

Estimation of the levels of Groundwater Aquifers under the Influence of Land-Use Changes by Using GRACE Satellite Data

Sayyad asghari saraskanroud ¹ *, shiva safari ² , elham Mollanouri ³

1- Associate Professor, Department of Natural Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

(*Corresponding Author Email: S.Asghari@uma.ac.ir)

2- MA, Student, Department of Natural Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

3- MA, Student, Department of Natural Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

1. Introduction

Groundwater plays a vital role in water resources, ecosystems, and human life. The role of groundwater is more prominent especially in areas where it is the main source of people's needs including drinking and agriculture water. Annually, about 982 billion cubic meters of groundwater is extracted worldwide and 70% of it is used for agriculture. The land use is one of the most important events through which humans cause changes to the environment. One of the most important natural resources that are severely damaged by land-use changes is water resources and groundwater. Therefore, it is necessary to study the land use and its effects on the environment, especially groundwater, along with other issues, such as precipitation fluctuations. Today, due to the high cost of constructing piezometric wells for studying groundwater aquifers to become aware of the process of its changes, such studies are done through remote sensing technology. GRACE gravimetric satellite is a revolution in surveying and estimating groundwater aquifers.

2. Methodology

The northwest of the country with an area of about 126420 km² includes Ardabil, East Azerbaijan, West Azerbaijan, and Zanjan provinces. Khiavchai Basin located to the right of Ardabil is one of the sub-tributaries of Qarahu River. The geographical coordinates of the study area located in the eastern side of Meshkinshahr are within the east longitude of 47° 38' 12" and 47° 48' 1" as well as the north latitude of 38° 12' 9" and 38° 24' 16". In the present study, the 3 products of GRACE satellite (CSR, GFZ, and JPL) were employed to extract fluctuations of the mentioned groundwater level by using Google Earth Engine (GEE) in the period of 2002-2016. Land-use classification of Xiao Region was done after examining the status of the northwestern aquifers and obtaining information from 8 piezometric wells in Xiao Region, along with the precipitation information obtained through TRMM satellite. The verification of this data was done by using the piezometric information of the station. To do this, 8 images of LandsatTM sensors and Landsat satellite related to the years of 2016 and 2002 were taken, respectively. The land-use maps were drawn according to different land uses in the region in the 7 classes of irrigated agriculture, rainfed agriculture, rangeland, residential areas, gardens, snow-

covered lands, and irrigated lands. In eCognition software, they were extracted by using the object-oriented technique and their overall accuracy coefficient and kappa coefficient were obtained.

3. Results and Discussion

Similar independent results from the 3 GRACE satellite products showed that the groundwater changes in the northwestern region of the country had a downward trend and decreased by approximately 32 cm from 2002 to 2016. According to the studies on the land-use maps and information zoning of piezometric wells in Xiao Region, a decreasing trend of the aquifers in Khiao Region was observed. The loss of rangeland use and the increase in construction and residential areas and agriculture lands were the causes of lack of permeability and surface pressures of the groundwater aquifers and the ultimate reduction of their levels. Therefore, according to the research results, the land-use change was an important factor in reducing the levels of the aquifers in the region. It is noteworthy that the precipitation phenomenon, although insignificant from 2002 to 2016, showed a decrease of 51 mm through TRMM satellite data and a 25-mm decrease in the precipitation of the region by using the piezometric station data, which could not be ineffective in lowering the groundwater aquifers.

4. Conclusion

Due to the importance of groundwater aquifers, their statuses were studied in the northwest of the country by using the data obtained from the 3 GRACE gravimeter satellite products of CSR, GFZ, and JPL in the GEE environment, which indicated a 32-cm drop in the groundwater aquifers in the basin. The results of the land-use changes and groundwater level in Khiavchai Basin in Meshkinshahr showed that the uses of rangeland and residential and barren lands had generally decreased and increased in a period of 14 years (2002-2016), respectively. The decrease of groundwater level caused by the mentioned uses had been intensified by these changes. In general, it could be concluded that there was a correlation between land use and groundwater level change in the study area. Also, the study of precipitation phenomenon by using TRMM satellite data and the synoptic station data demonstrated a decrease in precipitation, which could not be ignored in the intensification of the groundwater levels. Other results of this research included the capability of the GEE processing system in providing users with valuable information without the need for heavy processing operations.

Keywords: groundwater, GRACE satellite, Google Earth Engine (GEE) system, land use

References:

- Bruinsma, S., Forbes, J.M., (2010). Anomalous behavior of the thermosphere during solar minimum observed by CHAMP and GRACE, *Journal of Geophysical Research*, Vol 115, 1-8.
- Castellazzi, B., Martel, R., Galloway, D.L., Longuevergne, L., and Rivera, A., (2016). Assessing Groundwater Depletion and Dynamics Using GRACE and InSAR: Potential and Limitations, *Journal Ground water*, <https://doi.org/10.1111/gwat.12453>.

- Celemens, M., Khurelbaatar, G., Merz, R., Siebert, C., Afferden, M., and Rodiger, T., (2020). Groundwater protection under water scarcity; from regional risk assessment to local wastewater treatment solutions in Jordan, *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136066>.
- Famiglietti, J. S., M. Lo, S. L. Ho, J. Bethune, K. J. Anderson, T. H. Syed, S. C. Swenson, C. R. de Linage, and M. Rodell. (2011). Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 38. 1-4.
- Garg, K., K. H. Anantha, R. Nune, V. R. Akuraju, P. Singh, M. K. Gumma, S. Dixit, and R. Ragab. (2020). Impact of land use changes and management practices on groundwater resources in Kolar district, Southern India. *Journal of Hydrology: Regional Studies*.31, 1-21.
- Gleeson, T., K.M. Befus, S. Jasechko, E. Luijendijk and M.B. Cardendas. (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nat. Geosci.* 9 (2), 161–167.
- Huang, J., J. Halpenny, W. van der Wal, C. Klatt, T. S. James, and A. Rivera. (2012). Detectability of groundwater storage change within the Great Lakes Water Basin using GRACE. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 117, 1-26.
- Koelling, J., U. Send and M. Lankhorst. (2020). Decadal Strengthening of Interior Flow of North Atlantic DeepWater Observed by GRACE Satellites 10.1029,1-18.
- Kummerow, C. B. Wiliam, K. Toshiaki, S. James and S. Joanne. (1998). The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, VOLUME 15. 809-817.
- Longuevergne, L., B. R. Scanlon, and C. R. Wilson. (2010) GRACE Hydrological estimates for small basins: Evaluating processing approaches on the High Plains Aquifer USA. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 46, 1-15.
- Narany, T.S., A. Zaharin, A. Sefie and S.Keesstra. (2017). Detecting and predicting the impact of land use changes on groundwater quality, a case study in Northern Kelantan, Malaysia. *journal Science of the Total Environment*.599–600,844–853.
- Rodell, M., I. Velicogna, J. (2009). Famiglietti Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Journal Nature*, vol 460, 999-1003.
- Suciu, N., C. Farolfi, R. Marsala, E. Russo, M. Cremab, E. Peroncini, F. Tomei, G. Antolini, M. Marcaccio, V. b. Marletto, R. Colla, A. d. Gallo and E. Capri. (2020). Evaluation of groundwater contamination sources by plant protection products in hilly vineyards of Northern Italy. *journal Science of the Total Environment* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141495>.
- Save, H., S. Bettadpur, and B. D. Tapley. (2012). Reducing errors in the GRACE gravity solutions using regularization, *Journal of Geodesy* volume 86, 695–711.
- Tapley, B.D., S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*31: L09607. DOI:10.1029/2004GL019920
- Tourian, M.; O. Elmi, Q. Chen, B. Devaraju, Sh. Roohi, and N. Sneeuw. (2015) A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sensing of Environment* 156, 349–360.

- Yang, W., Zhao, Y., Wang, D., Wu, H., Lin, A., & He, L. (2020). Using principal components analysis and idw interpolation to determine spatial and temporal changes of Surfacewater quality of Xin'Anjiang river in huangshan, china. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082942>.
- Yin, W., SH. Chan, W. Zheng, I. y. Yeo, L. hu, N. Tandamrongsurb and Kh. Ghobadi. (2020). Improved water storage estimates within the North China Plain by assimilating GRACE data into the CABLE model. *Journal of Hydrology*, 0022-1694.
- Vishwakarma, B., B. Devaraju, and N. Sneeuw. (2018). What Is the Spatial Resolution of GRACE Satellite Products for Hydrology? *Remote Sensing*. 10, 852, 1-17.
- Wang. S., H. Liu, Y. Yu, W. Zhao, Q. Yang, and J. Liu. (2019). Evaluation of groundwater sustainability in the arid Hexi Corridor of Northwestern China, using GRACE, GLDAS and measured groundwater data products. *journal Science of the Total Environment* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135829>.





تخمین سطح سفره‌های آب زیرزمینی متأثر از تغییرات کاربری اراضی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE

صیاد اصغری سراسکانرود*، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
S.Asghari@uma.ac.ir
شیوا صفری، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
Safari.shiva@gmail.com
الهام ملانوری، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
e.mollanuri@gmail.com

چکیده

آب‌های زیرزمینی، منبع اصلی آب شیرین در بسیاری از نقاط جهان است. در مطالعه حاضر پس از بررسی سطح آب‌های زیرزمینی شمال غرب کشور با استفاده از ماهواره ثقل سنج GRACE، وضعیت این آب‌ها در منطقه خیابو با استفاده از داده‌های ایستگاههای پیژومتری و داده‌های بارشی اخذشده از ماهواره اینترنتی TRMM و همچنین داده‌های GRACE اخذشده در رابطه با شمال غرب کشور بررسی شد. در ادامه برای بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر نوسانات آب‌های زیرزمینی، با استفاده از تصاویر سنجنده OLI لندست ۸ مربوط به سال ۱۳۹۵ و سنجنده TM لندست ۵ مربوط به سال ۱۳۸۱، نقشه کاربری اراضی مربوط به حوضه خیابو استخراج شد. نتایج GRACE روند نزولی و کاهش ۳۳ سانتی‌متری سطح آب‌های زیرزمینی شمال غرب کشور را در بازه زمانی ۱۴ ساله نشان داد. بررسی تغییرات کاربری اراضی خیابو نیز روند نزولی سطح سفره‌ها به‌ویژه در کاربری مسکونی را به دلیل کاهش چشمگیر نفوذپذیری و برداشت‌های بیش از حد از آب‌های زیرزمینی نشان داد. از پژوهش حاضر چنین استنباط می‌شود که تغییر سطح سفره‌های آب زیرزمینی متأثر از کاربری اراضی است. در کنار تغییرات کاربری با توجه به اطلاعات بارشی به‌دست آمده و صحت‌سنجی این اطلاعات با استفاده از داده ایستگاه سینوپتیک، نوسانات بارشی نیز بی‌تأثیر نبوده و بر کاهش سطح سفره‌ها تأثیرگذار است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، وضعیت سفره‌ها با استفاده از داده‌های GRACE و تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن بر سطح سفره‌های آب زیرزمینی در مناطق مختلف به‌ویژه مناطق خشک بررسی شود.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، ماهواره GRACE، سامانه Google earth engine، کاربری اراضی



مقدمه

آب‌های زیرزمینی نقشی حیاتی در منابع آبی و اکوسیستم و زندگی بشر دارند (Suciu et al., 2020: 2). سالانه در سطح جهانی حدود ۹۸۲ میلیارد مترمکعب آب زیرزمینی برداشت و ۷۰ درصد آن برای کشاورزی استفاده می‌شود (Gleeson et al., 2016: 1). در سطح جهانی، دسترسی به آب شیرین همراه با افزایش فشار جمعیت، تغییر کاربری زمین، رشد صنعتی و شهرنشینی کاهش می‌یابد (Garg et al. 2020: 1). افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی مشکلاتی نظیر خشکسالی، کاهش کیفیت آب، افزایش هزینه پمپاژ و استحصال آب را به دنبال دارد. علاوه بر مشکلات گفته‌شده، خطر فرونشست که حرکت قائم یا نشست تدریجی یا فرورفتن ناگهانی سطح زمین است، بسیاری از دشت‌های ایران را تهدید می‌کند (تورانی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۱۷؛ اصغری و همکاران، ۱۳۹۹: ۲). در این میان کاربری اراضی، یکی از مهم‌ترین رویدادهایی است که به سبب آن انسان موجب تغییرات محیط‌زیست می‌شود و یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی که با تغییر کاربری اراضی به شدت آسیب می‌بیند، منابع آبی و آب‌های زیرزمینی است (رفیع شریف‌آباد و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۹۰).

