تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۳ | خرداد ۱۴۰۱ (ص ۵۴۱-۵۲۷)

DOI:https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.338863.669205

(مقاله علمی - پژوهشی)

Investigating the Impacts of Restoration Scenarios for Mashhad Aquifer Using Systems Dynamic Approach

HAMED MAZANDARANI ZADEH[1*], SAKINE KOOHI[1]

1. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

(Received: Feb. 9, 2022- Revised: Apr. 3, 2022- Accepted: Apr. 13, 2022)

ABSTRACT

The declining trend of groundwater reserves due to the high importance of these resources for water supply has become a major challenge, especially in arid and semi-arid regions such as many plains of Iran. On the other hand, establishing an urban wastewater project will directly impact the aquifer of the plain and intensify the process of reducing these reserves. This study investigates the effect of revival strategies in the framework of sustainable development principles on improving the aquifer reserves under five different scenarios. The Mashhad aquifer was picked as a case study. Simulation of the aquifer was performed using the system dynamics approach and Vensim PLE model during 1362-1420. Sensitivity analysis and calibration of the model were done during the period of 1362 to 1392, and the model was simulated until 1420 for evaluatation of different scenarios. Sensitivity analysis results demonstrated that aquifer volume has the highest sensitivity to the return coefficient of drinking and agricultural sectors. Increasing the pervious surfaces in urban architecture has improved about 16 and 19 percent in the aquifer recharging compared to scenarios 2 and 3. Generally, using methods such as changing agricultural methods, increasing water productivity, and improving urban architecture with a focus on increasing permeable levels, it can reduce the aquifer shortage between 22.0 % to 58.5%, compared to scenario 2. While not paying attention to the proposed methods led to a negative balance, and the aquifer will be in a critical and irreparable situation.

Keywords: Aquifer, Wastewater Network, Sustainable Development, Dynamic System, Groundwater Resources.

[*]Corresponding Author's Email: mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir

تحلیل اثربخشی سناریوهای احیای آبخوان مشهد با استفاده از مدلسازی پویایی سیستم‌ها

حامد مازندرانی‌زاده[1*]، سکینه کوهی[1]

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱/۱۴- تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۱/۲۴)

چکیده

روند نزولی حجم ذخایر آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک، همچون بسیاری از دشت‌های ایران، تبدیل به چالشی بزرگ شده است. از سوی دیگر ایجاد و توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری باعث کاهش جریان ورودی به آبخوان‌ها و در نتیجه تشدید روند کاهش این ذخایر شده است. هدف از انجام این مطالعه بررسی میزان تاثیر راهکارهایی در چارچوب اصول توسعه پایدار بر بهبود روند کاهش ذخیره آبخوان تحت ۵ سناریوی مختلف با استفاده از پویایی سیستم است. آبخوان دشت مشهد به عنوان مطالعه موردی در این پژوهش انتخاب شده است. شبیه‌سازی آبخوان با استفاده از رویکرد پویایی سیستم و نرم‌افزار Vensim PLE طی دوره آماری ۱۳۶۰-۱۴۲۰ انجام گرفته است. لازم بذکر است که تحلیل حساسیت و واسنجی مدل با توجه به داده‌های مشاهداتی حجم آبخوان برای دوره زمانی ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۲ و بررسی تاثیر سناریوهای مختلف بر حجم آبخوان تا سال ۱۴۲۰ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل حساسیت مدل در این مطالعه حاکی از آن است که تغییرات حجم آبخوان دارای بیشترین حساسیت نسبت به ضریب جریان بازگشتی در بخش‌های شرب و کشاورزی می‌باشد. نتایج نشان داد که با افزایش سطوح نفوذپذیر در معماری شهری نسبت به سناریوهای ۲ و ۳، منجر به بهبود حدود ۱۶ و ۱۹ درصدی وضعیت تغذیه آبخوان شده است. بطور کلی با استفاده از روش‌هایی همچون تغییر شیوه کشاورزی، افزایش بهره‌وری آب و همچنین اصلاح معماری شهری با تمرکز بر افزایش سطوح نفوذپذیر می‌توان بین ۲۲/۰ تا ۵۸ درصد از کسری مخزن ناشی از جمع‌آوری فاضلاب شهری (نسبت به سناریوی دوم) را کاهش داد. درحالی‌که با ادامه وضعیت فعلی، بیلان منفی آبخوان ادامه یافته و می‌تواند منجر به مرگ آبخوان و بروز آسیب‌های جبران‌ناپذیر اقتصادی و اجتماعی شود.

واژه‌های کلیدی: شبکه فاضلاب، توسعه پایدار، منابع آب زیرزمینی، تعادل بخشی

مقدمه

افزایش جمعیت به همراه گسترش شهرنشینی، تغییر الگوی مصرف، افزایش فعالیت‌های رفاهی، گردشگری، کشاورزی و صنایع منجر به افزایش تقاضای آب در دهه‌های اخیر شده است. از آنجا که از الزامات توسعه پایدار در هر کشوری وجود منابع آب است، تغییرات و بی‌نظمی‌ها در رخداد وقایع اقلیمی در سراسر جهان، منابع آب بسیاری از کشورها را با محدودیت جدی مواجه ساخته و در نتیجه ممکن است منجر به کندی روند توسعه پایدار شود (Delanka-Pedige *et al.*, 2021). از آنجایی که منابع آب زیرزمینی حدود ۹۷ درصد از آب‌های شیرین در سراسر کره زمین را تشکیل می‌دهد، هرگونه نگرانی در رابطه با منابع آب به همان اندازه نیز مربوط به منابع آب زیرزمینی است (Guppy *et al.*, 2018). در سال ۲۰۱۵ پیمان دستیابی به توسعه پایدار اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی توسط رهبران دنیا در اجلاس ریو+۲۰ تصویب شد. سند مذکور شامل ۱۷ آرمان توسعه پایدار (SDGs[1])، ۱۶۹ هدف خرد و شاخص‌هایی برای ارزیابی میزان پیشرفت در زمینه توسعه پایدار است که جایگزین اهداف توسعه هزاره (MDGs[2]) پس از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۳۰ شده است (United Nations, 2015). آرمان ششم از اهداف توسعه پایدار، به طور اختصاصی به مساله آب به عنوان یکی از عناصر اصلی توسعه پایدار مرتبط است و عبارت است از: "ایجاد دسترسی و مدیریت پایدار آب و بهداشت برای همگان". در همین راستا افزایش میزان بازیافت و استفاده مجدد و ایمن فاضلاب (SDG 6.3)، همچنین افزایش نسبت بهره‌وری مصرف آب (SDG 6.4) از جمله اهدافِ خرد تعیین شده در سندِ توسعه پایدار برای رسیدن به SDG 6 است. SDG 6.3 قطعا بیانگر ارتباط بین مدیریت فاضلاب و آب سالم است، بطوری‌که در صورت فقدان سیستم جمع‌آوری و تصفیه مناسب برای فاضلاب، تامین آب سالم امکان‌پذیر نخواهد

* نویسنده مسئول: mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir

۱ Sustainable Development Goals

۲ Millennium Development Goals

بود. علی‌الرغم توجه بیشتر کشورهای در حال توسعه به تامین آب سالم و بهداشتی، متاسفانه توجه چندانی به تاثیرات منفی فاضلاب و آلودگی‌های ناشی از آن و تاثیراتش بر سلامت انسان و محیط زیست و اهمیت طرح‌های جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب نشده است (Tortajada, 2020). از سوی دیگر فاضلاب شهری یکی از منابع تاثیرگذار بر بیلان آبخوان‌ها و منابع زیرزمینی است. از جمله تحقیقات صورت گرفته در زمینه تاثیر شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری بر تراز آبخوان و همچنین مدل‌سازی آبخوان‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

