



## Investigating quantity and salinity trend of groundwater in Shiraz basin and its affecting factors using in situ and remote sensing data

Shohreh Didari<sup>1✉</sup>, Sareh Aji<sup>2</sup>, Foorogh Golkar<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email:

[sh.didari@gmail.com](mailto:sh.didari@gmail.com)

2. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: [sareaji@gmail.com](mailto:sareaji@gmail.com)

3. Oceanic and Atmospheric Research Centre, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email:

[foroogh.golkar@gmail.com](mailto:foroogh.golkar@gmail.com)

---

---

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** May. 28, 2022

**Revised:** July. 20, 2022

**Accepted:** Aug. 24, 2022

**Published online:** Sep. 23, 2022

**Keywords:**

Groundwater level,  
Electrical conductivity,  
GRACE, MAN-Kendall test,  
Landsat.

---

---

### ABSTRACT

Declining water table and its consequences due to overexploitation of groundwater resources will be one of the challenges in the coming years in arid and semi-arid areas. Therefore, in this study, the groundwater level and its salinity in Shiraz basin for 27 years (1993-2020) was investigated. The trend of the water table time series was analyzed using Mann-Kendall test. Result shows a significantly decreasing trend; So that the negative trend of water table after the change point in June 2002 has increased to 2.8 times of the previous period. The possibility of using Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite data to monitor the groundwater level was also investigated. The results show very good accuracy (NRMSE <10%) of different versions of data. Examination of groundwater salinity using electrical conductivity (EC) data showed an increasing salinity trend in the basin. Factors affecting decreasing trend of quantity and quality in the basin were also analyzed. Results showed no significant trend in rainfall time-series. However, the increasing trend of the population and vegetation in the basin and the lack of surface water resources have led to a significant increase in groundwater abstraction. Thus, when planning, the land sustainability should be seriously considered by managers.

---

Cite this article: Didari, Sh., Aji, S., & Golkar, F. (2022) Investigating quantity and salinity trend of groundwater in Shiraz basin and its affecting factors using in situ and remote sensing data. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (7), 1645-1658.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341492.669243>



## بررسی روند تغییرات کمیت و شوری آب زیرزمینی و عوامل مؤثر بر آن در حوضه شیراز با استفاده از داده‌های زمینی و سنجش از دور

شهره دیداری<sup>۱</sup>، ساره عاجی<sup>۲</sup>، فروغ گلکار<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ایمیل: [sh.didari@gmail.com](mailto:sh.didari@gmail.com)

۲. بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ایمیل: [sareaji@gmail.com](mailto:sareaji@gmail.com)

۳. مرکز پژوهش‌های علوم جوی-اقیانوسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ایمیل: [foroogh.golkar@gmail.com](mailto:foroogh.golkar@gmail.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	افت سطح ایستابی و پیامدهای آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی یکی از چالش‌های پیش رو در سال‌های آینده خواهد بود. از این رو در این پژوهش به بررسی روند سطح آب زیرزمینی و شوری آن در حوضه شهر شیراز در طی دوره آماری ۲۷ ساله (۱۳۹۹-۱۳۷۲) پرداخته شد. بررسی سری زمانی تراز سطح ایستابی حاصل از چاه‌های پیژومتری با استفاده از آزمون من‌کندل نشان‌دهنده روند معنی‌دار کاهشی است؛ به طوری که روند منفی تغییرات سطح ایستابی بعد از نقطه تغییر در خردادماه ۱۳۸۱ به ۲/۸ برابر دوره قبل از خود افزایش یافته است. همچنین امکان کاربرد داده‌های حاصل از ماهواره GRACE به منظور پایش سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از دقت بسیار خوب ( $NRMSE < 10\%$ ) سری‌های مختلف داده GRACE در تخمین تغییرات سطح آب زیرزمینی است. بررسی شوری آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های هدایت الکتریکی (EC) نشان‌دهنده روند افزایشی شوری در سطح حوضه بود. عوامل مؤثر بر روند کاهشی کمیت و کیفیت آب زیرزمینی عواملی چون مقدار بارندگی، جمعیت و پوشش گیاهی حاصل از ماهواره Landsat مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل شده مشاهده شد که داده‌های بارندگی در حوضه دارای روند معنی‌دار نیست. از طرفی روند افزایشی جمعیت و پوشش گیاهی در حوضه و نبود منابع آب سطحی منجر به افزایش چشمگیر برداشت از منابع آب زیرزمینی گردیده است که در برنامه‌ریزی‌ها، پایداری سرزمین بایستی مورد توجه جدی مدیران قرار گیرد.
واژه‌های کلیدی: سطح آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی، GRACE، روند من‌کندل، Landsat	

استناد: دیداری، شهره؛ عاجی، ساره؛ گلکار، فروغ (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات کمیت و شوری آب زیرزمینی و عوامل مؤثر بر آن در حوضه شیراز با استفاده از داده‌های

زمینی و سنجش از دور. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۷)، ۱۶۵۸-۱۶۴۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343550.669281>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

تغییر اقلیم و افزایش جمعیت دو عامل اصلی فشار بر منابع آب است. این مسئله در مناطق پرجمعیت و مناطقی که با توسعه صنعتی و کشاورزی مواجه‌اند، بسیار بیشتر است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که دسترسی به آب‌های سطحی به میزان کافی نباشد، این فشار بر آب‌های زیرزمینی بیشتر خواهد بود؛ همانند بسیاری از بخش‌های خشک و نیمه‌خشک ایران که دسترسی به منابع آبی با محدودیت روبروست و منجر به کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی گردیده است که علاوه بر کاهش کمیت منابع آب، با کاهش کیفیت نیز مواجه شده‌اند. در این مناطق میزان تبخیر بسیار بیشتر از مقدار بارش است. به‌عنوان نمونه در شهر شیراز بر اساس آمار بلندمدت محاسبه شده ایستگاه سینوپتیک شیراز، میانگین تبخیر از تشت حدود هشت برابر مقدار بارش (میانگین تبخیر ۲۵۵۰mm در برابر ۳۲۰mm میانگین بارش) است. در این مناطق توسعه شهری از نظر شرب، صنعت و فضای سبز به میزان بسیار زیادی به آب زیرزمینی وابسته است. افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی مشکلات عدیده‌ای از جمله خشک‌سالی، کاهش کیفیت آب زیرزمینی، افزایش هزینه استحصال آب به دلیل نیاز به پمپاژ از اعماق بیشتر و همچنین خطر فرونشست زمین را به دنبال دارد.

به‌منظور مدیریت بهینه منابع محدود موجود آگاهی از وضعیت کمی و کیفی آب زیرزمینی و تغییرات آن در زمان و مکان از اهمیت بسیاری برخوردار است. مطالعات مختلفی در دنیا به بررسی روند تغییرات آب زیرزمینی پرداخته است (Mojid *et al.*, 2019; Pathak *et al.*, 2019). در ایران نیز این موضوع موردتوجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است و در بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته روند کاهش سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی مشاهده شده است (Mirabbasi *et al.*, 2020; Samani *et al.*, 2021). در خصوص کیفیت آب زیرزمینی عموماً به بررسی کیفیت آب در یک‌زمان خاص و مقایسه آن با استانداردها پرداخته شده است (Badeenezhad *et al.*, 2020; Alamdar *et al.*, 2019) و روند بلندمدت کیفیت آب و ارتباط آن با پایداری منابع موردتوجه چندان قرار نگرفته است.

به‌منظور بررسی وضعیت آب زیرزمینی از داده‌های چاه‌های پیژومتری استفاده می‌شود. هرچند این داده‌ها اطلاعات سطح ایستابی را با دقت بالا در اختیار قرار می‌دهند اما این داده‌ها اغلب دارای عدم پوشش مکانی کافی هستند و هزینه نصب، نگهداری و برداشت اطلاعات از این چاه‌ها بالا است. با توسعه سنجش‌ازدور امکان به‌کارگیری این داده‌ها در مطالعات مربوط به آب‌های زیرزمینی نیز موردتوجه قرار گرفت. میدان ثقل زمین ناشی از توزیع جرم در اعماق و پوسته زمین است و تغییرات این میدان ثقل در طول بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت در مناطقی که جایابی لایه‌های زمین قابل چشم‌پوشی است، به دلیل تغییر در موجودیت آب در آن منطقه است. از این ویژگی در ماهواره‌های بازیابی جاذبه و آزمایش آب‌وهوا<sup>۱</sup> GRACE برای بررسی میدان ثقل و در نتیجه تغییر در میزان ذخیره آب در مقیاس ماهیانه استفاده می‌شود (Swenson *et al.*, 2006).

