اکوهیدرولوژی
دورهٔ ۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۰، ص ۳۵۵-۳۴۵

تأمین حقابهٔ زیست‌محیطی تالاب گاوخونی با بهبود مدیریت تقاضای آب کشاورزی

راضیه حداد[۱]، محمد ابراهیم بنی‌حبیب[۲*]، سید مهدی هاشمی شاهدانی[۳]، سامان جوادی پیر بازاری[۳]، سجاد نجفی مرغلمکی[۴]

۱. دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
۲. استاد گروه آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
۳. دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
۴. دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۸/۱۶، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۱۲/۲۸)

چکیده

تالاب‌ها به عنوان یک اکوسیستم، کارکردی حیاتی در سیستم اجتماعی- زیست‌محیطی دارند. محدودیت آب مهم‌ترین عامل خشک شدن تالاب‌ها در مناطق خشک است. با توجه به اتلاف زیاد آب در کشاورزی، بهبود مدیریت مصرف در این بخش و تخصیص آب ذخیره‌شده از این راه می‌تواند به احیای حقابهٔ زیست‌محیطی تالاب‌ها کمک شایانی کند. هدف پژوهش حاضر، بررسی میزان پایداری سناریوهای مختلف بهبود مدیریت مصرف آب کشاورزی شامل سناریوهای «مدرن‌سازی و ارتقای بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی»، «ارتقای عملکرد سامانه‌های آبیاری داخل مزارع»، «بهینه‌سازی الگوی کشت» و «کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی» و نیز ترکیب این سناریوها بر احیای حقابهٔ زیست‌محیطی تالاب‌ها است. برای این منظور، حوضهٔ آبریز زاینده‌رود، مشتمل بر شش شبکهٔ آبیاری و تالاب گاوخونی واقع در انتهای حوضه، به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شد. مدل‌سازی حوضه با استفاده از نرم‌افزار مدیریت یکپارچهٔ WEAP انجام گرفت. همچنین، میزان پایداری اجرای سناریوها بررسی شد. شاخص اعتمادپذیری برای این سناریوها به دست آمد. نتایج نشان داد انعطاف‌پذیرترین سناریو، اجرای همهٔ سناریوها با شاخص پایداری ۸۷/۳ درصد و پس از آن، اجرای سناریوهای «مدرن‌سازی و ارتقای بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی»، «بهینه‌سازی الگوی کشت» و «کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی» با شاخص پایداری ۸۱/۶ درصد است. کمترین شاخص پایداری را نیز دو سناریوی «ارتقای عملکرد سامانه‌های آبیاری داخل مزارع»، «بهینه‌سازی الگوی کشت» با شاخص پایداری ۲/۲ درصد و ۲/۶ درصد دارند. بنابراین، اجرای ترکیب کاملی از سناریوهای مدیریت تقاضای آب کشاورزی می‌تواند پایدارترین راهکار برای احیای تالاب گاوخونی باشد.

کلیدواژگان: احیای تالاب، بهینه‌سازی الگوی کشت، گاوخونی، مدرن‌سازی سامانه‌های توزیع آب، مدل برنامه‌ریزی یکپارچهٔ WEAP.