بررسی سطح تراز آب زیرمینی در دشت کرمان و محدوده شهر کرمان نشان داد که این دو از روند معکوسی برخوردار هستند، بطوری‌که دشت کرمان با افت سالانه در سطح آب زیرزمینی روبرو است، درحالیکه سطح آب در محدوده شهر افزایش یافته است. دلیل این موضوع نبود شبکه جمع‌آوری فاضلاب در محدوده شهر است. همچنین پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در اثر توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب در شهر کرمان با استفاده از مدل GMS نشان داد که پس از اجرای سناریوی توسعه شبکه فاضلاب، سطح آب زیرزمینی با افت قابل توجهی روبرو می‌شود (Aghamolaie et al., 2018). همچنین Maleki et al. (2012) با بررسی اثر اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی دشت شاهرود با کاربرد مدل GMS به این نتیجه رسیدند که در دوره صحت‌سنجی، سطح آب پس از اجرای طرح فاضلاب در اکثر چاه‌های مشاهده‌ای در محدوده شهر با افت قابل توجهی روبرو است. درحالیکه در پیزومترهایی که دور از جریان عمومی شهر قرار گرفته‌اند، اختلاف سطح آب کم و بطور متوسط ۰/۰۴ متر است. Qashqaei et al. (2008) به بررسی مشکل بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در جنوب دشت تهران و دلایل ایجاد آن با استفاده از چرخه‌های علت-معلولی پرداخته و راهکارهایی برای حل این مساله ارائه دادند. Liu et al. (2008) با مدلسازی منابع آب زیرزمینی در پایین‌دست رودخانه زرد، به ارائه سیاست‌هایی در رابطه با مدیریت پایدار منابع آب پرداختند. Hi et al. (2010) تاثیر تغییرات آب و هوا بر سطح آب زیرزمینی در آبخوان ویکتوریا را با استفاده از مدل عددی MODFLOW مورد بررسی قرار دادند. Jafarzadeh et al. (2015) نیز در پژوهشی به بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت بیرجند تحت سه سناریوی عدم اجرای طرح فاضلاب، اجرای ۶۰ درصدی شبکه و اجرای طرح در ۱۰۰ درصد مناطق شهری پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که میزان افت در آبخوان طی ۶ سال مطالعاتی برای سناریوهای مورد بررسی به ترتیب معادل ۳/۵۷، ۵/۵ و ۶/۸ متر است. Monfared and Hoseini (2005) با استفاده از مدل عددی به بررسی پیامدهای کمی طرح جامع تامین آب شرب مشهد و پروژه احداث شبکه فاضلاب پرداخته و نشان دادند که در صورت اجرای شبکه فاضلاب، با توقف بهره‌برداری برخی از چاه‌های درون و پیرامون شهر می‌توان تاحدودی از افت شدید سطح آب زیرزمینی پیشگیری نمود. Mirzaei and Majidi (2013) با اثرسنجی اجرای شبکه‌های فاضلاب بر مدیریت منابع دشت تهران-کرج نشان دادند که اجرای شبکه فاضلاب با حذف یکی از مولفه‌های مهم تغذیه‌کننده آبخوان می‌تواند شرایط آبخوان را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. Aghakarami and Moridi (2014) نیز با بررسی اثر اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب بر سطح آبخوان تهران نسبت به زمان عدم اجرای طرح که تمام فاضلاب برگشتی از طریق چاه‌های جذبی وارد آبخوان می‌گردید با استفاده از مدل WEAP نشان دادند با اجرای طرح فاضلاب میزان پساب برگشتی به آبخوان در تمام ماه‌ها در دوره مورد بررسی کاهش داشته است و حذف این منبع تغذیه‌ای آبخوان منجر به افت تراز دشت می‌شود. Khorasani et al. (2020) با ارزیابی تاثیر کمی و کیفی احداث شبکه فاضلاب بر آبخوان در منطقه‌ای نیمه‌خشک نشان دادند که در صورت عدم توجه به جبران تغذیه آبخوان پس از احداث شبکه فاضلاب، علاوه بر کاهش کمیت منابع زیرزمینی به دلیل کوچک شدن ناحیه اشباع آبخوان کیفیت این منابع نیز به مرور کاهش خواهد یافت. بررسی مطالعات انجام شده بیانگر آن است که اجرای طرح‌های جمع‌آوری فاضلاب در اکثر موارد با کاهش تراز آبخوان همراه بوده است. بنابراین یکی از نگرانی‌های مهم در رابطه با اثرات آتی اجرای شبکه‌های جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب، تاثیر منفی آن‌ها بر آبخوان و منابع آب زیرزمینی است. درحالیکه به دلیل تاثیرات منفی فاضلاب بر کیفیت منابع آبِ موجود (ناشی از ورود حجم زیادی از نیترات به آبخوان)، محیط زیست و سلامت انسان، اجرای این طرح‌ها یکی از موارد مهم و حیاتی برای جلوگیری از کاهش کیفیت منابع زیرزمینی و در راستای رسیدن به توسعه پایدار است که در SDG نیز بدان اشاره شده است (United Nations, 2015). علاوه بر این همانطور که Khorasani et al. (2020) نشان دادند با احداث شبکه‌های فاضلاب تنها در صورت کاربرد راهکارهایی به منظور جبران افت تغذیه آبخوان می‌توان از کاهش کیفیت این منابع آبی جلوگیری نمود. در چنین شرایطی این سوال برای محققین قابل طرح است که آیا می‌توان با اتخاذ راهکارهایی در چارچوب اصول توسعه پایدار، به کاهش میزان تاثیرات منفی طرح‌های جمع‌آوری فاضلاب بر افت آبخوان کمک نمود؟ در این خصوص می‌توان به مواردی همچون مدیریت مصرف توسط تغییر شیوه کشاورزی از سنتی به مدرن به منظور مدیریت

میزان برداشت از منابع زیرزمینی، همچنین استفاده از رویکرد طراحی شهری حساس به آب به‌منظور افزایش سطوح نفوذپذیر در معماری شهری با هدف نگه‌داری و بازگشت مجدد منابع آب به جای انتقال سنتی رواناب‌های شهری به خارج از حوضه اشاره نمود.

از سوی دیگر از آنجاییکه رفتار پدیده‌هایی همچون تغییرات حجم آبخوان دارای جنبه‌های مختلفی می‌باشد بنابراین نیازمند بررسی یکپارچه است. از جمله راهکارها برای این منظور کاربرد پویایی سیستم و مدل‌های علت-معلولی است. در این زمینه Simonovic et al. (1997) با استفاده از پویایی سیستم به به ارزیابی بلندمدت برنامه‌ریزی منابع آب و بررسی سیاست‌های اتخاذی در مصر پرداختند. Yang et al. (2008) با کاربرد پویایی سیستم به تدوین استراتژی‌ای برای حل مشکلات کمبود آب در تایوان اقدام نمودند. Koohi and Mazandarani Zadeh (2021) با استفاده از مدل دینامیکی به ارزیابی تاثیر سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری پرداختند. Hashemi et al. (2020) به ارزیابی سیاست‌های مدیریتی بر منابع آب و اقتصاد دشت قزوین با استفاده از پویایی سیستم پرداختند. همچنین Luo et al. (2005) روش پویایی سیستم را روشی کارآمد برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب معرفی نمودند که منجر به افزایش سرعت توسعه مدلسازی و سهولت در بهبود مدل می‌شود. با توجه به اینکه نرم‌افزار پویایی سیستم Vensim PLE از جمله نرم‌افزارهای مورد تایید در پژوهش-های علمی (Zhou et al. 2022; Pereira et al. 2011; Marzouk et el. 2022; Pereira et al. 2012; Koohi and Mazandarani Zadeh, 2021; Hashemi et al. 2020) برای مدلسازی سیستم‌های پیچیده است. در این پژوهش از نرم‌افزار Vensim PLE برای بررسی میزان تاثیر راهکارهای مبتنی بر سیاست‌هاس توسعه پایدار بر بهبود وضعیت آبخوان استفاده شده است. علاوه بر این از آنجاییکه فرآیند واسنجی مدل مذکور یکی از گام‌های مهم در مدلسازی به شمار می‌رود تا در حد امکان از تحمیل عدم‌قطعیت زیاد بر نتایج جلوگیری شود. در تحقیق حاضر از روش احتمالاتی GLUE (Beven and Binley, 1992) که تلفیقی از روش مونت-کارلو با تئوری بیز است و دارای ساختاری قوی در شناسایی پارامترهای بهینه می‌باشد، برای انجام فرآیند واسنجی استفاده شده است.

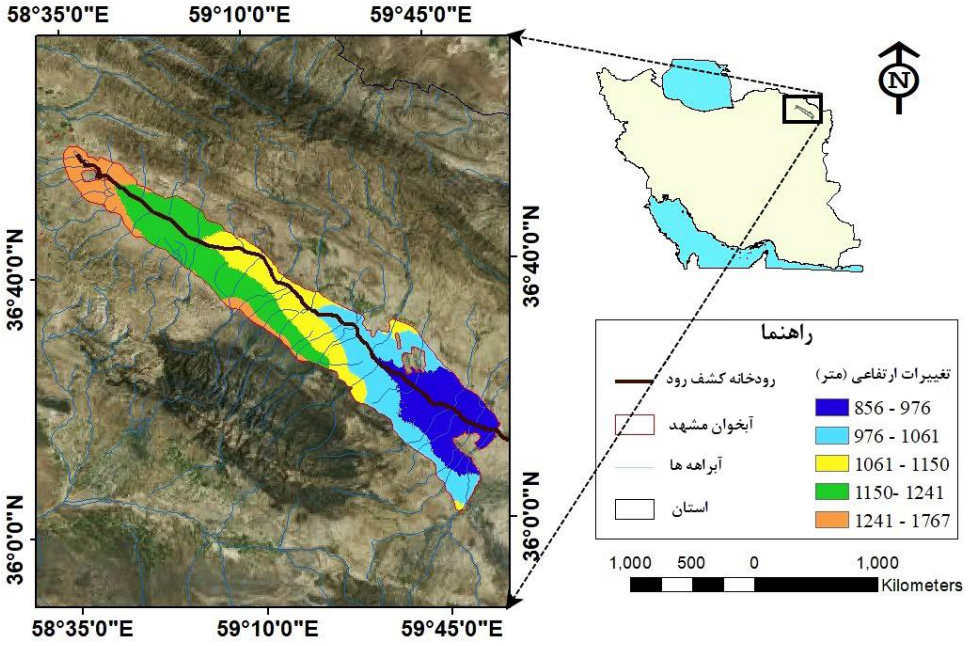
لذا با توجه به توضیحات فوق، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تاثیر سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری موجود در دشت مشهد بر روی تغییرات حجم آبخوان با کاربرد روش پویایی سیستم صورت پذیرفته است. همچنین بررسی میزان تاثیر اتخاذ راهکارهایی همچون تغییر شیوه کشاورزی از سنتی به مدرن و تغییر معماری شهری بمنظور افزایش سطوح نفوذپذیر بر تغییرات حجم آبخوان، از دیگر اهداف این تحقیق بشمار می‌رود. پاسخ به این سوال می‌تواند بمنظور اتخاذ سیاست‌هایی در راستای کاهش تاثیرات نامطلوب ناشی از احداث شبکه فاضلاب بر آبخوان و پیشگیری از افت شدید تراز آبخوان در آینده بسیار مفید و کاربردی باشد. به ویژه برای آبخوان‌هایی همچون دشت مشهد که به دلیل بیلان منفی، ممکن است در آینده‌ای نه چندان دور با بحران و مشکلاتی جدی‌تر مواجه شوند، در حالیکه در تحقیقات گذشته توجه چندانی به بررسی میزان بهبود تراز آبخوان‌ها براساس سیاست‌های مبتنی بر توسعه پایدار نشده است، همچنین در کمتر تحقیقی به پیش‌بینی بلندمدت از این مساله پرداخته شده است. بنابراین نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان گامی مهم در اعمال مدیریت پایدار بویژه در مناطق خشک و نیمه خشک که از شبکه جمع‌آوری فاضلاب برخوردار می‌باشند برای احیا و یا بهبود شرایط آبخوان‌ها مورد استفاده قرار گیرد. بطور کلی در این پژوهش ۵ سناریو براساس رویکرد پویایی سیستم و با بکارگیری نرم‌افزار پویایی Vensim PLE مورد بررسی قرار گرفت، که در ادامه به جزییات سناریوهای مطالعاتی و نحوه بکارگیری روش واسنجی GLUE اشاره شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در سال‌های اخیر روند افزایش جمعیت و برداشت از منابع زیرزمینی دشت مشهد منجر به ایجاد بیلان منفی در این دشت شده است که با ادامه این روند، مرگ دشت مشهد در پیش‌رو دور از انتظار نمی‌باشد. با توجه به اینکه مرگ دشت مشهد بر اثر اتمام ذخایر زیرزمینی نه تنها فاجعه اقتصادی بلکه یک فاجعه اجتماعی را نیز در پی خواهد داشت (Regional Water Company of Khorasan Razavi, 2010)، در این پژوهش، آبخوان مشهد به عنوان منطقه مورد انتخاب شده است. این آبخوان در موقعیت جغرافیایی ۳۶ تا ۳۷ درجه شمالی و ۵۸ تا ۶۰ درجه شرقی و در شمال شرقی استان خراسان رضوی واقع شده است. مساحت دشت مشهد در حدود ۲۵۲۰ کیلومتر مربع است. دشت مشهد با دو رشته کوه موازی با جهت شمال غربی- جنوب شرقی محصور شده است. رشته کوه هزار مسجد که ادامه ارتفاعات کپه داغ است، در شمال این دشت واقع شده و دارای کوه‌هایی به ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متر است. ارتفاعات بینالود و آلاداغ در ناحیه جنوب دشت مشهد واقع هستند و امتداد ارتفاعات البرز محسوب می‌شوند. زهکش اصلی این دشت، کشف‌رود است که با طولی در حدود ۱۷۰ کیلومتر از شمال غرب به سمت جنوب شرق در جریان است.

