



## Izeh Plain Subsidence Modeling Using MODFLOW Mathematical Code

K. Rajabi Khamseh<sup>1</sup>, A. Nikbakht Shahbazi<sup>1\*</sup>,  
H. Fathian<sup>1</sup>, and N. Zohrabi<sup>1</sup>

### Abstract

The Subsidence in plains can be directly due to the drop in groundwater level and the destruction of aquifer alluvial bounds. In this study, the MODFLOW mathematical model was run for Izeh plain by extracting a raster map of saturated aquifer subsidence in the ten-year period from 2008 to 2019 and the forecast period for three climatic scenarios between 2019 and 2029. Of the five AOGCM models reported in the fifth report presented in Lars-WG6, the HadGEM2-ES model was used under three scenarios: RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5. For the extraction of monthly data, maximum and minimum rainfall and temperature were used in the study area during the basic period (1993-1993) and the next period (2040-2021) under the three scenarios of RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. The annual precipitation of the basin in the next period was under the scenarios of RCP4.5, RCP4.5, RCP8.5 with average cultivars of 7.2, 18.71 and 23.7 percent, respectively, which is reflected in the decrease in the amount of surface feeding of aquifer. The Subsidence model was developed by developing the SUBSIDENCE package in the limited numerical code structure of MODFLOW. The quantitative groundwater flow model was calibrated using PEST automation code and sensitivity analysis. The results showed that the mathematical model used to simulate Izeh aquifer has a relative error (NRMSE) of 16%, which confirms the ideal modeling after reviewing the validation process. An examination of the vertical changes in the geological structure showed that in the long term of 20 years, with the climatic assumptions introduced, the aquifer level would experience a total subsidence of maximum 1.5 and minimum 0.9 meters. If the aquifer alluvial structure is destroyed, the subsidence may be less than these values, but in return, the conditions without returning the groundwater aquifer recharge may occur.

**Keywords:** MODFLOW Model, Izeh Aquifer, Subsidence.

Received: July 8, 2020

Accepted: January 3, 2021

## مدل سازی فرونشست دشت ایذه با استفاده از کد ریاضی MODFLOW

کریم رجیبی خمسه<sup>۱</sup>، علیرضا نیکبخت شهبازی<sup>۱\*</sup>، حسین  
فتحیان<sup>۱</sup> و نرگس زهرابی<sup>۱</sup>

### چکیده

فرونشست سازند دشت‌ها، می‌تواند مستقیماً بر اثر افت سطح آب زیرزمینی و تخریب بافت آب‌رقتی آبخوان صورت پذیرد. در این مطالعه در دشت ایذه کد ریاضی MODFLOW، با استخراج نقشه رستری فرونشست آبخوان اشباع در دوره ده ساله از ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۹ و اثرات تغییر اقلیم با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری تحت سه سناریو اقلیمی بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ انجام شد. از ۵ مدل AOGCM تحت گزارش پنجم ارائه‌شده در نرم‌افزار Lars-WG6 از مدل HadGEM2-ES تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. برای استخراج داده‌های ماهانه بارش و دمای ماکزیمم و مینیمم در منطقه مطالعاتی طی دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۱۷) و دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) تحت سه سناریو انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. بارش سالانه حوضه در دوره آتی تحت سناریوهای RCP4.5، RCP4.5، RCP8.5 به ترتیب با ارقام متوسط ۷/۲، ۱۸/۷۱ و ۲۳/۷ درصد کاهش بوده است که به صورت کاهش مقدار تغذیه سطحی آبخوان نمود می‌یابد. مدل فرونشست با توسعه پکیج SUBSIDENCE در ساختار کد عددی تفاضل محدود MODFLOW صورت پذیرفت. مدل کمی جریان آب زیرزمینی با استفاده از کد خودکار PEST واسنجی و تحلیل حساسیت شد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مدل ریاضی استفاده شده جهت شبیه‌سازی آبخوان ایذه دارای خطای نسبی (NRMSE) ۱۶ درصد می‌باشد که مؤید مدل‌سازی ایده‌آل پس از بررسی فرآیند صحت‌سنجی است. بررسی تغییرات عمودی ساختار زمین نشان داد که در بلند مدت ۲۰ ساله با فرضیات اقلیمی مطرح شده سطح آبخوان مجموعاً حداکثر تا ۱/۵ متر و حداقل ۰/۹ متر فرونشست رخ می‌دهد. در صورت تخریب ساختار آب‌رقتی آبخوان این مقدار ممکن است کمتر از این ارقام بوده؛ اما در مقابل برابر با شرایط بدون بازگشت تغذیه سفره آب زیرزمینی باشد.

**کلمات کلیدی:** مدل MODFLOW، آبخوان ایذه، فرونشست.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۴/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۰/۱۴

1- Department of Water Resources Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. Email: [nikbakhta@gmail.com](mailto:nikbakhta@gmail.com)

\*- Corresponding Author

۱- گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

\*- نویسنده مسئول

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

همبستگی (۰/۹۶۵) بین مقادیر فرونشست شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی شده را نشان داد. (Sitavi et al. (2019) در یک مطالعه به پدیده فرونشست زمین پرداختند. در مصر شهرستان اسنا به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. این منطقه از زمان احداث سد جدید اسنا در سال ۱۹۹۵ و به دلیل سطح بالای آب برخی کانال‌های آبیاری مانند کانال رمادی، از افزایش سطح آب‌های زیرزمینی رنج می‌برد. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر سناریوهای مختلف عملیاتی در فرونشست خاک و آب‌های زیرزمینی و رسیدن به سناریوی مطلوب بود. Yang and Liu (2019) در یک مطالعه، یک مدل آب زیرزمینی وابسته به تنش، MODFLOW-SD تهیه و همراه با مدل فرونشست غیرخطی، NDIS برای پیش‌بینی تغییر شکل عمودی در حوضه‌های دارای رسوبات بسیار فشرده شده استفاده کردند. بسته NDIS بر اساس قانون داری-گرسوانانوف و شار عمده به مدل فرونشست زمین ساخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نمونه‌های انجام شده برای یک مدل مفهومی نشان داد که تنش اعمال شده به دلیل پمپاژ باعث تغییر لایه‌های همگن به صورت ناهمگن می‌شود. همچنین در زمینه اثرات تغییر اقلیم از مطالعات مشابه می‌توان به پژوهش Mohamadi et al. (2017) اشاره کرد که با عنوان بررسی تغییرات زمانی و اثرات خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی از طریق شاخص‌های استاندارد در دشت کرمان، به این نتیجه رسیدند که حداقل ۵۷ درصد تغییرات آب زیرزمینی توسط شاخص SPI قابل پیش‌بینی و توجیه است. Rahimi et al. (2019) در یک پژوهش با عنوان تحلیل مکانی و زمانی تغییر اقلیم با استفاده از روش‌های ریز مقیاس‌نمایی SDSM، نشان دادند که نتایج روش‌های شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با دیگر روش‌های دارای دقت بالاتری در پیش‌بینی مقادیر است. آنها همچنین اشاره کردند که نتایج آماره من-کندال نشان داد که همواره مقادیر پیش‌بینی شده مدل LARS-WG برای نمایه‌های SPI و SPEI شیب بیشتری در جهت منفی شدن دارد. (Hamzeh et al. (2018) ضمن بررسی اثرات تغییرات پارامتر تغذیه بر سفره آب، در پنج سناریو اقلیمی نشان دادند که در سطح ریسک ۱۰ درصد تا ۱/۸ متر افت و در سطح ریسک ۹۰ درصد تا ۰/۴۳ متر افت در آبخوان قابل پیش‌بینی است. بعلاوه Mesmarian et al. (2016) در یک مطالعه به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت شهر کرد، در دو سناریو که افزایش برداشت ۱۰ و ۲۰ درصدی را برای افزایش دمای ۰/۴ سیلیسیوس سالانه در دوره ۱۰ ساله آبی بررسی کردند، خروجی این تحقیق مشخص کرد که در بدترین حالت تا حدود ۱۰ میلیون متر مکعب کسری مازاد بر این دشت تحمیل خواهد شد. Nadiri et al. (2018) به ارائه چهارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان

