

A review on the thermo-hydro-mechanical parameters changes in the mine wastes during the operational time: Investigating the influencing factors

Amirreza Pourverdi^{1, 3}, Faramarz Doulati Ardejani^{2, 3*}, Soroush Maghsoudy³

1. Master of Mine and Environment, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, pourverdi.ar1996@ut.ac.ir

2. Professor, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, fdoulati@ut.ac.ir

3. Researcher, Mine Environment and Hydrogeology Research Laboratory (MEHR Lab), University of Tehran, Tehran, Iran, s.maghsoudy@ut.ac.ir

Received: 2023/11/21 - Accepted: 2024/05/06

Abstract

Heap leaching structures and waste dumps are the most important mining structures, and paying attention to their stability issues at different stages of construction and operation is important. Investigating the thermo-hydronechanical parameters of the materials of these structures is very important to evaluate stability and geotechnical issues. Various factors affect the thermo-hydronechanical properties of materials, which can change the aforementioned properties and ultimately cause structural instability. Therefore, it is necessary to study the effect of various factors such as pH, salinity, temperature, consolidation, and precipitation (moisture) on the thermo-hydronechanical properties of materials and to investigate their behavior over time. This paper reviews some studies to investigate the effect of the mentioned factors on the thermo-hydronechanical properties of different soils. The results show that the change of some factors like pH affects the hydrodynamic properties of materials, which reduces soil strength parameters. Finally, one may conclude that by examining the hydrodynamic properties of the materials of mining structures and monitoring them over time, a favorable understanding of the behavior of the structure can be achieved, and its behavior can be predicted to some extent.

Keywords

Heap leaching, Waste dumps, Thermohydronechanical properties, Hydronechanical coupling.

* Corresponding Author



1- Introduction

Some structures used in waste management and the circular economy of mines are important. The most important structures are tailings dams, leaching heaps, and waste dumps. In this regard, attention should always be paid to certain factors before, during, and after the construction of these structures, with stability being one of the most critical considerations. Suppose safety and stability aspects are not addressed during the construction stages. In that case, these structures may experience partial or complete failure, resulting in irreparable financial and environmental damages to the mining complex and the natural and human ecosystems around it [1].

Part of these assessments and sustainability controls pertains to the post-construction phase of these structures. For example, in leaching heaps, acid leaching occurs during the extraction of mineral materials, which can affect the mechanical and hydraulic properties of the heap soil. Additionally, variations in the acid spray rate on the heap surface can lead to issues such as acid deficiency or excess in specific parts, potentially compromising the stability of the heap and causing structural changes or failure.

Waste dumps are exposed to weathering processes during certain seasons. Depending on the volume, rate, and intensity of precipitation, these dumps' hydraulic and mechanical parameters may change. Furthermore, acid mine drainage is produced in these structures due to the presence of moisture and oxygen. If waste dumps fail or collapse, severe environmental damage occurs, including soil pollution, surface water contamination, and groundwater pollution. Therefore, it is crucial to thoroughly investigate and manage certain parameters to prevent financial and environmental losses and minimize their impact. Similarly, tailings dams, which serve as repositories for processed waste, are composed of saturated particles within the silt range. Ensuring their stability is essential because failure could release a significant amount of contaminated material into the environment, leading to irreversible consequences [1].

Numerous studies have explored the impact of various parameters on soils and rocks with different compositions. Constantz investigated the temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils and concluded that in addition to viscosity, hydraulic conductivity changes with temperature [2]. Ojo and Brook investigated the effect of moisture on the mechanical properties of rock. The results revealed that a change in certain relative saturation values will result in the maximum and minimum strength of the rock [3]. Assouline et al. investigated the effect of compaction on the physical and hydraulic properties of two soils and found that the soil with larger clay particles was more compact [4]. Ghasemzadeh et al. investigated the effect of sulfuric acid on the hydromechanical properties of heap soils, and the results showed that the permeability decreased by 28% after five months and the friction angle decreased by 25% after eight months [5]. In another study, Ying et al. investigated the effect of salinity on compaction, matric suction, and stiffness of silty soil. They showed that compaction and stiffness increased with decreasing salinity and did not affect matric suction [6]. Mohammad et al. investigated the effect of mine tailings soil treatment using lime, aluminum, and fly ash type C and found that by increasing the amounts of these three materials simultaneously, compressive strength increased and hydraulic conductivity decreased [7]. Mehenni et al. investigated the effect of soil treatment on internal erosion resistance and hydromechanical properties of silty soil. They concluded that by adding cement and lime, compressive strength increased and permeability decreased [8].

In the present study, various influential factors on the thermo-hydro-mechanical properties of soil have been examined, considering the soil type relevant to the use of mining waste. The most critical parameters investigated include pH, salinity, temperature, moisture, and consolidation. This is a comprehensive review study on the effects of various environmental parameters on hydromechanical behaviors and can be effectively used to investigate the various phenomena in this field.

2- Methods

Indeed, natural phenomena often exhibit coupled behaviors. A closer examination of phenomena such as the behavior of radionuclides buried in the ground, geothermal fluid flow, CO₂ behavior after injection into the subsurface, hydrocarbon flow within the earth, magma movement from depth to the crust, and many energy-related processes reveals that various factors significantly influence the behavior of these materials and methods [9].

Investigating the coupled impact of hydraulic, mechanical, and chemical parameters is not recent. Since the early 1970s, researchers have been addressing this issue to solve complex engineering problems. In recent decades, substantial and fundamental efforts have intensified around this subject. Notably, the DECOVALEX international project, conducted in collaboration with the Earth Sciences Laboratory at the University of California, Berkeley, and KTH Royal Institute of Technology in Sweden, focuses on various aspects of coupled phenomena in Earth sciences. Over the past decade, researchers worldwide have contributed to this project, studying complex phenomena related to oil, rock mechanics, geothermal processes, hydrogeology, and environmental science. Their investigations examine the coupling of thermo-hydro-mechanical and chemical processes. Many countries have joined this initiative, initiating collaborative studies on this topic [10].

One of the most common and crucial areas where coupling plays a significant role is radioactive waste disposal. Ensuring the isolation and preventing the leakage of radioactive contamination into the environment are critical and essential aspects. Achieving highly accurate modeling of various interacting processes that impact leakage is of utmost importance. For instance, consider the disposal of atomic waste. In this context, the mechanical stability of the structure, the deformation of surrounding soil and rock, the heat generated due to radioactive materials, the subsurface heat, groundwater flow, and potential chemical reactions between radioactive materials and the containment walls all constitute coupled processes. Properly accounting for these interacting phenomena requires precise modeling and consideration of geochemical, geohydrological, geotechnical, and geological parameters. To this end, underground laboratories have been established to investigate the coupled effects of these phenomena within the DECOVALEX project. These laboratories meticulously examine parameters related to geochemistry, geohydraulics, geotechnics, and geology [10].

2-1- Theory of thermohydrromechanical and chemical coupling

Figure 1 shows the general structure and equations governing the coupling conditions. Four key thermodynamic, mechanical, hydraulic, and chemical parameters that encompass various aspects of this type of study are provided. These equations include heat transfer, mechanical deformation, fluid flow, and multi-component reactive transport. Solving these equations simultaneously leads to accurate solutions for many complex problems in earth sciences.

Initial discussions on coupling revolved around nuclear waste disposal and fluid flow modeling in fractured environments. Subsequently, topics related to fractured-porous media and weathered soils were addressed. In recent years, special attention has been given to the fractured-porous press, and discussions related to particle deformation, changes in porosity and permeability parameters, and soil and rock resistance parameters over time have emerged.

In mining environments, the formation of minerals, which leads to complex geological processes and significant variations in mineralogy, is considered based on the type of existing waste and geological context. Moreover, depending on the processing operations performed on the ore, multiple options can be regarded for coupling studies.

Various factors affect the thermo-hydro-mechanical properties of soils, each of which influences

a specific soil parameter. These factors cause the thermo-hydro-mechanical properties of soil to change under different conditions, which can sometimes have positive or negative environmental and economic implications. Therefore, before starting any study on the properties of a specific soil, it is essential to identify the variable and dependent parameters. Investigating these changes in the inference and conclusion process will be helpful. Figure. 2 shows some variables and dependent soil parameters.

