مدل بهینه‌سازی غیرخطی و ازدحام ذرات برای بهره‌برداری تلفیقی از پساب و آب زیرزمینی در دشت ورامین

مریم یوسفی، محمد ابراهیم بنی حبیب[۱]*، جابر سلطانی و عباس روزبهانی

دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
yusefi@ut.ac.ir
دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
banihabib@ut.ac.ir
استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
Jsoltani@ut.ac.ir
استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
roozbahany@ut.ac.ir

چکیده

برای تأمین نظر همزمان کشاورزان، مدیران منابع آب و محیط‌زیست ضرورت دارد تهیه مدل بهینه‌سازی الگوی‌کشت با بهره‌برداری تلفیقی کمی- کیفی از پساب و آب زیرزمینی با سه هدف حداکثرسازی سود کشاورزان، کاهش آبشویی نیتروژن و بهبود تغذیه آبخوان مدنظر قرار گیرد. در این پژوهش، مدل به دو روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی غیرخطی و نیز با روش الگوریتم ازدحام ذرات برای شبکه آبیاری ورامین در سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ تهیه شد. نتایج حاصل از حل مدل سه هدفه در روش برنامه‌ریزی غیرخطی نشان داد که افزایش سود حاصله از بهینه‌سازی الگوی‌کشت، بهبود بهره‌وری مصرف آب و تغذیه آبخوان به ترتیب به میزان ۶٪ ، ۲۲٪ و ۲۹٪ منجر به کاهش برداشت تلفیقی از پساب و آب زیرزمینی و کاهش کود نیتروژن مصرفی به ترتیب به میزان ۱۳٪ و ۸۵٪ شده است. همچنین، حل مدل سه هدفه با الگوریتم هوش-جمعی نیز نشان دادکه با افزایش سودحاصله ازبهینه‌سازی الگوی‌کشت، بهبود بهره‌وری مصرف آب و تغذیه آبخوان به ترتیب به میزان ۷٪، ۴۹٪ و ۳۰٪ ، اهداف کاهش برداشت تلفیقی از پساب و آب زیرزمینی و کاهش کود مصرفی به ترتیب به میزان ۳۵٪ و ۸۸٪ محقق شده است. مقایسه نتایج مقادیر متناظر توابع هدف در سناریوهای مختلف در دو روش برنامه‌ریزی غیرخطی و ازدحام ذرات ، حاکی از اختلاف بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۱ درصد بین مقادیر حاصله از دو روش بود. لذا، الگوریتم فراکاوشی ازدحام ذرات با اختلاف بسیار کمی از روش برنامه‌ریزی غیرخطی، قابلیت زیادی را در ارائه پاسخ-های بهینه دارا است. نتایج این پژوهش می‌تواند در استفاده بهینه منابع آب، افزایش درآمد کشاورزان و کاهش آبشویی نیتروژن در سایر شبکه‌های آبیاری مورداستفاده قرار گیرد. اصولاً استفاده از پساب‌ها و فاضلاب‌ها در آبیاری محصولات خوراکی کشاورزی برای تغذیه انسان و دام توصیه نمی‌شود و رعایت کامل استانداردها و ضوابط در استفاده از پساب‌ها در کشاورزی، امری ضروری و لازم‌الاجرا است.

واژه‌های کلیدی: آب نامتعارف، آبشویی نیتروژن، تغذیه آبخوان، الگوریتم فراکاوشی.

---

۱ – آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.

*– دریافت: بهمن ۹۵ و پذیرش:خرداد ۹۶

Archive of SID

www.SID.ir

مقدمه

اکثر کشاورزان مقادیر بالای آب و نیتروژن را برای اطمینان از تامین نیاز گیاه استفاده می‌کنند و بدین ترتیب عناصر خاک در معرض آبشویی و انتقال به منابع آب زیرزمینی قرار می‌گیرند (راموس و همکاران،۲۰۱۲). از سوی دیگر، پژوهشگران متعددی به مزایای کاربرد پساب اشاره کرده‌اند، به عنوان مثال فتا (۲۰۰۵)، اورون (۲۰۰۷)، آسانو (۲۰۰۷) و قاسمی و همکاران (۱۳۹۰) گزارش کرده‌اند که کاربرد پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در آبیاری محصولات کشاورزی، مزایای متعددی از قبیل فراهم نمودن یک منبع آب ارزان و دائمی، کاهش هزینه‌های تصفیه، آزادسازی بخشی از منابع آب با کیفیت خوب برای سایر مصارف، کاهش میزان و هزینه‌های مصرف کودهای شیمیایی و کاهش اثرات نامطلوب ناشی از دفع پساب به منابع آبی را به همراه دارد.

استاندارد سازمان بهداشت جهانی[1] (۲۰۰٦) گزارش کرده است که نرخ آبیاری با فاضلاب معادل ۱/۵ مترمکعب بر مترمربع در سال، به میزان ۲۲۵ کیلوگرم نیتروژن برای هر هکتار زمین تحت آبیاری تأمین می‌گردد که در چنین شرایطی استفاده از کودهای آلی و شیمیایی، به حداقل رسیده یا به طور کامل برطرف می‌گردد. همچنین استاندارد آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (۱۹۹۷)بیان می‌دارد که از مهمترین منابع آلودگی به نیترات، استفاده از کودهای ازته است که در کشاورزی و برای حاصلخیزی زمین استفاده می‌شود. این کودها در اثر آبشویی می‌توانند آبهای زیرزمینی را آلوده سازند و باعث ایجاد عوارض و اثرات سوء بهداشتی در مصرف کننده شوند.در کاربرد پساب‌ها برای مصارف زراعی، توجه به خواص بهداشتی نظیر کلی‌فرم، فکال کلی‌فرم و تخم انگل‌های نماتودی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و از عوامل محدودیت‌زا در انتخاب الگوی‌کشت محسوب می‌شوند. لذا رعایت کامل استانداردها و ضوابط کاربرد پساب‌ها به لحاظ قابلیت استفاده از آن‌ها در کشاورزی، امری ضروری و لازم‌الاجرا است (شرکت مهندسین مشاور یکم، ۱۳۸۹).

در ارتباط با تغذیه منابع آب زیرزمینی، علیزاده و همکاران (۱۳۹۱) بهینه‌سازی الگوی کشت را با هدف تغذیه و تعادل بخشی آبخوان (مطالعه موردی دشت مشهد- چناران) انجام دادند. این بررسی، به دنبال تعیین الگوی کشت در دوره برنامه‌ریزی ۱۰ ساله با تأکید برعدم بیلان منفی ذخایر آب زیرزمینی و دستیابی به اهداف موردنظر بود. جوداوی و همکاران (۲۰۱۵) توسعه و کاربرد مدل بهینه‌سازی الگوی کشت و بهره‌برداری تلفیقی را با تأکید بر پارامترهای عدم قطعیت آبخوان، برای جلوگیری از فشار بر منابع آب زیرزمینی در دشت فیروزآباد فارس، تدوین کردند. نتایج نشان داد که الگوی کشت فعلی باید تغییر یابد و سطوح کشت برخی از محصولات به‌صورت قابل‌توجهی کاهش یابد.