مصارف بی رویه و کنترل نشده منابع آب سطحی و زیرزمینی، کاهش نزولات جوی، تمرکز مصرف در برخی نقاط (عدم تعادل بین تقاضا و پتانسیل تأمین آب)، الگوی کشت نامناسب و عدم آبیاری صحیح و حفر چاه‌های متعدد و بهره‌برداری بی‌برنامه از آنها در چند دهه اخیر باعث بحرانی شدن وضعیت منابع آب زیرزمینی در اکثر دشت‌های کشور شده است. به نحوی که سطح آب زیرزمینی در اغلب آبخوان‌های کشور به طور مداوم سیر کاهشی داشته و متوسط افت سالانه در طول ۱۵ سال گذشته در حد ۱۲ متر در سال بوده است (دفتر مطالعات پایه وزارت نیرو، ۱۳۹۵). کاهش سطح تراز آب زیرزمینی دشت‌ها باعث افزایش هزینه استحصال آب و افزایش مصرف انرژی، کاهش کیفیت آب و ظهور پدیده فرونشست زمین می‌گردد. به عنوان اثرات ثانوی، با کاهش حجم آب قابل برداشت منابع زیرزمینی و افزایش هزینه استحصال آب، سطح زیرکشت محصولات کاهش و قیمت محصولات افزایش می‌یابد. یکی دیگر از عواملی که باعث بحرانی شدن وضعیت منابع آب زیرزمینی شده است، تغییر شرایط و رژیم تغذیه طبیعی سفره‌های آب زیرزمینی است. در برخی از دشت‌ها، ساخت‌وسازهای هیدرولیکی نامناسب بر روی رودخانه‌ها انجام شده و باعث کاهش تغذیه مناسب آبخوان پایین دست شده است. فایق آمدن بر مشکلات منابع آب زیرزمینی، نیاز به بررسی‌های علمی و ابزارهای گوناگون دارد که یکی از آنها مدل ریاضی است. مدل‌های ریاضی، بررسی تغییرات وضعیت موجود و آینده سفره‌های آب زیرزمینی را با لحاظ کردن عوامل متعدد مؤثر در آن، امکان‌پذیر ساخته است. لذا با استفاده از آنها می‌توان با صرف کمترین هزینه و زمان، تنها با جمع‌آوری اطلاعات مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم آب زیرزمینی وضعیت آبخوان را شبیه‌سازی کرد. این نوع مدل‌های شبیه‌ساز قادرند تأثیرات متقابل آب‌های سطحی و زیرزمینی را در دوره‌های کوتاه و بلندمدت ارائه دهند، که از مهم‌ترین این مدل‌ها می‌توان به MODFLOW اشاره کرد. مطالعات متعددی در این زمینه صورت گرفته است که به آنها اشاره می‌شود. Ranjbar and Ehteshami (2019) بیان کردند در دشت تهران استخراج بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در سال‌های اخیر باعث تخریب سازند آبرفتی در سطح وسیع شده است. هدف از مطالعه آنها، استفاده از توانایی مدل عددی و الگوریتم‌های داده‌محور برای پیش‌بینی قوی و سریع فرونشست زمین بود. به این ترتیب از بسته فرونشست در چارچوب MODFLOW برای تعیین تأثیر نوسانات آب زیرزمینی بر میزان فرونشست از طریق حوضه تهران استفاده شد. مدل مقدار بالای ضریب

تحت پوشش سازمان آب و برق خوزستان قرار دارد. ۱۸۵/۵۳ کیلومتر مربع از وسعت محدوده را دشت و ۵۰۰/۲۳ کیلومتر مربع از وسعت محدوده را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. کمترین ارتفاع محدوده ۳۵۵ متر مربوط به بخش‌های غربی محدوده و در خروجی آن و بیشترین ارتفاع محدوده ۲۹۲۲ متر از سطح دریا مربوط به قسمت‌های جنوب غربی آن می‌باشد (Ministry of Energy, 2016). موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور در شکل ۱ نشان داده شده است.

در محدوده مطالعاتی ایذه-پیون واقع در استان خوزستان، در مجموع ۱۷۴ چاه و چشمه با تخلیه ۸/۱۴ میلیون مترمکعب در سال وجود دارد که از این تعداد ۱۱۷ منبع در ارتفاعات و ۸۱ منبع در دشت‌ها قرار گرفته‌اند این محدوده مطالعاتی فاقد قنات می‌باشد (Ministry of Energy, 2016).

## ۲-۲- تئوری ریاضی مدل MODFLOW

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی توسط مدل ریاضی به عنوان پیش‌نیاز تحلیل پدیده نشست زمین، یک روش غیرمستقیم مطالعه است که با صرف هزینه کمتر نسبت به روش‌های مستقیم یا صحرایی می‌تواند مشکلات موجود را تا حد زیادی رفع کند. در این پژوهش با استفاده از مجموعه گسترده‌ای از داده‌های خام به جهت استفاده در مدل ریاضی MODFLOW، فرآیند توسعه مدل کمی و استخراج نتایج حاصل با استدلال بررسی صحت و دقت مدل تشریح شده است.

در یک برنامه رایانه‌ای مدل آب زیرزمینی، سیستمی از معادلات جبری (ماتریس) حل می‌شود. این ماتریس، تقریبی از مدل ریاضی است که توسط معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی تدوین شده است (Bear, 1990). معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های آزاد در حالت کلی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

که در این معادله  $h$  ارتفاع سطح آب زیرزمینی،  $S_y$  آبدهی ویژه،  $K$  هدایت هیدرولیکی در جهت‌های  $x$ ،  $y$ ، و  $z$  سفره آب زیرزمینی است.

## ۲-۳- فرونشست

به منظور مدل‌سازی فرونشست زمین، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$v_a = \frac{\sum_{k=1}^n V_k}{\sum_{k=1}^n S_k} = \frac{\sum_{k=1}^n \dot{V}_{ak} S_k}{\sum_{k=1}^n S_k} \quad (2)$$

با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک پرداختند. در این مطالعه هفت عامل هیدروژئولوژیکی و ژئولوژیکی مؤثر بر فرونشست، شامل افت سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و فاصله از گسل مورد ارزیابی قرار گرفته و تلفیق شدند و نقشه آسیب‌پذیری دشت در برابر فرونشست حاصل شد. Janbaz fotamy et al. (2020) فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری را بررسی کردند. نتایج نشان داد که میانگین سالانه فرونشست سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ در محدوده آبخوان قزوین ۳۹/۹ میلیمتر و در استان قزوین این مقدار کمتر و حدود ۳۳ میلیمتر بوده است. با مشاهده محدوده فرونشست در سطح استان قزوین دیده شد بیشترین فرونشست‌ها در محدوده آبخوان رخ داده است و در آنجا ضخامت لایه ریزدانه بیشتر بوده است. (Bijani et al. 2017) تأثیرات کف‌شکنی چاه‌ها بر پتانسیل برداشت از آبخوان با استفاده از مدل ریاضی و تأثیر برداشت بی‌رویه از چاه‌ها بر پتانسیل بهره‌برداری از آبخوان با استفاده از مدل عددی MODFLOW بررسی شده است. نتایج نشان داد ارائه مجوز کف‌شکنی به چاه‌های کشاورزی نه تنها یک آسیب جدی به آبخوان و محیط زیست دشت بوده بلکه یک رویکرد در راستای توزیع ناعادلانه آب در سطح دشت می‌باشد.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته تاکنون، پژوهش مشابهی در حیطه اثرات تغییر اقلیم با تأکید بر سناریوهای پیش‌بینی در دشت ایذه انجام نشده است و با توجه به دقت خروجی در مطالعات پیشین در حیطه محاسبات عددی مدل‌های فرونشست، در این تحقیق، دشت ایذه بر اساس یک روش کاملاً تئوریک توسعه مدل مفهومی جریان آب زیرزمینی، مقدار تغییرات قائم سازند آبخوان که اصطلاحاً فرونشست نام‌گذاری می‌شود، بر طبق تغییرات سلولی شبکه تفاضل محدود مدل جریان به صورت غیرخطی تهیه شد؛ و به منظور تعیین عامل اساسی به وجود آورنده این تغییرات، از روش فازی و تحلیل آماری-مکانی استفاده گردید. بزرگترین عامل اثرگذار در ایجاد فرونشست در نهایت در محیط صفحات گسترده، با رابطه رگرسیونی نقاط نظیر مورد بررسی واقع گردید که در ترکیب با اثرات تغییر اقلیم بر فرونشست سناریوهای محتمل در قالب یک مدل پیش‌بینی تعیین شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- موقعیت عمومی و جغرافیایی

محدوده مطالعاتی ایذه-پیون با وسعت ۶۸۵/۷۶ کیلومتر مربع می‌باشد که در قسمت جنوبی حوزه آبریز خود واقع شده است. این محدوده

