تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال یازدهم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۴
Volume 11, No. 1, Spring & Summer 2015 (IR-WRR)
۲۱-۳۱

# تدوین یک مدل پویای برنامه‌ریزی به منظور تخصیص منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود

آزاده احمدی[۱]*، نیما زاده‌وکیلی[۲]، حمیدرضا صفوی[۳] و سیدعلی اوهب یزدی[۴]

## چکیده

با توجه به مسئله بحران آب و توزیع غیر یکنواخت آن از لحاظ مکانی و زمانی، استفاده تلفیقی بهینه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و برداشت متعادل از دو منبع سطحی و زیرزمینی، امری ضروری است. با توجه به توسعه مدل WEAP به عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی انعطاف پذیر، جامع و شفاف در ارزیابی شرایط مختلف بلند مدت حوضه از این مدل به منظور شبیه‌سازی منابع آب حوضه و توسعه سناریوهای مختلف بهره‌برداری از منابع آب استفاده شده است. جهت شبیه‌سازی آبخوان‌های منطقه از مدل MODFLOW استفاده گردید. در گام بعدی جهت در جهت ارزیابی اثرات سیاست‌های تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی، مدل MODFLOW در مدل WEAP فراخوانی شده و بوسیله یک ارتباط پویا بین دو مدل، مدل WEAP-MODFLOW تشکیل شد. سپس اثر سناریوهای مختلف مدیریتی، بر میزان تأمین نیازهای شرب، صنعت، کشاورزی و زیست محیطی منطقه و سطح ایستابی در آبخوان بررسی شده است. نتایج مدل تدوین شده نشان می‌دهد که در نظرگرفتن شرایطی از جمله مدیریت مصرف از طریق اصلاح الگوی مصرف، اجرای طرحهای توسعه و محدودیت توسعه کشاورزی امکان بهره‌مندی بلند مدت از آبخوان‌های محدوده به عنوان منبع مطمئن و مکمل آب سطحی و همچنین بهبود وضعیت آبخوان‌ها را در پی خواهد داشت.

**کلمات کلیدی:** شبیه‌سازی حوضه آبریز، مدل آبهای زیرزمینی، بهره‌برداری تلفیقی آبهای سطحی و زیرزمینی، MODFLOW، WEAP.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۷ بهمن ۱۳۹۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۲۲ تیر ۱۳۹۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۲- کارشناس ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۴- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
*- نویسنده مسئول

# Development of a Dynamic Planning Model for Surface and Groundwater Allocation, Case Study: Zayandehroud River Basin

*A. Ahmadi [1*], N. Zadehvakili[2], H.R. Safavi[3] and S.A. Ohab Yazdi[4]*

## Abstract

Due to the water crisis and its non-uniform spatial and temporal distribution, it is essential to consider the conjunctive use of surface and groundwater resources. Considering the capability of WEAP model as a flexible, comprehensive, and transparent tool for assessing long-term conditions of the river-basin systems, it is utilized for simulating Zayandehroud water resources and developing different scenarios. Also MODFLOW model is used to simulate the aquifer system in this basin. In order to assess the imapcts of conjunctive use of surface and ground water resources, the developed MODFLOW model is imported into the WEAP model and WEAP-MODFLOW model is generated through a dynamic link.

The impacts of different management scenarios on domestic, industrial, agricultural, and environmental water demands as well as the groundwater table are evaluated. The results showed that the demand management through modifying consumption patterns, executing water development projects, and constraining the agricultural development can offer the aquifers as long lasting and reliable water resources. Improving aquifer's condition is also achieved acoordingly.

***Keywords:*** River basin simulation, Groundwater model, Surface and groundwater conjunctive use, WEAP, MODFLOW.

Received: February 16, 2014
Accepted: July 13, 2014

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Email: aahmadi@cc.iut.ac.ir.
2- M.Sc. Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
4- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
*- Corresponding Author

## ۱- مقدمه

افزایش تقاضای آب، توزیع ناهمگون زمانی و مکانی آب شیرین به لحاظ کمی از یک طرف و محدودیت‌ها و مشکلات روز افزون کیفی از طرف دیگر، تأمین منابع آب را در بسیاری از کشورها به یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر تبدیل نموده است. یکی از راهکارهای نوین در دهه‌های اخیر در بحث مدیریت منابع آب، استفاده تلفیقی[۱] از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشد. برداشت متعادل از دو منبع سطحی و زیرزمینی به نحوی که هم نیازها به طرز مطلوب تخصیص داده شوند و هم منابع آبی موجود با بحران مواجه نشوند، امری ضروری و حیاتی خواهد بود. استفاده تلفیقی در بحث کمی در واقع با هدف تعیین مقدار برداشت و توزیع زمانی و مکانی بهره‌برداری از هر یک از منابع به منظور کاهش میزان کمبودها، کاهش اثرات پراکندگی توزیع زمانی جریان رودخانه، ذخیره آب در سفره‌های آب زیرزمینی و مدیریت تقاضا در زمان خشکسالی می‌باشد.

در گذشته مطالعات زیادی با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی منابع سطحی و زیرزمینی انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. Hantush and Marino (1989) مدل بهینه‌سازی با قیود احتمالی را به منظور حداکثر کردن برداشت از آبخوان در سیستم آبراهه- آبخوان با حفظ محدودیت‌های موجود بر روی بارهای هیدرولیکی آبخوان و کاهش جریان آبراهه در طول افق طراحی با سطح اطمینان مشخص ارائه نمودند. Peralta et al. (1991) با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی مدلی ارائه کردند که ضمن شبیه‌سازی رفتار فیزیکی سفره با اعمال قیودی که پارامترهای مختلف سطح زیر کشت محصولات مختلف را بیان می‌نمود، مقدار سود خالص حاصل از کشت محصولات مختلف را با استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی بیشینه می‌کرد. Kholghi et al. (1995) دو مدل بهینه‌سازی چندمنظوره با هدف تخصیص آب سطحی و زیرزمینی در منطقه بیستون در کرمانشاه ایران پیشنهاد کردند که در مدل اول هدف حداکثر برداشت ممکن آب و در مدل دوم هدف حداقل نمودن هزینه‌ها تعریف شد. Emch and Yeh (1998) روش مدیریت تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی را با اهداف حداقل نمودن نفوذ آب شور به سفره آب زیرزمینی از دریا و نواحی ساحلی و کمینه نمودن هزینه استحصال آب مورد نیاز به کار بردند. Azaiez (2002) یک مدل تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای برای بهره‌برداری تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی به همراه تغذیه مصنوعی ارائه کرد و نشان داد که تحت چند فرض ساده، مسئله می‌تواند به عنوان یک برنامه غیرخطی با محدودیت‌های خطی فرموله شود.

Karamouz et al. (2007) یک روش کار برای بهره‌برداری تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی با هدف کنترل نوسانات سطح آب و کاهش هزینه‌های پمپاژ ارائه نمودند و در آن ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و شبکه مصنوعی عصبی به کار گرفته شد. صفوی و همکاران (۱۳۸۶) اندرکنش آبخوان- رودخانه را با مدل‌های کمی MODFLOW[۲] و کیفی MT3DMS[۳] شبیه‌سازی نمودند. در این تحقیق فرآیندهای انتقال، پخشیدگی، واکنش‌های شیمیایی و جذب به صورت پیوسته و در محیط متخلخل و آبراهه در نظر گرفته شده است.