سینگ (۲۰۰۱) یک مدل برنامه‌ریزی خطی را برای تعیین الگوی کشت بهینه برای بیشینه‌سازی سود خالص با توجه به میزان موجودیت آب، در منطقه‌ای در هند ارائه نمود. همچنین، خاره و همکاران (۲۰۰٦) یک مدل بهینه‌سازی خطی اقتصادی ـ مهندسی را برای بررسی امکان بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی با قیود مختلف مدیریتی و هیدرولوژیکی در اندونزی، تدوین نمودند. نتایج نشان داد گزینه بهره‌برداری تلفیقی می‌تواند سود کل فعالیت‌های کشاورزی را افزایش دهد. داویجانی و همکاران (۲۰۱۵) و (۲۰۱٦) مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای تخصیص منابع آب در منطقه خشک ایران برای بیشینه‌سازی اشتغال در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب را تدوین نمودند و برای حل آن از الگوریتم‌های فراکاوشی نظیر الگوریتم ازدحام ذرات استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با تخصیص بهینه منابع آب، میزان اشتغال و میزان درآمد خالص منطقه به ترتیب به میزان ۱۳ و ٥٤ درصد افزایش می‌یابد.

کارآموز و همکاران (۲۰۱۰) یک مدل الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی الگوی‌کشت با توجه به

[1] WHO

Archive of SID

www.SID.ir

اولویت‌های تخصیص منابع آب و موجودیت منابع آب سطحی و زیرزمینی را در هشت شبکه آبیاری در استان تهران، توسعه دادند. نتایج، نشان‌دهنده تغییرات آشکار در سطوح کشت محصولات مختلف برای دستیابی به حداکثر سود اقتصادی بود. همچنین، داس و همکاران (۲۰۱۵)، سیاست‌های تخصیص بهینه منابع آب و زمین را برای کشاورزی آبی پایدار در پروژه‌ای در کنار رودخانه ماهاندی در هند را با یک مدل برنامه‌ریزی خطی توسعه دادند. نتایج نشان می‌دهد که بهره‌برداری تلفیقی از ۸۷ درصد از آب سطحی و ۱۳ درصد آب زیرزمینی، سیاست تخصیص پایدار در منطقه است. خمیسی و همکاران (۲۰۱۳)، بهره‌برداری تلفیقی از پساب و آب زیرزمینی را در تناوب گیاهی بررسی نمودند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که استفاده از پساب در تلفیق با آب زیرزمینی در مناطق تحت آبیاری می‌تواند سطوح کشت محصولات را در مقابل استفاده تنها از پساب افزایش دهد.

سینگ (۲۰۱۲) مدل بهینه‌سازی خطی کمی- کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی برای بیشینه‌سازی سود خالص کشاورزی را در منطقه‌ای در هند بررسی نمود. توابع تولید در مدل برای برآورد عملکرد گیاه تحت شرایط مختلف شوری آب آبیاری توسعه یافت. نتایج مدل نشان داد که تحت شرایط استفاده بهینه از منابع آبوخاک، استفاده از آب زیرزمینی افزایش می‌یابد که در مقابل مشکلات غرقاب‌شدن و شوری در منطقه مطالعاتی کاهش می‌یابد. سینگ و پاندا (۲۰۱۳) یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی را در منطقه‌ای در هند توسعه دادند که منابع آبوخاک موجود را به‌ترتیبی تخصیص می‌دهد که سود خالص سالیانه با حذف مشکلات شوری بیشینه شود. سپس، یک مدل شبیه‌ساز آب زیرزمینی برای تعیین تاثیر بلندمدت استراتژی‌های مختلف مدیریت آب بر تراز سفره آب زیرزمینی با استفاده از نتایج مدل بهینه‌سازی، بکار گرفته شد. بر اساس نتایج مدل یک تغییر در الگوی کشت و همچنین افزایش برداشت از آب زیرزمینی باید مدنظر قرار گیرد.

یوسفی و همکاران (۱۳۹۵)، در پژوهشی مدل بهره‌برداری تلفیقی کمی- کیفی از پساب و آب زیرزمینی را برای بهینه‌سازی الگوی‌کشت در شبکه آبیاری ورامین به روش برنامه‌ریزی غیرخطی تدوین کردند. نتایج نشان‌دهنده بهبود سود خالص منطقه، کاهش کود مصرفی و افزایش تغذیه آبخوان به ترتیب به میزان ٦ ، ۷۱ و ۲۹ درصد نسبت به وضع موجود بود.

اینانلو و همکاران (۱۳۹۰)، حل مسائل چندهدفه مدیریت منابع آب با استفاده از ترکیب روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس[1]و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان-دهنده کاهش قابل توجه پیچیدگی‌های محاسباتی مدلهای بهینه‌سازی در حل مسئله چندهدفه بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن با لحاظ جنبه‌های زیست محیطی آن بوده است. رضایی و همکاران (۲۰۱٦)، ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات و سیستم استنتاج فازی را در مدیریت بهره‌برداری تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی در دشت نجف آباد توسعه دادند. مقایسه نتایج با دو روش معمول الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات حاکی از بهبود پاسخ‌های حاصله بود.

در کلیه مطالعات انجام شده تاکنون، مسئله بهینه‌سازی الگوی‌کشت با اهداف کمی نظیر افزایش سود یا کنترل بیلان آب زیرزمینی همراه بوده و اهداف کیفی تنها منوط به کنترل میزان شوری آب زیرزمینی می‌گردد، حال آنکه تاکنون مطالعاتی در خصوص کنترل میزان نیتروژن ورودی به محیط خاک و آبخوان، ناشی از مصرف پساب، آب زیرزمینی و کودهای ازته انجام نشده است؛ به عبارت دیگر در مسئله بهینه‌سازی الگوی‌کشت تنها دیدگاه اقتصادی و منابع آبی مدنظر قرار گرفته ولی دیدگاه زیست‌محیطی به لحاظ کنترل آبشویی نیتروژن مدنظر قرار نگرفته بود. تحقیق حاضر دارای دو هدف اصلی می باشد، هدف اول، توسعه و کاربرد مدل بهینه‌سازی سه هدفه الگوی‌کشت با بهره‌برداری تلفیقی کمی- کیفی از پساب و

[1]TOPSIS

Archive of SID

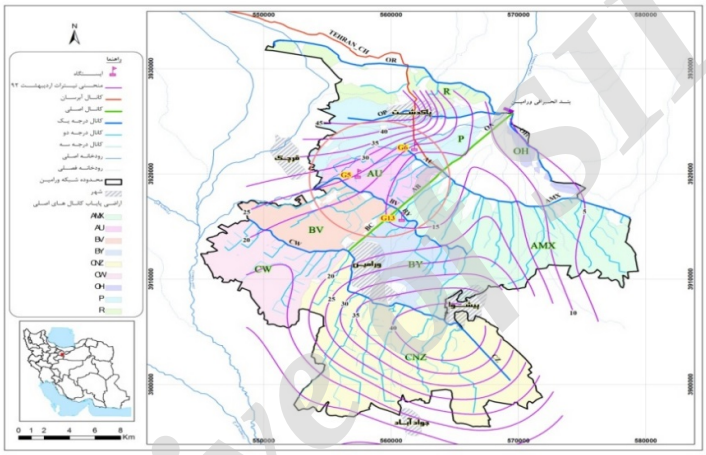
www.SID.ir

منابع آب زیرزمینی با اهداف حداکثرسازی سود حاصله از الگوی‌کشت، کاهش آبشویی نیتروژن و بهبود تغذیه آبخوان در شبکه‌های آبیاری و زهکشی و هدف دوم، مقایسه روشهای بهینه‌سازی کلاسیک برنامه‌ریزی غیرخطی و نوع تکاملی (الگوریتم ازدحام ذرات) می‌باشد.

