


Modeling the subsidence development of Marvdasht plain in relation to groundwater abstraction

Azam Heydari¹, Iraj Jabbari^{2*} 

1. PhD student, Department of Physical Geography, Razi University of Kermanshah, Iran

2. *Corresponding Author*, Associate Professor, Department of Physical Geography, Razi University, Kermanshah, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 13 June 2021

Revised: 19 February 2022

Accepted: 09 March 2022

Keywords:

Subsidence, Groundwater, Marvdasht, Fars Province, Environmental Hazards, Modflow.

ABSTRACT

Excessive abstraction of groundwater aquifers in the country has caused a sharp drop in the aquifer water level and the loss of aquatic aquifers, the effects of which is the phenomenon of subsidence. In this study, simulation of groundwater level changes in Marvdasht-Kharameh basin from a validation period and processing of a large set of raw data in Modflow mathematical model was used. The output results of sensitivity analysis of effective parameters in the calibration of Marvdasht aquifer show the maximum effect of hydraulic conductivity parameters and horizontal hydraulic conductance anisotropy and a set of linear groups of water supply network. Therefore, it is in line with the statistics of the Fars Regional Water Organization that there are wells with high discharge in these areas. According to the conditions of the aquifer, if the current operation trend continues, it is predicted that the groundwater level will drop by 15 meters during the years 2019 to 2029. Also, according to the average land subsidence, which averages 0.76 meters per 10 meters. The average land subsidence with the current harvest trend in the next ten years is predictable 114.78 cm and with a 30% increase in harvest, the rate of aquifer decline over the next 20 years is about 37 meters with an annual decline of about 1.9 meters. Land subsidence in this case is also predicted to be about 280 cm. Finally, according to the maps prepared from Marvdasht aquifer, due to the alluvial nature of the groundwater aquifer, the effect of water level drop can be observed from a short distance. The rate of subsidence in the southern and southwestern margins of the plain due to the low thickness of sediments and in the northern and northeastern parts of the plain due to coarse-grained sediments, is less than the central parts of the plain.

Cite this article: Heydari, A., & Jabbari, I. (2022). Modeling the subsidence development of Marvdasht plain in relation to groundwater abstraction. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(34), 17-34.

DOI: 10.22111/jneh.2022.38867.1815



© Iraj Jabbari.

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2022.38867.1815

* Corresponding Author Email: Iraj.Jabbari@razi.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۱، شماره ۳۴، زمستان ۱۴۰۱

مدل سازی توسعه فرونشینی دشت مروودشت در رابطه با برداشت آب های زیرزمینی

اعظم حیدری^۱، ایرج جباری^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲. دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه (نویسنده مسئول)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	برداشت بیش از حد از سفره های آب زیرزمینی در کشور سبب افت شدید سطح ایستابی آبخوان و از بین رفتن لایه های آبدار زمین گردیده است که آثار آن پدیده فرونشست می باشد. در این پژوهش شبیه سازی تغییرهای سطح آب زیرزمینی حوضه مروودشت - خرامه از یک دوره صحت سنجی و پردازش مجموعه گسترده ای از داده های خام در مدل ریاضی مادفلو استفاده شد. نتایج خروجی از تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر در واسنجی آبخوان مروودشت، نشان دهنده تأثیر حداکثری پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی افقی و یک مجموعه گروه خطی شبکه آبراهه ای است. از این رو با آمار سازمان آب منطقه ای فارس مبنی بر وجود چاه هایی با آب دهی بالا در این مناطق هماهنگی دارد. باتوجه به شرایط حاکم بر آبخوان، در صورت ادامه روند بهره برداری کنونی، پیش بینی می شود تراز سطح آب زیرزمینی در طی سال های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۹ میزان ۱۵ متر افت خواهد داشت. هم چنین باتوجه به نشست میانگین زمین که به طور میانگین ۶۰٫۷ متر به ازای ۱۰ متر افت تراز آبخوان می باشد، میزان نشست متوسط زمین با روند کنونی برداشت در ده سال آینده ۱۱۴٫۷۸ سانتی متر قابل پیش بینی می باشد و با افزایش ۳۰ درصدی برداشت، میزان افت تراز آبخوان در طی ۲۰ سال آینده در حدود ۳۷ متر می باشد که افت سالانه آن در حدود ۱٫۹ متر می باشد و فرونشست زمین در این حالت نیز در حدود ۲۸۰ سانتی متر پیش بینی می شود. در نهایت با استناد به نقشه های تهیه شده از آبخوان مروودشت باتوجه به آبرفتی بودن سفره آب زیرزمینی اثر افت سطح آب را می توان با فاصله مکانی کم مشاهده کرد که میزان فرونشست در حاشیه جنوبی و جنوب غربی دشت به دلیل ضخامت کم رسوبات و در نواحی شمالی و شمال شرقی دشت به دلیل رسوبات دانه درشت، کمتر از قسمت های مرکزی دشت باشد.

استناد: حیدری، اعظم، جباری، ایرج. (۱۴۰۱). مدل سازی توسعه فرونشینی دشت مروودشت در رابطه با برداشت آب های زیرزمینی. مخاطرات محیط

طبیعی، ۱۱ (۳۴)، ۳۴-۱۷. DOI: 10.22111/jneh.2022.38867.1815



© اعظم حیدری، ایرج جباری.*

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

* این مقاله مستخرج از رساله دکتری خانم اعظم حیدری به راهنمایی آقای دکتر ایرج جباری می باشد که در دانشگاه رازی کرمانشاه انجام شده است

مقدمه

تغییرهای آب‌وهوایی، فشارهای مضاعفی را بر اکوسیستم‌ها وارد نموده و بحران‌های محیطی را در بسیاری از کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه خشک افزایش داده است. از مهم‌ترین و اساسی‌ترین منابع طبیعی موجود در هر سرزمینی و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، منابع آب است. آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع آب است و برای اهداف مختلفی مانند کشاورزی، تأمین آب آشامیدنی و صنعتی استفاده می‌شوند (باهیر^۱ و همکاران ۲۰۱۹؛ باکی^۲ و همکاران ۲۰۱۷؛ کاریا^۳ و همکاران ۲۰۱۸؛ باهیر^۴ و همکاران ۲۰۱۸؛ نوایتی^۵ و همکاران ۲۰۲۰). کشور ایران که بخش اعظمی از آن در شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک قرار دارد، با بحران کمبود آب مواجه است. در این مناطق به دلیل محدودیت منابع آب سطحی، برداشت به منابع آب زیرزمینی متمرکز شده و بر سامانه‌های محیطی فشار وارد می‌شود. استان فارس یکی از مناطقی است که به دلیل قرارگیری در مناطق اقلیمی خشک و نیمه خشک با بحران کمبود آب مواجه است که می‌توان گفت آثار زیان‌بار محیطی به‌ویژه ژئومورفولوژیک در آن بیش از هر جای آشکارتر است. بخش عمده‌ای از این استان در دشت مرودشت قرار دارد که به دلیل قرارگیری در منطقه خشک و نیمه خشک با کاهش بیش‌ازحد تراز آب زیرزمینی، به علت بهره‌برداری بیش از اندازه از آبخوان‌ها مواجه است (گزارش سازمان آب فارس، ۱۳۹۵). همچنین حفر چاه‌های بدون مجوز (دفتر مطالعات پایه وزارت نیرو، ۱۳۹۵) باعث بروز حوادثی جبران‌ناپذیر شده است که این موضوع باعث گشته بسیاری از آبخوان‌های کشور در شرایط بحرانی قرار گرفته و مانند دشت مرودشت به علت کاهش تراز آبخوان جزء دشت‌های ممنوعه اعلام گردند. بنابراین در این منطقه یک ارتباط ناهماهنگ بین انسان و محیط برقرار شده است که افزایش جمعیت و بالا رفتن سطح انتظارات از زمین باعث شده است که منابع آب سطحی پاسخگو نبوده و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی نه تنها بهره‌برداری از این آب‌ها را محدود ساخته بلکه منجر به پدیده فرونشست زمین و خسارت‌های جانی و مالی سنگینی شده است. به‌طور کلی بحث‌هایی که در ارتباط با علل افت آب زیرزمینی در ایران صورت گرفته در تضاد با یکدیگر بوده و هنوز به یک جامعیت و هدفی روشن دست پیدا نکرده است. برخی معتقدند علل افت آب زیرزمینی، ناشی از تغییر اقلیم گسترده در ایران است (وحیدی، ۱۳۹۰؛ ربانی و علیخانی، ۱۳۸۹) و برخی دیگر آن را نتیجه بهره‌گیری بی‌رویه انسان از منابع آبی و عدم مدیریت درست منابع آب می‌دانند (نورانی و همکاران، ۱۳۹۴؛ فسخودی و میرزایی، ۱۳۹۲). هرچند منابع آب زیرزمینی بلافاصله تحت تأثیر تغییرهای آب و هوایی به‌ویژه نوسانات بارندگی قرار نمی‌گیرد (صمدی و همکاران، ۱۳۹۴). اما در دراز مدت به واسطه تغییرهای اقلیمی و یا افزایش برداشت نسبت به نفوذ آب، سبب کاهش تراز آب‌های زیرزمینی می‌شود. برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی باعث تغییر لندفرم‌ها و ایجاد عوارض مختلف ژئومورفولوژیک می‌گردد که با استفاده مدل عددی جریان آب زیرزمینی مادفلو مک دونالد و هابارگ^۶ (۱۹۹۶) یک شبیه‌ساز سه‌بعدی برای جریان آب زیرزمینی از طریق روش عددی تفاضلات محدود است که می‌تواند جریان آب زیرزمینی را تحت شرایط پیچیده هیدرولیکی و با فرآیندهای گوناگون هیدرولوژیکی ژو^۷ و لی (۲۰۱۱)

