نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و هفتم / شماره سوم / پاییز ۱۴۰۲/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۳۵ تا ۵۵

بهینه‌سازی زیست‌محیطی سطح زیر کشت محصولات شبکه آبیاری شهید چمران با روش پویایی سیستم

سعید آزادی[۱]، حامد نوذری[۱*]، صفر معروفی[۱] و بهزاد قنبریان[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۹)

چکیده

یکی از راهکارهای توسعه کشاورزی، استفاده مطلوب از شبکه‌های آبیاری و زهکشی است که منجر به بهره‌وری بیشتر و حفظ محیط‌زیست خواهد شد. در تحقیق حاضر به کمک روش تحلیل پویایی سیستم مدلی بسط داده شد تا بتواند با نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی، سطح زیر کشت محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران واقع در استان خوزستان را شبیه‌سازی کند. به‌منظور بررسی اعتبار مدل، از آزمون حدی و آنالیز حساسیت استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل و وجود ارتباط منطقی بین پارامترهای آن بود. همچنین به‌منظور تعیین سطح زیر کشت بهینه محصولات زراعی شبکه شهید چمران، با اهداف محیط‌زیستی و کمینه کردن میزان نمک خروجی از زهکش‌ها، الگوی کشت محصولات این شبکه در دو حالت تغییر غیر پلکانی و تغییر پلکانی تعیین شد. نتایج نشان داد میزان نمک خروجی بهینه‌سازی شده از شبکه در هر دو حالت پلکانی و غیر پلکانی در مقایسه با وضع موجود در منطقه کاهش یافته است. مقدار نمک کل در وضع موجود، از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۶ به‌ترتیب برابر با ۲۷۹۹، ۲۶۴۹، ۲۷۴۹، ۲۲۹۸ و ۲۰۰۴ تن بر روز بوده است که پس از بهینه‌سازی، در حالت پلکانی ۲۷۳۹، ۲۵۴۶، ۲۶۴۴، ۲۲۲۳ و ۱۹۵۲ تن بر روز و در حالت غیرپلکانی ۲۳۶۳، ۲۳۰۹، ۲۴۸۱، ۲۱۵۱ و ۱۹۱۲ تن بر روز به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که حالت غیرپلکانی با توجه به محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای آن، در کاهش نمک خروجی موفق‌تر از حالت پلکانی عمل کرده است. آنالیز نتایج نشان‌دهنده موفقیت مدل در بهینه‌سازی و دست‌یابی به اهداف مورد نظر بود. لذا می‌توان گفت، مدل حاضر در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شبکه آبیاری، الگوی کشت آن و تعریف سایر سناریوها از دقت خوبی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت، بهینه‌سازی، پویایی سیستم، محیط‌زیست، مدل‌سازی

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
۲. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم و هنر، دانشگاه کانزاس، منهتن، آمریکا.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: h.nozari@basu.ac.ir

مقدمه

ایران از نظر موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی جز مناطق خشک و نیمه خشک جهان به شمار می‌رود. محدودیت منابع آبی کشور و توسعه پروژه‌های صنعتی و کشاورزی، همگام با رشد جمعیت، باعث شده تا کیفیت منابع آبی پایدار نبوده و سیر نزولی داشته باشد. این مسئله در بسیاری از نقاط ایران آن‌چنان چشمگیر است که کوچک‌ترین تغییر در شرایط طبیعی آب و هوایی می‌تواند باعث بحران در بسیاری از فعالیت‌های مورد نظر شود. لذا، کیفیت و کمیت زه‌آب تولید شده در اراضی شور که نیاز به آبشویی اولیه دارند، از شروع بهره‌برداری شبکه آبیاری و زهکشی تا پیش از رسیدن به شرایط پایدار، همواره در حال تغییر است. در مناطق با آب زیرزمینی شور و کم‌عمق، زمان رسیدن به حالت تعادل ممکن است چندین سال به طول انجامد. در چنین شرایطی، آگاهی از کمیت و کیفیت زه‌آب تولید شده به‌منظور مدیریت و کنترل آن، امری ضروری است (۱).

طراحی الگوی کشت، فرایندی پیچیده و متأثر از عوامل متعدد و متنوع است که بررسی آن طراحان را در مواردی ملزم به جمع‌آوری انبوهی از اطلاعات و داده‌ها می‌کند. به‌منظور ارتقای کارکرد شبکه‌های آبیاری و زهکشی می‌توان از آزمایش‌های مزرعه‌ای و مدل‌های شبیه‌سازی بهره برد. مدل‌های شبیه‌سازی، طرح توسعه یافته‌ای از آزمایش‌های صحرایی بوده، و بر خلاف آزمایش‌های مزرعه‌ای دارای محدودیت‌هایی از جمله هزینه زیاد، صرف زمان زیاد در بررسی آزمایشگاهی، عدم امکان انجام سناریوهای متعدد و پیچیده، محدود بودن صحت نتایج به منطقه و شرایط آزمایش نیستند. در صورتی که این مدل‌ها به درستی واسنجی شوند، می‌توانند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف به کار گرفته شوند (۱۵). از آن جمله در پژوهشی، کاله (۹) به بررسی مدل DRAINMOD در شرایط خشک و نیمه‌خشک ترکیه پرداخت. نتایج شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده سطح ایستابی، دبی زه‌آب، شوری خاک و شوری زه‌آب خروجی مقایسه شد و در نهایت نتایج نشان داد که این مدل به‌عنوان ابزاری سودمند برای طراحی و اعتباریابی سیستم‌های آبیاری و زهکشی در این مناطق می‌تواند، استفاده شود.

لطیف‌زاده و همکاران (۱۱) پژوهشی را به‌منظور، تعیین الگوی کشت و افزایش بهره‌وری آب در اراضی شبکه آبیاری عقیلی- گتوند انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که الگوهای کشت موجود، مناسب نبوده و با تغییر در درصد کشت گیاهان زراعی در اراضی موجود و افزایش ذخیره آب، می‌توان اراضی دیم را به اراضی فاریاب تبدیل نمود. بلالی و همکاران (۳) در تحقیقی به بهینه‌سازی الگوی کشت با توجه به سناریوهای سیاست‌گذاری شده برای حفاظت از منابع آب پرداختند. در نهایت با در نظر گرفتن سناریوهای سیاست‌گذاری شده که شامل ترکیبی از افزایش قیمت آب، افزایش سرمایه‌گذاری برای ارتقای سیستم آبیاری، کاهش و افزایش قیمت محصولات، الگوی کشت بهینه برای دشت همدان- بهار تعیین شد.

محمدی و همکاران (۱۴) با هدف بیشینه‌سازی منافع خصوصی و اجتماعی، به بهینه‌سازی الگوی کشت با تأکید بر منافع اجتماعی در بهره‌برداری منطقی آب در تولید محصولات زراعی در شهرستان مرودشت استان فارس پرداختند. نتایج نشان داد که در این الگو، محصولاتی مانند گندم آبی، گندم دیم، ذرت دانه‌ای، هندوانه، خیار، پیاز، عدس آبی و لوبیا از برنامه حذف شده و محصولات جو دیم، خربزه و پیاز وارد الگوی کشت شدند. آن‌ها نشان دادند در الگوی بیشینه کردن منافع اجتماعی، میزان منافع اجتماعی و بازده برنامه‌ای نسبت به الگوی فعلی افزایش یافته است.

سیرواستاوا (۲۳) با هدف درک تأثیر کیفیت آب زیرزمینی بر عملکرد محصول، به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای آبیاری و اثرات آن بر عملکرد گیاهان زراعی

در منطقه گونا هند پرداخت. این پژوهشگر پیشنهاد داد عملکرد گیاهان زراعی در منطقه را می‌توان با اجرای مناسب مدیریت آب آبیاری بهبود بخشید.

سروریان و سلیمانی (۲۲) به بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی دشت مهران بر اساس محدودیت‌های منابع آب، سطح زیر کشت و تنوع زیستی پرداختند. نتایج بیانگر آن بود که در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵، الگوی کشت بهینه نبوده و شاخص تنوع زیستی نیز بسیار کم است. محصولاتی مانند ذرت، کنجد، بامیه و خیار، در الگوی کشت بهینه دارای سطوح زیر کشت قابل توجهی بودند و می‌توان از این محصولات به‌عنوان محصولات جایگزین کشت فعلی به‌منظور افزایش سود کشاورزی استفاده کرد. کومار و یادآو (۱۰) در مطالعه‌ای به بررسی مدل‌های تعیین الگوی کشت بهینه، جهت بیشینه‌سازی سود خالص سالانه پرداختند. نتایج بیانگر آن بود که برای دستیابی به سود بیشتر، بایستی سطح زیر کشت محصولاتی همچون پنبه، موز، نیشکر و بادام زمینی را افزایش داد.

مطالعه‌ای دیگر توسط حاق و همکاران (۷) به‌منظور دستیابی به سودمندترین الگوی کشت در منطقه هونزا انجام شد. بیشینه‌سازی سود خالص در سال، برای سه محصول عمده گندم، سیب‌زمینی و یونجه به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار اکسل داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفتند. نتایج نشان افزایش درآمد خالص به میزان ۱۰/۱۸ درصد داشت. در پژوهشی دیگر سبززاده و شوریان (۲۱) به‌منظور بیشینه‌سازی سود خالص محصولات کشاورزی، از یک روش جدید بهینه‌سازی استفاده کردند. نتایج نشان داد که با اعمال سطح زیر کشت بهینه و همچنین برنامه‌ریزی آبیاری، می‌توان سود خالص را در مقایسه با وضعیت موجود به طرز قابل توجهی افزایش داد.

اما یکی از روش‌های بسیار مؤثر برای بررسی وضعیت سیستم‌ها، روش تحلیل پویایی سیستم است که روشی قدرتمند و بصری برای شبیه‌سازی است. مدل‌هایی که با این روش نوشته می‌شوند، با بینش فرایندهای بازخورد، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار دینامیکی سیستم‌ها در طول زمان نایل می‌سازند (۱۸). کارهای متعددی در زمینه استفاده از این روش در مدل‌سازی منابع آب صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به پژوهش حاتم و منعم (۸) در بهینه‌سازی مصرف آب در شبکه‌های آبیاری با رویکرد پویایی سیستم اشاره کرد. آن‌ها نشان دادند راهکارهای بهبود عملکرد شبکه‌ها در مواردی باعث بروز تغییراتی مثبت در کوتاه‌مدت شده است ولی در درازمدت با ایجاد اثرات و پیامدها، نتیجه را تحت تأثیر قرار داده است. لذا آن‌ها نتیجه گرفتند برای پایداری اقدامات انجام شده در این راستا، نباید به‌صورت یک‌جانبه به موضوع پرداخت، بلکه در کنار این موضوع پویایی وجود دارد.