* نویسندهٔ مسئول
Email: banihabib@ut.ac.ir

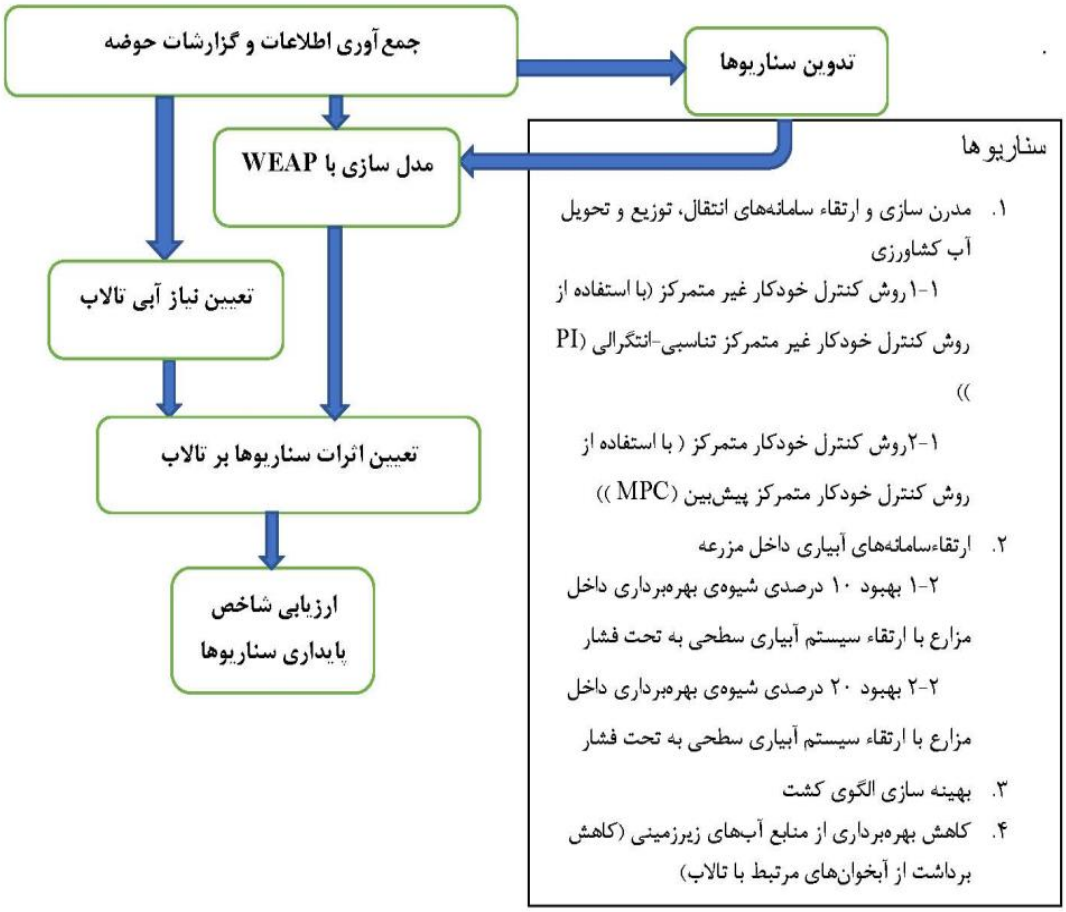
مقدمه

در سال‌های اخیر بخش زیادی از مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله تالاب‌ها به عنوان زیستگاه و اکوسیستم با محدودیت‌های آب مواجه شده‌اند. تالاب‌ها منابع مهم آب هستند که از تنوع زیست‌محیطی پشتیبانی می‌کنند، سیلاب را کنترل می‌کنند و در افزایش کیفیت زندگی مردم محلی و حیات وحش کارکرد زیادی دارند [۱]. محدودیت آب مهم‌ترین عامل خشک شدن تالاب‌ها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله کشور ایران است. از این‌رو، مدیریت مصرف آب در این مناطق اهمیت زیادی پیدا می‌کند. بخش کشاورزی به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب کمترین بازدهی مصرف را دارد و بیشترین اتلاف آب در این بخش صورت می‌گیرد [۲]. بنابراین، بهبود مدیریت تقاضای آب در کشاورزی با روش‌هایی مانند مدرن‌سازی و ارتقای سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در داخل و خارج از مزارع، بهینه‌سازی الگوی کشت و کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی و تخصیص آب ذخیره‌شده از این طریق به بخش زیست‌محیطی می‌تواند به عنوان یکی از راهکارهای اصلی احیای تالاب معرفی شود. به همین دلیل، با توجه به عملکرد نامطلوب بیشتر سامانه‌های انتقال و توزیع آب کشاورزی، استفادهٔ ناپایدار از منابع آب زیرزمینی و الگوی کشت نامناسب، ضرورت بهبود مدیریت بهره‌برداری با هدف کاهش تلفات در این بخش بیش از پیش افزایش پیدا کرده است. از این‌رو، مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. هاشمی شاهدانی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر فرایند بهبود توزیع آب در یک شبکهٔ بزرگ آبیاری از طریق اجرای تکنیک‌های خودکارسازی بهره‌برداری سازه‌های تنظیم سطح آب پرداختند. به‌کارگیری این تکنیک‌ها علاوه بر کاهش تلفات بهره‌برداری، سبب بهبود عدالت توزیع آب و افزایش قابلیت اطمینان تحویل آب به کشاورزان واقع در بالادست و پایین‌دست محدودهٔ مطالعه‌شده شد [۳]. همواره توسعهٔ سامانه‌های آبیاری تحت فشار با هدف افزایش بازدهی آبیاری و کاهش مصرف نمونه‌ای از اقدامات مورد توجه برای صرفه‌جویی آب بوده است. از این‌رو، Fanish و همکاران (۲۰۱۱) با ارتقای سیستم آبیاری معمولی به قطره‌ای سبب کاهش ۴۳ درصدی میزان مصرف آب و نیز افزایش عملکرد محصولات شدند [۴]. از دیگر راهکارهای مدیریت تقاضا در بخش کشاورزی، بهره‌برداری معقولانه از منابع آب زیرزمینی است که منجر به استفادهٔ پایدار و جلوگیری از نابودی این منابع می‌شود [۵]. Candela و همکاران (۲۰۰۹) آثار تغییرات آب‌وهوا بر تالاب‌های وابسته به آب زیرزمینی را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد برای جلوگیری از خشک شدن تالاب باید کاهش برداشت از آبخوان صورت گیرد [۶]. بهینه‌سازی الگوی کشت نیز یکی از راهکارهای پرکاربرد در مدیریت آب در بخش کشاورزی است که در تحقیقات گوناگونی به کار گرفته شده است. بنی‌حبیب و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی و مدل‌سازی شرایط حوضهٔ آبریز تالاب هورالعظیم، با استفاده از نرم‌افزار WEAP و همچنین، اجرای سناریوهای مختلف روی حوضهٔ آبریز تالاب هورالعظیم در شرایط فعلی و آینده (۲۰۴۲) به بررسی تأمین و یا عدم تأمین حقابهٔ زیست‌محیطی هورالعظیم پرداختند. نتایج مطالعهٔ آنها نشان داد علاوه بر سد کرخه، الگوی کشت نامناسب و استفاده از سیستم‌های سنتی آبیاری هم روی عدم تأمین حقابهٔ زیست‌محیطی هورالعظیم تأثیرگذار بوده است [۷].

پس از مطالعه و بررسی پژوهش‌های انجام‌شده برای کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی با اجرای سناریوهای مدیریتی، تحقیق حاضر تلاش دارد چهار سناریوی «مدرن‌سازی و ارتقای مدیریت سامانه‌های توزیع آب کشاورزی (با دو روش کنترل خودکار غیر متمرکز و متمرکز)»، «ارتقای سامانه‌های آبیاری داخل مزارع (بهبود ۱۰ و ۲۰ درصدی بازدهی آبیاری با ارتقای سیستم آبیاری سطحی به تحت فشار)»، «بهینه‌سازی الگوی کشت» و «کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی (کاهش برداشت از آبخوان‌های مرتبط با تالاب)» را به‌منظور احیای تالاب گاوخونی، با استفاده از مدل تخصیص منابع آب WEAP، مدل هیدرودینامیک توزیع آب و توسعهٔ مدل سیستم‌های کنترل خودکار توزیع آب کشاورزی در محدودهٔ شبکه‌های آبیاری بررسی کند. در ادامه، برای ارزیابی سناریوی مدیریت مصرف آب کشاورزی در سطح حوضهٔ آبریز، از شاخص پایداری (مجموع سه شاخص اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری) استفاده می‌شود. این پژوهش برای اولین‌بار اقدام به بررسی و ارزیابی میزان پتانسیل روش‌های یادشده با هدف حفظ و تأمین حقابهٔ زیست‌محیطی به صورت مجزا و ترکیبی کرده است.

مواد و روش‌ها

روند پژوهش صورت‌گرفته در شکل ۱ به صورت فلوچارت نشان داده شده است.

