Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Summer 2025, Vol. 15(2): 192 - 213

Research Article

Investigation of Submarine Groundwater Discharges Using Satellite Imagery and Water Balance Studies: A Case Study of the Namak-Kangan Anticline, Persian Gulf Region

Ahmadreza Karimi[1], Haji Karimi[2]*, Sirous Shamshiri[3], Younes Mousavi[4]

1- Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran
2- Department of Forestry, Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran
3- Department of Arid and Mountainous Areas Restoration, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran
4- Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Alborz, Iran

Keywords: *Karst, Remote Sensing, Persian Gulf, Submarine Springs, Bushehr.*

1-Introduction

Submarine groundwater discharge (SGD) represents a critical yet often overlooked component of the hydrological cycle in coastal regions. Particularly in karst-dominated formations adjacent to marine environments, such discharges can play significant roles in both hydrology and marine ecology. The present study aims to evaluate the existence of submarine springs in the Persian Gulf, with a particular focus on the Salt-Kangan Anticline in the Assaluyeh region, where geological structures potentially allow for groundwater discharge into the sea. Previous research has demonstrated that SGD, particularly in karstic and tectonically active coastal zones, can significantly impact seawater chemistry and coastal ecosystems (Aggarwal et al., 2004; Burnett et al., 2006). In many global locations, such as southeastern Sicily, the Adriatic Sea, and southern France, detailed investigations have revealed substantial submarine discharge zones with observable thermal and salinity anomalies (Zektser & Dzhamalov, 2007). These studies often rely on a combination of isotopic, geophysical, and hydrogeological techniques. Despite global advances, empirical verification of SGD in the Persian Gulf remains limited. However, several Iranian studies point toward the plausibility of submarine springs in the region. For example, Nemati Mansour et al. (2023) and Zaerian & Eslamian (2021) emphasize the importance of groundwater balance assessments in understanding aquifer behavior.

Additionally, Kastning (1977) identified the potential for groundwater discharge from karstic anticlines near the southern Zagros Mountains, due to the abundance of faulting and transverse geological structures. Thus, this study integrates hydrogeological balance analyses, satellite remote sensing, and field-based observations to investigate the likelihood of SGD in the Assaluyeh region. Given the strategic and ecological importance of the Persian Gulf, particularly in the context of increasing freshwater demand and industrial expansion, identifying and evaluating submarine springs could offer new avenues for regional water resource management.

2-Materials and Methods

This study employed a combination of field investigations, hydrogeological modeling, and remote sensing techniques to investigate potential SGD zones. The methodology was divided into three main components: field and hydrogeological analysis, satellite remote sensing, and community interviews.

* Corresponding author: h.karimi@ilam.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2025.49351.2509
Received: 2025-04-23
Accepted: 2025-08-11

ISSN: 2717-0764

Field Surveys and Hydrogeological Balance: Fieldwork was carried out in both summer and winter seasons to identify any physical manifestations of submarine springs. Interviews were conducted with local fishermen and coastal residents to gather anecdotal evidence. Simultaneously, geological and hydrological data from research institutions and governmental sources were used to analyze recharge, storage, and discharge characteristics of the karst systems within the Salt and Kangan anticlines.

The groundwater balance method was used, where inflows (mainly from precipitation) and outflows (spring discharge, evapotranspiration, and potential SGD) were computed. The catchment area, recharge coefficients, and spring discharge data were collected and processed using established hydrological equations (Domenico & Schwartz, 1998).

Satellite Remote Sensing: To detect SGD, sea surface temperature (SST) anomalies and chlorophyll-a concentrations were analyzed using MODIS-Aqua satellite data for three key years (2000, 2011, and 2021). Additionally, ASTER imagery and Google Earth Engine (GEE) were utilized for higher-resolution thermal anomaly detection and digital elevation model (DEM) creation. SST variations, when correlated with salinity and chlorophyll patterns, provide indicators of freshwater inputs into marine environments (Wilson & Rocha, 2012).

Infrared thermal bands (3.93 μm and 12 μm) were used to extract SST. These images were processed with atmospheric correction and georeferencing using QGIS and GEE. The presence of thermal plumes with anomalous temperature patterns was considered a key criterion for identifying potential SGD zones.

Study Area: The Salt-Kangan Anticline, situated on the northern margin of the Persian Gulf near Assaluyeh, was chosen due to its geological setting, karstic nature, and proximity to the sea. The anticline comprises karstifiable formations such as the Asmari and Jahrum limestones, which have considerable secondary porosity due to faulting and fracturing. The region also exhibits notable elevation differences, which favor the gravitational discharge of groundwater toward the sea.

3-Results and discussions

Field Investigations: Field visits yielded no direct visual confirmation of submarine spring activity along the coast of the study area. Interviews with fishermen and coastal dwellers similarly did not indicate knowledge of persistent freshwater discharges in the sea. Observations during different seasons also failed to reveal temperature or color anomalies typical of freshwater plumes.

Hydrogeological Balance: The calculated water balance for the Salt-Kangan Anticline revealed limited groundwater recharge potential. Precipitation in the region is low, averaging 200–300 mm/year. Using a conservative recharge coefficient of 5–10%, the annual recharge was estimated at approximately 2.8 million cubic meters. However, the total discharge from known springs and qanats within the anticline already accounted for 1.1 million cubic meters per year, suggesting limited surplus water available for SGD.

Furthermore, the anticline is hydrologically isolated, receiving minimal lateral inflow from adjacent structures. The lack of excess hydraulic head and the absence of significant spring activity near the shoreline point toward minimal or no submarine discharge (UNESCO, 2004).

Satellite Analysis: Remote sensing analysis identified a weak thermal anomaly in Nayband Bay during the winter season. SST maps showed a local temperature increase of 0.5–1.0°C compared to surrounding waters, consistent across multiple time points. However, these anomalies were spatially limited and inconsistent in intensity, suggesting that they might originate from coastal aquifer discharge or anthropogenic thermal sources (e.g., industrial activity), rather than from persistent groundwater discharge. Chlorophyll a concentrations and salinity gradients did not exhibit significant deviation near suspected SGD zones, further diminishing the likelihood of major freshwater inflows into the Gulf. The absence of consistent multi-parameter anomalies undermines the case for active submarine springs in the area.

4-Conclusion

This study employed a multi-method approach combining field investigations, hydrogeological balance calculations, and satellite-based thermal and chlorophyll analyses to assess the possibility of submarine groundwater discharge in the Salt-Kangan Anticline along the Persian Gulf. The evidence suggests that large-scale submarine springs are unlikely to exist in this region. Although a minor thermal anomaly was

ISSN: 2717-0764
CC BY

observed near Nayband Bay, its significance requires further validation through high-resolution imagery and field sampling to confirm. The results highlight the importance of integrating diverse datasets when investigating SGD, especially in arid and semi-arid coastal systems. Future research should focus on deploying in-situ sensors, tracer tests, and high-resolution remote sensing platforms to verify localized discharges.

5-References

Aggarwal, P.P., Kulkarni, K.M., Povinec, P.P., Han, L.F., Groening, M., 2004. Environmental isotope investigation of submarine groundwater discharge in Sicily, Italy. Book of Extended Synopses. Vienna: IAEA, 222–223. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.03.008

Aggarwal, P.P., Kulkarni, K.M., Povinec, P.P., Han, L.F., Groening, M., 2004. Environmental isotope investigation of submarine groundwater discharge in Sicily, Italy. Book of Extended Synopses. Vienna: IAEA, 222–223. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.03.008

Burnett, W.C., Aggarwal, P.K., Aureli, A., Bokuniewicz, H., Cable, J.E., Charette, M.A., Kontar, E., Krupa, S., Kulkarni, K.M., Loveless, A., Moore, W.S., Oberdorfer, J.A., Oliveira, J., Ozyurt, N., Povinec, P., Privitera, A.M.G., Rajar, R., Ramessur, R.T., Scholten, J., Stieglitz, T., Taniguchi, M., Turner, J.V., 2006. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. Science of the Total Environment 367(2–3), 498–543. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.05.009

Domenico, P. A., Schwartz, F. W. (1998). Physical and chemical hydrogeology (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Kastning, E.H., 1977. Faults as positive and negative influences on groundwater flow and conduit enlargement. In: Dilamarter, R.R., Csallany, S.C. (Eds.), Hydrologic Problems in Karst Regions. Bowling Green: Western Kentucky University, pp. 193–201.

Nemati Mansour, A., KordanMoghadam, H., Javadi, S., 2023. Estimation of groundwater balance using remote sensing approach: Case study of Qomsheh Plain. Aquifer and Qanat Journal 4(2), 35–48. https://doi.org/10.22077/jaaq.2024.7258.1061

UNESCO. (2004). Submarine groundwater discharge: Management implications, research methods, and case studies (IHP-VI Series on Groundwater No. 5).

Zektser, I.S., Everett, L.G., Dzhamalov, R.G., 2006. Submarine Groundwater (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420005257

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Karimi, A., Karimi, H., Shamshiri, S., Mousavi, Y,. 2025. Investigation of Submarine Groundwater Discharges Using Satellite Imagery and Water Balance Studies: A Case Study of the Namak-Kangan Anticline, Persian Gulf Region. Adv. Appl. Geol. 15 (2), 192-213.
DOI: 10.22055/aag.2025.49351.2509
https://aag.scu.ac.ir/article_20220.html

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

بررسی وجود چشمه‌های زیردریایی با به کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و مطالعات بیلان آب، مطالعه موردی: تاقدیس نمک ـ کنگان منطقه خلیج فارس

احمدرضا کریمی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

حاجی کریمی

گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

سیروس شمشیری

گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران

یونس موسوی

گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران، کرج، ایران

h.karimi@ilam.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

چکیده

در برخی نواحی از حاشیه خلیج فارس، تاقدیس‌هایی با ساختار کارستی در مجاورت دریا قرار دارند که احتمال تخلیه آب شیرین از آن‌ها به دریا از طریق چشمه‌های زیردریایی (Submarine Groundwater Discharge – SGD) مطرح است. این پژوهش با هدف بررسی وجود یا عدم وجود SGD در منطقه مورد مطالعه و پاسخ به این سؤال اصلی که آیا سامانه‌های کارستی مجاور خلیج فارس در استان بوشهر، پتانسیل تخلیه آب به دریا از طریق چشمه‌های زیردریایی را دارند؟ انجام شده است. در این راستا، ابتدا اطلاعات اقلیمی، زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی تاقدیس نمک-کنگان به عنوان نزدیک‌ترین تاقدیس کارستی به دریا از سازمان‌های مرتبط جمع‌آوری شد. داده‌های بیلان آبی از منابع رسمی از جمله مثل شرکت سهامی آب منطقه‌ای، اداره کل هواشناسی و اداره کل شیلات بوشهر، و همچنین داده‌های سنجش‌ازدور از سنجنده‌های MODIS و Landsat 8 برای تحلیل تغییرات دمای سطحی آب (SST)، شوری و کلروفیل-a در دو بازه زمانی تابستان و زمستان گردآوری و پردازش شدند. همچنین، طی دو مرحله بازدید میدانی، مصاحبه‌های متعدد با حدود ۵۰ تن از ماهیگیران و بومیان منطقه صورت گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که هیچ نشانه‌ای از وجود SGD دائمی در منطقه وجود ندارد؛ داده‌های بیلان آبی تاقدیس نمک-کنگان نیز نشان‌دهنده عدم وجود مازاد منابع آب کارستی برای تخلیه به دریاست. در تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، هیچ گونه آنومالی حرارتی یا تغییرات آشکاری در الگوهای شوری و کلروفیل به جز یک مورد محدود در خلیج نایبند مشاهده نشد که به نظر می‌رسد مربوط به تخلیه موضعی آب‌های سفره آبرفتی باشد. محدودیت این مطالعه شامل عدم امکان نمونه‌برداری مستقیم از بستر دریا و همچنین نبود گمانه در منطقه جهت اندازه‌گیری دبی خروجی از هر بخش است. بنابراین، برای تأیید قطعی عدم وجود SGD، انجام مطالعات ژئوفیزیکی و ردیابی ایزوتوپی در آینده پیشنهاد می‌شود. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای مهمی برای سیاست‌گذاری مدیریت منابع آب در مناطق ساحلی خلیج فارس باشد.