Bazargan-Lari et al. (2009) یک روش برای تدوین قوانین بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در زمان واقعی، ارائه دادند. در روش ارائه شده، مدل‌های شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی MODFLOW و پخش و انتقال آلاینده MT3D با مدل بهینه‌سازی NSGA-II تلفیق شدند تا منحنی‌های تعامل بین اهداف به دست آیند. برای تعیین منحنی‌های تعامل بین اهداف، از الگوریتم ژنتیک چندمنظوره NSGA-II و در رفع اختلاف بین تصمیم‌گیرندگان از تئوری رفع اختلاف یونگ استفاده شد.

Triana et al. (2010) به شبیه‌سازی یک سیستم آبخوان- رودخانه پرداختند و سپس از کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی و تقریب ضرایب پاسخ آبخوان استفاده نمودند. ایشان نیز مدل‌سازی کمی و کیفی آبخوان مربوطه را با استفاده از مدل‌های MODFLOW و MT3DMS انجام دادند. همچنین از مدل GEOMODSIM به عنوان یک مدل شبیه‌سازی آب‌های سطحی و ارتباط این مدل با شبکه عصبی مصنوعی برای ارزیابی سناریوهای مدیریتی مختلف استفاده شده است.

رضاپور طبری و همکاران (۱۳۸۸ و ۱۳۹۱) مدل‌های بهره‌برداری تلفیقی با هدف حداقل نمودن میزان کمبود در تأمین نیازهای آبی با توجه به محدودیتهای منابع آبی موجود، تدوین کردند که از ترکیب منطق فازی و روش بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی تصادفی برای در نظر گرفتن عدم دقت در پارامترهای تأثیرگذار بر تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی استفاده شد. پارامترهای مؤثر مذکور شامل ضرایب ضریب ذخیره ویژه، میزان تغذیه و تخلیه طبیعی آبخوان معرفی شدند.

Moharram et al. (2011) برای جلوگیری از کاهش سطح آب زیرزمینی و جلوگیری از آسیب رسیدن به آبخوانی در غرب کشور مصر برای به‌دست آوردن مقدار بهینه پمپاژ و همچنین تعداد بهینه چاه‌ها در منطقه از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در کنار مدل MODFLOW استفاده نمودند. ایشان با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف به بررسی وضعیت آب زیرزمینی منطقه پرداخته و در نهایت با توجه به بررسی سناریوها و انتخاب بهترین سناریو مقدار بهینه پمپاژ از چاه‌های منطقه تعیین گردید. Rezapour Tabari and Soltani (2013) از یک مدل بهره‌برداری تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی با هدف حداکثرسازی حداقل اطمینان پذیری سیستم، کمینه کردن هزینه‌های ناشی از عدم تأمین نیاز، احیای آبخوان، عدم تخطی از ظرفیت مخزن در حال بهره برداری ارائه کردند. برای نمایش منحنی تبادل بین این اهداف از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیر پست در مقایسه با الگوریتم ژنتیک مرحله‌ای استفاده شده است. Reazpor Tabari and Yazdi (2014) مدلی برای تخصیص از منابع آبی موجود حوضه کلاس با توجه به اولویتهای منابع و مصارف و محدودیتهای تراز سطح آب و با هدف تأمین نیازهای آبی داخل حوضه‌ای، کاهش میزان آبی خروجی از مرز ایران و افزایش انتقال آب به حوضه مجاور (حوضه دریاچه ارومیه) تدوین کردند.

در این مقاله از یک مدل شبیه‌سازی به همراه یک مدل برنامه‌ریزی منابع آب در سطح حوضه به منظور بررسی اثرات سناریوهای مختلف مدیریتی استفاده شود. مدل شبیه‌سازی مدل MODFLOW می‌باشد که سطح آب زیرزمینی را در مطالعه موردی دشت نجف‌آباد پیش‌بینی می‌کند. مدل برنامه‌ریزی حوضه آبریز WEAP[5] انتخاب شده است که قابلیت لینک با مدل شبیه‌سازی آبخوان را داشته است. سپس اثر سناریوهای مدیریتی شامل مدیریت تقاضا بر سطح آب در آبخوان و اثرات زیست‌محیطی آن به کمک مدل‌های توسعه داده شده بررسی شده است. در اغلب تحقیقات گذشته در مدل‌سازی حوضه آبریز، آبخوان به صورت توده‌ای درنظر گرفته شده است و شبیه‌سازی توزیعی در مدل‌سازی حوضه آبریز کمتر استفاده شده است. نوآوری این مقاله در ایجاد یک ارتباط پویا میان مدل‌های شبیه‌ساز آب زیرزمینی و آب سطحی و همچنین ایجاد ارتباط سلول‌های مدل آب زیرزمینی به عناصر مدل آب سطحی، در کنار تخصیص منابع آب سطحی حوضه به گره‌های مختلف در مدل شبیه‌ساز آب سطحی است. در اینصورت می‌توان وضعیت سطح ایستابی آبخوان نجف‌آباد به عنوان یکی از حساس‌ترین آبخوانهای حوضه آبریز زاینده‌رود به منابع آب سطحی را در اثر سناریوهای مدیریتی در هر نقطه بررسی نمود.

