شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تلفیق آب‌های سطحی و زیرزمینی با روش پویایی سیستم (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت عباس)

حمزه‌علی علیزاده*، علیرضا حسینی و مریم سلطانی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵)

چکیده

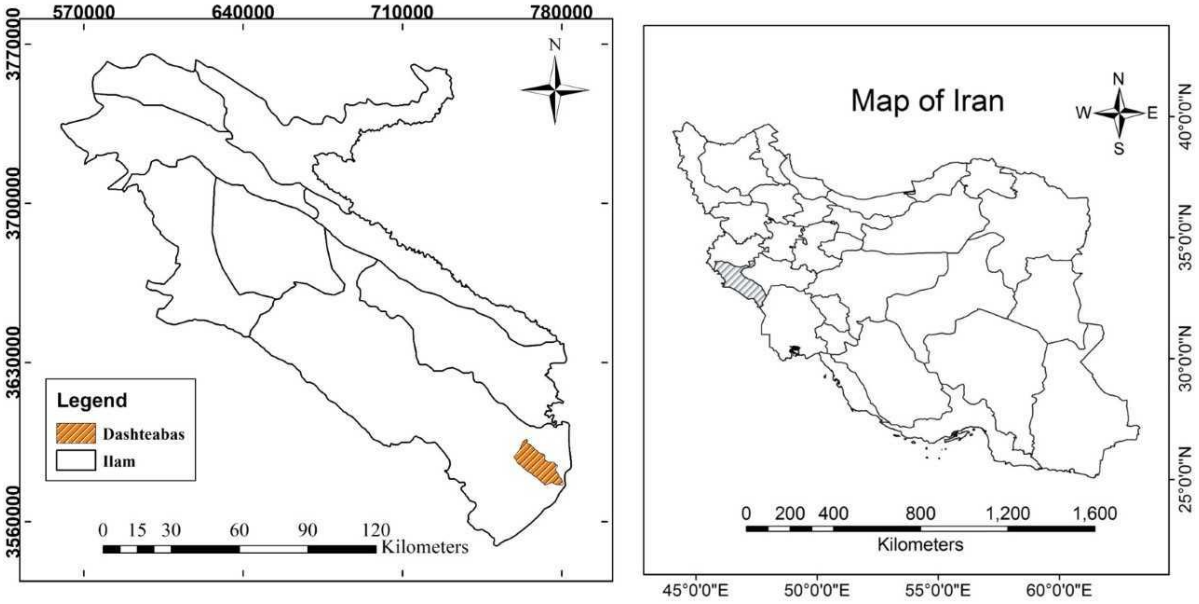
توسعه شبکه آبیاری دشت عباس و انتقال آب سد کرخه بدون توجه به منابع آب زیرزمینی دشت، باعث ماندابی شدن اراضی کشاورزی دشت در سال‌های اخیر شده است. هدف از این مطالعه بهینه‌سازی تلفیق منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت عباس برای حداقل کردن مشکلات ماندابی شدن اراضی و دستیابی به حداکثر درآمد خالص دشت بود. برای این منظور ابتدا رفتار آبخوان دشت با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها شبیه‌سازی شد. سپس با استفاده از روش بهینه‌سازی چندمعیاره مدل Vensim تلفیق آب‌های سطحی و زیرزمینی با تابع هدف حداکثرسازی درآمد خالص دشت بهینه‌سازی شد. زمان شروع مدل‌سازی سال ۱۳۸۰ و پایان آن سال ۱۴۱۰ و به‌مدت ۳۰ سال است. مدل با استفاده از داده‌های زمانی سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۸ واسنجی و با استفاده از داده‌های زمانی سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵ صحت‌سنجی شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که مدل قادر است متغیرهای کلیدی تراز آب زیرزمینی (ME برابر ۶۰ سانتی‌متر، R^2 برابر ۹۷ درصد وRMSE برابر ۴۷ سانتی‌متر) و شوری آب زیرزمینی (ME برابر۰/۱۲۳ میکروموس بر سانتی‌متر، R^2 برابر ۷۴ درصد و RMSE برابر ۱۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر) را با دقت مناسب شبیه‌سازی کند. همچنین نتایج مدل بهینه‌سازی نشان داد که بهینه‌ترین نسبت مصرف آب سطحی و زیرزمینی برای تأمین نیاز کشاورزی دشت عباس به‌ترتیب ۶۵ و ۳۵ درصد است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با بهینه‌سازی تلفیق آب سطحی و زیرسطحی با صرفه‌جویی سالانه حدود ۱۰ میلیون متر مکعب آب می‌توان ۸۰۰ هکتار اراضی جدید را آبیاری کرد.

واژه‌های کلیدی: استفاده تلفیقی، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، پویایی سیستم، سطح آب زیرزمینی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: H.alizadeh@ilam.ac.ir

مقدمه

در اغلب مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران که منابع آب سطحی محدود است، بخش اعظم نیاز آبی بخش کشاورزی از طریق منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. در این شرایط مدیریت بهره‌برداری همزمان منابع آب سطحی و زیرزمینی موسوم به مدیریت تلفیقی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری آب‌های سطحی و زیرزمینی ابتدا باید رفتار این دو سیستم با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی بررسی شده و سپس برای بهینه‌سازی اهداف مدنظر از مدل‌های بهینه‌سازی استفاده کرد. مهم‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی مورد استفاده در مدیریت تلفیقی شامل مدل‌های عددی مانند Modflow (۳)، پویایی سیستم (۸)، منطق فازی (۲۰) و شبکه عصبی مصنوعی (۴) است. مدل‌های عددی مثل Modflow قادر به بررسی فعل و انفعالات بین آب سطحی و زیرسطحی بوده و با آنها می‌توان تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی را مورد بررسی قرار داد. لیکن نیاز به تخصص و مهارت کاربران و نیاز به اطلاعات ورودی زیاد از جمله محدودیت‌ها و عوامل کاهش محبوبیت آنها و روآوری به مدل‌هایی نظیر شبکه عصبی مصنوعی و پویایی سیستم شده است. شبکه عصبی مصنوعی یک رویکرد مدل‌سازی جعبه سیاه غیرخطی است که به داده‌های بلندمدت به‌نسبت زیادی برای آموزش نیاز دارد. رویکرد پویایی سیستم ضمن تجزیه‌وتحلیل مسائل بیوفیزیکی به صورت پویا و ادغام آنها با جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی، پیامدهای سیاستگذاری و تصمیم‌گیری‌های مدیریت منابع آب را مورد بررسی قرار می‌دهد (۱۰). مدل‌های بهینه‌سازی در زمینه تلفیق منابع آب عبارتند از: برنامه‌ریزی پویا (۱۸)، برنامه‌ریزی خطی (۱۱)، برنامه‌ریزی غیرخطی (۵)، الگوریتم ژنتیک (۱۲) و پویایی سیستم‌ها (۳). روش‌های مدل‌سازی- بهینه‌سازی که مدل‌سازی سیستم‌های هیدرولوژیکی را با روش‌های بهینه‌سازی ریاضی متصل می‌کنند، در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب به طور گسترده بکار گرفته می‌شوند (۱۶). چن و همکاران (۴) برای شبیه‌سازی رفتار آب زیرزمینی از شبکه عصبی مصنوعی و برای بهینه‌سازی تلفیق منابع آب سطحی و زیرزمینی از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. چانگ و همکاران (۳) برای شبیه‌سازی رفتار آب‌های زیرزمینی از Modflow و برای بهینه‌سازی تلفیق منابع آب سطحی و زیرزمینی از روش پویایی سیستم (SD) استفاده کردند. صفوی و انتشاری (۱۵) از ترکیب شبکه عصبی به‌عنوان مدل شبیه‌سازی و سیستم جامعه مورچگان به‌عنوان مدل بهینه‌سازی برای تلفیق آب‌های سطحی و زیرزمینی در منطقه نجف‌آباد اصفهان استفاده کردند. کاراموز و همکاران (۹) از روش پویایی سیستم به‌عنوان مدل شبیه‌سازی و از مدل ریاضی برنامه‌ریزی پویا به‌عنوان مدل بهینه‌سازی تلفیق آب سطحی و زیرزمینی تهران استفاده کردند. نتایج نشان داد که روش پویایی سیستم ابزاری توانمند در شبیه‌سازی رفتار کمی و کیفی آبخوان دشت تهران بوده و از ترکیب آن با یک مدل بهینه‌سازی ریاضی می‌توان ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی آبیاری، بهینه‌سازی تلفیق و بهینه‌سازی الگوی کشت استفاده کرد. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه پویایی سیستم‌ها از جمله در زمینه مدیریت یکپارچه منابع آب (۲۱)، شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب (۶)، مدیریت عرضه و تقاضای منابع آب (۷)، تخصیص منابع آب (۱۳)، شیرین‌سازی آب دریا (۱۹)، مدیریت پساب (۲) و مدیریت بهره‌برداری از زهاب‌های کشاورزی (۱۴) انجام شده است. با توجه به پیچیدگی ذاتی سیستم‌های منابع آب به‌ویژه مسئله تلفیق آب سطحی و زیرسطحی به‌واسطه تغییرات زمانی قوانین حاکم بر سیستم، هم به مدل‌های بهینه‌سازی و هم مدل‌های شبیه‌سازی نیاز است. استفاده از روش پویایی سیستم به‌عنوان ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی رفتار محیط‌های پیچیده می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های بهینه‌سازی مرسوم و تحلیل رفتار پویای محیط پیچیده آب باشد. هدف از این مطالعه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تلفیق منابع آب سطحی و زیرزمینی شبکه آبیاری دشت عباس با روش پویایی سیستم و با توابع هدف دستیابی به حداکثر درآمد دشت، حذف یا حداقل کردن هزینه‌های زهکشی است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دشت عباس با وسعت کل ۵۳۶ کیلومتر مربع بخشی از حوضه آبریز رودخانه کرخه در استان ایلام است که بین عرض شمالی°۳۲ – ۱۵ تا °۳۲ –۳۰ و طول شرقی °۴۷ –۴۰ تا °۴۸ –۱۰ قرار دارد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است. شبکه آبیاری و زهکشی دشت عباس به وسعت ۱۶۴۵۰ هکتار دارای دو واحد عمرانی شمالی (۱۰۶۲۰ هکتار) و جنوبی (۵۸۳۰ هکتار) است. مساحت تحت پوشش روش‌های آبیاری سطحی، کم‌فشار، بارانی، تیپ و قطره‌ای به‌ترتیب ۴۸۴۵، ۹۶۹۰، ۱۳۹۴، ۳۴۹ و ۱۷۲ هکتار است. آب مورد نیاز شبکه (۱۷۳/۵ میلیون متر مکعب تخصیص) از سد مخزنی کرخه از طریق تونل انتقال به ابتدای کانال اصلی شبکه منتقل می‌شود. نیاز آبیاری هر هکتار الگوی کشت به‌تفکیک روش آبیاری در جدول (۱) و برخی از مهم‌ترین مشخصات لایه آبدار آبخوان دشت عباس در جدول (۲) ارائه شده است. بر این اساس درصد کشت محصولات با احتساب کشت مجدد در سیستم‌های آبیاری سطحی، کم‌فشار، بارانی، تیپ و قطره‌ای به‌ترتیب ۱۲۵، ۱۲۶، ۱۲۱ و ۱۰۰ درصد و نیاز آبیاری هر هکتار از اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری سطحی، کم‌فشار، بارانی، تیپ و قطره‌ای به‌ترتیب ۱۰۴۸۱، ۹۳۴۶، ۸۲۱۳، ۷۱۰۰ و ۱۳۵۵۹ متر مکعب در هکتار است.

