تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهاردهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷
Volume 14, No. 3, Fall 2018 (IR-WRR)
۲۲۰-۲۳۵

مدل هیدرولوژیکی-اقتصادی مبتنی بر رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای طراحی بهینه طرح‌ها و سیاست‌های توسعه منابع آب حوضه آبریز رودخانه حله

رضا آئین[۱] و حسین علیزاده[۲*]

چکیده

موضوع این مقاله توسعه یک مدل هیدرولوژیکی-اقتصادی مبتنی بر رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با هدف تعیین سیمای بهینه توسعه منابع آب حوضه آبریز رودخانه حله (شاپور-دالکی) واقع در جنوب ایران برای یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت می‌باشد. برای بهینه‌سازی از الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات (PSO) و برای شبیه‌سازی از ترکیب نرم‌افزار تخصیص آب WEAP با سه ماجول محاسباتی روندیابی نمک (شوری) منابع آب و خاک، تولید محصول و اقتصادی استفاده می‌شود. در نهایت از مدل توسعه‌یافته برای بهینه‌سازی اقدامات و طرح‌های زیرساختی (ساخت سدها و شبکه‌های آبیاری و بکارگیری تکنولوژی‌های مدرن آبیاری) و همچنین سیاست‌های بهره‌برداری (الگوی کشت، استراتژی آبیاری و آبشویی و قواعد بهره‌برداری مخازن و تخصیص آب) استفاده می‌شود. نتایج کاربرد مدل در خصوص حوضه آبریز حله ساخت سدهای چروم، دالکی و نرگسی، با حجم نرمال مخزن به ترتیب برابر ۴۳/۵، ۳۰۵/۵ و ۷۶/۸ میلیون مترمکعب را پیشنهاد می‌نماید که در اثر اجرای آن منافع خالص کل حوضه حاصل از کشاورزی در حدود ۱۸٪ افزایش می‌یابد و علیرغم آن ارزش اقتصادی آب تحت شرایط گزینه بهینه توسعه نسبت به وضع موجود کاهش می‌یابد. همچنین استراتژی آبیاری و آبشویی بهینه بدست آمده نشان داد، مقدار کل نیاز ناخالص آب در شرایط توسعه بهینه حدود ۳۵ درصد نسبت به شرایط وضع موجود کاهش خواهد یافت.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی هیدرولوژیکی-اقتصادی، شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، WEAP، روش رطوبت خاک، بیلان نمک، PSO.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۶/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱/۲۰

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
۲- استادیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

Hydro-Economic Simulation-Optimization Model for Optimal Design of Water Resource Development Projects and Policies in Helleh River Basin

R.Aein [1] and H. Alizadeh[2]*

Abstract

This paper deals with developing a hydro-economic simulation-optimization model for optimal design of water resource development projects and policies of Helleh (Shapoor-Dalaki) River Basin, located at south of Iran, over a long-term planning horizon. We employed Particle Swarm Optimization (PSO) coupled with a simulation model which is a combination of WEAP water allocation software and three computational modules for soil and water salt routing at basin scale, crop yield production, and economic analysis. Finally we applied the developed simulation-optimization model to optimize infrastructural projects and measures, e.g. construction of dams and irrigation districts and utilization of modern technologies, and also operation policies, e.g. irrigation and leaching strategies, reservoir rule curves, and water allocation priorities. Model application results suggested construction of Chorom, Dalaki and Nargesi dams with normal water volumes equal to 43.5, 305.5 and 76.8 million cubic meters, respectively. In spite of economic efficiency of the optimal solution achieved (18% enhancement of net benefit), the associated economic value of water was reduced with respect to business-as-usual condition. Also optimal irrigation and leaching strategies led to 35% reduction in total gross irrigation requirement under development condition.

Keywords: Hydro-Economic Modelling, Simulation-Optimization, WEAP, Salt Balance, PSO.

Received: September 16, 2017
Accepted: April 9, 2018

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Management, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, Water and Environment Group, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: Alizadeh@iust.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

آبیاری نقش عمده‌ای در تولید محصولات کشاورزی و غذای جمعیت رو به رشد جهان، به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کند. از طرفی مشکل شوری از معضلات جدی در مدیریت و تخصیص منابع آب در این اقلیم‌ها می‌باشد؛ به طوریکه شوری باعث افزایش پتانسیل اسمزی خاک و در نتیجه کاهش توانایی گیاه در جذب آب شده و متعاقباً باعث کاهش تولید محصول و کاهش سودآوری بخش کشاورزی می‌شود. همچنین با شدت یافتن بحران آب در اثر افزایش جمعیت و کمبود منابع جدید و نیاز برای طرح‌های مختلف توسعه‌ای زیرساختی و سازه‌ای، در نظر گرفتن تغییرات ارزش آب در زمان و مکان، به عنوان رویکردی جدید در مدیریت منابع آب مطرح می‌شود و مدیران منابع آب را به سمت روش‌هایی با کارایی مناسب فنی و اقتصادی سوق می‌دهد. در این راستا، ضرورت تلفیق دیدگاه‌های اقتصادی و فنی مطرح می‌شود و یکی از جلوه‌های این همکاری چندجانبه، در توسعه مدل‌های هیدرولوژیکی-اقتصادی ظهور می‌یابد. مدل‌های هیدرولوژیکی-اقتصادی، جنبه‌های هیدرولوژیکی، اقتصادی، مهندسی و محیط‌زیستی را در قالب یک چارچوب بهم‌پیوسته، متناسب با نیازهای مدیریت یکپارچه منابع آب در نظر می‌گیرند و ایده اصلی آنها گنجاندن مفاهیم اقتصادی در مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب است (Harou et al., 2009).

در سال‌های اخیر مدل‌های هیدرولوژیکی-اقتصادی به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف هیدرولوژیکی یا اقتصادی مرتبط با مسائل منابع آب در نقاط مختلف جهان بر اساس اهم مسائل و مشکلات پیش‌رو به کار گرفته شده است که بیشتر مبتنی بر رویکرد شبیه‌سازی و یا بهینه‌سازی صرف بوده و به دلیل پیچیدگی و به تبع آن زمان‌بر بودن رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، بسیار کمتر از دو رویکرد دیگر مورد استفاده بوده است. Esteve et al. (2015) یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی قطعی به صورت تلفیق یک مدل بهینه‌سازی اقتصادی در سطح مزرعه با مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی WEAP برای ارزیابی مدیریت تطبیقی آبیاری در مقابل شرایط خشکسالی و تغییر اقلیم در حوضه Middle-Guadiana در اسپانیا توسعه دادند. Blanco-Gutierrez et al. (2013)، در راستای ارتقای آبیاری پایدار در مناطق نیمه‌خشک از جمله Middle-Guadiana در اسپانیا با رویکرد مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی هیدرولوژیکی-اقتصادی، یک مدل اقتصادی در سطح مزرعه را با یک مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی، با استفاده از ماجول رطوبت خاک در نرم‌افزار WEAP تلفیق نمودند. Hum and Abdul-Talib (2016) در راستای مدیریت نیازها و تعیین تخصیص بهینه آب مبتنی بر منافع اقتصادی، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی قطعی برای حوضه Selangor در سنگاپور ارائه کردند که در آن یک مدل شبیه‌سازی در نرم‌افزار WEAP در جهت مدیریت هیدرولوژیکی آب، با یک مدل بهینه‌سازی اقتصادی در راستای بیشینه‌سازی منافع اقتصادی خالص تلفیق گردید. Reznik et al. (2016) یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به نام MYWAS در محیط GAMS و تلفیق با مدل WEAP، برای سیستم تأمین آب در سطح یک کشور (فلسطین اشغالی) با در نظر گرفتن بخش‌های مختلف برداشت، تأمین و تقاضای آب و منابع مختلف آب شامل شیرین، شور و بازیافتی ارائه دادند. Fraga et al. (2017) یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی کوتاه مدت قطعی برای بهینه‌سازی سیستم تأمین آب با یک برنامه‌ریزی درجه دوم پویا با بهره‌گیری از مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در WEAP برای حوضه Porto Alegre در کشور برزیل ارائه دادند. Mohsenizadeh and Shourian (2017)، با استفاده از تلفیق مدل MODSIM بعنوان مدل شبیه‌ساز و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته بعنوان الگوریتم بهینه‌ساز، بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوضه آبریز گرگانرود را بررسی نمودند.

در مقاله حاضر، یک مدل هیدرولوژیکی-اقتصادی مبتنی بر رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی بلندمدت به صورت بهینه‌سازی اقدامات و طرح‌های زیرساختی (ساخت سدها و شبکه‌های آبیاری و بکارگیری تکنولوژی‌های مدرن آبیاری) و همچنین سیاست‌های بهره‌برداری (الگوی کشت، استراتژی آبیاری و آبشویی و قواعد بهره‌برداری مخازن و تخصیص آب) توسعه می‌یابد. در گام نخست ابتدا با بهره‌گیری از نرم‌افزار WEAP و به طور خاص روش رطوبت خاک در این نرم‌افزار یک مدل شبیه‌سازی برای تخصیص آب مبتنی بر بیلان رطوبت در ناحیه ریشه گیاه در اراضی کشاورزی مربوط به حوضه آبریز حله ضمن لحاظ نمودن الگوی کشت اراضی و استراتژی آبیاری توسعه داده می‌شود. همچنین از آنجاییکه این نرم‌افزار امکان شبیه‌سازی حرکت نمک درون مخازن و شبکه‌های آبیاری و اراضی کشاورزی را ندارد و از طرفی ملاحظات مربوط به مدیریت نمک و آبشویی در شبکه‌های آبیاری منطقه مورد مطالعه مهم است؛ لذا یک ماجول محاسباتی برای روندیابی شوری رودخانه‌ها، مخازن و همچنین ناحیه ریشه گیاه در شبکه‌های آبیاری و اراضی کشاورزی تهیه می‌گردد. یکی از وظایف مهم این ماجول، محاسبه غلظت نمک ناحیه ریشه، نیاز آبشویی و غلظت نمک برگشتی از اراضی به رودخانه است. شایان ذکر است که این ماجول در محیط برنامه‌نویسی Python و با ایجاد یک رابط نرم‌افزاری بین این محیط و نرم‌افزار WEAP در جهت استخراج نتایج کمی حاصل از مدل WEAP توسعه داده می‌شود. نتیجه اتصال این دو ماجول، ارائه یک مدل یکپارچه شبیه‌سازی