در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و تغییرات ارتفاعی آبخوان مطالعاتی نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخوان دشت مشهد

نرم‌افزار پویایی سیستم Vensim PLE

پویایی سیستم یک روش مدلسازی ریاضی برای درک رفتارهای یک سامانه پیچیده در طول زمان است، که در آن با تمرکز بر حلقه‌های بازخورد درون سیستم و تاخیرهای زمانی در میان متغیرها به بررسی رفتار یک سیستم می‌پردازد. بنابراین با توجه به ماهیت عددی روش سیستم دینامیک، امکان مدلسازی وضعیت یک سیستم برای بازه زمانی آینده نیز توسط آن وجود دارد (Sterman, 2002). از آنجاییکه بررسی سامانه‌هایی همچون رفتار آبخوان‌ها یک فرآیند پیچیده و دارای جنبه‌های مختلف می‌باشد، در پژوهش حاضر از رویکرد پویایی سیستم برای مدلسازی تاثیر سناریوهای مختلف بر تراز آبخوان مشهد استفاده شده است. نرم-افزار پویایی مورد استفاده در پژوهش حاضر Vensim PLE است. Vensim PLE از جمله نرم‌افزارهای مدلسازی دینامیک است که برای کمک به درک فرآیندهای پیچیده و دینامیکی توسعه داده شده است این نرم‌افزار نوعی ابزار مدلسازی است که قادر به مجسم نمودن، پردازش، شبیه‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی مدل-های مربوط به سیستم‌های پویا به گونه‌ای ساده و با استفاده از حلقه‌ها و متغیرهای جریان می‌باشد. در Vensim PLE پس از تعریف روابط و ساخته شدن مدل می‌توان رفتار سیستم را در طول زمان شبیه‌سازی نمود.

مدل پویایی آبخوان مشهد

برای کمی‌سازی تغییرات حجم آبخوان دشت مشهد و بررسی سناریوهای مختلف در این مطالعه، مدلسازی بر مبنای بیلان آب زیرزمینی و براساس رابطه ۱ صورت پذیرفته است.

(رابطه ۱)

$$V = P + D_1 + G_1 + Q_r + Q_A - (ET + D_2 + G_2 + Q_d)$$

که در آن، V تغییرات حجم آبخوان (مترمکعب)، P حجم جریان نفوذیافته به آبخوان از بارش (مترمکعب)، ET حجم آب تبخیر شده از آبخوان (مترمکعب)، G1 و G2 به ترتیب حجم جریان زیرزمینیِ ورودی و خروجی آبخوان (مترمکعب)، D1 و D2 حجم جریانات سطحی ورودی و خروجی آبخوان (مترمکعب)، Q_r آب برگشتی به آبخوان از مصارف مختلف (مترمکعب)، Q_A میزان تغذیه مصنوعی (مترمکعب)، Q_d حجم آب تخلیه شده از آبخوان برای تامین نیازهای کشاورزی، صنعت و شرب (مترمکعب).

لازم بذکر است که آمار و اطلاعات اقلیمی، آبدهی سطحی و مقادیر جریان ورودی و خروجی زیرزمینی مورد استفاده در این پژوهش از اطلاعات مربوط به شرکت آب منطقه‌ای و اداره هواشناسی استان خراسان رضوی تهیه شده است. همچنین برای استخراج اطلاعات جمعیت و تعداد صنایع منطقه مطالعاتی از سالنامه‌های آماری منتشر شده توسط سازمان مرکز ملی آمار ایران استفاده شده است. آمار سطوح زیرکشت مورد استفاده در این پژوهش نیز از اطلاعات مربوط به سازمان جهاد کشاورزی خراسان رضوی و سالنامه‌های آماری سازمان مرکز ملی آمار ایران تهیه شده است.

واسنجی مدل توسعه داده شده برای آبخوان مشهد برای دوره زمانی ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۲ با توجه مقادیر مشاهده‌ای حجم آبخوان با هدف کاهش خطای مدل در تخمین حجم آبخوان صورت پذیرفته است. همچنین حساسیت حجم آبخوانِ مدلسازی شده توسط نرم‌افزار پویایی سیستم، نسبت به تغییر ضریب نفوذ بارش، ضریب نفوذ رواناب، ضرایب بازگشتی در بخش‌های مختلف کشاورزی، شرب و صنعت مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور میزان حساسیت حجم آبخوان نسبت به هر یک از موارد مذکور با ثابت نگه داشتن سایر عوامل و با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شده است.

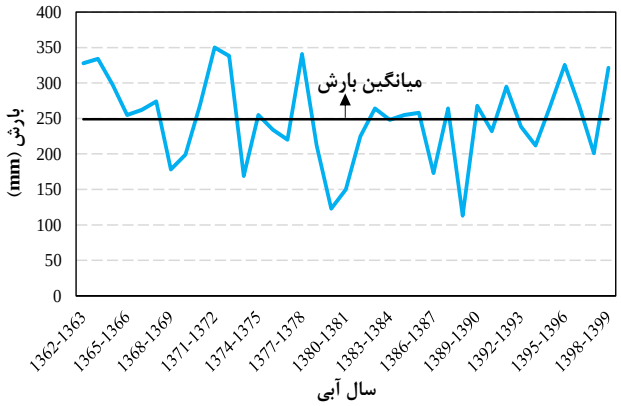
$$S=\left|\frac{M-O}{O}\right|\times 100 \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن، S میزان حساسیت (درصد)، M مقدار حجم آبخوان مدلسازی شده به ازای تغییر پارامترهای مورد نظر (مترمکعب)، O مقدار حجم آبخوان مدلسازی شده در شرایط مبنا (مترمکعب).

همچنین برای اینکه تاثیر شرایط موجود و سناریوهای مورد بررسی در طولانی‌مدت و طی سال‌های آتی مشخص گردد، نرم-افزار برای سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۴۲۰ مورد اجرا قرار گرفت. لازم بذکر است برای شبیه‌سازی دوره آینده نرخ رشد تمامی متغیرها همچون بارش، آبدهی رودخانه، جمعیت، تعداد صنایع و سطوح زیرکشت، برابر متوسط نرخ تغییرات سالانه هر یک از آن‌ها طی دوره مشاهداتی (سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۸) فرض شده است.

زیرسیستم متغیرهای تغذیه آبخوان

در این مطالعه تخمین ضریب نفوذ بارش سالانه، ضریب نفوذ رواناب و ضرایب آب بازگشتی به دشت مشهد طی فرآیند واسنجی و با کاربرد روش واسنجی احتمالاتی GLUE (Beven and Binley, 1992) بدست آمده است. روش GLUE از کارایی بالا در شناسایی پارامترهای بهینه برخوردار است. برای واسنجی ضرایب مذکور به این روش در گام اول ۵۰۰ داده تصادفی (در محدوده تغییرات هر ضریب که در ادامه بیان شده است) براساس توزیع یکنواخت برای هر ضریب تولید شد، در گام بعد مدل به ازای هر ۵۰۰ ترکیب مختلف از ضرایب مورد اجرا قرار گرفت و در نهایت مقادیر حجم آبخوان مدلسازی نسبت به مقادیر مشاهداتی مقایسه شد و از میان ۵۰۰ ترکیب مختلف که به صورت تصادفی تولیده شده‌اند، ترکیبی از ضرایب که منجر به کمترین خطا در تخمین حجم آبخوان (براساس مقدار شاخص کارایی RMSE[1]) شده است به عنوان ضرایب بهینه برای مدل انتخاب شده است. لازم بذکر است که برآورد مقدار بارش براساس گزارش مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی انجام شده است (IMO, 2018a) (۱۳۹۸ -۱۳۶۲) (شکل ۲). برای تخمین میزان جریان نفوذ یافته به آبخوان از متوسط جریان سالانه طی دوره آماری ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۸ رودخانه کشف‌رود که از رودخانه‌های تاثیرگذار بر بیلان آب زیرزمینی در این دشت است، استفاده شده است (Hosseini and Bagheri, 2013; IMO, 2018b). همچنین محدوده تغییرات ضرایب آب بازگشتی در دشت مشهد طی فرآیند واسنجی، براساس مطالعه انجام شده توسط Talebi Hosein Abad و همکاران (۲۰۱۱) معادل ۲۰ تا ۳۰ درصد برای مصارف کشاورزی و ۶۰ تا ۷۰ درصد در بخش شرب و صنعت منظور شده است (Talebi Hosein Abad et al., 2011). مقادیر جریان زیرزمینی ورودی به آبخوان طی سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۸ براساس گزارش‌های سالانه منتشره توسط شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی تهیه شده است.