فرناندز و سلما (۵) به‌منظور آنالیز توزیع مکانی زمین‌های تحت آبیاری، تغییرات کاربری و فاکتورهای کلیدی زیست‌محیطی اسپانیا، مدلی پویا ارائه دادند. این مدل شامل پنج بخش زمین‌های تحت آبیاری، بهره‌وری، سطح موجود، منابع آب و آلودگی بود. این پژوهشگران نشان دادند که هر سیاستی که به سوی کاهش و یا حذف مشکل کمبود آب نشانه‌روی کند، منجر به کاهش سطح زیر کشت می‌شود. حتی افزایش منابع آب هم نمی‌تواند مشکل کمبود آب را در طولانی مدت حل کند، زیرا آرایش حلقه‌های بازخوردی به شکلی است که افزایش منابع آب باعث افزایش سطح زیر کشت می‌شود و دوباره مشکل کمبود آب مطرح می‌شود. این پژوهشگران اظهار داشتند که کاهش زمین‌های تحت آبیاری به‌منظور تعادل تقاضا و منابع آب، نه تنها باعث از بین رفتن مشکل کمبود آب می‌شود، بلکه موجب بهبود مشکلات زیست‌محیطی که ناشی از آبیاری زمین‌های کشاورزی و ورود جریان آلوده به رودخانه است نیز خواهد شد.

نیازی و همکاران (۱۶) مدل پویایی سیستم را برای حفظ منابع آب و بازیافت آب آبخوان برای جلوگیری از

آلودگی در منطقه‌ای خشک پیشنهاد دادند و عنوان کردند که این مدل یک ابزار مؤثر برای کمک به حفظ منابع آب و کاهش تخلیه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

متین‌زاده و همکاران (۱۲) با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم به شبیه‌سازی حرکت پویای نیتروژن در سطح ایستابی کم‌عمق پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که دیدگاه تحلیل پویایی سیستم برای فهم رفتار غیرخطی در سیستم‌های پیچیده نسبت به زمان بسیار مناسب بوده و می‌توان از آن برای مدل‌سازی مدیریت کوددهی جهت جلوگیری از انتقال آلودگی به محیط‌زیست استفاده نمود.

ملاحظه می‌شود در پژوهش‌های انجام شده، تاکنون شبیه‌سازی هیدرولوژیک الگوی کشت یک شبکه آبیاری و زهکشی به روش تحلیل پویایی سیستم که بتواند اثرات زیست‌محیطی آن را نسبت به گذشت زمان مورد بررسی قرار دهد، انجام نشده است. نوآوری پژوهش حاضر نسبت به سایر پژوهش‌های صورت گرفته، شبیه‌سازی الگوی کشت یک شبکه آبیاری و زهکشی و بهینه سازی الگوی کشت به‌صورت سالانه و با گذشت زمان، به‌منظور مدیریت آلودگی زه‌آب و حفظ محیط‌زیست و در نهایت ارزیابی آثار ناشی از سناریوی انتخاب شده، نسبت به گذشت زمان است.

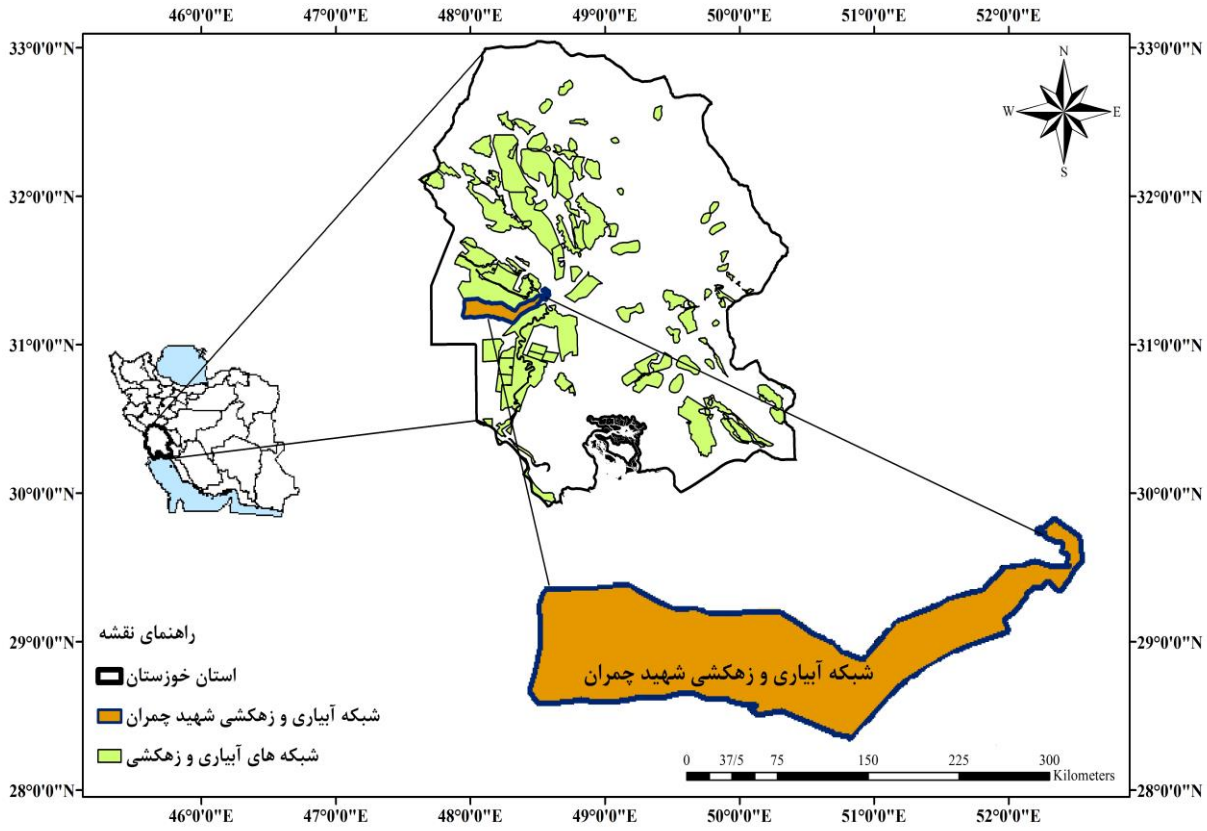
به‌کارگیری روشی از شبیه‌سازی که هم بر واقعیت منطبق باشد و هم امکان دخالت کاربر را در توسعه مدل ایجاد کند، ضروری است. در این ارتباط طراحی و تنظیم الگوی کشت جهت تعیین مقادیر سطوح زیر کشت و ترکیب مناسب محصولات، از اهمیت خاصی برخوردار است. گاهی اوقات نیز اجرای یک روش مدیریتی می‌تواند با گذشت زمان، اثرات منفی به دنبال داشته باشد. بررسی اثرات ناشی از اجرای یک سناریو قبل از اجرای آن می‌تواند به درک بهتری از سیستم منجر شود. بنابراین با توجه به ضرورت وجود یک مدل تحلیلی منطبق با شرایط صحرا و مزایای استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم در حل مسائل، از قبیل سرعت اجرای زیاد و امکان دسترسی کاربر به خطوط برنامه و همچنین سادگی حذف یا اضافه کردن یک پارامتر و بررسی تأثیر آن بر کل سیستم، تصمیم به استفاده از تکنیک تحلیل پویایی سیستم در شبیه‌سازی شبکه آبیاری و زهکشی گرفته شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران با مساحت ۱۱۲۰۰ هکتار در استان خوزستان در ۴۵ کیلومتری جنوب غربی شهر اهواز و حد فاصل جاده اهواز- خرمشهر تا هورالعظیم واقع شده است (شکل ۱). این اراضی در محدوده جغرافیایی ′۵۶ °۴۷ تا ′۲۳ °۴۸ طول شرقی از نصف النهار مبدأ و ′۵ °۳۱ تا ′۲۱ °۳۱ عرض شمالی از خط استوا واقع شده است. سازمان آب و برق خوزستان کارفرمای این طرح است. منبع تامین آب برای طرح، رودخانه کرخه است که محل آب‌گیری آن نیز در مجاورت سد انحرافی کرخه قرار دارد. زه‌آب ناشی از بارندگی و مازاد آبیاری پس از ورود به لترال‌ها و کلکتورها، وارد زهکش‌های روباز درجه ۲ و ۱ شده، سپس وارد زهکش اصلی شده و از آنجا به طرف خطوط مرزی هدایت می‌شوند. طبق مطالعات قبلی قرار بود آب زهکش اصلی وارد مخزن ۴ و ۵ هورالعظیم شود و بر اثر تبخیر، آب آن از بین برود.

متوسط شوری آب آبیاری و آب زیرزمینی اراضی منطقه به‌ترتیب برابر با ۲ و ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر است. کیفیت آب آبیاری ثابت اما کیفیت آب زیرزمینی متغیر است که یکی از دلایل اصلی آن تعداد سال‌های بهره‌برداری از شبکه است. در طول دوره بهره‌برداری، مقداری از آب آبیاری برای آبشویی مزارع استفاده می‌شود که با گذشت زمان روند شوری آب زیرزمینی نزولی شده و کیفیت آن با توجه به اختلاط با آب آبیاری با کیفیت مناسب، بهبود می‌یابد. همچنین شوری اولیه خاک ناحیه ریشه گیاه برابر با



شکل ۱. موقعیت شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران

۳/۲ دسی‌زیمنس بر متر است. عمق متوسط زهکش‌ها ۲ متر و فاصله آن‌ها ۷۵ متر، ضریب زهکشی ۱/۲ سانتی‌متر بر روز، شعاع مؤثر زهکش‌ها ۱۰۰ میلی‌متر و عمق لایه غیرقابل نفوذ ۵ متر بود که از جمله ورودی‌های مورد نیاز مدل برای پارامترهای سیستم زهکشی به شمار می‌روند.

