

Research Article

Investigating and comparing the efficiency of geotechnical and geoelectrical methods in the study of landslides (Case study: Afsarabad landslide in Chaharmahal and Bakhtiari province-southwest of Iran)

Sayed Naeim Emami^{1*}, Masumeh Mansuri²

1- Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Chaharmahal and Bakhtiari, Agricultural Research and Education Organization, Shahrekord, Iran

2- Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Chaharmahal and Bakhtiari, Agricultural Research and Education Organization, Shahrekord, Iran

Keywords: *Mass movements, Geological investigations, Geophysical explorations, Plaxis software*

1-Introduction

Mass movements are complex phenomena. Researchers have stated that the landslide results from soil type, heavy rainfall, deforestation, and a network of high-density rivers (Woldesenbet et al., 2023a). Also, rainfall, soil characteristics, underground water level, and slope dip were known to affect landslides (Woldesenbet et al., 2023b). A combination of geotechnical and geophysical techniques has been suggested in landslide investigation (Kabeta et al., 2023). Meanwhile, rainfall has been introduced as one of the most important factors in landslides (Dikshit et al., 2020). Many natural and human factors include lithology and soil type, fault zones, rainfall, steep slopes, seismic activities, changes in the geometry of the slopes, construction on the slopes, and vibrations caused by heavy traffic (Evans et al., 2009, Tang et al., 2011, Kothyari et al., 2012, Sorbino and Nicotera, 2013, Guerriero et al., 2021, Singh et al., 2022, Thakur et al., 2023). The main object of this research is the technical and economic optimization of the field study methods of rotational landslides as the most widespread and damaging mass movements using stratigraphy principles and geotechnical and geoelectrical field integration. The results of geoelectrical investigations comply significantly with the analysis obtained from field tests of soil mechanics, and the geoelectrical method with a dipole-dipole array can replace a significant part of conventional drilling at a low cost.

2- Material & methods

This research has been carried out in three stages as follows:

2-1- Field operations and sampling

Geotechnical investigations were carried out by drilling three boreholes and taking 17 intact and damaged samples. The geoelectric operation was carried out with Schlumberger and Dipole arrangement to reach the bedrock depth, the shape of possible sliding surfaces, sequence of sediments, and sedimentation on about 7 hectares.

2-2- Laboratory studies

Soil mechanics tests, including soil moisture percentage (MC), Liquid limit (LL), plastic limit (PI), granularity, uniaxial, direct cutting, and permeability with variable height, were performed. In addition, XRD and XRF analysis were performed on three marl samples of different colors.

2-3- Data analysis

Landslide stability was analyzed using numerical models and Plaxis software.

* Corresponding author: emami1348@yahoo.com

DOI: 10.22055/aag.2024.46751.2452

Received: 2024-04-29

Accepted: 2024-10-17

3-Results and discussion

3-1- Geographical location

The landslide is located 2 kilometers west of Afsarabad village, and its geographical coordinates are 50°24'22" east longitude and 32°09'16" north latitude, respectively (Fig. 1).

3-2- Geology

The oldest stratigraphic unit of the region includes fossiliferous marl limestones, thick-layered limestones, and sandy clay limestones equivalent to Sarvak Formation (k, k7) and blue-gray marl and shales containing thin clay layers of Gurpi Formation (k8). The red conglomerate, along with pieces of chert, sandstone, and siltstone equivalent to Kashkan Formation (E) began, and after that, white marl and dolomite limestone belonging to Jahrum and Asmari formations (EO) were deposited. In several outcrops of the Pabdeh formation (Pd) with marl and thin limestone lithology, a clay layer is placed at the base (EO). On the aforementioned dolomitic limestones, thick-layered limestones and marly limestones containing interlayers of marl and sandy limestone (OM2) and colluvial sand with pebbles (QR), deposits and unstable slope soils (Qt2) containing cemented and strong terraces Medium and coarse limestone fragments have been deposited along with wind deposits (Qt1) and finally loose and detached river alluviums (Qal) (Fig. 2).

3-3- Landslide geomorphology and stratigraphy

The creation of a v-shaped valley with the base towards the top of the range and cutting the linear structure of the region, indicating the separation of a huge wedge of soil and rock mass with lithological sequence, Gurpi marl, Kashkan conglomerate, Jahrum, Shahbazan and Asmari limestones from the upper part of the range and rapid invasion towards the bottom of the valley and Doab-Samsami river (Emami, 2010). In Fig. s (3-a and b), the mechanism of old and new landslides is well shown.

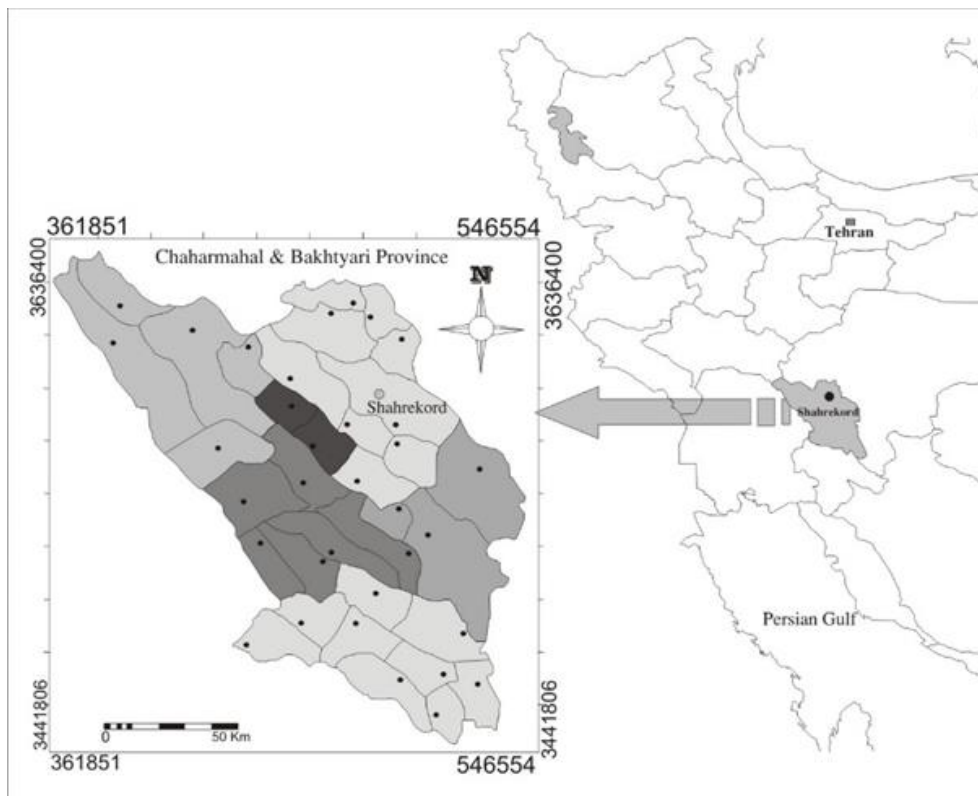


Fig. 1. Geographical location of the study area

In the area of the studied landslide, on the crest of the landslide, there are scarps between 50 and 100 cm in height, while at the eastern edge of the slope, where the boundary of the landslide is visible, the height of the scarps varies between 50 and 300 cm (Fig. 4 and 5). The area of the landslide section in the last general movement (1996) was 3.3 hectares. The length of the landslide from the road to the foot is about 300 meters, and its width varies from 60 meters in the foot to 140 meters in the middle of the slope.

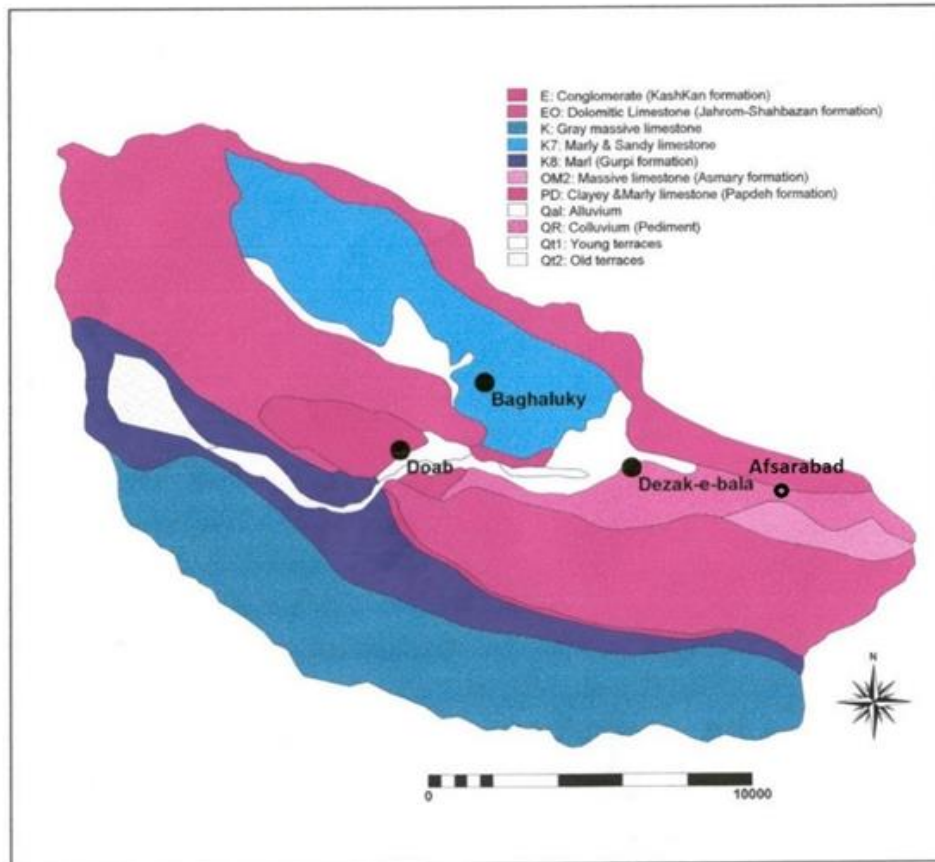


Fig. 2. Geological map of the Afsarabad area (Do-Ab Samsami watershed)

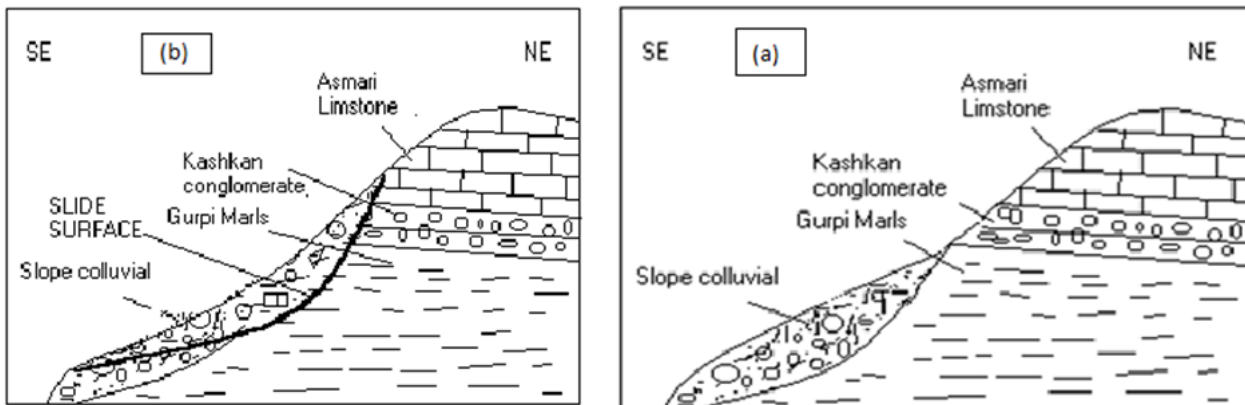


Fig. 3. (a) Early geological cross-section before the big ancient landslide (non-scale), and (b) Current geological cross-section of Afsarabad landslide (after old and new landslides)

3-4- Mineralogy

Analysis of the XRD diagrams shows the interesting peak similarity related to quartz, kaolinite, and montmorillonite minerals. Since Montmorillonite has considerable expandability, this mineralogical composition can be considered an intrinsic factor in increasing the domain's sensitivity to fracture and slip phenomena.

Geotechnical properties of materials involved in landslides: The depth layer with GC texture (clay gravel) can be separated in the studied slope after this depth. According to the results of Geoelectrical

operations, marl is the main lithology with a depth of more than 50 meters. Therefore, the drainage in the CL layer is very weak, and the persistence of water in this layer, even in limited rainfall, while creating saturation conditions, provides the basis for instability.

3-5- Stability analysis using Plaxis software

According to the output maps obtained from the stability analysis of Afsarabad landslide using Plaxis software, especially the total strain and horizontal displacement map, the old landslide is rotating at a depth of about 28 meters at the border of MH-ML soils and marl, from the upper part of the range to the toe. At the toe of the slope, no movement in the vertical direction is observed.

3-6- Geoelectric surveys

The geoelectrical method is used in order to determine the lithology fluctuations and diversity of the range to great depths, as well as to draw the rupture surfaces and possible landslides (Constantin et al., 2011; Bellanova et al., 2018; Pasierb et al., 2019). In this regard, the Schlumberger array was used to determine the slope lithology, and the dipole-dipole array was used to determine the depth and shape of the sliding surfaces. The profiles drawn in the dipole-dipole method (Fig. 4) show that the landslide is a rotational type (Slumping), and near the outcrop, the depth of the landslide is more than 20 meters, while in the toe of the slope, its depth is about 30 meters. Nevertheless, lithology is not considered as a determining factor or, in better words, a limiting factor of sliding levels because, in all layers, including the upper crust, middle deposits (colluvial), and thick marl layer, Multiple slip surfaces have been formed with various safety factors (Emami, 2010).