1 Bahir
2 Baki
3 Kariya
4 Navayati
5 Mac Downald
6 Gwo

شبیه‌سازی کند. این مدل قادر است جریان آب زیرزمینی قابل‌استفاده را شبیه‌سازی کند (رجایی و همکاران، ۲۰۰۸؛ میتلس^۱ و همکاران ۲۰۱۱؛ السلا^۲ و همکاران، ۲۰۱۱) و همچنین در مدیریت سطح آب‌زیرزمینی و استخراج آن (لثو و همکاران، ۲۰۱۰؛ لثو^۳ و همکاران، ۲۰۰۶) نیز کاربرد داشته باشد. اولین پژوهش در زمینه مدل‌سازی آب‌زیرزمینی توسط استلمان^۴ (۱۹۵۶) با به‌کار بردن روش تفاضل محدود انجام گرفت که برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان‌های ناپایدار دو بعدی در آبخوان‌های ناهمگن از این روش استفاده کرد (به ذکر از توسلی، ۱۳۷۷). گویمون و هیرومیکا^۵ (۱۹۸۵) برای ارزیابی واکنش آبخوان‌ها به تغذیه مصنوعی و بررسی تغییرهای سفره آب زیرزمینی اقدام به مدل‌سازی آبخوان نمودند و نتایج حاکی از آن بود که تحلیل‌های هیدرولوژیکی مناسب و شناسایی ژئوتکنیک منطقه اگر با مدل‌سازی عددی ترکیب شوند مدل ایجادشده می‌تواند نوسانات تراز آبخوان‌ها را به بهترین نحو شبیه‌سازی کند. نتایج مثبت حاصل از این مدل باعث شد پژوهشگران بعدی مانند سان^۶ و همکاران (۱۹۹۹)، جین^۷ و همکاران (۲۰۱۸)، راشیدا^۸ و همکاران (۲۰۲۰)، لایا^۹ و همکاران (۲۰۱۹)، المدانی^{۱۰} (۲۰۱۱) و راجی^{۱۱} (۲۰۱۳) به بررسی پدیده فرونشست ناشی از افت تراز ایستابی پرداخته و براساس آن پیش‌بینی‌های مختلف را در رابطه فرونشینی، سیل‌خیزی، فرسایش و حتی وضعیت اقتصادی منطقه پرداختند. همچنین شاید چشم‌گیرترین این پژوهش‌ها را بتوان پژوهش‌هایی دانست که در روابط به‌دست‌آمده که در آن‌ها بافت مواد زیرسطحی نیز دخالت داده شده و براساس آن وضعیت فرونشینی در نقاط مختلف پیش‌بینی شده است. نمونه‌ی چنین پژوهشی را یانگ^{۱۲} و لو (۲۰۱۹) برای پیش‌بینی تغییر شکل عمودی در حوضه‌های دارای رسوبات بسیار فشرده استفاده کردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نمونه‌های انجام‌شده برای یک مدل مفهومی نشان داد که تنش اعمال‌شده به‌دلیل پمپاژ بالای آب‌زیرزمینی باعث تغییر در لایه‌های همگن خاک به‌صورت ناهمگن می‌شود. پژوهش‌های مشابه نشان داده است که بیشترین فرونشست‌ها در محدوده‌های آبخوانی رخ داده است که در آنجا ضخامت لایه ریزدانه بیشتر بوده است (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۹؛ نادری و همکاران، ۲۰۱۸؛ جان قوتامی^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۰؛ بیژنی و همکاران، ۲۰۲۰؛ احتشامی، ۲۰۱۹؛ کارکی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۲۱؛ گیلبرت^{۱۵} و تورن، ۲۰۱۹؛ میترا^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۹؛ هومر^{۱۷} و همکاران، ۲۰۲۰؛ ویلیام^{۱۸}، ۲۰۱۶).

1 Mitles
 2 Eslama
 3 Leo
 4 Eatelman
 5 Hiromika
 6San
 7 Jin
 8 Rashida
 9 Laya
 10 Almadani
 11Raji
 12 Yang
 13 Jan
 14Karki
 15 Gilbert
 16 Mitra
 17 Homer
 18 Vilyam

نتایج این دست از پژوهش‌ها و استفاده از مدل‌هایی مانند مادفلو و وپ باعث شده است حتی شیوه‌های مدیریتی نیز با دقت بیشتری انجام گیرد. نتایج پژوهش‌های هو^۱ و همکاران (۲۰۱۰) برای صرفه‌جویی در آب کشاورزی و مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی منطقه شی جیا ژوانگیا پژوهش جورج^۲ و همکاران (۲۰۱۱) در زیر حوضه‌ی موسی در کریشنای هند و تأکید بر شیوه‌های صحیح کشاورزی و مدیریت منابع آب، در پژوهش سورینادو^۳ و همکاران (۲۰۱۵) که برای برنامه‌ریزی بهینه پمپاژ آب‌های زیرزمینی و مکان‌های مناسب برای آبیگری آب‌های زیرزمینی برای معدن کاری ایمن می‌توان اشاره کرد.

استفاده از مدل‌های مادفلو^۴ در سال‌های اخیر در ایران نیز گسترش قابل توجهی یافته است، به نحوی که پورحقی و همکاران (۱۳۹۴) در شبیه‌سازی آبخوان دشت لرستان- دلفان وضعیت آینده آن را در شرایط کاهش ۲۰ درصدی بهره‌برداری در خشکسالی و ترسالی را پیش‌بینی کردند یا بیات و همکاران (۱۳۹۷) با شبیه‌سازی عددی، مسیر جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان-بهار را مشخص نمودند و با این جریان احتمال دادند که سطح آلودگی آبخوان رو به افزایش بگذارد. در سال‌های اخیر نیز رنجبر و احتشامی (۲۰۱۹) علاوه بر استفاده از توانایی عددی مدل مادفلو و الگوریتم‌های داده محور برای پیش‌بینی قوی و سریع فرونشست زمین، نشان دادند که بهره‌برداری بیش‌از- حد از منابع آب زیرزمینی دشت تهران باعث تخریب سازند آبرفتی در سطح وسیع شده است. علی‌رغم وجود چنین پژوهش‌هایی و نگرانی‌های شدید از استفاده از منابع آب و نتایج احتمالی آن در فرونشینی دشت مرودشت هنوز رابطه دقیق بین این دو پدیده برای اقدامات عملی و مدیریتی صورت نگرفته است و در این باره این پژوهش قصد دارد با استفاده از مدل مادفلو و در بازه زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ بین فرونشینی و برداشت آب زیرزمینی آبخوان دشت مرودشت رابطه برقرار نموده و بر اساس آن در سناریوهای مختلف پیش‌بینی کند که روند این فرونشینی چگونه خواهد بود.

داده‌ها و روش‌ها

برای انجام این پژوهش نخست داده‌ها و اطلاعات منطقه مورد مطالعه مانند داده‌های چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای که شامل اطلاعات مربوط به ۸۱ چاه اکتشافی و ۷۵۰۰ چاه بهره‌برداری از سازمان مدیریت منابع آب استان فارس جمع‌آوری شد (آماربرداری سازمان آب فارس، ۱۳۹۸).

برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی مدل عددی مادفلو در محیط نرم‌افزار GMS^۵ با توجه به کاربرد و جامعیت آن انتخاب شد. پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، مدل مفهومی منطقه که به صورت فرم هندسی و براساس پارامترهایی که بر آبخوان بیشترین تأثیرپذیری را دارند، تعیین شد. برای تهیه مدل مفهومی، محدوده دشت به صورت فایل GIS^۶ وارد نرم‌افزار شد. سپس خصوصیت‌های دیگر آبخوان مانند مرزهای تراوا و ناتراوا که با استفاده از پارامترهای خواص لیتولوژیکی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و مشخصات سازندهای مرزی در منطقه و هم‌چنین دبی

1 Hou

2 Jorj

3 Sourinado

4 Mod Flow

5 Groundwater Modeling System

6 Geographic Information System

ورودی و خروجی به سلول‌های مرزی در محدوده تعیین شد و با انطباق تمام پارامترهای یادشده نقشه میان‌یابی مرزهای تروا و ناتروا در آبخوان تهیه شد. مرزهای شبیه‌سازی‌شده در این مدل شامل مرز بدون جریان برای مرزهای شرق، غرب و جنوب آبخوان و مرزهای جریان وابسته به بار هیدرولیکی برای مرزهای ورودی در شمال، شمال غرب و خروجی در جنوب شرق آبخوان تعیین شد.

در ادامه با استفاده از DEM^۱ سی متری استان فارس نقاط ارتفاعی (توپوگرافی سطح زمین) تهیه شد. سپس نقاط ارتفاعی را به نرم‌افزار GMS وارد کرده و در نهایت با استفاده از روش کریجینگ نقشه پهنه‌بندی توپوگرافی سطح زمین تهیه شد. به جهت توسعه مدل مفهومی، نیاز به تخمین دقیقی از تغییرهای ضخامت آبخوان (توپوگرافی سنگ کف) در حدود ناحیه اشباع بود. برای این منظور اطلاعات عمق چاه‌های عمیق و بالاتر از حد معین و داده‌های به-دست‌آمده از مطالعات ژئو الکتریک که در محدوده دشت انجام شده بود با هم تلفیق گشت و برای تعیین ضخامت آبخوان در لایه‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن عمق چاه‌های بهره‌برداری و نیز داده‌های به‌دست‌آمده از اکتشافات ژئوفیزیک، به صورت فایل‌های متنی وارد محیط GMS شد. سپس به روش میان‌یابی کریجینگ، نقشه پهنه‌بندی ضخامت سنگ کف با کم کردن ضخامت آبخوان از لایه توپوگرافی سطح زمین تهیه شد.

پس از تهیه مدل مفهومی، محیط آبخوان با استفاده از شبکه‌بندی تفاضل محدود به صورت مدل ریاضی مشخص شد. با استفاده از شبکه‌های با سلول‌هایی در جهت X به ۱۰۳ و در جهت Y به ۱۰۶ ردیف تقسیم و مش‌بندی آبخوان انجام شد. در واقع ساخت مدل ریاضی یک مرحله واسط برای انتقال اطلاعات واردشده به محیط نرم‌افزار GMS می‌باشد. به طوری که، این مرحله شامل بیان مدل مفهومی در قالب معادلات ریاضی است. به عبارت دیگر، طی این مرحله مدل مفهومی از سیستم فیزیکی به سیستم ریاضی تبدیل شد. معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های آزاد (بیر، ۱۹۹۰) در حالت کلی به صورت زیر می‌باشد (معادله ۱). 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.