مواد و روشها

منطقه مطالعاتی

دشت ورامین در بخش شمالی ایران و در دامنه جنوبی البرز، در حدود ٤٠ کیلومتری جنوب شرق استان تهران، واقع شده است. بارندگی در دشت بطور متوسط حدود ١٤٥ میلیمتر می‌باشد. شبکه آبیاری ورامین دارای مساحت ٥٢ هزار هکتار می‌باشد که دارای یک کانال اصلی به نامOABC بوده که نه کانال درجه دو در نقاط O,A,B,C از آن منشعب می‌شوند. در این پژوهش اراضی تحت پوشش کانال درجه دوAU به مساحت ٣٠٥٣ هکتار در نظرگرفته شده است. جانمایی شبکه آبیاری ورامین و موقعیت کانالها در شکل ١ نشان داده شده است.



شکل١- نقشه جانمایی شبکه آبیاری ورامین و موقعیت محدوده مطالعاتی (شرکت مهندسان مشاور مهارآب عمران گستر، ١٣٩٣)

جدول ١- آمار تامین آب اراضی پایاب کانال AU در سال آبی ٩١-٩٢ (میلیون مترمکعب)*

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	جمع
چاه	١/٣	١/٣	١/٣	٠/٨	٠/٨	٠/٨	١/٩	١/٩	١/٩	١/٩	١/٩	١/٩	١٨
پساب	٠/٤	٠/٢٨	٠/٥٣	٠/٢	٠/٤٦	٠/٤٣	١/١٤	١/٥٤	٠/٥	٠/٦	٠/٤٨	٠/٦٣	٧/٣
جمع	١/٧	١/٥٨٣	١/٨٣٢	٠/٩	١/٢٦	١/٢٣	٣/٠٤	٣/٤٤	٢/٤	٢/٥	٢/٣٨	٢/٥٣	٢٥

*(آمار شرکت مهندسان مشاور مهار آب عمران گستر، ١٣٩٣)

منابع آب شبکه ورامین

آمار منابع تامین کننده آب اراضی تحت پوشش کانال AU در سال آبی ٩١-٩٢، در جدول ١ ارائه شده است.اطلاعات تفصیلی در خصوص چگونگی برآورد نیاز آبی، نیاز کودی و میزان عملکرد گیاهان در شبکه آبیاری ورامین در تحقیق یوسفی و همکاران (٢٠١٦)، ارائه شده است. همچنین نتایج آزمایشات نیتروژن خاک، پساب و آب زیرزمینی در شبکه آبیاری ورامین در تحقیق یوسفی و همکاران (١٣٩٥) ارائه شده است.

مدل بهینه‌سازی تلفیقی کمی-کیفی پساب و آب زیرزمینی

مدل بهینه‌سازی تلفیقی کمی-کیفی پساب و آب زیرزمینی با سه تابع هدف، تدوین شده است. تابع هدف

Archive of SID

www.SID.ir

اول، دیدگاه اقتصادی بهره‌برداری از شبکه را نشان می‌دهد، در این دیدگاه تحصیل درآمد بیشتر با افزایش سطوح کشت، مطلوبیت دارد. تابع هدف دوم، دیدگاه زیست محیطی بهره‌برداری از شبکه است، این تابع هدف، میزان آبشویی نیتروژن کل به محیط خاک و آبخوان را کاهش می‌دهد. تابع هدف سوم، دیدگاه مدیریت منابع آب در بهره‌برداری از شبکه می‌باشد، این تابع هدف، وضعیت تغذیه و بیلان آبخوان را بهبود می‌بخشد. توابع هدف و محدودیت‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

توابع هدف

تابع هدف اول (رابطه ۱)، بهینه‌سازی سود حاصل از الگوی‌کشت می‌باشد. در این تابع هدف، سود ناخالص حاصل از عملکرد محصولات از هزینه‌های برداشت از پساب و آب زیرزمینی و همچنین هزینه‌های کشت و کود مصرفی، کسر شده تا سود خالص حاصل از مساحت کشت بدست آید. هزینه‌های کود مصرفی نیز مشتمل بر تامین کمبود نیاز کود ازته گیاه از میزان نیتروژنی است که بصورت بالقوه توسط نیتروژن پساب و نیترات آب زیرزمینی و نیتروژن اولیه خاک در اختیار گیاه قرارگرفته است.

Max:

$$Z_1 = \sum_{j=1}^{5} NR_j.A_j - CCW\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} VCW_{ij} - CGW\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} VGW_{ij} - t\left[\left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TC_{ij}\right)(\mathrm{A_j}) - \left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TN_{ij}\left(VCW_{ij}\right) + \sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} Tk_{ij}\left(VGW_{ij}\right) + \left(\sum_{j=1}^{5} TM_j\right)(A_j) + \left(\sum_{j=1}^{5} OM_j\right)(A_j)\right)\right] \quad (۱)$$

در این رابطه:

I شاخص ماه،j شاخص نوع گیاه، Z_1 سود خالص حاصل از منطقه(IR)، IR واحد پول، A_j مساحت تحت کشت محصول j(ha)، NR_j سود خالص گیاه jام (IR/ha)، TC_{ij} نیاز کودی ماهانه گیاهان (kg/ha)، TN_{ij} غلظت نیتروژن کل پساب (ppm)، Tk_{ij} غلظت نیترات آب زیرزمینی (ppm)، TM_{ij} نیتروژن کل خاک در ابتدای فصل کشت(kg/ha)، OM_{ij} ماده آلی خاک در ابتدای فصل کشت (kg/ha)، VCW_i حجم پساب که برای آبیاری در ماه iام به کار می‌رود(MCM، CCW) هزینه یک واحد آب کانال (پساب)(IR)، VGW_i حجم آب زیرزمینی که برای آبیاری در ماهiام به کار می‌رود(MCM، CGW) هزینه یک واحد آب زیرزمینی (IR)، t هزینه یک کیلوگرم کود مصرفی(IR).

تابع هدف دوم (رابطه ۲)، در خصوص حداقل‌سازی میزان آبشویی نیتروژن کل به محیط خاک و آبخوان می‌باشد. بدین ترتیب که کسر مقادیر نیتروژن ورودی به خاک از خروجی آن، می‌بایست کمینه گردد:

Min:

$$Z_2 = \left[\left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TN_{ij}\left(VCW_{ij}\right) + \sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} Tk_{ij}\left(VGW_{ij}\right) + \left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TF_{ij}\right)(\mathrm{A_j}) + \left(\sum_{j=1}^{5} TM_j\right)(A_j) + \left(\sum_{j=1}^{5} OM_j\right)(A_j)\right] - \left[\left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TC_{ij}\right)(\mathrm{A_j}) + \left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TD_{ij}\right)(\mathrm{A_j}) + \left(\sum_{j=1}^{5} TR_j\right)(A_j)\right] \quad (۲)$$

در این رابطه:

Z_2 میزان تلفات آبشویی ازت (kg/ha)، TF_{ij} کود داده شده به گیاه (kg/ha)، TD_{ij} دینیتریفیکاسیون نیتروژن در خاک (kg/ha)، TR_{ij} نیتروژن باقیمانده در خاک در انتهای فصل کشت (kg/ha).