هیدرولوژیکی کمی-کیفی در حوضه آبریز حله خواهد بود. در گام دوم، با مرتبط کردن این مدل شبیه‌سازی با الگوریتم *بهینه‌سازی دسته ذرات*[1] (PSO) پارامترهای مدل شبیه‌سازی مذکور بر اساس داده‌های مشاهداتی کمی (دبی جریان) و کیفی (شوری) تخمین زده می‌شود. در گام آخر، مدل شبیه‌سازی مذکور با دو ماجول محاسباتی زراعی (تولید محصول) و اقتصادی تلفیق شده و به الگوریتم بهینه‌سازی PSO متصل شده تا یک مدل هیدرولوژیکی-اقتصادی برای برنامه‌ریزی بلندمدت طرح‌ها و سیاست‌ها توسعه یابد. در ادامه جزییات بیشتر در مورد مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در بخش روش‌شناسی مطرح شده و سپس کاربرد آن برای حوضه آبریز رودخانه حله تشریح گردیده و نتایج و بحث و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه حله یکی ازحوضه‌های آبریز جنوب کشور ایران و بخشی از حوضه آبریز اصلی خلیج فارس و دریای عمان، با اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. محدوده این مطالعه شامل حوضه آبریز حله (شاپور- دالکی) از محل بند انحرافی چروم بر روی رودخانه شاپور و بند انحرافی گیخ بر روی رودخانه دالکی آغاز گردیده و نهایتاً به مصب خروجی رودخانه به خلیج فارس منتهی می‌گردد. در سال‌های اخیر طرح‌های توسعه‌ای بسیاری اعم از احداث سه سد نرگسی، دالکی و چروم علاوه بر سد در حال بهره‌برداری رئیسعلی دلواری و توسعه و بهبود شبکه‌های آبیاری و زهکشی پایین دست این سدها در منطقه مطابق شکل ۱ مطرح بوده است (Tamavan, 2014a,b; Abgir, 2012). با توجه به تعدد بیش از حد ترکیب گزینه‌های پیشروی تصمیم‌گیران در این حوضه برای تعیین الگوهای کشت مناسب، افزایش راندمان آبیاری و همچنین طرح‌های سدسازی و توسعه شبکه‌های آبیاری و زهکشی، همچنین وجود برخی نقایص در شبیه‌سازی سیستم منابع آب حله در تحقیقات پیشین از جمله مطالعه Nowrozi (2015)، شامل درنظر نگرفتن نیاز آبشویی و هزینه‌های تولید کشاورزی و طرح‌های سدسازی و شبکه‌های آبیاری، در تحقیق پیش‌رو ضمن رفع این نواقص، امکان بررسی ترکیب‌های مختلف گزینه‌ها و در نهایت انتخاب بهترین گزینه فراهم می‌گردد. شایان ذکر است که بخش اصلی مصرف آب در این حوضه آبریز مربوط به مصارف کشاورزی بوده و قسمت عمده نیاز از طریق منابع آب سطحی تأمین می‌گردد؛ لذا شبیه‌سازی دقیق‌تر فرآیندهای هیدرولوژیکی هم در سطح حوضه آبریز و هم در سطح دشت‌ها و شبکه‌های آبیاری با هدف برآورد نیاز آبیاری و آبشویی و همچنین تولید محصولات کشاورزی اهمیت دارد.

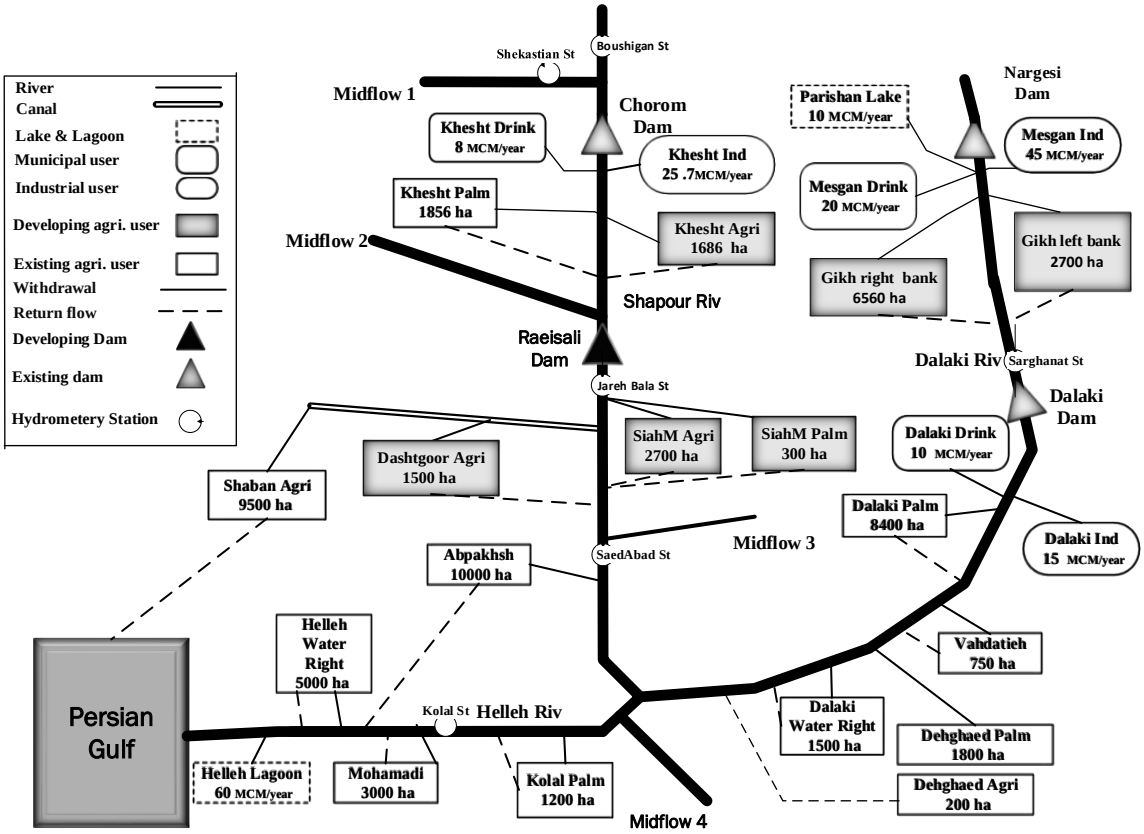

Fig. 1- Shematic of Helleh River Basin system under development conditions

شکل ۱- پیکربندی منابع-مصارف حوضه آبریز حله در شرایط توسعه

لذا مسأله مورد بررسی در این مطالعه شامل تعیین ترکیب بهینه از اقدامات سازه‌ای و مدیریتی در یک افق بلندمدت در راستای تعیین سیمای توسعه بهینه منابع آب حوضه آبریز حله می‌باشد.

لازم به ذکر است که نیازهای زیست محیطی مورد مطالعه در این پژوهش شامل نیاز زیست‌محیطی پایین‌دست سدها و نیاز دریاچه پریشان (از اهداف احداث سد نرگسی) و نیاز تالاب حله می‌باشد. که در این راستا مقادیر سالانه نیاز تالاب حله و دریاچه پریشان به ترتیب برابر ۶۰ و ۱۰ میلیون متر مکعب و مقادیری سالیانه نیاز زیست محیطی پایاب سدهای رئیسعلی دلواری، دالکی، نرگسی و چروم به ترتیب برابر ۸۳/۶۲، ۷۰/۳، ۳۷/۶، ۲۳/۴۱ میلیون متر مکعب می‌باشد (Tamavan, 2014a,b; Abgir, 2012).

۳- روش‌شناسی

مسأله تعیین سیمای بهینه طرح‌های توسعه منابع آب در سطح حوضه آبریز رودخانه را می‌توان با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی فرمول‌بندی نمود. بواسطه پیچیدگی روابط ریاضی می‌توان نشان داد که مسأله برنامه‌ریزی ریاضی مذکور در دسته مسائل غیرمحدب و برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط به عدد صحیح بوده و حل آن با استفاده از روشهای کلاسیک برنامه‌ریزی ریاضی دشوار است. با این توجه در این تحقیق از یک روش فراکاوشی بهینه‌سازی سراسری، یعنی بهینه‌سازی دسته ذرات (PSO)، در چارچوب رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده می‌گردد که در دهه اخیر کارایی آن برای حل مسائل پیچیده از این دست به اثبات رسیده است. در اینجا، مدل شبیه‌سازی در واقع یک مدل هیدرولوژیکی-اقتصادی است که شامل ۴ ماجول محاسباتی، ۱) نرم‌افزار WEAP برای تخصیص آب در سطح حوضه با بکارگیری روش رطوبت خاک برای تخمین نیاز آبیاری، ۲) روندیابی شوری در سطح حوضه، ۳) شبیه‌سازی تولید محصول، و ۴) ماجول اقتصادی می‌شود.

شکل ۲ طرح کلی مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی شامل اجزای مدل و ارتباط بین اجزا را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، متغیرهای تصمیم مسأله رابط بین اجزای مختلف‌اند که شامل سطح کل هر یک از واحدهای آبیاری (A_u)، درصد هر یک از انواع تکنولوژی‌های آبیاری (tech) در هر یک از واحدهای آبیاری، مشخص شده با اندیس (u)، به صورت ($TP_{tech,u}$)، حجم نرمال سدهای مخزنی ($St_{max,D}$)، رطوبت خاک در نقطه اقدام (شروع) آبیاری ($s_{intv,c,u}$) و رطوبت خاک هدف (مطلوب) برای خاتمه آبیاری ($s_{tg,c,u}$)، رطوبت خاک هدف آبشویی در خارج از فصل رشد ($s_{leach,c,u}$)، بهترین ماه شروع دوره آبشویی ($BML_{c,u}$) و طول دوره آبشویی ($NML_{c,u}$) هر یک از محصولات در هر یک از واحدها می‌باشند.

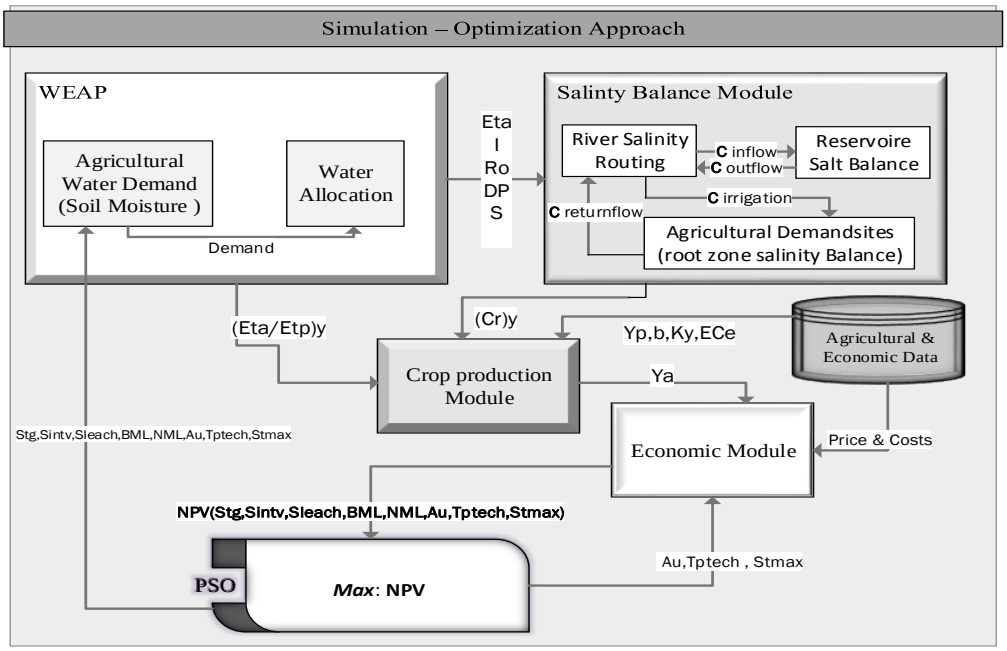

Fig. 2- Shematic of developed simulation– optimization approach

شکل ۲- طرح کلی رویکرد شبیه‌سازی– بهینه‌سازی

۳-۱- نرم‌افزار WEAP

نرم‌افزار WEAP بر اساس بیلان آب عمل می‌کند و می‌توان آن را در سامانه‌های شهری و کشاورزی در یک حوضه آبریز مورد استفاده قرار داد. این مدل قادر به شبیه‌سازی طیف وسیعی از مؤلفه‌های طبیعی و انسانی سیستم شامل رواناب، دبی پایه، تحلیل نیازها، تولید برقابی، ارزیابی آسیب‌پذیری و نیازهای اکوسیستم می‌باشد. همانطور که اشاره گردید برای شبیه‌سازی سیستم منابع–مصارف و نحوه تخصیص آب در این مطالعه از نرم‌افزار WEAP استفاده می‌گردد.