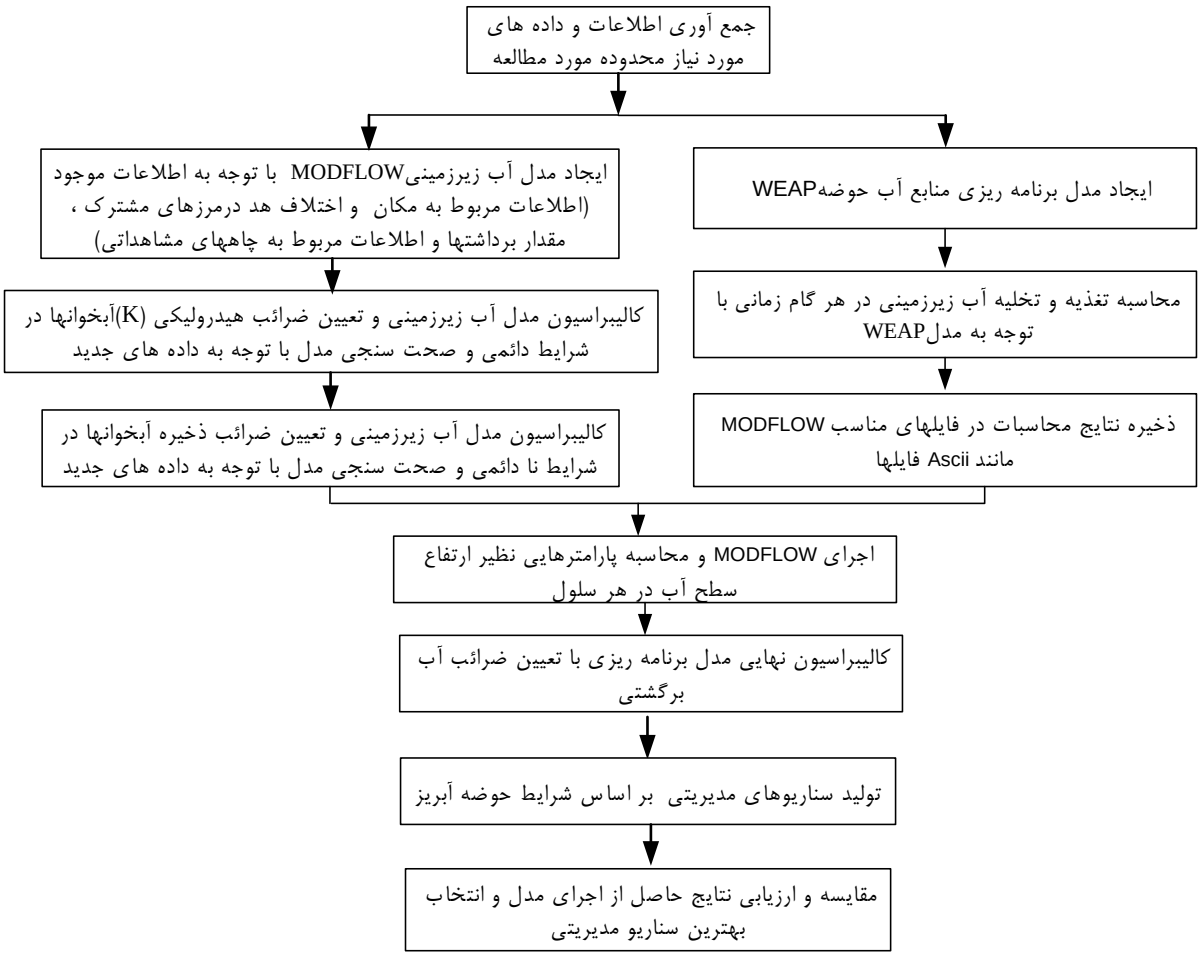
## ۲- روش انجام مطالعه

رویکرد اصلی تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. تدوین دو مدل شبیه‌سازی آبهای زیرزمینی و برنامه‌ریزی آبهای سطحی دو گام اصلی آن می‌باشد. جهت کالیبراسیون مدل MODFLOW، نیاز به اطلاعاتی نظیر موقعیت مکانی مرز مشترک آبخوان‌ها و اختلاف هد در آنها، مقدار بارش منطقه و نفوذ آن، مرز مشترک جریان آب سطحی با آبخوانها، اطلاعات مربوط به چاههای مشاهداتی و مقادیر برداشت می‌باشد. بعد از جمع‌آوری اطلاعات ورودی و خروجی آبخوان، مدل مورد نظر جهت کالیبراسیون آماده می‌شود در مرحله اول کالیبراسیون در حالت دائمی[6] انجام گرفته و مقدار ضرایب هیدرولیکی (K) تعیین می‌گردد. در ادامه در شرایط نادائمی[7] مقادیر ضرایب ذخیره آبخوان‌ها (S) تعیین شده و در پایان برای هر دو حالت صحت‌سنجی انجام می‌شود. شاخصی که جهت کالیبراسیون مدل انجام می‌گیرد اختلاف هد پیزومترهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشد که باید حداقل شود. مدل ایجاد شده در MODFLOW به عنوان یک مدل جدید وارد نرم افزار WEAP شده و با توجه به اطلاعات موجود در ایستگاههای هیدرومتری، کالیبراسیون نهایی با تعیین ضرایب بازگشتی کشاورزی، صنعت و شرب انجام می‌شود. در ادامه با توجه به مدل ایجاد شده سناریوهای مورد نظر تدوین شده و نتایج آن استخراج و با هم مقایسه می‌شوند.

### ۲-۱- مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی

در سال‌های اخیر برای توسعه و کالیبراسیون معادلات آب زیرزمینی از بسته‌های نرم افزاری مختلف استفاده می‌گردد. از جمله مدل‌های شبیه‌سازی آب زیرزمینی مدل MODFLOW است که اولین بار در سال ۱۹۸۴ تحت عنوان مدل جریان سه بعدی تفاضل‌های محدود[8] ارائه گردید. این مدل در طول زمان تغییراتی یافت که سرانجام به عنوان MODFLOW به وسیله Donald and Harbauh (1998) ارائه شد.

هدف از حل معادله جریان آب زیرزمینی در این نرم‌افزار، تعیین ارتفاع سطح ایستابی آب زیرزمینی و غلظت متغیرهای کیفی 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.




**شکل ۱- روند انجام تحقیق**

این نرم‌افزار از جمله مدل‌های معتبری است که قابلیت‌های آن در کارهای تحقیقاتی توسط محققین مورد ارزیابی قرار گرفته است.

معادله جریان آب‌زیرزمینی مورد استفاده در این نرم‌افزار که سه بعدی بوده و از ترکیب معادله پیوستگی و معادله دارسی حاصل می‌گردد، در دستگاه مختصات کارتزین و در محیط اشباع به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S_0 \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (۱)$$

در رابطه فوق $S_0$ ضریب ذخیره مخصوص، $h$ پتانسیل یا هد، $x, y, z$ معرف دستگاه مختصات کارتزین و مقادیر $K_x$، $K_y$، $K_z$ ضرایب هدایت هیدرولیکی به ترتیب در راستای $x$، $y$ ، $z$ می‌باشد.

## ۲-۲- مدل برنامه‌ریزی حوضه آبریز

حوضه آبریز واحد طبیعی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بوده که سه عنصر اصلی منابع مانند رودخانه‌ها، سفره‌های آب زیرزمینی، نیازها مانند زمین‌های کشاورزی، صنعتی و اجزای ارتباطی مانند ایستگاه‌های تصفیه و تأسیسات استفاده مجدد چرخش جریان آب تشکیل شده است. برای شبیه‌سازی سیستم منابع و مصارف آب، مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب (که به عنوان سیستم‌های پشتیبانی در تصمیم شناخته می‌شوند) قابل کاربرد هستند. نمونه‌هایی از این مدل‌ها شامل MODSIM، AQUATOOL، RIBASIM[۹]، WARGI-SIM[۱۰] و WEAP می‌باشند.

در این تحقیق با توجه به توانایی‌های مدل WEAP در ایجاد ارتباط پویا با مدل آب زیرزمینی، این مدل به عنوان مدل منتخب برای شبیه‌سازی حوضه مورد نظر در کنار مدل MODFLOW به عنوان مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. نرم‌افزار

WEAP، در سال ۱۹۸۸ و با هدف تبدیل شدن به ابزاری برای برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، جامع و شفاف به منظور ارزیابی پایداری تقاضاهای حال حاضر آبی و الگوهای تأمین آب و ارزیابی شرایط مختلف بلند مدت مختلف توسعه یافت. اولین کاربرد اصلی در منطقه دریای آرال در سال ۱۹۸۹ و با حمایت موسسه تازه تأسیس محیط زیست استکهلم صورت گرفت. از مزایای نرم افزار WEAP می‌توان به قابلیت استفاده در سطوح مختلف مقیاس زمانی و مکانی، اجرای مدل بر اساس سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، توانایی ایجاد، مدیریت، ارزیابی و مقایسه سناریوهای مختلف، نحوه تخصیص آب در آن مبتنی بر اولویت‌های تخصیص و همچنین توانایی استفاده از بسته‌های خروجی مدل MODFLOW و ایجاد یک ارتباط پویا بین مدل آبهای زیر زمینی و سطحی می‌باشد (Huber, 2008).