مدل‌سازی به روش پویایی سیستم

متدولوژی پویایی سیستم‌ها یک تکنیک مدل‌سازی و شبیه‌سازی است که مخصوص مسائل مدیریتی طولانی‌مدت، مزمن، و پویا طراحی می‌شود. این روش بر درک چگونگی اندرکنش فرایندهای فیزیکی، جریان اطلاعات و سیاست‌های مدیریتی تمرکز می‌کند که به چه نحو، این عوامل پویایی متغیرهای مورد نظر را ایجاد می‌کنند. در این روش سیستم‌های پیچیده واقعی توسط بازخوردهای متعدد، تأخیر زمانی، ذخیره‌سازی و از طریق معادلات دیفرانسیل مربوط به‌هم توصیف می‌شوند. این رویکرد بر گرفته از تفکر سیستمی به‌عنوان ابزاری در مدیریت و برنامه‌ریزی است، تفکر سیستمی در مقابل تفکر خطی بکار برده می‌شود، به‌نحوی که در تفکر خطی فرض می‌شود اتفاقات و روند آنها در سیستم در طول زمان ثابت عمل می‌کنند (۱۰). نرم‌افزارهای متعددی برای برای برنامه‌نویسی مدل‌های پویا وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به Vensim، Powersim، Stella اشاره کرد در این مطالعه از محیط Vensim برای برنامه‌نویسی و تدوین مدل پویا استفاده شد.

جدول ۱. الگوی کشت و آب مورد نیاز یک هکتار محصولات دشت عباس به تفکیک روش‌های آبیاری

		محصول										
		گندم	جو	ذرت	باقلا	کنجد	یونجه	سودان‌گراس	چغندرقند	کلزا	صیفی	مرکبات	جمع
الگوی کشت (درصد)	کم‌فشار	۲۵	۱۵	۱۰	۸	۵	۱۲	۵	۱۰	۶	۲۹	۰	۱۲۵
	بارانی	۳۲/۹	۱۹/۷	۱۳/۲	۱۰/۵	۶/۶	۱۵/۸	۶/۶	۱۳/۲	۷/۹	۰	۰	۱۲۶
	تیپ	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۱	۰	۱۲۱
آب ناخالص (متر مکعب در هکتار)	سطحی	۱۱۱۰	۵۴۶	۱۰۹۶	۲۹۷,۶	۴۹۸	۲۹۸۳,۲	۶۵۰	۵۵۲	۲۴۷,۲	۲۴۸۸	۰	۱۰۴۶۸
	کم فشار	۹۹۱	۴۸۸	۹۷۹	۲۶۶	۴۴۵	۲۶۶۴	۵۸۰	۴۹۳	۲۲۱	۲۲۲۱	۰	۹۳۴۶
	بارانی	۱۱۴۱	۵۶۰	۱۱۳۰	۳۰۵	۵۱۴	۳۰۶۹	۶۷۰	۵۶۹	۲۵۴	۰	۰	۸۲۱۳
	تیپ*	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۱۰۰	۰	۷۱۰۰
	قطره‌ای	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳۵۵۹	۱۳۵۵۹

*- آبیاری قطره‌ای نواری (tape): در شبکه آبیاری دشت عباس برای آبیاری صیفی‌جات از سیستم آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) استفاده می‌شود.

جدول ۲. برخی از مشخصات منطقه مورد مطالعه

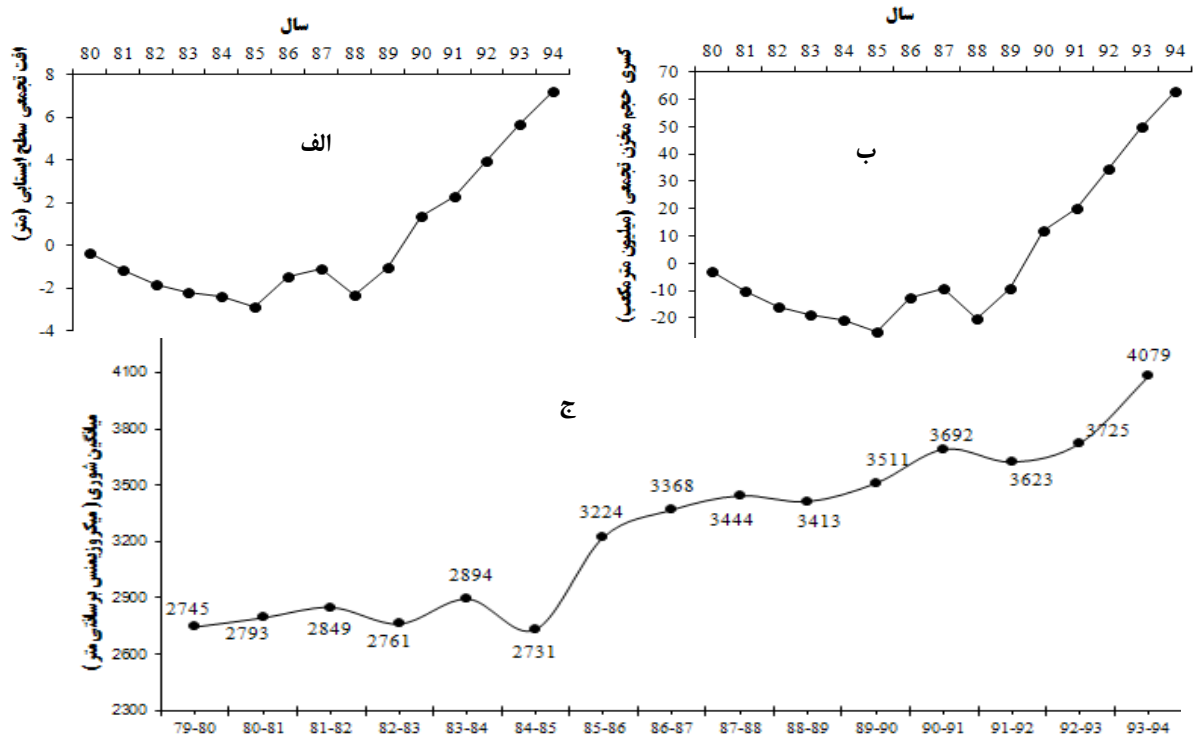
عنوان	مقدار	واحد	عنوان	مقدار	واحد
وسعت آبخوان	۱۷۵	کیلومتر مربع	ضریب ذخیره آبخوان	۵	درصد
متوسط بارندگی دشت	۲۴۶	میلی‌متر	آب زیرزمینی تجدیدپذیر	۴۳	میلیون متر مکعب
متوسط تبخیر سالانه	۱۶۶۷	میلی‌متر	حجم استاتیک آبخوان	۶۱۲	میلیون متر مکعب
متوسط رطوبت نسبی	۴۹	درصد	ضخامت لایه آبدار	۷۰	متر
کل اراضی کشاورزی	۱۶۴۵۰	هکتار	عمق آب زیرزمینی	۲۰-۰	متر

Vensim دارای قابلیت شبیه‌سازی بصری اجزا بوده و روابط موجود را به‌همان ترتیبی که در واقعیت است دارا است. این ابزار مدل‌سازی، امکان ایجاد مدل‌های پیچیده را با سهولت بیشتری نسبت به زبان‌های برنامه‌نویسی مرسوم به‌وجود می‌آورد (۱). مراحل مدل‌سازی در تحقیق حاضر شامل تعریف مسئله، تدوین مدل مفهومی، تعیین رفتار متغیرهای کلیدی، تدوین مدل شبیه‌سازی، تدوین مدل بهینه‌سازی و واسنجی و صحت‌سنجی مدل است.