امروزه با توجه به هزینه زیاد احداث چاه‌های پیرومتری، آگاهی از روند تغییرات سطح سفره‌های آب زیرزمینی از طریق تکنولوژی سنجش از دور انجام می‌شود. ماهواره‌های ثقل‌سنجی، انقلابی در زمینه بررسی و تخمین جریان‌های زیرزمینی محسوب می‌شود (فتح‌الله‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵: ۲). در این راستا داده‌های ماهواره GRACE^۱ با به‌کارگیری دو ماهواره مشابه و مجزا، ابزاری قدرتمند و با ارزش برای نظارت بر تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از دستیابی به تغییرات میدان ثقل زمین و به‌دنبال آن تغییر فاصله بین ماهواره‌ها محسوب می‌شود که در اثر تغییر سطح آب‌ها ایجاد می‌شود (اشرف‌زاده افشار و همکاران، ۱۳۹۴: ۷۵). درحقیقت سرعت این دو ماهواره با تغییر جاذبه زمین افزایش یا کاهش می‌یابد (Koelling et al., 2020:1).

در مطالعه‌ای دل‌آرام و همکاران (۱۳۸۶) توانایی داده‌های ماهواره GRACE را در تعیین سطح آب‌های زیرزمینی ایران بررسی کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد مقایسه اولیه داده‌های GRACE و اندازه‌گیری چاه‌های پیرومتری در ایران بیانگر پتانسیل زیاد داده‌های یادشده در تعیین تغییرات فصلی آب‌های زیرزمینی است.

رفیع شریف‌آباد و همکاران (۱۳۹۵) مطالعه‌ای درباره تأثیر روند تغییرات کاربری اراضی بر کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان انجام دادند. در این مطالعه برای رسیدن به اهداف پژوهش از داده‌های آب‌های زیرزمینی و همچنین تصاویر ماهواره‌ای لندست استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد بخش‌های جنوب منطقه بهترین کیفیت آب را برای مصارف کشاورزی دارند و با گذشت زمان از کیفیت آب کاسته و میزان آلودگی در قسمت شمالی و شرقی بیشتر شده است.

در مطالعه‌ای دیگر فرجی و همکاران (۱۳۹۶) داده‌های ماهواره GRACE را در برآورد تغییرات سطح آب

زیرزمینی در استان قزوین ارزیابی کردند. این پژوهشگران برای بررسی روند تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی به‌دست‌آمده از ماهواره GRACE از داده‌های بارش و رواناب‌های سطحی و زیرسطحی، رطوبت خاک تا عمق ۲۰۰ سانتی‌متر و آب معادل برف از مدل GLDAS^۱ استفاده کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد ماهواره GRACE، روند تغییرات ذخیره آب را بهتر از مدل GLDAS نشان داده است.

انتظاری و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه‌ای تغییرات آب‌های زیرزمینی را با استفاده از ماهواره GRACE بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد با استفاده از ماهواره GRACE می‌توان تغییرات آب‌های زیرزمینی را به‌خوبی برآورد کرد.

اقبالیان و بهمنی (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای با عنوان «بررسی تغییرات مکانی و زمانی معیارهای کیفی آب زیرزمینی دشت همدان» برای رسیدن به اهداف پژوهش، داده‌های کیفی آب زیرزمینی دشت همدان- بهار را در یک بازه زمانی ۱۰ ساله استخراج کردند و برای پهنه‌بندی تغییرات مکانی و زمانی معیارهای کیفی از روش‌های زمین‌آمار از جمله کریجینگ معمولی و روش میان‌یابی معکوس فاصله (IDW)^۲ با نرم‌افزار ARCGIS9.3 استفاده کردند. نتایج این پژوهش عملکرد متفاوت روش‌های مختلف آماری را برای متغیرهای مختلف نشان داد؛ برای نمونه بهترین روش پهنه‌بندی برای متغیر شوری (EC) روش عکس فاصله IDW، برای متغیر باقی‌مانده خشک (TDS) تابع شعاعی (RBF)، برای متغیر بی‌کربنات (HCO₃) روش کریجینگ از روش‌های زمین‌آمار و سپس روش تخمین‌گر موضعی از روش‌های معین و... معرفی شده است.

خسروی و همکاران (۱۳۹۹) مطالعاتی درباره بررسی تغییرات پهنه‌های آبی با استفاده از شاخص‌های آبی و Google earth engine انجام داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد شاخص‌های آبی نظیر AWE_{nsh}^۳ و AWE_{sh} و سامانه Google earth engine، ابزاری مفید برای شناسایی روند افزایشی و کاهش سطح آب تالاب‌ها هستند.

غفاری و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی اثر تغییر کاربری اراضی را بر سطح آب زیرزمینی در دشت‌های اصفهان- برخوار، نجف‌آباد و چادگان بررسی کردند. نتایج حاصل از این پژوهش افت سطح آب‌های زیرزمینی را در دشت‌های مطالعه‌شده متأثر از تغییر کاربری اراضی نشان داد.

صفاییان و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی تأثیر افزایش غلظت گاز دی‌اکسیدکربن را بر ذخیره کل آب ایران بررسی کردند. در این پژوهش برای رسیدن به اهداف پژوهش از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و ماهواره مشاهده‌کننده گازهای گلخانه‌ای (GOSAT)^۴ استفاده شد. نتایج این پژوهش همبستگی کانونی رابطه‌ای بین گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن را با تغییرات ذخیره کل آب نشان داد.

جمالی‌زاده و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای با عنوان «پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از

1. Global Land Data Assimilation System
2. Inverse Distance Weighting
3. Automated Water Extraction Index no shadow
4. Greenhouse Gases observing satellite

مدل‌های سری زمانی و GMS^۱ به اهمیت آب‌های زیرزمینی اشاره و نوسانات سطح سفره‌ها را در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۵ در دشت رفسنجان بررسی کردند. آنها به کاهش چشمگیر سطح آب‌ها در پایان دوره آماری پی بردند. این پژوهشگران براساس نتایج خود تا سال ۱۴۰۲، افت سالانه یک متری سطح سفره‌های زیرزمینی را پیش‌بینی کردند. در مطالعه‌ای نارانی و همکاران^۲ (2017) تأثیر تغییرات کاربری اراضی را بر کیفیت آب‌های زیرزمینی در منطقه‌ای در مالزی ارزیابی و غلظت نیترات را شاخص مناسبی برای بررسی این مسئله بیان کردند. آنها دلیل اصلی تغییرات اکوسیستم را تبدیل جنگل‌ها و زمین‌های چمن به زمین زراعی و شهر دانستند.

وَنگ و همکاران^۳ (2019) در مطالعه‌ای پایداری آب‌های زیرزمینی را در منطقه‌ای خشک در شمال شرقی چین با استفاده از داده‌های GRACE ارزیابی کردند. آنها به برداشت آب‌های زیرزمینی در چند دهه اخیر به‌ویژه در مناطق خشک به دلیل کمبود آب‌های سطحی و افزایش آبادی و شهرنشینی اشاره و کمترین میزان پایداری آب را در بخش مرکزی و شرقی منطقه شناسایی کردند.

در پژوهشی یِن و همکاران^۴ (2020) ذخایر آبی را در منطقه شمالی چین با استفاده از شبیه‌سازی داده GRACE به مدل CABLEE^۵ اندازه‌گیری کردند. آنها این منطقه را یک قطب مهم تولیدی محصولات کشاورزی معرفی و به کاهش شدید منابع آبی زیرزمینی به دلیل اقلیم خشک و فعالیت‌های فشرده انسانی در این منطقه اشاره کردند. آنها در این مطالعه داده‌های GRACE را در شناسایی ذخایر آب‌های زیرزمینی مؤثر دانستند.

سوسی و همکاران^۶ (2020) در مطالعه‌ای آب‌های زیرزمینی را در منطقه‌ای در ایتالیا بررسی کردند. این پژوهشگران فعالیت کشاورزی و محصولات محافظت‌کننده گیاهان را از عوامل مهم آلودگی آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در مناطقی شیب‌دار عنوان کردند.

گارگ و همکاران^۷ (2020) در مطالعه‌ای رابطه بین تغییرات کاربری اراضی و آب‌های زیرزمینی را در منطقه‌ای در شمال هند بین سال‌های ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۱ بررسی کردند. آنها به وجود ناهماهنگی بین استفاده و تأمین منابع آب زیرزمینی پی برده و دلیل خالی شدن آب‌های زیرزمینی و کاهش ۳۳ درصدی آن را تغییرات کاربری اراضی از زمین‌های چمن به کاشت اکالیپتوس و برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی بیان کردند.

نتایج حاصل از پژوهش پژوهشگران درباره روند تغییرات سطح سفره‌های آب زیرزمینی و افزایش برداشت از سطح این سفره‌ها نشان‌دهنده اهمیت مطالعه در این زمینه بوده و استفاده از ابزارهای جدید مانند ماهواره ثقل‌سنج GRACE در این زمینه بسیار حائز اهمیت است. با توجه به روند کاهشی سطح آب‌های زیرزمینی شمال غرب کشور

1. Ground Water Modeling System
2. Narany
3. Wang
4. Yin
5. Community Atmosphere-Biosphere Land Exchange
6. Suci et al.
7. Garg et al.