به‌منظور ارزیابی دقت داده‌های حاصل از ماهواره GRACE در بررسی تغییرات آب زیرزمینی، مطالعات متعددی در دنیا صورت گرفته است و مشاهده شد که تغییرات ذخیره‌سازی آب‌های زیرزمینی حاصل از GRACE با مقادیر اندازه‌گیری‌های شده مطابقت دارد. این نتایج توسط مطالعات انجام‌شده در مناطق مختلف دنیا از جمله در آمریکا (Ahamed *et al.*, 2020; Miro & Famiglietti, 2018)، اردن (Liesch & Ohmer., 2016)، هند (Singh & Saravanan, 2020)، خاورمیانه (Joodaki *et al.*, 2014) و چین (Wang *et al.*, 2017; Yin *et al.*, 2018; Feng *et al.*, 2020) نیز تأیید شد. بنابراین، داده‌های GRACE در ارزیابی نرخ تغییرات کمیت آب زیرزمینی موفق بوده است.

در ایران نیز بررسی‌هایی در خصوص دقت داده‌های حاصل از ماهواره گریس در مناطق مختلف صورت گرفته است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که این داده‌ها قادرند به‌خوبی افت سطح آب زیرزمینی را در دشت‌های موردبررسی را نشان دهد (Abou Zaki *et al.*, 2019; Zarinmehr *et al.*, 2022). یکی از چالش‌های موجود در بررسی روند تغییرات با استفاده از تصاویر ماهواره حجم بالای این تصاویر و مشکلات پردازش آن‌ها در دوره آماری طولانی است. موتور پردازشگر گوگل (Google Earth Engine (GEE با امکاناتی که در اختیار کاربران خود قرار می‌دهد مشکلات موجود در پردازش تصاویر ماهواره‌ای در دوره‌های آماری بلندمدت را مرتفع کرده است. GEE یک پلتفرم محاسباتی است که به کاربران امکان تجزیه‌وتحلیل جغرافیایی را در زیرساخت‌های Google بدون نیاز به دانلود آن‌ها و در بستر خدمات ابری و با استفاده از کد نویسی جاوا اسکریپت فراهم می‌کند (Gorelick *et al.*, 2017).

در این پژوهش به بررسی وضعیت کمیت و کیفیت آب در حوضه شیراز پرداخته می‌شود. در این حوضه که در منطقه خشک و نیمه‌خشک ایران قرار دارد و کلان‌شهر شیراز نیز در آن واقع شده است، تأمین نیاز شرب و آبیاری فضای سبز و توسعه شهری به‌طور عمده

به آب‌های زیرزمینی وابسته است. از این رو بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی در این منطقه از اهمیت بسیاری برخوردار است. بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی روند تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی و عوامل مؤثر بر آن در طی دوره آماری ۲۷ ساله (۱۳۷۲-۱۳۹۹) پرداخته شد. همچنین امکان کاربرد سری‌های مختلف (JPL, CSR, GFZ, MASCON) داده‌های حاصل از ماهواره GRACE در تخمین تغییرات سطح آب زیرزمینی در بستر GEE مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### محل پژوهش

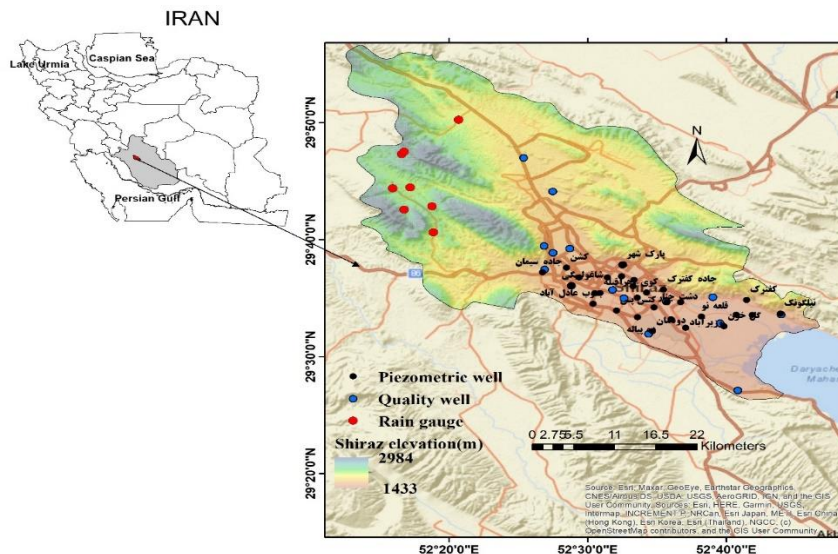
حوضه آبریز دشت شیراز در محدوده جغرافیایی  $29^{\circ} 26'$  تا  $29^{\circ} 56'$  شمالی و  $52^{\circ} 12'$  تا  $52^{\circ} 46'$  شرقی با مساحت  $1428 \text{ km}^2$  در بین ارتفاعات جنوب شرق زاگرس قرار گرفته است. ارتفاع این منطقه از سطح دریا در محدوده  $1433 \text{ m}$  تا  $2984 \text{ m}$  متغیر است و از سمت غرب به کوه دراک، از سمت شمال به کوه‌های بوم، سبزویشان، چهل‌مقام و باباکوهی محدود شده است و در نهایت با شیب ملایم و جهت غرب به شرق، به دریاچه مهارلو ختم می‌گردد (Noshadi & Ahadi., 2020). کلان‌شهر شیراز که پنجمین شهر بزرگ ایران و مرکز استان فارس نیز است، در این حوضه واقع شده است. این شهر بزرگ‌ترین نقطه جمعیتی در نیمه جنوبی کشور به شمار می‌رود. بر اساس روش دومارتن اقلیم شیراز نیمه‌خشک است. بر اساس آمار بلندمدت در ایستگاه سینوپتیک شیراز، میانگین دما در گرم‌ترین ماه سال (تیرماه)  $29/4^{\circ}\text{C}$ ، در سردترین ماه سال (دی‌ماه)  $6/7^{\circ}\text{C}$  و میانگین سالانه دما  $18/1^{\circ}\text{C}$  است. میانگین میزان بارندگی سالیانه شهر شیراز  $320 \text{ mm}$  است. حدود  $78\%$  از تأمین آب شرب شهری شیراز از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود.

### داده‌های مورد استفاده

#### داده‌های اندازه‌گیری شده

جهت پایش تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی در بلندمدت، سطح پیزومتریک ۲۸ چاه موجود در حوضه در مقیاس زمانی ماهانه و در بازه سال‌های ۱۳۷۲-۱۳۹۹ (۱۹۹۳-۲۰۲۰) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی تغییرات کیفی شیمیایی آب زیرزمینی از مقادیر هدایت الکتریکی<sup>۱</sup> (EC) اندازه‌گیری شده در ۱۶ چاه آبرفتی موجود در حوضه که در بازه زمانی ۲۰ ساله ۱۳۹۷-۱۳۷۷ (۱۹۹۷-۲۰۱۷) در مقیاس فصلی در دسترس بود استفاده شد.

جهت پایش تغییرات بارندگی در حوضه از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده شد. در این حوضه به تعداد ۸ ایستگاه باران‌سنجی در مقیاس زمانی ماهانه و در و در بازه سال‌های (۱۹۹۳-۲۰۲۰) مورد بررسی قرار گرفت. موقعیت کلیه این ایستگاه‌ها در شکل (۱) نمایش داده شده است. کلیه این داده‌ها از سازمان آب منطقه‌ای فارس اخذ شده است که به روش پلیگون تیسن جمع‌آوری شده و برای زیر حوضه شیراز در دسترس هست.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه به همراه محل ایستگاه‌های باران‌سنجی، چاه‌های پیزومتری و کنترل کیفیت

**آمار جمعیت**

جهت بررسی تغییرات جمعیت در حوضه موردبررسی از آمار جمعیتی شهر شیراز در سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۶۵ (۲۰۱۶-۱۹۸۶) حاصل از آمار سرشماری عمومی نفوس موجود در سایت مرکز آمار ایران استفاده شد (Statistics Center of Iran., 2020).