به‌منظور بررسی الگوی کشت در شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران، به جمع‌آوری اطلاعات شبکه پرداخته شد. بیشتر محصولات در الگوی کشت فعلی، با در نظر گرفتن سازگاری با اقلیم منطقه در نظر گرفته شده است. الگوی کشت پیشنهادی در این شبکه در سال ۱۳۹۲ به همراه سطح زیر کشت محصولات زراعی و مقدار آب آبیاری در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول درصد کشت محصولات شبکه بیش از ۱۰۰ درصد است که دلیل آن در نظر گرفتن کشت تابستانه برای برخی از محصولات است.

مدل‌سازی

یک مدل عبارت است از شمایی از یک پدیده واقعی و یا برداشت ذهنی از یک پدیده واقعی. تشخیص مشکل و تعریف صحیح مسئله، اولین گام در مدل‌سازی است. در این مرحله باید اهداف و نیازها را شناسایی نمود. تعریف مسئله شامل انتخاب موضوع، انتخاب متغیرها و مفاهیم کلیدی، افق زمانی و تعریف پویایی مسئله است. پس از تعریف مسئله، باید متغیرهای کلیدی شناسایی و تعیین شوند. از جمله متغیرهای کلیدی این پژوهش می‌توان به بارش، کمیت و کیفیت آب آبیاری، تبخیر و تعرق، هدایت هیدرولیکی خاک، نفوذ عمقی، جریان رو به بالا از تراز سطح ایستابی و سطح زیر کشت اشاره کرد. سپس باید

جدول ۱. الگوی کشت پیشنهادی و مقدار آب آبیاری شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران

محصول	درصدکشت (درصد)	سطح زیر کشت (هکتار)	مقدار آب آبیاری (مترمکعب بر هکتار)
گندم	۲۵	۲۸۰۰	۵۸۹۰
جو	۱۰	۱۱۲۰	۵۲۰۰
شبدر	۱۰	۱۱۲۰	۶۳۶۶
ذرت	۱۰	۱۱۲۰	۱۲۱۹۰
سودانگراس	۵	۵۶۰	۱۱۹۴۰
لوبیا	۱۰	۱۱۲۰	۶۷۸۰
هندوانه	۱۵	۱۶۸۰	۸۳۷۰
تابستانه			
خیار	۵	۵۶۰	۷۹۲۰
گوجه فرنگی	۵	۵۶۰	۱۰۳۴۰
باقلا	۵	۵۶۰	۵۳۹۰
ذرت علوفه	۱۰	۱۱۲۰	۱۱۵۹۰
ای			
هویج	۱۵	۱۶۸۰	۳۴۹۶
سویا	۱۰	۱۱۲۰	۱۶۵۷۰
یونجه	۱۰	۱۱۲۰	۱۶۳۲۰

رفتار مرجع متغیرهایی که دارای رفتار تاریخی می‌باشند را تعیین کرد و به وسیله آن‌ها رفتار سیستم را ارزیابی نمود. بعد از آن نوبت به فرموله کردن فرضیات دینامیکی می‌رسد که باید با توجه به شرایط موجود، ارتباط بین متغیرهای کلیدی و روابط بین آن‌ها را شناسایی کرد. فرضیات دینامیکی می‌توانند به‌صورت حلقه‌های علت و معلولی یا نمودار ذخیره و جریان بیان شوند.

از چالش‌های پیش روی ایجاد یک مدل، تعیین شرایط مرزی است که در این بخش، متغیرهای درونی و برونی سیستم و ارتباط بین آن‌ها تعیین می‌شود تا بتوان ورودی‌ها به سیستم و خروجی‌های از آن را محاسبه نمود. به بیان دیگر این بخش، محدوده مدل را با تعیین کردن متغیرهای درون‌زا، برون‌زا و متغیرهای غیر مؤثر بر مدل نمایش می‌دهد. در این پژوهش مدل‌سازی در سطح مزرعه و شبکه آبیاری و زهکشی است و با توجه به اینکه در اطراف یک مزرعه ممکن است رودخانه، زهکش‌های روباز و یا مزارع تحت آبیاری قرار داشته باشند، بایستی گزینه‌های مختلف را برای تعیین مرز سیستم در مدل تعریف کرد. به‌عنوان نمونه تبخیر و تعرق از سطح خاک یکی از این شرایط مرزی است (۱).

مدل‌سازی پویایی سیستم

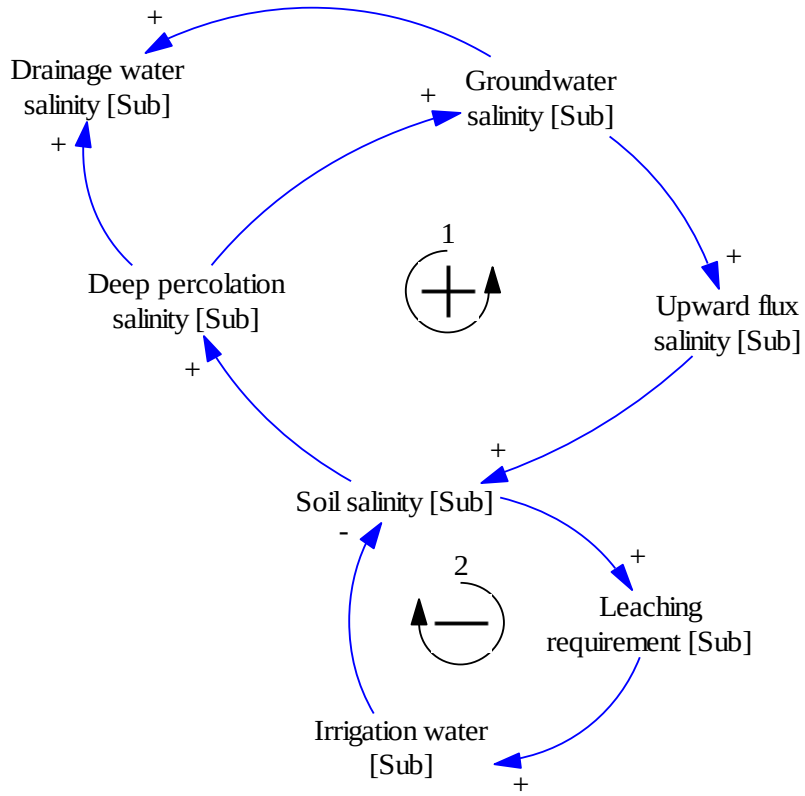
اساس روش تحلیل پویایی سیستم بر پایه فرضیه فرایندهای بازخوردی است که متأثر از رفتار گذشته خود بوده و از نتایج آن در رفتار آینده استفاده می‌کند (۱۷). این فرایند بازخوردی شامل حلقه‌های بازخوردی منفی و مثبت است

که روابط علت و معلولی یک سیستم را نشان می‌دهند و در واقع، ساختار اصلی یک سیستم هستند. حلقه منفی نشان می‌دهد که اگر علت افزایش یابد اثر آن کاهش می‌یابد و اگر علت کاهش یابد اثر آن روند افزایشی دارد. حلقه مثبت نیز نشان می‌دهد که اگر علت افزایش یابد اثر آن نیز افزایش می‌یابد و اگر علت کاهش یابد اثر آن نیز روند کاهشی دارد (۱۹). در این پژوهش، از محیط برنامه‌نویسی VENSIM که ابزاری برای مدل‌سازی به زبان پویایی سیستم و به‌صورت شی‌گرا بر پایه بازخورد است، استفاده شد. لذا برای اجرای یک مدل شبیه‌سازی به‌وسیله ابزار مدل‌سازی کامپیوتری مانند VENSIM باید حلقه‌های علت و معلولی را به نمودارهای حالت و جریان تبدیل کرد. در واقع حالت‌ها، انباشتگی‌های سیستم و نشان‌دهنده وضعیت سیستم هستند و تصمیم‌ها و فعالیت‌های سیستم بر پایه آنها صورت می‌گیرد. جریان‌ها نیز نرخ‌های تغییر را نشان می‌دهند. یعنی نشان‌دهنده فرایندهایی هستند که متغیر حالت را پر یا خالی می‌کنند. می‌توان گفت در یک سیستم، بر اساس متغیر حالت تصمیم‌ها اتخاذ شده و با تغییر متغییرهای جریان آن تصمیم‌ها اعمال می‌شود (۲).

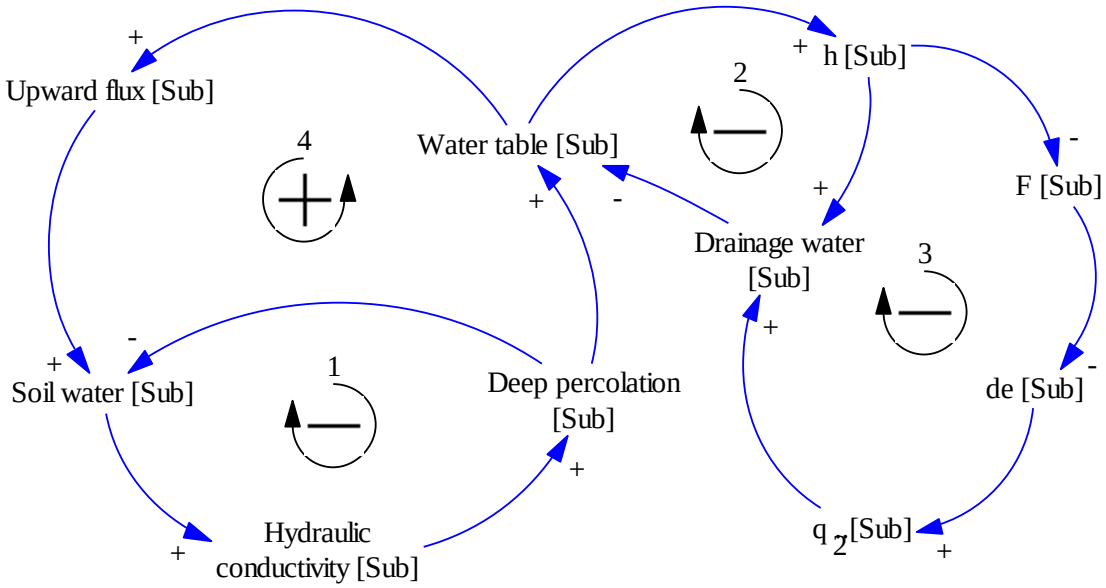
حلقه‌های علت و معلولی شوری در محیط خاک به‌عنوان نمونه‌ای از حلقه‌های کار شده در این مدل به‌صورت شکل ۲ است. در این مدل، شوری محیط خاک به‌وسیله یک حلقه مثبت و یک حلقه منفی معرفی شده است. در حلقه اول، افزایش شوری آب زیرزمینی باعث افزایش شوری جریان رو به بالا می‌شود و افزایش شوری این جریان باعث افزایش شوری خاک می‌شود. در حلقه دوم با افزایش شوری خاک نیاز آبشویی افزایش یافته و برای آبشویی منطقه ریشه نیاز به آب آبیاری افزایش می‌یابد و در اثر افزایش آب آبیاری شوری خاک در ناحیه ریشه کاهش می‌یابد و حلقه دوم به‌صورت یک حلقه منفی تعریف می‌شود.

