

Conjunctive Use of Surface- and Ground-water Considering the Effects of the Wastewater Collection Plan (Case Study: Tehran, Karaj and Shahryar Plains)

A. Hatamkhani¹ and A. Moridi^{2*}

بهره‌برداری تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی با مدنظر قرار دادن اثرات اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب (مطالعه موردی دشت تهران، کرج و شهریار)

امیر حاتم‌خانی^۱ و علی مریدی^{۲*}

Abstract

The increase in population and the expansion of agricultural and industrial water needs in Tehran-Karaj region has created a complex system of resources extraction and supply that necessitates the need to manage the water resources in this region. The purpose of this study is to analyze the water resources management in the current and future situations, the effect of wastewater allocation on supplying demands, and also to provide strategies for consumption reduction and management. These objectives are investigated in five different scenarios. For Groundwater simulation MODFLOW model is used and WEAP model is employed for water resources planning. In all scenarios, the first priority is given to the drinking and industrial demands which are supplied above 99% in all scenarios. The results showed that considering the implementation of future projects and increasing demands, the sustainability of resources was reduced in the last years of simulation which indicated a shortage of water resources against demands. According to the results, if no wastewater is allocated, the annual agricultural demand should be reduced by 40%, in order to keep the water shortage below 10%. If wastewater is allocated along with a 30% reduction in agricultural demand, the percentage of supply would exceed 90% and the water resources of the basin are in better condition in terms of sustainability and vulnerability.

Keywords: Conjunctive Use, Wastewater, WEAP, Vulnerability, Sustainability.

Received: December 15, 2020

Accepted: September 19, 2021

چکیده

افزایش جمعیت و گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعت در منطقه تهران - کرج سیستم پیچیده و ناهمگونی از منابع تخلیه و تغذیه را پدید آورده است و نیاز به مدیریت منابع آب در این منطقه را ضروری می‌سازد. هدف از مطالعه حاضر بررسی و مدیریت منابع آب منطقه مورد نظر در وضعیت فعلی و آینده، اثر تخصیص پساب فاضلاب بر تأمین نیازها و همچنین ارائه راهکارهایی برای کاهش و مدیریت مصرف می‌باشد که این اهداف در قالب سناریوهای ۵ گانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی از مدل MODFLOW و برای برنامه‌ریزی منابع آب از WEAP استفاده شده است. در همه سناریوها اولویت اول تأمین نیازهای شرب و صنعت است که در تمام سناریوها بالای ۹۹ درصد تأمین شده‌اند. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن اجرای طرح‌های آبی و افزایش نیازها، پایداری منابع در سال‌های آخر مدل‌سازی کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کمبود منابع آبی در مقابل تقاضا است. با توجه به نتایج، بدون تخصیص پساب، نیاز کشاورزی می‌بایست سالانه ۴۰ درصد کاهش یابد تا درصد کمبود آن به زیر ۱۰ درصد رسد و در صورت تخصیص پساب به نیاز کشاورزی، با کاهش ۳۰ درصدی نیز درصد تأمین این نیاز بالای ۹۰ درصد می‌رسد و منابع آبی حوضه از لحاظ پایداری و آسیب‌پذیری در وضعیت بهتری قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی: بهره‌برداری تلفیقی، پایداری منابع آب، تخصیص منابع آب، پساب فاضلاب، آسیب‌پذیری.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۹/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۶/۲۸

1- Ph.D. Student, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: a_moridi@sbu.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.3.3.8](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.3.3.8)

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۰ امکان‌پذیر است.



۱- مقدمه

رشد روزافزون جمعیت، گسترش شهرها و افزایش تقاضا و مشکلات مربوط به کیفیت منابع طبیعی، بیش از پیش مسأله مدیریت جامع و یکپارچه منابع آب را ضروری می‌سازد. در سال‌های اخیر رویکرد مدیریت تقاضا در مدیریت منابع آب نسبت به مدیریت عرضه اولویت بالاتری پیدا کرده است. بدین منظور محققان، مدیریت تلفیقی آب را مطرح نموده‌اند. هدف اصلی مدیریت تلفیقی این است که توسعه پایدار، کارآمد و عادلانه منابع آب حاصل شود. بنابراین مبنای مدیریت تلفیقی بر پایه ترکیب‌پذیری مدیریت تأمین با مدیریت تقاضا استوار بوده که جنبه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی را در نظر می‌گیرد (Yevjevich, 1995). بنابراین، بهره‌برداری تلفیقی یکی از تحلیل‌های مدیریتی در مبحث مدیریت منابع آب می‌باشد. مناسب‌ترین تعریف از بهره‌برداری تلفیقی عبارت است از تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی با توجه به محدودیت‌های کمی و کیفی جهت ارضاء نمودن یک یا چند هدف (Rao et al., 2004).

بهره‌برداری تلفیقی، مدیریتی متناسب با خصوصیات هر دو منبع آب سطحی و زیرزمینی است. هرچند که این دو منبع در ظرفیت ذخیره، تغذیه، تخلیه، هزینه اولیه و بهره‌برداری و محدودیت‌ها متفاوت هستند، استفاده همزمان از دو منبع باعث افزایش عملکرد، کفایت، اعتمادپذیری توزیع و کاهش هزینه‌ها در یک سیستم می‌شود. آب زیرزمینی دارای نقش مهم در بهره‌برداری تلفیقی است و همواره به عنوان یک مخزن پشتیبان برای منابع سطحی محسوب می‌شود و در زمان کمبود آب سطحی به ویژه در فصل گرم و خشک، کمبودهای موجود را جبران می‌نماید. در بهره‌برداری تلفیقی در فصل‌های مرطوب به علت پر بودن مخزن، بیشتر تأمین نیاز از آب سطحی صورت می‌گیرد و مقدار کمتری از آب زیرزمینی برداشت می‌شود و اجازه برگشت سطح آب زیرزمینی به حالت اولیه داده می‌شود. برعکس، در فصول خشک که از حجم منابع سطحی به مقدار زیاد کاسته می‌شود بیشتر تأمین نیاز از آبخوان صورت می‌گیرد. البته برداشت از آبخوان هم باید به گونه‌ای باشد که تعادل میان تغذیه و تخلیه آبخوان برقرار باشد و به عبارت دیگر بیلان آبخوان منفی نشود. بهره‌برداری بی‌رویه و بدون برنامه‌ریزی از آب زیرزمینی نیز اثرات نامطلوبی شامل نشست زمین، کاهش کیفیت آب زیرزمینی و اثرات جانبی زیست‌محیطی نامطلوب را به همراه دارد (Jenkins and Lund, 2004). مطالعات زیادی در حوزه بهره‌برداری تلفیقی انجام گرفته است. به طور مثال Jenkins and Lund (2004) قابلیت‌ها، محدودیت‌ها و منافع اقتصادی مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی در جنوب کالیفرنیا را با استفاده از مدل CALVIN^۱ بررسی کردند. هدف این

تحقیق دست یافتن به سیاست‌هایی جهت بهره‌برداری با اطمینان‌پذیری بالا و سود اقتصادی بیشتر بود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان‌دهنده افزایش درجه اطمینان‌پذیری به لحاظ بهره‌برداری کیفی و کمی و همچنین افزایش بهره اقتصادی در اثر اجرای طرح مدیریتی بود. (Vedula et al. (2004) برای رسیدن به سیاست استفاده بهینه برداشت تلفیقی منابع آب، از یک مدل ریاضی استفاده کردند. آن‌ها برداشت تلفیقی را با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی فرموله کردند و نتایج را با مدل‌های حاضر مقایسه نمودند که کارایی بالای مدل ریاضی را نشان داد. (Mahjoub et al. (2011) به مدل‌سازی بهره‌برداری تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی در منطقه مراغه پرداختند. آن‌ها در این مدل‌سازی تابع هدف را ماکزیمم کردن سود محصولات در منطقه مراغه در نظر گرفتند. ایشان شبیه‌سازی آبخوان را با نرم‌افزار GMS انجام داده و پمپاژهای متفاوت چاه برای سناریوهای مختلف در منطقه مورد مطالعه را مد نظر قرار دادند. در انتها ضمن تعیین کاهش سطح آب زیرزمینی به رویکردهای مدیریتی پرداختند. (Shamsai and Forghani (2011) در مقاله‌ای موضوع بهره‌برداری تلفیقی در مناطق خشکی که فقط دارای منبع آب سطحی انتقالی بوده و فاقد دیگر منابع آب سطحی می‌باشند را مورد بررسی قرار دادند. به این منظور آب زیرزمینی منطقه را توسط مدل Modflow-Pmwin شبیه‌سازی نمودند. از نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی، در تدوین مدل بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک استفاده نموده و گزینه‌های مختلف در جهت بهره‌برداری بهینه از منابع آب را ارائه کردند. هدف اصلی از مدل بهینه‌سازی، تدوین الگوی ماهانه برداشت از منابع آب سطحی انتقالی و زیرزمینی در راستای تأمین نیاز آبی در تمامی ماه‌ها با محوریت کنترل سطح آب زیرزمینی منطقه بود. (Rezapour Tabari (2012) برنامه بهینه بهره‌برداری از منابع آب داخل حوضه کلاس و احیای منابع آبی برون حوضه‌ای بر پایه تأمین نیازهای آبی داخل حوضه‌ای، کاهش میزان آب خروجی از مرز ایران و افزایش انتقال آب به حوضه مجاور (حوضه دریاچه ارومیه) را ارائه داد. ایشان با اجرای مدل پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک، مقادیر بهینه تخصیص و میزان آب انتقالی به حوضه مجاور را مشخص کرد و به این نتیجه رسید که با اعمال برنامه‌های بهینه بهره‌برداری تدوین شده می‌توان حجم قابل توجهی از منابع آبی داخل حوضه را به منظور احیای منابع آبی به بیرون حوضه انتقال داد. (Savafi et al. (2016) از یک مدل بهینه‌سازی بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای تهیه یک برنامه مناسب برای استفاده همزمان از منابع آب سطحی و زیرزمینی در منطقه آبیاری نکوآباد واقع در حوضه زاینده‌رود استفاده کردند. هدف از این مطالعه کاهش مصرف آب، تعریف الگوی کشت بهینه، کاهش افت سالانه در آب زیرزمینی و به حداکثر رساندن سود خالص مالی کشاورزان بود. (Rezaei et al. (2017) یک الگوریتم بر مبنای سیستم

فازی برای حل مسأله واقعی چند هدفه در استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را به کار بردند. اجرای مدل برای یک دوره ده ساله نشان دهنده افزایش راندمان آبیاری (کاهش تلفات)، کاهش مصرف آب در واحد سطح و افزایش بهره‌وری آب در مقایسه با شرایط بهره‌برداری واقعی بوده است. (Kanooni et al. (2019 یک الگوریتم قطعی مبتنی بر روش بهینه‌سازی ژنتیک به منظور تخصیص بهینه آب از منابع سطحی و زیرزمینی بین مصارف مختلف در بهره‌برداری از سد مخزنی یامچی در استان اردبیل ارائه کردند. تابع هدف در مدل بهینه‌سازی، حداکثر نمودن سود حاصل از تخصیص آب به بخش کشاورزی با توجه به الگوی کشت منتخب بود به طوری که تأمین نیازهای شرب و زیست‌محیطی به عنوان محدودیت در مدل بهینه در نظر گرفته شوند.