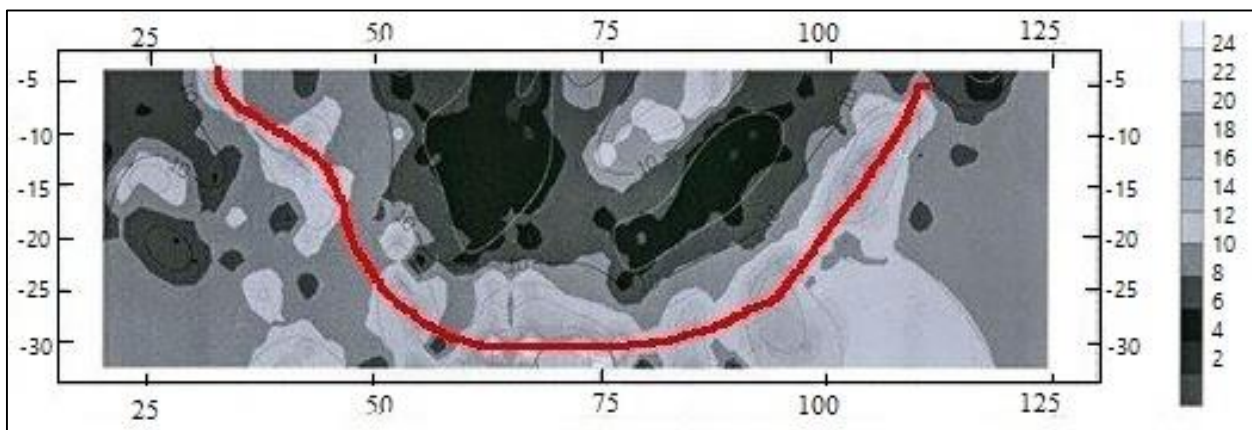


Fig. 4. Geoelectrical Profile No. 3- Dipole-Dipole array (near the sliding toe)

4-Conclusion

- The use of the geoelectric method has provided results that are completely similar to the findings of costly geotechnical explorations along with software analysis, which shows the great efficiency of the geoelectric method with a dipole-dipole array in detecting the variety of lithology of the slope and the depth of the sliding surfaces.

- The presence and seasonal fluctuations of groundwater caused weathering because of the expansion and contraction of expanding soils with increasing runoff and piezometric levels of the slope due to rainfall. Heavy long-term and sometimes high intensities of short-term rainfall, the occurrence of consecutive earthquakes of about 4 Richter, irrational cutting of the Shahrekord-Masjed Soleiman road incomplete drainage systems, especially on the bank of this road, and the production of artificial vibrations, especially due to the passage of heavy machinery, cause the instability of the slope.

- The stability analysis results show that the increase in underground water level due to heavy rainfalls, the increase in permeable water pressure, and the decrease in effective stresses cause instability. Therefore, the best measure to increase the stability of the slope is to create drainage systems at the toe of the slope and along the length of the slope to lower the underground water level to a depth of 20 meters from the

surface and to adjust the slope of the road edge up to 12 degrees using steps or terraces. Due to the high compatibility of the results of surface geology-geolectric and engineering geology (based on soil mechanics tests in the field and laboratory) on the slope deposits, the use of geophysical methods, especially geoelectricity suggested to be effective and cost-effective in the study of unstable slopes.

5-References

- Bellanova, J., Calamita, G., Giocoli, A., Luongo, R., Macchiato, M., Perrone, A., Uhlemann, S., Piscitelli, S., 2018. Electrical resistivity imaging for the characterization of the Montaguto landslide (southern Italy). *Engineering Geology* 243, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.014>
- Constantin, M., Bednarik, M., Jurchescu, M., Vlaicu, M., 2011. Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental Earth Sciences* 63, 397-406. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0724-y>
- Dikshit, A.; Sarkar, R.; Pradhan, B.; Segoni, S.; Alamri, A.M., 2020. Rainfall Induced Landslide Studies in Indian Himalayan Region: A Critical Review. *Applied Sciences* 10(7), 2466. <https://doi.org/10.3390/app10072466>.
- Emami, N., 2010. Drainage, the most suitable method to landslides stabilization and remediation (a case study: afsar - abad landslide). 9th International Conference on Hydroinformatics 2010, School of Mechanical Engineering, Tianjin, China 13, 2022-2029. <https://docplayer.net/188308460-9th-international-conference-on-hydroinformatics-2010.html>
- Evans, S.G., Roberts, N.J., Ischuk, A., Delaney, K.B., Morozova, G.S., Tutubalina, O., 2009. Landslides triggered by the 1949 Khatay earthquake, Tajikistan, and associated loss of life. *Engineering Geology* 109(3), 195-212. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.08.007>
- Guerriero, L., Ruzza, G., Maresca, R., Guadagno, F., Revellino, P., 2021. Clay landslide movement triggered by artificial vibrations: new insights from monitoring data. *Landslides* 18, 2949-2957. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01685-7>.
- Kabeta, W.F., Tamiru, M., Tsige, D., Ware, H., 2023. An integrated geotechnical and geophysical investigation of landslide in Chira town, Ethiopia. *Heliyon* 9(7), 12. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17620>
- Pasierb, B., Grodecki, M., Gwóźdź, R., 2019. Geophysical and geotechnical approach to a landslide stability assessment: a case study. *Acta Geophysica*, 67(4), 1823-1834. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00338-7>
- Singh, J., Pradhan, S.P., Singh, M., Hruaikima, L., 2022. Control of structural damage on the rock mass characteristics and its influence on the rock slope stability along National Highway-07, Garhwal Himalaya, India: an ensemble of discrete fracture network (DFN) and distinct element method (DEM). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(3), 96. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02575-5>.
- Sorbino, G., Nicotera, M.V., 2013. Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides. *Engineering Geology*, 165, 105-132. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.008>.
- Tang, C., Zhu, J., Qi, X., Ding, J., 2011. Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: A case study in the Beichuan area of China. *Engineering Geology* 122(1), 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.013>
- Thakur, M., Kumar, N., Dhiman, R.K., Malik, J.N., 2023. Geological and geotechnical investigations of the Sataun landslide along the Active Sirmauri Tal Fault, Sataun, Northwestern Himalaya, India. *Landslides* 20(5), 1045-1063. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02038-2>
- Woldesenbet, T., Telila, T., Fufa Feyessa, F., 2023. Geotechnical and geological investigation of landslide in West Arsi Zone, Ethiopia. *Environmental Earth Sciences* 82, 427. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11133-5>
- Woldesenbet, T.T., Arefaine, H.B., Yesuf, M.B., 2023. Numerical stability analysis and geotechnical investigation of landslide prone area (the case of Gechi district, Western Ethiopia). *Environmental Challenges* 13, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100762>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Emami, S.N., Mansuri, M., 2025. Investigating and comparing the efficiency of geotechnical and geoelectrical methods in the study of landslides (Case study: Afsarabad landslide in Chaharmahal and Bakhtiari province-southwest of Iran). Adv. Appl. Geol. 14(4), 1099-1123.

DOI: 10.22055/aag.2024.46751.2452

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_19709.html

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

بررسی و مقایسه کارایی روش‌های ژئوتکنیکی و ژئوالکتریکی در مطالعه زمین لغزش‌ها (مطالعه موردی: زمین لغزش افسرآباد در استان چهارمحال و بختیاری - جنوب غرب ایران)

سید نعیم امامی*

مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد ایران
معصومه منصوری

مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد ایران
* emami1348@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۶

چکیده

حرکات توده‌های پدیده‌های پیچیده‌ای هستند و هر ساله باعث خسارت‌های بی‌شمار جانی و مالی به کشور می‌شوند. تخریب جاده‌های کوهستانی غالباً به دلیل حرکات توده‌ای رخ می‌دهد. تشخیص سطح گسیختگی در زمین لغزش‌ها مهم‌ترین پیش‌نیاز مطالعات علل ناپایداری و اتخاذ تصمیم مناسب جهت پایدارسازی است که با عدم قطعیت فراوان روبرو است و حفاری دامنه‌های لغزیده به‌سختی می‌تواند به تشخیص این سطح کمک کند. هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی روش‌های مطالعه صحرایی زمین لغزش‌های چرخشی به‌عنوان فراگیرترین حرکات توده‌ای با تلفیق مطالعات چینه‌شناسی، کاوش‌های صحرایی ژئوتکنیکی و ژئوالکتریکی با هدف تعیین عمق سطح لغزش با کمترین هزینه می‌باشد. این تحقیق در محدوده زمین لغزش روستای افسرآباد در غرب استان چهارمحال و بختیاری به انجام رسیده و شامل جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی و چینه‌شناسی قبل و بعد از لغزش، حفاری و آزمایشات مکانیک خاک و هم‌چنین کاوش‌های ژئوالکتریک می‌باشد. هندسه سطح لغزش به‌ویژه عمق این سطح با استفاده از بررسی‌های ژئوالکتریکی با آرایه دوقطبی - دوقطبی استخراج و سپس با تحلیل‌های ژئوتکنیکی نرم‌افزاری مقایسه گردیده است. ضریب اطمینان برای لغزش افسرآباد به روش اجزای محدود (نرم‌افزار Plaxis) در سطوح مختلفی از آب زیرزمینی محاسبه شد. براساس نتایج به‌دست آمده دامنه ناپایدار بوده به‌طوری که ضریب اطمینان در فصل خشک و تر به ترتیب (۰/۷۷) و (۰/۱۶) و عمق سطح گسیختگی ۲۸ متر به‌دست آمده است. نتایج بررسی‌های ژئوالکتریک عمق متوسط ۲۵ متر را برای سطح گسیختگی نشان داده است که منطبق با تحلیل‌های نرم‌افزاری است. بر این اساس می‌توان روش ژئوالکتریک با آرایه دوقطبی - دوقطبی را با هزینه‌ای پایین جایگزین بخش قابل ملاحظه‌ای از حفاری‌های مرسوم نمود.

واژه‌های کلیدی: حرکات توده‌ای، بررسی‌های زمین‌شناختی، کاوش‌های ژئوفیزیکی، نرم‌افزار Plaxis

۱- مقدمه

زمین لغزش به‌عنوان یک خطر طبیعی ویرانگر با تخریب زیرساخت‌ها، تغییر وضعیت توپوگرافی زمین، تأثیر بر وضعیت اقتصادی - اجتماعی ساکنین نواحی آسیب دیده، به‌طور قابل توجهی زندگی انسان‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. زمین لغزش‌ها می‌توانند در اندازه‌های بسیار کوچک تا بسیار بزرگ به وقوع پیوسته و بسته به موقعیت جغرافیایی و مکان وقوع زمین لغزش آسیب‌های متفاوتی ایجاد کنند. استان چهارمحال و بختیاری در سه دهه اخیر و به‌ویژه هم‌زمان و پس از آغاز فعالیت‌های گسترده عمرانی هم‌چون احداث جاده‌های راهبردی شهرکرد -

مسجدسلیمان و شهرکرد - ایزده شاهد وقوع انواع حرکات توده - ای بوده است. عوامل طبیعی و انسانی بسیاری شامل سنگ - شناسی و جنس خاک، پهنه‌های گسلی، بارندگی، شیب‌های تند و فعالیت‌های لرزه‌ای، تغییرات هندسه دامنه، ساخت و ساز در دامنه‌ها و ارتعاشات ناشی از ترافیک‌های سنگین در ایجاد انواع حرکات توده‌ای به‌ویژه زمین لغزش‌ها موثر می‌باشند (Thaku ; Sorbino and Nicotera., 2013; ; et al., 2023 ;Kothyari Guerriero et al., 2021; Singh et al., 2022 ; Evans et al., 2009 Tang et ;al., 2011 et al., 2012 Avanzi et al., ; Collins., 2008 ; Ray et al., 2009 2004). با این ملاحظه که خصوصیات زمین‌شناسی جزء ویژگی‌های ذاتی دامنه‌ها می‌باشند، تغییرات ایجاد شده در

(Brzozówka)، نزدیک کراکوف (لهستان) پرداخته و از نتایج به دست آمده برای مدل سازی عددی لغزش استفاده کرده است. سطح لغزش به دست آمده از روش ژئوالکتریک با سطح لغزش به دست آمده توسط مدل سازی عددی همخوانی داشته است و تغییرات میزان اشباع شدگی خاک به عنوان مهم ترین عامل زمین لغزش شناخته شده است. Emami (۲۰۱۰) پارامترهای زمین شناسی و زمین شناسی مهندسی لغزش افسرآباد را بررسی و افزایش آب زیرزمینی در فصول پرباران را به عنوان مهم ترین عامل محرک وقوع زمین لغزش و زهکشی را به عنوان مؤثرترین راهکار کنترل پایداری دامنه معرفی نموده است (Emami, 2010).