۳-۲- روش رطوبت خاک

برای محاسبه مقدار آبیاری مورد نیاز جهت کنترل تنش آبی گیاه و به عبارت بهتر برآورد نیاز آبی بخش کشاورزی و تعیین استراتژی آبیاری، یک رویکرد رایج در برنامه‌ریزی آبیاری شبیه‌سازی رطوبت ناحیه ریشه گیاه مبتنی بر معادله بیلان رطوبت خاک منطقه ریشه گیاه است. در این زمینه نرم‌افزار WEAP مجهز به روشی موسوم به رطوبت خاک است. روش رطوبت خاک در این نرم‌افزار هم می‌تواند برای شبیه‌سازی بارش–رواناب و هم برای محاسبه نیاز آبی و برنامه‌ریزی آبیاری بکار رود. در این تحقیق از این روش صرفاً برای هدف دوم یعنی برنامه‌ریزی آبیاری و محاسبه نیاز آبی استفاده می‌شود. در روش رطوبت خاک برای یک حوضه که از چندین زیرحوضه با کاربری‌ها و نیز نوع خاک متفاوت تشکیل می‌شود، تغییرات رطوبت خاک در لایه بالایی با استفاده از معادله‌ی بیلان آب به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود (Yates et al., 2005):

$$\begin{aligned} & Rd_j \frac{ds_{1,j}}{dt} \\ & = I(t) + P_e(t) - PET(t) k_{c,j}(t) \left(\frac{5s_{1,j} - 2s_{1,j}^2}{3}\right) \\ & - (P_e(t) + I(t)) s_{1,j}^{RRF_j} - f k_{s,j} s_{1,j}^2 - (1 \\ & - f) k_{s,j} s_{1,j}^2 \end{aligned} \quad (۱)$$

در رابطه بالا، $s_{1,j} \in [0,1]$ رطوبت نسبی خاک (بی بعد) در منطقه ریشه در منطقه‌ای با اندیس j، Rd ظرفیت نگهداشت آب بر حسب میلی‌متر، PET تبخیرتعرق گیاه مرجع بر حسب میلی‌متر، k_c ضریب تبخیرتعرق گیاه، RRF عامل مقاومت در برابر تشکیل رواناب که به پوشش گیاهی زمین و شیب منطقه وابسته است، f ضریب تفکیک که مربوط به نوع پوشش زمین، نوع خاک و توپوگرافی بوده و جریان را به جریانات افقی و عمودی تقسیم می‌کند و k_s پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع مربوط به منطقه ریشه است. بنابراین جمله اول و دوم سمت راست این رابطه به ترتیب بیانگر میزان بارش مؤثر بر (P_e) و آبیاری نفوذ یافته به (I) منطقه ریشه، جمله سوم بیانگر مقدار تبخیرتعرق واقعی گیاه، جمله چهارم بیانگر مقدار رواناب سطحی و جمله پنجم و ششم به ترتیب بیانگر میزان کاهش رطوبت ناحیه ریشه از طریق نفوذ عمقی عمودی و جریان زیرسطحی افقی می‌باشند. شایان ذکر است که مقدار پارامتر تبخیرتعرق گیاه مرجع در این معادله از طریق معادله Penman-Monteith محاسبه می‌شود.

مقدار رطوبت نسبی خاک در ناحیه ریشه گیاه را می‌توان با جزئیات بیشتر برای مطالعه تنش آبی در ناحیه ریشه گیاه به ترتیب در ۴ سطح: ظرفیت اشباع (s_{sat})، ظرفیت زراعی (s_{FC})، حد آستانه بسته شدن روزنه‌های برگ (s_{Th}) و نقطه پژمردگی گیاه (s_{wp}) با توجه به ظرفیت خاک در نظر گرفت؛ که طی آن s_{sat}، بیانگر کل ظرفیت نگهداشت آب توسط خاک یا رطوبت نسبی اشباع بوده و بعد از هر بارندگی یا آبیاری گیاه، در صورتی که میزان رطوبت نسبی از ظرفیت زراعی زمین (s_{FC}) بیشتر شود؛ خاک رطوبت موجود را تا رسیدن به s_{FC}، به دلیل نیروی گرانشی به صورت نفوذ عمقی یا جریان زیرسطحی افقی زهکشی می‌کند. در واقع s_{FC} متناظر با میزان رطوبتی است که یک خاک با زهکشی مناسب در برابر نیروی گرانشی برای نگهداشت این مقدار رطوبت می‌تواند مقاومت کند. همچنین در نبود آبیاری و بارش، میزان رطوبت نسبی به صورت تدریجی تا میزان حد آستانه تنش آبی گیاه، s_{Th} کاسته می‌شود که این میزان، حدی است که میزان رطوبت کمتر از آن باعث ایجاد تنش آبی برای گیاه و در نتیجه کاهش تبخیر–تعرق، عملکرد و محصول می‌شود. در این ارتباط s_{wp} اصطلاحاً نقطه پژمردگی گیاه نامیده می‌شود.

در این ماجول و مبتنی بر حل عددی معادلات دیفرانسیل بیلان رطوبت در ناحیه ریشه گیاه، نیاز آبیاری و تبخیرتعرق واقعی (ET_a)، نفوذ عمقی (DP) و رواناب ناشی از بارندگی (RO) و رطوبت نسبی ناحیه ریشه (S) در هر گام زمانی (t) به تفکیک واحدهای زراعی محاسبه می‌شود. تعیین استراتژی آبیاری به وسیله دو پارامتر رطوبت نسبی اقدام (s_{intv}) (نقطه شروع آبیاری) و رطوبت نسبی هدف (s_{tg}) (رطوبت نسبی مطلوب برای خاتمه آبیاری) تعیین می‌گردند. این پارامترها به ترتیب عبارت‌اند از میزان رطوبتی که در آن آبیاری آغاز می‌گردد و آستانه‌ای که با رسیدن رطوبت به آن آبیاری خاتمه می‌یابد. در واقع می‌توان با تعیین مقادیر رطوبت نسبی هدف و رطوبت نسبی اقدام، استراتژی آبیاری مورد استفاده را در هر اراضی تعیین نمود. لذا واضح است که برای کنترل تنش آبی در ناحیه ریشه گیاه یا به عبارت بهتر استراتژی کنترل تنش آبی، می‌بایست مقدار رطوبت نسبی اقدام همواره بزرگتر یا مساوی مقدار حد آستانه بسته شدن روزنه‌های برگ، s_{Th}، باشد؛ در صورت کمتر بودن مقدار رطوبت نسبی اقدام از حد آستانه بسته شدن روزنه‌های برگ، در واقع اجازه ایجاد تنش آبی برای گیاه تحت آبیاری داده شده و یا به عبارت دیگر استراتژی آبیاری به صورت کم‌آبیاری

خواهد بود. همچنین رطوبت نسبی هدف باید بزرگتر از حد آستانه بسته شدن روزنه‌های برگ تعیین شود؛ در صورت بزرگتر بودن مقدار رطوبت نسبی هدف از مقدار رطوبت نسبی ظرفیت زراعی خاک، s_{FC}، نفوذ عمقی نیز رخ خواهد داد که در ایجاد آبشویی و کنترل تنش شوری گیاه مؤثر است (Vico and Porporato, 2011).

۳-۳- ماجول روندیابی شوری

اطلاعات ورودی مهم به ماجول روندیابی شوری با استفاده از ماجول قبلی فراهم می‌شود و وظیفه اصلی این ماجول محاسبه غلظت نمک در اجزای هیدرولوژیکی حوضه آبریز شامل سرشاخه‌های رودخانه‌ها، محل‌های تلاقی رودخانه‌ها، بیلان نمک در مخازن، بیلان نمک در ناحیه ریشه گیاه و جریان‌های برگشتی به رودخانه است که در ادامه به تفکیک تشریح می‌گردند. لازم به ذکر است که نرم‌افزار WEAP علیرغم قابلیت‌های فراوان امکان شبیه‌سازی نمک را در مخازن، منطقه ریشه و آب برگشتی فراهم نمی‌کند.

۳-۳-۱- غلظت نمک در سرشاخه رودخانه‌ها

در بسیاری از مطالعات شوری منابع آب از تحلیل رگرسیون برای دستیابی به رابطه مناسبی بین دبی جریان و شوری جریان (کل جامدات محلول یا TDS) استفاده شده است. بدین منظور در این مطالعه، از رابطه ارائه شده توسط O'Conner (1976)، استفاده گردید. O'Conner (1976) یک رابطه ریاضی لگاریتمی را برای بیان رابطه بین دبی جریان و TDS رودخانه برای شرایط دائمی جریان ارائه نمود. شکل کلی رابطه به صورت زیر است:

$$C = \begin{cases} C_g & ; Q < Q_0 \\ C_g + \left[\frac{\beta(C_g - C_s)}{Q^{1-n}}\right] & ; Q > Q_0 \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن C متغیر غلظت نمک، Q متغیر دبی رودخانه، Q_0 پارامتر بیشینه دبی پایه رودخانه، C_g پارامتر غلظت نمک در آب زیرزمینی، C_s پارامتر غلظت نمک در آب سطحی، n پارامتر شیب لگاریتمی نسبت دبی پایه (ورودی از آب زیر زمینی) به کل جریان رودخانه برای دبی‌های بزرگتر از جریان پایه و $\beta = Q_0^{1-n}$ است. شایان ذکر است که در این تحقیق، پارامترهای این رابطه در مرحله واسنجی مدل تعیین می‌گردند.