به منظور برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب در حوضه آبریز، نیاز به توسعه و یا استفاده از یک بسته نرم‌افزاری برای مدل‌سازی می‌باشد. به همین منظور، مدل‌هایی توسعه داده شده‌اند که در آن‌ها مجموعه‌ای از فرایندهای موجود در سیستم، به ترتیب رخداد، شبیه‌سازی شده و در نهایت به خروجی ختم شود. در این راستا، مدل‌های ریاضی تخصیص می‌توانند نقش مؤثری در این خصوص ایفا نمایند. WEAP² یکی از مهمترین مدل‌های شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب است که کاربردهای فراوانی داشته است. (Amini et al. (2017 در پژوهشی با استفاده از نرم‌افزار WEAP به عنوان ابزاری توانمند، به ارزیابی مدیریت‌های اعمال شده در حوزه آبخیز گاماسیاب و بررسی تأثیر سدهای بالادست بر عملکرد سد بیستون پرداختند. ایشان از داده‌های هیدرولوژیکی دراز مدت جهت شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه استفاده نمودند. نیازهای حوضه را با استفاده از داده‌های جمعیت، کشاورزی و صنعت استخراج و نیاز زیست‌محیطی را نیز با کاربرد روش مونتانا محاسبه کردند. نتایج بیانگر پوشش کامل نیازها در محدود سد بیستون در شرایط موجود و کمبود آب در صورت بهره‌برداری رسیدن سدهای پیش‌بینی شده در حوضه می‌باشند. (Zamanipour et al. (2018 در تحقیقی به منظور تعیین ابعاد بهینه مؤلفه‌های طراحی طرح انتقال آب بهشت‌آباد- زاینده‌رود، از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی استفاده کردند. شکل توسعه یافته الگوریتم هوش جمعی ذرات چند هدفه به صورت چند ازدحامی با رویکرد همکارانه، به منظور بهینه‌سازی و مدل WEAP، جهت شبیه‌سازی سیستم منابع و مصارف حوضه‌های آبریز، مورد استفاده قرار گرفت. کاهش کمبودهای تأمین نیاز مصارف شرب و زیست‌محیطی حوضه‌های مبدأ و مقصد و نیز کاهش هزینه‌های اقتصادی اجرای این طرح، از اهداف تعریف شده در این تحقیق بودند. (Hatamkhani and Moridi (2019 برای برنامه‌ریزی توسعه در حوضه آبریز کشکان، از WEAP به عنوان مدل

شبیه‌ساز استفاده کردند. در این تحقیق با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به برنامه‌ریزی توسعه واحدهای کشاورزی و برقراری با توجه به تمامی منابع و مصارف آب در حوضه پرداخته شد. نتایج عملکرد مناسب مدل توسعه یافته MOPSO-WEAP را نشان می‌دادند.

(Kalbali et al. (2019 با استفاده از مدل بارش- رواناب IHACRES و داده‌های بارش، دما و رواناب ماهانه در دوره پایه (۱۹۹۴-۲۰۱۰)، میزان رواناب رودخانه قره‌سو در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ را شبیه‌سازی کردند. سپس، وضعیت احتمالی تخصیص منابع آب و تأمین نیاز بخش کشاورزی توسط مدل WEAP را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل WEAP، نشان دهنده افزایش نیاز تأمین نشده بخش کشاورزی در منطقه مورد مطالعه در دوره آتی بود. نتایج، عملکرد مناسب مدل توسعه یافته MOPSO-WEAP را نشان داد. (Nazari Mejdari et al. (2019 در مقاله‌ای با تلفیق مدل هیدرولوژیکی SWAT و مدل WEAP به بررسی اثر توسعه بالادست و همچنین تغییر اقلیم بر کاهش منابع آب ورودی از حوضه مرزی هریرود به کشورهای ایران و ترکمنستان پرداختند. براساس نتایج، تغییر الگوی آب و هوایی و احداث سد تأمین نیازهای زیست‌محیطی در پایین دست سد را با مشکل جدی روبرو خواهد کرد. (Hatamkhani and Moridi (2021 برای برنامه‌ریزی بهینه در حوضه آبریز کرخه از WEAP استفاده کردند. در این تحقیق با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به برنامه‌ریزی توسعه واحدهای کشاورزی با توجه به معیارهای اقتصادی و اجتماعی پرداختند.

بررسی مطالعات گذشته نشان داد بیشتر مطالعات بر روی یک سناریو خاص متمرکز شده و اثر متغیرهای مختلف بر آینده را لحاظ ننموده‌اند. همچنین، تلفیق مدل MODFLOW و WEAP کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعات داخلی نیز خلاء یک بررسی جامع در رابطه با مدیریت تلفیقی بر روی دشت تهران- کرج به عنوان یکی از مهم‌ترین دشت‌های کشور احساس می‌شود. با توجه به این موارد، هدف از مطالعه حاضر بررسی وضعیت آبخوان تهران- شهریار و کرج به صورت یکپارچه، بررسی طرح جمع‌آوری فاضلاب و امکان افت آبخوان و تأثیر آن در بیلان آب سطحی و تهیه مدل‌های ریاضی کمی برای شبیه‌سازی وضعیت آبخوان در آینده می‌باشد. با استفاده از این مدل‌ها برای شبیه‌سازی وضعیت کمی آبخوان می‌توان ضمن بررسی اثرات سناریوهای مختلف بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، روش استفاده از منابع آب این محدوده را به گونه‌ای مشخص کرد که ضمن تأمین نیازهای موجود، کمترین اثرات سوء بر کمیت منابع آب زیرزمینی در محدوده طرح ایجاد شود. بنابراین مهمترین اهداف این تحقیق تهیه

کشاورزی و صنعت، نفوذ از بستر رواناب‌های ورودی به دشت و نفوذ بارندگی می‌باشد، برآورد می‌گردد. در فرایند مدل‌سازی، وضع موجود از سال ۱۳۴۸ تا سال ۱۳۹۵ و وضعیت توسعه از سال ۱۳۹۶ تا سال ۱۴۲۰ در نظر گرفته شد. با استفاده از نتایج مدل MODFLOW و استفاده از داده‌های حجم مخزن و حجم استاتیکی، دشت مورد مطالعه در مدل WEAP مدل گردید. فرایند کلی مطالعه حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است.

مدل شبیه‌سازی بهره‌برداری توأم از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزارهای WEAP و MODFLOW، بررسی وضعیت تغییرات کمی آبخوان تهران در صورت اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب شهر تهران و ارائه راهکارهای تغییر تخصیص و بهره‌برداری تلفیقی با هدف پایداری آبخوان می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه، برنامه‌ریزی منابع آب در سطح حوضه آبریز دشت تهران- کرج با تخصیص یکپارچه از منابع آب سطحی و زیرزمینی به مناطق مدنظر انجام شده و مدیریت منابع و مصارف حوضه تحت سناریوهای مختلف در نرم‌افزار WEAP مدل گردیده است. لذا ابتدا با استفاده از مدل MODFLOW میزان تغذیه از سطح آبخوان که شامل مقادیر ورودی از مرزهای آبخوان، آب برگشتی چاه‌های شرب،

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی تهران- کرج در ناحیه‌ای بین عرض جغرافیایی $۲۰^{\circ} ۳۵'$ تا $۱۵^{\circ} ۳۶'$ شمالی و طول جغرافیایی $۵۰^{\circ} ۵۰'$ تا $۱۵^{\circ} ۵۲'$ شرقی واقع شده و از نظر تقسیمات کشوری عمدتاً به استان تهران تعلق دارد.

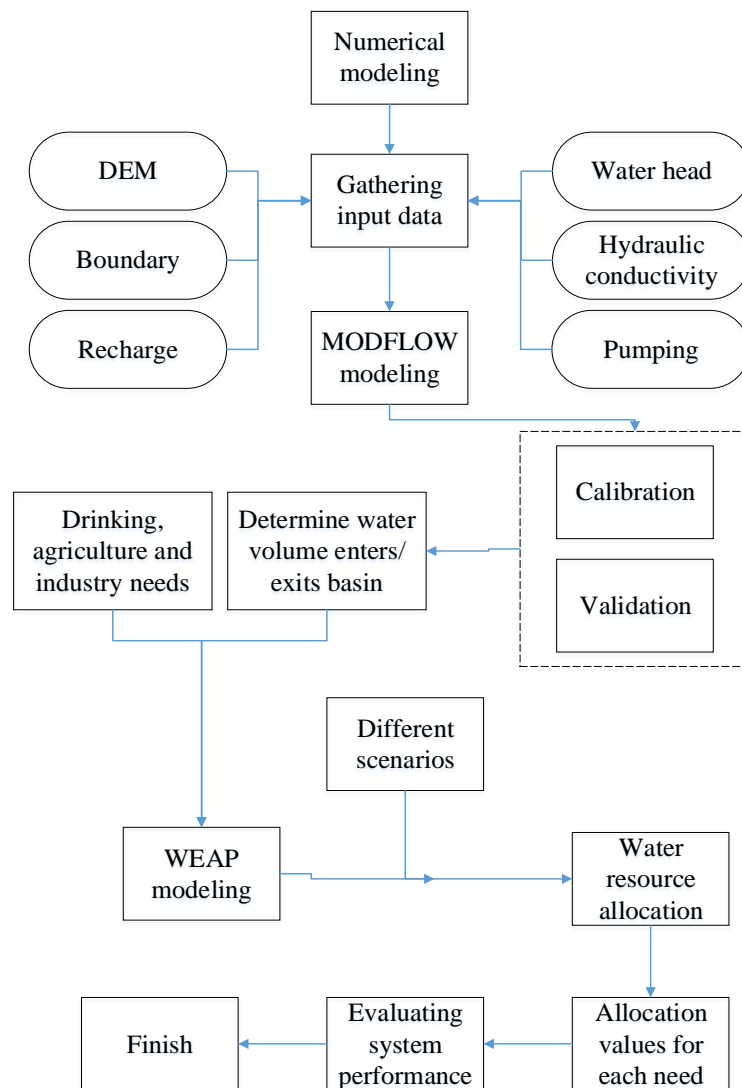


Fig. 1- Methodology flowchart

شکل ۱- فلوچارت روش انجام کار

مرطوب سرد در نواحی شمالی تا نیمه خشک و بیابانی در نواحی جنوبی منطقه متفاوت است. شکل ۲ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۲- مدل آب زیرزمینی MODFLOW