مدل WEAP بر اساس معادلات پایه بیلان آبی عمل کرده و آن را می‌توان در سیستم‌های شهری و کشاورزی، حوضه‌های مستقل یا سیستم‌های آبی پیچیده به کار برد. علاوه بر این، WEAP محدوده زیادی از مسائل مانند تحلیل نیاز هر بخش، حفاظت آب، حقابه‌ها و اولویت‌های تخصیص و شبیه‌سازی آب‌های سطحی و زیرزمینی را پوشش می‌دهد و هدفی که این مدل دنبال می‌کند حداکثر کردن پوشش نیازها می‌باشد.

مدل شبیه‌ساز WEAP یک منبع آب زیرزمینی را فقط به صورت یک مخزن با یک حجم ماکزیمم و یک حجم مینیمم در نظر می‌گیرد و سایر جزییات مربوط به آب‌های زیرزمینی در مدل WEAP دیده نمی‌شود. اما اگر از یک مدل آب زیرزمینی مانند MODFLOW کمک گرفته شود تا بتوان یک آبخوان را به صورت گسترده مدل نمود، آنگاه این امکان وجود دارد که مدل MODFLOW در مدل WEAP مورد استفاده قرار گرفته و سناریوهای مختلف در آن تدوین شود. این بدین مفهوم است که مدل کردن جزییات یک آبخوان در مدل WEAP امکان پذیر نیست اما فراخوانی یک مدل آبخوان گسترده در آن ممکن است. در این مدل به منظور برقراری ارتباط بین WEAP و MODFLOW برای هر گام زمانی اطلاعات مدل WEAP وارد مدل MODFLOW می‌شود و پس از شبیه‌سازی، اطلاعاتی نظیر ارتفاع سطح ایستابی برای انجام سایر محاسبات به WEAP باز می‌گردد. اتصال پویای دو مدل WEAP و MODFLOW به وسیله ایجاد این ارتباط برقرار می‌شود. در مدل WEAP این امکان وجود دارد که گروهی از سلول‌های موجود در محدوده مدل، به گره‌های آب زیرزمینی در WEAP متصل شوند، یا آب سلول‌های مشخصی در محدوده مدل به طور یکسان برای سایت تقاضای آب بهره‌برداری شوند و آب برگشتی هم به‌طور یکسان به همان سلول‌ها برگردد. به عبارتی، وجود شبکه سلول‌های مدل، امکان ارتباط مدل آب زیرزمینی و مدل WEAP و قابیلت مدیریت بهره‌برداری از آبخوان به شکل منطقه‌ای را فراهم آورده است.

## ۳-منطقه مورد مطالعه

حوضه زاینده‌رود که قسمتی از حوضه آبریز تالاب گاوخونی است دارای وسعت ۲۶۹۱۷ کیلومتر مربع می‌باشد و در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۰۲- ۵۰ تا ۴۵- ۵۲ و عرض‌های جغرافیایی ۱۵- ۳۱ تا ۴۵- ۳۳ شمالی قرار دارد. رودخانه زاینده‌رود به عنوان بزرگ‌ترین رودخانه در فلات مرکزی ایران در این حوضه واقع گردیده است که از دامنه‌های شرقی ارتفاعات زاگرس میانی سرچشمه گرفته و در جهت عمومی غرب به شرق جریان می‌یابد. این رودخانه در تأمین آب شرب، صنعت و کشاورزی منطقه مرکزی ایران نقش مهمی دارد. به طوری که تأمین آب شرب قریب به ۵ میلیون نفر از ساکنان این منطقه در ۴ استان اصفهان، چهار محال بختیاری، یزد و مرکزی و همچنین تأمین آب صنایع بزرگ ملی به عهده این رودخانه می‌باشد. این رودخانه همچنین تأمین آب کشاورزی دشت‌های بزرگی همچون لنجانات، مبارکه، نجف آباد، برخوار، مهیار و رودشتین را در وسعتی بالغ بر ۲۰۰ هزار هکتار عهده دار می‌باشد. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش تقاضا و پراکندگی بیشتر بارندگی در حوضه، عدم تعادل بین عرضه و تقاضای آب بوجود آمده که تأثیرات جبران‌ناپذیری بر روی منطقه مورد مطالعه گذاشته است[۱۴].حوضه آبریز زاینده‌رود مثال بسیار روشنی از یک حوضه تحت تنش آبی تاریخی می‌باشد که در پنجاه سال گذشته در آن سعی شده است یک انطباق منطقی بین عرضه و تقاضای آب ایجاد شود اما همواره با توسعه منابع آب در سطح حوضه آبریز زاینده رود و افزایش عرضه آب، بلافاصله حوضه با افزایش تقاضا روبرو گردیده است.

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق شامل مناطق پایین‌دست سد، دشت‌های شش‌گانه کشاورزی لنجانات، مبارکه، نجف آباد، برخوار، مهیار و رودشتین ، شهر اصفهان و چند شهر مهم حواشی رودخانه زاینده‌رود تا محل باتلاق گاوخونی است که از پایین‌دست سازه سد آغاز شده و تا باتلاق گاوخونی ادامه می‌یابد، می‌باشد (شکل۲). در این مقاله به دلیل اهمیت زیر حوضه نجف آباد در تامین نیاز آبی کشاورزی محدوده، وجود اندرکنش بالا بین آب سطحی و زیرزمینی در این آبخوان و همچنین وجود داده‌های در دسترس برای

مدل‌سازی آبخوان، آبخوان نجف‌آباد بصورت گسترده و توزیعی مدل‌سازی شده است.

در سال نرمال ۸۵-۸۴ معادل ۱۶۸۴/۷ میلیون متر مکعب از منابع آب سطحی در بخش کشاورزی حوضه زاینده‌رود مصرف شده و ۳۳۵۰/۷ میلیون متر مکعبی از سفره‌های آب زیرزمینی تأمین شده است. مصارف آب در بخش کشاورزی حوضه آبریز نجف‌آباد به دو بخش برداشت از آب سطحی و زیرزمینی اختصاص دارد. با توجه به محدودیت منابع آب سطحی در این حوضه حدود ۲۹ درصد از کل مصارف کشاورزی از آب سطحی تأمین شده و مابقی نیازهای کشاورزی از آب زیرزمینی تأمین می‌گردد (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۹۲).

