

شبیه‌سازی پویای منابع آب در حوزه آبریز هیرمند به منظور تأمین آب بخش کشاورزی و محیط زیست

مهران حکمت نیا^۱؛ مهدی صفدری^{۲*}؛ سید مهدی حسینی^۳؛ علی سردار شهرکی^۳

۱ - دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشکده اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲ - دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳ - استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳/۰۱/۰۰ - تاریخ پذیرش ۱۰/۰۷/۰۰)

چکیده:

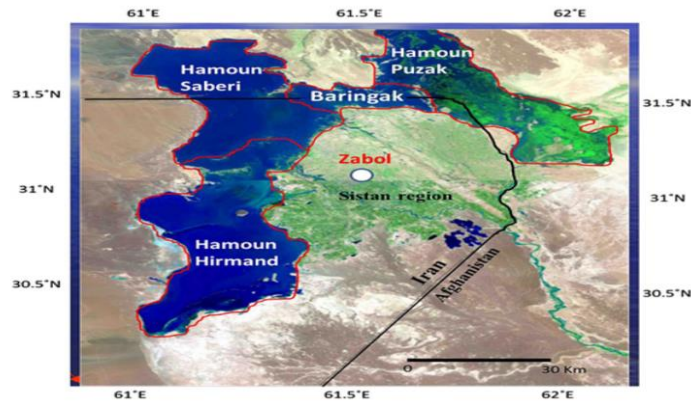
کشاورزی منبع اصلی برداشت آب است که حدود ۷۰ درصد از کل برداشت آب‌های شیرین حوزه آبریز هیرمند را شامل می‌شود. در سال‌های اخیر کمبود آب در حوزه آبریز هیرمند تأمین آب مورد نیاز بخش کشاورزی و محیط زیست را با مشکل مواجه کرده است. هدف این پژوهش، معرفی یک مدل پویایی سیستم (SDM) برای ارزیابی تقاضای آب تأمین‌شده و تقاضای آب تأمین‌نشده است. ابتدا سیستم منابع آب حوزه آبریز هیرمند در محیط نرم‌افزار VENSIM مدل‌سازی و وضعیت فعلی و آینده عرضه و تقاضای آب شبیه‌سازی شد. سپس طرح‌های در حال اجرا و سناریوهای مختلف مدیریتی شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که اجرای طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری کشاورزی در حوزه آبریز هیرمند، سبب کمبود آب سالانه ۴۱۵/۹۳۰ میلیون متر مکعب اراضی کشاورزی خارج از طرح می‌شود. اجرای خط دوم انتقال آب به زاهدان، کمبود آب در بخش کشاورزی را ۹/۳۲۴ میلیون متر مکعب در سال افزایش می‌دهد و سبب تشدید کم‌آبی سالانه ۶ میلیون متر مکعب در بخش محیط زیست می‌شود. ۲۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب در بخش شرب سبب افزایش تأمین آب در بخش کشاورزی و محیط زیست به اندازه ۳/۲۱۵ و ۲ میلیون متر مکعب در سال می‌شود. افزایش ۵۵ درصدی بازده آبیاری، تقاضای آب تأمین‌شده بخش کشاورزی را ۱۵۷/۸۲۹ میلیون متر مکعب در سال افزایش می‌دهد. اگر سیاست تخصیص آب فعلی ادامه داشته باشد، گسترش ریزگردها در حوزه آبریز هیرمند اجتناب‌ناپذیر است. برای حفظ محیط زیست در حوزه آبریز هیرمند، تغییر در سیاست تخصیص آب فعلی و اعمال اولویت یکسان تخصیص آب بین بخش کشاورزی و بخش محیط زیست پیشنهاد می‌شود.

کلید واژگان: طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری، کبود آب، مدل ونسیم

۱. مقدمه

کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در جهان است. منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک محدود است. در این مناطق بیش از ۹۰ درصد تقاضای آب محصولات کشاورزی با برداشت از منابع آب زیرزمینی و سطحی که کمیاب هستند انجام می‌گیرد (Hekmatnia et al., 2020). حوزه آبریز هیرمند با بارندگی حدود ۵۰ میلی‌متر در سال جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود. ۷۰ درصد از کل عرضه آب در این منطقه توسط بخش کشاورزی مصرف می‌شود (Shahraki et al., 2017). یکی از مشکلات اصلی مدیریت منابع آب در حوزه آبریز هیرمند، وابستگی به رودخانه مرزی هیرمند است که تنها منبع تأمین‌کننده آب در این منطقه به شمار می‌رود. رودخانه هیرمند دارای نوسان‌های شدید تأمین آب است و فعالیت‌های یکجانبه کشور افغانستان در خصوص ممانعت از ورود آب به این رودخانه سبب وقوع بحران شدید آبی در حوزه آبریز هیرمند شده است (Shahraki et al., 2019). مدیریت آب در حوزه آبریز هیرمند توسط دو بخش دولتی و خصوصی انجام می‌گیرد. بخش دولتی خود به زیربخش‌هایی مانند شرکت آب منطقه‌ای، محیط زیست، شیلات، منابع طبیعی و کشاورزی تقسیم می‌شود که هر کدام ترجیحات جداگانه و گاه متضادی دارند. برای مثال سازمان جهاد کشاورزی حجم آب بیشتری برای بخش کشاورزی خواستار است، در صورتی که سازمان محیط زیست آب را متعلق به بخش محیط زیست و تالاب‌ها می‌داند. در این صورت، اگر آب بیشتری به بخش کشاورزی اختصاص داده شود، آب کمتری برای بخش محیط زیست جاری می‌شود (Sardar Shahraki et al., 2019).

(2018). مطالب یادشده نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب در حوزه آبریز هیرمند فرایندی پویاست. بدین معنا که تصمیم‌گیری درباره تخصیص آب در طول زمان و بین بخش‌های مختلف است. به طوری که اگر امسال آب بیشتری به بخش شرب اختصاص داده شود، ممکن است سال آینده آب بخش محیط زیست و کشاورزی تأمین نشود. از این رو تصمیم‌گیری در زمان حال بر تصمیم‌های آینده مؤثر است (Sharifikia, 2013). مسئله تصمیم در مدیریت تخصیص و توزیع آب بین مصارف مختلف در حوزه آبریز هیرمند بسیار پیچیده است و یافتن جوابی که اهداف همه بخش‌ها را بهینه کند بسیار سخت است (Ghasemi & Dahmardeh, 2018). از این رو استفاده از ابزارهایی با قابلیت برقراری ارتباط منطقی بین ساختار و اجزای سیستم‌های منابع آب از نظر منابع و مصارف ضروری است. روش پویایی سیستم‌ها، از ابزارهای مدیریتی است که در سال‌های اخیر برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب کاربرد یافته است (Koushali et al., 2015). پویایی سیستم‌ها نشان می‌دهد که رفتار سیستم در طول زمان چگونه در حال تغییر است (Pereira et al., 2012). در سال‌های گذشته، استفاده از سیستم‌های پویا در مدیریت منابع آب گسترش یافته است. Bozorg-Haddad و همکاران (2020) در پژوهشی با بهره‌گیری از مدل پویایی سیستم‌ها نشان دادند که برای بازگرداندن تعادل آب دریاچه ارومیه، کاهش سطح زیر کشت بخش کشاورزی اجتناب‌ناپذیر است. Qin و همکاران (2019) با استفاده از مدل پویایی سیستم‌ها نشان دادند که طرح انتقال آب از جنوب به شمال چین ممکن است بحران کمبود آب در دشت شمال چین را کاهش دهد، اما نمی‌تواند از



