

Study of effective factors in the formation of sinkholes in south of Poldokhtar, Iran

Mohammad Hossein Ghobadi¹, Abdulreza Nooryazdan^{1*}

1- Department of Geology, Sciences Faculty, Bu Ali-Sina University, Hamedan, Iran

Keywords: Sinkhole, Seymareh landslide, Jaydar Lake, Poldokhtar

1-Introduction

Sinkholes are a depression on the ground surface formed due to the sudden collapse of the caves' ceilings in the karstic areas or quaternary cemented sediments. These features, like a basin, drain the runoffs in that area toward themselves (Waltham et al., 2005; Gutierrez et al., 2008). Sinkholes have large dimensions in plains and flat areas and cause damage to industrial buildings and residential areas. Various remote sensing (RS) and geophysical methods and geological engineering studies can largely determine the areas susceptible to this phenomenon. Soluble bedrock, groundwater flow, and climate are of the most critical factors causing the sinkhole formation. Among these factors, soluble bedrock is a significant one. In the plain of Kabudarahang in Hamadan province in western Iran, numerous sinkholes have been created. These sinkholes threaten the infrastructure of the region, including the Hamadan power plant in western Iran. Using the AHP method, the susceptibility map of the region for sinkhole formation is provided, which indicates that with increasing the time intervals between the formation of sinkholes, their diameter is increased as well (Taheri et al., 2015). Studies in the Ebro River valley in the west of Zaragoza city in Spain show that about 70% of the sinkholes have been formed along with the main joint systems (Gutierrez et al., 2009). With the worldwide occurrence of the most massive rock avalanche in arid and non-volcanic areas along with Seymareh landslide in the southwest of Poldokhtar city in Lorestan Province in western Iran, three natural lakes were formed: Seymareh on the Seymareh River, Jaydar on the Kashkan River, and Gori Balmak on the Mirabad seasonal River. Presently, Seymareh and Jaydar lakes are dried, but a part of the Gory Balmak Lake is refilled during the seasonal floods to the level of the channel constructed in its western part. The sedimentary deposits of these lakes have characteristics of freshwater sediments. Moreover, they are over-consolidated because of their geological history. The bedrock of these sediments consists of soluble and evaporative Gachsaran Formation. The city of Poldokhtar, eight villages, a part of the main roads, and the oil and gas pipelines, and the industrial and agricultural centers of the region are located on the remnants of the old sediments of Jaydar and Gory Balmak lakes. Due to the presence of field evidence of karst forms such as sinkholes, caves, and galleries, geological engineering studies have been carried out to understand the causes of the formation of sinkholes.

2. Methodology

This study was conducted in three phases including desktop, field, and laboratory studies.

A. Desktop studies: IRS-P5 satellite imagery processing, DEM preparation with a resolution of 2.5 m, preparation of required maps, hydrogeology map, and the distribution of sinkholes.

B. Field studies: Geological surveys, measuring the joint system's specifications, preparing in-situ bedrock core samples using the Honda GX35 portable device, sampling of filler material and Gachsaran Formation marls. for conducting dispersion tests, sampling of lake sediments for collapsibility test, measuring underground water level changes using active zone piezometers, and field surveying to identify sinkholes, caves, and dissolution tunnels; in this study, the results of ground penetration radar (GPR) geophysical and electrical resistivity tomography (ERT) methods used to determine the depth of the bedrock. In subsidence studies in the southern regions of Poldokhtar city, these methods have been used.

*Corresponding author: reza_nooryazdan@yahoo.com

DOI: 10.22055/AAG.2019.28733.1946

Received 2019-02-27

Accepted 2019-10-18

C. Laboratory studies: Microscopic study of thin sections of bedrock, measurement of physical and mechanical indices of bedrock, chemical dispersion test, Crumb and double hydrometer tests, double consolidation test for determination of collapsibility index and XRD test.

3. Results and discussion

Sinkholes are the representative of the Karst area (Galloway et al., 1999). Factors such as the type and depth of the bedrock, the type and thickness of bedrock coverings, water acidity, groundwater table and its long-run fluctuations, and groundwater rotational flow play an important role in the formation of the sinkhole (Heidari et al., 2011). In the present work, factors affecting the formation of the sinkholes in the south of the Poldokhtar city including the geological characteristics of the bedrock and its sediments, as well as underground water conditions were investigated. As mentioned in the geological section, the bedrock of the region is the Gachsaran evaporative Formation. In the study area, the depth of the bedrock increases from east to west. In the east of the region, at the site of Gory Balmak Lake, and in the Jaydar Lake, the bedrock levels are 800, 750, and 640 m.a.s.l, respectively. The rock mass discontinuities are filled with dispersive soils, which are easily washed out and removed from the environment. Also, the amount of sulfate in the bedrock is high. Therefore, bedrock is susceptible to solubility and the formation of karstic forms. In more than 49% of the area, the bedrock is covered by the landslide lake sediments of Gory Balmak and Jaydar.

Geophysical investigations show that the average depth of bedrock in the Jaydar Plain and Gory Balmak Lake site is 70 and less than 10 m above the ground, respectively. Lake sediments and marl soils resulted from weathering of the marl section of the Gachsaran Formation filling the joints. Filler materials are often classified as moderate and severe dispersive soils, according to laboratory results. The field surveys in the study area have resulted in the identification of at least 32 sinkholes (Fig.1). The sinkholes in the catchment basin of the Gory Balmak Lake are of a cover-collapse type and have a depth of more than 5 m. Also, they are often group-shaped and in the same direction as the fault. Around the Jaydar Plain, the sinkholes are of a cover-subsidence type, with a diameter of more than 10 m and an apparent depth of less than 5 m. Horizontal tunnel galleries connect the floor of some sinkholes. These galleries transfer water from the top to bottom levels. The results of the double consolidation test indicate the high collapsibility potential of bedrock covering sediments. In the southern part of the Gori Balmak Lake and the center of the Jaydar Plain, there is no visible sinkhole evidence on the ground surface due to the high thickness of the crater sediments. Therefore, the roughness of these areas is due to the ground subsidence at the top of the sinkhole crater.

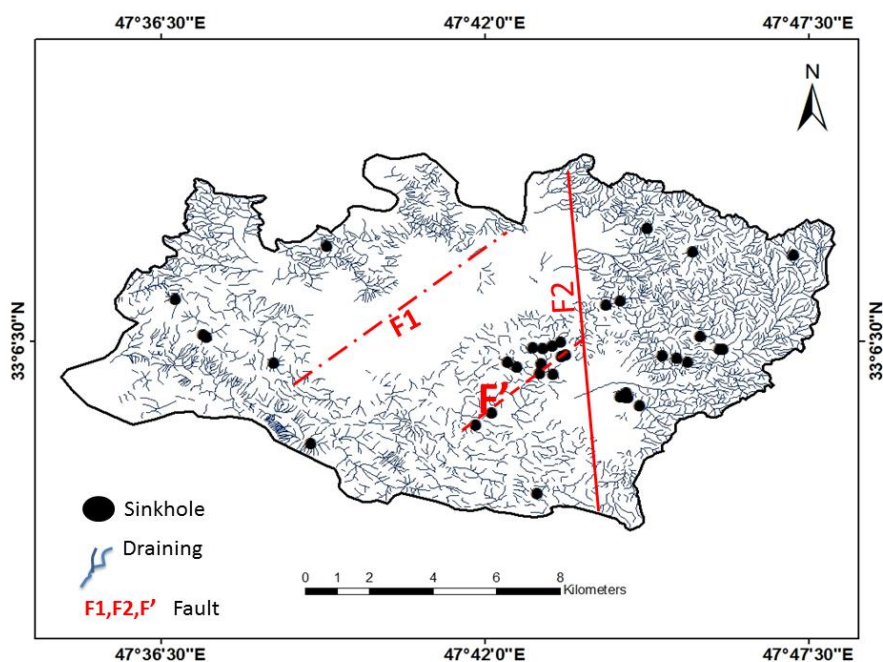


Fig 1. Type of sinkholes map in the study area.

4. Conclusion

The results of this study indicate that the soluble bedrock, the dispersion of the filler materials, and the collapsibility of bedrock covering sediments are practical factors in the study area in the formation of the sinkhole. Also, due to the difference in the geological age of sediments covering the bedrock, the presence of old and buried sinkholes in the area, especially in the Jaydar Plain, can create a severe threat to the centralized and linear structures in the region. Failure to manage the water resources of the region and the drop in the water table in the future can be useful in increasing the phenomenon of the sinkhole formation in the southern regions of Poldokhtar, especially in the Jaydar Plain.

References

- Galloway, D., Jones, D.R., Ingebritsen, S.E., 1999. Land subsidence in the United States, US Geological Survey Circular, 182.
- Gutierrez, F., Galve, J.P., Lucha, P., Bonachea, J., Pardo, G., Sanchez, J.A., Gutierrez, M., Gimeno, M.J., Remondo, J., Cendrero, A., 2009. Sinkholes in the salt-bearing evaporate karst of the Ebro River valley upstream of Zaragoza city (NE Spain) Geomorphological mapping and analysis as a basis for risk management. *Geomorphology* 108, 145-158.
- Gutierrez, F., Guerrero, J., Bonachea, J., Lucha, P., 2008. Asinkhole susceptibility zonation based on paleokarst analysis along a stretch of the Madrid-Barcelona high-speed railway built over gypsum and salt-bearing. *Engineering Geology* 102, 62-73.
- Heidari, M., Khanlari, G.R., TalebBeydokhti, A.R., Momeni, A.A., 2011. The formation of cover collapse sinkholes in North of Hamedan. *Iranian Journal of Geomorphology* 132, 76-86.
- Taheri, K., Gutierrez, F., Mohseni, H., Raeisi, E., Taheri, M., 2015. Sinkholesusceptibility mapping using the analytical hierarch process (AHP) and magnitude-frequency relationships: case study in Hamadan province, Iran. *Geomorphology* 234, 64-79.
- Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M., 2005. Sinkholes and subsidence, karst and cavernous rock in engineering and construction, Springer, Chichester, pp. 73.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Ghobadi, M.H., Nooryazdan, A. 2020. Study of effective factors in the formation of sinkholes in south of Poldokhtar, Iran. *Adv. Appl. Geol.* 10(1), 78-95.