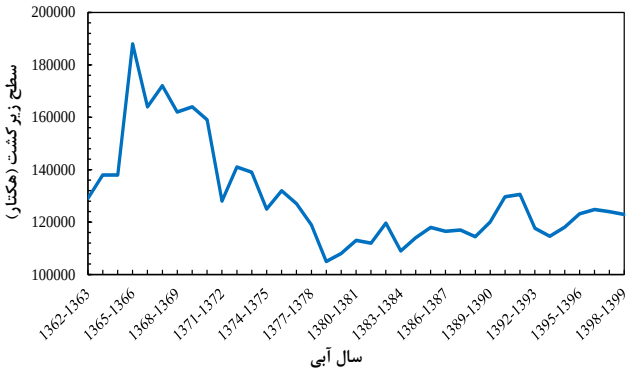
شکل ۲- مقادیر بارش سالانه دشت مشهد (IMO, 2018a)

زیرسیستم متغیرهای تخلیه آبخوان

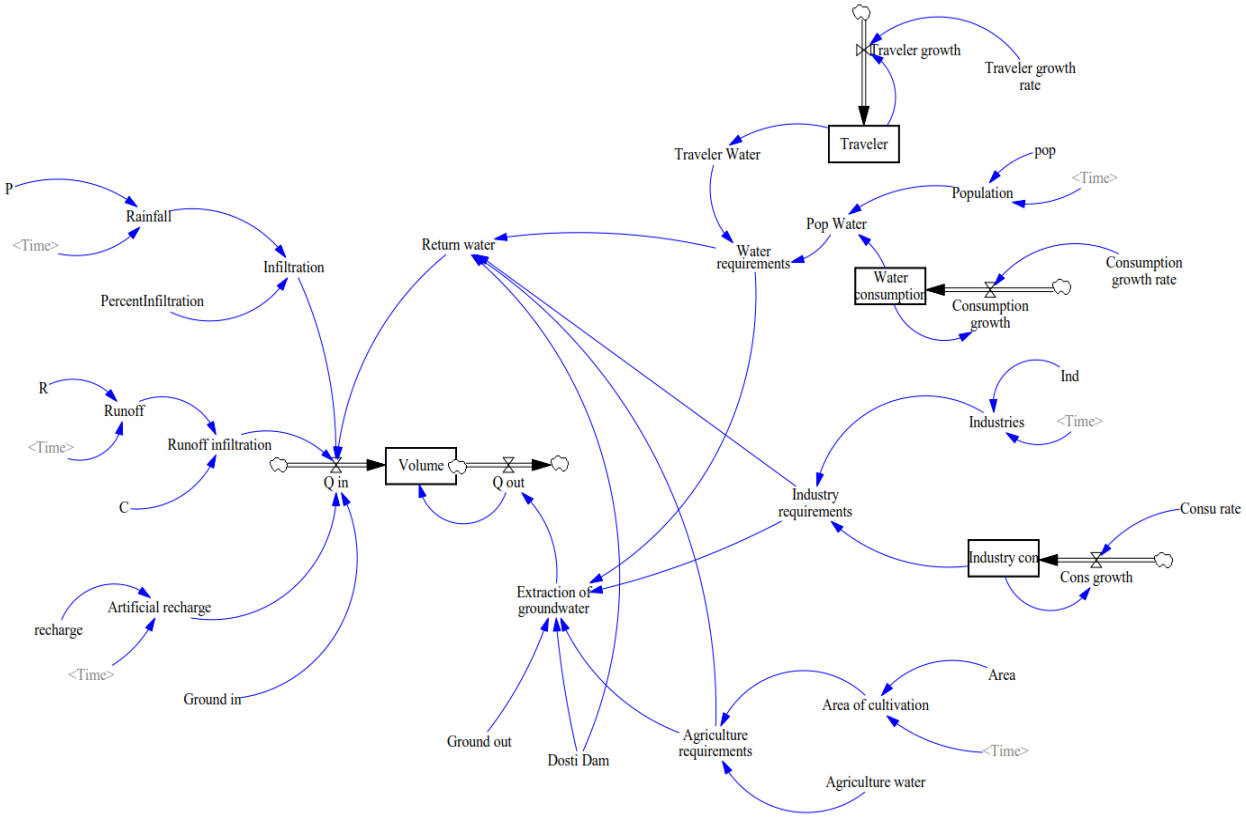
برای محاسبه نیاز آب شرب دشت، با توجه به اینکه جمعیت شهر مشهد متاثر از جمعیت ساکن و زائرین است، برآورد جمعیت ساکن براساس اطلاعات سازمان مرکز ملی آمار ایران و برآورد متوسط جمعیت زائر برحسب نفر در شبانه‌روز در طول سال با احتساب ۲۱۴ و ۷۵ لیتر در روز در به ترتیب برای سرانه مصرف جمعیت ساکن و زائر صورت گرفته است (Statistical Centre of Iran, 2018). نیاز آبی بخش صنعت براساس متوسط تعداد صنایع مشهد در سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۸ با توجه به اطلاعات استخراجی از سالنامه‌های آماری و با در نظر گرفتن سرانه مصرف ۱۱/۵ مترمکعب در روز به ازای هر واحد صنعتی با نرخ رشد مصرف ۰/۰۸ بدست آمده است (Statistical Centre of Iran, 2018).

[1] Root Mean Square Error

بخش کشاورزی با توجه به سطح زیرکشت گزارش شده توسط آمار و اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی خراسان رضوی و متوسط نیاز آبی هر هکتار محاسبه شده است. در شکل ۳ تغییرات سطح زیر کشت آبی دشت مشهد طی دوره آماری ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۸ نشان داده شده است (Agriculture Organization of Khorasan Razavi, 2018). با توجه به ناچیز بودن نرخ تبخیر و تعرق از منابع زیرزمینی مقدار حجم آب تبخیر شده از آبخوان در این مطالعه صفر فرض شده است. همچنین برآورد جریان سطحی و زیرزمینی خروجی از آبخوان با توجه به گزارش‌های سالانه سیمای آب مشهد منتشر شده توسط شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی برای سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۸ برآورد شده است (Regional Water Company of Khorasan Razavi, 2019). لازم بذکر است که میزانی از نیاز آبی دشت مشهد که توسط سد دوستی تامین می‌شود، براساس گزارشات سالانه سیمای آب مشهد تخمین زده شده است. نمودار جریان مدل پویایی آبخوان مشهد در محیط نرم‌افزار Vensim PLE در شکل ۴ نشان داده شده است. در جدول ۱ خلاصه‌ای از متغیرهای مورد نیاز برای مدلسازی آبخوان و روش تخمین هر یک از آن‌ها ارائه شده است.



شکل ۳- تغییرات سطح زیرکشت آبی دشت مشهد (Agriculture Organization of Khorasan Razavi, 2018)



شکل ۴- نمودار جریان مدل پویایی آبخوان مشهد

سناریوهای مورد مطالعه

جهان امروز با چالش‌های زیادی روبرو است، بیابان‌زایی، خشکسالی، فرسایش زمین، کمبود آب شیرین و خشکی از جمله این چالش‌ها می‌باشد. بنابراین کشورها، نمی‌توانند بدون توجه به مسائل توسعه پایدار به حیات خود ادامه دهند. اهداف توسعه پایدار که در سال ۲۰۱۵ به کشورهای عضو سازمان ملل متحد ارسال شد، رویکرد جدیدی را در زمینه توسعه و محیط زیست ترسیم نمود. همانطور که در مقدمه این سند آمده است، "این دستور کار، برنامه اقدام مردم، کره زمین و سعادت بشری می‌باشد. این دستور درصدد تقویت صلح جهانی در قالب آزادی‌های بیشتر

است.". این اهداف بر پایه اهداف توسعه هزاره ایجاد شده‌اند و بدنبال تحقق اهدافی که در توسعه هزاره عملی نشدند، می‌باشند (United Nations, 2015). همانگونه که پیش‌تر نیز عنوان شد این سند شامل ۱۷ آرمان و ۱۶۹ هدف خرد می‌باشد که آرمان ۶ از آن‌ها به آب به عنوان یکی از عناصر توسعه پایدار اشاره دارد که برای رسیدن به این هدف، اهداف خرد و همچنین شاخص‌هایی بمنظور ارزیابی میزان پیش‌برد اهداف در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از متغیرهای مورد نیاز برای مدلسازی آبخوان مشهد و روش تخمین هر یک از آن‌ها

ردیف	متغیر		روش تخمین
۱	ضریب نفوذ بارش		طی فرآیند واسنجی
۲	ضریب نفوذ رواناب		
۳	ضرایب جریان بازگشتی به آبخوان	کشاورزی	
۴		شرب	
۵		صنعت	
۶	اطلاعات اقلیمی		گزارش مطالعات شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی و اداره هواشناسی
۷	آبدهی سطحی		گزارش مطالعات شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی
۸	جریان ورودی و خروجی زیرزمینی		
۹	جریان سطحی ورودی و خروجی از آبخوان		گزارشات سالانه سیمای آب مشهد منتشر شده توسط آب منطقه‌ای خراسان رضوی
۱۰	میزان تامین نیاز آبی دشت توسط سد دوستی		
۱۱	جمعیت		سالنامه‌های آماری سازمان مرکز ملی آمار ایران
۱۲	تعداد صنایع		
۱۳	سطوح زیرکشت		سازمان جهاد کشاورزی خراسان رضوی و سالنامه‌های آماری سازمان مرکز ملی آمار ایران

با توجه به اینکه برای حفظ و پایداری کره زمین و منابع آن، حرکت در راستای اهداف توسعه پایدار لازم است. در این مطالعه تلاش شده است تا به بررسی میزان تاثیر اتخاذ راهکارهایی در راستای اصول توسعه پایدار بر حجم آبخوان پرداخته شود. در همین راستا، ۵ سناریو مورد بررسی قرار گرفته است که عبارتند از:

۱) مدلسازی آبخوان مشهد در شرایط عدم وجود سیستم جمع‌آوری فاضلاب.