نرم افزار MODFLOW که با زبان برنامه فرترن نوشته شده است، بر پایه روش تفاضل محدود و به روش بلوک مرکزی، حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی را در محیط متخلخل فراهم می‌کند (Harbaugh et al., 2000). هدف از حل معادله جریان آب زیرزمینی، تعیین ارتفاع سطح ایستایی آب زیرزمینی در گام‌های زمانی مختلف، با فرض در دست بودن ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدرولیکی آبخوان در سلول‌های مختلف و همچنین وضعیت تغذیه و تخلیه آن برای دوره زمانی مورد نظر است. در واقع، برای هر دوره زمانی، مجموعه معادلات حاکم بر جریان آب و انتقال جرم نوشته شده و با توجه به شرایط اولیه و شرایط مرزی به روش تکرار حل می‌شوند و تراز سطح آب و غلظت متغیرهای کیفی مورد نظر را در سلول‌های مختلف در انتهای ماه به دست می‌دهند. معادله حاکم در این مدل در قالب رابطه (۱) آورده شده است:

بر اساس اطلاعات شرکت مدیریت منابع آب ایران، این محدوده مطالعاتی دارای مساحت ۵۱۵۶ کیلومتر مربع است که حدود ۲۲۲۶ کیلومتر مربع آن مناطق مرتفع و ۲۹۳۰ کیلومتر مربع دشت می‌باشد. منطقه مورد مطالعه، حوضه آبریز رودخانه‌های شمال تهران و رودخانه‌های کرج را شامل می‌شود. این رودخانه‌ها از ارتفاعات جنوبی البرز سرچشمه گرفته و در نهایت به دریاچه حوض سلطان می‌ریزند. همچنین، مساحت آبخوان منطقه بالغ بر ۲۴۳۳ کیلومتر مربع می‌باشد. این آبخوان که شامل آبخوان‌های موضعی شمال محدوده و آبخوان اصلی می‌باشد، دشت‌های تهران، شهریار، کرج و فشافویه را در بر می‌گیرد. شهرها و محدوده‌های مسکونی مهمی در داخل این محدوده مطالعاتی قرار دارند که از آن جمله می‌توان به تهران، کرج، شهریار و اسلامشهر اشاره کرد. علاوه بر این شهرها، تعداد زیادی شهرک و روستا در محدوده مطالعاتی وجود دارد به گونه‌ای که تراکم جمعیت در این محدوده نسبت به سایر مناطق کشور بالا می‌باشد. منابع آبی مورد استفاده برای تأمین نیازهای آبی این منطقه عبارت است از مجموع برداشت از آب‌های زیرزمینی به علاوه انتقال آب از سدهای لتیان، لار، کرج و سد طالقان. با توجه به وجود رشته کوه‌های مرتفع البرز در حوضه‌های آبریز این رودخانه‌ها، اقلیم منطقه متنوع بوده و بین نیمه

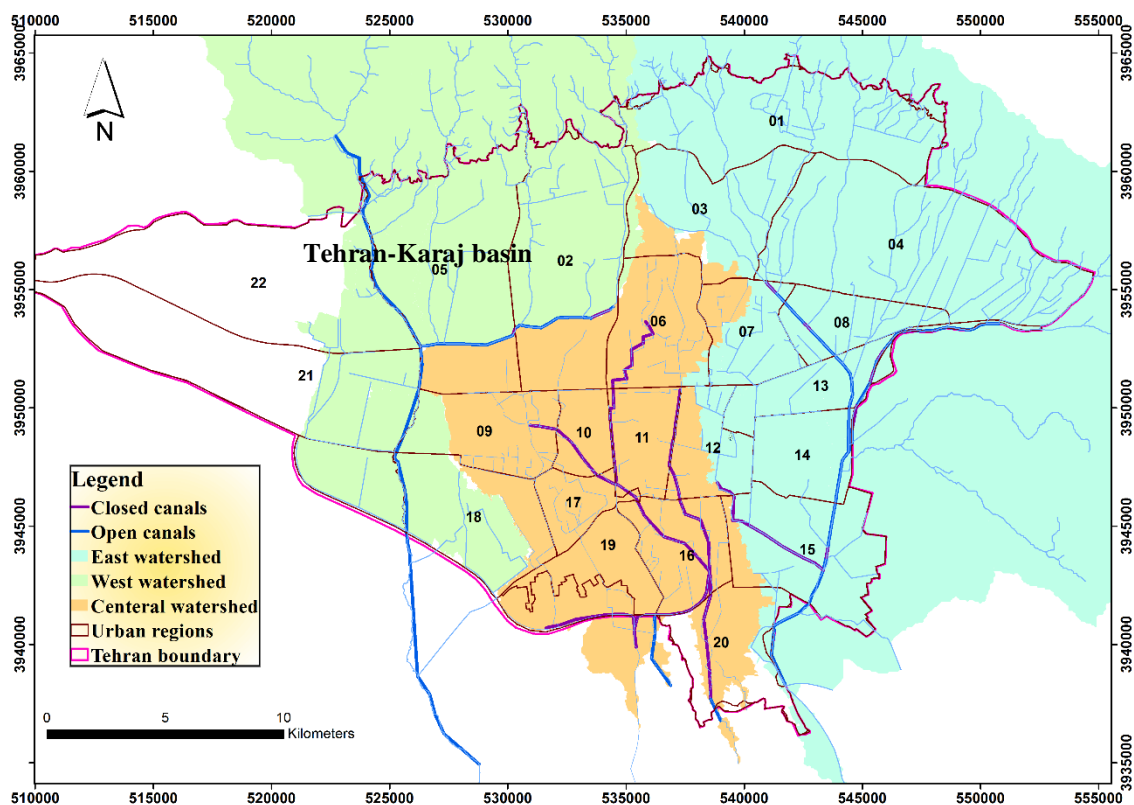


Fig. 2- Location of Tehran-Karaj study area

شکل ۲- موقعیت محدوده مطالعاتی تهران - کرج

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q_s \quad (1)$$

$$= S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

که در آن x ، y و z جهت جریان، t زمان، k ضریب هدایت هیدرولیکی، h تراز آب زیرزمینی، q_s دبی ورودی/خروجی و S_s ذخیره ویژه می‌باشد.

۳-۲- مدل یکپارچه منابع آب WEAP

مدل WEAP به عنوان یک ابزار کامپیوتری برای برنامه‌ریزی یکپارچه منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار با استفاده از رویکرد جامع برای شبیه‌سازی سیستم‌های آبی توسط مؤسسه محیط زیست استکهلم جهت رفع فاصله بین مدیریت منابع و هیدرولوژی حوضه توسعه داده شده است که نرم‌افزاری جامع، انعطاف‌پذیر و کاربر دوست برای آنالیز سیاست‌ها می‌باشد (Sieber and Purkey, 2007). مدل WEAP بر اساس معادلات پایه بیان آبی عمل کرده و آن را می‌توان در سیستم‌های شهری و کشاورزی، حوضه‌های مستقل یا سیستم‌های آبی پیچیده به کار برد. همچنین، WEAP محدوده زیادی از مسائل مانند تحلیل نیاز هر بخش، حفاظت آب، حقایق‌ها و اولویت‌های تخصیص، شبیه‌سازی آب‌های سطحی و زیرزمینی، بهره‌برداری از مخزن، تولید انرژی برقی، روندیابی آلودگی، نیازهای اکوسیستم، ارزیابی آسیب‌پذیری و تحلیل منفعت-هزینه طرح را پوشش می‌دهد. مدل WEAP از یک مدل برنامه‌ریزی خطی استاندارد برای حل مسائل تخصیص آب در هر گام زمانی استفاده می‌کند که تابع هدف آن حداکثر کردن درصد تأمین نیازهای مراکز تقاضا با توجه به اولویت در عرضه و تقاضا، تعادل جرمی و سایر قیود می‌باشند. تمامی قیود به طور متناوب برای هر گام زمانی و با توجه به اولویت در عرضه و تقاضا تعریف می‌شود. WEAP در هر گام زمانی معادله تعادل جرمی آب را برای هر شاخه و گره محاسبه می‌کند. با این فرض که عملکرد اجزا سیستم به جز در مخازن و رطوبت خاک، در هر گام زمانی مستقل از گام‌های دیگر می‌باشد. گام‌های زمانی با توجه به بزرگی حوضه می‌توانند کوچک (روزانه، ۱۰ روزه) یا بزرگ (ماهانه و یا بیشتر) در نظر گرفته شود (Yates et al., 2005).

مدل WEAP وارد می‌شود. مقادیر تخلیه توسط چاه‌های کشاورزی، شرب و صنعت از طریق لینک انتقالی از مخزن آب زیرزمینی به گره‌های مصرف و همچنین تغذیه ناشی از آب برگشتی از این مصارف بوسیله جریان برگشتی از هر گره به آبخوان در WEAP مدل‌سازی می‌شود. در فرایند مدل‌سازی با WEAP، ۵ سناریو متفاوت تعریف شد که عبارتند از: (۱) وضع پایه، (۲) وضع توسعه، (۳) وضع تعادل بخشی آبخوان، (۴) وضع تعادل بخشی آبخوان بدون اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب و (۵) مدیریت تقاضا. در سناریو وضعیت پایه حجم استاتیکی آبخوان تهران- کرج حدود ۴۴۵۰ میلیون متر مکعب بوده و نیازهای وضع موجود دشت وارد مدل شده است. همچنین سدهای لتیان، کرج و بند فشافویه در حال بهره‌برداری هستند. سناریوی ۲ بیان‌کننده شرایط توسعه منطقه بوده و در این سناریو، سد ماملو در پایین‌دست سد لتیان با هدف انتقال آب شرب به تهران فعال است. طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای در این سناریو انجام شده است. به عبارت دیگر، در سناریوی توسعه، طرح‌های مختلفی در منطقه مورد مطالعه به بهره‌برداری خواهند رسید که در نتایج مدل تأثیر خواهند گذاشت. از جمله مهم‌ترین این طرح‌ها اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب شهر تهران می‌باشد. در سناریوی ۳ با توجه به سناریو ۲ و افزایش برداشت از آبخوان، تعادل آبخوان مورد بررسی قرار گرفته است. در این سناریو تخلیه ماهانه از آبخوان با توجه به مقادیر تغذیه که از مدل MODFLOW گرفته شده است، محدود شده است. سناریو ۴ تعادل بخشی آبخوان بدون در نظر گرفتن طرح جمع‌آوری فاضلاب است و سناریو ۵ سناریوی مدیریت تقاضا است که با کاهش نیاز کشاورزی در این سناریو همراه است.

