شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سودآوری محصولات شبکه آبیاری و زهکشی جفیر (ایثارگران) با روش پویایی سیستم

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

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۲)

چکیده

در تحقیق حاضر به کمک روش تحلیل پویایی سیستم مدلی بسط داده شد تا بتواند سودآوری کشت محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی جفیر (ایثارگران) واقع در استان خوزستان را شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نماید. به‌منظور اعتباریابی نتایج شبیه‌سازی نسبت منفعت به هزینه، از شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE)، میانگین خطای اریبی (MBE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده و مقادیر آنها به‌ترتیب ۰/۲۵، ۰/۱۹، ۰/۰۰۵- و ۰/۹۶ بدست آمد. سپس به‌منظور تعیین سطح زیر کشت بهینه محصولات زراعی شبکه، با هدف افزایش سودآوری کشت محصولات، الگوی کشت محصولات این شبکه در دو حالت غیر پلکانی و پلکانی در سال‌های زراعی ۱۳۹۲ الی ۱۳۹۶ تعیین شد. در حالت غیر پلکانی سطح زیر کشت هر محصول زراعی در شبکه از صفر تا ۲ برابر وضع موجود تغییر یافت و در حالت پلکانی با توجه به شرایط اجتماعی و فرهنگی ساکنین منطقه، این تغییر به آرامی و در هر سال به میزان ۱۰ درصد وضع موجود بوده است. آنالیز نتایج نشان‌دهنده موفقیت مدل در بهینه‌سازی و دست‌یابی به اهداف مورد نظر داشت و مجموع نسبت منفعت به هزینه در همه سال‌ها در هر دو حالت پلکانی و غیر پلکانی افزایش یافت. به‌عنوان نمونه در سال ۱۳۹۶ نسبت به ۱۳۹۵، هزینه‌های تولید به اندازه ۷/۱ درصد کاهش و قیمت فروش به اندازه ۵/۸ درصد افزایش داشت و باعث افزایش میزان منفعت به هزینه در سال ۱۳۹۶ نسبت به سال ماقبل آن شد. نتایج نشان داد مدل حاضر در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شبکه آبیاری، الگوی کشت آن و تعریف سایر سناریوها از دقت خوبی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت، سودآوری اقتصادی، عملکرد محصول، مدل‌سازی، نرم‌افزار VENSIM

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

مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت، افزایش تولید محصولات زراعی یکی از نیازهای ضروری جامعه بوده و افزایش عملکرد این محصولات امری انکارناپذیر است. از شرایط لازم برای تأمین نیازهای غذایی، دسترسی به کشاورزی پایدار و توسعه آن است (۱۰). یکی از راه‌حل‌ها برای توسعه کشاورزی، استفاده از شبکه‌های آبیاری و زهکشی مدرن می‌باشد، به‌طوری که در این شبکه‌ها می‌توان از آب، انرژی، سطح زیر کشت و نیروی کارگری به‌صورت بهینه بهره برد که درنهایت منجر به بهره‌وری بالاتر و سود بیشتری خواهد شد (۱۱). طراحی الگوی کشت، فرآیندی پیچیده و متأثر از عوامل متعدد و متنوعی است که بررسی آن طراحان الگو را در مواردی ملزم به جمع‌آوری انبوهی از اطلاعات و داده‌ها می‌کند.

در این راستا به‌منظور ارتقای کارکرد شبکه‌های آبیاری و زهکشی می‌توان از آزمایش‌های مزرعه‌ای و مدل‌های شبیه‌سازی بهره برد. در آزمایش‌های مزرعه‌ای برای تعیین تأثیر عوامل مختلف بر روی کارکرد شبکه، عمق بهینه و برنامه‌ریزی آبیاری لازم است تا آزمایش‌هایی با کمّیت و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری برای محصولات زراعی مختلف انجام گیرد. از جمله محدودیت‌های این روش می‌توان به هزینه بالا، صرف زمان زیاد در بررسی آزمایشگاهی، عدم امکان انجام سناریوهای زیاد و پیچیده مدیریت آبیاری، محدودبودن صحت و سقم نتایج به منطقه و شرایط آزمایش اشاره کرد. بنابراین، از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان به‌عنوان طرح توسعه یافته‌ای از آزمایش‌های صحرایی برای غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده کرد. در صورتی‌که این مدل‌ها به درستی واسنجی شوند، می‌توانند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف به کار گرفته شوند (۹). پژوهشی به‌منظور، تعیین الگوی کشت و افزایش بهره‌وری آب در اراضی شبکه آبیاری عقیلی- گتوند انجام شد. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که الگوهای کشت موجود مناسب نبوده و با تغییر درصد ترکیب کشت گیاهان زراعی در اراضی موجود و افزایش ذخیره آب می‌توان اراضی دیم را تبدیل به اراضی فاریاب کرد و توأمان به سود اقتصادی قابل توجهی دست یافت (۷).

یکی از روش‌های بسیار مؤثر برای بررسی وضعیت سیستم‌ها، روش تحلیل پویایی سیستم می‌باشد که روشی قدرتمند و بصری برای شبیه‌سازی است. این روش ابتدا توسط فاستر (۳) جهت درک بهتر مسائل استراتژیک در سیستم‌های پویای پیچیده ابداع گردید. مدل‌هایی که با این روش نوشته می‌شوند، با بینش فرآیندهای بازخورد، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار پویایی سیستم‌ها در طول زمان نائل می‌سازند. کارهای متعددی در زمینه استفاده از این روش در مدل‌سازی منابع آب صورت گرفته است.

در پژوهشی بهینه‌سازی مصرف آب از طریق شبکه‌های آبیاری با رویکرد پویایی سیستم تحلیل شد. این پژوهشگران 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. بنابراین، آنها نتیجه گرفتند برای پایداری اقدامات انجام شده در این راستا، نباید به صورت یک‌جانبه به موضوع پرداخت بلکه در کنار این موضوع دینامیک‌هایی وجود دارند (۴).

در پژوهشی به‌منظور بررسی الگوی کشت موجود در منطقه پیرسلمان واقع در دشت اسدآباد و افزایش سودآوری، از روش تحلیل پویایی سیستم استفاده شد. این پژوهشگر با توجه به قابلیت‌های مدل مذکور، و با تعریف سناریوهای مختلف اقدام به ارزیابی الگوی کشت کرد. نتایج حاکی از توانایی مدل در تخمین عملکرد محصول و شبیه‌سازی الگوی کشت داشت (۶). همچنین شبیه‌سازی اثر تنش آبی و شوری بر عملکرد محصول چغندرقند با استفاده از روش پویایی سیستم انجام شد. در این پژوهش علاوه بر شبیه‌سازی اثر توأم تنش آبی و شوری بر عملکرد محصول چغندرقند، رطوبت و شوری خاک در ناحیه ریشه نیز شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که مدل حاضر می‌تواند با واسنجی دقیق و کامل، در تخمین عملکرد محصول از دقت

خوبی برخوردار باشد (۱۰).

