شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی در مدیریت‌های مختلف آبیاری با روش تحلیل پویایی سیستم

حامد نوذری[۱]*، مجید حیدری و سعید آزادی

استادیار گروه مهندسی آبیاری دانشگاه بوعلی سینا ، hanozari@yahoo.com

استادیار گروه مهندسی آبیاری دانشگاه بوعلی سینا ، mheydari_ir@yahoo.com

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری زهکشی گروه مهندسی آبیاری دانشگاه بوعلی سینا ، s_azadi_ir@yahoo.com

چکیده

یکی از راهکارهای توسعه کشاورزی، استفاده از شبکه‌های آبیاری و زهکشی است که منجر به بهره‌وری بالاتر و سود اقتصادی بیشتری خواهد شد. در تحقیق حاضر به کمک روش تحلیل پویایی سیستم مدل کامپیوتری بسط داده شد که بتواند عملکرد محصولات کشاورزی یک شبکه آبیاری را با توجه به کمیت و کیفیت آب آبیاری، شبیه‌سازی و سود خالص ناشی از محصولات را برآورد نماید. به منظور واسنجی و اعتباریابی نتایج مدل از داده‌های جمع‌آوری شده اراضی تحقیقاتی شبکه آبیاری سمت راست آبشار استفاده گردید. پس از تجزیه و تحلیل آماری و محاسبه RMSE، خطای نسبی، خطای استاندارد و ضریب همبستگی میزان برازش میان مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده عملکرد محصولات شبکه محاسبه شد. مقدار این شاخص‌ها با توجه به شرایط موجود در شبکه به ترتیب ۲۰۹/۹۸ کیلوگرم بر هکتار، ۱/۳۶ درصد، ۰/۰۰۷ و ۰/۹۹ برآورد گردید. نتایج نشان داد مدل حاضر در شبیه‌سازی شبکه آبیاری، الگوی کشت آن و تعریف سایر سناریوها از دقت خوبی برخوردار است. اما بررسی‌های اولیه نشان داد میزان برداشت آب زیرزمینی در منطقه مذکور بیشتر از حد مجاز می‌باشد. لذا با توجه به اهمیت منابع آب، دو سناریوی آبیاری به میزان نیاز آبی محصولات و آبیاری با توجه به محدودیت میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی تعریف شد و نتایج آنها تحلیل گردید. نتایج نشان داد که متوسط نسبت درآمد به هزینه محصولات برای شرایط آبیاری شبکه در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵،برای شبیه سازی سناریو اول و در سناریو دوم به ترتیب ۲/۵۸، ۲/۸۸ و ۲/۷۵ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شبکه آبیاری، الگوی کشت

مقدمه

افزایش روز افزون جمعیت و نیاز بشر به مواد غذایی و محدودیت منابع آب به منظور تولید مواد غذایی، موجب اهمیت روزافزون کشاورزی و تولیدات آن شده است.

شرایط خاص اقلیمی کشور که خشکی و پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی جزو انکار ناپذیر آن است، هر گونه تولید مواد غذایی و کشاورزی پایدار را منوط به استفاده صحیح و منطقی از منابع آب محدود

---

۱. آدرس نویسنده مسئول: همدان، دانشگاه بوعلی سینا ، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری

* دریافت: فروردین ۱۳۹۲و پذیرش:آبان ۱۳۹۲

کشور نموده است. یکی از راه حلها برای توسعه کشاورزی، استفاده از شبکه‌های آبیاری و زهکشی مدرن می‌باشد به طوری که در این شبکه‌ها می‌توان از آب، انرژی، سطح زیر کشت و نیروی کارگری به طرز بهینه بهره برد که نهایتا منجر به بهره‌وری بالاتر و سود اقتصادی بیشتری خواهد شد.

وظیفه‌دوست و همکاران در سال ۲۰۰۸ به منظور بررسی بهره‌وری آب کشاورزی در مقیاس مزرعه در منطقه برخوار اصفهان در سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ نشان دادند که متوسط بهره وری مصرف آب برای محصولات چغندرقند، آفتابگردان، ذرت علوفه‌ای و گندم به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۲۲، ۱/۷۶ و ۰/۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد(وظیفه‌دوست و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج تحقیقات در شبکه‌های اصفهان نشان می‌دهد که بهره‌وری اقتصادی آب در این شبکه ها حدود نصف مقدار نظیر آن در جهان است (اکبری و همکاران، ۲۰۰۳). رضاوردی نژاد (۱۳۸۹) میزان بهره‌وری آب برای سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ را در شبکه سمت راست آبشار در حوضه آبریز زاینده‌رود اصفهان محاسبه کرد. متوسط بهره‌وری آب شبکه برای سال زراعی فوق ۱/۲۹ کیلوگرم بر متر مکعب محاسبه گردید (رضاوردی نژاد، ۱۳۸۹).

به منظور ارتقای کارکرد شبکه‌های آبیاری و زهکشی کشور می‌توان از آزمایشهای مزرعه‌ای و مدل‌های شبیه‌سازی استفاده نمود. در آزمایشهای مزرعه‌ای برای تعیین تاثیر عوامل مختلف بر روی کارکرد شبکه، عمق بهینه و برنامه‌ریزی آبیاری لازم است که آزمایشهایی با کمیت و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری برای محصولات زراعی مختلف انجام گیرد. در این روش محدودیتهایی نیز وجود دارد. از جمله این محدودیتها می توان به هزینه بالا، عدم امکان انجام سناریوهای زیاد و پیچیده مدیریت آبیاری، محدود بودن صحت و سقم نتایج به منطقه و شرایط آزمایش اشاره نمود. لذا از مدلهای شبیه‌سازی می‌توان به عنوان طرح توسعه یافته‌ای از آزمایشهای صحرایی برای غلبه بر این محدودیتها استفاده کرد. در صورتیکه این مدلها به درستی واسنجی شوند، بدون محدودیت زمانی و مکانی موجود در آزمایشهای مزرعه‌ای و نیز صرف زمان و هزینه زیاد، می‌توانند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری به کار گرفته شوند (مصطفی‌زاده فرد و همکاران، ۲۰۰۹).