۵-۲- معیارهای ارزیابی

برای بررسی نتایج بدست آمده و ارزیابی هرگونه تغییر در تخصیص با استفاده از مدل، به شاخص‌هایی نیاز است که بتوان سیستم‌های منابع آب منطقه را در تأمین نیاز مورد ارزیابی قرار داد. به همین منظور در این مطالعه از شاخص‌های زیر استفاده شده است.

۵-۲-۱- شاخص اطمینان‌پذیری^۳ (RI)

اطمینان‌پذیری در یک سیستم بهره‌برداری منابع آب، یکی از کاربردی‌ترین معیارهای ارزیابی برای تحلیل سیستم‌های منابع آب می‌باشد که به دو صورت زمانی و حجمی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الف) اطمینان‌پذیری زمانی^۴

وضعیت سیستم در زمینه شکست و یا عدم شکست (تأمین نیازهای آبی و یا عدم تأمین آن)، با استفاده از این شاخص تحلیل می‌شود که

۵-۲-۲- وارد کردن اطلاعات مدل MODFLOW در مدل WEAP

بعد از مدل‌سازی آبخوان دشت تهران- کرج در مدل MODFLOW میزان سطح آب زیرزمینی و تغذیه/تخلیه مدل تعیین می‌گردد. نتایج مدل MODFLOW در هر گام زمانی مقادیر ورودی و خروجی به آبخوان را نشان می‌دهد. با استفاده از این مقادیر، مقدار ورودی خالص به آبخوان را در هر ماه با تفاضل مقادیر خروجی از ورودی به گره‌های

برای محاسبه آن از رابطه (۲) استفاده می‌گردد. این رابطه، بیان‌کننده نسبت تعداد کل ماه‌هایی که سیستم در زمینه تأمین آب با موفقیت روبه‌رو بوده به تعداد کل ماه‌های بهره‌برداری سیستم می‌باشد (Kjeldsen and Rosbjerg, 2004).

$$RI_t = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T} \quad (2)$$

که در رابطه فوق RI_t شاخص اطمینان‌پذیری زمانی، M تعداد کل وقایع شکست سیستم، $d(j)$ j امین واقعه شکست سیستم و T تعداد کل دوره‌های تعریف شده در سیستم می‌باشند.

ب) اطمینان‌پذیری حجمی^۵

این شاخص مقایسه‌ای است بین مصرف و نیاز واقعی در مقیاس سالانه که هم می‌تواند مبین مصرف بیش از اندازه در سیستم باشد و هم می‌تواند تنش‌های آبی مواجهه با آن را نشان دهد. رابطه (۳) نحوه محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد (Kundzewicz and Kindler, 1995):

$$RI_V = \frac{\int_0^T \min(Q_s(t), Q_D(t)) dt}{\int_0^T Q_D(t) dt} \quad (3)$$

که در آن RI_V شاخص اطمینان‌پذیری حجمی، $Q_s(t)$ حجم آب مصرفی که در واقع آب تأمین شده در زمان t بوده و $Q_D(t)$ بیان‌کننده حجم تقاضا در زمان t می‌باشند.

۲-۵-۲- شاخص پایداری در منابع^۶ (SI)

با استفاده از این شاخص می‌توان میزان پایداری منابع را مورد بررسی قرار داد و با استفاده از آن روند پایداری سیستم از منظر کمبودها را ارزیابی نمود. محاسبه این شاخص با استفاده از رابطه (۴) میسر می‌گردد (Xu et al., 2002):

$$SI = \frac{E - Q_D}{E} \quad (4)$$

که در آن E کل آب قابل دسترس می‌باشد.

۳-۵-۲- شاخص آسیب‌پذیری^۷ (VI)

این شاخص نشان‌دهنده الگوی مصرف سیستم در مقابل موجودی آن است که با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد (Raskin et al., 1992):

$$VI = \frac{Q_s}{S} \quad (5)$$

که در آن S موجودی سیستم است. هرچه VI بزرگتر باشد بیان‌کننده آسیب‌پذیری بیشتر خواهد بود.

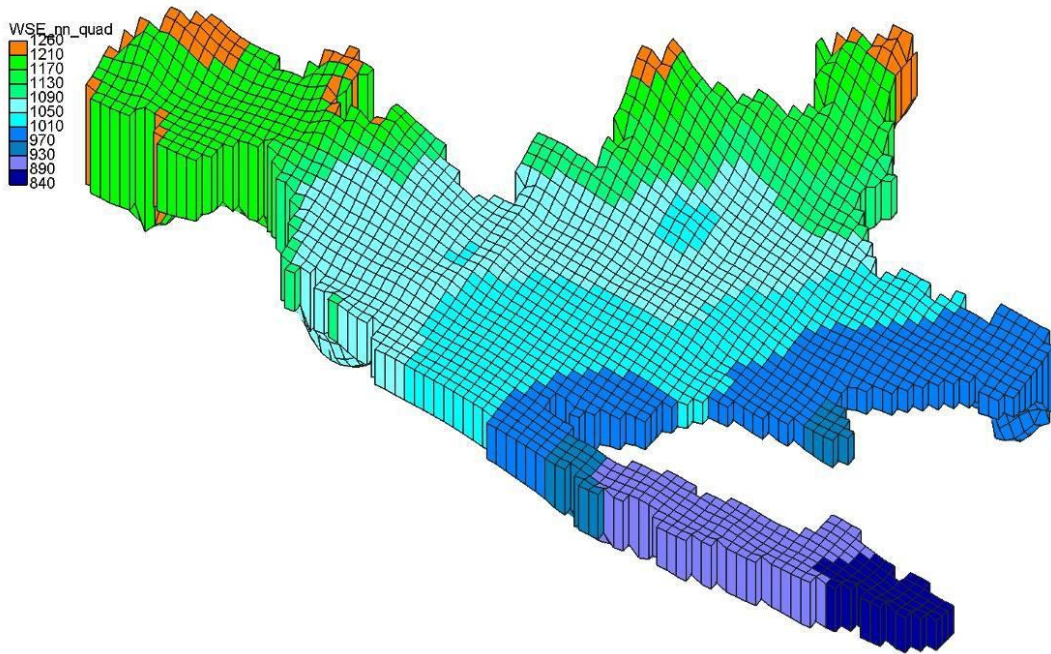
۳- نتایج

۳-۱- شبیه‌سازی کمی آبخوان

هدف اصلی از شبیه‌سازی کمی آبخوان، پیش‌بینی و بررسی تغییرات زمانی و مکانی سطح آب و احجام ورودی و خروجی به آبخوان در اثر تنش‌های مختلف وارد شده به آبخوان می‌باشد. برای ساخت مدل از اطلاعات ضخامت آبرفت، توپوگرافی سطح زمین و تراز سنگ کف، مشخصات فیزیکی، هیدرولیکی و هیدرودینامیکی آبخوان، مانند ضرایب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره استفاده شد. برای شبیه‌سازی، ابتدا منطقه موردنظر شبکه‌بندی شد. با توجه به وسعت منطقه، شبکه‌بندی استفاده شده برای مدل‌سازی آبخوان تهران- کرج دارای سلول‌هایی مربعی با ضلع یک کیلومتر در نظر گرفته شد. همچنین، با توجه به شکل محدوده مورد مطالعه و به منظور حداقل نمودن تعداد سلول‌های غیرفعال، سلول‌بندی محدوده مطالعاتی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به محورهای متداول در نظر گرفته شده است. بر این اساس، شبکه سلولی مورد استفاده برای مدل‌سازی به صورت شبکه‌ای متشکل از ۵۱۱۵ سلول (۹۳×۵۵) سلول در نظر گرفته شد. شبکه سلول‌بندی شده آبخوان در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳-۱-۱- پارامترهای ورودی مدل

مهمترین پارامترهای ورودی شامل جریان ورودی و خروجی زیرزمینی، تغذیه از طریق نزولات جوی، تغذیه از جریان‌های سطحی، تغذیه از طریق برگشت کشاورزی، تخلیه توسط چاه‌ها، تخلیه و تغذیه از قنوات و چشمه‌ها و تغذیه ناشی از فاضلاب‌های شهری و صنعتی است که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. میزان جریان‌های ورودی و خروجی آب زیرزمینی پس از تعیین مقاطع ورودی و خروجی و با بهره‌گیری از معادله داری دربارۀ جریان آب از لایه‌های متخلخل محاسبه گردید. در محدوده شبکه‌بندی آبخوان تهران مقدار کل جریان ورودی زیرزمینی برابر ۵۸۷/۲۲ میلیون متر مکعب و مقدار کل جریان خروجی زیرزمینی از محدوده برابر ۹۵/۲۱ میلیون متر مکعب محاسبه و برآورد گردید. به طور کلی نفوذ از طریق ریزش‌های جوی بر حسب شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی (میزان بارندگی، درجه حرارت، سرعت باد، رطوبت نسبی محیط، میزان تبخیر و بافت خاک سطحی و عمق آب زیرزمینی) تغییر می‌کند. با توجه به میزان متوسط ریزش‌ها و مساحت منطقه، حجم کل ریزش‌ها برابر ۲۹۹/۵۶ میلیون متر مکعب محاسبه شده است. حجم آب نفوذ یافته از ریزش‌های فوق برابر ۱۳/۸ درصد کل آن یا ۴۱/۳۴ میلیون متر مکعب در سال به دست آمده است.