امروزه مطالعه زمین لغزش ها با استفاده از حفاری های پرهزینه ژئوتکنیکی و آزمایشات پر تعداد مکانیک خاک صورت می پذیرد و لذا ضروری است که با بهره گیری از دانش زمین شناسی مهندسی و تلفیق روش های کم هزینه تر در جهت بررسی سریع و ارزان این گروه از مخاطرات طبیعی، گام های مؤثری برداشته شود. در این راستا و با هدف تعیین شکل و ابعاد فیزیکی لغزش، چگونگی فعالیت، علل وقوع و پیشنهاد گزینه های تثبیت، مجموعه بررسی های زمین شناسی، زمین شناسی مهندسی، هیدرولوژیکی، ژئوتکنیکی و ژئوالکتریک بر روی یک لغزش چرخشی منتخب در روستای افسرآباد از توابع شهرستان کوه رنگ استان چهارمحال و بختیاری انجام شده است. در این پژوهش روش کم هزینه ژئوالکتریک با آرایه ی دوقطبی - دوقطبی به عنوان روشی دقیق جهت جایگزینی به جای روش های ژئوتکنیکی مبتنی بر حفاری های پرهزینه به کار گرفته و پس از انطباق و صحت سنجی با استفاده از تحلیل نرم افزاری مبتنی بر ویژگی های فیزیکی مصالح دامنه به عنوان یک دستاورد علمی - اجرایی معرفی شده است.

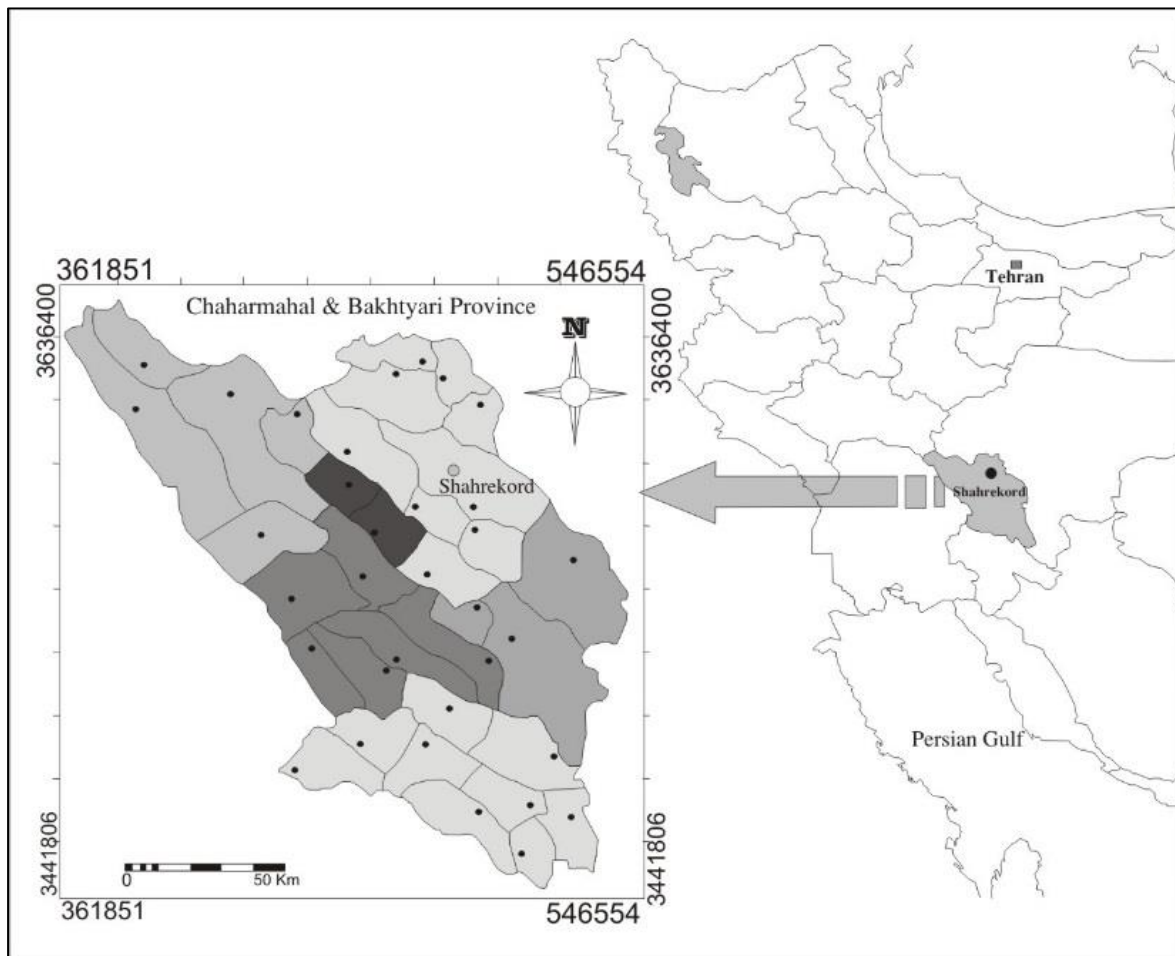
۲- موقعیت جغرافیایی و اقلیمی

زمین لغزش افسرآباد که در سال ۱۳۷۵ اتفاق افتاده در فاصله زمینی ۹۲/۵ کیلومتری غرب شهرکرد مرکز استان چهارمحال و بختیاری، در شهرستان کوه رنگ واقع شده است. محل لغزش در فاصله ۲ کیلومتری غرب روستای افسرآباد استقرار یافته و مختصات جغرافیایی آن به ترتیب $22^{\circ} 24' 50''$ طول شرقی و $32^{\circ} 09' 16''$ عرض شمالی می باشد (شکل ۱). براساس طبقه بندی اقلیمی گوسن این ناحیه در پهنه اقلیمی استپی سرد با میانگین بارش سالانه ۶۳۵ میلیمتر قرار گرفته است.

دامنه ها توسط انسان موجب ناپایداری دامنه و وقوع زمین لغزش می گردد. در این میان بارندگی به عنوان یکی از مهم ترین عوامل وقوع زمین لغزش معرفی شده است (Dikshit et al., 2020) برای بررسی علل و تثبیت زمین لغزش ها، اطلاعات دقیق در مورد ساختار زمین شناسی و جنس سنگ ها و نیز شاخص های ژئوتکنیکی مصالح درگیر در زمین لغزش ضروری است. در همین راستا روش های ژئوفیزیک غیرتهاجمی به دلیل دقت، کم هزینه بودن و فراهم آوردن مقاطع پیوسته از ساختارهای زمین شناسی برای مطالعات زمین لغزش بسیار مفید می باشند. از انواع مختلف روش های ژئوفیزیکی (لرزه ای، مقاومت الکتریکی، نفوذ رادار و روش ثقلی) روش ژئوالکتریک با ارائه اطلاعات مفیدی از هندسه زمین لغزش و ویژگی های هیدرولوژیکی محل به صورت گسترده تری در تحقیقات مربوط به حرکات توده ای مورد استفاده قرار می گیرد (Bellanova et al., 2018; Pasierb et al., 2019; Constantin et al., 2011; Pasierb., 2015).

در مطالعه ای ویژگی های زمین شناسی و ژئوتکنیکی زمین لغزش در منطقه غربی آرسی (Arsi) اتیوپی بررسی و دلیل وقوع زمین لغزش ترکیبی از شرایط از جمله نوع خاک، بارش زیاد، جنگل زدایی و وجود شبکه ای از انهار با تراکم بالا بیان گردید. عوامل ژئوتکنیکی، نوع خاک و نقش آنها در وقوع زمین لغزش Gechi در غرب اتیوپی با به کارگیری مطالعات میدانی، نتایج آزمایشگاهی و به کارگیری روش مقاومت الکتریکی و مدل سازی لغزش با استفاده از نرم افزار Plaxis بررسی شد. بارندگی، خصوصیات خاک، سطح آب زیرزمینی و شیب دامنه به عنوان عوامل مؤثر بر لغزش شناخته شد و اصلاح هندسه، شیب، ساخت دیواره حایل و ایجاد سازه های زهکشی مناسب و جنگل کاری به عنوان راهکار کنترل پایداری دامنه ارائه گردید (Woldesenbet et al, 2023).

Kabeta و همکاران (۲۰۲۳) با به کارگیری ترکیبی از روش های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی به بررسی زمین لغزش در شهر چیرا (Chira) پرداخته و پس از بررسی ویژگی های زمین شناسی منطقه و پارامترهای خاک و به کارگیری روش ژئوالکتریک به ترتیب بارش، نوع خاک، کاربری اراضی، ارتفاع، شیب و جهت شیب را به عنوان مهم ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش معرفی نموده است (Kabeta et al, 2023). Pasierb و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی به بررسی ویژگی های زمین لغزش در برزوزوکا



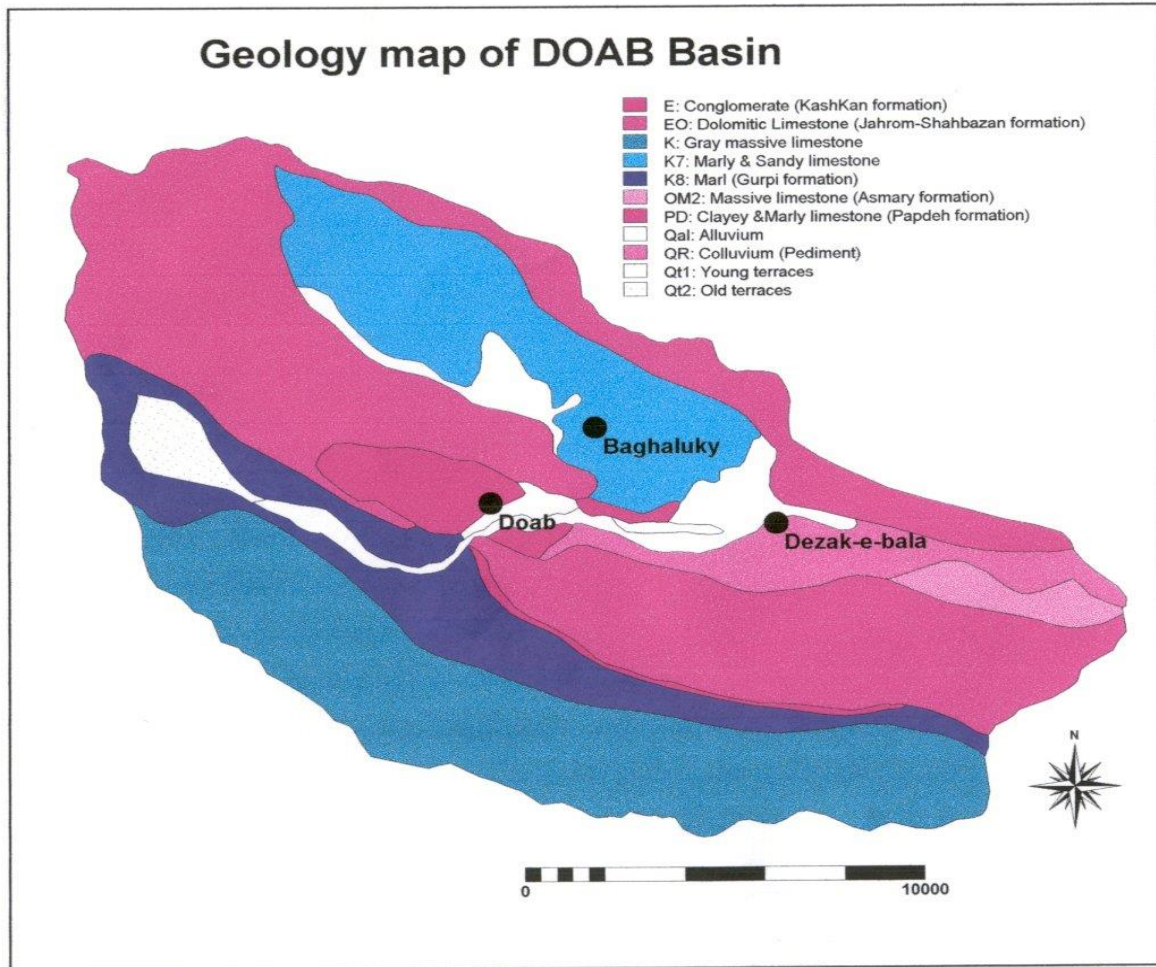
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده زمین لغزش افسرآباد (پلی گون سیاه)

Fig.1. Geographical location of Afsarabad landslide area (black polygone)

۳- زمین شناسی منطقه

از دیدگاه ساختاری، منطقه مورد مطالعه در زون زمین ساختی زاگرس مرتفع (High Zagros) استقرار یافته است. از ویژگی های بارز این زون می توان به وجود گسله های متعدد و تقریباً موازی با گسل اصلی زاگرس اشاره نمود که باعث درهم ریختن ستون چینه شناسی ناحیه و ناهمگون شدن توپوگرافی گردیده است. مهم ترین ساختار موجود در نزدیکی افسرآباد گسل معکوس اردل می باشد که از فاصله حدود ۷ کیلومتری شمال تا شرق محدوده عبور کرده و در واقع مهم ترین خطواره موجود در این محدوده می باشد. نقشه زمین شناسی محدوده زمین- لغزش افسرآباد واقع در حوزه آبخیز دوآب صمصامی در شکل ۲ ارائه گردیده است. قدیمی ترین واحد چینه شناسی منطقه شامل آهک های مارنی فسیل دار، آهک های ضخیم لایه و آهک های رسی ماسه ای معادل سازند سروک (k, k7) و مارن و شیل های

خاکستری مایل به آبی حاوی نازک لایه های رسی سازند گورپی (k8) می باشد. دوران سوم باکنگلومرای قرمز همراه با قطعات چرت، ماسه سنگ و سیلت استون معادل سازند کشکان (E) آغاز شده و به دنبال آن آهک های سفید مارنی و دولومیتی متعلق به سازندهای جهرم، آسماری (EO) نهشته شده اند. در چندین رخمون سازند پابده (pd) با لیتولوژی مارن و آهک نازک لایه رسی به صورت هم شیب در قاعده (EO) قرار گرفته است. بر روی آهک های دولومیتی مذکور، آهک های ضخیم لایه و آهک مارنی حاوی میان لایه های مارن و آهک ماسه ای (OM2) و کلوویال قلوه سنگ دار (QR)، واریزه ها و خاک های دامنه ای نابرجا (Qt2) تراس های سیمان شده و مستحکم حاوی قطعات آهکی متوسط و درشت همراه با واریزه های بادبزی شکل (Qt1) و در نهایت آبرفت های سست و منفصل رودخانه ای (Qal) نهشته شده اند (Emami, 2010) (شکل ۲).