بررسی روش‌های ارائه‌شده نشان می‌دهد که ضرورت بکارگیری روشی از شبیه‌سازی که هم بر واقعیت منطبق باشد و هم امکان دخالت کاربر را در توسعه مدل ایجاد کند، آشکار می‌شود. در این ارتباط طراحی و تنظیم الگوی کشت جهت تعیین مقادیر سطوح زیر کشت و ترکیب مناسب محصولات، از اهمیت خاصی برخوردار بوده و بایستی به نحوی انجام پذیرد که از ظرفیت‌های موجود و قابل دسترس استفاده بهینه صورت گیرد. با توجه به اینکه اغلب الگوی کشت توسط بهره‌بردار و با توجه به تجربه شخصی او تعیین می‌گردد، بنابراین تغییر این شرایط مشکلاتی را به همراه خواهد داشت. باید بتوان فرهنگ الگوی کشت بهینه را با توجه به شرایط اجتماعی و فرهنگی ساکنین منطقه، به آرامی و به دور از تنش نهادینه کرد. از طرفی این تغییر الگوی کشت باید بتواند سودآوری بهره‌برداران را حفظ نماید تا تمایل به تغییر این شرایط و اجرای الگوی کشت تعیین شده را داشته باشند. گاهی اوقات نیز اجرای یک روش مدیریتی می‌تواند با گذشت زمان، اثرات منفی به دنبال داشته باشد. بنابراین، بررسی اثرات ناشی از اجرای یک سناریو قبل از اجرای آن می‌تواند به درک بهتری از سیستم منجر شود. تهیه مدلی که بتواند به بررسی الگوی کشت موجود در منطقه و بیشینه‌کردن سودآوری ناشی از آن، نسبت به گذشت زمان بپردازد، ضروری به نظر می‌رسد.

هدف اصلی این پژوهش شبیه‌سازی هیدرولوژیکی الگوی کشت یک شبکه آبیاری و زهکشی به روش تحلیل پویایی سیستم است تا بتوان میزان سودآوری محصولات را نسبت به گذشت زمان مورد بررسی قرار داد. نوآوری این پژوهش نسبت به سایر پژوهش‌های صورت گرفته شبیه‌سازی تمامی مزارع موجود در یک شبکه آبیاری و زهکشی به‌صورت همزمان با استفاده از Subscript و بررسی اثر پارامترهای مختلف با توجه به گذشت زمان می‌باشد. همچنین، یکی دیگر از اهداف این پژوهش استفاده از روش ترکیبی شبیه‌سازی پویایی سیستم و بهینه‌سازی الگوریتم پاول جهت تعیین الگوی کشت با هدف افزایش سودآوری محصولات و مطابق با فرهنگ ساکنین منطقه است.

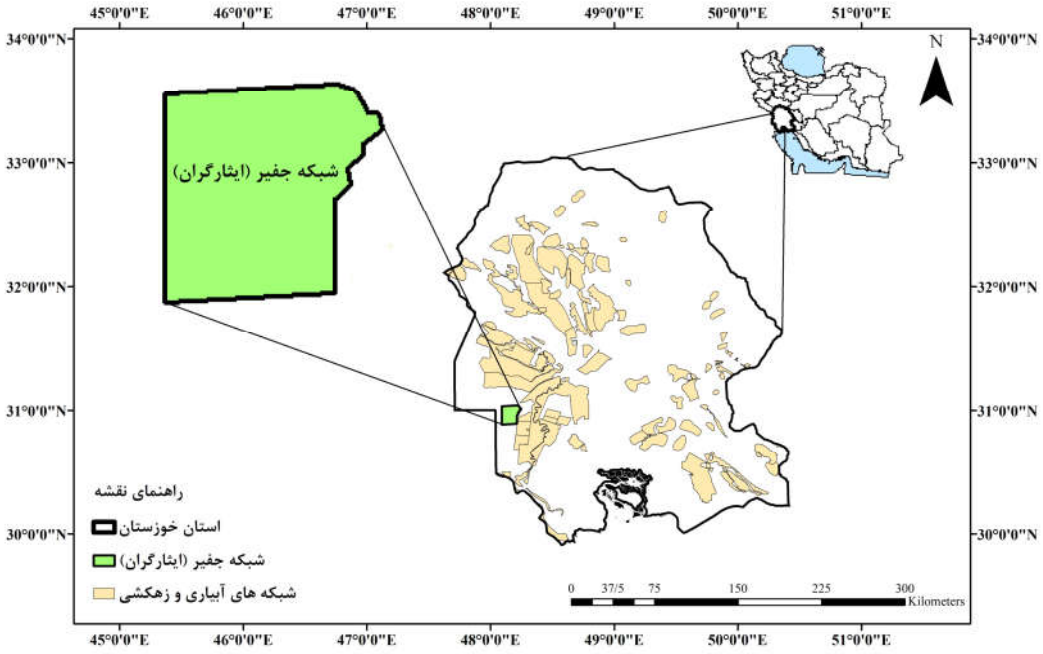
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شبکه آبیاری و زهکشی جفیر (ایثارگران) با مساحت ۳۹۶۴۵ هکتار در استان خوزستان در ۳۵ کیلومتری جنوب غربی شهر اهواز واقع شده است (شکل ۱). این اراضی از سمت شرق به خط راه‌آهن اهواز- خرمشهر و محدوده طرح توسعه نیشکر امیرکبیر، از سمت جنوب به جاده المهدی و از سمت غرب به اراضی ملی و تأسیسات نفتی حوزه یادآوران محدود می‌شود. سازمان جهاد کشاورزی استان خوزستان کارفرمای این طرح است. آب مورد نیاز شبکه از رودخانه کرخه تأمین و وارد کانال آبرسان می‌شود. شبکه فرعی شبکه آبیاری و زهکشی جفیر توسط مؤسسه جهاد نصر در حال اجرا بوده و ایستگاه پمپاژ آبیاری و قسمتی از کانال اصلی آن اجرا شده است. آب‌های مازاد آبیاری و زهکش‌های زیرزمینی پس از ورود به کلکتورهای زهکشی وارد شبکه زهکش روباز درجه ۱ و ۲ شده و توسط آنها به زهکش‌های اصلی روباز منتقل می‌شوند.

به‌منظور بررسی الگوی کشت در شبکه آبیاری و زهکشی جفیر، به جمع‌آوری اطلاعات شبکه پرداخته شد. اکثر محصولات در الگوی کشت فعلی شبکه، 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 در جدول ۱ ارائه شده است. درصد کشت محصولات شبکه بیش از ۱۰۰ درصد است که دلیل آن در نظر گرفتن کشت تابستانه برای برخی از محصولات می‌باشد.

متوسط هدایت الکتریکی آب آبیاری اراضی منطقه، برابر با ۲ و شوری آب زیرزمینی ۸۰ دسی‌زیمنس بر متر است. کیفیت آب آبیاری ثابت اما کیفیت آب زیرزمینی متغیر می‌باشد که یکی از دلایل اصلی آن تعداد سال‌های بهره‌برداری از شبکه است. در طول دوره بهره‌برداری، مقداری از آب آبیاری جهت آبشویی



شکل ۱. موقعیت شبکه آبیاری و زهکشی جفیر (ایثارگران)

جدول ۱. الگوی کشت پیشنهادی شبکه آبیاری و زهکشی جفیر

محصول	درصدکشت (%)	سطح زیر کشت (ha)
گندم	۳۵	۱۳۸۷۶
جو	۱۷	۶۷۴۰
ذرت	۶	۲۳۷۹
یونجه	۱۰	۳۹۶۵
شبدر	۵	۱۹۸۲
سودانگراس	۳	۱۱۸۹
سورگوم	۳	۱۱۸۹
کنجد	۲	۷۹۳
سیب زمینی	۶	۲۳۷۹
هندوانه	۶	۲۳۷۹
گوجه فرنگی	۸	۳۱۷۲
لوبیا	۱/۵	۵۹۵
باقلا	۲/۵	۹۹۱
آفتابگردان	۸	۳۱۷۲
برنج	۵	۱۹۸۲

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 ۳/۲ دسی‌زیمنس بر متر است. عمق متوسط زهکش‌ها بین ۲ تا ۲/۵ متر و فاصله آنها ۵۰ متر، ضریب زهکشی ۱/۲ سانتی‌متر بر روز، شعاع مؤثر زهکش‌ها بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر و عمق لایه غیرقابل نفوذ ۵ متر بوده که از جمله ورودی‌های مورد نیاز مدل برای پارامترهای سیستم زهکشی به شمار می‌روند.

