



Assessment and Validation of GRACE Satellite Data with Groundwater Resources Index (GRI) at Qazvin Aquifer Plain

Shima Azadeh Ranjbar¹ | Majid Kholghi² | Abdolnabi Abdeh Kolahchi³

1. Department of Irrigation & Reclamation Eng, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj,

Iran. E-mail: : Shima.azadeh.ran@ut.ac.ir, shima.ranjbar20@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Irrigation & Reclamation Eng, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: kholghi@ut.ac.ir, mkhholghi@gmail.com

3 Department of Hydrology and Water Resources Development, Soil Conservation and Watershed Management, E-mail: nabi.kolahchi@gmail.com, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, kolahchi@scwmri.ac.ir,

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 6, 2024

Revised: Dec. 4, 2024

Accepted: Feb. 25, 2025

Published online: June. 2025

Keywords:

*Groundwater Level,
Fluctuations,
GRI,
GRACE,
Satellite,
Qazvin Plain,
Remote Sensing*

ABSTRACT

due to the groundwater over withdrawal, a huge groundwater level decline and aquifer volume deficit have been observed in many plains of the country. due to the lack of data in most aquifers, we can use the remote sensing technique. In this study, Qazvin Plain was chosen as a study area due to its highly dependence on groundwater in agricultural, domestic and industry sectors. In this research, the fluctuations of the groundwater level of Qazvin plain in the period of 2002-2022 were investigated and compared using GRACE satellite data and observation well data. In this paper, the groundwater level fluctuations in Qazvin plain were investigated using the data of two JPL and CSR products of the GRACE satellite and the groundwater resource index (GRI) on a monthly time series. The results show that the two GRACE satellite products and the observation well data follow the same trend. In the second step, the data of two GRACE satellite products and index (GRI) of Qazvin plain were evaluated and validated. the statistical indices of determination coefficient, correlation coefficient, absolute average error and Nash Sutcliffe coefficient were used to verify the difference between satellite data and index (GRI). The coefficient of determination and correlation of the CSR product is equal to ($R=0.91$, $R^2=0.83$), the Nash Sutcliffe coefficient of the JPL product is equal to ($NSE=0.72$). The results of four statistical indices, indicate the accuracy and precision of GRACE satellite data, so we can conclude that in aquifers with insufficient observation wells, the GRACE satellite data can be used for groundwater management.

Cite this article: Azadeh Ranjbar, Sh., Kholghi, M., Abdeh Kolahchi, A., (2025) Assessment and Validation of GRACE Satellite Data with Groundwater Resources Index (GRI) at Qazvin Aquifer Plain, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (4), 1103-1117. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383301.669806>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383301.669806>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In recent years, the indiscriminate extraction of groundwater and poor management of water resources has resulted in a significant decline in groundwater levels many regions of the country. As a result, effective groundwater monitoring is essential. However, designing and implementing a comprehensive groundwater level monitoring network is both costly and time-consuming. In this context, remote sensing technology offers a promising solution for monitoring fluctuations in groundwater levels. The study aims to evaluate the accuracy and precision of remote sensing data in estimating changes in groundwater levels compared to the measurements collected from observation wells.

Methodology:

1-Groundwater level

The groundwater level has been monitored for 20 years using 173 observation wells the Qazvin aquifer. The hydrograph indicates that, on average, the groundwater level has dropped by nearly 20 meters during this period.

2- Groundwater Resources Index (GRI)

Data from 173 groundwater observation wells in the Qazvin Plain were used to calculate the monthly and annual Groundwater Resources Index (GRI) from 2002 to 2022. This index shows the behavior and the trend of groundwater decrease/increase during the several years in the study area. This index was calculated monthly for the whole study area from 2002 to 2022. The time series of GRI is presented in Figure 4.

3- GRACE satellite

(GRACE) satellite can detect fluctuations in groundwater. Monthly groundwater fluctuation data is available from (NASA) at three centers (JPL, GFZ, CSR) from 2002 to the present. These data were extracted for the study area. The time series of groundwater fluctuation presented at Figure 7.

4- Validation of groundwater level fluctuation using GRACE versus GRI

Statistical tools such as (R^2 , R , ...) are used for validation and accuracy of The GRACE (JPL, CSR) satellite data and Index (GRI) over the period from 2002 to 2022.

Results and Discussion

In this research, GRACE (JPL, CSR) satellite data and Index (GRI) were utilized to compare groundwater level fluctuations in the Qazvin Plain over a 20-year period.

1-Groundwater

The hydrograph of groundwater observation wells reveals a sharp decline in groundwater levels. It also shows groundwater level dropping sharply by about 15 meters during the last 3 years of the study period. The maximum and minimum drops in groundwater levels observed in the wells are 10.99 meters and 0.77 meters, respectively, occurring in mid-spring and mid-fall.

2-GRI

The GRI results indicate a trend of decreasing groundwater levels over the 20-year period, with the eastern and central regions of the plain being more significantly affected. Furthermore, the GRI demonstrates that the first eight years correspond to a wet period, while the final three years reflect a dry period.

3-GRACE

The JPL and CSR products of the GRACE satellite both exhibit a downward trend from 2002 to 2022, indicating a decline in groundwater levels. The JPL product presents slower fluctuations compared to the CSR product. Additionally, from 2018 to the end of the period, both products demonstrated greater fluctuations than in the earlier years.

4- Statistical Analysis to compare (GRACE) versus GRI

Both the GRACE data and the GRI index displayed similar decreasing trends in groundwater levels. To assess accuracy and validity, the following statistical indicators were employed: determination coefficient (R^2), correlation coefficient (R), mean absolute error (MAE), and Nash-Sutcliffe coefficient (NSE). According to the results (Table 2), all four statistical indicators yielded favorable values, underscoring the high accuracy of the GRACE satellite data. The CSR product demonstrated a high correlation coefficient of $R = 0.91$ indicating very high accuracy. The JPL product achieved a Nash-Sutcliffe coefficient of $NSE = 0.72$, reflecting good model efficiency.

Conclusion

The statistical indicators demonstrated the high accuracy of the GRACE satellite data, which exhibited a similar decreasing trend, with the CSR model identified as the most suitable for monitoring these fluctuations. Moiwo et al. (2012) conducted similar research in China, and their findings indicated a lower correlation compared to the results of this study. Additionally, Famiglietti et al. (2011) reported a significant decreasing trend in groundwater levels in their research. Both the JPL and CSR products of the GRACE satellite effectively represent observed groundwater data, validating their application for monitoring groundwater levels.

Given the GRACE satellite's capabilities for rapid estimation, access to real-time data, and cost-effective monitoring of groundwater fluctuations, this data can play a crucial role in groundwater management, decision-making, drought and wetness estimation, and forecasting aquifer levels in the region. Therefore, this research recommends the use of both GRACE (CSR and JPL) satellite products, which effectively represent observed groundwater data and validate their application for monitoring groundwater levels.

Author Consideration

“Conceptualization, methodology, validation, Abdeh Kolahchi, A.; software, formal analysis, Ranjbar, S.; and Abdeh Kolahchi, A.; investigation, resources, data curation, Abdeh Kolahchi, A. and Ranjbar, S.; writing—original draft preparation, writing—review and editing, visualization, supervision, project administration, funding acquisition, Kholgi, M., Ranjbar, S. and Abdeh Kolahchi, A. .

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی و اعتبار سنجی داده های ماهواره GRACE با شاخص منابع آب زیرزمینی در آبخوان دشت قزوین

شیمای آزاده رنجبر^۱ | مجید خلقی^۲ | عبدالنبی عبده کلاهچی^۳

۱. گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Shima.azadeh.ran@ut.ac.ir

shima.ranjbar20@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: kholghi@ut.ac.ir

mkhholghi@gmail.com ،

۳. گروه هیدرولوژی و توسعه منابع آب، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری - سازمان تات - وزارت کشاورزی رایانامه: nabi.kolahchi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی، منجر به افت تراز سطح آب زیرزمینی در سفره‌های آب زیرزمینی در کشور شده است. با توجه به این که در بعضی آبخوان‌ها، تعداد و پراکنش چاه‌های مشاهده‌ای کافی نیست، از این رو با استفاده از تکنیک سنجش از دور می‌توان نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی را پایش کرد. دشت قزوین به دلیل وابستگی شدید به آب زیرزمینی در بخش‌های شرب، صنعت و به ویژه کشاورزی، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت قزوین در دوره‌ی ۲۰۲۲-۲۰۰۲ با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE و داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله، به منظور دقت بیشتر، نوسانات سطح آب زیرزمینی در دشت قزوین با استفاده از داده‌های دو الگوریتم JPL، CSR و ماهواره GRACE و همچنین شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) در مقیاس زمانی ماهانه، بررسی گردید. نشان نتایج می‌دهد که داده‌های دو الگوریتم ماهواره GRACE و شاخص GRI از یک روندی پیروی می‌کنند. همچنین داده‌های دو الگوریتم ماهواره GRACE و شاخص GRI دشت قزوین مورد ارزیابی و صحت سنجی قرار گرفت. شاخص‌های آماری ضریب تعیین، همبستگی، نش ساتکلیف و میانگین مطلق خطا به منظور راستی آزمائی بین دو سری داده‌های ماهواره‌ای و شاخص GRI استفاده گردید. ضریب تعیین و همبستگی محصول CSR به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۹۱، نش ساتکلیف محصول JPL برابر با ۰/۷۲، که بیانگر صحت و دقت بالای داده‌های ماهواره GRACE می‌باشد. با توجه به این تحقیق می‌توان پیشنهاد داد که در آبخوان‌ها فاقد آمار و یا داده‌های اندک، می‌توان از کارائی داده‌های ماهواره GRACE استفاده کرد.
واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، چاه مشاهده‌ای، دشت قزوین، سنجش از دور، GRACE	