شکل ۱- شماتیک حوزه آبریز هیرمند

کشاورزی و محیط زیست است. در این زمینه، ابتدا سیستم منابع آب حوزه آبریز هیرمند در محیط نرم‌افزار ونسیم مدل‌سازی می‌شود. سپس منابع و مصارف آب مشخص می‌شود. در نهایت سناریوهای مختلف مدیریتی به منظور مدیریت تأمین آب در بخش کشاورزی و محیط زیست حوزه آبریز هیرمند شبیه‌سازی می‌شود. تاکنون به موارد ذکر شده کمتر توجه شده و بررسی بیشتر این موارد، جنبه نوآوری پژوهش حاضر است.

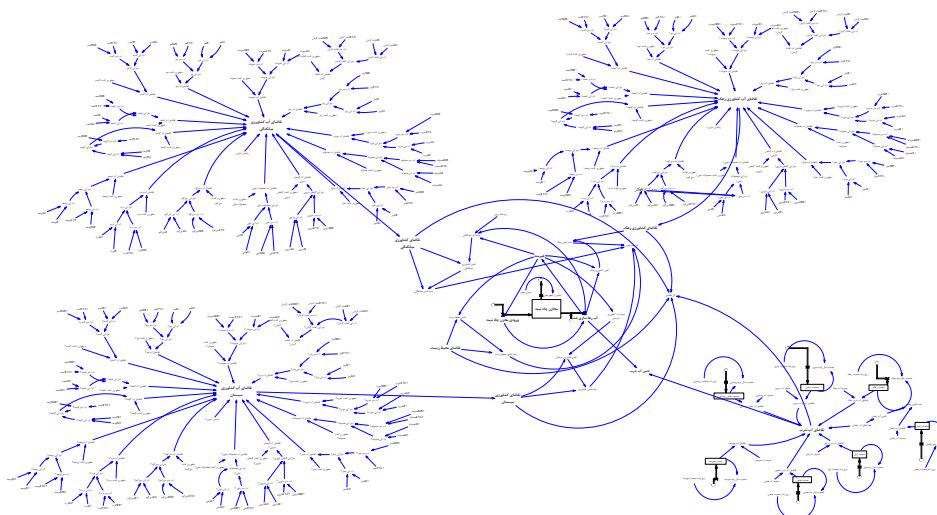
۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه تحقیق

حوزه آبریز هیرمند (شکل ۱)، در شمال استان سیستان و بلوچستان و در نزدیکی مرز افغانستان قرار گرفته است. یکی از مشخصه‌های اصلی این منطقه تبخیر زیاد آب است. به نحوی که سالانه ۴ تا ۵ هزار میلی‌متر از منابع آب حوزه آبریز هیرمند تبخیر می‌شود (Shahraki *et al.*, 2019). در حوزه آبریز هیرمند، سه بخش کشاورزی، هفت بخش آب آشامیدنی (شش بخش شهری و یک بخش روستایی) و تقاضای بخش محیط زیست (تالاب هامون) وجود دارد. مجموع اراضی کشاورزی در حوزه آبریز هیرمند در حدود ۱۵۴ هزار هکتار است (Shahraki *et al.*, 2017). منبع تأمین آب مخازن چاه‌نیمه است که از

کاهش بیشتر ذخیره آب‌های زیرزمینی در جنوب جلوگیری کند. Alifujiang و همکاران (2017) به مدل‌سازی پویای دریاچه ایسیکول^۱ در قرقیزستان پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات مربوط به کاربری اراضی کشاورزی مهم‌ترین عامل کاهش سطح آب دریاچه ایسیکول بوده است. Barhagh و همکاران (2020) با بهره‌گیری از مدل پویایی سیستم نشان دادند که با کاهش سطح زیر کشت محصولات کشاورزی و اجرای سیاست‌های مدیریتی همانند یکپارچه‌سازی اراضی کشاورزی، کاهش نیروی کار کشاورزی و اجرای الگوی بهینه کشت سبب افزایش تراز آب دریاچه ارومیه می‌شود. Sabbaghi و همکاران (2017) در پژوهشی به شبیه‌سازی و ارزیابی شاخص تکاپوی آب سد مخزنی شهید یعقوبی با استفاده از مدل پویایی سیستم‌ها پرداختند. یافته‌ها نشان داد که براساس تأمین آب رودخانه و میزان تقاضا در ۹۲ ماه از ۱۶۸ ماه دوره شبیه‌سازی شده توانایی پاسخگویی نیاز کشاورزی پایین‌دست را ندارد. بررسی منابع نشان داد که مدل ونسیم توانایی زیادی در مدل‌سازی سیستم پیچیده منابع آب دارد. بنابراین هدف این پژوهش، مدل‌سازی سیستم منابع آب حوزه آبریز هیرمند به منظور مدیریت تأمین آب در بخش

^۱ Issyk-Kul



شکل ۲- مدل شبیه‌سازی شده تأمین آب حوزه آبریز هیرمند در VENSIM

در این بخش، بر اساس رویکرد پویایی سیستم، سازوکارهای موجود در سیستم منابع آب حوزه آبریز هیرمند مدل‌سازی شده است. برای مدل‌سازی سیستم منابع آب حوزه آبریز هیرمند، از مدل VENSIM استفاده شد که می‌تواند مدل‌های پویایی سیستم را به تصویر بکشد و شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل کند. این ابزار مدل‌سازی از نوعی روش مدل‌سازی عینی استفاده می‌کند که می‌تواند مشکلات پیچیده منابع آب را به روشی ساده‌تر از زبان‌های برنامه‌نویسی معمول مدل‌سازی کند (Pereira et al., 2012). پس از فرموله کردن فرضیه دینامیکی و شناسایی ارتباط بین متغیرهای کلیدی و روابط بین آنها، متغیرهای درونی و برونی سیستم و ارتباط بین آنها تعیین شد (Xi & Poh, 2013). شکل ۲ ساختار مدل‌سازی شده حوزه آبریز هیرمند را نشان می‌دهد.

۲-۴. زیرسیستم تقاضای آب بخش کشاورزی

بخش کشاورزی در حوزه آبریز هیرمند حدود ۷۰ درصد از کل منابع آبی موجود را مصرف می‌کند (Shahraki et al, 2019). در حوزه آبریز هیرمند

رودخانه هیرمند تغذیه می‌شوند. سرمنشأ رودخانه هیرمند در افغانستان است. در سال‌های اخیر افغانستان سدهای مختلفی روی رودخانه هیرمند احداث کرده و مانع ورود آب به ایران شده است (Bazzi et al., 2020).