۳-۳-۲- بیلان نمک در محل تلاقی رودخانه‌ها

محل تلاقی شاخه‌های رودخانه یا محل برداشت آب از رودخانه یا محل آب برگشتی به صورت یک گره است که دارای ورودی و خروجی است. بنابراین معادله بیلان جرم نمک بر مبنای اصل بقای جرم برای یک گره تلاقی در یک گام زمانی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sum_i Q_{i.t} \times C_{i.t} = \sum_j Q_{j.t} \times C_{j,t} \quad (۳)$$

که در آن Q نماینده حجم جریان و C نماینده غلظت نمک است. اندیس‌های i و j به ترتیب مربوط به یالهای ورودی به و خروجی از گره بوده و اندیس t مربوط به گام زمانی است. از این معادله برای شبیه‌سازی غلظت نمک در هر گره و به ازای هر گام زمانی استفاده می‌شود.

۳-۳-۳- بیلان نمک در مخازن

برای مدل‌سازی بیلان نمک در مخازن، از یک معادله یک بعدی مبتنی بر فرض اختلاط کامل در مخازن به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$C^s_{t+1} \times S_{t+1} - C^s_t \times S_t = C^Q_t \times Q_t - \frac{C^s_{t+1}+C^s_t}{2} R_t \quad (۴)$$

که در این رابطه t اندیس مربوط به گام زمانی، Q_t و R_t به ترتیب دبی ورودی و خروجی مخزن سد، S_t حجم ذخیره مخزن در ابتدای گام زمانی t، C^s_t و C^Q_t به ترتیب غلظت نمک مربوط به ذخیره مخزن و غلظت نمک جریان ورودی به مخزن در گام زمانی t است. این رابطه مبتنی بر فرض‌های ساده‌کننده واقعیت بوده و روند مدل‌سازی شوری در مخازن را تسهیل می‌نماید.

۳-۳-۴- بیلان نمک در ناحیه ریشه گیاه

برای کنترل تنش شوری در ناحیه ریشه گیاه نیز بایستی همانند رطوبت موجود در ناحیه ریشه، حرکت نمک در ناحیه ریشه گیاه را نیز شبیه‌سازی نمود. لذا معادله بیلان نمک در ناحیه ریشه گیاه بر اساس رابطه (۱) و با فرض محلول بودن نمک در رطوبت موجود در ناحیه ریشه گیاه به صورت زیر خواهد بود:

$$Rd\frac{d(C\times S)}{dt} = C_i(t)I(t) + C_p(t)P_e(t) - C(t)DP(t) \quad (۵)$$

که در آن C_i، غلظت نمک آب آبیاری بر حسب (mg/m^3) و C مقدار غلظت نمک در ناحیه ریشه گیاه برحسب (mg/m^3) بوده و I و P_e، به ترتیب مقدار آبیاری نفوذ یافته و بارش مؤثر وارد شده به ریشه بعد از کسر مقادیر رواناب سطحی معادل جمله چهارم رابطه (۱) بر حسب (m^3) در گام زمانی t (ماهیانه) می‌باشند. در این مطالعه، مقادیر غلظت نمک ورودی از طریق بارش برابر صفر لحاظ شده و همچنین از اثرات موبینگی صرفنظر شده است. همچنین مقدار نفوذ عمقی (DP) در رابطه (۵) بیانگر نفوذ عمقی عمودی و جریان زیر سطحی افقی خارج شده از ناحیه ریشه شامل مقادیر جملات پنجم و ششم رابطه (۱) و به صورت رابطه (۶) می‌باشد:

$$DP(t) = f \times k_s s^2(t) + (1-f)k_s s^2(t) = k_s s^2(t) \quad (۶)$$

در نتیجه با تلفیق رابطه (۵) و (۶) و توضیحات ارائه شده معادله بیلان غلظت نمک در ناحیه ریشه گیاه به صورت زیر خواهد بود:

$$Rd\frac{d(C\times S)}{dt} = C_i(t)I_e(t) - k_s\,C(t)s^2(t) \qquad (۷)$$

برای حل معادله فوق، تمامی جملات مربوط به معادله بیلان رطوبت باید به عنوان مقادیر معلوم در معادله جایگذاری شود. همچنین مقادیر غلظت آبیاری نیز به عنوان ورودی این معادله بوده و در نهایت سری زمانی غلظت نمک در منطقه ریشه بدست خواهد آمد.

جهت کنترل تنش شوری، باید مقدار نمک تجمع شده در ناحیه ریشه گیاه از طریق نفوذ عمقی ایجاد شده در اثر اعمال آب مازاد بر نیاز آبی گیاه (نیاز آبشویی) زایل شود. لذا در این ماجول، آبشویی به صورت توأمان در طول فصل رشد و همچنین در خارج از فصل رشد لحاظ شده است. بدین منظور جهت آبشویی در طول فصل رشد گیاهان مقادیر رطوبت نسبی هدف (s_{tg}) باید بزرگتر از مقدار رطوبت نسبی ظرفیت زراعی خاک (s_{FC}) تعیین گردد. همچنین جهت اعمال نیاز آبشویی در خارج از فصل رشد ۳ متغیر تحت عنوان BML، NML و s_{leach} تعریف می‌گردند که به ترتیب بیانگر بهترین ماه در خارج از فصل رشد جهت شروع دوره آبشویی، طول دوره آبشویی در خارج از فصل رشد و رطوبت نسبی هدف برای آبشویی در خارج از فصل رشد می‌باشند. این سه متغیر در راستای کاهش غلظت نمک در ناحیه ریشه گیاه از طریق ایجاد نفوذ عمقی بیشتر در ناحیه ریشه گیاه در چارچوب مدل بهینه‌سازی تعیین و به ماجول بیلان رطوبت (روش رطوبت خاک در ناحیه ریشه) وارد می‌گردد. در واقع عامل ارتباط بین دو ماجول بیلان رطوبت و بیلان نمک، متغیرهای تصمیم مربوط به استراتژی آبیاری و آبشویی می‌باشند.

۳-۳-۵- غلظت نمک آب برگشتی

مبتنی بر بیلان رطوبت در ناحیه ریشه گیاه، مؤلفه‌های آب خروجی از اراضی به سمت رودخانه، شامل مقادیر رواناب سطحی، جریان زیرسطحی و جریان پایه می‌باشد. مجموع مقادیر جریان زیر سطحی و جریان پایه مقدار جریان خروجی از ناحیه ریشه گیاه را تشکیل می‌دهند، که از طریق ضریب (f) از یکدیگر تفکیک می‌گردند. با توجه به کاربری کشاورزی که اغلب جهت تأمین هد آب، دارای شیب می‌باشند و همچنین جهت ساده‌سازی بیشتر و با توجه به عدم مدل‌سازی آب زیرزمینی و کمبود اطلاعات در این زمینه، مقدار ضریب تفکیک برابر ۱ فرض می‌گردد و در نتیجه غلظت نمک خروجی از اراضی به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$C_{Return}(t) = \frac{C_{I_j}(t)SR_j(t)+C_j(t)Int_j(t)}{SR_j(t)+Int_j(t)} \qquad (۸)$$

در این معادله C_{I_j} غلظت آب آبیاری و C_j غلظت نمک در ناحیه ریشه گیاه در اراضی j بر حسب (mg/m^3)، SR، مقدار رواناب سطحی و Int، مقدار جریان زیرسطحی بر حسب (m^3) می‌باشند. همچنین محاسبات غلظت نمک در محل تلاقی جریان برگشتی به رودخانه نیز مانند رابطه معرفی شده در بخش بیلان نمک در محل تلاقی رودخانه‌ها خواهد بود. خروجی‌های ماجول بیلان نمک و ماجول تخصیص آب (نرم‌افزار WEAP) در نهایت به عنوان ورودی ماجول تولید محصول به کار گرفته می‌شوند. این خروجی‌ها عبارتند از: سری‌های زمانی غلظت نمک در منطقه ریشه و تبخیرتعرق پتانسیل و واقعی.

۳-۴- ماجول تولید محصول

این ماجول با استفاده از نتایج ماجول‌های تخصیص آب و بیلان نمک در ناحیه ریشه، عملکرد زراعی محصولات تحت مؤثر توأمان تنش شوری و آبی را برآورد می‌کند. در این راستا با استفاده از نتایج حاصل از سه ماجول تخصیص آب و بیلان نمک، شامل مقادیر غلظت ناحیه ریشه در هر فصل آبیاری (میانگین غلظت فصلی) و مقادیر نسبت تجمعی تبخیرتعرق واقعی به پتانسیل ($\frac{ET_a}{ET_p}$) در آن فصل با استفاده از رابطه زیر بازدهی فصلی محصول در اراضی کشاورزی مورد نظر برآورد می‌شود:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \left(1 - \frac{b}{100K_y}\left(EC_e - EC_{e,threshold}\right)\right) \times \left(\frac{ET_a}{ET_p}\right) \qquad (۹)$$

که در این رابطه Y_a، عملکرد واقعی محصول، Y_m، عملکرد حداکثر مورد انتظار محصول، K_y، ضریب حساسیت تنش آبی محصول، EC_e، هدایت الکتریکی متوسط نمونه اشباع منطقه ریشه بر حسب (ds/m)، $EC_{e,threshold}$ حد آستانه هدایت الکتریکی نمونه اشباع خاک که به ازای مقادیر EC_e فراتر از آن، عملکرد محصول به واسطه شوری کاهش می‌یابد و b، کاهش عملکرد محصول به واسطه یک واحد افزایش EC_e از حد آستانه است.

۳-۵- ماجول اقتصادی

در این ماجول با توجه به عملکرد محصول، قیمت محصولات، هزینه‌های تولید شامل بذر، کود شیمیایی، آب، نیروی کار و حمل و نقل، و هزینه‌های بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی و سدهای در حال بهره‌برداری، هزینه احداث سدهای در حال احداث به صورت تابعی از حجم نرمال مخزن و هزینه احداث شبکه‌های در حال توسعه بـه صورت تابعی از سطح شبکه‌ها، سود خـالص سالانه محصولات کشاورزی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$NPV = \sum_{y}\left\{\sum_{u}\sum_{c}\left(\left(Ya_{c,u,y}A_{c,u}Pr_{c,u,y} - C_{Pd,c,u,y}A_{c,u}\right) - C_{Op,u}A_{u}\right) \times \left(\frac{P}{F}, i, y\right)\right\} - \sum_{u}\left(VIC_{u}\, A_{u} + CIC_{u}\right) - \sum_{D}\left(C_{op,D} + VDC_{D}\, St_{max,D} + CDC_{D}\right) \quad (10)$$

که در آن $Ya_{c,u,y}$ بازدهی زراعی واقعی هر محصول (c) در هر اراضی (u) در هر سال (y)، $A_{c,u}$ سطح زیر کشت هر محصول در هر اراضی، $Pr_{c,u,y}$ قیمت هر محصول در هر اراضی در هر سال، $C_{Pd,c,u,y}$ هزینه تولید واحد سطح هر محصول در هر اراضی در هر سال، و $C_{Op,u}$ هزینه یکنواخت سالانه بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی در واحد سطح می‌باشد. همچنین VIC_u مؤلفه مربوط به ارزش حاضر هزینه‌های متغیر احداث شبکه‌های آبیاری و زهکشی در واحد سطح و CIC_u مؤلفه مربوط به ارزش حاضر هزینه‌های ثابت آن بوده و A_u سطح شبکه‌های آبیاری و زهکشی در هر اراضی است. همچنین $C_{op,D}$ مؤلفه مربوط به ارزش حاضر هزینه بهره‌برداری سدها، VDC_D مؤلفه مربوط به ارزش حاضر هزینه‌های متغیر احداث سد D به ازای واحد حجم مخزن بوده و CDC_D مؤلفه مربوط به ارزش حاضر هزینه‌های ثابت آن می‌باشد. $St_{max,D}$ حجم نرمال سد مخزنی می‌باشد. همچنین i نرخ تنزیل، و $\left(\frac{P}{F}, i, y\right)$ فاکتور مالی ارزش فعلی یکبار پرداخت بوده که برابر با $(1+i)^{-y}$ است.

