

Assessment of land subsidence susceptibility in the Salmas Plain Aquifer Northwestern Lake Urmia, utilizing fuzzy logic

Somayeh Karimiasl¹, Behzad Hessari^{2*}, Kamran Zeinalzadeh² and Mahdi Erfanian³

¹ PhD Student in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

² Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

³ Associate Professor, Department of Pasture and watershed, Faculty Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 09 December 2023

Accepted: 20 April 2024

Extended abstract

Introduction

Salmas Plain represents one of the most critical areas in the country experiencing subsidence. In general, various factors cause land subsidence, but in many areas, the excessive extraction of ground water from aquifers causes land subsidence. The increasing use of ground water, especially in the sites that are accumulated with alluvial deposits, shallow sea or unconsolidated lake, leads to subsidence or collapse of the land. With the excessive extraction of ground water, the water level of the aquifer decreases and the hydrostatic pressure decreases, which makes it possible for the land to subside gradually. Subsidence in plains mostly occurs due to this factor, namely excessive groundwater extraction and compaction of clay and silt layers between aquifers. In this case, even if the water table level rises again, the land cannot return to its original level.

Materials and methods

In this study, the susceptibility of land subsidence in Salmas Plain was investigated using layers of influential factors in subsidence with ArcGIS software and fuzzy logic. In the first stage, statistical information on some factors causing subsidence, including groundwater level decline, well extraction rate, aquifer storage coefficient, transmissivity coefficient, precipitation, DEM map, soil texture, and bedrock depth, was collected and raster maps of each of these factors at the aquifer level were prepared. In the next stage, fuzzy layering was performed using fuzzy membership functions based on the impact of decreasing or increasing each of these factors on land subsidence. Subsequently, the maps were combined using fuzzy operators (Gamma OR, AND, SUM, PRODUCT) to obtain a unified map of aquifer subsidence susceptibility. Finally, to select the best combination of operators, the results were compared and evaluated with field observation data and the ROC curve performance index.

Results and discussion

The results showed that the OR operator had the lowest conformity with observed subsidence in the area with an AUC of 0.693. Gamma operators with an AUC above 70% had the highest overlap or conformity with observed subsidence in the plain. In this study, the Gamma 0.9 operator was selected as the best fuzzy operator with an AUC of 0.805. The results indicate that the eastern part of the aquifer is critical in terms of subsidence. Approximately 25% of the total area of Salmas Plain, equivalent to 93 square kilometers, has subsidence with very high susceptibility.

Conclusion

Based on the results obtained, it can be said that although the AUC value of the fuzzy operator sum is higher, the Gamma operator with a value of 0.9 has the highest conformity with the ground reality on the fuzzy map, even though it has a lower AUC value. It is essential to mention that the minimum operator AND and Product

* Corresponding author: b.hessari@urmia.ac.ir

create a region with low susceptibility, while the maximum operator OR and SUM maximize the susceptible area. They cannot achieve satisfactory performance in preparing a subsidence susceptibility map. Here, they have only been used to demonstrate the inefficiency of fuzzy operators in maximizing or minimizing subsidence susceptibility.

Keywords: Alluvial deposits, Critical areas, Fuzzy operations, Groundwater level, ROC

Cite this article: Karimiasl, S., Hessari, B., Zeinalzadeh, K., Erfanian, M., 2024. Assessment of land subsidence susceptibility in the Salmas Plain Aquifer, Northwestern Lake Urmia, utilizing fuzzy logic. *Watershed Engineering and Management* 16(3), 331-353.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



ارزیابی حساسیت فرونشست زمین در آبخوان دشت سلماس با استفاده از منطق فازی

سمیه کریمی اصل^۱، بهزاد حصاری^{۲*}، کامران زینال زاده^۲ و مهدی عرفانیان^۳
^۱ دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۳ دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

چکیده مبسوط

مقدمه

دشت سلماس، یکی از بحرانی‌ترین دشت‌های کشور از نظر فرونشست است. به‌طور کلی، عوامل مختلفی سبب فرونشست زمین می‌شوند، ولی در بسیاری مناطق برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های زیرزمینی باعث فرونشست زمین می‌شود. افزایش روزافزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی، دریایی کم‌عمق یا دریاچه‌ای تحکیم نیافته انباشته شده‌اند، به نشست و یا فروریزش زمین منجر می‌شود. با برداشت بیش از حد آب زیرزمینی، سطح ایستابی لایه آبدار پایین رفته و فشار هیدرواستاتیک کاهش می‌یابد که در نتیجه امکان نشست زمین را به‌صورت تدریجی فراهم می‌نماید. فرونشست ماندگار دشت‌ها عمدتاً در اثر همین عامل یعنی برداشت بیش از حد مجاز آب و فشرده‌شدن لایه‌های رسی و سیلتی میان آبخوان صورت می‌گیرد. در این صورت، حتی اگر سطح ایستابی مجدداً بالاتر آید، امکان بازگشت زمین به تراز اولیه خود وجود ندارد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، حساسیت فرونشست دشت سلماس با بهره‌گیری از لایه‌های عوامل مؤثر در فرونشست با نرم‌افزار ArcGIS و منطق فازی بررسی شد. در مرحله اول، آمار و اطلاعات برخی عوامل که موجب ایجاد فرونشست می‌شوند، شامل افت سطح آب زیرزمینی، دبی بهره‌برداری از چاه‌ها، ضریب ذخیره آبخوان، ضریب انتقال‌پذیری، بارش، نقشه DEM، بافت خاک و عمق سنگ بستر، جمع‌آوری و نقشه رستری هر کدام از این عوامل در سطح آبخوان تهیه شد. در مرحله بعد، فازی‌سازی لایه‌ها با استفاده از توابع عضویت فازی، با توجه به تأثیر کاهش یا افزایش هر کدام از این عوامل در فرونشست زمین انجام گرفت. سپس، نقشه‌ها با عملگرهای فازی (Gamma، OR، AND، SUM، PRODUCT) با هم تلفیق شده و نقشه واحد حساسیت فرونشست آبخوان به‌دست آمد. در نهایت، برای انتخاب بهترین عملگر ترکیب، نتایج را با داده‌های مشاهده‌ای صحرائی مقایسه شد و با شاخص عملکرد منحنی ROC کنترل و صحت‌سنجی صورت گرفت.

* مسئول مکاتبات: b.hessari@urmia.ac.ir

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که عملگر OR با $AUC=0/693$ کمترین انطباق را با فرونشست رخ داده در منطقه دارد. عملگرهای گاما با سطح زیر منحنی بالای ۷۰ درصد، بیشترین همپوشانی یا انطباق را با فرونشست مشاهده‌ای در دشت داشتند و در این پژوهش عملگر گامای ۰/۹ با $AUC=0/805$ به‌عنوان بهترین عملگر فازی انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که قسمت شرق آبخوان از نظر فرونشست بحرانی است. از کل مساحت دشت سلماس، ۲۵ درصد معادل ۹۳ کیلومترمربع دارای فرونشست با حساسیت خیلی بالا است.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان کرد که علی‌رغم اینکه مقدار AUC اپراتور فازی sum بالاتر است؛ ولی در نقشه فازی گاما با مقدار ۰/۹ بیشترین انطباق را با واقعیت زمینی دارد، هرچند مقدار AUC کمتری دارد. ذکر این نکته ضروری است، عملگرهای حداقل‌سازی AND و Product با ایجاد منطقه با حساسیت کم و عملگرهای حداکثرسازی OR و SUM با حداکثرسازی منطقه، نمی‌توانند کارایی مطلوبی در تهیه نقشه حساسیت فرونشست داشته باشند و در اینجا فقط برای نمایش دادن ضعف کارایی اپراتورهای فازی در حداکثر یا حداقل‌سازی حساسیت فرونشست زمین، استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: تراز آب زیرزمینی، عملگرهای فازی، مناطق بحرانی، نهشته‌های آبرفتی، ROC

مقدمه

در دسترس قرار دادن آب با کیفیت بهتر را نیز به ارمغان می‌آورند (FAO, 2015).

بر اساس مطالعه دانشگاه کالیفرنیا، بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳، حدود ۳۷ آبخوان بزرگ دنیا به شدت با کاهش سطح و کمبود حجم آب مواجه شده و نتوانسته‌اند با بارش و نفوذ دوباره آب‌های سطحی، تجدید شوند. بر اساس گزارش‌های جهانی، برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی در ۵۰ سال گذشته چهار برابر افزایش یافته است.

بالاترین سطح افت آب‌های زیرزمینی و یا تخلیه آبخوان‌ها در چین، هند، پاکستان، ایران، بنگلادش، آمریکا، مکزیک و اروپا گزارش شده است. تخمین زده می‌شود، اضافه برداشت آب‌های زیرزمینی در جهان حدود ۲۰۰ کیلومترمکعب، معادل بیش از ۲۰۰ میلیارد مترمکعب در سال باشد، که بیانگر پمپاژ شدن حدود یک پنجم از کل آب‌های زیرزمینی است (Konikow, 2011). نگاهی به وضعیت آب‌های زیرزمینی در ایران نشان می‌دهد که یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان آب‌های زیرزمینی در جهان است و ۸۷ درصد از جمعیت در مناطقی زندگی می‌کنند که برای شرب و آبیاری به شدت

تشدید دخالت‌های انسان در محیط‌زیست و چرخه آب از یک سو و محدودیت منابع آب سطحی در مقابل تأمین نیازهای روزافزون جوامع بشری از طرف دیگر، موجب شده است تا استفاده از منابع آب زیرزمینی برای رفع نیازها گسترش یابد (Consulting Engineers, 2014). حدود ۳۰ درصد از آب‌های شیرین جهان را سفره‌های آب زیرزمینی تشکیل می‌دهند. پس از یخچال‌ها، منابع آب زیرزمینی، دومین منبع آب شیرین موجود در جهان هستند. در نقاطی که آب‌های سطحی همانند دریاچه‌ها و رودخانه‌ها وجود نداشته و یا غیرقابل استفاده باشند، نیازهای آبی توسط منابع آب زیرزمینی برطرف می‌شود.

امروزه برآورد شده است که در سطح جهان، ۳۶ درصد از آب قابل شرب، ۴۲ درصد از آب موردنیاز برای آبیاری و کشاورزی، و ۲۴ درصد از کل مصرف آب جهان از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. اهمیت آب‌های زیرزمینی صرفاً به‌خاطر حجم آبخوان‌ها و میزان دسترسی به آنها نیست. آب‌های زیرزمینی مزایای عمده دیگری، از جمله در دسترس بودن در سطح محلی، قابلیت اطمینان بالا در طول خشکسالی، تنظیم اکوسیستم و به‌طورکلی،

همزمان با رشد صنعتی و توسعه شهرنشینی جهانی گزارش نمود. با توجه به پیشینه موضوع در سطح بین المللی، قدیمی‌ترین فرونشست شناخته شده در کارگروه فرونشست در سازمان یونسکو، در ایالت آلابامای ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۰۰ بوده است (Galloway, 2016). در ایران، فرونشست زمین در اکثر دشت‌هایی نظیر مشهد، اصفهان، اراک و یزد و تهران مشاهده و گزارش شده است. اولین فرونشست ثبت شده مربوط به دشت رفسنجان در سال ۱۳۴۶ بوده است. بنابر گزارش‌های سال ۱۳۴۶ در دشت رفسنجان به ازای هر ۱۰ متر افت سطح آب زیرزمینی، حدود ۴۲ سانتی‌متر فرونشست زمین گزارش شده است (Hosseini Milani, 1994).

Maleki and Rezaee (2016) به‌منظور تحلیل فرونشست دشت کرمانشاه از تلفیق فازی لایه افت سطح آب و بافت خاک استفاده کرد. نتایج آنها بیانگر تأثیر ریزدانه بودن خاک در فرونشست زمین بود. همچنین، افت سطح آب، تأثیر به‌سزایی در وقوع فرونشست گزارش شد و در مناطق دارای بافت خاک رسی و ریزدانه، فرونشست بیشتر اتفاق افتاده است. پتانسیل فرونشست زمین ناشی از افت سطح ایستابی آبخوان دشت اردبیل، با استفاده از اطلاعات و داده‌های مختلف شامل نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، لاگ‌های حفاری، اطلاعات سطح آب پیزومترها و چاه‌های مشاهده‌ای، کاربری اراضی، اطلاعات آب‌دهی و لوگ حفاری چاه‌های بهره‌برداری، بررسی شده است (Mersi et al., 2017).