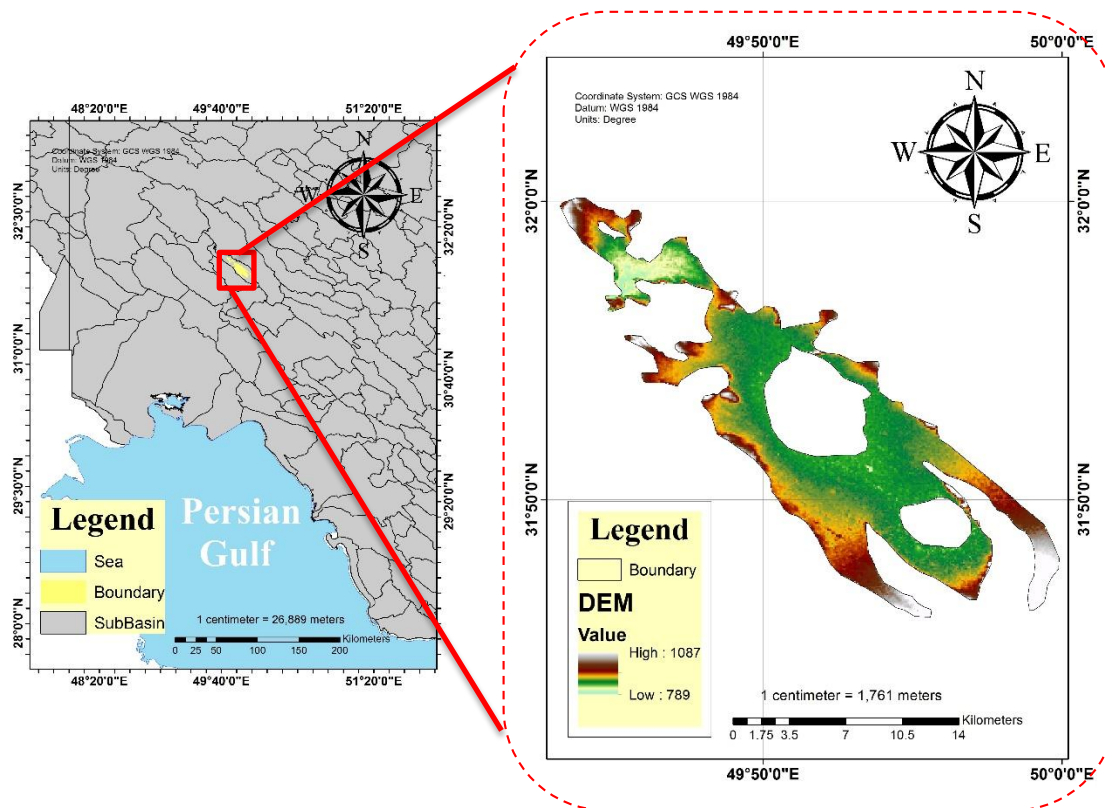


Fig. 1- Geographical location of the study area; Izeh plain

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه- دشت ایذه

(RCP) نام دارد، که شامل ۴ سناریو RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 می‌شود (Van Vuuren et al., 2011). این سناریوها بیانگر خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای هستند که توسط گزارش ارزیابی پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم مورد پذیرش قرار گرفته است. این سناریوها، چهار آینده اقلیمی ممکن را توصیف می‌کنند، که تمامی آنها بر این اصل استوارند که میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای به چه میزان در آینده منتشر خواهند شد. اسامی این چهار سناریو بر اساس میزان انرژی بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ است، که طبق این سناریوها بدست آمده است. به طور مثال طبق سناریو RCP8.5، میزان انرژی اضافی در سال ۲۱۰۰ میلادی در هر متر مربع برابر با ۸/۵ وات بر هر متر مربع است. این سناریوها براساس محدوده وسیعی از تغییرات قابل امکان در میزان گازهای تولیدی توسط عوامل غیر طبیعی مانند انسان‌ها در آینده استوار هستند. در این پژوهش از مدل HadGEM2-ES تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. این سه مدل از بین مدل‌های موجود در مدل LARS-WG6 انتخاب شده‌اند.

که در آن  $v_a$  نرخ فرونشست سالانه منطقه مورد مطالعه (میلیمتر در سال) است. بخش  $V_k$  حجم ناحیه فرونشینی  $k$  مرتبه (میلیمتر مکعب) است.  $\dot{V}_{ak}$  نرخ فرونشست سالانه است که در محاسبه حجم هر منطقه (میلیمتر در سال) استفاده می‌شود. مساحت منطقه فرونشست است.

$n$  تعداد مناطق فرونشست است. در بسته محاسباتی فرونشست که تحت عنوان SUBSIDENCE در نرم‌افزار رابط گرافیکی GMS شناخته می‌شود، به عنوان پس پردازش بر خروجی مدل آب زیرزمینی، مقدار عددی تغییرات سازند آبخوان بر حسب واحد طول، از طرق رقوم تجمعی  $v_a$  در هر دوره زمانی بدست داده می‌شود. این مقدار در یک رابطه مستقیم با افت جریان آب زیرزمینی در مناطقی که با عدد منفی تعیین می‌شود نشان‌دهنده نشست زمین می‌باشد.

#### ۴-۲- تغییر اقلیم و سناریوهای آن

مدل‌های سه بعدی جفت شده اقیانوس- اتمسفر گردش عمومی جو AOGCM بر پایه قوانین فیزیکی که بوسیله روابط ریاضی ارائه می‌شوند، استوار می‌باشند. جدیدترین سناریوهای انتشار که در گزارش ارزیابی پنجم (AR5) از آن استفاده شد، نماینده خط سیر غلظت

۳-۱- اجرا و توسعه مدل عددی

محاسبات در نسخه شماره ۱۰ نرم‌افزار GMS و موتور MODFLOW-2005 صورت پذیرفت. دوره مطالعاتی ۱۲۶ ماه و بر پایه حداکثر داده‌های موجود قابل تدقیق و بازسازی در نظر گرفته شد. شکل ۲ و ۳ مدل سه بعدی محدوده دشت را نشان می‌دهند. اندازه سلولی در نظر گرفته شده برای شبکه تقاض محدود جریان آب زیرزمینی، برابر با ۳۰۰ متر در ۳۰۰ متر با تراکم بهینه بر پهنه دشت بوده است. همچنین شرایط مرزی بر پایه مطالعات اکتشافی گزارش بیان (وزارت نیرو، ۱۳۹۵)، تهیه شد. مقدار اولیه هدایت هیدرولیکی با پهنه‌بندی رقوم هم مقدار ضریب قابلیت انتقال و تقسیم این مقدار بر ضخامت دشت بدست آمد. به علاوه ضرایب ناهمسانگردی پارامتر هدایت هیدرولیکی با توجه به فقدان برداشت اولیه، برابر با مفروضات کد شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. شبکه آبراهه‌ای معادل مسیل توپوگرافی دشت و ناحیه دریاچه‌های در نظر گرفته شده مطابق با حدود آخرین تصاویر حاصل در ماهواره بوده است. همچنین شرایط مرزی بر پایه روش معمول تخمین مرزهای تراوا در موقعیت موازی خطوط هم مقدار تراز آب زیرزمینی به شرط وجود منبع آب در آن ناحیه بوده است.

موتور محاسباتی PCG2 با ۱۰۰ تکرار Outer و Inner و با حد بحرانی تغییرات همگرایی ۰/۰۱ متر و همچنین حد بحرانی خطای همگرایی ۰/۰۱ متر مکعب در روز انتخاب گردید. جهت عملیات واسنجی در شرایط غیر ماندگار از ۷۵٪ طول بازه زمانی استفاده شد.

مدل LARS-WG یکی از مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است که برای تولید بارش روزانه، تابش، ماکزیمم و مینیمم درجه حرارت‌های روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده بکار می‌رود (Barrow and Semenov, 2002). اولین نسخه LARS-WG در بوداپست (Budapest) در سال ۱۹۹۰ به عنوان ابزاری برای مقیاس کاهی به روش آماری در کشور مجارستان ابداع شد. یک مولد آب و هوای تصادفی، از آب و هوای روزانه مشاهده شده یک ایستگاه برای محاسبه یک مجموعه از پارامترها برای توزیع‌های احتمال متغیرهای هواشناسی، به علاوه ارتباط بین آن‌ها استفاده می‌کند. این مجموعه از پارامترها برای تولید سری‌های زمانی متغیرهای هواشناسی ساختگی با طول دلخواه از طریق انتخاب تصادفی مقادیر از توزیع‌های مناسب استفاده شده است. از طریق دخالت پارامترهای توزیع‌ها برای یک ایستگاه به همراه تغییرات پیش‌بینی شده اقلیمی که از مدل‌های اقلیم جهانی یا منطقه‌ای نتیجه شده، سناریوی اقلیم روزانه برای این ایستگاه می‌تواند تولید شود و در اتصال به مدل‌های شبیه‌سازی سامانه‌های مختلف از جمله منابع آب و کشاورزی برای ارزیابی اثرات استفاده گردد. مدل LARS-WG در اقلیم‌های مختلف آزمون گردیده و نتایج مطلوبی را در تولید آماره‌های آب و هوای گوناگون شامل حوادث شدید آب و هوایی نشان داده است. لذا در این تحقیق از نسخه 6 Lars-WG بهره گرفته شده است ویژگی سناریوهای RCP را نشان می‌دهد (Semnoff and Barrow, 2017).