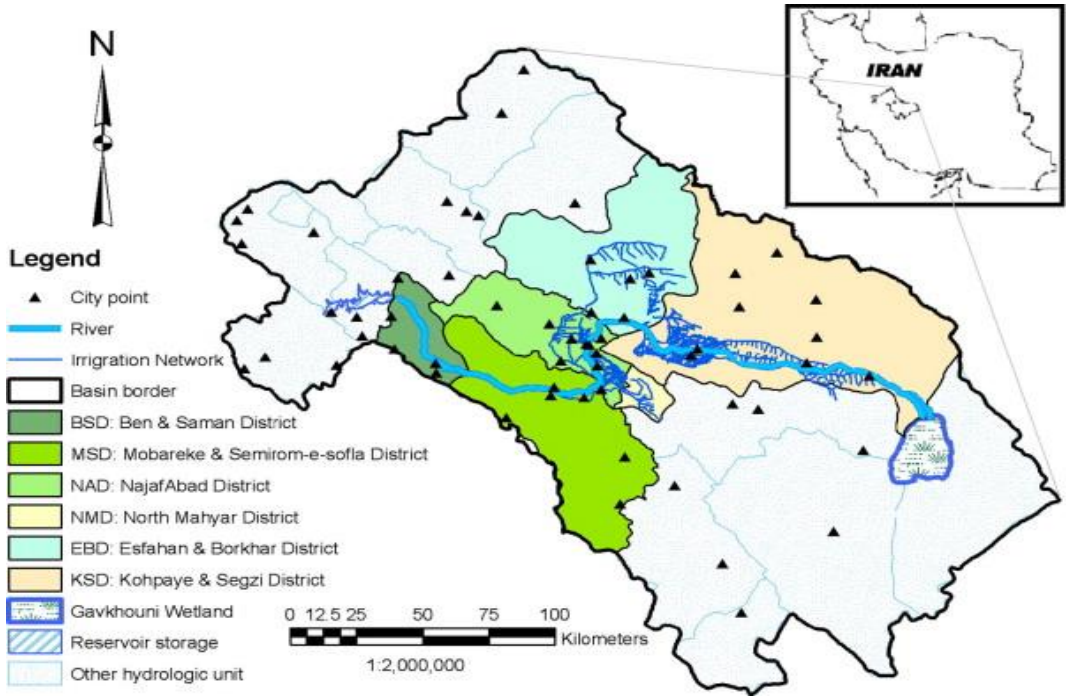


شکل ۱. فلوچارت روش تحقیق

منطقهٔ مطالعاتی

حوضهٔ آبریز زاینده‌رود با وسعتی بیش از ۴۰ هزار کیلومتر مربع در مرکز ایران واقع شده است که استان‌های اصفهان و چهارمحال بختیاری را در بر می‌گیرد. زاینده‌رود یکی از رودخانه‌های دائمی و مهم کشور و مهم‌ترین پیکرهٔ آبی این حوضه است، که پس از طی مسیر و سیراب کردن زمین‌های کشاورزی، تأمین آب شرب و آب مورد نیاز صنایع مستقر در مسیرش در انتها به تالاب گاوخونی واقع در شرق حوضه ختم می‌شود (شکل ۲).

طی ۱۰ سال گذشته، به علت استفادهٔ بیش از حد از آب زاینده‌رود و کمبود بارندگی‌ها در این حوضه، این رودخانه در فصل‌های گرم سال همواره با کمبود آب مواجه بوده، به گونه‌ای که از اصفهان تا تالاب گاوخونی ماهیت خود را به منزلهٔ رودخانهٔ دایمی طبیعی از دست داده است. در بخش کشاورزی در این حوضه حدود ۱۷۰ میلیون متر مکعب آب در سال به مصرف می‌رسد، در حالی که با توجه به خشکسالی‌های اخیر کمتر از ۶۰ میلیون مترمکعب آب به تالاب می‌رسد. باتلاق گاوخونی، تالاب بین‌المللی بزرگ با عمق کم است که در کنوانسیون رامسر ۱۹۷۵ به ثبت رسیده است. این تالاب نقش مهم هیدرولوژیکی، بیولوژیکی و زیست‌محیطی در عملکرد طبیعی حوضهٔ آبی زاینده‌رود دارد و یک منبع مهم برای تغذیهٔ سفره‌های آبی و همچنین، مانع تبدیل شدن منطقه به بیابان است. این باتلاق از عوامل مهم تنظیم‌کنندهٔ اقلیم منطقه است که در کنترل و کاهش توفان‌های گرد و غبار منطقه کارکرد زیادی دارد [۸].



شکل ۲. حوضهٔ آبریز زاینده‌رود

شبیه‌سازی و واسنجی مدل WEAP در حوضهٔ سد زاینده رود

برای مدل‌سازی محدودهٔ مطالعاتی در مدل WEAP به طول دورهٔ آماری ۳۰ سال (۱۹۸۷ــ ۲۰۱۶)، منابع و مصارف حوضه و طرح‌های آبی مورد بهره‌برداری بعد از سد زاینده‌رود مورد توجه قرار گرفت. اطلاعات هیدرومتری رودهای زاینده‌رود، چشمه مرغاب، خشکه‌رود، زرچشمه و رود رحیمی (ایزد خواست)، به صورت سری زمانی ماهانه وارد مدل شد. همچنین، منابع آب زیرزمینی و مصارف حوضه شامل شرب، صنعت و کشاورزی که بعد از سد زاینده‌رود قرار دارند، به تفکیک محدوده‌های مطالعاتی در مدل در نظر گرفته شد و در نهایت، سناریوهای مطرح‌شده، در مدل پیاده‌سازی شد.

به‌منظور برآورد میزان خطای واسنجی و صحت‌سنجی در مدل شبیه‌سازی، مقایسهٔ آمار محاسباتی و مشاهداتی دو ایستگاه هیدرومتری پل زمان‌خان (بعد از سد تنظیمی زاینده‌رود) و ورزنه (انتهای زاینده‌رود) با استفاده از شاخص میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE[1]) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE[2]) انجام شد (روابط ۱ و ۲). به این صورت که از ۳۰ سال طول دورهٔ مدل‌سازی، دورهٔ واسنجی به مدت ۲۰ سال (۱۹۸۷ــ ۲۰۰۶) و دورهٔ صحت‌سنجی به مدت ۱۰ سال (۲۰۰۷ــ ۲۰۱۶) اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. که در آن Q_{ci} دبی محاسبه‌شده توسط مدل در سال iام، Q_{oi} دبی مشاهداتی ایستگاه آب‌سنجی در سال iام و n تعداد داده‌ها است.

$$MARE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|Q_{ci} - Q_{oi}|}{Q_{oi}} \qquad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{ci} - O_{oi})^2}{n}} \qquad (۲)$$

معرفی گزینه‌های خودکارسازی شبکه‌های آبیاری

سامانهٔ کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی-انتگرالی (PI)

در این پژوهش از دو روش کنترل خودکار غیر متمرکز تناسبی-انتگرالی (PI) و کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین (MPC) برای بهبود مدیریت بهره‌برداری سیستم انتقال و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری رودشتین، نکوآباد، آبشار، مهیار و جرقویه، برخوار و کرون استفاده شده است (شکل ۳). کنترلگر PI بر اساس روش کنترل پسخور (کنترل حلقه بسته) طراحی می‌شود که در آن متغیر کنترل‌شونده (رقوم سطح آب در این تحقیق) در بالادست سازه تنظیم اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، میزان انحراف رقوم

1. Mean Absolute Relative Error
2. Root Mean Square Error

سطح آب از رقوم هدف به الگوریتم کنترل بازگردانده می‌شود تا با اندازه‌گیری اقدام تصحیحی، که عبارت است از: میزان بازشدگی سازهٔ تنظیم، متغیر کنترل‌شونده (رقوم سطح آب بالادست سازهٔ تنظیم) به سوی مقادیر هدف بازگردانده شود. در این روش اغتشاش‌ها (میزان آب منحرف‌شده در محل آبگیرها یا هر رواناب واردشده به کانال یا منحرف‌شده از آن) حتی اگر شناخته‌شده نباشند، به صورت غیرمستقیم و از طریق آثار آن بر خروجی سیستم (رقوم سطح آب هر بازه) در نظر گرفته می‌شود. بر اساس الگوریتم کنترل تناسبی- انتگرالی، تغییرات دبی عبوری از زیرسازهٔ تنظیم به صورت رابطهٔ ۳ قابل محاسبه است [۹].

$$\Delta Q_{(k)} = K_i.e_{(k)} + K_p.\left[e_{(k)} - e_{(k-1)}\right] \qquad (۳)$$