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه افسرآباد (حوزه آبخیز دوآب صمصامی)
 Fig 2. Geological map of Afsarabad area (Doab Samsami watershed)

۴- هندسه لغزش

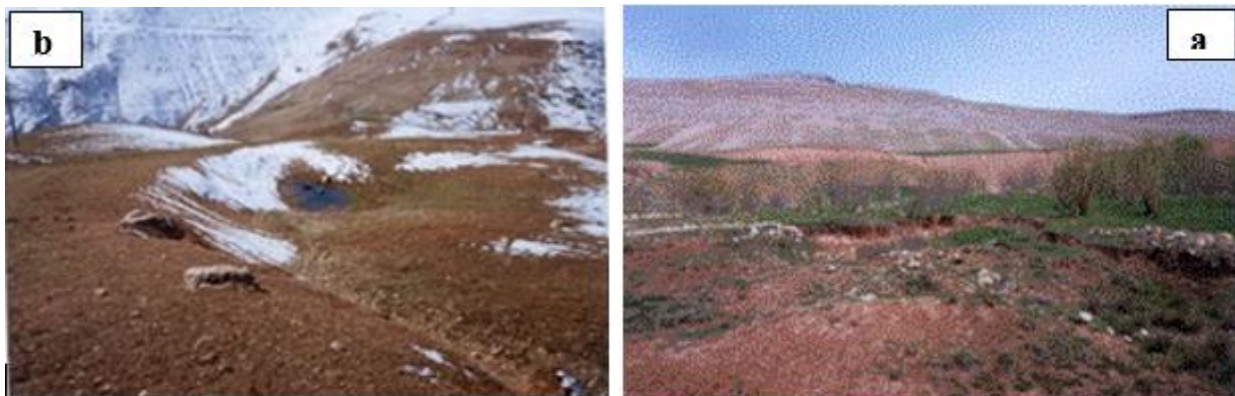
توده لغزشی افسرآباد در دامنه رو به جنوب قلمرو زاگرس مرتفع به وقوع پیوسته است (شکل ۳). جهت حرکت این توده و سایر حرکات مشابه موازی با آن در منطقه در راستای شمال شرق - جنوب غرب بوده و طول آن از بالا تا پنجه بیش از دو برابر عرض متوسط توده می باشد. در بخش افراز لغزش، پرتگاههایی به ارتفاع بین ۵۰ تا ۱۰۰ سانتیمتر بوجود آمده (شکل ۴a) و این در حالی است که در لبه شرقی توده که مرز شاخص لغزش بخوبی دیده می شود ارتفاع پرتگاه بین ۵۰ تا ۳۰۰ سانتیمتر در تغییر می باشد (شکل ۴b). مرز غربی توده فاقد پرتگاه شاخص بوده و تنها پس از تهیه نقشه توپوگرافی بزرگ مقیاس و ترسیم

بلوک دیاگرام دامنه این مرز با انحنای بارز خطوط تراز به خوبی متمایز گردید.

ارتفاع متوسط توده لغزیده از سطح دریا ۱۹۱۸ متر و شیب متوسط آن ۱۵/۵ درجه است. بالاترین نقطه ارتفاعی (جاده اصلی شهرکرد - مسجد سلیمان) در رقوم ارتفاعی ۱۹۵۰ و پایین ترین نقطه (پنجه لغزشی) آن در رقوم ۱۸۷۰ متر قرار دارد که بر این اساس اختلاف ارتفاع افراز و پنجه لغزش ۸۰ متر است. مساحت بخش لغزیده در آخرین حرکت مورد نظر در سال ۱۳۷۵ برابر با ۳/۳۳ هکتار بوده، طول لغزش از محل جاده (افزار لغزش) تا پنجه حدود ۳۰۰ متر و عرض آن بین ۶۰ متر در حوالی پنجه تا ۱۴۰ متر در میانه توده در تغییر است.



شکل ۳- تصویر محدوده لغزش افسرآباد و رودخانه دوآب صمصامی (نگاه به سمت شمال) - گمانه ها با مثلث قرمز نشان داده شده اند.
Fig. 3. Afsarabad landslide area and Doab Samsami River (looking north)

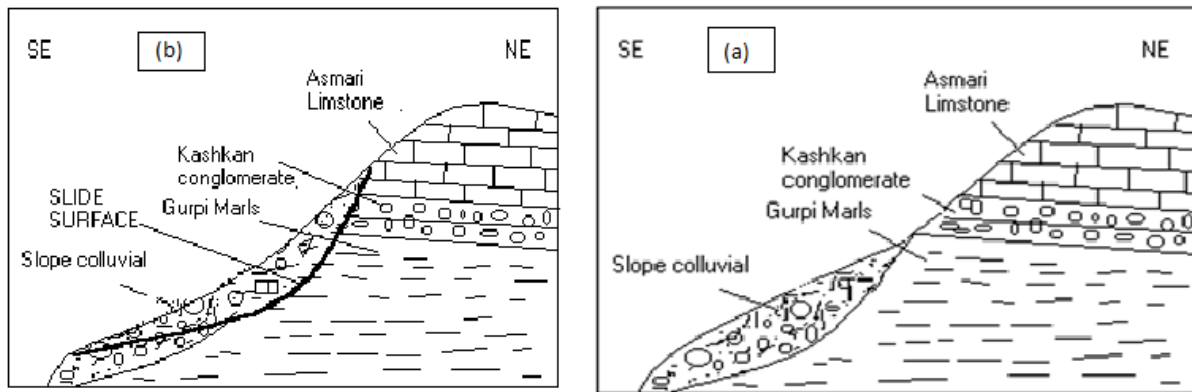


شکل ۴- (a) تصویر پرتگاه واقع در افراز لغزش و (b) تصویر پرتگاه شرقی لغزش
Fig. 4. (a) Picture of scarp in landslide crown and (b) Picture of eastern Landslide scarp

۵- زمین ریخت و چینه شناسی لغزش

ایجاد دره ۷ شکل با قاعده به سمت بالای دامنه و در واقع قطع ساختار خطی سنگ چینه ای منطقه، حاکی از جدایش گوه ای عظیم توده خاکی و سنگی با توالی لیتولوژیکی، مارن گورپی، کنگلومرای کشکان، آهک های جهرم، شهبازان و آسماری از بخش فوقانی دامنه و هجوم بهمن آسای آن به سمت پایین دامنه و رودخانه دوآب صمصامی می باشد (Emami et al, 2001). در شکل a و b به خوبی ساز و کار لغزش قدیمی و نیز لغزش های جدید به نمایش درآمده است. براساس این مقاطع، سطوح لغزش چرخشی قدیمی در سازندهای کشکان با لیتولوژی کنگلومرا،

آهک های شهبازان و بخشی از مارن های گورپی توسعه یافته و تمام این چینه ها را درگیر نموده است. در لغزش جدید نیز که بر روی واریزه های دامنه ای (کلویال QR) رخ داده در واقع نهشته های نابرجای حاصل از لغزش بهمن گونه قدیمی مجدداً در اثر عواملی که به آن ها اشاره شد دچار گسیختگی های چرخشی جدید گردیده اند. نکته پایانی در خصوص ریخت شناسی این لغزش آنست که پس از وقوع زمین لغزش اصلی مورد مطالعه این پژوهش، لغزش های محدود و کوچک جدیدی در دل توده فرو ریخته و لغزیده، رخ داده که همگی پس از وقوع بارش، جاری شدن آب در آبراهه ها و پدیده پاشویی خاک های رسی - مارنی محلی در دل توده بوده است.



شکل ۵- (a) نیمرخ زمین شناسی اولیه قبل از وقوع لغزش قدیمی بزرگ (بدون مقیاس) و (b) نیمرخ زمین شناسی کنونی زمین لغزش افسرآباد (پس از لغزش‌های قدیم و جدید) (Emami et al, 2001)

Fig 5. (a) Early geological cross section before the big ancient landslide (not to scale) and (b) Current geological cross section of Afsarabad landslide (after old and new landslides) (Emami et al, 2010)

در عمق بیش‌تر از ۷ متر، از پارامترهای اندازه‌گیری شده در گزارشی با عنوان مطالعات ژئوتکنیک محور بهشت‌آباد، صمصامی، چمن‌گلی توسط اداره راه استان چهارمحال و بختیاری استفاده شده است. بعلاوه در مطالعات ژئوتکنیک از نتایج آزمایشات و مغزه‌گیری دو گمانه ۳۰ متری حفر شده استفاده گردیده است. هم‌چنین برای سنگ بستر، با در نظر گرفتن به‌عنوان سنگ‌های ضعیف جهت تحلیل پایداری از پارامترهای ژئوتکنیکی ذکر شده در منابع مختلف به‌ویژه کتاب جداول بررسی و طراحی ژئوتکنیکی (Look, 2007)، استفاده شده است.

۶-۳- کانی‌شناسی لغزش افسرآباد

با توجه به نقش غیرقابل تردید نوع کانی‌های متشکله مصالح درگیر در لغزش در وقوع و فعالیت مجدد ناپایداری‌ها، به‌منظور تشخیص نوع کانی‌های رسی که در واقع عوامل اصلی ناپایداری مصالح به‌ویژه ریزدانه‌ها می‌باشند، بر روی سه نمونه مارن با رنگ‌های آبی، قهوه‌ای، زرد که در تمام گمانه‌ها به‌صورت مشابه (با رنگ‌های یکنواخت) به‌دست آمده‌اند؛ آزمون‌های XRD و XRF انجام شد. لازم به ذکر است که در آنالیز XRD (X-Ray Diffraction) تنها نوع کانی‌های اصلی و فرعی تعیین شده و در آنالیز XRF (X-Ray fluorescence) اکسید عناصر اصلی و سایر عناصر مشخص می‌شوند.

۶-۴- هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی آب‌های خروجی دامنه

با توجه به نقش غیرقابل تردیدی که آب‌های زیرزمینی و

۶- مواد و روش‌ها

۶-۱- بازدید مکان لغزش و جمع‌آوری اطلاعات

اولین گام در این پژوهش بررسی میدانی زمین‌لغزش افسرآباد جهت جمع‌آوری اطلاعات می‌باشد. بررسی میدانی شامل نقشه برداری و شناسایی مرزهای زمین‌لغزش، جمع‌آوری اطلاعات ژئوتکنیکی، ژئوفیزیکی، هیدروژئولوژیکی (سطح آب زیرزمینی) دامنه می‌باشد. بررسی‌های میدانی انجام شده به شرح ذیل است: الف) بازدید بصری: این مرحله شامل بررسی محل جهت تعیین میزان خسارت وارده به زیرساخت‌ها از جمله جاده و شواهد جابه‌جایی خاک می‌باشد.

ب) نقشه برداری توپوگرافی

پ) حفاری گمانه برای به‌دست‌آوردن نمونه خاک و انجام

آزمایشات تعیین پارامترهای مکانیکی خاک دربخش لغزیده

۶-۲- آزمایشات ژئوتکنیکی

براساس نتایج حاصل از سه گمانه دستی حفر شده و در مجموع با اخذ ۱۷ نمونه دست خورده، ۳ نمونه دست نخورده (کلوخه) جهت انجام آزمایشات مکانیک خاک شامل درصد رطوبت (MC)، حد روانی (LL)، دامنه خمیری (PI)، دانه‌بندی، تک محوری، برش مستقیم و نفوذپذیری با ارتفاع متغیر همراه با ۱۱ آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد و ۹ مورد نیز آزمون دانسیته تر و خشک در اعماق مختلف گمانه‌ها، برخی ویژگی‌های مصالح درگیر در لغزش که در تحلیل پایداری دامنه مورد استفاده قرار می‌گیرند مشخص شد. جهت تکمیل اطلاعات در مورد ویژگی‌های ژئوتکنیکی مواد دامنه به‌ویژه مارن‌های قرار گرفته

شش تابع پلاستیک است که در زیر یکی از این توابع ۲ و ۱ ارائه شده است.

(رابطه ۱)

$$f_1 = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \varphi - C \cos \varphi \leq 0$$

$$g_1 = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \psi \quad (\text{رابطه ۲})$$

۶-۷- پیشنهاد اقدامات اصلاحی

باتوجه به علل اصلی وقوع زمین لغزش در منطقه، روش‌های مناسب در جهت افزایش ضریب ایمنی و در نهایت کنترل زمین لغزش ارائه خواهد شد. در شکل ۶، نمودار جریانی مراحل انجام شده طی این تحقیق ارائه شده است.