تعریف مسئله و سناریوهای مورد ارزیابی

در شکل (۲) نمودار تغییرات افت تجمعی، کسری حجم مخزن آبخوان و کموگراف دشت ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که از سال ۱۳۸۶ و همزمان با شروع بهره‌برداری از شبکه آبیاری، برای نمودار افت سطح آب زیرزمینی و کسری حجم مخزن تغییر یافته است. با بهره‌برداری از شبکه حجم زیادی آب سطحی وارد دشت شده و برنامه استفاده از منابع آب زیرزمینی به‌دلایل اقتصادی و اجتماعی محقق نشده است (جدول ۳). طی ۱۰ سال اخیر سطح آب زیرزمینی حدود ۱۱ متر افزایش پیدا کرده و در بسیاری از مناطق دشت به‌ویژه مناطق جنوبی سطح آب زیرزمینی به سطح زمین رسیده و باعث ایجاد مشکلات زهکشی حادی شده است. تحلیل کموگراف نیز بیانگر افت کیفیت آب آبخوان است. بنابراین مهم‌ترین مسئله دشت عباس زهدار شدن اراضی و ورود آب زیرزمینی شور به منطقه توسعه ریشه است.

سناریوهای مورد ارزیابی شامل سناریوی یک: ادامه روند کنونی برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی سناریوی دو: بررسی ادامه



شکل ۲. الف) افت سطح آبخوان، ب) کسری حجم مخزن و ج) کموگراف آبخوان دشت عباس

جدول ۳. میزان برداشت آب سطحی و زیرزمینی طی سال‌های اخیر

سال آبی	۹۴-۹۳	۹۳-۹۲	۹۲-۹۱	۹۱-۹۰	۹۰-۸۹	۸۹-۸۸	۸۸-۸۷	۸۷-۸۶
برداشت (میلیون متر مکعب)	۲۱	۲۰,۷	۲۰,۳	۲۰	۲۰,۱	۲۰	۵۴	۵۴
سطحی	۱۳۰/۲	۱۴۸/۳	۱۳۰/۹	۹۳/۹	۱۵۹/۹	۱۲۴/۶	۳۴/۸	۸۰/۳

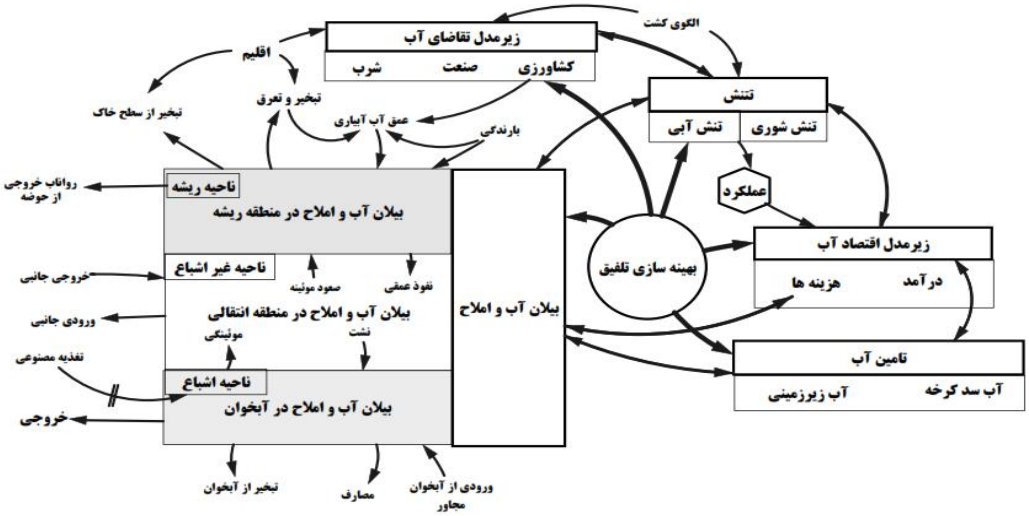
روند کنونی برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی با احداث شبکه زهکشی اصلی و سناریوی سه: بهینه‌سازی سهم برداشت از منابع آب زیرزمینی در دشت برای حل مشکلات زهدار شدن اراضی بود.

تدوین مدل مفهومی

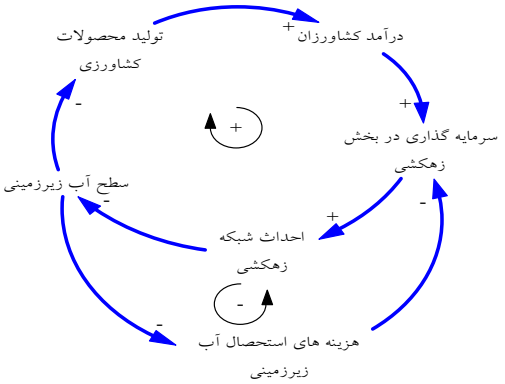
چارچوب کلی مدل مفهومی و برخی از متغیرهای کلیدی مدل در محیط Vensim در شکل (۳) ارائه شده است. مدل پویایی مدیریت منابع آب دشت عباس دارای پنج زیرسیستم، تقاضای آب (کشاورزی، شرب و ...)، عرضه آب یا کمیت و کیفیت آب، تنش‌های محیطی (شوری و کم‌آبی)، اقتصاد آب (هزینه‌ها و درآمدها) و بیلان (بیلان آب و املاح در خاک و آب زیرزمینی) است. هر یک از زیرمدل‌ها توسط متغیرهای برونزا و درونزای سیستم بر همدیگر اثر می‌گذارند. به‌عنوان مثال تقاضای آب در بخش کشاورزی تحت تأثیر متغیرهای برونزای اقلیم و الگوی کشت و متغیرهای درونزای بیلان آب و املاح، تنش‌های شوری و کم‌آبی، منابع آب و متغیرهای اقتصادی است. از طرف دیگر زیرمدل تقاضای آب بر زیرمدل‌های تأمین آب، اقتصاد آب (درآمد و هزینه) و بیلان آب و املاح (از طریق نفوذ آب کشاورزی) اثرگذار است.

تبیین فرضیه‌های دینامیکی (رفتار متغیرهای کلیدی) و شبیه‌سازی (فرموله کردن فرضیه‌های دینامیکی)

در این مرحله اثرات مثبت و منفی متغیرهای کلیدی در قالب



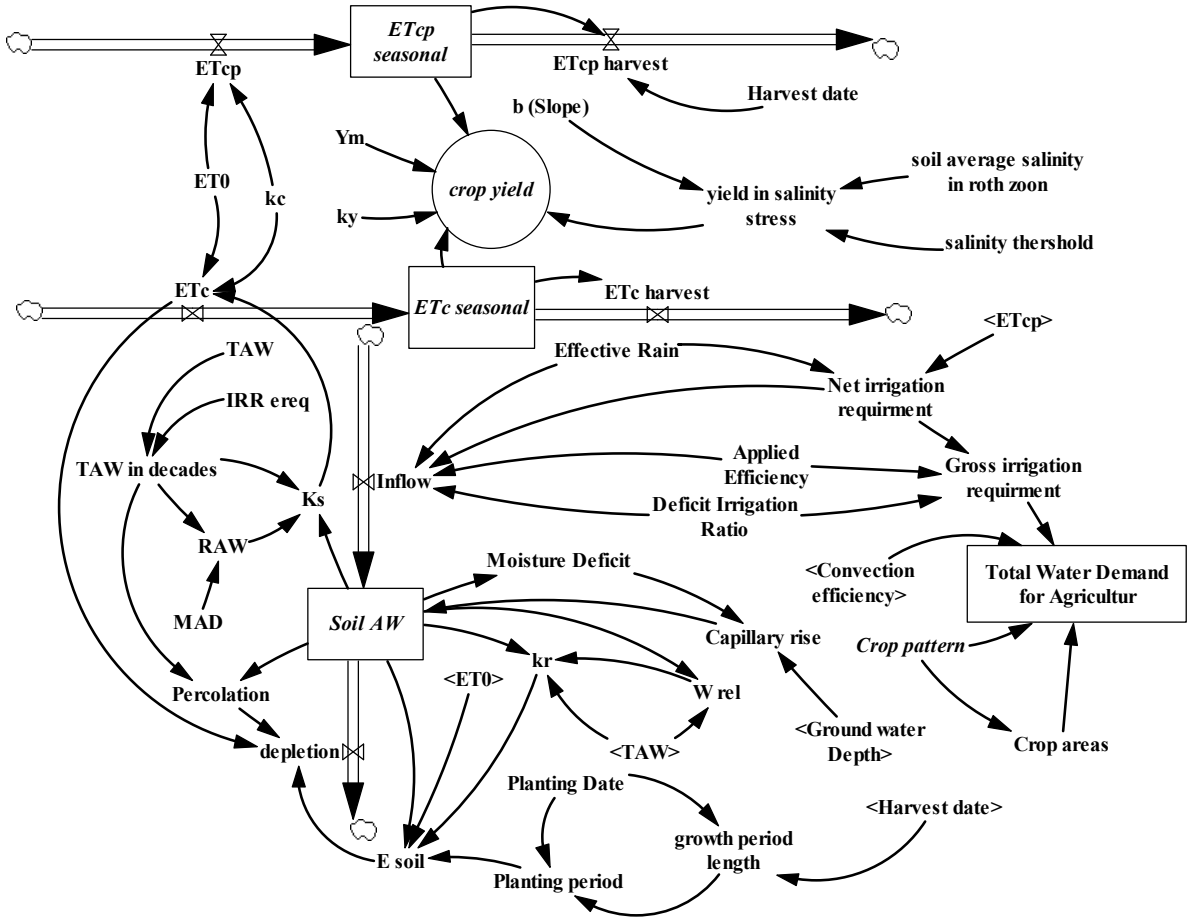
شکل ۳. مدل مفهومی مدیریت منابع آب زیرزمینی دشت عباس



شکل ۴. نمونه‌ای از حلقه‌های علی و معلولی احداث زهکش در دشت عباس

روابط علی معلولی و بازخوردها تعیین شد. در شکل (۴) نمونه ساده‌ای از حلقه‌های علی و معلولی به تصویر کشیده شده است. حلقه اول که یک حلقه علی معلولی مثبت است بیان می‌دارد که سرمایه‌گذاری در بخش زهکشی از طریق کاهش سطح آب زیرزمینی و افزایش عملکرد محصول باعث افزایش انگیزه سرمایه‌گذاری در بخش زهکشی می‌شود. حلقه دوم که یک حلقه علی معلولی منفی است بیانگر اینست که سرمایه‌گذاری در بخش زهکشی از طریق کاهش تلفات نفوذ و افت سطح آب زیرزمینی باعث افزایش هزینه‌های استحصال آب زیرزمینی شده و از این طریق باعث کاهش انگیزه سرمایه‌گذاری در توسعه شبکه زهکشی می‌شود.