Table 1- Characteristics of RCPs scenarios  
جدول ۱- ویژگی سناریوهای (IPCC 2014) RCP

Equivalent to air temperature anomaly according to the emission scenario (SRES)	Garlic line	Temperature anomaly (Celsius)	Carbon dioxide concentration (PPM)	Made it radiant (w/m <sup>2</sup> )	Scenario name
AIF1	Additive No	4.9	≥ 1370	8.5 in 2100	RCP8.5
B2	Mutation fixation No	3.0	~ 850	Value 6 after 2100	RCP6
B1	Mutation fixation	2.4	~ 650	A value of 4.5 after 2100	RCP4.5
None	Increase then decrease	1.5	~ 490	The value is 3 in the middle of the 21st century, which decreases to 2.6 by the end of the century	RCP2.6 (RCP3PD)

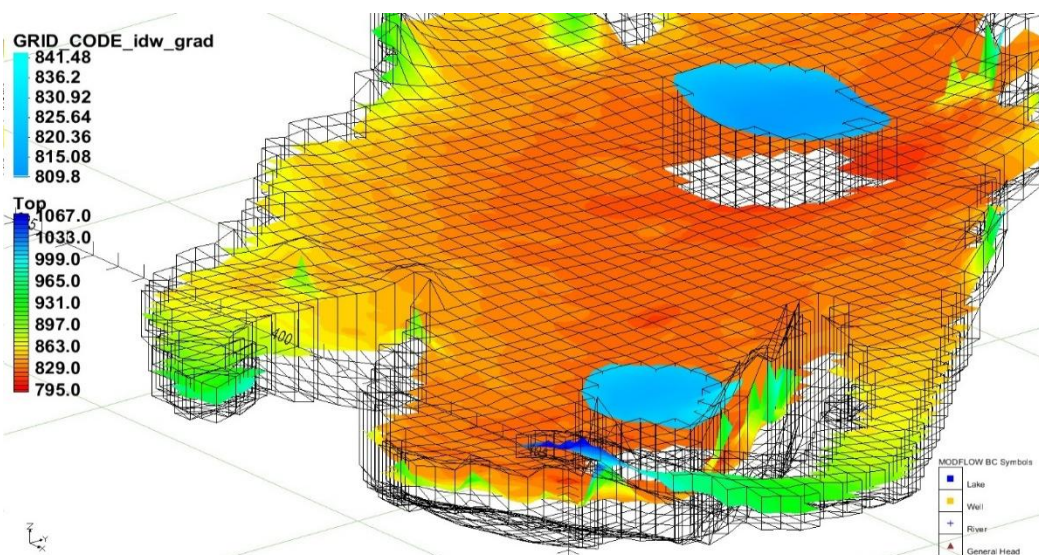


Fig. 2- The elements of the lakes in the three-dimensional model of the plain

شکل ۲- المان دریاچه‌ها در مدل سه بعدی دشت

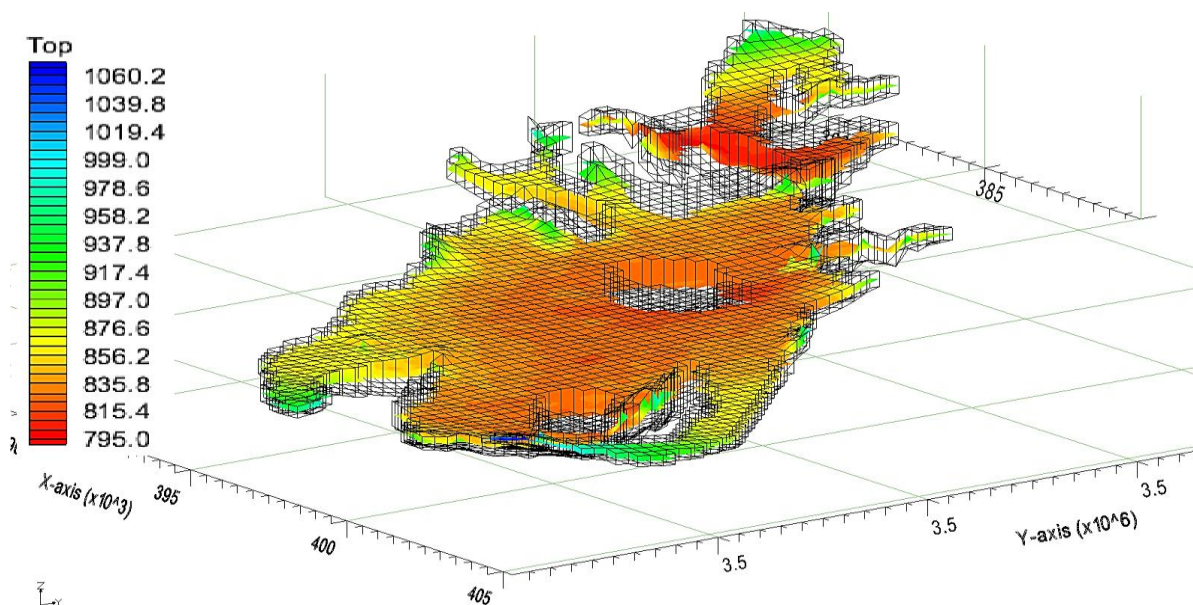
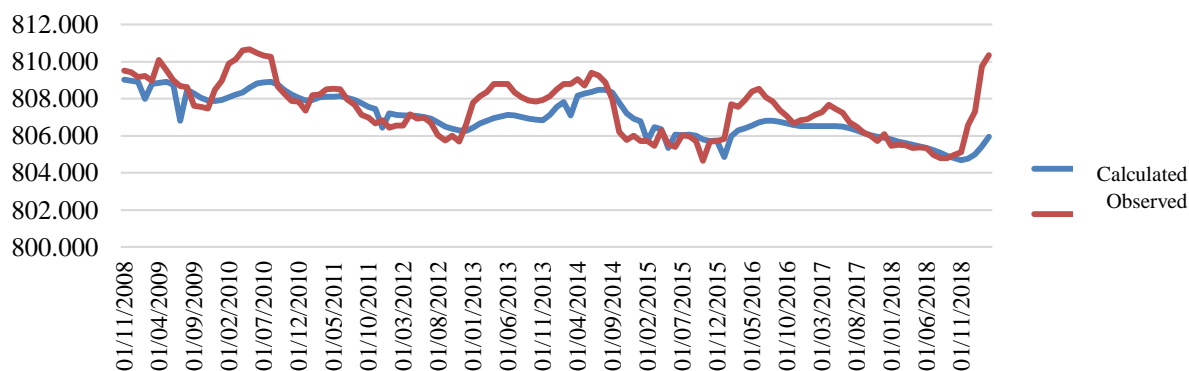


Fig. 3- 3D model of the finite difference network of the plain

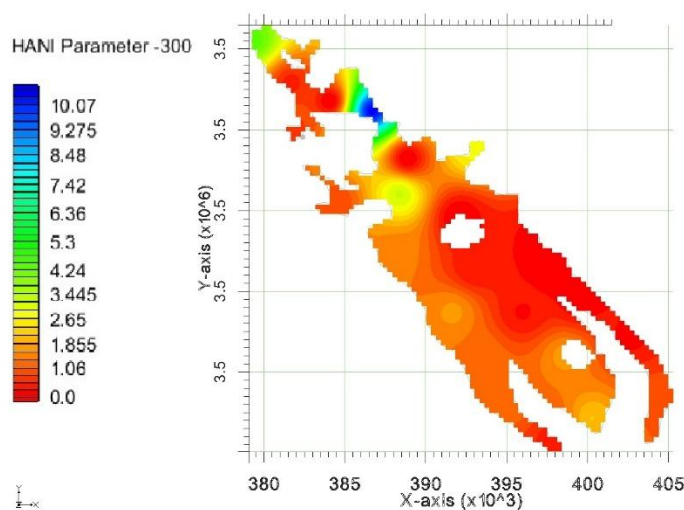
شکل ۳- مدل سه بعدی شبکه تفاضل محدود دشت

شکل‌های ۵ تا ۱۰ مقادیر بهینه پارامترهای اساسی مدل جریان آب زیرزمینی دشت ایذه را نمایش می‌دهد. در هیچ یک از موارد، انحراف آماری با تراکم مقدار در یک موقعیت یا زون مکانی صورت نپذیرفت که این نمایش همگنی مراحل واسنجی است.

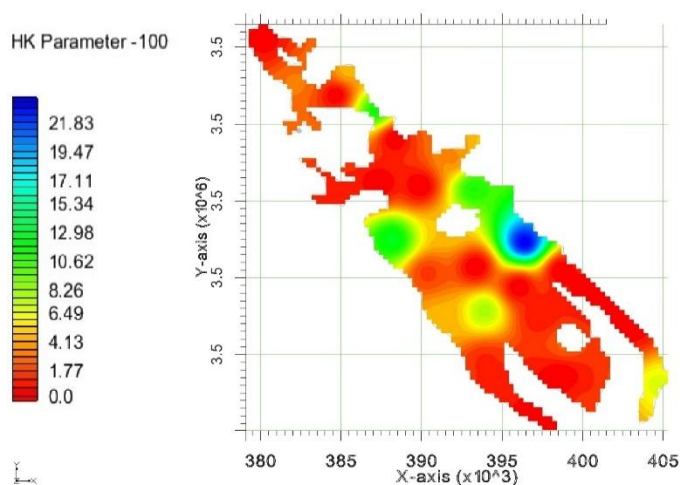
پس از هفت بار اجرای مدل واسنجی با تعداد معین تکرار داخلی، مقادیر بهینه نهایی پارامتر تغذیه از سطح، هدایت هیدرولیکی افقی و ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی افقی، آبدی ویژه در قالب نقاط پایلوت استخراج و پارامترهای، قابلیت انتقال در مرزها و شبکه آبراه‌های به صورت دسته خطوط حاصل گردید. مقدار خطا در مرحله واسنجی در بهینه ترین حالت به مقدار نرمال RMSE حدود ۱۳٪ کاهش پیدا کرد که مؤید واسنجی مطلوب است.