همچنین حلقه‌های علت و معلولی عملکرد زهکش‌ها به‌صورت شکل ۳ است. در حلقه شماره ۱ افزایش نفوذ عمقی باعث کاهش رطوبت در ناحیه غیراشباع می‌شود. بنابراین هدایت هیدرولیکی در ناحیه غیراشباع (K_2) کاهش یافته و باعث کاهش نفوذ عمقی از ناحیه غیراشباع می‌شود. در حلقه شماره ۲ با افزایش میزان زه‌آب خروجی، تراز سطح آب کاهش و ارتفاع آب روی زهکش (h) کاهش می‌یابد و باعث کاهش میزان زه‌آب خروجی شده و یک حلقه منفی را تشکیل می‌دهد. از سوی دیگر با کاهش ارتفاع آب روی زهکش، میزان ضریب مربوط به عمق معادل (F) افزایش یافته و باعث کاهش عمق معادل زهکشی (d_e) شده و این مسئله باعث می‌شود سهم آبی که از قسمت تحتانی وارد زهکش با فاصله L می‌شود ($q_2=8K_2.h.d_e/L^2$) کاهش یابد و در نهایت باعث کاهش میزان زه‌آب خروجی می‌شود. با کاهش میزان زه‌آب خروجی، سطح ایستابی افزایش می‌یابد و این افزایش منجر به افزایش ارتفاع آب روی زهکش خواهد شد (حلقه شماره ۳). در حلقه چهارم، با افزایش تراز سطح آب، جریان رو به بالا افزایش یافته و باعث افزایش رطوبت در ناحیه غیراشباع می‌شود. بنابراین هدایت هیدرولیکی در ناحیه غیراشباع افزایش یافته و باعث افزایش نفوذ عمقی از ناحیه غیراشباع و افزایش تراز سطح آب می‌شود.

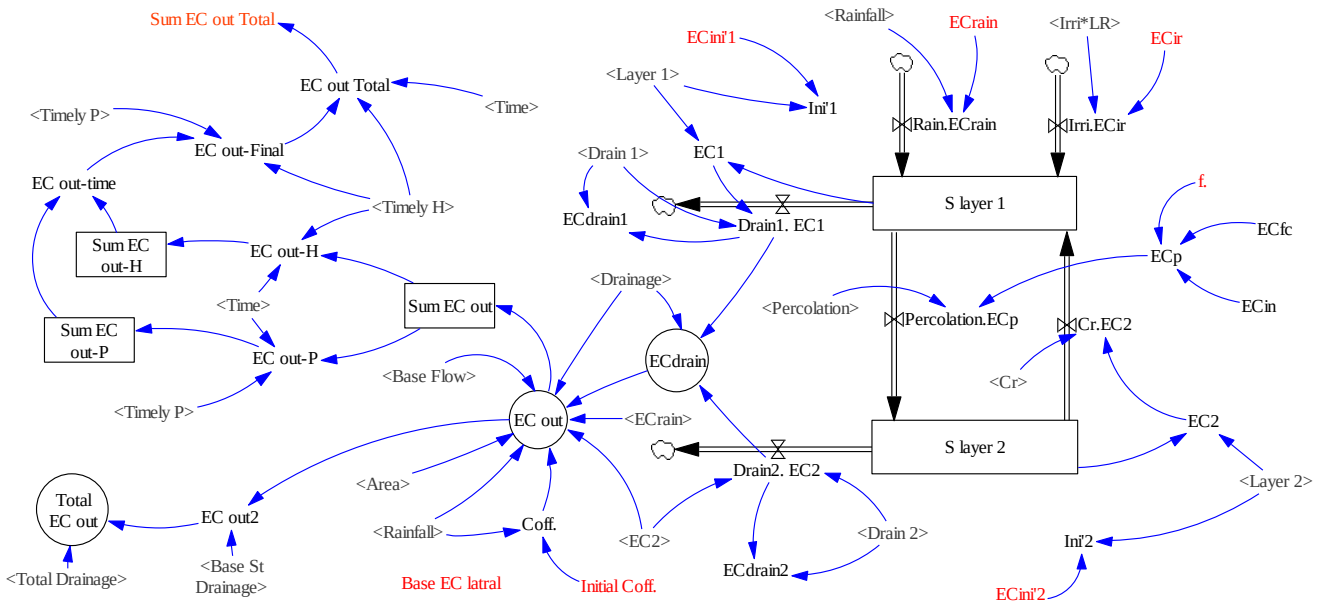
با توجه به یکسان بودن روابط علت و معلولی بین پارامترهای محیط آب و خاک، از تابع Subscript در نرم‌افزار VENSIM استفاده و بدین ترتیب از تکرار آن‌ها برای هر مزرعه جلوگیری شد. در این راستا به‌منظور تعریف میزان پارامترهای هر یک از مزارع (نوع خاک، عمق لایه غیر قابل نفوذ، هدایت هیدورلیکی و غیره)، شرایط زهکشی (عمق زهکش و فاصله زهکش)، گیاه کشت شده (نوع گیاه و مشخصات مربوط به آن) و به‌منظور تعریف توزیع مکانی و زمانی هر یک از آنها و اجرای مدل، ماتریسی سه بعدی ایجاد و به‌عنوان ورودی برای مدل تعریف شد. در چنین شرایطی مدل می‌تواند به‌صورت هم‌زمان و به‌صورت جامع و یکپارچه، سیستم



شکل ۲. حلقه‌های علت و معلولی شوری در محیط خاک به‌صورت **Subscript**



شکل ۳. حلقه‌های علت و معلولی عملکرد زهکش‌ها به‌صورت **Subscript**



شکل ۴. نمودار حالت و جریان تغییر الگوی کشت بر اساس پارامترهای زیست محیطی به‌صورت Subscript

آب، خاک و گیاه تمامی مزارع درون یک شبکه (۱۴ مزرعه) را نسبت به زمان شبیه‌سازی کند. بنابراین تمامی شرایط گفته شده به‌صورت هم‌زمان در قالب یک مدل جامع و یکپارچه برای یک دوره ۵ ساله تهیه شد. حال با تبدیل حلقه‌های علت و معلولی به نمودارهای حالت و جریان، مدل شبیه‌سازی ایجاد می‌شود. به‌عنوان نمونه شکل ۴ نمودار حالت و جریان تغییر الگوی کشت بر اساس شوری و دبی زه‌آب را نشان می‌دهد.

در شکل ۴، اندیس ۱ و ۲ نشان‌دهنده لایه اول و دوم، EC، EC_{rain}، EC_{ir}، EC_{drain}، EC_{p}، EC_{fc} و EC_{in} به‌ترتیب هدایت الکتریکی، هدایت الکتریکی بارش، آبیاری، زه‌آب، نفوذ عمقی، ظرفیت زراعی و ورودی (دسی‌زیمنس بر متر) هستند. همچنین S layer شوری لایه (بدون بعد)، Drainage زه آب (میلی‌متر بر روز)، Base Flow دبی پایه (میلی‌متر بر روز)، Rainfall بارش (میلی‌متر بر روز)، Area مساحت قطعه مورد نظر (هکتار)، percolation نفوذ عمقی (میلی‌متر بر روز)، Cr صعود مویینگی (میلی‌متر بر روز)، Irri. آبیاری (میلی‌متر بر روز)، Time گام زمانی (روز)، پیشوند و پسوندهای out، Sum، Total، Coff.، P و H به‌ترتیب خروجی، مجموع، جمع کل، ضریب، کاشت و برداشت برای پارامترهای مختلف هستند.

طراحی و ارزیابی سیاست‌ها

در این پژوهش با توجه به شرایط موجود، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی الگوی کشت شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران صورت گرفت و نتایج بدست آمده بررسی و تحلیل شد. شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران شامل ۱۴ مزرعه است که در هر مزرعه یک محصول زراعی کشت می‌شود. لذا در این شبکه ۱۴ محصول زراعی مختلف کشت می‌شود.

تابع هدف

تابع هدف بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران با هدف کمینه کردن توأمان شوری و دبی زه‌آب خروجی از شبکه به‌صورت زیر است: (۱)

$$\text{Minimize } A^{*} = \text{Average EC}_{out} \times \text{Total Drainage}_{out}$$

$$\text{Average EC}_{out} = \sum_{st=1}^{n}\sum_{Ty=1}^{m} \frac{(EC_R \times R \times A_{st,Ty}) + (EC_{d\,st,Ty} \times d_{st,Ty} \times A_{st,Ty}) + (EC_{baseTy} \times B \cdot F_{Ty})}{(R \times A_{st,Ty}) + (d_{st,Ty} \times A_{st,Ty}) + (B \cdot F_{Ty})} \quad (۲)$$

$$\text{Total Drainage}_{out} = \sum_{st=1}^{n}\sum_{Ty=1}^{m} (d_{st,Ty} \times A_{st,Ty}) + \sum_{Ty=1}^{m} B \cdot F_{Ty} \quad (۳)$$

$$d_{st,Ty} = \frac{4 \times k_{1st,Ty} \times h_{st,Ty}^{\ 2}}{L^2} + \frac{8 \times k_{2st} \times de_{st,Ty} \times h_{st,Ty}}{L^2} \quad (۴)$$

در روابط فوق اندیس St سطح زیر کشت هر یک محصولات در شبکه آبیاری و زهکشی بر حسب هکتار (اولین Subscript)، اندیس Ty سال زراعی بر حسب سال (دومین Subscript)، Average EC_{Out} میانگین شوری زه‌آب در محل خروجی از شبکه‌ها (دسی‌زیمنس بر متر)، Total $Drainage_{Out}$ دبی زه‌آب خروجی در محل خروجی از شبکه (مترمکعب بر روز)، EC_R شوری بارش (دسی‌زیمنس بر متر)، R مقدار بارش (میلی‌متر بر روز)، A سطح زیر کشت هر یک از محصولات زراعی در شبکه آبیاری و زهکشی (هکتار)، EC_d شوری زه‌آب خروجی هر مزرعه (دسی‌زیمنس بر متر)، d دبی زه‌آب خروجی هر مزرعه (میلی‌متر بر روز)، EC_{base} میانگین شوری زه‌آب خروجی در زهکش اصلی (دسی‌زیمنس بر متر)، B.F دبی پایه زه‌آب خروجی در زهکش اصلی (مترمکعب بر روز)، k_1 و k_2 به‌ترتیب ضریب هدایت هیدرولیکی در قسمت فوقانی و تحتانی زهکش‌ها (میلی‌متر بر روز)، h ارتفاع آب روی زهکش در نقطه وسط بین دو زهکش (متر)، de عمق معادل زهکشی (متر) و L فاصله بین زهکش‌ها (متر) هستند.