(۱)

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

در ادامه، اطلاعات جمع‌آوری‌شده در مدل مفهومی شامل مقادیر پارامترهای فیزیکی (ضخامت لایه آبدار، ضریب تخلخل و غیره) و هیدرودینامیکی (ضریب هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال) در آبخوان و همچنین مقادیر تغذیه (نفوذ ناشی از بارش و آب برگشتی ناشی از مصارف) و تخلیه از آبخوان (پمپاژ چاه‌ها) به مدل ریاضی منتقل شد و هر کدام توسط نماد مختص به خود نمایش داده شد. در نهایت محاسبات مربوط به هر سلول انجام شد و نتایج در قالب نقشه‌های شبیه‌سازی‌شده مشخص شد. پس از تبدیل مدل مفهومی به شبکه و تعیین سایر خواص سلول‌های شبکه، به اجرای اولیه مدل برای حالت پایدار اقدام شد که در حالت اولیه امکان دارد مدل در مراحل ابتدایی اجرا نتایج قابل‌قبولی را ارائه ندهد. به عنوان مثال احتمال دارد بین داده‌های مشاهداتی سطح تراز و داده‌های محاسباتی اختلاف

^۱ Digital Elevation Model

زیادی وجود داشته باشد که باعث ایجاد خطای بالا در نتایج نرم افزار می‌شود. در مدل مادفلو این فرضیات با اجرا کردن مرحله کالیبره مدل انجام شد. به این صورت که تعدادی از پارامترهای آبخوان به‌عنوان پارامتر کالیبراسیون در نظر گرفته شد و نتایج مربوط به داده‌های محاسباتی تا حد ممکن و بهینه به داده‌های مشاهداتی نزدیک شد و باتوجه به این پارامترها کالیبره مدل انجام شد. پس از کالیبره کردن مدل در حالت پایدار، مدل در حالت ناپایدار نیز باتوجه به نوع کاربری و مشخص کردن تعداد گام‌های زمانی کالیبره و اجرا شد. پس از انجام کالیبراسیون مدل، مرحله صحت‌سنجی که مهر تأییدی برای انجام مدل‌سازی هم در شرایط پایدار و ناپایدار است نیز انجام شد. در ادامه برای تحلیل حساسیت پارامترهایی که واسنجی شده‌اند از پارامترهایی مانند هدایت هیدرولیکی، آنیزوتروپی، پارامتر تغذیه سطحی، پارامتر شبکه آبراه‌های، مرزهای تراوا و آب‌دهی ویژه استفاده شد. به این صورت که پارامترهای واسنجی که مورد آنالیز حساسیت قرار گرفته بودند به دلیل داشتن میزان خطای کم و قابل قبول صحت آن‌ها تأیید شد. باتوجه به هدف این پژوهش، به‌منظور ایجاد رابطه بین تراز آبخوان و نرخ فرونشست، پس از تهیه مدل‌سازی کمی تراز آبخوان اقدام به مدل‌سازی فرونشست آبخوان مروودشت شد. اجرای مدل‌سازی کمی نشست زمین در حوضه مروودشت-خرامه در قالب مدل مادفلو در محیط GMS بر مبنای توسعه بسته عددی^۱ SUB انجام گرفت. سپس پردازش بر روی خروجی مدل آب زیرزمینی، مقدار عددی تغییرهای سازند آبخوان بر حسب واحد طول، از طریق رقوم تجمعی $v\alpha$ در هر دوره زمانی انجام گرفت. این مقدار در یک رابطه مستقیم با افت جریان آب زیرزمینی در مناطقی که با عدد منفی تعیین می‌شود و نشان‌دهنده نشست زمین می‌باشد. به‌منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی نرخ فرونشست زمین از معادلات یانگ و همکاران (۲۰۰۹) و چو و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شد (معادله ۲). که در این معادلات $V\alpha$ نرخ فرونشست سالانه (میلی‌متر در سال)، V_K حجم ناحیه فرونشستی، k مرتبه (میلی‌متر مکعب)، V_{aK} نرخ فرونشست سالانه در یک منطقه (میلی‌متر در سال)، S_k مساحت منطقه فرونشست و n نقاط فرونشست در منطقه مورد مطالعه است. در ادامه جهت پیش‌بینی شرایط آینده آبخوان، با استفاده از سناریوهایی در سری زمانی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ساله مدل مورد برازش قرار گرفت.

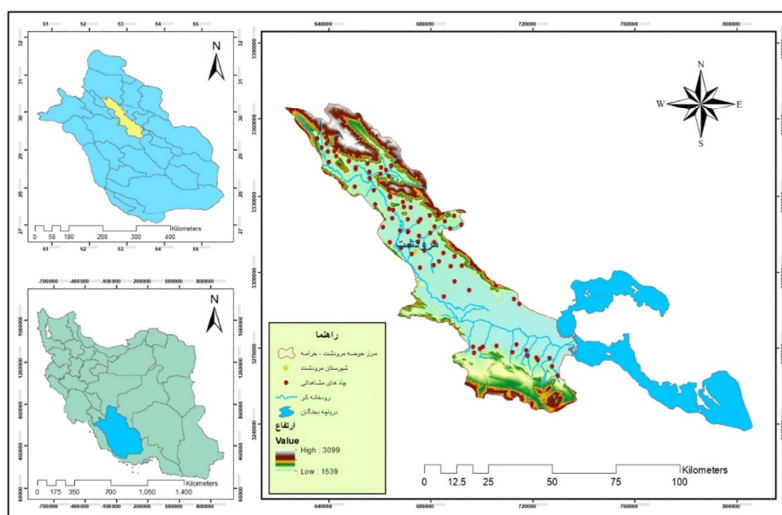
$$v\alpha = \frac{\sum_{k=1}^n V'_K}{\sum_{k=1}^n S_k} = \frac{\sum_{k=1}^n V_{aK} S_k}{\sum_{k=1}^n S_k} \quad (2)$$

ویژگی منطقه مورد مطالعه

محدوده مروودشت-خرامه واقع در حوضه آبریز دریاچه بختگان در استان فارس می‌باشد که از نظر زمین‌شناسی در پهنه تکتونیکی رشته کوه‌های زاگرس چین‌خورده قرار دارد. آبخوان مروودشت-خرامه در مختصات جغرافیایی "۲۵' ۱۷° تا "۲۶' ۴۴° ۵۳ طول شرقی "۱۸' ۲۹° تا "۲۶' ۷۱° عرض شمالی واقع شده است. مساحت کل این محدوده مطالعاتی ۳۹۲۶/۱ کیلومتر مربع بوده که از این میزان ۲۱۰۲/۷۰ کیلومتر مربع دشت و ۱۸۲۳/۴ کیلومتر مربع را ارتفاعات تشکیل داده است. این ارتفاعات دارای امتداد شمال‌غربی، جنوب‌شرقی است. دشت‌های این حوضه که نواحی پست بین ارتفاعات را تشکیل می‌دهند، غالباً از روند ارتفاعات تبعیت می‌کنند. حداکثر ارتفاع در حوضه ۳۰۹۹ متر و حداقل ارتفاع ۱۵۳۹ متر می‌باشد. این حوضه دارای میانگین بارش سالانه

¹ Subsidence

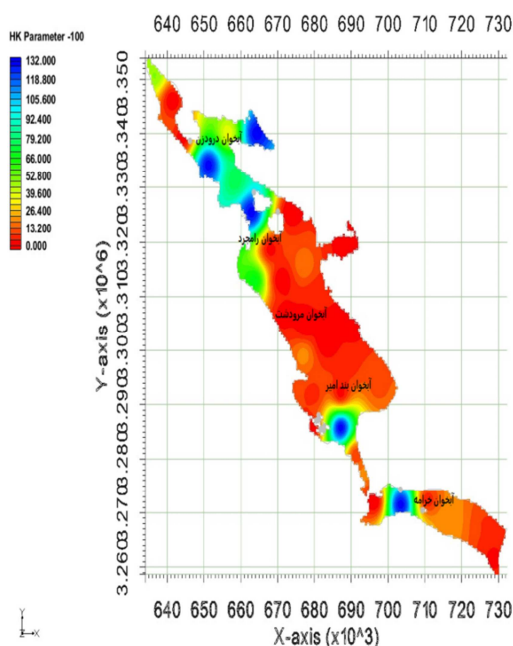
۲۸۰/۳۵ میانگین سالانه درجه حرارت ۱۷/۵ سانتی‌گراد می‌باشد. از نظر هیدرولوژی در این حوضه رودخانه کر، یک رودخانه اصلی و دائمی می‌باشد که از ارتفاعات شمال غرب حوضه سرچشمه گرفته و طول آن تا دریاچه بختگان ۳۵۱/۵ کیلومتر و مساحت آبخوان کر ۱۴۷۰/۵۴۰ کیلومترمربع است. رودخانه کر در آبخوان مرو دشت پس از تلاقی با رودخانه سیوند در نهایت به دریاچه بختگان سرازیر می‌شود. تراکم شبکه آبراهه‌ها نیز در سطح حوضه آبریز مورد مطالعه بسیار متفاوت است. در رسوبات نرم و فرسایش پذیر، مثل سازندهای گروه فارس، پابده و گورپی تراکم آبراهه‌ها بیشتر، جریان‌های سطحی و موقتی در منطقه دارای بستری پهن هستند و اغلب آن‌ها به صورت همگرا از حاشیه به مرکز دشت جریان یافته و در نهایت به سدهای درودزن و سیوند واقع در منطقه سرازیر می‌شوند؛ ولی در سطح سازندهای سخت از تراکم کمتری برخوردار هستند. بستر این رودخانه در برخی نقاط بر روی این سازندها دارای شکستگی‌ها و درز و شکاف فراوان است که بیشتر به شکل دره‌های ژرف V مانند نمایان است. توسعه و تراکم فشرده شبکه آبراهه‌ها در سرشاخه‌های شمال غربی و غرب حوضه رودخانه کر در حد فاصل تنگ براق و دشت درودزن به علت گسترش رسوبات نرم و فرسایش سازند گورپی، سبب ایجاد ناحیه‌ای بسیار ناهموار شده، موجب انتقال حجم زیادی از رسوبات به دریاچه سد درودزن می‌گردد. چین‌خوردگی‌های باریک و فشرده و بهم‌ریختگی طبقات و گسل‌های تراستی متعدد و مخروط افکنه‌های فراوان مانند دشتک و گنبد‌های نمکی واقع در شمال شرق درودزن که حاصل رسوبات سازند هرمز در منطقه است از خصوصیت‌های بارز ژئومورفولوژیکی در حوضه آبریز رودخانه کر می‌باشد. در شمال حوضه سازندهای آهکی گسترش غالب داشته و اغلب پرتگاه‌ها و ستیغ کوه‌های بلند را تشکیل داده است که مهم‌ترین آن تنگ براق است که حاصل فرسایش آب‌های روان می‌باشد (نبوی، ۱۳۷۵). در کنار طاقدیس‌های بلند و مرتفع حوضه، ناودیس‌های کشیده و عریضی نیز وجود دارند که به وسیله رسوبات حاصل از فرسایش ارتفاعات اطراف پر شده و دشت‌های این حوضه را به وجود آورده‌اند که یکی از گسترده‌ترین دشت‌های حاصل خیز ایران به نام مرو دشت در این حوضه قرار دارد (شکل ۱).