لازم به ذکر است، علاوه بر هزینه بالا و صرف زمان زیاد در بررسی آزمایشگاهی سیستم آب و خاک، ثابت نگه داشتن شرایط آزمایش در طول تحقیق نیز بسیار دشوار است. از این رو تلاش‌های زیادی به منظور توسعه مدل‌های کامپیوتری در بخش مذکور صورت گرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به مدل کامپیوتری Drainmod اشاره کرد که به منظور شبیه‌سازی سطح ایستابی و زهاب خروجی زهکش‌های زیرزمینی در مناطق مرطوب با سطح ایستابی کم عمق توسعه یافته است (اسگکس، ۱۹۸۰). همچنین به کمک مدل Swap تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. اگر چه این مدل توانایی شبیه‌سازی‌های همه جانبه مانند عملکرد محصول، نحوه حرکت آب و املاح در خاک و انتقال حرارت را دارد، اما با محدودیت‌هایی از جمله تعداد ورودی‌های زیاد نیز روبرو است (کروس و ون‌دام، ۲۰۰۸).

یکی از روش‌های بسیار موثر برای بررسی وضعیت سیستم‌ها، روش پویایی سیستم می‌باشد که یکی از روشهای قدرتمند و بصری شبیه‌سازی است. این روش ابتدا توسط فاستر (۱۹۶۱) جهت درک بهتر مسائل استراتژی در سیستم‌های پویای پیچیده ابداع گردید (فاستر، ۱۹۶۱). مدل‌هایی که با این روش نوشته می‌شوند، با بینش فرآیندهای بازخورد، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار دینامیکی سیستم‌ها در طول زمان نایل می‌سازند. زمینه‌های کاربردی این روش بسیار وسیع بوده و کاربرد آن در مسائل اجتماعی و اقتصادی بیشتر تأکید می‌شود. استفاده از این روش در تحقیقات آب نیز صورت گرفته که می‌توان به تحقیقات فلچر در سال ۱۹۹۸ اشاره نمود. این محقق روش مذکور را به عنوان یک روش

تحلیل تصمیم در مدیریت کم آبی استفاده نمود (فلچر، ۱۹۹۸).

نوذری و همکاران در سال ۱۳۸۸ با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم، تراز سطح آب و شدت زهاب خروجی اراضی مجهز به سیستم زهکش زیرزمینی را در شرایط غیرماندگار به طور کامل مدلسازی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد روش پویایی سیستم ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی فرایندهای سیستم پیچیده آب و خاک می‌باشد (نوذری و همکاران، ۱۳۸۸). همچنین بالا و همکاران در سال ۱۹۸۸ رابطه بین عملکرد محصول و تنش آبی وارده بر آن در طول دوره رشد را به کمک روش پویایی سیستم مدلسازی نمودند. در این مطالعه مقادیر شبیه‌سازی تبخیر و تعرق تجمعی با داده‌های مشاهده‌ای در ایستگاه هواشناسی کپنهاگ، تطابق قابل قبولی را نشان داد و نتایج حاکی از توانایی مدل در مدیریت میزان کاربرد آب آبیاری در مزرعه بود (بالا و همکاران، ۱۹۸۸).

لو و همکاران در سال ۲۰۰۹ از روش تحلیل پویایی سیستم برای توسعه نفوذ، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی و صعود موئینگی، در کشت برنج واقع در پایین دست رودخانه زرد چین استفاده کردند. نتایج این مدل که از آنالیز و روابط باز خورد بین فرآیندهای هیدرولوژی استفاده می‌کند، نشان داد که با سطح اطمینان ۹۵ درصد رابطه معنی‌داری بین پارامترهای شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد (لو و همکاران، ۲۰۰۹). سیسل و بارلس (۲۰۰۱) مدل دینامیکی شوری در زمین‌های آبیاری، در قسمت نسبتاً کم آب جنوب شرقی ترکیه را مورد بررسی قرار دادند. این محققین با شبیه‌سازی محیط خاک در حضور سیستمهای زهکشی زیرزمینی، نشان دادند که روش پویایی سیستم می‌تواند روش مناسبی برای شبیه-سازی این محیط باشد (سیسل و بارلس، ۲۰۰۱).

با بررسی مطالعات صورت گرفته می‌توان گفت، مدلهای عددی بسیاری وجود دارد که می‌توانند انتقال املاح را در محیط متخلخل شبیه‌سازی و عملکرد محصول را برآورد کنند. اما به دلیل حساسیت این مدلها به شرایط مرزی استفاده از آنها در شرایط مزرعه بحث برانگیز می‌باشد (چوپس و هوپمنز، ۲۰۰۲؛ جرعه نوش و سپاسخواه، ۲۰۰۳). در اکثر مدلهای تحلیلی موجود نیز نمی‌توان سهم مشارکت کمی و کیفی آب آبیاری را در عملکرد محصول تعیین نمود و یا قابلیت الگوی کشت که به دلیل متغیر بودن مشخصات گیاه و تاثیر حضور ریشه گیاه در ناحیه غیر اشباع خاک، یکی از عوامل موثر و مهم در مدیریت آب آبیاری در سطح مزارع می باشد، در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این، به کمک هیچ یک از مدلهای موجود نمی‌توان پارامترهای اقتصادی یک شبکه، که یکی از مهمترین پارامترها در مدیریت می باشد را محاسبه نمود. بنابراین با توجه به اهمیت این مسئله و مزایای استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم در حل مسائل، تصمیم به استفاده از تکنیک تحلیل پویایی سیستم برای شبیه سازی سیستم آب و خاک در مقیاس شبکه آبیاری و زهکشی گرفته شد تا علاوه بر شبیه‌سازی شبکه و الگوی کشت حاکم بر آن، بتوان عملکرد محصول را با توجه به کمیت و کیفیت آب آبیاری محاسبه و پارامترهای اقتصادی ناشی از آن را مورد بررسی قرار داد.