۳-۶- واسنجی

با توجه به این که در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی در سطح حوضه آبریز چالش عمده در استفاده از مدل‌های مفهومی هیدرولوژیکی، تعیین مقدار پارامترهای آن است (Brath et al., 2004)، لذا در این مطالعه از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با هدف کمینه کردن اختلاف (RMSE) مقادیر دبی جریان و شوری آب مشاهداتی توسط ایستگاههای هیدرومتری و شبیه‌سازی شده بوسیله مدل برای تخمین پارامترهای مدل شبیه‌سازی شامل پارامترهای روش رطوبت خاک و پارامترهای رابطه دبی-شوری و همچنین واسنجی سطح شبکه‌های آبیاری، الگوی کشت اراضی و استراتژی‌های آبیاری اراضی کشاورزی استفاده می‌شود.

۴- نتایج و بحث

حوضه آبریز حله یکی ازحوضه‌های آبریز جنوب کشور ایران و بخشی از حوضه آبریز اصلی خلیج فارس و دریای عمان، با اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد که در سالهای اخیر با چالش‌هایی در زمینه مدیریت آب و علی‌الخصوص شوری منابع آب کشاورزی مواجه بوده است. همچنین در سالهای اخیر طرح‌های توسعه‌ای اعم از احداث سه سد نرگسی، دالکی و چروم علاوه بر سد در حال بهره‌برداری رئیسعلی دلواری و توسعه شبکه‌های آبیاری پایین دست آنها در این حوضه مطرح شده است. با این توجه در این مطالعه ابتدا حوضه آبریز حله برای وضع موجود توسط نرم‌افزار WEAP شبیه‌سازی شده و مطابق بخش روش‌شناسی، اقدام به واسنجی شرایط موجود بر اساس مشاهدات مربوط به دبی رودخانه‌ها و کیفیت آن (شوری) در ایستگاه‌های مربوطه و تخمین پارامترهای ماجول‌های هیدرولوژیکی (تخصیص آب و بیلان نمک) شد. سپس مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی هیدرولوژیکی-اقتصادی توسعه یافته، برای بهینه‌سازی اقدامات ترکیبی زیرساختی و مدیریتی به صورت توأمان برای افق بلندمدت (۴۱ ساله) به کار گرفته شد. شایان ذکر است که متغیرهای تصمیم این مدل شامل حجم نرمال سدهای در حال مطالعه یا اجرا، مساحت شبکه‌های در حال مطالعه یا اجرا، همچنین متغیرهای تصمیم مربوط به برنامه آبیاری و آبشویی می‌باشند. مطابق آنچه که در بخش روش‌شناسی بیان شد، حد پایین برای رطوبت نسبی اقدام (S_{intv}) باید به میزان بیشتر از رطوبت نسبی پژمردگی (S_{wp})، (به طور متوسط حدود ۲۰ درصد برای همه اراضی) باشد که در این مطالعه برابر ۳۰ درصد در نظر گرفته می‌شود و حد بالای آن نیز باید برابر رطوبت نسبی ظرفیت نگهداشت زمین (S_{FC})، (به طور متوسط حدود ۶۰ درصد برای همه اراضی) و همچنین حد پایین برای رطوبت نسبی هدف (S_{tg}) باید برابر رطوبت نسبی حد آستانه تنش آبی (S_{Th})، (به طور متوسط حدود ۴۰ درصد برای همه اراضی) و حد بالای آن نیز ۱۰۰ درصد است. بنابراین همانطور که در بخش قبل نیز اشاره شد، در صورت کمتر بودن مقدار رطوبت نسبی اقدام (S_{intv}) از رطوبت نسبی حد آستانه تنش آبی (S_{Th})، استراتژی از نوع کم آبیاری و در صورت بیشتر بودن از آن از نوع کنترل تنش خواهد بود.

لازم به ذکر است متغیر تصمیم مربوط به تعیین حجم بهینه سدهای در حال توسعه علاوه بر یک بازه پیوسته از مقادیر شامل گزینه گسسته عدم ساخت سد نیز می‌باشد. همچنین با توجه به این که در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، استفاده توأمان از تکنولوژی‌های مدرن و سنتی مطرح و امکانپذیر است، لذا در این مطالعه درصد استفاده از تکنولوژی سنتی به عنوان متغیر تصمیم لحاظ شده و طبیعتاً میزان استفاده از

تکنولوژی‌های مدرن حاصل کسر این مقدار از کل (۱۰۰ درصد) خواهد بود.

همچنین مقدار پارامترهای ماجول زراعی و اقتصادی بر اساس طرح‌های مطالعاتی و آمار جهاد کشاورزی در این حوضه و یا براساس برخی بازدیدهای میدانی برآورد گردیدند. اطلاعات اقتصادی مربوط به هزینه احداث سدهای مخزنی و شبـــکه‌های آبیاری و زهکشی نیز مبتنی بر گزارشات موجـــود (Tamavan, 2014a; ATP, 2016; Tamavan, 2015) گردآوری و به صورت توابعی از متغیرهای تصمیم مربوطه تخمین زده شده‌اند (جدول ۱). همچنین در برآورد هزینه‌های احداث و سرمایه‌گذاری اولیه سدهای مخزنی، هزینه‌های ناشی از خسارات دریاچه سد مخزنی نیز لحاظ شده است که در این راستا هزینه خسارت مخزن سد دالکی و نرگسی به ترتیب ۴۰۰۰۰ و ۴۰۴۹۷ میلیون ریال و هزینه خسارت مخزن سد چروم سالیانه ۶۲۸۰ میلیون ریال می‌باشد. شایان ذکر است تمامی اطلاعات اقتصادی شامل قیمت‌ها و هزینه‌ها برای سال ۱۳۹۳ به عنوان سال مبنای اقتصادی در این مطالعه گردآوری و بروز رسانی شده است (جدول ۲).

منافع حاصل از طرح‌های توسعه‌ای شامل منافع حاصل از بخش کشاورزی، شرب و صنعت و برقابی خواهد بود. در این مطالعه با توجه به این که در زمینه بهینه‌سازی طرح‌های سدسازی امکان عدم ساخت نیز مطرح می‌باشد لذا باید همه عوامل دخیل در بحث توجیه‌پذیری طرح در منافع مطرح شود. با این توجه در زمینه طرح‌های سدسازی، منافع حاصل از طرح‌های سدسازی شامل منافع کشاورزی حاصل از شبکه‌های آبیاری و زهکشی توسعه داده شده و بهبود یافته و همچنین منافع شرب و صنعت در نظر گرفته شده است. از طرفی با توجه به این که مصرف غالب آب در این حوضه آبریز مربوط به مصارف کشاورزی است، لذا بحث رقابت بین دو کاربر رقابتی صنعت و کشاورزی در این حوضه تأثیرگذار نخواهد بود. بنابراین نیاز آبی دو بخش شرب و صنعت بصورت ثابت در نظر گرفته شد. بطور مشخص، اهداف بهره‌برداری سد نرگسی شامل تأمین ۲۰ میلیون متر مکعب شرب مسقان و ۴۵ میلیون متر مکعب برای صنعت مسقان، اهداف بهره‌برداری سد دالکی شامل تأمین ۲۵ میلیون متر مکعب شرب و صنعت دالکی و اهداف بهره‌برداری سد چروم شامل تأمین ۳ میلیون متر مکعب شرب خشت و ۷ میلیون متر مکعب صنعت خشت می‌باشد. مقادیر مذکور نیاز آبی در حقیقت حد بالای کاربری آب توسط این بخش‌ها بوده و به تبع آن با کمبود تأمین آب برای این بخش‌ها از منافع آنها کاسته خواهد شد.

Table1- Economic data of the projects (Ab Toseye Paydar, 2016; Tamavan, 2014a; Tamavan, 2015)

جدول ۱- اطلاعات اقتصادی پروژه‌ها (Tamavan, 2015; Tamavan, 2014a; ATP, 2016)

Project	Variable	Capital cost function	O&M cost (% of capital cost)
Nargesi dam	NWV**	31893.45×NWV+24181.99	1
Dalaki dam	NWV	11358×NWV+132880	0.6
Chorom dam	NWV	37428.2×NWV+408802.03	0.6
Gikh ID*- surface tech.	A	375.81×A	
Gikh ID- sprinkler tech.	A	415.81×A	
Dasht-e-Goor ID- tape tech.	A	496.67×A+10000	1.5
Siah-Mansoor ID- surface tech.	A	247.088×A	1.5
Siah-Mansoor ID- tape tech.	A	352.94×A	1.5
Shabankareh ID- surface tech.	A	241.379×A	1.3
Khesht ID- surface tech.	A	165.94×A	1.3

*ID: irrigation district; **NWV: normal water volume; ***A: area

Table 2- Agro-economic data (Booshehr Regional Water Company; Ministry of Agriculture Jihad; FAO56)

جدول ۱- داده‌های اقتصاد کشاورزی (آب منطقه ای بوشهر، وزارت جهاد کشاورزی، گزارش FAO56)

Crop	K_y	Y_m (kg/ha)	b (Unitless)	$EC_{e,threshold}$ (ds/m)	Price (Rial/Kg)	Production Cost (Rial/Kg)
Palm date	0.8	7400	3.6	4	11850	3500
Wheat	1.05	2700	7.1	6	10500	4640-6690
Sorghum	0.9	50000	16	6.8	1100	900
Water melon	1	36000	16	2.5	2000-2200	1110-2200
Tomato	1.1	39400	9	1.7	3000-3500	2530-2590

برای محاسبه کاهش منافع از مفهوم ارزش آب در بخش‌های شرب و صنعت مبتنی بر تعرفه‌های فروش استفاده شد. ارزش اقتصادی آب شرب خشت در حدود ۸۰۰۰ ریال به ازای هر متر مکعب و ارزش اقتصادی آب صنعت خشت در حدود ۵۰۰۰ ریال به ازای هر متر مکعب لحاظ شد (Tamavan, 2015). همچنین ارزش آب برای شرب و صنعت دالکی برابر ۶۰۰۰ ریال به ازای هر متر مکعب و برای شرب و صنعت نرگسی برابر ۶۱۵۴ ریال به ازای هر متر مکعب در نظر گرفته شد (ATP, 2016).