مقدار دنیتریفیکاسیون از (TD_{ij}) رابطه شماره ۳ محاسبه می‌گردد (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۲):

$$\left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TD_{ij}\right) = \left[\left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TT_{ij}\left(VCW_{ij}\right) + \sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} Tk_{ij}\left(VGW_{ij}\right) + \left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TF_{ij}\right)(\mathrm{A_j})\right] * \left(1-\exp^{(-0.01\times\Delta t)}\right) \quad (۳)$$

در این رابطه، TT_{ij} غلظت نیترات پساب (ppm)، ۳۰Δt روز.

تابع هدف سوم (معادله شماره ٤)، در خصوص بهبود وضعیت تغذیه آبخوان می‌باشد. بدین ترتیب که کسر میزان تغذیه آبخوان ناشی از نفوذ عمقی حاصل از آب سطحی و زیرزمینی به انضمام تغذیه ناشی از بارندگی از میزان برداشت از آبخوان، بیشینه گردد.

Archive of SID

www.SID.ir

Max:

$$Z_3 = RAL\sum_{i=1}^{12}(VCW_i + VGW_i) + RRF\sum_{i=1}^{12} RF_i . A_i - \sum_{i=1}^{12} VGW_i \quad (٤)$$

در این رابطه:

Z_3 میزان تغذیه آبخوان (MCM)، RAL=۰/۳۷٤ضریب تغذیه برای تلفات آب کاربردی، RRF=۰/۱۳ ضریب تغذیه برای بارندگی، RF_i بارش در ماه (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۹۲).

تابع سه هدفه وزنی

برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه از روش جمع وزنی استفاده شد. فرم کلی تابع سه هدفه وزنی نرمال شده مطابق با رابطه شماره ۵ می‌باشد.

$$\text{MIN: } Z = -W_1Z_1 + W_2Z_2 - W_3Z_3 \quad (٥)$$

در این رابطه:

W_3, W_2, W_1 وزن‌های توابع هدف.مدل سه هدفه وزنی با لحاظ وزن‌های (۰/۳۳۳و ۳۳۳/و۰/۳۳۳) و (۰/۲۵و ۰/۲۵و۰/۵) و (۰/۲۵و ۰/۵و۰/۵)و (۰/۵و ۰/۲۵و۰/۲۵)و (۰/۵و ۰/۵و۰/۵) ترتیب برای اهداف افزایش درآمدزایی، کاهش آبشویی و افزایش تغذیه آبخوان، اجراء گردید، در این پژوهش به منظور عدم ارجحیت یک هدف بر اهداف دیگر، از نتایج وزنهای مساوی استفاده گردیده است.

محدودیت‌ها (قیود)

محدودیت نیاز کودی گیاه (رابطه ٦) که این محدودیت بیان می‌کند، نیاز کود نیتروژنه گیاهان بطور کامل از تلفیق پتانسیل کودی پساب و آب زیرزمینی، کود داده شده به زمین و مقادیر نیتروژن و ماده آلی اولیه خاک، قابل تامین باشد.

$$\left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TC_{ij}\right)(\mathrm{A_j}) \le \left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TN_{ij}\left(VCW_{ij}\right)\right) + \sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} Tk_{ij}\left(VGW_{ij}\right) + \left(\sum_{i=1}^{12}\sum_{j=1}^{5} TF_{ij}\right)(\mathrm{A_j}) + \left(\sum_{j=1}^{5} TM_j\right)(A_j) + \left(\sum_{j=1}^{5} OM_j\right)(A_j)) \quad (٦)$$

محدودیت سطوح زیرکشت (رابطه ۷) که مجموع سطوح زیرکشت محصولات در شبکه آبیاری ورامین می‌بایست کوچکتر مساوی مساحت تحت کشت منطقه باشد.

$$\sum_{j=1}^{5} \mathrm{A_{ij}} \le \mathrm{TA_j} \forall i \quad (٧)$$

در این رابطه، $\mathrm{TA_j}$ مساحت کل کشت.

محدودیت نیاز آبی گیاهان (رابطه ۸) که بیان می‌کند، نیاز آبی گیاهان تحت‌کشت می‌بایست ماهانه بطور کامل از پساب در تلفیق با آب زیرزمینی پوشش داده شود.

$$\sum_{j=1}^{5} \mathrm{GIR_i} . \mathrm{A_i} - \sum_{j=1}^{5} \mathrm{VGW_i} - \sum_{j=1}^{5} \mathrm{VCW_i} = 0; \quad \forall i \quad (٨)$$

در این رابطه، $\mathrm{GIR_i}$ نیاز ناخالص ماهانه گیاه. لازم به ذکر است که راندمان کل آبیاری سطحی در اراضی منطقه مورد مطالعه، ۵۱ درصد در نظر گرفته شده است (شرکت مهندسان مشاور مهار آب عمران گستر، ۱۳۹۳).

محدودیت برداشت از پساب (رابطه ۹) که با اعمال این محدودیت، میزان برداشت از پساب، حداکثر به میزان موجودیت پساب در کانال در آن ماه محدود می‌شود.

$$\mathrm{VCW_i} <= \mathrm{AVCW_i} \forall i \quad (٩)$$

در این رابطه:

$\mathrm{AVCW_i}$ میزان موجودیت پساب در ماه i (MCM).

محدودیت برداشت از آب زیرزمینی (رابطه ۱۰) که با اعمال این محدودیت، میزان برداشت از آب زیرزمینی، حداکثر به میزان پتانسیل برداشت از آب زیرزمینی در آن ماه محدود می‌گردد.

$$\mathrm{VGW_i} <= \mathrm{AVGW_i} \forall i \quad (١٠)$$

در این رابطه:

$\mathrm{AVGW_i}$ میزان موجودیت آب زیرزمینی در ماهi(MCM)

محدودیت تغییرات سطوح زیرکشت محصولات (رابطه ۱۱) که بیانگر بازه تغییرات سطوح کشت محصولات، براساس پتانسیل تولید منطقه طی سال‌های خشکسالی و پرآبی ۱۰ ساله منطقه بین مقدار صفر تا حداکثر می‌باشد.

$$0 \le \mathrm{A_j} \le \mathrm{TA_{jmax}} \quad (١١)$$

در این رابطه:

$\mathrm{TA_{jmax}}$ بیشینه مساحت کشت محصول در دوره ۱۰ ساله.

Archive of SID

www.SID.ir

متغیر تصمیم

متغیرهای تصمیم مشتمل بر سطوح کشت محصولات، میزان تخصیص از پساب و آب زیرزمینی و همچنین مقادیر کود داده شده به گیاه بصورت ماهانه و سالانه محاسبه شده است.