در رابطهٔ ۳ $\Delta Q_{(k)}$ مقدار تغییرات دبی عبوری از سازهٔ تنظیم بر حسب مترمکعب بر ثانیه در گام زمانی جاری، e برابر مقدار انحراف‌های تراز سطح آب از رقوم هدف، اندیس‌های k و k-1 به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ گام زمانی جاری و گام زمانی قبلی، k_p برابر ضریب تناسبی و k_i برابر ضریب انتگرالی است. محاسبهٔ ضرایب تناسبی و انتگرالی (k_p و k_i) بر اساس فرمول پیشنهادی Schuurmans [۱۰] برای طراحی کنترلگر تناسبی- انتگرالی انجام گرفت. بر اساس قوانین تنظیم ارائه‌شده توسط Schuurmans محاسبهٔ ضرایب تناسبی بر پایهٔ چهار پارامتر سیستم که عبارت‌اند از: سطح ذخیره در شرایط بهره‌برداری (A_S)، گام زمانی کنترل (T_C)، رزونانس ماکزیمم در جریان حداقل (R_P) و بسامد رزونانس ماکزیمم در جریان حداقل بازهٔ کانال (ω_r) و به صورت روابط ۴ و ۵ قابل محاسبه است [۱۰].

$$K_p = \frac{1}{2}.\sqrt{\frac{A_s.\omega_r}{R_p}} \qquad (۴)$$

$$K_i = \frac{T_c.\omega_r}{12.R_p} \qquad (۵)$$

سامانهٔ کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین (MPC)

کنترلگر پیش‌بین[3] (MPC) نوعی سامانهٔ کنترل خودکار مرکزی و ترکیبی از روش‌های کنترل پسخور[4] و پیشخور[5] است که به منظور محاسبهٔ متغیر خروجی، از یک الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌کند. وظیفهٔ کنترلگر، رساندن سطح آب پایین‌دست بازه به سطح آب هدف، با تنظیم سطح آب بالادست و نیز میزان تنظیم‌شدگی دریچه‌ها است. کنترلگر MPC با بهره‌گیری از ترکیب دو عامل افق زمانی و مدل ریاضی سامانهٔ تحت کنترل (مدل داخلی سیستم) اقدام به پیش‌بینی متغیرهای هیدرولیکی سیستم در آینده می‌کند. فرمان‌های کنترل در هر گام زمانی بر اساس وضعیت هیدرولیکی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای در کانال مشخص می‌شود. در کنترل سیستم آبی به روش MPC، از مدل فضای حالت[6] برای بیان مدل داخلی استفاده می‌شود که امکان فشرده‌سازی فرمولاسیون چندمتغیرهٔ مدل‌های خطی را مهیا می‌کند. تابع هدف استفاده‌شده برای سیستم کانال به‌صورت رابطهٔ ۶ تعریف می‌شود [۱۱]:

$$\min J = X^T.Q.X + U^T.R.U \qquad (۶)$$

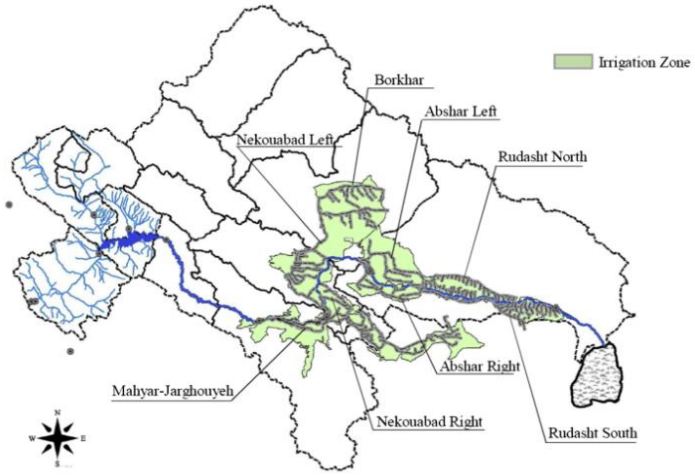
که در آن J تابع هدف است و باید حداقل شود، X متغیرهای حالت، U اعمال کنترلی، Q ماتریس وزن برای متغیرهای حالت و R ماتریس وزن برای اعمال کنترلی است. الگوریتم بهینه‌سازی استفاده‌شده در کنترلگر MPC می‌تواند ناحیهٔ حل مسئله را با اعمال قیدها، محدود کند. محدودیت‌ها نباید هرگز به‌واسطهٔ حل مسئله نقض شود، نقض این محدودیت‌ها ممکن است به تجهیزات و سازه‌ها آسیب بزند. به این نوع محدودیت‌ها، محدودیت‌های سخت گفته می‌شود. محدودیت‌های این تحقیق عبارت است از: میزان مانور دریچهٔ تحت کنترل در هر گام زمانی (u_{lim}) و نیز حداقل رقوم مورد نیاز آبگیری (x_{lim}). روابط ۷ و ۸ محدودیت‌های سخت را برای مقادیر وضعیت و متغیر کنترل‌شونده نشان می‌دهد:

$$E.x(k) \le x_{lim}(k) \qquad (۷)$$

$$F.u(k) \le u_{lim}(k) \qquad (۸)$$

در روابط یادشده E و F نمایانگر ماتریس انتخابی با مقادیر ابتدایی ۱ و ۱- هستند تا برای یکسان‌سازی محاسبات همیشه فرم محدودیت‌ها به حالت نامساوی کوچک‌تر و مساوی درآید [۱۲].

3. Model Predictive Control
4. Feedback
5. Feed-forward
6. State Space Model



شکل ۳. شبکه‌های اصلی آبیاری در پایین‌دست سد زاینده‌رود [۱۳]

بهینه‌سازی الگوی کشت

برای بهینه‌سازی الگوی کشت شبکه‌های آبیاری حوضهٔ آبریز زاینده‌رود و گاوخونی در این پژوهش، از بهینه‌سازی خطی استفاده شده است که تابع هدف آن بیشینه‌سازی سود حاصل از فروش محصولات و کمینه‌سازی آب مصرفی محصولات کشاورزی در شبکه‌های آبیاری است (رابطهٔ ۹). برای تحلیل حساسیت مدل نیز درتابع هدف، وزن‌های مختلفی از آب مصرفی و سود محصولات در نظر گرفته شد که در آن a_1 عددی در بازهٔ صفر یک است. بر این اساس، بهترین جواب پیاده‌سازی شد.

$$\text{Maximization}(a_1\sum_{i=1}^{n}\frac{b_i}{b_T}A_i-(1-a_1)\sum_{i=1}^{n}\frac{w_i}{w_T}A_i) \qquad (۹)$$