۲) از آنجایی که افزایش نسبت فاضلاب تصفیه شده، استفاده مجدد و ایمن فاضلاب از اهداف سند توسعه پایدار است، در سناریوی دوم به مدلسازی تغییرات حجم آبخوان با وجود سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری و اختصاص فاضلاب تصفیه شده برای تامین نیازهای کشاورزی پرداخته شده است. برای این منظور از اطلاعات آب منطقه‌ای خراسان رضوی در رابطه با درصد اتصال به شبکه جمع‌آوری فاضلاب استفاده شده است (Regional Water Company of Khorasan Razavi, 2011) (جدول ۲).

جدول ۲- درصد اتصال به شبکه جمع‌آوری فاضلاب

سال	اتصال به شبکه جمع‌آوری فاضلاب (٪)	نفوذ به آبخوان (٪)
۱۳۹۰-۱۳۸۹	۲۵	۷۵
۱۳۹۱-۱۳۹۰	۳۵	۶۵
۱۳۹۲-۱۳۹۱	۴۵	۵۵
۱۳۹۳-۱۳۹۲	۵۵	۴۵
۱۳۹۴-۱۳۹۳	۶۵	۳۵
۱۳۹۵-۱۳۹۴	۷۵	۲۵

۳) با توجه به اینکه کاربرد شیوه‌های آبیاری نوین به شرط عدم افزایش سطح زیرکشت، منجر به کاهش برداشت آب برای هر هکتار می‌گردد که در نتیجه با افزایش بهره‌وری همراه است. از آنجایی که افزایش بهره‌وری مصرف آب نیز یکی از اهداف توسعه پایدار است. در این سناریو مدلسازی حجم آبخوان در صورت وجود شبکه جمع‌آوری فاضلاب و با فرض تبدیل شیوه کشاورزی از سنتی به مدرن از سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۲۰ صورت پذیرفته است. فرض سناریوی ۳ این است که از سال ۱۴۰۰ به تدریج و سالانه ۳ درصد از سطوح زیرکشت کشاورزی‌های سنتی دشت به کشاورزی مدرن تغییر یابد. متوسط کاهش آب مصرفی در زراعت و باغها براساس مطالعه (Baghani et al., 2010) به ازای هر هکتار کشاورزی مدرن نسبت به کشاورزی سنتی ۲۷/۵ درصد لحاظ شده است.

۴) گسترش سطوح نفوذناپذیر در معماری شهری باعث کاهش نفوذ آب حاصل از بارش در محدوده شهری می‌شود، درحالیکه یکی از مسائل مهم در رویکرد طراحی شهری حساس به آب با دید یکپارچه، کاربرد سازه‌ها، پوشش‌های گیاهی، حفاظت

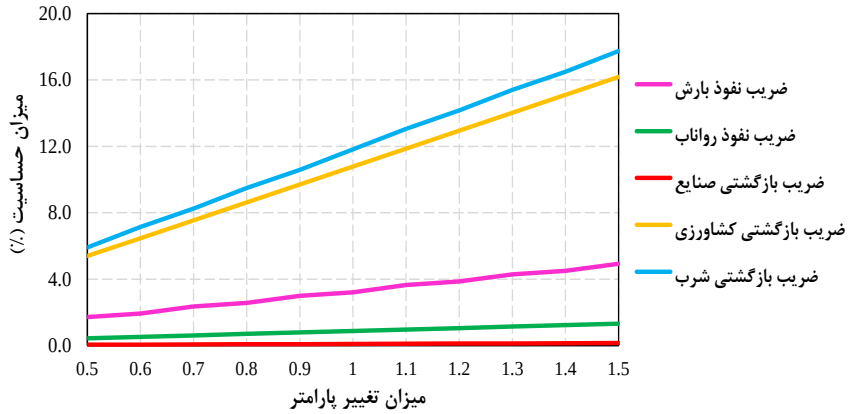
از سیستم‌های طبیعی هیدرولوژی شهری و مدیریت آب باران است (Andrew et al., 2012). با توجه به اینکه بکارگیری این تفکر در طراحی شهری علاوه بر کنترل سیلاب‌ها بر تغذیه منابع زیرزمینی نیز تاثیرگذار خواهد بود، در این سناریو تلاش شده است تا به بررسی میزان تاثیر افزایش سطوح تراوا در معماری شهری بر تغییرات حجم آبخوان پرداخته شود. بدین منظور در سناریوی ۴ فرض شده است تا علاوه بر وجود شبکه فاضلاب، از سال ۱۴۰۰ به تدریج با تغییر معماری شهری به سمت افزایش سطوح نفوذپذیر، سالانه ۱ درصد به سطوح تراوا در دشت مشهد افزود شود.

۵) در سناریوی ۵ سعی بر آن است تا اثر توامان هر سه راهکار فوق بر آبخوان مورد ارزیابی قرار بگیرد. برای این منظور در این سناریو تغییرات حجم آبخوان مشهد با وجود شبکه جمع-آوری فاضلاب شهری، تغییر شیوه کشاورزی سنتی به مدرن و تغییر معماری شهری با رویکرد افزایش میزان سطوح نفوذپذیر مورد مدلسازی قرار گرفته است.

نتایج

تحلیل حساسیت

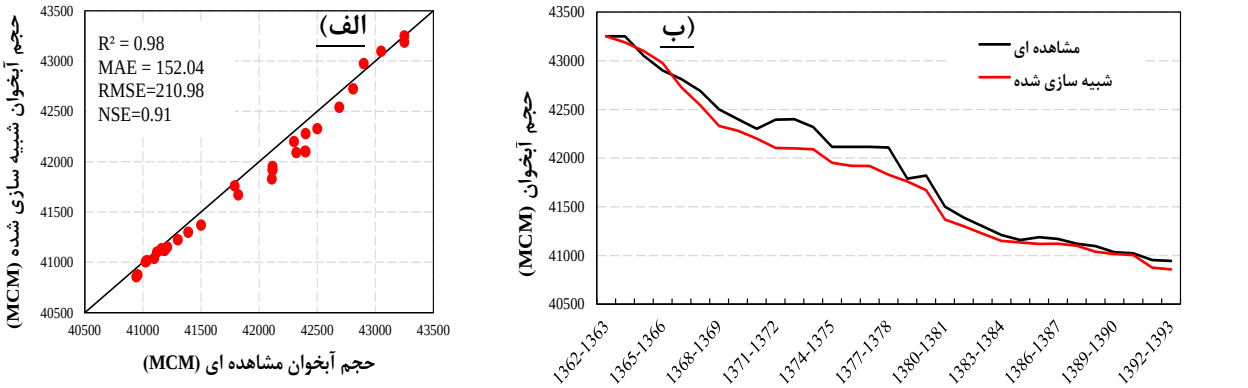
نتایج تحلیل حساسیت مدل پویایی نسبت به تغییر ۰/۵ تا ۱/۵ برابریِ ضرایب نفوذ بارش، رواناب و ضریب جریان بازگشتی بخش‌های صنایع، کشاورزی و شرب در شکل ۵ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود حجم آبخوان بیشترین حساسیت را نسبت به تغییر ضریب جریان بازگشتی در بخش‌های شرب و کشاورزی داشته است، بطوریکه میزان حساسیت مدل نسبت به تغییر این دو پارامتر دارای بیشترین شیب است و در سطح تغییر ۱/۵ برابری به ترتیب معادل ۱۷/۷ و ۱۶/۲ درصد می‌باشد. درحالیکه با تغییر مقدار ضریب جریان بازگشتی از بخش صنایع و ضریب نفوذ رواناب، تغییرات قابل توجهی در مقدار حجم آبخوانِ مدلسازی شده ایجاد نشده است.