واژه‌های کلیدی: *کارست، سنجش از دور، خلیج فارس، چشمه‌های زیردریایی، بوشهر*

۱- مقدمه

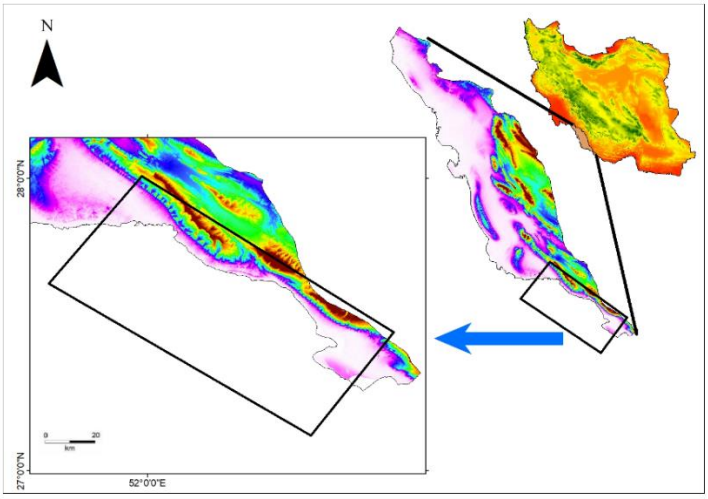
آب یکی از مهم‌ترین سرمایه‌ها و منابع حیاتی برای مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی محسوب می‌شود. بنابراین، ضروری است که تمام منابع آب شیرین در نقاط مختلف جهان، به دقت مورد ارزیابی واقع شوند. این موضوع با توجه

به اقلیم خشک و نیمه خشک کشور ایران، از اهمیت بیشتری برخوردار است (کریمی، ۱۴۰۳). از طرفی دیگر، تخلیه چشمه‌های شیرین زیرزمینی به دریا مورد بحث محققان بوده است. همچنین از گذشته بومیان روایت‌هایی مبنی تخلیه چشمه‌های شیرین به دریا مطرح کرده‌اند. در نتیجه این مطالعه در پاسخ به گمانه‌هایی که از دیرباز در رابطه با تخلیه آب زیرزمینی شیرین به دریا مطرح بوده می‌پردازد. دلیل انتخاب تاقدیس نمک کنگان به‌دلیل نزدیکی سازندهای کارستی به دریا، وجود اختلاف ارتفاع مناسب و ارتباط مستقیم تاقدیس نمک–کنگان با آب‌های ساحلی، به‌عنوان ناحیه‌ای مستعد برای تخلیه آب زیرزمینی انتخاب شده است. همچنین مطالعه بر روی کل سواحل خلیج فارس در یک مطالعه میسر نیست و مطالعات بیشتری را در یک بازه زمانی بسیار طولانی‌تر طلب می‌کند، لذا در این مطالعه بر روی تاقدیس نمک-کنگان تمرکز شده است. یکی از روش‌های پایش آب زیرزمینی، محاسبه بیلان می‌باشد که اطلاعات مهمی درباره وضعیت و تغییرات آبخوان‌ها ارائه می‌دهد (نعمتی منصور و همکاران، ۱۴۰۲). مطالعات زیادی در مورد برآورد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی و حجم ذخیره آبخوان انجام شده است (Aslam et al., 2021; Janardhanan et al., 2023; Weatherl et al., 2021). اندازه‌گیری و تعیین میزان تخلیه زیردریایی آب‌ها به دریا یا اقیانوس کاری بسیار دشوار است زیرا معمولاً این پارامتر به کمک محاسبات بیلان انجام می‌گیرد و دقت اندازه‌گیری‌ها بستگی به میزان دقت اندازه‌گیری سایر مولفه‌های بیلان مانند میزان بارش، تبخیرو تعرق، تخلیه به رودخانه ها و ... دارد (Zektser and Dzhamalov, 2007). تجربیات متعددی از بررسی و ارزیابی ناحیه‌ای و همچنین نقشه کردن تخلیه آب از خشکی به دریاها، دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها در مناطق مختلف جهان به دست آمده است و میزان تخلیه آب به دریاها، دریاچه ها و اقیانوس‌ها با روش‌های متداول کمی سازی شده است (Zektser and Dzhamalov, 2007). در حاشیه جنوبی کشور ایران، در مجاورت خلیج فارس و دریای عمان سازندهای متفاوت آهکی در یال‌های جنوبی رشته‌کوه‌های زاگرس در حاشیه ساحل دریا قرار دارند که با توجه به گسلش‌ها و ساختارهای عرضی فراوانی که راستای عمومی شمال غربی-جنوب شرقی زاگرس را قطع کرده‌اند، پتانسیل تخلیه آب آن‌ها به دریا وجود دارد (Kastning, 1977). ایزدپناهی (۱۳۸۹) پایش‌هایی جهت بررسی تخلیه آب به درون آب‌های خلیج فارس زیر نظر مراکز سواحل بوشهر انجام داده است. همچنین امینی نکو و سیمایی (۱۳۸۰) (نقل شده از افشار سیستانی، ۱۳۹۳) معتقد است که جریانی دائمی از آب شیرین در زیر خلیج‌فارس به‌سوی عربستان و دیگر کشورهای خلیج‌فارس وجود دارد. Aggarwal و همکاران (۲۰۰۴) نتیجه کاربرد ایزوتوپ‌های محیطی در بررسی هیدرودینامیک چشمه‌های زیردریایی سواحل جنوب شرقی سیسیل ایتالیا را منتشر کردند. محتوای ایزوتوپی دوتریوم و اکسیژن هجده چشمه‌های زیردریایی مزبور ترکیبی میانگین از چشمه‌های کارستی و آب دریا در این منطقه به دست آمد. سن آب‌های زیرزمینی در سازندهای کربناته در جنوب شرق سیسیل نیز بین دو تا سی سال برآورد شد. Burnett و همکاران (۲۰۰۶) به طور جداگانه کاربرد ایزوتوپ‌های رادیوم و رادون را در ارزیابی تخلیه زیردریایی این منطقه مورد بررسی قرار دادند. چشمه‌های زیردریایی در دامنه‌های زیرسطحی دریا و در نواحی نزدیک به جزایر و همچنین در شیب‌های تند کوه‌هایی که به دریا می‌رسند مانند جزایر هاوایی و جزایر فیلیپین، پراکنده هستند (Zektser and Dzhamalov, 2007). دبی چشمه‌های زیردریایی در دریای مدیترانه به قدری زیاد هستند که به راحتی در داخل آب دریا تشخیص داده شده‌اند و جریان آب شیرین را از داخل آب شور دریا ایجاد کرده‌اند (Zektser and Dzhamalov, 2007). امروزه استفاده از روش‌های جدید همچون روش‌های سنجش از دور جهت بالا بردن دقت در تعیین مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (IWPRI, 2014). مطالعات موردی زیادی نیز در سال‌های اخیر جهت شناسایی مناطق محتمل تخلیه آب زیرزمینی به دریا صورت گرفته است. در مطالعه‌ی George و همکاران (۲۰۲۳) در سواحل غربی هند، مناطق محتمل تخلیه آب زیرزمینی زیردریایی (SGD) و نفوذ آب شور

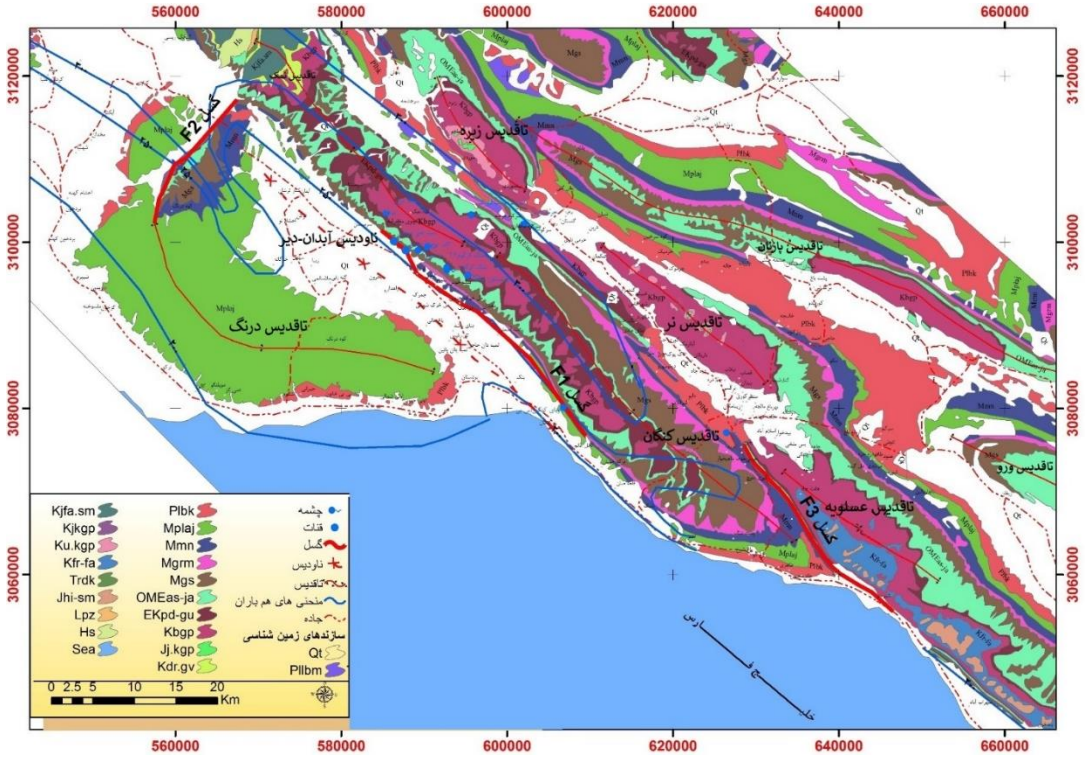
(SWI) با تلفیق داده‌های دمای سطح دریا از تصاویر ماهواره‌ایLandsat 8 ، نوسانات سطح ایستابی و پارامترهای کیفیت آب شناسایی شدند. در این بررسی، داده‌های دمایی دریا برای آشکارسازی SGD در مناطقی با تضاد حرارتی بالا میان آب دریا و آب تخلیه‌شده به کار گرفته شد. همچنین، سطوح بالا در تراز آب زیرزمینی و هدایت الکتریکی پایین با SGDو سطوح پایین آب زیرزمینی همراه با غلظت بالای کلرید، به عنوان شاخص‌های SWI معرفی شدند. همچنین در مطالعه Ye و همکاران (۲۰۲۴)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، تغییرات زمانی و مکانی تخلیه آب زیرزمینی زیردریایی (SGD) در خلیج دایا چین بررسی شده است. تحلیل دمای سطحی آب دریا (SST) از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ نشان داده که تخلیه SGD در تمامی خط ساحلی خلیج رخ می‌دهد و شدت آن وابسته به فصل بوده و در تابستان و پاییز بیشتر است. این پژوهش کاربرد مؤثر سنجش از دور حرارتی در بررسی تعاملات خشکی–دریا را تأیید می‌کند. در مطالعه‌ای مشابه که توسط Kunnavil و همکاران (۲۰۲۵) در سواحل جنوب‌غربی هند انجام شد، مناطقی از تخلیه آب زیرزمینی زیردریایی (SGD) با استفاده از نمونه‌برداری‌های میدانی گسترده در فواصل ۱۰ کیلومتری شناسایی و تأیید گردید. از روش‌های متنوعی شامل تحلیل‌های بیوشیمیایی، ژئوفیزیکی (ERT) و تصاویر ماهواره‌ای (Landsat-8) در باند مادون قرمز حرارتی برای شناسایی آنومالی‌های دمایی مرتبط با SGD استفاده شد. در نتیجه، ۹ ناحیه مستعد تخلیه آب زیرزمینی تعیین و اعتبارسنجی گردید. مطالعات فرزین و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از نقشه ناهنجاری دمایی استاندارد به تعیین نواحی احتمالی تخلیه آب زیرزمینی دریایی به سواحل خلیج فارس در استان بوشهر پرداخته‌اند. در این پژوهش با استفاده از داده‌های حرارتی لندست ۸ و تحلیل ناهنجاری دمایی استاندارد (STA)، نواحی احتمالی تخلیهٔ آب زیرزمینی زیردریایی (SGD) در سواحل استان بوشهر شناسایی شد. نتایج نشان داد مجموعاً ۲۲٬۳۱۷ هکتار سطح تخلیهٔ احتمالی وجود دارد که بیشترین آن در خلیج نایبند، خور خان و سواحل بوشهر و هندیجان است. این سطوح بیانگر اهمیت بالای تخلیهٔ زیرسطحی به خلیج فارس بوده و نیازمند بررسی‌های کمّی دقیق‌تر هستند. دلدار (۱۳۹۲) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مکان‌یابی چشمه‌های آب شیرین خلیج‌فارس، تصاویر سنجندهٔ ETM+ ماهواره لندست ۷ را به کار گرفت. نتایج وی در تحلیل، تصاویر نشان‌دهندهٔ ناهنجاری‌های دمایی سطح آب دریا تا ۴ درجه سانتیگراد در مناطق مل گنزه خور موسی و اطراف کشور بحرین است. هدف از این مطالعه با استفاده از تکنیک های هیدروژئولوژی مانند بررسی بیلان و زمین شناسی و همچنین با بکارگیری تکنیک‌های سنجش از دور به بررسی وجود چشمه های زیردریایی در ناحیه عسلویه بوشهر که یک تاقدیس کارستی در مجاور خلیج فارس قرار گرفته است پرداخته شده است. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. از آنجا که هدف از این مطالعه بررسی تخلیه زیردریایی چشمه‌های کارستی می‌باشد، مناطقی از استان بوشهر که از سفره‌های کارستی تشکیل گردیده و در فاصله کمی از دریا قرار گرفته‌اند، شامل محدوده کنگان تا خلیج نایبند از استان بوشهر، به همراه زمین شناسی منطقه (شکل ۲) مورد بررسی قرار گرفته است.