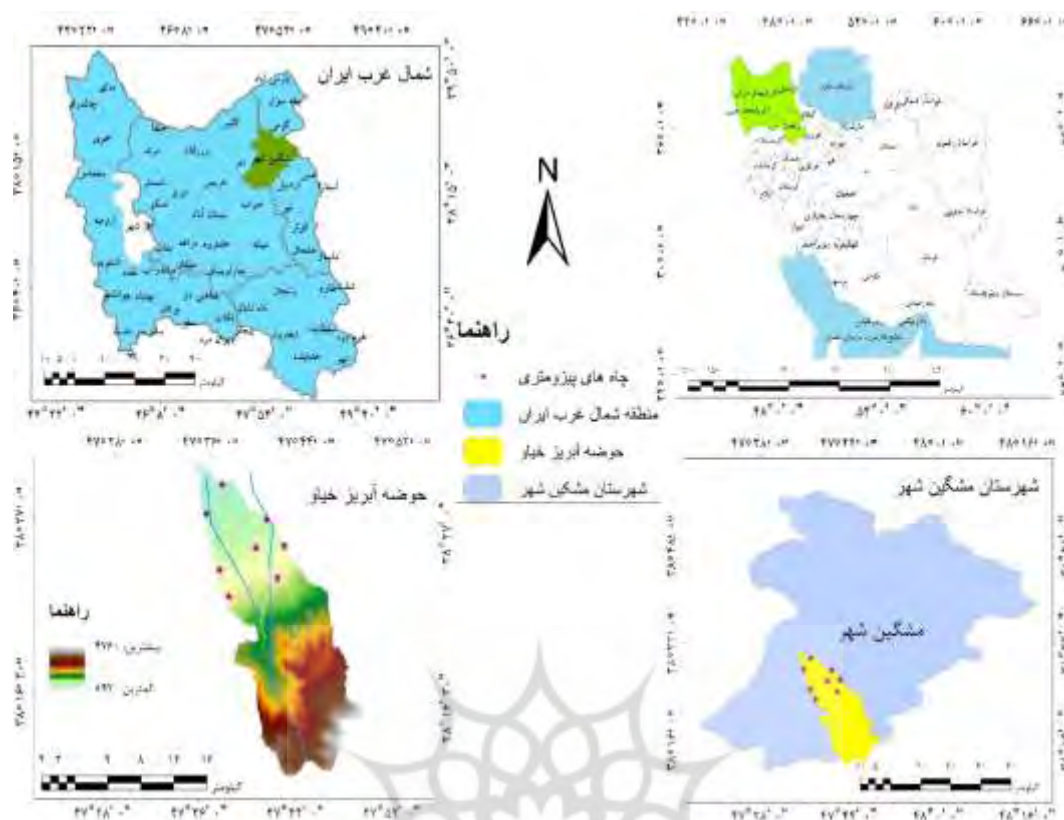
و مجاورت حوضه خیابو با منطقه کوهستانی سبلان به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین تأمین‌کننده‌های منابع آبی شمال غرب کشور و همچنین نتایج حاصل از پژوهش‌های صورت‌گرفته درباره رابطه تغییرات کاربری اراضی و افزایش میزان بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی و افت سطح ایستابی و تغییر کیفیت آب سفره‌ها، بررسی آب‌های زیرزمینی منطقه خیابو و تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر محیط‌زیست به‌ویژه آب‌های زیرزمینی در این منطقه ضروری است و می‌تواند آگاهی‌های لازم را در اختیار کارشناسان و برنامه‌ریزان برای شناخت، مدیریت و ارزیابی مناسب و پایدار منابع آبی قرار دهد؛ بنابراین هدف از این مطالعه، بررسی سطح سفره‌های آب زیرزمینی شمال غرب کشور در بازه زمانی ۱۴ ساله با استفاده از داده‌های ماهواره ثقل‌سنج GRACE در سامانه Google Earth engine است؛ همچنین بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی منطقه خیابو با به‌کارگیری اطلاعات چاههای پیژومتری و سنجنده GRACE و بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر تغییرات سطح این سفره‌ها، از دیگر اهداف این مطالعه است. استخراج داده‌های سه مرکز اطلاعاتی ^۱CSR-^۲GFZ-^۳JPL به‌طور همزمان در سامانه Google earth engine در مدت‌زمانی کوتاه را می‌توان نوآوری پژوهش حاضر دانست.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه پژوهش

شمال غرب کشور با مساحتی حدود ۱۲۶۴۲۰ کیلومتر مربع شامل استان‌های اردبیل، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و زنجان است که حدود ۷,۷ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است. متوسط ارتفاع این منطقه ۱۸۳۰ متر از سطح دریا و بلندترین ارتفاع منطقه بیش از ۴۵۰۰ متر بالاتر از سطح دریاست (عساکره و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۵۰). حوضه خیابو چای واقع در استان اردبیل و از زیرشاخه‌های رودخانه قره‌سوست و از نظر مختصات جغرافیایی در ضلع شرقی مشکین شهر از توابع استان اردبیل در موقعیت جغرافیایی به مختصات ۴۷ درجه و ۳۸ دقیقه و ۱۲ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۴۸ دقیقه و ۱ ثانیه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱۲ دقیقه و ۹ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۲۴ دقیقه و ۱۶ ثانیه عرض شمالی قرار دارد. ارتفاع این حوضه از سطح دریا ۲۳۳۸ متر است که از جنوب به شمال کاهش می‌یابد. رودخانه اصلی این حوضه «خیابو چای» نام دارد که از ارتفاعات سبلان سرچشمه می‌گیرد و سرتاسر دره موئیل را طی می‌کند و به رودخانه قره‌سو از زیرحوضه‌های رودخانه ارس می‌ریزد (قنواتی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۲۴). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده و همچنین موقعیت چاههای پیژومتری را نشان می‌دهد.

1. Center for space research
2. Geo Forschungs Zentrum Potsdam
3. Jet Propulsion Laboratory



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده و چاههای پیزومتر

Figure 1. Geographical location of the study area and piezometric wells

داده‌های ماهواره‌ای

در پژوهش حاضر از داده‌های ماهواره‌ی ثقل سنج GRACE با استفاده از سامانه Google Earth Engine برای استخراج نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه شمال غرب کشور در بازه زمانی ۱۳۸۱-۱۳۹۵ استفاده شده است. سامانه پردازشی تحت وب Google Earth Engine بستری مناسب را برای تجزیه و تحلیل علمی و دسترسی به داده‌های مکانی و بارگذاری داده‌های رستری با فرمت TIF و وکتوری با فرمت SHP فراهم می‌کند و ابزاری قدرتمند در مباحث سنجش از دور است (<https://earthengine.google.com>). با مشاهده روند نزولی سطح سفره‌ها در منطقه شمال غرب با انتخاب منطقه خیابو و اخذ اطلاعات از چاههای پیزومتر این منطقه و اطلاعات سنجنده GRACE، تصاویر ماهواره‌ای سنجنده OLI^۱ لندست ۸ سال ۱۳۹۵ و سنجنده TM^۲ لندست ۵ مربوط به سال ۱۳۸۱، برای استخراج نقشه‌های کاربری اراضی منطقه خیابو دانلود و اخذ شد. تصاویر اخذشده پس از حصول اطمینان از نبود خطاهای رایج عمل تصحیح اتمسفری با استفاده از مدل FLAASH در نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام و قسمتی از تصویر براساس منطقه مورد مطالعه برش داده شد تا برای طبقه‌بندی آماده شود. جدول ۱ مشخصات تصاویر اخذشده را نشان می‌دهد.

1. Operational Land Imager

2 Thematic Mapper

جدول ۱. اطلاعات تصاویر ماهواره لندست ۵ و ۸

Table 1. Landsat 5 and 8 satellite image information

نوع ماهواره	نوع سنجنده	مسیر	گذر	تاریخ
لندست ۵	TM	۱۶۷	۳۳	۲۰۰۲/۸/۶
لندست ۸	OLI	۱۶۷	۳۳	۲۰۱۶/۸/۱۲

ماهواره GRACE

ماهواره ثقل سنج گریس فرصت مناسبی را برای پایش ذخایر آب‌های زیرزمینی^(۱) (GWS) در مقیاس بزرگ فراهم کرده و دیدگاه جدیدی در هیدرولوژی ارائه داده است (Tapley et al., 2004: 121). این سنجنده فقط ماهواره سنجش از دوری است که از امواج الکترومغناطیسی استفاده نمی‌کند، بلکه با تغییرات میدان گرانشی زمین، تغییرات سفره زیرزمینی یعنی بالآمدگی یا پایین‌رفتگی را به صورت نسبی تخمین می‌زند و خلاصه اطلاعات را از طریق سه محصول JPL، GFZ، CSR ارائه می‌دهد. گرانش دو مزیت اساسی دارد؛ اول اینکه اتصال بین جاذبه و جرم، مستقیم و مستقل از لیتولوژی است و نیازی به کالیبراسیون ندارد و دوم اینکه ویژگی فاصله اجازه نفوذ و ثبت ذخایر جرمی سیستم‌های آب زیرزمینی را در اعماق زمین می‌دهد. در واقع GARCE امکان پایش تغییرات ذخایر آب‌های زیرزمینی سیستم‌های طبیعی و مهندسی را فراهم می‌کند (Rodell et al., 2009: 999; Famiglietti et al., 2011: 2; Huang et al., 2012: 4). سیستم GRACE شامل دو ماهواره در مسیری به ارتفاع تقریبی ۴۵۰ کیلومتر و فاصله ۲۰۰ کیلومتری از یکدیگر است. اندازه‌گیری فاصله بین ماهواره‌ها در سطح میکرومتر اجازه تشخیص ضخامت آب معادل^(۲) (WTE) تا یک سانتی‌متر را در منطقه‌ای در مقیاس ارتفاع سیستم، یعنی با قطر چند صد کیلومتر می‌دهد. داده‌های GRACE به چهار دسته داده تقسیم می‌شوند؛ سطح صفر که داده‌های خام دریافت شده از ماهواره است، سطح ۱-A که شامل طول کالیبره شده و تصحیح شده بین دو ماهواره و داده‌های GPS^(۳) است، ۱-B و سطح ۲ که شامل مدار دقیق ماهواره، تخمین‌هایی از ضرایب هارمونیک کروی میدان ثقل زمین و پروفیل‌های تأخیر و حالت انکسار اتمسفری است (فتح‌الله‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴: ۲). داده‌های سطح ۱ GRACE باید پردازش و به تغییرات جرم و تغییرات ذخایر آبی (داده‌های سطح ۳) برای استفاده در کاربردهای هیدرولوژی تبدیل شود. متداول‌ترین استراتژی‌های پردازشی، تبدیل سیگنال به ضرایب هارمونیک کروی است. سه مرکز GFZ، JPL و CSR به‌عنوان بخشی از سیستم زمینی GRACE داده‌های سطح ۲ شامل ضرایب هارمونیک کروی گرانش را تولید می‌کنند (<https://grace.jpl.nasa.gov/data/monthly-mass-grids/>). سهم آب زیرزمینی می‌تواند با کم کردن سایر عوامل از کل ذخایر آبی (ΔTWS) با GRACE اندازه‌گیری شود (Castellazzi et al., 2016: 2) (رابطه ۱).