شکل ۳- شبکه سلول‌بندی شده مدل MODFLOW برای منطقه مورد مطالعه تهران- کرج
Fig. 3- Tehran-Karaj study area MODFLOW grid cells

۳-۱-۲- اجرای مدل و کالیبراسیون آن در حالت ماندگار

در مرحله نخست، تنظیم دستی پارامترهای تراز آب و نفوذپذیری زهکش‌ها، تغذیه از سطح و هدایت هیدرولیکی در مدل انجام و خروجی‌های مدل با ترازهای چاه‌ها کنترل شدند. پس از این مرحله، عملیات کالیبراسیون خودکار برای مدل برای سال ۱۳۴۸ تا ۱۳۸۵ انجام شد. متغیر مورد استفاده در فرآیند کالیبراسیون خودکار در مطالعات جاری، هدایت هیدرولیکی و تغذیه از سطح در نظر گرفته شد. با توجه به قابلیت‌های مناسب نرم‌افزار GMS در کالیبراسیون مدل‌های عددی، از قابلیت Regularization در این نرم‌افزار برای کالیبراسیون مقادیر K در محدوده مدل‌سازی استفاده شد. مقادیر کالیبره شده K برای محدوده‌ی مدل‌سازی در شکل ۴ نمایش داده شده است.

بر اساس این شکل، بیشترین مقدار پارامتر هدایت هیدرولیکی در محدوده مطالعاتی به بیش از ۶۰ متر در روز می‌رسد که در محل تلاقی رودخانه‌های کن و چیتگر و نیز در محل مخروط افکنه رودخانه کرج واقع شده است. کمترین میزان هدایت هیدرولیکی نیز حدود ۳ متر در روز می‌باشد که به جنوب دشت تهران اختصاص دارد. همچنین، کالیبراسیون پارامتر تغذیه از سطح نیز با استفاده از قابلیت PEST نرم‌افزار به صورت همزمان با هدایت هیدرولیکی انجام شد. برای این کار، پلیگون‌های تغذیه از سطح، بر اساس نتایج مطالعات آب زیرزمینی مقاردهی اولیه شده و سپس با استفاده از قابلیت PEST، مقادیر بهینه این پارامتر برای کالیبره نمودن مدل عددی مشخص شد.

میزان نفوذ ناشی از برگشت آب کشاورزی با توجه به مطالعات گذشته حدود ۲۰ درصد از کل آب مصرفی در نظر گرفته شده و برابر با ۲۱۲/۵ میلیون متر مکعب محاسبه گردیده است. برای مدل‌سازی با محاسبه تعداد سلول‌های واقع در بخش کشاورزی، مقدار تغذیه کل از طریق برگشت آب کشاورزی بین این سلول‌ها تقسیم شده است. میزان تغذیه ماهانه هر سلول از آب برگشتی کشاورزی از ضرب کل تغذیه سلول در درصد توزیع ماهانه نیازهای آبی گیاهان به دست آمد. بر اساس اطلاعات موجود، تعداد ۶۲۰ رشته قنات در منطقه مورد مطالعه قرار دارد. میزان تخلیه از کل قنات‌ها در محدوده مطالعاتی برابر ۱۳۳/۹ میلیون متر مکعب می‌باشد. همچنین از کل تخلیه چشمه‌های محدوده مطالعاتی مقدار ناچیزی از آن معادل ۰/۰۳ میلیون متر مکعب در داخل محدوده بیابان آب زیرزمینی واقع شده است. میزان آب برگشتی ناشی از قنات برابر ۱۹/۷۲ میلیون متر مکعب و آب برگشتی ناشی از چشمه‌ها برابر ۰/۰۰۵ میلیون متر مکعب در سال تعیین شده است. با توجه به اطلاعات شرکت آب و فاضلاب تهران و نحوه مصارف آب، با مقایسه محدوده شبکه‌بندی آبخوان تهران، کل مصرف جهت شرب، صنعت و بهداشت ۱۶۳۸ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد که از این مقدار مصرف در حدود ۷۵ درصد به پساب تبدیل می‌شود. در صورتی که کل این پساب وارد چاه‌های فاضلاب شود، تقریباً مقدار ۷۰ تا ۷۵ درصد آن به آبخوان نفوذ می‌گردد. بنابراین، میزان ۹۰۵/۳ میلیون متر مکعب نفوذ به آبخوان در نظر گرفته شده است.

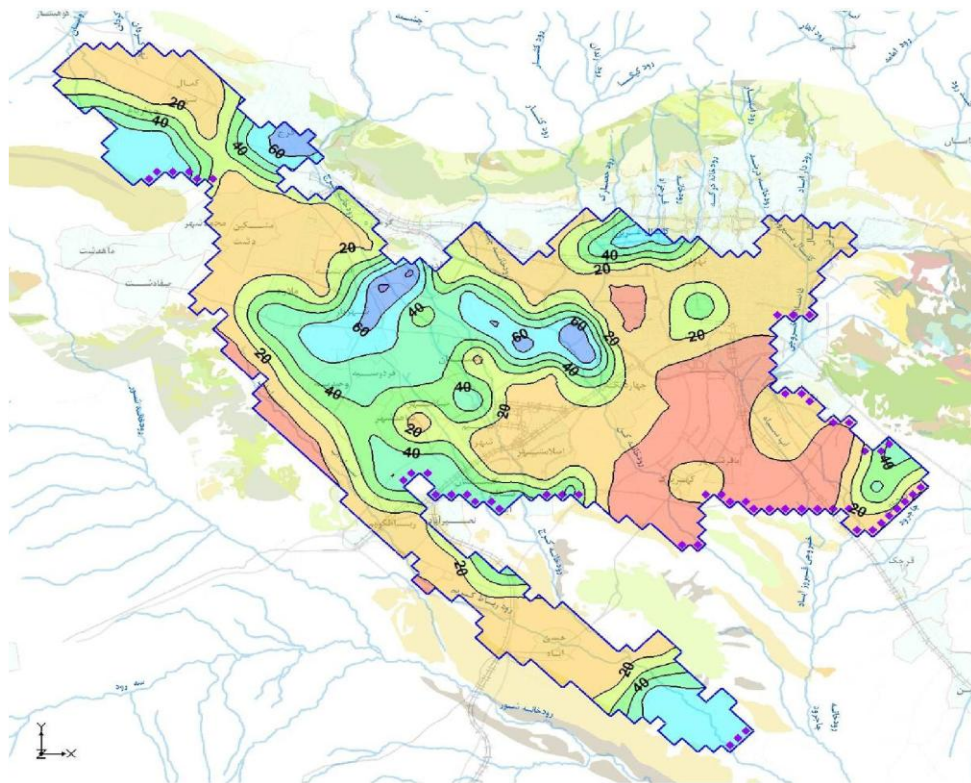


Fig. 4- Distribution of calibrated values of hydraulic conductivity (m/d)
 شکل ۴- توزیع مقادیر کالیبره شده هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)

حدود ۳۶ میلیمتر در روز و در مخروط افکنه رودخانه‌های درکه و فرحزاد، میزان تغذیه از سطح در حدود ۲۶ میلیمتر در روز به دست آمده است.

توزیع مقادیر کالیبره شده پارامتر تغذیه از سطح به آبخوان در شکل ۵ نمایش داده شده است. بر اساس این شکل، بیشترین مقدار تغذیه از سطح مربوط به رودخانه کن بوده و به حدود ۶۰ میلیمتر در روز می‌رسد. همچنین، در محل مخروط افکنه رودخانه کن، میزان تغذیه از سطح

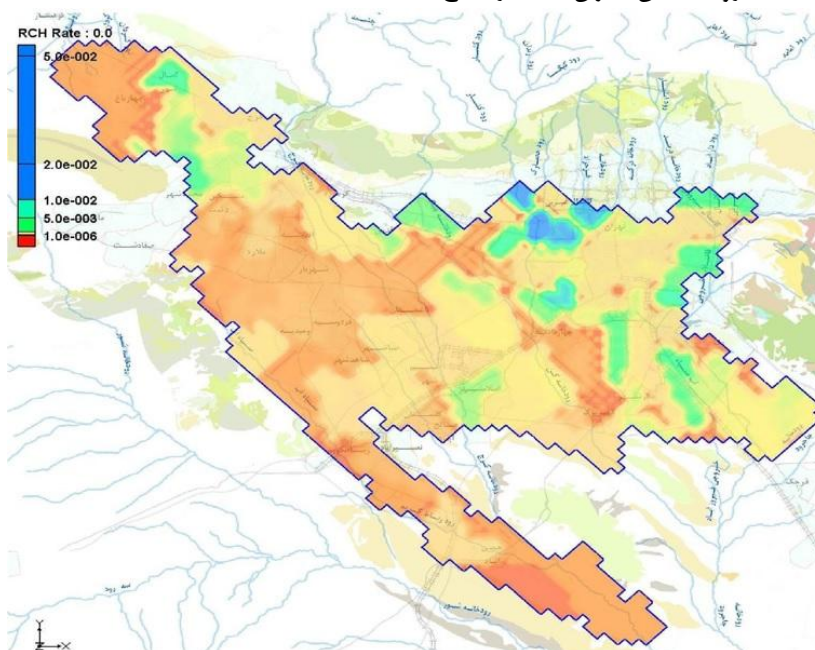


Fig. 5- Distribution of calibrated values of recharge (m/d)
 شکل ۵- توزیع مقادیر کالیبره شده تغذیه از سطح (متر بر روز)

۳-۱-۳- صحت‌سنجی مدل غیر ماندگار

برای تعیین کارایی مدل غیر ماندگار آب زیرزمینی، از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای مربوط به سال‌های آبی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵ (به مدت ۱۰ سال) استفاده شد. بر این اساس، مقادیر مرزی، مقادیر برداشت چاه‌ها و تغذیه از سطح آبخوان به صورت ماهانه با استفاده از داده‌های سال آبی موردنظر تهیه و به مدل وارد شد. در این مرحله، مدل عددی اجرا شده و نتایج به دست آمده با داده‌های واقعی مقایسه شد. نتایج حاصل از مدل عددی انطباق خوبی با مقادیر مشاهداتی داشت به طوری که بیشترین مقدار R^2 برابر ۰/۹۷ و کمترین آن ۰/۸۷ بدست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی می‌باشد.

۳-۲-۲- مدل‌سازی تخصیص منابع آب

در شبیه‌سازی حوضه تهران- کرج با استفاده از مدل WEAP، گره‌های تقاضا به تفکیک شرب و صنعت، کشاورزی و محیط زیست به مدل معرفی شدند. برای شبیه‌سازی یکپارچه دشت تهران- کرج و تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی به مناطق نیاز، علاوه بر تعریف گره‌های منابع آب سطحی (سد و رودخانه‌ها) آبخوان دشت تهران- کرج و شهریار نیز به عنوان گره آب زیرزمینی در مدل تعریف گردید. شکل ۶ مدل WEAP ایجاد شده دشت تهران- کرج را نشان می‌دهد. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوها آورده شده است.