مواد و روش‌ها

تبخیر و تعرق

در این قسمت سعی بر این است تا با دادن اطلاعات هواشناسی شامل اطلاعات بارش، درجه حرارت ماکزیمم و مینیمم، سرعت باد و رطوبت نسبی، به مدل مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل به کمک روش فائو پنمن مانتیث برآورد گردد. همچین مدل قابلیت ورود میزان تبخیر و تعرق پتانسیل منطقه بصورت مستقیم و بدون نیاز به محاسبه را نیز دارا می باشد.

شبیه سازی آب و املاح در خاک

در این تحقیق از روش بیلان آبی جهت شبیه سازی آب و از روش بیلان جرمی به منظور شبیه سازی املاح در لایه های مختلف خاک استفاده شده است. لازم به ذکر است در تعیین مقدار املاحی که بصورت نفوذ عمقی از

لایه های فوقانی خاک می‌گذرد، از روابط جریان ترجیحی استفاده شده است. بدین معنی که بخشی از آب آبیاری که بصورت نفوذ عمقی از لایه های فوقانی می گذرد در شستشوی نمک موثر نیست و بدون اینکه با آب خاک مخلوط شود از درز و شکافها و یا فضاهای درشت خاک عبور می کند.

عملکرد محصول

با در نظر گرفتن اثرات شوری و کم آبی در مراحل رشد گیاه، مدل تابع تولید- آب- شوری در مقیاس درون فصلی ونگ، به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد که هدف آن محاسبه عملکرد نسبی محصول نسبت به کمیت و کیفیت آب آبیاری محصول می‌باشد.

$$\frac{Y_a}{Y_{\max}} = \prod_{i=1}^{n}\left(\frac{ET_i}{ET_{\max -i}}\right)^{\lambda i} \cdot \prod_{j=1}^{m}\left(\frac{S_{\max -j} - S_j}{S_{\max -j} - S_{\min -j}}\right)^{\beta j} \quad (۱)$$

در این رابطه Y_a بازده محصول با توجه به تنش آب و شوری، Y_{max} حداکثر بازده محصول، $ET_{max\text{-}i}$ تبخیر و تعرق گیاهی ماکزیمم، بدون تنش شوری و منبع آب کافی در طی مرحله رشد i ام، ET_i تبخیر و تعرق گیاهی واقعی بدون تنش شوری و آبی طی مرحله رشد i ام، λ_i شاخص حساسیت آبی محصول در طی مرحله رشد i ام، n تعداد مراحل رشد محصول مرتبط با تاثیر تنش آبی بر بازده محصول، m تعداد مراحل رشد محصول مرتبط با تجمع شوری-خاک بر بازده محصول، $S_{max\text{-}j}$ حد بالای غلظت شوری خاک در طی مرحله رشد i ام، S_j غلظت شوری خاک واقعی در طی مرحله رشد i ام، $S_{min\text{-}j}$ مقدار بحرانی غلظت شوری خاک در طی مرحله رشد i ام، β_i شاخص حساسیت شوری محصول می باشد.

محیط برنامه نویسی

در این تحقیق، از محیط برنامه نویسی Vensim DSS32 نسخه 4.0a که ابزاری برای مدلسازی به زبان پویایی سیستم و به صورت شی گرا بر پایه بازخورد می‌باشد، استفاده می‌شود. این ابزار مدلسازی، امکان ایجاد مدل‌های پیچیده را با سهولت بیشتری نسبت به زبان‌های برنامه نویسی مرسوم بوجود می‌آورد.

یکی از مراحل اصلی مدلسازی به روش پویایی سیستم ترسیم نمودارهای علی و معلولی می‌باشد. این نمودارها ابزاری مناسب برای ترسیم ساختار بازخوردی سیستمها می‌باشند. رابطه علی با دو علامت مثبت و منفی نشان داده می‌شود. در صورتی که تغییرات متغیر مستقل و وابسته در یک جهت باشند رابطه علی مثبت خواهیم داشت و در صورتیکه تغییرات متغیر مستقل و وابسته عکس یکدیگر باشند رابطه علی منفی خواهیم داشت. پس از ترسیم نمودارهای علی و معلولی باید نمودارهای حالت و جریان را ترسیم نمود. این نمودارها همراه با بازخورد دو مفهوم اساسی تئوری تحلیل پویایی سیستم می‌باشند.

داده‌های ورودی مدل شامل اطلاعات هواشناسی، اطلاعات مربوط به خصوصیات فیزیکی خاک، گیاه، شوری، کمیت و کیفیت آب آبیاری و سیستم زهکشی مزرعه می‌باشد. از آنجا که مدل توانایی پذیرش الگوی کشت را دارد بنابراین اطلاعات خصوصیات فیزیکی خاک، گیاه و حتی سیستم زهکشی می‌تواند برای مزارع مختلف متفاوت باشد.