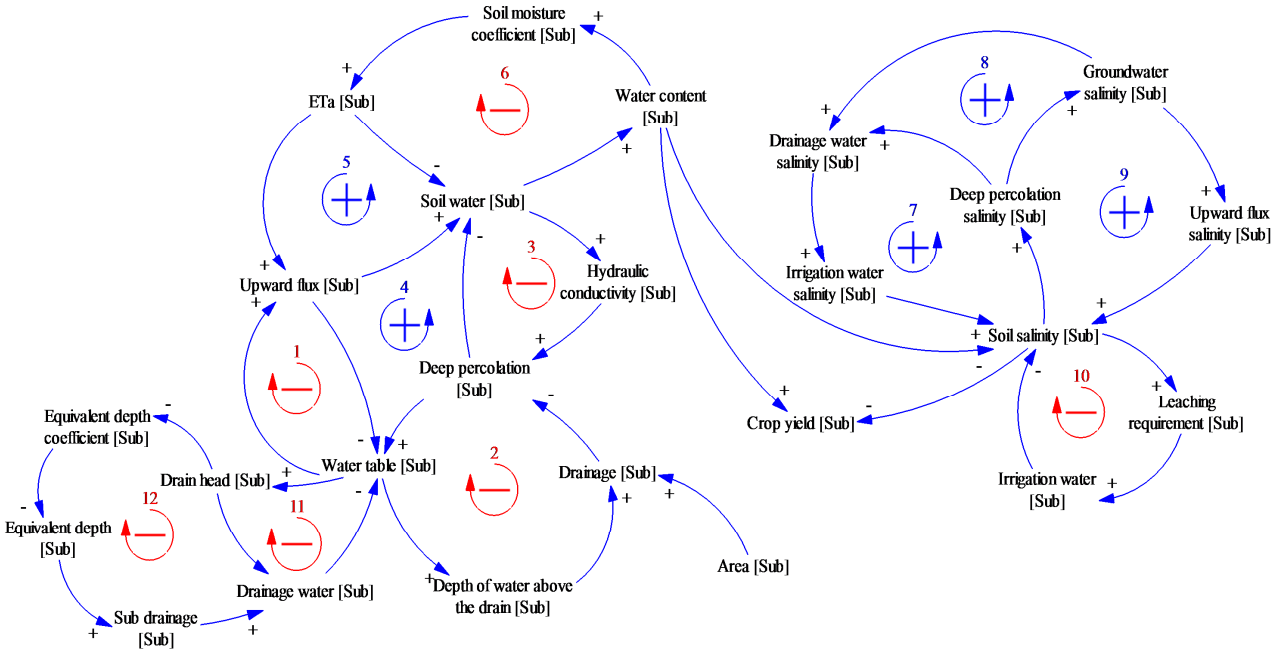
هزینه‌های تولید محصولات شامل هزینه‌های متغیر و ثابت است. هزینه‌های متغیر هر محصول در ارتباط با مقدار آب مصرفی محصولات بوده که بستگی به مقدار آب مصرفی، نوع منبع آب (سطحی یا زیرزمینی) و سایر هزینه‌های در ارتباط با آب مصرفی دارد و هزینه‌های ثابت هر یک از محصولات نیز شامل هزینه‌های آماده‌سازی زمین، تهیه زمین، کاشت، داشت و برداشت است. هزینه متغیر هر محصول در این پژوهش، که هزینه آب‌بهای سطحی است، برای سال‌های ۱۳۹۲ الی ۱۳۹۶ مقادیر ثابت ۱۳۰، ۱۷۰، ۲۱۰، ۲۳۰ و ۲۵۰ ریال بر مترمکعب در نظر گرفته شد (۵).

متوسط هزینه تولید محصولات کشاورزی به تفکیک مراحل مختلف کشت برای سال‌های ۱۳۹۲ الی ۱۳۹۶ از جهاد کشاورزی استان خوزستان جمع‌آوری گردید. مجموع هزینه‌های ثابت در واحد سطح هکتار برای محصولات کشت‌شده در شبکه جفیر در سال‌های فوق به‌ترتیب برابر با ۶۷۶، ۷۸۹، ۸۰۲، ۹۵۷۷ و ۸۸۹ میلیون ریال بر هکتار است. همچنین، متوسط قیمت فروش هر کیلوگرم از محصولات زراعی این شبکه در سال‌های زراعی ۱۳۹۲ الی ۱۳۹۶ نیز به‌ترتیب برابر با ۱۹۸۶۹، ۲۲۳۸۷، ۲۴۶۴۴، ۲۵۰۳۴ و ۲۶۴۹۵ ریال بر کیلوگرم است (۵).

مدل‌سازی پویایی سیستم

در این پژوهش، از محیط برنامه نویسی VENSIM که ابزاری برای مدل‌سازی به زبان پویایی سیستم و به صورت شی‌گرا بر پایه بازخورد می‌باشد، استفاده شد. این ابزار مدل‌سازی، امکان ایجاد مدل‌های پیچیده را با سهولت بیشتری نسبت به زبان‌های برنامه‌نویسی مرسوم ایجاد می‌کند. یکی از مراحل اصلی مدل‌سازی به روش پویایی سیستم، ترسیم نمودارهای علت و معلولی است. این نمودارها ابزاری مناسب برای ترسیم ساختار بازخوردی سیستم‌ها می‌باشند. این فرایندهای بازخوردی شامل حلقه‌های بازخوردی مثبت و منفی است که روابط علت و معلولی یک سیستم را نشان می‌دهند و در واقع، ساختار اصلی یک سیستم هستند. درصورتی‌که تغییرات متغیر مستقل و وابسته در یک جهت باشند رابطه علّی مثبت خواهیم داشت و در صورتی‌که تغییرات متغیر مستقل و وابسته عکس یکدیگر باشند رابطه علّی منفی خواهیم داشت. پس از ترسیم نمودارهای علت و معلولی باید نمودارهای حالت و جریان را ترسیم کرد. این نمودارها همراه با بازخورد دو مفهوم اساسی تئوری تحلیل پویایی سیستم هستند. در واقع، حالت‌ها انباشتگی‌های سیستم هستند و نشان‌دهنده وضعیت سیستم بوده و تصمیمات و فعالیت‌های سیستم بر پایه آنها صورت می‌گیرد. جریان‌ها نیز نشان‌دهنده فرایندهایی هستند که متغیر حالت را پر یا خالی می‌کنند. می‌توان گفت که در یک سیستم، بر اساس متغیر حالت، تصمیم‌ها اتخاذ شده و با تغییر متغیرهای جریان، آن تصمیمات اعمال می‌شوند.

حلقه‌های علت و معلولی محیط آب و خاک به منزله نمونه‌ای از حلقه‌های کار شده در این مدل به‌صورت شکل ۲ است. در این شکل به‌عنوان نمونه در حلقه شماره ۲، افزایش نفوذ عمقی باعث افزایش تراز سطح آب می‌شود و با افزایش تراز سطح آب، عمق آب روی زهکش و میزان زه‌آب خروجی افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش زه‌آب خروجی باعث کاهش نفوذ عمقی شده و یک حلقه منفی را تشکیل می‌دهد. در حلقه چهارم نیز با افزایش نفوذ عمقی، تراز سطح آب افزایش یافته و با بالاآمدن تراز سطح آب، میزان جریان رو به بالا افزایش یافته و باعث افزایش رطوبت خاک خاک می‌شود. با توجه به رابطه بین هدایت هیدرولیکی و رطوبت خاک در ناحیه غیر اشباع،