۴-۱- نتایج واسنجی هیدرولوژیکی

همانطور که پیشتر بیان گردید در این تحقیق صرفاً پارامترهای مرتبط با ماجول‌های هیدرولوژیکی، یعنی تخصیص آب و بیلان نمک، واسنجی می‌گردد. شایان ذکر است که در این تحقیق سری‌های زمانی دراز مدت آبدهی ماهانه رودخانه در محل سرشاخه‌ها و جریانات میانی سیستم به عنوان داده ورودی استفاده شد که همگی از مطالعات پیشین استخراج گردید (Mahab, 2010; Tamavan, 2014a,b)؛ بنابراین آبدهی به صورت داده ورودی (بدون شبیه‌سازی بارش–رواناب) در نظر گرفته شد. با این توجه، هدف اصلی واسنجی در این تحقیق، روندیابی صحیح نمک تحت تأثیر فرآیندهای طبیعی ورودی (شوری اولیه) و همچنین فرآیندهای مربوط به مدیریت و برداشت انسان (شوری ثانویه) است. بدین منظور از مشاهدات هیدرولوژیکی توأم دبی و شوری بهره‌گیری می‌شود و با توجه به محدودیتهای مربوط به پیوستگی زمانی و مکانی اینگونه مشاهدات در نهایت از رکوردهای تاریخی سه ایستگاه جره بالا، سعدآباد و کلل که همگی مربوط به نقاط مهم بر روی رودخانه‌های اصلی با آمار نسبتاً مناسب‌تر است، استفاده می‌شود. شایان ذکر است که آمار مربوط به ایستگاههای هیدرومتری مناسب دیگر که در بالادست سه ایستگاه مذکور قرار دارند، در حقیقت در مطالعات پیشین برای استخراج سری‌های زمانی آبدهی طبیعی ورودی به‌کار گرفته شده‌اند و بنابراین به‌صورت غیرمستقیم در این تحقیق مورد توجه بوده‌اند.

برای شبیه‌سازی از مشاهدات دوره زمانی سالهای ۱۹۷۲–۲۰۱۲ استفاده شد. پارامترهای مورد نظر در مجموع بالغ بر ۱۱۵ عدد بود که عبارتند از پارامترهای روش رطوبت خاک، پارامترهای رابطه دبی–شوری، پارامترهای سطح زیرکشت و الگوی کشت اراضی زارعی و همچنین مقادیر سطح شبکه آبیاری و زهکشی اراضی، که در طول دوره شبیه‌سازی (سالهای ۱۹۷۲–۲۰۱۲) در حال تکمیل و احداث بوده اند. با توجه به تعدد قابل توجه پارامترها در دو مرحله از تعداد آنها کاسته شد. در مرحله اول با توجه به همبستگی‌های موجود در توزیع مکانی مقادیر پارامترها، پارامترهای اضافی حذف شدند که در نتیجه اینکار تعداد پارامترها به ۵۰ عدد کاهش یافت. سپس تحلیل حساسیت نتایج شبیه‌سازی به مقادیر پارامترها انجام گردید و در نهایت ۲۵ پارامتر دارای حساسیت شناخته شد که همگی در روند واسنجی در نظر گرفته شدند. برای تحلیل حساسیت از روش VARS[۲] استفاده شد. نتیجه تحلیل حساسیت در شکل ۳ قابل مشاهده است.

نتایج واسنجی این پارامترها با توجه به مشاهدات توأم دبی و TDS در ایستگاه‌های جره بالا، سعدآباد و کلل با استفاده از سه شاخص ضریب نش (NS)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) در جدول ۳ ارائه شده است. با این توجه مقادیر معیارهای واسنجی از منظر دبی و TDS به صورت توأمان از دقت قابل قبول برخوردار است.

۴-۲- نتایج بهینه‌سازی

با اجرای مدل بهینه‌سازی، نتایج حاصل از انتخاب بهترین ترکیب از مجموعه اقدامات زیر ساختی در نظر گرفته شده برای حوضه آبریز شامل احداث ۳ سد و توسعه شبکه‌های آبیاری و زهکشی پایین دست آنها و به تبع آن منافع خالص حاصل از بهترین ترکیب بدست می‌آید. که طی آن مقادیر بهینه سطح توسعه اراضی دشت گور برابر با ۱۱۶۸ هکتار، اراضی زراعی سیاه منصور برابر ۲۷۰۰ هکتار، باغات سیاه منصور برابر ۱۷۹ هکتار، اراضی ساحل چپ و راست بند گیخ (پاییـــن

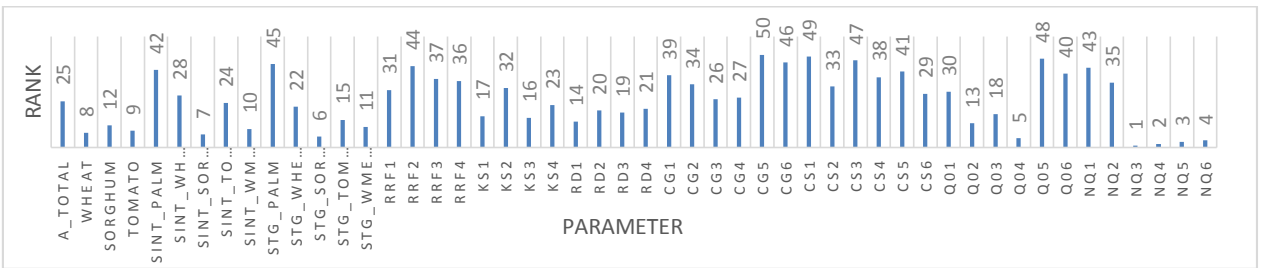

Fig. 3- Parameters' Sensitivity Ranking

شکل ۳- مرتبه حساسیت پارامترها

Table 3- Goodness-of-fit measures for hydrological simulation

جدول ۳- معیارهای نکویی برازش مربوط به شبیه‌سازی هیدرولوژیکی

Quantity	Measure	Kolal	Saedabad	Jareh bala
Discharge (m3/s)	RMSE	7.21	14.8	10.9
	R^2	0.78	0.7	0.76
	NS	0.75	0.66	0.74
TDS (mg/l)	RMSE	112.03	119.6	----
	R^2	0.56	0.52	----
	NS	0.2	0.21	----

دست سد نرگسی) به ترتیب برابر ۱۵۱۲ و ۳۶۰۴ هکتار بوده و مقدار بهینه توسعه زراعت اراضی خشت و دشت شبانکاره به ترتیب به مقدار ۱۴۷۹ و ۹۲۸۹ هکتار بالغ گردیده است. همچنین با توجه به انتخاب نوع تکنولوژی آبیاری در سطح برخی مزارع (سطحی (سنتی یا هیدروفلوم)، قطره‌ای (یا نواری) و بارانی) مقادیر بهینه سهم (درصد) آبیاری سطحی در باغات سیاه منصور برابر ۴۷/۵۳ درصد و در زراعت سیاه منصور برابر ۲۴/۵ درصد بدست آمده است. در نتیجه با توجه به طرح تکنولوژی آبیاری نواری در این اراضی مقدار بهینه سهم این تکنولوژی در هر یک از این اراضی برابر ۵۲/۵ و ۷۵/۵ درصد است. همچنین مقادیر بهینه سهم (درصد) آبیاری سطحی در ساحل چپ و راست بند گیخ به ترتیب برابر ۴۸ و ۵۰ درصد به‌دست آمده که در نتیجه با توجه به طرح تکنولوژی آبیاری بارانی (نیمه متحرک کلاسیک) در این اراضی مقدار بهینه سهم این تکنولوژی در هر یک از این اراضی برابر ۵۲ و ۵۰ درصد است. در زمینه طرح‌های سدسازی نیز، طی روند بهینه‌سازی مقادیر بهینه حجم مخزن سد چروم برابر ۴۳/۵ میلیون متر مکعب، سد دالکی ۳۰۵/۵ میلیون متر مکعب و سد نرگسی ۷۶/۸ میلیون متر مکعب به‌دست آمد.

مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مربوط به استراتژی آبیاری-آبشویی به صورت جدول ۴ است. با اتخاذ استراتژی بهینه آبیاری مقدار کل نیاز ناخالص آبی در شرایط توسعه در حدود ۸۵۰ میلیون متر مکعب بوده که نسبت به شرایط وضع موجود در حدود ۳۵ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین مقدار کل کمبود آب در شرایط توسعه در حدود ۳۰۹ میلیون متر مکعب (۳۵ درصد نیاز کل) و در وضع موجود ۷۸۱ میلیون متر مکعب (۶۰ درصد نیاز کل) مورد انتظار است.

در نتیجه بر اساس مقادیر بهینه به‌دست آمده، بیشینه ارزش حال حاضر منافع خالص کل حوضه آبریز حله در حدود ۲۳۱۰۶/۰۲ میلیارد ریال بدست آمده است که از این بین ارزش حال حاضر منافع خالص کشاورزی در طول این دوره ۲۶۹۹۷/۳ میلیارد ریال و ارزش حال حاضر منافع شرب و صنعت حاصل از احداث سدها در این دوره نیز برابر ۸۵۳۲/۴۶ میلیارد ریال برآورد گردیده است. با مقایسه اقتصادی ارزش خالص حاضر مربوط به گزینه بهینه با ارزش خالص حاضر مربوط به آینده بدون طرح (ادامه وضع موجود)، می‌توان میزان توجیه‌پذیری اقتصادی را به تفکیک هر طرح به صورت جدول ۵ محاسبه نمود. مطابق جدول، با اجرای گزینه بهینه، ارزش حاضر منافع در حدود ۳۶/۲ درصد افزایش می‌یابد که با احتساب هزینه‌های تولید و هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری زیرساختها، ارزش منافع خالص حال حاضر در کل حوضه آبریز حله، در حدود ۱۸/۴درصد افزایش می‌یابد که این نشان دهنده توجیه اقتصادی اجرای این طرح‌هاست. شایان ذکر است در محاسبات مرتبط با جدول ۵، نرخ تنزیل (i) در نظر گرفته شده بر اساس رابطه (۱۰) برابر ۷ درصد بوده است.