از نظر تقسیمات جغرافیایی و آب و هوایی خلیج فارس در منطقهٔ آب و هوای گرم و خشک تا نیمه استوایی واقع است (کریمی و کریمی، ۱۴۰۳) دمای هوا در زمستان می تواند تا صفر درجه و در تابستان تا ۵۰ درجه سانتیگراد برسد (Swift and Bower, 2003) که باعث بالا رفتن دمای سطحی تا بیش از ۳۰ $^{\circ}C$ می‌شود. این تغییرات فصلی مربوط به دمای خلیج فارس و اقیانوس هند می‌باشد (Emery, 1956). میانگین بلند مدت دمای هوا در بوشهر ۲۶/۳ درجه سانتیگراد و متوسط بلند مدت بارش حدود ۲۳۰ میلیمتر در سال می‌باشد (سازمان هواشناسی بوشهر، ۱۴۰۰). از نظر زمین شناسی منطقه شامل سازندهای آغاجاری، گروه فارس، آسماری – جهرم، پابده – گورپی، بنگستان شامل سازندهای کژدمی، سروک و ایلام به صورت تفکیک نشده و با علامت (KBgp) و گروه خامی در نقشه (شکل ۲) نشان داده شده

است. نماد سازندهای روی نقشه عبارتند از: آبرفت (Qt)، بختیاری(Plbk)، آغاجاری(Mplaj)، میشان (Mmn)، گوری (Mgrm)، گچساران (Mgs)، آسماری – جهرم (OMEas-ja، پابده – گورپی (EKpd-gu)، گروه بنگستان (Kbgp)، داریان – گدوان (Kdr.gv)، داریان – فهلیان (Kdr.fa)، فهلیان – سورمه (Kjfa.sm)، هیث - سورمه (Jhi-sm) .



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه جهت بررسی های سنجش از دور (سواحل استان بوشهر)
Figure 1: Study area for remote sensing investigations (Bushehr Province coasts)



شکل ۲- نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه
Figure 2: Geological map of the study area

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- هیدروژئولوژی و بیلان

برای شناسایی مناطقی که تخلیه آب شیرین به دریا دارند، بر اساس بازدیدهای میدانی و جمع‌آوری داده‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی از محدوده مورد مطالعه، اطلاعات جامعی از تخلیه آب از سفره‌های کارستی به داخل دریا به دست می‌آید. این بازدیدها به‌منظور تعیین دقیق موقعیت و شرایط هیدروژئولوژیکی چشمه‌های زیردریایی انجام شده و الگوهای تخلیه آب زیرزمینی از سازندهای کارستی مورد ارزیابی قرار گرفته است. یکی از روش‌های غیرمستقیم برای کنترل تخلیه آب سازندهای کارستیِ تاقدیس‌های مجاور دریا، محاسبه بیلان آبی آن سازندهاست. این بیلان به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم در هیدروژئولوژی، برای برآورد میزان آب ورودی و خروجی به سفره استفاده می‌شود. در این پژوهش، بیلان آبی با هدف شناسایی و تخمین پتانسیل تخلیه آب تاقدیس‌های مجاور به دریا مورد محاسبه قرار گرفت. در این مطالعه، یکی از مهم‌ترین تاقدیس‌هایی که ارتباط مستقیم با دریا دارد، تاقدیس نمک است که ادامه آن به‌عنوان تاقدیس کنگان شناخته می‌شود. نزدیکی سازندهای کارستی به دریا و وجود اختلاف ارتفاع کافی میان آن‌ها، شرایط مناسبی برای تخلیه آب زیرزمینی به دریا فراهم کرده است. به همین دلیل، این تاقدیس به‌عنوان کانون اصلی مطالعات تخلیه آب در این پژوهش انتخاب شده است. برای انجام محاسبات بیلان، ورودی‌ها و خروجی‌های مختلف آب در سیستم کارستی مورد بررسی قرار گرفتند. ورودی‌ها شامل بارش‌های جوی، ورودی زیرزمینی از پهنه‌های مجاور و ورودی‌های سطحی می‌باشد. خروجی‌ها شامل خروجی از چشمه‌ها، چاه‌ها و قنوات، تخلیه به رودخانه‌های سطحی، تخلیه زیرزمینی به پهنه‌های مجاور، تبخیر از منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

برای محاسبه بیلان آبی پهنه‌های کارستی، از رابطه کلی بیلان آب زیر استفاده می‌شود:

$$B=I-O$$ (رابطه ۱)

که در آن:

B نشان‌دهنده تغییرات حجم آب در سفره کارستی است.

I مجموع ورودی‌های آب به سیستم شامل بارش، ورودی‌های سطحی و زیرزمینی است.

O مجموع خروجی‌ها شامل تخلیه از چشمه‌ها، قنوات، رودخانه‌ها، تبخیر و تخلیه زیرزمینی به پهنه‌های مجاور است.

حجم ورودی بارش را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$V=P\times A\times R$$ (رابطه ۲)

که در آن: P میزان بارندگی منطقه (میلی‌متر در سال)، A مساحت پهنه کارستی (متر مربع) و R ضریب نفوذ بارش به سفره کارستی (درصد) است. همچنین، مجموع خروجی‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$O = Qspring + Qwells + QQanat + Qevaporation + Qunderground\ discharge$$ (رابطه ۳)

که هر یک از این مقادیر بر اساس داده‌های میدانی و تحلیل‌های هیدرولوژیکی برآورد می‌شود.

۲-۲- روش‌شناسی ماهواره‌ای

اختلاف دمای مناطق دارای جریان‌های زیرزمینی تخلیه‌شده در دریا نسبت به آب‌های اطراف به این دلیل است که آب شیرین زیرزمینی، به دلیل چگالی کمتر نسبت به آب شور، به شکل پلوم‌های شناور بر سطح دریا قرار می‌گیرد. همچنین دمای جریان خروجی از زمین کمتر از دمای آب دریای محیط اطراف است. به‌طورکلی تصویربرداری مادون قرمز حرارتی راهکاری مؤثر در شناسایی چشمه‌های زیردریایی است. این تکنیک بر مبنای گرادیان حرارتی بین آب زیرزمینی و شرایط سطحی محیط استوار است؛ به‌طوری‌که در ارزیابی سریع نواحی وسیع و کسب اطلاعات در مورد نواحی ویژه تخلیه آب زیرزمینی می‌تواند بسیار تأثیرگذار باشد. داده‌های ماهواره مودیس (Modis satellite) که علاوه بر دسترسی رایگان، به‌روز نیز هستند یکی از بهترین منابع ارائه تصویر با تفکیک‌پذیری متوسط می‌باشد. با این وجود، استفاده از این نوع داده‌ها با کیفیت متوسط تنها در سطوح وسیع توصیه می‌شود. در این مطالعه از داده‌های مختلف سنجش از دور و پلتفرم‌های تحلیلی برای بررسی پارامترهای اقیانوسی و

تغییرات محیطی در بازه‌های زمانی متفاوت استفاده شده است. خلاصه‌ای از روش‌ها و منابع داده‌ای مورد استفاده به شرح زیر است:

ماهواره MODIS روی ماهواره Aqua: داده‌های ماهواره MODIS(اسپکترورادیومتر تصویربرداری با قدرت تفکیک متوسط) از ماهواره Aqua برای سه بازه زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها در قالب تصاویر نقشه‌برداری استاندارد سطح سه (L3SMI)، شامل پارامترهایی مانند غلظت کلروفیل، دمای سطح دریا (Sea Surface temperature-SST) و نرخ جذب نور بودند. دمای سطح دریا (SST) با استفاده از دو باند مادون قرمز (طول موج‌های ۳.۹۳ و ۱۲ میکرون) محاسبه شد و تغییرات دما در طول زمان مورد بررسی قرار گرفت.

داده‌های ماهواره ASTER: ماهواره ASTER که بر روی ماهواره Terra قرار دارد، با استفاده از باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک(VNIR) و مادون قرمز حرارتی (TIR)، تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا ارائه می‌دهد. این داده‌ها برای مطالعات تغییرات دمای سطح و مدل‌سازی ارتفاع رقومی (DEM)استفاده شد. داده‌های L1T ماهواره ASTER پس از پردازش اولیه شامل کالیبراسیون و تبدیل به واحدهای فیزیکی مورد استفاده قرار گرفتند.

تحلیل‌های محیط Google Earth Engine: به‌منظور تحلیل داده‌ها و پردازش در مقیاس بزرگ، از پلتفرم Google Earth Engineاستفاده شد. این پلتفرم، دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای را فراهم کرده و امکان کدنویسی در محیط جاوا اسکریپت برای انجام تحلیل‌های دقیق و سریع داده‌های محیطی و اقیانوسی را مهیا می‌کند.

بررسی پارامترهای کلیدی: دمای سطح دریا: خروج چشمه‌های آب به دریا معمولا باعث ناهنجاری در سطح دریا خواهند شد. روند تغییرات دمایی در سطح آب بدین گونه است که معمولا محل خروج آب چشمه‌ها در تابستان سردتر و در زمستان گرمتر از آب دریا است. دمای سطح دریا (SST)، داده‌های MODIS و الگوریتم‌های پردازش تصویر برای تحلیل تغییرات دمای سطح دریا و ارتباط آن با شرایط اقلیمی و زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گرفت. ناهنجاری حرارتی به‌صورت تفاوت بین دمای سطح دریا سطوح گرم‌تر در تصاویر حرارتی، رنگی روشن‌تر از سطوح خنک‌تر دارند، در هر پیکسل با مقدار دمای میانگین کل تصویر تعریف می‌شود (Wilson and Roha, 2016) که از رابطه (۴) زیر بدست می‌آید:

$$TA=Tp-\bar{T} \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

که TA ناهنجاری حرارتی بر حسب درجه سانتیگراد، Tp دمای هر پیکسل بر حسب درجه سانتیگراد و مقدار $\bar{T}$ دمای میانگین سطح دریا بر حسب درجه سانتیگراد است.

غلظت کلروفیل: از داده‌های MODIS برای اندازه‌گیری غلظت کلروفیل دریا به عنوان شاخصی جهت فعالیت فیتوپلانکتون استفاده شد.

شوری آب: با استفاده از رابطه زیر (رابطه ۵) و داده‌های بازتاب نور در طول موج‌های ۴۸۸ و ۵۳۱ نانومتر از داده‌های MODIS، میزان شوری آب محاسبه گردید:

(رابطه ۵)

$$\text{Salinity (psu)} = 37 - 0.003\ (Rrs(488) + Rrs(531)) / (1 - 0.054\ (Rrs(488) / Rrs(531)))$$

که در این رابطه Rrs_488 و Rrs_531 ضریب انعکاس نور آب در دو طول‌موج ۴۸۸ و ۵۳۱ نانومتر هستند که توسط ماهواره MODIS به دست آمده‌اند. در این رابطه، مقادیر a=37، b=0.003 و c=0.054 برای محاسبه‌ی شوری استفاده شده‌اند. این روش‌امکان بررسی دقیق تغییرات محیطی و اقیانوسی را فراهم کرده و ابزارهای مهمی برای تحلیل داده‌های سنجش‌از دور در این مطالعه ارائه دادند.

۳- نتایج پژوهش

۳-۱- نتایج محاسبات بیلان

بیلان اجمالی تاقدیس نمک (کنگان): تاقدیس نمک که در ادامه بطرف جنوب شرق به دریای خلیج فارس متصل می‌شود به نام تاقدیس کنگان نیز معروف می‌باشد. بررسی بیلان اجمالی این تاقدیس و همچنین بررسی رابطه آن با دشت مجاور آن می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد وجود آب‌های مازاد و تخلیه آن‌ها به دریا بصورت چشمه‌های زیردریایی ارائه نماید. به همین منظور یک بیلان اجمالی از سازندهای کارستی این پهنه ارائه می‌گردد. مطابق با تمامی معادلات

بیلان، مولفه‌های ورودی و خروجی سازندهای کارستی این تاقدیس مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. تنها مولفه ورودی به این تاقدیس، بارش‌ها و نزولات جوی می‌باشد و این تاقدیس امکان تغذیه از تاقدیس‌های مجاور را ندارد.