**داده‌های سنجش از دور****ماهواره GRACE**

ماهواره‌های دوقلوی بازمیابی جاذبه و آزمایش آب‌وهوا GRACE در ۱۷ مارس ۲۰۰۲ باهدف اندازه‌گیری‌های دقیق از تغییرات میدان گرانش زمین و ایجاد تحولی در تحقیقات درباره مخازن آب‌های زیرزمینی، یخ و اقیانوس‌ها، زمین‌لرزه و تغییرات پوسته زمین به فضا پرتاب شد. این ماهواره حاصل همکاری آژانس‌های فضایی ایالات‌متحده آمریکا و آلمان است. (Landerer & Swenson., 2012). داده‌های ماهواره GRACE تغییرات ذخیره کل آب<sup>۱</sup> ( $\Delta TWS$ ) را به‌صورت یک سیستم ذخیره‌سازی یکپارچه عمودی نشان می‌دهد که از آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی، رطوبت خاک، آب برف و آب بیولوژیکی تشکیل شده است. در مناطق خشک که آب‌های سطحی و پوشش برف موجود نباشد، عمده این تغییرات را می‌توان مرتبط با آب زیرزمینی دانست. از این‌رو داده‌های حاصل از این ماهواره را می‌توان در تکمیل داده‌های اندازه‌گیری شده و برای پر کردن کمبودها در مقیاس مکانی و زمانی و یا جایگزین آن‌ها در مناطق فاقد اطلاعات استفاده کرد (Miro *et al.*, 2018). داده‌های ماهواره GRACE به‌صورت شبکه‌ای در مقیاس زمانی ماهانه در دو نسخه پردازش داده ارائه می‌شود: نسخه داده‌های هارمونیک کروی<sup>۲</sup> با دقت مکانی  $1^\circ \times 1^\circ$  در طول و عرض جغرافیایی توسط سه مرکز داده: JPL<sup>۳</sup>، GFZ<sup>۴</sup> و CSR<sup>۵</sup> تولید می‌شوند و نسخه داده‌های Mascon<sup>۶</sup> که با دقت  $3^\circ \times 3^\circ$  در طول و عرض جغرافیایی تولید می‌شود. با توجه به اینکه پردازش داده‌های GRACE در بستر GEE صورت می‌گیرد در این پژوهش دقت هر چهار سری داده در تخمین تغییرات آب زیرزمینی در بازه سال‌های موجود در این سامانه یعنی ۱۳۹۶-۱۳۸۱ (۲۰۱۷-۲۰۰۲) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

**ماهواره Landsat**

ماهواره لندست حاصل تلاش مشترک سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده آمریکا USGS و اداره ملی هوا و فضا NASA باهدف پایش منابع زمینی راه‌اندازی شد و تاکنون ۹ سری از این ماهواره در مدار قرار گرفته است. در این پژوهش داده‌های لندست ۵، ۷ و ۸ برای تعیین تغییرات سطح سبز در حوضه در بازه سال‌های ۱۳۷۲-۱۳۹۹ (۱۹۹۳-۲۰۲۰) مورد استفاده قرار گرفت. منطقه موردبررسی در مسیر ۱۶۳ و ردیف ۳۹ تصاویر لندست قرار دارد. تصاویر بازتاب سطحی<sup>۷</sup> (SR) باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک استفاده شده است. از این محصول با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، و تفکیک زمانی ۱۶ روزه جهت تعیین پوشش گیاهی حوضه آبریز در بستر GEE استفاده شد.

**روش پژوهش****تغییرات پوشش گیاهی حوضه آبریز:**

افزایش یا کاهش در میزان پوشش گیاهی در حوضه آبریز می‌تواند نمایشگر میزان برداشت از آب‌های سطحی و یا زیرزمینی حوضه به‌منظور تأمین نیاز آبی آن‌ها باشد. از این‌رو تغییرات سطح سبز حوضه آبریز در طی دوره آماری ۳۵ ساله با استفاده از تصاویر ماهواره لندست مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور تعیین پوشش گیاهی حوضه، شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) مورد استفاده قرار گرفت. شاخص NDVI با استفاده از بازتاب سطحی باندهای قرمز (RED) و مادون قرمز نزدیک (NIR) و رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (\text{البته } ۱)$$

با استناد به پژوهش‌های پیشین حد آستانه گذاری جداسازی پوشش گیاهی 0.2 است (Townshend *et al.*, 1985)، بنابراین پس از محاسبه شاخص، کلیه مناطقی که مقدار NDVI در آن‌ها بزرگ‌تر از حد آستانه باشد به‌عنوان پوشش گیاهی در نظر گرفته می‌شوند و

1 Total Water Storage Change

2 Spherical Harmonic Data Versions

3 Jet Propulsion Laboratory

4 Geo Forschungs Zentrum Potsdam

5 U. Texas / Center for Space Research

6 Mascon Data Versions

7 Surface Reflectance



مساحت پوشش گیاهی در هر تصویر محاسبه شده و روند تغییرات پوشش گیاهی حوضه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

### بررسی روند تغییرات زمانی

تحلیل روند از جمله مهم‌ترین روش‌های آماری است که به‌طور گسترده برای ارزیابی سری‌های زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از این آزمون‌های بسیار کاربردی جهت تعیین معنی‌داری روند در سری‌های زمانی، آزمون من‌کنندال است. این روش به‌طور متداول و گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی بکار گرفته می‌شود. از نقاط قوت این روش می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند اشاره نمود. مراحل محاسبه آماره این آزمون به شرح روابط (۲) تا (۵) است (Kendall., 1948):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{رابطه (۲)}$$

جایی که  $n$  تعداد داده‌هاست و  $x_k$  و  $x_j$  داده‌های متوالی  $k$  ام و  $j$  ام هستند؛ و  $k, j \leq n$  و  $k \neq j$  است. همچنین  $\text{sgn}$  تابع علامت است که با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴) واریانس  $S$  محاسبه می‌شود و  $t$  اندازه یک بازه زمانی و  $\sum_t$  مجموع بازه‌ها است. اگر  $n$  بزرگ‌تر از 10 باشد آماره  $Z$  برای توزیع نرمال از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۵)}$$

مقادیر مثبت  $Z$  نشان‌دهنده روند صعودی و مقادیر منفی نشان‌دهنده روند نزولی خواهد بود. در این پژوهش سطح  $0.05$  برای بررسی معنی‌داری روند مورد استفاده قرار گرفت.

### تعیین نقطه تغییر در سری زمانی

چنانچه روند در سری زمانی معنی‌دار باشد، تعیین نقطه تغییر روند به‌منظور ارزیابی دلایل ایجاد این تغییر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از روش‌های متداول برای تعیین نقطه تغییر توسعه داده‌شده توسط پتیت (Pettitt, 1979) است. از مزیت‌های این روش این است که یک روش ناپارامتری و نوع توزیع داده‌ها تأثیری در این روش ندارد. این روش زمان وقوع تغییر معنی‌دار در میانگین سری زمانی را مشخص می‌کند. فرض صفر آزمون این است که سری داده‌ها همگن است و از یک توزیع تبعیت می‌کند و فرض مقابل این است که همگنی داده‌ها در یک نقطه از سری زمانی ( $t$ ) می‌شکند. آماره آزمون  $U_{t,T}$  بررسی می‌کند که آیا دو مجموعه نمونه  $x_1, x_2, \dots, x_t$  و  $x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_T$  از یک جامعه آماری هستند و از یک توزیع تبعیت می‌کنند؛ این آماره با استفاده از رابطه (۶) تعیین می‌شود:

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن  $T$  تعداد کل مشاهدات است. تابع علامت  $\text{sgn}$  نیز بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود. آماره  $U_{t,T}$  برای کلیه سری‌های زمانی در محدوده  $1, \dots, T$  محاسبه می‌شود و سپس معنی‌دارترین آماره بر اساس بیشینه مقدار آن از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$K_T = \text{Max}|U_{t,T}| \quad \text{رابطه (۷)}$$

نقطه  $t$  به شرطی نقطه تغییر است که  $K_T$  از لحاظ آماری در سطح  $0.05$  معنی‌دار باشد. سطح معنی‌داری تقریبی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود و چنانچه مقدار  $p$  از سطح معنی‌داری موردنظر کوچک‌تر باشد، نقطه  $t$ ، نقطه تغییر خواهد بود.