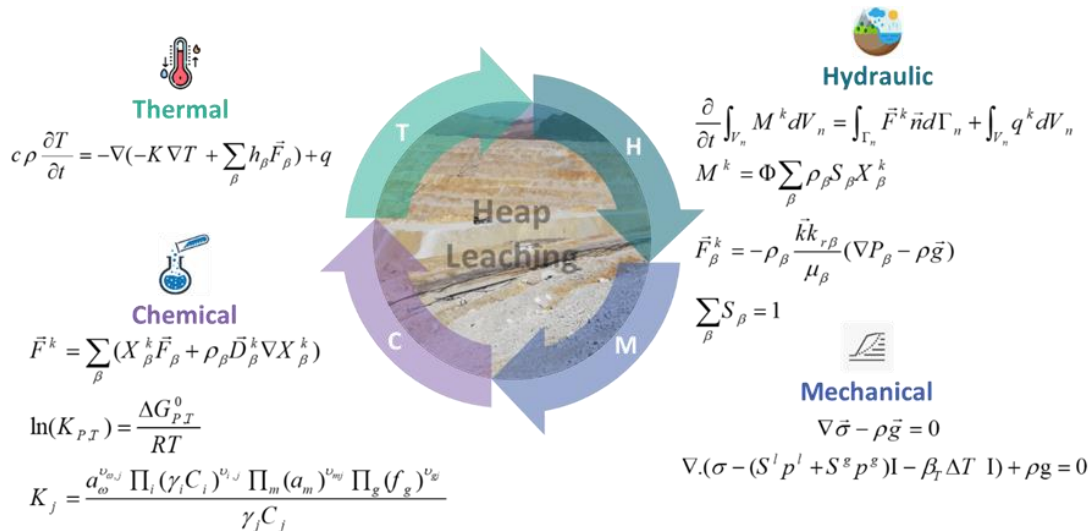


Figure 1. Mathematical structure of modeling under coupling conditions and investigating the effect of THMC parameters

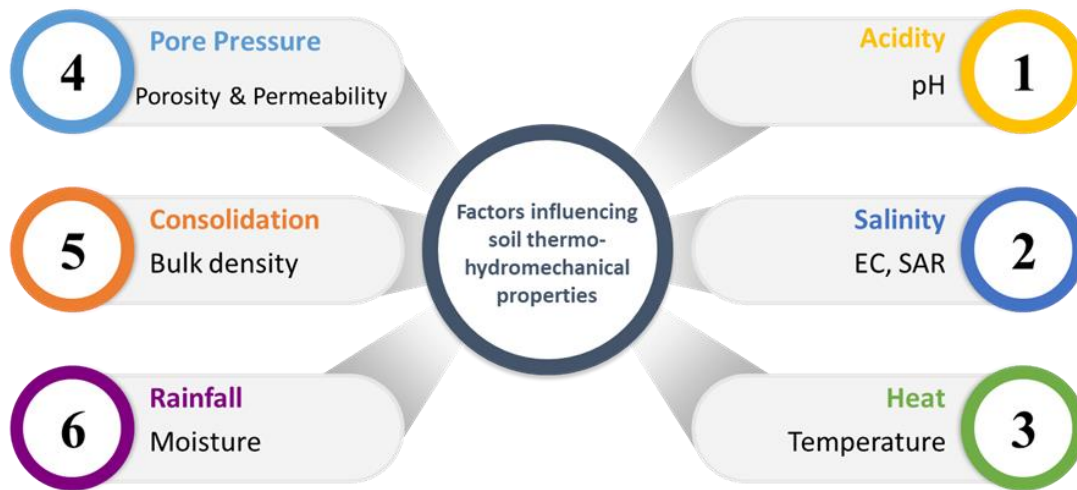


Figure 2. Parameters affecting the thermo-hydro-mechanical properties of soils

3- Findings and Argument

Numerous studies have been conducted on the effect of variable parameters on the thermo-hydro-mechanical properties of materials. Some of these studies are summarized in Table. 1.

As evident, these researchers have investigated the mutual influence of thermo-hydro-mechanical parameters on different soils, and the properties of the studied soils have been examined over time. One such study in this field was carried out by Mohamed et al., who investigated the hydro-mechanical properties of mine tailings after treatment with lime, aluminum, and type C fly ash. The laboratory test results showed that using lime, aluminum, and type C fly ash in sulfur-rich waste materials improves plasticity, efficiency, and volumetric stability. The combination of 5% lime, 10% type C fly ash, and 110 ppm aluminum resulted in a compact and monolithic structure

capable of withstanding 1000 kPa or more under uniaxial compressive strength testing. Additionally, it reduced the permeability coefficient to 1.96×10^{-6} m/s, which is lower than the value mentioned in environmental protection standards (10^{-5} m/s). Figure. 3 illustrates the impact of different treatment combinations on compressive strength. As evident, after 28 days of modification with the combination of 5% lime, 10% type C fly ash, and 110 ppm aluminum (S3L5A110F10), the tailings soil reached its highest strength [7].

Table 1. A summary of the studies conducted

Influencing parameter	Actionable parameter	Type of soil	Research Methodology	Results	References
Temperature	Permeability	Sand	Isothermal steady-state fluxes	<ul style="list-style-type: none"> - Hydraulic conductivity increases with increasing temperature and decreasing matric potential - With the increase in temperature and volumetric water content, the hydraulic conductivity increased 	[2]
Moisture	Mechanical properties	Rock	UCS	<ul style="list-style-type: none"> - The highest strength occurs in saturation less than 18%, and the lowest strength occurs in saturation greater than 45% 	[3]
Consolidation	Physical and hydraulic properties	Clay	UCS and moisture characteristic curve	Soil with higher pH and CEC and less organic matter has more consolidation, and its hydraulic conductivity is higher after applying a pressure of 1000 kPa.	[4]
Sulfuric acid	Hydromechanical properties	Heap soil	<ul style="list-style-type: none"> -Shear strength -Durability -Constant head 	<ul style="list-style-type: none"> - The permeability decreased by 28% after 5 months, and the friction angle decreased by 25% after 8 months of leaching - The cohesion value was zero in all experiments, and the internal friction angle decreased over time 	[5]
Salinity	Compaction, matric stiffness, matric potential	Silt	<ul style="list-style-type: none"> -Standard proctor compaction test -Bender element test 	<ul style="list-style-type: none"> - By reducing the salinity from 2.10 g/kg to zero, the maximum dry density and water content were optimized - Salinity does not affect matric potential - Stiffness (G_{max}) increased with increasing salinity up to 2.10 g/kg and remained almost constant after that 	[6]
High pH	Hydromechanical properties	Compacted clay	<ul style="list-style-type: none"> -Shear strength -Hydraulic conductivity 	<ul style="list-style-type: none"> - The swelling properties of the soil decreased during 18 months due to the increase in the friction angle, and the saturated conductivity increased slightly, but the unsaturated conductivity did not change 	[11]

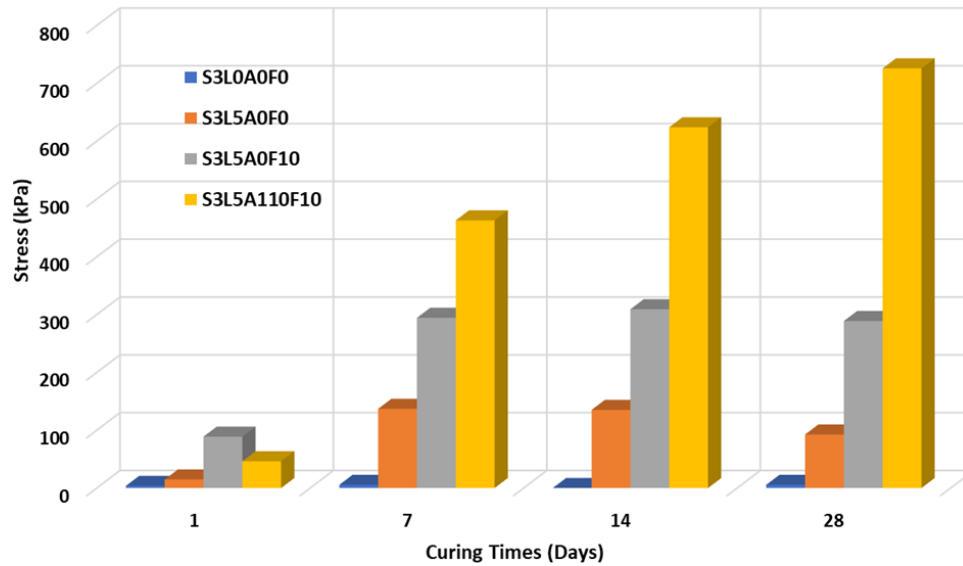


Figure 3. The effect of different combinations of lime, aluminum, and type C fly ash on compressive strength in 28 days (S sampling site, L lime, A aluminum, and F type C fly ash) (Modified after [7])

Mehenni et al. investigated the impact of soil treatment on internal erosion and hydro-mechanical properties of silty soil. The silty soil was treated using bentonite, lime, and cement. Before the treatment, the soil had a compressive strength of 142 kPa and a hydraulic conductivity of 6×10^{-9} m/s. The low hydraulic conductivity was due to the high percentage (99.2%) of fine particles (below 80 microns) and initial consolidation. Treatment with clay minerals (bentonite and kaolinite) did not significantly affect the compressive strength. Still, it reduced the hydraulic conductivity (Table. 2). Figure. 4 illustrates the effect of silty soil treatment with lime and cement. As observed, the compressive strength of the soil increased significantly over time, reaching over 1500 kPa after 90 days with a 6% increase in strength [8].