در سال نرمال ۸۵-۸۴ میزان آب برداشتی دشت نجف‌آباد از آب سطحی توسط شبکه‌های آبیاری مدرن و انهار سنتی برابر ۳۴۷ میلیون متر مکعب و میزان آب برداشتی از آب زیرزمینی برابر ۸۳۱/۵ میلیون متر مکعب بوده است که همین امر باعث افت شدید آب در سطح آب زیرزمینی این دشت شده است. طول دوره مدل‌سازی این حوضه آبریز برای کالیبراسیون برابر با ۷ سال و برای برنامه‌ریزی ۸ سال در نظر گرفته شده است. همچنین در این مطالعه پنج آبخوان لنجانات، نجف‌آباد، مهیار شمالی، اصفهان- برخوار و کوهپایه-سگزی مورد بررسی قرار گرفته است که آبخوان نجف‌آباد به صورت گسترده و سایر آبخوان‌ها به صورت نقطه‌ای مدل‌سازی شده‌اند. مشخصات آبخوان‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

## ۴- نتایج

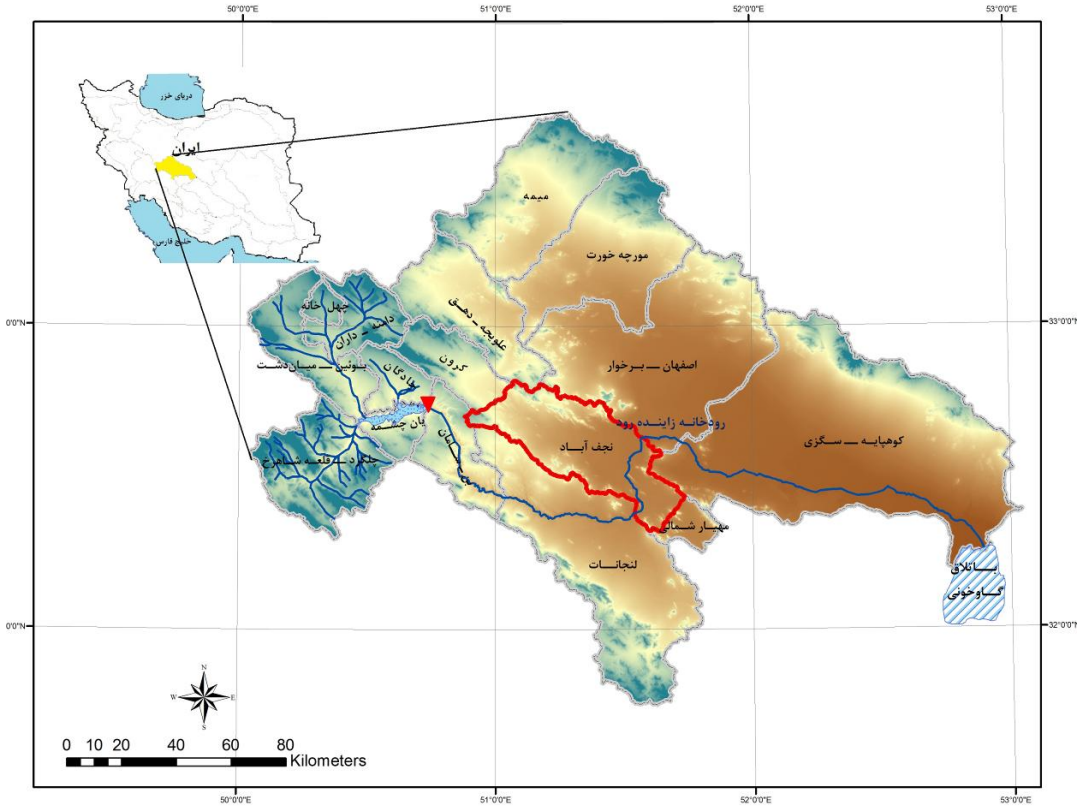
پس از پیاده‌سازی پیکره‌بندی حوضه در مدل WEAP، مدل شماتیکی که شامل مسیر رودخانه از سد زاینده‌رود تا باتلاق گاوخونی، گره‌های برداشت آب زیرزمینی، گره‌های مربوط به سایت‌های تقاضا کانال‌های آبیاری دشت نجف‌آباد و همچنین سلول‌های لینک شده آب زیرزمینی با مدل WEAP ایجاد شده است. آبخوان‌های دشت‌های کوهپایه- سگزی، اصفهان- برخوار، لنجانات و مهیار شمالی در مدل WEAP به صورت یک مخزن با یک گره مدل شده‌اند. اما آبخوان دشت نجف‌آباد به صورت گسترده و توزیعی مدلسازی شده است. شمایی از آبخوان مدل‌شده دشت نجف‌آباد در نرم‌افزار MODFLOW در شکل ۳ نشان داده شده است.

مدل متصل شده WEAP-MODFLOW این امکان را فراهم می‌کند که با اتصال سلول‌های معینی از بین سلول‌های فعال مدل MODFLOW به عناصر WEAP مدیریت آبخوان با تقسیم منطقه به زیر بخش‌های مختلف انجام پذیر باشد. منظور از اتصال بین این دو مدل این است که برای هر گام زمانی اطلاعات مدل WEAP وارد مدل MODFLOW شود و پس از شبیه‌سازی در MODFLOW اطلاعاتی نظیر ارتفاع سطح ایستابی برای انجام سایر محاسبات به WEAP باز گردد. در شکل ۳ نمایی از حوضه آبریز به همراه مدل‌سازی توزیعی آبخوان نجف‌آباد نشان داده شده است. سایر آبخوان‌های حوضه آبریز که تامین نیاز آبی آنها از هر دو منبع آب سطحی و زیرزمینی انجام می‌شود، به صورت متمرکز مدل‌سازی شده است.

به منظور اطمینان از نتایج مدل WEAP-MODFLOW نتایج مدل MODFLOW در شبیه‌سازی مقادیر سطح آب در ۵۲ چاه مشاهداتی در محدوده آبخوان دشت نجف‌آباد، و مدل WEAP در شبیه‌سازی وضعیت میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت‌های دیگر حوضه آبریز و دبی جریان در سه ایستگاه هیدرومتری لنج، موسیان و ورزنه با نتایج تاریخی آن مقایسه شده است.

**جدول ۱- مشخصات آبخوانهای محدوده مورد مطالعه**

| آبخوان | مشخصات آبخوان | | راندمان آبیاری موجود (٪) | آب برگشتی کشاورزی (٪) | آب برگشتی صنعت (٪) | آب برگشتی شرب (٪) | ضریب نفوذ از رودخانه به آبخوان |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | مساحت($Km^2$) | ضریب ذخیره | | | | | |
| کوهپایه- سگزی | ۴۵۰۰ | ۰/۰۳۵ | ۴۸/۵ | ۳۴/۶ | ۵۷/۵ | ۸۰/۱ | ۳/۱ |
| اصفهان برخوار | ۱۴۸۶ | ۰/۰۵ | ۴۹/۲ | ۱۹/۶ | ۵۷/۶ | ۷۵ | - |
| لنجانات | ۹۶۵ | ۰/۰۴ | ۴۱/۱ | ۱۴/۵ | ۶۰ | ۸۱ | ۸ |
| مهیار شمالی | ۱۴۱ | ۰/۰۷ | ۴۲/۱ | ۱۸/۲ | ۵۰ | ۹۱ | - |
| نجف آباد | ۸۳۵ | ۰/۰۵ | ۴۷/۶ | ۲۳/۵ | ۵۹/۹ | ۸۳ | ۱۳/۲ |




**شکل ۲- حوضه آبریز زاینده‌رود و محدوده مطالعاتی نجف‌آباد واقع در آن**

در ادامه در شکل ۴ نمونه‌ای از کالیبراسیون مدل MODFLOW در یک چاه مشاهده‌ای و شکل ۵ نمونه‌ای از نمودارهای کالیبره مدل WEAP-MODFLOW را در ایستگاه آب‌سنجی لنج نشان می‌دهد. به منظور تخمین خطا بین نتایج مدل و مقادیر مشاهداتی از ضریب همبستگی و خطای ریشه متوسط مربعات[11] که از رابطه زیر قابل محاسبه است، استفاده شده است. هرچه این آماره کمتر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(y_t - \hat{y}_t)^2}{n}} \qquad (۲)$$

ضریب همبستگی و خطای ریشه متوسط مربعات برای تغییرات تراز سطح ایستابی در شکل ۴ به ترتیب ۹۴ درصد و ۲/۲ متر و آورد رودخانه در شکل ۵ به ترتیب ۹۹ درصد و ۱۱/۸ میلیون متر مکعب می‌باشد.