شکل ۵- حساسیت حجم آبخوان مشهد نسبت به تغییر ۰/۵ تا ۱/۵ برابری پارامترهای مدنظر

واسنجی نرم‌افزار

در پژوهش حاضر از مقادیر مشاهده‌ای حجم آبخوان مشهد در دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۶۲ تا ۱۳۹۲) برای واسنجی نرم‌افزار Vensim PLE استفاده شده است. فرآیند واسنجی نرم‌افزار طی تکرارهای مختلف و مقایسه تغییرات سری زمانی حجم آبخوان شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار با آمار مشاهده‌ای با هدف کاهش خطای نرم‌افزار در تخمین حجم آبخوان صورت پذیرفته است. در شکل ۶ نمودار پراکنش تغییرات حجم آبخوان شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای و سری زمانی حجم آبخوان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد نرم‌افزار پویایی واسنجی شده، مقادیر حجم آب زیرزمینی را با ضریب همبستگی ۰/۹۸ و میانگین مطلق خطایی معادل ۱۵۲/۰۴ شبیه‌سازی نموده است. با توجه به نتایج مشخص است مقدار شاخص NSE طی دوره واسنجی در حدود ۰/۹۱ است. لازم بذکر است که مقدار ضرایب آب بازگشتی برای بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی طی فرآیند واسنجی به ترتیب ۰/۸۶، ۰/۸۹ و ۰/۳۰ تخمین زده شده است.



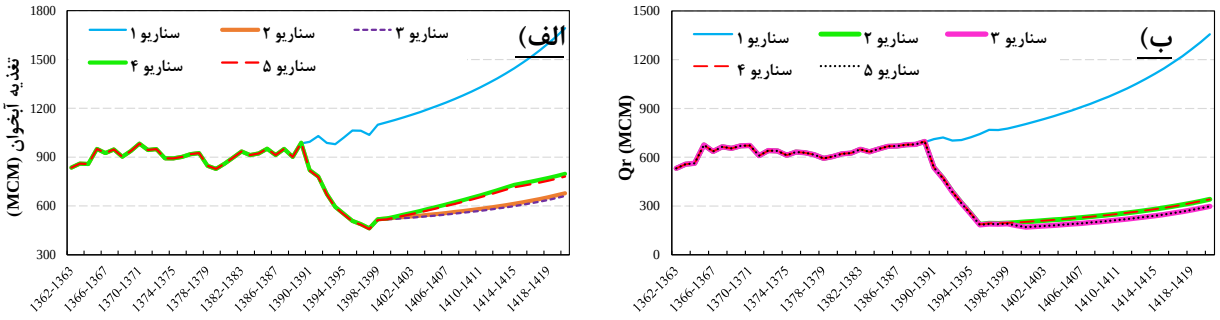
شکل ۶- الف) نمودار پراکنش مقادیر حجم آبخوان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (۱۳۹۲-۱۳۶۲) و ب) حجم آبخوان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (۱۳۹۲-۱۳۶۲)

بررسی میزان تغذیه آبخوان

در این بخش به بررسی تاثیر سناریوهای مختلف بر روی میزان جریان بازگشتی و مقدار تغذیه آبخوان پرداخته شده است. به همین منظور سری زمانی جریان بازگشتی و تغذیه آبخوان مشهد طی سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۴۲۰ در شکل‌های ۷ الف و ب ارائه شده است. شکل ۷-الف گویای کاهش قابل توجه میزان جریان بازگشتی به آبخوان پس از احداث شبکه جمع‌آوری فاضلاب در سال ۱۳۸۹ است، بصورتیکه از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۵ میزان جریان برگشتی به آبخوان از مصارف کشاورزی، شرب و صنعت طی سناریوهای ۲ تا ۵ حدود ۷۳ درصد کاهش داشته است و این درحالی است که در سناریوی اول (در شرایط عدم وجود سیستم جمع‌آوری فاضلاب) مقدار جریان برگشتی با حدود ۷ درصد افزایش نسبت به سال ۱۳۸۹ مواجه بوده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد از سال ۱۳۹۵ به بعد روند تغییرات جریان برگشتی به آبخوان با افزایش همراه است که می‌تواند به علت افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش مصرف آب در بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت باشد. کاهش شیب این تغییرات در سناریوهای ۲ تا ۵ نسبت به سناریوی اول ناشی از آن است که براساس جدول ۱ با احداث سیستم جمع‌آوری فاضلاب میزان نفوذ به آبخوان در نهایت به ۲۵ درصد رسیده است، بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود از سال ۱۳۹۴ به بعد تغذیه آبخوان توسط جریانات برگشتی با شیب ۲۵ صدم نسبت به عدم وجود شبکه فاضلاب ادامه یافته است.

با توجه به شکل ۷-ب مشخص است که میزان تغذیه آبخوان نیز پس از احداث شبکه جمع‌آوری فاضلاب و انتقال فاضلاب‌های جمع‌آوری شده به واحدهای تصفیه خانه با کاهش قابل توجهی همراه است. نتایج بیانگر آن است که میزان جریان برگشتی به آبخوان از تاثیر قابل توجهی بر مقدار تغذیه و تعادل آبخوان برخوردار بوده است، بطوریکه در سناریوهای ۲ تا ۵ میزان کاهش تغذیه آبخوان در سال ۱۴۲۰ نسبت به سال ۱۳۸۹ به ترتیب برابر با ۳۱/۴، ۳۳/۲، ۱۹/۳ و ۲۱/۱ درصد است. درحالیکه بدون وجود سیستم جمع‌آوری فاضلاب (سناریوی ۱) با توجه به افزایش مصرف در بخش‌های مختلف شرب، صنعت و کشاورزی و در نتیجه افزایش مقدار جریان برگشتی به آبخوان، مقدار تغذیه آبخوان در سال ۱۴۰۰ به ۱۶۹۲ MCM[1] (۷۲ درصد افزایش نسبت به سال ۱۳۸۹) رسیده است. همچنین از آنجاییکه در سناریوهای ۴ و ۵ با فرض تغییر رویکرد معماری شهری، سالانه ۱ درصد از سطوح ناتراوا کاسته شده است، مشاهده می‌شود که اتخاذ این تصمیم منجر به افزایش تغذیه آبخوان شده است که ناشی از افزایش میزان نفوذ جریان ناشی از باران به جریان‌های زیرزمینی است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش سطوح نفوذپذیر در معماری شهری نسبت به سناریوهای ۲ و ۳، وضعیت تغذیه آبخوان بطور میانگین با حدود ۱۶ و ۱۹ درصد بهبود همراه بوده است.

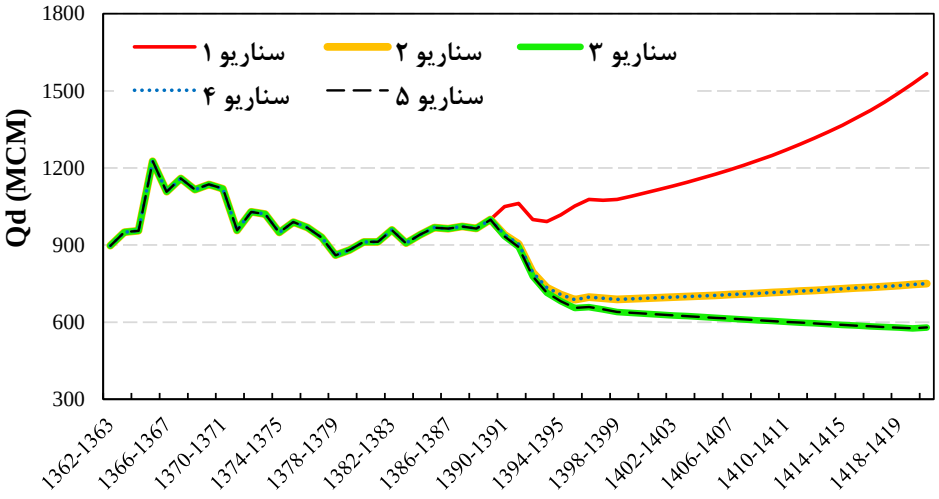
۱ Million Cubic Meters



شکل ۷- الف) میزان تغذیه آبخوان، ب) میزان جریان برگشتی از مصارف به آبخوان

بررسی میزان تخلیه آبخوان

بررسی تغییرات مقدار برداشت از منابع زیرزمینی طی سناریوهای مختلف حاکی از آن است که اختصاص فاضلابِ تصفیه شده به تامین بخشی از نیازهای کشاورزی منجر به کاهش برداشت از آبخوان شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد میزان برداشت از آبخوان در سناریوی اول در سال ۱۳۹۵ در حدود ۱۰۵۲ MCM است، درحالیکه با تامین بخشی از نیازهای کشاورزی توسط فاضلاب تصفیه شده مقدار برداشت از آبخوان در سناریوهای ۲ و ۴ به ۶۸۷ MCM رسیده است (در حدود ۳۴/۷ درصد کاهش). همچنین نتایج نشان می‌دهد تغییر شیوه کشاورزی از سنتی به مدرن در سناریوهای ۳ و ۵ از تاثیر قابل توجهی در کاهش مقدار برداشت از منابع آب زیرزمینی برخوردار است، بطوریکه با ادامه کشاورزی به شیوه سنتی مقدار برداشت از آبخوان در سال ۱۴۰۰ معادل ۷۵۰ MCM برآورد شده است، درحالیکه با کاربرد کشاورزی مدرن مقدار برداشت از آبخوان در سال ۱۴۰۰ به ۵۷۹ MCM کاهش یافته است. بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که افزایش بهره‌وری آب با تغییر شیوه کشاورزی از سنتی به مدرن (به شرط عدم افزایش سطوح زیرکشت و عدم تغییر گونه تحت کشت) می‌تواند در درازمدت از تاثیر قابل توجهی بر کاهش مقدار برداشت از منابع زیرزمینی برخوردار باشد. درحالیکه بدون وجود سیستم جمع‌آوری فاضلاب با توجه به افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش مصارف در بخش‌های مختلف شرب، کشاورزی و صنعت میزان برداشت از منابع زیرزمینی بطور فزاینده‌ای با افزایش همراه است، بطوریکه براساس مدلسازی با سیستم پویا در این پژوهش، میزان برداشت در سال ۱۴۲۰، ۱۵۶۰ MCM تخمین زده شده است.