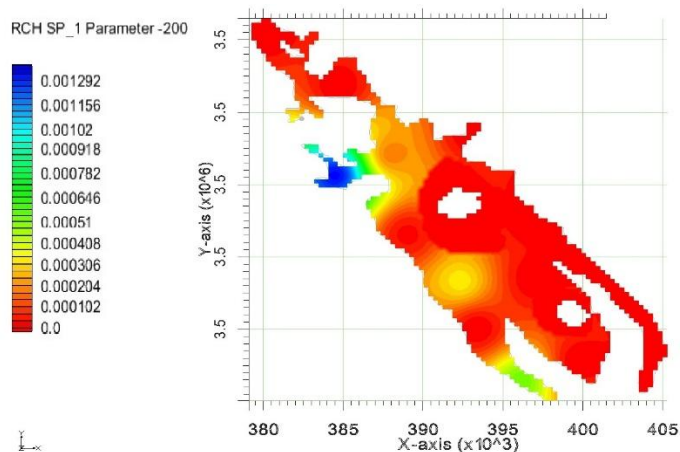
**Fig. 4- Observational and computational hydrograph in calibrated model**  
 شکل ۴- مقایسه هیدروگراف آبخوان - مشاهداتی و محاسباتی مدل واسنجی شده



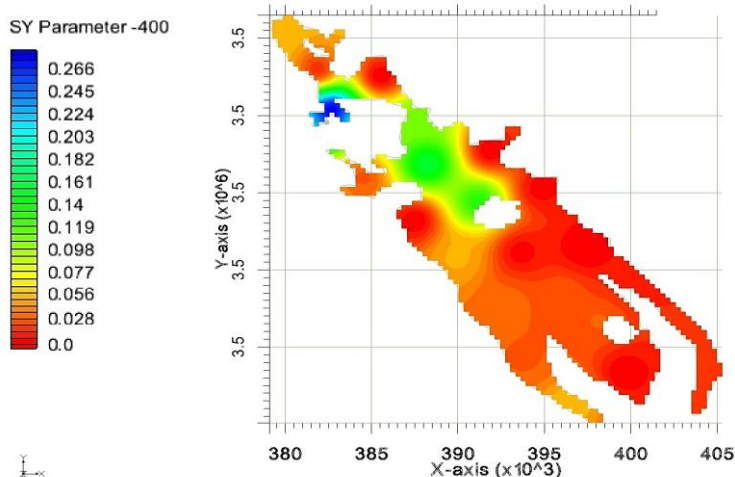
**Fig. 5- Horizontal hydraulic conductivity parameter**  
 شکل ۵- پارامتر ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی افقی



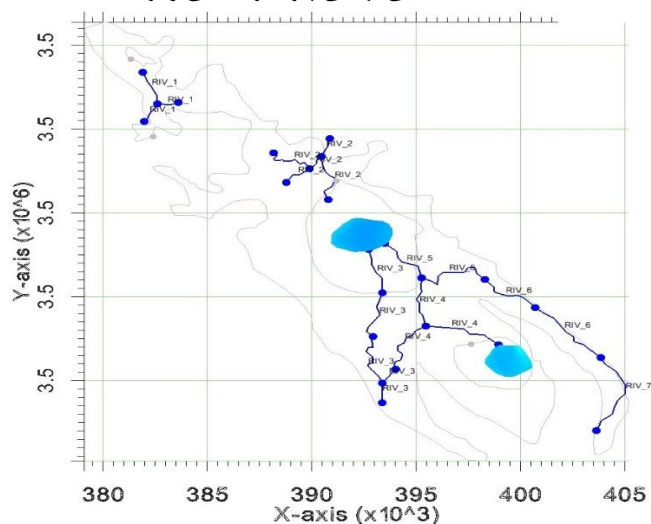
**Fig. 6- Interpolation of the horizontal hydraulic conductivity parameter (m/d)**  
 شکل ۶- میان یابی پارامتر هدایت هیدرولیکی افقی (متر در روز)



**Fig. 7- Recharge from the surface (meters per day per unit cell)**  
 شکل ۷- میانمایی نهایی پارامتر تغذیه از سطح (متر در روز در هر واحد سلولی)

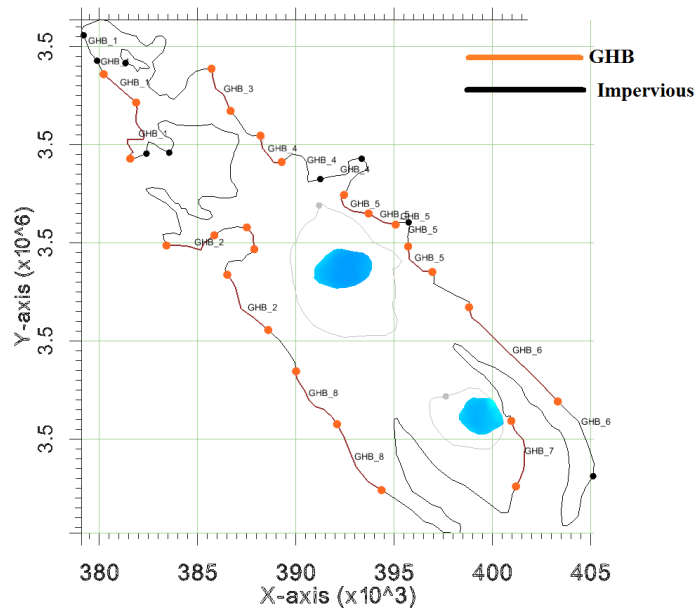


**Fig. 8- Final interpolation of specified yield parameter**  
 شکل ۸- میانمایی نهایی پارامتر آبدهی ویژه



**Fig. 9- Final interpolation of the waterway parameter**  
 شکل ۹- میانمایی نهایی پارامتر آبراهه





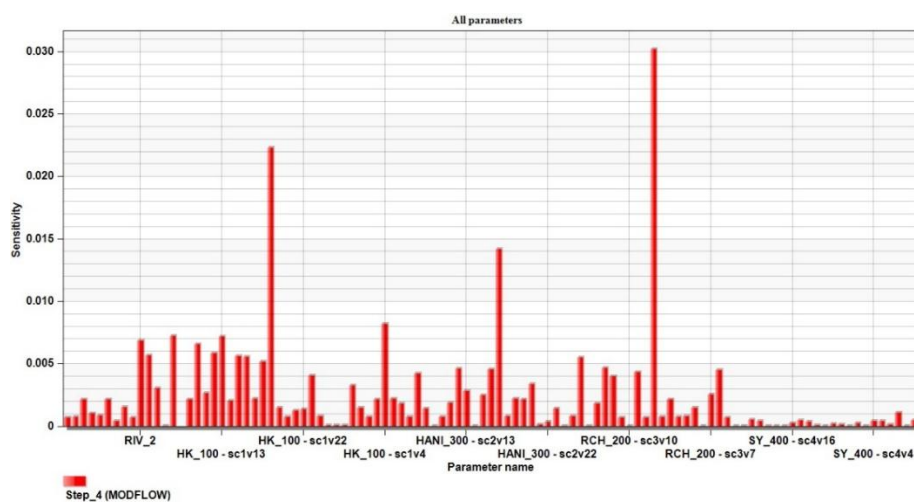
**Fig. 10- Final interpolation of the GHB Boundary parameter**  
**شکل ۱۰- میانجیابی نهایی پارامتر مرزهای تراوا**

در واسنجی آبخوان ایذه، نشان‌دهنده تأثیر حداکثری پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی افقی و یک مجموعه گروه خطی شبکه آبراه‌های بود. شکل ۱۱ مقدار حساسیت هر یک از پایتوت‌های منتخب در تخمین پارامترهای منتخب نشان می‌دهد. محور افقی شماره و عنوان هر پایلوت و محور عمودی در این شکل، مقدار حساسیت را نمایش می‌دهد. موقعیت هر پایلوت باید به صورت منحصر در محدوده مکانی دشت مورد بررسی قرار بگیرد. در این پژوهش به موارد بیشینه (حساسیت حداکثری) اشاره شده است.

مقدار متوسط پارامتر آبدهی ویژه بر اساس خلاصه آماری شبکه سلولی مدل تفاضل محدود، معادل ۴٪ محاسبه شد که در گزارش بیلان و مطالعات صحرایی این رقم برای محدوده اشباع دشت برابر ۵٪ در نظر گرفته شده بود.