در مرحله بعد (شبیه‌سازی) روابط بین متغیرها (متغیرهای کلیدی و متغیرهای کمکی) و مقادیر متغیرها (متغیرهای ثابت) تعیین می‌شود. افق برنامه شبیه‌سازی ۳۰ ساله و واحد گام زمانی مورد استفاده در مدل ۱۰ روزه است. در شکل (۵) ساختار حالت – جریان تقاضای آب در بخش کشاورزی ارائه شده است. تقاضای آب در بخش کشاورزی با توجه به نیاز آبی خالص الگوی کشت، سناریوهای الگوی کشت، ضرایب تنش آبی (Ks)، راندمان آبیاری (راندمان کاربرد وابسته به نوع خاک و سیستم آبیاری، راندمان انتقال و راندمان توزیع وابسته به نوع منبع آب) محاسبه شد. ضریب تنش آبی با استفاده از اصل بقای جرم (بیلان آبی) و از رابطه (۱) شبیه‌سازی شد.



شکل ۵. ساختار حالت و جریان تقاضای آب در بخش کشاورزی

$$AW(t)=AW(t_0)+\int_{t_0}^{t_n}(\text{Inflow-Outflow})dt \qquad (۱)$$

در این رابطه AW(t) آب قابل دسترس در هر بازه زمانی، $AW(t_0)$ آب قابل دسترس در شرایط اولیه، Inflow جریان‌های روزانه ورودی به خاک وابسته به نوع گیاه و اقلیم شامل بارندگی، آبیاری و صعود مویینگی و Outflow جریانات خروجی از عمق توسعه ریشه شامل تبخیر و تعرق از گیاه، تبخیر از سطح خاک، نفوذ عمقی و رواناب خروجی است.

عملکرد محصول متناسب با مقدار آب آبیاری، کیفیت آب آبیاری و تبخیر و تعرق با استفاده رابطه (۲) شبیه‌سازی شد.

$$\frac{Y_a}{Y_P}=(1-b(EC_e-EC^*))\times(1-K_Y(1-\frac{ET_{Ct}}{ET_{Pt}})) \qquad (۲)$$

که در آن Ky، ET_{Ct}، ET_{Pt}، Y_a و Y_P به‌ترتیب میانگین ضریب واکنش گیاه به آب آبیاری، تبخیر و تعرق گیاه در دهه‌های مختلف و تبخیر، تعرق پتانسیل گیاه در دهه‌های مختلف، عملکرد واقعی و عملکرد پتانسیل است. شوری عصاره اشباع خاک در هر لحظه با استفاده از اصل بقای جرم (رابطه ۳) در خاک محاسبه شد (۲):

$$ECe(t)=\frac{Mis_{(t_0)}+\int_{t_0}^{t_n}(Mis(t)_a - Mis(t)_l)\,dt}{0.64\times(\frac{\theta_S\times D_r}{100})\times 10000} \qquad (۳)$$

که در آن $Mis(t_0)$، Mis(t)a و Mis(t)l به‌ترتیب شوری اولیه خاک، املاح ورودی به خاک و املاح آبشویی شده (کیلوگرم در هکتار) در زمان‌های مختلف و θs و Dr به‌ترتیب رطوبت حجمی اشباع و عمق توسعه ریشه است. به‌همین ترتیب برای بررسی تغییرات املاح در منطقه انتقالی و منطقه اشباع (آب زیرزمینی) و برای شبیه‌سازی تغییرات سطح و حجم آبخوان از اصل بقای جرم

استفاده شد (جزئیات روابط مورد استفاده و ساختار حالت جریان متغیرهای کلیدی در مقالات علیزاده و همکاران (۱ و ۲) و سلطانی و علیزاده (۱۷) ارائه شده است). مدل قابلیت فراخوانی اطلاعات مربوط به اقلیم (شامل بارندگی، ET0 و دما)، عرضه آب (سدها، منابع آب زیرزمینی)، هیدرولوژی (خصوصیات فیزیوگرافی حوضه رودخانه و مسیل‌ها، CN، سطح آب زیرزمینی)، خصوصیات خاکشناسی (شوری عصاره اشباع، بافت خاک)، ضرایب گیاهی الگوی کشت (Kc، Ky)، سطح زیرکشت و هزینه‌های کاشت، داشت برداشت در سناریوهای مختلف را دارا است.

واسنجی، صحت‌سنجی و بهینه‌سازی

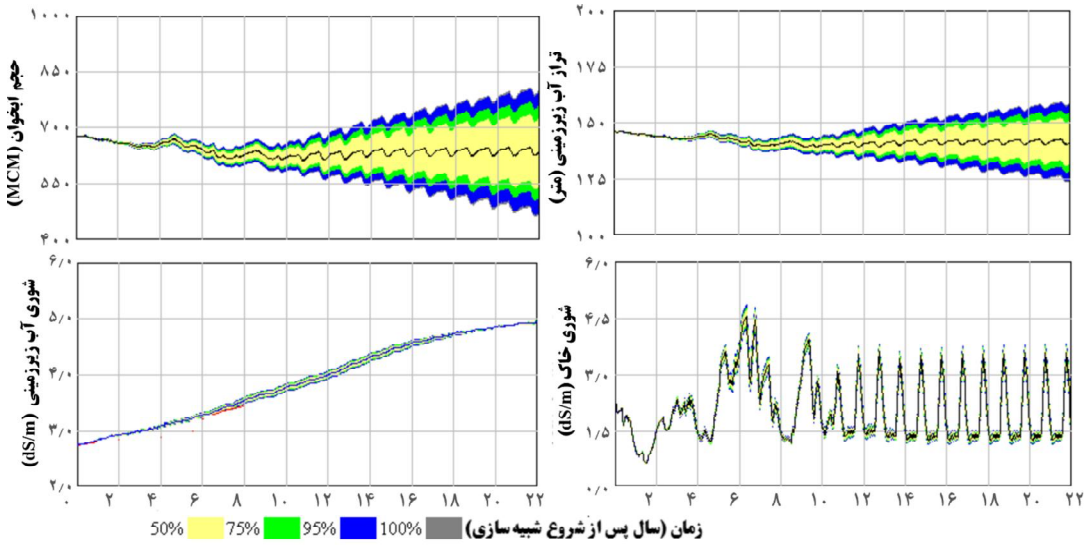
یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های مدل Vensim ابزار Optimization Setup است. این ابزار قابلیت واسنجی تمام پارامترهای اثرگذار را به‌صورت همزمان (Multivariate calibration) از طریق آنالیز چندمعیاره فراهم می‌کند. واسنجی برای پارامترهای ثابت مؤثر بر متغیرهای کلیدی مثل تراز و شوری آب زیرزمینی انجام می‌شود. مراحل واسنجی در محیط vensim عبارت است از ایجاد فایل داده‌های مشاهداتی متغیرهای کلیدی (real data یا Database) در محیط نرم‌افزار excel با پسوند dat، فراخوانی داده‌های مشاهده‌ای از طریق دستور Import Database در محیط نرم‌افزار Vensim، تعریف فایل Payoff از طریق گزینه Optimization با پسوند vpd، تعریف متغیرهای کلیدی تراز و شوری آب زیرزمینی که دارای داده اندازه‌گیری شده زمانی هستند در قسمت Optimization Setup، تعریف متغیرهای ثابتی که باید واسنجی شوند و تکمیل فرایند واسنجی با اجرای مدل است. برای واسنجی مدل از داده‌های سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۸ و برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵ تراز (هیدروگراف) و شوری (کموگراف) آب زیرزمینی دشت عباس استفاده شد. هیدروگراف آبخوان با استفاده از شبکه‌بندی تیسن هیدروگراف ۲۹ حلقه چاه مشاهده‌ای شبکه پیزومتری و گموگراف آبخوان از اطلاعات کیفی ۹ حلقه چاه شبکه‌سنجی کیفی استخراج شد.

بهینه‌سازی تلفیق آب‌های سطحی و زیرسطحی در این مطالعه با هدف حداقل‌سازی بیلان مثبت و نیاز به زهکشی و حداکثرسازی درآمد خالص دشت صورت گرفت. برای این منظور نسبت حجم منابع آب سطحی (SW Ratio) و زیرزمینی (GW Ratio) به کل آب مصرفی به‌عنوان دو متغیر ثابت و حداکثرسازی درآمد خالص دشت و حداقل‌سازی بیلان مثبت دشت به‌عنوان توابع هدف درنظر گرفته شد. فرایند بهینه‌سازی دو متغیر درصد منابع آب سطحی و زیرسطحی در قسمت Optimization Setup مدل مشابه فرایند واسنجی است. در این حالت متغیرهای کلیدی حداکثر درآمد ممکن و حداقل خیز تراز آب زیرزمینی است. فرایند بهینه‌سازی در مدل‌های پویا به این صورت است که مدل ابتدا کل فرایند شبیه‌سازی را برای مقادیر مختلف نرخ‌های آب سطحی و زیرزمینی شبیه‌سازی کرده (مثلاً با فاصله زمانی ۰/۰۱ مدل حدود ۱۰۰۰۰ بار اجرا می‌شود) سپس از بین ترکیب‌های مختلف بهترین ترکیب آب زیرزمینی و آب سطحی که منجر به حداکثر درآمد و حداقل خیز تراز می‌شود را انتخاب می‌کند.