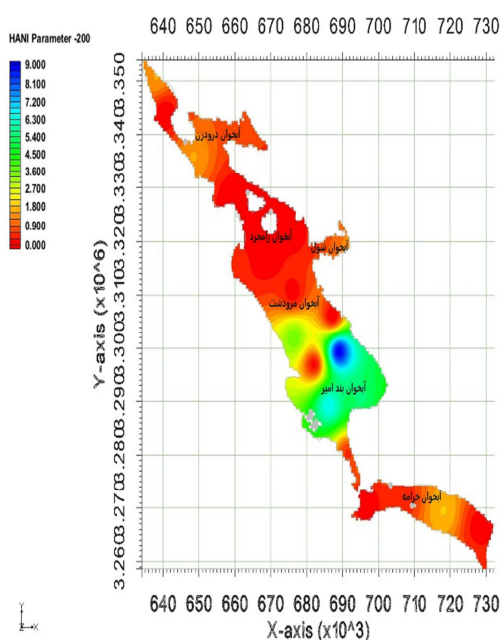
شکل ۱: موقعیت حوضه آبریز مرو دشت - خرامه

نتایج و بحث

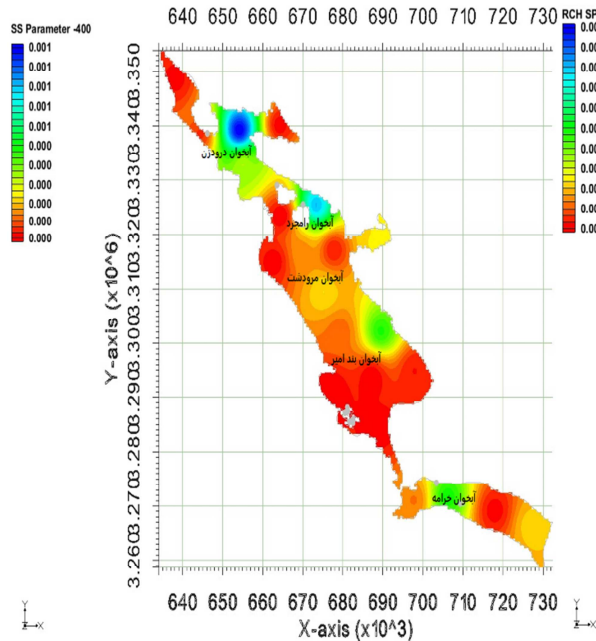
نتایج حاصل از مدل‌سازی کمی آبخوان مرودشت نشان داد که پارامتر ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی، در نواحی مرکزی آبخوان دارای بیشترین مقدار است که می‌توان به آبخوان منطقه شول و بند امیر اشاره کرد (شکل ۲). در حالی که هدایت هیدرولیکی افقی، در چهار پایلوت با توزیع‌های جنوب، مرکز و شمال دارای بیشترین مقدار می‌باشد. بیشینه مقدار هدایت هیدرولیکی افقی در آبخوان‌های مناطق درودزن، رامجرد، بندامیر، خرامه کاملاً مشهود است (شکل ۳). در نهایت دو پارامتر تغذیه از سطح و آب‌دهی ویژه به ترتیب در نواحی میانی و شمالی آبخوان به دلیل قرارگیری سدهای درودزن، سیوند در آن مناطق دارای ارزش بالاتری بودند (شکل‌های ۴-۵). نکته قابل توجه از منظر توزیع بیشینه مقادیر این پارامترها مشخص‌کننده این مطلب می‌باشد که در اجرای مدل بیشترین سلول‌ها به صورت خشک در آبخوان مشخص شده است. در هر چهار پارامتر موردنظر بیشترین سلول خشک، مربوط به منطقه رامجرد می‌باشد. بنابراین تمایل به تأمین آب ازدست‌رفته در ازای افت صورت‌گرفته با این پارامترهای نهایی قابل انتظار بود. نتایج نشان داد، این مدل با قدرت تغییرپذیری مکانی بالا تأثیر پارامترهای مختلف را بر تراز آب زیرزمینی در نقاط مختلف آبخوان را به خوبی مشخص می‌کند. در نهایت مدل‌سازی کمی آبخوان نشان داد در محدوده‌هایی که بیشترین کاهش تراز آب زیرزمینی به وقوع پیوسته است انتظار می‌رود که بیشترین تغییر ساختار عمودی وجود داشته باشد. بنابراین افت آبخوان اثر اساسی بر روی فرونشست زمین می‌گذارد.



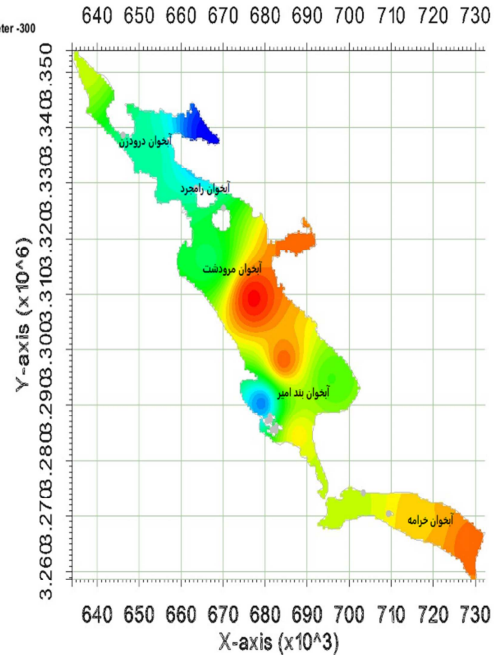
شکل ۳: میان‌یابی پارامتر هدایت هیدرولیکی افقی



شکل ۲: توزیع ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی افقی

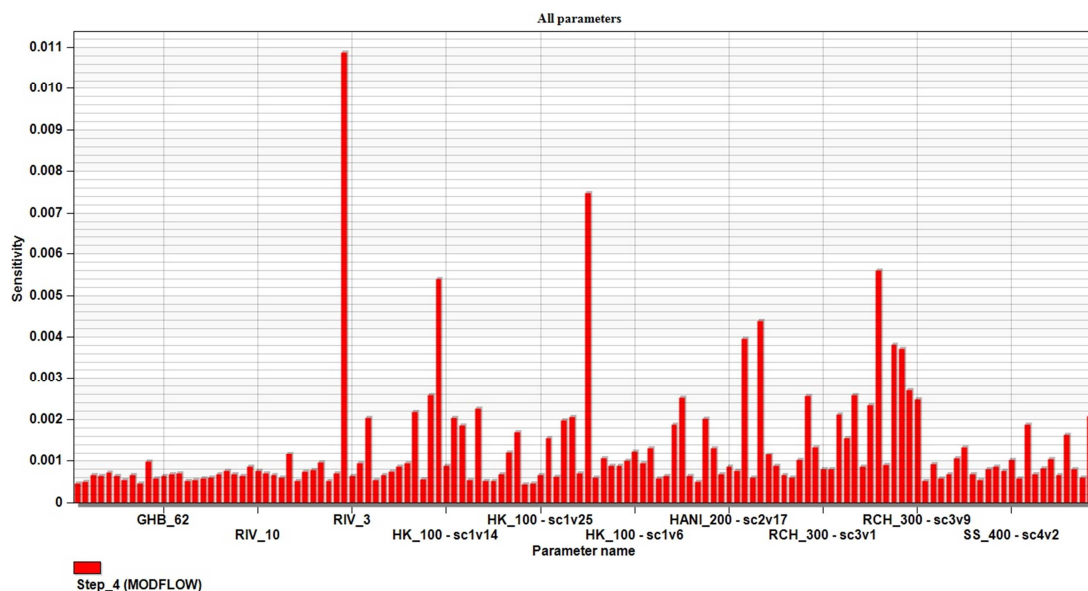


شکل ۵: میان‌یابی نهایی پارامتر آب‌دهی ویژه



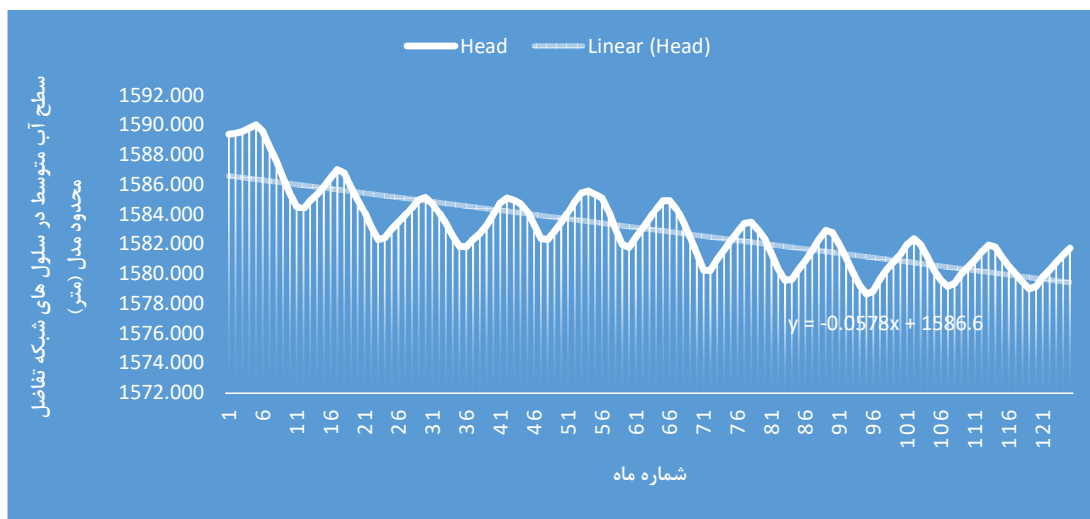
شکل ۶: میان‌یابی نهایی پارامتر تغذیه از سطح