۳-۲-۱- سناریوی ۱ (وضع موجود)

سناریو وضع موجود که با عنوان سال پایه در مدل تعریف می‌شود (سال ۱۳۴۸ تا ۱۳۹۶)، بیان‌کننده وضعیت موجود منطقه است. حجم مورد نیاز مصارف شرب، صنعت و کشاورزی سال پایه برای تمام سال‌ها وارد مدل شده است. نیاز محیط زیست در وضع موجود صفر منظور شده و اولویت نیازها به ترتیب شرب، صنعت و کشاورزی در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول ۱ درصد تأمین نیاز شرب از منابع سطحی حدود ۵۷ درصد و از منابع زیرزمینی در حدود ۴۳ درصد می‌باشد. نیاز صنعت به طور کامل از منابع زیرزمینی تأمین شده و برای مصارف کشاورزی نیز حدود ۷۰ درصد از منابع زیرزمینی و ۳۰ درصد نیز از منابع سطحی تأمین شده است.

۳-۲-۲- سناریوی ۲ (ادامه روند موجود تا سال ۱۴۲۰)

در سناریوی توسعه، طرح‌های مختلفی در منطقه مورد مطالعه به بهره‌برداری خواهند رسید که در نتایج مدل تأثیر خواهند گذاشت. از جمله مهمترین این طرح‌ها اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب شهر تهران می‌باشد.

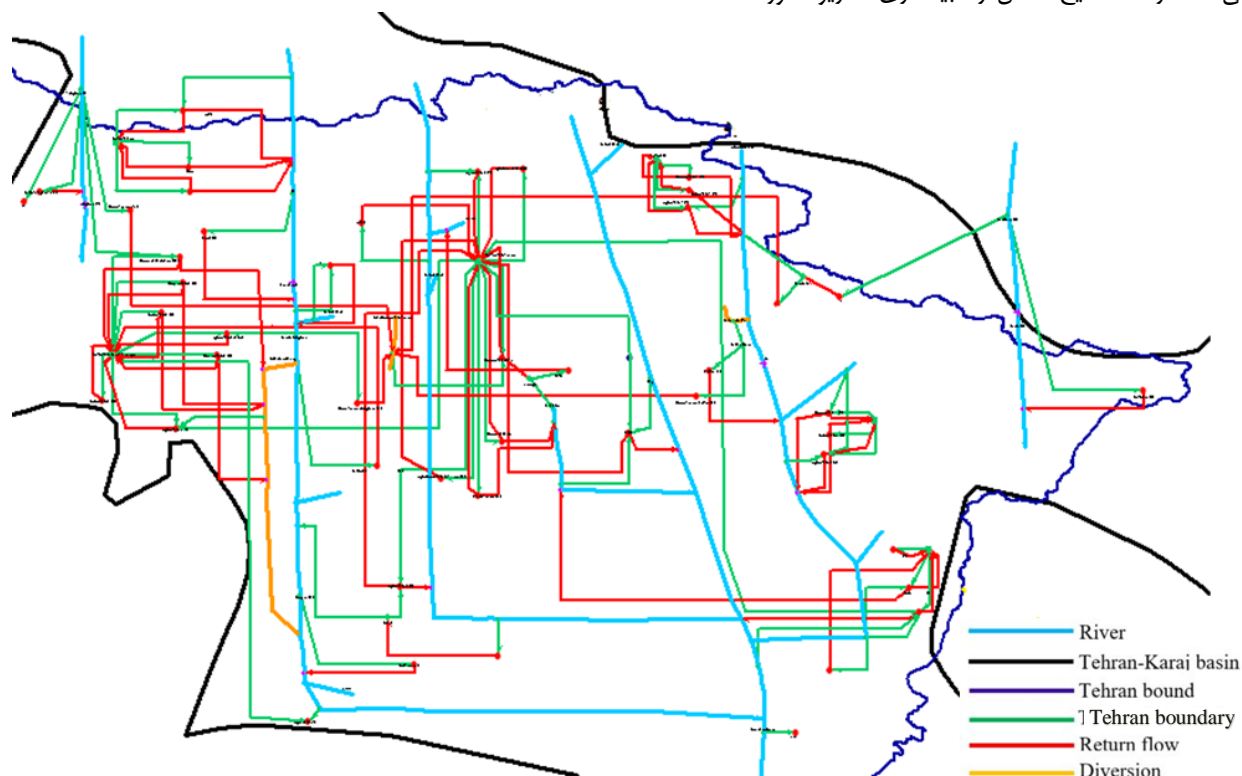


Fig. 6- Modeling of Tehran-Karaj plain in WEAP model

شکل ۶- مدل‌سازی دشت تهران- کرج در WEAP

۳-۲-۴- سناریوی ۴ (تعادل بخشی آبخوان بدون اجرای طرح فاضلاب)

در این سناریو منابع و مصارف همان منابع و مصارف سناریوی قبلی است فقط با این تفاوت که ۷۰ درصد آب برگشتی از شرب از طریق چاه‌های فاضلاب به آبخوان تخلیه شده و باعث تغذیه آن می‌شوند. در جدول ۱ مقادیر تأمین نیاز از منابع سطحی و زیرزمینی ارائه شده است. با توجه به جدول، ۴۸ درصد نیاز شرب از منابع زیرزمینی و حدود ۵۱ درصد از منابع سطحی تأمین می‌شود. نیاز کشاورزی به طور متوسط ۸۴ درصد تأمین شد که از این مقدار ۲۳ درصد از منابع سطحی و بقیه از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود. تأمین آب کشاورزی از پساب فاضلاب حذف شده و فقط درصد کمی از نهرهای فاضلاب به نیاز کشاورزی اختصاص داده می‌شود. در طول دوره مدل‌سازی حجم ۱۷ میلیون متر مکعب به ذخیره آبخوان اضافه شده و آبخوان تغذیه شده است.

۳-۲-۵- سناریوی ۵ (تعادل بخشی آبخوان و مدیریت تقاضا در بخش کشاورزی)

در سناریوی تعادل بخشی آبخوان، نیاز کشاورزی در حدود ۲۵ درصد در هر سال کمبود داشت. در این سناریو نیاز کشاورزی را کاهش داده تا در هر سال حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد تأمین شود. پتانسیل منابع آبی که در سناریوهای توسعه ثابت بوده و همچنین نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی را نشان می‌دهد، نیاز کشاورزی نسبت به سناریو تعادل بخشی ۴۰ درصد کاهش یافته تا درصد تأمین آب این نیاز در پایان سال به ۹۰ درصد برسد. درصد تأمین نیازهای شرب و صنعت بالای ۹۹ درصد و برای نیاز کشاورزی حدود ۹۱ درصد است. تغییرات حجم سالانه آب مخزن آبخوان برابر ۱۸ میلیون مترمکعب است.

با توجه به سناریوهای موجود، به دلیل برداشت‌ها از منابع آب زیرزمینی برای تأمین نیازها فرونشست در منطقه تهران- کرج رخ می‌دهد که در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است بیشترین میزان نشست حدود ۲۴ سانتی‌متر بوده که مقدار قابل توجهی می‌باشد.

۳-۳- ارزیابی عملکرد سیستم منابع آب

اثرات هر یک از سناریوهای فوق بر عملکرد منابع آب منطقه مورد مطالعه، با به کارگیری ۳ شاخص اطمینان‌پذیری (زمانی و حجمی)، پایداری منابع و آسیب‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت.

یکی از بزرگترین تصفیه‌خانه‌های در حال اجرا، تصفیه‌خانه جنوب تهران می‌باشد که قادر است سالانه ۲۴۶ میلیون متر مکعب فاضلاب را تصفیه نموده و برای کشاورزی جنوب تهران و دشت ورامین مورد استفاده قرار گیرد. مدول ۱ تا ۴ تصفیه‌خانه جنوب تهران در دست اجرا است و مدول ۵ تا ۶ این تصفیه‌خانه که قرار است سالانه حدود ۲۴۵۹۸۱ هزار متر مکعب پساب تولید کند، در حال توسعه می‌باشد. در این سناریو، مدول‌های ۱ تا ۶ این تصفیه‌خانه در نظر گرفته شده است. در سناریوی وضع موجود کسری مخزن آب زیرزمینی حدود ۵۶ میلیون متر مکعب بدست آمد. هدف اصلی این سناریو تعیین کسری مخزن آبخوان تهران- کرج با ادامه وضع فعلی تا سال ۱۴۲۰ با در نظر گرفتن طرح‌های توسعه می‌باشد. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که پساب فاضلاب نیز بخشی از نیازهای کشاورزی را تأمین می‌کند. در این سناریو ۴۷ درصد نیاز شرب توسط منابع زیرزمینی و حدود ۵۳ درصد توسط منابع سطحی تأمین می‌شود. مقدار آب مصرفی صنعت نیز به طور کامل از آب چاه‌ها تأمین می‌شود و برای بخش کشاورزی ۵ درصد نیاز تأمین شده توسط پساب فاضلاب، ۱۸ درصد آب‌های سطحی و حدود ۷۰ درصد از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود. در این سناریو نیازهای شرب و صنعت بالای ۹۹ درصد در هر سال تأمین می‌شوند اما نیاز کشاورزی در حدود ۹۳ درصد تأمین می‌شود. همچنین، نیاز زیست‌محیطی حدود ۴۲ درصد تأمین می‌گردد.

۳-۲-۳- سناریوی ۳ (تعادل بخشی آبخوان)

با ادامه روند موجود تا سال ۱۴۲۰ مشاهده شد که آبخوان تهران- کرج سالانه ۱۵۶ میلیون متر مکعب کسری مخزن خواهد داشت، در این سناریو هدف، متعادل کردن آبخوان تهران- کرج است به طوری که میزان تخلیه از آبخوان با میزان تغذیه آبخوان برابر باشد و فقط از حجم دینامیکی آبخوان برداشت شود. برای تعریف این سناریو در مدل، درصد آب برگشتی از مصرف شرب به فاضلاب از نتایج مدل MODFLOW وارد شده است. در این حالت ۶۰ درصد فاضلاب برگشتی شرب تهران به شبکه فاضلاب منتقل شده و ۴۰ درصد آن به آبخوان منتقل می‌شود. همچنین، مقدار برداشت از آبخوان محدود شده، ماکزیمم مقدار برداشت از آبخوان پس از اجرای مدل آب زیرزمینی، متناظر با تغذیه آبخوان در هر ماه وارد مدل می‌شود که باعث می‌شود در هر ماه نتوان بیشتر از مقدار ورودی به آبخوان برداشت نمود. همچنین، در این سناریو نیاز زیست‌محیطی بعد از شرب و صنعت اولویت‌بندی شده است. لذا نیاز شرب، صنعت و زیست‌محیطی بالای ۹۰ درصد تأمین شده است. اما نیاز کشاورزی به دلیل اینکه در اولویت آخر قرار داشت و عمده منبع تأمین آن منابع زیرزمینی بود حدود ۷۷ درصد تأمین نیاز شد.