شکل ۲. حلقه‌های علت و معلولی محیط آب و خاک به‌صورت Subscript

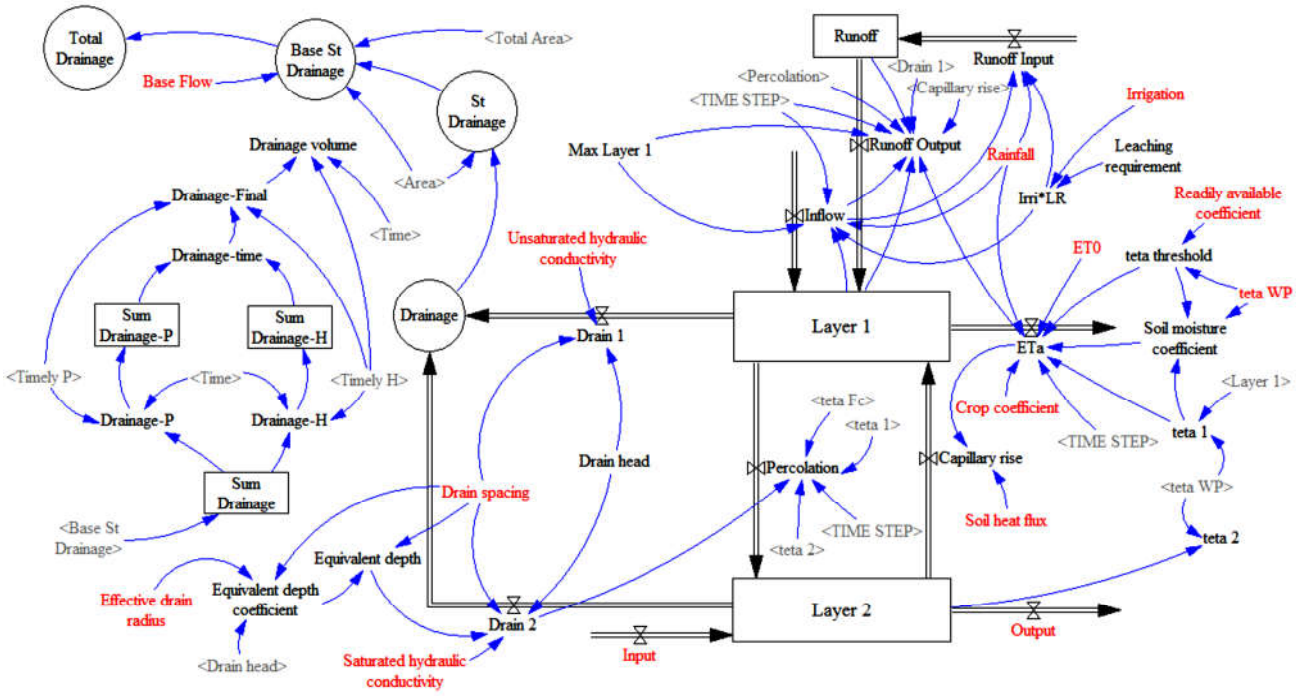
افزایش رطوبت خاک باعث افزایش هدایت هیدرولیکی شده و درنهایت میزان نفوذ عمقی افزایش می‌یابد. بنابراین، این حلقه یک حلقه مثبت است. مساحت آبیاری هر مزرعه، به‌عنوان یک پارامتر ورودی تأثیرگذار تعریف شده است. درواقع، مساحت سطح زیر کشت برای هر محصول، تأثیر مستقیم بر میزان زه‌آب خروجی از هر مزرعه داشته و با تغییر مساحت، میزان زه‌آب خروجی تغییر خواهد کرد. در شکل ۲ عملکرد محصولات زراعی یک پارامتر خروجی است و یک حلقه را تشکیل نمی‌دهد. درواقع، مقدار رطوبت و شوری خاک تأثیر مستقیم بر عملکرد محصول داشته و با ایجاد شرایط مطلوب رطوبتی و کاهش شوری خاک می‌توان عملکرد محصول را افزایش داد.

با توجه به یکسان بودن روابط علت و معلولی بین پارامترهای سیستم آب و خاک و گیاه، از تابع Subscript در نرم افزار VENSIM استفاده و بدین‌ترتیب 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 هیدرولیکی و غیره)، شرایط زهکشی (عمق زهکش و فاصله زهکش) و 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 سه‌بعدی ایجاد و به‌عنوان ورودی برای مدل تعریف شد. در چنین شرایطی مدل می‌تواند به‌صورت همزمان و به‌صورت جامع و یکپارچه، سیستم آب، خاک و گیاه تمامی مزارع درون یک شبکه (۱۵ مزرعه) را نسبت به زمان شبیه‌سازی نماید. بنابراین، تمامی شرایط مذکور به‌صورت همزمان در قالب یک مدل جامع و یکپارچه برای یک دوره ۵ ساله تهیه شد.

با تبدیل حلقه‌های علت و معلولی به نمودارهای حالت و جریان، مدل شبیه‌سازی ایجاد می‌شود که در شکل ۳ نمودار حالت و جریان محیط آب و خاک و عملکرد محصولات زراعی به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی پاول

روش پاول یکی از پرکاربردترین روش‌های بهینه‌سازی عددی نامقید برای مسائل گسسته است و بر پایه توابع کوادراتیک



شکل ۳. نمودار حالت و جریان محیط آب و خاک و عملکرد محصولات به‌صورت Subscript

(مجذوری) بنا شده است. این روش منجر به یک کلاس رایج در روش‌های بهینه‌سازی موسوم به برنامه‌ریزی مجذوری شده است (۱۳). روش پاول از یک نقطه تصادفی (حدس اولیه) شروع می‌کند و در هر مرحله تکرار، در راستای جهت‌های مزدوج جستجو کرده تا به نقطه بعدی برسد. آن قدر این کار ادامه پیدا کرده تا به مینیمم تابع هدف برسد. می‌توان این روش را به‌عنوان یک روش شبه- نیوتون و همچنین گرادیان مزدوج نیز در نظر گرفت (۱۲). در قسمت بهینه‌سازی نرم‌افزار VENSIM از الگوریتم پاول جهت حل مسائل بهینه‌سازی نامقید در مسائل گسسته استفاده می‌شود. اما روش‌هایی مانند بهینه‌سازی بیژن، یک استراتژی طراحی پی‌درپی برای بهینه‌سازی جهانی توابع جعبه سیاه بوده که هیچ فرم عملکردی به خود نمی‌گیرد و به دلیل محدودیت محاسباتی کامپیوترها و امکان تجمع خطای عددی، مورد استقبال کدهای کامپیوتری برای کاربردهای صنعتی و بزرگ مقیاس است. درحالی‌که روش پاول در زمره سریع‌ترین و مدرن‌ترین روش‌های شبه نیوتن یا جستجوی غیر مستقیم است (۲).

ایده اصلی روش پاول به این صورت است که در ابتدای تکرار، ماتریس تبدیل مختصات به صورت ماتریس واحد در نظر گرفته می‌شود ولی در تکرارهای بعدی، ماتریس مربوطه به‌روز شده تا درنهایت به معکوس هسین تبدیل شود. گام‌های مربوط به این روش به‌صورت زیر می‌باشد (۸):

مرحله اول: X_i نقطه آغازین بوده، به‌صورتی که اگر ماتریس H_i در نقطه شروع $i=0$ باشد، $I=H_0$ (I به‌عنوان ماتریس واحد) به صورت ماتریس $n\times n$ مثبت معین متقارن بوده است.

مرحله دوم: گرادیان تابع، ∇f_i در نقطه X_i محاسبه و جهت جستجو به صورت رابطه ۱ انتخاب می‌شود:

$$S_i = -S_i \times \nabla f_i \qquad (۱)$$

مرحله سوم: گام بهینه از نقطه X_i شروع شده و در جهت S_i، تابع با طول گام بهینه (λ_i) مینیمم می‌شود. این مینیمم میانی در نقطه X_{i+1} اتفاق می‌افتد و به‌صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$X_{i+1} = X_i + (\lambda_{i+1} \times H_i \times \nabla f(x_i)) \qquad (۲)$$

مرحله چهارم: نقطه جدید X_{i+1} برای بهینگی آزمایش می‌شود.