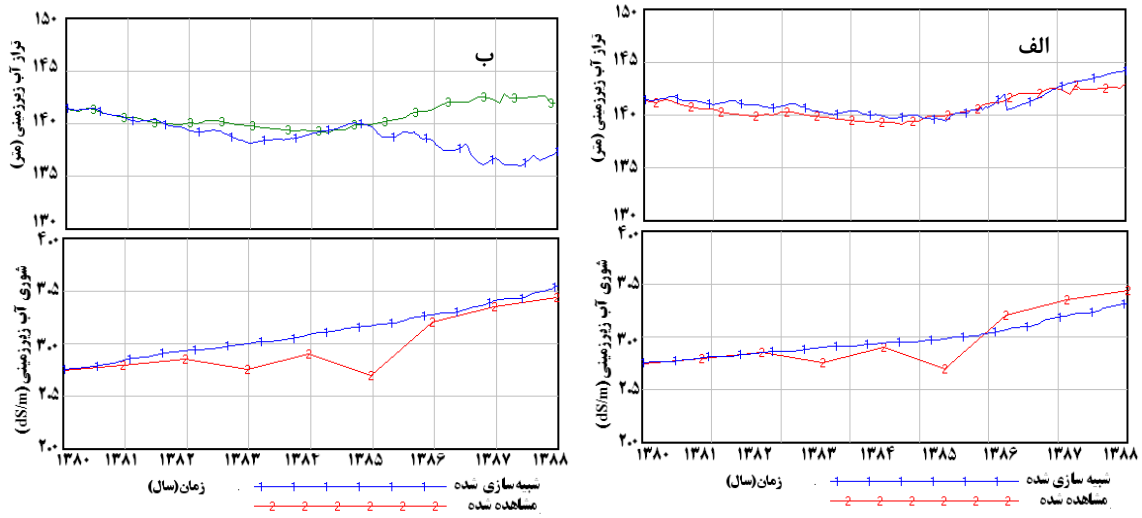
نتایج

آنالیز حساسیت مدل

در این بخش حساسیت پارامترهای کلیدی مدل شامل تراز سطح آب زیرزمینی، حجم استاتیک آبخوان، شوری آب زیرزمینی و شوری عصاره اشباع خاک نسبت به پارامترهای راندمان کاربرد، ضریب برگشت آب کشاورزی به آبخوان، نشت از کانال‌ها، نشت از آبخوان‌های دیگر، سطح ایستابی اولیه، زهکشی از آبخوان و شوری آب نشتی از آبخوان‌های دیگر با ضرایب اطمینان ۵۰ تا ۱۰۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت. به‌عنوان نمونه در شکل (۶) حساسیت برخی پارامترهای کلیدی نسبت به ضریب برگشت آب کشاورزی به آبخوان ارائه شده است. نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که از بین همه پارامترهای ورودی حساسیت متغیرهای کلیدی به راندمان کاربرد و ضریب برگشت آب کشاورزی بیشتر است. تغییرات



شکل ۶. حساسیت برخی از متغیرهای کلیدی مدل نسبت به ضریب برگشت آب کشاورزی (مقدار اولیه ۲۰ درصد)



شکل ۷. نتایج شبیه‌سازی تراز و کیفیت آب زیرزمینی: الف) قبل و ب) بعد از واسنجی

راندمان کاربرد باعث تغییر قابل ملاحظه همه متغیرهای کلیدی می‌شود. افزایش مقدار ضریب برگشت آب کشاورزی باعث افزایش حجم استاتیک آبخوان و افزایش کیفیت آب زیرزمینی به سبب رقیق شدن و همچنین کاهش شوری خاک به‌علت آبشویی می‌شود.

واسنجی مدل

در شکل (۷) نتایج خروجی شبیه‌سازی تراز و کیفیت آب زیرزمینی مدل قبل و بعد از واسنجی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های ریاضی درصورتی که واسنجی نشوند نتایج قابل قبولی ارائه نخواهند داد. در جدول (۴) پارامترهای ثابت مدل بعد از واسنجی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل بعد از ۶۲۸۳ اجرا همگرا شده و مقدار پارامترهای غیرمطمئن را به‌روش بهینه‌سازی چندمعیاره برآورد کرده است.

در جدول (۵) شاخص‌های ارزیابی مدل در شبیه‌سازی

جدول ۴. مقادیر پارامترهای ورودی پس از واسنجی مدل

پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
نشت آب از انهار و کانال‌ها	درصد	۱۱/۶	درصد نفوذ عمقی بارندگی	درصد	۱۶
ضریب برگشت آب کشاورزی به آبخوان	درصد	۳۳/۴	تخلخل مؤثر لایه غیراشباع	درصد	۱۵
ضریب تغییر حجم نسبت به تغییر یک متر تراز آبخوان	MCM	۹/۷۳	شوری آب ورودی از آبخوان مجاور	mg/lit	۱۹۲۵
حجم استاتیک آبخوان	MCM	۶۰۰	راندمان کاربرد آبیاری	درصد	۵۹
نشت از آبخوان به آبخوان‌های مجاور	MCM/dec	۰/۶۴	ضریب برگشت آب شرب	درصد	۰/۷۹
ضریب زهکشی به‌وسیله زهکش‌های موجود	درصد	۱۵/۱	شوری آب برگشتی شرب و صنعت	mg/lit	۹۹۸
تعداد اجرای مدل برای همگرا شدن	عدد	۶۲۸۳	جریان زیرسطحی ورودی آبخوان	MCM/dec	۰/۰۱۵

جدول ۵. شاخص‌های ارزیابی مدل طی بازه واسنجی مدل

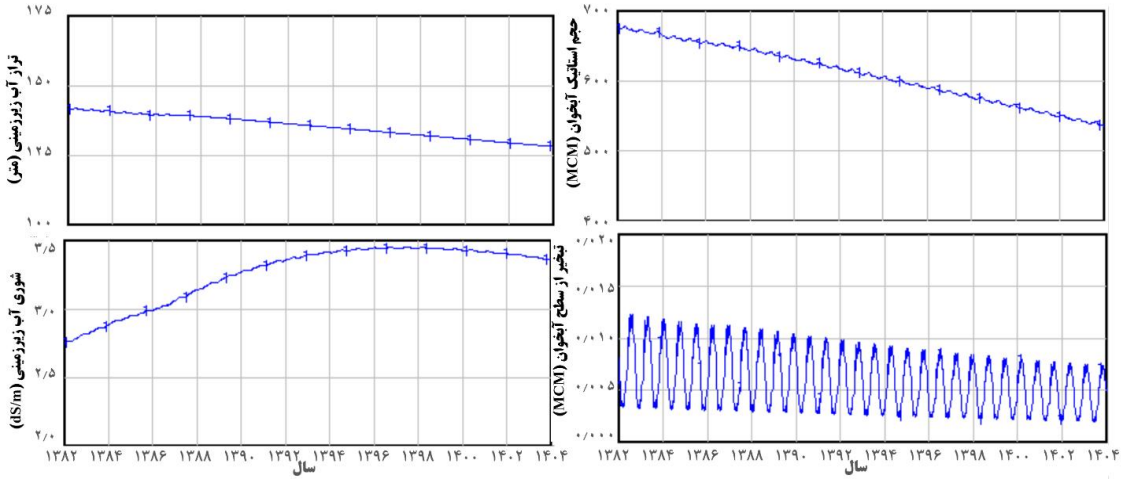
شاخص	ME %	CRM	R^2	RMSE		NRMSE %
				مقدار	واحد	
شوری	۹/۲۶	۰/۰۰	۰/۷۴	۱۰۰/۷	µmoh/cm	۳/۸۵
تراز آب زیرزمینی	۰/۴۵	۰/۰۰	۰/۹۳	۴۵	cm	۰/۳۹

متغیرهای کلیدی تراز و شوری آب زیرزمینی با داده‌های سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۸ ارائه شده است. حداکثر خطای مدل (ME)، ضریب تبیین (R^2) و RMSE در برآورد سطح آب زیرزمینی به‌ترتیب ۶۵ سانتی‌متر، ۹۳ درصد و ۴۵ سانتی‌متر است. همچنین مقدار ME، R^2 و RMSE در برآورد شوری آب زیرزمینی به‌ترتیب ۰/۱۲۳ میکروموس بر سانتی‌متر، ۷۴ درصد و ۱۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است. نتایج نشان می‌دهد که مدل قادر است تراز و شوری آب زیرزمینی را با دقت مناسب شبیه‌سازی کند که از این لحاظ با نتایج تحقیقات چانگ و همکاران (۳)، نوزری (۱۴)، علیزاده و همکاران (۲) مطابقت دارد.