که در آن w_i مقدار آب مصرفی محصولات در هکتار، w_T کل آب مصرفی محصولات قبل از بهینه‌سازی، b_i سود خالص حاصل از فروش محصولات در هکتار، b_T کل سود حاصل از محصولات قبل از بهینه‌سازی، A_i مساحت سطح زیر کشت محصولات به صورت هکتار و اندیس i محصولات هستند [۱۴]. دو قید اجرایی مدل در رابطهٔ ۱۰ بیان شد که در آن $A_{(T)}$ کل مساحت زیر کشت محصولات و $w_{(T)}$ نیز کل آب مصرفی محصولات است.

$$s.t\sum_{i=1}^{n}A_i \le A_T i=1,2,\ldots,n$$
$$\sum_{i=1}^{n}w_i \le w_T i=1,2,\ldots,n \qquad (۱۰)$$

قید سوم نیز بر اساس محصولات اعمال شد. مقدار تولید هر محصول را نمی‌توان یکباره از بین برد یا چندین برابر کرد، زیرا برای اجرای بهینه‌سازی بسیار اهمیت دارد، که بهینه‌سازی انجام‌شده نزدیک به واقعیت موجود حوضه باشد. این قید به صورت محدودیت در مساحت سطح زیر کشت محصولات بین ۹۰ تا ۱۲۰ درصد از مساحت فعلی در نظر گرفته شد (رابطهٔ ۱۱) [۱۵].

$$0/9A_i \le A_i \le 1/2A_i \quad i=1,2,\ldots,n \qquad (۱۱)$$

سناریوهای بهبود مدیریت تقاضای آب کشاورزی

بهبود مدیریت مصارف کشاورزی در محدودهٔ مطالعه‌شده، توسط چهار سناریو در مدل مدیریت یکپارچهٔ منابع آب WEAP انجام گرفت (جدول ۱). به این صورت که در سناریوی A از دو روش کنترل خودکار غیر متمرکز تناسبی-انتگرالی (PI) و کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین (MPC) برای بهبود مدیریت بهره‌برداری سیستم انتقال و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری رودشتین، نکوآباد، آبشار، مهیار و جرقویه، برخوار و کرون استفاده شد. در سناریوی B با توجه به میزان رشد اراضی دارای آبیاری تحت فشار از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۵، فرض شد که همین روند دوباره ادامه‌دار باشد. این سناریو با فرض افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی بازدهی آبیاری در اراضی تحت فشار تعریف شده است [۱۶]. در سناریوی C بهینه‌سازی الگوی کشت پنج شبکهٔ اصلی آبیاری رودشتین، نکوآباد، آبشار، مهیار- جرقویه و برخوار در حوضه صورت گرفت و در سناریوی D کاهش ۵ و ۱۰ درصدی برداشت از آبخوان‌های همجوار تالاب در محدوده‌های مطالعاتی کوهپایه-سگزی، مهیار جنوبی و اسفنداران در نظر گرفته شد. همچنین، ترکیب این سناریوها با یکدیگر مطابق جدول ۱ در مدل WEAP اجرا شد.

جدول ۱. سناریوهای مدیریت مصرف آب کشاورزی

شماره	سناریو	روش استفادشدهٔ سناریو
۱	A	مدرن‌سازی و ارتقای بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی
۲	B	ارتقای عملکرد سامانه‌های آبیاری داخل مزارع
۳	C	بهینه‌سازی الگوی کشت
۴	D	کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی
۵	AB	مدرن‌سازی و ارتقای بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی و ارتقای عملکرد سامانه‌های آبیاری داخل مزارع
۶	AC	مدرن‌سازی و ارتقای بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی و بهینه‌سازی الگوی کشت
۷	AD	مدرن‌سازی و ارتقای بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی و کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی
۸	BC	ارتقای عملکرد سامانه‌های آبیاری داخل مزارع و بهینه‌سازی الگوی کشت
۹	BD	ارتقای عملکرد سامانه‌های آبیاری داخل مزارع و کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی
۱۰	CD	بهینه‌سازی الگوی کشت و کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی
۱۱	ABC	مدرن‌سازی و ارتقای بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی، ارتقای عملکرد سامانه‌های آبیاری داخل مزارع و بهینه‌سازی الگوی کشت
۱۲	ABD	مدرن‌سازی و ارتقای بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی، ارتقای عملکرد سامانه‌های آبیاری داخل مزارع و کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی
۱۳	ACD	مدرن‌سازی و ارتقای بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی بهینه‌سازی الگوی کشت کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی
۱۴	ABCD	مدرن‌سازی و ارتقای بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی، ارتقای عملکرد سامانه‌های آبیاری داخل مزارع، بهینه‌سازی الگوی کشت و کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی

شاخص پایداری

شاخص پایداری، ظرفیت سناریو در واکنش به تغییرات طبیعی یا تحمیلی یا ضربه‌های ناگهانی است. این شاخص از رابطهٔ ۱۲ به دست می‌آید [۱۷]. که در آن Φ پایداری، α اعتمادپذیری (اطمینان‌پذیری) حجمی، β برگشت‌پذیری و γ آسیب‌پذیری است.

$$\Phi = \alpha.\beta(1-\gamma) \qquad (۱۲)$$

۱- اطمینان‌پذیری (α): اطمینان‌پذیری یا قابلیت اطمینان با این مفهوم تعریف می‌شود که با چه احتمالی آب اختصاص‌یافته به مصرف‌کننده نیاز آن را تأمین خواهد کرد [۱۸] یا سیستم تا چه حد در حالت مطمئن و عدم شکست کار خواهد کرد (رابطهٔ ۱۳).

$$\alpha_T = \frac{n}{N} \qquad (۱۳)$$

که در آن α_T اعتمادپذیری زمانی، n تعداد سال‌هایی است که حداقل نیاز زیست‌محیطی تالاب تأمین شده و N نیز تعداد کل سال‌هاست.

۲- آسیب‌پذیری (γ): آسیب‌پذیری پارامتری شبیه کمبودها در سیستم است. اگر رخ دهد، آسیب‌پذیری شدت شکست‌های سیستم را بیان می‌کند و می‌تواند به عنوان ۱) میانگین شکست‌ها، ۲) میانگین ماکزیمم کمبودها طی یک دورهٔ متوالی شکست در سیستم و ۳) احتمال بیشتر شدن کمبود در یک یا چند دوره از یک حد معین تعریف می‌شود (رابطهٔ ۱۴) [۱۸]. که در آن Def درصد کمبود نیاز آبی تالاب و R نیز تعداد کل سال‌های عدم تأمین حقابهٔ تالاب است.

$$\gamma = \frac{\sum Def_t}{R} \qquad (۱۴)$$

۳- برگشت‌پذیری (β): برگشت‌پذیری توانایی سیستم در تغییر شرایط آن سیستم است (رابطهٔ ۱۵). در واقع، این پارامتر برای سیستم‌های منابع آب به این صورت تعریف می‌شود که احتمال اینکه سیستم پس از شکست به حالت مطلوب بازگردد، چقدر است. به علت اینکه شرایط آب‌وهوایی و شرایط سیستم‌های منابع آب در بسیاری از مواقع یکنواخت و ثابت نیستند، برگشت‌پذیری به عنوان یک پارامتر آماری برای بررسی انعطاف‌پذیری سیستم نسبت به تغییر شرایط و سیاست‌های مختلف مدیریتی نیز در نظر گرفته می‌شود [۱۸].

$$\beta = \frac{r}{R} \qquad (۱۵)$$

که در آن r تعداد سال‌هایی است که حقابهٔ زیست‌محیطی تأمین نشده و بعد از آن حقابه تأمین شده است و R تعداد کل سال‌های عدم تأمین حقابهٔ تالاب است.