DOI: 10.22055/AAG.2019.28733.1946

url: https://aag.scu.ac.ir/article_15072.html?lang=en

مطالعه عوامل مؤثر در تشکیل فرو چاله‌ها در جنوب شهر پل دختر، جنوب غرب ایران

محمد حسین قبادی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

عبدالرضا نوریزدان*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۶

*reza_nooryazdan@yahoo.com

چکیده

فروچاله‌ها در دشت‌های پوشیده از رسوبات کواترنر با سنگ‌بستر انحلال‌پذیر، فراوانی بیش‌تری دارند. برخی از دشت‌ها در منطقه زاگرس چین‌خورده در ایران کارستی هستند. این پژوهش در گستره‌ای به مساحت ۱۵۵ کیلومتر مربع با هدف ارزیابی عوامل مؤثر در فروچاله‌زایی در محل قدیمی دریاچه‌های جایدر گوری بلمک در جنوب شهر پل دختر، جنوب غرب ایران انجام شده است. این دریاچه‌ها در اثر وقوع بهمین سنگی سیمره در جنوب غرب ایران تشکیل شده بودند. در این منطقه رسوبات دریاچه‌ای ناشی از ایجاد سدهای زمین‌لغزشی گسترش دارند. بر اساس نتایج حاصل از انجام مطالعات ژئوفیزیکی در منطقه به روش‌های GPR با آنتن ۱۰ مگاهرتز و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT)، ضخامت رسوبات دریاچه‌ای قدیمی جایدر در محل دشت جایدر به‌طور متوسط ۷۰ متر در محل دریاچه قدیمی گوری بلمک کمتر از ۱۰ متری باشد. سنگ‌بستر رسوبات هر دو دریاچه سازند تخییری گچساران است. سازند مذکور از نظر سنی به سنوزوئیک تعلق دارد. مقاومت فشاری تک‌محوری و کششی بخش ژیبس سنگ‌بستر به ترتیب ۱/۵ و ۱۶/۳۹ مگاپاسکال است. حداقل ۴ دسته درزه در توده سنگ‌بستر گسترش دارد. منشأ مواد پرکننده درزه‌ها، ناشی از فرسایش واحدهای ماری سازند گچساران و رسوبات دریاچه‌ای می‌باشند. با انجام آزمون‌های کرامب، هیدرومتری دوگانه و نیز آزمون شیمیایی (شارد) و اگرآ بودن مواد پرکننده درزه‌ها تأیید شده است. بر روی رسوبات دریاچه‌ای پوشاننده سنگ‌بستر آزمون تحکیم دوگانه صورت پذیرفت که رهنمندی رسوبات مذکور مشخص گردید. بر اساس داده‌های پیرومتریک نصب شده در دشت مورد مطالعه، عمق متوسط آب زیرزمینی طی ۱۰ سال گذشته ۳ متر افت کرده و اکنون تراز متوسط آب زیرزمینی در عمق ۲۰ متری از سطح زمین قرار دارد. مشاهدات صحرایی وجود حداقل ۳۲ فروچاله را در منطقه مورد پژوهش نشان می‌دهد. در محدوده دریاچه قدیمی گوری بلمک به علت ضخامت کم روباره، فراوانی فروچاله‌ها در سطح زمین بیش‌تر از دشت جایدر است. در محدوده دریاچه قدیمی گوری بلمک، فروچاله‌ها از تیپ ریزشی (Cover-collapse Sinkhole) با عمق بیش از ۵ متر و در محدوده دریاچه قدیمی جایدر از تیپ فرونشستی (Cover-subsidence Sinkhole) با عمق کمتر از ۵ متر می‌باشند. نتایج این پژوهش نشان داد انحلال‌پذیری سنگ‌بستر، و اگرآ بودن مواد پرکننده ناپیوستگی‌های توده سنگ و قابلیت رهنمندی رسوبات دریاچه‌ای مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در پدیده فرو چاله‌زایی در منطقه هستند. تغییر در سطح ایستابی آب زیرزمینی و وجود فروچاله‌های قدیمی و مدفون در منطقه به‌خصوص در محل دریاچه قدیمی جایدر (دشت جایدر) می‌تواند یک تهدید جدی برای سازه‌های متمرکز و خطی احداث شده در منطقه باشد.

کلمات کلیدی: فروچاله، سازند گچساران، انحلال‌پذیری ژیبس، واگرایی مواد پرکننده درزه‌ها، بهمین سنگی سیمره، پل دختر

مقدمه

از بین این عوامل سنگ‌بستر انحلال‌پذیر یک عامل بسیار مهم محسوب می‌گردد. فرو چاله‌ها و نحوه گسترش آن‌ها در نقاط مختلف دنیا مورد بررسی قرار گرفته است. در دشت کبودرآهنگ در استان همدان در غرب ایران تعداد زیادی فرو چاله ایجاد شده است. این فرو چاله‌ها زیرساخت‌های منطقه از جمله نیروگاه همدان در غرب را به شدت تهدید می‌کنند. با استفاده از روش AHP نقشه حساسیت به ایجاد فرو چاله منطقه تهیه شده است که نشان می‌دهد با افزایش فاصله زمانی بین تشکیل فرو چاله‌ها بر قطر آن‌ها نیز افزوده می‌گردد (Taheri et al., 2015). در ارتباط با فروچاله‌های موجود در نوار ساحلی دریای مرده دو فرضیه مطرح شده است. فرضیه اول وجود فرو چاله‌ها را در ارتباط با عوامل نئوتکتونیک به‌خصوص گسل‌ها می‌داند و فرضیه دوم منشأ فرو چاله‌ها را در صخره‌های نمکی ساحلی تعیین می‌کند. بررسی‌های انجام گرفته با استفاده از روش لرزه‌ای انعکاسی نشان داد فرو چاله‌ها در امتداد

از نظر ژنتیکی فرو چاله عبارت است از یک فرورفتگی در سطح زمین که بر اثر ریزش ناگهانی سقف غارها در مناطق کارستی یا رسوبات سیمانی شده کواترنر ایجاد و مانند یک تشتک، رواناب‌های محل را به سمت خود زهکش می‌کند (Waltham et al., 2005; Gutierrez et al., 2008).

فروچاله‌ها در دشت‌ها و مناطق هموار غالباً دارای ابعاد بزرگی هستند؛ و باعث بروز خسارات به ابنیه‌ی فنی و مناطق مسکونی می‌شوند. روش‌های مختلفی از جمله تکنیک دور سنجی، روش‌های ژئوفیزیکی و مطالعات زمین‌شناسی مهندسی می‌تواند تا حد زیادی مناطق مستعد ایجاد این پدیده را مشخص کند. سنگ‌بستر انحلال‌پذیر، جریان آب زیرزمینی، اقلیم و ناپیوستگی‌های ساختاری از جمله سیستم‌های درزه و گسل از مهم‌ترین عوامل ایجاد فرو چاله می‌باشند.

این رسوبات را سازند انحلال پذیر و تبخیری گچساران تشکیل می دهد. شهر پل دختر، ۸ روستا، بخشی از جاده های اصلی و خطوط لوله نفت و گاز، مراکز صنعتی و کشاورزی منطقه بر روی باقی مانده رسوبات قدیمی دریاچه های جایدر و گوری بلمک قرار گرفته اند. به نظر می رسد عدم آگاهی از خطر فرو چاله در این منطقه در آینده یک تهدید مهم برای مناطق جمعیتی و پروژه های عمرانی است. به این منظور با انجام این پژوهش ضمن شناسایی مناطق در معرض خطر فرو چاله، مهم ترین عوامل مؤثر در فرو چاله زایی در منطقه بررسی شده اند.

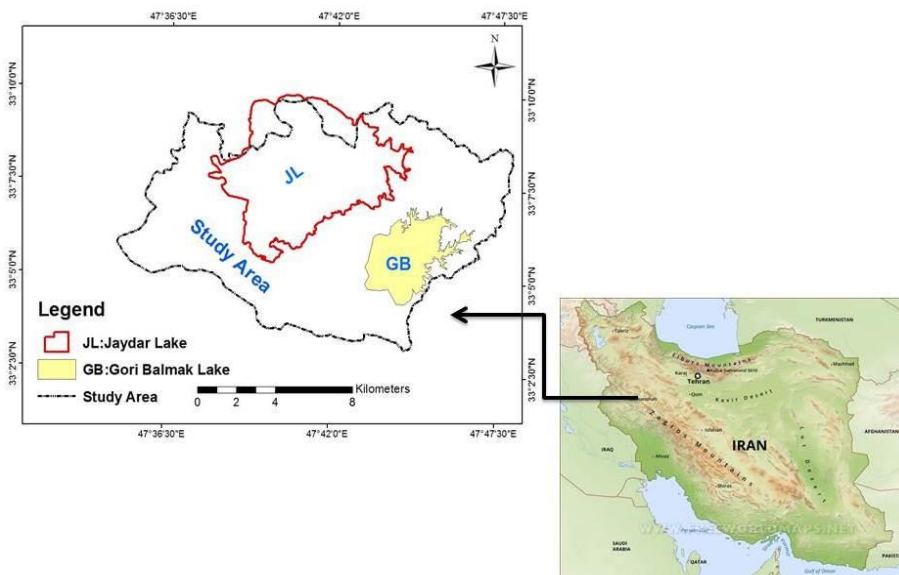
موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی

از نظر جغرافیایی منطقه مطالعه در طول های ۴۷ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی و عرض های ۳۳ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۸ دقیقه شمالی قرار دارد. شهر پل دختر و ۸ روستا در این منطقه واقع شده اند (شکل ۱). متوسط بارندگی سالانه و میزان تبخیر و تعرق سالانه ناحیه به ترتیب ۳۶۰ میلی متر ۲۹۲۰ میلی متر است. اقلیم منطقه خشک بوده و بیشینه و کمینه دمای منطقه در مردادماه برابر با ۴۷ درجه سانتی گراد و در دی ماه برابر با صفر درجه سلسیوس است.

خط ساحلی قدیمی و در صخره های نمکی و تحت کنترل گسل های منطقه ایجاد شده اند (Ezersky and Frumkin, 2013).

مطالعات انجام شده در دره رودخانه ابرو در غرب شهر زاراگوزا در کشور اسپانیا نشان می دهد که بیش از ۱۳۷ تالاب و آبگیر در کمتر از چند دهه اخیر از بین رفته اند. مطالعات انجام شده نشان داد بسیاری از این آبگیرها در اثر ایجاد فرو چاله خشک شده اند. بررسی های صورت گرفته در این منطقه نشان داد حدوداً ۷۰ درصد فرو چاله ها در راستای سیستم های درزه اصلی و در امتداد WNW-ESE تشکیل شده اند (Gutierrez et al., 2009). با وقوع بزرگ ترین گسیختگی سنگی جهان در مناطق خشک و غیر ولکانیکی موسوم به زمین لغزش سیمره در جنوب غرب شهر پل دختر در استان لرستان در غرب ایران، سه دریاچه طبیعی بانام های سیمره بر روی رودخانه سیمره، جایدر بر روی رودخانه کشکان و گوری بلمک بر روی رودخانه فصلی میرآباد تشکیل می شود. اکنون دریاچه های سیمره و جایدر خشک شده اما بخشی از دریاچه گوری بلمک در زمان سیلاب های فصلی تا تراز کانال احداث شده در غرب آن، آبگیری می کند.