اگر X_{i+1} بهینه باشد، فرایند تکراری متوقف می‌شود، در غیر این صورت مرحله پنجم انجام می‌شود.

مرحله پنجم: ماتریس H_i به صورت روابط زیر به‌روز می‌شود:

$$H_i = H_{i-1} + M_i + N_i \quad (۳)$$

$$M_i = \frac{(X_i - X_{i-1}) \times (X_i - X_{i-1})^T}{(X_i - X_{i-1})^T \times \left(\nabla f(X_i) - \nabla f(X_{i-1})\right)} \quad (۴)$$

$$N_i = -\frac{\left(H_{i-1} \times \left(\nabla f(X_i) - \nabla f(X_{i-1})\right)\right) \times \left(H_{i-1} \times \left(\nabla f(X_i) - \nabla f(X_{i-1})\right)\right)^T}{\left(\nabla f(X_i) - \nabla f(X_{i-1})\right)^T \times H_{i-1} \times \left(\nabla f(X_i) - \nabla f(X_{i-1})\right)} \quad (۵)$$

به‌طور دقیق‌تر ماتریس‌های M_i و N_i دارای خواص زیر هستند:

$$\sum_{i=1}^{n} M_i = H_{i-1} \quad \text{and} \quad \sum_{i=1}^{n} N_i = -H_i \quad (۶)$$

دو ماتریس بالا طوری نرمالیزه شده و مشابه مشتق اول و دوم پیشنهاد داده شده‌اند که درنهایت ماتریس H_i همواره مثبت معین باقی می‌ماند و یک تقریب برای معکوس ماتریس مشتق‌های جزیی مرتبه دوم تابع هدف f خواهد بود. آن‌گاه الگوریتم مزبور بعد از n تکرار، علاوه بر رسیدن به نقطه بهینه *X، H_i به ماتریس i*-1 همگرا می‌شود.

طراحی و ارزیابی سیاست‌ها

در این پژوهش سعی شد با توجه به شرایط موجود، اقدام به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی الگوی کشت شبکه آبیاری و زهکشی جفیر کرده و درنهایت نتایج بدست آمده را مورد ارزیابی قرار داد. شبکه آبیاری و زهکشی جفیر شامل ۱۵ مزرعه می‌باشد که در هر مزرعه یک محصول زراعی کشت می‌شود. بنابراین، در این شبکه ۱۵ محصول زراعی مختلف کشت می‌شود.

تابع هدف

تابع هدف بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی شبکه با هدف بیشینه‌کردن نسبت سودآوری به صورت زیر است:

$$\text{Maximize } A^* = \frac{\text{Total Income}}{\text{Total Cost}} \quad (۷)$$

$$\text{Total Income} = \sum_{St=1}^{n} \sum_{Ty=1}^{m} \left(Y_{a\,St,Ty} \times A_{St,Ty} \times SP_{St,Ty}\right) \quad (۸)$$

$$\text{Total Cost} = \sum_{St=1}^{n} \sum_{Ty=1}^{m} \left(CPC_{St,Ty} \times A_{St,Ty}\right) \quad (۹)$$

$$CPC = \left(P_C + G_C + H_C + L_C + Pre_C\right) + \left(W_P \times W_{Co}\right) \quad (۱۰)$$

در این روابط اندیس St سطح زیر کشت هر یک محصولات در شبکه آبیاری و زهکشی جفیر بر حسب هکتار (اولین Subscript)، اندیس Ty سال زراعی بر حسب سال (دومین Subscript)، Total Income کل درآمد حاصل از فروش محصولات زراعی (ریال)، Total Cost کل هزینه حاصل از کاشت، داشت، برداشت، تهیه زمین، آماده‌سازی زمین و آب مصرفی محصولات زراعی (ریال)، Y_a عملکرد نسبی واقعی محصول (بدون بعد)، A سطح زیر کشت هر یک از محصولات زراعی در شبکه آبیاری و زهکشی (هکتار)، SP قیمت فروش هر یک از محصولات زراعی در شبکه آبیاری و زهکشی (ریال بر کیلوگرم)، P_C، G_C، H_C، L_C و Pre_C به‌ترتیب هزینه کاشت، داشت، برداشت، تهیه زمین و آماده‌سازی زمین هر یک از محصولات زراعی در شبکه آبیاری و زهکشی (ریال بر هکتار)، W_P قیمت آب مصرفی هر یک از محصولات زراعی در شبکه آبیاری و زهکشی (ریال بر مترمکعب) و W_{Co} مقدار آب مصرفی هر یک از محصولات زراعی در شبکه آبیاری و زهکشی (مترمکعب بر هکتار).

باید خاطر نشان کرد که در شرایطی که تنش شوری و تنش کم‌آبی توأمان وجود داشته باشد، عملکرد محصول در رابطه ۸ تحت تأثیر هر دو تنش کاهش یافته و برای کمّی کردن آن، از توابع تولید- آب- شوری (روابط ۱۱ و ۱۲) استفاده می‌شود. بنابراین، در شرایط تنش آبی و شوری، مدل تابع تولید- آب- شوری زیر در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت (۱).

$$Y_{a\,St,Ty} = Y_{m\,St}\left[1 - K_{y\,St}\left(1 - \frac{ET_{a\,St,Ty}}{ET_{0\,St,Ty}}\right)\right] \quad (۱۱)$$

$$\frac{ET_{a\,St,Ty}}{ET_{0\,St,Ty}} = \left[1 - \frac{b_{St}}{100 \times K_{y\,St}} \left(EC_{e\,St,Ty} - EC_{e\,threshold\,St}\right)\right] \times \left[\frac{TAW_{St} - D_{r\,St}}{TAW_{St} - RAW_{St}}\right] \quad (۱۲)$$

از تابع فوق به‌منظور محاسبه عملکرد محصول نسبت به کمیت و کیفیت آب آبیاری هر محصول استفاده شد.

در این روابط Y_m عملکرد نسبی بیشینه محصول (بدون بعد)، K_y ضریب حساسیت به تنش آبی (بدون بعد)، ET_a تبخیر و تعرق واقعی ($mm.day^{-1}$)، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد ($mm.day^{-1}$)، b شیب کاهش عملکرد محصول به‌ازای افزایش یک دسی‌زیمنس بر متر هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (درصد)، EC_e میانگین هدایت الکتریکی عصاره اشباع در محدوده توسعه ریشه گیاه ($dS.m^{-1}$)، $EC_{e\ threshold}$ هدایت الکتریکی عصاره اشباع در آستانه کاهش عملکرد محصول ($dS.m^{-1}$)، TAW کل آب قابل استفاده خاک عمق توسعه ریشه گیاه (mm)، D_r مقدار تخلیه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه (mm) و RAW آب سهل الوصل خاک در عمق توسعه ریشه گیاه (mm).