نتایج و بحث

واسنجی و اعتبارسنجی مدل WEAP

مطابق نتایج ارائه‌شده در جدول ۲، مقدار میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE) و همچنین، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) طی دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی ایستگاه هیدرومتری پل زمان‌خان به‌ترتیب برابر ۰/۰۴۱و ۰/۰۷۷ برآورد شد. واسنجی و صحت‌سنجی مدل در ایستگاه ورزنه نیز همانند پل زمان‌خان، به‌ترتیب برابر ۰/۰۶۱ و ۰/۰۷۱ به دست آمد.

جدول ۲. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل WEAP

نام ایستگاه	دورهٔ واسنجی (۱۹۸۷ـ ۲۰۰۶)		دورهٔ اعتبارسنجی (۲۰۰۷ـ ۲۰۱۶)	
	MARE	RMSE ($\frac{m^3}{s}$)	MARE	RMSE ($\frac{m^3}{s}$)
پل زمان‌خان	۰/۰۴۱	۱/۹۹۸	۰/۰۷۷	۲/۹۲۳
ورزنه	۰/۰۶۱	۰/۲۷۴	۰/۰۷۱	۰/۰۶۷

نتایج سناریوهای اجراشده در مدل شبیه‌سازی WEAP

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی A

سناریوی A با هدف بررسی توانایی‌های سامانه‌های کنترل خودکار در بهبود وضعیت کنونی بهره‌برداری از کانال‌های اصلی شبکه‌های آبیاری موجود در حوضهٔ آبریز زاینده‌رود در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد روش خودکارسازی متمرکز پیش‌بین به‌مراتب عملکرد بهتری نسبت به روش خودکارسازی غیر متمرکز تناسبی- انتگرالی دارد و با استفاده از این روش می‌توان دبی ورودی به شبکه‌های آبیاری تا ۶/۹ متر مکعب در ثانیه کاهش داد. پس از به دست آمدن نتایج خودکارسازی شبکه‌های آبیاری این نتایج وارد مدل شبیه‌سازی WEAP شد. خروجی مدل WEAP نشان داد با اجرای روش خودکارسازی MPC، آبی که وارد تالاب می‌شود ۴۹/۱ درصد نسبت به عدم اجرای سناریو افزایش می‌یابد. بر این اساس، سالانه به طور میانگین ۲۲۴/۵ میلیون متر مکعب آب به تالاب می‌رسد. با بررسی‌های انجام‌شده حداقل نیاز زیست‌محیطی تالاب ۱۴۰ میلیون متر مکعب آب در سال است که ۷۰ درصد از این نیاز برای برای حفاظت از خطر نابودی تالاب و ۳۰ درصد دیگر برای برای بهبود عملکرد تالاب مورد نیاز است [۱۹]. بر این اساس، روش خودکارسازی MPC، ۱۰۰ درصد از حداقل نیاز زیست‌محیطی تالاب را فراهم می‌کند. همچنین، با اجرای روش خودکارسازی PI نیز آب رسیده به تالاب ۱۹/۱ درصد افزایش را نسبت به عدم اجرای سناریو در پی خواهد داشت، که مقدار میانگین آب رسیده به تالاب ۱۷۹/۲ میلیون متر مکعب در سال خواهد بود. این سناریو نیز ۱۰۰ درصد حداقل نیاز زیست‌محیطی تالاب را فراهم می‌کند.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی B

نتایج حاصل از بهبود ۱۰ و ۲۰ درصدی بازدهی سامانه‌های آبیاری تحت فشار داخل مزارع در مدل شبیه‌سازی WEAP نشان داد که طی دورهٔ شبیه‌سازی به طور میانگین با بهبود ۱۰ درصد بازدهی سامانه‌های آبیاری تحت فشار، ۱۷۰/۱۳ میلیون متر مکعب در سال آب به تالاب می‌رسد و با بهبود ۲۰ درصد بازدهی سامانه‌های آبیاری تحت فشار این مقدار آب به ۱۷۰/۲۴ میلیون متر مکعب افزایش می‌یابد، که تفاوت چندانی در مقدار آب رسیده به تالاب با افزایش بازدهی از ۱۰ به ۲۰ درصد وجود ندارد. دلیل آن نیز کند بودن روند ارتقای سیستم‌های آبیاری تحت فشار است. طی ۱۵ سال (از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۶) تقریباً فقط در ۳ هزار هکتار از زمین‌های کشاورزی سیستم آبیاری تحت فشار پیاده‌سازی شده که در مقایسه با کل زمین‌های زیر کشت (۲۰۰ هزار) این مساحت بسیار ناچیز بوده و با افزایش ۱۰ درصد بازدهی به ۲۰ درصد در این مساحت بسیار کم از زمین‌های آبیاری تحت فشار تأثیر چندانی ندارد. با اینکه با افزایش بازدهی از ۱۰ به ۲۰ درصد تفاوت چندانی در افزایش جریان ورودی تالاب نمی‌شود، ولی اجرای این سناریو به طور میانگین سبب افزایش ۲۰ میلیون متر مکعب آب در سال در جریان ورودی تالاب می‌شود.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی C

بر اساس نتایج ارائه‌شده از بهینه‌سازی الگوی کشت در جدول ۳، بیشترین درصد کاهش آب در شبکهٔ آبیاری

برخوار رخ خواهد داد و کمترین درصد کاهش مصرف آب در شبکهٔ مهیار و جرقویه است که کاهش مصرف آبی صورت نمی‌گیرد. بیشترین سود حاصل از بهینه‌سازی نیز مربوط به شبکهٔ آبیاری رودشتین است. نتایج اجرای این سناریو در مدل شبیه‌سازی WEAP نشان می‌دهد که با اجرای این سناریو ۱۸/۸ درصد آب بیشتری نسبت به عدم اجرای این سناریو به تالاب می‌رسد که به طور میانگین برابر ۱۷۸/۸ میلیون متر مکعب در سال است. به منظور تحلیل حساسیت در مدل برای اینکه بهترین جواب حاصل شود، در شبکه‌های آبیاری نکوآباد، آبشار، رودشت، مهیار و جرقویه و برخوار آب مصرفی و سود حاصل از محصولات در تابع هدف وزن نسبی در نظر گرفته شد. در این شبکه‌های آبیاری بهترین جواب به‌ترتیب در وزن نسبی آب مصرفی ۰/۵، ۰/۰۶۵/۶، ۰/۵ و ۰/۵ به دست آمد.