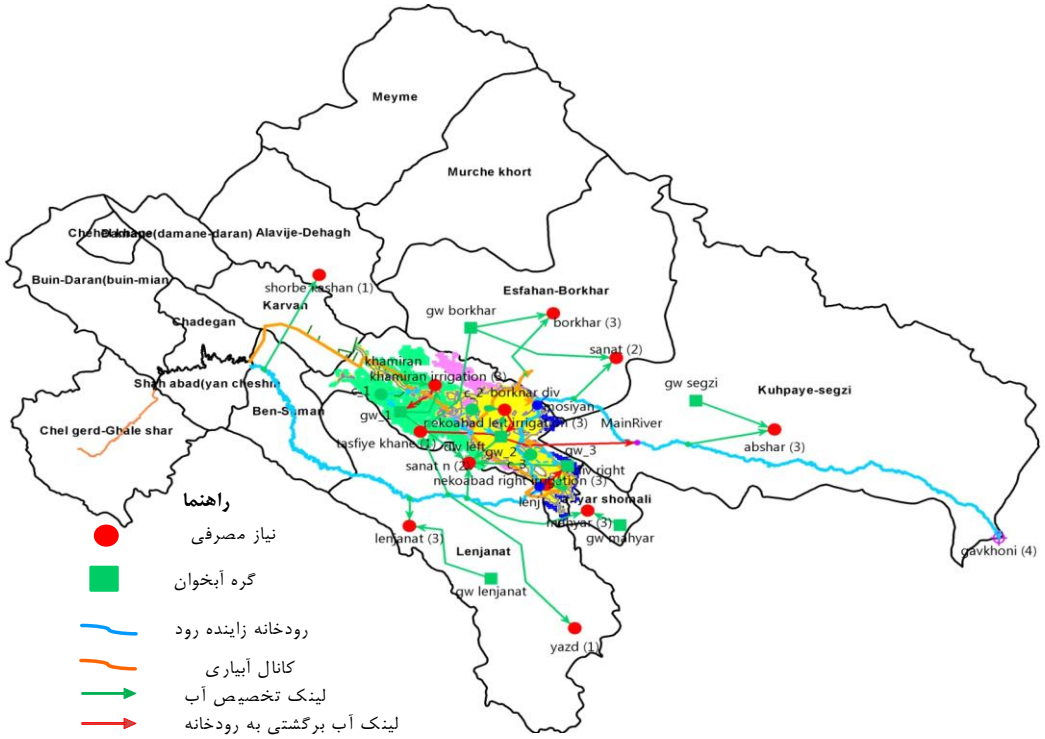
در ادامه با بررسی شرایط حوضه آبریز، وضعیت حوضه در آینده در قالب سه سناریو بررسی شده است. مشخصات سه سناریو در جدول ۱ ارائه شده است.

سناریو اول: در این سناریو فرض شده است که وضع موجود ادامه پیدا کند و آبدهی به صورت تاریخی در نظر گرفته شده، راندمان کشاورزی علیرغم توسعه کشاورزی بدون ارتقاء و همچنین توسعه سازه‌ای آتی حوضه و طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای به بهره‌برداری نرسد. لازم به ذکر است که اولویت تخصیص آب بر اساس مدیریت تاریخی در حوضه به ترتیب به بخش‌های شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست مبنای سیاست تخصیص آب در مدل در نظر گرفته شده است.

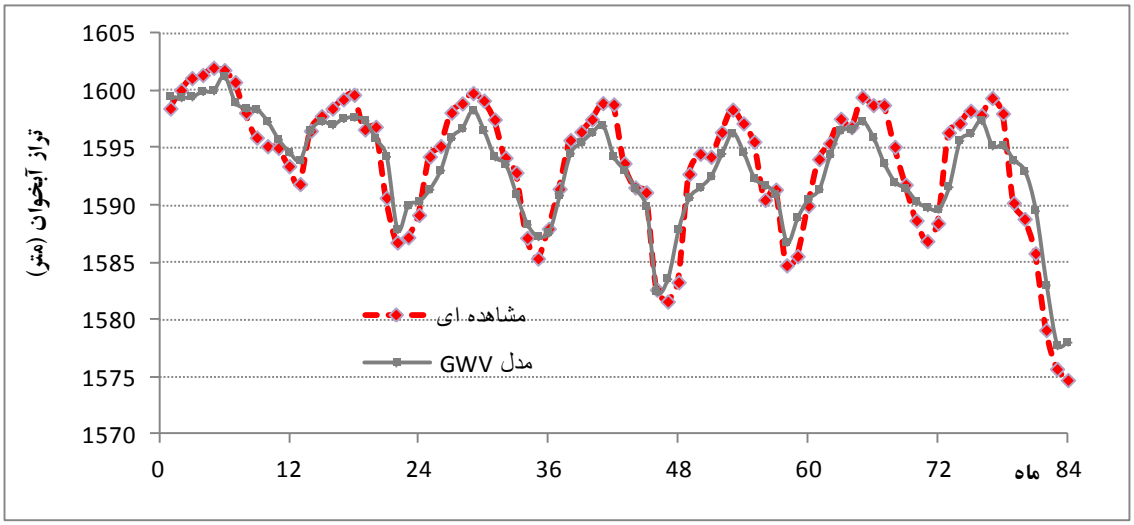
سناریو دوم: در این سناریو شرایط همانند سناریو اول بوده با این تفاوت که مصرف شرب و صنعت به شرایط مطلوب یعنی کاهش ۲۰ و ۱۰ درصدی به ترتیب در صنعت و شرب رسیده و راندمان کشاورزی با وجود توسعه کشاورزی اصلاح شود. همچنین فرض شد که مقدار برداشت از آبخوان‌ها در هر سال به اندازه تغذیه آبخوان در همان سال محدود گردد.