در این پژوهش، از روش تحلیل حساسیت تلفیق شده با مرحله واسنجی استفاده شده است. نتایج خروجی از آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در واسنجی آبخوان مرو دشت، نشان‌دهنده تأثیر حداکثری پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی افقی و یک مجموعه گروه خطی شبکه آبراه‌های بود. هدایت هیدرولیکی آبخوان یکی از پارامترهایی است که در این مدل از عدم قطعیت بالایی برخوردار است و با تغییر در مقادیر این پارامتر مدل حساسیت زیادی نشان می‌دهد. بنابراین دلیل بالا بودن میزان حساسیت هدایت هیدرولیکی آبخوان وجود چاه‌هایی با آب‌دهی بالا در این مناطق است، از این رو با آمارهایی که از سازمان آب منطقه‌ای فارس دریافت شده است هماهنگی دارد. همچنین پارامتر آنیزوتراپی نیز در این مدل دارای حساسیت قابل توجهی است. مقدار حساسیت هر یک از پایلوت‌های منتخب در تخمین پارامترهای منتخب نشان داده شده است (شکل ۶). 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. بر همین اساس، ویرایش‌های صورت‌گرفته بر مرزهای با بار هیدرولیکی پویا (مدل مفهومی) در حدود پارامترهای حساسیت زیاد، خطای کل واسنجی را در آخرین مرحله از مراحل چهارگانه واسنجی به حداقل مطلوب کاهش داد. بنابراین، به دلیل داشتن میزان خطای کم و قابل قبول صحت پارامترهای واسنجی شده تأیید شد.

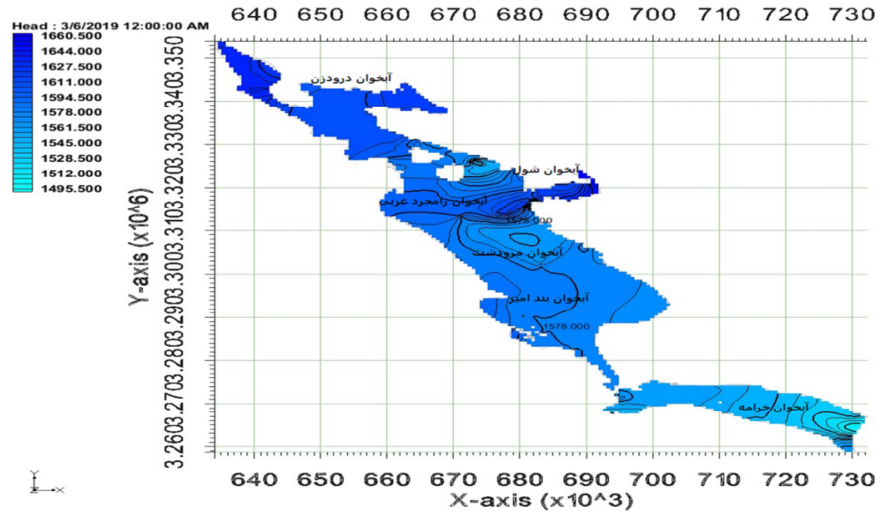


شکل ۶: تحلیل حساسیت پارامترهای واسنجی

پس از تأیید واسنجی باتوجه به هدف پژوهش، آخرین بازه لایه افت سطح آب در آبخوان به صورت رستری در شبکه تفاضل محدود و در نمودار زیر به صورت متوسط سری زمانی تهیه شد (شکل‌های ۷-۸). افت متوسط تراز آبخوان مرودشت در طی بازه ۱۰ ساله مدل‌سازی حدود ۱۵ متر می‌باشد که افت متوسط سالانه آبخوان حدود ۰,۷۶ متر در سال می‌باشد. بنابراین از نتایج به دست آمده می‌توان چنین عنوان کرد که در آبخوان مرودشت، 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.

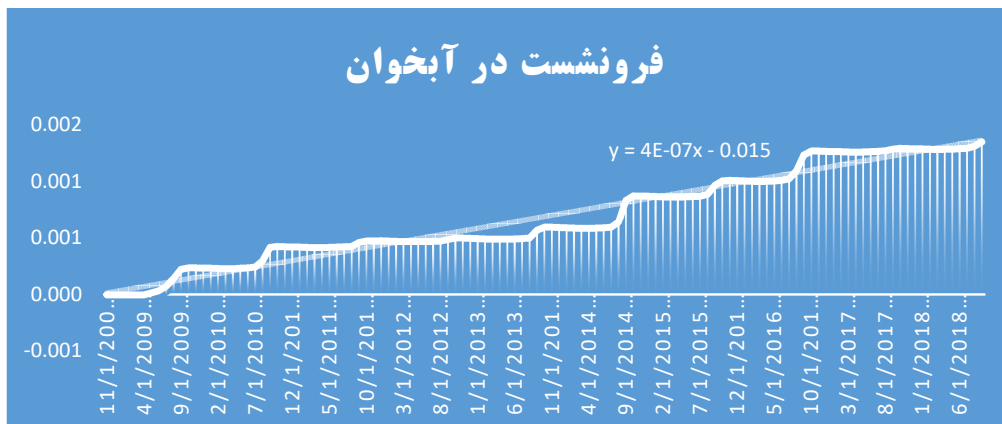


شکل ۷: سری زمانی افت سطح آب در آبخوان (متر)

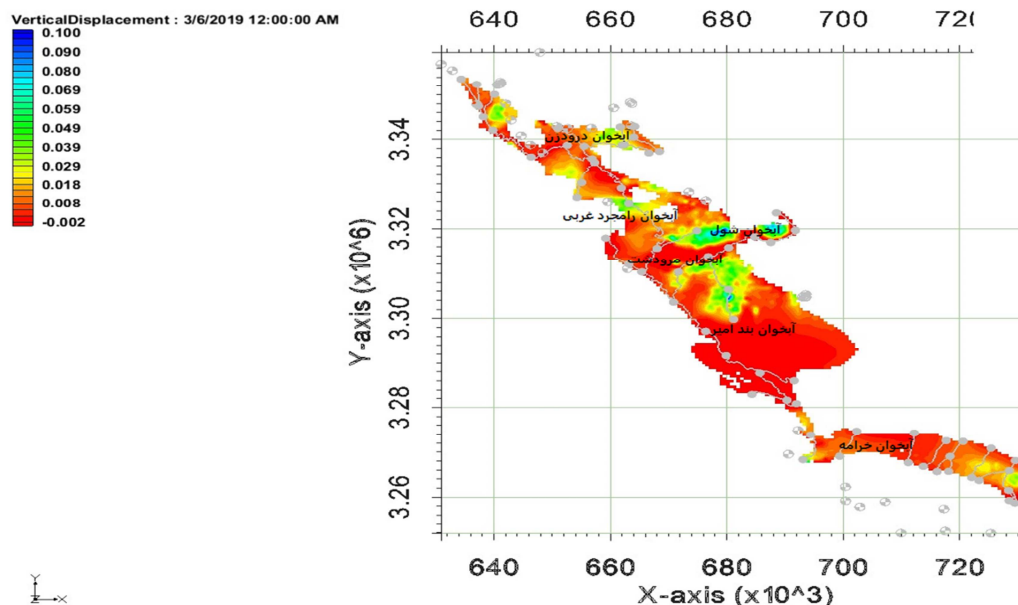


شکل ۸: تصویر رستری افت نهایی سطح آب در آبخوان

پس از تهیه لایه افت سطح آب زیرزمینی، نمودار سری زمانی متوسط فرونشست در سطح آبخوان باتوجه به پارامترهای مدل تهیه شد (شکل ۹). در نهایت لایه رستری فرونشست زمین بر روی شبکه تفاضل محدود در آخرین بازه زمانی تهیه شد (شکل ۱۰). بررسی تغییرهای عمودی ساختار زمین نشان داد که در بازه زمانی ۱۰ ساله با فرضیات کاهش تراز آب زیرزمینی مطرح شده سطح آبخوان حداقل تا ۱۵ متر کاهش داشته است. میزان فرونشست محلی تقریباً ۹ سانتی‌متر در هر سال برآورد گردید و بیشینه فرونشست تقریباً ۱۱۴٫۷۸ سانتی‌متر در طی بازه ۱۰ ساله مدل‌سازی به وقوع پیوسته است (جدول ۱). در صورت تخریب ساختار آبرفتی آبخوان این مقدار ممکن است بیشتر از این ارقام با شرایط بدون بازگشت تعذیه سفره آب زیرزمینی باشد.



شکل ۹: سری زمانی فرونشست در آبخوان (متر)



شکل ۱۰: تصویر رستری فرونشست نهایی در آبخوان

جدول ۱: خلاصه آماری نتایج مدل سازی فرونشست (درسال)

حجم کلی فرونشست (متر)	مقدار فرونشست (کیلومتر مکعب)	مساحت آبخوان (کیلومتر مربع)	بیشینه فرونشست محلی (متر)
۰,۰۹۰	۱۳۱,۸۸۵	۱۴۷۰,۵۴۰	۰,۰۹۹

در ادامه جهت پیش بینی شرایط آینده آبخوان، با استفاده از سناریوهایی در سری زمانی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ساله مدل مورد برازش قرار گرفت. تحت هر کدام از شرایط یادشده میزان افت تراز آب در آبخوان برای هر کدام از سه دوره زمانی با میزان نشست زمین برآورد شد. میزان درصد افت تراز آبخوان طبق (معادله ۳) محاسبه شده است. در این معادلات:

$$H_0 = \text{میانگین تراز آبخوان در سال پیش بینی} \quad H_I = \text{میانگین آبخوان تراز در سال } I$$