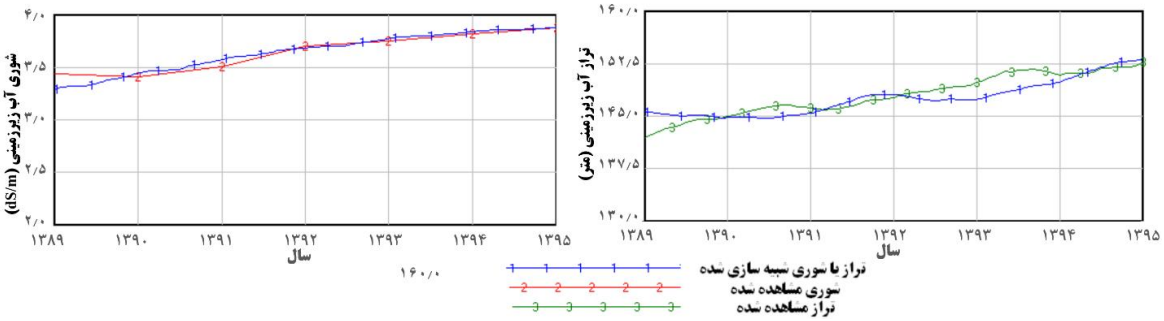
صحت‌سنجی مدل

صحت‌سنجی مدل از طریق آزمون ساختار و صحت‌سنجی با اطلاعات مشاهده‌ای انجام گرفت. آزمون رفتار مدل با شرایط حدی یکی از ابتدایی‌ترین و پایه‌ای‌ترین آزمون‌های صحت‌سنجی ساختاری مدل‌های پویا است. در شکل (۸) رفتار برخی از متغیرهای کلیدی مدل در شرایط عدم توسعه شبکه دشت عباس (شرایط حدی) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت عدم توسعه شبکه، حجم آبخوان و تراز آب زیرزمینی به‌علت برداشت بیش از حد مجاز کاهش یافته و در اثر افت سطح آب زیرزمینی تبخیر از سطح آبخوان نیز کاهش می‌یابد. نتایج آزمون حدی نشان می‌دهد که در صورت عدم توسعه شبکه، افت سطح آب زیرزمینی و کاهش کیفیت آب زیرزمینی مطابق با شرایط پیش از اجرای شبکه ادامه پیدا خواهد کرد که بیانگر صحت مدل تدوین شده است.

در شکل (۹) تغییرات تراز و شوری آب زیرزمینی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده طی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵ ارائه شده است. همچنین در جدول (۶) شاخص‌های آماری ارزیابی مدل ارائه شده است. نتایج نشان‌دهنده توانایی مدل در برآورد سطح و شوری آب زیرزمینی است. از این نظر نتایج این مطالعه با نتایج تحقیقات چانگ و همکاران (۳)، لئو و همکاران (۱۱)، نوزری و همکاران (۱۲)، علیزاده و همکاران (۲) مطابقت دارد.



شکل ۸. رفتار متغیرهای کلیدی در شرایط حدی عدم توسعه شبکه



شکل ۹. مقایسه نتایج خروجی مدل با داده‌ها واقعی سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۵ (دوره صحت‌سنجی مدل)

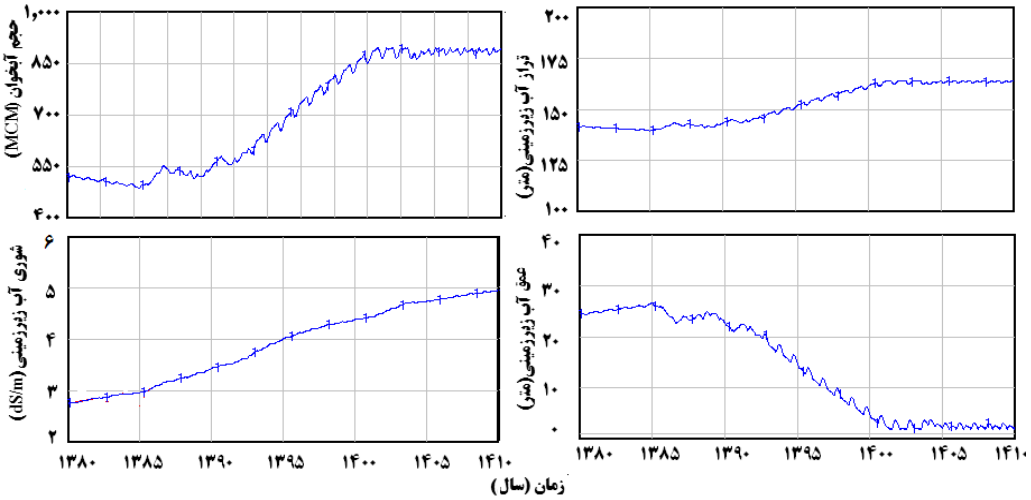
جدول ۶. شاخص‌های ارزیابی مدل طی دوران صحت‌سنجی مدل

شاخص	ME %	CRM	R^2	RMSE		NRMSE %
				مقدار	واحد	
شوری	۲/۵۶	۰/۰۰	۰/۹۲	۵۰/۸	µmoh/cm	۱/۳۹
تراز آب زیرزمینی	۰/۴۵	۰/۰۰	۰/۹۸	۴۷	cm	۰/۳۶

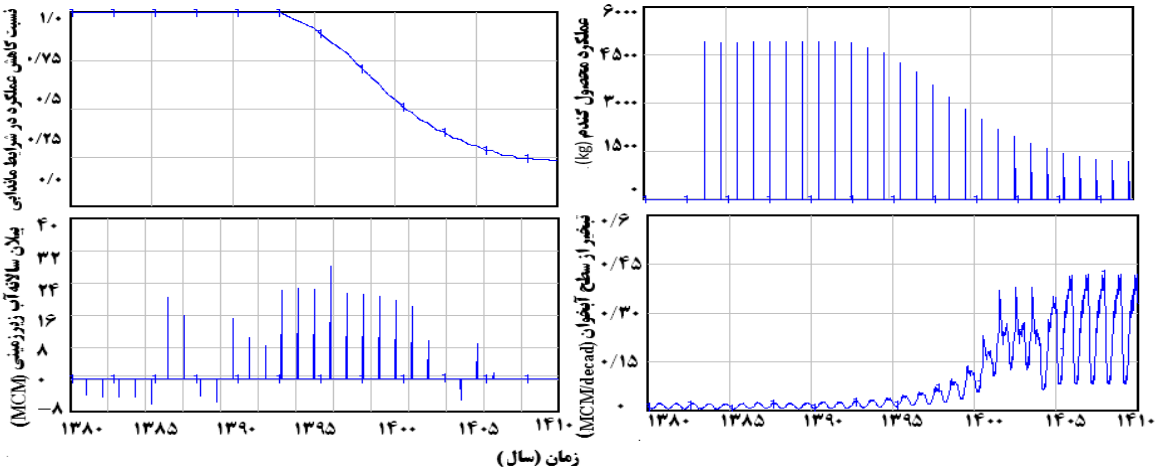
پیش‌بینی متغیرهای کلیدی در شرایط عدم بهینه‌سازی تلفیق و اجرای شبکه زهکشی

در شکل (۱۰) نتایج اجرای مدل در پیش‌بینی متغیرهای کلیدی تراز، عمق، حجم و شوری آب زیرزمینی تا افق ۱۴۱۰ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد درصورت عدم افزایش حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی و عدم اجرای شبکه زهکشی، حجم و سطح آب زیرزمینی افزایش پیدا می‌کند. دلیل افزایش سطح آب زیرزمینی پیشی گرفتن حجم آب‌های ورودی به آبخوان از حجم آب‌های خروجی از آبخوان پس از اجرای شبکه آبیاری است. به عبارت دیگر پس از بهره‌برداری از شبکه آبیاری دشت عباس، بیلان آب دشت به‌طور متوسط سالانه حدود ۵ میلیون متر مکعب مثبت است. این مسئله باعث می‌شود عمق آب زیرزمینی در بخش اعظمی از دشت به حدود یک متر و کمتر برسد.

در شکل (۱۱) نتایج خروجی مدل در شبیه‌سازی تبخیر از سطح آبخوان، بیلان آب زیرزمینی، ضریب کاهش عملکرد و عملکرد محصول گندم ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد با



شکل ۱۰. نتایج اجرای مدل در پیش‌بینی متغیرهای کلیدی در سناریوی شماره یک

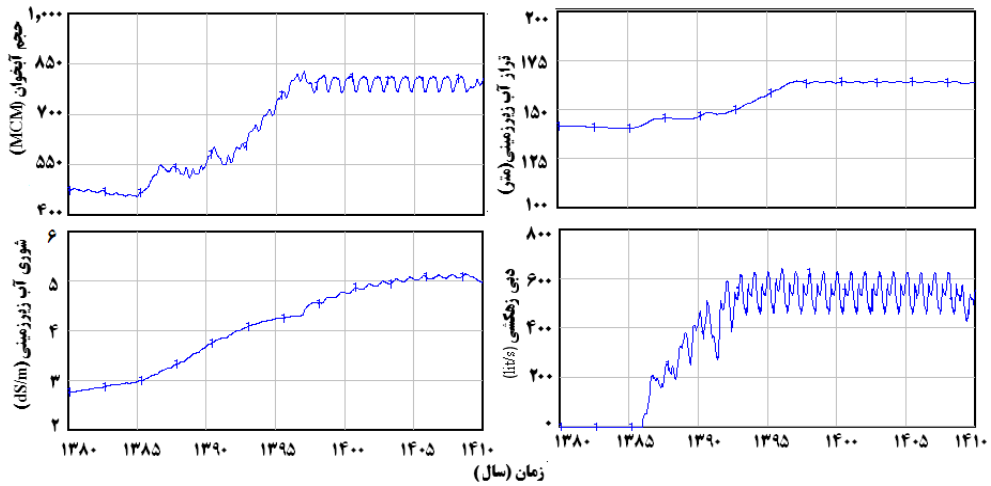


شکل ۱۱. پیش‌بینی بیلان آب زیرزمینی و تبخیر از سطح آبخوان تا افق ۱۴۱۰ در سناریوی شماره یک