سناریوهای پیشنهادی

در این تحقیق، ۵ سناریو در نظر گرفته شد که در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- سناریوهای مورد مطالعه در مدل بهینه‌سازی

سناریوی ۰(وضع موجود)	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳	سناریوی ۴
لحاظ وضعیت فعلی منطقه	تابع هدف Z_1	تابع هدف Z_2	تابع هدف Z_3	توابع هدف Z_1, Z_2, Z_3

روش حل مدل بهینه‌سازی

با توجه به اهداف تحقیق، بخش بهینه‌سازی براساس روشهای برنامه‌ریزی غیرخطی و ازدحام ذرات تهیه شده است. لازم به ذکر است که بهینه‌سازی برنامه‌ریزی غیرخطی به روش گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته[1] و با استفاده ازسالور اکسل[2] و برای الگوریتم ازدحام ذرات در محیط متلب[3] انجام شده است.

الگوریتم ازدحام ذرات (الگوریتم PSO)

الگوریتم ازدحام ذرات شبیه‌سازی یک رفتار دسته‌جمعی است که ایده اصلی آن از نحوه حرکت دسته پرنده‌ها وماهیان نشات گرفته است. این الگوریتم مانند سایر تکنیکهای محاسباتی تکاملی، از یک جمعیت که شامل راه‌حل‌های بالقوه مسئله تحت بررسی است، جهت اکتشاف در فضای جستجو استفاده می‌کند. ایده اصلی در این الگوریتم اینست که در هر دسته از موجودات فوق، هر عضو می‌تواند از مشاهدات و تجربیات تمام اعضا در حین جستجو برای رسیدن به هدف سود جوید. در این روش هر ذره دارای یک بردار سرعت می‌باشد که مسئول تغییردادن موقعیت آن ذره به منظور اکتشاف در بین جوابهای موجود است.

اگر فضای جستجو، یک فضای D بعدی از جمعیت باشد ذره I از جمعیت با بردار D بعدی $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$، سرعت $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ بهترین مکان دیده شده تا بحال توسط ذره i بصورت $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ و بهترین ذره در کل جمعیت با اندیس g نشان داده می‌شود. جمعیت ذرات مطابق با دو معادله ذیل به حرکت واداشته می‌شوند(ابرت و شای، ۱۹۹۸).

$$V_{id}^{n+1} = X(wv_{id}^{n} + c_1 r_1^{n}(P_{id}^{n} - x_{id}^{n}) + c_2 r_2^{n}(P_{pg}^{n} - x_{id}^{n})) \quad (۱۲)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^{n} + v_{id}^{n+1} \quad (۱۳)$$

که در این روابط:

d=1,2,…D و i=1,2,…N و N برابر با اندازه جمعیت، n شماره تکرار، w وزن اینرسی، c2,c1 دو ثابت مثبت بنامهای ضرایب شناخت و اجتماعی، X فاکتور انقباض (می‌تواند مانند w برای محدود کردن سرعت بکار رود) و r2,r1 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت بین [0,1] می‌باشند. در نسخه R2015a نرم‌افزار متلب، کد الگوریتم ازدحام ذرات اضافه گردیده لذا برای حل مدل از این کد موجود استفاده گردید.

نتایج و بحث

مقادیر متغیرهای تصمیم در وضع موجود در جدول ۳ ارائه شده همچنین با حل مدل بهینه‌سازی تک هدفه و سه هدفه با استفاده از دو روش برنامه‌ریزی

[1] Generalized Reduced Gradient (GRG2)
[2] Excell Solver
[3] MATLAB

Archive of SID

www.SID.ir

غیرخطی و الگوریتم ازدحام ذرات، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم و توابع هدف در جدول ٤ ارائه شده است:

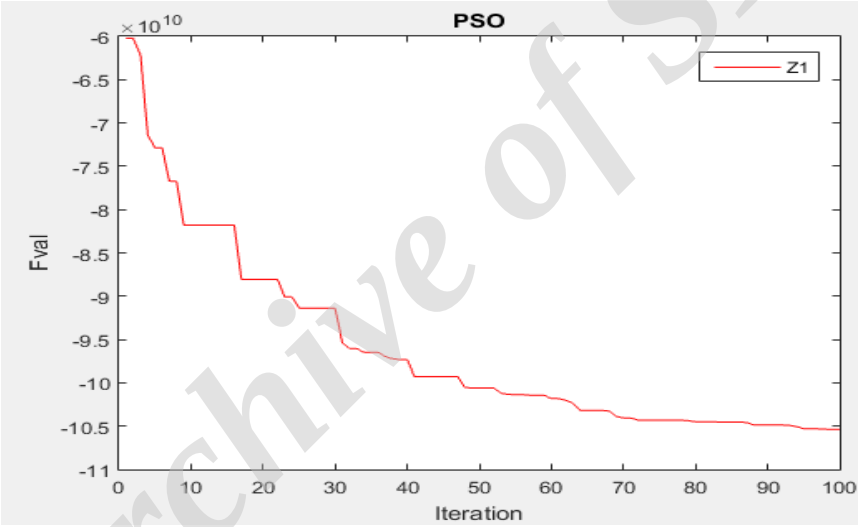
جدول ۳- مقادیر متغیرهای تصمیم در وضع موجود

سناریوی صفر (وضع موجود)	A(ha)	VCW(MCM)	VGW(MCM)	TF(kg/ha)
	۲۱۲۰	۷/۲۶۴	۱۷/۷	۷۵۰

جدول ۴- نتایج بهینه‌سازی مدل در روش های برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم ازدحام ذرات

مقادیر متغیرهای تصمیم و توابع هدف در بهینه‌سازی

سناریو	NLP					PSO				
	A(ha)	VCW (MCM	VGW (MCM	TF (kg/h)	OF1	A(ha)	VCW (MCM	VGW (MCM	TF (kg/ha)	OF
سناریو ۱	۱۶۳۶	۶/۴۰	۱۷/۷	-	۹۷۲۶۳۴۱۰۰۰۷	۱۴۹۶	۶/۵۹	۱۶/۰۱	-	۹۷۰۶۷۲۸۳۶۲۲
سناریو ۲	۱۰۶۴	۰/۶	۱۵/۷۱	۴۰	۴۹۱۸۰۴	۱۰۳۳	۱/۷۷	۹/۰۶	۶۵	۴۹۸۴۲۰
سناریو ۳	۵۳۲	۵/۹۲	۰/۱۷	-	۲۷۶۳۹۲۱	۵۵۲	۷/۲۶	۰	-	۲۷۸۲۰۳۷
سناریو ۴	۱۶۵۱	۵/۹۲	۱۶/۱	۲۲۰	۱/۴۴	۱۶۰۰	۴/۶۲	۱۱/۶۴	۸۷	۱/۴۷



شکل ۲- همگرایی تابع Z1 در الگوریتم ازدحام ذرات

[1]Objective Function(OF)

Archive of SID

www.SID.ir

ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی

در رسیدن به بهترین جواب سراسری، روش برنامه‌ریزی غیرخطی بسیار سریع و الگوریتم ازدحام ذرات علی رغم اتکا به الگوریتم فراکاوشی، با سرعت مناسبی عمل کرده است. روش غیرخطی علی‌رغم دارا بودن سرعت بالا در هر اجراء جوابهای ناشی از آن تقریباً یکی هستند و در همان ۱۰۰ تکرار نخست در زمان ۱۰۰ ثانیه به جواب بهینه دست می‌یابد. در روش الگوریتم ازدحام ذرات بعد از حدود ۱۰۰ تکرار در زمان چند دقیقه، الگوریتم به همگرایی می‌رسد و اختلاف پاسخهای نهایی بسیار ناچیز است. با افزودن بر تعداد جمعیت و تعداد تکرار، زمان بیشتری برای همگرایی نیاز خواهد بود. در شکل ۲ نحوه عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات در تکرارهای مختلف نشان داده شده است. درالگوریتم ازدحام ذرات، تعداد جمعیت ۱۰۰، c_1= ۰/۵ =c_2 ۰/۵، w_{min}=۰/۱،X=۱ و w_{max}= ۱.۱ تعیین شد. پارامترهای به کار رفته در الگوریتم، از مقادیر پیشنهادی در منابع علمی مرتبط اقتباس گردید (مقدسی و همکاران، ۱۳۸۷ و جانگاردی و ناقش کومار، ۲۰۱۰). همچنین مقدار ضریب جریمه (10E7)، به محدودیتها اضافه گردید.