مؤلفه‌های تغذیه آبخوان کارستی: برای بررسی میزان تغذیه از بارش‌های منطقه به سازندهای کارستی این تاقدیس نیاز به محاسبه مساحت سازندهای تاقدیس که با دریا در ارتباط هیدروژئولوژیکی می‌باشند است. همانگونه که در بخش زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه عنوان شد، تاقدیس نمک بصورت یک تاقدیس تقریباً متقارن و مرتفع بوده و عملکرد سازندهای نفوذناپذیر در مرکز و هسته آن باعث قطع ارتباط هیدروژئولوژیکی یال شمال شرقی و جنوب غربی آن گردیده است. وجود چشمه‌هایی در یال شمال شرقی تاقدیس در منطقه باغان، جم و ریز و همچنین تغذیه دشت‌های مذکور (با عنایت به وجود چاه‌های آبرفتی متعدد در این دشت‌ها) شاهد این مدعاست. به همین منظور مجموع مساحت سازندهای کارستی این تاقدیس از محدوده محور تاقدیس به‌طرف جنوب محاسبه و در محاسبات بیلان مد نظر قرار گرفته شده است. جدول ۱ مجموع مساحت سازندهایی که پتانسیل کارستی شدن و تشکیل آبخوان کارستی را دارند به نمایش گذاشته است که با استفاده از روی نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شده است. در این جدول علاوه بر مساحت سازند، میزان بارش محدوده بر اساس منحنی‌های هم باران منطقه در سال ۱۳۸۸ نیز ارائه شده است. در برآورد میزان تغذیه سفره‌های کارستی از بارندگی پارامترهای مختلفی از قبیل نوع و میزان پدیده‌های کارستی، درز و شکاف و شکستگی و گسل‌ها، نوع، میزان و پراکنش بارش‌ها، پوشش خاک و پوشش گیاهی، شیب توپوگرافی، شیب لایه‌ها، جنس سازند و ضخامت لایه‌ها، دمای هوا و ... موثر هستند. موضوع و مسئله تبخیر در محیط‌های کارستی به واسطه قرار گرفتن سطح آب سفره در اعماق زمین (معمولاً بیشتر از ۱۰ متر)، باعث می‌گردد که تبخیر از منابع آب کارست به حداقل برسد اما عملکرد تبخیر بیشتر در فرایند نفوذ آب در هنگام تغذیه و همچنین زمان توقف آن در ناحیه اپی کارست یا ناحیه Subcataneous zone در نظر گرفته می‌شود (Sauter, 1992) که ممکن است آب مدت طولانی (حتی ماه‌ها) در خلل و فرج و درز و شکاف‌ها باقی بماند و پدیده تبخیر بر این آب‌ها اثر نماید. در واقع عملکرد تبخیر را در درصد نفوذ آب از بارش‌ها به سفره‌های کارستی در نظر می‌گیرند. با احتساب موارد فوق و بر اساس بازدیدهای به‌عمل آمده از منطقه مورد مطالعه و بر اساس تجربیات نگارندگان از دیگر نواحی کارستی کشور، مقدار درصد نفوذ برای سازند سروک و گروه بنگستان ۲۰ درصد، برای سازند آسماری ۱۵ و برای سازندهای میشان (بخش گوری) و بختیاری ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در دیگر مطالعاتی که در منطقه به انجام رسیده میزان درصد نفوذ از مقادیر فوق کمتر لحاظ گردیده و مقادیر فوق دست بالا در نظر گرفته شده است؛ به‌عنوان نمونه، در مطالعات مهندسین مشاور فارساب صنعت (۱۳۸۸ و ۱۳۹۵) مقدار نفوذ برای ارتفاعات به ترتیب ۱۰ و ۸.۶ درصد در نظر گرفته شده است. از آنجا که یکی از اهداف این پژوهش، یک بیلان اجمالی است، محاسبات بیلان برای میانگین ده سال، از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۸، محاسبه شده است.

لازم به ذکر است که آهک‌های کارستی منطقه به‌ویژه سازند آسماری که در حاشیه تاقدیس قرار دارد به‌وسیله گسل‌ها، شکستگی‌ها و یا آبراهه‌های فرسایشی بریده شده و پیوستگی ندارند، به همین دلیل چشمه‌های کارستی بزرگی در این ناحیه شکل نگرفته و تکه‌های مجزای آهکی بصورت جداگانه آب‌های خود را از طریق آبراهه‌هایی که از تاقدیس منشعب می‌شوند به دشت‌های مجاور تخلیه می‌کنند. هیچگونه ورودی دیگر از تاقدیس‌ها یا آبرفت های مجاور که آب آن‌ها بتواند وارد تاقدیس کنگان شود وجود ندارد.

مؤلفه‌های تخلیه بیلان آبخوان کارستی: مهمترین مولفه‌هایی که می‌توان جهت تخلیه سفره کارستی کنگان (نمک) در نظر گرفت شامل تخلیه از طریق چشمه‌ها و قنوات، تخلیه به آبرفت‌های دشت‌های مجاور، تخلیه زیرزمینی به تاقدیس‌های مجاور و دریا می‌باشد.

الف- تخلیه از طریق چشمه‌ها و قنوات: مشخصات و ویژگی‌های منابع آب منطقه به‌ویژه چشمه‌ها و قنوات در

جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که عنوان گردید، مجموع آبدهی (دبی) چشمه‌ها و قنواتی که از یال جنوب تاقدیس تخلیه می‌شوند ۳۶.۱ لیتر بر ثانیه و مجموع حجم تخلیه سالانه آن‌ها حدود ۱.۱ میلیون متر مکعب می‌باشد.

جدول ۱- مساحت، بارش متوسط، درصد نفوذ و حجم تغذیه سازندهای کارستی تاقدیس کنگان (نمک)

Table 1- Geological units of the drainage basin of Deir and Kangan plains

ردیف	نام سازند	مساحت (Km^2)	بارش متوسط (mm)	نفوذ بارش (٪)	حجم تغذیه (MM^3)
۱	سروک (گروه بنگستان)	۶۸.۶	۲۵۰	۲۰	۳.۴
۲	آسماری	۱۰۶	۲۵۰	۱۵	۴
۳	گوری	۵۸	۲۰۰	۱۰	۱.۱
۴	بختیاری	۱۸.۵	۲۰۰	۱۰	۰.۴
	مجموع تغذیه				۸.۹

جدول ۳- برخی مشخصات چشمه‌های موجود در محدوده مطالعاتی دیر و کنگان

Table 3: Some characteristics of the springs in the study area of Deir and Kangan

شماره	مختصات UTM		نام آبادی	نام چشمه	دبی (l/s)	EC (µS/cm)
	X	Y				
۱	۶۰۷۱۹۰	۳۰۸۰۱۱۰	کنگان	اوبای کنگان (بی بی)	۵	۴۶۸۰
۲	۵۹۵۶۳۸	۳۰۹۶۰۱۵	دوراهک	بیدستون تنگه	۱	۳۲۸
۳	۵۹۳۱۰۵	۳۰۹۶۹۴۷	مل خرک	تنگ گرگوم ۲	۰.۱	۱۵۲۱
۴	۵۹۳۱۰۰	۳۰۹۶۶۱۳	مل خرک	تنگ گرگوم ۱	۱.۵	۲۳۴۰
۵	۵۹۰۷۴۵	۳۰۹۹۴۴۵	تنگ خوش	پاریو تنگ خوش	۲.۵	۵۳۸۲
۶	۵۸۹۶۳۴	۳۰۹۸۹۹۱	سورو	آبگرم سورو	۵	۶۳۰۰
۷	۵۸۵۸۰۷	۳۱۰۳۵۲۵	لوهک	تنگ دوین	۸	۴۱۳۴
۸	۶۶۶۹۴۱	۳۰۴۳۳۶۸	بیدخون	بیدخون	۱۰	۱۱۰۰
۹	۶۷۰۴۸۷	۳۰۴۰۱۶۳	بزباز	بزباز	۲	۱۶۰۰
۱۰	۶۶۵۹۴۸	۳۰۴۰۹۷۹	بیدخون	آبگرم بیدخون	۸	۱۹۲۰۰
۱۱	۶۷۱۶۵۲	۳۰۴۰۴۱۵	کلات	کلات	۵	۱۷۰۰
۱۲	۶۸۱۰۳۵	۳۰۲۷۹۴۹	سهمو جنوبی	العین	۲	۱۲۸۰
۱۳	۶۲۶۸۲۰	۳۰۷۷۰۷۲	جم	پدری	۳	۵۸۰
۱۴	۵۹۶۰۶۱	۳۱۰۳۲۸۶		آب سردو (آب دورک)	۱	۷۰۰
۱۵	۶۰۲۳۶۶	۳۱۰۲۱۴۴	تشان	حرمه نارین	۳	۱۱۵۰

جدول ۴- برخی مشخصات قنوات دائمی موجود در محدوده مطالعاتی دیر و کنگان

Table 4: Some characteristics of the permanent qanats in the study area of Deir and Kangan

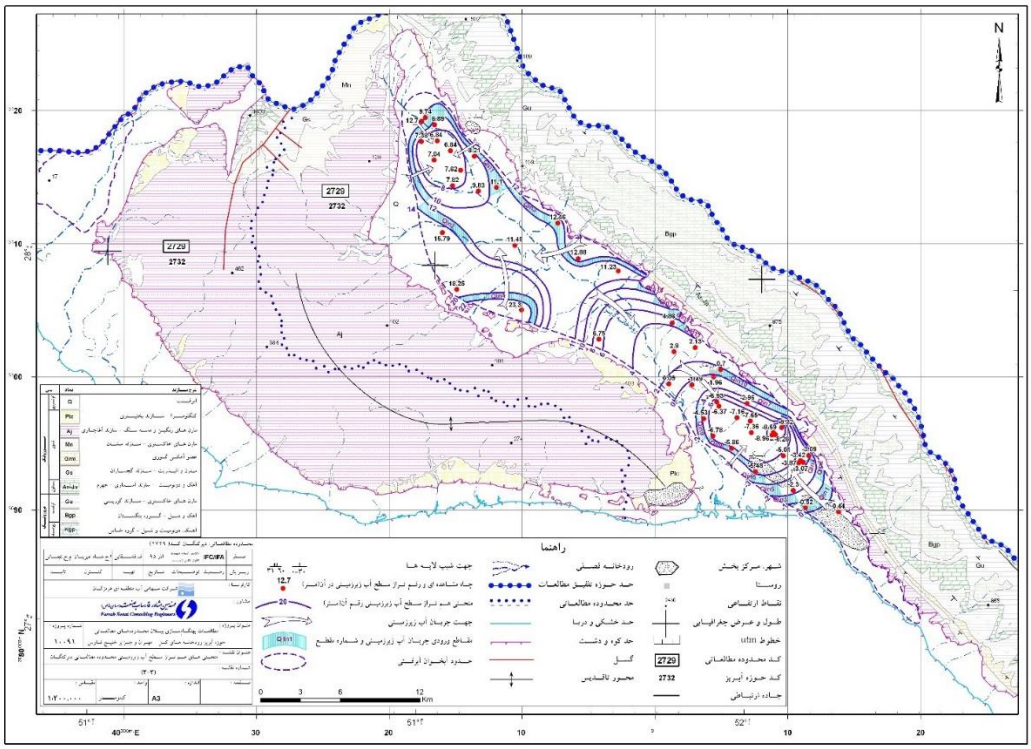
شماره	مختصات UTM		نام آبادی	مالک	عمق مادر چاه (متر)	دبی (l/s)	EC (µS/cm)
	X	Y					
۱	۵۸۷۷۸۶	۳۰۹۹۰۱۰	شطرود	اکبر منصوری منش	۳۵	۷	۵۳۲۰
۲	۵۸۶۳۵۵	۳۱۰۰۰۷۳	لوهک	سید علی مومنی	۱۰	۶	۵۳۰۰