نهبشته های رسوبی این دریاچه ها دارای مشخصات رسوبات آب های شیرین و با توجه به تاریخچه زمین شناسی بیش تحکیم یافته می باشند. سنگ بستر

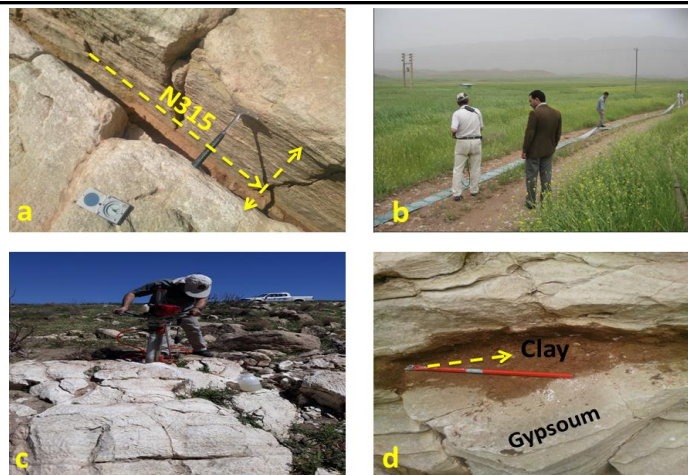


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه.
Fig 1. The Location of study area.

مواد و روش ها

با انجام بازدیدهای صحرایی و با استفاده از مغزه گیر سیار مدل Honda G35X از بخش ژیبس سازند گچساران، به شکل برج مغزه گیری انجام شده است (شکل 2c). هم چنین از مواد پرکننده درزه های سنگ بستر و خاک روبره نمونه گیری شده است (شکل 2d). با انتقال نمونه های سنگ و خاک به آزمایشگاه و با استفاده از آزمون های استاندارد ASTM مهم ترین خصوصیات زمین شناسی مهندسی نمونه ها تعیین شده است. با تلفیق نتایج بازدیدهای صحرایی و نتایج آزمون های آزمایشگاهی ضمن تعیین تیپ فرو چاله ها مهم ترین عوامل مؤثر در ایجاد آن ها نیز مشخص شده است.

به منظور انجام این مطالعه ابتدا با استفاده از زوج تصاویر ماهواره IRS-P5 مدل رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه با دقت مکانی ۲/۵ متر تهیه شده است. با استفاده از DEM منطقه و در محیط نرم افزار ARC GIS 10.6 محل تقریبی فرو چاله های موجود در منطقه مشخص شده است. هم چنین با مطالعه خصوصیات ناپیوستگی های موجود در توده سنگ بستر، تأثیر این سطوح در افزایش انحلال پذیری بررسی شده است (شکل 2a). با استفاده از روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی زمینی (GPR) با آنتن ۱۰ مگاهرتزی عمق سنگ بستر و محل حفرات انحلالی و عوامل ساختاری (گسل ها) تعیین شده است (شکل 2b).



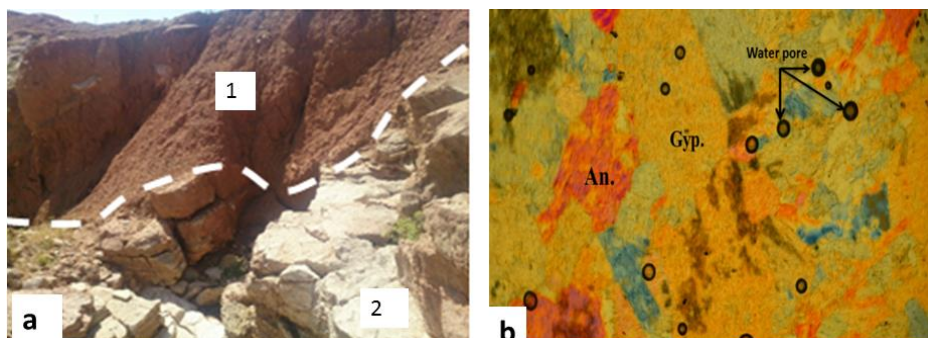
شکل ۲- بخشی از کارهای صحرایی انجام شده در این مطالعه، (a) درزه‌های کششی با روند N315 باعث تشکیل بلوک‌های مکعبی در بخش ژیبسی سازند گچساران شده است، (b) انجام عملیات ژئوفیزیکی به روش رادار نفوذی زمینی به منظور تعیین عمق سنگ‌بستر و ضخامت رسوبات دریاچه‌ای، (c) مغزه گیری بر جا از سنگ‌بستر برای تهیه نمونه‌های استوانه‌ای و (d) درزه‌های پر شده سنگ‌بستر به وسیله رس‌های حاصل از هوازدگی مارن های قرمز سازند گچساران.

Fig. 2. A Part of the work done in this study, (a) The tensile joints with N315 trend have formed cubic blocks in the Gypsum section of the Gachsaran Formation, (b) Geophysical operations using GPR method to determine the depth of bed rock and thickness of lake sediments, (c) In situ core samples from bedrock for cylindrical samples, and (d) joints filled of the red marl wreathed of Gachsaran Formation.

زمین‌شناسی

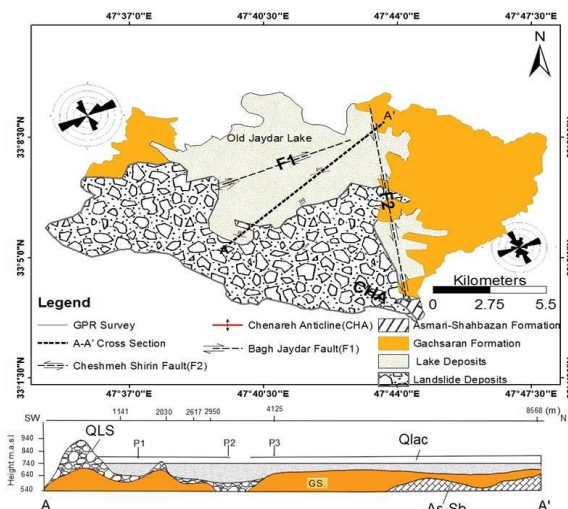
جایدر و گوری بلمک می‌باشند. عملیات درزه نگاری در محل رخنمون سنگ‌بستر در دره رودخانه کشکان و آبریز دریاچه گوری بلمک، منجر به شناسایی حداقل ۴ دسته درزه اصلی شده است. روند غالب درزه‌ها NE-SW است. در غرب روستای سراب حمام در مرکز دشت جایدر (محل عبور خطوط لوله نفت) یک تراس به ارتفاع کمتر از ۵ متر وجود دارد. در امتداد این تراس اغلب چاه‌های آب خشک شده یا دچار ریزش شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد این تراس می‌تواند ادامه گسل پنهان باغ جایدر باشد. گسل باغ جایدر عامل اصلی بروز ایجاد اختلاف ارتفاع بیش از ۸۰ متر نسبت به مناطق غربی (مرز بین دریاچه جایدر و سیمره) است. هم‌چنین عملکرد گسل چشمه شیرین باعث ایجاد تغییرات مشخصی در منطقه شده است که مهم‌ترین آن حذف بخش شرقی تاقدیس‌های ماله کوه و چناره در شمال و جنوب شرق منطقه است. در این مطالعه نقشه زمین‌شناسی و مقطع عرضی A-A' در راستای شمال شرق-جنوب غرب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 تهیه شده است (شکل ۴).

منطقه مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی ساختاری در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد. تاقدیس ماله کوه در شمال، ناودیس چم مهر در مرکز و تاقدیس چناره در جنوب مهم‌ترین عناصر ساختاری منطقه می‌باشند. هم‌چنین منطقه مطالعاتی تحت تأثیر گسل راستا لغز چشمه شیرین در شرق، گسل چپ لغز چم مهر در غرب و گسل مدفون باغ جایدر در بخش مرکزی است. اصلی‌ترین واحد سنگی سازند تبخیری گچساران با لیتولوژی ژیبس، انیدریت و مارن قرمز است (شکل ۳a). این سازند سنگ‌بستر رسوبات کواترنر است. مطالعه مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از بخش ژیبس سنگ‌بستر نشان داد توده‌های ژیبس از نوع پروفیریک می‌باشند (شکل ۳b). سازند گچساران به‌عنوان جوان‌ترین واحد سنگی منطقه، سنگ پوش چین‌های منطقه است. منطقه مطالعه بخشی از ناودیس چم مهر است که به‌وسیله رسوبات کواترنر پوشیده شده است. رسوبات کواترنر منطقه شامل مصالح زمین‌لغزش سیمره و رسوبات برجای مانده از دریاچه‌های زمین‌لغزشی



شکل ۳- رخنمون سازند گچساران (عکس a): بخش مارن قرمز (1) و ژیبس (2)، (عکس b): مقطع میکروسکوپی؛ ژیبس پروفیریک (Gyp) و انیدریت (An).

Fig. 3. Two main part of Gachsaran Formation, (a) The red marl (1), and gypsum (2), and (b) Thin section showing gypsum (Gyp), and Anhydrite (An).



شکل ۴- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه، علامت‌های استفاده شده در این نقشه؛ F1: گل باغ جایدر، F2: گل چشمه شیرین، CHA: تاقدیس چناره و P1-P7: مسیرهای برداشت پروفیل ژئوفیزیکی.

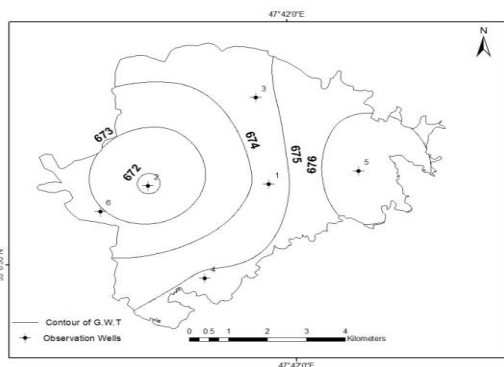
Fig. 4. Geological map of the study area. The symbols used in this map; F1: Bagh Jaydar fault, F2: Cheshmeh Shirin fault, CHA: The Chanareh anticline, and P1-P7: Geophysical profiles route.

عملیات ژئوفیزیکی

در این مطالعه به منظور شناخت عمق و ساختارهای موجود در سنگ‌بستر از عملیات ژئوفیزیکی به روش‌های GPR با آنتن ۱۰ مگاهرتزی استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان داد، عمق متوسط سنگ‌بستر در دشت جایدر به طور متوسط ۷۰ و در دشت گوری بلمک کمتر از ۱۰ متر است (شکل ۶). در این مطالعه به منظور صحت سنجی روش GPR از نتایج روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) که در حدفاصل روستای سراب حمام تا ابتدای جاده دوکوهه در مرکز دشت جایدر استفاده شده است. نتایج این روش تا حدود زیادی و البته با دقت بیشتر در تفکیک مرزهای ساختاری، تأیید کننده روش GPR است (شکل ۷). در نتایج هر دو روش ژئوفیزیکی نشانه‌هایی از انحلال و فرونشست در مقطع عرضی دیده می‌شود. با توجه به اختلاف سن زمین‌شناسی بین رسوبات دریاچه‌ای و سنگ‌بستر احتمال دارد که این علائم نشانه‌هایی از فرو چاله‌های مدفون باشند.