استناد: آزاده رنجبر؛ شیمای آزاده رنجبر؛ مجید، عبده کلاهچی؛ عبدالنبی، (۱۴۰۴) ارزیابی و اعتبار سنجی داده های ماهواره GRACE با شاخص منابع آب زیرزمینی در آبخوان

دشت قزوین، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۴)، ۱۱۱۷-۱۱۰۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383301.669806>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383301.669806>

مقدمه

در سال های اخیر برداشت بی رویه از سفره های آب زیرزمینی و عدم صحیح مدیریت منابع آب، منجر به افت تراز سطح آب زیرزمینی و کسری شدید مخزن در سفره های آب زیرزمینی در اکثر دشت های کشور شده است (Javadi et al., 2021). با توجه به وابستگی تامین آب کشور به این منبع آب با ارزش، پایش آب های زیرزمینی در راستای مدیریت بهتر، امری ضروری است. طرح و اجرای شبکه پایش سطح آب زیرزمینی که بتواند به طور کامل آبخوان را پوشش دهد، نیازمند هزینه سنگین و زمان طولانی است. در این راستا کارایی سنجش از دور می تواند در پایش نوسانات سطح آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. سوال اصلی این است که آیا نوسانات سطح آب زیرزمینی برداشت شده توسط چاه مشاهده ای با داده های سنجش از دور همخوانی دارند یا خیر؟ بدین منظور هدف از پژوهش حاضر بررسی صحت و دقت داده های سنجش از دور در برآورد تغییرات سطح آب زیرزمینی در مقایسه با داده های چاه های مشاهده ای است.

پژوهش های متعددی در زمینه بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی با داده های ماهواره ای سنجش از دور انجام شده است که به تعدادی از آنها اشاره می شود. (Rodell and Famiglietti., (2002 نشان دادند که استفاده از داده های ماهواره GRACE برای بررسی تغییرات آب زیرزمینی در آبخوان های مرتفع در مرکز آمریکا مناسب بوده است. (Yeh, et al (2006 بیان نمودند که تخمین آب زیرزمینی با استفاده از داده های ماهواره GRACE با داده های مشاهداتی در Illinois آمریکا توافق زیادی دارند. اگر چه خاطر نشان کردند که در مقایسه ماهانه نتایج ناشی از داده های GRACE و داده های مشاهداتی تفاوت های معناداری دیده می شود. (Ramillien, et al. (2008 داده های ماهواره ای GRACE برای یک دوره ۴ ساله ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ در حوضه رودخانه ای آمازون را بررسی نمودند. روند تغییرات سطح آب زیرزمینی را ارزیابی کرده اند. نتایج پژوهش آنها نشان دهنده ی بیش برآوردی داده های ماهواره ای GRACE است. (Leblanc, et al. (2009 یک مطالعه در مورد خشکسالی حوضه آبریز Murray- Darling استرالیا در طی دوره ۶ ساله ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ انجام دادند که نتایج، کاهش در منابع آب منطقه را آشکار نمود. آنها دریافتند که همبستگی بالا بین تغییرات آب زیرزمینی مشاهداتی و داده های ماهواره GRACE وجود دارد. (2010) Longuevergne, et al. داده های مرکز پردازش CSR و GRGS ماهواره ای GRACE را در حوضه ای به مساحت ۲۰۰ هزار کیلومتر مربع در آبخوان مرتفع کلرادو آمریکا طی دوره ی ۴ ساله ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ ارزیابی کردند. پس از مقایسه ی روند تغییرات تراز آب زیرزمینی ماهواره ای GRACE و داده های چاه های مشاهده ای، نتایج بیان کننده آن است که ماهواره ای GRACE روند تغییرات تراز آب زیرزمینی را به خوبی نشان می دهد. (Famiglietti, et al. (2011 داده های ماهواره GRACE را در Central Valley کالیفرنیا آمریکا مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که آب زیرزمینی یک نرخ کاهش سالانه حدود ۲۰/۴ میلی متر را در تراز سطح آب زیرزمینی را تجربه نموده است که تقریباً معادل دو سوم کل هدر رفت آب در حوضه آبریز است. (Moiwo, et al. (2012 با استفاده از ماهواره GRACE تغییرات ماهانه و سالانه ی ذخیره آب زیرزمینی را در منطقه ی شمال چین در طی دوره ۴ ساله ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ محاسبه کردند (Voss, et al. (2013 با استفاده از ماهواره ای GRACE، تخلیه ی آب های زیرزمینی منطقه ی دجله و فرات و غرب ایران در دوره ۶ ساله ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ بررسی کردند، که نتایج آنها کاهش بیش از ۱۷ میلی متر در سال و کاهش بیش از ۹۱ میلیون مکعب حجم آب های زیرزمینی را نشان داد. (Ferreira, (2013 et al. مقدار کل تخلیه ی آب حوضه یانگژی در کشور چین را با استفاده از داده های ماهواره GRACE در طی دوره ۶ ساله ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ برآورد کردند. (Forootan, et al. (2014 نوسانات سطح آب زیرزمینی مناطق مرکزی و شمال غرب با ماهواره GRACE از سال ۲۰۰۵ به بعد بررسی کردند، نتایج پژوهش آنها نشان دهنده ی افت تراز سطح آب زیرزمینی در مناطق مرکزی و شمال غرب ایران به طور متوسط ۱۵ میلی متر در سال است. (Chen, et al. (2014 با هدف یافتن روشی برای افزایش دقت داده های ماهواره GRACE، به بررسی داده های این ماهواره در طی دوره ۹ ساله ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ پرداختند، در این تحقیق از داده های مرکز پردازش GFZ، CSR و JPL استفاده شد. نتایج نشان داد که مقایسه تغییرات سطح آب زیرزمینی GRACE با داده های زمینی نشانگر روند افت سطح آب زیرزمینی است. نتیجه ی (2014) Joodaki در بررسی نوسان آب های زیرزمینی منطقه ی خاورمیانه در طی دوره ۹ ساله ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ با ماهواره ای GRACE کاهش چشم گیر تراز ایستایی آبخوان های غرب ایران و شمال عراق را نشان داد. (Castellazzi, et al. (2018 از داده های ماهواره GRACE و داده های سازمان آب ایالتی مکزیک برای تخمین میزان تخلیه آب های زیرزمینی در این منطقه استفاده کردند. آنها نشان دادند که تخمین ماهواره GRACE با داده های زمینی سازگار است و برای برنامه های مدیریت آب مناسب است. آنها همچنین میزان تخلیه بیشتر آب های زیرزمینی و روند منفی در زمین های کشاورزی در شمال مکزیک را نشان دادند. (Banerjee, et al. (2018. داده های ماهواره GRACE را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که آب های زیرزمینی در مناطق مرکزی و جنوبی هند افزایش یافته و داده های GRACE برای شناسایی فرآیند