تعریف محدودیت‌ها

محدودیت‌های غیرپلکانی

مطابق با ظرفیت محدود آب آبیاری، کل آب مورد نیاز برای هر یک از محصولات زراعی در شبکه (AW_{St})، باید کوچک‌تر یا مساوی کل آب در دسترس در طول سال زراعی (AW_{Total}) باشد (رابطه ۵). همچنین با توجه به مساحت شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران که مقداری ثابت است، مجموع مساحت محصولات زراعی در شبکه (۱۴ مزرعه)، از مجموع مساحت شبکه (A_{Total}) باید کمتر شود (رابطه ۶). همچنین فرض شد مساحت زیر کشت هر محصول زراعی در شبکه می‌تواند از صفر تا ۲ برابر وضع موجود تغییر یابد (رابطه ۷).

$$\sum_{st=1}^{n} AW_{st} \le AW_{Total} \quad n = 14 \quad (۵)$$

$$\sum_{st=1}^{n} A_{st} \le A_{Total} \quad n = 14 \quad (۶)$$

$$0 \le A_{st} \le 2A_{st} \quad (۷)$$

محدودیت‌های پلکانی

در این قسمت علاوه بر محدودیت‌های تعریف شده در روابط ۵ و ۶، فرض شد کمترین و بیشترین تغییر در مساحت محصولات شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران در هر سال به میزان ۱۰ درصد وضع موجود (به‌صورت پلکانی) باشد (رابطه ۸). به عبارت دیگر در این حالت قرار است تغییر در الگوی کشت نسبت به الگوی کشت اجرا شده در منطقه به آرامی و به دور از تنش صورت گیرد تا بتوان فرهنگ الگوی کشت بهینه را با توجه به شرایط اجتماعی و فرهنگی ساکنین منطقه، نهادینه کرد.

$$(1-0.1i) \times A_{st} \le A_{st} \le (1+0.1i) \times A_{st} \quad i = 1,2,3,4,5 \quad (۸)$$

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

آزمون حدی

پس از ایجاد مدل شبیه‌سازی، باید بتوان اعتبار آن را تایید کرد.

یکی از مراحل سنجش اعتبار مدل، آزمون مدل در شرایط حدی است. در این آزمون اعتبار مدل بر اساس فرضیات و انتظارات کاربر مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر در این آزمون، شرایط خاص و غیر معمولی که خروجی آن برای کاربر قابل پیش‌بینی است به‌عنوان ورودی مدل تعریف می‌شود و خروجی مدل با رفتار قابل انتظار مقایسه می‌شود. بنابراین شرایط حدی ممکن است اصلاً رخ ندهد ولی مدل طبق این شرایط باید درست عمل کند. به‌عنوان نمونه در این قسمت آبیاری با آب شور به‌عنوان شرایط حدی به مدل اعمال شد. هدایت الکتریکی آب آبیاری بیشتر از حد تحمل گیاه به شوری و برابر با ۹ دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شد. با توجه به هدایت الکتریکی اولیه لایه فوقانی لوله‌های زهکش که برابر ۳/۲ دسی‌زیمنس بر متر است، انتظار می‌رود شوری خاک در ناحیه ریشه روند افزایشی داشته باشد. با توجه به اعمال شرایط مذکور به‌عنوان داده‌های ورودی به مدل، پس از اجرای مدل، صحت این ادعا اثبات گردید که در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از اجرای مدل، محصول یونجه کشت شده در این شرایط به‌تدریج تحت تنش شوری وارد شده به آن، با افت عملکرد مواجه و در نهایت از بین می‌رود.

آنالیز حساسیت

در این قسمت مدل شبیه‌سازی شده تحت شرایط عدم قطعیت پارامترها، شرایط اولیه و مرزهای مدل آزمون می‌شود. به‌عنوان مثال مقادیر عملکرد محصول در کشت‌های مختلف را با توجه به شرایط متفاوت آبیاری و شوری خاک می‌توان بررسی کرد. همچنین به ارزیابی اثر ضریب کارایی آبشویی بر روی عملکرد محصول، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و شوری زه‌آب خروجی پرداخت. از طرفی می‌توان با تغییر در عمق و فاصله نصب زهکش‌ها، تغییرات تراز سطح ایستابی، شوری زه‌آب خروجی، دبی زه‌آب خروجی و عملکرد محصول را مورد بررسی قرار داد. به‌عنوان نمونه به بررسی حساسیت مدل نسبت به ضریب راندمان آبشویی (f) پرداخته شد.

این ضریب به‌عنوان درصدی از مقدار کل نفوذ عمقی که در شستشوی خاک مؤثر است در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با افزایش ضریب راندمان آبشویی، مقدار نمکی که از ناحیه ریشه گیاه شسته می‌شود بیشتر و شوری خاک این ناحیه کمتر می‌شود. نتایج تغییرات شوری خاک ناحیه ریشه هنگامی که این پارامتر بین ۰/۳ تا ۰/۷ تغییر کند در شکل ۶ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که شوری خاک ناحیه ریشه به این پارامتر حساس بوده و با افزایش ضریب راندمان آبشویی، شوری خاک ناحیه ریشه گیاه کمتر می‌شود. این حساسیت نشان دهنده ارتباط منطقی بین این دو پارامتر در مدل است.

تجزیه و تحلیل نتایج بهینه‌سازی

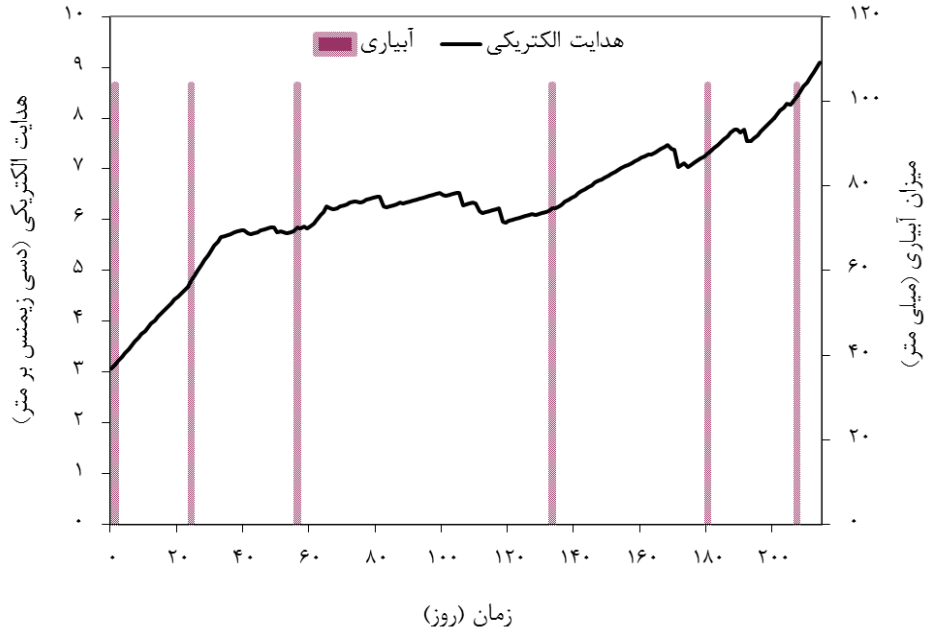
سناریو اول: کاهش شوری زه‌آب خروجی

هدف از این سناریو، بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران برای کمینه کردن شوری زه‌آب خروجی با دو حالت پلکانی و غیر پلکانی است. به‌منظور محاسبه میزان نمک خروجی از زهکش‌ها می‌توان از رابطه تجربی زیر استفاده کرد (۴):

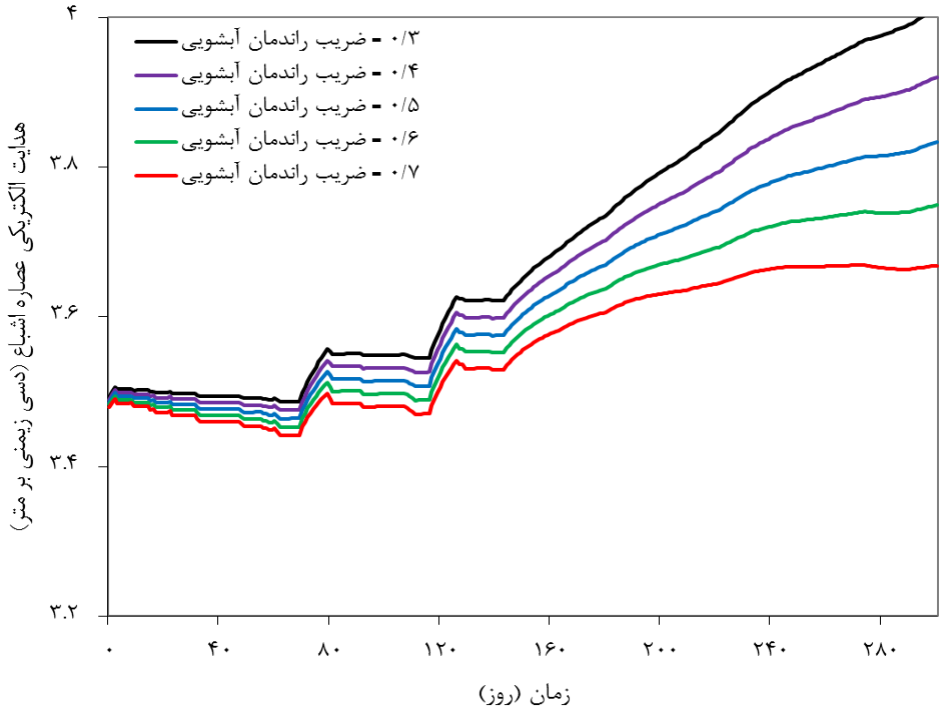
$$TDS = 800 \times EC \qquad (۹)$$

که در آن EC بر حسب دسی‌زیمنس بر متر و باقی‌مانده خشک (TDS) بر حسب میلی‌گرم بر لیتر است. با محاسبه میزان حجم زه‌آب خروجی می‌توان مقدار وزنی نمک را بدست آورد.