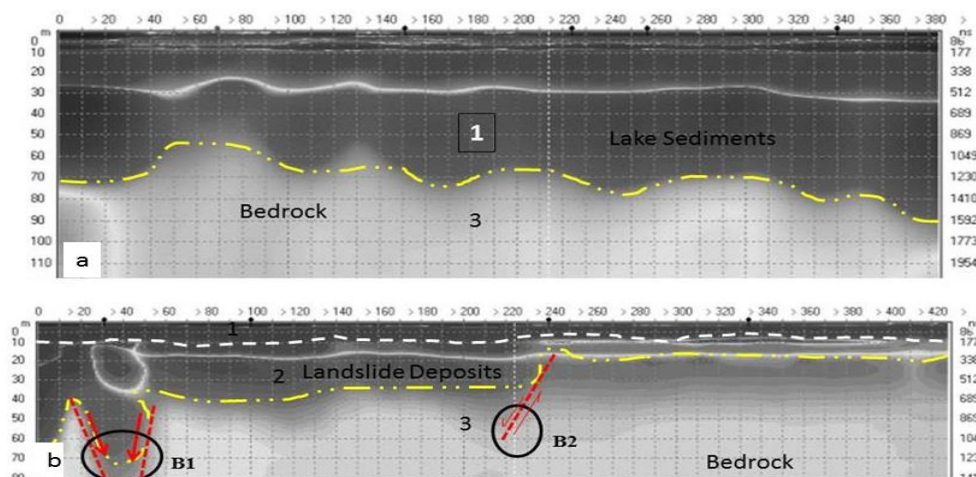
شرایط هیدرودینامیکی

سیستم اصلی زهکشی منطقه رودخانه کشکان است. دبی متوسط رودخانه کشکان در محل ایستگاه هیدرومتری پل دختر ۵۶/۳ مترمکعب بر ثانیه است (Sourinezhad, 2002). با توجه به مشاهدات صحرایی و استفاده از برخی شاخص‌های توپوگرافی از جمله ارتفاع نسبی و جهت شیب زمین می‌توان گفت از نظر هیدرودینامیکی: ۱- آب زیرزمینی دریاچه گوری بلمک را تغذیه می‌کند. ۲- دشت جایدر به وسیله دریاچه گوری بلمک و همچنین منابع آب موجود در مصالح زمین‌لغزشی تغذیه می‌شود. ۳- آبخوان دریاچه جایدر رودخانه کشکان را تغذیه می‌کند. در این مطالعه با استفاده از یک دستگاه سوند صوتی تراز آب زیرزمینی در ۶ پیژومتر فعال منطقه، در چندین نوبت اندازه‌گیری و نقشه تراز آب زیرزمینی منطقه تهیه شده است (شکل ۵). نتایج نشان می‌دهد عمق متوسط آب زیرزمینی در منطقه حدود ۲۰ متری از سطح زمین قرار دارد. بررسی آمارهای موجود نشان می‌دهد طی سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۰۸ تراز آب زیرزمینی منطقه به طور متوسط ۳ متر افت داشته است. همچنین با توجه به نقشه تراز آب زیرزمینی، جهت غالب جریان آب زیرزمینی به سمت غرب است (شکل ۵).



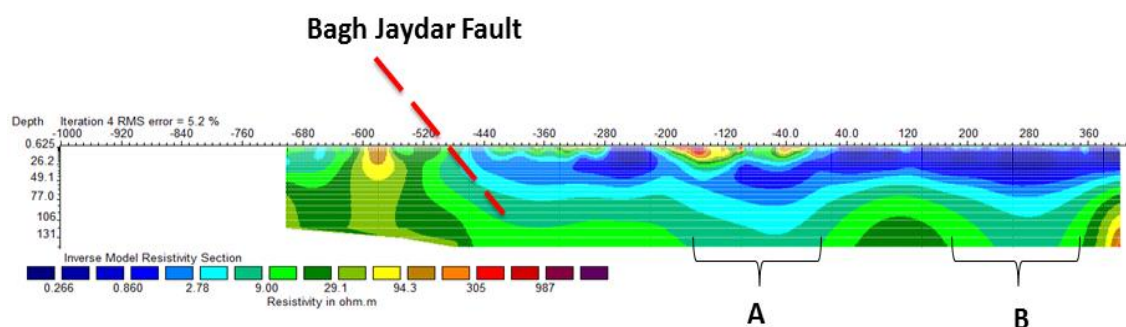
شکل ۵- نقشه تراز آب زیرزمینی آبخوان تشکیل شده در مناطق جنوبی شهر پل دختر (بخش اصلی پهنه رسوبی دریاچه جایدر).

Fig. 5. The groundwater level map of the Jaydar plain.



شکل ۶- رادارگرام های به دست آمده با آنتن ۱۰MHz به روش GPR در دشت جایدرد (a) و گوری بلمک (b)، دوایر B1 به ترتیب نشان دهنده وجود یک حفره انحلالی در سنگ بستر پر شده توسط مصالح کواترنری و B2 یک تغییر در موقعیت سنگ بستر ناشی از عملکرد یک گسل محلی را نشان می دهد. در این شکل بخش ۱ شامل رسوبات دریاچه ای بخش ۲ مصالح زمین لغزشی بلوکی و بخش ۳ سنگ بستر است. مرز بین رسوبات دریاچه ای و مصالح زمین لغزشی با خط چین سفید و خط چین زرد رنگ مرز بین سنگ بستر و مصالح رویی است.

Fig. 6. Two radargram obtained using GPR method with 10MHz antenna in the Jaydar plain (a), and Gori Balmak (b). Sections 1, 2 and 3, are fine grain layer with coarse-grained interlayer, landslide materials, and bedrock respectively. Yellow and white lines shows boundary between bedrock and the upper materials, landslide materials, and lake sediments respectively.



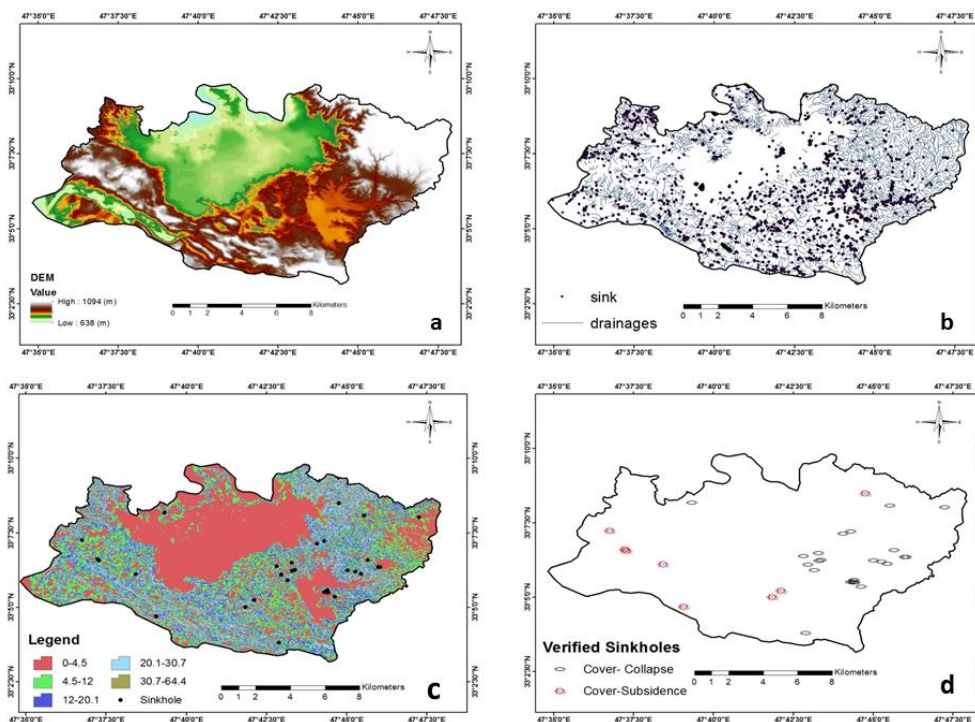
شکل ۷- مقطع عرضی برداشت شده به روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) در امتداد جاده روستای سراب حمام تا اول جاده روستای دوکوهه در این شکل عمق سنگ بستر بیش از ۱۰۰ متر است. در محل نقاط A و B در سطح زمین فرونشست زمین اتفاق افتاده است. به نظر می رسد این نقاط در بالای دو حفره انحلالی موجود در سنگ بستر واقع شده اند.

Fig. 7. Longitudinal sections obtained from electrical resistivity tomography (ERT) method on the Sarab Hammam – Dokoheh villages road. In this place, the depth of the bedrock is more than 100 m. At the point A and B, land subsidence has occurred. Sub-surface roughness can be due to the operation of the Bagh Jaydar fault, or to the dissolution bedrock in strike of the joint.

شناسایی فرو چاله های منطقه

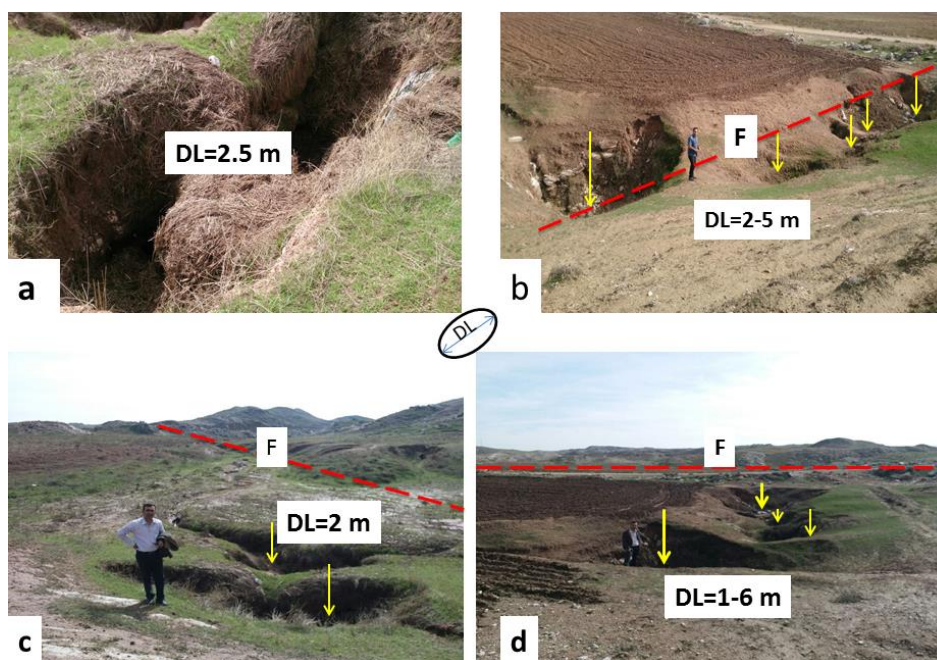
حداقل ۳۲ فرو چاله را تأیید می کند (شکل ۸c). نتایج نشان می دهد تمرکز غالب فرو چاله در بخش شرقی و شمال غربی محدوده مطالعه و در شیب های کمتر از ۲۰ درجه است (شکل ۸d). به نظر می رسد عامل فراوانی فرو چاله در این مناطق عملکرد گسل های چشمه شیرین و باغ جایدرد باشد. بررسی های صحرایی نشان می دهد فرو چاله های موجود در حوضه آبریز دریاچه گوری بلمک باعث انتقال آب به مخزن دریاچه گوری بلمک و چشمه های شرق دشت جایدرد می شوند. ولی فرو چاله های موجود در محدوده دشت جایدرد عامل انتقال آب به رودخانه کشکان هستند.