۲-۲. مدل پویایی سیستم^۲

تجزیه و تحلیل به هم پیوسته سیستم‌های منابع آب در مقیاس حوزه آبریز، مستلزم توسعه مدل یکپارچه منابع آب حوزه است (Koushali et al., 2015). رویکرد پویایی سیستم از توانمندترین ابزارهای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب است. این رویکرد که در سال ۱۹۶۸ توسط فارستر آغاز شد، روشی تقلیدی برای بازخورد شیء‌گرا با سابقه طولانی است (Forrester, 1968). در سال‌های اخیر، در تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی سیستم‌های منابع آب، به این رویکرد توجه روزافزونی شده است. بنابراین در این پژوهش از مدل پویایی سیستم SD برای شبیه‌سازی استفاده شد.

۲-۳. ساختار مدل

^۲ System dynamic

متر مکعب و WCPC سرانه مصرف آب برحسب متر مکعب در سال است.

۲-۶. زیرسیستم مخزن تأمین آب

مخزن آب چاه‌نیمه تأمین‌کننده تقاضای آب در حوزه آبریز هیرمند است. رودخانه هیرمند منبع تأمین‌کننده آب مخزن چاه‌نیمه است. آب از طریق کانال ورودی رودخانه هیرمند وارد مخزن چاه‌نیمه می‌شود. مقدار آب رهاسازی‌شده با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Pereira et al., 2012):

$$OutFlow = IS + inFlow - E$$

(رابطه ۳)

در رابطه ۳، OutFlow مقدار آب رهاسازی‌شده، IS مقدار حجم اولیه مخزن، E تبخیر از سطح مخزن و inflow جریان ورودی به مخزن چاه‌نیمه است.

۲-۷. زیرسیستم تأمین آب حوزه آبریز هیرمند

زیرسیستم تأمین آب منعکس‌کننده توانایی تأمین آب مصارف مختلف در حوزه آبریز هیرمند است. هدف از کاربرد این زیرسیستم، بررسی میزان شکاف موجود بین تأمین و تقاضای آب در حوزه آبریز هیرمند است. تأمین آب براساس کل منابع آب شامل ورودی رودخانه هیرمند و ورودی رودخانه پریان برآورد می‌شود. محاسبه تقاضای آب در حوزه آبریز هیرمند براساس زیرسیستم تقاضای آب شرب، زیرسیستم تقاضای آب کشاورزی و مصرف آب محیط زیست است. طبق اسناد بالادستی تقاضای آب محیط زیست در حوزه آبریز هیرمند ۳۵۸/۵۰۰ میلیون متر مکعب در سال است. آب رودخانه هیرمند از طریق کانال انتقال آب وارد مخزن چاه‌نیمه‌ها می‌شود. پس از آگیری کامل چاه‌نیمه‌ها، آب باقی‌مانده از طریق کانال برای تأمین آب بخش کشاورزی و محیط زیست به رودخانه هیرمند واریز می‌شود.

سه بخش کشاورزی سیستان، زهک و میانکنگی وجود دارد. بخش کشاورزی اولویت دوم تأمین آب در حوزه آبریز هیرمند پس از بخش شرب است. در زیرسیستم بخش کشاورزی ابتدا نیاز آبی محصولات کشت‌شده در حوزه آبریز هیرمند با استفاده از پارامترهای اقلیمی مؤثر بر نیاز آبی در محیط نرم‌افزار CROPWAT به‌دست آمد. سپس با توجه به سطح زیر کشت هر محصول، تقاضای آب هر محصول محاسبه شد. سپس از جمع تقاضاهای آب محصولات مختلف در بخش‌های کشاورزی سیستان، زهک و میانکنگی، تقاضای آب بخش کشاورزی هر بخش به‌دست آمد و وارد مدل ونسیم شد.

۲-۵. زیرسیستم تقاضای آب بخش شرب

برای برآورد زیرسیستم تقاضای آب بخش شرب باید جمعیت منطقه تخمین زده شود. جمعیت تأثیر چشمگیری بر منابع آب دارد. کل جمعیت در حوزه آبریز هیرمند را شش بخش جمعیت شهری و یک بخش جمعیت روستایی تشکیل می‌دهند. هرچه رشد جمعیت سریع‌تر باشد، نیاز به آب بخش شرب نیز بیشتر خواهد بود. تقاضای آب بخش شرب از تقاضای آب شهری و تقاضای آب روستایی تشکیل شده است که به نرخ مصرف آب و جمعیت بستگی دارد. برای تخمین جمعیت از رابطه ۱ استفاده شد.

(رابطه ۱)

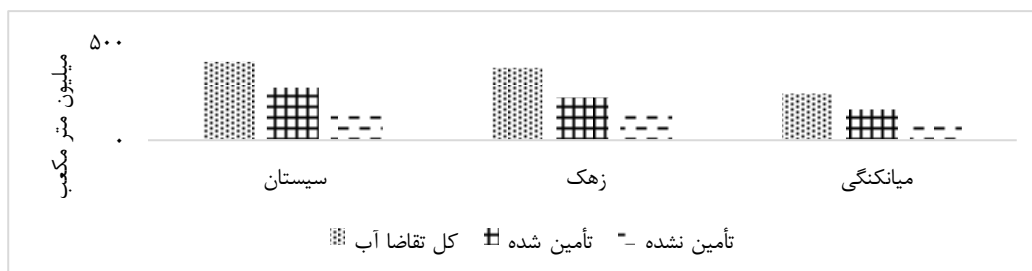
$$P_t = P_0(1 + r)^n$$

در این رابطه، P_0 جمعیت در سال پایه، P_t جمعیت در سال t ، r نرخ رشد جمعیت و n فاصله بین سال‌های شبیه‌سازی شده است.

$$WD = P_t \times WCPC$$

(رابطه ۲)

در رابطه ۲، WD تقاضای آب شرب برحسب میلیون



شکل ۳- تقاضای سالانه آب بخش کشاورزی در وضعیت پایه

۲-۸. سناریوهای پژوهش

هیرومند بررسی می‌شود. در سناریو ششم (SC6) پروژه خط دوم انتقال آب به زاهدان شبیه‌سازی و تأثیر اجرای آن ارزیابی می‌شود. سناریو هفتم (SC7) ترکیب سناریوهای SC5 و SC6 است. هدف از ایجاد سناریو SC7 ارزیابی این واقعیت است که پس از اجرای خط دوم انتقال آب به زاهدان، صرفه‌جویی در مصرف آب چقدر می‌تواند مؤثر واقع شود.