شکل ۷ میزان نمک خروجی بهینه‌سازی شده شبکه شهید چمران را در برابر الگوی پیشنهادی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در این حالت میزان نمک خروجی بهینه‌سازی شده کاهش محسوسی به‌ویژه در حالت پلکانی نداشت. زیرا در حالت پلکانی، مدل در هر سال، تنها قادر است ۱۰ درصد تغییر در سطح زیر کشت محصولات، اعمال کند. روند میزان نمک کل زه‌آب خروجی از شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۶ تقریبا نزولی است. این کاهش در حالت غیر پلکانی که قید آن آزادی عمل بیشتری دارد، بیشتر صورت

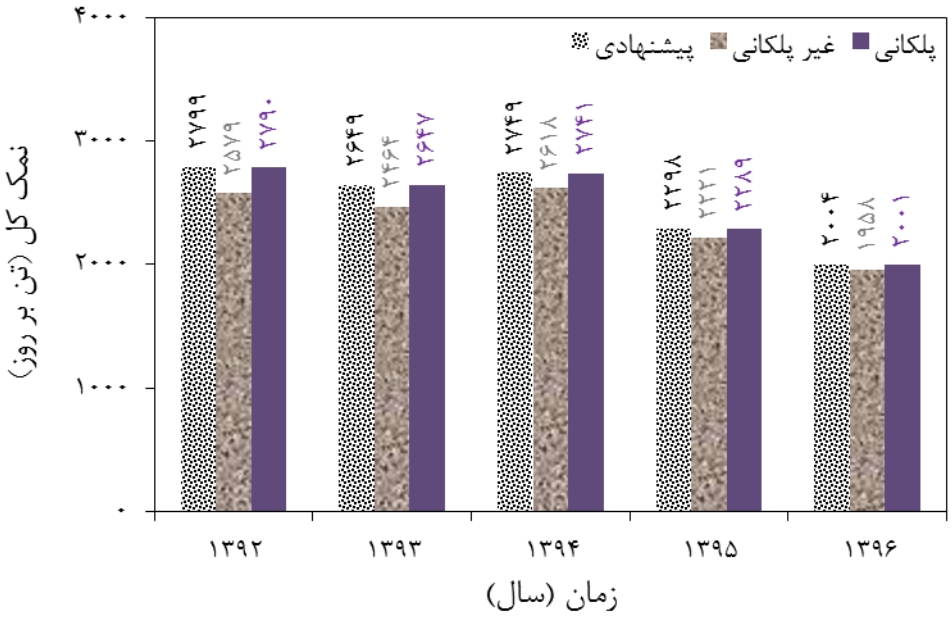


شکل ۵. تغییرات شوری خاک در ناحیه ریشه گیاه با شرایط آبیاری با آب شور



شکل ۶. حساسیت شوری خاک ناحیه ریشه گیاه به ضریب راندمان آبشویی

گرفته است. دلیل این امر آبیاری و آبشویی است که به مرور زمان توسط آب آبیاری با کیفیت مناسب انجام می‌پذیرد و باعث کاهش نمک خروجی از شبکه می‌شود. زیرا نمک‌های موجود در آب‌های زیرزمینی به وسیله جریان‌های شعاعی و از زیر زهکش‌ها وارد لوله‌های زهکش می‌شوند و با گذشت زمان و آبیاری محصولات، آب با کیفیت خوب جایگزین آن می‌شود.



شکل ۷. مقایسه میزان نمک زه‌آب خروجی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران مطابق با سناریو اول

لذا با توجه به اینکه آب زیرزمینی منطقه کم عمق و شور و آب آبیاری شیرین است، با گذشت زمان املاح موجود در آب زیرزمینی تخلیه شده و از شوری آن کاسته می‌شود. در این مورد نوذری و آزادی (۱۷) در پژوهش آزمایشگاهی با استفاده از آب آبیاری با کیفیت مناسب روند تغییرات شوری آب زیرزمینی شور زیر لوله‌های زهکش را بررسی کرده و نشان دادند که با گذشت زمان و اختلاط آب آبیاری شیرین با آب زیرزمینی شور، املاح موجود در آب زیرزمینی تخلیه شده و روند شوری آن کاهشی است. به عبارت دیگر میزان دبی زه‌آب تقریبا ثابت اما شوری زه‌آب کاهشی است که در نهایت منجر به روند نزولی نمودار شکل ۷ شد.

در این سناریو با توجه به تابع هدف آن که کاهش هدایت‌الکتریکی زه‌آب خروجی است، مدل به دنبال دستیابی به این امر بود. اما توجه به دو نکته ضروری است. نخست در تمامی سناریوهای در نظر گرفته شده در این پژوهش سعی شد مجموع مساحت بهینه شده محصولات زراعی در شبکه آبیاری و زهکشی از مساحت واقعی آن شبکه بیشتر نبوده و برابر آن باشد. دوم آنکه با توجه به ظرفیت محدود آب آبیاری، کل آب مورد نیاز برای هر یک از محصولات زراعی در شرایط بهینه شده در شبکه، تقریبا برابر با کل آب در دسترس در طول سال زراعی در نظر گرفته شد.

در این سناریو، سطح زیر کشت بهینه هر یک از محصولات شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران مطابق با دو حالت پلکانی و غیرپلکانی به‌صورت جداگانه توسط مدل محاسبه شد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). در این سناریو سطح زیر کشت محصولاتی مانند گندم، جو، شبدر، هندوانه، خیار و ذرت علوفه‌ای تقریبا در تمام سال‌ها ثابت نگه داشته شده است. محصولاتی مانند ذرت، لوبیا قرمز و گوجه‌فرنگی در حالت غیر پلکانی سطح زیر کشت آنها در تمامی سال‌ها کاهش یافته اما در حالت پلکانی تقریبا ثابت هستند. همچنین محصولاتی مانند سودانگراس، باقلا سبز و هویج در حالت غیر پلکانی سطح زیر کشت آنها در تمامی سال‌ها افزایش یافته اما در حالت پلکانی تقریبا ثابت هستند. محصولاتی مانند سویا و یونجه نیز عملکرد متفاوتی داشته‌اند. دلیل این تفاوت‌ها همان‌طور که گفته شد ماهیت تابع هدف تعریف

شده در دو حالت پلکانی و غیر پلکانی است. چرا که در حالت غیر پلکانی دامنه تغییرات سطح زیر کشت محصولات، آزادی عمل بیشتری دارد، اما این تغییرات در حالت پلکانی به آرامی و سالانه به میزان ۱۰ درصد است.

سناریو دوم: کاهش دبی زه‌آب خروجی

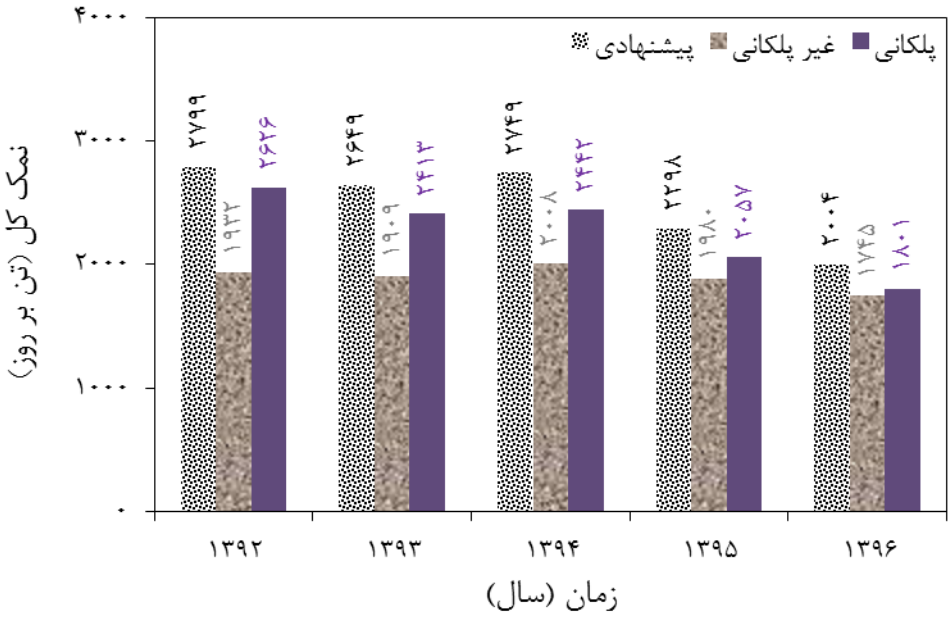
در این سناریو با هدف کمینه کردن دبی زه‌آب خروجی، به بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات پرداخته شد. شکل ۸ میزان نمک خروجی بهینه‌سازی شده شبکه شهید چمران را در برابر الگوی پیشنهادی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در همه سال‌ها با کاهش محسوس دبی زه‌آب، میزان نمک خروجی نیز کاهش چشمگیری داشته و این کاهش در حالت غیر پلکانی بیشتر است. زیرا همان‌طور که بیان شد در حالت پلکانی، مدل در هر سال تنها قادر است درصدی تغییر در سطح زیر کشت محصولات اعمال کند که نشان از موفقیت مدل در بهینه‌سازی و دقت عمل در لحاظ کردن تابع هدف و قیدهای مرتبط دارد. در اینجا میزان نمک خروجی کاملاً به دبی زه‌آب خروجی وابسته بود و با افزایش یا کاهش میزان دبی زه‌آب، میزان نمک خروجی نیز افزایش یا کاهش می‌یافت. بنابراین در این سناریو می‌توان شاهد بیشترین اثربخشی در کاهش مقدار نمک خروجی بود.