$$\Delta GWS = \Delta TWS - (\Delta SMS + \Delta SMS + \Delta SIS) \quad (1)$$

ΔSMS : ذخایر آب‌های سطح، ΔSMS : ذخایر آبی موجود در بخش غیراشباع خاک، ΔSIS : ذخایر آب یخ و برف

1. Groundwater storage
2. water thickness equivalen
3. Global Positioning System

قدرت تفکیک ماهواره GRACE

گریس قدرت تفکیک گرانشی را ارائه می‌دهد و به جرم و تغییرات ذخایر در مقیاس بزرگ حساس است (Castellazzi et al., 2016: 2). پژوهشگران مختلف در مطالعاتی سعی کرده‌اند حداقل مساحت مناسب منطقه مطالعه‌شده را در ارتباط با داده‌های گریس مطرح کنند که به ابهاماتی منجر شده است (Vishwakarma et al., 2018: 2)؛ برای نمونه نویسندگانی از جمله لونگیوورنج و همکاران^۱ (2020) داده‌های حاصل از گریس را برای حوضه‌هایی با حداقل ۲۰۰ هزار کیلومتر مربع و با حساسیت ۱۰ میلی‌متر (برای مثال 2 km^3) مناسب دانسته‌اند و براساس مطالعات برخی نویسندگان از جمله بارینسام و همکاران^۲ (2010) و سیو و همکاران^۳ (2012) مقیاس‌های صدهزار کیلومتر مربع نیز با اعمال تغییراتی می‌تواند مناسب باشد؛ توراین و همکاران^۴ (2015) نیز به مساحت ۵۲ هزار کیلومتر مربعی حوضه دریاچه ارومیه اشاره کرده و این مقدار مساحت را برای مطالعات GRACE مناسب دانسته‌اند. با این حال در مطالعاتی نیز قابل بازیابی بودن اطلاعات برای مناطق کوچک مطرح شده است (Castellazzi et al., 2016: 4) به نقل از (Tourian et al., 2016 و Longuevergne et al., 2010).

در مطالعه حاضر از مجموعه داده‌های مربوط به خشکی (LAND) موجود در محصول ماهانه ماهواره GRACE (GRACE Monthly Mass Grids-Land) که اطلاعات گرانشی در ارتباط با تغییر سفره‌های آب زیرزمینی برحسب سانتی‌متر از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ در آن موجود است، در بازه زمانی ۱۳۸۱-۱۳۹۵ استفاده شده است. تغییرات ماهانه مشاهده‌شده در گرانش ناشی از تغییرات ماهانه جرم است که می‌تواند ناشی از تغییرات ذخیره آب در مخازن هیدرولوژیکی، جابه‌جایی توده یخ اقیانوس و... باشد. تغییرات جرم را می‌توان در یک لایه بسیار نازک از تغییرات ضخامت آب در نزدیکی سطح زمین فرض کرد که برحسب سانتی‌متر ضخامت آب معادل اندازه‌گیری می‌شود. البته در مواردی که تغییرات گرانشی ناشی از تغییرات خود زمین است، مانند زلزله‌های بزرگ، استفاده از واحد آب معادل درست نیست. پس از اجرای دستورات لازم در سامانه Google earth engine حدود ۱۵۵ تصویر در نتیجه اجرای پردازش گریس براساس محصولات مراکز تحقیقاتی JPL، GFZ، CSR، فراخوانی شدند. در ادامه با بررسی اطلاعات ۸ چاه پیرومتری منطقه خیاو مشکین شهر و مشاهده افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی با توجه به مشاهدات سنجنده GRACE در ارتباط با افت سطح سفره‌های شمال غرب کشور، این منطقه برای بررسی تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن بر میزان افت سطح سفره‌ها بررسی شد.

طبقه‌بندی با استفاده از تکنیک شی‌گرا

در مطالعه حاضر از تکنیک شی‌گرا برای استخراج طبقات کاربری اراضی در ۷ کلاس (کشاورزی آبی، کشاورزی

-
1. Longuevergne
 2. Bruinsma
 3. Save
 4. Tourian

دیمی، مرتع، مناطق مسکونی، باغ، پوشش برفی و پوشش آبی) در محیط نرم‌افزاری eCognition استفاده شده است. تکنیک شی‌گرا یکی از روش‌های رایج برای طبقه‌بندی تصاویر است که علاوه بر اطلاعات طیفی از پارامترهایی همچون بافت، شکل، رنگ و... در طبقه‌بندی استفاده می‌کند (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۴۱). قطعه‌بندی، بخش مهمی از تکنیک شی‌گرا است. پس از انجام طبقه‌بندی، مقادیر صحت کلی^۱ و ضریب کاپا^۲ با انتخاب تعدادی پیکسل نمونه و مقایسه با نتایج طبقه‌بندی به منظور ارزیابی کمی صحت طبقه‌بندی، در نرم‌افزار ENVI 5.3 به صورت ماتریس خط استخراج شد.

روش میان‌یابی معکوس فاصله

مدل IDW، یکی از معمول‌ترین روش‌های میان‌یابی نقاط پراکنده در فضا است که اساس آن بر مبنای این فرضیه است که در یک سطح میان‌یابی، اثر یک پارامتر بر نقاط اطرافش یکسان نیست و هرچه فاصله از مبدأ افزایش یابد، اثر کمتر خواهد شد (انصاری و داوودی، ۱۳۸۶: ۱۰۲). همچنین روش IDW نسبت به روش‌های معمول دیگر مانند کرجینگ، توانایی مدیریت پارامترهایی با توزیع غیرنرمال را دارد (Yang et al., 2020: 4). در این روش فاصله هر نقطه یا پیکسل با پیکسل مجاور سنجیده و سپس برحسب مقدار فاصله به آن سلول، ارزش یا ضریب وزن داده می‌شود و در نهایت ارزش سلول مرکزی ماتریس با جمع ارزش‌های نقاط همسایه و میانگین وزنی آنها به دست می‌آید (انصافی مقدم و رفیعی، ۱۳۸۸: ۲۸۳). الگوریتم این روش به صورت زیر است:

$$X = \sum \left(\frac{Z_i}{D_i} \right) \sum \left(\frac{1}{D_i} \right) \quad (2)$$

X: ارزش برآوردشده از روش درون‌یابی، Z_i: ارزش نقاط موجود (نقاط یا پیکسل‌های همسایه)، D_i: فاصله بین X

و هر نقطه موجود

داده‌های بارشی تهیه‌شده از ماهواره TRMM^۳

ماهواره TRMM محصول مشترک کشورهای ژاپن و آمریکا است و با هدف اندازه‌گیری بارندگی در سطح اقیانوس‌ها و دریاها و برای مطالعه بارش‌های حاره‌ای به‌ویژه در مناطق فاقد اطلاعات آماری ثبت‌شده در ۲۷ نوامبر سال ۱۹۹۷ با قدرت تفکیک ۰٫۲۵ درجه در مدار استوا قرار گرفت. محصولات بارشی TRMM طیف متنوعی از نقشه‌های ساعتی تا ماهانه را دارند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۴: ۶؛ رسولی و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۰۳). در این پژوهش از محصول ماهانه 3B43 این ماهواره استفاده شده است که میزان بارش ماهانه را برحسب واحد میلی‌متر بر ساعت در یک رستر با توان تفکیک مکانی ۰٫۲۵ در ۰٫۲۵ درجه محاسبه می‌کند. ابزارهای اصلی کاوشگر TRMM عبارت‌اند از:

1. Overall Accuracy
2. Kappa coefficient
3. The Tropical Rainfall Measuring Mission

تصویربرداری ماکروویو^۱ TRMM، رادار بارشی^۲ و سیستم رادیومتر سنجش مادون قرمز^۳ (Kummerow et al., 1998: 809). هرچند لازم است پیش از به‌کارگیری داده TRMM، داده‌های شبکه‌ای این پایگاه ماهواره‌ای در مقابل داده‌های ایستگاههای کشور صحت‌سنجی شوند، با توجه به اینکه دسترسی به‌روز به داده‌های بارشی ایستگاههای سینوپتیک کشور همیشه امکان‌پذیر نیست، می‌توان از داده‌های این پایگاه به شرط مطابقت با واقعیت در بررسی روند کلی بارش ایران در شرایطی استفاده کرد که داده‌های زمینی به‌نگام در دسترس نیست (مسعودیان و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۱). در مطالعه حاضر برای بررسی صحت داده‌های بارش TRMM از اطلاعات بارشی ایستگاه سینوپتیک واقع در منطقه مطالعه استفاده شده است.

نتایج و بحث

به‌منظور بررسی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی از داده‌های ماهواره ثقل‌سنج GRACE در سامانه پردازشی Google Earth engine استفاده و در حداقل زمان نتایج قابل قبول و منطقی از سه مرکز اطلاعاتی CSR-GFZ-JPL، JPL و NASA حاصل شد. در سامانه Google Earth engine با نوشتن کدهای لازم ضرایب هارمونیک (داده‌های سطح ۲) ماهواره GRACE برای دسترسی به اطلاعات وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی هر سه مرکز اطلاعاتی CSR-GFZ-JPL در ارتباط با حوضه شمال غرب کشور استخراج شد و با توجه به روند نزولی سطح سفره‌های حوضه بزرگ شمال غرب و اطلاعات کسب‌شده از ۸ حلقه چاه پیزومتری مرتبط با حوضه خیاو چای مشکین‌شهر، نشانه‌هایی از روند نزولی سطح سفره‌ها در این حوضه نیز مشاهده شد. موقعیت چاههای بررسی‌شده در شکل ۱ قابل مشاهده است؛ بنابراین فقط با یک بار اجرای دستورکارهای لازم می‌توان اطلاعات مدنظر را درباره منطقه مطالعه به‌صورت همزمان از سه مرکز اطلاعاتی کسب کرد؛ فقط کافی است شیب فایل منطقه تغییر یابد که با استفاده از سامانه پردازشی Google Earth Engine این امکان فراهم شده است.

شکل ۲ و ۳ پیکسل‌هایی را شامل می‌شود که پوشش حوضه شمال غرب کشور و افت سطح آب‌های زیرزمینی را از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ با سنجنده گریس نشان می‌دهد؛ همان‌طور که از شکل مشخص است، ۱۶ پیکسل با مساحت تقریباً ۹۶۴۰ کیلومتر مربع که ۶ پیکسل به‌صورت کامل هستند، منطقه شمال غرب را پوشش داده‌اند؛ همچنین ابعاد هر پیکسل ۸۶ در ۱۱۰ کیلومتر مربع تخمین زده شد. شکل ۴ نمودارهای مربوط به تغییرات سفره‌های آب زیرزمینی تهیه‌شده از سه مرکز اطلاعاتی CSR-GFZ-JPL را در بازه زمانی ۱۴ ساله مربوط به کل منطقه شمال غرب کشور نشان می‌دهد.