$$p = 2 \times \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^2 + T^3}\right) \quad \text{رابطه ۸}$$

### ارزیابی آماری دقت

به منظور مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده و برآورد شده، جذر متوسط مربع خطا (RMSE)، جذر متوسط مربع خطای نرمال شده (NRMSE) و متوسط خطای اریبی (MBE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) به ترتیب به شرح روابط (۹) تا (۱۲) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad \text{رابطه ۱۱}$$

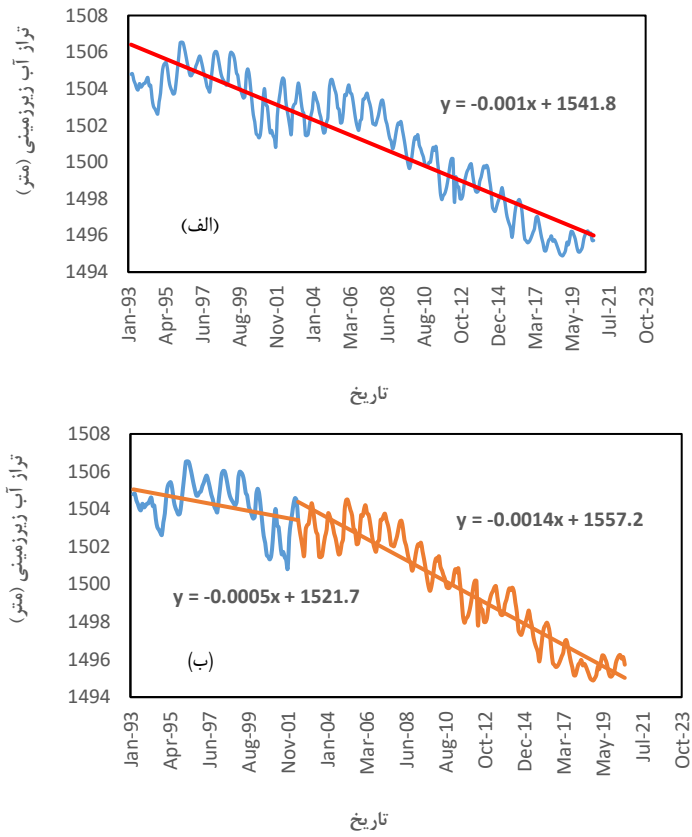
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

که در آن  $\hat{y}_i$  و  $y_i$  به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده است،  $\bar{y}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد مشاهدات است. در ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) از آنجا که خطاها قبل از میانگین‌گیری به می‌رسند، وزن نسبتاً بالایی به خطاهای بزرگ می‌دهد. هنگامی که MBE نزدیک به صفر است، نتایج برآورد دقیق هستند. مقادیر مثبت یا منفی آن به ترتیب نشانه برآورد بیشتر یا کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است. هر چه مقدار NRMSE کمتر باشد نشانه تطابق بهتر مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده است. چنانچه مقدار NRMSE کمتر از ۱۰٪ باشد برآورد بسیار خوب، بین ۱۰ تا ۲۰٪ خوب، بین ۲۰ تا ۳۰٪ نسبتاً خوب و بزرگ‌تر از ۳۰٪ بد ارزیابی می‌شود. ضریب تعیین ( $R^2$ ) میزان تطابق مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. کلیه محاسبات مربوط به روند، تعیین نقطه تغییر و دقت آماری با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شد.

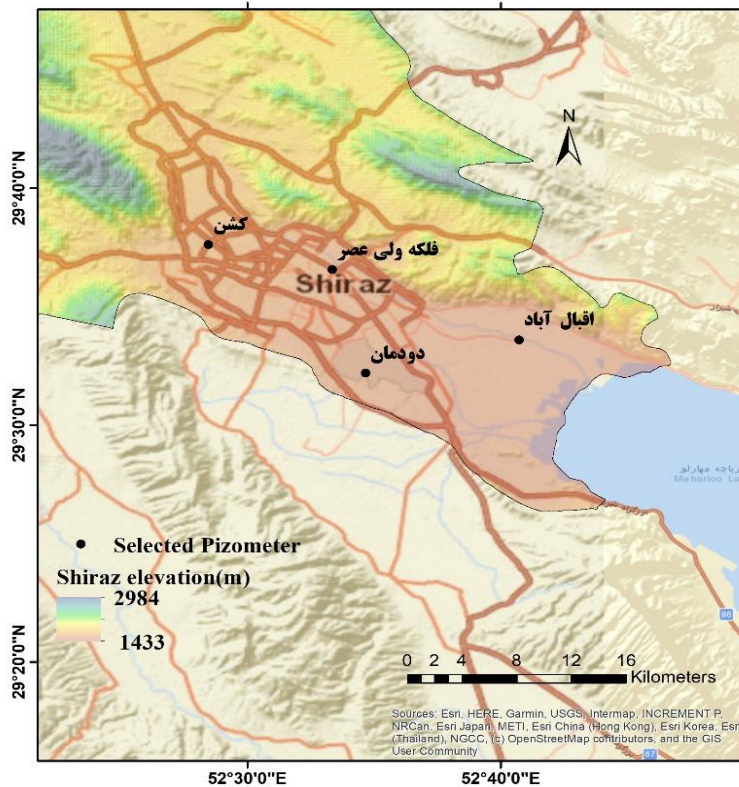
### نتایج و بحث

سری زمانی تغییرات سطح ایستابی در بازه سال‌های ۱۳۷۲-۱۳۹۹ (۱۹۹۳-۲۰۲۰) در شکل (۲) نشان داده شده است. داده‌ها با استفاده از آزمون من‌کنندال مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای یک روند منفی معنی‌دار است. شیب تغییرات سطح ایستابی در بازه زمانی مورد بررسی به صورت کلی برابر با ۱mm در ماه است. با استفاده از آزمون پتیت داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت و نقطه تغییر در خرداد ۱۳۸۱ (ژوئن ۲۰۰۲) تشخیص داده شد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است هرچند که در سال‌های قبل از این تاریخ نیز روند تغییرات منفی بوده است، اما شیب این تغییرات در بعدازاین تاریخ به ۲/۸ برابر افزایش می‌یابد و کاهش شدید سطح ایستابی رخ می‌دهد. در طی بازه مورد بررسی حدود ۱۰m کاهش سطح ایستابی رخ داده است که به‌طور متوسط برابر با حدود ۳۱mm/month است که معادل ۳۷cm در سال است.

به منظور بررسی روند تغییرات در مناطق مختلف حوضه، چهار چاه پیژومتری با پراکنش در مناطق مختلف شهری مورد انتخاب قرار گرفتند. محل قرارگیری این چاه‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در آن‌ها در طول دوره آماری مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌طور که نمودار روند سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد در کلیه چاه‌ها روند به‌صورت نزولی است و حاکی از کاهش افت سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف شهری است.