پس از پردازش داده‌های به‌دست آمده با نرم‌افزار GIS و تهیه نقشه‌های رقومی شده عوامل مؤثر در فرونشست و ترکیب آنها، نهایتاً مشخص شد که مناطق جنوب شرقی دشت اردبیل که دارای بیشترین حجم بهره‌برداری از چاه‌های عمیق با مصرف کشاورزی و شرب، بیشترین ضخامت آبرفت و نزدیک‌ترین منطقه به گسل‌های اصلی منطقه هستند، دارای بیشترین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست هستند.

Mohebbi Tafreshi et al., (2019) برای ارزیابی خطر فرونشست زمین از نرم‌افزار GIS و منطق فازی استفاده کردند. ابتدا نقشه رستری عوامل مؤثر بر

به آب‌های زیرزمینی وابسته هستند (Safdari et al., 2022).

بر اساس نتایج، میزان مصرف آب‌های زیرزمینی (از طریق چاه، قنات و چشمه‌ها) از کمتر از ۱۸ میلیارد مترمکعب در دهه ۱۳۵۰ به بیش از ۷۹ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۸۵ رسید. با این حال، از این تاریخ به بعد میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی کاهش داشته، به گونه‌ای که در سال ۱۳۹۴ به حدود ۶۱ میلیارد مترمکعب رسید. همچنین، نتایج نشان‌دهنده مصرف بالای آب‌های زیرزمینی در بخش کشاورزی است، بر این اساس، حدود ۹۰ درصد از این منابع در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. در نهایت، طی سال‌های اخیر میزان متوسط افت سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی کشور حدود ۵۱ سانتی‌متر و اضافه برداشت ۵۰۸۶ میلیون مترمکعب در سال بوده است. در این راستا و در شرایط فعلی، ۳۴۷ محدوده از مجموع ۶۰۹ محدوده جز مناطق ممنوعه هستند (Nour, 2017). با تخمین آب‌های زیرزمینی در ایران بین سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶ یک روند منفی ۴۴۰۰- میلیون مترمکعب نشان از برداشت اضافی از سفره‌های زیرزمینی برای مصارف بیشتر کشاورزی در مناطق مختلف ایران است. در ایران با برآورد حدود ۹۰۰ هزار چاه عمیق که حدود ۳۵۰ هزار چاه‌های غیرمجاز در سفره‌های زیرزمینی حفر شده‌اند، کنترل مناسبی بر برداشت آب وجود ندارد.

پیامد کاهش آب‌های زیرزمینی، فرونشست زمین است. فرونشست زمین می‌تواند مسیرهای جریان سطحی و زیرسطحی را تغییر دهد و باعث کاهش عمده و غیرقابل برگشت ظرفیت آبخوان شود (Saemian et al., 2022). نتایج محققین در کشورهای چین، مکزیک، ویتنام، ایتالیا، پاکستان، عربستان و ایران نشان می‌دهد، بهره‌برداری و استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی عامل اصلی فرونشست زمین است (Kakar et al., 2019; Othman et al., 2019; Ty et al., 2021; Yu, et al., 2020; Zhu et al., 2020; Dehghaniet al., 2019).

Waltham (1989) نرخ بالای خطر فرونشست زمین با افت سطح آب زیرزمینی بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰

است و در این پژوهش پهنه‌بندی فرونشست زمین با منطق فازی انجام شد. دشت سلماس از مهم‌ترین دشت‌های استان آذربایجان غربی است.

در دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت همراه با توسعه کشاورزی سبب برداشت بی‌رویه و فشار بر منابع آبی این دشت شده است. استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و تغذیه کم دشت باعث افت سطح آب در دهه اخیر شده است. فرونشست سطح زمین ناشی از افت سطح آب‌های زیرزمینی در بخش‌هایی از این دشت به طور محسوس مشاهده می‌شود (Zarei et al., 2019).

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، آبخوان دشت سلماس واقع در شمال غرب حوزه آبخیز دریاچه ارومیه است. در شکل ۱، موقعیت آبخوان دشت سلماس نشان داده شده است. مساحت آبخوان دشت سلماس ۳۶۵/۶۸۴ کیلومتر مربع است که در شمال آذربایجان غربی قرار گرفته است.

داده‌های مورد استفاده-بارش: چگونگی توزیع بارش‌های ماهانه در دشت سلماس نشان می‌دهد که اردیبهشت ماه، پر باران‌ترین ماه سال و مردادماه، کم بارش‌ترین ماه سال است. بر اساس ایستگاه باران‌سنجی سلماس، متوسط بارش سالانه بین سال‌های (۹۹-۱۳۸۱)، ۳۰۰ میلی‌متر در سال است. برای تهیه نقشه رستری بارش، از داده‌هایی که از مدیریت منابع آب ایران تهیه شد، استفاده شد. تغییرات بارش از ۲۰۰ میلی‌متر در نیمه شرقی آبخوان تا ۳۶۶ میلی‌متر در غرب آبخوان متغیر است. نقشه رستری بارش در شکل ۶، نشان داده شده است.

از نظر مفهومی و از دیدگاه هیدرولوژی آبخوان، هرچه بارش کمتر باشد، احتمال فرونشست بیشتر و هرچه بارش بیشتر باشد، نفوذ آب به سطح آب زیرزمینی افزایش یافته و با افزایش سطح آب زیرزمینی احتمال فرونشست کمتر خواهد بود. مناطقی از دشت سلماس که بارش سالیانه بیشتری دریافت می‌کنند، از نظر این عامل، پتانسیل کمتری دارند. متوسط بارندگی در دوره ۲۰ ساله مورد

فرونشست زمین تهیه شد. عامل‌ها با توابع عضویت فازی، فازی‌سازی شده، سپس، برای ترکیب نقشه‌ها، از توابع همپوشانی فازی استفاده شد. در نهایت، برای تأیید مدل‌ها، از معیارهای آماری و شواهد فرونشست زمین، استفاده شد. بر این اساس، عملگر فازی $\text{Gamma } 0.8$ با بیشترین تطابق و عملگر فازی SUM با کمترین تطابق، به عنوان سازگارترین و بدترین عملگرهای فازی معرفی شدند.

(Oh and Lee, 2010) برای برآورد و ارزیابی فرونشست در شهر سامچکو در کشور کره، از مدل WOE^1 و ارزش‌گذاری وزنی لایه‌ها در GIS بهره گرفتند. برای انجام این پژوهش، از هفت عامل مهم شامل عمق گسل، فاصله از گسل، شیب زمین، تراز آب زیرزمینی، نقشه زمین‌شناسی، کاربری اراضی و نفوذپذیری چاه‌های گمانه، به عنوان عوامل مؤثر در فرونشست استفاده کردند.

(Putra et al., 2011) در پژوهشی به ارزیابی ریسک فرونشست زمین در مناطق رانگ کوپ اندونزی پرداخته‌اند. آنها نقشه ریسک فرونشست را بر اساس پنج پارامتر شیب زمین، لیتولوژی، پستی و بلندی، فاصله تا ساختارهای دره مانند (فروچاله‌ها یا شکاف) و کاربری اراضی به دست آوردند. وزن پارامترها با رویکرد AHP^2 برای تهیه نقشه فرونشست، به دست آمد. نتایج نشان داد، بالاترین مناطق ریسک در نزدیکی مناطق فروچاله‌ها در تطابق با اطلاعات میدانی است.

(Park et al., 2012) از GIS و سیستم استنتاج فازی-عصبی برای برآورد شدت فرونشست در شهر سامچکو کشور کره استفاده کردند. آنها، لایه‌های رقومی عمق گسل، فاصله از گسل، شیب، زمین‌شناسی و کاربری اراضی را برای بررسی فرونشست به کار بردند. نتایج نشان داد که روش استنتاج فازی-عصبی از دقت قابل قبولی برخوردار است.

فرونشست زمین در شمال غرب دریاچه ارومیه روند صعودی داشته و با توجه به تغییرات عواملی که باعث آن می‌شوند، قابل پیش‌بینی است. مرور سوابق تحقیقاتی نشان می‌دهد که طرح جامعی برای پیش‌بینی و پیشگیری از پدیده فرونشست به صورت توزیعی در منطقه اجرا نشده

² Analytical Hierarchy Process

¹ Weight of evidence

افت در چاه‌های دیگر مناطق از ۹/۱۴ متر در کلشان تا ۳۸/۲۴ متر در اراضی صدقیان متغیر است.

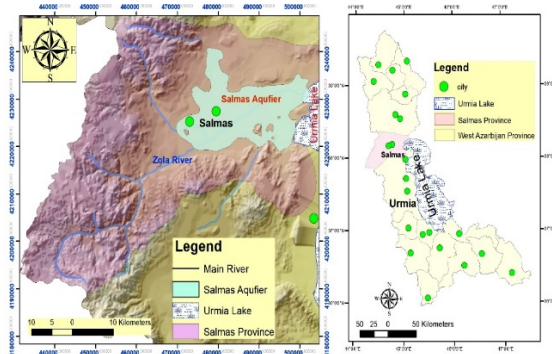
همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، نقاط قرمز رنگ بالاترین میزان افت سطح آب را دارند. بنابر آمار ثبت شده از چاه‌های پیژومتری، دبی بهره‌برداری از چاه‌ها در محدوده منطقه مورد مطالعه یعنی آبخوان دشت سلماس بالغ بر ۷۵ میلیون مترمکعب در سال است. از روش درون یابی IDW برای تهیه نقشه رستری، دبی بهره‌برداری از چاه‌ها، استفاده شد (شکل ۶).

در نقشه‌های رستری و درون‌یابی، تفاوت جزئی بین دو روش درون‌یابی کریجینگ و IDW وجود داشت. کیفیت نقشه‌های درون‌یابی حاصل از روش کریجینگ به اندازه روش درون‌یابی با IDW مناسب نبودند و با توجه به اینکه پراکنش داده‌ها خوب بوده و منطقه به صورت دشت و تغییرات ارتفاعی کم است، روش IDW به‌عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد. آمار دبی بهره‌برداری از چاه‌ها نشان می‌دهد، نیمه شرقی آبخوان برداشت آب به مراتب بالاتر از نیمه غربی است. در شکل ۳، نقشه پراکنش چاه‌های بهره‌برداری و نقشه پراکنش افت سطح آب زیرزمینی آورده شده است.

نقشه‌های ضرایب هیدرودینامیکی: بر اساس آمار تهیه شده از شرکت آب منطقه‌ای و ۱۴ چاه اکتشافی موجود در منطقه تحت نظارت شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی (اندازه‌گیری و کنترل کیفیت داده‌ها)، استفاده شد. ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان که شامل ضریب ذخیره و ضریب انتقال‌پذیری است، در نیمه شرقی آبخوان مقادیر پایینی دارند به‌طوری که در خان تختی واقع در جنوب شرق آبخوان ضریب ذخیره کمتر از ۰/۰۱ درصد است. این ضریب شاخصی است که میزان آب هدایت شده به چاه‌ها بر اثر فشار آبخوان را نمایش می‌دهد. مقادیر پایین این ضریب بیانگر کیفیت پایین سرعت جریان آب است. در چنین شرایطی، محیط آبخوان عمدتاً از بافت سنگین رسی تشکیل شده است.