1. Microwave Imager (TMI)
2. precipitation radar (PR)
3. Visible and Infrared Radiometer System (VIRS)



شکل ۳. پیکسل‌های پوشش دهنده منطقه توسط سنجنده گریس و سطح سفره‌های آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۵

Figure 3. Pixels covering the area by grease sensor and groundwater aquifer surface in 2016



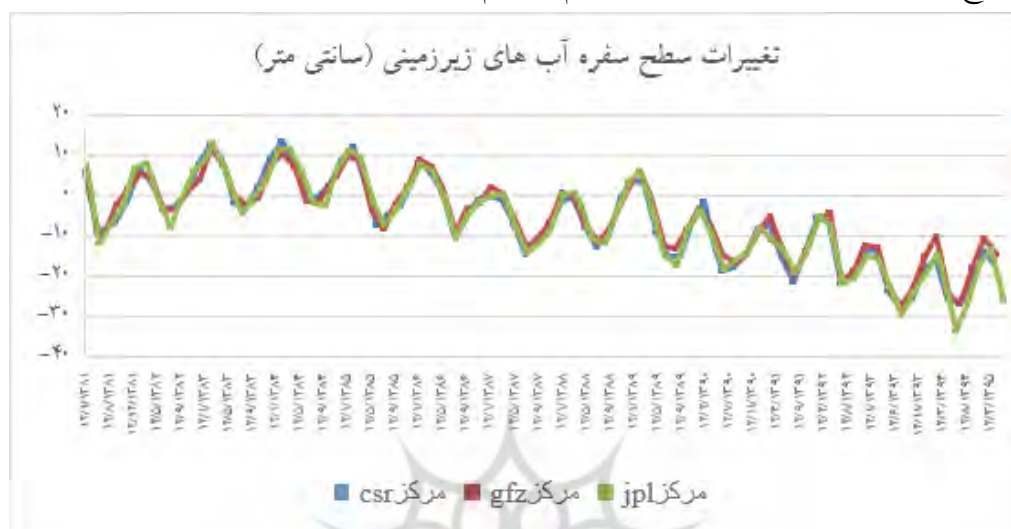
شکل ۲. پیکسل‌های پوشش دهنده منطقه توسط سنجنده گریس و سطح سفره‌های آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۱

Figure 2. Pixels covering the area by grease sensor and groundwater aquifer surface in 2002

با توجه به شکل ۴ که نتایج مشابه و مستقل سه محصول ماهواره GRACE را نمایش می‌دهد، تغییرات آب‌های زیرزمینی در منطقه روند کاهشی و افت ۳۳ سانتی‌متری را در بازه زمانی مطالعه شده نشان داده‌اند. شکل‌های ۲ و ۳ نیز تأییدکننده همین موضوع هستند. همان‌طور که از نمودار مشخص است، در سال ۱۳۸۱ سطح سفره‌های آب زیرزمینی حدود ۷ سانتی‌متر بوده و از سال ۱۳۸۱ تا سال ۱۳۸۵ سطح سفره‌های آب زیرزمینی روند افزایشی تا حدود ۱۲ سانتی‌متر داشته، ولی از سال ۱۳۸۱ به بعد روند کاملاً کاهشی است و در سال ۱۳۹۵ سطح سفره‌ها به ۲۴- سانتی‌متر رسیده است. البته این روند کاهشی به حالت سینوسی است؛ یعنی در ماههای بارشی و در ماههایی که استفاده کمتری از آب‌های زیرزمینی می‌شود، تراز سفره‌های آب بیشتر می‌شود و در ماههایی که برداشت زیاد است، تراز به کمترین حد خود می‌رسد. نتایج حاصل دقت و سرعت زیاد ماهواره GRACE را در برآورد نوسانات سطح سفره‌های زیرزمینی نشان می‌دهد. به‌طوری‌که یین و همکاران^۱ (2020)، فتح‌الله‌زاده و همکاران (۱۳۹۴)، افشار و همکاران (۱۳۹۴)، کولینگ و همکاران^۲ (2020) به قابلیت سنجنده GRACE در بررسی سفره‌های آب زیرزمینی اشاره کرده‌اند. در ادامه، پهنه‌بندی داده‌های چاههای پیژومتری منطقه خیابو مشکین‌شهر با استفاده از روش درون‌یابی IDW صورت گرفت (شکل‌های ۵ و ۶)؛ به طوری که یانگ و همکاران^۳ (2020) به نقل از هیلدر و همکاران^۴ (2020) نقاط

1. Yin et al.
2. Koelling et al.
3. Yang et al.
4. Haldar et al.

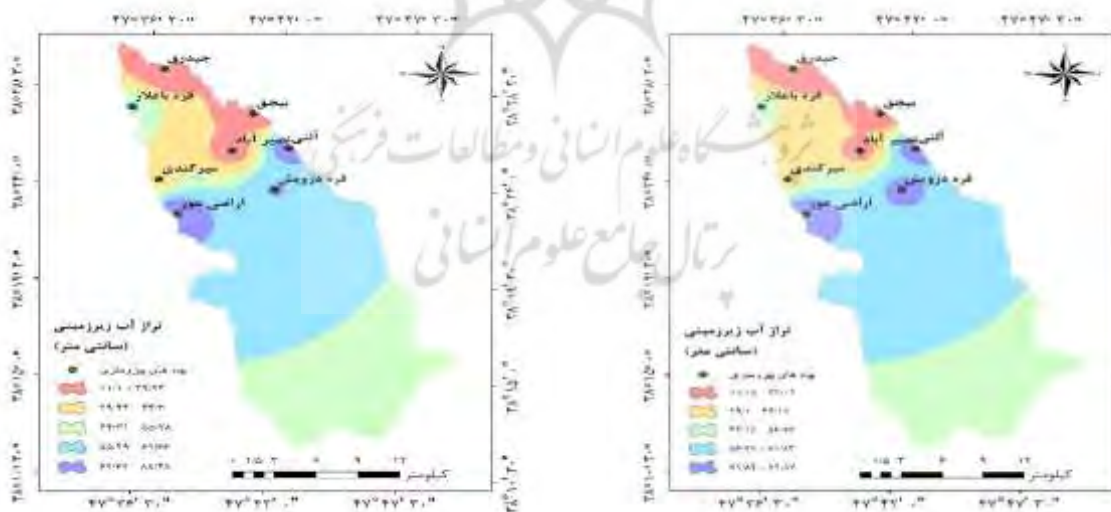
نمونه‌برداری نشده را در روش IDW، بیشتر شبیه به مقادیر نقاط نمونه‌برداری شده نزدیک‌تر معرفی کرده‌اند و نقاط مشاهده‌ای نزدیک را در تغییر کیفیت آب مؤثر دانسته‌اند؛ بنابراین روش IDW را در این دسته از مطالعات نتیجه‌بخش عنوان کرده‌اند. طی بازه زمانی مطالعه شده عمق چاه‌های منطقه افزایش یافته است. میزان سطح آب زیرزمینی عموماً در ماه اول سال سطح بالایی دارد و طی زمان از میزان حجم آب کم شده است.



شکل ۴. تغییرات سفره‌های آب زیرزمینی (به سانتی‌متر)، منطقه شمال غرب از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵، به‌دست‌آمده از سه

محصول GRACE

Figure 4. Groundwater aquifer changes (in centimeters) in the northwest region from 2002 to 2016 obtained from three GRACE products



شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی

منطقه مطالعه شده در سال ۱۳۹۵

Figure 6. Groundwater level zoning map of the study area in 2016

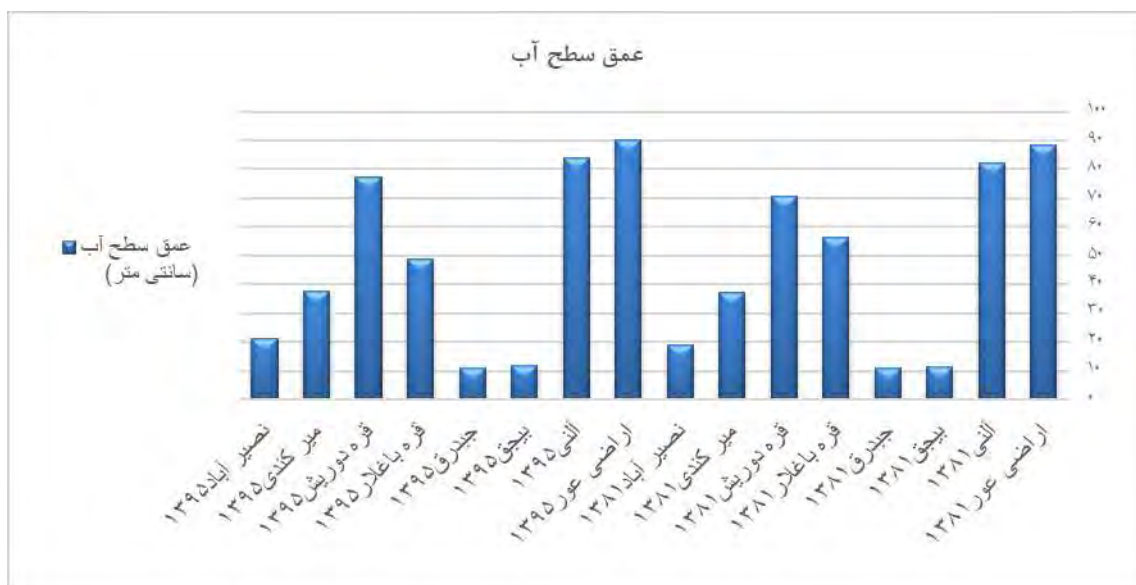
شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی تراز آب