سناریو سوم: این سناریو همانند سناریو دوم می‌باشد با این تفاوت که طرح انتقال آب بهشت‌آباد که سالانه حدود ۲۰۰ میلیون متر مکعب

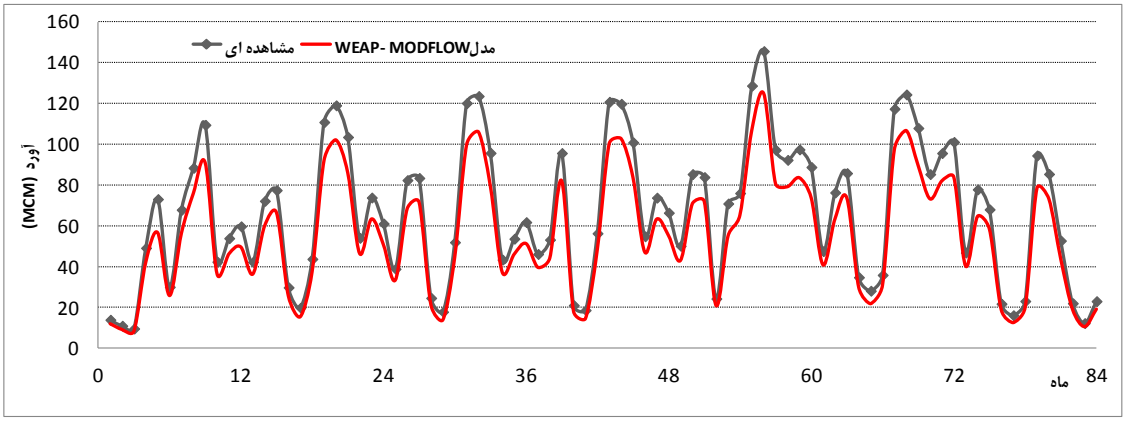
آب برای مصارف داخل حوضه را در بر خواهد داشت در نظر گرفته می‌شود و توسعه کشاورزی در این سناریو به وقوع نمی‌پیوندد و شرایط کشاورزی مشابه وضع موجود می‌باشد. اولویت تخصیص آب در حوضه به ترتیب به بخش‌های شرب، صنعت، محیط زیست و کشاورزی مبنای سیاست تخصیص آب در مدل در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از سناریوهای مختلف در شکل‌های ۶ و ۷ و جدول ۳ ارائه شده است. نتایج حاصل از مدل در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که نیازهای شرب و صنعت با توجه به اولویت بالاتر نسبت به بخش کشاورزی تا حداکثر ممکن تأمین شده است. نتایج به‌دست آمده از مدل در سناریو اول حاکی از افت شدید در سطح آب در آبخوان‌های محدوده مورد مطالعه می‌باشد که خسارات جبران ناپذیری را به این آبخوان‌ها متحمل می‌نماید.




**شکل ۳- شبکه‌بندی و جزییات دشت نجف آباد در مدل WEAP**




**شکل ۴- تغییرات تراز سطح ایستابی مدل در مقایسه مقادیر واقعی در یک چاه مشاهده‌ای**




**شکل ۵- میزان آورد رودخانه محاسبه شده در مدل و مشاهده‌ای در ایستگاه آب سنجی لنج**

**جدول ۲- مشخصات سناریوهای در نظر گرفته شده جهت ارزیابی سناریوهای مدیریتی**

| سناریوها | راندمان کشاورزی | | افق توسعه کشاورزی | | مصرف صنعت | | طرح انتقال آب به داخل حوضه | | مصرف شرب | | اولویت محیط زیست | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | فعلی | اصلاح شده | ۱۳۸۵ | ۱۳۹۵ | معمول | مطلوب | ندارد | دارد | معمول | مطلوب | ندارد | دارد |
| اول | x | | | x | x | | x | | x | | x | |
| دوم | | x | | x | | x | x | | | x | x | |
| سوم | | x | x | | | x | | x | | x | | x |

در این سناریو میزان برداشت آب از منابع آب زیرزمینی نسبت به شرایط تاریخی از ۶۹ درصد به ۷۴.۲ درصد افزایش یافته است. در این سناریو افت سطح آب زیرزمینی را به ویژه در قسمت‌های مرکزی آبخوان و بخش تحت پوشش آبیاری کانال چپ نکوآباد مشاهده می‌شود. همچنین علاوه بر برداشت اضافه از آبخوان‌ها نیازهای سایت‌های مختلف به طور کامل برآورده نمی‌شود و مقدار آب سطحی بیشتری نسبت به دشت‌های مختلف برای تأمین نیازها اختصاص داده می‌شود که این امر باعث کاهش آب در رودخانه شده و مقدار آب کمتری به تالاب گاوخونی رسیده و شرایط تالاب گاوخونی را بسیار دشوارتر می‌نماید. میزان ورودی به تالاب گاوخونی در این سناریو در مقایسه با حالت معمول که مقدار متوسط ۰/۴ میلیون متر مکعب (۱۰/۳ میلیون متر مکعب آب در سال ۸۵) وارد تالاب گاوخونی می‌شود، تقریباً برابر صفر می‌باشد.

نتایج مدل در سناریو دوم نشان می‌دهد که تأمین نیازها از منابع آب زیرزمینی حوضه از ۷۴/۲ درصد در سناریو اول به میزان ۷۰ درصد در این سناریو کاهش یافته است. همچنین آورد رودخانه از مقدار صفر به ۳/۲ میلیون متر مکعب در سال ۸۵ افزایش یافته است که همچنان نیاز باتلاق تأمین نمی‌شود. در سناریو سوم، با مدیریت تقاضا در سطح حوضه آبریز و مدیریت تامین با اجرای طرح انتقال آب بهشت‌آباد، مقدار تامین نیاز زیست محیطی باتلاق گاوخونی به ۴۵ میلیون متر مکعب افزایش می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهد بخشی از آب انتقال داده شده از طریق تونل بهشت‌آباد در سناریو سوم صرف تأمین نیازهای بخش کشاورزی شده به طوری که برداشت از آب زیرزمینی توسط گره‌های کشاورزی به میزان ۴ درصد کاهش یافته است و درصد بیشتری از نیازهای حوضه از طریق آب سطحی برآورده شده است. در این‌حالت پایداری آبخوانهای حوضه بیشتر می‌شود و همچنین میزان حجم آب ورودی به تالاب گاوخونی نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است در این سناریو سطح زیر کشت نسبت به سناریو دوم کاهش یافته است و با شرایط فعلی یکسان درنظر گرفته شده است.

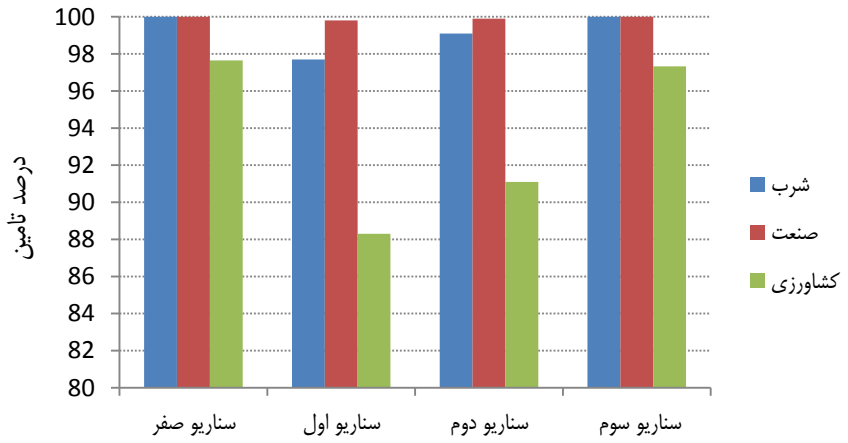
## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق تدوین مدل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در جهت تأمین نیازهای شرب، صنعت،