Table 1- Results for simulation scenarios (values in million cubic meters)
جدول ۱- نتایج کلی سناریوها (مقادیر بر حسب میلیون متر مکعب)

#	Water resources potential (Mm ³)			Demands (Mm ³)			Supply (Mm ³)																						
	Surface	GW	Total	Drinking	Industry	Environment	Drinking	Drinking	Drinking	Industry	Industry	Industry	Deficit (%)	GW	Surface water	Agriculture	Agriculture	Agriculture	Deficit (%)	Surface	Surface	Environment	Environment	Deficit (%)	GW	GW	GW	Storage deficit	
1	1245.9	6024	7497.4	1370	267.2	1822.4	0	575.8	793.5	0.05	266.8	0	0.15	1264	488	0	0	0	3.8	0	0	0	0	0	0	1264	488	0	-55
2	1252.7	6733	8619.4	2338.7	552.6	1887.5	217.5	1116.2	1218.9	1	552.5	0	0.02	1301.2	350.3	111.3	6	6	6	93.2	210.8	3.01	2	2	2	1301.2	350.3	111.3	-156
3	1252.7	6595	8481.4	2338.7	552.6	1887.5	217.5	1151.1	1207.5	1.2	539.9	12.7	0.02	968.6	373.1	112.1	23.01	23.01	23.01	210.8	3.01	2	2	2	2	968.6	373.1	112.1	12
4	1252.7	6750.3	8636.7	2338.7	552.6	1887.5	217.5	1141.7	1217.1	0	532.6	0	0	1127.6	449	13	15.8	15.8	15.8	210.8	3.01	2	2	2	2	1127.6	449	13	2
5	1252.7	2126.3	8462.7	2338.7	552.6	1132.5	217.5	1151.1	1207.5	0.01	539.9	12.7	0	757	251.1	99.1	3	3	3	210.8	3.01	2	2	2	2	757	251.1	99.1	18

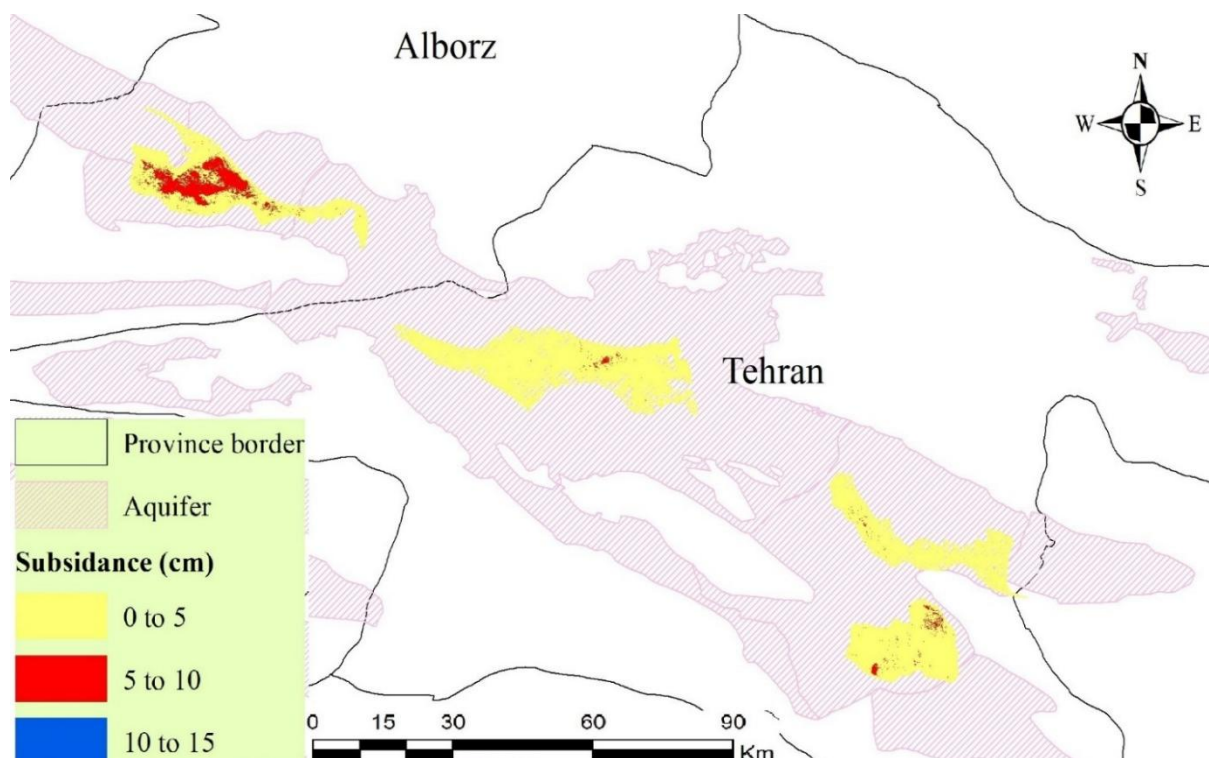


Fig. 7- Tehran-Karaj basin subsidence (1398)
 شکل ۷- میزان فرونشست دشت تهران - کرج (سال ۱۳۹۸)

۳-۳-۱- شاخص اطمینان پذیری

الف) اطمینان پذیری زمانی

این شاخص با محاسبه تعداد شکست‌ها در هر گره در طول دوره شبیه‌سازی تعیین گردید. میزان متوسط این شاخص برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی در هر سناریو در جدول ۲ آمده است. اطمینان‌پذیری برای مصرف کشاورزی در سناریو ۳ کمترین مقدار خود را داشته که به دلیل محدود کردن برداشت از آبخوان به این مقدار رسیده است و سناریو ۴ باعث افزایش این شاخص شده است که تأمین بیشتر نیاز کشاورزی را نتیجه می‌دهد. در سناریو ۵ که کاهش ۳۰ درصدی نیاز کشاورزی را به همراه داشت این مقدار افزایش یافته است.

ب) اطمینان‌پذیری حجمی

این شاخص با در نظر گرفتن حجم آب تخصیص داده شده به هر یک از گره‌های نیاز، نسبت به تقاضای کامل آن محاسبه می‌شود. در جدول ۳ برای سناریو شماره ۱ و ۲ نیاز شرب اولویت اول، صنعت اولویت دوم و کشاورزی اولویت سوم می‌باشد. در این دو سناریو اولویت زیست‌محیطی اولویت آخر است. در سناریوهای ۳ و ۴ و ۵ اولویت شرب و صنعت ثابت مانده، و اولویت کشاورزی اولویت آخر در نظر گرفته شده است. در تمام سناریوها درصد تأمین نیاز کشاورزی در دوره خشکی که میزان تغذیه از سطح آبخوان نسبت به دوره مرطوب کاهش می‌یابد و همچنین آبدهی رودخانه‌ها نسبت به دوره مرطوب کمتر است، کاهش یافته است.

Table 2- Average temporal reliability index in each scenario

جدول ۲- متوسط شاخص اطمینان‌پذیری زمانی در هر سناریو

Need	Supply (%)				
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Agriculture	93.86	87.89	63.96	68.87	86.83
Drinking	99.9	94.45	100	100	100
Industry	99.75	99.95	100	100	100

فاضلاب ۷۰ درصد فاضلاب برگشتی از مصارف شرب به آبخوان می‌ریزد و باعث تغذیه آن می‌شود و در نتیجه باعث تأمین بیشتر نیاز کشاورزی در این سناریو می‌شود.

۳-۳-۲- شاخص پایدار در منابع (SI)

با استفاده از این شاخص می‌توان پایدار بودن سیستم منابع آبی حوضه را در برابر تقاضا مورد بررسی قرار داد. به طور ساده تفاوت این شاخص با شاخص قبلی این است که در SI مبنای مقایسه، منابع حوضه با تقاضا است و در RI مقایسه تقاضا و عرضه مدنظر می‌باشد. نتایج در جدول ۴ آورده شده است. هر چه نتایج این شاخص به ۱ نزدیکتر باشد پایداری منابع در مقابل تقاضای آب بیشتر است.

کمترین درصد تأمین نیاز کشاورزی مربوط به سناریو ۳ یعنی تعادل بخشی آبخوان است که در این سناریو برای این که برداشت از آبخوان بیش تر از حجم دینامیک نباشد، مقدار تخلیه از آبخوان محدود می‌گردد و چون عمده منبع تأمین نیاز کشاورزی چاه‌ها هستند در نتیجه تأمین نیاز در کشاورزی با کمبود مواجه می‌شود. در سناریو ۴ نیز با مدیریت نیاز کشاورزی و کاهش ۴۰ درصدی آن در هر سال درصد تأمین این نیاز حدوداً ۹۰ درصد می‌رسد.

نیاز شرب و صنعت در طول تمام سناریوها اولویت تأمین اول و دوم هستند و به این دلیل در تمام سناریوها و در تمام دوره‌ها بالای ۹۹ درصد تأمین شدند. میانگین سالانه تأمین نیاز کشاورزی در سناریو ۳ نسبت به سناریو ۴ کمتر است، به دلیل این که بدون اجرای طرح

Table 3- Average percentage of supply in each scenario

جدول ۳- متوسط درصد تأمین نیاز برای هر یک از سناریوها

Scenario	Need	Supplied in each month (%)												
		Mehr	Aban	Azar	Dey	Bahman	Esfand	Farvardin	Ordibehesht	Khordad	Tir	Mordad	Shahrivar	Annual average
1	Agriculture	98.4	99.9	100	99.8	99.6	99.8	99.6	99.1	97.7	92	88.2	93.4	97.3
	Drinking	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Industry	100	100	100	100	100	100	100	100	99.9	99.7	99.7	99.9	99.9
2	Agriculture	98.9	99.1	97.6	95.7	96.3	99.8	99.7	98.9	94.6	84.6	84.6	96.5	95.5
	Drinking	98.6	98.9	100	100	100	100	100	100	100	99.5	99.3	98.5	96.5
	Industry	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3	Agriculture	90.1	90.7	94.3	86	87	90.3	91.5	74.4	50.4	39.5	45.2	83.7	76.9
	Drinking	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Industry	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4	Agriculture	81.7	90.7	94.4	86	87	90.3	87.1	87.8	81	61.8	64.8	78	82.6
	Drinking	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Industry	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
5	Agriculture	91.4	91.2	98.5	85.9	86.1	91.8	92.9	96.5	95.5	88.4	78.8	92	90.8
	Drinking	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Industry	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

۳-۳-۳- شاخص آسیب‌پذیری (VI)

میزان آب تأمین شده در برابر میزان آب قابل دسترس در منطقه نشان‌دهنده آسیب‌پذیری سیستم‌های منابع آب می‌باشد. نتایج بدست آمده از این شاخص در جدول ۵ ارائه شده است.