۷- نتایج و بحث

۷-۱- ویژگی‌های ریخت‌شناسی توده لغزشی

مشاهدات صحرایی صورت گرفته، نشانگر وجود ترک‌های کششی به‌ویژه در دامنه و بالای توده می‌باشد. برخی از روندهای اصلی اندازه‌گیری شده عبارتند از: N50W - N45W - N40W - N5E - N62E. به دلیل جنس رسوبات و فرم خاص لغزش، ترک‌های موازی و در واقع شعاعی در سطح توده مشاهده نشد. ترک‌های فوق‌الذکر عمدتاً در پنجه و افراز لغزش متمرکز می‌باشند. به عبارتی در پنجه عمدتاً ترک‌هایی با روند شمال شرق - جنوب غرب گسترش داشته و تنها یک شکاف به طول ۲۵ متر با روند N70W مشهود است. این در شرایطی است که در افراز لغزش و به‌ویژه در کنار جاده اصلی شهرکرد - مسجدسلیمان روند شکاف‌ها عمدتاً شمال غرب - جنوب شرق (به موازات جاده) می‌باشد و تقریباً از محل همین ترک‌ها پدیده شکست و لغزش‌های بعدی (پس از مدتی از وقوع ترک) اتفاق می‌افتد (شکل a و b). در هر صورت دقت در مختصات اندازه‌گیری شده مؤید دو راستای عمده شمال غرب - جنوب شرق و شمال شرق - جنوب غرب با زوایای مختلف و بی‌نظم می‌باشد. این شکاف‌ها ناشی از تکتونیسم پویای منطقه نبوده و صرفاً متأثر از حرکات داخلی توده لغزش افسرآباد است و بنابراین کاملاً مرتبط با جنس مصالح متشکله دامنه می‌باشد، چرا که هر ساله بر تعداد آن‌ها در کنار جاده و شیب‌های تند درون دامنه افزوده شده درحالی‌که هیچ حرکت تکتونیکی جدیدی رخ نمی‌دهد.

سطحی بر وقوع زمین لغزش‌ها دارند، در مدت اجرای پژوهش (۳۰ ماه) بیش از ۳۰ مورد اندازه‌گیری آب بر روی چشمه اصلی واقع در افراز لغزش، چشمه و مجرای خروجی پایین‌تر از پنجه لغزش، چشمه‌های فصلی دامنه توده لغزش و هرزآب‌های جاده اصلی واقع بر روی افراز لغزش انجام پذیرفت. از سوی دیگر به منظور بررسی تغییر خصوصیات شیمیایی آب قبل و پس از ورود به توده لغزش و نیز مقایسه آب‌های خارج شده از توده با مناطق هم‌جوار بدون حرکات توده‌ای، نمونه برداری از چشمه اصلی در بالای لغزش، پنجه توده و نیز انتهای‌ترین نقطه خروجی آب‌ها و قبل از ورود به رودخانه دو آب صمصامی (جنوب دامنه) صورت پذیرفت.

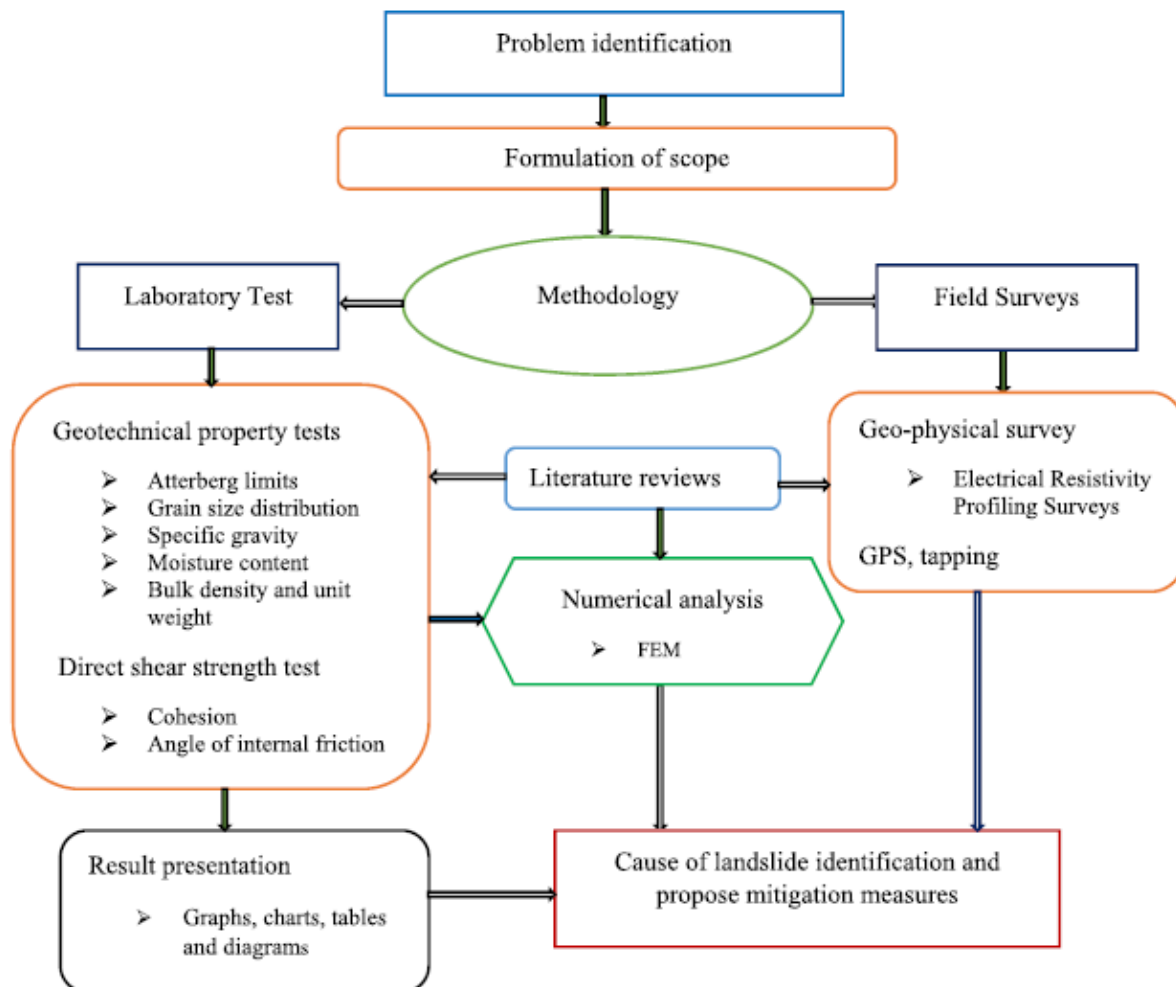
۶-۵- بررسی ژئوفیزیکی

با عنایت به نیمرخ‌های ترسیم شده از وضعیت زمین‌شناسی منطقه و بر اساس پیمایش‌های سطح الارضی و پیش‌بینی عدم دستیابی به سنگ کف به واسطه حفاری‌های دستی، عملیات ژئوالکتریک با دو آرایش اشلومبرگر و دو قطبی (Dipole) با هدف دستیابی به عمق سنگ بستر، عمق و شکل سطوح لغزش احتمالی، توالی جنس و دانه‌بندی رسوبات در سطح حدود ۷ هکتار انجام پذیرفت.

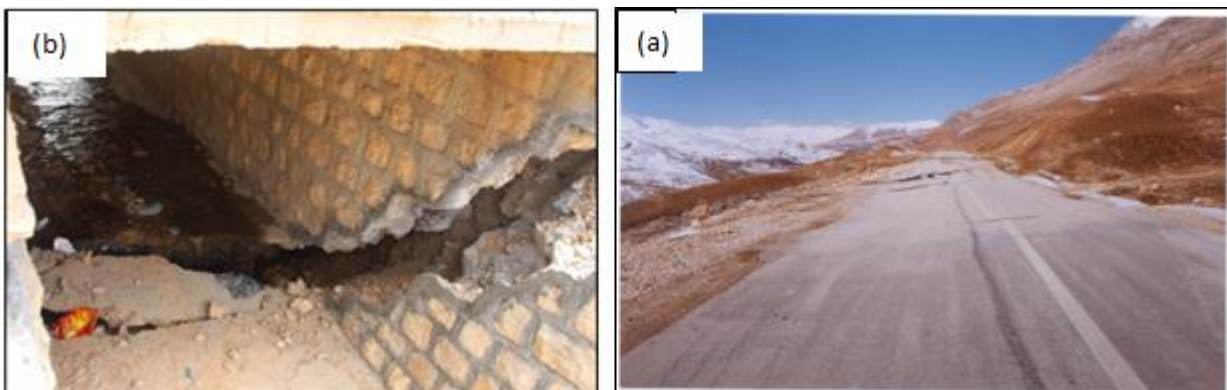
۶-۶- تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌های به دست آمده از تحقیقات میدانی، نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و بررسی‌های ژئوفیزیکی جهت تعیین پارامترهای اثرگذار بر زمین لغزش افسرآباد، تحلیل میزان پایداری دامنه و سطح زمین لغزش با استفاده از مدل‌های عددی با استفاده از نرم افزار plaxis بررسی گردید. در نرم‌افزار plaxis می‌توان برای محاسبه ضریب پایداری، روش phi-c Reduction بر اساس معیار موهر-کولمب را به کار گرفت.

مدل انتخاب شده موهر-کولمب براساس نظریه الاستیک-پلاستیک مکانیک خاک بیان شده است. بر این اساس، هم پارامترهای الاستیک (E و U) و هم پارامترهای پلاستیک (c, φ و Ψ)، در این مدل استفاده شده است. به‌طور مشابه علاوه بر توابع تسلیم (F)، در این مدل توابع پتانسیل پلاستیک (g)، گنجانیده شده، که در آن زاویه اتساع با رفتار پلاستیک خاک در ارتباط است. فرمول موهر-کولمب شامل شش تابع تسلیم و



شکل ۶- نمودار جریان‌ی مراحل انجام پژوهش
Fig 6. flow chart of research



شکل ۷- (a) پدیده نشست در امتداد ترک‌های کششی بستر جاده شهرکرد- مسجدسلیمان و (b) عمق ترک‌ها که باعث تخریب پایه پل شده است.
Fig. 7.(a) Subsidence along with the cracks in the base of the Shahrekord-Masjed Soleyman road and (b) The depth of the cracks that caused the destruction of the bridge foundation

۷-۲- کانی شناسی

بر روی سه نمونه مارن رنگی تشکیل دهنده توده لغزشی افسرآباد آزمایش XRD پذیرفت که نتایج آن در جدول (۱) درج گردیده است. بالا بودن مقادیر سلیس (SiO_2) اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) حاکی از وفور ترکیبات آلومینوسیلیکاته بوده که در واقع همان ساختمان رس‌ها را تشکیل می‌دهند. از سوی دیگر فراوانی اکسید کلسیم (CaO) مؤید حضور آهک به‌عنوان یک فاز کانیایی غالب می‌باشد که به‌عنوان کانی همراه کانی‌های رسی تلقی می‌شود. مقادیر بالای (L.O.I) به دلیل هوازدگی نمونه‌ها و وجود مقادیر قابل توجهی آب همراه می‌باشد. براساس آنالیز XRD در هر سه نمونه فاز غالب یا به‌عبارتی کانی‌های اصلی زمینه را کلسیت (CaCO_3) و کوارتز (SiO_2) تشکیل داده و این در شرایطی است که فاز فرعی معرف ایلیت و مونت مورینیت می‌باشد. با توجه به این که مونت مورینیت واجد انبساط‌پذیری قابل ملاحظه‌ای می‌باشد می‌توان این ترکیب کانی‌شناسی را به‌عنوان عامل ذاتی در جهت افزایش حساسیت دامنه به پدیده شکست و لغزش مد نظر قرار داد.

۷-۳- هیدرولوژی و هیدروژئولوژی

در جدول ۲، آمار آبدی چشمه اصلی واقع در افراز لغزش و نتایج اندازه‌گیری‌ها بر روی سایر خروجی‌های آبی دامنه ارائه شده است (Emami et al, 2001). به دلیل ارتباط مستقیم آبدی مجاری داخل و پنجه لغزش با میزان آب نفوذی از محل چشمه اصلی در بخش بالای لغزش، انطباق زیادی بین زمان‌های پربابی این مجاری با دبی‌های حداکثر چشمه اصلی، قابل مشاهده است که در جدول ارائه شده به‌خوبی می‌توان این

همخوانی را شاهد بود. این تطابق نشانگر آنست که چنانچه بتوان آب خروجی از چشمه اصلی را بدون ورود به توده پایین دست، به رودخانه اصلی در پایین (جنوب) توده لغزشی هدایت نمود؛ در واقع از اشباع شدن مصالح ریز دانه توده و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در دامنه جلوگیری می‌شود که قطعاً این امر نقش غیرقابل انکاری در پیش‌گیری از لغزش‌های مکرر آینده خواهد داشت.

نتایج خصوصیات شیمیایی آب قبل و پس از ورود به توده لغزش و نیز مقایسه آب‌های خارج شده از توده با مناطق هم‌جوار بدون حرکات توده‌ای، در جدول ۳ درج گردیده است (Emami et al., 2001).

دقت در نتایج تجزیه شیمیایی آب نشان می‌دهد که تقریباً تفاوت‌چندانی بین فاکتورهای شیمیایی در چهار نمونه به‌چشم نمی‌خورد. در این رابطه بررسی نتایج نمونه‌های ۱ و ۲ و ۳ که مربوط به آب‌های قبل و بعد از ورود به توده می‌باشند، هیچ نشانه‌ای از تأثیرگذاری ترکیب لیتولوژیکی و رسوب‌شناختی توده مشاهده نمی‌شود. به‌عبارتی عمل انحلال املاح پیکره توده لغزشی در آب‌های ورودی زیاد نیست و این عدم انحلال خود می‌تواند به‌عنوان فاکتوری مثبت در تثبیت لیتولوژیکی توده تلقی گردد. از طرف دیگر نمونه شاهده‌ای که از چشمه آب آشامیدنی میانه روستای افسرآباد در امتداد چشمه اصلی و به فاصله دو کیلومتری جنوب شرقی آن برداشت شده و مورد آزمایش قرار گرفته است نیز تقریباً ترکیبی مشابه با سه نمونه پیش‌گفته دارد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای در منطقه نقشی در تغییر ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی نداشته است.