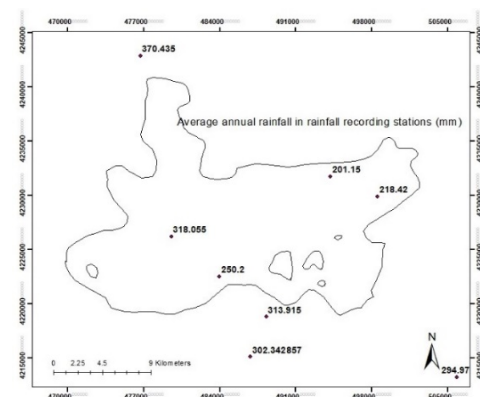
در شکل ۴، نقشه پراکنش چاه‌های استخراجی ضریب ذخیره و ضریب انتقال‌پذیری آبخوان دشت سلماس نشان داده شده است. همان‌طور که از نقشه ضریب ذخیره

مطالعه برای ۱۱ ایستگاه واقع در آبخوان دشت سلماس، استخراج شد. آمار بارش به‌صورت روزانه در این ۱۱ ایستگاه ثبت شده بود. بارش سالانه از جمع کل روزهای سال استخراج شد و برای به‌دست آوردن بارش متوسط سالیانه هر ایستگاه، بعد از استخراج بارش به تفکیک سالیانه در طول ۲۰ سال، میانگین‌گیری انجام گرفت. در شکل ۲، پراکنش ایستگاه‌های ثبت بارش آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز زولاچای و آبخوان دشت سلماس در شمال غرب دریاچه ارومیه

Fig. 1. The location of Zolachai watershed and Salmas plain aquifer in the northwest of Lake Urmia



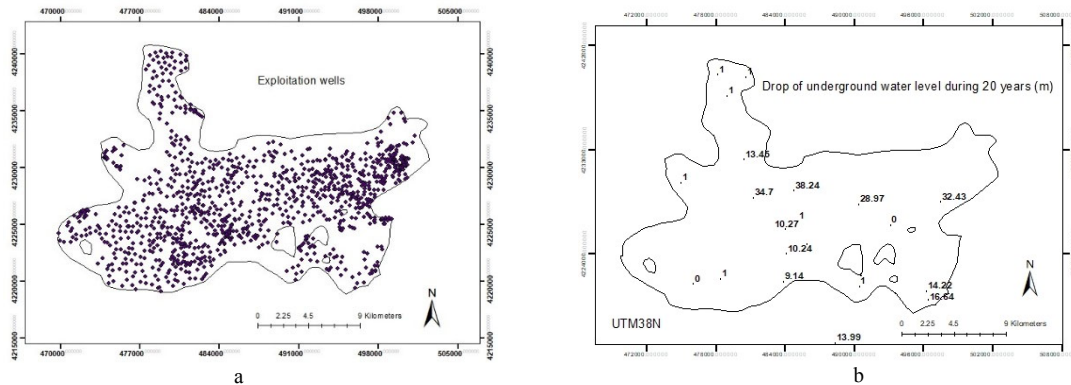
شکل ۲- نقشه پراکنش ایستگاه‌های ثبت بارش

Fig. 2. Distribution map of rainfall recording stations

افت سطح آب زیرزمینی و دبی بهره‌برداری از چاه‌ها: بر اساس آمار و اطلاعات ثبت شده از چاه‌های اکتشافی (شکل ۳، سمت چپ)، تهیه شده از شرکت آب منطقه‌ای استان، تغییرات تراز آب زیرزمینی بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ استخراج شد. در مناطقی مثل سلطان احمد و گل اوزان، افت سطح آب زیرزمینی رخ نداده است و میزان

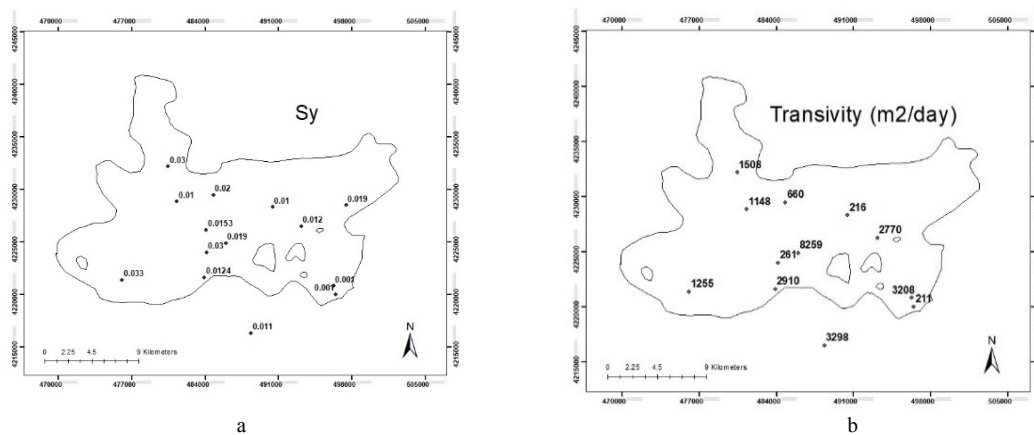
که در قسمت مرکزی آبخوان مقدار این ضریب بیشتر از بقیه نقاط است.

مشخص است، در نیمه غربی آبخوان مقدار این ضریب بیشتر است و نقشه ضریب انتقال پذیری هم نشان می‌دهد



شکل ۳- a: نقشه پراکنش چاه‌های بهره‌برداری و b: نقشه پراکنش چاه‌های اکتشافی (اعداد روی نقشه بیانگر افت سطح آب زیرزمینی است).

Fig. 3. a: Distribution map of production wells and b: distribution map of exploratory wells



شکل ۴- ضرایب هیدرودینامیکی استخراج شده از چاه‌های اکتشافی دشت مورد مطالعه

Fig. 4. Distribution map of wells to extract hydrodynamic coefficients

بافت خاک: بافت خاک به نسبت ذرات شن، سیلت و رس اشاره دارد که بخش معدنی خاک را تشکیل می‌دهند. درشت و سبک به خاک شنی و ریز و سنگین به خاک رسی اطلاق می‌شود. خاک لوم ترکیبی از شن، سیلت و رس است. بافت خاک به نوبه خود روی مقدار آبی که خاک می‌تواند در خود نگه دارد، سرعت حرکت آب در خاک و میزان حاصلخیزی آن تأثیرگذار است.

بافت خاک ممکن است از ریز تا درشت طبقه‌بندی شود. بافت ریز (خاک‌های بافت سنگین)، نشان دهنده نسبت بالایی از ذرات ریزتر مانند سیلت و خاک رس است. بافت درشت، نشان دهنده نسبت بالای شن است. در تشکیلات زمین‌شناسی آبخوان، در صورت وجود لایه‌های

نقشه مدل رقومی ارتفاع: در این پژوهش، از محصولات سنجنده استر (ASTER) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر برای استخراج مدل رقومی ارتفاع دشت سلماس استفاده شد. در محدوده مورد مطالعه، مدل رقومی ارتفاع زمین از ۱۶۱۸ در نیمه غربی تا ۱۲۶۹ در نیمه شرقی آبخوان متغیر است. دشت‌های کم ارتفاع، نیمه شرقی آبخوان، منتهی به دریاچه و نیمه غربی را ارتفاعات و کوه‌ها تشکیل می‌دهد. فرونشست زمین در مناطق دشت با ارتفاع کم، بیشتر اتفاق می‌افتد و در نیمه شرقی آبخوان دشت سلماس که ارتفاع کمتر است، فرونشست بیشتری نسبت به بقیه نقاط مشاهده می‌شود.

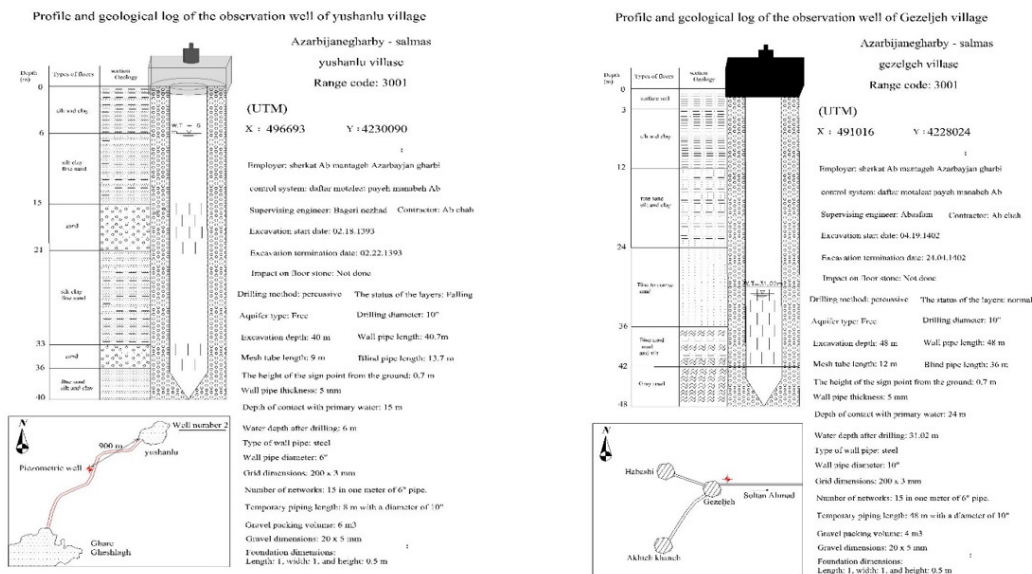
تشکیل شده از رس و سیلت، با پایین آمدن سطح آب زیرزمینی، تنش مؤثر بین خاکدانه‌ها افزایش یافته و با تحکیم خاک (فشردگی خاک) در لایه‌های آبخوان، امکان وقوع فرونشست زمین تشدید می‌شود (Nameghi et al., 2013).

از نظر فرونشست، منطقه‌ای که از خاک ریزدانه سنگین رسی تشکیل شده باشد، در مقایسه با منطقه‌ای که از خاک سبک درشت دانه شنی تشکیل شده است، استعداد بیشتری برای فرونشست دارد. در آبخوان دشت سلماس نیمه شرقی آبخوان از مواد رسی و سیلتی تشکیل شده است و قسمت غربی آبخوان از مواد لومی و شنی تشکیل شده است. در نتیجه قسمت شرقی آبخوان استعداد بیشتری برای فرونشست دارد.

برای تهیه نقشه تیپ و بافت خاک، از گزارش مطالعات ارزیابی منابع و قابلیت اراضی موسسه تحقیقات آب و خاک و مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی استفاده شد (Saber et al., 1989). لازم به ذکر است که این نقشه‌ها شامل اطلاعات پروفیل عمقی خاک هستند. بحث فرونشست در حقیقت یک رفتار تحکیم خاک است که دو عامل اصلی، اول، خروج آب از بدنه خاک اشباع (در طبیعت و وسعت دشت، همان افت

سطح آب است) و دیگری، حضور و وجود ریزدانه در بدنه و ضخامت خاک مسبب آن است. در نواحی که سطح آب از یک تراز در اثر افت به تراز پایین‌تری افت می‌کند، عاملی که سبب تعیین مقدار نشست می‌شود، علاوه بر میزان افت سطح آب، ضخامت و میزان درصد ریزدانه است. برای تدقیق این موضوع علاوه بر نقشه‌های فوق‌الذکر، اطلاعات لوگ ۳۲ چاه اکتشافی جمع‌آوری شد. لوگ چاه‌های منطقه (۳۲ چاه موجود) با این نقشه مقایسه و عملاً مشخص شد که متوسط بافت عمق خاک با نتایج لوگ چاه‌های مشاهداتی تطبیق دارد.

در شکل ۵، دو نمونه از لوگ چاه‌های مشاهداتی در دشت سلماس ارائه شده است. بر همین اساس، نقشه بافت خاک دشت سلماس شامل چهار نوع رسی، سیلت، لومی و شنی استخراج شد. با توجه به اینکه خاک رسی بیشترین پتانسیل فرونشست زمین را دارد، کد ۴ به این تیپ خاک تعلق گرفت. بعد از خاک رسی، به ترتیب خاک‌های تیپ سیلتی، لومی و شنی بیشترین پتانسیل فرونشست زمین را دارند. بنابراین، کد ۳ به تیپ خاک سیلتی، کد ۲ به تیپ خاک لومی، و کد ۱ به تیپ خاک‌های شنی تعلق گرفت. نقشه رستری بافت خاک طبق کدها استخراج شد.



شکل ۵- دو نمونه از پروفیل عمقی بافت خاک در سطح آبخوان دشت سلماس
 Fig. 5. Two examples of the depth profile of the soil texture on the surface of the Selmas plain aquifer

جدول ۱- کدهای بافت خاک در سطح آبخوان

Table 1. Soil type on the surface of the aquifer

Soil type	Class number
Sand	1
Loam	2
Silt	3
Clay	4

لایه‌های ریزدانه بیشتر باشد، فرونشست زمین بیشتر خواهد بود. بنابراین، در جایی که ضخامت لایه آبدار بیشتر است، امکان وقوع فرونشست نیز بیشتر است (Salehi Moteahd et al., 2019).

در مرکز آبخوان دشت سلماس، سنگ کف از رسوبات دانه ریز مارن و رس است و در غرب منطقه سازندهای آذرین و مارن‌های میوسن، جنس سنگ کف را تشکیل می‌دهد. عمق سنگ بستر بر اساس آمار شرکت آب منطقه ای استان و از روی ۱۴ چاه اکتشافی موجود در منطقه طبق جدول ۲، استخراج شد. در سطح آبخوان دشت سلماس اراضی سلطان احمد با ۱۵۹ متر بیشترین عمق سنگ بستر را دارند.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از لوگ چاه‌های اکتشافی، دو نوع آبخوان آزاد و تحت فشار در آبخوان دشت سلماس وجود دارد که روی همدیگر قرار گرفته‌اند. آبخوان تحت فشار با مخازن آزاد در ارتباط است که در منطقه تغذیه (قسمت غرب و شمال غربی دشت) یکی شده و تشکیل سفره آبدار واحدی را می‌دهند و به سمت شرق، لایه‌های آزاد به تدریج به لایه‌های نیمه تحت فشار و تحت فشار تبدیل می‌شود. به دلیل وجود چاه‌های بهره‌برداری فراوان و برداشت از آنها طی دهه‌های اخیر، امروز طبقات تحت فشار حالت آرتزین نداشته و به صورت سفره آزاد عمل می‌کنند.

در سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تغییرات حجم مخزن منفی ۳/۳۲ میلیون مترمکعب و متوسط افت تراز آب زیرزمینی منفی ۰/۳۷ متر مشاهده شده است. شروع مطالعات دشت سلماس به دهه ۴۰ باز می‌گردد، ولی اندازه گیری شبکه پیژومتری و رسم هیدروگراف واحد، اولین بار از سال آبی ۱۳۵۴-۱۳۵۳ آغاز شده است. نگاهی به دوره ۴۶ ساله از سال ۱۳۵۴ تا سال ۱۴۰۰ نشان می‌دهد که

عمق سنگ بستر: آبخوان یا سفره آب زیرزمینی، یک لایه آبدار زیرزمینی است که در لایه‌های تحکیم نیافته (گراول، شن و سیلت) یا در سنگ‌های دارای درز و شکاف ایجاد می‌شود. این آب می‌تواند از طریق چاه، بهره‌برداری شود. نفوذ آب در زمین تا برخورد به قشرهای نفوذ ناپذیر ادامه می‌یابد. به محض اینکه آب‌ها به این قبیل لایه‌ها نفوذ کردند و جریان آنها از هر طرف متوقف شد، در خلال حفره‌های سنگ‌ها جمع شده و سفره‌های آبدار یا مخازن زیرزمینی آب را تشکیل می‌دهند.

آب‌های زیرزمینی معمولاً در سنگ‌ها و موادی که دارای تخلخل هستند، جمع می‌شوند. سنگی که سفره آبدار تشکیل می‌دهد، علاوه بر تخلخل باید دارای نفوذپذیری نیز باشد، تا بتواند آب زیرزمینی را از خود عبور دهد. مانند مواد رسی با وجود تخلخل زیاد به علت نفوذ ناپذیر بودن، نمی‌توانند تشکیل سفره آبدار را بدهند. سنگ‌هایی که شکاف‌های متعدد و مرتبط به هم دارند، برای تشکیل سفره آبدار مناسب هستند. بیش از ۹۰ درصد سفره آبدار از سنگ‌های نامتراکم که قسمت اعظم آنها را شن و ماسه تشکیل می‌دهد، به وجود آمده است.

گاهی نیز سنگ‌های آذرین و دگرگونی به علت داشتن شکستگی‌های زیاد، می‌توانند تشکیل سفره آبدار دهند. هرچه عمق سنگ بستر بیشتر باشد، یعنی ضخامت لایه آبدار در آن منطقه زیاد است (Todd, 1980).

همچنین، رابطه بین نرخ فرونشست و عمق سنگ بستر به صورت زیر وجود دارد (Lohman, 1961).

$$\Delta b = \Delta p \left(\frac{\rho}{\gamma} - nb\beta \right) \quad (1)$$

که در آن، Δb نرخ فرونشست و b ضخامت آبخوان است. همان‌طور که از معادله مشخص است، بین نرخ فرونشست و ضخامت آبخوان رابطه مستقیم وجود دارد. زمانی که افت سطح آب بیشتر و ضخامت لایه‌های آبدار و

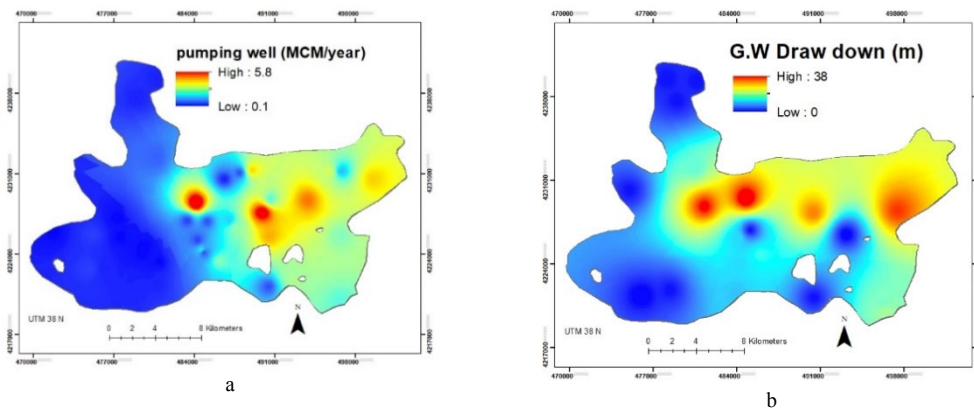
صدور اولین گواهی ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از آب زیرزمینی برای قسمتی از دشت سلماس (مناطق ورودی دشت در غرب جاده ارومیه سلماس) در سال ۱۳۷۹ شد. افزایش میزان بارندگی در اوایل دهه ۸۰ نیز نتوانست باعث جلوگیری از افت سطح سفره شود. لذا، در حال حاضر تمامی محدوده مطالعاتی سلماس ممنوعه اعلام شده است (Consulting Engineers, 2014).

در طول این دوره از سال ۱۳۵۴ تا ۱۳۷۴، نوسانات سطح سفره حالت طبیعی داشته است. به طوری که خشکسالی های اوایل دهه ۶۰ باعث افت حدود دو متر در سطح سفره آب زیرزمینی شده که با افزایش بارندگی در اواخر دهه ۶۰ و اوایل دهه ۷۰ این میزان از افت جبران شده است (شکل ۷). متأسفانه با شروع مجدد دوره خشکسالی از سال ۷۵ و افزایش همزمان میزان بهره‌برداری، افت شدید سطح سفره شروع شده که باعث

جدول ۲- عمق سنگ بستر در نقاط مختلف سطح آبخوان

Table 2. Bedrock depth at different points of the aquifer surface

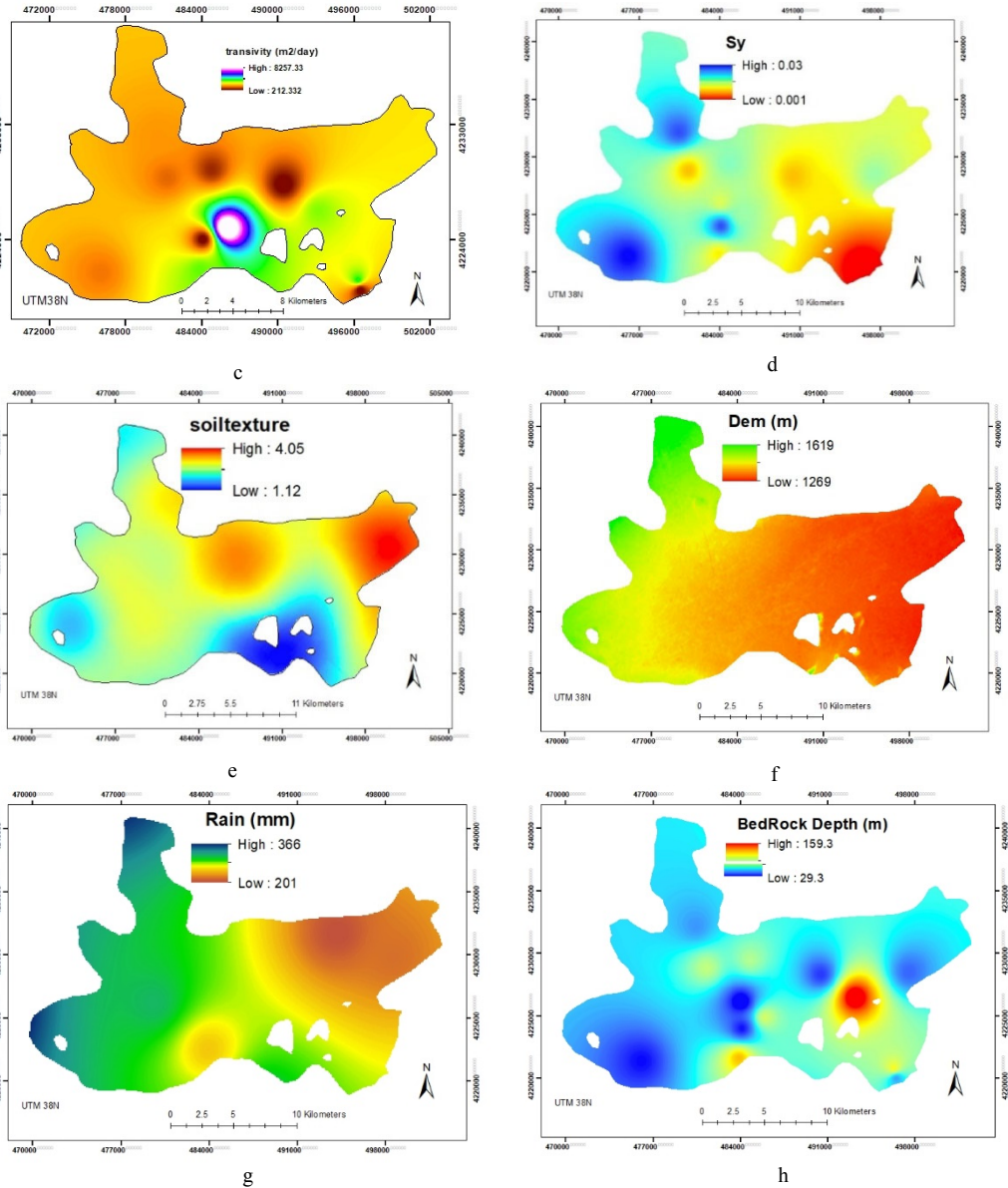
Type of well	Location	UTMX	UTMY	Depth
Exploratory	Araziye Tamar	488342	4216294	52
Exploratory	Araziye Habashi	490434	4228297	45
Exploratory	Araziye Sedgiyan	484773	4229470	92
Exploratory	Aga Esmal	485956	4224853	99
Exploratory	Poshte padejan	481286	4228834	95
Exploratory	Poshte khantakhty	496473	4220000	62
Exploratory	Khantakhty	496279	4220785	109
Exploratory	Derishak	484110	4223990	40
Exploratory	Soltan Ahmad	493167	4226470	159
Exploratory	Soreh	484058	4226118	29
Exploratory	Garegeshlagh	497471	4228477	53
Exploratory	Kalshan	483878	4221607	121
Exploratory	Goluzan	476071	4221377	39
Exploratory	Moghanjog	480451	4232158	60



شکل ۶- نقشه رستری عوامل موثر بر فرونشست آبخوان دشت سلماس، a: دبی بهره برداری از چاه‌ها، b: افت سطح آب زیرزمینی،

c: ضریب انتقال‌پذیری، d: ضریب ذخیره، e: بافت خاک، f: نقشه DEM، g: بارش، h: عمق سنگ بستر

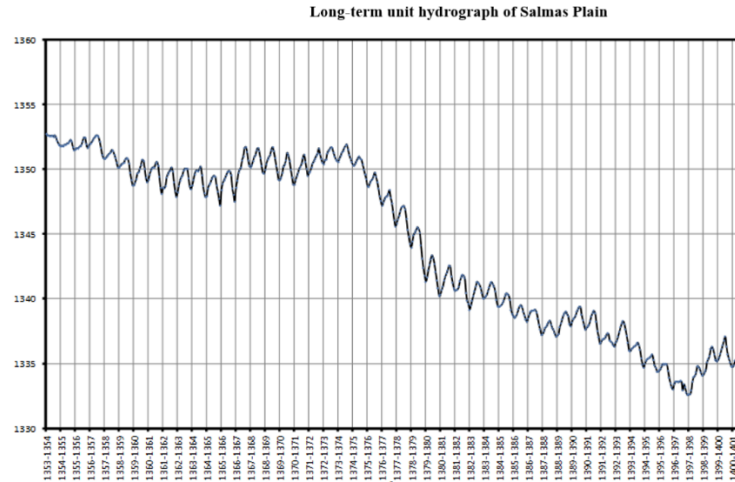
Fig. 6. Raster map of the factors affecting the subsidence of Salmas Plain aquifer, a: Pumping well, b: G.W Draw down, c: Transivity, d: Sy, e: Soil texture, f: DEM, g: Rain, h: Bedrock depth



ادامه شکل ۶
Fig. 6. Continued

دشت سلماس (شکل ۷)، از سال آبی ۱۳۵۴-۱۳۵۳ لغایت ۱۴۰۰-۱۳۹۹ میزان افت تراز آب زیرزمینی آبخوان مزبور به طور میانگین سالانه حدود ۰/۳۸ متر و در مجموع دوره فوق حدود ۱۸ متر است که کاهش و کسری حجم مخزن متناظر این دوره معادل ۲۱۵ میلیون مترمکعب بوده است (Consulting Engineers, 2014).