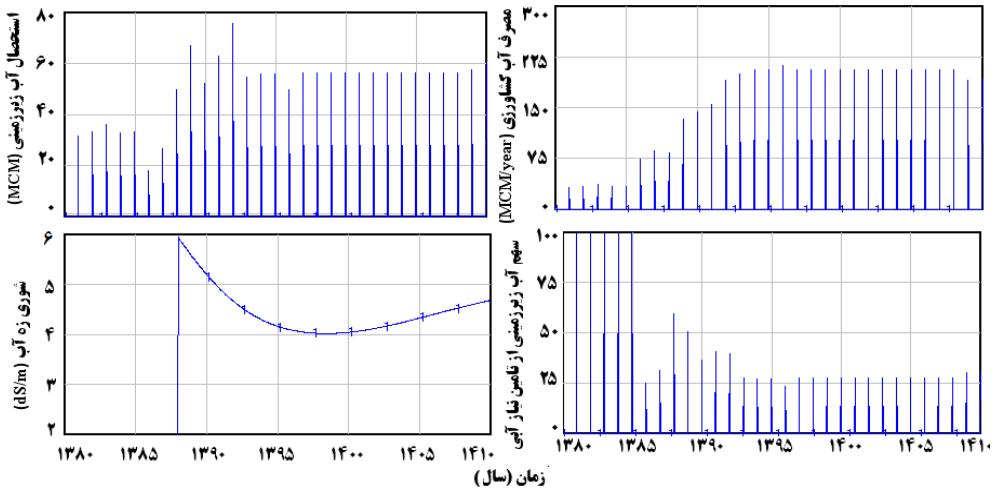
کاهش عمق آب زیرزمینی تبخیر از سطح آبخوان افزایش می‌یابد. کاهش عمق آب زیرزمینی باعث ایجاد شرایط ماندابی و کاهش عملکرد محصول می‌شود. به‌طوری که از سال ۱۳۹۲ عملکرد محصول به‌صورت سیگموئیدی کاهش پیدا کرده و عملکرد محصول در سال ۱۴۰۰ بیش از ۵۰ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. ژانگ و همکاران (۲۲) اثر ترازهای مختلف آب زیرزمینی بر عملکرد گندم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که با کاهش عمق آب زیرزمینی (بالا آمدن سطح ایستابی) ۸۰ سانتی‌متر به ۲۰ سانتی‌متر عملکرد محصول حدود ۶۰ درصد کاهش می‌یابد که از این حیث با نتایج تحقیق حاضر مشابهت دارد. نسبت کاهش عملکرد در شرایط سفره آب زیرزمینی کم عمق به نوع خاک، نوع محصول و کیفیت آب زیرزمینی وابسته است (۲۳). بنابراین برای جلوگیری از کاهش تولیدات کشاورزی اجرای سیستم زهکشی امری اجتناب ناپذیر است.

پیش‌بینی متغیرهای کلیدی مدل تا افق ۱۴۱۰ با حفظ شرایط موجود (احداث زهکش روباز اصلی)

در شکل (۱۲) نتایج خروجی مدل در شبیه‌سازی حجم، تراز و شوری آب زیرزمینی و دبی زهکش اصلی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با احداث زهکش اصلی شبکه به شرط

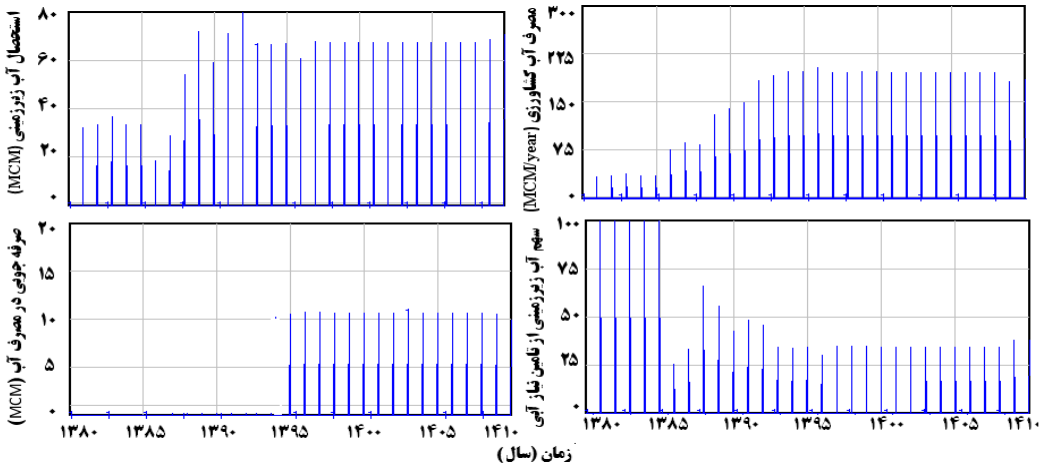


شکل ۱۲. نتایج خروجی مدل در شبیه‌سازی حجم، تراز و شوری آب زیرزمینی و دبی زهکش اصلی در سناریوی دوم

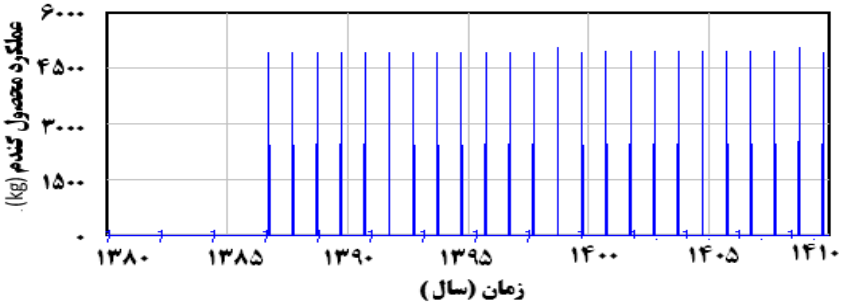


شکل ۱۳. نتایج خروجی مدل در شبیه‌سازی برخی متغیرهای ثانویه بهره‌برداری از شبکه در سناریوی دوم

لای‌روبی سالانه کانال تراز آب زیرزمینی در رقم ۱۶۳ متر به پایداری خواهد رسید لیکن به‌علت بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در مناطق جنوبی دشت شوری آب زیرزمینی رو به افزایش خواهد بود. شبیه‌سازی دبی زهکش ها با استفاده از فرمول گلوور- دام نشان می‌دهد که دبی زهکش‌ها در فصول مختلف سال بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ لیتر در ثانیه در نوسان است. بنابراین احداث شبکه زهکشی اصلی (با مشخصات کانال MD1) در اراضی دشت عباس می‌تواند به بهبود شرایط کمک کند. لذا احداث زهکش اصلی در اراضی دشت عباس همه مشکل ماندابی را رفع نمی‌کند. چرا که به‌علت شعاع تأثیر محدود کانال، کانال اصلی نمی‌تواند کل دشت را زهکشی کند و بیلان دشت همچنان مثبت می‌ماند. در شکل ۱۱ شبیه‌سازی میزان برداشت آب زیرزمینی، مصرف آب کشاورزی، سهم آب زیرزمینی از تأمین منابع آب مورد نیاز دشت و شوری زهکشی دشت در سناریوی دوم ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با ساخت زهکش‌های اصلی می‌توان حجم زیادی از آب‌های اضافی تجمعی در منطقه توسعه ریشه را از خاک خارج کرد. در این حالت حجم آب مصرفی دشت حدود ۲۱۰ میلیون متر مکعب و سهم آب زیرزمینی ۵۵ میلیون متر مکعب (حدود ۲۶ درصد) است (شکل ۱۳). شوری آب زهکش ها با گذر زمان و



شکل ۱۴. نتایج خروجی برخی از متغیرهای مدل بهینه‌سازی



شکل ۱۵. نتایج خروجی عملکرد گندم بعد از بهینه‌سازی تلفیق آب سطحی و زیرسطحی

شستشوی خاک کاهش پیدا می‌کند به‌طوری که شوری زهاب از حدود ۶ دسی زیمنس بر متر در ابتدای احداث زهکش به حدود ۴ دسی زیمنس بر متر در سال ۱۴۰۰ می‌رسد سپس با افزایش شوری آب زیرزمینی به‌علت تبخیر از سطح آبخوان شوری زهاب هم افزایش پیدا کرده و مجدد به حدود ۵ دسی زیمنس در سال ۱۴۱۰ می‌رسد. بنابراین توسعه زهکش اصلی به تنهایی نمی‌تواند مشکلات ماندابی بودن شبکه را رفع کند و در بلندمدت ماندابی شدن به تولیدات کشاورزی آسیب می‌رساند (شکل ۱۳).

پیش‌بینی متغیرهای کلیدی مدل تا افق ۱۴۱۰ با بهینه‌سازی تلفیق آب سطحی و زیرسطحی

در شکل (۱۴) برخی از مهم‌ترین خروجی‌های مدل پس از بهینه‌سازی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌ترین نسبت مصرف آب سطحی و زیرسطحی برای تأمین نیاز کشاورزی دشت عباس به‌ترتیب ۶۵ و ۳۵ درصد است. نتایج نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی تلفیق می‌توان سالانه ۱۰میلیون متر مکعب در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. با توجه به الگوی کشت دشت عباس این میزان مصرف معادل توسعه ۷۹۸ هکتار اراضی جدید است. لازم به ذکر است استفاده از چاه به‌عنوان سیستم زهکشی عمودی می‌تواند بخش اعظمی از هزینه‌های زهکشی زیرزمینی را کاهش دهد و نیاز به سیستم زهکشی زیرزمینی به بخش‌های اندکی از دشت محدود شود. همچنین در شکل (۱۵) عملکرد محصول بعد از بهینه‌سازی تلفیق ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تلفیق منابع آب سطحی و زیرسطحی می‌توان بخش اعظم مشکلات

ماندابی بودن اراضی را رفع کرده و از این طریق از کاهش عملکرد محصول جلوگیری کرد.