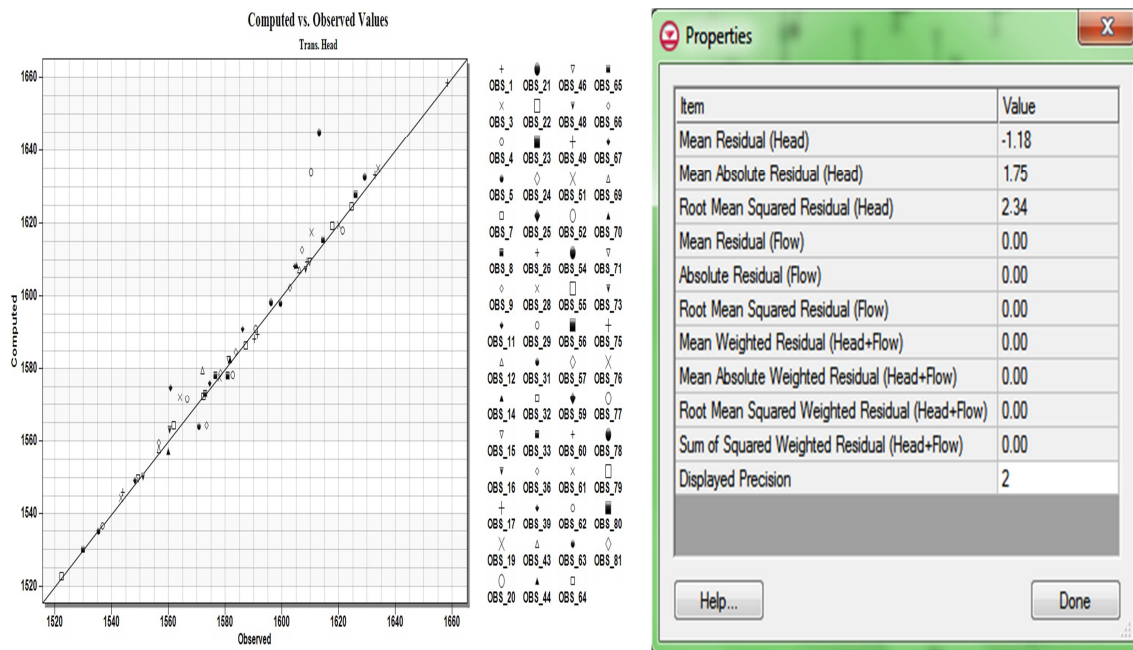
$$H = \frac{H_0 - H_I}{H_0} = H * 100 \quad (3)$$

در نتیجه باتوجه به شرایط حاکم بر آبخوان در صورت ادامه روند بهره برداری کنونی پیش بینی می شود تراز سطح آب زیرزمینی در طی سال های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۹ میزان ۱۵ متر افت خواهد داشت که سالانه حدود ۰,۷۶ متر افت می باشد. باتوجه به اینکه یکی از اصلی ترین مخاطرات فروکش تراز آبخوان نشست زمین به دلیل کاهش فشار آب منفذی بین رسوبات، به دلیل افزایش تنش مؤثر و در نتیجه تراکم و تحکیم در رسوبات است و همچنین باتوجه به نشست میانگین زمین که به طور میانگین ۰,۷۶ متر به ازای ۱۰ متر افت تراز آبخوان است، میزان نشست متوسط زمین طبق این سناریو ۱۱۴,۷۸ سانتی متر را نشان می دهد. در صورت افزایش ۱۰ درصدی در میزان بهره برداری از آبخوان، افت

تراز سطح آب زیرزمینی در طی دوره پیش‌بینی در حدود ۲۷ متر خواهد بود که سالانه افتی معادل ۱,۴ متر را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن ۰,۷۶ متر نشست زمین به ازای هر ۱۰ متر افت تراز آبخوان در اثر کاهش فشار آب منفذی بین رسوبات، به دلیل افزایش تنش مؤثر و در نتیجه تراکم و تحکیم در رسوبات، در طی ۲۰ سال آینده و تحت سناریو شماره دو، میزان نشست زمین در حدود ۱۹۸ سانتی‌متر خواهد بود. طبق سناریو شماره سه و با افزایش ۳۰ درصدی برداشت، میزان افت تراز آبخوان در طی دوره پیش‌بینی در حدود ۳۷ متر می‌باشد که افت سالانه آن در حدود ۱,۹ متر است. فرونشست زمین در این حالت نیز در حدود ۲۸۰ سانتی‌متر می‌باشد. با توجه به اینکه در این پژوهش برداشت از آب‌های زیرزمینی یکی از علل مهم فرونشست در دشت مرو دشت عنوان شده است، به منظور تبیین روند تغییرات آب زیرزمینی، روند کلی میزان سطح آب سالانه تمام چاه‌های مشاهده‌ای (۸۱ حلقه چاه پیژومتر) در بازه زمانی (۲۰۰۸-۲۰۱۹) مورد بررسی قرار گرفت. در نمایش خطا و همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (مرحله صحت‌سنجی)، محور طولی مقادیر مشاهداتی و در محور عمودی مقادیر محاسباتی برای تک تک پیژومترها نمایش داده شده است. در این نمودار هر کدام از ۸۱ پیژومتر با علامت منحصر به فردی نمایش داده شده است که هرچه علامت مربوط به یک چاه از خط ۴۵ درجه فاصله بگیرد نشان‌دهنده بالا بودن خطای آن می‌باشد و در این شکل هیچ کدام از پیژومترها خطای غیر قابل‌قبولی ندارند (شکل ۱۱). همچنین برای بررسی خطا در صحت‌سنجی از معادله زیر استفاده شده است که اگر مقدار درصد به دست آمده کمتر از ۱۰ درصد باشد مدل‌سازی مطلوب است. اگر کمتر از ۲۰ درصد باشد مدل‌سازی مناسب، اما با مقدار مشخصی خطای قابل بررسی است و اگر بیش از این مقدار باشد دارای خطای بزرگ و قابل بررسی است که مقدار خطا پس از محاسبه در این مدل ۲ درصد حاصل شد.

$$[RMSE/(MAX_{\text{Observation}}-MIN_{\text{Observation}})]=NRMSE$$

با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی از لایه‌های درونی زمین (به ویژه سنگ کف)، دستیابی به این مقدار تا حد بسیار زیادی غیرممکن به نظر می‌رسید. همچنین عامل دیگری که مدل‌سازی را می‌تواند در این مورد با مشکلات بزرگ مواجه سازد، افت شدید سطح آب در آبخوان به سبب وجود برداشت‌های بیش از حد مجاز و حفر چاه‌های غیر مجاز و خشکسالی و غیره است و در عین حال انتظار می‌رفت واسنجی مدل با بایاس شدید همراه گردد. با این همه، در نهایت هیدروگراف چاه‌ها در محدوده انحراف استاندارد داده‌های پیژومتری با تطبیق نسبی حاصل شده و خطای کل نیز به قدر مطلوب کاهش داشت. مقدار مورد نظر برای این مدل با تقسیم RMSE با رقم ۱,۷۵ بر حد اختلاف کمینه از بیشینه در منطقه، عدد نرمال شده ۱۱ درصد را به دست داد که کمتر بودن این عدد از حد ۲۰ درصد برای دوره طولانی مدت شبیه‌سازی، ایده‌آل می‌باشد (شکل ۱۲).



شکل ۱۱: جدول میانگین خطا در مرحله صحت‌سنجی

شکل ۱۲: مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای پیرومترهای موجود

عمده مطالعات صورت‌گرفته در حیطه بررسی رخداد فرونشست در دشت‌های کشور، تنها به تغییرهای کمی ساختار زمین پرداخته است. برای نمونه می‌توان به مطالعات رنجبر و احتشامی (۲۰۱۹) اشاره کرد. در این مطالعه با بررسی پژوهش‌های اخیر در محدوده آبخوان دشت مروودشت، اقدام به تهیه یک شبیه‌ساز تصمیم‌گیری بر پایه روش‌های خطی در مدل مادفلو برای پیش‌بینی میزان فرونشست انجام شده است. شاخص محاسباتی نشان می‌دهد که افزایش تخریب ساختار عمودی زمین درست در مناطقی رخ داده است که در سناریوهای پیش‌بینی با کاهش تراز آب زیرزمینی به دلیل بهره‌برداری بیش‌ازحد در آبخوان مشخص شده است. از این‌رو با آمار سازمان آب منطقه‌ای فارس مبنی بر وجود چاه‌هایی با آب‌دهی بالا در این مناطق هماهنگی دارد. در نهایت آنچه برای مدیران اجرایی کارآمد می‌باشد، ترکیب پارامترهای مؤثر بر ایجاد فرونشست با شرایط پیش‌بینی احتمالاتی شاخص محور می‌باشد.

نتیجه‌گیری

دشت مروودشت واقع در استان فارس یکی از دشت‌های بحرانی استان است که در سال‌های اخیر شاهد فروکش قابل-ملاحظه تراز آبخوان و فرونشست زمین بوده است. از این‌رو، شبیه‌سازی آبخوان دشت و پیش‌بینی میزان افت تراز آبخوان تحت شرایط و سناریوهای متفاوت در آینده از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. بدین منظور، ابتدا پارامترهای موردنیاز برای تهیه مدل مفهومی آبخوان مورد ارزیابی و سپس نوسانات سطح ایستابی مورد بررسی قرار گرفت. در نتیجه باتوجه به شرایط حاکم بر آبخوان، در صورت ادامه روند بهره‌برداری کنونی پیش‌بینی می‌شود تراز سطح آب زیرزمینی در طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۹ میزان ۱۵ متر افت خواهد داشت که سالانه حدود ۰,۷۶ متر افت می‌-

باشد. همچنین باتوجه به نشست میانگین زمین که به‌طور میانگین ۰,۷۶ متر به ازای ۱۰ متر افت تراز آبخوان است، میزان نشست متوسط زمین طبق این سناریو ۱۱۴,۷۸ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. در صورت افزایش ۱۰ درصدی در میزان بهره‌برداری از آبخوان، افت تراز سطح آب زیرزمینی در طی دوره پیش‌بینی در حدود ۲۷ متر خواهد بود که سالانه افتی معادل ۱,۴ متر را نشان می‌دهد. طبق سناریو شماره سه و با افزایش ۳۰ درصدی برداشت، میزان افت تراز آبخوان در طی دوره پیش‌بینی در حدود ۳۷ متر می‌باشد که افت سالانه آن در حدود ۱,۹ متر است. فرونشست زمین در این حالت نیز در حدود ۲۸۰ سانتی‌متر می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که در دشت مرو دشت، میزان فرونشست رابطه مستقیمی با افت آب‌های زیرزمینی دارد. بنابراین لازم است تا در مصرف آب‌های زیرزمینی به‌خصوص در زمینه کشاورزی نظارت بیشتری صورت گیرد و میزان بهره‌برداری متناسب با میزان تغذیه باشد؛ زیرا تداوم روند استفاده از آب‌های زیرزمینی علاوه بر مسائل و مشکلات مربوط به کم‌آبی می‌تواند منجر به مخاطرات جبران‌ناپذیر ناشی از فرونشست شود.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از دانشگاه رازی و شرکت مدیریت منابع آب ایران برای فراهم‌کردن امکانات و داده‌های لازم به‌منظور انجام این پژوهش قدردانی می‌شود.