بر اساس نتایج آخرین آماربرداری سراسری (دور سوم) در محدوده مطالعاتی سلماس، در مجموع ۱۷۴۵ حلقه چاه (عمیق و نیمه عمیق) حفر شده است. سایر منابع آب زیرزمینی منطقه طرح شامل ۴۶۶ دهنه چشمه و ۶۹ رشته قنات است. تخلیه سالانه منابع آب زیرزمینی سلماس در سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ حدود ۱۷۵ میلیون مترمکعب است. با توجه به نتایج هیدروگراف درازمدت



شکل ۷- هیدروگراف واحد درازمدت دشت سلماس ۱۴۰۰-۱۳۵۳ (منبع: دفتر مطالعات آب منطقه‌ای آذربایجان غربی)
 Fig. 7. Long-term unit hydrograph of Salmas Plain (Source: West Azarbaijan Regional Water Studies Office)

زمین را بر اساس منطق فازی (عملگرهای فازی) ارائه کند، اهمیت به‌سزایی دارد. تاکنون علیرغم اهمیت موضوع، پژوهش خاصی در این زمینه در این دشت انجام نشده است. پژوهش حاضر، گام ابتدایی برای تهیه نقشه حساسیت فرونشست در این دشت مهم است. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان بستر اولیه جهت انجام مطالعات بعدی توسط کارشناسان و محققان تلقی شود.

Gharekhani et al., و Najafi Igdiret al., (2023) در سال‌های اخیر، دشت سلماس در استان آذربایجان غربی با فرونشست‌های نگران‌کننده‌ای مواجه شده است. با توجه به شواهد موجود از فرونشست گسترده در سطح دشت سلماس (شکل ۸)، انجام یک پژوهش که بتواند بر اساس مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار در وقوع پدیده فرونشست، نقشه حساسیت یا پتانسیل فرونشست



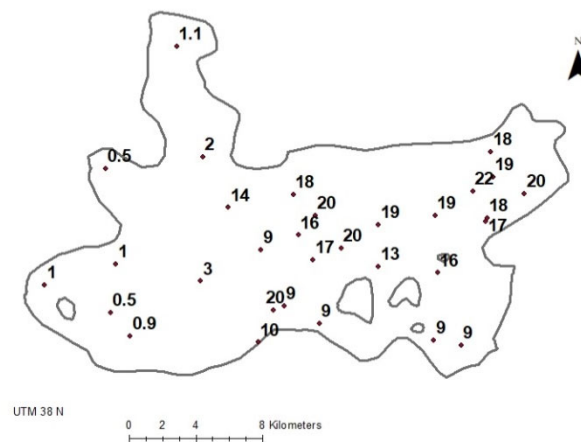
شکل ۸- فرونشست مشاهده‌ای در دشت سلماس (تاریخ ۱۴۰۲/۴/۴)
 Fig. 8. Observed subsidence in Salmas plain (Date: 25 June, 2023)

سازمان‌ها و ارگان‌های مختلف شامل سازمان نقشه‌برداری کل کشور، واحد GIS سازمان برنامه و بودجه، سازمان

نقشه‌های مشاهده‌ای فرونشست زمین در دشت سلماس: برای تهیه نقشه فرونشست مشاهده‌ای، از

مشاهده مقدار فرونشست زمین از چاه‌های پیژومتری که در منطقه وجود داشت، صورت گرفت. در شکل ۸، نحوه محاسبه مقدار فرونشست از مشاهده چاه‌های پیژومتری نشان داده شده است. در شکل ۹، نقشه مشاهداتی فرونشست زمین در آبخوان دشت سلماس آورده شده است. تاریخ بازدید میدانی و ثبت اطلاعات مربوط به شکل ۹، ۱۴۰۲/۰۴/۰۴ است.

زمین‌شناسی استان، سازمان آب منطقه‌ای استان و سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان غربی، برای دریافت داده‌ها پیگیری‌های لازم انجام شد، اما داده و نقشه مشاهده‌ای مورد تأیید وجود نداشت و تنها اطلاعات موجود مربوط به سازمان نقشه‌برداری کل کشور است که فرونشست را تنها در دو نقطه از محدوده آبخوان دشت سلماس گزارش کرده است. بنابراین، برای تهیه داده‌های مشاهده‌ای فرونشست زمین، تنها راه‌حل در بازدیدهای میدانی، با همکاری اداره امور آب شهرستان سلماس و



شکل ۹- نقشه فرونشست زمین مشاهداتی آبخوان دشت سلماس (اعداد به سانتی‌متر است).

Fig. 9. Observational subsidence map of Salmas plain aquifer (numbers are in centimeters)

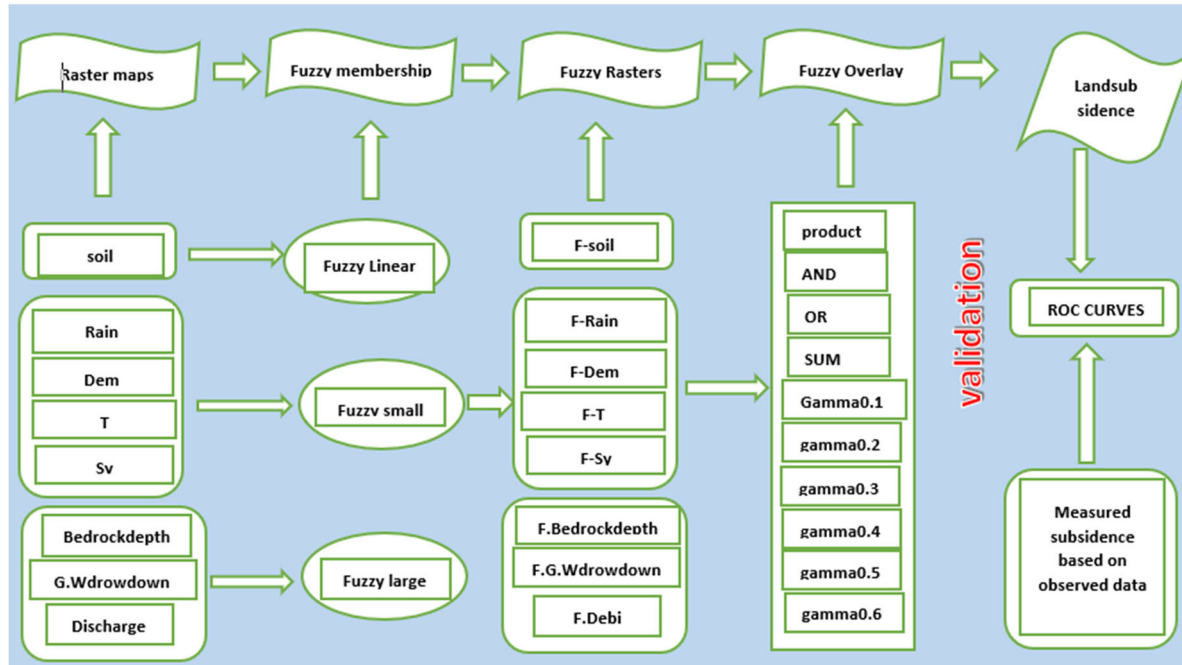
نقشه مدل رقومی ارتفاع و نقشه بافت خاک و چ) داده‌های کلیماتولوژیکی شامل نقشه‌های بارش است. مطابق شکل ۱۰، روش پژوهش شامل تهیه نقشه‌های رستری عوامل هشت‌گانه ذکر شده و سپس، فازی‌سازی این لایه‌ها با توابع فازی (small, large, linear) است. با توجه به تأثیری که افزایش یا کاهش هر کدام از این عوامل در فرونشست زمین دارند، فازی‌سازی صورت می‌گیرد.

مثلاً با کاهش بارش، فرونشست افزایش می‌یابد. بنابراین، این لایه رابطه معکوس با فرونشست زمین دارد و با تابع small فازی می‌شود و یا با کاهش افت سطح آب زیرزمینی، فرونشست کاهش می‌یابد بنابراین، این لایه رابطه مستقیم با فرونشست زمین دارد و با تابع large فازی می‌شود. پس از تهیه نقشه‌های فازی، لایه‌ها با عملگرهای فازی (SUM, AND, OR, Gamma)

روش کار: در شکل ۱۰، نمودار گردشی پژوهش حاضر نشان داده شده است. با استناد به مبانی نظری از مدل‌های مفهومی و نرم‌افزار GIS به‌عنوان ابزارهای اصلی برای تعیین پهنه‌بندی حساسیت فرونشست استفاده شد. سیستم اطلاعات جغرافیایی و نرم‌افزار GIS قابلیت زیادی برای ارزیابی و ثبت داده‌های پرحجم محیطی و پردازش داده‌ها دارد. این نرم‌افزار با افزایش سرعت و دقت محاسبات، مناطق مستعد فرونشست را پیش‌بینی می‌کند. در بررسی و تعیین فرونشست عوامل متعددی دخالت دارند. برای پهنه‌بندی حساسیت منطقه از لحاظ فرونشست سه تیپ اطلاعات استخراج شد که شامل الف) داده‌های هیدروژئولوژیکی شامل افت سطح آب زیرزمینی، ضریب انتقال‌پذیری، ضریب آبدهی ویژه، مقدار تخلیه یا پمپاژ، عمق سنگ بستر، ب) داده‌های ژئولوژیکی شامل

ای صحرایی، مقایسه کرده و با شاخص عملکرد منحنی ROC کنترل و صحت‌سنجی صورت می‌گیرد.

PRODUCT) با هم تلفیق شده و نقشه واحد حساسیت فرونشست تحلیلی آبخوان به دست می‌آید. در نهایت، برای انتخاب بهترین عملگر ترکیب، نتایج را با داده‌های مشاهده



شکل ۱۰- نمودار گردش پژوهش حاضر
Fig. 10. The flow chart of current research

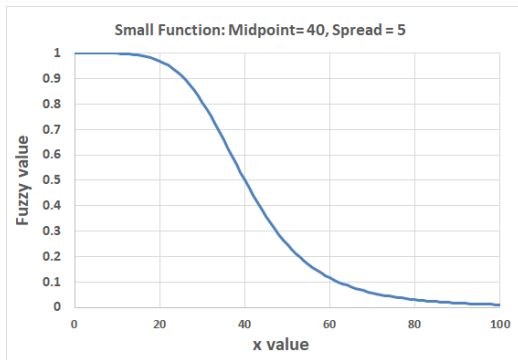
انتخاب این اعداد و انتخاب نوع تابع بر اساس هدف پروژه و نوع تأثیری که متغیر مورد استفاده در هدف پروژه دارد، تعیین می‌شود.

در این پژوهش، برای بررسی تأثیر عوامل مختلف روی فرونشست زمین، با توجه به اینکه کاهش یا افزایش هر کدام از این پارامترها، اثر کاهشی یا افزایشی بر فرونشست خواهد داشت، از توابع عضویت فازی Fuzzy large، Fuzzy linear، Fuzzy small استفاده شد.

تابع عضویت Large: عملکرد این تابع به این صورت است که مقادیر بالای عدد میانی یا Midpoint را به سمت یک و مقادیر کمتر از عدد میانی را به سمت صفر فازی می‌کند و به عدد میانی، مقدار 0.5 اختصاص می‌دهد. آن دسته از عوامل مؤثر که افزایش مقدار یا ارزش پیکسل‌ها در آنها بیانگر پتانسیل بالاتر وقوع فرونشست باشند و به عبارت دیگر، رابطه مستقیم با میزان فرونشست زمین دارند، شامل لایه‌های افت سطح ایستابی، عمق سنگ بستر

توابع عضویت و اپراتورهای فازی: به منظور استفاده از عملگرهای فازی و فازی سازی، در مرحله نخست باید تابع عضویت فازی به تفکیک برای هر لایه رقومی با توجه به نقش و نحوه تأثیر آن در وقوع فرونشست با توجه به شرایط منطقه تعریف شود. پس از تهیه لایه‌های رستری عوامل مؤثر در فرونشست، با تابع fuzzy membership فازی سازی لایه‌ها، برای امکان تلفیق آنها انجام شد. تعریف مجموعه فازی برای متغیرهای ورودی را فازی‌سازی می‌گویند.