جدول ۱- نتایج آنالیز XRF بر روی مارن‌های توده لغزشی افسرآباد (Emami et al, 2001)
Table 1. The results of XRF analysis on the marls of Afsarabad landslide mass

Oxide	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	Fe_2O_3	TiO_2	SO_3	L.O.I
sample										
1	34.71	8.25	0.11	1.52	22.46	1.27	4.81	0.47	0.08	26.23
2	29.87	8.01	0.12	1.41	24.64	1.87	4.37	0.46	0.06	29.05
3	21.38	4.47	0.08	0.87	36.75	0.98	2.40	0.5	0.09	32.72

جدول ۲- نتایج اندازه گیری آب چشمه اصلی و آب های خروجی توده لغزش افسرآباد (لیتر در ثانیه)

Table2. The results of measuring the water of the main spring and the outlet waters of the Afsarabad landslide mass (L/S)

waste water	3 rd year			2 nd year				1 th year			Output	Month
	hillside	toe	main spring	waste water	hillside	toe	main spring	waste water	hillside	toe		
0.64	0.72	-	0.26	0.48	0.77	0.52	0.52	-	-	0.44	-	Farvardin
0.22	0.18	-	0.22	0.23	0.53	0.26	0.45	-	-	0.29	-	Ordibehesht
0.01	0.027	0.035	0.19	0.05	0.75	0.15	0.37	0.025	0.06	0.13	0.24	Khordad
0	0	0	0.15	0	0	0.04	0.2	0	0	0	0.18	Tir
0	0	0	0.12	0	0	0	0.18	0	0	0	0.13	Mordad
0	0	0	0.09	0	0	0	0.14	0	0	0	0.1	Shahrivar
0	0	0	0.08	0	0	0	0.1	0	0	0	0.08	Mehr
0	0	0	0.08	0	0	0	0.1	0	0	0	0.08	Aban
0.96	1.4	-	0.18	0.1	0	0	0.12	0	0	0.017	0.12	Azar
3.32	2.5	0.8	0.9	0.33	0.52	0.75	0.14	0	0.4	0.16	0.15	Dey
4.42	3	-	1.1	0.48	0.58	-	0.13	5	0.45	0.43	0.18	Bahman
4.44	3.58	-	1	0.66	0.67	-	0.19	1.14	0.6	0.85	0.31	Esfand

جدول ۳- نتایج تجزیه شیمیایی آب های واقع در محدوده طرح لغزش افسرآباد

Table 3. The results of chemical analysis of waters in Afsarabad landslide area

Number	Sample specifications	pH	Meq/l					
			Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻
1	The main spring above the landslides	8.5	0.07	1.2	2.4	0.9	3	0.6
2	Hillside output	8.2	0.09	1.2	2.4	0.8	2.8	0.6
3	Landslide toe	8.5	0.1	1.7	2.4	0.6	2.8	0.8
4	Afsarabad village)witness (spring	8.3	0.07	1.6	2.4	0.8	3.3	0.6

۷-۴- خواص ژئوتکنیکی مصالح درگیر در لغزش

در جدول ۴ نتایج آزمایش‌های انجام شده به تفکیک هر گمانه ارائه شده است. براساس نتایج به دست آمده از سطح تا عمق حفاری (حدود ۶ متر) لایه سطحی با بافت CL (رس با پلاستیسیته پایین) و عمقی با بافت GC (گراول رسی) در دامنه مورد مطالعه قابل تفکیک بوده که پس از این عمق با توجه به نتایج عملیات ژئوالکتریکی صورت پذیرفته مارن یکپارچه تا عمق بیش از ۵۰ متر حضور دارد. آزمون نفوذپذیری انجام شده بر روی کلوخه رسی از عمق ۱/۵ متری گمانه شماره سه نشانگر ضریب نفوذپذیری $6-10 \times 5 \text{ cm/sec}$ بوده که این مقدار بسیار پایین قطعاً ناشی از نوع رس‌های غالب موجود در نیمرخ دامنه می‌باشد. بنابراین زهکشی در لایه CL بسیار ضعیف بوده و ماندگاری آب در این لایه حتی در بارندگی‌های محدود ضمن ایجاد شرایط اشباع شدگی، زمینه وقوع ناپایداری را فراهم می‌سازد.

در تحلیل پایداری شیب، پارامترهای زهکشی نشده (آنالیزهای تنش کل) برای پایداری کوتاه مدت و پارامترهای زهکشی شده (آنالیز تنش مؤثر) برای پایداری بلند مدت استفاده می‌شود (Berilgen, 2007). با توجه به این که لغزش افسرآباد سبب ایجاد مشکلات بسیار در مسیر جاده شهرکرد-مسجدسلیمان طی سالیان گذشته گردیده؛ تحلیل بلند مدت این لغزش در این پژوهش مد نظر می‌باشد و پارامترهای لازم جهت تحلیل پایداری براساس آنالیزهای تنش مؤثر می‌باشد (جدول ۵).

۷-۵- تحلیل پایداری دامنه با استفاده از نرم‌افزار Plaxis

پس از تعیین پارامترهای مورد نیاز جهت تحلیل پایداری و ترسیم سطوح لغزش، از نرم‌افزار Plaxis استفاده گردید. این نرم‌افزار از روش اجزای محدود استفاده می‌کند. در مدل مدنظر برای تحلیل پایداری و ضریب اطمینان زمین لغزش افسرآباد از ۴ لایه با مشخصات ذکر شده در جدول استفاده می‌شود.

محاسبه ضریب اطمینان در دو حالت و براساس مراحل زیر انجام شده است:

۱- تحلیل پایداری دامنه در فصل خشک (فصل‌های بدون بارندگی)، با قرارگیری سطح آب زیرزمینی در ۵ متری سطح زمین.

۲- تحلیل پایداری دامنه در فصل تر (فصل‌های بارندگی)، با قرارگیری سطح آب زیرزمینی در ۲/۵ متری از سطح دامنه.

محاسبه مرحله پلاستیک، پس از رسیدن تنش‌های برجا به $0/77$ مجموع وزن در فصل خشک و $0/6$ در فصل تر، به دلیل ریزش دامنه، مرحله محاسبات متوقف می‌شود (شکل ۸).
سطح شکست در نرم‌افزار Plaxis با محلی‌سازی کرنش به دست می‌آید (شکل ۹a و b). کرنش‌های کل، کرنش‌های جمع شده در هندسه مدل در نقاط تنش در انتهای مرحله محاسبه اخیر می‌باشد که به صورت کرنش‌های اصلی (در جهت‌های اصلی)، کرنش‌های حجمی (VE) یا کرنش برشی (SE) معادل بیان می‌شوند. کرنش افزایشی، نمو و تمرکز کرنش‌ها در هندسه مدل در نقاط تنش را نشان می‌دهد که ممکن است شکست‌های جدید از آنجا رخ دهد. همچنین با استفاده از جابه‌جایی‌های افقی و عمودی، سطح شکست، جابه‌جایی‌ها در جهت افق و جابه‌جایی‌ها در جهت قائم مشخص می‌گردد (شکل ۱۰a و b).

با توجه به نقشه‌های خروجی حاصل از تحلیل پایداری لغزش افسرآباد با استفاده از نرم‌افزار Plaxis، به‌ویژه نقشه کرنش کل و جابه‌جایی افقی، لغزش قدیمی به صورت چرخشی در عمق حدود ۲۸ متر در مرز خاک‌های MH-ML و سنگ مارن، از بخش بالایی دامنه تا پنجه آن قابل تشخیص است. همچنین، با استفاده از نقشه‌های کرنش افزایشی، تنش مؤثر و نقاط پلاستیک، لغزش جدیدتری بر روی لغزش قدیمی، نزدیک پنجه دامنه مشاهده می‌شود. میزان کرنش کل، زمانی که سطح آب در ۲/۵ متری سطح دامنه قرار دارد نسبت به حالتی که سطح آب زیر زمینی پایین‌تر است، مقدار کم‌تری را نشان می‌دهد که خود دلیلی بر افزایش تنش مؤثر با افت سطح آب و افزایش میزان کرنش می‌باشد. در نقشه جابه‌جایی قائم، بیش‌ترین جابه‌جایی مربوط به تاج لغزشی (۱/۳۱ متر در فصل خشک و ۰/۸۷ متر در فصل تر) می‌باشد. در پنجه دامنه، هیچ جابه‌جایی در جهت قائم مشاهده نمی‌گردد. دلیل این میزان جابه‌جایی در فصل خشک را می‌توان پایین رفتن سطح آب زیرزمینی و افزایش تنش مؤثر و در نتیجه آن کاهش فضای بین منفذی و افزایش جابه‌جایی بیان کرد. این درحالی است که بیش‌ترین میزان جابه‌جایی افقی در پنجه دامنه، در فصل خشک ۰/۶۹ متر و در فصل تر ۰/۵۳ متر است. قابل ذکر است که در فصل خشک و تر سطوح لغزشی به دست آمده تقریباً یکسان می‌باشد. از آنجایی که نرم‌افزار Plaxis براساس قانون تشکیل‌دهنده‌ها (رابطه تنش-کرنش) می‌باشد؛ سطح لغزش

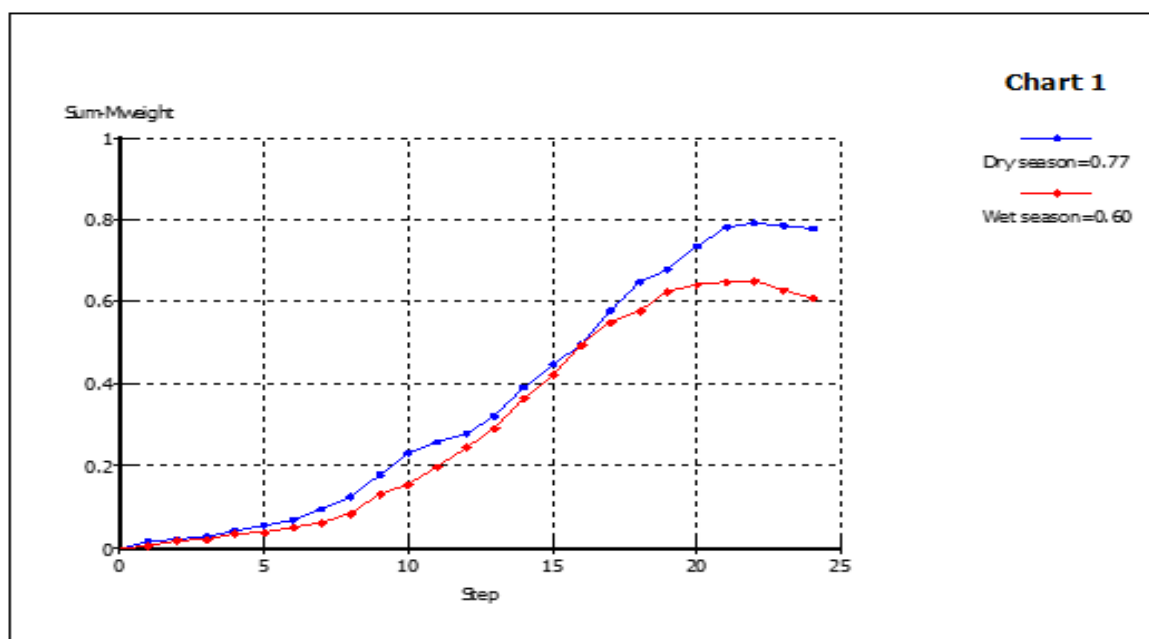
ارائه شده به وسیله آن، به عنوان بحرانی ترین سطح در نظر گرفته می شود. به طور مشابه ضریب اطمینان محاسبه شده با این جدول ۴- خلاصه نتایج آزمایشات مکانیک خاک (بر روی نمونه های دست خورده)

Table4. Summary of results of soil mechanics tests (on damaged samples)

Borehole number	Depth (m)	Unified classification	(kg/cm ³) Density		Liquid limit %LL	Plastic limit %PI	Standard Penetration Test										
			wet	dry			15 cm Penetration	15 cm First	15 cm Second	Sum 30 cm							
1	1	GC	2.01	1.84	46	24	2	3	3	6							
					47	24											
	2	CL				49	26	3	4	4	8						
						59	32										
												2	2	3	5		
												3	5	4	9		
2	1	CL			44	18	2	4	3	7							
					46	19											
	2	ML				49	20	2	4	3	7						
						44	18										
						1.69	1.48					39	14	2	3	3	6
						1.73	1.46					52	25	3	3	4	7
2.02	1.73	42	21														
3	1	CL			45	23	3	3	4	7							
					1098	1.58					42	21					
	2	CL				39	16	3	3	4	7						
						38	17										
												2	2	6	8		
5	GC				35	15	4	8	5	13							
					2.11	1.98					4	8	5	13			