مقایسه نتایج مقادیر متناظر توابع هدف در سناریوهای مختلف در دو روش برنامه‌ریزی غیرخطی و ازدحام ذرات، حاکی از اختلاف بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۱ درصد بین مقادیر حاصله از دو روش بود. این نتیجه موید این مطلب است که الگوریتم ازدحام ذرات با اختلاف بسیار کمی از روش برنامه‌ریزی غیرخطی، قابلیت زیادی را در ارائه پاسخ‌های بهینه دارا می‌باشد. نتایج مقایسه دو روش فوق با نتایج پژوهش فلاح و حداد (۱۳۹۰) و همچنین مقدسی و همکاران (۱۳۸۷)، هم‌خوانی دارد. در پژوهش فلاح و حداد (۱۳۹۰)، مدیریت بهره‌برداری بهینه از مخازن با روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم ازدحام ذرات بررسی شد. مقایسه نتایج نشان داد جوابهای الگوریتم ازدحام ذرات با متوسط ۰/۳ درصد اختلاف با روش برنامه‌ریزی غیرخطی، قابلیت زیادی در ارائه جوابهای بهینه دارد. همچنین در پژوهش مقدسی و همکاران (۱۳۸۷)، موضوع حداکثرسازی درآمد در خشکسالی با سه روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی غیرخطی، روش الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات انجام شد. نتایج نشان دهنده، برتری روش غیرخطی، سپس الگوریتم ازدحام ذرات و در نهایت الگوریتم ژنتیک بود.

براساس نتایج حاصله، مقدار سطوح بهینه کشت در تمامی سناریوها در دو روش، نسبت به وضع موجود کاهش یافته است، از دلایل کاهش سطوح کشت، می‌توان به رعایت برداشت مجاز از پساب و آب زیرزمینی، رعایت حدود مجاز تغییرات سطوح کشت، کاهش میزان آبشویی نیتروژن کل و بهبود تغذیه آبخوان اشاره کرد. این کاهش در سناریوهای۲و ۳ بیش از ۵۰ درصد بوده است که دو عامل، کاهش میزان آبشویی نیتروژن کل و بهبود تغذیه آبخوان، نقش اساسی‌تری در کاهش سطوح فوق داشته‌اند. مقادیر سطوح تحت کشت در دو روش بهینه‌سازی، تفاوت قابل‌توجهی نداشته است این در حالیست که درصد کشت محصولات مختلف، گاهاً تغییرات قابل توجهی داشته است، به عنوان مثال درصد کشت محصول یونجه در سناریوهای ۱،۲ و ٤ به دلیل دارا بودن بالاترین درآمد در روش برنامه‌ریزی غیرخطی، بیشترین مقدار بوده که در روش ازدحام ذرات، درصد صیفی‌جات در سناریوهای ۱، ۲ و ٤ افزایش یافته است. از دلایل اصلی افزایش سطوح محصول یونجه می‌توان به درآمدزایی بالای گیاه یونجه و همچنین نیاز کود ازته پایین‌تر محصول یونجه در میان کشت‌های بهاره اشاره نمود. همچنین از دلایل افزایش سطوح صیفی‌جات می‌توان به نیاز آبی بسیار پایین‌تر این محصول نسبت به گیاه یونجه نام برد.

مقایسه وضعیت سناریوهای مختلف در دو روش برنامه‌ریزی غیرخطی و ازدحام ذرات با وضع موجود در شاخص‌های مساحت کل کشت، سطوح کشت گیاهان، مقادیر برداشت از آب سطحی و زیرزمینی، کود مصرفی، بهبود تغذیه آبخوان، کاهش آبشویی نیتروژن،

Archive of SID

www.SID.ir

سود خالص کل و بهره‌وری مصرف آب[1] در اشکال ۳ و ٤ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که شاخص به نسبت مقدار متغیرهای محاسباتی (مساحت کل کشت، سطوح کشت گیاهان، کود مصرفی و ...) به مقدار آن متغیر در وضع موجود، اطلاق می‌شود.

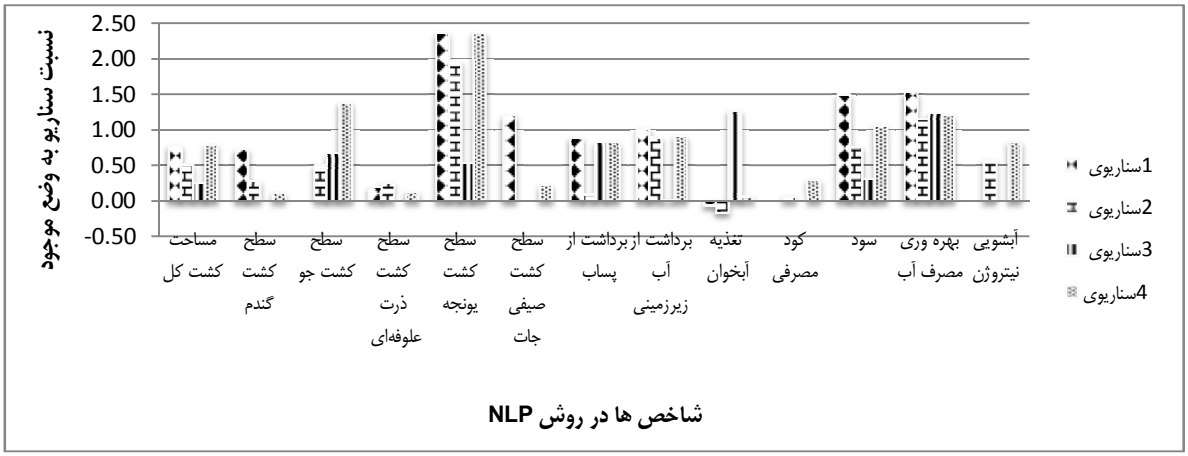
در شاخص برداشت از پساب، مدل میزان تامین آب از پساب را در تمامی سناریوها در دو روش نسبت به وضع موجود، به جز سناریوی ۳ در روش ازدحام ذرات، کاهش داده است، این کاهش برداشت به دلیل رعایت حد برداشت مجاز از پساب و متعاقباً کاهش تلفات آبشویی نیتروژن کل می‌باشد. در سناریوی ۳ مدل با حداکثر برداشت از پساب، مبادرت به کاهش برداشت از آب زیرزمینی و متعاقباً افزایش تغذیه آبخوان می‌کند. در شاخص برداشت از آب زیرزمینی، در تمامی سناریوها میزان برداشت در روش ازدحام ذرات کمتر از روش برنامه‌ریزی غیرخطی می‌باشد. این در حالیست که در سناریوی ۳ که هدف بهبود وضعیت تغذیه آبخوان می‌باشد، تقریباً از آب زیرزمینی برداشت نمی‌شود، مدل با حذف برداشت از آبخوان، به بهبود وضعیت بیلان آبخوان که در حال حاضر منفی است، کمک می‌کند. شایان ذکر است که میزان تغذیه براساس شاخص تغذیه آبخوان در تمامی سناریوها در روش ازدحام ذرات نسبت به روش برنامه‌ریزی غیرخطی، افزایش یافته است.