فازی‌سازی یعنی قرار دادن ورودی‌ها و معیارها در رنج عددی بین صفر و یک است. در این نوع قرارگیری، مقدار صفر برای محدوده‌ای از شاخص‌های ورودی تعلق می‌گیرد که کمترین ارزش را دارد و مقدار یک محدوده‌ای را شامل می‌شود که بیشترین ارزش و تأثیر را در هدف نهایی پروژه خواهد داشت. هر رنج عددی موجود در لایه‌های ورودی را می‌توان بر اساس توابع مورد نظر فازی‌سازی کرد که



شکل ۱۲- تابع عضویت small
Fig. 12. Small Membership function

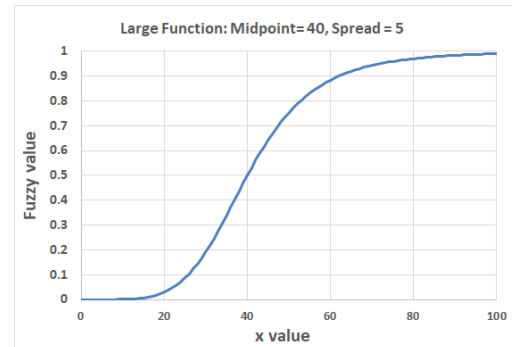
تابع عضویت Linear یا خطی، مقدار پیکسل‌ها را به صورت خطی بین صفر و یک قرار می‌دهد. به طوری که مقدار صفر برای داده‌های حداقل و مقدار یک برای داده‌های حداکثر اختصاص پیدا می‌کند. در این نوع تابع به دو مقدار حداقل و حداکثر نیاز است. پارامتر تیپ خاک با استفاده از این تابع عضویت، فازی‌سازی می‌شود. برای فازی‌سازی این نوع شاخص‌ها، به هر طبقه کیفی یک عدد اختصاص می‌یابد به طوری که عدد صفر به کمترین مقدار گسسته کد خاک با کمترین حساسیت و عدد یک، به بزرگ‌ترین مقدار کد تیپ خاک با بیشترین حساسیت اختصاص داده می‌شود (Raines et al., 2010).

به عبارت دیگر، مقادیر کد خاک هر یک پیکسل با یک تابع خطی ساده، بین مقادیر صفر و یک فازی‌سازی می‌شوند. توابع خطی برای متغیرهای گسسته مثل بافت خاک و کاربری اراضی که ارزش هر پیکسل، یک عدد قراردادی یا اسمی تعریف شده توسط کاربر تعیین شده، قابل استفاده است.

در فازی‌سازی لایه‌های رستری، عوامل مؤثر در فرونشست، با توابع عضویت small, large, linear باید دقت شود که عدد فازی ۰/۵ به داده midpoint تعلق می‌گیرد. به طور مثال، افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان از صفر تا ۳۸ متر متغیر است. نرم‌افزار به طور پیش فرض عدد ۱۹ را به عنوان midpoint قرار می‌دهد. به این معنی که افت ۱۹ متر سطح آب زیرزمینی در لایه رستری، متناظر عدد ۰/۵ در لایه فازی است. با توجه به شواهد و تجربیات، افت سطح آب زیرزمینی، بیشترین تأثیر را در فرونشست زمین دارد. بنابراین، قرار دادن مقدار افت ۱۹

و دبی بهره‌برداری از چاه‌های پمپاژ، با تابع عضویت Large فازی‌سازی شد و رابطه ریاضی آن به صورت زیر است (Mohebbi Tafreshi et al., 2019).

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{f_1}} \quad (2)$$



شکل ۱۱- تابع عضویت Large
Fig. 11. Large Membership function

شاخص f_1 در تابع عضویت بین ۱ تا ۱۰ توسط کاربر قابل تعریف است. f_2 برابر midpoint (عدد میانی) است که مقدار آن باید توسط کاربر بهینه‌سازی شود. هرچه f_1 بزرگتر شود، شیب منحنی تابع عضویت، تندتر می‌شود. از تابع عضویت small با توجه به اینکه فاکتورهای بارش، ضریب انتقال‌پذیری، ضریب آبدهی و مدل رقومی ارتفاع، اثر معکوس روی فرونشست دارند استفاده شد. چون با کاهش ارزش پیکسل‌ها در هر یک از این لایه‌ها، حساسیت فرونشست به طور مفهومی یا مورد انتظار، می‌تواند بیشتر باشد. نواحی از دشت سلماس با بارش کمتر، مقادیر ارتفاعی پایین‌تر و ضریب آبدهی و ضریب انتقال‌پذیری کمتر، حساسیت وقوع فرونشست بالاتری دارند. تابع عضویت small به صورت زیر تعریف می‌شود (Mohebbi Tafreshi et al., 2018; Raines et al., 2010)

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{f_2}\right)^{f_1}} \quad (3)$$

کمتر از ۱۰ متر در لایه فازی عدد کمتر از ۰/۵ و افت‌های بالای ۱۰ متر عدد فازی بیشتر از ۰/۵ را نشان می‌دهند. افت صفر که در منطقه گل اوزان به ثبت رسیده، عدد فازی صفر و افت ۳۸ متر که در صدقیان مشاهده شده، عدد فازی یک را نشان می‌دهد. هرچه افت بیشتر باشد، احتمال فرونشست بیشتر است و هر چه افت کمتر باشد، احتمال فرونشست کمتر است.

هرچه بافت خاک ریزدانه و رسی باشد، پتانسیل وقوع فرونشست بیشتر است. در خاک‌های درشت‌دانه احتمال فرونشست کمتر است. بنابراین، در هر قسمت آبخوان که بافت خاک ریزدانه است، عدد فازی به طرف یک و هر قسمت که بافت خاک درشت‌دانه است، عدد فازی به طرف صفر میل می‌کند. برای فازی‌سازی لایه دبی بهره‌برداری از چاه‌ها، با توجه به اینکه دامنه دبی بهره‌برداری از چاه‌ها بین یک تا شش میلیون مترمکعب در سال است، Midpoint را روی سه میلیون قرار داده که در لایه فازی عدد ۰/۵ را نشان می‌دهد. بیشترین برداشت آب از آبخوان مربوط به مناطق صدقیان و حبشی و کنگرلو است که در نقشه فازی عدد نزدیک به یک را نشان می‌دهند و کمترین برداشت آب از مناطق آغ اسماعیل و آغ زیارت است که در لایه فازی اعداد نزدیک به صفر را نشان می‌دهند.

دامنه ضریب آبگذری در آبخوان بین صفر تا ۰/۰۳۳ است. برای فازی‌سازی لایه ضریب آبگذری، midpoint را روی ۰/۰۱۵ قرار داده و بیشترین ضریب آبگذری با ۰/۰۳۳ که در گل اوزان به ثبت رسیده، در لایه فازی عدد صفر را نشان می‌دهد که بیانگر فرونشست حداقل است. کمترین ضریب آبگذری در خان تختی به ثبت رسیده که در لایه فازی عدد یک را نشان می‌دهد که بیانگر فرونشست حداکثری است. ضریب انتقال‌پذیری آبخوان دشت سلماس بین ۲۰۰ تا ۸۲۵۹ مترمربع در روز متغیر است. بالاترین مقدار این ضریب در قسمت مرکز آبخوان به ثبت رسیده که در لایه فازی کمترین اعداد و نزدیک به صفر خواهد بود.

به لحاظ نقشه مدل رقومی ارتفاع، نیمه شرقی آبخوان شامل دشت‌های منتهی به دریاچه است که ارتفاع کمی دارند. لایه فازی در این قسمت اعداد بالای ۰/۵ و نیمه

متر با عدد فازی ۰/۵ منجر به خطای فاحش در محاسبات خواهد شد. جهت جلوگیری از بروز خطاهای احتمالی در فازی‌سازی لایه‌ها، باید به عدد تعلق گرفته به midpoint دقت و توجه کافی مبذول داشت. علاوه بر f_2 که نشان دهنده midpoint در فرمول فازی‌سازی است، f_1 نیز بیانگر spread است که عددی بین یک تا ده است. اگر spread را عدد بزرگ در فازی‌سازی، در نظر گرفت، داده‌های بیشتری را به‌عنوان صفر و یک در نظر می‌گیرد. به‌عنوان مثال، در فازی‌سازی لایه بارش با دامنه ۳۶۶-۲۰۰ میلی‌متر، با $spread = 8$ داده‌های کمتر از ۲۵۰ عدد فازی یک و داده‌های بیشتر از ۳۲۰ عدد فازی صفر می‌گیرند. در صورتی که با $spread = 2$ فقط داده بارش ۲۰۰، عدد فازی یک و فقط داده بارش ۳۶۶ عدد فازی صفر می‌گیرد. توجه به این نکات سبب می‌شود، لایه فازی از دقت بالایی برخوردار باشد.

نتایج و بحث

نقشه‌های فازی عوامل موثر بر وقوع فرونشست:

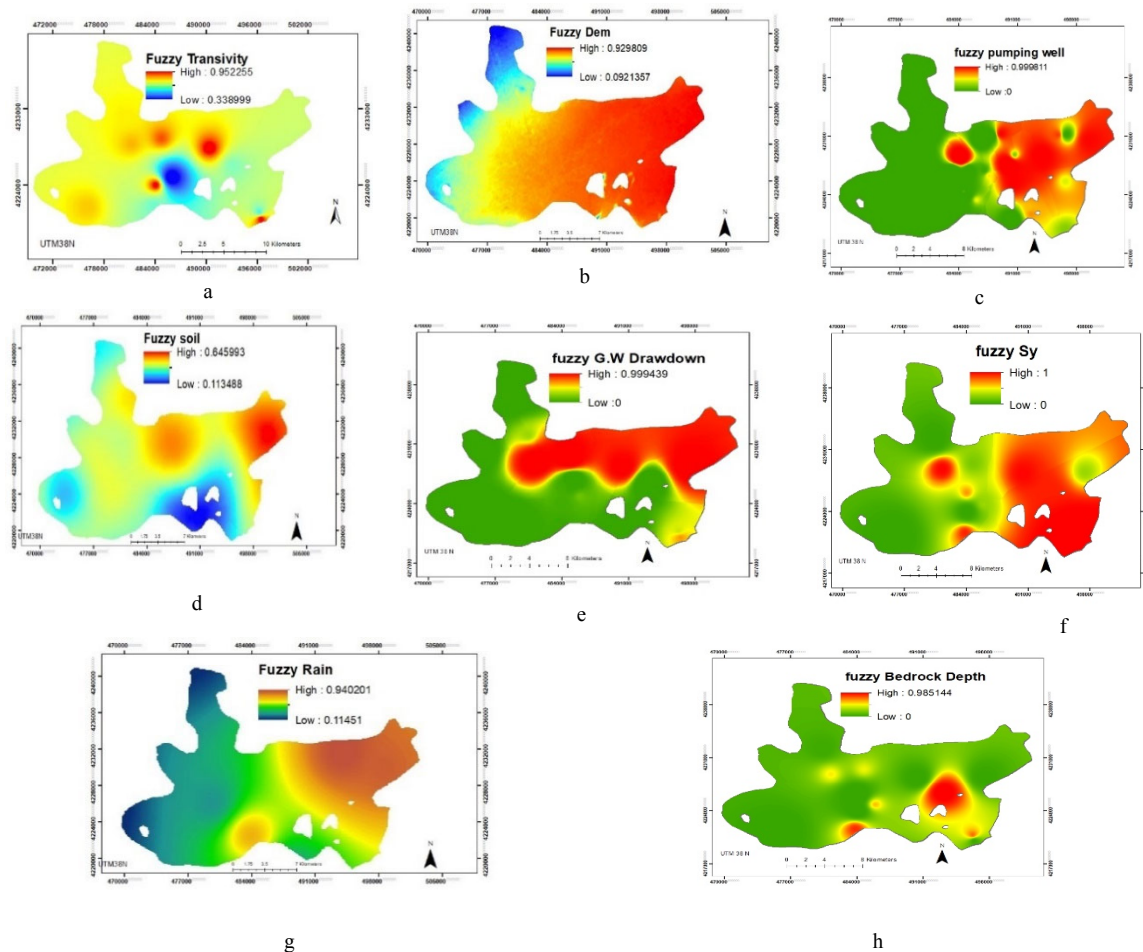
طبق استدلال هرچه مقدار بارش کمتر باشد، پتانسیل یا حساسیت فرونشست بیشتر و هر چه مقدار بارش بیشتر باشد، حساسیت فرونشست کمتر می‌شود (به‌دلیل امکان تغذیه آب زیرزمینی بیشتر). دامنه بارش در سطح آبخوان بین ۲۰۰ تا ۳۶۶ میلی‌متر است.