منابع

- پورحقی، احمد؛ آخوندعلی، علی محمد؛ رادمنش، فردین؛ میرزایی، سید: (۱۳۹۳). مدیریت بهره‌برداری از منابع آب در شرایط خشکسالی با مدل MODFLOW مطالعه موردی (دشت نورآباد) علوم مهندسی و آبیاری، دوره ۳۷، شماره ۲، صص ۷۱-۸۲.
- سازمان سهامی آب منطقه‌ای استان فارس (۱۳۹۵). گزارش بیان آب محدوده مطالعاتی مرو دشت (۲۶۴۷)، ۱-۶۳.
- صمدی رقیه، بهمنش جواد؛ رضایی حسین (۱۳۹۴). بررسی روند تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت ارومیه)، نشریه دانش آب خاک، جلد ۲۲، شماره ۴، صص ۶۷-۸۴.
- نبوی، محمدحسن: (۱۳۷۵). تنگ‌هافر به‌ویژه بوم‌ریخت‌های منطقه بختیاری، مهندسان مشاور آب نیرو، صص ۸-۹.
- Al-Salamah, L.S., Ghazaw, Y.M. and Ghuman, A.R. (2011). Groundwater modeling of Saq Aquifer Buraydah Al Qassim for better water management strategies. *Environmental Monitoring and Assessment* 173 (1-4): 851-860.
- Bear J (1979) *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill, New York, 569p.
- Bahir, M., Ouhamdouch, S., Carreira, P.M., (2018). Isotopic and geochemical methods for studying water-rock interaction and recharge mode: application to the Cenomanian-Turonian and Plio-Quaternary aquifers of Essaouira Basin, Morocco. *Mar. Freshw. Res.* 69, 1290-1300.
- Bahir, M., Ouazar, D., Goumih, A., Ouhamdouch, S., (2019). Evolution of the chemical and isotopic composition of groundwater under a semiarid climate; the case of the Cenomano-Turonian aquifer within the Essaouira basin (Morocco). *Environ Earth Sci* 78, 353. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8349-2>.
- Baki, S., Hilali, M., Kacimi, I., Kassou, N., Nouayti, N., Bahassi, A., (2017). Assessment of groundwater intrinsic vulnerability to pollution in the Pre-Saharan areas - the case of the Tafilalet plain (Southeast Morocco). *Procedia Earth Planet Sci* 17, 590.
- .Bayat Varkeshi M, Farahani Dastjani M, and Ghabaei Sough M (2018) Effect of meteorological drought on groundwater resources (Cas study: Komijan aquifer in Markazi provience). *Iran-Water Resource Research* 14(1):114-124.
- 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.

- Carreira, P.M., Bahir, M., Ouhamdouch, S., Fernandes, P.G., Nunes, D., (2018). Tracing salinization processes in coastal aquifers using an isotopic and geochemical approach: comparative studies in western Morocco and southwest Portugal. *Hydrogeol. J.* 26, 2595–2615.
- 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
- El Madani, F., Chiaar, A., Chafi, A., (2011). Phytoplankton composition and abundance assessment in the Nador lagoon (Mediterranean coast of Morocco). *Acta Bot. Croat.* 70, 269–288.
- Siarkos, I., and Latinopoulos, P. (2012). “Delineation of wellhead protection zones for the control of point pollution sources in the aquifer of N. Moudania, Greece”. *European Water*, 40: 3-17.
- Singh, S., Mitra, S., Srivastava, P., Abebe, A., Torak, L., (2017). Evaluation of Water-use Policies for Baseflow Recovery During Droughts in an Agricultural Intensive Karst Watershed: Case Study of the Lower Apalachicola–Chattahoochee–Flint River Basin, Southeastern United States. <https://doi.org/10.1002/hyp.11278>.
- Sun, H., Grandstaff, D., and Shagam, R.(1999).” Land subsidence due to groundwater withdrawal: potential damage of subsidence and sea level rise in southern New Jersey, USA.” . *Environmental Geology*, 37 (4): 290-296.
- GA EPD, (2017). Synopsis Report - Groundwater Availability Assessment Updates
- Gilbert, A., Turner-Nesmith, A., (2019). The war over water continues. *Sci. Scope* 43, 53–63.
- Guymon, G. L., and Hromadka, T. V.(1985). “Modeling of groundwater response to artificial recharge. In T.Asano “. *Artificial recharge of groundwater* :129-149.
- Homer, C., Dewitz, J., Jin, S., Xian, G., Costello, C., Danielson, P., Gass, L., Funk, M., Wickham, J., Stehman, S., et al., 2020. Conterminous United States land cover change patterns (2001–2016) from the (2016) National Land Cover Database. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 162, 184–199.
- 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.
- Jeanne, P., Tom, G. F., Jonny, R., and Donald, V.(2018). “Role of Agricultural Activity on Land Subsidence in the San Joaquin Valley, California”. *Journal of Hydrology*.
- Jones, L.E., Painter, J.A., LaFontaine, J.H., Sepúlveda, N., Sifuentes, D.F.,(2017). Groundwater-Flow Budget for the Lower Apalachicola-chattahoochee-Flint River Basin in Southwestern Georgia and Parts of Florida and Alabama, 2008–12. Kinnaman, S.L., Dixon, J.F., 2011.
- Painter, J.A., Torak, L.J., Jones, J.W., (2015). Evaluation and Comparison of Methods to Estimate Irrigation Withdrawal for the National Water Census Focus Area Study of the Apalachicola-Chattahoochee-Flint River Basin in Southwestern Georgia. Poeter, E.P., Hill, M.C., 1998.
- Rachida Lyazidi , Mohamed Abdelbaset Hessane , Jaouad Filali Moutei , Mohammed Bahir ,(2020).Developing a methodology for estimating the groundwater levels of coastal aquifers in the Gareb-Bourag plains, Morocco embedding the visual MODFLOW techniques in groundwater modeling system, *Groundwater for Sustainable Development*, 1-19.
- Rachida Lyazidi a,b, Mohamed Abdelbaset Hessane a, Jaouad Filali Moutei b, Mohammed Bahir c, Developing a methodology for estimating the groundwater levels of coastal aquifers in the Gareb-Bourag plains, Morocco embedding the visual MODFLOW techniques in groundwater modeling system *Groundwater for Sustainable Development*.(2020) 1-19.
- Raji, O., Niazi, S., Snoussi, M., Dezileau, L., Khouakhi, A., (2013). Vulnerability assessment of a lagoon to sea level rise and storm events: Nador lagoon (NE Morocco). *J. Coast Res.* 65, 802–807.
- Ranjbar A, Ehteshami M (2019) Development of an uncertainty based model to predict land subsidencecaused by groundwater extraction (Case study: Tehran Basin). *Geotechnical and Geological Engineering* 37(4):3205–3219.
- Rejani, R., Jha, M.K., Panda, S.N., andMull, R. (2008). Simulation modeling for efficient groundwater management in balasore coastal basin, India. *Water Resources Management* 22 (1): 23–50.
- Ritesh Karki a,* , Puneet Srivastava b, Latif Kalin c, Subhasis Mitra d, Sarmistha Singh.,(2021), Assessment of impact in groundwater levels and stream-aquifer interaction due to increased groundwater withdrawal in the lower Apalachicola-Chattahoochee-Flint (ACF) River Basin using MODFLOW, *Journal of Hydrology: Regional Studies*,19.
- Liu, C.W., Lin, C.N., Jang, C.S., Chen, C.P., Chang, J.F., Fan, C.C. and Lou, K.H. 2006. Sustainable groundwater management in Kinmen Island. *Hydrological Processes* 20: 4363–4372.
- Liu, C.W., Chou, Y.L., Lin, S.T., Lin, G.J. and Jang, C.S. (2010). Management of high groundwater level aquifer in the Taipei Basin. *Water Resources Management* 24 (13): 3513–3525.

- Li L, Xia J, Xu CY, Chu J, Wang R (2009) Analyse the sources of equifinality in hydrological model using glue methodology. IAHS publication 331(4):130-138
- Lyazidi, R., Hessane, M.A., Filali Moutei, J., Bahir, M., Ouhamdouch, S., (2019). Management of water resource from semiarid area by elaborating database under GIS: case of Gareb-Bouareg aquifer (Rif, Morocco). Arab J Geosci 12, 352. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4513-y>.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model (PDF), Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6. U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model. US Geological Survey Open-file Report. PP. 83-875.
- Mitra, S., Singh, S., Srivastava, P., (2019). Sensitivity of groundwater components to irrigation withdrawals during droughts on agricultural-intensive karst aquifer in the Apalachicola–Chattahoochee–Flint River Basin. J. Hydrol. Eng. 24, 5018032.
- Mittelstet, A.R., Smolen, M.D., Fox G.A. and Adams D.C.(2011). Comparison of aquifer sustainability under groundwater administrations in Oklahoma and Texas. Journal of the American Water Resources Association 47 (2): 424–431.
- Nouayti, N., Khattach, D., Hilali, M., Brahimi, A., Baki, S., (2016). Evaluation de la contamination m'etallique des eaux des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc) Assessment of metal contamination in Jurassic water tables of Ziz high basin (Central High Atlas, Morocco). J. Mater. Environ. Sci. 7 (5), 1495–1503.
- Nouayti, N., Nouayti, A., Khattach, D., Hilali, M., El khadrani, N.,(2020). Characterization of the mineralization of the groundwater in High Basin of Guir (Morocco) by geochemical and geostatistical. E3S Web of Conferences 150, 100.
- William F Ames.(۲۰۱۶). Numerical Methods for Partial Differential Equations. 3rd edition, Academic Press, Inc., Boston.
- Xu, X., Huang, G., Qu, Z., Pereira, L., (2011). Using MODFLOW and GIS to assess changes in groundwater dynamics in response to water saving measures in irrigation districts of the upper Yellow River basin. Water Resour. Manag. 25, 20352059.
- Yang, F, R. Lee, C, H. Kung, W, J. Yeh, H, F.,(20۱9), The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of “Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project” in Taiwan, Engineering Geology, Volume 103, Issues 1–2, 39–58.
- Zhou Y. and Li W. (2011). A review of regional groundwater flow modeling. Geoscience Frontiers 2(2): 205-214.