تعریف قیود

۱- قیود غیرپلکانی

در واقع قیود محدودیت‌هایی هستند که با توجه به شرایط مورد نظر برای مسئله تعریف می‌شود. 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 ۱۳). همچنین، با توجه به مساحت شبکه آبیاری و زهکشی جفیر که مقداری ثابت است، مجموع مساحت محصولات زراعی در شبکه (۱۵ مزرعه)، از مجموع مساحت شبکه (A_{Total}) نباید بیشتر شود (رابطه ۱۴). از سوی دیگر فرض شد مساحت زیر کشت هر محصول زراعی در شبکه می‌تواند از صفر تا ۲ برابر وضع موجود در نظر گرفته شود (رابطه ۱۵).

$$\sum_{St=1}^{n} AW_{St} \le AW_{Total} \quad n = 15 \quad (۱۳)$$

$$\sum_{St=1}^{n} A_{St} \le A_{Total} \quad n = 15 \quad (۱۴)$$

$$0 \le A_{St} \le 2A_{St} \quad (۱۵)$$

۲- قیود پلکانی

در این قسمت علاوه بر محدودیت‌های تعریف شده در روابط ۱۱ و ۱۲، فرض شد حداقل و حداکثر تغییر در مساحت محصولات شبکه آبیاری و زهکشی جفیر در هر سال به میزان ۱۰ درصد وضع موجود تغییر یابد (به‌صورت پلکانی). 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.

$$(1-0.1i) \times A_{St} \le A_{St} \le (1+0.1i) \times A_{St} \quad i = 1,2,3,4,5 \quad (۱۶)$$

شاخص‌های آماری

به‌منظور ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج مدل، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE)، میانگین خطای اریبی (MBE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. شکل ریاضی این آماره‌ها به‌صورت زیر است:

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(Y_m - Y_p\right)^2}}{n} \quad (۱۷)$$

$$SE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(Y_m - Y_p\right)^2}}{\bar{Y}_m} \quad (۱۸)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(Y_p - Y_m\right)}{n} \quad (۱۹)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} \left(Y_m - \bar{Y}_m\right)\left(Y_p - \bar{Y}_p\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(Y_m - \bar{Y}_m\right)^2 . \sum_{i=1}^{n} \left(Y_p - \bar{Y}_p\right)^2} \quad (۲۰)$$

در این روابط n تعداد روزهای دوره مورد مطالعه، Y_m مقادیر اندازه‌گیری شده در هر روز، Y_p مقدار پیش‌بینی شده با استفاده از مدل، $\overline{Y}_m$ میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و $\overline{Y}_p$ میانگین داده‌های پیش‌بینی شده پارامتر نسبت منفعت به هزینه تمامی محصولات زراعی شبکه طی دوره ۵ ساله می‌باشد.

نتایج و بحث

پایداری مدل در شرایط حدی

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 هرگز رخ ندهد ولی مدل طبق این شرایط باید درست عمل کند.

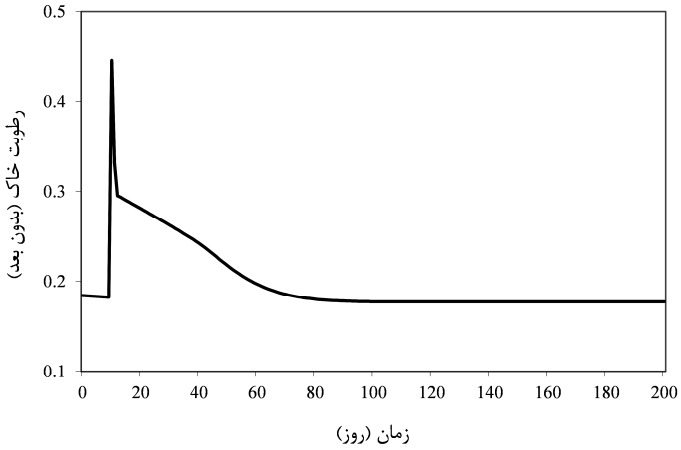
در این قسمت با انجام یک آبیاری واحد، چگونگی تغییر رطوبت خاک در ناحیه ریشه به‌عنوان شرایط حدی به مدل اعمال شد. بنابراین، با انجام یک آبیاری کامل، رطوبت خاک تا حد رطوبت اشباع که برابر با ۰/۴۳ است افزایش یافت. با متوقف‌کردن آبیاری، انتظار می‌رود رطوبت خاک در ناحیه ریشه به‌تدریج کاهش یافته تا به نقطه پژمردگی برابر با ۰/۱۷ برسد و پس از آن در مقدار ثابتی برابر با رطوبت خاک در نقطه پژمردگی باقی بماند. ازطرفی انتظار می‌رود میزان تخلیه خاک از آب مازاد تا نقطه ظرفیت مزرعه که ۰/۳ است سریعتر و پس از آن به‌دلیل نیروهای موجود در خاک تا نقطه پژمردگی با روند کندتری صورت گیرد. همچنین، در این آزمون سطح ایستابی عمیق درنظر گرفته شد تا صعود موئینگی تأثیری بر رطوبت خاک نداشته باشد. تغییرات رطوبت خاک در ناحیه ریشه گیاه به صورت شکل ۴ می‌باشد. دیده می‌شود که تغییرات مطابق با انتظار است و می‌توان صحت مدل را تحت این شرایط تایید کرد.

اعتبارسنجی سودآوری

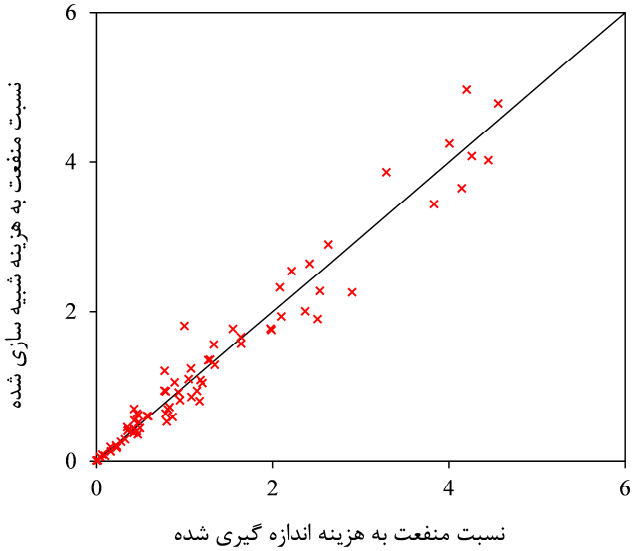
پس از ایجاد مدل شبیه‌سازی، باید بتوان اعتبار آن را تأیید کرد. به‌منظور بررسی عملکرد صحیح مدل در شبیه‌سازی نسبت سود به هزینه، از آمار و اطلاعات محصولات زراعی مختلف طی دوره ۵ ساله در شبکه آبیاری و زهکشی جفیر استفاده شد. شکل ۵ نسبت منفعت به هزینه شبیه‌سازی شده شبکه آبیاری و زهکشی جفیر را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، مدل نسبت منفعت به هزینه تمامی محصولات زراعی شبکه را به‌درستی شبیه‌سازی کرده است که نشان از توانایی آن در شبیه‌سازی دارد. میانگین مقادیر پارامترهای آماری RMSE، SE، MBE و R^2 برای نسبت منفعت به هزینه تمامی محصولات زراعی این شبکه طی دوره ۵ ساله به‌ترتیب برابر با ۰/۲۵، ۰/۱۹، ۰/۰۰۵- و ۰/۹۶ است. در پژوهشی که در آن به شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی مختلف در شبکه آبیاری سمت راست آبشار اصفهان با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم پرداخته شده بود، نشان دادند که این روش در شبیه‌سازی عملکرد محصولات و پارامترهای اقتصادی از جمله نسبت سود به هزینه بسیار توانمند است (۱۱).