شکل ۸- میزان برداشت از منابع زیرزمینی طی سناریوهای مختلف

بررسی تغییرات حجم آبخوان

مقادیر افت آبخوان در طول دوره ۵۸ ساله (افت آبخوان در سال ۱۴۲۰ نسبت به سال ۱۳۶۲) و متوسط افت سالانه‌ی حجم آبخوان در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین اثرات سناریوهای مختلف بر تغییرات حجم آبخوان از سال ۱۳۶۲ تا ۱۴۲۰ در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که در صورت عدم جمع‌آوری فاضلاب‌های شهری و صنعتی با توجه به افزایش جمعیت و مصرف آب در بخش‌های مختلف همچنین نفوذ فاضلاب‌ها به منابع زیرزمینی، حجم آبخوان از سال ۱۴۰۴ روندی رو به افزایش داشته است و در نهایت در سال ۱۴۲۰ به ۴۲۰۲۲

MCM رسیده است. بطورکلی در این سناریو افت آبخوان در طول دوره مطالعاتی معادل ۲/۸۴ درصد و سالانه ۰/۰۵ درصد است.

نتایج حاکی از آن است در سناریوی ۲ آبخوان بیشترین میزان افت را تجربه نموده است، بطوریکه حجم آبخوان در سال ۱۴۲۰ با حدود ۱۵/۰۵ درصد افت نسبت به سال ۱۳۶۲ معادل ۳۶۷۴۰ MCM است. بنابراین مشخص است که اجرای شبکه فاضلاب منجر به کاهش آب برگشتی به آبخوان شده است، در نتیجه میزان تغذیه آبخوان در صورت اجرای شبکه فاضلاب کاهش یافته است و این کاهش از سال ۱۳۹۴ و با پیوستن ۷۵ درصد فاضلاب به شبکه جمع‌آوری شدت یافته است. همانگونه که در بخش قبل نیز مشاهده شد میزان برداشت از منابع زیرزمینی در صورت اجرای طرح فاضلاب با کاهش روبرو است که بعلت تامین نیاز آبی بخش کشاورزی با پساب جمع‌آوری و تصفیه شده است. بطورکلی همانطور که مشاهده می‌شود احداث سیستم شبکه فاضلاب موجب شده است تا از یک سو فاضلاب شهری بجای تغذیه آبخوان وارد واحدهای تصفیه فاضلاب شده و تغذیه آبخوان کاهش یابد، از سوی دیگر با اجرای این طرح نیاز کشاورزی به جای برداشت از سفره زیرزمینی از فاضلابِ تصفیه شده تامین گردد و بدین لحاظ سفره زیرزمینی کمتر تخلیه شود. با توجه به شکل ۹ کاهش حجم آبخوان درصورت اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب مشهود است، بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که سهم آب برگشتی ناشی از فاضلاب شهری از اهمیت بالایی در بیلان آبخوان برخوردار است.

نتایج نشان می‌دهد استفاده از سیستم‌های طبیعی هیدرولوژی به منظور مدیریت آب باران و افزودن سالانه ۱ درصد به سطوح نفوذپذیر شهری توانسته است از سال ۱۴۰۰ تا ۱۴۲۰ منجر به بهبودی ۵۶ درصدی در روند افت حجم منابع زیرزمینی نسبت به سناریوی ۲ شود، که با نتیجه این مطالعات هم‌خوانی دارد (Lottering et al., 2015; Goodarzi et al., 2016; Saeedi and Darabi, 2019). بطوریکه Saeedi and Darabi (2019) در مطالعه‌ای نشان دادند که کاربرد طراحی اکولوژیک مناظر شهری، رویکرد مناسبی برای کاهش مصرف آب می‌باشد و تاثیر قابل-توجهی در تغذیه آبخوان‌ها و بهبود منابع زیرزمینی دارد. با توجه به نتایج مشخص است که حجم آبخوان در سناریوی ۴ در سال ۱۴۲۰ حدود ۳۸۲۳۶ MCM است. بهبود وضعیت آبخوان در این سناریو ناشی از آن است که با اجرای این رویکرد در طراحی شهری میزان ذخیره‌سازی، نگه‌داری و بازگشت مجدد آب بارش‌ها در حوضه افزایش خواهد یافت که به افزایش میزان ذخیره سفره-های آب زیرزمینی کمک می‌نماید.

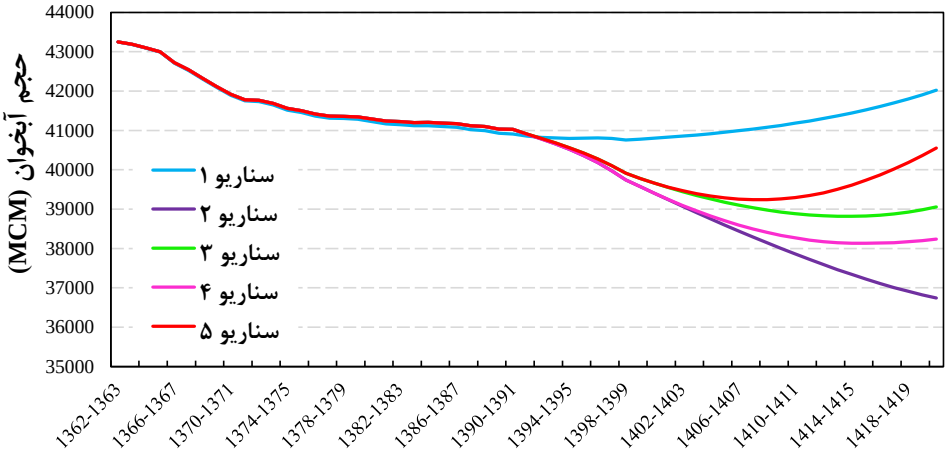
جدول ۳- میزان افت آبخوان نسبت به سال ۱۳۶۲ برای سناریوهای مورد مطالعه

سناریو	افت آبخوان (٪)	متوسط افت سالانه آبخوان (٪)
1	2.84	0.05
2	15.05	0.26
3	9.7	0.17
4	11.59	0.20
5	6.24	0.11

همچنین همانطور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود در سناریوی سوم میزان افت سالانه معادل ۰/۱۷ درصد در سال است، درحالیکه صرفا ایجاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب منجر به افت سالانه ۰/۲۶ درصد می‌شود. به عبارت بهتر می‌توان چنین عنوان نمود که تغییر شیوه کشاورزی از سنتی به مدرن همزمان با جمع-آوری فاضلاب‌های شهری باعث شده است تا روند افت آبخوان در کل دوره مطالعاتی نسبت به سناریوی ۲، ۳۴/۶ درصد بهبود یابد که در راستای مطالعه Hosseini and Bagheri (2013) می‌باشد. با توجه به شکل ۹ مشخص است که توسعه روش‌ها و سیستم‌های نوین آبیاری از طریق بهبود توزیع آب در سطح مزارع و کاهش خروج آب از دسترس گیاه موجب افزایش راندمان آبیاری شده و با کاهش مصرف آب در واحد سطح به شرط عدم افزایش سطح زیرکشت منجر به کنترل میزان آب استخراجی از چاه‌های کشاورزی و درنتیجه کاهش افت منابع زیرزمینی شده است. میزان حجم آبخوان با تغییر سالانه ۳ درصد از سطوح زیرکشت به کشاورزی مدرن در سال ۱۴۲۰، ۳۹۰۵۴ MCM است.

در ادامه این تحقیق با توجه به اهمیت مساله افت منابع زیرزمینی، به بررسی اثر توامان اجرای سیستم کشاورزی نوین و تغییر سطوح تراوای شهری بر بهبود روند افت آبخوان ناشی از اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری پرداخته شده است (سناریوی ۵). بر اساس نتایج حاصل مشخص است که مقدار افت آبخوان در کل دوره مطالعاتی و افت سالانه به تریب برابر با ۶/۲۴ و ۰/۱۱ درصد است، همانگونه که ملاحظه می‌گردد با کاربرد این سناریو حجم منابع زیرزمینی در سال ۱۴۲۰ به ۴۰۵۵۰ MCM رسیده است. بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که با حرکت در چارچوب اصول توسعه پایدار، مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی با کاربرد روش‌ها و سیستم‌های نوین کشاورزی، مدیریت آب باران از طریق افزایش سطوح نفوذپذیر شهری در کنار ایجاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری می‌توان به طور قابل ملاحظه‌ای اثرات منفی ناشی از جمع‌آوری و ممانعت از نفوذ فاضلاب‌های شهری و صنعتی بر بیلان آبخوان را کاهش داد. چنانکه با توجه به نتایج نیز مشاهده می‌شود با کاربرد سناریوی ۵ میزان افت آبخوان در دوره مورد مطالعه نسبت به سناریوی

دوم، در حدود ۵۸/۵ درصد بهبود داشته است و با این رویکرد آبخوان از وضعیت بحرانی ناشی از جمع‌آوری فاضلاب‌ها خارج می‌شود.