در این سناریو نیز، سطح زیر کشت بهینه محصولات زراعی تمامی محصولات شبکه توسط مدل محاسبه شده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). با مقایسه سطح زیر کشت محصولاتی مانند گندم، جو، سودانگراس، هویج و یونجه، می‌توان گفت که تولید این محصولات مطابق با تابع هدف در نظر گرفته شده در این سناریو، باعث کاهش میزان نمک زه‌آب خروجی می‌شود. لذا سطح زیر کشت این محصولات در حالت غیر پلکانی از همان ابتدا افزایش چشمگیری داشته و در حالت پلکانی نیز هر سال سطح زیر کشت آن‌ها افزوده شده است. از سوی مقابل، سایر محصولات شرایطی کاملا متفاوت داشته و تابع هدف تعریف شده در این سناریو سعی در کاهش سطح زیر کشت این محصولات دارد. در حالت غیرپلکانی با توجه به دامنه عمل خود و تعریف قیود، سطح زیر کشت بیشتر آن‌ها در همان ابتدا صفر شده و در حالت پلکانی نیز روند کاهشی داشته‌اند و مدل به خوبی این شرایط را اعمال کرده است.

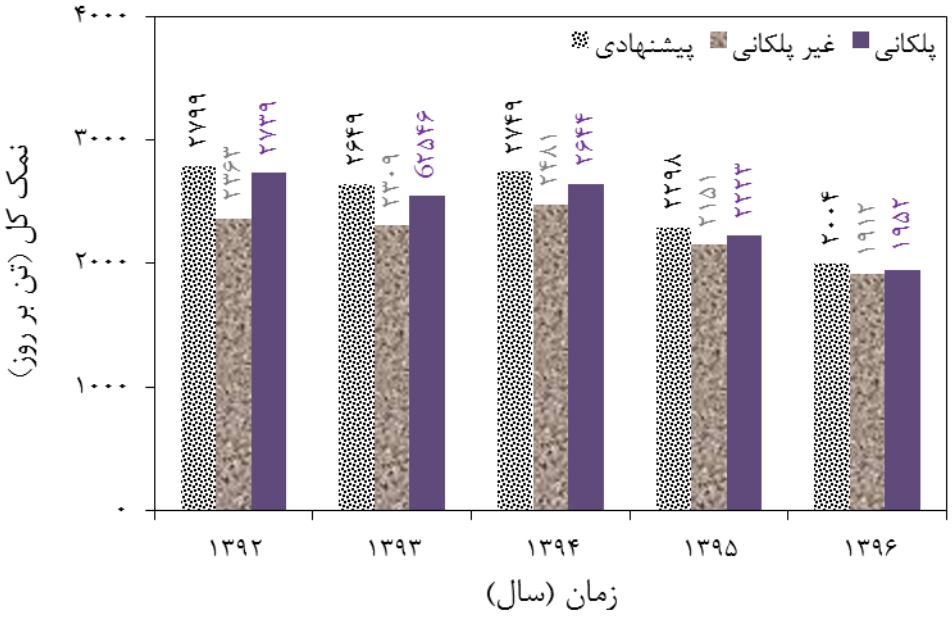
سناریو سوم: ملاحظات زیست‌محیطی

در این سناریو با در نظر گرفتن دیدگاه زیست‌محیطی و کمینه کردن میزان نمک خروجی از زهکش‌ها، سطح زیر کشت محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران به‌صورت یکپارچه تعیین شد. در واقع سناریو سوم تلفیق سناریو اول و دوم بوده و این دو سناریو را به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته است. شکل ۹ میزان نمک خروجی بهینه‌سازی شده از شبکه را در هر سال نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده توانایی مدل در کاهش میزان نمک خروجی و در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی در هر دو حالت پلکانی و غیرپلکانی دارد.

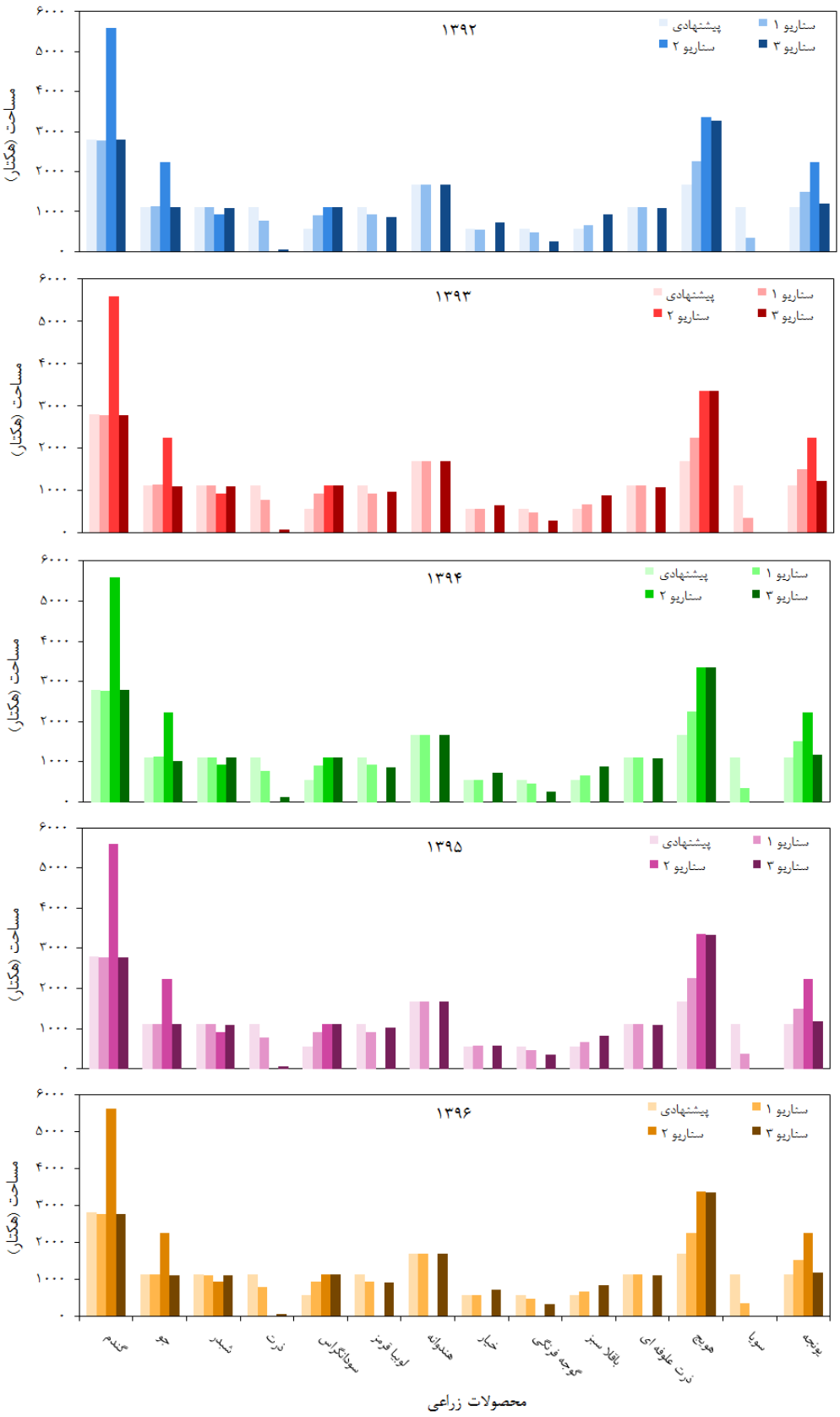
در اینجا نیز با در نظر گرفتن دیدگاه زیست‌محیطی، سطح زیر کشت محصولات زراعی شبکه شهید چمران برای دوره آماری مورد مطالعه تعیین شد که نتایج آن در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سطح زیر کشت محصولاتی مانند سودانگراس، باقلا سبز، هویج و یونجه از دیدگاه زیست‌محیطی باید افزایش یابد و تولید محصولاتی مانند ذرت، لوبیا قرمز، گوجه‌فرنگی و سویا در منطقه کاهش و یا متوقف شود. سایر محصولات نیز تقریبا شرایط ثابتی داشتند. مشابه همین نتیجه، توسط رفیعی (۲۰) برای الگوی کشت بهینه در دشت آزادگان حاصل شد. سایر پژوهشگران نیز پس از اعمال الگوی کشت بهینه نتایج مشابهی به‌دست آورند که می‌توان به نتایج محمدی و همکاران (۱۳)، سیرواستاوا و سینگ (۲۴)، جعفرزاده و همکاران (۶) و آزادی و همکاران (۲) اشاره کرد.



شکل ۸. مقایسه میزان نمک زه‌آب خروجی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران مطابق با سناریو دوم



شکل ۹. مقایسه میزان نمک زه‌آب خروجی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران مطابق با سناریو سوم



شکل ۱۰. مقایسه سطح زیر کشت بهینه محصولات زراعی شبکه شهید چمران طی دوره ۵ ساله در حالت غیرپلکانی

شکل ۱۱. مقایسه سطح زیر کشت بهینه محصولات زراعی شبکه شهید چمران طی دوره ۵ ساله در حالت پلکانی

در پژوهشی دیگر سروریان و سلیمانی (۲۲) الگوی کشت محصولات کشاورزی دشت مهران را بر اساس محدودیت‌های منابع آب، سطح زیر کشت و تنوع زیستی بهینه‌سازی کردند. گندم بیشترین سطح زیر کشت و گوجه فرنگی، یونجه و ذرت به‌دلیل سود کم و مصرف زیاد آب کمترین سطح زیر کشت را به خود اختصاص دادند. محصولاتی مانند ذرت، کنجد، بامیه و خیار، در الگوی کشت بهینه دارای سطوح زیر کشت قابل توجهی بودند و می‌توان از این محصولات به‌عنوان محصولات جایگزین کشت فعلی به‌منظور افزایش سود کشاورزی استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم، سطح زیر کشت محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران شبیه‌سازی شد. سپس با کمک آزمون حدی و آنالیز حساسیت به بررسی عملکرد صحیح مدل در شبیه‌سازی پرداخته شد. نتایج شبیه‌سازی پارامترهای زیست‌محیطی در شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران با استفاده از نرم‌افزار VENSIM، نشان از توانایی زیاد مدل در شبیه‌سازی منطقه دارد. پس از آن، به بهینه‌سازی سطح زیر کشت محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران پرداخته شد. در این راستا سه سناریو زیست محیطی در نظر گرفته شد. در سناریو اول به بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی شبکه با هدف کمینه کردن شوری زه‌آب خروجی پرداخته شد. در سناریو دوم هدف کمینه کردن دبی زه‌آب خروجی بود. در سناریو سوم با تلفیق سناریو اول و دوم و در نظر گرفتن دیدگاه زیست-محیطی و کمینه کردن میزان نمک خروجی از زهکش‌ها، سطح زیر کشت محصولات زراعی شبکه به‌صورت یکپارچه تعیین شد. برای تمامی سناریوها، قیود در دو حالت غیرپلکانی و پلکانی تعریف شدند. در حالت غیرپلکانی سطح زیر کشت هر محصول زراعی در شبکه می‌تواند از صفر تا ۲ برابر وضع موجود تغییر یابد. اما در حالت پلکانی با توجه به شرایط اجتماعی و فرهنگی ساکنین منطقه و به‌دلیل فرهنگ‌سازی اجرای الگوی کشت بهینه، این تغییر به آرامی و در هر سال به میزان ۱۰ درصد وضع موجود است.