هرچه این شاخص نزدیک به صفر باشد آسیب‌پذیری منابع آبی حوضه در مقابل تقاضا کمتر است. برای دشت تهران- کرج در سناریو ۱ مقدار شاخص آسیب‌پذیری به طور میانگین برابر ۰/۸۵، برای سناریو ۲ برابر

Table 4- Sustainability index values for different scenarios

جدول ۴- مقادیر شاخص پایداری منابع برای سناریوهای مختلف

Scenario	SI min	SI max	SI average
1	-0.2	0.47	0.135
2	-2.7	0.3	-1.2
3	0.4	0.5	0.45
4	0.37	0.52	0.44
5	0.5	0.53	0.52

۱/۵، برای سناریو ۳ برابر ۰/۵۳ و برای سناریوهای ۴ و ۵ برابر با ۰/۵ می باشد که نشان دهنده آسیب پذیر بودن منابع آبی حوضه در وضع توسعه است.

اضافه برداشت از آبخوان در سناریو ۲، برداشت از آبخوان فقط به حجم دینامیکی آبخوان محدود و همچنین اولویت تأمین نیاز کشاورزی بعد از محیط زیست فرض شد. نیازهای شرب، صنعت و محیط زیست تأمین شدند اما نیاز کشاورزی ۷۶ درصد تأمین شده و دچار کمبود خواهد بود. مخزن آبخوان در این سناریو هر سال ۱۲ میلیون متر مکعب تغذیه شده و شاخص های پایداری و آسیب پذیری بطور قابل ملاحظه ای تغییر می کنند.

Table 5- Vulnerability index values for different scenarios
جدول ۵- مقادیر شاخص آسیب پذیری منابع برای سناریوهای مختلف

Scenario	VI	VI	VI
	min	max	average
1	0.6	1.1	0.85
2	0.5	3.1	1.805
3	0.4	0.6	0.53
4	0.5	0.55	0.5
5	0.48	0.52	0.5

در سناریو ۴ تأمین نیازهای شرب، صنعت و محیط زیست مثل سناریو قبل بود اما نیاز کشاورزی حدود ۸۵ درصد تأمین شد که نسبت به سناریوی قبل افزایش یافته است. پایداری منابع به طور میانگین ۰/۴۱ محاسبه شد که نسبت به سناریوی قبلی بیشتر است. در سناریو ۵ تأمین نیازهای شرب، صنعت و محیط زیست نسبت به قبل تغییری نکرد. نیاز کشاورزی بدون در نظر گرفتن تخصیص از پساب فاضلاب، حدود ۸۲ درصد و با در نظر گرفتن تخصیص به ترتیب ۸۲ و ۸۹ درصد تأمین شد. پایداری منابع در این سناریو حدود ۰/۵۲ بود که بالاترین مقدار را داشته و پایداری منابع آبی منطقه در این سناریو را نشان می دهد.

۴- خلاصه و نتیجه گیری

مطالعه حاضر با هدف برنامه ریزی منابع آب در حوضه تهران- کرج و تخصیص آب از منابع سطحی و زیرزمینی (رویکرد تلفیقی) تحت سناریوهای مختلف و اعمال اثر طرح های مختلف توسعه از جمله طرح جامع جمع آوری فاضلاب به مناطق نیاز انجام گرفت. مقدار تأمین نیازها در هر سناریو و درصد تأمین از منابع سطحی و زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت و همچنین شاخص های ارزیابی برای هر سناریو محاسبه شد. نتایج سناریو ۱ که وضع موجود سیستم است نشان داد که نیازهای شرب و صنعت بالای ۹۹ درصد و نیاز کشاورزی حدود ۹۶ درصد تأمین شده است. با توجه به تأمین این نیازها در انتهای دوره مدل سازی حدود ۵۵ میلیون متر مکعب برای هر سال کسری مخزن آب زیرزمینی وجود دارد.

سناریو ۵ نسبت به همه سناریوها با توجه به شاخص های ارزیابی بهترین سناریو برای مدیریت منابع آبی حوضه تعیین شد. به طور کلی می توان نتیجه گرفت در آینده و با در نظر گیری اجرای طرح های توسعه چالش جدی برای تأمین نیازها ایجاد خواهد شد که نیازمند به مدیریت و برنامه ریزی مناسب است. پروسه طی شده در طول این پژوهش می تواند در سایر حوضه های آبریز ملی و بین المللی استفاده گردد. از نتایج این تحقیق می توان در مدیریت و برنامه ریزی منابع آب شهری حوضه تهران کرج با دید بلند مدت استفاده نمود.

پی نوشت ها

- 1- California Value Integrated Network Model
- 2- Water Evaluation and Planning System
- 3- Reliability Index
- 4- Temporal Reliability Index
- 5- Volumetric Reliability Index
- 6- Sustainability Index
- 7- Vulnerability Index

پایداری منابع در این سناریو ۰/۱۲ و شاخص آسیب پذیری برابر ۰/۸۵ بود. در سناریو ۲ که ادامه روند موجود با اجرای طرح فاضلاب و طرح های انتقال بین حوضه ای و همچنین احداث سد ماملو است، تأمین نیازهای شرب و صنعت بالای ۹۹ درصد، نیاز زیست محیطی ۴۳ درصد و نیاز کشاورزی ۹۴ درصد تأمین شد. کسری مخزن هر ساله آبخوان حدود ۱۵۶ میلیون متر مکعب و شاخص آسیب پذیری در این سناریو در سال های انتهای مدل سازی به مقدار ۳ نیز رسید که نشان دهنده عدم وجود منابع برای تأمین نیازها است. لذا با وجود اضافه شدن سد ماملو و طرح انتقال بین حوضه ای وضعیت منابع آبی حوضه ناپایدار خواهد بود. در سناریو سوم با توجه به

۵- مراجع

- Amini A, Javan M, Eghbalzadeh A, Ghasemi M (2017) An assessment of water resources management using the WEAP Model in the Gamasyab Watershed, the Province of Kermanshah, Iran. *Water Resources Engineering* 10(32):13-18 (In Persian)
- Harbaugh A W, Banta E R, Hill M C, McDonald M G (2000) Modflow-2000, the U.S. geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. Open-file report, U. S. Geological Survey (92):134
- Hatamkhani A, Moridi A (2019) Multi-objective optimization of hydropower and agricultural development at river basin scale. *Water Resources Management* 33(13):4431-4450
- Hatamkhani A, Moridi A (2021) Optimal development of agricultural sectors in the basin based on economic efficiency and social equality. *Water Resources Management* 35(3):917-932
- Jenkins M, Lund JR (2004) Economic values for conjunctive use and water banking in Southern California. *Journal of Water Resources Research* 40(3):1-15
- Kanooni A, Hashemi shahedani S, Anvari S (2019) Conjunctive use of surface water and groundwater for optimal water allocation of reservoir dam under water resources shortage (Case study: Yamchi reservoir dam, Ardabil). *Iran-Water Resources Research* 15(1):59-75 (In Persian)
- Kalbali E, Ziaee S, Mardani Najafabadi M, Zakerinia M (2019) Assessment of climate change impacts on optimum cropping pattern: a case study of Ghareso basin in Golestan province. *Iran-Water Resources Research* 15(3):251-271 (In Persian)
- Kjeldsen T R, Rosbjerg D (2004) Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. *Hydrological Sciences Journal* 49(5):767
- Mahjoub H, Mohammadi M, Parsinejad M (2011) Conjunctive use modeling of groundwater and surface water. *Journal of Water Resource and Protection* 3(10):726-734
- Nazari Mejdard H, Moridi A, Yazdi J, KhazaiePoul A (2019) Sustainability outlook of domestic and agricultural demand of Dusti dam considering climate change scenarios and impact of Salma dam. *Iran-Water Resources Research* 15(3):17-32 (In Persian)
- Rao S, Murty Bhallamudi B, Thandaveswara S, Mishra G C (2004) Conjunctive use of surface and groundwater for coastal and deltaic systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130(3):255-267
- Raskin P, Hansen E, Zhu J, Iwra M (1992) Simulation of water supply and demand in the Aral Sea region. *Water International* 17(2):55-67
- Rezaei F, Safavi H R, Zekri M (2017) A hybrid fuzzybased multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use and optimal multi-crop pattern planning. *Water Resources Management* 31(4):1139-1155
- Rezapour Tabari M (2012) Conjunctive use of surface and groundwater with inter-basin transfer approach: Case study Piranshahr plain. *Journal of Water and Wastewater* 22(4):103-113 (In Persian)
- Safavi H R, Falsafioun M (2017) Conjunctive use of surface water and groundwater resources under deficit irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 143(2):05016012
- Sieber J, Purkey D (2007) WEAP21 User Guide. http://sei-us.org/Publications_PDF/SEI-WEAP21UserGuide-07.pdf
- Shamsai A, Forghani A (2011) Conjunctive use of surface and ground water resources in arid regions. *Iran-Water Resources Research* 7(2):26-36 (In Persian)
- Vedula S, Mujumdar P P, Sekhar G C (2005) Conjunctive use modeling for multicrop irrigation. *Agricultural Water Management* 73(3):193-221
- Xu Z. X, Takeuchi K, Ishidaira H, Zhang X W (2002) Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach. *Water Resources Management* 16(3):239-261
- Yates D, Sieber J, Purkey D, Huber-Lee A (2005) WEAP21-A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International* 30(4):487-500
- Yevjevich V (1995) Effects of area and time horizons in comprehensive and integrated water resources management. *Water Science and Technology* 31(8):19-25
- Zamanipour M., Saadatpour M, Zahabiyoun M (2018) Simulation-optimization approach based on meta-model in optimal design of inter-basin water transfer system. *Iran-Water Resources Research* 14(1):198-215 (In Persian)