نتیجه‌گیری

یکی از راهکارهای کاهش مشکلات ماندابی شدن دشت بدون صرف هزینه‌های احداث شبکه زهکشی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تولید حجم انبوه زهکشی، استفاده همزمان از منابع آب زیرزمینی و سطحی است. هدف از این مطالعه بهینه‌سازی تلفیق منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت عباس برای حداقل کردن مشکلات ماندابی شدن اراضی و دستیابی به حداکثر درآمد خالص دشت بود. برای این منظور ابتدا رفتار آبخوان دشت با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها شبیه‌سازی شد. سپس با استفاده از روش بهینه‌سازی چندمعیاره مدل Vensim تلفیق آب‌های سطحی و زیرزمینی با تابع هدف حداکثرسازی درآمد خالص دشت بهینه‌سازی شد. مدل با استفاده از داده‌های زمانی ۸ ساله منتهی به ۱۳۸۸ واسنجی و با استفاده از داده‌های زمانی سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵ صحت‌سنجی شد. نتایج نشان‌دهنده توانایی مدل در برآورد سطح آب زیرزمینی (RMSE برابر ۴۷ سانتی‌متر، R^2 برابر ۰/۹۷ و ماکزیمم خطای ۶۰ سانتی‌متر) است. در مجموع سه سناریوی پیش‌بینی متغیرهای کلیدی مدل تا افق ۱۴۱۰ بدون لحاظ تلفیق و زهکشی، پیش‌بینی متغیرهای کلیدی مدل تا افق ۱۴۱۰ با حفظ شرایط موجود (احداث زهکش روباز اصلی) و پیش‌بینی متغیرهای کلیدی مدل تا افق ۱۴۱۰ با بهینه‌سازی تلفیق آب سطحی و زیرسطحی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بدون لحاظ تلفیق و زهکشی پس از بهره‌برداری شبکه آبیاری دشت‌عباس بیلان آب دشت به‌طور متوسط سالانه حدود ۵ میلیون متر مکعب مثبت است. این مسئله باعث می‌شود عمق آب زیرزمینی در بخش اعظمی از دشت به حدود یک متر و کمتر برسد. نتایج سناریوی حفظ شرایط موجود (احداث زهکش روباز اصلی) نشان می‌دهد که با احداث زهکش اصلی شبکه به شرط لای‌روبی سالانه کانال تراز آب زیرزمینی در رقم ۱۶۳ متر به پایداری خواهد رسید لیکن به‌علت بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در مناطق جنوبی دشت شوری آب زیرزمینی رو به افزایش خواهد بود. احداث شبکه زهکشی اصلی عمیق (با مشخصات کانال MD1) در اراضی دشت عباس می‌تواند به بهبود شرایط کمک کند اما همهٔ مشکل ماندابی را حل نمی‌کند زیرا به‌علت شعاع تأثیر محدود کانال، کانال اصلی نمی‌تواند کل دشت را زهکشی کند و بیلان دشت همچنان مثبت می‌ماند. در این حالت حجم آب مصرفی دشت حدود ۲۱۰ میلیون متر مکعب و سهم آب زیرزمینی ۵۵ میلیون متر مکعب (حدود ۲۶ درصد) است. بهینه‌سازی تلفیق آب‌های سطحی و زیرسطحی با هدف حداقل‌سازی بیلان مثبت و حداکثرسازی درآمد خالص دشت صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌ترین نسبت مصرف آب سطحی و زیرسطحی برای تأمین نیاز کشاورزی دشت عباس به‌ترتیب ۶۵ و ۳۵ درصد است. با بهینه‌سازی تلفیق می‌توان سالانه ۱۰ میلیون متر مکعب در مصرف آب صرفه جویی کرد. استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی می‌تواند باعث تثبیت سطح ایستابی، کاهش هزینه‌های زهکشی به‌علت خیز سطح آب زیرزمینی و صرفه‌جویی در مصرف آب شود. با توجه به الگوی کشت دشت عباس با صرفه‌جویی ۱۰ میلیون متر مکعبی در مصرف آب شبکه می‌توان نیاز آبی ۷۹۸ هکتار اراضی جدید را تأمین کرد.

منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, H. A., A. Liaghat and T. Sohrabi. 2017. Simulating effects of long term use of wastewater on farmers health using system dynamics modeling (case study: Varamin plain). *Journal of Water and Soil* 31(1): 127-143. (In Farsi).

2. Alizadeh, H. A., A. Liaghat and T. Sohrabi. 2014. Assessing pressurized irrigation systems development scenarios on groundwater resources using system dynamics modeling. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 3(4): 1-14. (in Farsi).
3. Chang, L. C., C. C. Ho., M. S. Yeh and C. C. Yang. 2011. An integrating approach for conjunctive-use planning of surface and subsurface water system. *Water Resources Management* 25(1): 59-78.
4. Chen, Y. W., L. C. Chang, C. W. Huang and H. J. Chu. 2013. Applying genetic algorithm and neural network to the conjunctive use of surface and subsurface water. *Water Resources Management* 27(14): 4731-4757.
5. Chiu, Y. C., T. Nishikawa and W. W. Yeh. 2009. Optimal pump and recharge management model for nitrate removal in the Warren Groundwater Basin, California. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(3): 299-308.
6. Darbandi, S., Y. Dinpajouh and S. Zeinali. 2014. Efficiency study of the system dynamics model to simulate the rainfall- runoff (case study: Lighvan watershed). *Journal of Water and Soil* 28(1): 127-138. (In Farsi).
7. Goldani, M., H. Amadeh and M. Zamanipour. 2011. A system dynamics approach in water resource management and government subsidy policy: A case study of Tajan basin in tran). The 29th International Conference of the System Dynamics Society.
8. Ho, C. C., C. C. Yang, L. C. Chang and M. S. Yeh. 2007. System dynamics modeling of the conjunctive-use of surface and subsurface water. In World Environmental and Water Resources Congress. Restoring Our Natural Habitat p 1-10).
9. Karamouz, M., R. Kerachian and B. Zahraie. 2004. Monthly water resources and irrigation planning: Case study of conjunctive use of surface and groundwater resources. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 391(5): 391-402.
10. Khan, S., L. Yufeng and A. Ahmad. 2009. Analyzing complex behavior of hydrological systems through a system dynamics approach. *Environmental Modelling and Software* 24(12): 1363-1372.
11. Khare, D. and M. K. Jat. 2006. Assessment of conjunctive use planning options: A case study of Sapon irrigation command area of Indonesia. *Journal of Hydrology* 328(3-4): 764-777.
12. Liu, L., Y. Luo, C. He, J. Lai and X. Li. 2010. Roles of the combined irrigation, drainage, and storage of the canal network in improving water reuse in the irrigation districts along the lower Yellow River, China. *Journal of Hydrology* 14(391): 157-174.
13. Masike, S. 2011. Application of system dynamic approach for water planning and decision making under water scarcity at Jwaneng diamond mine. *Journal of Geography and Regional Planning* 4(5): 251-260.
14. Nozari, H. and A. Liaghat. 2014. Simulation of drainage water quantity and quality using system dynamics. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 140(11): 1-9.
15. Safavi, H. R. and S. Enteshari. 2016. Conjunctive use of surface and ground water resources using the ant system optimization. *Agricultural Water Management* 173: 23-34.
16. Singh, A. 2014. Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture. *Journal of Hydrology* 519: 1688-1697.
17. Soltani, M. and H. A. Alizadeh. 2018. Integrated water resources management at basin scale (IWMsim) using a system dynamics approach. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 7(2): 69-90. (In Farsi).
18. Tran, L. D., L. Doc, S. Schilizzi, M. Chalak and R. Kingwell. 2011. Optimizing competitive uses of water for irrigation and fisheries. *Agriculture Water Management* 101(1): 42-51.
19. Udono, K. and R. Sitte. 2008. Modeling seawater desalination powered by waste incineration using a dynamic systems approach. *Journal of Desalination* 229: 302-317.
20. Wang, C. X., Y. P. Li, G. H. Huang and J. L. Zhang. 2016. A type-2 fuzzy interval programming approach for conjunctive use of surface water and groundwater under uncertainty. *Information Sciences* 340: 209-227.
21. Zarghami, M. and S. Akbariyeh. 2012. System dynamics modeling for complex urban water systems: application to the city of Tabriz, Iran. *Resources, Conservation and Recycling* 60: 99-106.
22. Zhang, W., J. Zhu, X. Zhou and F. Li. 2018. Effects of shallow groundwater table and fertilization level on soil physico-chemical properties, enzyme activities, and winter wheat yield. *Agricultural Water Management* 208: 307-317.
23. Zimmermann, I., H. Fleige and R. Horn. 2017. Longtime effects of deep groundwater extraction management on water table levels in surface aquifers. *Journal of Soils Sediments* 17(1): 133-143.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 24, No. 3, Fall 2020, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Simulating and Optimizing the Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources Using the System Dynamics Approach (A Case Study: Dashte-Abbas Irrigation Network)

H. Alizadeh*, A. Hoseini and M. Soltani[1]

(Received: November 2-2019; Accepted: March 5-2020)

Abstract

The construction of irrigation network and the water transfer from Karkheh Dam to Dashte-Abbas, due to neglecting the groundwater resources has increased groundwater level and waterlogging of the agricultural land in the recent years. The aim of this study was, therefore, to optimize the conjunctive use of surface and groundwater resources in Dashte-Abbas to minimize waterlogging problems and achieve the maximum net income. For this purpose, the behavior of groundwater was simulated using the system dynamics (SD) approach. The conjunctive use of surface and groundwater resources was then optimized using the Vensim multi-criteria optimization method with the objective function of maximizing the net income of the plain. The SD model calibration was done using climatic, hydrological, agricultural, and environmental data from the 2001-2009 time period; then it was validated based on the information from the 2009-2016 period. Evaluation of the developed SD model showed that the model had high accuracy in simulating key variables such as groundwater levels (ME=60cm, R^2=97%, RMSE=47cm) and groundwater salinity (RMSE=100µS/cm, R^2=74%, and ME=123µS/cm). Furthermore, the results of the optimization model showed that the optimum use of surface and groundwater resources for the agricultural demand was 65% and 35%, respectively. To sum up, it could be concluded that with the optimization of the conjunctive use of surface and groundwater resource, s about 10 MCM of water consumption could be annually saved to irrigate almost 800 ha of the new lands.

Keywords: Conjunctive use, Optimization, Simulation, System Dynamics, Groundwater level.

1. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.
*: Corresponding author, Email: H.alizadeh@ilam.ac.ir