سطح آب زیرزمینی به اندازه کافی کارآمد هستند. Rateb, et al. (2020) روند تغییرات ذخیره آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GRACE برای یک دوره ۱۵ ساله ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ در آبخوان‌های اصلی ایالات متحده را ارزیابی و مدل‌سازی کردند. آنها دریافتند که در آبخوان جنوب غربی و جنوب مرکزی ایالات متحده، تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و داده‌های ماهواره GRACE با یکدیگر مطابقت دارد. Khorrami, et al. (2021) تغییرات زمانی ذخیره آب‌های زیرزمینی و در ارتباط متغیرهای اقلیمی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GRACE برای یک دوره ۱۳ ساله ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ در ترکیه را ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که تغییرات ماهانه ذخیره آب‌های زیرزمینی در ترکیه با بارش و دما در تاخیر ۲ ماهه همبستگی زیادی دارد. Rafik, et al. (2023) سطح آب زیرزمینی را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GRACE برای یک دوره ۱۳ ساله ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ در مراکش را پیش‌بینی نمودند و مدل‌سازی هیدرولوژیکی برای منطقه مورد مطالعه انجام دادند. Yang, et al. (2024) تغییرات زمانی افزایش و کاهش ذخیره آب‌های زیرزمینی و در ارتباط متغیرهای اقلیمی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GRACE برای یک دوره ۱۲ ساله ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶ در چین را ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که تخمین‌های ماهواره‌ی GRACE به طور کلی قابل مقایسه هستند. نبوی و همکاران (۱۳۹۹) منابع آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ثقل سنجی ماهواره‌ی GRACE برای یک دوره ۱۴ ساله ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ در خراسان رضوی را ارزیابی نمودند. در نهایت داده‌های ماهواره GRACE(CSR) تخمین مناسب‌تری در تغییرات ماهانه سطح آب زیرزمینی را نشان دادند. حافظ‌پرست (۱۴۰۰) تغییرات سطح آب‌زیرزمینی آبخوان میانراهان در استان کرمانشاه با داده‌های ماهواره GRACE ارزیابی نمودند. نتایج نشان دادند که تخمین ماهواره GRACE با داده‌های زمینی سازگار است. بررسی پژوهش‌های پیشین، توانایی ماهواره GRACE را در پایش نوسانات آب زیرزمینی نشان می‌دهد که تخمین ماهواره GRACE با داده‌های زمینی سازگار است و در عمده پژوهش‌ها نام محصول مورد استفاده ذکر نشده است و تنها از یک محصول استفاده شده است و ضمن اینکه دوره‌های ۳ الی ۱۰ ساله را مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این پژوهش علاوه بر ذکر نام الگوریتم، از دو الگوریتم ماهواره GRACE و یک دوره‌ی ۲۰ ساله بررسی شده است. همچنین میزان سازگاری داده‌های زمینی با دو محصول ماهواره GRACE به صورت عددی و نه توصیفی ارائه می‌شود.

از آنجایی که دشت قزوین یکی از دشت‌های مهم از نظر صنعتی و شهری-روستایی و از قطب‌های اصلی کشاورزی در کشور است که به آب‌های زیرزمینی وابستگی شدید دارد، به همین منظور، منطقه مورد مطالعه دشت قزوین تعیین گردید. در این پژوهش تمرکز بر راستی آزمائی پایش نوسانات سطح آب زیرزمینی داده‌های ماهواره GRACE در مقایسه با داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای دشت قزوین در بازه زمانی ۱۴۰۱-۱۳۸۱ است.

مواد و روش‌ها

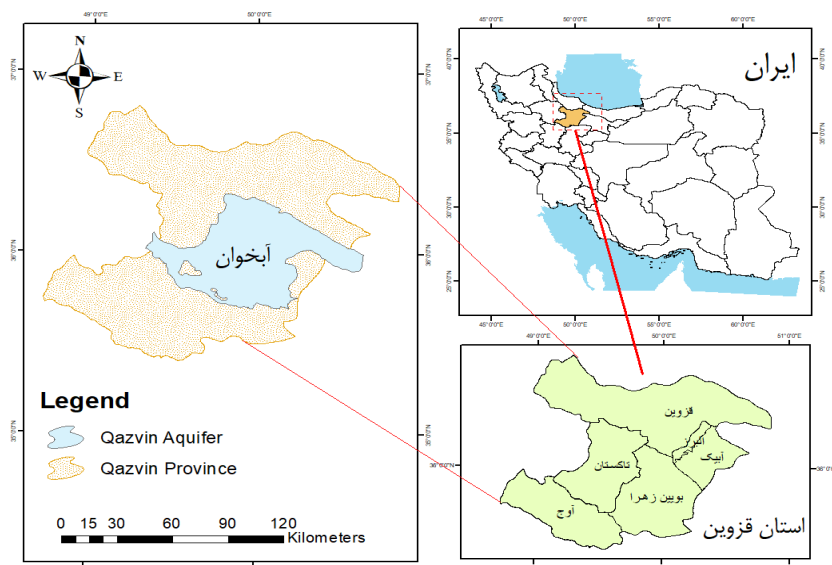
منطقه مورد مطالعه

دشت قزوین در مختصات جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده و از شمال و جنوب به ترتیب با رشته کوه‌های البرز و راموند احاطه شده است. (شکل ۱)

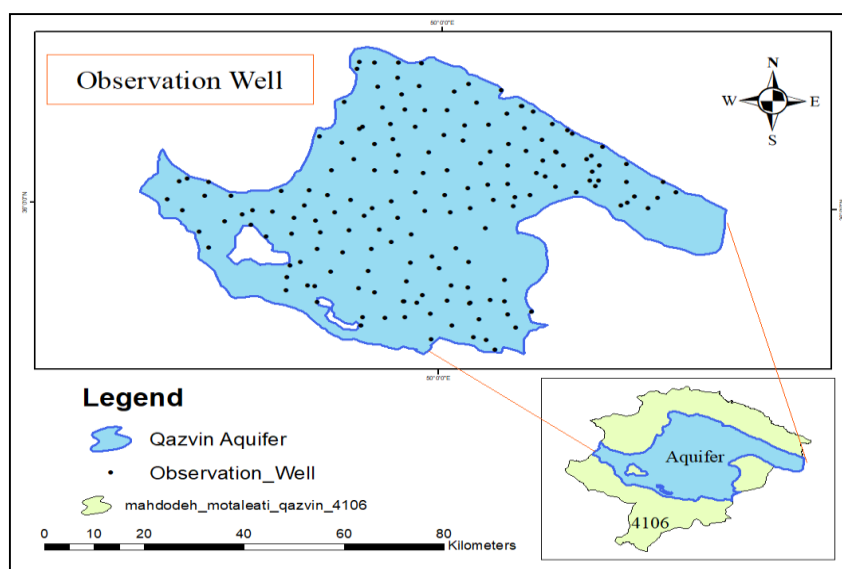
اقلیم دشت قزوین نیمه خشک و متوسط بارش سالانه آن حدود ۳۱۷ میلی‌متر می‌باشد. دشت قزوین یکی از قطب‌های مهم کشاورزی کشور محسوب می‌شود. شبکه آبیاری دشت قزوین دارای ۱۲۰۰ کیلومتر کانال‌های درجه یک تا چهار است. محدوده شبکه از روستای زیاران در شهرستان آبیک تا روستای کهک در شهرستان تاکستان ادامه دارد. هدف از احداث شبکه آبیاری و زهکشی انتقال آب رودخانه طالقان از محل سد انحرافی زیاران به دشت قزوین است. منابع آب سطحی دشت قزوین شامل رودخانه شاهرود، رودخانه‌های فصلی و همچنین سهمیه آب تخصیص یافته از سد طالقان است.

آبخوان دشت قزوین یک آبخوان آبرفتی با وسعتی حدود ۴۰۰۰ (۳۹۵۲/۴) کیلومترمربع که ۷۸ درصد از کل وسعت دشت (۵۰۵۹/۳) کیلومترمربع را شامل می‌شود، تشکیل گردیده است. آبخوان دشت قزوین از سال ۱۳۴۱ مورد شناسایی و بهره‌برداری قرار گرفته است. با گذشت زمان، حفر چاه‌ها در دشت افزایش یافت بطوری که بیش از ۵/۱ میلیارد متر مکعب آب از این دشت تخلیه می‌شود. این برداشت بیش از حد مجاز و بسیار بیشتر از پتانسیل آن بوده و موجب افت سالیانه ۱/۵ متر سطح آب زیرزمینی و ایجاد کسری مخزن شده است. بیش از ۸۵ درصد از مصارف آب این دشت مربوط به بخش کشاورزی است که با توجه به محدودیت منابع آب سطحی و فصلی بودن این منابع، بخش عمده آب آبیاری از منابع زیرزمینی استحصال می‌شود. (Regional Water Company of Qazvin, 2024) دشت قزوین دارای ۱۷۳ حلقه چاه مشاهده‌ای آب زیرزمینی می‌باشد. دلیل انتخاب دشت قزوین علاوه بر اهمیت آب زیرزمینی در

این منطقه از نظر تامین آب، تعداد و پراکنش مناسب چاه های مشاهده ای است. (شکل ۲)