اعتبار سنجی مدل

پس از ایجاد مدل شبیه‌سازی، باید بتوان اعتبار آن را تایید کرد. در این قسمت به کمک آمار و اطلاعات جمع آوری شده از شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبشار واقع در حوزه هیدرولوژیک رودخانه زاینده‌رود اعتبار مدل کنترل می‌شود. این شبکه که در حوزه هیدرولوژیک رودخانه زاینده‌رود و دشت کوهپایه و سگزی در شرق شهرستان اصفهان واقع شده است (شکل ۱) در سال ۱۳۴۹ احداث گردیده و در طول جغرافیایی ۵۱/۵۰ تا ۵۲/۰۹ درجه و عرض جغرافیایی ۳۲/۴۲ تا ۳۲/۶۷ درجه و ارتفاع متوسط ۱۵۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. آب مورد نیاز زمین‌های زیردست شبکه از آب سطحی و از طریق انحراف آب در محل سد انحرافی آبشار و آب زیرزمینی از طریق چاه‌های عمیق و نیمه عمیق منطقه

تأمین می‌شود. سطح اراضی کشاورزی طراحی شده زیردست کانالهای آبیاری حدود ۱۵۰۰۰ هکتار و وسعت کل شبکه حدود ۲۰۰۰۰ هکتار می باشد (اکبری و همکاران، ۲۰۰۳).

این منطقه از نظر اقلیمی خشک و نیمه خشک بوده و محدوده درجه حرارت ماهیانه آن از ۳ تا ۳۰ درجه سانتیگراد و متوسط بارش سالیانه آن ۱۲۰ میلیمتر می-باشد. آب سطحی دارای کیفیت خوب بوده ولی آبهای زیرزمینی منطقه دارای شوری بالا می‌باشد. به همین دلیل کشاورزان منطقه برای آبیاری از تلفیق آب سطحی و زیرزمینی استفاده می‌کنند. روند تغییرات شوری آب سطحی نیز در طول سال بسیار اندک می‌باشد. این روند وابستگی مستقیم به مقدار جریان رودخانه داشته و بیشترین مقدار آن در اسفند ماه با شوری ۱/۰۹ دسی-زیمنس بر متر و کمترین آن حدود ۰/۸۲ دسی‌زیمنس بر متر در خرداد ماه اتفاق افتاده است. همچنین کمترین میزان شوری آب زیرزمینی در حدود ۱/۵۵ دسی‌زیمنس بر متر و بیشترین شوری آب زیرزمینی به طور متوسط ۶/۹۵ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ به عنوان سال زراعی مبنا میزان عرضه آب در کل شبکه ۳۸۹/۴ میلیون متر مکعب می‌باشد که سهم آب زیرزمینی و انحرافی از محل سد به ترتیب ۷۸/۳ و ۲۱/۷ درصد گزارش شده است (رضاوردی نژاد، ۱۳۸۹).

لازم به ذکر است اطلاعات ضریب گیاهی از مجله فائو ۵۶ استخراج گردید. سپس مقادیر ضریب گیاهی برای منطقه مورد مطالعه توسط مدل واسنجی شد (آزادی، ۱۳۹۱).

تعیین محصولات شاخص و سازگار با منطقه

پس از مشورت با کارشناسان مراکز خدمات جهاد کشاورزی منطقه، ۸ محصول عمده شبکه، شامل گندم، جو، برنج، پیاز، یونجه، ذرت علوفه‌ای، آفتابگردان و چغندرقند که از سال زراعی ۷۶-۱۳۷۵ تا ۸۷-۱۳۸۶ همواره بیش از ۹۰٪ سطح کشت شبکه را به خود اختصاص داده‌اند، به عنوان محصولات شاخص منطقه انتخاب گردید (رضاوردی نژاد، ۱۳۸۹). در تحقیق حاضر بر اساس آمار بلند مدت ۸ محصول فوق به عنوان محصولات عمده شبکه و سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ به عنوان سال زراعی مبنا انتخاب شد. سطح زیر کشت این محصولات زراعی در کل شبکه در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ به ترتیب برابر است با ۴۳/۲، ۸/۲، ۲۰/۲، ۰/۲، ۰/۸، ۵/۹، ۷/۳ و ۵/۷ درصد می‌باشد که در مجموع ۹۱/۵ درصد از کل شبکه را در این سال زراعی شامل می‌شود. از آنجایی که سایر محصولات شبکه درصد کمی را شامل می‌شدند، از آنها صرفنظر شد و شبیه‌سازی شبکه برای این محصولات اصلی صورت گرفت. لازم به ذکر است نیاز آبی کل محصولات شبکه در سال زراعی مذکور نیز از مرکز جهاد کشاورزی استان دریافت گردید.

عملکرد واقعی و پتانسیل محصولات گزارش شده در منطقه در سال زراعی ۸۶ بر حسب تن در هکتار برابر است با: پیاز ۸۳-۱۱۰، چغندرقند ۴۰-۵۰، ذرت علوفه‌ای ۸۰-۱۰۰، گندم ۶/۳-۹، جو ۵/۲-۸، برنج ۶/۵-۷، یونجه ۱۴-۱۷ و آفتابگردان ۲/۵-۳.