در این پژوهش به منظور شناسایی فرو چاله های موجود منطقه با استفاده از بسته Hydrology نرم افزار ARC GIS 10.6 و مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۲/۵ متر (شکل ۸a) شبکه زهکشی منطقه تهیه شده است (شکل ۸b). در مرحله دوم با استفاده از دستور sink نقشه مناطق گودال مانند تهیه و با نقشه شبکه زهکشی منطبق شده است (شکل ۸b). در این پژوهش با استفاده از دستورهای شرطی در محیط نرم افزار ARC GIS گودال های واقع شده در زهکش های مرکزگرا و هم چنین زهکش هایی که به شکل ناگهانی قطع شده اند، تفکیک شده اند. باز دیده های صحرایی در منطقه مطالعه وجود



شکل ۸- نقشه‌های تهیه‌شده در محیط Arc GIS به‌منظور تهیه نقشه فرو چاله‌های منطقه، (a) DEM منطقه با دقت ۲/۵ متر، (b) نقشه گودال‌های طبیعی منطقه و نقشه تجمع شبکه جریان منطقه، (c) نقشه فرو چاله‌های موجود در منطقه و (d) نقشه شیب منطقه برحسب درجه.

Fig. 8. The maps prepared in the Arc GIS environment includes (a) The dem of area with a precision of 2.5 m, (b) The sink and deranges accumulation maps, (c) The slope map of area in terms of degree, and (d) The sinkholes map of area.



شکل ۹- نمایی از فرو چاله‌های شکل‌گرفته در بخشی از پهنه گسل چشمه شیرین در شرق منطقه مطالعه، (a) این فرو چاله‌ها به شکل گروهی در امتداد گسل و شاخه‌های فرعی آن قرار دارند (شکل های b, c) و (d) دهانه این فرو چاله‌ها بیضوی شکل بوده و قطر بزرگ (DL) آن‌ها از ۱ تا ۶ متر در تغییر است.

Fig. 9. View of sink holes formed (a-d) in the part of the Cheshmeh Shiran fault in the east of the study area, (a) Group of the sinkholes are located along the fault line (Figs b and c), and (d) The funnels of sinkholes is elliptical form and large diameter (DL) is changed from 1 to 6 m.



شکل ۱۰- انواع فرو چاله‌های تشکیل شده در غرب و مرکز منطقه پژوهش، (شکل های a و b) نوع ریزشی با قطر بیش از ۱۰ متر و (شکل های c و d) فروچاله‌ها فرونشستی با قطر کمتر از ۶ متر هستند.

Fig. 10. Types of sinkholes formed in west and center of study area., (a and b) Types are cover-collapse with diameter more than 10 m, (c and d) are cover-subsidence types with less than 6 m diameter.

آزمون‌های آزمایشگاهی و بر اساس استاندارد ASTM تعیین شده‌اند. به همین دلیل ویژگی‌هایی مانند چگالی سنگ (G_s) درصد تخلخل (n)، نسبت تخلخل (e)، وزن واحد حجم خشک ($S\gamma$)، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، مقاومت کششی ($t\sigma$) و مدول الاستیسیته (E) سنگ‌بستر اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی بر روی سنگ‌بستر، مواد پرکننده درزه‌های توده سنگ‌بستر، بخش مارنی سنگ‌بستر و پوش خاکی توده سنگ‌بستر، انجام شده است.

آزمون‌های سنگ

به منظور شناخت تأثیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌بستر روی تشکیل فرو چاله‌های منطقه مورد مطالعه، این خصوصیات با استفاده از

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌بستر به منظور تعیین تاب‌آوری سقف فضاهای زیرزمینی در توده‌های ژئوسنگ‌بستر.

Table 1. The physical and mechanical properties of bedrock.

G_s	γ_d (g/cm^3)	$n\%$	$e\%$	γ_s (g/cm^3)	UCS (Mpa)	st (Mpa)	E (Gpa)	Intact Rock Class
2.12	2.18	21	4	2.31	16.39	1.5	5	EL

لایه‌های ژئوس سازند گچساران، ریزش کرده و منجر به تشکیل فرو چاله گردد. هم چنین نتایج آزمون XRF بالا بودن مقادیر یون سولفات و درجه خلوص بالای آن‌ها را نشان می‌دهد. وجود آثار انحلالی در محل، بالا بودن پتانسیل انحلال‌پذیری سنگ‌بستر تأیید می‌شود (جدول ۲).

نتایج نشان می‌دهد که ژئوسنگ‌بستر دارای مقاومت تک‌محوری متوسط ۱۶/۳۹ مگا پاسکال و نسبت مدولی کمتر از ۵۰ گیگا پاسکال است؛ که بر اساس روش دیر و میلر (۱۹۶۶) در رده EL قرار می‌گیرد. هم‌چنین مقاومت کششی توده سنگ ۱/۵ مگا پاسکال برآورد شده است. با توجه به مقاومت کششی کم توده‌های ژئوس انتظار می‌رود سقف فضاهای کارستی موجود در

جدول ۲ - نتایج آزمایش XRF نمونه‌های سنگ‌بستر.

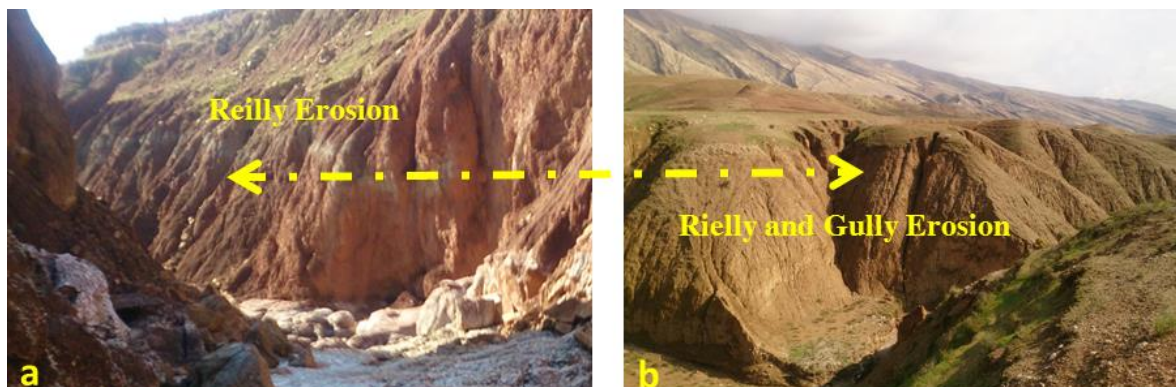
Table 2. Results of XRF bedrock samples.

Components%	S1	S2	S3
SiO ₂	0.3	0.7	0.46
Al ₂ O ₃	0.1	0.2	0.2
CaO	32.4	32.1	34.2
MgO	0.1	0.3	0.27
SO ₄	45.8	45.5	43.5
SrO	0.1	0.2	0.88
L.O.I	21	20.8	21.1

آزمون واگرایی مواد پرکننده درزه

مشاهدات صحرایی آثار واگرایی در رسوبات دریاچه‌ای و خاک‌های حاصل از هوازدگی بخش مارنی سازند گچساران را نشان می‌دهد (شکل ۱۱). نوع پرکننده درزه‌ها، در افزایش سرعت انحلال‌پذیری سنگ‌بستر نقش دارد.

در اثر آب شستگی پرکننده درزه‌ها، حجم گذر آب از فضای درزه‌ها افزایش می‌یابد. این موضوع باعث افزایش میزان انحلال‌پذیری سنگ‌بستر و گسترش فضای‌های زیرزمینی می‌شود.



شکل ۱۱- نشانه‌های واگرایی (فرسایش شیاری و گالی) روی خاک‌های ریزدانه در سطح (a) بخش مارنی سازند گچساران و (b) رسوبات دریاچه‌ای.

Fig. 11. Signs of dispersion (Rill and Gully erosion) on fine-grained soils in the marl of Gachsaran Formation (a), and (b) Lake sediments.

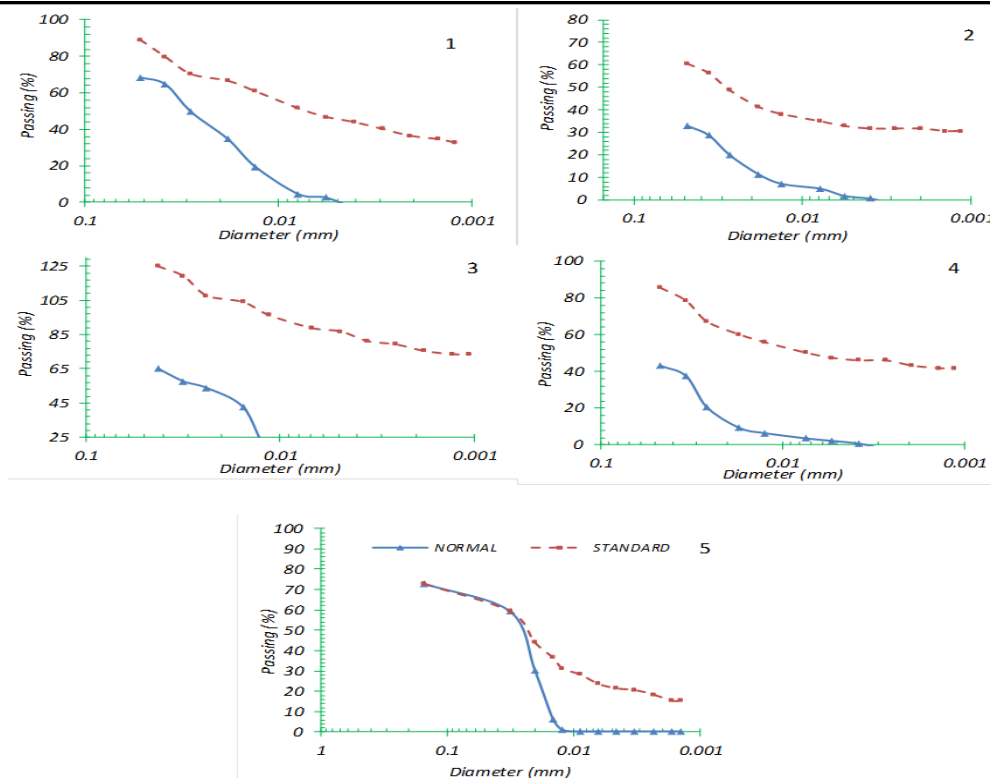
دانه‌بندی، درصد ذرات ریزتر از ۰/۰۰۵ میلی‌متر در دو روش تعیین می‌گردد. سپس پارامتر نسبت واگرایی که عبارت است از: درصد عبوری از قطر ۵ میکرون در آزمایش بدون ماده پراکنده ساز نسبت به درصد عبوری از قطر ۵ میکرون آزمایش استاندارد، تعیین شد (جدول ۳). نتایج آزمون نشان داد، تعداد ۳ نمونه از مواد پرکننده درزه با نسبت‌های واگرایی ۳۲، ۳۴، ۳۵ در رده خاک‌های نسبتاً واگرا، یک نمونه از پرکننده‌های درزه با نسبت واگرایی ۸/۱ غیر واگرا و خاک حاصل از هوازدگی و تخریب مارن قرمز سازند گچساران با نسبت واگرایی ۵۱ شدیداً واگرا است (شکل ۱۲).