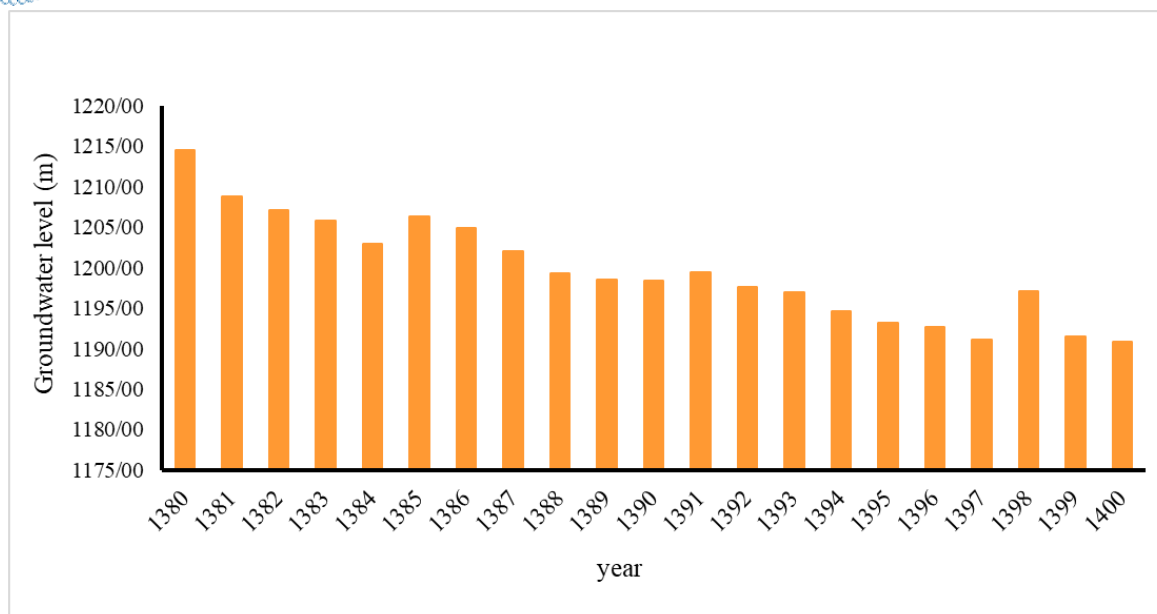


شکل ۱- محدوده جغرافیایی آبخوان قزوین



شکل ۲- شبکه چاه های مشاهده ای دشت قزوین

شکل ۳ هیدروگراف آبخوان آبرفتی دشت قزوین مربوط به سال های آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۰ الی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ را نشان می دهد. ترسیم هیدروگراف آبخوان با استفاده از آمار ماهیانه نوسانات سطح آب زیرزمینی چاه های مشاهده ای تهیه شده است. لازم به ذکر است که مساحت شبکه تیسس آبخوان آبرفتی این دشت ۳۹۵۲/۴ کیلومترمربع می باشد. طی دوره ۲۰ ساله مذکور سطح آب زیرزمینی این دشت ۲۳ متر افت نموده که متوسط سالانه آن برابر با ۱/۱۵ متر می باشد. بیشینه افت سطح آب زیرزمینی با رقم ۵ متر مربوط به سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۰ بوده و کمینه آن در سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۹ برابر ۳۵ سانتی متر است. طی دوره آماری موجود بیشینه تراز آب زیرزمینی با رقم ۱۲۰۴/۲ متر مربوط به فروردین ماه سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۰ بوده و کمینه آن درمهر ماه سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ برابر ۱۱۹۱/۲ متر می باشد. بررسی تراز سطح آب زیرزمینی در بازه های زمانی ۵ ساله ۱۳۸۵-۱۳۸۰ حدود ۹ متر افت، ۱۳۹۰-۱۳۸۵ حدود ۶ متر افت، ۱۳۹۵-۱۳۹۰ حدود ۵ متر افت، ۱۴۰۰-۱۳۹۵ حدود ۲/۳ متر افت، را نشان می دهد. هیدروگراف آبخوان آبرفتی دشت قزوین دارای سیر نزولی می باشد و سطح آب زیرزمینی در این دشت به شدت در حال افت می باشد.



شکل ۳- هیدروگراف وزنی آبخوان دشت قزوین در دوره ۱۴۰۰ - ۱۳۸۰

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش

در این پژوهش برای ارزیابی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی دو نوع داده استفاده شد؛ داده‌های ۱۸۴ چاه مشاهده‌ای آب زیرزمینی دشت قزوین در طول دوره آماری ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ از وزارت نیرو و شرکت آب منطقه‌ای قزوین اخذ گردید. همچنین داده‌های ماهواره GRACE از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲ از سایت ماهواره‌های اقلیمی ناسا استخراج شد.

نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) (Groundwater Resource Index)

شاخص منبع آب زیرزمینی در سال ۲۰۰۸ توسط Mendicino et al., ارائه شد. این شاخص به منظور ارزیابی وضعیت مخزن سفره آب زیرزمینی و همچنین ارزیابی واقعی از میزان ذخیره آبخوان به کار می‌رود. GRI شاخصی است که با استفاده از پارامتر عمق سطح ایستابی در مقیاس ماهانه و سالانه قابل محاسبه بوده و از نتایج آن می‌توان برای پیش‌بینی اهداف و تصمیم‌گیری‌های مدیریت آبخوان استفاده کرد.

شاخص GRI با استاندارد کردن سطح آب سفره زیرزمینی بدست می‌آید. بدین صورت که از اختلاف میان سطح آب زیرزمینی و میانگین بلند مدت آن با تقسیم بر انحراف معیار سطح آب زیرزمینی، شاخص سطح آب زیرزمینی استاندارد بدست می‌آید.

شاخص GRI بدون بعد بوده و با توجه به آمار بلند مدت سطح ایستابی سفره آب زیرزمینی بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه، GRI شاخص منبع آب زیرزمینی در ماه m و سال y ، $D_{y,m}$ عمق آب زیرزمینی در ماه m از سال y ، $\mu_{D,m}$ میانگین ارتفاع سطح آب زیرزمینی ماه m برای D سال و $\sigma_{D,m}$ انحراف معیار ارتفاع سطح آب زیرزمینی ماه m برای D سال می‌باشد. طبقات مختلف رطوبتی شاخص GRI در جدول (۱) نشان داده شده است. هر چه مقادیر شاخص از ۲+ بیشتر باشد، ترسالی بسیار شدیدتر و هرچه از ۲- کمتر باشد خشکسالی بسیار شدیدتر خواهد بود.

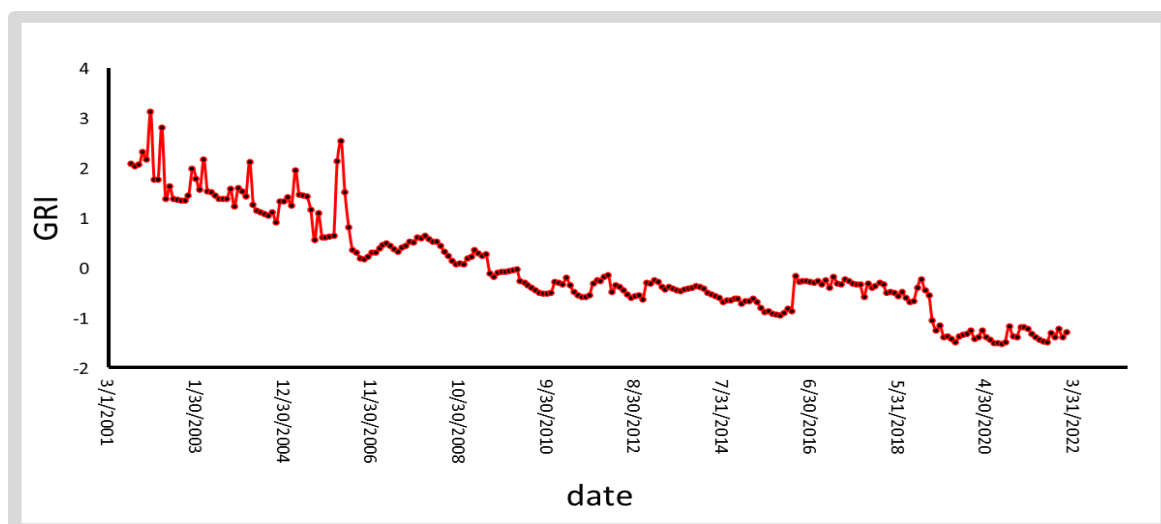
به منظور بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی از آمار ۱۷۳ حلقه چاه مشاهده‌ای استفاده شد. شاخص GRI برای آبخوان دشت قزوین به تفکیک ماهانه طی دوره آماری ۲۰ ساله محاسبه گردید. (شکل ۴)

شکل ۴ افت تراز سطح آب زیرزمینی طی بازه زمانی ۱۴۰۱-۱۳۸۱ را نشان می‌دهد. شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) در ۸ سال ابتدای دوره آماری دارای وضعیت نرمال و در حالت ترسالی بوده است اما نوسانات زیادی را نشان داده است. در بازه زمانی ۱۳۸۸-۱۳۹۷ وضعیت منابع آب زیرزمینی در حالت خشکسالی و نوسانات کم می‌باشد. در بازه زمانی ۱۳۹۷-۱۳۹۴ وضعیت منابع آب زیرزمینی مقدار کمی

بهبود پیدا کرد اما هنوز در حالت خشکسالی بوده است. در سه سال پایانی وضعیت منابع آب زیرزمینی در حالت خشکسالی شدید می باشد.