Table 2. Impact of treatment on hydraulic conductivity

Treatment method	Hydraulic conductivity (m/s)
Untreated silt	6.0×10^{-9}
+2 % kaolinite	2.3×10^{-9}
+5 % kaolinite	1.3×10^{-9}
+9 % kaolinite	7.3×10^{-10}
+2 % bentonite	2.2×10^{-10}
+5 % bentonite	5.1×10^{-11}
+2 % bentonite	2.6×10^{-11}
+1 % lime (90 days)	9.0×10^{-9}
+3 % lime (90 days)	9.7×10^{-10}
+3 % cement (90 days)	1.9×10^{-9}
+6 % cement (90 days)	7.3×10^{-10}

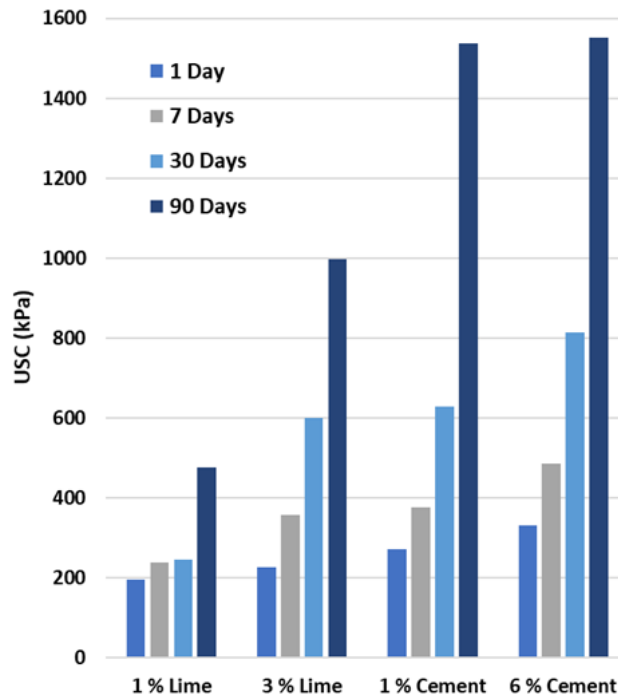


Figure 4. Effect of lime and cement treatment on the UCS of the silty soil (Modified after [8])

4- Conclusions

As seen in previous sections, numerous studies have been conducted regarding the thermo-hydro-mechanical properties of materials, and various parameters have influenced these properties. In some studies, it was observed that the effect of certain similar parameters on thermo-hydro-mechanical properties is not constant and varies, which could be related to factors such as soil type, the duration of the impact of the parameters, etc. Therefore, it can be concluded that each problem and experiment has unique conditions, and investigations and experiments should be conducted with precision to obtain accurate results. It is recommended that appropriate tools and tests be used during experiments and that the effects of different parameters on thermo-hydro-mechanical properties be carefully evaluated over time.

The interaction of thermal, hydraulic, mechanical, and chemical factors is possible in mining structures, such as mine pits, heap leach pads, waste dumps, and tailings dams. In mine pits, the interaction between the rock structure and the pore fluid is significant, and the impact of the fluid on the mechanical structure of the pit (or vice versa) should be studied. Also, salinity is an issue in some mines, and the pore fluid may have very high electrical conductivity (EC). This can affect both the mechanical structure and the fluid's behavior in the pit's fractured-porous environment, making coupled and combined studies highly important.

Due to their reactions with acidic solutions or other leaching fluids, heap leach structures require coupled studies and simultaneous examination of parameters. Adding leaching solutions can change mechanical properties (such as cohesion, friction angle, compressive strength, etc.) and alter the fluid flow behavior within the heap. Furthermore, chemical reactions and heat generation in heap leach structures can cause other parameters (hydraulic and mechanical) to change differently, which ultimately has economic and environmental implications.

Another relevant structure is a waste dump. Due to the materials contained within the waste dumps and their interaction with water, waste dumps can produce acid mine drainage, resulting in pH reduction within the dump structure. As previously discussed, these changes can affect various soil properties. Similarly, tailings dams exhibit similar processes, and the effect of fluids in these

structures should be seriously investigated. The geochemical structure and hydraulic behavior of the fluid in tailings dams are of utmost importance. They can change the poromechanical structure, potentially causing geotechnical and hydrogeological environmental issues.

In conclusion, negative and disproportionate effects can occur considering the soil-rock structure of mining structures and the various factors mentioned in this study. Therefore, comprehensive coupled studies and simultaneous examination of parameters and processes in these structures should be prioritized. Variables such as salinity, acidity, chemical reactions, etc., significantly influence the thermo-hydro-mechanical and chemical aspects, potentially affecting long-term operational efficiency and leaving irreversible damage in their wake.

References

1. R. W. Sarsby, *Environmental geotechnics*. Thomas Telford, 2000.
2. J. Constantz, "Temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils," Wiley Online Library, 1982.
3. O. Ojo and N. Brook, "The effect of moisture on some mechanical properties of rock," *Min. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 145–156, 1990.
4. S. Assouline, D. Tessier, and J. Tavares-Filho, "Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experimental results and modeling," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 61, no. 2, pp. 390–398, 1997.
5. H. Ghasemzadeh, M. S. Pasand, and M. M. M. Shamsi, "Experimental study of sulfuric acid effects on hydro-mechanical properties of oxide copper heap soils," *Miner. Eng.*, vol. 117, pp. 100–107, 2018.
6. Z. Ying, Y.-J. Cui, N. Benahmed, and M. Duc, "Salinity effect on the compaction behavior, matric suction, stiffness and microstructure of a silty soil," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 855–863, 2021.
7. A. Mohamed, M. Hossein, and F. Hassani, "Hydro-mechanical evaluation of stabilized mine tailings," *Environ. Geol.*, vol. 41, no. 7, pp. 749–759, 2002.
8. A. Mehenni, O. Cuisinier, F. Masrouri, and E. Lavallée, *Impact of soil treatment on internal erosion resistance and hydromechanical characteristics of a silty soil*. 2016.
9. O. Kolditz, H. Shao, W. Wang, and S. Bauer, "Thermo-hydro-mechanical chemical processes in fractured porous media: modeling and benchmarking," vol. 25. Springer, 2016.
10. O. Kolditz et al., "OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media," *Environ. Earth Sci.*, vol. 67, no. 2, pp. 589–599, 2012.
11. O. Cuisinier, D. Deneele, F. Masrouri, A. Abdallah, and N. Conil, "Impact of high-pH fluid circulation on long-term hydromechanical behavior and microstructure of compacted clay



مقاله پژوهشی

مروری بر تغییرات پارامترهای ترموهیدرومکانیکی باطله‌های معدنی در طول زمان
بهره‌برداری و بررسی عوامل تاثیرگذار

امیررضا پوروردی^۱، فرامرز دولتی ارده‌جانی^{۲*}، سروش مقصودی^۳

۱. کارشناس ارشد معدن و محیط زیست، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،
pourverdi.ar1996@ut.ac.ir
۲. استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،
fdoulati@ut.ac.ir
۳. پژوهشگر، آزمایشگاه تحقیقاتی MEHR، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،
s.maghsoudy@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷

چکیده

از مهم‌ترین سازه‌های معدنی می‌توان به توده‌های فروشویی و انباشتگاه‌های باطله اشاره کرد که همواره باید به مسایل پایداری آن‌ها در مراحل مختلف ساخت و ساز و بهره‌برداری توجه شود. بررسی پارامترهای ترموهیدرومکانیکی مواد این سازه‌ها برای ارزیابی مسایل پایداری و ژئوتکنیکی بسیار مهم است. عوامل مختلفی بر خواص ترموهیدرومکانیکی مواد تاثیرگذارند که تغییر در آن‌ها موجب تغییر در خواص ترموهیدرومکانیکی مواد در نهایت باعث ناپایداری سازه می‌شود. به همین دلیل نیاز است مطالعاتی در مورد تاثیر عوامل مختلف مانند pH، شوری، دما، تحکیم و بارش (رطوبت) بر خواص ترموهیدرومکانیکی مواد انجام و رفتار آن‌ها در طول زمان بررسی شود. در این مقاله به چند مورد از مطالعاتی که در رابطه با تاثیر پارامترهای مختلف (pH، شوری، دما، تحکیم و بارش) بر خواص ترموهیدرومکانیکی خاک‌های مختلف انجام شده است، پرداخته می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تغییر در مقادیر برخی از عوامل مانند pH موجب تاثیرپذیری برخی از پارامترهای هیدرودینامیکی می‌شود که ممکن است این موضوع منتج به کاهش برخی از پارامترهای مقاومتی خاک شود. با بررسی خواص هیدرودینامیکی مواد سازه‌های معدنی و پایش آن‌ها در طول زمان می‌توان به درک مطلوبی از رفتار سازه رسید و همچنین رفتار آن را تا حدودی پیش‌بینی کرد.