تجزیه و تحلیل نتایج نشان‌دهنده دقت و توانایی مدل در بهینه‌سازی و دست‌یابی به اهداف مورد نظر بود. با مقایسه پارامترهای محیط‌زیستی کل محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران در تمامی سناریوها در هر دو حالت غیرپلکانی و پلکانی، دیده شد که در حالت غیرپلکانی کاهش میزان نمک خروجی از زه‌آب‌ها بیشتر از حالت پلکانی محقق شده که دلیل آن نیز آزادی عمل قیود در حالت غیرپلکانی است. در هر دو حالت تغییر پلکانی و غیرپلکانی محصولات سودانگراس، باقلا سبز، هویج و یونجه با افزایش سطح زیر کشت و محصولات ذرت، لوبیا قرمز، گوجه‌فرنگی و سویا با کاهش تولید در منطقه روبه‌رو شدند.

از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به فرض همگنی خاک در یک زمین زراعی اشاره نمود. به عبارت دیگر خواص سطح زمین و زیرسطحی بسیار ناهمگن هستند. بنابراین پارامترهای سیستم‌های هیدرولوژیک از قبیل ضریب زبری سطحی، هدایت هیدرولیکی و خواص پوشش گیاهی نسبت به مکان و گاهی نسبت به زمان نیز متغیر هستند. حتی اگر ما قادر به دیدن این پارامترها بدون خطا باشیم، نمی‌توانیم در همه جای اراضی، این پارامترها را اندازه‌گیری کنیم. لذا در این پژوهش فرض بر این است که شرایط همگن است، یعنی از یک ارزش واحد برای تعریف یک پارامتر در یک مزرعه تحت یک کشت خاص استفاده شده است. محدودیت دوم در این پژوهش اندازه‌گیری شرایط مرزی و اولیه است. با توجه به گستردگی منطقه، امکان اندازه‌گیری دقیق آنها وجود نداشت و به کمک گزارش‌های موجود در منطقه و با توجه به اظهارات دست-اندرکاران منطقه مورد مطالعه تخمین زده شدند.

از قابلیت مدل تهیه شده در این پژوهش علاوه بر نمایش تغییرات تمامی پارامترهای مؤثر در سیستم نسبت به زمان، می‌توان به افزایش سرعت ایجاد مدل، سادگی اصلاح ساختار مدل در واکنش به تغییرات سیستم، پذیرش الگوی کشت، بهینه‌سازی، قابلیت تحلیل حساسیت و صرف زمان کمتر در اجرای برنامه اشاره کرد.

منابع مورد استفاده

1. Azadi, S. 2021. Determining optimal crop pattern in irrigation and drainage network using system dynamics approach. Ph.D. Thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan, I.R. Iran (In Farsi).
2. Azadi, S., H. Nozari, B. Ghanbarian and S. Marofi. 2022. Optimizing cropping pattern to improve the performance of irrigation network using system dynamics—Powell algorithm. *Environmental Science and Pollution Research Journal* 29: 64547-64559.
3. Balali, H., S. Khalilian, D. Viaggi, F. Bartolini and M. Ahmadian 2011. Groundwater balance and conservation under different water pricing and agricultural policy scenarios: A case study of the Hamadan-Bahar plain. *Ecological Economics* 70: 863-872.
4. Eliot, A., A. Estella, S. D. Rebecca, W. Dale and D. Franklyn. 2004. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. *Applied Geophysics.* 56: 281–294.
5. Fernjndez, J. M. and M. A. E. Selma. 2004. The dynamics of water scarcity on irrigated landscapes: Mazarrń and Aguilas in south-eastern Spain. *System Dynamics Review* 20: 117-137.
6. Jafarzadeh, A., A. Khaseii and A. Shahidi. 2016. Designing a multi objective decision-making model to determine optimal crop pattern influenced by climate change phenomenon (case study: Birjand plain). *Iranian Journal of Soil and Water Researc*h, 47(4): 849-859 (In Farsi).
7. Haq, F., A. Parveen, S. Hussain and A. Hussain. 2020. Optimization of the Cropping Pattern in District Hunza, Gilgit-Baltistan. *Sarhad Journal of Agriculture* 36: 612-616.
8. Hatam, A. and M. J. Monem. Analysis of water consumption optimization through the improvement of irrigation networks using system dynamics approach. *In*: Proceeding of 2011 4th Iran Water Resources Management Conference, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (In Farsi).
9. Kale, A. 2011. Field-evaluation of DRAINMOD-S for predicting soil and drainage water salinity under semi-arid conditions in Turkey. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9: 26-40.
10. Kumar, V. and S.M. Yadav. 2019. Optimization of cropping patterns using elitist-Jaya and elitist-TLBO algorithms. *Water Resources Management Journal* 33: 1817-1833.
11. Latifzade, S., R. Mokhtaran, L. Latifzade and S. Hamzeh. 2010. Determination of optimum cropping pattern considering agricultural water management issue in the Aghili-Gotvand irrigation project. *Journal of Water Engineering* 1(1): 53-59 (in Farsi).
12. Matinzadeh, M. M., J. Abedi Koupai, A. Sadeghi-Lari, H. Nozari and M. Shayannejad. 2017. Development of an innovative integrated model for the simulation of nitrogen dynamics in farmlands with drainage systems using the system dynamics approach. *Journal of Ecological Modelling* 347: 11–28.
13. Mohammadi, H., F. Boustani and F. Kafilzadeh. 2012. Optimal cropping pattern using a multi-objectives fuzzy non-linear optimization algorithm: a case study. *Journal of water and wastewater* 23(84): 43-55 (in Farsi).
14. Mohammadi, H., A. Sargazi, V. Dehbashi and M. Poudineh. 2016. Optimization of cropping pattern with an emphasis on social benefits in the rational exploitation of water (A case study of Fars province). *Journal of Environmental Science and Technology* 17(4): 107-115 (In Farsi).
15. Mostafazadeh-fard, B., H. Mansouri, S. F. Mousavi and M. Feyzi. 2009. Effects of different levels of irrigation water salinity and leach-ing on yield and yield components of wheat in an arid region. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 135: 32–38.
16. Niazi, A., S. O. Prasher, J. Adamowski and T. Gleeson. 2014. A system dynamics model to conserve arid region water resources through aquifer storage and recovery in conjunction with a dam. *Water* 6: 2300-2321.
17. Nozari, H. and S. Azadi. 2017. Experimental evaluation of artificial neural network for predicting drainage water and groundwater salinity at various drain depths and spacing. *Natural Computing Applications Journal* 31: 1227-1236
18. Nozari, H., S. Azadi and N. Mazoji. 2019. Simulation of the quality process of Nahr shaaban irrigation channel using system dynamics approach. *Irrigation and Water Engineering Scientific Research Journal* 9(35): 217-228 (In Farsi).
19. Nozari, H., A. M. Liaghat and S. Azadi. 2022. Management of agricultural saline drainage using system dynamics approach. *Water and Environment Journal* 36: 299-307.
20. Rafiee, V., M. Shourian and J. Attari. 2017. Optimum crop patterning by integrating SWAT and the harmony search optimization algorithm. *Iran-Water Resources Research*: 13(3): 73-88 (in Farsi).
21. Sabzzadeh, I. and M. Shourian. 2020. Maximizing crops yield net benefit in a groundwater-irrigated plain constrained to aquifer stable depletion using a coupled PSO-SWATMODFLOW hydro-agronomic model. *Journal of Cleaner Production*: 262: 121349.

22. Sarvariyan, J. and P. Soleimani. 2022. Optimizing the pattern of cultivation of agricultural products in the Mehran Plain based on the limitations of water resources, cultivated area and biodiversity. *Journal Water and Irrigation Management* 4(11): 725-737 (In Farsi).
23. Srivastava, S. K. 2019. Assessment of groundwater quality for the suitability of irrigation and its impacts on crop yields in the Guna district, India. *Journal of Agricultural Water Management* 216: 224-241.
24. Srivastava, P. and R. M. Singh. 2015. Optimization of cropping pattern in a canal command area using fuzzy programming approach. *Water Resources Management* 29: 4481-4500.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 27, No. 3, Fall 2023, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Environmental Optimization of the Cultivated Area of Shahid Chamran Irrigation Network Using System Dynamics Approach

S. Azadi[1], H. Nozari[1*], S. Marofi[1] and B. Ghanbarian[2]

(Received: February 3-2022 ; Accepted: January 29-2023)

Abstract

One of the strategies for agricultural development is the optimal use of irrigation and drainage networks, which will lead to higher productivity and environmental protection. The present study used the system dynamics approach to develop a model for simulating the cultivated area of the Shahid Chamran irrigation and drainage network located in Khuzestan province by considering environmental issues. Limit test and sensitivity analysis were used for model validation. The results showed the proper performance of the model and the logical relationship between its parameters. Also, the cropping pattern of the network was determined in two modes of non-stepwise and stepwise changes to determine the optimal cultivated area of the Shahid Chamran network with environmental objectives and minimize the amount of salt from drains. The results showed that the amount of optimized output salt from the network has decreased in both non-stepwise and stepwise changes compared to the existing situation in the region. The total output salt in the current situation, from 2013 to 2017, was obtained at 2799, 2649, 2749, 2298, and 2004 tons.day^{-1}, respectively, in the stepwise changes, are 2739, 2546, 2644, 2223, and 1952 tons.day^{-1}, and finally, in the non-stepwise changes, are 2363, 2309, 2481, 2151, and 1912 tons.day^{-1}. The results showed that the non-stepwise changes due to considered limitations have been more successful in reducing output salt than the stepwise changes. The analysis of the results showed the model's success in optimizing and achieving the desired goals. The results showed that the present model has good accuracy in simulating and optimizing the irrigation network, cropping pattern, and defining other scenarios.

Keywords: Cropping pattern, Optimization, System dynamics, Environment, Modeling

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2. Department of Geology, Kansas State University, Manhattan KS, USA.
*: Corresponding author, Email: h.nozari@basu.ac.ir