### ۲-۳- تحلیل حساسیت

در این پژوهش، از روش تحلیل حساسیت تلفیق شده با مرحله واسنجی استفاده شده است. نتایج خروجی از آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر



**Fig. 11- Sensitivity analysis of calibration parameters**  
**شکل ۱۱- تحلیل حساسیت پارامترهای واسنجی**

کرد. توسعه مدل مفهومی دریاچه‌ها نشان داد که وقوع فرونشست در اطراف ناحیه اشباع کمتر بوده است (شکل ۱۳).

بر همین اساس، ویرایش‌های صورت گرفته بر مرزهای با بار هیدرولیکی پویا (مدل مفهومی) در حدود پارامترهای با حساسیت زیاد، خطای کل واسنجی را در آخرین مرحله از مراحل چهارگانه واسنجی به حداقل مطلوب کاهش داد.

آخرین بازه لایه افت سطح آب در آبخوان به صورت رستری در شبکه تفاضل محدود و در نمودار شکل ۱۲ به صورت متوسط سری زمانی نمایش داده شده است. اثر اساسی فرونشست منشعب از افت تراز آب زیرزمینی است. بنابراین انتظار می‌رود در محدوده‌هایی که بیشترین کاهش سطح آب به وقوع پیوسته است، بیشترین تغییر ساختار عمودی وجود داشته باشد.

در شکل ۱۱ تحلیل حساسیت هر یک از پارامترهای واسنجی در محدوده دشت ایذه برای تکرار آخر مرحله واسنجی نمایش داده شده است. مشخصاً بیشترین حساسیت در کاهش خطای تابع هدف را می‌توان در پارامترهای هدایت هیدرولیکی و تغذیه از سطح مشاهده

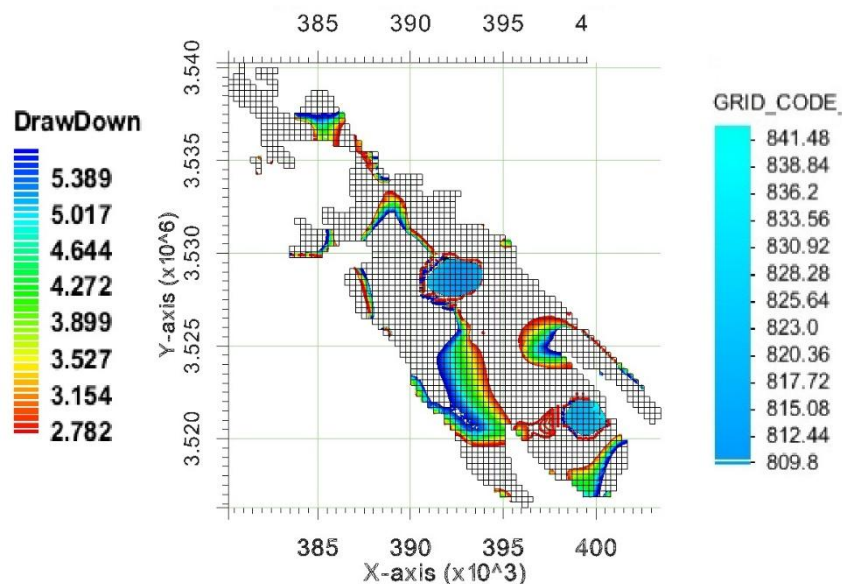


Fig. 12- Final drop down in aquifer  
شکل ۱۲- افت نهایی سطح آب در آبخوان

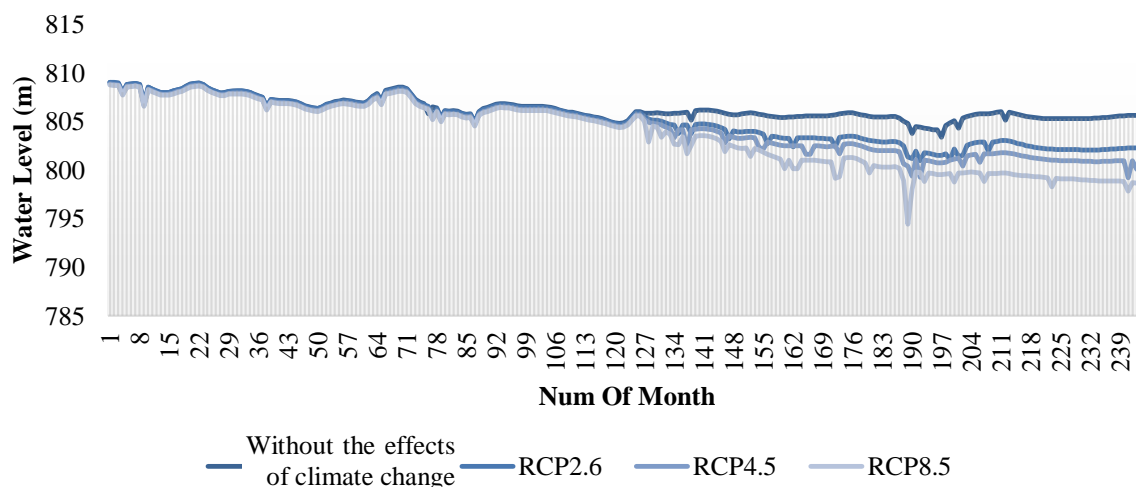


Fig. 13- Time series of water level drop down in aquifer  
شکل ۱۳- سری زمانی افت سطح آب در آبخوان

### ۳-۳- اثرات تغییر اقلیم بر بارش دشت ایذه

تغذیه از سطح در بسته RCH مدل بوده است. سطح نهایی آب حاصل شده در شبکه تفاسل محدود مدل برای ماه پایانی مشخص کرد که سطح آب می‌تواند در بدترین حالت تا ۱۴/۳ متر و در بهترین شرایط تا ۵/۶ متر افت کند. دو سناریو میانی افت تراز آب آبخوان را در حالت متوسط ۸/۱ و ۹/۶ متر محاسبه کرده‌اند. هر یک از شرایط تغییرات ارتفاعی آب در آبخوان منجر به یک رخداد تغییرات ساختاری در دشت ایذه شده است که جدول ۴ کمینه و بیشینه محلی، مقدار متوسط سلول‌های شبکه مدل و حدود و انحراف استاندارد حاصل شده را به صورت متوسط برای سناریوهای اجرا شده نمایش می‌دهد.

شکل‌های ۱۵ الی ۱۸ تغییرات مکانی وقوع فرونشست را برای دشت ایذه در محدوده شبکه اشباع تفاسل محدود مدل آب زیرزمینی در دوره بلند مدت ۲۰ ساله نشان می‌دهد. می‌توان بیان کرد که فرونشست هم راستا با وقوع افت در بخش‌هایی از آبخوان اتفاق افتاده است که شرایط آبرفتی غیر قابل بازگشت فصلی را دارا بوده‌اند. به این معنی که تخریب ساختار عمودی زمین در بخش میانی سفره و یک ناحیه منحصر از شمال آبخوان بیشتر رخ داده است. در این شکل‌ها، نواحی با رنگ کلاس سبز رخداد شدیدتر تخریب زمین را مشخص می‌کند.

در اشکال ۱۵ الی ۱۸ به ترتیب مقدار لایه رستری بر روی شبکه تفاسل محدود فرونشست زمین در آخرین بازه زمانی و نمودار سری زمانی فرونشست متوسط در سطح آبخوان نمایش داده شده است. جدول ۲ مشخص می‌کند که در آبخوان ایذه و در محدوده اشباع، به صورت متوسط بین ۲۰ تا ۴۴ سانتی متر فرونشست در طی بازه سناریو مدل‌سازی به وقوع پیوسته است.

از ۵ مدل AOGCM تحت گزارش پنجم ارائه شده در نرم‌افزار Lars-WG6 از مدل HadGEM2-ES تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شده است. برای استخراج داده‌های ماهانه بارش و دما ماکزیمم و مینیمم در منطقه مطالعاتی طی دوره پایه (۲۰۱۷-۱۹۹۳) و دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) تحت سه سناریو انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. در این پژوهش، میزان تغییرات میانگین دمای ماکزیمم، مینیمم و میزان درصد تغییرات میانگین بارش ماهانه در دوره آتی نسبت (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه از مدل AOGCM تحت سه سناریو بدست آمده است. نتایج آزمون کای اسکور برای توزیع احتمالاتی بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در مدل Lars-WG در جدول ۲ ذکر شده است. در مجموع انتظار می‌رود که دمای متوسط سالانه حوضه در دوره آتی تحت سناریو RCP2.6 حدود ۱/۲ درجه سانتیگراد، RCP4.5 حدود ۱/۵ درجه سانتیگراد و تحت سناریو RCP8.5 حدود ۱/۸ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد. بارش سالانه حوضه در دوره آتی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب با ارقام متوسط ۷/۲، ۱۸/۷۱ و ۲۳/۷ درصد کاهش بوده است که به صورت کاهش مقدار تغذیه سطحی آبخوان نمود می‌یابد. جدول ۳ تغییرات بارش و دما را در مقایسه با دوره پایه مشخص می‌کند.