شاخص کود مصرفی، یکی از شاخص‌های مهم در این پژوهش می‌باشد. در تمامی سناریوها در دو روش، میزان کود موردنیاز نسبت به وضع موجود کاهش قابل توجه یافته است. در سناریوی ٤ با انتخاب ترکیب کشت بهینه در شرایط تامین توامان سه هدف، می‌توان از پتانسیل کودی پساب و آب زیرزمینی بهره جست که این امر منجر به کاهش مصرف کود ازته به میزان ۷۱ درصد در روش برنامه‌ریزی غیرخطی و به میزان ۸۸ درصد در روش ازدحام ذرات می‌گردد. در شاخص آبشویی نیتروژن نیز تفاوت قابل توجهی بین روش برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم ازدحام ذرات در سناریوهای مختلف وجود ندارد. در شاخص‌های سود و بهره‌وری مصرف آب، در تمام سناریوها در دو روش، میزان بهره‌وری آب بالاتر از وضع موجود است و تنها در سناریوی ۳ روش ازدحام ذرات، کاهش یافته است. سناریوی ۱ در دو روش دارای بالاترین میزان سود و بهره‌وری آب می‌باشد که نشان‌دهنده بالاترین سود خالص حاصله در مقابل واحد آب مصرفی در بین سناریوهای مختلف می‌باشد که به دلیل انتخاب الگوی‌کشت با تراکم کشت بالای محصولات سودآورتر می‌باشد. در سناریوهای ۲ و ۳ در دو روش، میزان سودآوری طرح کاهش یافته که بعلت کاهش قابل توجه در سطوح تحت کشت به دلیل اعمال اهداف کاهش میزان آبشویی نیتروژن و افزایش تغذیه آبخوان، حادث می‌گردد. در سناریوی ٤ در هر دو روش، شاخص بهره‌وری مصرف آب و همچنین میزان سود شبکه نسبت به وضع موجود افزایش یافته است. بطورکلی نزدیکی نتایج مقادیر متناظر توابع هدف در دو روش، حاکی از کارایی قابل‌توجه الگوریتم ازدحام ذرات در حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی می‌باشد.

[1] میزان سود محصول به ازاء واحد آب مصرفی می‌باشد که از تقسیم سود (برحسب ریال) بر حجم آب مصرفی (برحسب مترمکعب) بدست می‌آید.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۳ - نمایش شاخص‌های سناریوها در روشNLP

شکل ۴- نمایش شاخص‌های سناریوها در روش PSO

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

نتایج حاصل از حل مدل بهینه‌سازی سه هدفه بهره‌برداری تلفیقی کمی- کیفی از پساب و آب زیرزمینی نشان داد که با تغییر در الگوی‌کشت و تلفیق بهینه پساب و آب زیرزمینی، می توان ضمن استفاده موثر از پتانسیل کودی پساب و آب زیرزمینی، میزان آبشویی نیتروژن را به محیط خاک و آبخوان، کاهش داده و همچنین بیلان آبخوان را بهبود بخشید. علاوه بر آن، سود خالص حاصل از محصولات کشاورزی و نیز میزان بهره‌وری مصرف آب را افزایش داد. به منظور بررسی گزینه‌های مختلف بهره‌برداری تلفیقی، سناریوهای مختلفی با استفاده از روشهای برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم ازدحام ذرات، مورد مطالعه قرار گرفت. حل مدل سه هدفه در روش برنامه‌ریزی غیرخطی با افزایش سود حاصله از بهینه‌سازی الگوی‌کشت، بهبود بهره‌وری مصرف آب و تغذیه آبخوان به ترتیب به میزان ٦، ۲۲ و ۲۹ درصد منجر به کاهش برداشت تلفیقی از پساب و آب زیرزمینی و کاهش کود ازته مصرفی به ترتیب به میزان ۱۳ و ۸۵ درصد شده است. همچنین در الگوریتم ازدحام ذرات نیز، مدل سه هدفه با افزایش سود حاصله از بهینه‌سازی الگوی‌کشت، بهبود بهره‌وری مصرف آب و تغذیه آبخوان به ترتیب به میزان ۷، ٤۹ و ۳۰ درصد، اهداف کاهش برداشت تلفیقی از پساب و آب زیرزمینی و کاهش کود مصرفی را به ترتیب به میزان ۳۵ و ۸۸ درصد محقق گردانیده است. همچنین اختلاف کم در حدود ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۱ درصد بین نتایج مقادیر متناظر توابع هدف در سناریوهای مختلف در دو روش برنامه‌ریزی غیرخطی و ازدحام ذرات، حاکی از قابلیت زیاد الگوریتم فراکاوشی ازدحام ذرات، در یافتن

Archive of SID

www.SID.ir

پاسخ‌های بهینه بود. مدیریت یکپارچه کمی- کیفی منابع آب آبیاری و پساب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی به لحاظ کنترل اثرات زیست محیطی آبشویی نیتروژن به محیط خاک و آبخوان، مسئله‌ای مهم و حائزاهمیت است و مدلهای سه هدفه پیشنهادی این تحقیق می‌تواند در بهبود کارکردهای بخش‌های سه گانه کشاورزی، محیط زیست و منابع آب در سایر شبکه‌های آبیاری و زهکشی مورد استفاده قرار گیرد. اصولاً استفاده از پساب‌ها و فاضلاب‌ها در آبیاری محصولات خوراکی کشاورزی برای تغذیه انسان و دام به دلیل احتمال وجود فلزات سنگین و برخی از میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا نظیر انواع کلی‌فرم، فکال کلی‌فرم و تخم انگل‌های نماتودی قابل توصیه نیست و استفاده از پساب‌ها باید با رعایت کامل استانداردهای کاربرد پساب در اراضی کشاورزی به‌گونه‌ای صورت پذیرد که هم از فواید کاربرد پساب‌ها بهره جست و هم خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی ناشی از مصرف پساب‌ها را به حداقل، کاهش داد.

فهرست منابع

۱. اینانلو، ب.، ب. زهرایی. و ع. روزبهانی. ۱۳۹۰. حل مسائل چندهدفه مدیریت منابع آب با استفاده از ترکیب روش تصمیم گیری چندمعیاره TOPSIS و الگوریتم بهینه‌سازیPSO. پنجمین همایش ملی مهندسی محیط زیست.

۲. بنی‌حبیب، م. ا.، م. حسین‌زاده. و م. اولاد قره‌گوز. ۱۳۹٤. تدوین مدل برنامه‌ریزی غیرخطی تخصیص آب و الگوی‌کشت در شرایط کم‌آبیاری (بررسی موردی: استان‌های تهران و البرز). پژوهش آب ایران. جلد ۹، شماره ٤، صفحه ۱۳۹-۱٤۳.