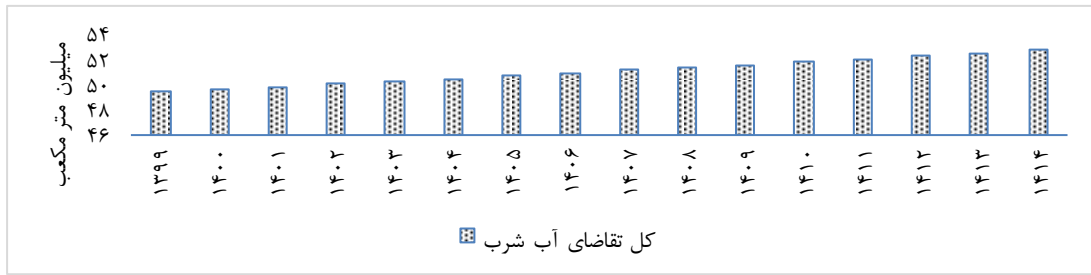
۳. نتایج

۳-۱. سناریو SC1

۳-۱-۱. بخش کشاورزی

کل تقاضای آب در بخش کشاورزی در سناریو SC1 در شکل ۳ ارائه شده است. در وضعیت فعلی، کل تقاضای آب در بخش کشاورزی سیستان، زهک و میانکنگی به ترتیب ۳۹۸/۲۶۹، ۳۶۹/۰۹۶ و ۲۳۸/۸۵۹ میلیون متر مکعب در سال است. کل تقاضای آب بخش کشاورزی حوزه آبریز هیرومند ۱۰۰۶/۲۲۴ میلیون متر مکعب در سال است. مقدار آب تأمین‌شده در بخش کشاورزی سیستان، زهک و میانکنگی به ترتیب ۲۷۰/۷۷۵، ۲۱۶/۵۱۶ و ۱۵۹/۸۵۹ میلیون متر مکعب و مقدار آب تأمین‌نشده ۱۷۰/۴۹۳، ۱۷۲/۵۸ و ۷۹ میلیون متر مکعب است. در وضعیت فعلی در مجموع ۴۲۲/۰۷۳ میلیون متر مکعب از تقاضای آب بخش کشاورزی در حوزه آبریز هیرومند

سناریوهای اجرا شده در این پژوهش به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱. سناریوهایی که براساس طرح‌ها و سیاست‌های در حال اجرا در منطقه طراحی می‌شوند؛ ۲. سناریوهایی که با تغییر اعداد در مدل ایجاد می‌شوند؛ ۳. سناریوهایی که با ترکیب سناریوها در مدل ایجاد می‌شوند. مهم‌ترین طرح‌های در حال اجرا در منطقه، طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری زراعی کشاورزی و خط دوم انتقال آب از مخزن چاه‌نیمه به شهرستان زاهدان است. سناریو اول پژوهش (SC1) وضعیت پایه و حال حاضر منطقه مورد ارزیابی است. سناریوهای دوم تا چهارم پژوهش مربوط به بخش کشاورزی است. در سناریو دوم (SC2)، اجرای طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری شبیه‌سازی می‌شود. طبق اسناد بالادستی ۴۰۰ میلیون متر مکعب آب از کل منابع آب در حوزه آبریز هیرومند به این طرح اختصاص می‌یابد. سناریو سوم (SC3) و سناریو چهارم (SC4) به ترتیب تأثیر ۴۵ و ۵۵ درصد افزایش بازده آبیاری در حوزه آبریز هیرومند ارزیابی می‌شود. در حال حاضر بازده آبیاری در حوزه آبریز هیرومند ۳۵ درصد است (Shahraki et al, 2019). افزایش بازده آبیاری جزء اهداف در حال اجرای جهاد کشاورزی در حوزه آبریز هیرومند است. در سناریو پنجم (SC5) تأثیر ۲۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب شرب در حوزه آبریز



شکل ۴- کل تقاضای آب شرب در حوزه آبریز هیرمند در وضعیت پایه تا سال ۱۴۱۴

جدول ۱- تقاضای آب شرب حوزه آبریز هیرمند (متر مکعب)

| بخش روستایی | هیرمند | هامون | نیمروز | زهک | زابل | زاهدان | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|---------|----------|------|
| ۱۲۳۹۲۳۰۰ | ۳۷۵۰۷۶ | ۳۴۶۹۱۹ | ۱۴۸۳۳۶ | ۷۶۳۹۸۹ | ۸۲۲۷۸۲۰ | ۳۶۷۰۱۰۰۰ | ۱۳۹۹ |
| ۱۲۵۲۲۴۰۰ | ۳۷۸۱۵۲ | ۳۴۹۷۶۴ | ۱۴۹۵۵۳ | ۷۷۰۲۵۴ | ۸۲۹۵۲۸۰ | ۳۷۸۰۹۹۰۰ | ۱۴۰۰ |
| ۱۲۶۵۳۹۰۰ | ۳۸۱۲۵۳ | ۳۵۲۶۳۲ | ۱۵۰۷۷۹ | ۷۷۶۵۷۰ | ۸۳۶۳۳۱۰ | ۳۸۹۵۱۸۰۰ | ۱۴۰۱ |
| ۱۲۷۸۶۷۰۰ | ۳۸۴۳۷۹ | ۳۵۵۵۲۳ | ۱۵۲۰۱۵ | ۷۸۲۹۳۸ | ۸۴۳۱۸۸۰ | ۴۰۱۲۸۱۰۰ | ۱۴۰۲ |
| ۱۲۹۲۱۰۰۰ | ۳۸۷۵۳۱ | ۳۵۸۴۳۹ | ۱۵۳۲۶۲ | ۷۸۹۳۵۸ | ۸۵۰۱۰۳۰ | ۴۱۳۴۰۰۰۰ | ۱۴۰۳ |
| ۱۳۰۵۶۷۰۰ | ۳۹۰۷۰۹ | ۳۶۱۳۷۸ | ۱۵۴۵۱۹ | ۷۹۵۸۳۰ | ۸۵۷۰۷۳۰ | ۴۲۵۸۸۵۰۰ | ۱۴۰۴ |
| ۱۳۱۹۳۸۰۰ | ۳۹۳۹۱۳ | ۳۶۴۳۴۱ | ۱۵۵۷۸۶ | ۸۰۲۳۵۶ | ۸۶۴۱۰۲۰ | ۴۳۸۷۴۶۰۰ | ۱۴۰۵ |
| ۱۳۳۳۲۳۰۰ | ۳۹۷۱۴۳ | ۳۶۷۳۲۹ | ۱۵۷۰۶۳ | ۸۰۸۹۳۵ | ۸۷۱۱۸۷۰ | ۴۵۱۹۹۷۰۰ | ۱۴۰۶ |
| ۱۳۴۷۲۳۰۰ | ۴۰۰۳۹۹ | ۳۷۰۳۴۱ | ۱۵۸۳۵۱ | ۸۱۵۵۶۹ | ۸۷۸۳۳۱۰ | ۴۶۵۶۴۷۰۰ | ۱۴۰۷ |
| ۱۳۶۱۳۸۰۰ | ۴۰۳۶۸۳ | ۳۷۳۳۷۸ | ۱۵۹۶۴۹ | ۸۲۲۲۵۶ | ۸۸۵۵۳۳۰ | ۴۷۹۷۰۹۰۰ | ۱۴۰۸ |
| ۱۳۷۵۶۷۰۰ | ۴۰۶۹۹۳ | ۳۷۶۴۳۹ | ۱۶۰۹۵۹ | ۸۲۸۹۹۹ | ۸۹۲۷۹۵۰ | ۴۹۴۱۹۷۰۰ | ۱۴۰۹ |
| ۱۳۹۰۱۱۰۰ | ۴۱۰۳۳۰ | ۳۷۹۵۲۶ | ۱۶۲۲۷۸ | ۸۳۵۷۹۷ | ۹۰۰۱۱۵۰ | ۵۰۹۱۲۱۰۰ | ۱۴۱۰ |
| ۱۴۰۴۷۱۰۰ | ۴۱۳۶۹۵ | ۳۸۲۶۳۸ | ۱۶۳۶۰۹ | ۸۴۲۶۵۰ | ۹۰۷۴۹۶۰ | ۵۲۴۴۹۷۰۰ | ۱۴۱۱ |
| ۱۴۱۹۴۶۰۰ | ۴۱۷۰۸۷ | ۳۸۵۷۷۶ | ۱۶۴۹۵۱ | ۸۴۹۵۶۰ | ۹۱۴۹۳۸۰ | ۵۴۰۳۳۷۰۰ | ۱۴۱۲ |
| ۱۴۳۴۳۶۰۰ | ۴۲۰۵۰۷ | ۳۸۸۹۳۹ | ۱۶۶۳۰۳ | ۸۵۶۵۲۶ | ۹۲۲۴۴۰۰ | ۵۵۶۶۵۵۰۰ | ۱۴۱۳ |
| ۱۴۴۹۴۳۰۰ | ۴۲۳۹۵۵ | ۳۹۲۱۲۹ | ۱۶۷۶۶۷ | ۸۶۳۵۵۰ | ۹۳۰۰۰۴۰ | ۵۷۳۴۶۶۰۰ | ۱۴۱۴ |