کلمات کلیدی

توده فروشویی، انباشتگاه باطله، خواص ترموهیدرومکانیکی، کوپلینگ هیدرومکانیکی.

۱- مقدمه

زیادی از مواد آلوده به درون محیط زیست راه پیدا کند و خسارات جبران‌ناپذیری در پی داشته باشد. دیواره‌های معدن نیز به مرور زمان در اثر هوازدگی و بارش‌های جوی دچار فرسایش و در نتیجه کاهش پارامترهای مقاومتی می‌شوند، به همین دلیل بررسی خواص سنگ و تاثیرپذیری آن تحت شرایط و عوامل مختلف بسیار مهم است [۱].

مطالعات متعددی از تاثیر پارامترهای مختلف بر روی خاک‌ها و سنگ‌ها با ترکیبات گوناگون انجام شده است. اوجو و بروک تاثیر رطوبت را بر روی ویژگی‌های مکانیکی سنگ مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد تغییر در مقادیر خاصی از اشباع نسبی، مقاومت بیشینه و کمینه سنگ را در پی دارد [۲]. کنستانتز و ابستنگی دمایی هدایت هیدرولیکی غیراشباع دو خاک را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که علاوه بر گرانی، پارامتر هدایت هیدرولیکی با دما تغییر می‌کند [۳]. پوما طی یک پژوهش ویژگی‌های هیدرومکانیکی مواد دانه‌ای شکل از باطله مواد معدنی مربوط به مس را مورد ارزیابی قرار داد و دریافت که تغییر در نفوذپذیری مواد تاثیری بر زمان اشباع ندارد [۴]. یینگ و همکاران اثر شوری را بر حد روانی خاک سیلتی و بنتونیت مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که با افزایش شوری در بنتونیت، حد روانی و تنش تسلیم در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته و در خاک سیلتی این افزایش اندک بوده است [۵]. یینگ و همکاران در مطالعه دیگری اثر شوری بر تحکیم، پتانسیل آب و سفتی خاک سیلتی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که با کاهش شوری تحکیم و سفتی افزایش پیدا کرده و بر پتانسیل آب تاثیری نداشته است [۶]. اسولین و همکاران تاثیر تحکیم را بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی دو خاک مورد بررسی قرار دادند و دریافتند خاکی که اندازه ذرات رس آن به نسبت بزرگتر بود بیشتر تحت تحکیم قرار گرفت [۷]. از دیگر مطالعاتی که در رابطه با مساله شوری وجود دارد می‌توان به مطالعه صمیم‌نیا و همکاران (۱۳۹۹) اشاره کرد که تاثیر شوری آب منفذی را بر مقاومت تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک‌های رسی مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که افزایش سدیم کلرید باعث کاهش ویژگی‌های مقاومتی خاک می‌شود [۲۶]. قاسم‌زاده و همکاران اثر اسید سولفوریک بر خواص هیدرومکانیکی خاک توده را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که نفوذپذیری بعد از ۵ ماه حدود ۲۸ درصد و زاویه اصطکاک بعد از ۸ ماه حدود ۲۵ درصد کاهش یافته است [۸]. خداپنده و همکاران (۱۳۹۸) تاثیر

برخی از سازه‌های مورد استفاده در مدیریت باطله و اقتصاد چرخشی معادن اهمیت بسیار زیادی دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به سدهای باطله (تیلینگ‌ها)، توده‌های فروشویی و انباشتگاه‌های باطله اشاره کرد. در همین راستا همیشه باید سعی شود که قبل، حین و بعد از احداث این سازه‌ها به برخی از نکات توجه شود که از جمله مهم‌ترین این نکات پایداری این سازه‌ها است. اگر در مراحل ساخت این سازه‌ها به نکات ایمنی و پایداری توجه نشود ممکن است که دچار شکست و خرابی، به صورت جزئی و کلی شوند که این امر خسارات مالی و زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری را برای مجموعه معدنی و زیست‌بوم طبیعی و انسانی اطراف، به دنبال دارد [۱].

بخشی از این بررسی‌ها، توجهات و کنترل پایداری این سازه‌ها به بعد از ساخت و احداث آن‌ها مربوط می‌شود. برای مثال در فروشویی توده‌ای به دلیل اسیدشویی که جهت استحصال مواد معدنی رخ می‌دهد، ممکن است خواص مکانیکی و هیدرولیکی خاک توده را متاثر کند و یا کم و زیاد شدن نرخ شدت جریان پاشش اسید بر روی سطح توده، مشکلاتی مانند کمبود و یا ازدیاد اسید در بخش‌هایی از توده به وجود آورد که این ناهماهنگی و عدم تعادل ممکن است بر روی پایداری توده تاثیرات منفی بگذارد و موجب دگرگونی و ریزش سازه شود.

در انباشتگاه‌های باطله نیز در فصول بارانی سال تحت بارش‌های جوی قرار می‌گیرند و با توجه به حجم، آهنگ و شدت بارش این امکان وجود دارد که پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی آن‌ها تغییر کنند و در ادامه به دلیل وجود آب و اکسیژن، زهاب اسیدی معدن تولید می‌شود و با خرابی و شکست این سازه‌ها خسارات شدید زیست‌محیطی به وجود می‌آید که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به آلودگی خاک‌ها، آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی اشاره کرد. پس همواره باید تاثیر برخی از پارامترها را به طور جدی بر خاک توده‌های فروشویی و انباشتگاه‌های باطله مورد بررسی قرار داد تا بتوان از به وجود آمدن خسارات مالی و زیست‌محیطی جلوگیری به عمل آورد و یا آن‌ها را به حداقل رساند. همچنین سدهای باطله که محل انباشت باطله‌های فراوری‌اند از ذرات اشباع شده در حد سیلت تشکیل شده‌اند و مساله پایداری آن‌ها بسیار مهم است زیرا در صورت شکست و خرابی ممکن است مقدار بسیار

های هیدرولیکی و مکانیکی خاک مورد بررسی قرار گرفته و با در نظر گرفتن جنس خاک مورد بررسی تلاش شده است که این موضوع برای باطله‌های معدنی مورد استفاده قرار گیرد. مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه عبارت از pH، شوری، دما، رطوبت و تحکیم است که اثر هر کدام بر برخی از خواص هیدرومکانیکی خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه مروری جامع بر اثرات پارامترهای مختلف زیست‌محیطی بر رفتارهای هیدرومکانیکی است و می‌تواند در بررسی‌های این حوزه مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش‌شناسی

اغلب پدیده‌ها در طبیعت ماهیت توامان دارند. بررسی دقیق‌تر بر روی پدیده‌هایی مانند رفتار مواد رادیواکتیو دفن شده در زمین، جریان سیالات ژئوترمال، رفتار و تجزیه گاز CO₂ پس از تزریق به درون زمین، جریان مواد هیدروکربوری درون زمین، حرکت ماگما از عمق به سمت پوسته و بسیاری از پدیده‌های مرتبط با حوزه انرژی نشان می‌دهد که پدیده‌های مختلفی بر روی رفتار این مواد و فرآیندها تاثیرگذارند [۱۷].

بررسی تاثیر توامان پارامترهای هیدرولیکی مکانیکی و شیمیایی موثر بر انتقال از اوایل دهه ۱۹۷۰ مطرح بوده است اما تلاش‌های جدی و اساسی پیرامون این موضوع از دو دهه پیش آغاز شده و در سال‌های اخیر شدت یافته است. در مهم‌ترین این تلاش‌ها با همکاری آزمایشگاه زمین‌شناسی برکلی و دانشگاه KTH سوئد، پروژه‌ای بین‌المللی با عنوان DECOVALEX تعریف شده است که بر روی جنبه‌های مختلف پدیده کوپلینگ در علوم زمین به پژوهش می‌پردازد. در راستای پروژه DECOVALEX، محققان بسیاری از سرتاسر جهان در یک دهه اخیر برای مطالعه پدیده‌های پیچیده مرتبط با زمین، در شاخه‌هایی مانند نفت، مکانیک سنگ، ژئوترمال، هیدروژئولوژی و محیط زیست بر روی موضوع کوپلینگ ترموهیدرومکانیکی و شیمیایی کار کرده‌اند و بسیاری از کشورها نیز به این پروژه پیوسته‌اند و مطالعات مشترکی را پیرامون این موضوع آغاز کردند [۱۸].