۳. سلطانی، ا.، ا. سلطانی، ا. زینلی. و ع. دستمالچی. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی تلفات نیتروژن از مزارع گندم با استفاده از مدل CropSyst در گرگان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد بیستم، شماره چهارم.

٤. شرکت مهندسان مشاور مهارآب عمران گستر، ۱۳۹۳. گزارش مطالعات بازنگری و علاج بخشی شبکه آبیاری و زهکشی دشت ورامین.

۵. شرکت مهندسین مشاور یکم، ۱۳۹۲. مطالعات کیفی و آلودگی محدوده مطالعاتی ورامین. گزارش تجزیه و تحلیل داده‌های آلودگی منابع آب.

٦. علیزاده، ا.، ن. مجیدی.، م. قربانی. و ف. محمدیان. ۱۳۹۱. بهینه‌سازی الگوی کشت با هدف تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت مشهد-چناران). آبیاری و زهکشی ایران، جلد ٦، شماره ۱.

۷. فلاح مهدی‌پور ا.، ا. بزرگ حداد. ۱۳۹۰. بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدهای چندمنظوره با کاربرد روش بهینه‌سازی مجموعه ذرات. آب و فاضلاب، شماره ٤، سال ۱۳۹۱، صفحه ۱۰۵-۹۷.

۸. قاسمی، س.ع.، ش. دانش، ا. علیزاده. ۱۳۹۰. ارزیابی پتانسیل تأمین آب آبیاری و ارزش کودی پساب تصفیه-خانه‌های فاضلاب شهری، آب و خاک. جلد ۲۵، شماره ۵، ۱۱۸۳-۱۱۷۲.

۹. مقدسی، م.، س. مرید. و ش. عراقی نژاد. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی تخصیص آب در شرایط کم آبی با استفاده از روشهای برنامه‌ریزی غیرخطی، هوش‌جمعی والگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی). تحقیقات منابع آب ایران، سال چهارم، شماره ۳.

۱۰. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، دفتر نظام فنی اجرایی، شرکت مهندسین مشاور یکم، ۱۳۸۹. ضوابط زیست‌محیطی استفاده مجدد از آب‌های برگشتی و پساب‌ها، نشریه شماره ۵۳۵ .

Archive of SID

www.SID.ir

۱۱. یوسفی، م.، ج. سلطانی، م. ا. بنی حبیب، ع. رحیمی‌خوب، ع. روزبهانی. و سلطانی، ا. توسعه مدل بهینه‌سازی چند هدفه بهره‌برداری تلفیقی پساب و آب زیرزمینی (مطالعه موردی- شبکه آبیاری ورامین). ۱۳۹۵. پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۳۰، شماره ۴، صفحه ۵۶۷-۵۵۵.

12. Asano. T. 2007. Water reuse: issues, technologies, and applications. McGraw-Hill Professional.
13. Das, B., A.Singh., S.N.Panda., and H. Yasuda. 2015. Optimal land and water allocation policies for sustainable irrigated agriculture. Land Use Policy, 42:527-537.
14. Eberhart R. C., and Y. Shi. 1998. Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. Evolutionary Programming VII, 7th International Conference, EP98, San Diego, CA, USA, March 25-27.
15. Fatta, D., and N. Kythreotou. 2005. Wastewater as valuable water resource - concerns, constraints and requirements related to reclamation, recycling and reuse. IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance, Greece.
16. Habibi Davijani M, Banihabib M E, Nadjafzadeh Anvar A and Hashemi S R (2016) MultiObjective Optimization Model for the Allocation of Water Resources in Arid Regions Based on the Maximization of Socioeconomic Efficiency. Water Resource Management. 30:927–946.
17. Habibi Davijani M, Banihabib M E, Nadjafzadeh Anvar A and Hashemi S R (2015) Optimization model for the allocation of water resources based on the maximization of employment in the agriculture and industry sectors. Hydrology. 533 430–438.
18. Joodavi, A., M.Zare., andM. Mahootchi. 2015. Development and application of a stochastic optimization model for groundwater management: crop pattern and conjunctive use consideration. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 29:1637–1648.
19. Janga Reddy, M., and D. Nagesh Kumar. 2010. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using elitist-mutated particle swarm optimization. Hydro. Sci. J. 52(4), 686-701.
20. Karamouz, M., B. Zahraie., R. Kerachian., and A. Eslami. 2010. Crop pattern and conjunctive use management: A Case Study.Irrigation and drainage. 59, 2.
21. Khamisi, S.A., S.A. Prathapar. and M. Ahmed. 2013. Conjunctive use of reclaimed water and groundwater in crop rotations. Agricultural water management, 116, pp.228-234.
22. Khare, D. 2006. Assessment of counjunctive use planning options: A case study of sapon irrigation command area of Indonesia. Journal of Hydrology. 328 (3), 764-777.
23. Oron, G., L. Gillerman., A. Bick., Y. Mnaor., N. Buriakovsky., and J. Hagin. 2007. Advanced low quality waters treatment for unrestricted use purposes: Imminent challenges. Desalination, 213: 189-198.
24. Ramos, T.B., J. Šimu˚ nek., M.C. Goncalves., J.C. Martins., A. Prazeres., and L.S. Pereira. 2012. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. Agric. Water Manag. 111, 87–104.
25. Rezaei, F., H. R. Safavi., A. Mirchi. and K. Madani. 2016. f-MOPSO: An alternative multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use management. Hydro-environment Research, 14 (2017) 1–18.
26. Singh, A., and S.N. Panda. 2013. Optimization and simulation modeling for managing the problems of water resources. Water resources management. 27 (9), 3421-3431.
27. Singh. A. 2012. Optimal allocation of resources for the maximization of net agricultural return. Irrigation and Drainage Engineering.138 (9), 830-836.
28. Singh, D. K., C.S. Jaiswal., K.S. Reddy., R.M. Singh., and D.M. Bhandarkar. 2001. Optimal cropping pattern in a canal command area.Agricultural water management. Vol. 50. Issue 1. Pages 1-8.
29. US EPA. 1997. Estimated national occurrence and exposure to Nitrite in public drinking water supplies. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency (UAEPA); P. 1-77.

Archive of SID

www.SID.ir

30. World Health Organization. 2006. Guidelines for drinking water quality. 3 ed. Geneva: WHO, 2006.p. 190-1.
31. World Health Organization. 2006. WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2 of Wastewater use in agriculture, Geneva.
32. Yousefi, M., A. RahimiKhob., J. Soltani., M. B. Banihabib. and E. Soltani. 2016. Assessment of Nitrogen Demand of Cropping Pattern by Critical Plant Nitrogen Concentration Index (Case Study: Varamin Irrigation and Drainage Network), 2ndWorld. Irrigation Forum, Chiang Mai, Thailand.
33. Yousefi, M., J. Soltani, A. RahimiKhob, M. B. Banihabib and E. Soltani. 2017. Assessment of nitrogen leaching of cropping pattern by soil nitrogen balance equation (Case Study: Varamin Irrigation and Drainage Network). Modern Applied Science; 11(4)30-38.

Archive of SID

www.SID.ir