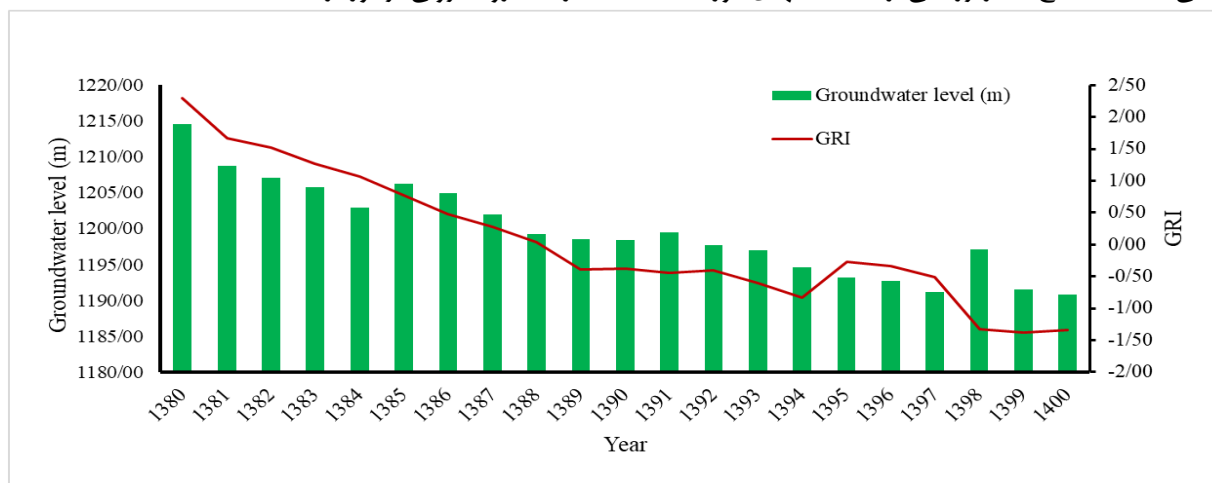
جدول ۱- طبقه بندی خشکسالی بر اساس شاخص منابع آب زیرزمینی (Mendicino et al., 2008)

طبقات	طبقه بندی رطوبتی	GRI مقادیر
۱	ترسالی بسیار شدید	۲ و بیشتر
۲	ترسالی شدید	۱٫۵ تا ۱٫۹۹
۳	ترسالی متوسط	۱ تا ۱٫۴۹
۴	نزدیک به نرمال	-۰٫۹۹ تا ۰٫۹۹
۵	خشکسالی متوسط	-۱ تا ۱٫۴۹
۶	خشکسالی شدید	-۱٫۵ تا -۰٫۹۹
۷	خشکسالی بسیار شدید	-۲ تا کمتر



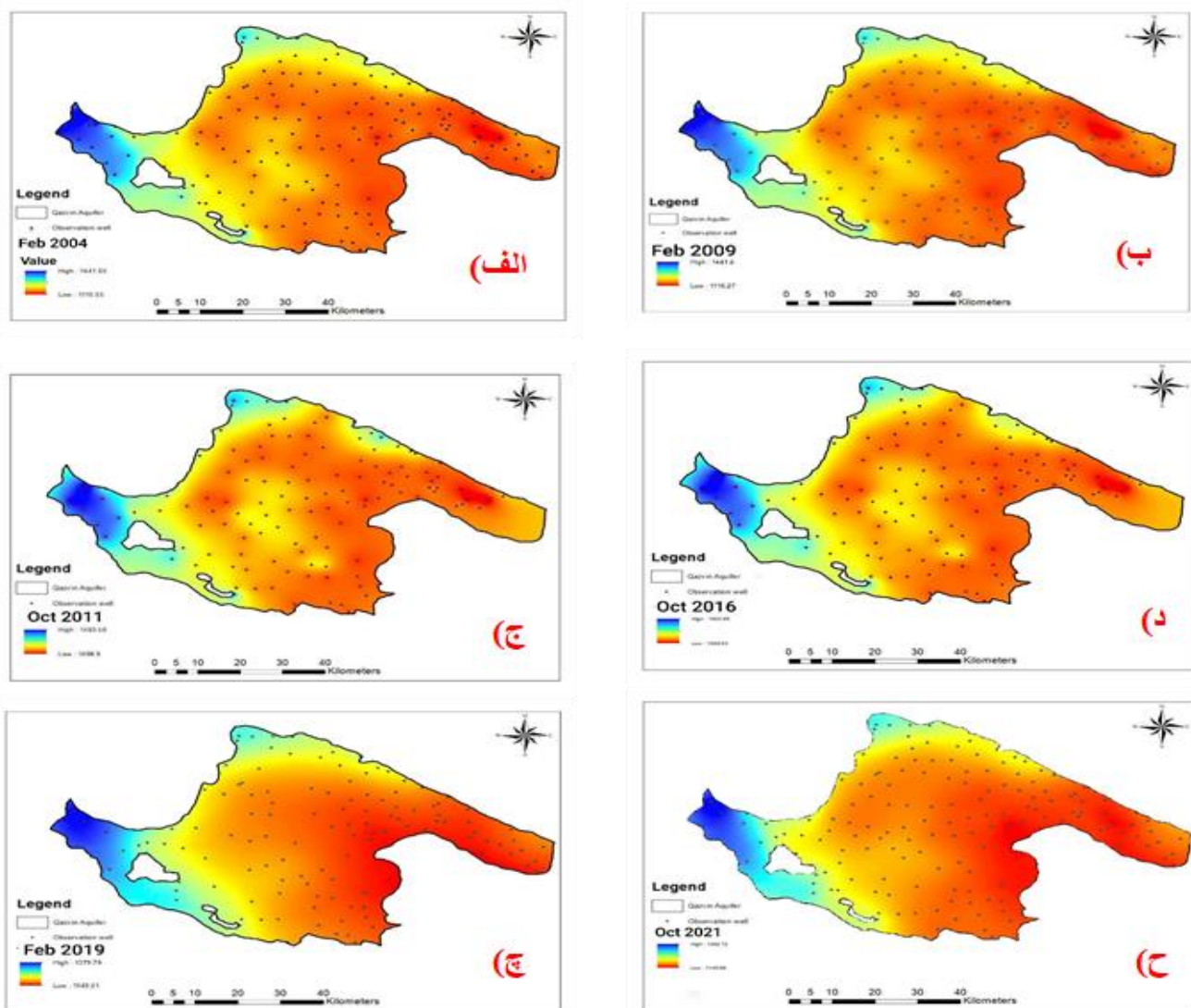
شکل ۴- سری زمانی ماهانه شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) ۲۰۲۲-۲۰۰۲

نمودار شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) سالانه و سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۸۰ در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می دهند که سطح آب زیرزمینی از ابتدا تا انتهای دوره مطالعه شده از یک روند نزولی برخوردار است.



شکل ۵- سری زمانی سالانه شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) و تراز سطح آب زیرزمینی دشت قزوین ۲۰۲۲-۲۰۰۲

به منظور تحلیل مکانی و زمانی تراز آب زیرزمینی دشت، پهنه‌بندی بر اساس سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای دشت قزوین و میانگین شاخص آب زیرزمینی (GRI) به تفکیک ماهانه در بازه زمانی ۱۳۸۱-۱۴۰۱ صورت گرفت. پهنه‌بندی به روش درون‌یابی Kriging در محیط GIS انجام گردید. از بین ۲۴۰ نقشه ایجاد شده، به علت محدودیت حجمی، فقط ۶ نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی در شکل ۶ نشان داده شده است. نواحی به رنگ قرمز نشان دهنده تراز سطح آب زیرزمینی پایین و نواحی به رنگ آبی نشان دهنده تراز سطح آب زیرزمینی بالا می‌باشد.