در لایه فازی بارش، midpoint را روی ۲۸۰ قرار داده که عدد ۰/۵ را نشان می‌دهد. بارش‌های کمتر از ۲۸۰ میلی‌متر که در نیمه شرقی آبخوان رخ داده است، اعداد فازی ۰/۵ تا یک و بارش‌های بیشتر از ۲۸۰ میلی‌متر که در نیمه غربی آبخوان به ثبت رسیده، اعداد فازی صفر تا ۰/۵ را در لایه فازی می‌گیرد. ذکر این نکته ضروری است که در فازی‌سازی با توابع Fuzzy Linear، Fuzzy Large، Fuzzy small حد پایین و بالای لایه فازی با توجه به توابع، لزوماً صفر و یک نیست.

فازی‌سازی لایه افت سطح آب زیرزمینی: دامنه افت سطح آب زیرزمینی بین صفر تا ۳۸ متر است. در لایه فازی شده افت سطح آب، midpoint را روی ۱۰ متر قرار داده که در لایه فازی عدد ۰/۵ را نشان می‌دهد. افت‌های

متر است. در لایه فازی این قسمت عدد نزدیک به یک را نشان می‌دهد و در سوره، عمق سنگ بستر ۲۹ متر است و در لایه فازی عدد نزدیک به صفر را نشان می‌دهد. در شکل ۱۳، نقشه‌های رستری فازی شده لایه‌های هشت گانه، ارائه شده است.

غربی آبخوان که شامل ارتفاعات است در لایه فازی اعداد کمتر از ۰/۵ را نشان می‌دهد. هرچه عدد فازی به یک نزدیک‌تر باشد، حساسیت فرونشست زمین بالاست. دامنه عمق سنگ بستر در آبخوان دشت سلماس بین ۲۹ تا ۱۵۹ متر متغیر است. در سلطان‌احمد عمق سنگ بستر ۱۵۹



شکل ۱۳- نقشه‌های رستری فازی شده فاکتورهای موثر، a: ضریب انتقال‌پذیری، b: Dem، c: دبی بهره برداری از چاه‌ها، d: بافت خاک، e: افت سطح آب زیرزمینی، f: ضریب ذخیره، g: نقشه بارش، h: عمق سنگ بستر

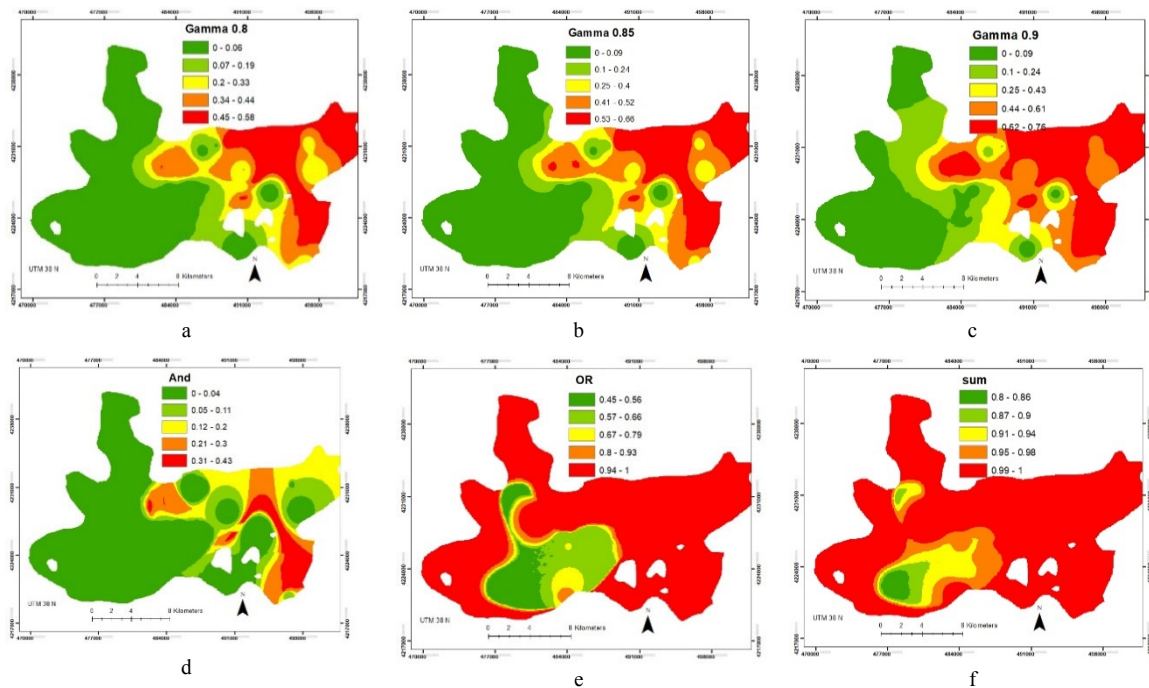
Fig. 13. Fuzzy raster maps of affecting factors, a: Transivity, b: DEM, c: Pumping well, d: Soil texture, e: G.W Draw down, f: Sy, g: Rain, h: Bedrock depth

دارند مقدار حداقل فازی یک پیکسل را در بین هشت لایه رقومی فازی انتخاب کنند. به عبارت دیگر، این عملگر فازی تمایل به حداقل نشان دادن مقدار عدد فازی یک پیکسل در مجموع لایه‌ها دارند. در این حالت، بیشتر منطقه یا دشت آبخوان از نظر مقدار فازی به سمت عدد

پس از فازی شدن هر یک از لایه‌های رقومی با توابع عضویت یاد شده، از عملگرها یا اپراتورهای فازی AND، OR، SUM، GAMMA، PRODUCT برای ترکیب یا همپوشانی فازی با ابزار Fuzzy Overlay نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. اپراتور ضرب و AND فازی تمایل

یک تمایل دارند و بیشتر منطقه از نظر وقوع فرونشست در طبقه بالای حساسیت قرار خواهند گرفت. اپراتور گامای فازی، در واقع یک روش وزنی ترکیب اپراتورهای فازی جمع و ضرب است. اگر مقدار گاما برابر یک باشد، نتیجه مشابه با اپراتور جمع فازی و اگر مقدار گاما صفر باشد، نتیجه مشابه با اپراتور ضرب فازی است. در این پژوهش، مقادیر گاما ۰/۸ و ۰/۸۵ و ۰/۹ تعریف شده و برای هر مقدار گاما، یک لایه فازی ترکیبی به دست آمد.

حداقل فازی یا صفر تمایل دارند و بیشتر منطقه از نظر وقوع فرونشست در طبقه پایین حساسیت قرار خواهند گرفت. در مقابل، اپراتورهای فازی OR و SUM تمایل دارند مقدار حداکثر فازی یک پیکسل را در بین هشت لایه رقومی فازی انتخاب کنند. به عبارت دیگر، این عملگرهای فازی، تمایل به حداکثر نشان دادن مقدار حساسیت یا عدد فازی یک پیکسل در مجموع لایه‌ها دارند. در این حالت، بیشتر منطقه یا دشت آبخوان از نظر مقدار فازی به سمت عدد حداکثر فازی یا



شکل ۱۴- نقشه ترکیب فازی، a: گامای ۰/۸، b: گامای ۰/۸۵، c: گامای ۰/۹، d: and، e: or، f: sum
Fig. 14. Combined fuzzy map, a: Gamma 0.8, b: Gamma 0.85, c: Gamma 0.9, d: and, e: or, f: sum

که میزان دقت را به صورت کیفی و کمی برآورد می‌کند. به منظور ارزیابی دقت نتایج مدل از مساحت سطح زیر این منحنی AUC^۱ استفاده می‌شود. با افزایش مقدار AUC، دقت و صحت نتایج، افزایش می‌یابد. بنابراین، بعد از همپوشانی لایه‌ها، برای مقایسه بین حساسیت فرونشست زمین تحلیلی و فرونشست مشاهده‌ای از منحنی ROC استفاده شد.

بر اساس نقشه مقادیر عمق فرونشست مشاهداتی و پراکنش نقاط و روش منحنی ROC معیار سطح زیر منحنی AUC و همپوشانی پهنه‌های حساسیت بالاتر با شواهد زمینی و انطباق حداکثر با مقادیر فازی تمام لایه های فازی، در نهایت، بهترین نقشه حساسیت فرونشست بر اساس مقدار بهینه گاما برای دشت سلماس به دست آمد. منحنی ROC، به عنوان یک روش کارآمد در شناسایی میزان دقت احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌ها مطرح شده

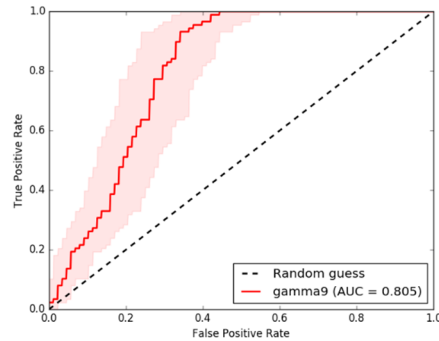
¹ Area Under the ROC Curves

زمینی دارد، هرچند مقدار AUC کمتری دارد. ذکر این نکته ضروری است، عملگرهای حداقل سازی AND و Product با ایجاد منطقه با حساسیت کم و عملگرهای حداکثر سازی OR و SUM با حداکثر سازی منطقه، نمی توانند کارایی مطلوبی در تهیه نقشه حساسیت فرونشست داشته باشند و در اینجا فقط برای نمایش دادن ضعف کارایی اپراتورهای فازی در حداکثر یا حداقل سازی حساسیت فرونشست، استفاده شده است.

نقشه ترکیبی گامای ۰/۹ که از روی هم قرارگیری عوامل هشت گانه استخراج شد، به خوبی بیانگر این است که در نیمه شرقی آبخوان حساسیت فرونشست زمین بسیار بالاتر از نیمه غربی است. در مشاهدات میدانی نیز این نظریه به وضوح رویت شد. نتایج اعتبارسنجی نقشه های فازی گاما و شواهد زمینی بر اساس منحنی مذکور نشان داد، عملگر فازی گاما با مقدار ۰/۹ دارای مقدار سطح زیر منحنی AUC برابر ۰/۸۰۵ است.

بر اساس پردازش تصاویر راداری ماهواره سنتینل A1 در سال ۱۴۰۱، نقشه عمق فرونشست دشت سلماس توسط کارشناسان فنی سازمان نقشه برداری کشور تهیه و اعتبارسنجی شده است. به دلیل اینکه نویسندگان به نقاط شواهد زمینی مورد استفاده توسط سازمان مذکور، دسترسی نداشتند، لذا، در تیرماه ۱۴۰۲ اقدام به پیمایش میدانی کرده و تعداد ۳۰ نقطه از دشت سلماس مطابق شکل ۸ (مشاهدات فرونشست مجاور چاه های پیژومتری و اراضی با فرونشست شدید) انتخاب شد.

به دلیل انطباق زیاد شواهد زمینی و نقشه مذکور، از آن به عنوان رفرنس یا شواهد رستری مشابه تحقیقات سایر محققان در ایران و خارج استفاده شده است. به عبارت دیگر، در ارزیابی حساسیت فرونشست زمین با روش منطق فازی انتظار این است که نواحی با مقادیر فازی بالا با مناطق با عمق فرونشست زیاد، تطابق قابل قبول داشته باشند. لازم به ذکر است از ضرورت های ارزیابی روش های تهیه نقشه حساسیت فرونشست، اعتبارسنجی نقشه های فازی با شواهد رستری است که در تحقیقات گذشته مورد توجه قرار گرفته است (Mohebbi; Farryabi, 2023) و همان طور که در شکل ۱۶ و نقشه



شکل ۱۵- منحنی ROC برای نقشه فازی گامای ۰/۹

Fig. 15. Roc curve for fuzzy gamma 0.9

جدول ۳- درصد مساحت زیرمنحنی عملگرهای همپوشانی فازی

Table 3. Percentage of the area under curve for different fuzzy overlay operations

model	Gamma 0.8	Gamma 0.85	Gamma 0.9	sum	AND	OR
AUC	0.805	0.804	0.805	0.886	0.767	0.693

همانطور که در بخش روش کار توضیح داده شد، بعد از فازی سازی لایه های رقومی مربوط به هشت شاخص مؤثر در وقوع فرونشست زمین، تلفیق لایه ها بر اساس عملگرهای فازی انجام شد. برای تهیه نقشه حساسیت یا پتانسیل وقوع فرونشست دشت سلماس، هشت لایه رستری فازی شده باید با هم ترکیب شوند. برای تلفیق لایه ها از همپوشانی فازی شامل GAMMA، AND، OR، SUM، PRODUCT استفاده شد.