بر اساس نتایج، محاسبه ارزش اقتصادی آب برای مصارف کشاورزی طرح‌های توسعه‌ای امکان‌پذیر است. شایان ذکر است که ارزش اقتصادی آب کشاورزی در واقع بیانگر میزان سوددهی (منافع خالص) حاصل از به‌کارگیری آب در بخش کشاورزی (بر حسب ریال) در ازای مصرف یک واحد (یک متر مکعب) آب در این بخش می‌باشد. در محاسبه ارزش اقتصادی آب، هزینه‌های سرمایه‌گذاری به صورت یکنواخت شده در طول عمر مفید و همچنین هزینه‌های بهره‌برداری سالیانه طرح‌های سازه‌ای (سد و شبکه) در کنار هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی و منافع ناخالص حاصل از فروش محصولات در نظر گرفته می‌شود. با این توجه، ارزش اقتصادی آب در مصارف کشاورزی تحت شرایط ۳ سناریوی ۱) ادامه وضع موجود، ۲) بهینه‌سازی وضع موجود بدون اقدام سازه‌ای و ۳) توسعه کامل با اجرای گزینه‌های بهینه سازه‌ای در شکل ۴ با هم مقایسه می‌شود. شایان ذکر است سناریوی دوم مربوط به تغییر استراتژیهای آبیاری و آبشویی با هدف بهینه‌سازی وضع موجود بدون اجرای اقدامات سازه‌ای است. با توجه به شکل، ارزش اقتصادی آب در اثر بهینه‌سازی وضع موجود (بهینه‌سازی برنامه آبیاری-آبشویی)، افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به سناریوی اول (ادامه وضع موجود) داشته است. که این موضوع می‌تواند به دلیل رویکردها و استراتژی‌های کم آبیاری و کنترل تنش شوری از طریق آبشویی و به طور کلی افزایش منافع خالص کشاورزی با مصرف کمتر آب باشد.

Table 4- Optimum values of irrigation and leaching decision variables

جدول ۴- جوابهای بهینه متغیرهای تصمیم مربوط به آبیاری و آبشویی

Lands	Technology	Crop	Area (ha)	S_{intv} (%)	S_{tg} (%)	S_{leach} (%)	BML	NML	Demand (mcm/yr)
Khesht	Surface	Palm	1856	46.7	71.5	0	0	0	33.58
Khesht	Surface	Wheat	887.5	52.6	75.6	0	0	0	4.6
		Sorghum	147.9	46.4	74.4	67.8	8	3	
		Tomato	295.8	38.5	50.2	71.9	5	3	
		watermelon	147.9	44.3	76.3	0	0	0	
Dasht-e-goor	Tape	Wheat	467.3	46.9	46.9	93.9	9	3	3.14
		Sorghum	116.8	62.5	62.5	96.4	7	1	
		Tomato	350.5	69.8	69.8	90.5	7	2	
		watermelon	233.7	57.6	57.6	63.5	10	1	
Siah Mansour	Surface	Palm	85	42.1	72.6	0	0	0	6.24
	Tape	Palm	93.9	30.8	30.8	0	0	0	
Siah Mansour	Surface	Wheat	330.8	58.2	89.1	0	0	0	9.21
		Sorghum	66.2	37.9	74.6	74.1	7	1	
		Tomato	198.5	31.6	66.3	84.1	5	1	
		watermelon	66.2	30.9	69.4	0	0	0	
	Tape	Wheat	1019	75	75	0	0	0	
		Sorghum	203.8	52.3	52.3	74.1	7	1	
		Tomato	611.6	74.3	74.3	84.1	5	1	
		watermelon	203.8	61.7	61.7	0	0	0	
Shabankareh	Surface	Wheat	3250	38.2	82.8	86.8	2	1	29.26
		Tomato	6037	38.2	77.9	85.7	9	1	
Abpakhsh	Surface	Palm	10000	35.7	73.2	0	0	0	289.4
Dalaki	Surface	Palm	8400	42.7	63.8	0	0	0	
Vahdatieh	Surface	Palm	750	48.8	75	0	0	0	
Dehghaed	Surface	Palm	300	50.42	77.7	0	0	0	9.44
Dehghaed	Surface	Wheat	1800	50.1	84.1	87.1	8	1	13.86
Dalaki water rights	Surface	Wheat	1500	51.8	73.3	65.5	11	3	4.87
Kolal	Surface	Palm	1250	32.3	74.8	0	0	0	27.86
Mohamadi	Surface	Wheat	3000	39.5	50.3	0	0	0	3.12
Helleh water right	Surface	Wheat	5000	44.8	96.5	0	0	0	14.71
Gikh left bank	Surface	Wheat	362.8	40.8	52.3	66.3	8	2	12.13
		Sorghum	90.7	36.2	65.4	83.2	8	1	
		Tomato	181.4	35.6	65.8	87.9	6	2	
		watermelon	90.7	37.7	51.1	84	4	2	
	Sprinkler	Wheat	393	33.1	42.7	66.3	8	2	
		Sorghum	98.2	30.3	86.8	83.2	8	1	
		Tomato	196.5	48.9	73.9	87.9	6	2	
		watermelon	98.2	36.9	48.8	84.1	4	2	
Gikh Right bank	Surface	Wheat	901	30.1	49.4	76.1	8	1	4.77
		Sorghum	225.3	41.7	53.7	0	0	0	
		Tomato	450.5	35.4	71.1	0	0	0	
		Watermelon	225.3	43.1	65.2	0	0	0	
	Sprinkler	Wheat	901	42.3	49.9	76.1	8	1	
		Sorghum	225.3	41.1	65.9	0	0	0	
		Tomato	450.5	44.7	85.1	0	0	0	
		Watermelon	225.3	30.1	56.8	0	0	0	

Table 5- Comparing business-as-usual and development conditions

جدول ۵- مقایسه شرایط آینده بدون طرح و توسعه (میلیارد ریال)

Items	Business as usual	Development
Agricultural Benefits	19824	26997
M&I Benefit	0	8532
Dams' Construction Costs	0	8112
Dams' O&M Costs	29	781
Irrigation Districts' Construction Costs	0	3876
Irrigation Districts' O&M Costs	282	903
Total net benefits	19514	21858

همچنین در مقایسه با وضع موجود، با اجرای طرح‌های سازه‌ای، کاهش ارزش اقتصادی آب کشاورزی در اثر اجرای طرح‌های سازه‌ای مشاهده می‌گردد که می‌بایست در انتخاب و اجرای طرح‌های سازه‌ای مورد توجه قرار گیرد. در این راستا باید توجه نمود که اجرای طرح‌های زیرساختی علیرغم افزایش منافع خالص اقتصادی کل در سطح حوضه، به کاهش ارزش اقتصادی آب کشاورزی منجر می‌شود. تحت این شرایط در برخی سالها ارزش آب منفی می‌شود که دلیل آن احتساب هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (به صورت ارزش یکنواخت سالیانه) و هزینه‌های بهره‌برداری سالیانه در محاسبه ارزش آب است. شایان ذکر است که شیب نزولی نمودار ارزش اقتصادی آب در همه سناریوها تحت تأثیر بلندمدت شوری آب است چراکه شوری یا باعث کاهش بازدهی زراعی محصول می‌شود و یا در صورت کنترل از طریق آبشویی خصوصاً در اراضی زراعی باعث مصرف مضاعف آب می‌شود که در هر دو صورت منجر به کاهش ارزش اقتصادی آب می‌گردد.

با توجه به این که در محاسبات منافع و هزینه‌های اقتصادی، از قیمت‌های جدول ۱ و جدول ۲ بر اساس مطالعات مهندسین مشاور و اطلاعات وزارت جهاد کشاورزی و آب منطقه‌ای بوشهر در سال پایه ۱۳۹۳ استفاده شده است و با عنایت بر امکان عدم تحقق پیش‌بینی صورت گرفته بدلیل عوامل مختلف اجتماعی و سیاسی، لازم است نتایج اقتصادی بدست آمده را تحت شرایط افزایش هزینه‌ها و یا کاهش منافع مورد انتظار تحلیل حساسیت نمود. در این راستا مطابق جدول ۶، نتایج اقتصادی در ۳ نرخ تنزیل ۷٪، ۸٪ و ۱۰٪ تحت ۱۳ شرایط مختلف متأثر از افزایش ۱۰ یا ۲۰ درصدی هزینه‌های اقتصادی و یا کاهش ۱۰ الی ۲۰ درصدی قیمت فروش محصولات کشاورزی و کاهش قیمت آب شرب و صنعت بررسی گردید. از طرفی با توجه به سیاست‌های دولت در زمینه خودکفایی در تولید گندم و افزایش نرخ تضمینی خرید گندم از کشاورزان در سال پایه (حدود ۱/۵ برابر قیمت جهانی محصول)، لذا منافع اقتصادی حاصل از شرایط در نظر گرفتن قیمت جهانی گندم به جای نرخ تضمینی آن نیز مورد بررسی قرار گرفت. از این رو بدبینانه‌ترین حالت مطابق جدول ۶ مربوط به در نظر گرفتن نرخ تنزیل ۱۰ درصد و افزایش ۲۰ درصدی هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از سازه‌های آبی و تولید محصولات کشاورزی همزمان با کاهش ۲۰ درصدی قیمت فروش محصولات کشاورزی و کاهش ۲۰ درصدی منافع شرب و صنعت می‌باشد. نتایج نشان داد که به ازای تمامی سناریوهای تحلیل حساسیت، که جزییات آن در جدول ۶ قابل ملاحظه است، کماکان گزینه سه سدی توجیه‌پذیر باقی می‌ماند هر چند تحت شرایط برخی از سناریوهای تحلیل حساسیت ممکن است گزینه مذکور بهینه باقی نماند. جهت بررسی بهینگی گزینه سه سدی و با توجه به محدودیت‌های مربوط به زمان‌بر بودن اجرای مدل شبیه‌سازی–بهینه‌سازی، مقدار شاخص طرح (NPV) گزینه سه سدی با شاخص مربوط به وضع موجود مقایسه گردید.

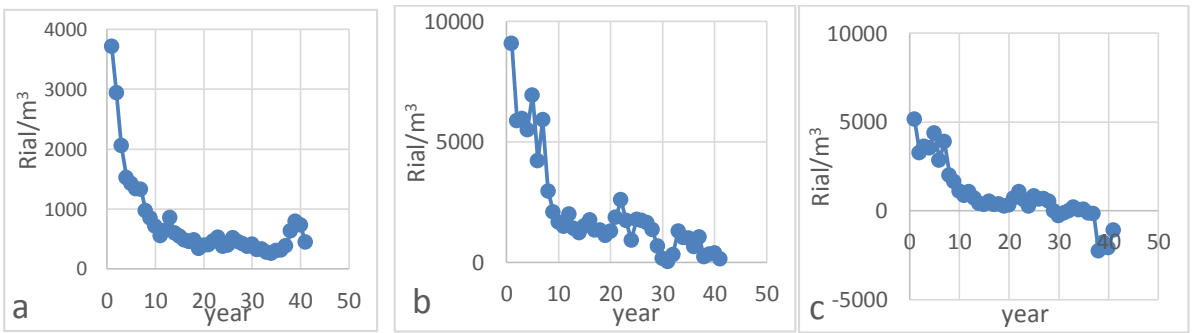

Fig. 4- Economic value of irrigation water at basin scale for a) first scenario, b) second scenario c) third scenario

شکل ۴- ارزش اقتصادی آب آبیاری در سطح حوضه آبریز؛ الف) سناریوی اول، ب) سناریوی دوم، ج) سناریوی سوم

نتایج نشان داد که افزایش مقدار نرخ تنزیل تا سطح ۱۰٪ می‌تواند سبب تغییر شرایط بهینگی گزینه سه سدی از منظر اقتصادی شود، بطوریکه NPV گزینه سه سدی به ازای تمامی سناریوها کمتر از NPV مربوط به وضع موجود است. به ازای نرخ تنزیل ۸٪ و همچنین با در نظر گرفتن کاهش ۱۰ درصدی قیمت محصولات کشاورزی همچنان گزینه سه سدی بهتر از وضع موجود است. اما با کاهش ۲۰ درصدی قیمت محصولات یا کاهش ۲۰ درصدی قیمت آب شرب و صنعت و حالات ترکیبی دیگر وضع موجود بهتر از گزینه سه سدی خواهد بود. در این رابطه، سلول‌های جدول مربوط به حالاتی که به ازای آنها شرایط بهینگی گزینه سه سدی قطعاً تغییر می‌کند پر رنگ نمایش داده شده‌اند. به ازای تنزیل ۷٪، در صورت کاهش ۱۰ درصدی قیمت محصولات کشاورزی همزمان با افزایش ۱۰ درصدی هزینه‌های کشاورزی و کاهش ۱۰ درصدی قیمت آب شرب و صنعت، گزینه سه سدی بهتر از وضع موجود است، در حالی که تحت دیگر شرایطی که به ازای آن قیمت محصولات کاهش بیشتر یا هزینه‌ها افزایش بیشتر دارد وضعیت به عکس بوده و شرایط اقتصادی وضع موجود بهتر از گزینه سه سدی است.