هزینه‌های تولید محصولات

هزینه‌های تولید محصولات شامل هزینه‌های ثابت و متغیر می‌باشد. هزینه‌های ثابت هر یک از محصولات شامل هزینه‌های آماده‌سازی زمین، زمین، کاشت، داشت و برداشت بوده و هزینه‌های متغیر هر محصول نیز در ارتباط با مقدار آب مصرفی محصولات می‌باشد که بستگی به مقدار آب مصرفی، نوع منبع آب (سطحی یا زیرزمینی)، هزینه‌های آبیاری و سایر هزینه‌های در ارتباط با آب مصرفی دارد. هزینه آبیاری هر محصول از آمارنامه معاونت طرح و برنامهریزی اقتصادی جهاد کشاوزی استان اصفهان استخراج گردید. هزینه آببهای سطحی برای هر سال زراعی ثابت بوده و از شرکت بهره برداری شبکه آبشار، جمع آوری شده است. هزینه های آب زیرزمینی شامل هزینه تعمیر پمپ، هزینه سوخت یا برق و کفزنی چاه می‌باشد که این آمار براساس شرکت آب منطقه‌ای برای سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ جمع آوری شده است.

هزینه‌های ثابت و متغیر در واحد سطح برای سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ در جدول ۱ ارائه شده است.

قیمت خرید هر کیلوگرم از محصولات گندم، جـو، ذرت علوفه‌ای، چغندرقند، آفتابگردان، پیاز، یونجه و برنج در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ به ترتیـب ۳۰۵۰، ۲۷۰۰، ۳۵۰، ۵۰۰، ۹۰۰۰، ۶۴۰، ۳۳۰۰، ۱۵۰۰۰ ریال بود.

به منظور ارزیابی و اعتباریابی نتایج مدل، از شاخصهای آماری ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE) و ضریب همبستگی (R^2) استفاده شد. شکل ریاضی این آماره‌ها بصورت زیر می باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_m - Y_p)^2}{n}} \qquad (۲)$$

$$SE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum (Y_m - Y_p)^2}}{\overline{Y}_m} \qquad (۳)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(Y_m - \overline{Y}_m)(Y_p - \overline{Y}_p)]^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y_m - \overline{Y}_m)^2 \sum_{i=1}^{n}(Y_p - \overline{Y}_p)^2} \qquad (۴)$$

در این روابط n تعداد روزهای دوره مورد مطالعه، Y_m مقادیر اندازه‌گیری شده در هر روز، Y_p مقدار پیش بینی شده با استفاده از مدل، $\overline{Y}_m$ میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و $\overline{Y}_p$ میانگین داده‌های پیش بینی شده می‌باشد.

نتایج و بحث

همانطور که پیشتر نیز اشاره شد در مدلسازی به روش پویایی سیستم، حلقه‌های علت و معلولی مکانیزم بازخوردهای اصلی را نشان می‌دهند. حلقه‌های علت و معلولی سیستم آب و خاک در حضور ریشه گیاه بصورت شکل ۲ می‌باشد. به عنوان نمونه در حلقه شماره ۱ با افزایش تبخیر و تعرق واقعی، ظرفیت آب خاک کاهش می‌یابد. با کاهش آن میزان رطوبت خاک کاهش یافته و باعث کاهش ضریب رطوبتی خاک می‌شود. کاهش ضریب رطوبتی خاک نیز موجب کاهش تبخیر و تعرق واقعی می‌شود و یک حلقه منفی را تشکیل می‌دهد. از طرفی در حلقه شماره ۲ با افزایش تبخیر و تعرق واقعی میزان جریان رو به بالا از سطح آب زیرزمینی افزایش می‌یابد که خود باعث افزایش آب خاک شده و یک حلقه مثبت را تشکیل می‌دهد.

لازم به ذکر است که در این تحقیق پس از مدلسازی محیط آب و خاک، نتایج مدل به کمک داده های اندازه گیری شده از کرتهای آزمایشی محصول چغندر قند صحت سنجی شد (آزادی، ۱۳۹۱). سپس به کمک گزینه سابسکریت[1] که یکی از توانایی‌های محیط برنامه نویسی Vensim می‌باشد و قادر است پراکندگی مکانی سیستم‌های مشابه را شبیه‌سازی نماید، الگوی کشت مورد نظر در شبکه تعریف شد. پس از آن شبکه آبیاری سمت راست آبشار اصفهان به طور کامل توسط مدل شبیه‌سازی گشت. پس از شبیه‌سازی شبکه و آبیاری گیاهان با توجه به شرایط سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ در این شبکه، خطای نسبی بین عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شده محاسبه شد که مقدار میانگین آن برابر با ۱/۳۶ درصد می‌باشد (جدول ۲). رن و همکاران مقدار این خطا را در تحقیقی برای گندم حدود ۶ درصد و برای پنبه حدود ۱۱ درصد بدست آوردند و دقت مدل را خوب ارزیابی کردند (رن و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین مقدار شاخص‌های آماری RMSE، SE و R^2 عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شبکه در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر خطای نسبی، خطای استاندارد، ضریب همبستگی و همچنین RMSE، می‌توان انطباق بین نتایج شبیه‌سازی شده و واقعی را در تحقیق حاضر خوب ارزیابی کرد.

بررسی‌های اولیه حاکی از آن بود که آب مورد استفاده در شبکه مذکور حدود ۳۸۹/۴ میلیون متر مکعب و بیش از نیاز آبی محصولات می‌باشد. لذا پس از تایید نتایج مدل، با توجه به محدودیت منابع آب و اهمیت حفظ و نگهداری آنها، تاثیر مدیریت‌های مختلف آب آبیاری بر میزان برداشت محصول و پارامترهای اقتصادی ناشی از آن مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین در یک سناریو، عملکرد محصولات و پارامترهای اقتصادی شبکه

1. Subscript

با توجه به نیاز آبی محصولات (۱۳۴/۳۰ میلیون متر مکعب) و در سناریوی دیگر، با توجه به مقدار مجاز و پتانسیل برداشت از آب زیرزمینی (۱۷۴/۱۵ میلیون متر مکعب)، ارزیابی شد.