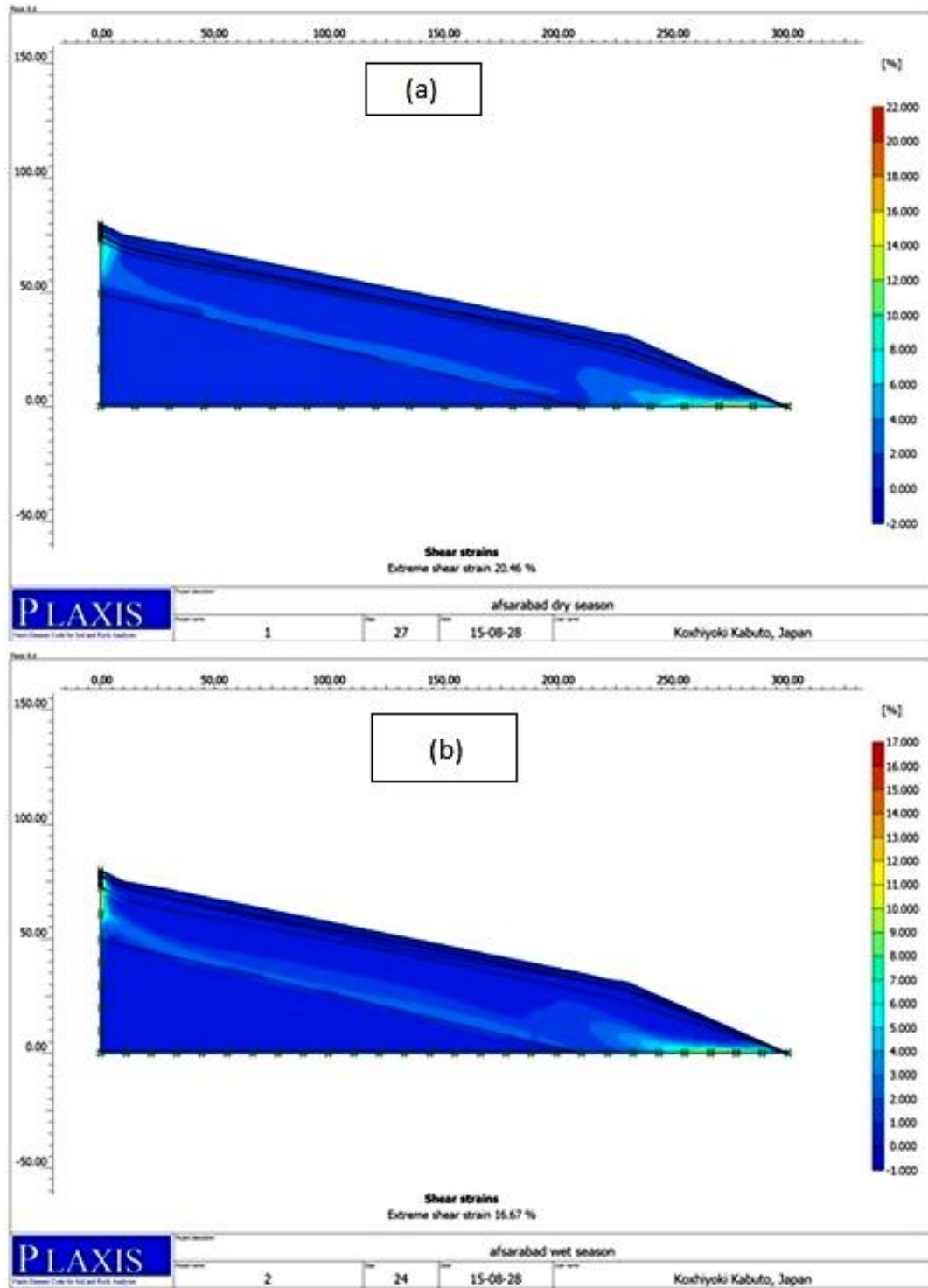
جدول ۵- پارامترهای ژئوتکنیکی مواد درگیر در لغزش افسرآباد
Table 5. Geotechnical parameters of materials involved in Afsarabad landslide

parameters	(CL) The first layer	The second layer (Gc)	The third layer (ML-MH)	The fourth layer (Marl rock)
γ_{unsat} [kN/m ³]	17	16.9	17	24.4
γ_{sat} [kN/m ³]	20.43	20.33	20.43	26.6
k_x [m/day]	0.004	0.086	0.004	0.001
k_y [m/day]	0.0004	0.009	0.0004	0.0001
E_{ref} [kN/m ²]	3458	11934.83	16800	56000
ν	0.33	0.25	0.29	0.29
c'_{ref} [kN/m ²]	13	7	24	1000
Φ' [°]	23	27	17	28
C_u [kN/m ²]	83	13	71	-
Φ_u [°]	7	24	9	-
Ψ [°]	0	0	0	0

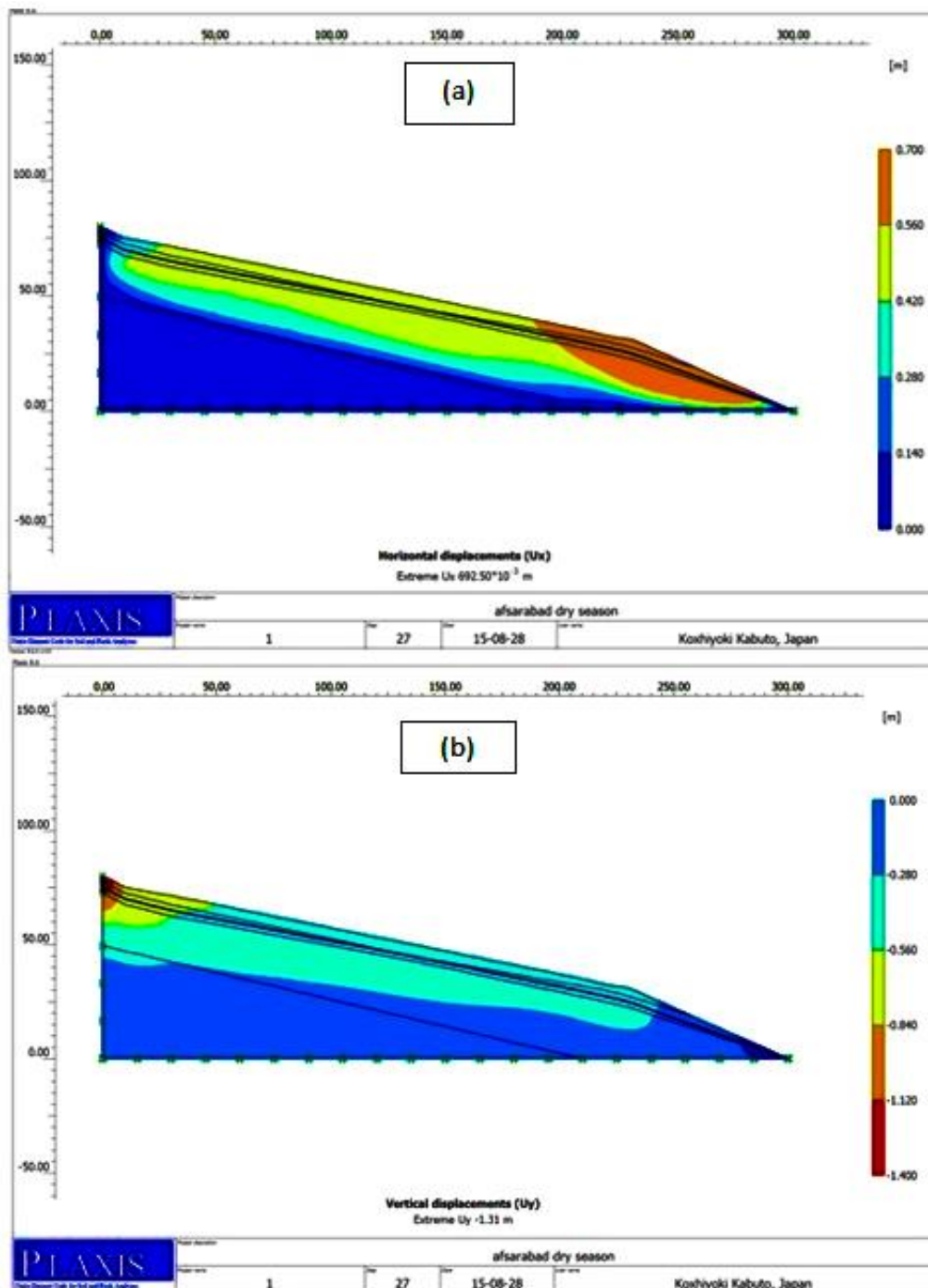


شکل ۸- ضریب اطمینان به دست آمده برای لغزش افسرآباد در فصل خشک و فصل تر با استفاده از نرم افزار Plaxis

Fig. 8. Safety factor obtained for Afsar abad landslide in dry season and wet season using software plaxis.



شکل ۹- کرنش کل محاسبه شده برای مدل لغزش افسرآباد در (a) فصل خشک و (b) فصل تر و نمایشی از سطح لغزشی آن در نرم افزار Plaxis
 Fig. 9. Calculated total strain for Afsarabad landslide model in (a) dry season and (b) wetter season and a representation of its sliding surface in Plaxis software



شکل ۱۰- (a) جابه جایی افقی محاسبه شده برای مدل لغزش افسرآباد و (b) جابه جایی قائم محاسبه شده برای مدل لغزش افسرآباد در نرم افزار Plaxis
Fig. 10. (a) Calculated horizontal displacement for the Afsarabad landslide model in Plaxis software and (b) Calculated vertical displacement for Afsarabad landslide model in Plaxis software.

احتمالی از روش ژئو الکتریک استفاده می شود. در این راستا برای تعیین جنس پیکره سنگ شناسی دامنه از آرایه اشلومبرگر

۶-۷- بررسی های ژئوالکتریک

با هدف تعیین نوسانات و تنوع سنگ شناسی دامنه تا اعماق زیاد و همچنین ترسیم سطوح گسیختگی و زمین لغزش

سرتاسر پیکره دامنه مورد بررسی، لیتولوژی بعنوان عامل تعیین کننده یا به عبارت بهتر عامل محدود کننده سطوح لغزش تلقی نمی گردد چراکه در تمام طبقات اعم از قشر فوقانی، واریزه های میانی (کلوویال) و طبقه ضخیم مارنی سطوح لغزش متعدد با فاکتورهای ایمنی متنوع شکل گرفته است (Emami et al, 2001).

۷-۷- طبقه بندی علل و روشهای پایدارسازی

به منظور تعیین و معرفی علل وقوع این لغزش در چهار چوبه ای کلاسیک و قابل دسته بندی از مدل ارائه شده توسط پوپسکو (۱۹۹۶) استفاده شده است. در این الگو عوامل وقوع ناپایداری دامنه ای به دو گروه علل زمینه ساز (Preparatory casual factors) و علل ماشه ای (Triggering casual factors) تفکیک می گردند. در شکل ۱۲ ساختار کلی این مدل و در جدول ۶ فهرست جزئی این عوامل درج شده است. بر اساس نتایج حاصل از بررسی ها و مطالعات صورت گرفته در محدوده مورد مطالعه و تحلیل پایداری لغزش افسرآباد مجموعه ای از عوامل زمینه ساز و ماشه ای شامل حضور سازندهای سست و مستعد ناپایداری هم چون مارن های گورپی، فرسایش زیر سطحی در اثر حضور و نوسانات فصلی آب های زیرزمینی، هوازدگی ناشی از انبساط و انقباض خاک های منبسط شونده با افزایش رواناب ها و نیز افزایش سطوح پیرومتریک دامنه در اثر بارش های سنگین بلند مدت و گاهاً شدت های بالای بارش کوتاه مدت، وقوع زلزله های پی در پی حدود چهار ریشتر، برش غیرمنطقی دامنه درجاده شهرکرد- مسجدسلیمان، ایجاد سیستم های زهکشی ناقص به ویژه در حاشیه این جاده و تولید لرزش های مصنوعی به ویژه در اثر عبور ماشین آلات سنگین، سبب ناپایداری دامنه شده است.

نتایج حاصل از تحلیل پایداری دامنه نشان می دهد که افزایش سطح آب زیرزمینی به دلیل بارش های سنگین و در نتیجه آن افزایش فشار آب منفذی و کاهش تنش های مؤثر سبب افزایش ناپایداری می شود. بنابراین بهترین گزینه جهت کنترل پایداری دامنه، ایجاد سیستم های زهکش در پنجه دامنه و در طول توده لغزیده و پایین بردن سطح آب زیرزمینی تا عمق ۲۰ متری از سطح دامنه و تعدیل شیب حاشیه جاده تا حد ۱۲ درجه به روش پلکانی یا تراس بندی می باشد.

و جهت تعیین عمق و شکل سطوح لغزش از آرایه دوقطبی- دوقطبی استفاده شد.

۷-۶-۱- سنگ شناسی توده لغزشی با استفاده از آرایه اشلومبرگر

بر اساس نتایج ژئوالکترونیک در آرایه اشلومبرگر، بدنه اصلی توده را مارن های ضخیم لایه (سازند گورپی) با ضخامتی حدود ۵۰ متر تشکیل داده که بخش های سطحی این مارن ها را زون های کم ضخامت واریزه های با پرکننده رسی در بر می گیرند. سطوح لغزش هم در واریزه های درشت دانه و هم در مارن ها تشکیل شده اند.

۷-۶-۲- تعیین عمق و شکل سطوح لغزش با استفاده از آرایه دوقطبی - دوقطبی

عملیات ژئوالکترونیک با تکیه بر اندازه گیری مقاومت الکتریکی مصالح موجود در دامنه و در گیر در لغزش با آرایه دوقطبی - دوقطبی در امتداد سه مسیر پیمایشی به انجام رسید. در اینجا مقطع سوم که در میانه توده لغزشی قرار داشته و سطح لغزش بر روی آن بخوبی مشخص شده ارائه گردیده است.