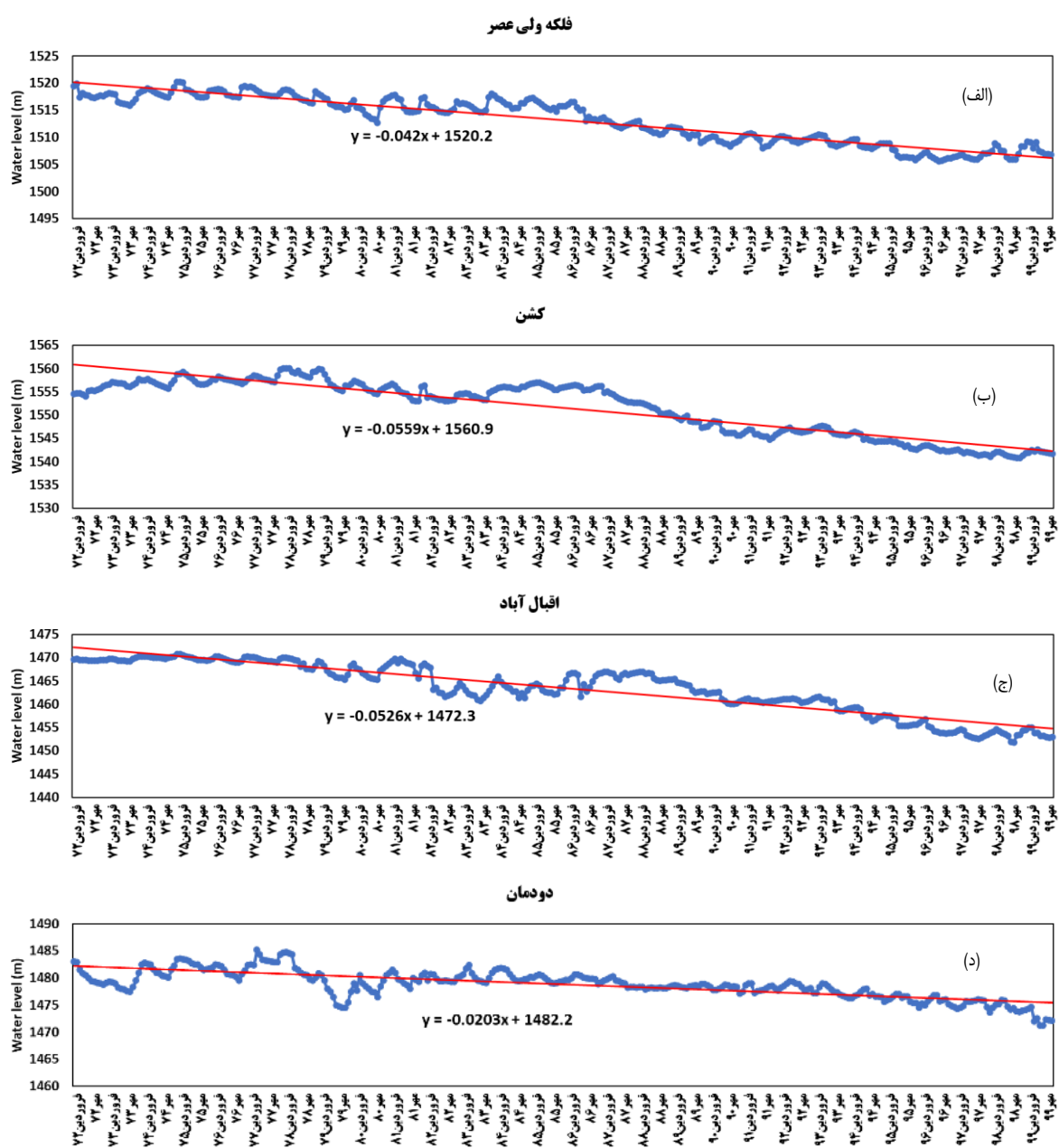
شکل ۲- سری زمانی و روند تغییرات سطح ایستابی در حوضه شیراز در بازه سال‌های ۱۹۹۳-۲۰۲۰ (الف) در کل بازه و (ب) در قبل و بعد از نقطه تغییر در ژوئن ۲۰۰۲



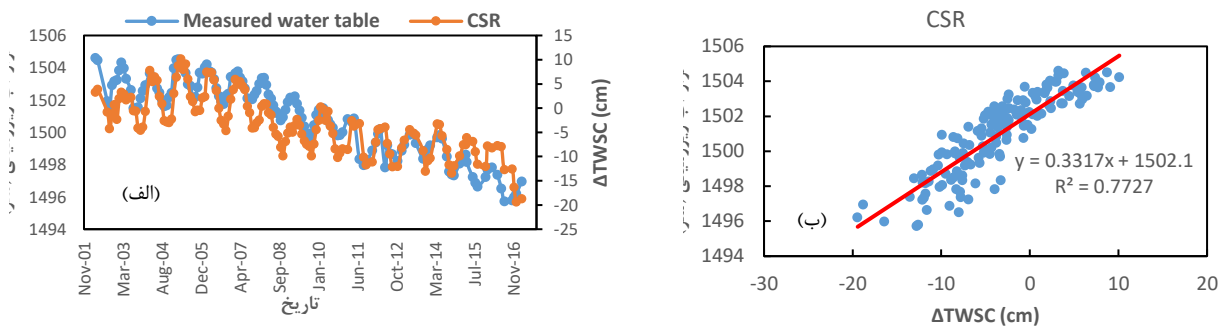
شکل ۳- محل قرارگیری چاه‌های پیزومتری منتخب جهت بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی



از طرفی همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد داده‌های حاصل از ماهواره GRACE امکان پایش تغییرات آب زیرزمینی را فراهم می‌کند. از این‌رو دقت سری مختلف داده‌های حاصل از این ماهواره در پایش تغییرات آب زیرزمینی در حوضه شیراز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به مقادیر پارامترهای آماری دقت در جدول (۱)، تغییرات ذخیره کل آب ( $\Delta TWSA$ ) حاصل از محصول CSR با  $NRMSE=7.17\%$  بهترین عملکرد را دارا است و بعد از آن به ترتیب JPL، GFZ و MASCON قرار می‌گیرد. البته ذکر این نکته ضروری است که همه داده‌های تغییرات ذخیره کل آب دارای دقت بسیار خوبی در تخمین تغییرات سطح ایستابی می‌باشند. بررسی سری زمانی تغییرات ذخیره کل آب و تغییرات سطح ایستابی نشان می‌دهد که داده‌های MASCON و GFZ دامنه تغییرات را بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای تخمین می‌زنند. مقایسه سری زمانی تغییرات ذخیره کل آب حاصل از داده‌های CSR و تغییرات سطح ایستابی در (شکل ۵) نشان‌دهنده توانمندی این داده در تعیین شیب روند تغییرات سطح آب زیرزمینی است. در پژوهشی که توسط Nabavi et al. (2020) در منطقه خراسان رضوی صورت گرفت نیز مشاهده شده که سری داده‌های CSR مطلوب‌ترین پیش‌بینی را در روند تغییرات سطح آب زیرزمینی ماهانه داشته است.



شکل ۴- روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه سال‌های ۱۳۷۲-۱۳۹۹ در چاه‌های پیژومتری منتخب (الف) فلکه ولی عصر، (ب) کشن، (ج) اقبال‌آباد و (د) دودمان



شکل ۵- نمودار پراکنش مقادیر سطح ایستابی در مقابل تغییرات ذخیره کل آب ( $\Delta TWSA$ ) حاصل از ماهواره‌های GRACE (الف) و نمودار سری زمانی سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و تغییرات ذخیره کل آب ( $\Delta TWSA$ ) حاصل از ماهواره GRACE در سری داده CSR (ب)

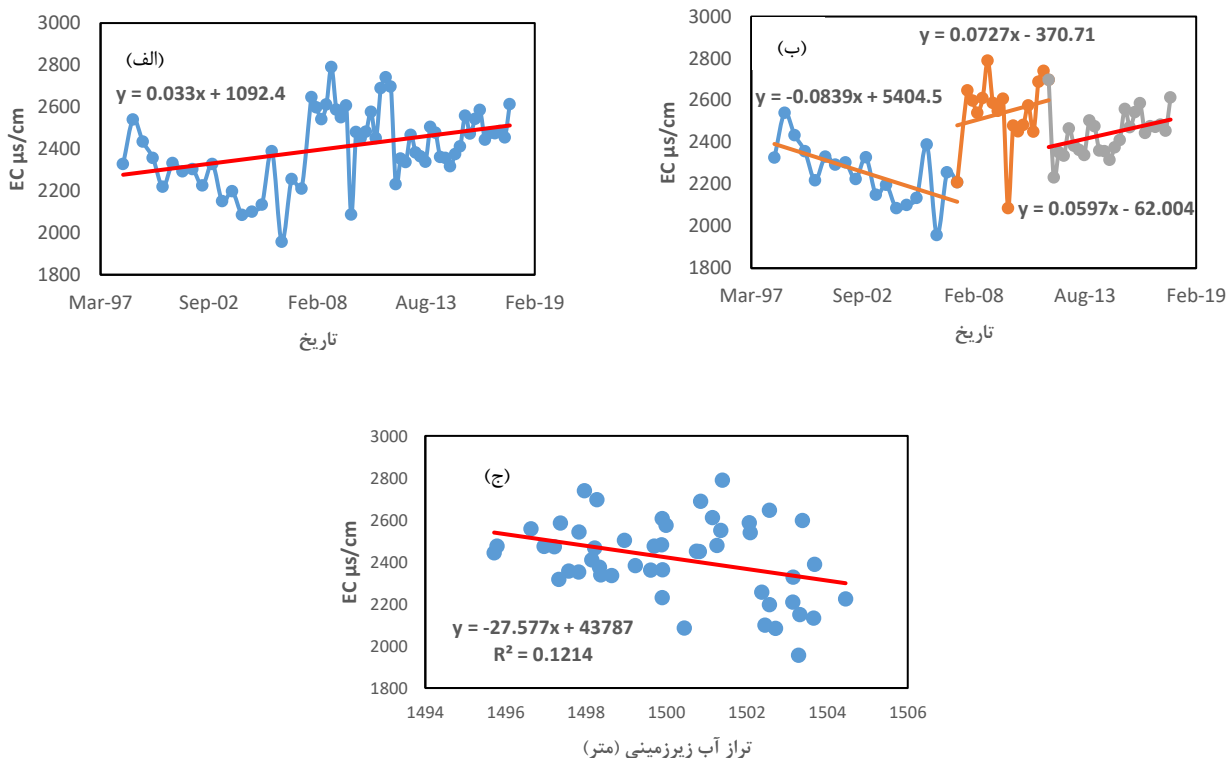
جدول ۱- پارامترهای آماری دقت تخمین سطح ایستابی حوضه شیراز با استفاده از  $\Delta TWSA$  حاصل از سری‌های مختلف داده GRACE