References

References (in Persian)

- Pourhaqi, Ahmad; Akhund Ali, Ali Mohammad; Radmanesh, Fardin; Mirzaei, Seyed: (2014) Management of water resources utilization in drought conditions with MODFLOW model Case study (Nurabad plain) Engineering and Irrigation Sciences, Volume 37, Number 2, pp. 71-82. [In Persian]
- Samadi Roghayeh, Behmanesh Javad; Rezaei Hossein (2015) Investigation of the trend of groundwater level changes (Case study of Urmia plain), Journal of Soil Water Volume, Volume 22, Number 4, pp. 67-84. [In Persian]
- Nabavi, Mohamad Hossein, (1996) Strais, especially in Bakhtiari region , Tehran, pp.8-9. [In Persian]
- Basic Office Of the Ministry Of Science, (2016). [In Persian]
- Fars Regional Water Organization (2016). [In Persian]

References (in English)

- Al-Salamah, L.S., Ghazaw, Y.M. and Ghumman, A.R.(2011). Groundwater modeling of Saq Aquifer Buraydah Al Qassim for better water management strategies. Environmental Monitoring and Assessment 173 (1–4): 851–860.
- Bear J (1979) Hydraulics of groundwater. McGraw-Hill, New York, 569p.
- Bahir, M., Ouahdouch, S., Carreira, P.M., (2018). Isotopic and geochemical methods for studying water–rock interaction and recharge mode: application to the Cenomanian–Turonian and Plio-Quaternary aquifers of Essaouira Basin, Morocco. Mar. Freshw. Res. 69, 1290–1300.
- Bahir, M., Ouazar, D., Goumih, A., Ouahdouch, S., (2019). Evolution of the chemical and isotopic composition of groundwater under a semiarid climate; the case of the Cenomano-Turonian aquifer within the Essaouira basin (Morocco). Environ Earth Sci 78, 353. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8349-2>.
- Baki, S., Hilali, M., Kacimi, I., Kassou, N., Nouayti, N., Bahassi, A., (2017). Assessment of groundwater intrinsic vulnerability to pollution in the Pre-Saharan areas - the case of the Tafilalet plain (Southeast Morocco). Procedia Earth Planet Sci 17, 590.
- .Bayat Varkeshi M, Farahani Dastjani M, and Ghabaei Sough M (2018) Effect of meteorological drought on groundwater resources (Cas study: Komijan aquifer in Markazi province). Iran-Water Resource Research 14(1):114-124.
- 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.
- Carreira, P.M., Bahir, M., Ouahdouch, S., Fernandes, P.G., Nunes, D., (2018). Tracing salinization processes in coastal aquifers using an isotopic and geochemical approach: comparative studies in western Morocco and southwest Portugal. Hydrogeol. J. 26, 2595–2615.
- 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
- El Madani, F., Chiaar, A., Chafi, A., (2011). Phytoplankton composition and abundance assessment in the Nador lagoon (Mediterranean coast of Morocco). Acta Bot. Croat. 70, 269–288.
- Siarkos, I., and Latinopoulos, P. (2012). “Delineation of wellhead protection zones for the control of point pollution sources in the aquifer of N. Moudania, Greece”. European Water, 40: 3-17.
- Singh, S., Mitra, S., Srivastava, P., Abebe, A., Torak, L., (2017). Evaluation of Water-use Policies for Baseflow Recovery During Droughts in an Agricultural Intensive Karst Watershed: Case Study of the Lower Apalachicola–Chattahoochee–Flint River Basin, Southeastern United States. <https://doi.org/10.1002/hyp.11278>.
- Sun, H., Grandstaff, D., and Shagam, R.(1999).” Land subsidence due to groundwater withdrawal: potential damage of subsidence and sea level rise in southern New Jersey, USA.” . Environmental Geology, 37 (4): 290-296.
- GA EPD, (2017). Synopsis Report - Groundwater Availability Assessment Updates
- Gilbert, A., Turner-Nesmith, A., (2019). The war over water continues. Sci. Scope 43, 53–63.
- Guymon, G. L., and Hromadka, T. V.(1985). “Modeling of groundwater response to artificial recharge. In T.Asano “. Artificial recharge of groundwater :129-149.
- Homer, C., Dewitz, J., Jin, S., Xian, G., Costello, C., Danielson, P., Gass, L., Funk, M., Wickham, J., Stehman, S., et al., 2020. Conterminous United States land cover change patterns (2001–2016) from the (2016) National Land Cover Database. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 162, 184–199.
- 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 Hydrology393(3-4):219–232.

- Jeanne, P., Tom, G. F., Jonny, R., and Donald, V. (2018). "Role of Agricultural Activity on Land Subsidence in the San Joaquin Valley, California". *Journal of Hydrology*.
- Jones, L.E., Painter, J.A., LaFontaine, J.H., Sepúlveda, N., Sifuentes, D.F., (2017). Groundwater-Flow Budget for the Lower Apalachicola-chattahoochee-Flint River Basin in Southwestern Georgia and Parts of Florida and Alabama, 2008–12. Kinnaman, S.L., Dixon, J.F., 2011.
- Painter, J.A., Torak, L.J., Jones, J.W., (2015). Evaluation and Comparison of Methods to Estimate Irrigation Withdrawal for the National Water Census Focus Area Study of the Apalachicola-Chattahoochee-Flint River Basin in Southwestern Georgia. Poeter, E.P., Hill, M.C., 1998.
- Rachida Lyazidi , Mohamed Abdelbaset Hessane , Jaouad Filali Moutei , Mohammed Bahir ,(2020).Developing a methodology for estimating the groundwater levels of coastal aquifers in the Gareb-Bourag plains, Morocco embedding the visual MODFLOW techniques in groundwater modeling system, *Groundwater for Sustainable Development*, 1-19.
- Rachida Lyazidi a,b, Mohamed Abdelbaset Hessane a, Jaouad Filali Moutei b, Mohammed Bahir c, Developing a methodology for estimating the groundwater levels of coastal aquifers in the Gareb-Bourag plains, Morocco embedding the visual MODFLOW techniques in groundwater modeling system *Groundwater for Sustainable Development*.(2020) 1-19.
- Raji, O., Niazi, S., Snoussi, M., Dezileau, L., Khouakhi, A., (2013). Vulnerability assessment of a lagoon to sea level rise and storm events: Nador lagoon (NE Morocco). *J. Coast Res.* 65, 802–807.
- 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.
- Rejani, R., Jha, M.K., Panda, S.N., and Mull, R. (2008). Simulation modeling for efficient groundwater management in balasore coastal basin, India. *Water Resources Management* 22 (1): 23–50.
- Ritesh Karki a,* , Puneet Srivastava b, Latif Kalin c, Subhasis Mitra d, Sarmistha Singh.,(2021), Assessment of impact in groundwater levels and stream-aquifer interaction due to increased groundwater withdrawal in the lower Apalachicola-Chattahoochee-Flint (ACF) River Basin using MODFLOW, *Journal of Hydrology: Regional Studies*,19.
- Liu, C.W., Lin, C.N., Jang, C.S., Chen, C.P., Chang, J.F., Fan, C.C. and Lou, K.H. 2006. Sustainable groundwater management in Kinmen Island. *Hydrological Processes* 20: 4363–4372.
- Liu, C.W., Chou, Y.L., Lin, S.T., Lin, G.J. and Jang, C.S. (2010). Management of high groundwater level aquifer in the Taipei Basin. *Water Resources Management* 24 (13): 3513–3525.
- Li L, Xia J, Xu CY, Chu J, Wang R (2009) Analyse the sources of equifinality in hydrological model using glue methodology. *IAHS publication* 331(4):130-138
- Lyazidi, R., Hessane, M.A., Filali Moutei, J., Bahir, M., Ouhamdouch, S., (2019). Management of water resource from semiarid area by elaborating database under GIS: case of Gareb-Bouareg aquifer (Rif, Morocco). *Arab J Geosci* 12, 352. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4513-y>.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model (PDF), *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6. U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model. *US Geological Survey Open-file Report*. PP. 83-875.
- Mitra, S., Singh, S., Srivastava, P., (2019). Sensitivity of groundwater components to irrigation withdrawals during droughts on agricultural-intensive karst aquifer in the Apalachicola–Chattahoochee–Flint River Basin. *J. Hydrol. Eng.* 24, 5018032.
- Mittelstet, A.R., Smolen, M.D., Fox G.A. and Adams D.C.(2011). Comparison of aquifer sustainability under groundwater administrations in Oklahoma and Texas. *Journal of the American Water Resources Association* 47 (2): 424–431.
- Nouayti, N., Khattach, D., Hilali, M., Brahimi, A., Baki, S., (2016). Evaluation de la contamination m'etallique des eaux des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc) Assessment of metal contamination in Jurassic water tables of Ziz high basin (Central High Atlas, Morocco). *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (5), 1495–1503.
- Nouayti, N., Nouayti, A., Khattach, D., Hilali, M., El khadrani, N.,(2020). Characterization of the mineralization of the groundwater in High Basin of Guir (Morocco) by geochemical and geostatistical. *E3S Web of Conferences* 150, 100.
- William F Ames.(٢٠١٤). *Numerical Methods for Partial Differential Equations*. 3rd edition, Academic Press, Inc., Boston.
- Xu, X., Huang, G., Qu, Z., Pereira, L., (2011). Using MODFLOW and GIS to assess changes in groundwater dynamics in response to water saving measures in irrigation districts of the upper Yellow River basin. *Water Resour. Manag.* 25, 20352059.
- Yang, F, R. Lee, C, H. Kung, W, J. Yeh, H, F.,(2019), The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of "Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project" in Taiwan, *Engineering Geology*, Volume 103, Issues 1–2, 39–58.
- Zhou Y. and Li W. (2011). A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers* 2(2): 205-214.