شکل ۶- نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی دشت قزوین

(الف) اسفند ۱۳۸۲ (ب) اسفند ۱۳۸۷ (ج) شهریور ۱۳۹۰ (د) شهریور ۱۳۹۵ (چ) اسفند ۱۳۹۷ (ح) شهریور ۱۴۰۰

نتایج پهنه‌بندی بیانگر این است که افت تراز سطح آب زیرزمینی در نواحی شرقی، جنوب شرقی و مرکز دشت قزوین بیش از سایر نقاط آبخوان است که از دلایل اصلی آن تعداد بیشتر چاه بهره‌برداری و متمرکز بودن و گسترش مناطق کشاورزی در این نواحی می‌باشد

ماهواره GRACE

ماهواره‌ی Gravity Recovery And Climate Experiment یا به اختصار GRACE، ابزاری ارزشمند برای پایش آب زیرزمینی می‌باشد و ماهواره‌ی سنجنش از دوری است که توانایی نظارت بر نوسانات و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی را به روش گرانش‌سنجی دارد؛ که بوسیله دو ماهواره مشابه و مجزا در ارتفاع ۱۰۰ کیلومتری از سطح زمین با فاصله ۲۲۰ کیلومتر انجام می‌شود و قادر است با اندازه‌گیری تغییرات میدان ثقل کره‌ی زمین بر اساس عرض جغرافیایی مرجع، مقدار تغییرات ذخیره‌ی آب را برآورد کند. با تغییر میدان ثقل محلی که ماهواره‌ها

از آن عبور می کنند، فاصله های بین ماهواره ها تغییر کرده و با آنالیز تغییرات فاصله، می توان به تغییرات میدان ثقل دست یافت. این ماهواره، تغییرات میزان آب را در زمین به صورت غیرمستقیم و با تخمین تغییرات میدان ثقل زمین اندازه گیری می نماید. بنابراین بر اساس تغییرات گرانش در یک مکان خاص در طول زمان، بی هنجاری ذخیره کل آب یا TWSA در آن منطقه توسط GRACE اندازه گیری می شود. زمانی که میزان آب در یک سفره ی آب زیرزمینی کم می شود، نیروی جاذبه ی آن نقطه کاهش می یابد.

دو ماهواره GRACE برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ پرتاب شدند و پیش بینی شده بود که تا سال ۲۰۱۷ به مأموریت ادامه دهد، اما ماهواره GRACE در سال ۲۰۱۶ پایان یافت. سپس در سال ۲۰۱۸ ماهواره GRACE-FO به عنوان جانشین ماهواره GRACE به فضا پرتاب شد. ماهواره GRACE بر خلاف ماهواره های معمول هیچگونه اندازه گیری انرژی امواج مغناطیسی که از زمین بازتاب می شوند، را انجام نمی دهد و فقط دو ماهواره به تنهایی به عنوان ابزار اندازه گیری استفاده می شوند. داده های این ماهواره به صورت ماهانه است و می توانند هر گونه تغییر در جاذبه ی نقاط مختلف زمین را تشخیص دهند.

با توجه به اینکه داده های ماهواره GRACE توان تفکیک مکانی یک درجه ای را دارند، بنابراین یک پیکسل به مختصات مرکز عرض جغرافیایی ۳۶ و طول جغرافیایی ۵۰ درجه، تقریباً کل محدوده دشت قزوین را پوشش می دهد.

با توجه به اینکه داده های ماهواره GRACE توان تفکیک مکانی یک درجه ای را دارند، بنابراین یک پیکسل به مختصات مرکز عرض جغرافیایی ۳۶ و طول جغرافیایی ۵۰ درجه، تقریباً کل محدوده دشت قزوین را پوشش می دهد.

اطلاعات ماهواره GRACE توسط سه مرکز، JPL در ناسا، موسسه GFZ در آلمان و مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه تگزاس آمریکا UTCSR؛ پردازش، ذخیره سازی و به صورت شبکه بندی شده در اختیار قرار می گیرد. اگر چه هر سه مرکز فوق از داده های خام اولیه ارسالی توسط ماهواره GRACE استفاده می کنند، اما به دلیل استفاده از الگوریتم های مختلف در آنالیز داده ها و همچنین نوع تصحیحات اعمال شده، مدل های ماهیانه ارائه شده توسط سه مرکز با یکدیگر متفاوت می باشد. در این پژوهش از دو محصول (JPL، CSR) ماهواره GRACE در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲ استفاده گردید.

نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده های ماهواره GRACE

شکل ۷ نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده های دو محصول JPL، CSR ماهواره GRACE به تفکیک ماهانه در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲ را نشان می دهد.

باتوجه به شکل ۷ دو محصول JPL، CSR ماهواره GRACE از ابتدا تا انتهای دوره دارای روند نزولی بوده و هر دو نمودار افت تراز سطح آب زیرزمینی از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲ را نشان می دهند. محصول JPL نوسانات آرام تری را نسبت به محصول CSR نشان می دهد. در نمودار تاریخ سپتامبر ۲۰۱۷ تا سپتامبر ۲۰۱۸ فاقد داده می باشد به دلیل پایان یافتن مأموریت ماهواره GRACE در سال ۲۰۱۷، در سال ۲۰۱۸ ماهواره GRACE-FO به عنوان جانشین ماهواره GRACE به فضا پرتاب شد. از سال ۲۰۱۸ تا انتهای دوره، هر دو محصول شدت نوسانات بیشتری را نسبت به ابتدای دوره تا سال ۲۰۱۷ نشان داده است.

نتایج ارزیابی دقت و صحت سنجی داده های ماهواره GRACE با داده های چاه های مشاهده ای آب زیرزمینی (شاخص GRI) دشت قزوین
به منظور بررسی همخوانی نوسانات سطح آب زیرزمینی برداشت شده توسط چاه مشاهده ای (شاخص GRI) با داده های سنجش از دور، با استفاده از ۲۴۰ داده ماهانه، نتایج با یکدیگر صحت سنجی گردید. (شکل ۸)

روند داده های ماهواره GRACE (محصول CSR و محصول JPL) با داده های چاه های آب زیرزمینی دشت قزوین (شاخص GRI) یکی است و هر دو افت تراز سطح آب زیرزمینی را نشان می دهند.

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی دقت و صحت سنجی نوسانات سطح آب زیرزمینی برداشت شده توسط چاه مشاهده ای با داده های ماهواره GRACE از شاخص های آماری ضریب تعیین (R^2)، ضریب همبستگی (R)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب نش ساتکلیف (NSE) استفاده شده است. این شاخص ها به صورت روابط ۲ تا ۵ تعریف می شوند.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n M_i C_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n M_i^2 \sum_{i=1}^n C_i^2}} \quad \text{رابطه ۲}$$

رابطه (۳)

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2 (M_i - \bar{M})^2}}$$

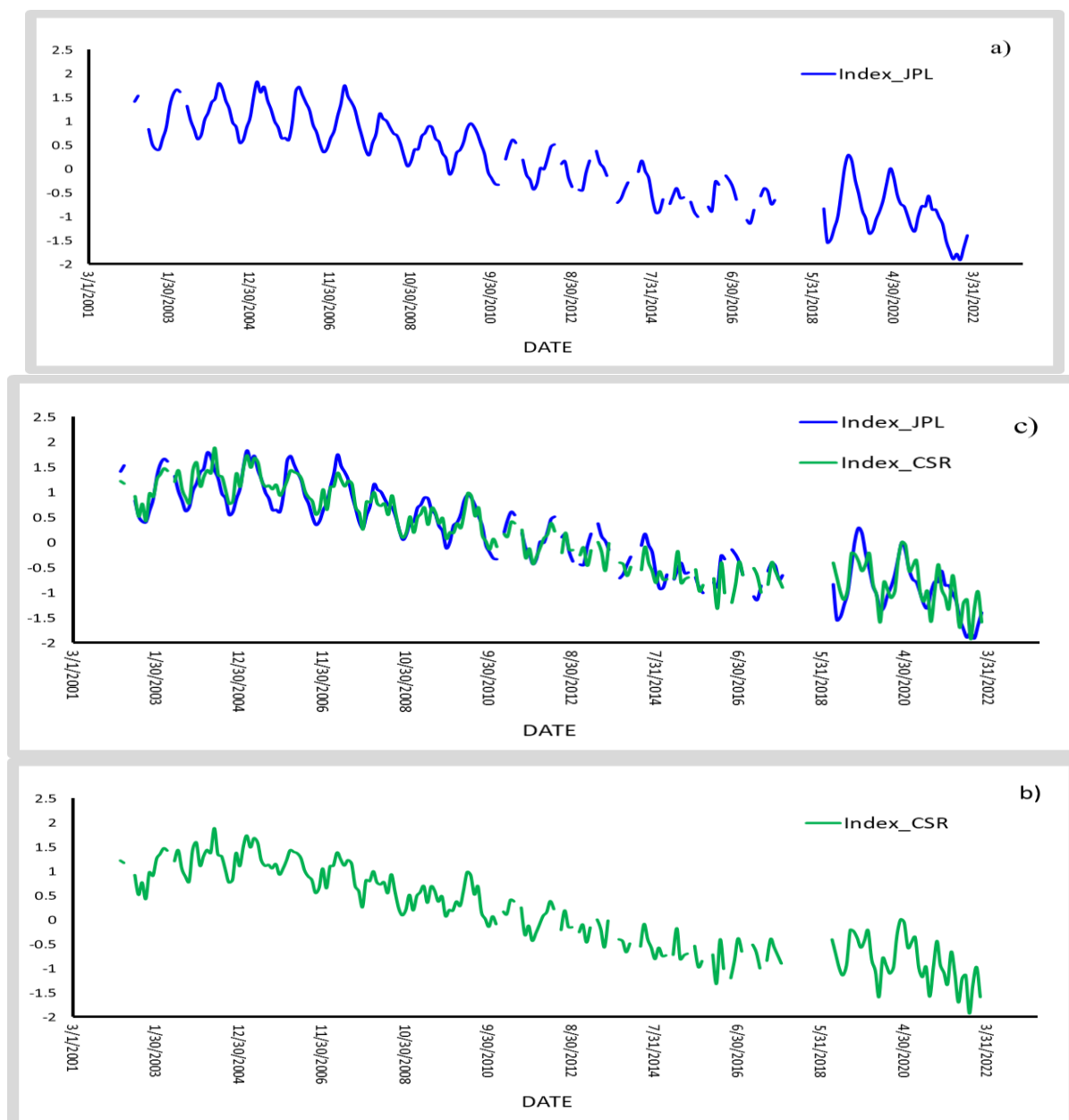
رابطه (۴)