سری داده	MBE(m)	RMSE (m)	NRMSE%	R <sup>2</sup> %
CSR	۱۳۴-۲/۹۰-	۱/۰۸	۷/۱۷	۷۷/۲۷
JPL	۱۳۴-۱/۲۷-	۱/۱۲	۷/۴۸	۷۵/۲۳
GFZ	۱۳۴-۲/۰۶-	۱/۳۲	۸/۷۸	۶۵/۹۲
MASCON	۱۳۴-۲/۲۹-	۱/۴۴	۹/۶۱	۵۹/۱۷

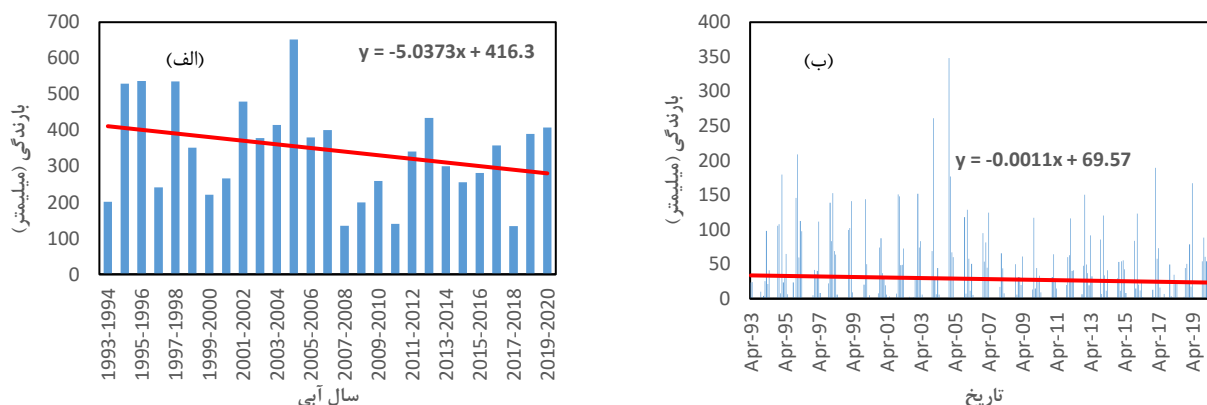
به منظور بررسی اثر روند نزولی کمیت بر کیفیت آب زیرزمینی داده‌های EC به‌عنوان نماینده شوری آب زیرزمینی در حوضه موردبررسی قرار گرفت و روند تغییرات آن در طول دوره آماری ۲۰ ساله ۱۳۹۷-۱۳۷۷ (۱۹۹۷-۲۰۱۷) در دسترس ارزیابی شد. نتایج در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است روند کلی تغییرات شوری آب زیرزمینی در این دوره ۲۰ ساله به‌صورت صعودی است و با توجه به آزمون من‌کندال نیز در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. درحالی‌که در ابتدای این دوره مقدار EC برابر با ۲۳۰۰  $\mu\text{s}/\text{cm}$  بوده است در انتهای دوره این عدد با ۲۶۰۰  $\mu\text{s}/\text{cm}$  رسیده است. چنانچه داده‌ها را در این دوره ۲۰ ساله با استفاده از آزمون پتیت موردبررسی قرار دهیم دو نقطه تغییر در داده‌ها تشخیص داده می‌شود (شکل ۶). یکی در بهار سال ۱۳۸۶ (۲۰۰۷) که از ابتدای دوره تا این تاریخ EC دارای روند نزولی است. از بعد از این تاریخ تا تابستان سال ۱۳۹۱ (۲۰۱۱) که نقطه تغییر دوم است روند تغییرات با یک افزایش ناگهانی و روند صعودی همراه است. از تابستان ۱۳۹۱ (۲۰۱۱) به بعد علیرغم اینکه مجدداً یک افت در مقدار EC مشاهده می‌شود اما روند تا پایان دوره به‌صورت صعودی است. بنابراین آنچه در مجموع مشهود است کاهش کیفیت آب زیرزمینی در طی دوره موردبررسی است که همراه با افت کمیت همراه بوده است. ذکر این نکته قابل‌توجه است که EC در حوضه همواره از حداکثر مجاز استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO) برای آب شرب (1500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) بیشتر بوده است (WHO, 2011) و این روند افت کیفیت به‌صورت افزایشی ادامه دارد. با بررسی رابطه بین سطح آب زیرزمینی و مقدار EC در شکل ۶ (ج) مشاهده می‌شود که با کاهش سطح تراز آب زیرزمینی مقدار EC افزایش یافته است. در بررسی‌های صورت گرفته در طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۷۲ در خصوص کمیت و کیفیت آب در حوضه آبریز شیراز (Karimi (2012) نیز روند نزولی در هر دو مورد مشاهده نمود به‌نحوی‌که در دوره موردبررسی سطح آب زیرزمینی ۵/۹۸ متر افت داشته است. همچنین در بررسی دیگری که در دشت شیراز در بازه سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۷۲ صورت گرفت Barzegar (2017) & Masoudi که به ارزیابی شدت تخریب کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی پرداخته بودند، نشان دادند که EC بیشترین تأثیر را در تخریب منابع آب زیرزمینی داشته است و حدود ۸۵٪ از کل منطقه در خطر تخریب متوسط و بالاتر قرار داشتند.

عوامل مختلفی می‌تواند در رخداد این روند نزولی کمیت و کیفیت آب زیرزمینی مؤثر باشد. یکی از عوامل می‌تواند کاهش ورودی‌ها در اثر کاهش بارش باشد. به‌منظور بررسی این فرضیه روند بارش حاصل از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی سازمان آب که به روش پلیگون تبیین میانگین بارش در حوضه در مقیاس ماهانه و سالانه مورد ارزیابی قرار گرفت. در داده‌های سالانه خودهمبستگی بین داده‌ها وجود نداشت ولی در داده‌های ماهانه خودهمبستگی مشاهده شد که پیش از انجام آزمون من‌کندال پیش‌سفیدسازی داده‌ها صورت گرفت. نتایج (شکل ۷) نشان داد که هرچند در هر دو مقیاس سالانه و ماهانه روند کاهشی داریم اما این روند با استفاده از آزمون من‌کندال با ضریب اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار نیست. بنابراین نمی‌توان گفت که کاهش بارش عامل مؤثری بر روند کاهشی سطح ایستابی است. در پژوهش صورت گرفته

توسط (Noshadi & Ahadi (2020) در دوره آماری سال‌های ۱۳۷۲-۱۳۹۶ مشاهده شد که در شاخص خشک‌سالی بارش استاندارد شده روند معنی‌داری مشاهده نشد هرچند که در شاخص آب زیرزمینی خشک‌سالی هیدرولوژیک حاد را نشان می‌داد.