لازم به ذکر است که در این دو سناریو از پتانسیل آب سطحی به طور کامل استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی شبکه، توسط مدل مذکور، برای سه حالت فوق در شکل ۳، نشان داده شده است.

در این قسمت با توجه به هزینه‌های ثابت و متغیر و سود ناشی از محصولات شبکه، میزان سود به هزینه برای شرایط آبیاری شبکه در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵، مطابق با نیاز آبی محصولات و با توجه به پتانسیل برداشت از منابع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول ۴ نتایج مربوط به این بررسی را که توسط مدل صورت گرفته است نشان می دهد.

با توجه به جدول فوق، متوسط نسبت درآمد به هزینه محصولات برای حالت‌های مذکور به ترتیب ۲/۵۸، ۲/۸۸ و ۲/۷۵ می‌باشد. ملاحظه می‌شود که بیشترین نسبت درآمد به هزینه محصولات مربوط به زمانی می شود که مطابق با نیاز آبی محصولات، آبیاری صورت گیرد و کمترین این نسبت نیز متعلق به شرایط سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ در شبکه می باشد. این بدان مفهوم است که مصرف آب مطابق با نیاز آبی محصولات، بیشترین کارکرد را دارا می‌باشد. از طرفی اگر مقدار هزینه‌ها از درآمد حاصله کسر شود، سود خالص بدست می‌آید که با توجه به آن مجموع سود بدست آمده برای محصولات با توجه به شرایط مذکور به ترتیب ۲۴۶۱۶۴/۰۲، ۲۵۶۶۷۶/۶۶ و ۲۵۴۸۳۸/۳۵ میلیون ریال می‌باشد. بنابراین با توجه به میزان سود خالص، هزینه‌ها و ارزش آب مصرفی (مخصوصا آب زیرزمینی) می‌توان نتیجه گرفت که مصرف آب با توجه به نیاز آبی گیاه، بیشترین عملکرد را از نظر اقتصادی دارا می‌باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق با استفاده از تکنیک تحلیل پویایی سیستم محیط آب و خاک در مقیاس یک شبکه آبیاری و زهکشی شبیه‌سازی و پارامترهای اقتصادی ناشی از الگوی کشت محصولات در شبکه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با توجه به آنکه در شرایط موجود، آب مورد استفاده بیش از نیاز آبی محصولات می باشد، دو سناریوی آبیاری محصولات شبکه مطابق با نیاز آبی آنها و آبیاری با توجه به محدودیت میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی تعریف و شبیه‌سازی شد. در سناریو دوم و سوم از پتانسل آب سطحی به طور کامل استفاده گردید و کمبود آن از منابع آب زیرزمینی جبران شد. به منظور واسنجی و اعتباریابی نتایج مدل نیز از آمار و اطلاعات جمع آوری شده از شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبشار واقع در حوزه هیدرولوژیک رودخانه زاینده‌رود در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ استفاده گردید. میزان برازش میان مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده عملکرد محصولات شبکه در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵، با محاسبه شاخصهای آماری RMSE، خطای نسبی، خطای استاندارد و ضریب همبستگی محاسبه گردید. مقدار این شاخص‌ها به ترتیب ۲۰۹/۹۸ کیلوگرم بر هکتار، ۱/۳۶ درصد، ۰/۰۰۷ و ۰/۹۹ برآورد گردید که دقت خوبی را نسبت به شرایط واقعی نشان می‌دهد. لذا با توجه به این مقادیر و همچنین اعداد ارائه شده در جدول ۴ می‌توان گفت روش تحلیل پویایی سیستم، در شبیه‌سازی محیط آب و خاک و عملکرد محصول در شبکه از دقت خوبی برخوردار است. از سوی دیگر نتایج مربوط به میزان سود خالص، هزینه‌ها و ارزش آب مصرفی نشان می‌دهد که مصرف آب متناسب با نیاز آبی گیاه، بیشترین عملکرد اقتصادی و مصرف آب مطابق با شرایط موجود (سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵) کمترین عملکرد اقتصادی را داراست.

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، حساسیت و صرف زمان کمتر در اجرای برنامه اشاره کرد پذیرش الگوی کشت، بهینه‌سازی، قابلیت تحلیل

جدول۱- هزینه‌های تولید محصولات انتخابی بر اساس آمار سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵

محصول	مجموع هزینه ثابت (ریال بر هکتار)	هزینه آب سطحی (ریال بر متر مکعب)	هزینه آب زیرزمینی (ریال بر متر مکعب)
گندم	۶۷۸۸۰۹۰	۷۷/۳	۱۶۲/۴
جو	۵۷۶۶۹۴۰	۶۴/۷	۱۳۵/۸
آفتابگردان	۸۹۴۲۹۶۰	۷۴/۰	۱۵۵/۴
چغندرقند	۱۲۱۷۸۰۳۰	۷۵/۰	۱۵۷/۵
پیاز	۲۶۴۴۳۷۲۰	۹۵/۸	۲۰۱/۲
ذرت علوفه ای	۷۱۹۲۵۴۰	۹۵/۸	۲۰۱/۱
برنج	۲۰۴۹۳۷۴۰	۷۱/۴	۱۵۰/۰
یونجه	۱۳۰۴۵۰۰۰	۷۴/۰	۱۵۵/۴

جدول ۲- خطای نسبی بین عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شبکه در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ بر حسب درصد