شکل ۹- تغییرات حجم آبخوان برای سناریوهای مورد مطالعه (۱۴۲۰-۱۳۶۲)

بحث و نتیجه‌گیری

یکی از چالش‌های جدی در رابطه با منابع آب زیرزمینی، بیلان منفی آبخوان‌ها به دلیل وقوع خشکسالی‌ها و افزایش میزان برداشت از منابع زیرزمینی است. این مساله به ویژه در مناطق با کمبود منابع آبی که از وابستگی بیشتری به منابع زیرزمینی برخوردارند، دارای اهمیت بیشتری است. از سوی دیگر افزایش نسبت فاضلاب تصفیه شده و استفاده مجدد از آن یکی از عناصر اصلی توسعه پایدار است. درحالیکه با توجه به نقش مهم فاضلاب-های شهری و صنعتی بر بیلان آبخوان، اجرای طرح‌های جمع-آوری و انتقال فاضلاب به واحدهای تصفیه‌خانه برای استفاده مجدد، منجر به کاهش ذخایر منابع زیرزمینی خواهد شد. با توجه به اهمیت بالای حفظ منابع زیرزمینی در این پژوهش میزان اثر راهکارهایی در چارچوب اصول توسعه پایدار بر کاهش تاثیر منفی طرح‌های جمع‌آوری فاضلاب‌های شهری و صنعتی بر منابع زیرزمینی از طریق پویایی سیستم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اجرای سناریوهای مختلف نشان داد که تغییر شیوه کشاورزی از سنتی به مدرن، افزایش سطوح تراوای شهری و مد نظر قرار دادن هر دو راهکار به صورت همزمان به ترتیب منجر به ۳۵/۵، ۲۳/۰ و ۵۸/۵ درصد بهبود در روند افت آبخوان نسبت به سناریوی اجرای شبکه فاضلاب در مشهد شده است و حجم آبخوان در سال ۱۴۲۰ برای سناریوهای فوق در حدود ۳۹۰۵۴، ۳۸۲۳۶ و ۴۰۵۵۰ MCM است. درحالیکه بدون اتخاذ سناریوهای مذکور و صرفا با جمع‌آوری فاضلاب‌های شهری و صنعتی، مقدار ذخیره آبخوان در سال ۱۴۲۰ معادل ۳۶۷۴۰ MCM است. همانطور که Hosseini and Bagheri (2013) نیز در پژوهش خود ذکر کردند بررسی اتخاذ بسته‌های سیاستی مختلف بر وضعیت آبخوان، بهره-وری اقتصادی، کمبود آب و نیاز آبی دشت نشان داد که تغییر نیاز آبی به واسطه تغییر الگوی کشت، سیاستی تاثیرگذار بر روی بهبود وضعیت منابع آبی و تراز آبخوان دشت مشهد می‌باشد. همچنین در پژوهشی Saeedi and Darabi (2019) عنوان نمودند که جایگزینی رویکرد طراحی مناظر شهری با توجه به شرایط منابع آب می‌تواند علاوه بر کاهش وابستگی به منابع آب و کاهش رواناب شهری منجر به احیاء آبخوان‌ها نیز شود. در نتیجه همانطور که Khorasani et al. (2020) نیز عنوان داشتند، لازم است تا در کنار احداث شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، کاهش تغذیه ناشی از احداث این شبکه جبران شود تا در حد امکان از بحرانی شدن وضعیت آبخوان‌ها جلوگیری شود. بطور کلی نتایج نشان داد که جمع‌آوری و انتقال فاضلاب به واحدهای تصفیه‌خانه با توجه به کاهش قابل توجه در مقدار جریان بازگشتی به آبخوان، منابع زیرزمینی را با بحران جدی مواجه می‌نماید، اما با اتخاذ سیاست‌ها و راهکارهایی در راستای اصول توسعه پایدار می‌توان تا حد قابل توجهی این بحران را مدیریت نمود. به عبارت دیگر توجه صرف به جمع‌آوری فاضلاب‌های شهری و صنعتی بدون لحاظ نمودن سایر عوامل تاثیرگذار منجر به خسارات شدیدی در رابطه با بیلان منفی و کسری قابل توجه منابع زیرزمینی خواهد شد که جبران آن مستلزم صرف هزینه‌های بالایی است. بنابراین لازم است تا از طرق دیگر همچون افزایش تغذیه مصنوعی، مدیریت مصارف، کاهش برداشت و افزایش میزان نفوذ به تغذیه آبخوان‌ها و منابع زیرزمینی توجه شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Aghakarami, M., & Moridi, A. (2014). Quantitative evaluation of water allocation scenarios using WEAP (Case study: Tehran-Karaj plain). *In 5th National Conference on Water Resources Management* (p. 10). (In Farsi).

Aghamolaie, I., Lashkaripour, G. reza, Ghafoori, M., & Moghadas, N. H. (2018). Evaluating and forecasting groundwater level fluctuations resulting from the development of sewage collection network in Kerman. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, *8*(2), 140–157. (In Farsi).

AgricultureOrganizationofKhorasanRazavi. (2018). No Title. Statistical yearbook of agriculture, agricultural statistics and information office. (In Farsi).

Andrew, M. C., Nigel, J. T., Jason, B., Margaret, L., & Matthias, D. (2012). Watering our cities: the capacity for water sensitive urban design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the australian context. *Progress in Physical Geography*, *37*, 2–28.

Baghani, J., Zare, S., & Joleini, M. (2010). The Affectivity of New Irrigation Systems on Ground Water Resources, Yield and Water Use Efficiency in Mashhad Plain. *Agricultural Research, Extension and Education Organization, Agricultural Engineering Research Institute*. (In Farsi).

Beven, K., Binley, A. (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*. 6, 279–298. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305.

Delanka-Pedige, H. M. K., Munasinghe-Arachchige, S. P., Abeysiriwardana-Arachchige, I. S. A., & Nirmalakhandan, N. (2021). Wastewater infrastructure for sustainable cities: assessment based on UN sustainable development goals (SDGs). *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*. https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1795006.

Goodarzi, M., Haghtalab, N., and Mahdinia, M. H. (2016). Providing strategies for landscape rehabilitatin of industrial areas based on eco-industrial network concept case study: chenaran industrial state. *Journal of Environmental Science and Technology*, 18(2): 207-219. (In Farsi).

Guppy, L., Uyttendaele, P., Villholth, K. G., and Smakhtin, V. (2018). *Groundwater and Sustainable Development Goals: Analysis of Interlinkages.* Retrieved from http://inweh.unu.edu/publications/.

Hashemi, M., Mazandarani Zadeh, H., Daneshkare Arasteh, P., and Zarghami, M. (2020). Evaluation of Management Policies to Simultaneously Maintain Groundwater Resources and Farmers' Livelihoods Using the System Dynamics and Game Theory. *Iran-Water Resources Research*, 16 (3), 1-17. (In Farsi).

Hosseini, S.A., and Bagheri, A. (2013). System dynamics modeling of the water resources system in mashad plain to analyze strategies for sustainable development. *Water and Wastewater Consulting Engineers*, *24*(4), 28–39. (In Farsi).

IMO. (2018a). Iran meteorological organization. Statistical Yearbook of Meteorological Stations, Mashhad Plain. (In Farsi).

IMO. (2018b). Iran meteorological organization. *Statistics of Synoptic Stations, Mashhad Plain*. (In Farsi).

Jafarzadeh, A., Khashei-Siuki, A., and Shahidi, A. (2015). Study of integrated urban wastewater impacts on groundwater levels influenced climate change effects on 2020-2014 (case study: birjand plain). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *9*(3), 489–498. (In Farsi).

Khorasani, H., Kerachian, R., Aghayi, M. M., Zahraie, B., and Zhu, Z. (2020). Assessment of the impacts of sewerage network on groundwater quantity and nitrate contamination: case study of Tehran. *World Environmental and Water Resources Congress 2020*, 53–66. https://doi.org/10.1061/9780784482964.006.

Koohi, S., and Mazandarani Zadeh, H. (2021). The effect of wastewater system on the groundwater based on system dynamic approach. In: Proceedings of *the virtual conference of AQUA≈360: Water for All - Emerging Issues and Innovations*, 31 Aug-2 Sep, University of Exeter, United Kingdom.

Lottering, N., Du Plessis, D., and Donaldson, R. (2015). Coping with drought: the experience of water sensitive urban design (WSUD) in the George municipality. *Water SA*, 41: 01-08.

Maleki, R. (2012). Investigating the effect of sewage project implementation on groundwater level in Shahroud plain using mathematical model. MSc. Shahrood University of Technology. (In Farsi).

Marzouk, M., and Fattouh, K. M. (2022). Modeling investment policies effect on environmental indicators in Egyptian construction sector using system dynamics. *Cleaner Engineering and Technology*, 6. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100368.

Pereira, R. M. S., Haie, N., and Machado, G. J. (2011). Modelling water resources using Vensim PLE. *2nd international conference on Development, Energy, Environment, Economics*.

Pereira, R. M. S., Haie, N., and Machado, G. J. (2012). Vensim PLE to Create Models for Water Management. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 6 (4).

RegionalWaterCompanyofKhorasanRazavi. (2011). Report of Updated of Integrated Water Resources Studies of Qareqoom Basin, V3, Toossab Consulting Engineers, Mashhad. (In Farsi).

RegionalWaterCompanyofKhorasanRazavi. (2019). *Reports of Water Appearance of Cities, Mashhad*. (In Farsi).

Saeedi, I., & Darabi, H. (2019). Ecological landscape design in semi-arid areas on basis of water sensitive urban design approach (case study: Mohajeran city). Journal of Environmental Studies, 44 (4), 689-701. (In Farsi).

StatisticalCentreofIran. (2018). No Title. *Statistical Yearbooks, Khorasan Razavi*. (In Farsi).

Sterman, J. (2002). *System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Massachusetts Institute of Technology. Engineering Systems Division.

Talebi Hosein Abad, F., Velayati, S., Davari, K., Sanaei Nejad, S. H., & Hoseini, S. A. (2011). The effect of return water on the renewable water (Case study: Khorasan Razavi province). In *4th National Conference on Water Resources Managment*. (In Farsi).

Tortajada, C. (2020). Contributions of recycled wastewater to clean water and sanitation Sustainable Development Goals. *Npj Clean Water*, *3*(22). Retrieved from https://doi.org/10.1038/s41545-020-0069-3%0A

UnitedNations. (2015). Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development.

Zhou, Q., Deng, X., Hwang, B. G., and Yu, M. (2022). System dynamics approach of knowledge transfer from projects to the project-based organization. *International Journal of Managing Projects in Business.* January. DOI: 10.1108/IJMPB-06-2021-0142.