مطابقت دارد. آنان با استفاده از مدل WEAP عرضه و تقاضای آب بخش کشاورزی در حوزه آبریز هیرمند را محاسبه کردند.

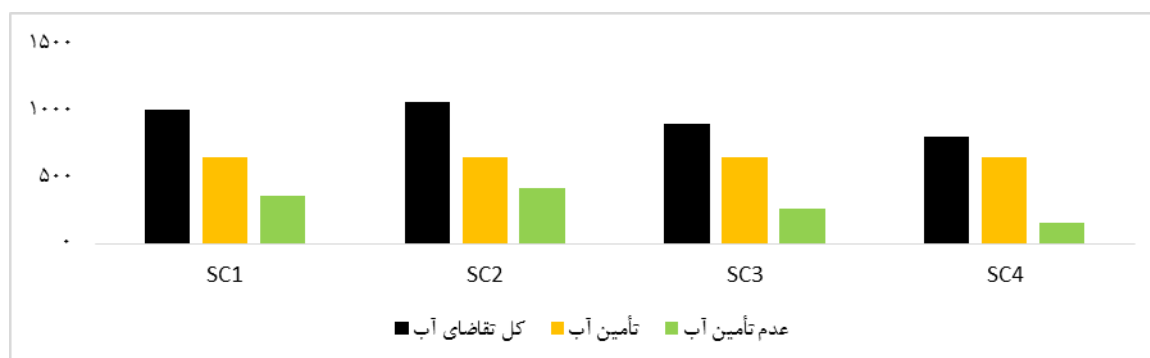
۱-۲. بخش شرب

به دلیل رشد جمعیت، هرساله بر تقاضای آب شرب افزوده می‌شود. این افزایش با توجه به نرخ رشد جمعیت و نرخ مصرف آب به‌ازای هر نفر در هر منطقه

تأمین نمی‌شود و ۶۴۷/۱۵۰ میلیون متر مکعب تأمین می‌شود. چالش اصلی بخش کشاورزی در حوزه آبریز هیرمند این است که رودخانه هیرمند به‌عنوان منبع تأمین‌کننده آب اغلب به دلایل طبیعی یا انسانی، نمی‌تواند این ضروری‌ترین منبع حیات را برای بخش کشاورزی حوزه آبریز هیرمند تأمین کند. نتایج این بخش با یافته‌های Shahraki و همکاران (2019)



شکل ۵- کل تقاضای آب بخش محیط زیست در وضعیت پایه تا سال ۱۴۱۴



شکل ۶- اجرای سناریوهای مختلف در بخش کشاورزی

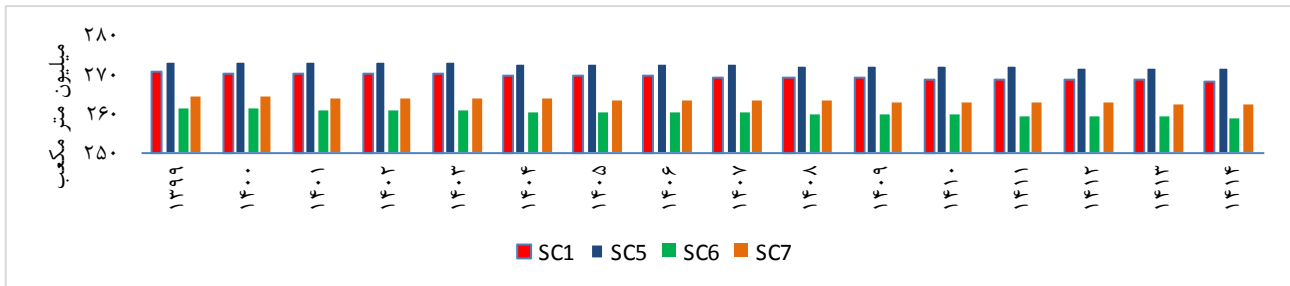
شود. ظرفیت خط انتقال آب به شهرستان زاهدان سالانه ۲۶ میلیون متر مکعب است. بنابراین تقاضای آب شهرستان زاهدان به صورت کامل تأمین نمی‌شود. برای رفع این مشکل خط دوم انتقال آب به شهرستان زاهدان در حال اجراست. در سال ۱۴۱۴ تقاضای آب در زاهدان ۵۷/۳۴۶ میلیون متر مکعب، در زابل ۹۳ میلیون متر مکعب، در زهک ۰/۸۶۳ میلیون متر مکعب، در نیمروز ۰/۱۶۷ میلیون متر مکعب، در هامون ۰/۳۹۲ میلیون متر مکعب، در هیرمند ۰/۴۲۳ میلیون متر مکعب و در بخش روستایی ۱۴۴/۹۴۳ میلیون متر مکعب است.