شکل ۶- سری زمانی و روند تغییرات EC در حوضه شیراز در بازه سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۹۷ (الف) در کل بازه و (ب) در قبل و بعد از نقاط تغییر (ج) ارتباط بین سطح آب زیرزمینی و EC آب



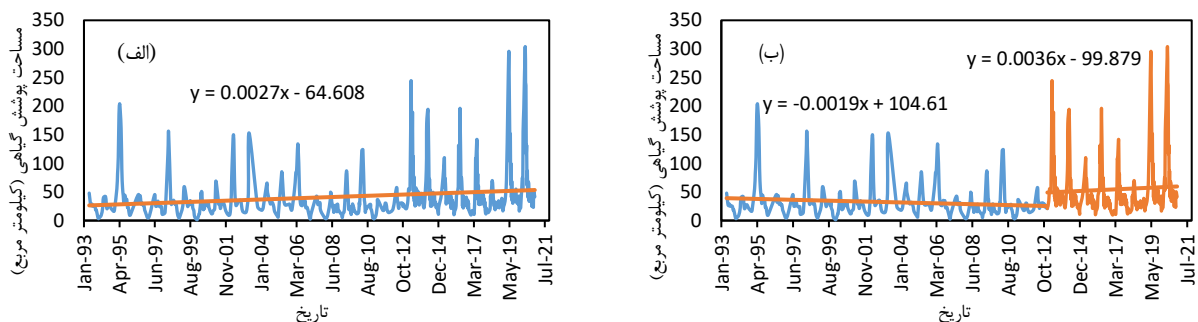
شکل ۷- سری زمانی و روند تغییرات بارندگی در حوضه شیراز در بازه سال‌های ۱۹۹۳-۲۰۲۰ (الف) در مقیاس سالانه و (ب) مقیاس ماهانه

از عوامل دیگری که باعث فشار بر منابع آب زیرزمینی می‌گردد برداشت بی‌رویه از آن به‌منظور تأمین نیازهای شرب و فضای سبز در محدوده حوضه شیراز است. به‌منظور بررسی این مسئله تغییرات جمعیت شهر شیراز در طی دهه‌های گذشته مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج آمار سرشماری صورت گرفته از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۶ در شهرستان شیراز بیانگر افزایش بسیار شدید جمعیت است، به‌طوری‌که از ۲۲۲۱۴۳ نفر در سال ۱۹۸۶ به ۱۸۶۹۰۰۱ نفر در سال ۲۰۱۶ رسیده است. با توجه به محدودیت منابع آب سطحی در منطقه، با افزایش جمعیت، تأمین نیاز آبی برای این افراد منجر به افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی می‌گردد. همچنین این افزایش جمعیت منجر به تغییر کاربری اراضی و کاهش نفوذ آب در مناطق شهری گردیده که تغذیه آب‌های زیرزمینی از طریق نفوذ عمقی را نیز با مشکل مواجه

کرده است. این مسئله که برداشت بیش از تغذیه در حوضه شیراز عمده دلیل افت سطح آب زیرزمینی است توسط بررسی‌های صورت گرفته توسط (Noshadi & Ahadi, 2020) نیز مورد تأکید قرار گرفته است. همچنین نتایج مشابهی در بسیاری از حوضه‌هایی که در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور قرار دارند مشاهده شده است (Abou Zaki et al., 2019; Ebrahimi et al., 2021; Rahimzadegan & Entezari, 2019)

از سوی دیگر با توجه به افزایش جمعیت و توسعه شهری شیراز، پوشش گیاهی این شهر دستخوش تغییراتی شده است. سری زمانی سطح سبز حاصل از این تصاویر در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به نمودار ۸ (الف) در سطح سبز حوضه شاهد یک روند افزایشی هستیم که با توجه به آزمون من‌کنندال نیز در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. از این رو به منظور تعیین نقطه تغییر از آزمون پتیت استفاده شد. نتیجه این آزمون نشان داد که در دی‌ماه ۱۳۹۱ (ژانویه ۲۰۱۳) نقطه تغییر رخ داده است. با بررسی روند تغییرات در قبل و بعد از این نقطه در شکل ۸ (ب) مشاهده شد که در قبل از این تاریخ روند تغییرات پوشش گیاهی در سطح حوضه دارای یک روند کاهشی بوده است که این مسئله را می‌توان به تخریب باغات موجود در محدوده شهر شیراز به منظور احداث مناطق مسکونی مرتبط دانست. اما بعد از این تاریخ شاهد یک روند صعودی هستیم. این مسئله را می‌توان مرتبط با تلاش‌های سازمان سیما منظر و فضای سبز شهری برای افزایش فضای سبز شهری همچنین توسعه باغشهرهای اطراف محدوده شهر شیراز مرتبط دانست. در این میان برای تأمین آب آبیاری و حفظ حیات این پوشش سبز به صورت عمده از آب زیرزمینی استفاده شده است که با توجه به بحران آب و برداشت‌های بی‌رویه تأمین آب موردنیاز با مشکل مواجه شده است.

نکته دیگری که بایستی به آن توجه کرد سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهر شیراز می‌باشد که عملیات اجرایی آن از سال ۱۳۷۵ شروع شده است (Kariminejad, 2020). با توجه به آمار شرکت آب و فاضلاب شیراز تا پایان سال ۱۴۰۰ به میزان ۲۴۳۸ km شبکه و خطوط انتقال فاضلاب در محدوده شهر شیراز اجرا شده است. حجم فاضلاب جمع‌آوری شده از حوضه تا خرداد ۱۴۰۱ نیز برابر با  $20660 \text{ m}^3$  می‌باشد. همچنین ۷/۷۵٪ از جمعیت شهر شیراز تحت پوشش تأسیسات فاضلاب شهری قرار گرفته‌اند (Shiraz Water and Wastewater Company, 2022). قبل از اجرای سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهر شیراز، سیستم‌های جمع‌آوری به صورت چاه‌های جذبی بوده است که منجر به تغذیه آب زیرزمینی می‌گردیده است که با اجرای این سیستم این آب از حوضه خارج شده و پس از تصفیه بخشی از آن به دریاچه مهارلو در جنوب حوضه شیراز وارد می‌شود. عدم کاربرد مجدد فاضلاب تصفیه شده در حوضه نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل به هم خوردن تعادل آبخوان باشد. از طرفی افزایش جمعیت و برداشت آب زیرزمینی برای تأمین نیاز این جمعیت در حال توسعه شرایط آب موجود در آبخوان را چه از لحاظ کمیت و چه از لحاظ کیفیت با مشکلات بیشتری مواجه می‌کند. به منظور استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی بایستی اثر هر یک از این عوامل به صورت جداگانه مورد بررسی‌های دقیق‌تر قرار بگیرد و تصمیم‌های مدیریتی مناسب با شرایط موجود اتخاذ گردد.



شکل ۸- سری زمانی و روند تغییرات سطح پوشش گیاهی در حوضه شیراز در بازه سال‌های ۱۹۹۳-۲۰۲۰ (الف) در کل بازه و (ب) در قبل و بعد از نقطه تغییر در ژانویه ۲۰۱۳

## نتیجه‌گیری

بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی یکی از مشکلات رایج در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و چنانچه این بهره‌برداری‌ها بدون برنامه‌ریزی صورت پذیرد، این مسئله می‌تواند منجر به صدمات جبران‌ناپذیری از جمله پدیده فرونشست گردد که در مناطق شهری موجب خسارات مالی و جانی می‌گردد. از این رو به منظور بررسی وضعیت کمی و کیفی آب زیرزمینی در حوضه شهر شیراز، بررسی وضعیت سطح

ایستایی در این حوضه با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده چاه‌های پیژومتری و داده‌های حاصل از ماهواره GRACE در بازه زمانی ۱۳۷۲-۱۳۹۹ (۱۹۹۳-۲۰۲۰) و EC آب زیرزمینی صورت گرفت. همچنین عوامل مؤثر بر روند تغییرات نیز مورد بررسی قرار گرفت نتایج نشان داد:

۱- داده‌های سطح ایستایی حاصل از چاه‌های پیژومتری روند معنی‌دار کاهشی در سطح ۹۵ درصد را نشان دادند؛ به طوری که این روند منفی از خردادماه ۱۳۸۱ به بعد به  $2/8$  برابر دوره قبل از خود افزایش یافته است.