جدول ۳. نتایج کلی بهینه‌سازی الگوی کشت

نام شبکهٔ آبیاری	درصد کاهش آب مصرفی	درصد افزایش سود حاصل از محصولات
شبکهٔ آبیاری آبشار	۱۲	۴
شبکهٔ آبیاری رودشت	۱۰	۷۴
شبکهٔ آبیاری برخوار	۱۴	۳
شبکهٔ آبیاری نکوآباد	۲	۱
شبکهٔ آبیاری جرقویه	۰	۷

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی D

نتایج اجرای این سناریو در مدل شبیه‌سازی WEAP نشان داد با کاهش ۱۰ درصد برداشت از آبخوان مرتبط با تالاب آب رسیده به تالاب نسبت به عدم اجرای سناریو ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. بر این اساس، سالانه به طور میانگین ۱۹۵/۷ میلیون متر مکعب آب به تالاب می‌رسد. همچنین، مقدار آب افزوده‌شده در کاهش ۵ درصد برداشت از آبخوان مرتبط با تالاب نیز ۱۵/۷ درصد است که سالانه به طور میانگین ۱۷۴/۲ میلیون متر مکعب آب به تالاب می‌رسد. نتایج نشان‌دهندهٔ بهبود حداقل ۲۴ میلیون متر مکعب در سال در جریان ورودی تالاب با اجرای این سناریو است. پس از بررسی ۴ سناریوی اصلی و با در نظر گرفتن بهترین زیر سناریوها به عنوان سناریوی اصلی، در ادامه به بررسی نتایج اجرای ترکیبی این سناریوها پرداخته می‌شود.

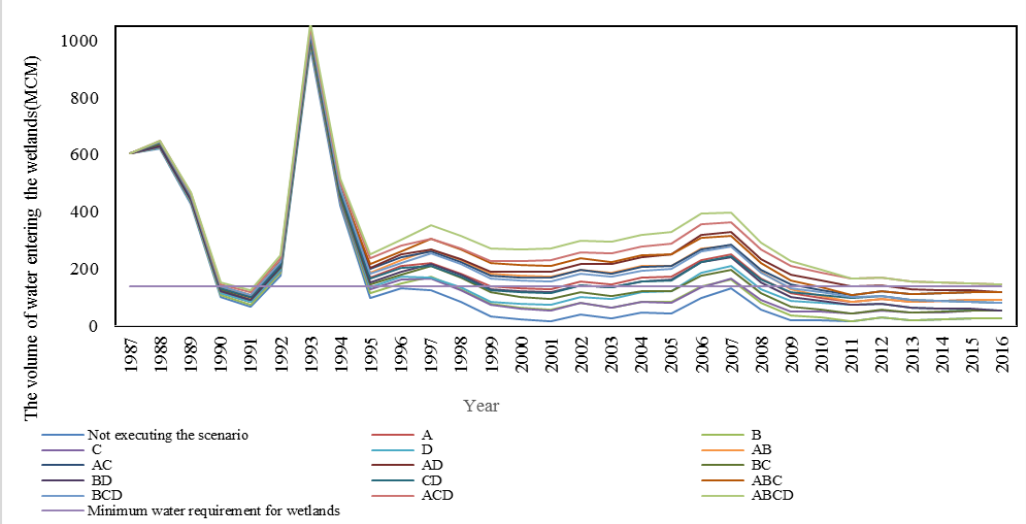
نتایج اجرای ترکیبی سناریوها

نتایج اجرای ترکیبی سناریوها در شکل ۴ نشان می‌دهد در بین سناریوهایی که دو سناریوی ترکیبی داشتند، سناریوی AD بیشترین تأثیر را در تأمین حقابهٔ زیست‌محیطی تالاب داشت، به طوری که حتی ترکیب سه سناریوی B و C و D نیز به‌مراتب تأثیری کمتری نسبت به آن دارند. همچنین، کمترین میزان تأثیر در بهبود مدیریت تقاضای آب کشاورزی برای تأمین حقابهٔ تالاب را در بین سناریوهایی که دو سناریوی ترکیبی داشتند، سناریوی BC به خود اختصاص داده است. در سناریوهایی با ترکیب سه سناریو، سناریوی ACD بیشترین تأثیر و سناریوی BCD کمترین تأثیر را در تأمین حقابهٔ تالاب دارد. در نهایت، در بین کل سناریوهای ترکیبی نیز اثرگذارترین سناریو، ترکیب هر چهار سناریوی اصلی ABCD است.

شاخص پایداری به‌دست‌آمده از نتایج مدل WEAP

نتایج ارائه‌شده از شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری در جدول ۴ نشان می‌دهد از نظر اعتمادپذیری زمانی، دو سناریوی ABCD و ACD با درصد اعتمادپذیری ۹۶/۷ درصد بیشترین مقدار این شاخص را به دست آوردند. کمترین میزان اعتمادپذیری زمانی را نیز دو سناریوی B و C با درصد اعتمادپذیری ۳۳/۳ درصد دارند. از لحاظ برگشت‌پذیری نیز، دو سناریوی ABCD و BCD برگشت‌پذیرترین سناریوها هستند که درصد برگشت‌پذیری آنها ۱۰۰ درصد است. سایر سناریوها میزان برگشت‌پذیری بسیار کم حدود ۱۰ تا ۱۷ درصد را دارند. آسیب‌پذیرترین سناریوها، دو سناریوی B و C به‌ترتیب با ۵۶ درصد و ۴۹ درصد آسیب‌پذیری هستند و کمترین سناریوی آسیب‌پذیر، سناریوی ABCD است که درصد آسیب‌پذیری آن ۹/۷ درصد است.

شاخص پایداری همهٔ شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری را در بر می‌گیرد. بنابراین، همان‌گونه که در این سه شاخص بهترین سناریو، ABCD بود، در شاخص پایداری نیز این سناریو برترین سناریو است. به طور کلی، با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته، پایدارترین سناریو، سناریوی ABCD با ۸۷/۳ درصد و پس از آن سناریوی ACD با ۸۱/۶ درصد است و کمترین میزان پایداری را در تأمین زمانی حداقل حقابهٔ زیست‌محیطی تالاب دو سناریوی C و B دارند که درصد پایداری آنها به‌ترتیب ۲/۶ درصد و ۲/۲ درصد است.