ب- تخلیه آهک‌ها به دشت‌های مجاور: یکی از مولفه‌های مهم بیلان در هر منطقه تخلیه از سازندهای سخت و کارستی به دشت‌های مجاور بصورت تخلیه زیرسطحی بوده که در مناطقی که هیچ مانع هیدروژئولوژیکی برای ممانعت از تخلیه آب از سازندها به آبرفت های مجاور وجود ندارد آب‌ها به آبخوان آبرفتی تخلیه می‌شوند. در چنین مناطقی لازم است گمانه هایی در حدفاصل کوه و دشت حفاری گردند تا از طریق آن‌ها بتوان با در دست داشتن ضخامت آبرفت‌ها، گرادیان هیدرولیکی و میزان هدایت هیدرولیکی، به کمک معادله دارسی میزان تخلیه آب به آبرفت ها را محاسبه نمود. متاسفانه به دلیل فقدان گمانه در داخل پهنه‌های کارستی و یا در حدفاصل آهک‌ها و دشت‌های مجاور، محدودیت در ارائه میزان تخلیه سازندهای آهکی به آبرفت دشت مجاور ایجاد شده است. سطح و تراز آب گمانه‌ها در محاسبه و برآورد تخلیه و یا تغذیه آب از (یا به) سفره کارستی بسیار حائز اهمیت است و همچنین در ارزیابی تغییرات ذخیره استاتیک و حتی دینامیک نقش مهمی ایفا می‌نماید. بنابراین از این طریق امکان محاسبه میزان تخلیه به آبرفت‌های دشت مجاور از سازندهای سخت مقدور نمی‌باشد. مهندسین مشاور فارساب صنعت (۱۳۹۵) این پارامتر را به‌عنوان مجهول بیلان در نظر گرفته شده و میزان تغذیه از سازندهای کارستی به دشت مجاور را برآورد نموده‌اند. بر اساس مطالعات مهندسین مشاور فارساب صنعت (۱۳۸۸) میزان تخلیه به آبرفت‌های دشت دیر-کنگان از آهک‌ها و سازندهای سخت مجاور ۲۵ میلیون متر مکعب بوده که البته این حجم در برگیرنده کلیه آب‌های ارتفاعات اعم از کارستی و غیر کارستی بوده و این آب‌ها به دشت وارد می‌شوند. از تاقدیس کنگان به تاقدیس‌های مجاور تخلیه ای وجود ندارد زیرا این تاقدیس در کنار دریا قرار گرفته و تاقدیس دیگری که ارتفاع کمتری از این آبخوان داشته باشد در مجاورت آن وجود ندارد. تفاوت مقدار تخلیه به دست آمده در این مطالعه در مقایسه با مطالعه مهندسین مشاور فارساب صنعت (۱۳۸۸) این است که عدد ارائه‌شده در گزارش فارساب شامل کل ارتفاعات، اعم از کارستی و غیرکارستی بوده، در حالی‌که پژوهش حاضر صرفاً بخش مرتبط با سازندهای کارستی را تحلیل کرده است.

بررسی بیلان اجمالی: ارزیابی بیلان اجمالی تاقدیس کنگان نشانگر آنست که از مجموع ۸.۹ میلیون متر مکعب بارش نفوذ یافته در سازندهای کارستی و سخت منطقه، حدود ۱.۱ میلیون متر مکعب بطور مستقیم از طریق چشمه‌ها و قنواتی که از این تاقدیس سرچشمه می‌گیرند تخلیه شده و حدود ۷.۸ میلیون متر مکعب به‌طور غیر مستقیم و از طریق دره‌های متصل کننده تاقدیس به دشت دیر-کنگان وارد سفره آبرفتی می‌شود. این میزان تغذیه از طریق ارتفاعات به دشت کنگان عسلویه همچنان کمتر از میزان تغذیه‌ای است که مهندسین مشاور فارساب صنعت (۱۳۸۸) برای تغذیه آبخوان آبرفتی از ارتفاعات در نظر گرفته است. همچنین بررسی بیلان‌های محاسبه شده جهت آبخوان آبرفتی دشت دیر-کنگان نشان داده است که این آبخوان به دلیل اضافه برداشت، با کسری مخزن نیز مواجه بوده و میزان سالانه این کسری قریب ۵ میلیون متر مکعب می‌باشد (شرکت آب منطقه‌ای بوشهر). این روند کاهشی در دیگر دشت‌های مجاور تاقدیس‌های منطقه مانند دشت دیر-کنگان نیز وجود دارد). نکته دیگر آن است که تراز آب زیرزمینی در محدوده‌هایی از آبخوان کنگان قریب ۸ متر (مهندسین مشاور فارساب صنعت، ۱۳۸۸ مطابق شکل ۳) و بر اساس آخرین مطالعات (مهندسین مشاور کاواب، ۱۴۰۰) حدود ۱۲ متر (مطابق شکل ۴) پایین‌تر از تراز دریا بوده و باعث ایجاد یک گرادیان منفی از دریا بطرف سفره ساحلی شده و یکی از عوامل شوری دشت کنگان نیز معرفی گردیده است.

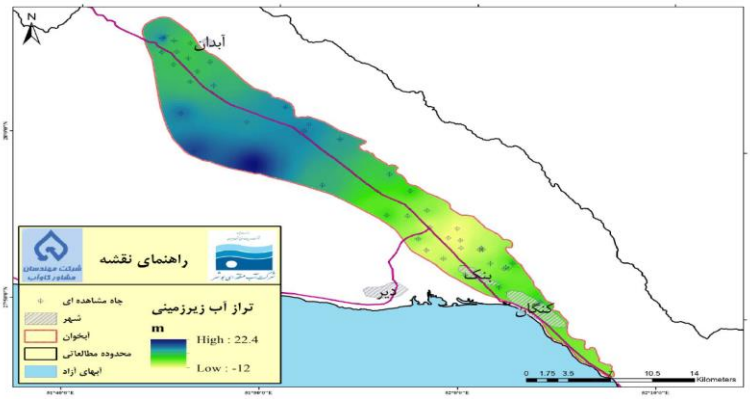
جمع بندی بخش بیلان آب‌های زیرزمینی و بررسی‌های هیدروژئولوژیکی تاقدیس نمک – کنگان نشانگر پتانسیل پایین تخلیه آب از آهک‌ها بهطرف دریا بصورت متمرکز و بهصورت چشمه‌های زیردریایی می‌باشد. در مقایسه با مطالعاتی نظیر Aslam و همکاران (۲۰۲۱) در پاکستان که با استفاده از بیلان آبی نشان دادند مناطق دارای تغذیه خالص می‌توانند پتانسیل تخلیه به سطح را داشته باشند، روشن

می‌سازد که وجود تغذیه به‌تنهایی شرط کافی برای تخلیه زیردریایی نیست.



شکل ۳: نقشه هم پتانسیل آب زیرزمینی دشت کنگان (مهندسین مشاور فارساب صنعت، ۱۳۸۸)

Figure 3: Groundwater potential map of Kangan Plain (Farsab Sanat Consulting Engineers, 2009)



شکل ۴: پهنه بندی تراز آب زیرزمینی در دشت دیر کنگان برای مهرماه ۱۳۹۴ (مهندسین مشاور کاواب، ۱۴۰۰، نقل از کریمی و کریمی، ۱۴۰۳).

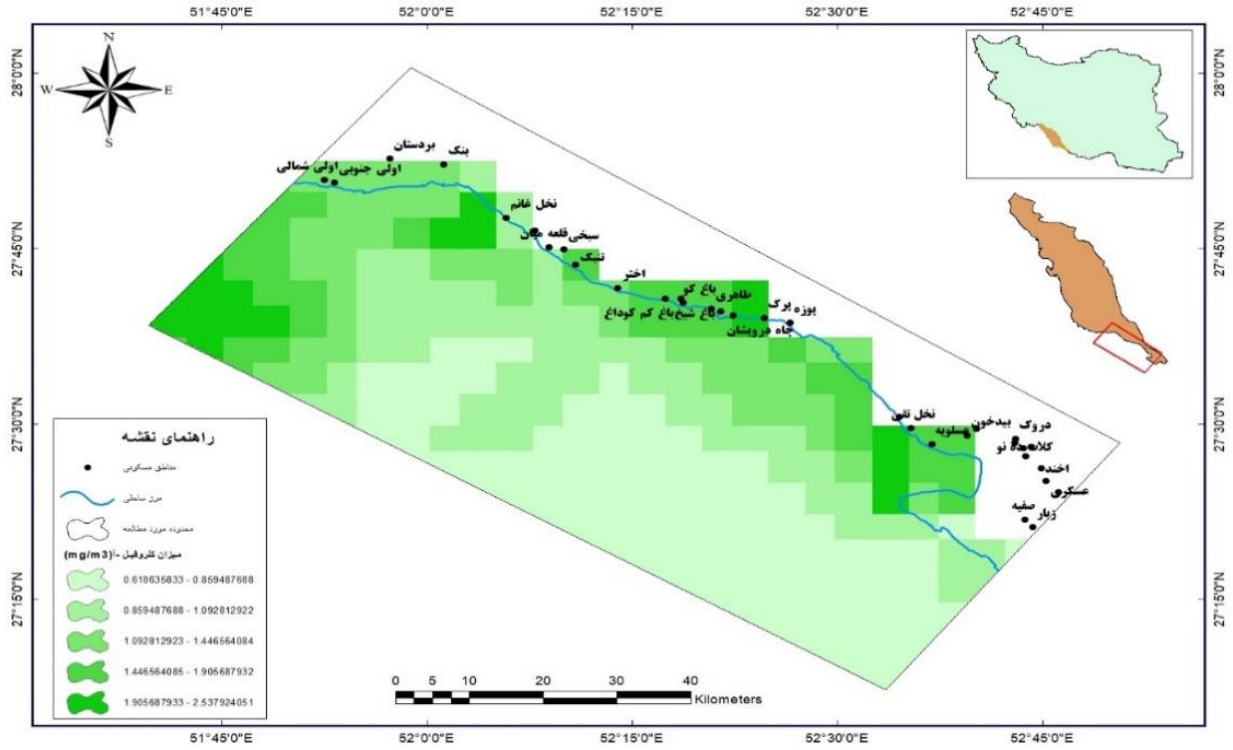
Figure 4: Groundwater level zoning in Deir-Kangan Plain for October 2015 (Kavab Consulting Engineers, 2021, cited from Karimi & Karimi, 2024)

۳-۲- نتایج مطالعه تصاویر ماهواره‌ای

در حاشیه ساحل خلیج فارس تنها محدوده‌ای که آهک‌های کارستی در مجاورت دریا قرار دارند، محدوده شرقی استان بوشهر در محدوده کنگان تا عسلویه بوده، به همین دلیل این منطقه جهت انجام پژوهش انتخاب گردید. سنجش از دور حرارتی: یکی از روش‌های تشخیص جریان آب زیرزمینی زیردریایی (SGD)، استفاده از سنجش‌ازدور برای بررسی دمای سطح دریا و شناسایی اختلاف دمای نواحی دارای تخلیه زیردریایی است. این روش بر اساس تفاوت چگالی و دمای آب زیرزمینی با آب دریا عمل می‌کند، زیرا آب زیرزمینی شیرین به‌صورت پلوم‌های شناور روی آب شور قرار گرفته و دمای آن معمولاً کمتر است. تصویربرداری حرارتی مادون‌قرمز از ابزارهای مهم در شناسایی این نواحی محسوب می‌شود که با نشان دادن ناهنجاری‌های دمایی، مکان‌های تخلیه را در مقیاس بزرگ مشخص می‌کند. تداوم حضور لکه‌های دمایی در تصاویر ماهواره‌ای نشان‌دهنده پایداری جریان‌های زیرزمینی است و بررسی‌های بعدی مانند استفاده از تصاویر هوایی با تفکیک‌پذیری بالا، نمونه‌برداری‌های میدانی و سنجش‌های ایزوتوپی برای تعیین منشأ و کیفیت آب ضروری است. تصاویر ماهواره‌ای مانند مودیس و لندست، به دلیل دسترسی آسان و پوشش وسیع، برای شناسایی اولیه مناطق پتانسیل تخلیه آب زیرزمینی مناسب هستند، اما تعیین مکان دقیق چشمه‌ها نیازمند تصویربرداری هوایی با وضوح بالا و بررسی‌های میدانی است. این رویکرد ترکیبی امکان کاهش هزینه‌ها و زمان را فراهم کرده و می‌تواند مناطق خاصی مانند سواحل خلیج‌فارس را با دقت بیشتری مورد ارزیابی قرار دهد.