۳-۱-۳. بخش محیط زیست

کل تقاضای آب در بخش محیط زیست ۳۵۸/۵ میلیون متر مکعب در سال است (Shahraki et al., 2019). براساس نتایج شبیه‌سازی، سالانه ۱۳۵/۳۱۷ میلیون متر مکعب از کل تقاضای آب بخش محیط زیست تأمین می‌شود و ۲۲۳/۱۸۲ میلیون متر مکعب

متغیر است. در شکل ۴ تقاضای آب شرب حوزه آبریز هیرمند تا افق ۱۴۱۴ ارائه شده است. در وضعیت فعلی کل تقاضای آب شرب در حوزه آبریز هیرمند ۴۹/۴۶۵ میلیون متر مکعب در سال است. در صورت ادامه وضعیت فعلی تا سال ۱۴۱۴، کل تقاضای آب شرب در این منطقه به ۵۲/۸۸۵ میلیون متر مکعب می‌رسد. تقاضای آب به دلیل رشد جمعیت روند رو به رشدی دارد.

در جدول ۱، نتایج شبیه‌سازی تقاضای آب شرب شهرها و بخش روستایی که توسط منابع آب حوزه آبریز هیرمند تأمین می‌شود در وضعیت فعلی تا سال ۱۴۱۴ ارائه شده است. تقاضای آب برای شهرستان‌های زاهدان، زهک، زابل، نیمروز، هیرمند، هامون و بخش روستایی به ترتیب ۰/۷۶، ۳۶/۷۰۱، ۰/۳۷۷، ۰/۱۴۹، ۸/۲۷۳، ۰/۳۴۸ و ۱۲/۴۶۰ میلیون متر مکعب محاسبه شد. نیاز آبی شهرستان زاهدان از طریق خط انتقال آب از مخازن چاه‌نیمه تأمین می‌



شکل ۷- تأثیر سناریوهای مختلف بر تأمین آب بخش کشاورزی

هیرمند که در خارج از طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری قرار دارند با کمبود آب مواجه خواهند شد. کل کمبود آب با اجرای طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری در حوزه آبریز هیرمند ۴۱۵/۹۳ میلیون متر مکعب است که نسبت به وضعیت پایه ۵۶/۸۵۷ میلیون متر مکعب کمبود آب کاهش می‌یابد. بنابراین اجرای طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری از یک سو سبب تأمین ۴۰۰ میلیون متر مکعب آب برای اراضی کشاورزی موجود در این طرح می‌شود و کمبود آب کشاورزی در حوزه آبریز هیرمند را کاهش می‌دهد و از سوی دیگر افزایش تقاضای آب کشاورزی در منطقه و کمبود آب اراضی کشاورزی خارج از طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری در حوزه آبریز هیرمند را در پی دارد. طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری زمانی مفید خواهد بود که برنامه مدونی برای تأمین آب یا الگوی کشت اراضی کشاورزی خارج از طرح وجود داشته باشد.

۳-۳. سناریو افزایش بازده آبیاری (SC3) و

(SC4)

در حال حاضر بازده آبیاری در بخش کشاورزی حوزه آبریز هیرمند ۳۵ درصد است. در این سناریو هدف بررسی تأثیر افزایش بازده آبیاری مثل به‌کارگیری شیوه‌های نوین آبیاری بر تأمین آب در بخش کشاورزی است. در این زمینه، تأثیر افزایش بازده آبیاری به میزان ۴۵ و ۵۵ درصد شبیه‌سازی و در شکل ۶ ارائه شده است. با افزایش بازده آبیاری به

تأمین نمی‌شود. در حال حاضر با تأمین نشدن بخش بزرگی از نیاز آبی بخش محیط زیست در حوزه آبریز هیرمند، اکوسیستم طبیعی منطقه به خطر افتاده که انتشار گردوغبار در حوزه آبریز هیرمند را در پی داشته است. یکی از دلایل تأمین نشدن آب بخش محیط زیست در حوزه آبریز هیرمند، پروتکل میان ایران و افغانستان است. براساس این پروتکل، سالانه حدود ۸۲۰ میلیون متر مکعب آب تحویل ایران می‌شود. با توجه به نیاز بخش‌های شرب و کشاورزی، نیاز بخش محیط زیست تأمین نمی‌شود. دلیل این موضوع آن است که تأمین آب بخش محیط زیست نسبت به بخش‌های شرب و کشاورزی اولویت کمتری دارد. تأمین نشدن نیاز آبی بخش محیط زیست سبب خشکی تالاب هامون و ایجاد پدیده گردوغبار و ریزگرد در منطقه شده است.

۳-۲. سناریو طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری (SC2)

در شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری (SC2) ارائه شده است. اجرای سناریو طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری (SC2) در حوزه آبریز هیرمند موجب افزایش ۵۷/۳۷۶ میلیون متر مکعبی تقاضای آب در بخش کشاورزی در سال نسبت به وضعیت پایه می‌شود. با توجه به تأمین کامل آب برای طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری، کمبود آب بخش محیط زیست تشدید می‌شود و دیگر اراضی کشاورزی حوزه آبریز

الگوی مصرف آب شرب بر میزان تأمین آب بخش محیط زیست مؤثر است و سبب افزایش تأمین آب بخش محیط زیست به اندازه ۲ میلیون متر مکعب در سال می‌شود (شکل ۸). با توجه به اینکه اولویت تخصیص آب در حوزه آبریز هیرمند، بخش شرب است، با کاهش مصرف آب در بخش شرب، کمبود آب در بخش کشاورزی و محیط زیست کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که سیستم منابع آب حوزه آبریز هیرمند، سیستمی به هم پیوسته با تأثیرات متقابل است. یکی از راهکارهای مؤثر (هرچند اندک) در نجات بخش محیط زیست در حوزه آبریز هیرمند صرفه‌جویی در مصرف آب شرب است. Tidwell و همکاران (2004) نشان دادند که صرفه‌جویی در مصرف آب از راهکارهای مؤثر در مدیریت تأمین آب در سیستم‌های به هم پیوسته منابع آب است.

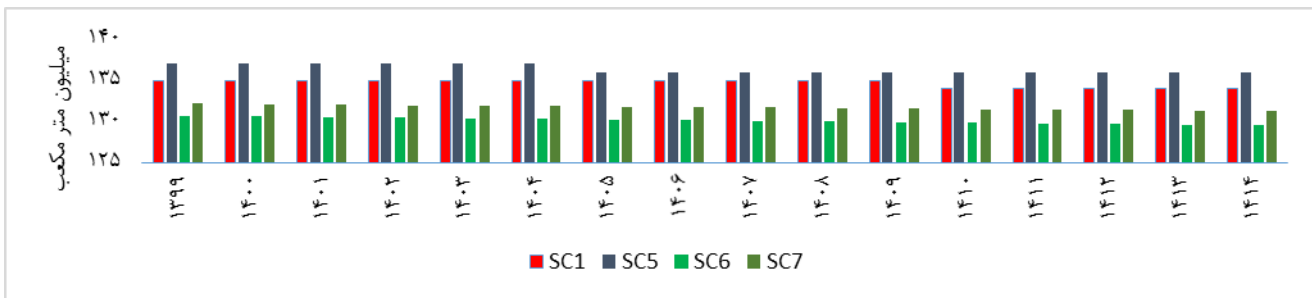
۳-۵. سناریو خط دوم انتقال آب به زاهدان (SC6)