شکل ۴. روند تغییرات حجم سالانهٔ آب ورودی به تالاب طی دورهٔ زمانی مطالعه‌شده

جدول ۴. شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری سناریوها

سناریو	φ	γ	β	α_T	سناریو	φ	γ	β	α_T
A	۰/۰۷۲	۰/۲۸۴	۰/۱۶۷	۰/۶	**BC**	۰/۰۲۷	۰/۳۹۲	۰/۱۱۱	۰/۴
B	۰/۰۲۲	۰/۵۶۳	۰/۱۵۰	۰/۳۳۳	**BD**	۰/۰۵۵	۰/۳۶۵	۰/۱۵۴	۰/۵۶۷
C	۰/۰۲۶	۰/۴۸۸	۰/۱۵۰	۰/۳۳۳	**CD**	۰/۰۶۵	۰/۲۵۶	۰/۱۵۴	۰/۵۶۷
D	۰/۰۲۷	۰/۴	۰/۱۱۱	۰/۳۸۴	**ABC**	۰/۰۹	۰/۱۸۲	۰/۱۴۳	۰/۷۶۷
AB	۰/۰۴۷	۰/۲۹۸	۰/۱	۰/۶۶۷	**ABD**	۰/۰۶۳	۰/۳۱۱	۰/۱۲۵	۰/۷۳۳
AC	۰/۰۶۵	۰/۱۶۹	۰/۱۱۱	۰/۷	**ACD**	۰/۸۱۶	۰/۱۵۶	۱	۰/۹۶۷
AD	۰/۱۱۶	۰/۱۳۴	۰/۱۶۷	۰/۸	**ABCD**	۰/۸۷۳	۰/۰۹۷	۱	۰/۹۶۷

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به منظور بررسی تأثیر بهبود مدیریت مصرف آب کشاورزی در تأمین حقابهٔ زیست‌محیطی تالاب گاوخونی، ابتدا مدل تخصیص آب در حوضهٔ زاینده‌رود توسط مدل WEAP توسعه داده شد. سپس، واسنجی و صحت‌سنجی مدل توسعه‌داده‌شده صورت گرفت. به‌منظور دستیابی به هدف تحقیق، چهار سناریوی مدیریت مصرف آب کشاورزی شامل «مدرن‌سازی و ارتقای مدیریت سامانه‌های توزیع آب کشاورزی»، «ارتقای عملکرد سامانه‌های آبیاری داخل مزارع»، «بهینه‌سازی الگوی کشت» و «کاهش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی» به دو صورت انفرادی و ترکیبی توسط مدل شبیه‌سازی WEAP در نظر گرفته و نتایج به‌دست‌آمده توسط شاخص‌های پایداری آنالیز شد.

نتایج بیانگر آن است که پایدارترین سناریو، اجرای سناریوی ترکیبی ABCD با میزان پایداری ۸۷/۳ درصد و پس از آن، اجرای سناریوی ACD با ۸۱/۶ درصد پایداری است. کمترین پایداری را در تأمین حقابهٔ زیست‌محیطی تالاب نیز دو سناریوی B و C دارند که درصد پایداری آن‌ها به‌ترتیب ۲/۲ درصد و ۲/۶ درصد است. با توجه به کند بودن روند تبدیل روش‌های آبیاری سنتی به آبیاری نوین، سناریوی C نتایج مطلوبی کسب نکرد. با تسریع روند

تبدیل روش‌های آبیاری سنتی به نوین، این سناریو نتایج بهتری را کسب خواهد کرد. سناریوی B (بهینه‌سازی الگوی کشت) نیز با اینکه از لحاظ اجرایی بهترین گزینه است، ولی با توجه به نتایج کمترین میزان پایداری را دارد و در اولویت آخر قرار می‌گیرد. همچنین، با توجه به نتایج سناریوی A (روش خودکارسازی MPC) که ۶۰ درصد از نیاز زمانی حداقل حقابهٔ زیست‌محیطی تالاب را فراهم می‌کند و بهترین اقدام انفرادی است، ولی لزوم اجرای سناریوی ترکیبی در این میان کاملاً مشهود است.

منابع

[1].Mitsch WJ, Gosselink JG. Wetlands. 5th ed. 2015.

[2].FAO E. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome. 2017.

[3].Shahdany SM, Firoozfar A, Maestre JM, Mallakpour I, Taghvaeian S, Karimi P. Operational performance improvements in irrigation canals to overcome groundwater overexploitation. Agricultural Water Management. 2018 May 31;204:234-46.

[4].Fanish SA, Muthukrishnan P, Sekar SP. Effect of drip fertigation in intensive maize (Zea mays) based intercropping system. CROP RESEARCH. 2011;42(1to3):69-76.

[5].Acharya G, Barbier E. Using Domestic Water Analysis to Value Groundwater Recharge in the Hadejia'Jama'are Floodplain, Northern Nigeria. American Journal of Agricultural Economics. 2002 May;84(2):415-26.

[6].Candela L, von Igel W, Elorza FJ, Aronica G. Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain). Journal of hydrology. 2009 Oct 15;376(3-4):510-27.

[7].Banihabib ME, Najafi Marghki S, Shabestari MH. Integrated water resources planning model to study and predict the supply of environmental water from the watersheds of Turkey, Iraq and Iran. Iranian Journal of Water Research. 2019. 32: 115-126 (Persian)

[8].Vakil HA. Gavkhooni Swamp to Turn into an International Tourism Destination. Skyscrapercity: Tourism Infrastructure. Development and News. 2006.

[9].Van Overloop PJ. Drainage control in water management of polders in the Netherlands. Irrigation and drainage systems. 2006 Feb 1;20(1):99-109.

[10].Schuurmans J, Clemmens AJ, Dijkstra S, Hof A, Brouwer R. Modeling of irrigation and drainage canals for controller design. Journal of irrigation and drainage engineering. 1999 Dec;125(6):338-44.

[11].Van Overloop PJ, Weijs S, Dijkstra S. Multiple model predictive control on a drainage canal system. Control Engineering Practice. 2008 May 1;16(5):531-40.

[12].Yaltaqian khiabani M, Hashemi SM. Design of automatic control System for equitable distribution of water in dehydrated conditions and inflow fluctuations, case study of Roodasht irrigation network, Soil Conservation Research. 2018. 25(5). (Persian)

[13].Safavi HR, Golmohammadi MH, Sandoval-Solis S. Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin. Journal of hydrology. 2016 Aug 1;539:625-39.

[14].Davijani MH, Banihabib ME, Anvar AN, Hashemi SR. Optimization model for the allocation of water resources based on the maximization of employment in the agriculture and industry sectors. Journal of Hydrology. 2016 Feb 1;533:430-8.

[15].Banihabib ME, Zahraei A, Eslamian S. An integrated optimisation model of reservoir and irrigation system applying uniform deficit irrigation. International Journal of Hydrology Science and Technology. 2015;5(4):372-85.

[16].Karimi P, Qureshi AS, Bahramloo R, Molden D. Reducing carbon emissions through improved irrigation and groundwater management: A case study from Iran. Agricultural water management. 2012 May 15;108:52-60.

[17].Sandoval-Solis S, McKinney DC, Loucks DP. Sustainability index for water resources planning and management. Journal of Water Resources Planning and Management. 2011 Sep 1;137(5):381-90.

[18].Hashimoto T, Stedinger JR, Loucks DP. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water resources research. 1982 Feb 1;18(1):14-20.

[19].Sarhadi A, Soltani S. Determination of water requirements of the Gavkhuni wetland, Iran: A hydrological approach. Journal of arid environments. 2013 Nov 1;98:27-40.