شایان ذکر است که در این مطالعه، توجیه‌پذیری احداث اقدامات سازه‌ای مطرح شده در گزینه بهینه بدست آمده در راستای توسعه حوضه آبریز حله، صرفا از منظر اقتصادی مورد مطالعه قرار گرفته است حال آنکه در این زمینه عوامل متعدد زیست‌محیطی، اجتماعی و سیاسی نیز دخیل می‌باشند که می‌توانند در نتایج به‌دست آمده این مطالعه اثرگذار باشند.

۵- نتیجه‌گیری

مسأله تعیین سیمای بهینه طرح‌ها و سیاست‌های توسعه منابع آب در سطح حوضه آبریز حله در این پژوهش مورد توجه قرار گرفت. فرمول‌بندی مسأله با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی منجر به یک مسأله برنامه‌ریزی غیرمحدب غیرخطی مختلط به عدد صحیح می‌گردد که جزو مسائل پیچیده است.

با این توجه یک رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به صورت ترکیب نرم‌افزار WEAP با سه ماجول محاسباتی اضافی (روندیابی شوری، زراعی، اقتصادی) به عنوان مدل شبیه‌سازی در تلفیق با الگوریتم بهینه‌سازی PSO برای حل مسأله توسعه یافت.

Table 6- Sensitivity analysis on obtained economic results of development condition (values are in Billion Rial)

جدول ۶- تحلیل حساسیت نتایج اقتصادی حاصل از شرایط توسعه (مقادیر بر حسب میلیارد ریال می‌باشند)

Scenario	Cost	$Price_{M\&I}$[3]	$Price_{AGR}$[4]	i[5] = 7%		i = 8%		i = 10%	
				3Dams[6]	BaU[7]	3Dams	BaU	3Dams	BaU
1	cte[2]	cte	cte	21857	19513	19301	18354	15248	16480
2	cte	-10%	cte	21004	19513	18529	18354	14602	16480
3	cte	-20%	cte	20151	19513	17758	18354	13956	16480
4	cte	cte	-10%	19157	17531	16797	16491	13056	14809
5	cte	cte	-20%	16458	15548	14293	14627	10864	13137
6	cte	-10%	-10%	18304	17531	16026	16491	12410	14809
7	cte	-20%	-20%	14751	15548	12750	14627	9572	13137
8	+10%	cte	-10%	17790	17500	15452	16462	11743	14785
9	+10%	cte	-20%	15090	15517	12948	14599	9551	13114
10	+20%	cte	-10%	16423	17468	14106	16434	10429	14762
11	+20%	cte	-20%	13723	15486	11603	14571	8237	13090
12	+20%	-10%	-20%	12870	15486	10831	14571	7591	13090
13	+20%	-20%	-20%	12017	15486	10059	14571	6945	13090
14[1]	cte	cte	GP Wheat	19604	18522	17212	17422	13419	15644

[1] special condition in which global price (GP) is considered for wheat =7150 Rial/Kg
[2] cte: Constant; [3] M&I: Municipal and Industrial; [4] AGR: Agricultural; [5] i: discount rate
[6] 3Dams: solution with 3 dams; [7] BaU: business-as-usual
Grey cells are related to conditions for which 3Dams solution is not optimal.

مدل توسعه یافته برای تعیین سیمای بهینه توسعه منابع آب حوضه آبریزی حله بکار گرفته شد. نتایج بهینه‌سازی حاکی از وجود راندمان اقتصادی در اجرای سه طرح سدسازی دالکی، نرگسی و چروم و طرح‌های توسعه شبکه‌های آبیاری پایین دست آنهاست. با انتخاب گزینه پیشنهاد شده توسط این تحقیق، ضمن آنکه در اثر استراتژی‌های آبیاری و آبشویی بهینه، مقدار کل نیاز ناخالص حدود ۳۵ درصد نسبت به شرایط وضع موجود کاهش داشته و به تبع آن کاهش میزان کمبود آب در شرایط توسعه حدود ۲۵ درصد نسبت به وضع موجود بهبود یافته، منافع ناخالص و خالص بخش کشاورزی نیز به ترتیب ۳۶/۲ و ۱۸/۴ درصد نسبت به شرایط وضع موجود افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج حاکی از آن است که علیرغم بهینه بودن گزینه پیشنهاد شده، ارزش اقتصادی آب تحت شرایط گزینه بهینه توسعه نسبت به وضع موجود کاهش می‌یابد که این مطلب عمدتاً تحت تأثیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و بهره‌برداری طرح‌های سازه‌ای و همچنین تأثیر نامطلوب شوری بر کاهش تولید محصول و یا افزایش نیاز آبشویی و مصرف بیشتر آب است. با توجه به آنکه اتخاذ تصمیم در زمینه سدسازی و افزایش و توسعه سطح زیرکشت می‌تواند تبعات قابل توجه زیست‌محیطی را درپی داشته باشد، در تحقیق حاضر از نتایج ارزیابی‌ها و مطالعات پیشین زیست‌محیطی مربوط به هریک از طرح‌ها بهره‌گیری شد، بطوریکه حقابه‌های زیست‌محیطی به عنوان نیازهای آبی مقید کننده و همچنین خسارت‌های زیست‌محیطی/اجتماعی دریاچه مخازن در قالب تابع هدف اقتصادی لحاظ گردید. این در حالیست که سایر هزینه‌های محتمل خارجی زیست‌محیطی و اجتماعی طرح‌ها، به دلیل محدودیت اطلاعات در این زمینه، به حساب نیامد. همچنین به عنوان دیگر محدودیت این تحقیق، بهینه‌سازی مبتنی بر معیارهای صرفاً اقتصادی انجام شد و سایر ملاحظات فنی و زیست‌محیطی و تا حدودی اجتماعی در قالب محدودیت‌ها و نه توابع هدف مورد توجه قرار گرفت. با این توجه از روش‌های متداول در ارزیابی و بهینه‌سازی چندهدفه شامل روش‌های نظام‌مند برای بهره‌گیری از نظرات خبرگان در قالب مصاحبه و تحلیل‌های جانبی بهره‌گیری نشد؛ امری که از اهمیت قابل توجه برخوردار بوده و در آینده قابل انجام است.

۶- قدردانی

در پایان، نویسندگان این مقاله از شرکتهای مهندسین مشاور یکم، تماوان، آب توسعه پایدار و همچنین شرکت آب منطقه‌ای استان بوشهر در راستای همکاری و در اختیار گذاشتن اطلاعات اقتصادی طرح‌های سدسازی و شبکه‌های آبیاری و زهکشی حوضه آبریز حله، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

پی‌نوشت‌ها

1- Particle Swarm Optimization
2- Variogram Analysis of Response Surface

۷- مراجع

Abgir CEC (2014) Updates of the comprehensive water plan of the country in the watershed of Helleh, Mand, Kel-Mehran, Bandar Abbas-Sadej and Baluchestan. Technical Report (In Persian)

ATP CEC (2016) Economic evaluation of Dalaki dam. Technical Report (In Persian)

Brath A, Montanari A and Toth E (2004) Analysis of the effects of different scenarios of historical data availability on the calibration of a spatially-distributed hydrological model. Journal of Hydrology 291(3-4):232-253

Blanco-Gutiérrez I, Varela-Ortega C and Purkey DR (2013) Integrated assessment of policy interventions for promoting sustainable irrigation in semi-arid environments: A hydro-economic modeling approach. Journal of Environmental Management 128:144-160

Esteve P, Varela-Ortega C, Blanco-Gutiérrez I and Downing TE (2015) A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. Ecological Economics 120:49-58

Fraga CCS, Medellín-Azuara J and Marques GF (2017) Planning for infrastructure capacity expansion of urban water supply portfolios with an integrated simulation-optimization approach. Sustainable Cities and Society 29:247-256

Harou JJ, Pulido-Velazquez M, Rosenberg DE, Medellín-Azuara J, Lund JR and Howitt RE (2009) Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. Journal of Hydrology 375(3-4):627-643

Hum NNMF and Abdul-Talib S (2016) Modeling optimal water allocation by managing the demands in Selangor. ISFRAM 2015. Springer, p93–104

Nowrozi B (2015) Hydro-economic modeling for quantitative and qualitative management of surface water in Helleh River Basin. M.Sc. Thesis, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (In Persian)

O'Connor DJ (1976) The concentration of dissolved solids and river flow. Water Resources Research 12(2):279-294

Reznik A, Feinerman E, Finkelshtain I, Kan I, Fisher F, Huber-Lee A and Joyce B (2016) The cost of

Mohsenizadeh E, Shourian M (2017) Optimum water resources allocation planning at basin scale by integrating MODSIM and Cuckoo optimization algorithm. Iran Water Resources Research 13(4):1-16 (In Persian)

Vico G and Porporato A (2011) From rainfed agriculture to stress-avoidance irrigation: I. A generalized irrigation scheme with stochastic soil moisture. Advances in Water Resources 34(2):263–271

Yates D, Purkey D, Sieber J, Huber-Lee A and Galbraith H (2005) WEAP21-A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: Part 2: aiding freshwater ecosystem service evaluation. Water International 30(4):501–512

covering costs: a nationwide model for water pricing. Water Economics and Policy 2(4):1650024

Tamavan CEC (2015) Study of economic evaluation of Choroom dam. Technical Report (In Persian)

Tamavan CEC (2014a) Study of the first and second phase of Shirin River development and economic evaluation of Nargesi dam. Technical Report (In Persian)

Tamavan CEC (2014b) Water resources planning of Chorom dam. Technical Report (In Persian)

Mahab GCEC (2010) Water resources planning of Raeis-Ali Delvari dam. Technical Report (In Persian)