در این مطالعه از مواد پرکننده درزه و خاک موجود بر روی بخش مارنی سنگ‌بستر، در ۵ نقطه نمونه‌برداری گردید. سپس خواص شیمیایی (روش شرارد) تعیین شد در مرحله بعد آزمون‌های کرامب و هیدرومتری دوگانه انجام گرفت. در این مطالعه ذرات نمونه‌های خاک بعد از زمان ۵ تا ۱۰ دقیقه پراکنده می‌شوند که نشان‌دهنده واگرایی شدید است. در روش هیدرومتری دوگانه، دانه‌بندی ذرات خاک با دو روش هیدرومتری استاندارد (استفاده از ماده پراکنده ساز) و هیدرومتری معمولی انجام می‌شود. با استفاده از منحنی

جدول ۳- نتایج واگرایی خاک بر اساس روش هیدرومتری دوگانه (Bell, 1994).

Table 3. Results of soil dispersion based on double hydrometer (Bell, 1994).

Dispersion Degree	Dispersion Ratio
Non dispersive	<30
Moderate dispersive	30-50
High dispersive	>50

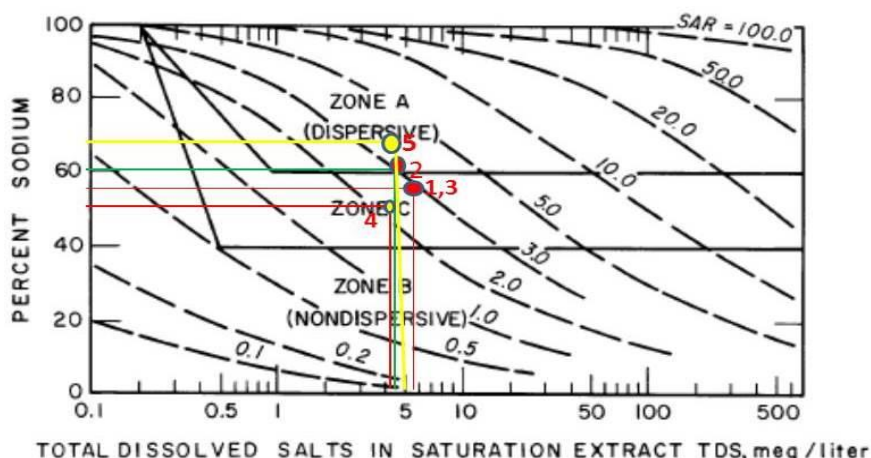


شکل ۱۲- منحنی‌های آزمون هیدرومتری دوگانه نمونه‌های خاک پرکننده درزه (۱ و ۲ و ۳ و ۴) و خاک روی بخش ماری سازند گچساران (۵).
 Fig. 12. The curves of double hydrometer test of joints filling materials (4, 3, 2 and 1), and the marl of Gachsaran Formation (5).

نتایج استفاده از روش شیمیایی نشان می‌دهد ۴ نمونه خاک پرکننده درزه و بخش ماری سازند گچساران واگرا هستند (جدول ۴).

در این مطالعه به منظور تعیین دقیق پتانسیل واگرایی خاک با استفاده از دستگاه Atomic adsorption کاتیون‌های مؤثر در واگرایی خاک مشخص شده‌اند. با استفاده از روابط ۱ و ۲ با تعیین درصد سدیم (PS)، نسبت جذب سدیم (SAR) و مجموع کل املاح موجود (TDS) (Sherard, 1976) مطابق شکل ۱۳ درجه واگرایی نمونه‌ها تعیین شده است.

$$PS = \frac{Na^{2+}}{TDS} \times 100 \quad \text{رابطه ۲} \quad SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{Ca^{2+} + Mg^{2+}}} \quad \text{رابطه ۱}$$



شکل ۱۳ - نمودار تعیین واگرایی خاک‌های ریزدانه با استفاده از فاکتورهای PS، TDS و SDR (Sherard, 1976). منطقه قرارگیری خاک‌های واگرا منطقه در شکل با اعداد ۱ تا ۵ مشخص شده است.

Fig 13. Determination of the dispersion of fine grained soils using PS, TDS and SDR factors (Sherard, 1976). The region of dispersion soils in the region is identified with number of 1 to 5.

جدول ۴ - وضعیت واگرایی مواد پرکننده درزه‌ها و بخش مارنی سازند گچساران در محل مطالعه.

Table 4. Dispersion conditions of filling materials study area.

Sample	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	TDS	Ps	SDR	Dispersion			Description
	Meq/l						CR	DH	CH	
1	0.21	1.6	0.8	5.71	54.3	2	D	D	ID	Filling
2	0.11	1.2	0.5	4.61	60.74	2.15	D	D	D	Filling
3	0.18	1.68	0.4	5.16	65.20	2.01	D	D	ID	Filling
4	0.11	0.66	0.98	3.85	54.55	1.64	D	No	ID	Filling
5	0.15	0.95	0.65	5.15	66.02	2.69	D	D	D	Gachsaran of Marl

علائم به کار رفته در متن جدول: عدم واگرایی خاک (No)، واگرایی متوسط (ID)، خاک‌های واگرا (D)، روش کرامب (CR)، روش هیدرومتری دوگانه (DH)، روش شیمیایی (CH).

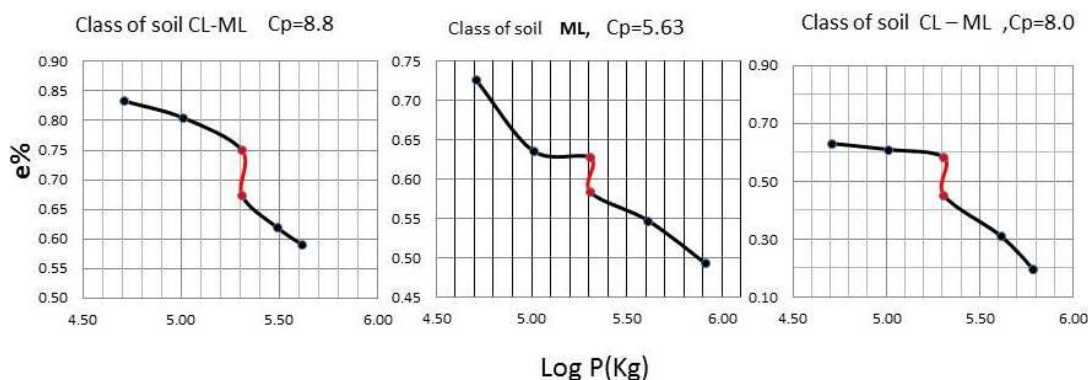
The symbols are used in the table: Non-dispersion of soils (No), moderate dispersion (ID), dispersion (D), Crumb method (CR), dual hydrometer (DH), chemical method (CH).

$$C_p = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \times 100 \quad (\text{رابطه ۳})$$

در آزمون تحکیم دوگانه اگر مقدار C_p بزرگ‌تر از ۲ باشد خاک واگرا است. در این مطالعه بر روی ۳ نمونه از خاک‌های منطقه که بیش‌ترین گسترش افقی و عمودی را دارند آزمون ریمبندگی انجام شده است (شکل ۱۴) نتایج نشان می‌دهد خاک‌ها دارای پتانسیل بالای ریمبندگی می‌باشند. این خاک‌ها مطابق رده‌بندی متحد در رده خاک‌های CL-ML و ML قرار می‌گیرند.

آزمون ریمبندگی خاک روباره

ریمبندگی خاک‌ها در توسعه عمودی فرو چاله‌ها و ظاهر شدن دهانه فرو چاله در سطح زمین نقش مهمی دارد. در این مطالعه به منظور مطالعه میزان ریمبندگی خاک‌های منطقه از آزمون تحکیم دوگانه استفاده شده است. در این آزمون یک نمونه از خاک با رطوبت طبیعی به مدت ۲۴ ساعت و به شکل پلکانی تا بار ۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، درون رینگ تحکیم قرار می‌گیرد. سپس استوانه دستگاه تحکیم به وسیله آب پر شده تا نمونه اشباع و مقدار نشست خاک یادداشت می‌شود. با داشتن نسبت تخلخل اولیه خاک قبل از اشباع شدن (e_0) و بعد از اشباع شدن (e_1) شاخص C_p (پتانسیل ریمبندگی) خاک تعیین می‌شود (Jennings and Knigh, 1975).



شکل ۱۴ - منحنی تحکیم دوگانه خاک‌های دارای پتانسیل ریمبندگی در محل مطالعه.

Fig. 14. Double consolidation curve of soils with collapsible potential in study site.

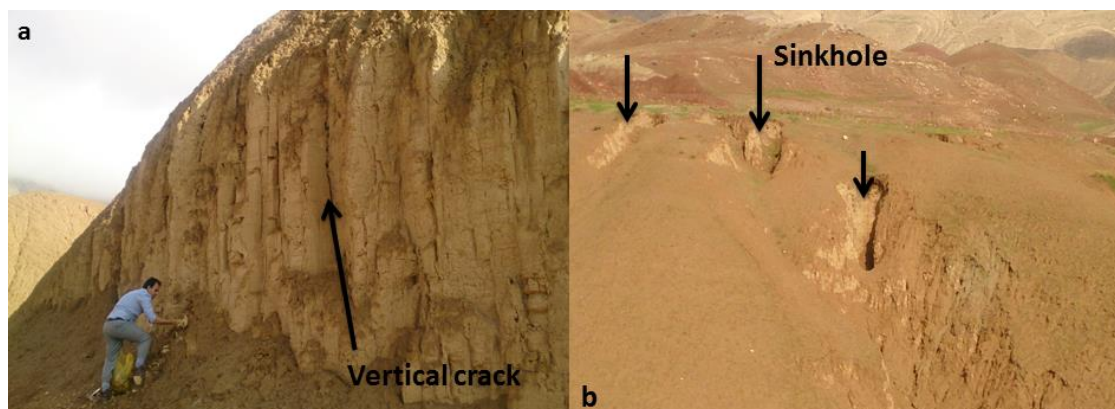
(Heidari et al., 2011). در این پژوهش خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌بستر، خاک روباره و شرایط هیدرودینامیکی و عوامل تکنونیک به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرو چاله زایی در جنوب شهر پلدختر شامل بررسی شده‌اند. همان‌گونه که در بخش زمین‌شناسی اشاره شد، سنگ‌بستر منطقه سازند تبخیری گچساران است. در منطقه مطالعه

بحث

فرو چاله‌ها شاخص مناطق کارستی هستند (Galloway et al., 1999). عواملی مانند نوع و عمق سنگ‌بستر، نوع و ضخامت رسوبات پوششی سنگ‌بستر، اسیدیته آب، سطح ایستایی آب زیرزمینی و نوسانات بلندمدت آن و جریان چرخشی آب زیرزمینی نقش مهمی در تشکیل فرو چاله دارند

رمبنده بودن دومین عامل مؤثر در تشدید پدیده فرو چاله زاپی در منطقه هستند. این خاکها در شرایط خشک درشیبهای تند پایدارند (شکل ۱۵a) ولی در حضور آب دچار ریزش می‌شوند؛ که معرف رمبندگی آنهاست. بررسی‌های صحرایی در محل ترانشه‌ها نشان‌دهنده ترک‌های عمودی در ساختمان این خاکها است. این ترکها محل مناسبی جهت نفوذ آب‌های سطحی و به‌مرورزمان، شکل‌گیری فرو چاله‌های عمودی هستند. این‌گونه فرو چاله‌ها درشیب‌های کم دارای دهانه دایره و درشیب‌های تند دهانه بیضی دارند (شکل ۱۵b). پدیده تشکیل فرو چاله در رسوبات دریاچه‌ای منطقه نسبت به فرو چاله‌های تشکیل‌شده در سنگ‌بستر به علت خصوصیات فیزیکی این نوع رسوبات ازجمله ریزشی بودن سرعت بیشتری دارد.