طرح خط دوم انتقال آب به شهرستان زاهدان، یکی از طرح‌های در حال اجرا در حوزه آبریز هیرمند به منظور تأمین کامل نیاز آبی شهرستان زاهدان است. در شکل‌های ۷ و ۸، اثر اجرای این طرح تحت سناریو SC6 شبیه‌سازی شده است. اجرای خط دوم انتقال آب به شهرستان زاهدان موجب تشدید کمبود آب در بخش کشاورزی و محیط زیست می‌شود. با اعمال سناریو SC6 تأمین آب بخش کشاورزی در حوزه آبریز هیرمند به اندازه ۹/۳۲۴ میلیون متر مکعب در سال کاهش می‌یابد. اجرای سناریو SC6 سبب افزایش کمبود آب در بخش محیط زیست نیز می‌شود. به طوری که تأمین آب بخش محیط زیست پس از اعمال سناریو SC6 سالانه حدود ۶ میلیون متر مکعب کاهش می‌یابد. بنابراین اجرای خط دوم

میزان ۴۵ و ۵۵ درصد، تقاضای آب در بخش کشاورزی حوزه آبریز هیرمند نسبت به وضعیت پایه کاهش می‌یابد. افزایش بازده آبیاری به میزان ۴۵ درصد سبب کاهش تقاضای آب به اندازه ۱۰۰/۶۲۳ میلیون متر مکعب می‌شود. با افزایش ۵۵ درصدی بازده آبیاری، تقاضای آب ۲۰۱/۲۴۵ میلیون متر مکعب کاهش می‌یابد. تأمین نشدن آب در بخش کشاورزی حوزه آبریز هیرمند از ۳۵۹/۰۷۳ میلیون متر مکعب در وضعیت پایه SC1، به ۲۵۸/۴۵۱ میلیون متر مکعب در سناریو SC3 و ۱۵۷/۸۲۹ میلیون متر مکعب در سناریو SC4 کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش بازده آبیاری، موجب کاهش تأمین نشدن آب محصولات کشاورزی در حوزه آبریز هیرمند می‌شود. با توجه به محدودیت منابع آب در حوزه آبریز هیرمند، در کنار افزایش بازده آبیاری با الگوی کشت بهینه می‌توان مصرف آب کشاورزی را مدیریت کرد و تأمین نشدن آب در بخش کشاورزی را به حداقل رساند. افزایش بازده آبیاری تأثیری بر تأمین شدن یا تأمین نشدن آب بخش محیط زیست ندارد.

۳-۴. سناریو صرفه‌جویی در مصرف آب (SC5)

در شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی تأثیر ۲۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب شرب (SC5) بر تأمین آب در بخش کشاورزی و محیط زیست ارائه شده است. با اصلاح الگوی مصرف آب در بخش شرب، تقاضای آب شرب کاهش و تأمین آب در بخش کشاورزی سالانه ۳/۲۱۵ میلیون متر مکعب افزایش می‌یابد که البته درصد ناچیزی از کل مصرف آب در بخش کشاورزی (حدود ۱ درصد) است. ولی چون قیمت تمام‌شده هر متر مکعب آب شرب زیاد است، سبب صرفه‌جویی در هزینه‌های شرکت آب منطقه‌ای می‌شود. اصلاح



شکل ۸- تأثیر سناریوهای مختلف بر تأمین آب بخش محیط زیست

متر مکعب کاهش می‌یابد. مقایسه سناریوهای SC7 و SC6 نشان می‌دهد که پس از اجرای طرح انتقال آب به زاهدان، اصلاح الگوی مصرف آب در بخش شرب با هدف کاهش کمبود آب در بخش کشاورزی و محیط زیست ضرورت دارد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر، مدل‌سازی سیستم منابع آب حوزه آبریز هیرمند به‌منظور مدیریت تأمین آب بخش کشاورزی و محیط زیست بوده است. در این زمینه ابتدا سیستم منابع آب حوزه آبریز هیرمند در محیط نرم‌افزار ونسیم مدل‌سازی شد. سپس طرح‌های در حال اجرا و سناریوهای مختلف مدیریتی در منطقه شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که تقاضای آب بخش کشاورزی و بخش محیط زیست در حوزه آبریز هیرمند سالانه به‌ترتیب ۱۰۰۶ و ۳۵۸/۵۰۰ میلیون متر مکعب است که بخش بزرگی از آن تأمین نمی‌شود. پژوهش‌های دیگر در حوزه آبریز هیرمند گویای همین واقعیت است که حوزه آبریز هیرمند با محدودیت شدید منابع آب روبه‌رو است و منابع آب موجود پاسخگوی آب مورد نیاز بخش کشاورزی و محیط زیست این منطقه نیست (Hekmatnia et al., 2021; Shahraki et al., 2018; Shahraki et al., 2019). در صورت تأمین نشدن نیاز آبی بخش محیط زیست، مشکل خشکی

انتقال آب از مخازن چاه‌نیمه به شهرستان زاهدان، اگرچه کمبود آب در شهرستان زاهدان را کاهش می‌دهد، سبب کاهش آب تأمین‌شده در بخش کشاورزی و محیط زیست می‌شود. Qin و همکاران (2019) نشان دادند که خط انتقال آب از جنوب به شمال چین کمبود آب در شمال را برطرف کرده، اما سبب فشار بر منابع آب در جنوب شده است.

۳-۶. ترکیب سناریوهای SC5 و SC6 (SC7)

در سناریو SC7 اعمال همزمان طرح انتقال آب به زاهدان و اصلاح الگوی مصرف آب شبیه‌سازی شد. در شکل‌های ۷ و ۸، نتایج اعمال این سناریو نشان داده شده است. سناریو SC7 تأمین آب در بخش کشاورزی را نسبت به سناریو SC6 به‌طور متوسط ۳/۲۱۵ میلیون متر مکعب در سال افزایش می‌دهد. بنابراین پس از اجرای طرح خط دوم انتقال آب به زاهدان، ۲۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب در بخش شرب برای افزایش تأمین آب در بخش کشاورزی راهکار مفیدی است. با اعمال سناریو SC7 تأمین آب در بخش کشاورزی سیستم نسبت به سناریو SC5 و وضعیت پایه کاهش می‌یابد. سناریو SC7 کمبود آب در بخش کشاورزی سیستم را نسبت به وضعیت پایه ۶/۱۰۸ میلیون متر مکعب در سال افزایش می‌دهد. در سناریو SC7 نیز آب تأمین‌شده برای بخش محیط زیست ۲/۷۵۹ میلیون