$$MAE = \frac{\sum |C_i - M_i|}{n}$$

رابطه (۵)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}$$

که در این روابط، C_i مقادیر ماهواره *GRACE*، M_i مقادیر چاه‌های مشاهده‌ای، $\bar{C}$ میانگین مقادیر ماهواره *GRACE* و n تعداد داده‌ها می‌باشند. ضریب تعیین، ضریب همبستگی و ضریب نش سائکلیف هرچه به یک نزدیکتر باشد و میانگین مطلق خطا هرچه به صفر نزدیکتر باشد، بیانگر آن است که مدل برآورد بهتری داشته است. نتایج آنالیز آماری انجام‌شده بر یافته‌های این پژوهش در جدول ۲ نشان داده شده است.

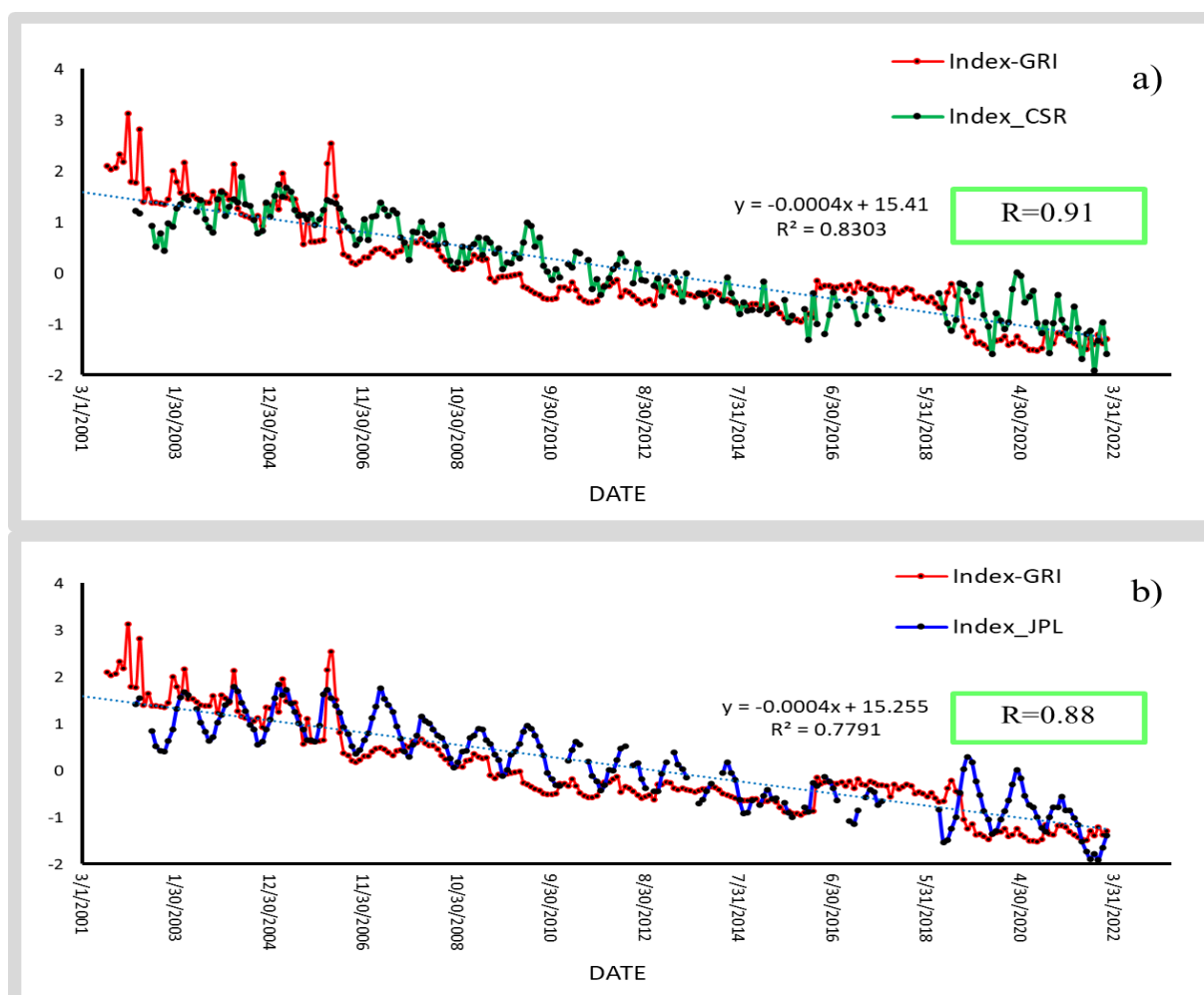


شکل ۷- سری زمانی ماهانه نوسانات سطح آب زیرزمینی ۲۰۰۲-۲۰۲۲؛ دو محصول JPL, CSR ماهواره *GRACE*
 الف) CSR ب) JPL ج) JPL, CSR

جدول ۲- نتایج تحلیل آماری

ضریب تعیین (R^2)	ضریب همبستگی (R)	ضریب نش ساتکلیف (NSE)	میانگین مطلق خطا (MAE)
۰/۸۳	۰/۹۱	۰/۶۹	۰/۱۸
۰/۷۷	۰/۸۸	۰/۷۲	۰/۱۸
CSR- GRI			
JPL- GRI			

ضریب همبستگی و تعیین محصول CSR به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۹۱ می باشد، که نشان دهنده دقت خیلی بالای مدل است. ضریب نش ساتکلیف محصول JPL برابر با ۰/۷۲ یعنی کارایی مدل بالا می باشد. با توجه به نتایج جدول ۲، هر چهار شاخص مقادیر خیلی خوبی نشان دادند که بیانگر دقت بالای داده های ماهواره GRACE می باشد. در نتیجه داده های ماهواره GRACE محصول CSR و محصول JPL به خوبی نمایانگر داده های زمینی یعنی داده های چاه های آب زیرزمینی می باشد.



شکل ۸- صحت سنجی داده های ماهواره GRACE با داده های چاه های مشاهده ای آب زیرزمینی (شاخص GRI)
الف) محصول CSR ب) محصول JPL

بحث و نتیجه گیری

در سال های اخیر، افزایش بهره برداری از آب های زیرزمینی، منجر به افت شدید تراز سطح آب زیرزمینی و کسری مخزن در اکثر آبخوان های کشور شده است؛ در این راستا و در گام اول مدیریت آب های زیرزمینی، پایش نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان ها، از اولویت خاصی

برخوردار است.