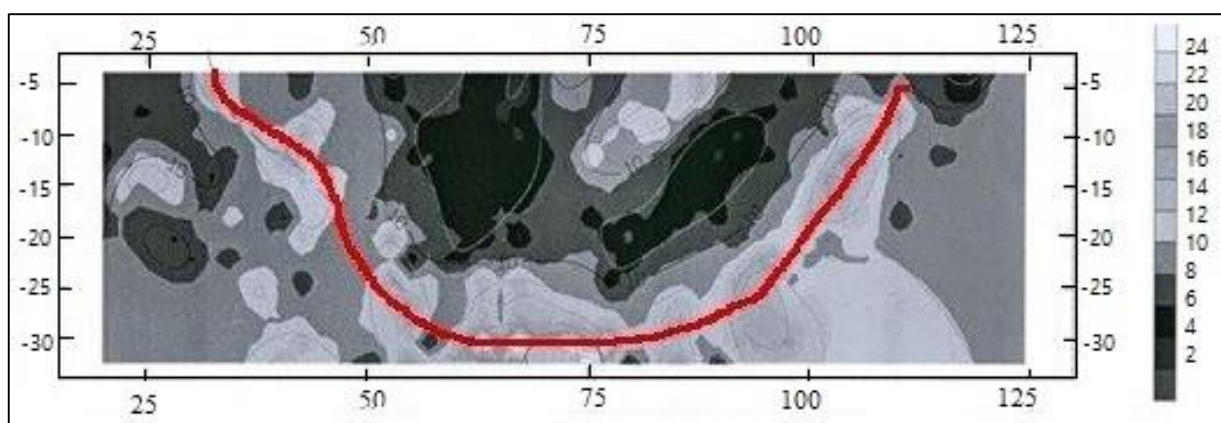
مقطع شماره ۳ - این مقطع در نزدیکی قاعده لغزش انتخاب شده است. بر اساس شکل ۱۱، در فاصله حدود ۳۵ متری از حاشیه چپ شکل به زون با مقاومت بالا وجود دارد که بار دیگر در فاصله ۱۱۰ متری حاشیه چپ شاهد و در جوار حاشیه راست تکرار می شود. همانطوریکه بر روی شکل دیده می شود بخوبی روند انحنا در این زون را تا عمق ۳۰ متری می توان مشاهده نمود. بر این اساس عمق لغزش قطعاً ۳۰ متر برآورد می گردد. در فاصله ۸۷ متر از حاشیه چپ شکل نیز یک زون با مقاومت بالا تا عمق کم دیده می شود که نشان از شکستگی های متوالی و تکرار سطوح لغزش به موازات یکدیگر دارد.

نیمرخ های ترسیم شده در روش دوقطبی-دوقطبی نشانگر آن است که لغزش رخ داده در این دامنه از نوع چرخشی (Slumping) بوده که در نزدیکی افزاز لغزش عمق آن بالغ بر ۲۰ متر بوده که در دامنه و پنجه دامنه عمق آن به حدود ۳۰ می رسد که بر این اساس می توان بطور متوسط عمق لغزش را ۲۵ متر در نظر گرفت. علاوه بر یک سطح لغزش عمومی با اعماق فوق الذکر، تعدادی سطوح گسیختگی فرعی در درازای دامنه و بموازات سطح اصلی لغزش رخ داده که حکایت از وقوع چرخش های مکرر منتهی به سطح گسیختگی اصلی در عمق متوسط ۲۵ متری دارد. با توجه به وقوع این سطوح محاسبه شده در

جدول ۶- فهرست مختصری از علل عمومی زمین لغزش

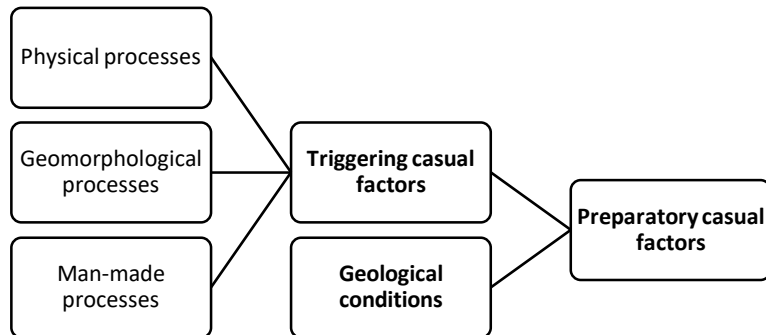
Table 6. A brief list of common causes of landslides

1. Conditions and features of the land
1) Weak plastic materials, sensitive and collapsible materials
2) weathered and cracked materials
3) Rock mass discontinuities and geological structures with opposite and different orientation
4) Differential permeability and its effects on groundwater
5) Distinct hardness and roughness (hard and dense materials on plastic materials)
2. Geomorphological processes
1) Volcanic and tectonic uplift
2 Ice expansion
3) Flood erosion, wave erosion of the tongue (claw) of the slope
4) subsurface erosion (dissolution, drainage and piping)
5) Loading on the slope
6) Destruction of vegetation (due to erosion, forest fire, drought)
3. Physical processes
1) Heavy and short-term rains and flash floods on the slope, high tides or natural dams breaking
2) Rapid melting of thick and dense snow
3) Long-term heavy rains
4) Earthquake and volcanic eruption
5) Melting and stretching of frozen soils
6) weathering caused by freezing and thawing
7) Weathering caused by expansion and contraction of expanding soils
4. Man-made processes
1) Digging the slope or its toe
2) Loading on the slope or its toe
3) Settlement and seepage from reservoirs
4) Irrigation
5) Maintaining incomplete drainage systems
6) Water seepage from services (water reservoirs, sewers, torrential rains)
7) Destruction of vegetation
8) mining and extraction (open pits or underground galleries)
9) Creating a pile of perishable waste
10) Artificial vibrations due to traffic, spark plugs, passing heavy machinery



شکل ۱۱- نیمرخ ژئوالکتریک شماره ۳ آرایه دوقطبی- دوقطبی (نزدیک پنجه لغزش). منحنی قرمز نشانگر سطح لغزش است

Fig.11. Geoelectrical profile number 3 - Dipole-dipole array (near the tip of the slip). The red curve indicates the slip surface.



شکل ۱۲- عوامل اصلی وقوع زمین لغزش
Fig.11. The main causes of landslides

مشابه با یافته‌های حاصل از کاوش‌های پرهزینه ژئوتکنیکی همراه با تحلیل نرم‌افزاری ارائه داده است که این امر نشان از کارایی شگرف روش ژئوالکتریک با آرایه دوقطبی - دوقطبی در تشخیص تنوع لیتولوژی دامنه و عمق سطوح لغزش دارد. با توجه به انطباق بسیار زیاد نتایج حاصل از بررسی‌های زمین‌شناسی سطح‌الارضی- ژئوالکتریک با زمین‌شناسی مهندسی (مبتنی بر آزمون‌های مکانیک خاک در صحرا و آزمایشگاه) بر روی واریزه‌های دامنه‌ای، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به‌ویژه ژئوالکتریک به عنوان روش‌هایی کم‌هزینه و مؤثر در مطالعات دامنه‌های نابرجا پیشنهاد می‌گردد.

۸- نتیجه گیری

براساس نتایج آزمایشات و کاوش‌های صورت گرفته، حرکت توده‌ای افسرآباد یک زمین‌لغزش چرخشی است که در پیکره مارنی در دامنه جنوبی منطقه افسرآباد اتفاق افتاده است. اولین و عمیق‌ترین سطح لغزش در عمق ۲۸ متری قرار گرفته و پس از آن نیز گسیختگی‌هایی در سطوح بالاتر (۱۰ و ۱۵ متر) به‌وقوع پیوسته است. بررسی نتایج حاصل از مطالعات چینه‌شناسی، ژئوتکنیکی و ژئوالکتریکی نشانگر انطباق و هم‌افزایی قابل ملاحظه بین یافته‌های این شیوه‌های مطالعاتی است. به‌عبارتی در فرآیند تعیین سازوکار زمین‌لغزش و به‌ویژه تشخیص شکل و عمق سطوح لغزش، استفاده از روش ژئوالکتریک نتایجی کاملاً

مراجع

- Bellanova, J., Calamita, G., Giocoli, A., Luongo, R., Macchiato, M., Perrone, A., Uhlemann, S., Piscitelli, S., 2018. Electrical resistivity imaging for the characterization of the Montaguto landslide (southern Italy). *Engineering Geology* 243, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.014>
- Berilgen, M.M., 2007. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Computers and Geotechnics* 34(2), 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.004>
- Collins, T., 2008. Debris flows caused by failure of fill slopes: Early detection, warning, and loss prevention. *Landslides* 5, 107-120. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0107-y>
- Constantin, M., Bednarik, M., Jurchescu, M., Vlaicu, M., 2011. Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental Earth Sciences* 63, 397-406. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0724-y>
- D'Amato Avanzi, G., Giannecchini, R., Puccinelli, A., 2004. The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). *Engineering Geology* 73(3), 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.005>
- Dikshit, A.; Sarkar, R.; Pradhan, B.; Segoni, S.; Alamri, A.M., 2020. Rainfall Induced Landslide Studies in Indian Himalayan Region: A Critical Review. *Applied Sciences* 10(7), 2466. <https://doi.org/10.3390/app10072466>

- Emami, N., 2010. Drainage, the most suitable method to landslides stabilization and remediation (a case study: afsar - abad landslide). 9th International Conference on Hydroinformatics 2010, School of Mechanical Engineering, Tianjin, China 13, 2022-2029. <https://docplayer.net/188308460-9th-international-conference-on-hydroinformatics-2010.html>
- Emami, N., Ghayoumian, J., Raisian, R., 2001. Final Report of Research plan Investigation of Afsar- Abad landslide, presenting suitable stabilization methods. Agriculture and Natural resources research center of chaharmahal & Bakhtiari Province, P. 172.
- Evans, S.G., Roberts, N.J., Ischuk, A., Delaney, K.B., Morozova, G.S., Tutubalina, O., 2009. Landslides triggered by the 1949 Khat earth quake, Tajikistan, and associated loss of life. *Engineering Geology* 109(3), 195-212. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.08.007>
- Guerriero, L., Ruzza, G., Maresca, R., Guadagno, F., Revellino, P., 2021. Clay landslide movement triggered by artificial vibrations: new insights from monitoring data. *Landslides* 18, 2949–2957. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01685-7>.
- Kothyari, G., Pant, P.D., Luirei, K., 2012. Landslides and neotectonic activities in the Main Boundary, Thrust (MBT) zone: Southeastern Kumaun, Uttarakhand. *Journal of the Geological Society of India* 80, 101–110. <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0123-y>.
- Singh, J., Pradhan, S.P., Singh, M., Hruaikima, L., 2022. Control of structural damage on the rock mass characteristics and its influence on the rock slope stability along National Highway-07, Garhwal Himalaya, India: an ensemble of discrete fracture network (DFN) and distinct element method (DEM). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(3), 96. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02575-5>.
- Sorbino, G., Nicotera, M.V., 2013. Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides. *Engineering Geology*, 165, 105-132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.008>.
- Tang, C., Zhu, J., Qi, X., Ding, J., 2011. Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: A case study in the Beichuan area of China. *Engineering Geology* 122(1), 22-33. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.013>
- Thakur, M., Kumar, N., Dhiman, R.K., Malik, J.N., 2023. Geological and geotechnical investigations of the Sataun landslide along the Active Sirmauri Tal Fault, Sataun, Northwestern Himalaya, India. *Landslides* 20(5), 1045-1063. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02038-2>
- Woldesenbet, T., Telila, T., Fufa Feyessa, F., 2023. Geotechnical and geological investigation of landslide in West Arsi Zone, Ethiopia. *Environmental Earth Sciences* 82, 427. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11133-5>
- Woldesenbet, T.T., Arefaine, H.B., Yesuf, M.B., 2023. Numerical stability analysis and geotechnical investigation of landslide prone area (the case of Gechi district, Western Ethiopia). *Environmental Challenges* 13, 1-14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100762>
- Kabeta, W.F., Tamiru, M., Tsige, D., Ware, H., 2023. An integrated geotechnical and geophysical investigation of landslide in Chira town, Ethiopia. *Heliyon* 9(7), 12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17620>
- Look, B. G., 2007. *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*, 2nd edition, Routledge, P. 332.
- Pasierb, B., 2015. Numerical evaluation 2D electrical resistivity tomography for investigations of subsoil. *Environment Engineering* (2), 101-112. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.15.230.4616>.
- Pasierb, B., Grodecki, M., Gwóźdź, R., 2019. Geophysical and geotechnical approach to a landslide stability assessment: a case study. *Acta Geophysica*, 67(4), 1823-1834. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00338-7>
- Popescu, M.F., 1996. From landslide causes to landslide remediation. *Proceedings of the seventh international symposium on landslides*. 17-21 June 1996. Trondheim, PP. 75-96.
- Ray, P.K.C., Parvaiz, I., Jayangondaperumal, R., Thakur, V.C., Dadhwal, V.K., Bhat, F.A., 2009. Analysis of seismicity-induced landslides due to the 8 October 2005 earthquake in Kashmir Himalaya. *Current Science* 97(12), 1742-1751. <http://www.jstor.org/stable/24107254>