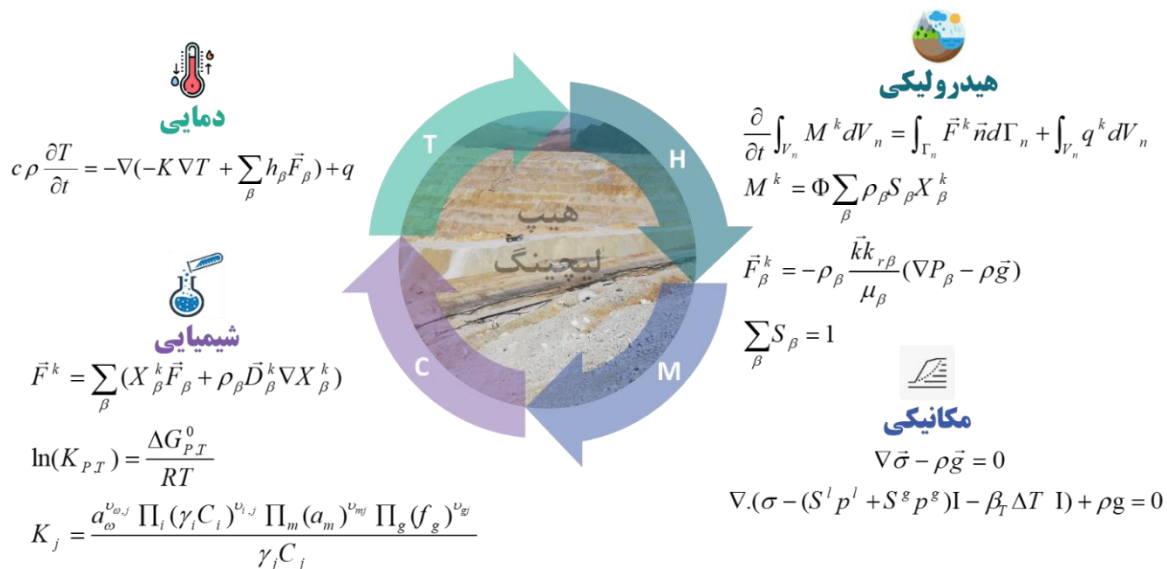
از موارد پرکاربرد و جرقه‌های اولیه مباحث کوپلینگ می‌توان به موضوع دفن زباله‌های اتمی اشاره کرد. در موضوع زباله‌های اتمی، ایزوله ماندن و عدم نشست آلودگی اتمی به محیط زیست، مساله‌ای حیاتی و بسیار مهم بوده است و مدل‌سازی بسیار دقیق فرآیندهای مختلف تاثیرگذار بر نشست

pH شیرابه را بر میزان فروریزش و ویژگی‌های مقاومت برشی خاک‌های رمنده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شیرابه‌ها با pH پایین باعث افزایش رمنندگی خاک می‌شود و چسبندگی آن را افزایش و زاویه اصطکاک را کاهش می‌دهد و شیرابه‌ها با pH بالا رمنندگی کمتری را موجب می‌شوند و افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک را به همراه دارد [۲۷]. کوپلینگ و همکاران تاثیر pH بالا را بر روی رفتار هیدرومکانیکی خاک رس فشرده در دراز مدت مورد بررسی قرار دادند و مشاهده شد که نفوذپذیری اشباع با قلیایی‌تر شدن محلول افزایش می‌یابد و نفوذپذیری غیراشباع تغییری نمی‌کند [۹]. یو و همکاران تاثیر دما را بر روی رفتار هیدرومکانیکی بوم رسی (رس با خاصیت پلاستیک بالا) مورد پژوهش قرار دادند و دریافتند که با افزایش دما مقاومت برشی کاهش پیدا می‌کند [۱۰]. فاورو و لالویی تاثیر تزریق CO₂ را بر رفتار هیدرومکانیکی Caprock مورد بررسی قرار دادند و متوجه شدند که با تزریق CO₂ هیچ‌گونه تغییری در خواص هیدرومکانیکی نمونه حاصل نشده است [۱۱]. ماتسوموتو و همکاران تاثیر تغییرات pH را بر ویژگی‌های فیزیکی خاک برای بررسی فرسایش، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و نتیجه گرفتند که با کاهش حد روانی خاک، فرسایش بیشتر رخ می‌دهد [۱۲]. عابدی کوپایی و همکاران تاثیر pH آب منفذی را بر روی ویژگی‌های مکانیکی خاک رس کائولینیت بررسی کردند و نشان دادند که مقاومت فشاری، پارامترهای مقاومت برشی و حد روانی خاک به طور قابل‌توجهی با افزایش pH و کاهش pH، افزایش یافتند [۱۳]. اسپاگنولی و همکاران تاثیر مقادیر مختلف pH را بر مقاومت برشی زهکش نشده خاک رس کائولینیت مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش و کاهش مقدار pH، مقاومت برشی زهکش نشده به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافت [۱۴]. محمد و همکاران اثر اصلاح خاک باطله معدنی را با استفاده از آهک، آلومینیوم و خاکستر زغال نوع C مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که با افزایش مقادیر این سه اصلاح‌کننده، به طور همزمان، مقاومت فشاری افزایش و هدایت هیدرولیکی کاهش یافته است [۱۵]. مهنی و همکاران تاثیر اصلاح خاک بر روی مقاومت فرسایشی داخلی و ویژگی‌های هیدرومکانیکی خاک سیلتی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که با اضافه کردن سیمان و آهک، مقاومت فشاری افزایش و نفوذپذیری کاهش یافته است [۱۶].

در پژوهش حاضر اثر عوامل مختلف تاثیرگذار بر ویژگی-

۲-۱- تئوری کوپلینگ ترموهیدرومکانیکی و شیمیایی

در شکل ۱ ساختار کلی و روابط حاکم بر شرایط کوپلینگ تشریح شده است و چهار پارامتر کلیدی ترمودینامیکی، مکانیکی، هیدرولیکی و شیمیایی که وجوه مختلف این نوع مطالعات را شامل می‌شوند، آورده شده که روابط انتقال حرارت، تغییر شکل مکانیکی، جریان سیال و انتقال چند مولفه‌ای و واکنشی از جمله روابطی است که باید به طور همزمان در این مدل مورد بررسی قرار گیرد و حاصل حل توامان این روابط، جوابی با دقت بالا برای بسیاری از مسایل پیچیده در حوزه علوم زمین است [۱۸].



شکل ۱- ساختار ریاضی مدل سازی تحت شرایط کوپلینگ و بررسی تاثیر توامان پارامترهای THMC

انجام گرفته بر روی کانسنگ، می‌توان گزینه‌های متعددی را به منظور مطالعات کوپلینگ مدنظر قرار داد [۲۵].