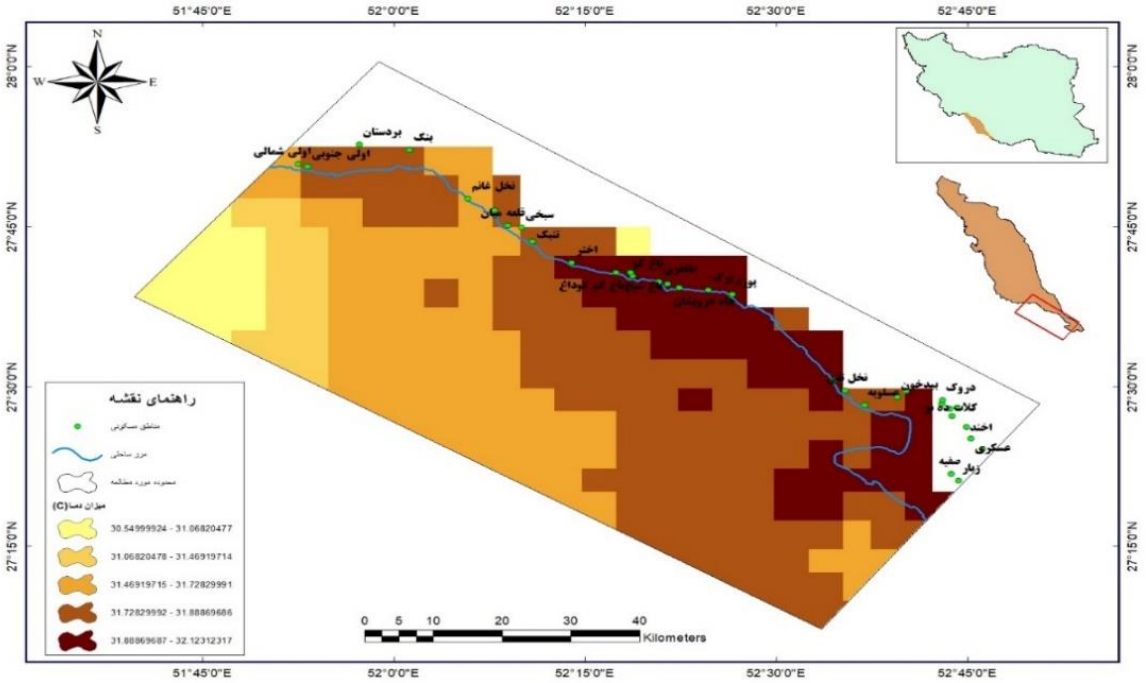
برآورد دمای سطح دریا، کلروفیل - آ و شوری در تعیین نواحی پتانسیل SGD: ویژگی‌های دمایی، کلروفیل - آ، شوری داده‌های مکانی-زمانی ماهواره‌ای در فاصله ۵۰ کیلومتری از ساحل در تصاویر ۷ تا ۹ ارائه شده است. سیستم‌های سنجش از دور مورد استفاده برای تعیین محل تخلیه آب زیرزمینی به دریا یا دریاچه، شامل تصاویر هوایی با تفکیک‌پذیری بالا (Lewandowski et al., 2013)، تصویربرداری مادون‌قرمز هوایی دستی (Duarte et al., 2006)، و تصویربرداری حرارتی زمینی هستند. این روش‌ها اگرچه کارا و مؤثرند، اما بسیار پرهزینه بوده و قطعاً برای ارزیابی در مقیاس منطقه‌ای یا پایش پیوسته تخلیه آب زیرزمینی در پیکره‌های وسیع آبی مناسب نمی‌باشند. استفاده از تصاویر با کیفیت تفکیک‌پذیری متوسط می‌تواند به منظور تشخیص ناهنجاری‌های وسیع و یا اهمیت اولویت بیشتری از نظر زمان و هزینه نسبت و به تصاویر باکیفیت بالا داشته باشد؛ ازاین‌رو و باتوجه‌به وسعت زیاد محدوده مورد مطالعه از داده‌ها تصاویر مربوط به سال ۲۰۰۰ الی ۲۰۲۱ ماهواره ترا (ماهواره‌های مودیس و استر) جهت تعیین نقشه‌های دما، شوری و کلروفیل - آ سطح دریای خلیج‌فارس به‌منظور تعیین حدود احتمالی چشمه‌های آب شیرین زیردریایی در طول سواحل شرقی استان بوشهر استفاده شده است. دلیل انتخاب سه دوره زمانی مختلف، بررسی سری زمانی پارامترها در زمان‌های مختلف بوده که بتوان از روی آن‌ها وجود یا عدم وجود روند در داده‌های پارامترهای مختلف (دما، شوری و کلروفیل) را تشخیص داد. همچنین تصادفی نبودن یک پدیده در طول زمان را نشان می‌دهد؛ بدین صورت که آیا آن رخداد بصورت محدود و در یک سال خاص رخ داده است. تکرار شدن یک پدیده در طی زمان، نشانگر آن است که آن پدیده تصادفی نیست. علت انتخاب ماه‌های اردیبهشت و مهر به این دلیل است که این دو ماه معرف و بیانگر فصول تر و خشک در یک سیکل هیدرولوژی در نظر گرفته می‌شوند. تغذیه‌های فصل تر به آب‌های زیرزمینی پیوسته و اردیبهشت ماه معرف بالاترین تراز آب زیرزمینی در آبخوان و مهر ماه که در انتهای سال آبی قرار دارد، معرف پایین‌ترین سطح و تراز آب زیرزمینی محسوب می‌شوند و در این دو فصل، آنومالی‌های آب‌های زیرزمینی، بخصوص تغذیه و تخلیه، خود را بهتر نشان می‌دهند. نتایج حاصل از داده‌های شوری و کلروفیل - آ تفاوت محسوس و آشکار جهت تشخیص مناطق تخلیه احتمالی آب زیرزمینی نداشتند. در حالی‌که داده‌های حرارتی مؤثرتر بوده و نشان‌دهنده لکه‌هایی است که بالاترین میزان ناهنجاری حرارتی را با محیط اطراف خود دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ناحیه احتمالی در نزدیکی ساحل و فاصله بسیار

اندک از ساحل قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین ناحیه خلیج نای‌بند و حوالی عسلویه شناسایی گردید. همانطور که در شکل ۵ تا ۷ به عنوان مثال نقشه کلروفیل، دمایی و شوری سطح دریا در ماه مهر ۲۰۲۱ آورده شده است، عمده‌ی ناهنجاری‌های دمایی در محدوده شرق منطقه مشاهده می‌شود. بررسی این تصویر نشان‌دهنده آن است که دمای سطح آب در بعضی از نقاط ۲۵.۰۷ تا ۲۸.۹ درجه‌ی سانتی‌گراد متفاوت می‌باشد. بررسی این تصویر نشان‌دهنده آن است که دمای سطح آب در بعضی از نقاط ۲۹.۹ تا ۳۱.۳ درجه‌ی سانتی گراد متفاوت می‌باشد. به طور کلی دمای سطح آب در ماه مهر از شمال منطقه مورد مطالعه به سمت جنوب کاهش یافته، کمترین دما مربوط به نواحی جنوب منطقه و با فاصله از ساحل و بیشترین دما در نواحی ساحلی حوالی عسلویه، بیدخون، چاه درویشان، بندر طاهری و ده‌نو می‌باشد. دمای سطح آب در ماه مهر نسبت به ماه اردیبهشت ۲۰۰۰ بیشتر است. این روند تغییرات و پراکندگی دمایی تقریباً در کلیه سال‌های مطالعه مشابه هستند. به‌نظر می‌رسد که علت بالا بودن دما در نزدیک خط ساحلی، به دلیل عمق کمتر آب دریا در این محدوده و تاثیر پذیری دمای آب دریا از دمای بالای هوای محیط این منطقه است.



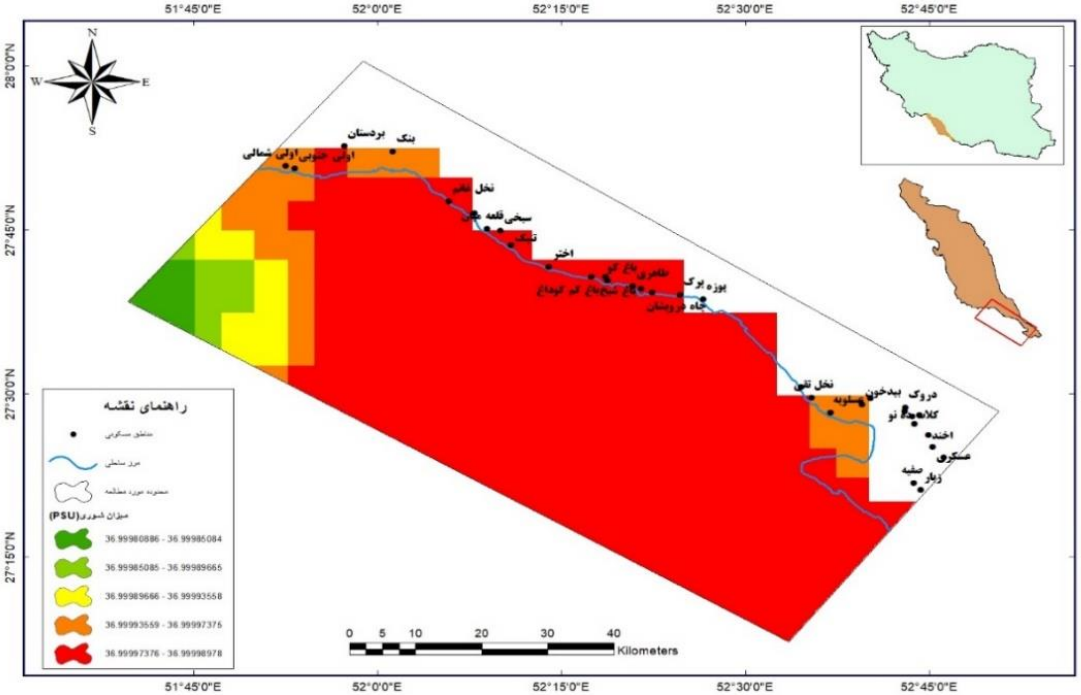
شکل ۵: نقشه میزان کلروفیل آب دریا در ماه مهر سال ۲۰۲۱

Figure 5: Map of sea surface chlorophyll concentration in October 2021



شکل ۶: نقشه میزان دمای آب دریا در ماه مهر سال ۲۰۲۱

Figure 6: Map of sea surface temperature in October 2021



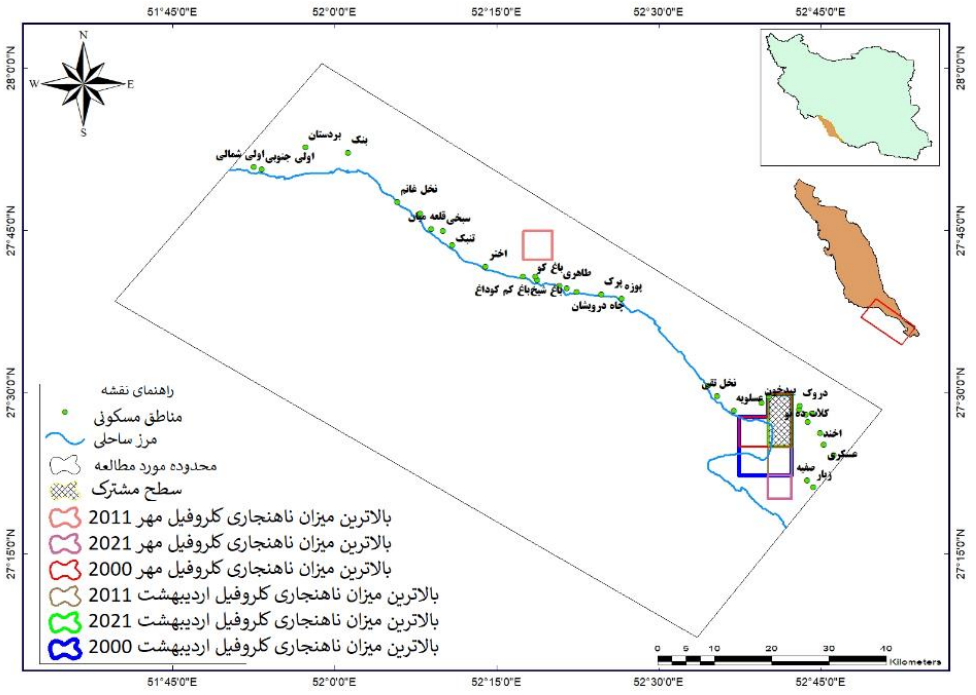
شکل ۷: نقشه میزان شوری سطح آب دریا در ماه مهر سال ۲۰۲۱