در شکل ۱۴، نقشه های نهایی فازی (خروجی هشت لایه)، ارائه شده است. عملگر ضرب فازی باعث می شود، مقادیر فازی یک پیکسل در هشت لایه با یکدیگر ضرب شوند و نقشه نهایی از نظر حساسیت وقوع، مقادیر پایین تری داشته باشند. به عبارت دیگر، این عملگر باعث حداقل سازی حساسیت مناطق می شود. عملگر گاما با مقدار پارامتر مختلف قابل استفاده است (گاما ۰/۱ تا ۰/۹) و در واقع ترکیبی از مدل جمع و ضرب فازی هست که در این پژوهش مورد توجه بیشتر قرار گرفته است.

در پژوهش حاضر، در بین نقشه های مختلف گاما، نقشه گامای با مقدار ۰/۹ بهترین همپوشانی را با شواهد زمینی فرونشست دشت سلماس نشان داد. علیرغم اینکه مقدار AUC اپراتور فازی sum بالاتر است ولی در نقشه فازی گاما با مقدار ۰/۹ بیشترین انطباق را با واقعیت

نتیجه‌گیری

استان آذربایجان غربی، علیرغم اینکه جزء استان‌های پر آب کشور محسوب می‌شود، اما وقوع خشکسالی‌های متعدد و پیوسته طی دو دهه اخیر و کاهش منابع آب‌های سطحی، باعث توجه و مصرف بی‌رویه بهره‌برداران از منابع آب‌های زیرزمینی سهل‌الوصول در آبخوان‌های استان و افزایش افسارگسیخته تعداد چاه‌های مجاز و غیرمجاز شده است.

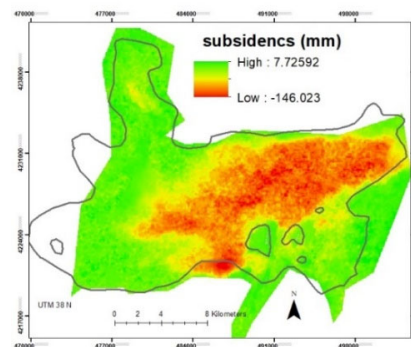
در حال حاضر، در برخی دشت‌های استان نظیر دشت سلماس، اثرات منفی کاهش حجم مخازن آب زیرزمینی به وضوح مشاهده می‌شود که یکی از مهم‌ترین شواهد آن، وقوع و گسترش پدیده فرونشست زمین در سال‌های اخیر است و با توجه به آهستگی و خزانده بودن این پدیده مخرب، مورد غفلت قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، ارزیابی حساسیت فرونشست دشت سلماس با بهره‌گیری از لایه‌های عوامل مؤثر در فرونشست دشت سلماس با نرم افزار ArcGIS و منطق فازی است.

نتایج نشان داد که از بین عوامل هشت‌گانه دخیل در فرونشست زمین در دشت سلماس، دو لایه (عمق سنگ بستر و ضریب آبگذری) را می‌توان به‌عنوان اصلی‌ترین شاخص‌های فرونشست در این منطقه معرفی کرد. هر قسمت آبخوان عمق سنگ بستر زیاد و ضریب آبگذری کمتر بوده است، فرونشست زمین بیشتر رخ داده است. علاوه بر این، در بحث ترکیب لایه‌ها، در بین نقشه‌های مختلف گاما، نقشه گاما با مقدار ۰/۹ بهترین همپوشانی را با شواهد زمینی فرونشست دشت سلماس نشان داد. علیرغم اینکه مقدار AUC اپراتور فازی sum بالاتر است ولی در نقشه فازی گاما با مقدار ۰/۹ بیشترین انطباق را با واقعیت زمینی دارد.

هرچند مقدار AUC کمتری دارد. ذکر این نکته ضروری است، عملگرهای حداقل سازی AND و Product با ایجاد منطقه با حساسیت کم و عملگرهای حداکثر سازی OR و SUM با حداکثر سازی منطقه، نمی‌توانند کارایی مطلوبی در تهیه نقشه حساسیت فرونشست داشته باشند و در اینجا فقط برای نمایش دادن ضعف کارایی اپراتورهای

فازی شکل ۱۴ (گامای ۰/۹) مشاهده می‌شود، انطباق مکانی قابل قبول بین نقشه فرونشست (عمق زیاد) و نقشه گامای ۰/۹ وجود دارد. علیرغم اینکه مقدار سطح زیر منحنی سایر عملگرهای فازی نیز بالاتر از مقدار ۰/۷ است. بر اساس پیمایش میدانی در تیرماه ۱۴۰۲، در کلشان واقع در جنوب آبخوان، بیشتر از ۲۰ سانتی‌متر فرونشست زمین مشاهده شد. عمق سنگ بستر در کلشان بیشتر از ۱۲۰ متر است و جزء مناطق با عمق سنگ بستر زیاد محسوب می‌شود. ضریب آبگذری برای این قسمت خیلی پایین بوده و ۰/۱۲ درصد به‌دست آمده است. سایر شاخص‌های هشت‌گانه در این قسمت از دشت سلماس نظیر افت سطح آب زیرزمینی و دبی بهره‌برداری از چاه‌ها و غیره، مقادیر متوسط دامنه تغییرات خود را دارند.

بنابراین، این دو لایه (عمق سنگ بستر و ضریب آبگذری) را می‌توان به‌عنوان اصلی‌ترین شاخص‌های فرونشست در این منطقه معرفی کرد. در لایه ترکیبی گامای ۰/۹، این منطقه جزء پهنه‌های با حساسیت کم از نظر فرونشست است که به‌عنوان نقطه ضعف اپراتورهای فازی در شناسایی مناطق با حساسیت بیشتر فرونشست در دشت سلماس دلالت دارد. به عبارت دیگر، عملگر فازی گاما نیز در مواردی علیرغم داشتن سطح زیرمنحنی بالا قادر به ارزیابی دقیق نیست. این موضوع با استفاده از روش‌های متداول وزندهی شاخص‌ها و کاربرد نظریه‌های استنتاج فازی در گام بعدی پژوهش مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.



شکل ۱۶- نقشه فرونشست دشت سلماس به میلی‌متر بر اساس

پردازش تصاویر ماهواره‌ای (منبع: سازمان نقشه‌برداری ایران)

Fig. 16. The subsidence depth of Salmas Plain (mm) based on satellite image processing (Source: National Cartography Center of Iran)

فازی در حداکثر یا حداقل سازی حساسیت فرونشست زمین، استفاده شده است.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از کلیه افرادی که در ارتقای کیفیت مقاله نقش مؤثری ایفا کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

- Consulting Engineers, 2014. Studies on updating water resources balance for the studied areas in the Lake Urmia Basin ending period in water year 1389-90. Water Resources Balance, Ministry of Energy, West Azerbaijan Regional Water Company (in Persian).
- Dehghani, M., Nikoo, M.R., 2019. Monitoring and management of land subsidence induced by over-exploitation of groundwater. In Natural Hazards GIS-Based Spatial Modeling Using Data Mining Techniques, 271-296, Springer, Cham (in Persian).
- Faryabi, M., 2023. A fuzzy logic approach to land subsidence susceptibility mapping: using hydrogeological data. Environ. Earth Sci. 82, 209.
- FAO, 2015. Shared global vision for Groundwater Governance 2030 and a call-for-action.
- Galloway, D.L., Jones, D.R., Ingebritsen, S.E., 1999. Land subsidence in the United States (Vol. 1182). Geological Survey (USGS).
- Gharekhani, M., Nadiri, A.A., Khatibi, R., Sadeghfam, S., 2021. An investigation into time-variant subsidence potentials using inclusive multiple modelling strategies. J. Environ. Manage. 294, 112949.
- Hosseini Milani, M., 1994. Overdraft of groundwater resources and its effects. Proceedings of the National Conference of groundwater resources, Sirjan, Iran (in Persian).
- Kakar, N., Kakar, D.M., Khan, A.S., Khan, S.D., 2019. Land subsidence caused by groundwater exploitation in Quetta Valley, Pakistan. Int. J. Eco. Environ. Geo. 10-19
- Konikow, L.F., 2011. Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise. Geophys. Res. Letters 38(17).
- Lohman, S., 1961. Compression of elastic artesian aquifers. US Geol. Surv. Prof. Pap., 424-B, 47-49.
- Mesri, M., Satarzadeh, Y., 2017. Investigating the potential of land subsidence caused by the drop in the Ardabil plain aquifer water level. Proceedings of 16th Iranian Hydraulics Conference, September, Iran (in Persian).
- Mohebbi Tafresh, G., Nakhaei, M., Lak, R., 2021. Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. GeoJournal, 86(3), 1203-1223.
- Najafi Igdar, A., Choubin, B., Shirani, K., 2023. Land subsidence estimation in Salmas Plain using differential interferometric synthetic aperture radar algorithm. Watershed Manage. Res., in Press (in Persian).
- Nameghi, H., Hosseini, S.M., Sharifi, M.B., 2013. An analytical procedure for estimating land subsidence parameters using field data and InSAR images in Neyshabur Plain. Sci. Quart. J. Iranian Associ. Engineer. Geo. 6(1-2), 33-50 (in Persian).
- Nour, H., 2017. Analysis of groundwater resources utilization and their current condition in Iran. J. Rainwater Catch. Syst. 5(2), 29-38 (in Persian).
- Oh, H.J., Lee, S., 2010. Assessment of ground subsidence using GIS and the weights-of-evidence model. Engineer. Geo. 115(1), 36-48.
- Othman, A., Abotalib, A.Z., 2019. Land subsidence triggered by groundwater withdrawal under hyper-arid conditions: case study from Central Saudi Arabia. Environ. Earth Sci. 78(7), 243.
- Park, I., Choi, J., Lee, M.J., Lee, S., 2012. Application of an adaptive neuro-fuzzy inference system to ground subsidence hazard mapping. Computers Geosci. 48, 228-238.
- Putra, D.P.E., Setianto, A., Keokhampui, K., Fukuoka, H., 2011. Land subsidence risk assessment in Karst region, case study: Rongkop, Gunung Kidul, Yogyakarta-Indonesia. Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie-Festschrift Zum, 60, 39-50.
- Raines, G.L., Sawatzky, D.L., Bonham-Carter, G.F., 2010. New fuzzy logic tools in ArcGis 10: ArcUser. Esri.com.
- Maleki, A., Rezaee, P., 2016. Forecast locations at risk of subsidence plain Kermanshah. J. Spatial Plann. 20(1), 235-251 (in Persian).

- Saberi, j., Emamyari, K., 1989. Map of land resource and capacity assessment studies. Soil Water Res. Inst. Agricul. Nat. Resour. Res. Organiza. West Azarbaijan Province (in Persian).
- Saemian, P., Tourian, M.J., AghaKouchak, A., Madani, K., Sneeuw, N., 2022. How much water did Iran lose over the last two decades? J. Hydrol.: Region. Studies (in Persian).
- Safdari, Z., Nahavandchi, H., Joodaki, G., 2022. Estimation of groundwater depletion in Iran's catchments using well data. Water 14, 131 (in Persian).
- Salehi Moteahd, F., Hafezi Moghaddas N., Lashkaripour G.R., Dehghani. M., 2019. Geological parameters affected land subsidence in Mashhad Plain, north-east of Iran. Environ. Earth Sci. 78, 1-12 (in Persian).
- Todd, D.K., 1980. Ground water hydrology, 2d ed.: New York, John Wiley, 535
- Ty, T.V., Minh, H.V.T., Ram Avtar, R., Kumar, P., Hiep, H.V., Kurasaki, M., 2021. Spatiotemporal variations in groundwater levels and the impact on land subsidence in CanTho, Vietnam. Groundwater Sustain. Develop. 15, 100680.
- Waltham, A.C., 1989. Ground subsidence. Blackie & Son Limited.
- Yu, H., Gong, H., Chen, B., Liu, K., Gao, M., 2020. Analysis of the influence of groundwater on land subsidence in Beijing based on the geographical weighted regression (GWR) model. Sci. Total Environ. 738, 139405.
- Zarei, K., Rasulzadeh, A., Siddiqui, M., Ahmadzadeh, GH., Ramezani Moghadam, J., 2019. Determining the relationship between land subsidence and groundwater level drop with two methods of radar interferometry and GPS fixed station, case study: Selmas Plain. J. Irriga. Water Engineer. Iran 11(1), 168-182 (in Persian).
- Zhu, L., Zhua, L., Gong, H., Chen, Y., Wang, Sh., Ke, Y., Guo, G., Li, X., Chen, B., Wang, P., Teatini, P., 2020. Effects of water diversion project on groundwater system and land subsidence in Beijing, China. Engineer. Geo. 276, 105763.