تجزیه و تحلیل نتایج بهینه‌سازی

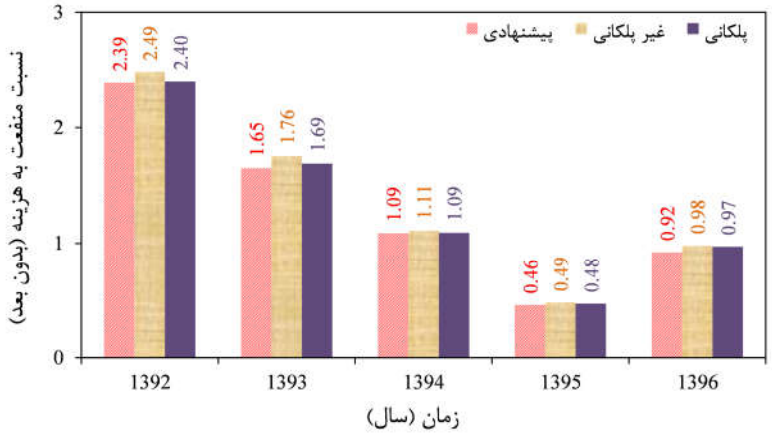
با هدف بیشینه‌کردن نسبت منفعت به هزینه، به بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی جفیر در دو حالت غیر پلکانی و پلکانی پرداخته شد. پس از اعمال تابع هدف و قیود، مدل به دنبال یافتن بهترین جواب با اجراهای مکرر و دستیابی به سطح زیر کشت بهینه محصولات زراعی شبکه است. بنابراین، در این پژوهش مدل پس از ۳۱۴۹۴ اجرا، موفق به دستیابی به جواب بهینه شده و عملیات اجرای مدل متوقف شده است. در شکل ۶ نسبت منفعت به هزینه بهینه‌سازی شده شبکه جفیر در هر سال با شرایط پیشنهادی مقایسه شده است. همانطور که دیده می‌شود پس از اعمال بهینه‌سازی، مجموع نسبت منفعت به هزینه در همه سال‌ها افزایش یافته است. این



شکل ۴. تغییرات رطوبت خاک در ناحیه ریشه گیاه با توجه به آبیاری واحد



شکل ۵. نسبت منفعت به هزینه محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی جفیر (ایثارگران)



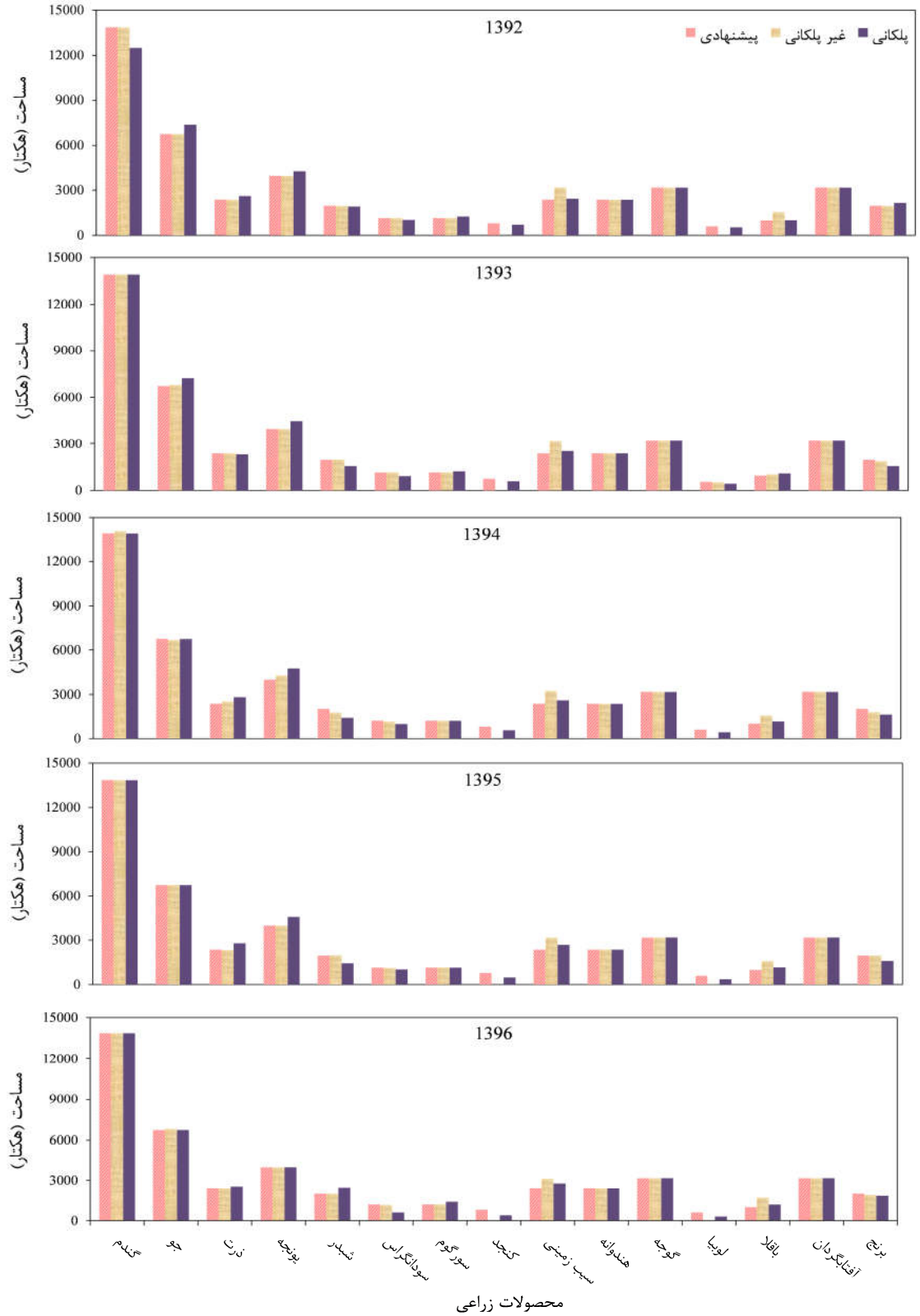
شکل ۶. مقایسه سودآوری بهینه‌شده محصولات شبکه آبیاری و زهکشی جفیر (ایثارگران) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

افزایش در حالت پلکانی در مقایسه با حالت غیر پلکانی کمتر است. زیرا در حالت پلکانی، مدل در هر سال تنها قادر است ۱۰ درصد تغییر در سطح زیر کشت محصولات اعمال کند که نشان از موفقیت مدل در بهینه‌سازی و دقت عمل در لحاظ‌کردن تابع هدف و قیود مربوطه دارد. مطابق با شکل ۶، نسبت منفعت به هزینه از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۵ روند کاهشی و در سال ۱۳۹۶ روند افزایشی داشته است. علت کاهش میزان منفعت به هزینه از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۵، افزایش هزینه‌های تولید محصول می‌باشد. به‌طوری‌که در سال ۱۳۹۵ نسبت به ۱۳۹۴ به اندازه ۱۹/۳ درصد افزایش هزینه‌های تولید محصولات را شاهد بودیم اما فروش محصولات افزایش چندانی نداشته و در سال ۱۳۹۵ نسبت به ۱۳۹۴ به اندازه ۱/۶ درصد رشد داشته است.