اجرای مدل پیش‌بینی در هر دوره از ماه پایانی مدل شبیه‌سازی با فرض سه سناریو اقلیمی انجام شد. نحوه اعمال سناریوها با استفاده از تأثیر بر مقدار بارش و تعیین ضریب تبخیر و تعرق متناسب با جدول

**Table 2- Chi-square test results for probabilistic distribution of precipitation, minimum temperature and maximum temperature in LARS-WG model**

**جدول ۲- نتایج آزمون کای اسکور برای توزیع احتمالاتی بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در مدل LARS-WG**

Month	Rainfall		Tmax		Tmin	
	k-s	P-Value	k-s	P-Value	k-s	P-Value
Jan	0.07	1	0.1	0.998	0.1	0.998
Feb	0.02	1	0.1	0.997	0.1	0.998
Mar	0.05	1	0.05	1	0.1	0.998
Apr	0.08	1	0.1	0.998	0.1	0.998
May	0.03	1	0.05	1	0.05	0.999
Jun	0.02	1	0.05	1	0.05	1
Jul	0.1	0.988	0.1	0.988	0.1	0.988
Aug	0.1	0.995	0.12	0.996	0.12	0.996
Sep	0.05	1	0.05	1	0.05	1
Oct	0.073	0.999	0.1	0.998	0.1	0.997
Nov	0.036	0.998	0.05	1	0.05	1
Dec	0.061	1	0.05	1	0.05	1

**Table 3- Changes in precipitation and temperature (2040-2021) compared to the base period**

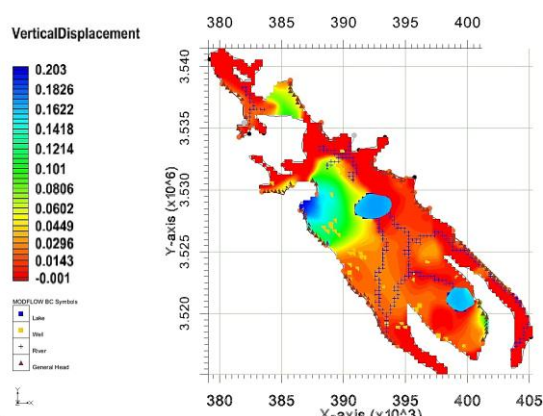
جدول ۳- تغییرات بارش و دما (۲۰۲۱-۲۰۴۰) در مقایسه با دوره پایه

Change in temperature (°C)			Change in rainfall (%)			Month
RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 2.6	
2.0	1.4	1.5	-17.0	-12.0	-7.2	April
1.5	1.3	1.0	-17.4	-16.5	-7.6	May
1.0	0.8	0.5	-18.6	-14	-8.7	June
1.7	1.5	1.2	-24.6	-19.6	-5.0	July
2.1	2.0	1.6	-19.4	-14.4	-9.4	August
2.9	2.7	2.4	-21.5	-16.5	-6.3	September
3.4	3.2	2.9	-21.3	-16.3	-6.5	October
1.7	1.5	1.2	-21.3	-16.3	-8.2	November
1.2	1.0	0.7	-25.9	-20.9	-3.6	December
1.1	1.1	0.6	-25.6	-20.6	-6.2	January
1.0	1.2	0.5	-29.6	-26.3	-7.6	February
0.8	0.5	0.3	-36.5	-27.8	-9.5	March

**Table 4- Statistical summary of Subsidence modeling**

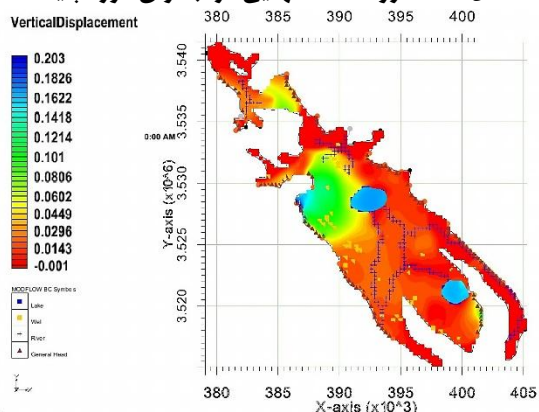
جدول ۴- خلاصه آماری مدل سازی فرونشست

Run title	Min	Max	Rang	Average	standard deviation
Base priod	-0.001	0.203	0.203	0.004	0.014
RCP2.6	-0.001	0.357	0.357	0.005	0.018
RCP4.5	-0.001	0.414	0.415	0.005	0.018
RCP8.5	-0.001	0.441	0.443	0.006	0.020



**Fig. 14- Final subsidence in aquifer**

شکل ۱۴- فرونشست نهایی در آبخوان دوره پایه



**Fig. 15- Final subsidence-second scenario**

شکل ۱۵- فرونشست نهایی در آبخوان سناریو RCP2.6

بررسی تغییرات عمودی ساختار زمین نشان داد که در بلند مدت ۲۰ ساله با فرضیات اقلیمی مطرح شده سطح آبخوان مجموعاً حداکثر تا ۱/۵ متر و حداقل ۰/۹ متر فرونشست رخ می‌دهد. در صورت تخریب ساختار آبرفتی آبخوان این مقدار ممکن است کمتر از این ارقام بوده اما در مقابل برابر با شرایط بدون بازگشت تغذیه سفره آب زیرزمینی باشد.

در یک اجرای امتداد شرایط، و سه سناریو بررسی اثر اقلیم، می‌توان مشاهده کرد که تغییر در مقدار تغذیه، می‌تواند نمودار افت ساختار زمین را به صورت جهشی تا دو برابر مقدار اولیه افزایش دهد. این درحالی است که کاهش بیشتر در مقدار تغذیه، روند تخریب ساختار آبخوان را با سرعت کمتری مواجه می‌سازد. و علت این امر می‌تواند تا حد زیادی به پتانسیل آبخوان بازگردد. در عین حال مرز غیرقابل بازگشت در سناریو نهایی مورد بررسی واقع شد که در این شرایط اگرچه رخداد نشست زمین مجدداً افزایش چشمگیری داشت، با این حال شوک زمانی ماه ۱۹۰ از ابتدای دوره مدل‌سازی، تا حد زیادی تعدیل یافته است.

متوسط ۷/۲، ۱۸/۷۱ و ۲۳/۷ درصد کاهش بوده است و به دنبال آن کاهش بارش، علاوه بر کاهش تغذیه آبخوان، منبع آب سطحی نیز برای بهره‌برداران از بین رفته است.

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

۱- مدل جریان آب زیرزمینی دشت ایزه؛ با اجرا در محیط نرم‌افزاری GMS و با استفاده از کد MODFLOW، نشان داد که مقدار افت سطح آب را در بازه ۲۰ ساله می‌تواند از مرز بحرانی تعیین شده عبور کند.

۲- مقدار خطای محاسبه شده در دوره واسنجی برای معیار RMSE برابر ۱/۲۳ و در دوره صحت‌سنجی همین مقدار تا ۱/۷۲ افزایش پیدا کرد که رقوم نرمال شده در هر دو مورد مشخص کننده مدل‌سازی مطلوب بود.

۳- سه سناریو اقلیمی به منظور تحلیل حساسیت آبخوان در مقابل تغییرات بارندگی برای یک بازه ۱۰ ساله در امتداد مدل پایه تفاضل محدود جریان آب زیرزمینی اجرا شد، در مجموع انتظار می‌رود که دمای متوسط سالانه حوضه در دوره آتی تحت سناریو RCP4.5 حدود ۱/۵ درجه سانتیگراد و تحت سناریو RCP8.5 حدود ۱/۸ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد.

۴- با اجرای سناریوهای اقلیمی می‌توان انتظار داشت که سطح آب در سفره در بدترین حالت تا ۱۴/۳ متر و در بهترین شرایط تا ۵/۶ متر افت کند. دو سناریو میانی افت تراز آب آبخوان را در حالت متوسط ۸/۱ و ۹/۶ متر محاسبه کرده‌اند.

نمودار شکل ۱۸ چهار اجرای ۲۰ ساله مدل جریان آب زیرزمینی و مقدار متوسط ماهانه فرونشست در محدوده دشت ایزه را برای هر مورد نشان داده است. می‌توان مشاهده کرد که روند تغییرات در ماه‌های بین ۱۸۵ تا ۱۹۳ بر خلاف دوره ابتدایی مدل علاوه بر شیب کلی تند سناریوها، دارای یک جهش شدید نیز بوده است. علت این موضوع به عبور از نقاط شکست آبخوان و تخریب بی‌بازگشت پتانسیل تغذیه سفره آب زیرزمینی باز می‌گردد. روند وقوع خشکسالی‌های بلندمدت، می‌تواند بر مقدار استحصال آب از شبکه جریان آب سطحی اثر گذار باشد.