حوزه آبریز هیرمند و خط دوم انتقال آب به زاهدان را بررسی نکرده‌اند. در این پژوهش اولین بار آثار اجرای این طرح‌ها شبیه‌سازی شد. با اجرای طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری کشاورزی، با اینکه ۴۰۰ میلیون متر مکعب آب به ۴۶۰۰۰ هکتار اراضی کشاورزی تعلق می‌گیرد، بخش محیط زیست و حدود ۱۰۸ هزار هکتار اراضی کشاورزی خارج از طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری با تشدید کمبود آب مواجه می‌شوند. اجرای خط دوم انتقال آب به زاهدان، موجب تشدید کمبود آب در بخش کشاورزی و کم‌آبی تالاب هامون و بخش محیط زیست می‌شود. یکی از راهکارهای عملی، صرفه‌جویی در مصرف آب شرب برای افزایش هرچند ناچیز سهم آب بخش کشاورزی و محیط زیست است که با یافته‌های بسیاری از پژوهشگران مطابقت دارد (Abadi et al., 2015; Kpushali et al., 2015). افزایش بازده آبیاری سبب افزایش تأمین آب در بخش کشاورزی و محیط زیست شده است. Shahraki و همکاران (2018) نشان دادند که مؤثرترین راه افزایش تأمین آب در بخش کشاورزی سیستان، افزایش بازده آبیاری تا ۷۵ درصد است که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. بنابراین افزایش بازده آبیاری برای جلوگیری از اتلاف منابع آب در حوزه آبریز هیرمند ضروری است. بر این اساس توسعه سیستم‌های آبیاری و زهکشی مناسب کانال‌های آبیاری پیشنهاد می‌شود.

تالاب هامون و گسترش ریزگردها ادامه می‌یابد. برای افزایش تأمین آب بخش محیط زیست، کاهش تقاضای آب بخش کشاورزی از طریق کاهش سطح زیر کشت کل محصولات، به‌خصوص محصولات نیازمند آب زیاد پیشنهاد می‌شود. Bozorg-Haddad و همکاران (2020) نشان دادند که کاهش سطح زیر کشت محصولات کشاورزی در حوزه دریچه ارومیه سبب به تعادل رسیدن تراز آب این رودخانه می‌شود. یعنی واردات محصولات کشاورزی (واردات آب مجازی) به‌جای تولید در حوزه آبریز هیرمند برای تأمین مواد غذایی و کاهش فشار بر منابع آب محدود منطقه، راهکاری عملی برای صرفه‌جویی در آب کشاورزی و به تعادل رساندن تأمین آب در بخش محیط زیست است. Hekmatnia و همکاران (2020) نشان دادند که واردات آب مجازی سبب صرفه‌جویی در منابع ملی آب می‌شود. ادامه سیاست کنونی تخصیص آب، سبب مخاطرات زیست‌محیطی و گسترش معضل ریزگردها در حوزه آبریز هیرمند می‌شود که پیامدهای اجتماعی و زیست‌محیطی مختلفی دارد. بنابراین برای حفظ محیط زیست در حوزه آبریز هیرمند، تغییر در سیاست فعلی تخصیص آب و اعمال اولویت یکسان تخصیص آب بین بخش کشاورزی و بخش محیط زیست پیشنهاد می‌شود. محققان تا کنون طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری کشاورزی

References

- Abadi, L. S. K., Shamsai, A., Goharnejad, H., 2015. An analysis of the sustainability of basin water resources using Vensim model. *KSCE Journal of civil engineering*, 19(6), 1941-1949.
- Alifujiang, Y., Abuduwaili, J., Ma, L., Samat, A., Groll, M., 2017. System Dynamics Modeling of Water Level Variations of Lake Issyk-Kul,

Kyrgyzstan. *Water* 9(12), 989.

- Barhagh, S., Zarghami, M., Alizade Govarchin Ghale, Y., Shahbazbegian, M., 2020. Investigating the Impacts of Restoration Scenarios for Urmia Lake Using Predator-Prey System Dynamics Model. *Iran-Water Resources Research* 16(2), 1-17. (In Persian).

- Bazzi, H., Ebrahimi, H., Aminnejad, B., 2020. A comprehensive statistical analysis of evaporation rates under climate change in Southern Iran using WEAP (Case study: Chahnimeh Reservoirs of Sistan Plain). *Ain Shams Engineering Journal*.
- Bozorg Haddad, O., Dehghan, P., Zareie, S., Loáiciga, H.A., 2020. System dynamics applied to water management in lakes. *Irrigation and Drainage* 69(4), 956-966.
- Forrester, J. W., 1968. Industrial dynamics-after the first decade. *Management Science*, 14(7), 398-415.
- Hekmatnia, M., Hosseini, S., Safdari, M., 2020. Water Resource Management of the Agricultural Sector in Sistan and Baluchestan Province: a Virtual Water Perspective. *Irrigation and Water Engineering* 11(1), 137-149. (In Persian).
- Hekmatnia, M., Hosseini, S., Safdari, M., 2020. Water Use Assessment of Date in Sistan and Balouchestan Province Based on the Concept of Virtual Water. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 51(2), 513-524. (In Persian).
- Koushali, H.P., Moshtagh, R., Mastoori, R. 2015. Water resources modelling using system dynamic in Vensim. *J Water Resource Hydraulic Energy* 4(3), 251-256.
- Mahammad ghasemi, M., Dahmardeh, M., 2018. Water Resources Management of the Hirmand River Basin in Agricultural and Household Sectors. *Journal of Hydrosiences and Environment* 2(4), 51-56. (In Persian).
- Pereira, R. M., Haie, N., Machado, G.J., 2012. Vensim PLE to create models for water management. *World* 3, 4.
- Qin, H., Zheng, C., He, X., Refsgaard, J.C., 2019. Analysis of Water Management Scenarios Using Coupled Hydrological and System Dynamics Modeling. *Water Resources Management* 33(14), 4849-4863.
- Sabbaghi, M., Shahnazary. A., Naghi Ziaei, A., 2017. Simulation and operation evaluation of Shahid Yaghoobi dam by using system dynamic (Case study: dam shahid yaghoobi). *Journal of Watershed Management Research* 8(16), 188-199. (In Persian).
- Sardar Shahraki, A., Shahraki, J., Hashemi Monfared A., 2018. An integrated Fuzzy multi-criteria decision-making method combined with the WEAP model for prioritizing agricultural development, case study: Hirmand Catchment. *Ecopersia* 6(4), 205-214.
- Shahraki, A.S., Shahraki, J., Monfared, S.A.H., 2019. An Integrated Water Resources Management Considering Agricultural Demands and the Assessment of Different Scenarios in Hirmand Catchment, Iran. *Water Resources*, 46(2), 308-317.
- Sharifikia, M., 2013. Environmental challenges and drought hazard assessment of Hamoun Desert Lake in Hirmand catchment, Iran, based on the time series of satellite imagery. *Natural Hazards* 65(1), 201-217.
- Tidwell, V.C., Passell, H.D., Conrad, S.H., Thomas, R.P., 2004. System dynamics modeling for community-based water planning: Application to the Middle Rio Grande. *Aquatic Sciences* 66(4), 357-372.
- Xi, X., Poh, K.L., 2013. Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore. *Procedia Computer Science* 16, 157-166.