زیرزمینی منطقه مطالعه شده در سال ۱۳۸۱

Figure 5. Groundwater level zoning map of the study area in 2002

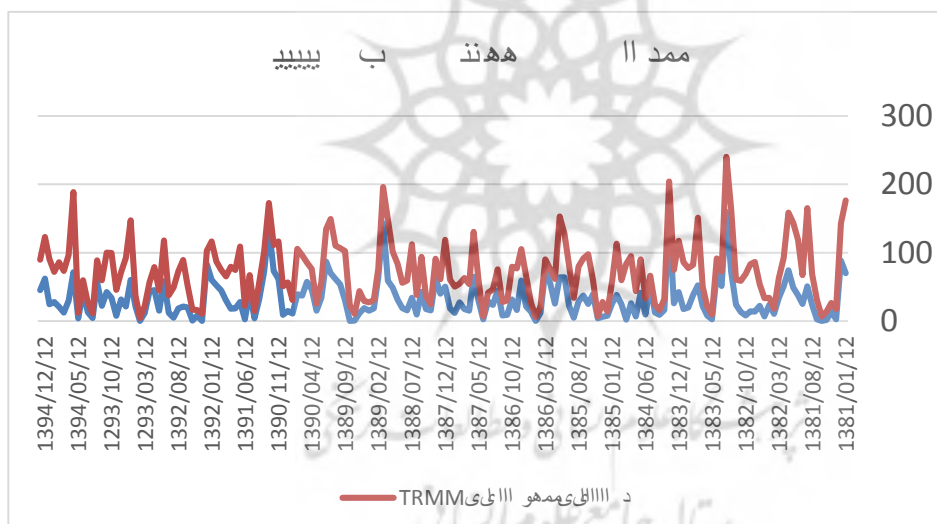
با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ بیشترین اختلاف سطح ایستابی در مناطقی با رنگ بنفش و صورتی پررنگ دیده می‌شود. دلیل این امر را می‌توان نوع کاربری‌های منطقه و جهت جریان آب‌های زیرزمینی از مناطق مرتفع به سمت مناطق پست‌تر با توجه به شیب، ضخامت، رسوبات موجود و ساختار مورفولوژیکی بستر دانست. درحقیقت هرچه از مناطق صورتی‌رنگ دور می‌شویم، بر عمق چاهها افزوده می‌شود؛ درواقع اختلاف سطح ایستابی در مناطق مختلف حوضه نشان‌دهنده اختلاف پتانسیل در منطقه و میزان برداشت‌ها از سطح سفره‌ها با توجه به نوع کاربری‌هاست و جهت جریان از قسمت‌های جنوبی حوضه (نزدیک کوهستان سبلان) با پتانسیل زیاد به سمت قسمت‌های شمالی حوضه با پتانسیل کم است؛ به طوری که علیزاده (۱۳۹۸) در کتاب *اصول هیدرولوژی کاربردی* وجود اختلاف پتانسیل در منطقه را دلیل اصلی جریان سفره‌های زیرزمینی مطرح و جهت جریان را از مناطق مرتفع به سمت مناطق پست عنوان کرده است. تحلیل‌های صورت‌گرفته با مطالعه سوسی و همکاران (۲۰۲۰) نیز مطابقت دارد.

داده‌های به‌دست‌آمده از سه مرکز ماهواره ثقل‌سنج گریس نیز با داده‌های چاههای پیژومتری همخوانی دارد و افزایش عمق سطح آب‌ها را در بازه زمانی مطالعه‌شده نشان می‌دهد. شکل ۷ نیز نمودار میله‌ای مربوط به اطلاعات چاههای پیژومتری را نمایش می‌دهد. شکل ۸ نمودار مرتبط با میزان تغییرات بارش در بازه زمانی ۱۳۸۱-۱۳۹۵ را با استفاده از پایگاه داده زمینی و پایگاه داده ماهواره‌ای TRMM نشان می‌دهد. میزان افت سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های TRMM و ایستگاه زمینی به ترتیب ۵۱ و ۲۵ میلی‌متر تخمین زده شده است. هرچند برآورد داده‌های TRMM مقادیر بارش بیشتری را در مقایسه با داده زمینی به‌ویژه در ماههای سرد و مناطق کوهستانی نشان می‌دهد، با وجود این نتایج حاصل از اعمال تابع رگرسیون بین داده‌های بارش زمینی و TRMM، مقادیر صفر و ۵۰۸۱۰ را به ترتیب برای متغیرهای SIG و آماره t نشان داده است؛ بنابراین انطباق نسبی بین داده‌های زمینی و TRMM مشاهده می‌شود. نتایج حاصل در این زمینه با مطالعه مسعودیان و همکاران (۱۳۹۳) و جعفری و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد؛ به طوری که این پژوهشگران نیز به همبستگی بین داده‌های ماهواره‌ای TRMM و داده‌های زمینی اشاره و میزان همبستگی را در مناطق کوهستانی و فصول سرد کم و در فصول کم‌بارش زیاد معرفی کرده‌اند؛ در هر صورت داده‌های ماهواره‌ای TRMM را هم در شرایط کم‌بارش و هم در شرایط پر بارش قابل اطمینان معرفی کرده‌اند. عسگری و همکاران (۱۳۸۷) نیز اختلاف دقت مکانی بین داده‌ها را دلیلی بر عدم انطباق کافی بین داده زمینی و داده ماهواره‌ای دانسته‌اند؛ به‌ویژه اینکه به اختلاف و کم‌بودن دقت مکانی داده‌های بارش زمینی در مناطق مختلف اشاره کرده‌اند.



شکل ۷. سطح ایستابی چاههای پیزومتری مطالعه‌شده در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۵

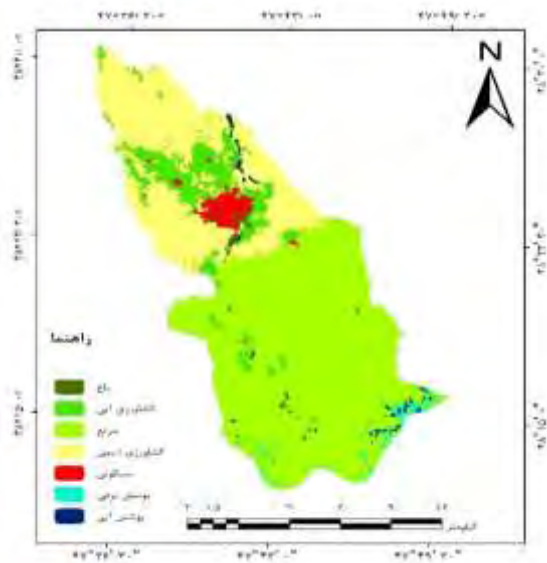
Figure 7. Water level of piezometric wells studied in 2002 and 2016



شکل ۸. نمودار حاصل از بررسی نوسانات بارشی در بازه زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵

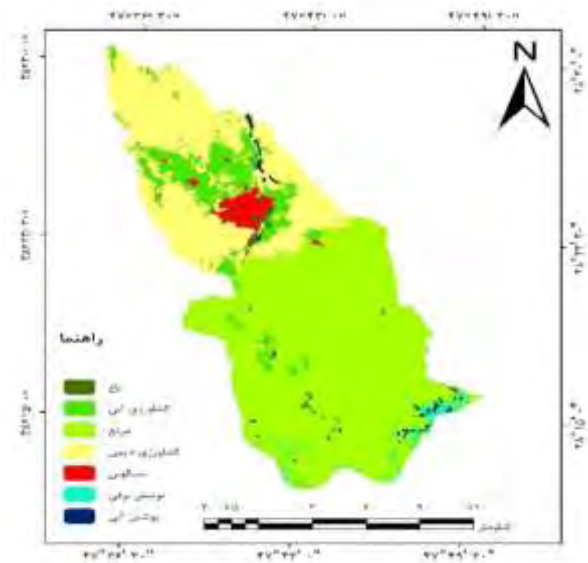
Figure 8. Diagram obtained from the study of precipitation fluctuations in the period 2002 to 2016

در ادامه با قطعه‌بندی چندمقیاسه از طریق تجزیه و تحلیل نتایج قطعه‌بندی در مقیاس‌های مختلف و با در نظر گرفتن اندازه مقیاس ۸ برای تصویر ۲۰۰۲ و مقیاس ۷۰ برای تصویر ۲۰۱۶ با مقادیر نرمی ۲۲ و ۲۳ و پارامتر فشردگی به ترتیب ۴/۰ و ۶/۰، تکنیک شی‌گرا در منطقه خیابو مشکین‌شهر برای استخراج نقشه‌های کاربری اراضی پیاده‌سازی شد. شکل‌های ۹ و ۱۰، نقشه‌های طبقات کاربری اراضی حاصل از طبقه‌بندی را نمایش می‌دهند.



شکل ۱۰. نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی به روش تکنیک شی پایه سال ۱۳۸۱

Figure 10. Land use classification map by basic object technique method in 2002



شکل ۹. نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی به روش تکنیک شی پایه سال ۱۳۹۵

Figure 9. Land use classification map by basic object technique method in 2016

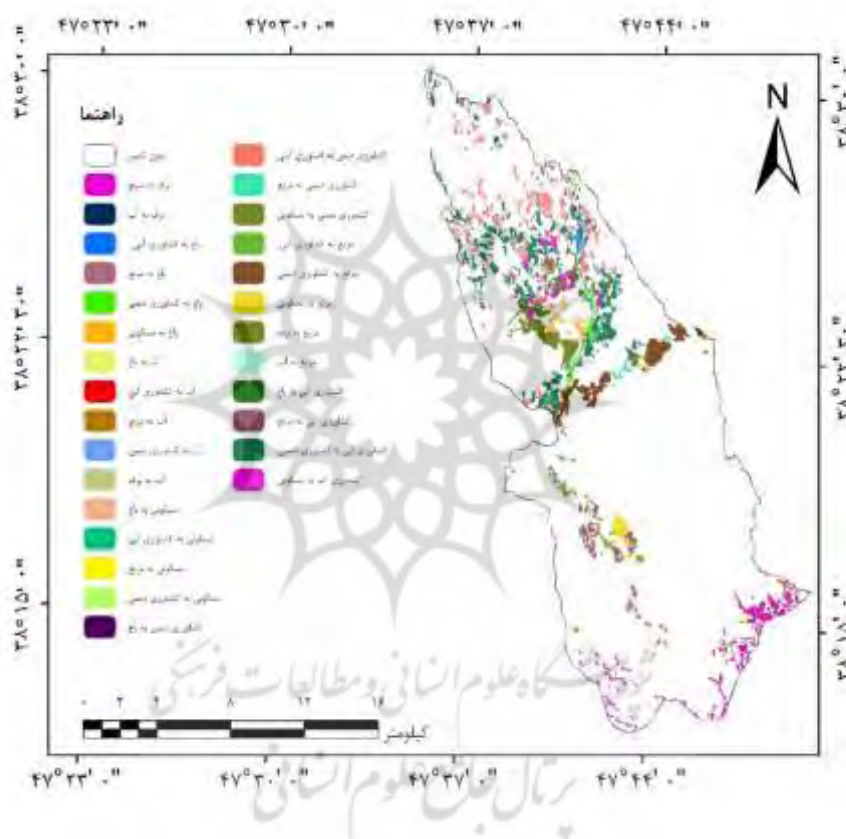
صحت کلی و ضریب کاپای حاصل از صحت‌سنجی نتایج طبقه‌بندی برای سال ۱۳۹۵ به ترتیب ۹۷٪ و ۹۶٪ و برای سال ۱۳۸۱ مقادیر این ضرایب ۹۳٪ و ۹۰٪ به دست آمده است. نمودار ستونی مساحت کاربری‌های اراضی در سال‌های مطالعه‌شده در شکل ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱۱. مساحت کاربری اراضی با استفاده از روش شی‌گرا در منطقه مطالعه‌شده