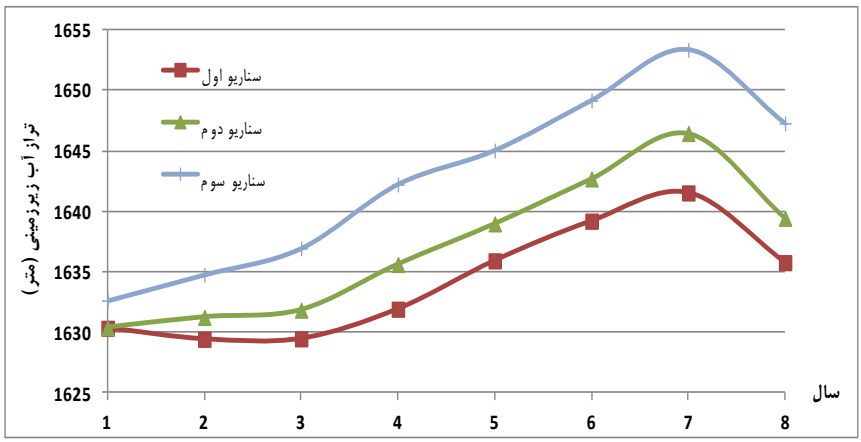
کشاورزی و زیست محیطی بوده است. در راستای دستیابی به این هدف، با تلفیق دو مدل شبیه‌ساز MODFLOW و WEAP و ایجاد یک ارتباط پویا میان مدل‌های مذکور مدل WEAP-MODFLOW در محدوده مطالعاتی بسط داده شد و آبخوان نجف‌آباد به صورت جزیی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شرایط دوره تاریخی مقادیر محاسبه شده در مدل نشان می‌دهد که ۶۹ درصد از نیازهای منطقه تـوسط منابع آب زیرزمینی و ۳۱ درصد آن توسـط منابع آب سطحی تأمین شده است که این نتایج در سناریوهای ۱ تا ۳ برای آب زیرزمینی به ترتیب برابر ۷۴ ، ۷۰ و ۶۶ درصد می‌باشد. همچنین نتـــایج نشان داد بهترین سناریو برای کاهش خسارت به آبخوان‌ها و افزایش سطح تراز آنها سناریوی سوم با الگوی مصرف شرب و صنعت در شرایط مطلوب، اصلاح راندمان کشاورزی، اجرای طرحهای

**جدول ۳- نتایج حاصل از سناریوهای مختلف**

| سناریو | درصد تامین نیازها از منبع آب | | آورد تالاب گاوخونی (MCM) |
|---|---|---|---|
| | سطحی(٪) | زیرزمینی(٪) | |
| تاریخی | ۳۱ | ۶۹ | ۰/۴ |
| ۱ | ۲۵/۸ | ۷۴/۲ | ۰ |
| ۲ | ۳۰ | ۷۰ | ۳/۲ |
| ۳ | ۳۴ | ۶۶ | ۴۵ |




**شکل ۶- درصد تامین نیازهای آب در سناریوهای مختلف**




**شکل ۷- میزان تغییرات سطح ایستابی در آبخوان نجف‌آباد بر اساس سناریوهای مختلف**

توسعه منابع آب و حفظ شرایط فعلی سطح زیر کشت در این حوضه می‌باشد. جهت تکمیل مطالعات انجام شده در این زمینه ارائه مدل شبیه‌ساز کمی- کیفی منابع آب حوضه، افزایش دقت در مدل‌سازی حوضه بر استفاده از مدلسازی آبهای زیرزمینی در دیگر آبخوانها، استفاده از شاخص‌های دیگر در ارزیابی سناریوهای مدیریتی پیشنهاد می‌شود.

## پی‌نوشت‌ها

1- Conjunctive Use
2- Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model (MODFLOW)
3- Modular Three Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation (MT3DMS)
4- Water Evaluation And Planning System (WEAP)
5- Stationary
6- Transient
7- Three-Dimentional Finite-Difference Flow Method
8- River Basin Simulation Model (RIBASIM)
9-Water Resources Graphical Interface- Simulation Toolkit (WARGI-SIM)
10- Root Mean Square Error (RSME)

## ۶- مراجع


صفوی ح‌ر، افشار ع، قاهری ع، ابریشم چی ا، تجریشی م (۱۳۸۶) مدل شبیه‌سازی کمی-کیفی اندرکنش آبراهه با سفره آب زیرزمینی. مجله علمی-پژوهشی آب و فاضلاب ۶۱: ۱۴-۲.

رضاپور طبری م، مکنون ر، عبادی ت (۱۳۸۸) مدل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر پایه عدم دقت در پارامترهای آبخوان. مجله علمی و پژوهشی آب و فاضلاب ۷۲: ۱۵-۲.

رضاپور طبری م، مکنون ر، عبادی ت (۱۳۹۱) ارائه ساختاری جهت برنامه‌ریزی بلندمدت بهینه بهره‌برداری تلفیقی. مجله علمی و پژوهشی آب و فاضلاب ۸۴: ۶۹-۵۶.

مهندسین مشاور یکم (۱۳۹۳) مطالعات بهنگام سازی طرح جامع آب کشور – حوضه آبریز گاوخونی. گزارش برنامه‌ریزی منابع آب، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا.

Azaiez MN (2002) A model for conjunctive use of ground and surface water with opportunity costs. European Journal of Operational Research 143: 611-624.

Bazargan-Lari MR, Kerachian R, Mansoori A (2009) A conflict-resolution model for the conjunctive use of surface and groundwater resources that considers water-quality issues: A case study. Environmental Management 43: 470-482.

Donald MG, Harbough AW (1988) A modular three dimensional finite difference groundwater flow model. United States Geological Survey, U.S.A.

Emch PG, Yeh WWG (1998) Management model for conjunctive use of coastal surface water and groundwater. Journal of Water Resources Planning and Management 124(3): 129-139.

Hantush MMS, Marino MA (1989) Chance-constrainted model for management of stream-aquifer system. Journal of Water Resources Planning and Management 115(3) :259-277.

Huber M (2008) Modflow2WEAP-User Guide Software Version 3.0.0 Last Modified.

Karamouz M, Mohammad Reazpor Tabari M, Kerachian R (2007) Application of genetic algorithms and artificial neural networks in conjunctive use of surface and growndwater resources. Water International 32(1): 163-176.

Kholghi M, Razack M, Mirabzadeh M, Porel G (1995) Multiobjective simulation-optimization model for conjunctive use of surface and groundwater management. Procceding of Regional Conference on Water Resources Management, Isfahan, Iran, 657-665.

Reazpor Tabari MM, Yazdi A (2014) Conjunctive use of surface and groundwater with inter-basin transfer approach: Case study Piranshahr. Water Resources Management DOI 10.1007/s11269-014-0578-2.

Rezapour Tabari MM, Soltani J (2013) Multi-Objective Optimal Model for Conjunctive Use Management Using SGAs and NSGA-II Models Water Resources Management 27(1): 37-53.

Moharram SH, Gad MI, Saafan TA, Khalaf Allah S (2011) Optimal groundwater management using genetic algorithm in El-Farafra Oasis, Western Desert, Egypt. Water Resources Management 26: 927-948.

Peralta RC, Asghari K, Shulstad RN (1991) SECTAR model for economically optimal sustained groundwater yield planning. Journal of Irrigation and Drain Engineering 117(1): 5-24.

Teriana E, Labadie JW, Gates TK, Anderson CHW (2010) Neural network approach to stream-aquifer modeling for improved river basin management. Journal of Hydrology 391: 235-247.