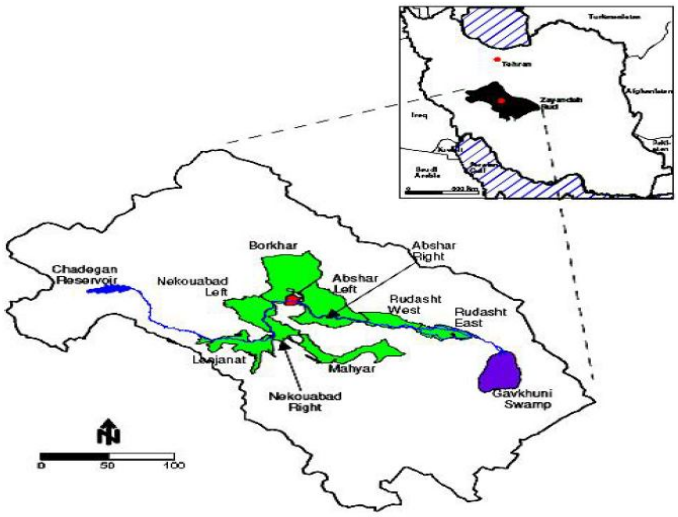
محصول زراعی	پیاز	چغندر قند	ذرت	گندم	جو	برنج	یونجه	آفتابگردان
مقدار	۰/۰۰۵	-۰/۰۰۳	۰/۰۲	۰/۹	-۰/۰۶	۸/۵	۱/۵	۰

جدول ۳- مقدار شاخصهای آماری عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شبکه در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵

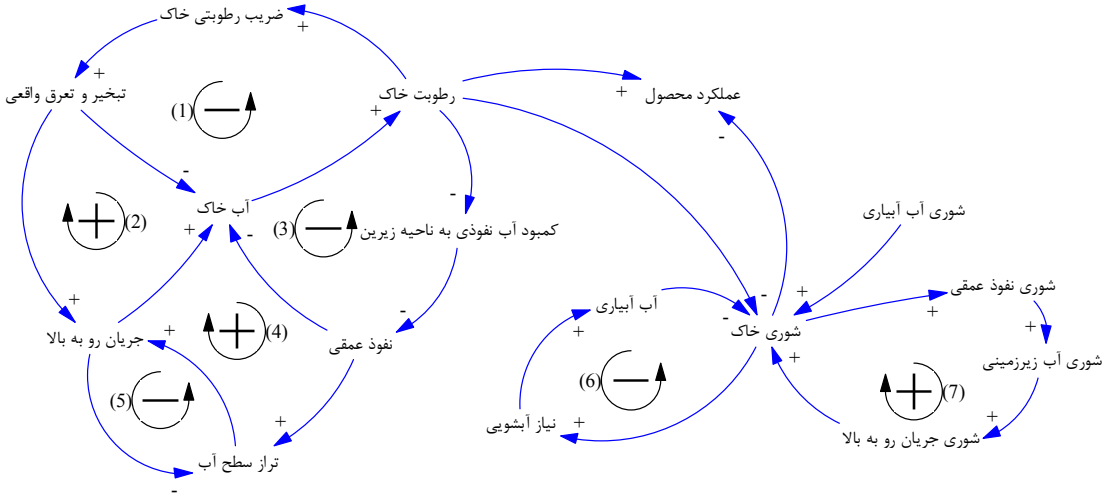
شاخص آماری	R^2	RMSE (kg/ha)	SE
مقدار	۰/۹۹	۲۰۹/۹۸	۰/۰۰۷

جدول ۴- پارامترهای اقتصادی برآوردی برای سناریوهای مختلف (میلیون ریال)

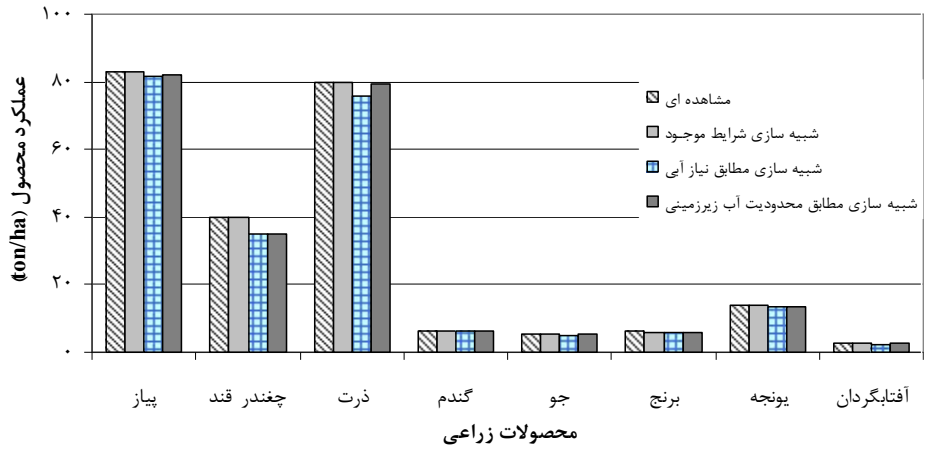
محصول زراعی	شرایط موجود در شبکه در سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵			با توجه به نیاز آبی محصولات			با توجه به پتانسیل برداشت از منابع آب زیرزمینی		
	درآمد	هزینه ها	درآمد به هزینه	درآمد	هزینه ها	درآمد به هزینه	درآمد	هزینه ها	درآمد به هزینه
پیاز	۴۷۰۰۰	۲۵۲۵۵/۲	۱/۸۶	۴۶۱۷۰	۲۳۸۸۵/۲	۱/۹	۴۶۵۹۰	۲۴۵۵۹/۸	۱/۹
چغندر قند	۶۰۰	۴۵۷/۳	۱/۳	۵۲۴/۹۶	۳۸۹/۴	۱/۳۵	۵۲۵/۶	۴۲۲/۵	۱/۲
ذرت	۸۴۸۲۰	۲۷۲۶۴/۵	۳/۱	۸۰۵۵۰	۲۳۲۱۹/۹	۳/۵	۸۴۰۱۰	۲۵۱۹۰/۴	۳/۳
گندم	۱۲۳۳۷۰	۵۳۸۷۳/۴	۲/۳	۱۲۲۸۶۰	۴۶۵۷۳/۲	۲/۶	۱۲۳۲۲۰	۵۰۱۳۰/۲	۲/۵
جو	۱۷۲۷۰	۸۸۲۹/۲	۱/۹۶	۱۶۷۰۰	۷۵۲/۹	۲/۲	۱۷۱۵۰	۸۱۷۴/۶	۲/۱
برنج	۷۶۳۰۰	۲۰۴۲۲/۹	۳/۷۴	۷۵۵۶۰	۱۸۲۷۷/۷	۴/۱	۷۷۱۰۰	۱۹۳۲۳/۳	۳/۹۹
یونجه	۴۹۸۲۰	۱۸۳۴۹/۹	۲/۷	۴۸۰۲۰	۱۵۳۴۱/۹	۳/۱	۴۹۳۶۰	۱۶۸۱۲	۲/۹
آفتابگردان	۲۷۰۰	۱۲۶۳/۵	۲/۱۴	۲۶۴۵	۱۱۲۳/۱	۲/۴	۲۶۸۷	۱۱۹۱/۶	۲/۳