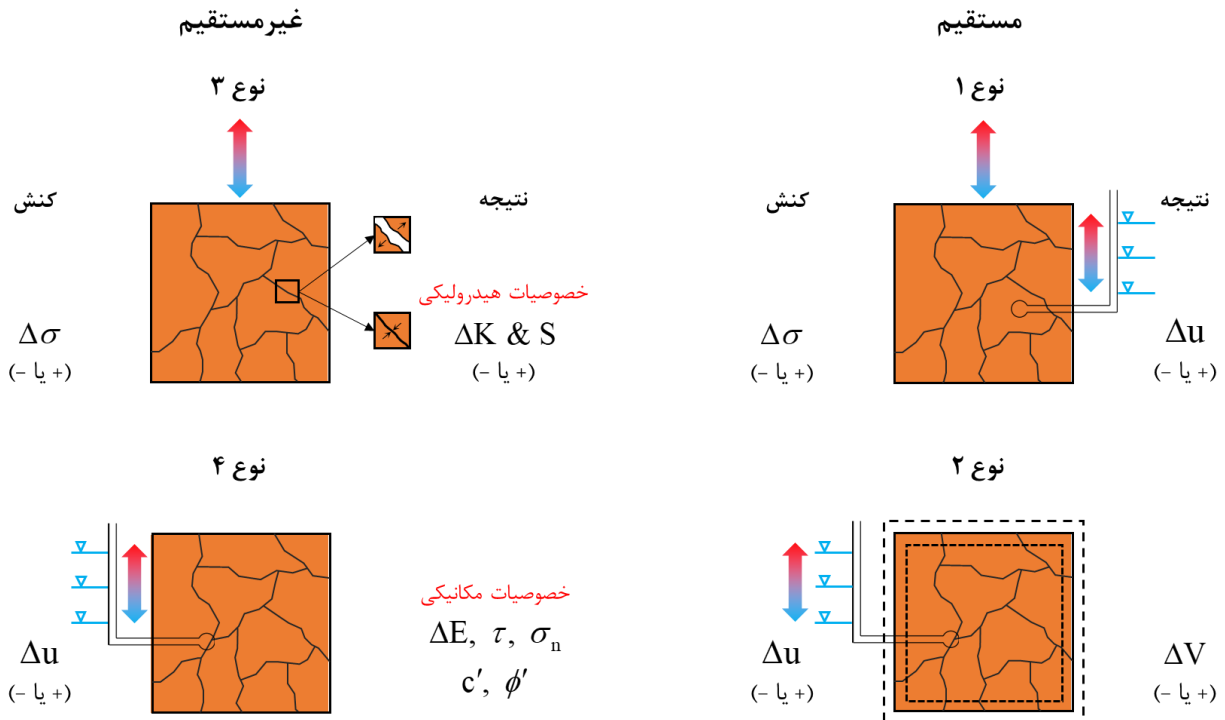
۲-۲- کوپلینگ هیدرومکانیکی و سازه‌های معدنی

راتوست و استفانسون (۲۰۰۳) و وانگ (۲۰۰۰) دو نوع کوپلینگ هیدرومکانیکی مستقیم و غیرمستقیم را مشخص کردند. کوپلینگ مستقیم در خلال تعاملات تغییر شکل و سیال منفذی رخ می‌دهد. کوپلینگ غیرمستقیم در جایی اتفاق می‌افتد که فرآیندهای هیدرولیکی و مکانیکی، در خلال تغییرات ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی، بر روی یکدیگر تاثیر می‌گذارند. چهار نوع کوپلینگ هیدرومکانیکی در شکل ۲ نشان داده شده است.

آلودگی، اهمیت بالایی دارد. بدین منظور پایداری مکانیکی سازه، تغییر شکل ذرات خاک و سنگ اطراف محل دفن، تاثیرات حرارت تولید شده در اثر مواد رادیواکتیو و همچنین حرارت موجود در عمق زمین در محل دفن، جریان آب زیرزمینی و همچنین واکنش‌های شیمیایی مواد رادیواکتیو با دیواره محل دفن و واکنش احتمالی پس از نشست، از جمله فرآیندهای توامانی است که باید به دقت مورد توجه قرار گیرد و در مطالعات و مدل‌سازی‌ها لحاظ شود. به این منظور آزمایشگاه‌های زیرزمینی برای بررسی تاثیر توامان این پدیده‌ها در جریان پروژه DECOVALEX احداث شده و پارامترهای ژئوشیمیایی، ژئوهیدرولیکی، ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۸].

علاوه بر دفن زباله‌های اتمی، مباحث اولیه کوپلینگ، حول مدل‌سازی جریان سیال در محیط‌های شکسته شکل گرفت و پس از آن مباحث مربوط به محیط‌های سنگی خردشده و همین‌طور خاک‌های دست‌خورده مطرح شد. در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به محیط‌های شکسته-متخلخل معطوف شده است و مباحث مربوط به تغییر شکل ذرات محیط و تغییر پارامترهای تخلخل و تراوایی و پارامترهای مقاومتی خاک و سنگ در طول زمان مطرح شده است [۲۴].

در محیط‌های معدنی با توجه به نوع و پسماندهای موجود و لحاظ محیط زمین‌شناسی تشکیل ماده معدنی که باعث وجود فرآیندهای پیچیده زمین‌شناسی و تغییرات بسیار زیاد در کانی‌شناسی محیط می‌شود و همچنین نوع عملیات فرآوری



شکل ۲- شماتیکی از کویلینگ مستقیم و غیرمستقیم هیدرومکانیکی. که در آن $\Delta\sigma$ مبین تغییر فشار، Δu تغییر در فشار منفذی، ΔV تغییر در حجم، K هدایت هیدرولیکی، S ضریب ذخیره، E مدول الاستیسیته، τ مقاومت برشی، σ_n مقاومت نرمال، c' چسبندگی و ϕ زاویه اصطکاک است (اقتباس شده از [۲۱])

تحت تاثیر قرار می‌دهند (شکل ۳) و موجب می‌شوند که ویژگی‌های هیدرومکانیکی خاک در شرایط مختلف تغییر کند که گاه این تغییرات می‌تواند از دیدگاه زیست‌محیطی و ژئوتکنیکی مثبت و یا منفی باشد. بنابراین قبل از شروع هرگونه مطالعه در مورد ویژگی‌های خاک مورد نظر باید پارامترهای متغیر و وابسته را مشخص کرد؛ زیرا با تغییر در پارامترهای متغیر، پارامترهای وابسته خاک دچار تغییر می‌شوند که بررسی این تغییرات در روند استنباط و نتیجه‌گیری کمک‌کننده است. در شکل ۴ برخی از پارامترهای متغیر و وابسته خاک نشان داده شده است.

۴- بررسی اثر متقابل پارامترهای ترموهیدرومکانیکی در طول زمان

مطالعات متعددی در رابطه با تاثیر پارامترهای متغیر بر خواص ترموهیدرومکانیکی مواد انجام شده است که بعضی از آن‌ها به طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. در بخش‌های بعدی نتایج برخی از این مطالعات مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

کویلینگ مستقیم شامل دو مورد زیر است:

- کویلینگ جامد- سیال، وقتی تغییر در تنش موجب تغییر در فشار منفذی سیال می‌شود (نوع ۱).
- کویلینگ سیال- جامد، وقتی تغییر در فشار سیال منفذی موجب تغییر در حجم توده سنگ می‌شود (نوع ۲).

این دو مورد عمدتاً مربوط به تغییر حجم منفذند که همچنین تغییر در ویژگی‌های مکانیکی را باعث می‌شود.

کویلینگ غیرمستقیم شامل دو مورد زیر است:

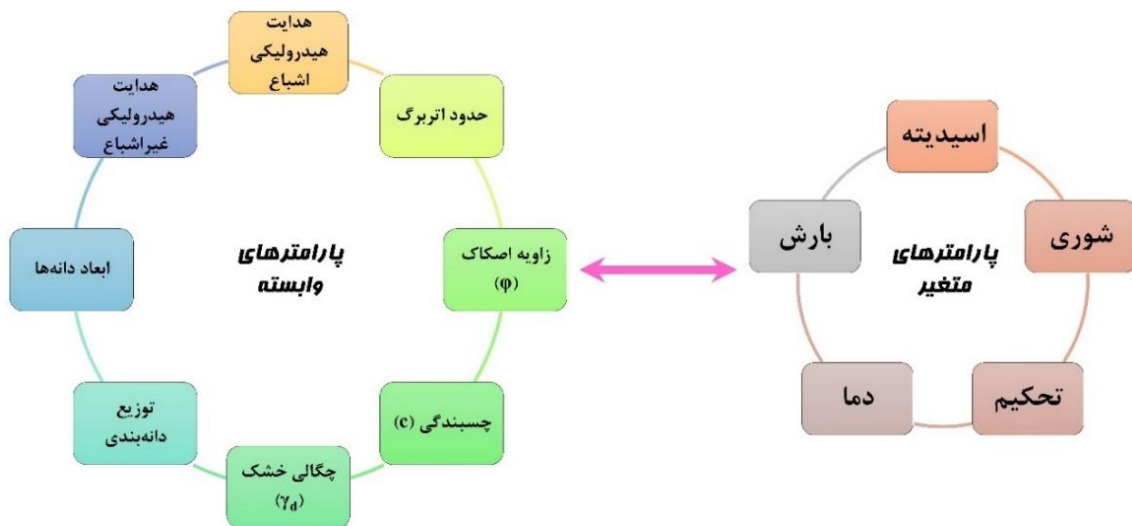
- کویلینگ جامد- سیال، وقتی که تغییر در تنش موجب تغییر در ویژگی‌های هیدرولیکی توده سنگ می‌شود (نوع ۳).
- کویلینگ سیال- جامد، وقتی که تغییر در فشار سیال منفذی موجب تغییر در ویژگی‌های مکانیکی توده سنگ می‌شود (نوع ۴) [۱۹ و ۲۰].