Figure 11. Land use area using object-oriented method in the study area

همان‌طور که از شکل مشخص است، بیشترین مساحت در سال‌های ۸۱ و ۹۵ به کاربری مرتع با مقدار ۱۸۶ کیلومترمربع مربوط است. سپس کاربری کشاورزی دیمی در سال ۹۵ بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده و در همین سال برخلاف کشاورزی دیمی، کشاورزی آبی کاهش مساحت داشته است. بررسی کاربری مناطق مسکونی نشان داد این کاربری از سال ۸۱ تا ۹۵ افزایش ۵ کیلومترمربعی داشته است؛ همچنین مساحت کاربری‌های باغ و پوشش آبی در سال ۹۵ نسبت به سال ۸۱ به‌طور محسوسی کاهش یافته است؛ به طوری که پوشش باغی از $\frac{2}{98}$ کیلومترمربع به $\frac{1}{88}$ کیلومترمربع و پوشش آبی از $\frac{1}{99}$ کیلومترمربع به $\frac{0}{40}$ کیلومترمربع کاهش یافته است. شکل ۱۲ نقشه تغییرات کاربری اراضی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. نقشه تغییرات کاربری اراضی منطقه مطالعه شده

Figure 12. Map of land use changes in the study area

مساحت کاربری‌های تغییر یافته در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول ۲، کاربری کشاورزی دیمی به آبی و کاربری کشاورزی آبی به دیمی و کاربری مرتع به کشاورزی دیمی و کاربری کشاورزی دیمی به مسکونی بیشترین تغییر را داشته‌اند که تغییر مرتع به کشاورزی دیمی و همچنین کشاورزی دیمی به مسکونی از دلایل مهم برداشت زیاد از آب‌های زیرزمینی و باعث کاهش سطح سفره‌های زیرزمینی است. از موارد گفته شده می‌توان استنباط کرد که تغییرات کاربری اراضی علاوه بر تحت تأثیر قراردادان کمیت آب‌های زیرزمینی، می‌تواند مشکلات احتمالی نظیر

پدیده فرونشست را به دنبال داشته باشد؛ همچنین کیفیت آب‌های زیرزمینی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد که برای جامعه انسانی خطرناک است.

نارانی و همکاران^۱ (2017) و زینالی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعات خود افت کیفیت آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر کاربری کشاورزی و مسکونی و افزایش برداشت از سطح سفره‌ها می‌دانند. سلمنس و همکاران^۲ (2020) نیز نفوذ فاضلاب تصفیه‌نشده به سفره‌های زیرزمینی را تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی، مشکل بزرگی در برابر دسترسی انسان به آب شیرین مطرح کرده‌اند؛ به طوری که برخی پژوهشگران افت کیفیت آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر کاربری کشاورزی و مسکونی و افزایش برداشت از سطح سفره‌ها می‌دانند (زینالی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۸۳؛ Narany et al., 2017: 850). همچنین نتایج به دست آمده در رابطه با تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر کمیت سطح سفره‌های زیرزمینی با مطالعات غفاری و همکاران (۱۳۹۸)، اصغری و همکاران (۱۳۹۹) و گارگ و همکاران (2020) مطابقت دارد؛ به طوری که این پژوهشگران نیز از بین رفتن کاربری مراتع و افزایش ساخت‌وساز و مناطق مسکونی و افزایش زمین‌های کشاورزی را دلیلی بر فشار بر سطح سفره‌های زیرزمینی و عامل کاهنده سطح این سفره‌ها معرفی کرده‌اند.

جدول ۲. مساحت کاربری‌های تغییر یافته

Table 2. Area of modified applications

مساحت (کیلومتر)	کاربری‌های تغییر یافته	مساحت (کیلومتر مربع)	کاربری‌های تغییر یافته
۳/۷۴	مرتع به کشاورزی دیمی	۰/۲۴	کشاورزی دیمی به مرتع
۹/۳۹	کشاورزی آبی به کشاورزی دیمی	۱/۴۵	کشاورزی آبی به مرتع
۰/۵۲	باغ به کشاورزی دیمی	۰/۵۵	باغ به مرتع
۰/۶۰	آب به کشاورزی دیمی	۰/۷۹	آب به مرتع
۳/۱۷	کشاورزی دیمی به مسکونی	۰/۰۴	مسکونی به مرتع
۰/۳۲	مسکونی به کشاورزی دیمی	۰/۹۲	مرتع به کشاورزی آبی
۰/۰۵	مرتع به آب	۵/۹۱	کشاورزی دیمی به کشاورزی آبی
۰/۰۳	برف به آب	۰/۳۴	باغ به کشاورزی آبی
۰/۰۴	مرتع به برف	۰/۰۶	آب به کشاورزی آبی
۰/۲۱	مسکونی به باغ	۰/۱۷	مسکونی به کشاورزی آبی
۰/۳۶	کشاورزی آبی به باغ	۰/۸۴	مرتع به مسکونی
۰/۱۵	آب به باغ	۱/۸۷	کشاورزی آبی به مسکونی
۰/۱۷	کشاورزی دیمی به باغ	۰/۵۷	باغ به مسکونی
		۰/۰۷	آب به برف

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت سفره‌های آب زیرزمینی در زندگی بشر که بر توسعه اقتصادی و تنوع اکولوژیکی تأثیرگذار است، در این مطالعه وضعیت سفره‌ها با استفاده از ماهواره ثقل سنج GRACE بررسی شد. GRACE به دلیل قابلیت

1. Narany et al.
2. Celemens et al.

دسترسی آسان و سهولت استفاده و حصول نتایج قابل قبول در مطالعات هیدرولوژیکی، در میان پژوهشگران محبوبیت زیادی دارد. بررسی داده‌های سه پروداکت CSR، GFZ و JPL ماهواره ثقل سنج GRACE در محیط Google earth engine حاکی از افت ۳۳ سانتی‌متری سطح سفره‌های آب زیرزمینی در حوضه شمال غرب کشور است که هر سه محصول تقریباً به نتایج یکسانی دست یافته‌اند. البته از سال ۲۰۰۶ به بعد افت سفره‌ها شدت بیشتری یافته و در سال ۲۰۱۰ این روند کاهش نسبتاً متوقف شده و از آن به بعد روند نزولی ادامه یافته است. با مشاهده روند نزولی سطح سفره‌های آب زیرزمینی در حوضه شمال غرب کشور و مشاهده همین روند در حوضه خیابو چای مشکین‌شهر با استفاده از اطلاعات چاههای پیزومتری و سنجنده GRACE در بازه زمانی مطالعه‌شده، وضعیت تغییر کاربری اراضی به‌عنوان عامل مهم در رابطه با افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی در این منطقه بررسی شد. با توجه به اینکه برداشت‌ها از منابع زیرزمینی بیشتر از منابع صورت می‌گیرد و بیشترین میزان این برداشت‌ها هم برای مصارف کشاورزی و ساخت‌وساز استفاده می‌شود، بررسی نقشه تغییرات کاربری اراضی، افزایش کاربری‌های کشاورزی، مسکونی و کاهش کاربری مرتع را نشان داده است. همگام با این تغییرات، از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ کاهش سطح آب زیرزمینی در کاربری‌های یادشده شدت بیشتری یافته است. با توجه به نتایج پژوهش حاضر فعالیت‌های انسانی و برداشت‌های بی‌رویه، جزو عمده‌ترین عوامل تغییردهنده سطح سفره‌های آب زیرزمینی است. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که در منطقه مطالعه‌شده ارتباط متقابلی بین نوع کاربری و تغییر ارتفاع آب زیرزمینی وجود داشته است. اطلاعات بارشی ماهانه به‌دست‌آمده از پایگاه اینترنتی TRMM و داده ایستگاه زمینی نیز به ترتیب کاهش ۵۱ و ۲۵ میلی‌متری بارش را در بازه زمانی مطالعه‌شده در حوضه خیابو چای مشکین‌شهر نشان داده که هر دو داده به‌صورت هماهنگ روند کاهش بارش را در بازه زمانی مطالعه‌شده نشان می‌دهند و این مسئله را در افت کلی سطح سفره‌ها نمی‌توان نادیده گرفت.

همچنین از نتایج دیگر این پژوهش می‌توان به قابلیت سامانه پردازشی تحت وب Google Earth Engine اشاره کرد که بدون نیاز به عملیات سنگین پردازشی و نرم‌افزار ویژه‌ای قادر است اطلاعات ارزشمندی در اختیار کاربران قرار دهد و با استفاده از کدنویسی و بدون نیاز به دانلود می‌توان تصاویر مختلف را فراخوانی کرد و روی آنها عملیات لازم را انجام داد که داده‌های اخذشده با سنجنده GRACE نیز از این قاعده مستثنا نیست؛ بنابراین این اطلاعات به‌ویژه در مناطقی که داده‌های در دسترس کمیاب است، می‌تواند بسیار ارزشمند باشد.

بررسی نقشه‌های تغییرات کاربری اراضی و رابطه آن با سطح سفره‌های آب زیرزمینی می‌تواند برای توسعه استراتژی‌های پایدار منابع آب‌های زمینی و زیرزمینی در آینده مفید باشد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی بازه‌های زمانی متفاوت در مناطق و سال‌های مختلف با اقلیم متفاوت از نظر داده‌های بارشی و GRACE بررسی شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی انجام گرفته است. بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- ابراهیمی، حمید، رسولی، علی‌اکبر، احدپور، احمد، (۱۳۹۷). مدل‌سازی تغییرات دینامیک کاربری اراضی با استفاده از پردازش شی‌گرایی تصاویر ماهواره‌ای و مدل CA-Markov؛ مطالعه موردی: شهر شیراز، فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۷، شماره ۱۰۸، ۱۳۷-۱۴۹.
- اشرف‌زاده افشار، علی، جودکی، غلامرضا، شریفی، محمدعلی، (۱۳۹۵). ارزیابی منابع آب‌های زیرزمینی ایران با استفاده از داده‌های ماهواره ثقل‌سنجی GRACE، نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۵، شماره ۴، ۷۳-۸۴.
- اصغری سراسکانرود، صیاد، محمدزاده شیشه‌گران، مریم، قلعه، احسان، (۱۳۹۹). بررسی رفتار فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری؛ مطالعه موردی: شهرستان سرعین، دومین کنفرانس ملی مدیریت شهری.
- اصغری سراسکانرود، صیاد، قلعه، احسان، عبادی، الهامه، (۱۳۹۹). بررسی تغییرات کاربری اراضی و ارتباط آن با سطح آب‌های زیرزمینی؛ مطالعه موردی: دشت اردبیل، نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره ۱۲، شماره ۱، ۸۶-۱۰۶.
- اقبالیان، سحر، بهمنی، امید، (۱۳۹۹). بررسی تغییرات مکانی و زمانی معیارهای کیفی آب زیرزمینی دشت همدان بهار با استفاده از (GIS) طی بازه زمانی ۱۰ ساله، نشریه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، دوره ۲۲، شماره ۳، ۸۳-۹۸.
- انتظاری، اردلان، رحیم‌زادگان، مجید، (۱۳۹۶). بررسی تغییرات آب‌های زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE، چهارمین کنفرانس بین‌المللی فناوری‌های نوین در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران.
- انصاری، حسین، داوودی، کامران، (۱۳۸۶). پهنه‌بندی دوره خشک با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد شده در محیط GIS؛ مطالعه موردی: استان خراسان، پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۳۹، شماره ۶۰، ۹۷-۱۰۸.
- انصافی مقدم، طاهره، رفیعی امام، عمار، (۱۳۸۸). پهنه‌بندی خشکسالی‌های اقلیمی با استفاده از روش میان‌یابی معکوس فاصله (IDW)؛ مطالعه موردی: حوضه دریاچه نمک، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۶، شماره ۲، ۲۷۴-۲۹۲.
- پایگاه اطلاعاتی <https://earthengine.google.com>
- پایگاه اطلاعاتی <https://grace.jpl.nasa.gov/data/monthly-mass-grids>
- تورانی، مرجان، آق‌اتابای، مریم، روستایی، مه‌آسا، (۱۳۹۵). مطالعه فرونشست در غرب استان گلستان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، فصلنامه علمی پژوهشی دانشگاه گلستان، سال ۸، شماره ۲۷، ۱۱۷-۱۲۷.
- زینالی، بتول، فریدپور، مجتبی، اصغری سراسکانرود، صیاد، (۱۳۹۴). بررسی تأثیر خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی بر ویژگی‌های کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی؛ مطالعه موردی: دشت مرند، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، دوره ۷، شماره ۱۴، ۱۷۷-۱۸۷.