دشت قزوین به دلیل وابستگی شدید به آب‌های زیرزمینی در کشاورزی، شرب و صنعت و پراکنش مناسب چاه‌های مشاهده‌ای، در این پژوهش انتخاب شد. در این پژوهش، از داده‌های ماهواره GRACE و داده‌های چاه مشاهده‌ای برای پایش نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت قزوین استفاده گردید و در جهت راستی آزمائی مقادیر آنها، با هم مقایسه گردید. به منظور دقت بیشتر در این مطالعه از دو الگوریتم *JPL*، *CSR*، *GRACE* استفاده شده است و همچنین به دلیل اطمینان بالاتر به نتایج، یک دوره‌ی بلند مدت ۲۰ ساله انتخاب گردید. روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت قزوین با استفاده از داده‌های دو الگوریتم *CSR*، *JPL*، ماهواره *GRACE* و همچنین با استفاده از شاخص منبع آب زیرزمینی (*GRI*) به تفکیک ماهانه در بازه زمانی ۲۰۰۲-۲۰۲۲ نشان می‌دهد که داده‌های ماهواره *GRACE* و داده‌های چاه مشاهده‌ای (شاخص *GRI*) هر دو از یک روند کاهشی پیروی می‌کنند. نتایج داده‌های ماهواره *GRACE* و داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای آب زیرزمینی (شاخص *GRI*) دشت قزوین با یکدیگر صحت‌سنجی گردید. به منظور صحت‌سنجی از شاخص‌های آماری ضریب تعیین، ضریب همبستگی، میانگین مطلق خطا و ضریب نش ساتکلیف استفاده گردید. هر چهار شاخص مقادیر خیلی خوبی نشان دادند؛ با توجه به نتایج ضریب همبستگی مدل *CSR* و *JPL* با داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای دشت قزوین (شاخص *GRI*) به ترتیب برابر با ۰/۹۱، ۰/۸۸ بدست آمد، که مدل *CSR* مناسب‌ترین مدل برای پایش نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت قزوین است. ضریب نش ساتکلیف محصول *JPL* برابر با ۰/۷۲ که بیانگر دقت بالای داده‌های ماهواره *GRACE* می‌باشد.

جهت مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش، *Moiwo, et al. (2012)* با استفاده از ماهواره *GRACE* تغییرات ماهانه و سالانه‌ی ذخیره آب زیرزمینی را در منطقه‌ی شمال چین طی دوره ۷ ساله ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ محاسبه کردند. نتایج مقایسه‌ی این دو سری داده ضریب تعیین ۰/۶۵ در مقیاس ماهانه و ضریب تعیین ۰/۸ در تغییرات سالانه را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این پژوهش در مقایسه با نتیجه پژوهش *Moiwo, et al. (2012)* همبستگی بالاتر و مطلوب‌تری را ارائه می‌دهد. بررسی روند نوسانات آب زیرزمینی نشان داد که داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای و دو الگوریتم *JPL*، *CSR*، ماهواره *GRACE*، دارای یک روند کاهشی معنی داری است که در راستای نتایج *Yang, et al. (2024)* می‌باشد.

براساس نتایج این تحقیق می‌توان بیان کرد که داده‌های ماهواره *GRACE* به خوبی نمایانگر داده‌های زمینی یعنی داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای آب زیرزمینی می‌باشد که گویای صحت و دقت بالای تصاویر ماهواره *GRACE* در بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌باشد. براساس قابلیت مناسب داده‌های ماهواره *GRACE* برای برآورد سریع، دسترسی به داده‌های زمان واقعی، صرفه جویی در هزینه و نیروی انسانی در پایش نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌توان از این تکنیک در مدیریت آب‌های زیرزمینی و پیش‌بینی تراز آبخوان‌های کشور استفاده نمود.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

- حافظ پرست؛ مریم. (۱۴۰۰). پایش تغییرات سطح آب‌زیرزمینی آبخوان میانراهان با داده‌های ماهواره *GRACE*. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۵(۲)، ۴۲۸-۴۴۳.
- نبوی؛ سید نوید، علیزاده؛ امین و فرید حسینی؛ علیرضا. (۱۳۹۹). ارزیابی منابع آب زیر زمینی با استفاده از داده‌های ثقل سنجی ماهواره ای *GRACE* (مطالعه موردی: خراسان رضوی) *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۴(۳) ۸۵۵-۸۶۶.

REFERENCES

- Castellazzi, P., Longuevergne, L., Martel, R., Rivera, A., Brouard, C., & Chaussard, E. (2018). Quantitative mapping of groundwater depletion at the water management scale using a combined GRACE/InSAR approach. *Remote Sensing of Environment*, 205, 408-418.
- Chen, Y., Li, W., Xu, C., Ye, Z., & Chen, Y. (2015). Desert riparian vegetation and groundwater in the lower reaches of the Tarim River basin. *Environmental Earth Sciences*, 73, 547-558.
- Famiglietti, J. S., Lo, M., Ho, S. L., Bethune, J., Anderson, K. J., Syed, T. H., ... & Rodell, M. (2011). Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. *Geophysical Research Letters*, 38(3).
- Ferreira, V. G., Gong, Z., He, X., Zhang, Y., & Andam-Akorful, S. A. (2013). Estimating total discharge in the Yangtze River Basin using satellite-based observations. *Remote Sensing*, 5(7), 3415-3430.

- Forootan, E., Rietbroek, R., Kusche, J., Sharifi, M. A., Awange, J. L., Schmidt, M., ... & Famiglietti, J. (2014). Separation of large scale water storage patterns over Iran using GRACE, altimetry and hydrological data. *Remote Sensing of Environment*, 140, 580-595.
- Hafezparast, M. (2021). Monitoring groundwater level changes of Mianrahan aquifer with GRACE satellite data. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(2), 428-443. (In Persian).
- Javadi, S., Saatsaz, M., Shahdany, S. M. H., Neshat, A., Milan, S. G., & Akbari, S. (2021). A new hybrid framework of site selection for groundwater recharge. *Geoscience Frontiers*, 12(4), 101144.
- Joodaki G. (2014) Earth Mass Change Tracking Using GRACE Satellite Gravity Data. Norwegian University of Science and Technology.
- Khorrami, B., & Gunduz, O. (2021). Evaluation of the temporal variations of groundwater storage and its interactions with climatic variables using GRACE data and hydrological models: A study from Turkey. *Hydrological Processes*, 35(3), e14076.
- Leblanc, M. J., Tregoning, P., Ramillien, G., Tweed, S. O., & Fakes, A. (2009). Basin-scale, integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia. *Water resources research*, 45(4).
- Longuevergne, L., Scanlon, B. R., & Wilson, C. R. (2010). GRACE Hydrological estimates for small basins: Evaluating processing approaches on the High Plains Aquifer, USA. *Water Resources Research*, 46(11).
- Mendicino, G., Senatore, A., & Versace, P. (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 282-302.
- Moiwo, J. P., Tao, F., & Lu, W. (2013). Analysis of satellite-based and in situ hydro-climatic data depicts water storage depletion in North China Region. *Hydrological Processes*, 27(7), 1011-1020.
- 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 Persian).
- Nasa Jet Propulsion Laboratory California Institute OF Technology,(2024), <https://grace.jpl.nasa.gov>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Rafik, A., Brahim, Y. A., Amazirh, A., Ouarani, M., Bargam, B., Ouatiki, H., ... & Chehbouni, A. (2023). Groundwater level forecasting in a data-scarce region through remote sensing data downscaling, hydrological modeling, and machine learning: A case study from Morocco. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50, 101569.
- Ramillien, G., Famiglietti, J. S., & Wahr, J. (2008). Detection of continental hydrology and glaciology signals from GRACE: a review. *Surveys in geophysics*, 29, 361-374.
- Rateb, A., Scanlon, B. R., Pool, D. R., Sun, A., Zhang, Z., Chen, J., ... & Zell, W. (2020). Comparison of groundwater storage changes from GRACE satellites with monitoring and modeling of major US aquifers. *Water Resources Research*, 56(12), e2020WR027556.
- Regional Water Company of Qazvin,(2024), www.qzrw.ir
- Rodell, M., & Famiglietti, J. S. (2002). The potential for satellite-based monitoring of groundwater storage changes using GRACE: the High Plains aquifer, Central US. *Journal of Hydrology*, 263(1-4), 245-256.
- Voss, K. A., Famiglietti, J. S., Lo, M., De Linage, C., Rodell, M., & Swenson, S. C. (2013). Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region. *Water resources research*, 49(2), 904-914.
- Yang, J., Pan, Y., Zhang, C., Gong, H., Xu, L., Huang, Z., & Lu, S. (2024). Comparison of groundwater storage changes over losing and gaining aquifers of China using GRACE satellites, modeling and in-situ observations. *Science of The Total Environment*, 173514.
- Yeh, P. J. F., Swenson, S. C., Famiglietti, J. S., & Rodell, M. (2006). Remote sensing of groundwater storage changes in Illinois using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resources Research*, 42(12).