عمق سنگ‌بستر از شرق به غرب زیاد می‌شود. در شرق منطقه تراز سنگ‌بستر ۸۰۰، در محل دریاچه گوری بلمک ۷۵۰ و در محل دریاچه جایدر ۶۴۰ متر از سطح دریا است. ناپیوستگی‌های توده سنگ به‌وسیله خاک‌های واگرا پرشده‌اند که به‌راحتی شسته و از محیط خارج می‌شوند. هم‌چنین مقادیر سولفات در سنگ‌بستر بالا است؛ بنابراین سنگ‌بستر مستعد انحلال‌پذیری و ایجاد اشکال کارستی است. در بیش از ۴۹ درصد از سطح منطقه سنگ‌بستر توسط رسوبات دریاچه‌های زمین‌لغزشی گوری بلمک و جایدر پوشیده شده است. ضخامت این رسوبات از ۸ متر در محل دریاچه گوری بلمک تا ۷۰ متر در دشت جایدر متغیر است. بخش زیادی از این رسوبات در رده خاک‌های ریزدانه رسی با حد خمیری کم قرار دارند. رسوبات دریاچه‌ای با خصوصیات خاک‌های بیش تحکیم یافته آب‌های شیرین به علت

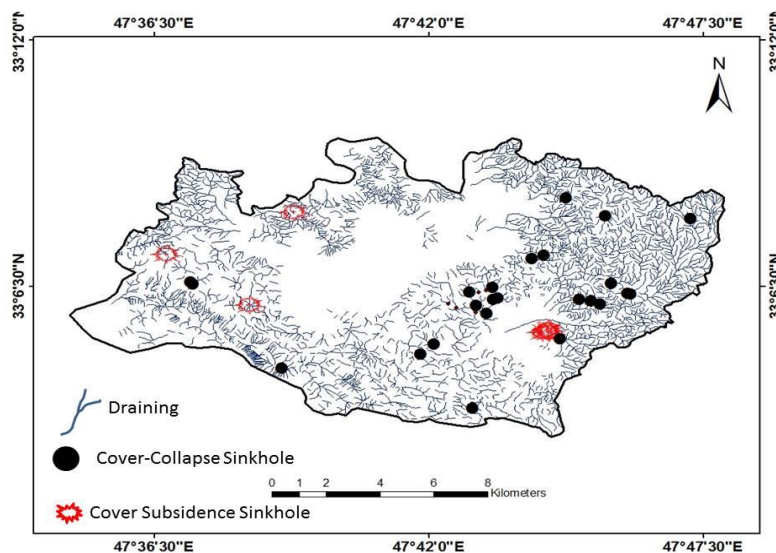


شکل ۱۵- رسوبات بیش تحکیم یافته دارای ترک‌های کششی عمودی می‌باشند. که محل مناسبی برای نفوذ آب‌های سطحی می‌باشند (a). تمرکز جریان آب در این نقاط به مرور زمان زمینه را برای فرسایش داخلی، ریزش خاک و تشکیل فرو چاله فراهم می‌کند (b). این خاکها درشیب زیاد پایدار ولی در حضور آب ریزش می‌کنند.

Fig. 15. The over consolidated sediments have vertical tensile cracks, which are a good place for penetration of surface water, (a) continuity of water flow in the cracks is caused erosion and the formation of sinkholes (b).

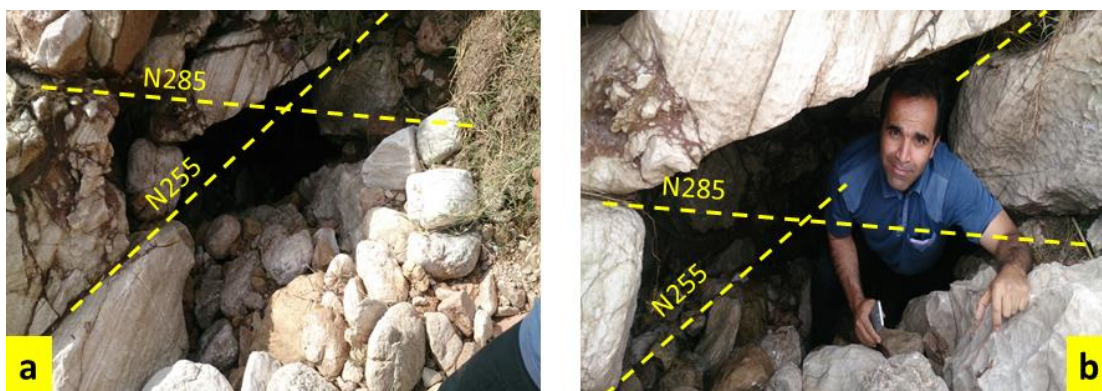
چاله‌ها به‌ندرت در سطح زمین دیده می‌شود؛ اما در چند نقطه در حاشیه دشت جایدر و دریاچه گوری بلمک دهانه حداقل ۵ فرو چاله فرونشستی دیده می‌شود. این فرو چاله‌ها غالباً در محل درزه‌های تشکیل‌شده‌اند. شکل دهانه این فرو چاله‌ها دایره‌ای و قطر آنها حداکثر ۱۰ متر است. به علت ریزش رسوبات دریاچه‌ای به داخل لوله اصلی فرو چاله، تخمین عمق واقعی آنها سخت است، ولی عمق ظاهری آنها کمتر از ۵ متر است. از دیگر اشکال کارستی منطقه گالری‌های تونلی شکل هستند که بر اساس مطالعات صحرایی با کف فرو چاله‌ها متصل می‌باشند. شواهد صحرایی نشان می‌دهد این حفرات انحلالی در سنگ‌بستر یک شبکه به‌هم‌پیوسته را تشکیل می‌دهند. نقش اصلی این گالری‌ها زهکشی بخشی از آب‌های زیرزمینی است. این گالری‌ها بیشتر در امتداد درزه‌های برشی (شکل ۱۷) و شکاف‌های کششی (شکل ۱۸) در راستای شمال غرب شکل‌گرفته‌اند.

مطالعات نشان می‌دهد تراز متوسط آب زیرزمینی منطقه طی سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۸ به میزان ۳ متر افت داشته است. هم‌چنین اسیدپته آب زیرزمینی محل از ۶/۷ تا ۷/۱ متغیر است. بر اساس عوامل فوق و بررسی‌های صحرایی می‌توان فرو چاله‌های تشکیل‌شده در منطقه را به دو گروه تقسیم کرد. فرو چاله فروریزشی (Cover-collapse sinkhole) در مناطقی که پوشش رسوبی سنگ‌بستر کم باشد و فرو چاله فرونشستی (Cover-subsidence sinkhole) در مناطقی که ضخامت رسوبات پوشاننده سنگ‌بستر زیاد است (شکل ۱۶). فرو چاله‌های فروریزشی دارای عمق بیش از ۵ متر و قطر دهانه آنها کمتر از ۳ متر است. این فرو چاله‌ها غالباً در محل گسل‌ها و به شکل خطی تشکیل‌شده‌اند. فرو چاله‌های فرونشستی غالباً در بخش‌های مرکزی دشت جایدر و بخش جنوبی دریاچه گوری بلمک متمرکز هستند. به علت ضخامت بالای پوشش رسوبی در این محل‌ها دهانه فرو



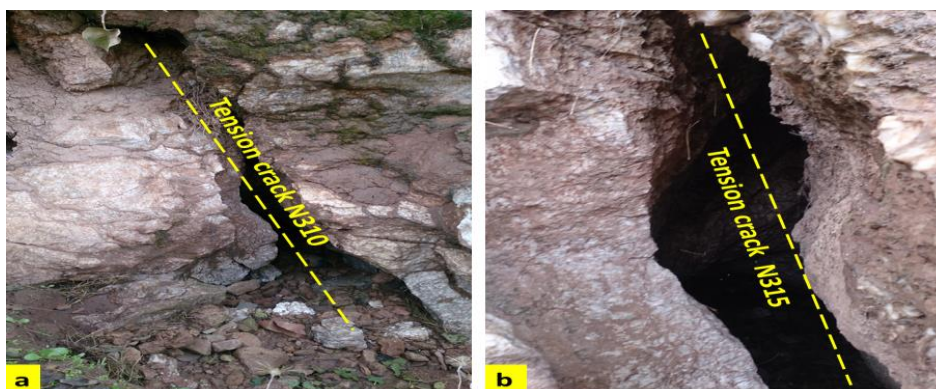
شکل ۱۶- نقشه فرو چاله‌های موجود در منطقه مطالعه.

Fig. 16. Type of sinkholes map in the study area.



شکل ۱۷- (a و b) ورودی گالری‌های افقی ایجاد شده در امتداد درزه‌های برشی سنگ‌بستر در شمال دریاچه گوری بلمک.

Fig 17. (a-b) The entrance of horizontal galleries along the shear joints of bedrock in the north of the Gori Balmak Lake.



شکل ۱۸- (a و b) تشکیل گالری‌های افقی در امتداد ترک‌های کششی با روند غالب N312. با توجه به امتداد این گالری‌ها به نظر می‌رسد علاوه بر تغذیه چشمه سراب جهانگیر نقش مهمی در تغذیه رودخانه کشکان نیز داشته باشند.

Fig. 18. (a-b) The formation of horizontal galleries along of tension cracks with N312 trend. Seems to be in line with these galleries play an important role in fed of the Sarab Jahangir spring as well as the Kashkan River.

جایدر نشان داد در بخش شمال غربی آن حداقل ۶ فرو چاله با قطر دهانه حداکثر ۱/۵ متر وجود دارد (شکل ۱۹b). آب دریاچه جایدر با رسیدن به محل فرو چاله‌ها وارد گالری شده و در محل دشت جایدر تخلیه می‌شده است (نقل قول از مردم روستای میرآباد). بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد سقف گالری‌ها به علت مقاومت کششی کم به تدریج ریزش کرده که این موضوع باعث نشست در طول گالری و بروز ناهمواری و فرونشست زمین شده است.