۳- معرفی عوامل اثرگذار بر خواص ترموهیدرومکانیکی مواد

عوامل متعددی بر روی خواص هیدرومکانیکی خاک‌ها تاثیرگذارند که هر کدام از این عوامل پارامتر مشخصی از خاک را



شکل ۳- پارامترهای اثرگذار بر خواص هیدرومکانیکی خاک‌ها



شکل ۴- پارامترهای متغیر و وابسته خاک که با تغییرات در پارامترهای متغیر، تغییراتی در پارامترهای وابسته خاک ایجاد می‌شود

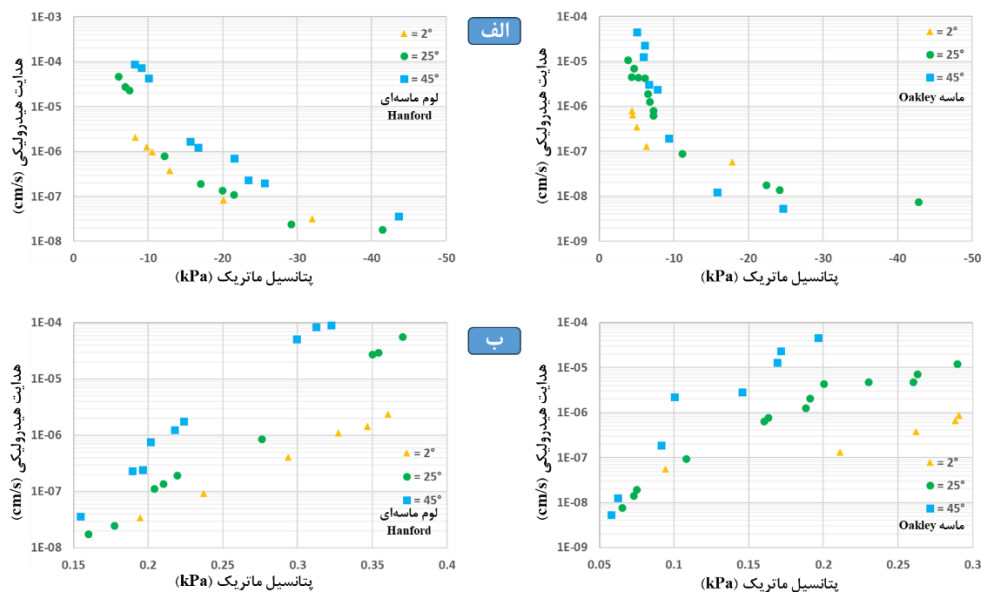
ب هدایت هیدرولیکی بر حسب آب محتوی حجمی رسم شده است. با توجه به شکل ۵- الف می‌توان دریافت که با کاهش پتانسیل ماتریک و افزایش دما هدایت هیدرولیکی افزایش پیدا کرده است و این افزایش برای خاک Oakley بیشتر است. از شکل ۵- ب هم می‌توان فهمید که با افزایش آب محتوی حجمی و افزایش دما، هدایت هیدرولیکی افزایش پیدا کرده است و میزان افزایش هدایت هیدرولیکی به یک مقدار مشخص برای دو خاک، در آب محتوی حجمی کمتری از خاک Oakley رخ داده است [۳].

۴-۱- اثر تغییرات دما، شوری، بارش و تحکیم بر نفوذپذیری (K) مواد

کنستانتز (۱۹۸۲) اثر دما بر هدایت هیدرولیکی غیراشباع دو خاک را مورد بررسی قرار داد. خاک ماسه‌ای Oakley و خاک لوم ماسه‌ای Hanford که میزان ماسه در Oakley حدود ۸۸ درصد وزنی و در Hanford حدود ۷۰ درصد وزنی بود. در این پژوهش فرض اینکه تنها گرانیوی با تغییر دما تغییر خواهد کرد، رد شده است. در شکل ۵- الف هدایت هیدرولیکی بر حسب پتانسیل ماتریک و در شکل ۵-

جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده

مرجع	توضیحات (نتایج)	شیوه پژوهش	نوع خاک	پارامتر تاثیرپذیر	پارامتر اثرگذار
(Constantz, 1982)	<ul style="list-style-type: none"> هدایت هیدرولیکی با افزایش دما و کاهش پتانسیل ماتریک افزایش می‌یابد. با افزایش دما و آب محتوی حجمی هدایت هیدرولیکی افزایش یافته است. 	آزمایش‌های شار تبحیری حالت پایدار	ماسه	هدایت هیدرولیکی	دما
(Ojo & Brook, 1990)	بیشترین مقاومت در اشباع کمتر از ۱۸ درصد و کمترین مقاومت در اشباع بیش از ۴۵ درصد رخ می‌دهد.	تست مقاومت فشاری (UCS)	سنگ	ویژگی‌های مکانیکی	رطوبت
(Assouline et al., 1997)	خاک با pH و CEC بالاتر و مواد آلی کمتر خاصیت تحکیم‌پذیری بیشتری دارد و هدایت هیدرولیکی آن بعد از اعمال فشار ۱۰۰۰ کیلوپاسکال بیشتر است.	تست UCS و منحنی مشخصه رطوبت	سنگ	ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی	تحکیم
(Ghasemzadeh et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> نفوذپذیری بعد از ۵ ماه ۲۸ درصد و زاویه اصطکاک بعد از ۸ ماه فروشویی ۲۵ درصد کاهش یافت. چسبندگی در همه تست‌ها صفر بود و با افزایش نرخ اسید و گذشت زمان زاویه اصطکاک کاهش پیدا کرد. 	<ul style="list-style-type: none"> تست برش مستقیم تست دوام تست هد ثابت 	خاک توده مس اکسیدی	خواص هیدرومکانیکی	اسید سولفوریک
(Ying, Cui, Benahmed, et al., 2021)	<ul style="list-style-type: none"> با کاهش شوری از ۲/۱۰ گرم بر کیلوگرم به صفر دانسیته خشک بیشینه و آب محتوی بهینه شد. شوری تاثیری بر پتانسیل ماتریک ندارد. سفتی (G_{max}) با افزایش شوری تا ۲/۱۰ گرم بر کیلوگرم افزایش یافت و بعد از آن تقریباً ثابت ماند. 	<ul style="list-style-type: none"> تست تراکم پروکتور تست المان خمشی 	سپت	تحکیم، سفتی و پتانسیل ماتریک	شوری
(Cuisinier et al., 2014)	خواص تورمی خاک طی ۱۸ ماه در پی افزایش زاویه اصطکاک کاهش پیدا کرد و هدایت اشباع افزایش اندکی داشت ولی هدایت غیراشباع تغییری نکرد.	تست مقاومت برشی و هدایت هیدرولیکی	خاک ریزه	خواص هیدرومکانیکی	pH بالا



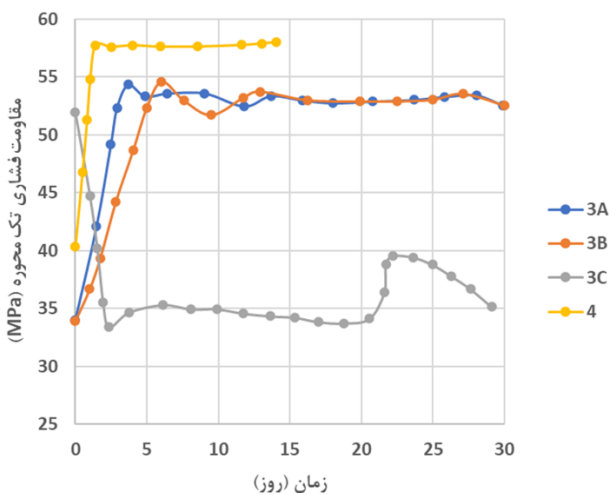
شکل ۵- هدایت هیدرولیکی بر حسب پتانسیل ماتریکس و در سه دمای مختلف (الف) و هدایت هیدرولیکی بر حسب آب محتوی حجمی در سه دمای مختلف (ب) (اقتباس شده از [۳])

قلیایی سایت مرجع و به مقدار $2/9 \times 10^{-10}$ متر بر ثانیه در تماس با محلول قلیایی افزایش پیدا کرده است ولی هدایت هیدرولیکی غیراشباع تغییر خاصی نکرده و تقریباً ثابت مانده است [۹].

مکنیل و کولمن (۱۹۶۶) اثر شوری را بر هفت نوع خاک مورد بررسی قرار دادند. در شکل ۹ هدایت هیدرولیکی دو نوع خاک لوم ماسه‌ای Pachappa و لوم رسی Waukena بر حسب میزان غلظت شوری و در مقادیر ثابتی از پارامتر SAR رسم شده است ($SAR = Na^+ / [(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2]^{0.5}$).