- جمالی‌زاده، محمدعلی، بذرافشان، ام‌البین، مهدوی نجف‌آبادی، رسول، آذره، علی، رفیعی ساردویی، الهام، (۱۳۹۹).
پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های سری زمانی و GMS؛ مطالعه موردی: دشت
رفسنجان)، نشریه اکو هیدرولوژی، دوره ۷، شماره ۱، ۹۷-۱۰۹.
- جعفری سالیانه، مریم، پاکدامن، محمدصادق، جمالی، علی‌اکبر، (۱۳۹۴). صحت‌سنجی برآوردهای شدت بارش
توسط ماهواره TRMM 3B43 در ماههای پربارش مناطق کوهستانی (استان لرستان)، همایش ملی ژئوماتیک،
دوره ۲۲.
- خسروی، رضا، حسن‌زاده، رضا، حسینجانی‌زاده، مهدیه، محمدی، صدیقه، (۱۳۹۹). بررسی تغییرات پهنه‌های آبی با
استفاده از شاخص‌های آبی و گوگل ارث انجین؛ مطالعه موردی: تالاب‌های شهرستان پلدختر، استان لرستان،
نشریه اکو هیدرولوژی، دوره ۷، شماره ۱، ۱۳۳-۱۴۶.
- دل‌آرام، امیر، نجفی علمداری، مهدی، نعیمی، مجید، (۱۳۸۶). بررسی توانایی داده‌های ماهواره‌ای GRACE در
تعیین تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی ایران، همایش ژئوماتیک، ۸۶، تهران.
- رسولی، علی‌اکبر، عرفانیان، مهدی، ساری صراف، بهروز، جوان، خدیجه، (۱۳۹۵). ارزیابی تطبیقی مقادیر بارندگی
برآورده‌شده TRMM و بارش ثبت‌شده ایستگاههای زمینی در حوضه دریاچه ارومیه، فصلنامه علمی پژوهشی
فضای جغرافیایی، سال ۱۶، شماره ۵۴، ۱۹۵-۲۱۷.
- رفیع شریف‌آباد، جواد، نوحه‌گر، احمد، زهتابیان، غلامرضا، خسروی، حسن، غلامی، حمید، (۱۳۹۵). بررسی روند
تغییرات کاربری اراضی بر روی کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان، فصلنامه علمی پژوهشی جغرافیا
(برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، سال ۷، شماره ۱، ۱۸۹-۱۹۹.
- صفاییان، سمانه، فلاحتکار، سامره، طوریان، محمدجواد، (۱۳۹۹). تأثیر افزایش غلظت گاز دی‌اکسید کربن بر
ذخیره کل آب ایران با استفاده از سنجش از دور، سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۲، شماره ۱، ۱۰۱-۱۱۲.
- عساکره، حسین، رزمی، رباب، (۱۳۹۰). اقلیم‌شناسی بارش شمال غرب ایران، جغرافیا و توسعه، دوره ۹، شماره ۲۵،
۱۳۷-۱۵۸.
- عسکری، قاسم، پورباقری، سید مهدی، مبارکی، زهرا، (۱۳۸۷). اعتبارسنجی داده‌های بارش به‌دست‌آمده از ماهواره
TRMM به کمک ایستگاههای خودکار هواشناسی در آذرماه ۸۶، همایش ژئوماتیک ۸۷ و چهارمین همایش
یکسان‌سازی نام‌های جغرافیایی.
- علیزاده، امین، (۱۳۹۸). اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ ۴۱، دانشگاه بین‌المللی امام رضا.
- غفاری، صدیقه، مرادی، حمیدرضا، مدرس، رضا، (۱۳۹۸). اثر تغییر کاربری اراضی بر سطح آب زیرزمینی در
دشت‌های اصفهان- برخوار، نجف‌آباد و چادگان، نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۹،
۲۳۵۱-۲۳۷۱.

- فتح‌الله‌زاده، فرزاد، وثوقی، بهزاد، رعوفیان نایینی، مهدی، محبی، محمود، (۱۳۹۵). مقایسه نتایج چاههای پیزومتری و مشاهدات ماهواره ثقل‌سنجی گریس در برآورد تغییرات آب‌های زیرزمینی، همایش ملی ژئوماتیک، دوره ۲۳.
- فرجی، زهره، کاویانی، عباس، اشرف‌زاده، افشین، (۱۳۹۶). ارزیابی داده‌های ماهواره GRACE در برآورد تغییرات سطح آب زیرزمینی در استان قزوین، نشریه اکو هیدرولوژیة دوره ۴، شماره ۲، ۴۷۶-۴۶۳.
- قنواتی، عزت‌الله، بابایی اقدم، فریدون، همتی، ظاهر، رحیمی، مسعود، (۱۳۹۴). پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری با استفاده از مدل فازی در محیط GIS؛ مطالعه موردی: حوضه خیاو چای مشکین‌شهر، هیدروژئومورفولوژی، دوره ۳، شماره ۳، ۱۲۱-۱۳۵.
- مسعودیان، سید ابوالفضل، رعیت‌پیشه، فاطمه، کیخسروی کیانی، محمدصادق، (۱۳۹۳). معرفی و مقایسه پایگاههای داده بارشی TRMM و اسفزاری، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۸، شماره ۴، ۱۵-۳۱.
- Bruinsma, S., Forbes, J.M., (2010). Anomalous behavior of the thermosphere during solar minimum observed by CHAMP and GRACE, Journal of Geophysical Research, Vol 115, 1-8.
- Castellazzi, B., Martel, R., Galloway, D.L., Longuevergne, L., and Rivera, A., (2016). Assessing Groundwater Depletion and Dynamics Using GRACE and InSAR: Potential and Limitations, Journal Ground water, <https://doi.org/10.1111/gwat.12453>.
- Celemens, M., Khurelbaatar, G., Merz, R., Siebert, C., Afferden, M., and Rodiger, T., (2020). Groundwater protection under water scarcity; from regional risk assessment to local wastewater treatment solutions in Jordan, Science of the Total Environment. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136066>.
- Famiglietti, J. S., M. Lo, S. L. Ho, J. Bethune, K. J. Anderson, T. H. Syed, S. C. Swenson, C. R. de Linage, and M. Rodell. (2011). Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 38. 1-4.
- Garg, K., K. H. Anantha, R. Nune, V. R. Akuraju, P. Singh, M. K. Gumma, S. Dixit, and R. Ragab. (2020). Impact of land use changes and management practices on groundwater resources in Kolar district, Southern India. Journal of Hydrology: Regional Studies.31, 1-21.
- Gleeson, T., K.M. Befus, S. Jasechko, E. Luijendijk and M.B. Cardendas. (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. Nat. Geosci. 9 (2), 161-167.
- Huang, J., J. Halpenny, W. van der Wal, C. Klatt, T. S. James, and A. Rivera. (2012). Detectability of groundwater storage change within the Great Lakes Water Basin using GRACE. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117, 1-26.
- Koelling, J., U. Send and M. Lankhorst. (2020). Decadal Strengthening of Interior Flow of North Atlantic DeepWater Observed by GRACE Satellites 10.1029,1-18.
- Kummerow, C. B. Wiliam, K. Toshiaki, S. James and S. Joanne. (1998). The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, VOLUME 15. 809-817.
- Longuevergne, L., B. R. Scanlon, and C. R. Wilson. (2010) GRACE Hydrological estimates for small basins: Evaluating processing approaches on the High Plains Aquifer USA. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 46, 1-15.
- Narany, T.S., A. Zaharin, A. Sefie and S.Keesstra. (2017). Detecting and predicting the impact of land use changes on groundwater quality, a case study in Northern Kelantan, Malaysia. journal Science of the Total Environment.599-600,844-853.
- Rodell, M., I. Velicogna, J. (2009). Famiglietti Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. Journal Nature, vol 460, 999-1003.

- Suciu, N., C. Farolfi, R. Marsala, E. Russo, M. Cremab, E. Peroncini, F. Tomei, G. Antolini, M. Marcaccio, V. b. Marletto, R. Colla, A. d. Gallo and E. Capri. (2020). Evaluation of groundwater contamination sources by plant protection products in hilly vineyards of Northern Italy. *journal Science of the Total Environment* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141495>.
- Save, H., S. Bettadpur, and B. D. Tapley. (2012). Reducing errors in the GRACE gravity solutions using regularization, *Journal of Geodesy* volume 86, 695–711.
- Tapley, B.D., S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters* 31: L09607. DOI:10.1029/2004GL019920
- Tourian, M.; O. Elmi, Q. Chen, B. Devaraju, Sh. Roohi, and N. Sneeuw. (2015) A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sensing of Environment* 156, 349–360.
- Yang, W., Zhao, Y., Wang, D., Wu, H., Lin, A., & He, L. (2020). Using principal components analysis and idw interpolation to determine spatial and temporal changes of Surfacewater quality of Xin'Anjiang river in huangshan, china. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082942>.
- Yin, W., SH. Chan, W. Zheng, I. y. Yeo, L. hu, N. Tandamrongsurb and Kh. Ghobadi. (2020). Improved water storage estimates within the North China Plain by assimilating GRACE data into the CABLE model. *Journal of Hydrology*, 0022-1694.
- Vishwakarma, B., B. Devaraju, and N. Sneeuw. (2018). What Is the Spatial Resolution of GRACE Satellite Products for Hydrology? *Remote Sensing*. 10, 852, 1-17.
- Wang. S., H. Liu, Y. Yu, W. Zhao, Q. Yang, and J. Liu. (2019). Evaluation of groundwater sustainability in the arid Hexi Corridor of Northwestern China, using GRACE, GLDAS and measured groundwater data products. *journal Science of the Total Environment* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135829>.