Figure 7: Map of sea surface salinity in October 2021

پراکنش غلظت کلروفیل–آ، شوری و دمای سطح آب دریا در محدوده منطقه مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است؛ به‌عنوان مثال، غلظت کلروفیل–آ سطح آب دریا در ماه مهر سال ۲۰۲۱ قابل مشاهده است. بررسی این تصویر نشان‌دهنده آن است که میزان غلظت کلروفیل - آ در سطح منطقه از ۰.۳۵ تا ۶.۴۴ میلی‌گرم در متر مکعب متفاوت می‌باشد. به طور کلی میزان غلظت کلروفیل – آ موجود در آب در شرق منطقه مورد مطالعه و در نواحی نزدیک به ساحل بیشتر است. هر چه از خط ساحلی فاصله گرفته می‌شود، از شمال به سمت جنوب، میزان غلظت کلروفیل - آ آب کاهش یافته و به صورت رنگ روشنتر در تصاویر قابل مشاهده می‌باشد ناهنجاری و آنومالی شوری در محدوده خط ساحلی منطقه مشاهده نمی‌شود. بررسی این تصویر نشان‌دهنده آن است که میزان شوری سطح آب از نقاط ۳۶.۹۹۹۹۲۶۲ تا ۳۶.۹۹۹۹۲۷۴۳ PSU متفاوت می‌باشد. اختلاف شوری در این تصاویر بین پیکسل‌ها مقدار بسیار ناجیزی است. به طور کلی میزان شوری آب دریا در سطح منطقه به صورت یکنواخت است. یکنواختی شوری آب دریا در سال‌های مختلف کم و بیش مشابه است که در شکل‌ها قابل مشاهده هستند. مشاهده ناهنجاری در زمان‌های مختلف از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا نشانگر وجود جریان احتمالی تخلیه‌ای به دریا می‌باشد. از این رو سطح مشترک تعریف و تعیین گردید. سطح مشترک علاوه بر کاهش خطاهای احتمالی در تعیین سطح ناهنجاری طی فرایندهای استخراج و تفسیر نقشه‌ها، نشان دهنده تداوم محدوده ناهنجاری بخصوص دمایی است که می‌تواند به عنوان محل تخلیه دائمی آب زیر زمینی به دریا تلقی شود. در این راستا تمامی سطوحی که در آن‌ها ناهنجاری مشاهده شد را به صورت پلی‌گون‌های جداگانه برای دوره زمانی سه گانه و نقشه‌های موضوعی استخراج گردید. سپس با وارد کردن تمامی سطوح با موضوع یکسان در یک نقشه و انجام محاسبات جداگانه برای هر کدام سطوح مشترک شوری، سطوح مشترک کلروفیل - آ و سطوح مشترک دمایی طی سال‌های ۲۰۱۱،۲۰۰۰ و ۲۰۲۱ در سواحل شرقی استان بوشهر مشخص شدند که اطلاعات حاصل از مساحت و سطح مشترک برای هر کدام از نقشه‌ها در طی این سه دوره شکل‌های ۸ تا ۱۰ به عنوان مثال نقشه سطوح مشترک دمایی استاندارد، سطوح مشترک شوری و کلروفیل - آ طی سال‌های ۲۰۱۱،۲۰۰۰ و ۲۰۲۱ را در سواحل شرقی استان بوشهر نشان می‌دهد.

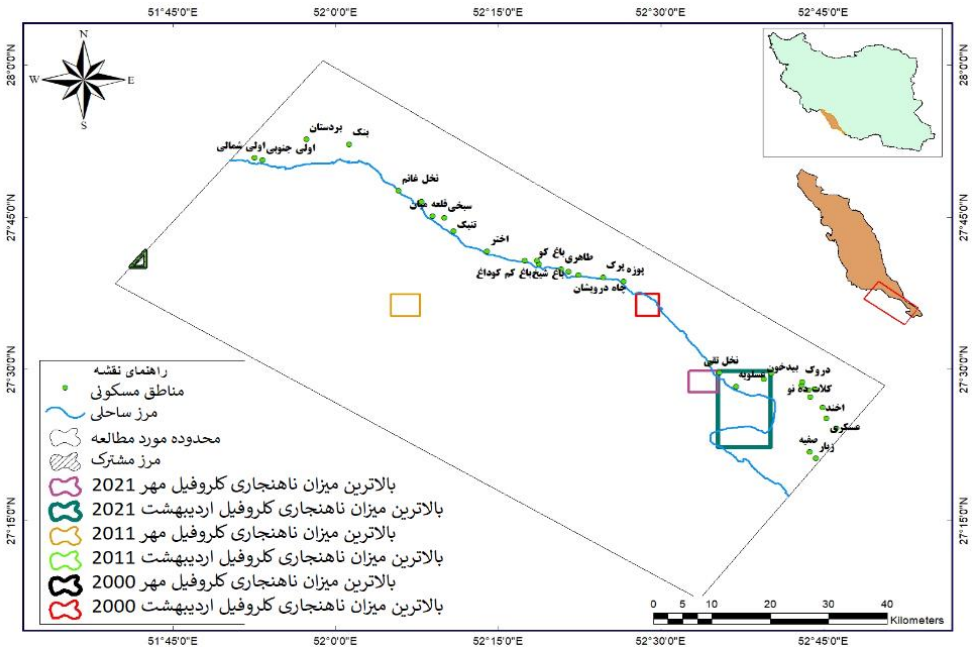
بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از هم‌پوشانی سه نوع نقشه تولیدشده، تنها هم‌پوشانی داده‌های دمای سطح مودیس در نواحی ساحلی و کم‌عمق مشاهده می‌شود، در حالی‌که محدوده‌های مشترک مربوط به داده‌های کلروفیل-آ و شوری در فواصل دورتری از ساحل قرار دارند. شکل ۱۰ نشان‌دهنده محدوده مشترک ناهنجاری حرارتی استاندارد در طی دوره زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ در سواحل خلیج نای‌بند در نزدیکی عسلویه است که دارای مساحتی برابر با ۳۵.۹۶ کیلومتر مربع می‌باشد.

نتایج حاصل از این پژوهش، به‌ویژه در شناسایی نواحی دارای آنومالی حرارتی محدود در خلیج نایبند، با نتایج حاصل از مطالعه فرزین (۱۳۹۶) که با داده‌های لندست ۸ در این منطقه مطالعه نموده است همخوانی و مطابقت دارد. با این حال، بررسی‌های تکمیلی این تحقیق شامل تحلیل بیلان آبی و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، نشان داد که این نواحی بیشتر احتمالاً ناشی از زهکش‌های آبرفتی و نه چشمه‌های کارستی متمرکز هستند و این نکته وجه تمایز اصلی پژوهش حاضر با مطالعه پیش‌گفته است. شکل ۱۱ نقشه نتایج حاصل از روابط بین باندهای دمایی به‌دست آمده سال ۲۰۱۲ با داده‌های باند ۱۳ را در سواحل شرقی استان بوشهر را نشان می‌دهد که دمای بالاتر خشکی نسبت به دریا را مشخص می‌کند؛ بیشترین دما در شمال‌غرب و کمترین دما در آب‌های جنوبی دور از ساحل با رنگ سبز تیره‌تر قابل مشاهده است دیده می‌شود.



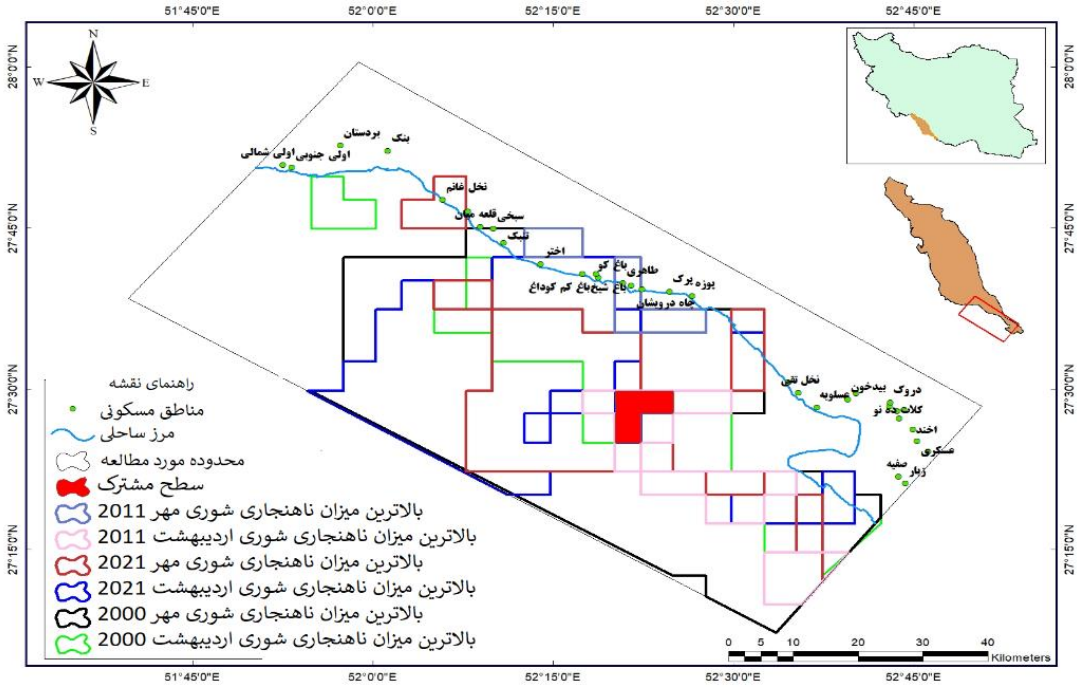
شکل ۸: نقشه محدوده سطح مشترک دمای استاندارد آب دریا طی ماه‌های اردیبهشت و مهر در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۱-۲۰۲۱

Figure 8: Standard sea surface temperature interface map during May and October for the period 2000-2011-2021



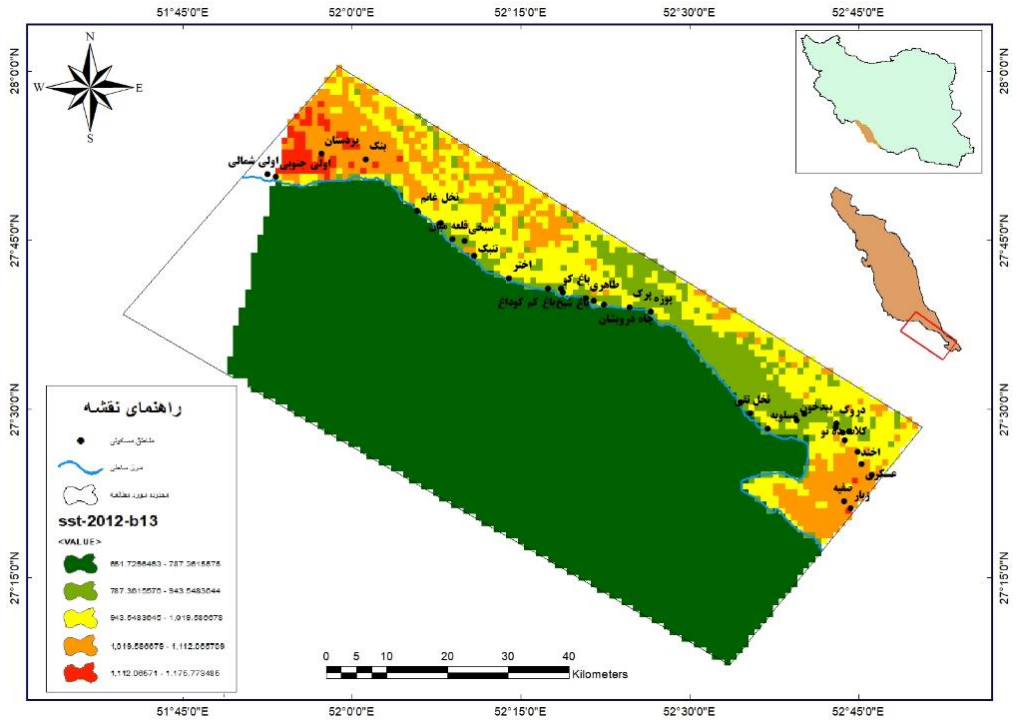
شکل ۹: نقشه محدوده سطح مشترک کلروفیل - آ استاندارد آب دریا طی ماه‌های اردیبهشت و مهر در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۱-۲۰۲۱

Figure 9: Standard sea surface chlorophyll-a interface map during May and October for the period 2000-2011-2021



شکل ۱۰: نقشه محدوده سطح مشترک شوری استاندارد آب دریا طی ماه‌های اردیبهشت و مهر در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۱-۲۰۲۱

Figure 10: Standard sea surface salinity interface map during May and October for the period 2000-2011-2021