شواهد صحرایی نشان دهنده وجود جریان آب در این گالری‌ها است. مهم‌ترین این گالری‌ها در بین دریاچه گوری بلمک و دشت جایدر تشکیل شده است. ارتفاع و عرض خروجی این گالری در محل دشت جایدر به ترتیب ۲/۵ و ۵ متر است (شکل ۱۹c2). سرعت جریان آب در این کانال ۰/۴۳ متر بر ثانیه است؛ بنابراین در زمان‌های سیلابی حجم گذر آب از این گالری به معادل ۵/۴ مترمکعب بر ثانیه می‌تواند برسد. این گالری نقش یک سرریز نیلوفری را برای دریاچه جایدر داشته است. بررسی‌های انجام گرفته در محل دریاچه

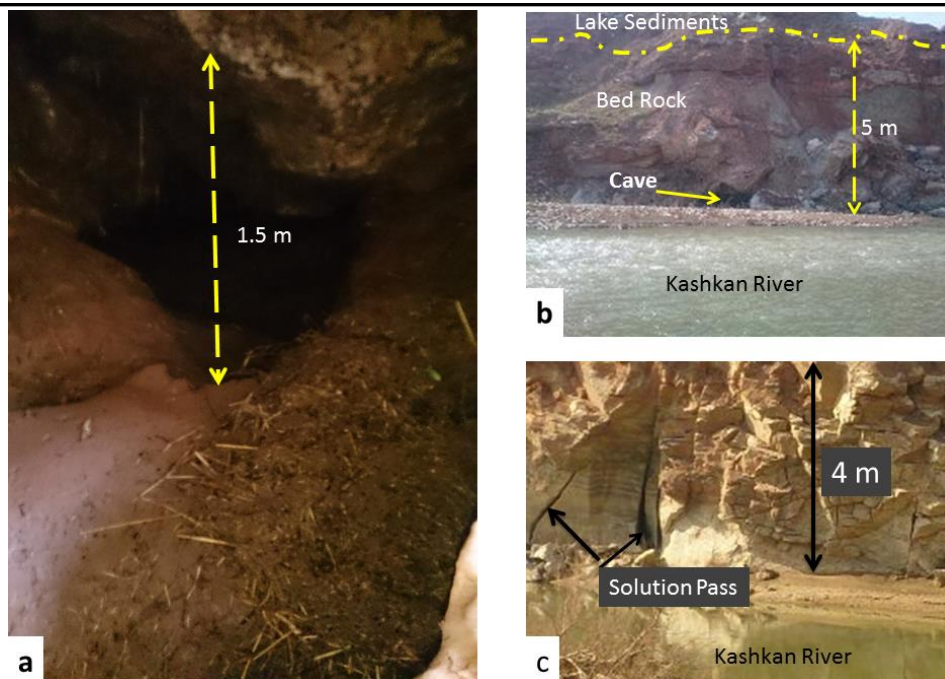


شکل ۱۹- تصویر ماهواره Sentinel 2A, L1C با ترکیب باندهی NDWI از موقعیت دریاچه گوری بلمک (محدوده آبی زنگ) در تاریخ ۲۰۱۹/۵/۱۶. کانال زهکشی با خطچین قرمز مشخص شده است. (b) تصویر از Google Earth از موقعیت فرو چاله‌های مشخص شده در محل دریاچه است. (c) موقعیت خروجی جدید (c1) دهانه گالری افقی و (c2) متصل به محل فرو چاله‌ها در محل دریاچه گوری بلمک را نشان می‌دهد.

Fig. 19. Input and output position of the sinkholes drainage of the Gori Balmak. (a) Gory Balamak Lake, Drainage channel, and sinkholes position (b) The sinkholes position in large scale, (c) Artificial channel outlet, (c1) Outlet of drainage gallery (c2), (e) Situation of Gory Balmak Lake on 23/12/2018.

(شکل ۲۰a). این حفرات را می‌توان خروجی گالری‌های موجود در سنگ‌بستر منطقه در نظر گرفت (شکل ۲۰b و c). آب این حفرات باعث تغذیه رودخانه کشکان می‌شود.

هم‌چنین در دشت جایدر و در مجاورت رودخانه کشکان چندین شکاف و غار انحلالی دیده می‌شود. در دهانه خروجی و کف این گالری‌ها، نشانه‌هایی از خاک‌های شسته شده و انتقالی با منشأ رسوبات دریاچه‌ای دیده می‌شود



شکل ۲۰- دهانه خروجی گالری‌های زهکشی در منطقه مطالعه. خروجی یک گالری در دشت جایدر (a) و خروجی یک غار در بستر رودخانه کشکان (b) و خروجی گالری‌های زهکشی در مسیر رودخانه کشکان (c).

Fig. 20. Galleries drainage outlet. (a) Horizontal gallery outlet in the Jaydar plain. (b) A cave in the Kashkan River floor and (c) outlet of gallery in the Kashkan River pass.

نتیجه‌گیری

ترازهای بالا به پایین می‌شوند. نتایج آزمون تحکیم دوگانه نشان‌دهنده پتانسیل بالای رمبندگی رسوبات پوشاننده سنگ‌بستر است. در بخش جنوبی دریاچه گوری بلمک و مرکز دشت جایدر به علت ضخامت زیاد رسوبات دهانه هیچ فرو چاله‌های در سطح زمین دیده نمی‌شود، بنابراین ناهمواری‌های موجود در این محل‌ها، ناشی از فرونشست زمین، در بالای دهانه فرو چاله هستند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، در منطقه مطالعه سنگ‌بستر انحلال‌پذیر با مقاومت کششی کم، واگرایی مواد پرکننده درزه‌ها، رمبندگی رسوبات دریاچه‌ای پوشاننده سنگ‌بستر عوامل مؤثر در تشکیل فرو چاله هستند. همچنین با توجه به اختلاف سن زمین‌شناسی رسوبات پوشاننده سنگ‌بستر، وجود فرو چاله‌های قدیمی و مدفون به‌خصوص در محل دشت جایدر می‌تواند یک تهدید جدی برای سازه‌های متمرکز و خطی در منطقه باشد. عدم مدیریت منابع آب منطقه و افت سطح ایستابی آب در آینده می‌تواند در تشدید پدیده فرو چاله زایی در مناطق جنوبی شهر پل‌دختر به‌ویژه در محل دشت جایدر مؤثر باشد.

دشت‌های جایدر و گوری بلمک باقی‌مانده‌های دو دریاچه زمین‌لغزشی با همین نام‌ها می‌باشند. دریاچه‌های مذکور در اثر وقوع بهمین سنگی سیمره در جنوب غرب ایران تشکیل شده بودند. سنگ‌بستر رسوبات دریاچه‌ای، سازند گچساران با لیتولوژی غالب ژئوپس و مارن‌های قرمز سولفاته است. توده‌های ژئوپس سنگ‌بستر با مقاومت فشاری تک‌محوری ۱۶/۳۹ مگا پاسکال و نسبت مدولی ۵۰، مطابق روش دیر و میلر در رده سنگ‌های EL قرار می‌گیرند. با توجه به مقاومت کششی کمتر از ۲ مگا پاسکال توده‌های ژئوپس سازند گچساران در منطقه پژوهش، سقف فضاهای کارستی از جمله غار و گالری‌های افقی به‌آسانی ریزش و مقدمات تشکیل فرو چاله فراهم می‌شود. نتایج بررسی‌های ژئوفیزیکی نشان می‌دهد عمق متوسط سنگ‌بستر در دشت جایدر و محل دریاچه گوری بلمک به ترتیب ۷۰ و کمتر از ۱۰ متری از سطح زمین است. همچنین در محل رخنمون سنگ‌بستر در اطراف منطقه مطالعه حداقل ۴ دسته‌درزه برداشت شده است. بازشدگی درزه‌ها توسط رسوبات دریاچه‌ای و خاک‌های مارنی حاصل از هوازدگی بخش مارنی سازند گچساران پر شده است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد مواد پرکننده اکثراً در رده خاک‌های با واگرایی متوسط و شدید قرار می‌گیرند. نتایج بازدیدهای صحرائی در منطقه مطالعه منجر به شناسایی حداقل ۳۲ فرو چاله شده است. فرو چاله‌های موجود در حوضه آبریز دریاچه گوری بلمک از تیپ فروریزشی (Cover- Collapse) و دارای عمقی بیش از ۵ متر بوده و غالباً به شکل گروهی و در یک راستای گسلی هستند. در اطراف دشت جایدر فرو چاله‌ها از تیپ فرونشستی (Cover- Subsidence) بوده و دارای قطری بیش از ۱۰ متر و عمق ظاهری کمتر از ۵ متر می‌باشند. کف برخی فرو چاله‌ها به گالری‌های افقی تونلی شکل متصل است. این گالری‌های باعث انتقال آب از

منابع

- Bell, F.G., Maud, R.R., 1994. Dispersive Soils: A Review from a South African Perspective. *Quaternary Journal of Engineering Geology* 11, 195-210.
- Deer, D.U., Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. Technical Report No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, New Mexico.
- Ezersky, M., Frumkin, A., 2013. Fault-Dissolution fronts relations and the Dead Sea sinkhole problem. *Journal of Geomorphology* 201, 35-44.
- Galloway, D., Jones, D.R., Ingebritsen, S.E., 1999. Land subsidence in the United States US geological Survey Circular, pp. 182.
- Gutierrez, F., Galve, J.P., Lucha, P., Bonachea, J., Pardo, G., Sanchez, J.A., Gutierrez, M., Gimeno, M. J, Remondo, J., Cendrero, A., 2009. Sinkholes in the salt-bearing evaporate karst of the Ebro River valley upstream of Zaragoza city (NE Spain) Geomorphological mapping and analysis as a basis for risk management. *Journal of Geomorphology* 108, 145-158.
- Gutierrez, F., Guerrero, J., Bonachea, J., Lucha, P., 2008. A sinkhole susceptibility zonation based on paleokarst analysis along a stretch of the Madrid-Barcelona high-speed railway built over gypsum and salt-bearing. *Journal of Engineering Geology* 102, 62-73.
- Heidari, M., Khanlari, G.R., Taleb Beydokhti, A.R., Momeni, A.A., 2011. The formation of cover collapse sinkholes in North of Hamedan, Iran. *Journal of Geomorphology* 132, 76-86.
- Jennings, J.E., Knight, K., 1975. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. *Proceedings of the sixth Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 99-105.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Dekker, R.S., 1976. Identification and nature of dispersive soils ASCE. *Journal of Geotechnical Division* 102, 69-85.
- Sourinezhad, A., 2002. The estimation of runoff in the watershed basin of Kashkan River using GIS. *Journal of Geographic Researches* 43, 57-80. (In Persian).
- Taheri, K., Gutierrez, F., Mohseni, H., Raeisi, E., Taheri, M., 2015. Sinkholesusceptibility mapping using the analytical hierarchy process (AHP) and magnitude-frequency relationships: case study in Hamadan province, Iran. *Geomorphology* 234, 64-79.
- Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M., 2005. Sinkholes and subsidence, karst and cavernous rock in engineering and construction, Springer, Chichester, pp. 373.