دلیل افزایش میزان منفعت به هزینه در سال ۱۳۹۶، کاهش هزینه‌های تولید به اندازه ۷/۱ درصد نسبت به ۱۳۹۵ و همچنین افزایش قیمت فروش به اندازه ۵/۸ درصد است. شکل ۷ به مقایسه سطح زیر کشت بهینه‌شده محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی جفیر در طول دوره آماری مورد مطالعه و در دو حالت غیر پلکانی و پلکانی می‌پردازد. همانطور که دیده می‌شود بعضی از محصولات مانند کنجد و لوبیا، با توجه به هزینه‌ها، میزان آب مصرفی و قیمت پایین فروش آن، ارزش اقتصادی تولید در منطقه مورد مطالعه را ندارند و در حالت غیر پلکانی با توجه به تعریف خاص قید آن، سطح زیر کشت این محصولات همان ابتدا صفر شده است، اما در حالت پلکانی سطح زیر کشت این محصولات به تدریج کاهش یافته است. همچنین سودانگراس با توجه به قیمت فروش و هزینه‌های تولید، سطح زیر کشت آن روند کاهشی را سپری کرده است. از سوی دیگر برخی محصولات مانند سیب زمینی و باقلا در بیشتر سال‌ها تولیدی مقرون به صرفه داشته و سطح زیر کشت آنها در هر دو حالت غیر پلکانی و پلکانی نسبت به شرایط واقعی افزایش یافته است. محصولاتی مانند گندم، جو، ذرت، سورگوم، هندوانه، گوجه فرنگی و آفتابگردان تقریباً شرایط با ثباتی را طی کرده و کاهش یا افزایش محسوسی در سطح زیر کشت این محصولات پدید نیامده است. اما محصولاتی مانند یونجه، شبدر و برنج شرایط نوسانی را طی سال‌های ۱۳۹۲ الی ۱۳۹۶ سپری کردند که علت آن نوسانات در قیمت فروش و هزینه‌های تولید این محصولات بوده است. البته بایستی درنظر داشت که با توجه به سطح زیر کشت ثابت شبکه آبیاری و زهکشی جفیر، افزایش یا کاهش در قیمت فروش و هزینه‌های تولید محصولات در این شبکه طی یک سال زراعی، در تعارض با یکدیگر بوده و در همان سال مبنا، به‌فرض با افزایش قیمت فروش یک محصول سطح زیر کشت آن افزایش می‌یابد. این امر ممکن است بر روی محصولی که شرایط ثابتی داشته تأثیر گذاشته و سطح زیر کشت آن را کاهش دهد. بنابراین، این موضوع نشان‌دهنده پویابودن روش تحلیل پویایی سیستم است و نشان می‌دهد که با تغییر شرایط اولیه، مدل بهترین حالت را در نظر گرفته تا بیشترین بازده طبق تابع هدف مربوطه حاصل شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از تکنیک تحلیل پویایی سیستم سطح زیر کشت محصولات زراعی در مقیاس یک شبکه آبیاری و زهکشی شبیه‌سازی شد. سپس به ارزیابی عملکرد صحیح مدل در شبیه‌سازی پرداخته شد. نتایج شبیه‌سازی نسبت منفعت به هزینه با استفاده از نرم‌افزار VENSIM در شبکه آبیاری و زهکشی جفیر نشان از توانایی آن در شبیه‌سازی داشت. میانگین مقادیر پارامترهای آماری RMSE، SE، MBE و R^2 برای نسبت منفعت به هزینه تمامی محصولات زراعی شبکه به‌ترتیب برابر با ۰/۲۵، ۰/۱۹، ۰/۰۰۵- و ۰/۹۶



شکل ۷. مقایسه سودآوری بهینه‌شده کل محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی جفیر (ایثارگران) طی دوره ۵ ساله (رنگی در نسخه الکترونیکی)

بدست آمد. پس از اعتباریابی مدل در شبیه‌سازی، به بهینه‌سازی سطح زیر کشت محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی جفیر پرداخته شد. در این راستا با هدف بیشینه‌کردن نسبت منفعت به هزینه، به بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات این شبکه در دو حالت غیر پلکانی و پلکانی پرداخته شد. در حالت غیر پلکانی 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 به دلیل فرهنگ‌سازی اجرای الگوی کشت بهینه، این تغییر به آرامی و در هر سال به میزان ۱۰ درصد وضع موجود می‌باشد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان‌دهنده دقت و توانایی مدل در بهینه‌سازی و دست‌یابی به اهداف مورد نظر داشت. با مقایسه نسبت منفعت به هزینه کل محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی جفیر در هر دو حالت غیر پلکانی و پلکانی، دیده شد که افزایش سودآوری محصولات در حالت غیر پلکانی بیشتر از حالت پلکانی است که دلیل آن نیز آزادی عمل مدل در حالت غیر پلکانی می‌باشد.

با مقایسه سطح زیر کشت بهینه‌شده محصولات زراعی شبکه آبیاری و زهکشی جفیر در دو حالت غیر پلکانی و پلکانی می‌توان دریافت که برخی محصولات مانند کنجد، لوبیا و سودانگراس تقریباً ارزش اقتصادی تولید در منطقه مورد مطالعه را ندارند و سطح زیر کشت آنها روند کاهشی دارد. اما تولید محصولاتی مانند سیب‌زمینی و باقلا مقرون به صرفه بوده و سطح زیر کشت آنها افزایش یافته است. محصولاتی مانند گندم، جو، ذرت، سورگوم، هندوانه، گوجه فرنگی و آفتابگردان نیز تقریباً شرایط باثباتی را طی کرده و کاهش یا افزایش محسوسی در سطح زیر کشت این محصولات بوجود نیامده است.

از قابلیت مدل تهیه شده در این تحقیق 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. FAO 56. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, Irrigation and Drainage. Paper No. 56.
2. Fletcher, R. 1981. Practical Methods of Optimization. Vol. I, Unconstrained Optimization, John Wiley and Sons, Inc., New York.
3. Forrester, J. W. 1961. Industrial Dynamics, Productivity press. Portland Oregon.
4. Hatam, A. and M. J. Monem. 2013. Analysis of water consumption optimization through the improvement of irrigation networks with a systems dynamics approach. *In*: Proceeding of 4th Iranian Water Resources Management Conference, Amirkabir University, Tehran, Iran (In Farsi).
5. Jahad Agricultural Organization of Khouzestan. 2018. Available online at: https://ajkhz.ir/main/index.php/pages/general/ghimat-mahsolat-keshavarzi.html (In Farsi).
6. Kordian Hamedani, R. 2015. Optimization of cropping pattern for groundwater protection in Asadabad plain using system dynamics method. Master thesis, BU-Ali Sina University, Hamedan, I.R. Iran (In Farsi).
7. 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): 153-59 (In Farsi).
8. Lazarou, S., V. Vita and L. Ekonomou. 2011. Application of Powell's optimization method for the optimal number of wind turbines in a wind farm. *IET Science, Measurement and Technology* 5(3): 77-80.
9. 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* 135:1(32): 32-38.
10. Nozari, H., S. Azadi and V. Rezaverdinejad. 2019. Simulation of the effect of salinity and water stress on sugar beet using the system dynamics approach. *Journal of Water and Soil Science* 23 (1): 337-350 (In Farsi).

11. Nozari, H., M. Heydari and S. Azadi. 2014. Simulation of a right Abshar irrigation network and its cropping pattern using a system dynamics approach. *Irrigation and Drainage Engineering* 140: 1-7.
12. Powell, M. J. D. 1962. An Iterative Method for Finding Stationary Values of a Function of Several Variables. *The Computer Journal* 5: 147-151.
13. Rao, S. S. 2009. Engineering Optimization: Theory and Practice. John Wiley and Sons, Inc, Indiana, USA.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 26, No. 1, Spring 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Simulation and Optimization of Profitability of Jofeyr (Isargaran) Irrigation and Drainage Network Products Using System Dynamics Approach

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

(Received: March 29-2021; Accepted: June 23-2021)

Abstract

In the present study, a model was developed using a system dynamics approach to simulate and optimize the profitability of crops of the Jofeyr (Isargaran) Irrigation and Drainage Network located in Khuzestan Province. To validate the results, the statistical indicators of root mean square error (RMSE), standard error (SE), mean biased error (MBE), and determination coefficient (R^2) were used. To validate the simulation results of the benefit-cost ratio, the values of these indicators were obtained 0.25, 0.19, 0.005, and 0.96, respectively. Then, to determine the optimal cultivated area of the network and increase the profitability, the cropping pattern was determined both non-stepwise and stepwise in 2013 to 2017 cropping years. In the non-stepwise, the cultivated area of each crop changed from zero to 2 times of current situation. In stepwise, due to social and cultural conditions of inhabitants, this change was slow and 10% of the current situation every year. The analysis of the results showed the success of the model in optimizing and achieving the desired goals and the total benefit-cost ratio increased in all years both non-stepwise and stepwise. For example, in 2017 compared to 2016, production costs decreased by 7.1 percent and sales prices increased by 5.8 percent, and increased the benefit-cost in 2017 compared to the previous year. The results showed that the present model has good accuracy in simulating and optimizing the irrigation network, its cropping pattern, and defining other scenarios.

Keywords: Cropping pattern, Economic profitability, Crop yield, Modeling, VENSIM software

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