۲- داده‌های حاصل از ماهواره GRACE به منظور ارزیابی تغییرات سطح ایستایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کلیه سری داده‌های حاصل از این ماهواره با دقت بسیار خوبی روند تغییرات را برآورد می‌کنند، هرچند که سری داده‌های CSR و JPL از دقت بالاتری برخوردار بودند. از این رو این داده‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای داده‌های حاصل از چاه‌های پیژومتری در مناطق فاقد آمار و یا در ترکیب با آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۳- ارزیابی روند شوری آب زیرزمینی نشان‌دهنده روند صعودی مقدار EC در سطح حوضه و کاهش کیفیت این آب جهت مصرف شرب است. همچنین افزایش مقدار می‌تواند EC با کاهش سطح آب زیرزمینی مرتبط باشد که این مسئله نیاز به بررسی بیشتر دارد.

۴- عوامل مؤثر بر روند کاهشی سطح ایستایی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در بررسی داده‌های بارندگی در حوضه هیچ‌گونه روند معنی‌داری مشاهده نشد و نمی‌توان افت سطح ایستایی را به کاهش بارندگی نسبت داد. از طرفی جمعیت و سطح سبز در حوضه دارای روند معنی‌دار افزایشی بود و با توجه به نبود منابع آب سطحی این مسئله می‌تواند منجر به افزایش چشمگیر برداشت از منابع آب زیرزمینی و همچنین کاهش تغذیه آب زیرزمینی به دلیل تغییر کاربری اراضی گردد؛ از طرفی سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری نیز در شهر شیراز توسعه داشته است هرچند که آب تصفیه‌شده در حوضه مورد استفاده مجدد چندان قرار نگرفته است. از این رو لازم است میزان اثر هر یک از این عوامل بر روی کیفیت و کمیت آب زیرزمینی با دقت بیشتر در پژوهش‌های آینده مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرد.

۵- بنابراین ادامه روند فعلی می‌تواند منجر به مشکلات بسیاری در حوضه شهر شیراز گردد؛ از این رو مدیران این حوضه بایستی اقدامات مؤثری در تعادل بخشی به آبخوان را پیش رو گیرند تا از خسارات ناشی از این افت سطح آب زیرزمینی بکاهد.

۶- با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق و روند نزولی مشاهده شده در سطح آب زیرزمینی پیشنهاد می‌گردد که در پژوهش‌های آینده شدت اثر عوامل مختلف مؤثر و همچنین نقش سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری بر این کاهش مورد ارزیابی دقیق‌تری قرار گیرد. همچنین راهکارهای مؤثر و مناسب حوضه شیراز به منظور تعادل بخشی آبخوان نیز مورد بررسی قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Abou Zaki, N., Torabi Haghghi, A., M. Rossi, P., J. Tourian, M., and Kløve, B. (2019). Monitoring groundwater storage depletion using gravity recovery and climate experiment (GRACE) data in Bakhtegan Catchment, Iran. *Water*, 11(7), 1456.
- Ahamed, A., Knight, R., Alam, S., Pauloo, R., and Melton, F. (2022). Assessing the utility of remote sensing data to accurately estimate changes in groundwater storage. *Science of The Total Environment*, 807, 150635.
- Alamdar, R., Kumar, V., Moghtaderi, T., and Naghibi, S. J. (2019). Groundwater quality evaluation of Shiraz City, Iran using multivariate and geostatistical techniques. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1-16.
- Badeenezhad, A., Tabatabaee, H. R., Nikbakht, H. A., Radfard, M., Abbasnia, A., Baghapour, M. A., and Alhamd, M. (2020). Estimation of the groundwater quality index and investigation of the affecting factors their changes in Shiraz drinking groundwater, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100435.
- Barzegar, S., & Masoudi, M. (2017). Degradation severity assessment of groundwater resources using the modified version of IMDPA and GIS in Shiraz plain, Fars province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(3), 47-57. (In Farsi).
- Ebrahimi, A., Nazemosadat, S. M., Motamedvaziri, B., & Ahmadi, H. (2021). Land Use-Land Cover Change and Its Relationships with the Groundwater Table and the Plants' Altitudinal Zones: A Case Study of Arsanjan County, Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(3), 1891-1907.
- Feng, W., Shum, C. K., Zhong, M., and Pan, Y. (2018). Groundwater storage changes in China from satellite



- gravity: An overview. *Remote Sensing*, 10(5), 674.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27.
- Joodaki, G., Wahr, J., and Swenson, S. (2014). Estimating the human contribution to groundwater depletion in the Middle East, from GRACE data, land surface models, and well observations. *Water Resources Research*, 50(3), 2679-2692.
- Karimi, S. (2012). Investigation of groundwater resources quality variations trend (Case study; Shiraz Plain/ Fars province). M.Sc. thesis, Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
- Kariminejad, M. (2020 September). *Appearance of Shiraz sewage project*. Retrieved July 17, 2022, Shiraz Water and Wastewater company news, from <https://news.abfa-shiraz.ir/news>
- Kendall, M.G. (1948). *Rank correlation methods*. Griffin.
- Landerer, F. W., and Swenson, S. C. (2012). Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water resources research*, 48(4).
- Liesch, T., and Ohmer, M. (2016). Comparison of GRACE data and groundwater levels for the assessment of groundwater depletion in Jordan. *Hydrogeology Journal*, 24(6), 1547-1563.
- Mirabbasi, R., Ahmadi, F., and Jhajharia, D. (2020). Comparison of parametric and non-parametric methods for trend identification in groundwater levels in Sirjan plain aquifer, Iran. *Hydrology Research*, 51(6), 1455-1477.
- Miro, M. E., and Famiglietti, J. S. (2018). Downscaling GRACE remote sensing datasets to high-resolution groundwater storage change maps of California's Central Valley. *Remote Sensing*, 10(1), 143.
- Mojid, M. A., Parvez, M. F., Mainuddin, M., and Hodgson, G. (2019). Water table trend—a sustainability status of groundwater development in North-West Bangladesh. *Water*, 11(6), 1182.
- Nabavi, S. N., Alizadeh, A., & Faridhosseini, A. (2020). Evaluation of groundwater resources using GRACE Satellite Gravimetric Data (Case study: Khorasan Razavi). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(3), 855-866. (In Farsi).
- Noshadi M., Ahadi A. (2020) Analyzing piezometers' behavior to determine the lag time of the rainfall effects on the groundwater level fluctuations in the alluvial plain of Shiraz by using SPI and GRI Indices. *Journal of Water and Soil Science*; 23 (4) :299-312. (In Farsi).
- Pathak, A. A., and Dodamani, B. M. (2019). Trend analysis of groundwater levels and assessment of regional groundwater drought: Ghataprabha River Basin, India. *Natural Resources Research*, 28(3), 631-643.
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135.
- Rahimzadegan, M., & Entezari, S. A. (2019). Performance of the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) method in monitoring groundwater-level changes in local-scale study regions within Iran. *Hydrogeology Journal*, 27(7), 2497-2509.
- Samani, S., Moghaddam, H. K., and Zareian, M. J. (2021). Evaluating time series integrated groundwater sustainability: a case study in Salt Lake catchment, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 1-13.
- Shiraz Water and Wastewater company. (2022). *The performance of the company in the sewage sector*. Retrieved July 17, 2022, from <https://abfa-shiraz.ir>.
- Singh, L., and Saravanan, S. (2020). Satellite-derived GRACE groundwater storage variation in complex aquifer system in India. *Sustainable Water Resources Management*, 6(3), 1-15.
- Statistics Center of Iran. (2020). Retrieved January 20, 2022, from <https://www.amar.org.ir>.
- Swenson, S., Yeh, P. J. F., Wahr, J., and Famiglietti, J. (2006). A comparison of terrestrial water storage variations from GRACE with in situ measurements from Illinois. *Geophysical Research Letters*, 33(16).
- Wang, S., Liu, H., Yu, Y., Zhao, W., Yang, Q., and Liu, J. (2020). Evaluation of groundwater sustainability in the arid Hexi Corridor of Northwestern China, using GRACE, GLDAS and measured groundwater data products. *Science of The Total Environment*, 705, 135829.
- WHO (2011) WHO guidelines for drinking-water quality, 4th edn. World Health Organization, Washington, DC.
- Yin, W., Hu, L., and Jiao, J. J. (2017). Evaluation of groundwater storage variations in Northern China using GRACE data. *Geofluids*, 2017.
- Zarinmehr, H., Tizro, A. T., Fryar, A. E., Pour, M. K., and Fasihi, R. (2022). Prediction of groundwater level variations based on gravity recovery and climate experiment (GRACE) satellite data and a time-series analysis: a case study in the Lake Urmia basin, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 81(6), 1-11.