شکل ۱۱: نقشه دمای محاسبه شده بر اساس باند ۱۳ ماهواره استر سال ۲۰۱۲

Figure 11: Temperature map calculated based on ASTER sensor band 13 in 2012

یافته‌های این پژوهش اگرچه در ابتدا نشانه‌هایی از وجود تخلیه آب زیرزمینی در ناحیه را مطرح کردند، اما در نهایت با رد این فرضیه، به روشن‌تر شدن درک ما از دینامیک هیدروژئولوژیکی سواحل کارستی جنوب کشور کمک کرده‌اند. در نتیجه، با تکیه بر داده‌های بیلان، تراز سطح آب، و تحلیل سنجش از دور، می‌توان اظهار داشت که برخلاف برخی گزارش‌های غیرعلمی محلی و برخی پیش‌فرض‌های قبلی (مانند پژوهش فرزین و همکاران، ۱۳۹۶)، شواهد کافی دال بر وجود چشمه‌های زیردریایی فعال در سواحل مورد مطالعه به‌دست نیامد و این پژوهش وجه تمایز خود را در رویکرد تلفیقی و مبتنی بر داده‌های چندمنظوره (بیلان، زمین‌شناسی، و سنجش از دور) نشان می‌دهد. اهمیت نتایج به‌ویژه در این است که برخلاف برخی گمانه‌زنی‌های محلی و پیش‌فرض‌های موجود، هیچ‌گونه تخلیه آشکاری از آب شیرین زیرزمینی به دریا در این منطقه شناسایی نگردید. این یافته در ارتباط مستقیم با اهداف و فرضیه‌های پژوهش است؛ زیرا هدف اصلی بررسی وجود چنین تخلیه‌ای بود و نتایج نشان دادند که علی‌رغم شرایط زمین‌شناسی مستعد، فرآیندهایی مانند زهکش‌های آبرفتی و تبادل محدود سطحی، مهم‌ترین مکانیسم‌های کنترل جریان زیرسطحی به دریا هستند و نه تخلیه‌های کارستی متمرکز. این موضوع نه‌تنها به درک بهتر سازوکارهای زیرسطحی در این نوع سازندهای ساحلی کمک می‌کند، بلکه از نظر مدیریتی نیز می‌تواند مانع از برداشت‌های نادرست و خوش‌بینانه از منابع آب زیرزمینی ناپیدا گردد. همچنین، این یافته‌ها اهمیت روش‌شناختی به‌کارگیری رویکردهای ترکیبی سنجش از دور، بیلان آبی و تحلیل زمین‌شناسی را در اعتبارسنجی فرضیات در مقیاس منطقه‌ای نشان می‌دهد. افزون بر آن، بر خلاف تحقیقاتی نظیر Burnett et al. (2006) و George et al. (2023) که به‌کمک داده‌های ماهواره‌ای ناهنجاری‌های حرارتی مشخصی را به‌عنوان نشانگر تخلیه زیردریایی در مطالعات بر روی سواحل دیگر معرفی کرده‌اند، در این مطالعه، گرچه برخی ناهنجاری‌های حرارتی در خلیج نای‌بند شناسایی شد، اما بررسی میدانی، بیلان آبی و تفاوت تراز سطح نشان داد که این ناهنجاری‌ها عمدتاً به دلیل تبادل حرارتی ناشی از عمق کم آب در نواحی ساحلی بوده و به‌احتمال زیاد به تخلیه موضعی آب آبرفتی مربوط می‌شوند نه چشمه‌های کارستی.

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، تعیین نواحی پتانسیل تخلیه آب زیرزمینی کارستی به‌صورت متمرکز و کانالیزه در سواحل استان بوشهر با تأکید بر بررسی‌های میدانی، ارزیابی بیلان سازندهای کارستی، و تحلیل شاخص‌های سنجش از دور بود. مطابق با مطالعات انجام‌شده، در نواحی شمالی خلیج‌فارس و در سواحل استان بوشهر، مناطق چندانی مشاهده نگردید که دمایی کمتر از محیط اطراف داشته باشند و به احتمال زیاد، نواحی تخلیه آب زیرزمینی به دریا بسیار محدود هستند. با این وجود، یک‌سری آنومالی حرارتی محدود در محدوده خلیج نایبند و شرینو مشاهده گردید که به‌طورکلی می‌تواند ناشی از زهکشی آبخوان‌های ساحلی یا تخلیه محدود آب‌های زیرزمینی غیرکارستی باشد. همچنین بررسی بیلان هیدرولوژیکی تاقدیس نمک-کنگان نشان داد که هیچ‌گونه مازاد پتانسیلی برای تخلیه آب‌های کارستی به دریا وجود ندارد. نتایج این تحقیق از جنبه کاربردی می‌تواند در مدیریت یکپارچه منابع آب در مناطق ساحلی مورد استفاده قرار گیرد، به‌ویژه در ارزیابی دقیق‌تر ذخایر آب کارستی و جلوگیری از برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی که به‌اشتباه تصور می‌شود با دریا در ارتباط هستند. همچنین می‌تواند به بهینه‌سازی مطالعات مکان‌یابی برای احداث تأسیسات آب‌شیرین‌کن و حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی یاری رساند. این تحقیق به سوالاتی در گذشته مبنی بر احتمال تخلیه آب‌های زیرزمینی به دریا در این منطقه پاسخ داده و هر گونه تخلیه آب زیرزمینی به دریا را رد کرده است. محدودیت اصلی این مطالعه، نبود گمانه‌های ژئوفیزیکی در حدفاصل سازندهای کارستی و دریا برای بررسی مستقیم جریان‌های زیرسطحی و نیز فقدان داده‌های درازمدت و پیوسته در برخی بخش‌های ساحلی بوده است. همچنین، نبود اطلاعات دقیق از تغییرات زمانی شوری و دمای آب در مقیاس روزانه و فصلی، قدرت استنباط نهایی را کاهش داده است. پیشنهاد می‌شود در

تحقیقات آتی، از تلفیق روش‌های ژئوفیزیکی مانند الکترومغناطیس و گرادیومتری حرارتی در دریا، و همچنین ردیابی ایزوتوپی برای تشخیص منشأ جریان‌های زیردریایی استفاده شود. همچنین استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالاتر مانند Sentinel-3 و بررسی در بازه‌های زمانی طولانی‌تر می‌تواند به تقویت و اعتباربخشی به نتایج مشابه کمک کند.

سپاسگزاری

بخش عمده داده‌های این مطالعه از طرح پژوهشی "ارزیابی چشمه‌های آب شیرین در منطقه ساحلی شمال خلیج فارس در منطقه بوشهر" با همکاری دانشگاه ایلام و موسسه تحقیقات آب کشور به انجام رسیده است که مراتب تقدیر و تشکر خود را از دستگاه‌های فوق به همراه شرکت آب منطقه‌ای بوشهر اعلام می‌دارد.

مراجع

AfsharSistani, A., 2014. Freshwater springs in the Persian Gulf. Persian Gulf Studies 1(2), 38–45.

Aggarwal, P.P., Kulkarni, K.M., Povinec, P.P., Han, L.F., Groening, M., 2004. Environmental isotope investigation of submarine groundwater discharge in Sicily, Italy. Book of Extended Synopses. Vienna: IAEA, 222–223. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.03.008

Aslam, M., Salem, A., Singh, V.P., Arshad, M., 2021. Estimation of spatial and temporal groundwater balance components in Khadir Canal Sub-Division, Chaj Doab, Pakistan. Hydrology 8(4), 178. https://doi.org/10.3390/hydrology8040178

Burnett, W.C., Aggarwal, P.K., Aureli, A., Bokuniewicz, H., Cable, J.E., Charette, M.A., Kontar, E., Krupa, S., Kulkarni, K.M., Loveless, A., Moore, W.S., Oberdorfer, J.A., Oliveira, J., Ozyurt, N., Povinec, P., Privitera, A.M.G., Rajar, R., Ramessur, R.T., Scholten, J., Stieglitz, T., Taniguchi, M., Turner, J.V., 2006. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. Science of the Total Environment 367(2–3), 498–543. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.05.009

Bushehr Meteorological Organization, 2021. Meteorological yearbook 2020–2021. Bushehr Province Meteorological Bureau.

Deldar, P., 2013. Locating freshwater springs in the Persian Gulf using satellite imagery. Master’s thesis, Tarbiat Modares University, Faculty of Marine Sciences.

Duarte, T.K., Hemond, H.F., Frankel, D., Frankel, S., 2006. Assessment of submarine groundwater discharge by handheld aerial infrared imagery: Case study of Kaloko fishpond and bay, Hawai'i. Limnology and Oceanography Methods 4, 227. https://doi.org/10.4319/lom.2006.4.227

Emery, K.O., 1956. Sediments and water of the Persian Gulf. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 40(10), 2354.

Farsab Sanat Consulting Engineers, 2009. Semi-detailed studies of groundwater in the Deyr–Kangan study area (Volume VI: Hydrogeological studies).

Farsab Sanat Consulting Engineers, 2016. Water balance estimation of 42 study areas in the Kol–Mehran river basin and Persian Gulf islands up to the 2010–2011 water year (Volume V: Water resource assessment, Appendix 29: Water balance report of the Deyr–Kangan study area, Code 2729).

Farzin, M., NazariSamani, A., Feyzniya, S., Kazemi, Gh., 2017. Determining potential areas of submarine groundwater discharge (SGD) into the shores of the Persian Gulf in Bushehr Province using standard temperature anomaly maps. Ecohydrology 4(2), 477–488.

George, A., Gandhi, M.S., Muthukumar, P., Roy, P.D., Muralitharan, J., Selvam, S., 2023. Possible zones of submarine groundwater discharge (SGD) and seawater intrusion (SWI) along the west coast of Kanyakumari, India. Journal of Chemistry 2023, Article ID 6687308. https://doi.org/10.1155/2023/6687308

Iranian Water Policy Research Institute (IWPRI), 2014. Groundwater Sustainability Plan, Case Study of Rafsanjan Plain, Part 1.

Izadpanahi, Gh., 2010. Continuous hydrology and hydrobiology studies of the Persian Gulf in Bushehr Province waters. Tehran: Iranian Fisheries Science Research Institute.

Janardhanan, S., Islam, M.M., Islam, M.T., Peña-Arancibia, J., Hodgson, G., Karim, F., Kirby, J.M., 2023. Groundwater balance and long-term storage trends in the regional Indo-Gangetic aquifer in northwest Bangladesh. Journal of Hydrology: Regional Studies 49, 101500. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101500

Karimi, A.R., 2024. Comparison of economic approaches to water leakage exploitation from the Zamakān Dam. Aquifer and Qanat Journal 4(2), 149-160. (https://doi.org/10.22077/jaaq.2024.7435.1070)

Karimi, H., Karimi, A., 2024. Evaluation of freshwater springs in the northern coastal region of the Persian Gulf in Bushehr (Potential, Origin, and Utilization). Water Research Institute, Research Project of Ilam University.

Kastning, E.H., 1977. Faults as positive and negative influences on groundwater flow and conduit enlargement. In: Dilamarter, R.R., Csallany, S.C. (Eds.), Hydrologic Problems in Karst Regions. Bowling Green: Western Kentucky University, pp. 193–201.

Kunnavil, N., Badimela, U., Srinivas, R., et al., 2025. Multiple proxies to investigate the submarine groundwater discharge into the Arabian Sea, Southwest coast, India: Integration of biogeochemical, geophysical, and remote sensing techniques. Environmental Science and Pollution Research 32, 8117–8144. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36132-w

Lewandowski, J., Meinikmann, K., Ruhtz, T., Pöschke, F., Kirillin, G., 2013. Localization of lacustrine groundwater discharge (LGD) by airborne measurement of thermal infrared radiation. Remote Sensing of Environment 138, 119–125. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.005

Nemati Mansour, A., KordanMoghadam, H., Javadi, S., 2023. Estimation of groundwater balance using remote sensing approach: Case study of Qomsheh Plain. Aquifer and Qanat Journal 4(2), 35–48. https://doi.org/10.22077/jaaq.2024.7258.1061

Sauter, M., 1992. Quantification and Forecasting of Regional Groundwater Flow and Transport in a Karst Aquifer (Gallusquelle, Malm, SW Germany). Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe 13, 1–150.

Swift, S.A., Bower, A., 2003. Formation and circulation of dense water in the Persian/Arabian Gulf. Journal of Geophysical Research 108(C1). https://doi.org/10.1029/2002JC001360

Weatherl, R.K., HenaoSalgado, M.J., Ramgraber, M., Moeck, C., Schirmer, M., 2021. Estimating surface runoff and groundwater recharge in an urban catchment using a water balance approach. Hydrogeology Journal 29(7), 2411–2428. https://doi.org/10.1007/s10040-021-02385-1

Wilson, J., Rocha, C., 2016. A combined remote sensing and multi-tracer approach for localising and assessing groundwater–lake interactions. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 44, 195–204. https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.09.004

Ye, K., Dai, Z., Zhang, X., Zhan, C., Ma, Y., Wang, D., VoThanh, H., Soltanian, M.R., 2024. Characterization of the submarine groundwater discharge patterns in Daya Bay, China. SSRN Electronic Journal. https://doi.org/10.2139/ssrn.5042124

Zektser, I.S., Everett, L.G., Dzhamalov, R.G., 2006. Submarine Groundwater (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420005257