به این صورت که با کاهش آورد جریان در یک حوضه آبریز، برنامه‌های بلند مدت اقتصادی جمعیت بهره‌بردار منجر به برداشت‌های ثابت و مطابق با اهداف از پیش تعیین شده، به پمپاژ بیشتر آب زیرزمینی از مخازن ثابت و در دسترس دشت‌ها شود. در دشت ایزه نیز به علت آنومالی‌های اقلیمی در چند سال اخیر، به وضوح برداشت‌های مازاد و عموماً خارج از پروانه چاه‌های بهره‌برداری افزایش یافته است که دوره پیش‌بینی تشدید این شرایط را گوهی می‌دهد. که در نهایت خود را بر سرعت فزاینده وقوع فرونشست زمین به دنبال کاهش سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد. به بیانی دیگر بر طبق پیش‌بینی مدل اقلیمی با افزایش درجه حرارت، دمای متوسط سالانه حوضه در دوره آتی تحت سناریو RCP2.6 حدود ۱/۲ درجه سانتیگراد، RCP4.5 حدود ۱/۵ درجه سانتیگراد و تحت سناریو RCP8.5 حدود ۱/۸ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه افزایش یافت. بارش سالانه حوضه در دوره آتی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5 به ترتیب با ارقام

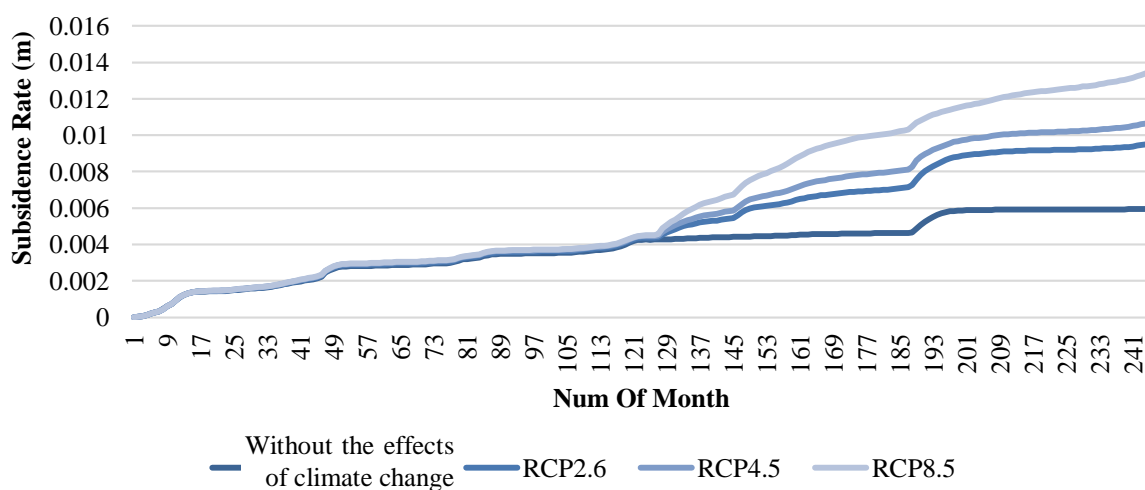


Fig. 18- Time series of subsidence in aquifer

شکل ۱۸- سری زمانی فرونشست در آبخوان

- Hamzeh S, Toulteh Latz, Delqandi M, Moghadam H (2018) Risk assessment of climate change effects on gutvand aquifer. *Ecohydrology* 5(1):122-111 (In Persian)
- Hu Y, Moiwo J P, Yang Y, Han S, Yang Y (2010) Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain. *Journal of Hydrology* 393(3-4):219-232
- Janbaz fotamy M, Kholghi M, Abdeh Kolahchi A, Roostaei M (2020) Land subsidence assessment due to groundwater exploration by using differential radar interferometry technique, Case study: Qazvin province. *Iran-Water Resources Research* 16(3):135-149 (In Persian)
- Lachaal F, Mlayah A MB, Tarhouni J, Leduc C (2012) Implementation of a 3-D groundwater flow model in a semi-arid region using MODFLOW and GIS tools: The Ze ´ ramdine-Be ´ ni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia). *Computers and Geosciences* 48:187-198
- Mesmariam Z, Bouani A, Pir Bazari SJ (2016) The effect of climate change on the groundwater balance of Shahrekord plain in future periods. *Ecohydrology* 3(2):233-242 (In Persian)
- Mohammadi S, Naseri F, Nazaripour H (2017) Investigation of temporal changes and the effect of meteorological drought on groundwater resources of Kerman plain using standard precipitation indicators (SPI) and groundwater resources (GRI). *Ecohydrology* 5(1):22-11 (In Persian)
- Office of Basic Studies of the Ministry of Energy (2016) Water balance report of Urmia Lake catchment area. (In Persian)
- Page M L, Berjamy B, Fakir Y, Bourgin F, Jarlan L, Abourida A, Benrhanem M, Jacob G, Huber M, Sghrer F, Simonneaux V, Chehbouni G (2012) An integrated DSS for groundwater management based on remote sensing, the case of a semi-arid aquifer in Morocco. *Water Resour Manage* 26:3209-3230
- Rahimi R, Rahimi M (2019) Spatial and temporal analysis of climate change in the coming years and comparison of micro-scale methods of SDSM, LARS-WG and artificial neural network in Khuzestan province. *Ecohydrology* 5(4):1174-1161 (In Persian)
- Ranjbar A, Ehteshami M (2019) Development of an uncertainty based model to predict land subsidence caused by groundwater extraction (Case study: Tehran Basin). *Geotechnical and Geological Engineering* 37(4):3205-3219
- ۵- بررسی اثر افت سطح آب در تمامی شرایط مفروض بر آب زیرزمینی نشان داد که در آبخوان ایذه و در محدوده اشباع، به صورت متوسط بین ۲۰ تا ۴۴ سانتی متر فرونشست در طی بازه سناریو مدل سازی به وقوع پیوسته است.
- ۶- روند تغییرات ساختار عمودی دشت در ماه های بین ۱۸۵ تا ۱۹۳ بر خلاف دوره ابتدایی مدل علاوه بر شیب کلی تند سناریوها، دارای یک جهش شدید نیز بوده است. علت این موضوع به عبور از نقاط شکست آبخوان و تخریب بی بازگشت پتانسیل تغذیه سفره آب زیرزمینی باز می گردد.
- ۷- می توان در یک مطالعه پیشنهادی، اثر تصاعدی وقوع خشکسالی بر افت تراز آب زیرزمینی که محرک پدیده فرونشست می باشد را تا مرحله مرز بحران و نقطه غیر قابل بازگشت مشاهده کرد. پس از این مقدار روند تغییرات آهسته اما خسارات ساختاری در سفره آبرفتی ایذه اساسی تر خواهد بود. به این معنی که با روند گسترش خشکسالی، در ابتدا پدیده فرونشست با سرعت بیشتر و شوک های مقطعی صورت می پذیرد و در ادامه با رسیدن به مرز بحران، کاهش تراکم خلل و فرج های آبرفت در مساحت بیشتر و با مقدار محلی کمتر ایجاد می گردد.

## ۷- مراجع

- Al-Sittawy M, Gad S, Fouad R, Nofal E (2019) Assessment of soil subsidence due to long-term dewatering, Esna city, Egypt. *Journal Water Science* 33(1):40-53
- Bear J (1979) *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill, New York, 569p.
- Bijani M, Moridi A, Majdzadeh Tabatabaie M (2017) Investigation of well deepening effects on aquifer yeild using numerical model. *Iran-Water Resources Research* 12(4):83-92 (In Persian)
- Chenini I, Mammou A B (2010) Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling. *Computers and Geosciences* 36(6):801-817
- Cho J, Barone V A, Mostaghimi S (2009) Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a Virginia watershed. *Agricultural Water Management* 96(1):1-11
- Gaura S, Chahar B R, Graillota D (2011) Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13(1):127-139

- Yang F R, Lee C, H Kung, W J, Yeh H F (2009) The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of "Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project" in Taiwan. *Engineering Geology* 103(1-2):39-58
- Yaoutia F E, Mandourb A, E Khattacha D, Kaufmann O (2008) Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-Environment Research* 2(3):192-209
- Zhang H, Hiscock K M (2010) Modelling the impact of forest cover on groundwater resources: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands, UK. *Journal of Hydrology* 392(3-4):136-149
- Rashvand M, Li J, Liu Y (2019) Coupled stress-dependent groundwater flow-deformation model to predict land subsidence in basins with highly compressible deposits. *Journal of Hydrology* 6(3):78
- Semenov M A, Barrow A (2002) LARS-WG, A stochastic weather generator for use in climate impact studies. Hertfordshire, UK
- Taheri Z, Barzghari G, Dideban K (2018) A framework to estimation of potential subsidence of the aquifer using algorithm genetic. *Iran-Water Resources Research* 14(2):182-194 (In Persian)
- Van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Masui T (2011) The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change* 109(1-2):5-31