شکل ۱. شمای کلی شبکه‌های آبیاری عمده در حوضه آبریز زاینده‌رود (سالمی و همکاران، ۲۰۰۰)



شکل ۲. حلقه‌های علت و معلولی محیط آب خاک



شکل ۳. عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شده محصولات تحت سناریوهای مختلف

فهرست منابع

۱.آزادی، س، ۱۳۹۱، تاثیر کمیت و شوری آب آبیاری بر عملکرد محصول با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی.

۲.اکبری، م، م، میرلطیفی، س، مرید، و پ، دروگرز، ۱۳۸۲، کاربرد سنجش از دور در برآورد سودمندی آب در شبکه‌های آبیاری، مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۴، شماره ۱۷، صفحه ۶۵-۸۲.

۳.رضاوردی نژاد، و، ۱۳۸۹، بهینه‌سازی الگوی کشت و تخصیص آب مصرفی در شرایط شوری و محدودیت آب در شبکه آبیاری سمت راست آبشار، دانشگاه تهران، تهران، رساله دکتری آبیاری و زهکشی.

۴.نوذری، ح، ع، لیاقت، م، خیاط خلقی، و ع، صدیقی، ۱۳۸۸، شبیه‌سازی زهکش زیرزمینی در شرایط غیر ماندگار با استفاده از تکنیک تحلیل پویایی سیستم، مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۰، شماره ۲، صفحه ۷۱-۸۶.

5. Bala, B.K., M.A., Satter, M.A., Halim, and M.S.U. Talukdar. 1998. Simulation of Crop-Irrigation Systems. Agric. Systems. J. 27:51-65.

6. Chops, G., and W, Hopmans. 2002. Analytical Model for Vadose Zone Solute Transport with Root Water and Solute Uptake. Vadose Zone. J. 1:158–171.

7. Fletcher, E.J. 1998. The use of system dynamics as a decision support tool for the management of surface water resources. Proc. 1st Int. Conf. on New Information Technolo. For Decision-Making in Civ. Engrg., University of Quebec, Montreal, Canada. PP:909-920.

8. Forrester, J.W. 1961. Industrial dynamics, productivity press, Portland Oreg.

9. Jorenush, M.H., and A.R. Sepaskhah. 2003. Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions. Agric. Water Management. J. 61:125–141.

10. Kroes, J.G., and J.C. Van Dam. 2008. Reference manual SWAP version 3.2., Alterra Green World Research, Wageningen, Report 1649, Availabel at:www.alterra.nl/models/swap.

11. Luo, Y., S., Khan, and Y. Cui. 2009. Application of system dynamics approach for time varying water balance in aerobic paddy fields. Paddy Water Environ. 7:1-9.

12. Mostafazadeh-fard, B., H., Mansouri, S.F., Mousavi, and M. Feyzi. 2009. Effects of different levels of irrigation water salinity and leaching on yield and yield components of wheat in an arid region. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. J. 135(1):32-38.

13. Ren, W.Y., K.S., Zhong, L.F., Sheng, Z., Lu, and Z.J. Hua. 2007. Saline Water Irrigation Scheduling Through a Crop-Water-Salinity Production Function and a Soil-Water-Salinity Dynamic Model. Pedosphere. 17:303-317.

14. Salemi, H.R., A., Mamanpoush, M., Miranzadeh, M., Akbari, M., Torabi, N., Toomanian, H., Murray-Rust, P., Droogers, H., Sally, and A. Gieske. 2000. Water management for sustainable irrigated agriculture in the Zayandeh Rud basin, Esfahan Province, Iran. IWMI-IAERI, Iran.

15. Saysel, A., and Y. Barlas. 2001. A dynamic model of salinization on irrigated lands. Ecological Modelling. 139:177-199.

16. Skaggs, R.W. 1980. Drainmod reference report. Method for design and evaluation of drainage water management systems for soils with high water tables. USDA-SCS. PP:329.

17. Vazifedoust, M., J.C., Van Dam, R.A., Feddes, and M. Feizi. 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. Agric. Water Management. J. 95:89-102.