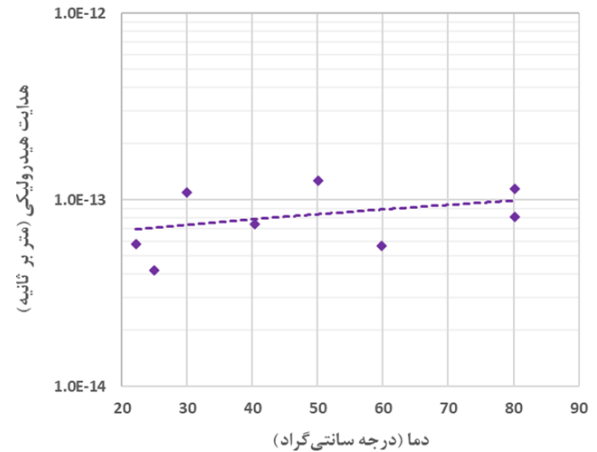
نتایج نشان داد که با کاهش غلظت نمک و افزایش غلظت پارامتر SAR هدایت هیدرولیکی کاهش یافته است و یا به عبارتی دیگر اگر تغییرات در SAR صفر (به دلیل نبود یون سدیم) ثابت فرض شود با کاهش SAR و افزایش غلظت نمک هدایت هیدرولیکی افزایش پیدا می‌کند [۲۳].

آجو و بروک (۱۹۹۰) تاثیر رطوبت بر ویژگی‌های مکانیکی سنگ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در مقادیر خاصی از اشباع نسبی نمونه سنگ دارای استحکام بیشینه و کمینه است. بیشترین مقاومت و استحکام در کمترین حالت اشباع (کمتر از ۱۸ درصد) بدست آمد و در مقادیر اشباع بین ۱۸ و ۴۵ درصد مقاومت فشاری متغیر بود و در اشباع بالای ۴۵ درصد کمترین استحکام و مقاومت بدست آمد. در ادامه سه نمونه 3A، 3B و 3C که 3A و 3B تحت شرایط آب و هوایی خشک قرار گرفت، مقاومت آن‌ها افزایش یافت ولی نمونه 3C که تحت شرایط آب و هوایی مرطوب قرار گرفته بود، مقاومت آن کاهش یافت. در شکل ۸ نحوه تغییر مقاومت فشاری در طول زمان برای نمونه‌های در حال خشک شدن و مرطوب شدن مشاهده می‌شود [۲].



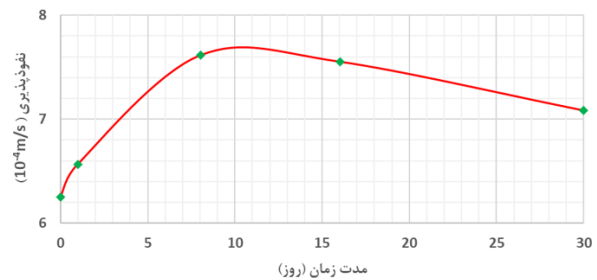
شکل ۸- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف در طول زمان (اقتباس شده از [۲])

ویلار و یورت (۲۰۰۴) اثر دما را بر ویژگی‌های هیدرومکانیکی بنتونیت فشرده شده مورد بررسی قرار دادند. در شکل ۶ هدایت هیدرولیکی بنتونیت فشرده شده بر حسب دما رسم شده است و مشاهده می‌شود که با افزایش دما هدایت هیدرولیکی افزایش اندکی داشته است [۲۲].



شکل ۶- هدایت هیدرولیکی بنتونیت فشرده شده (دما) (اقتباس شده از [۲۲])

قاسمزاده و همکاران (۲۰۱۸) تاثیر سولفوریک اسید بر خواص هیدرومکانیکی خاک توده مس اکسیدی معدن میدوک را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که نفوذپذیری بعد از حدود پنج ماه حدود ۲۸ درصد کاهش یافته است. در شکل ۷ نتیجه تست نفوذپذیری ثابت در مدت زمان یک ماه آورده شده است [۸].

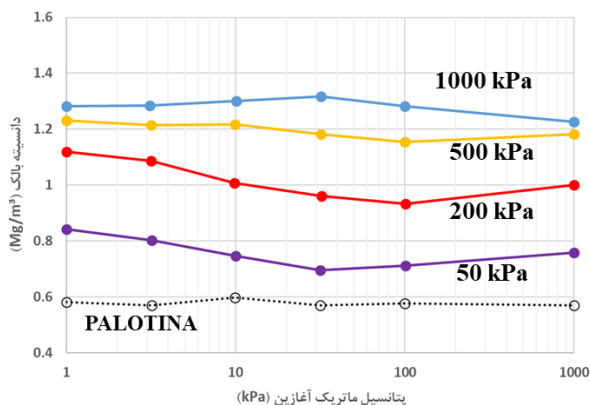


شکل ۷- نتیجه تست هد ثابت در مدت زمان یک ماه از فرآیند فروشویی ستونی با اسید سولفوریک (اقتباس شده از [۸])

کوئیسینی و همکاران (۲۰۱۴) تاثیر pH بالا (محلول قلیایی) را بر خواص هیدرومکانیکی خاک رسی آرژیلیت فشرده شده در درازمدت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از دو نوع محلول قلیایی یکی محلول قلیایی که با اضافه کردن ۱/۲ گرم بر لیتر quicklime بدست آمده بود و دیگری آب قلیایی محل به عنوان مرجع استفاده کردند. نمونه به مدت هجده ماه تحت تماس با دو محلول قلیایی قرار گرفت و نتایج نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع از مقدار اولیه $0/9 \times 10^{-10}$ متر بر ثانیه به مقدار 2×10^{-10} متر بر ثانیه در تماس آب

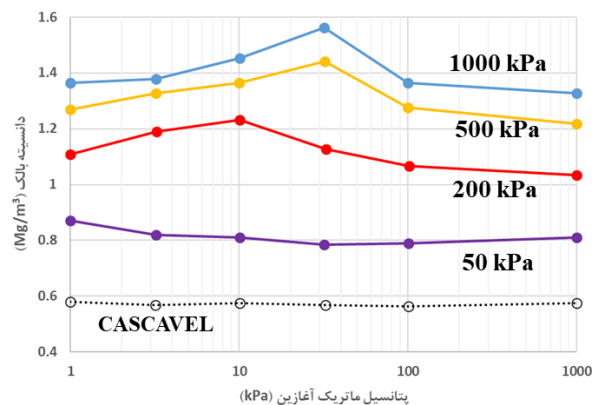
اصطکاک را تا ۲۶ درصد و آب سایت زاویه اصطکاک را تا ۱۸ درصد افزایش داده که این امر باعث کاهش شدید خواص تورم‌پذیری به دلیل حل شدن ذرات اولیه رس، شده است. در این آزمایش چسبندگی و سفتی نمونه تغییری نکرد [۹].

اسولین و همکاران (۱۹۹۷) تاثیر تحکیم را بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی دو خاک به نام‌های Casavel و Palotina بررسی کردند. بخش عمده‌ای از هر دو خاک را رس تشکیل داده است و اندازه ذرات رس خاک Palotina نسبت به ذرات رس خاک Casavel بزرگتر است. در شکل ۹ نتایج تست مقاومت فشاری و تاثیر آن بر چگالی بالک در مقادیر مختلف پتانسیل ماتریک آورده شده است و همانطور که مشخص است خاک Palotina با pH بالاتر و ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتر و مواد آلی کمتر خاصیت تراکم‌پذیری بیشتری به ویژه در فشار ۱۰۰۰ کیلوپاسکال و پتانسیل ماتریک ۳۲- کیلوپاسکال (بیشینه مقدار دانسیته بالک) از خود نشان داده است [۷].

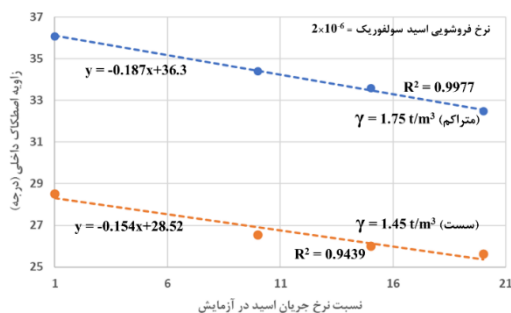


یو و همکاران (۲۰۱۸) تاثیر دما بر رفتار هیدرومکانیکی بوم رسی (رس با خاصیت پلاستیک بالا) را مورد بررسی قرار دادند. تحت شرایط زهکش نشده آزمایش‌های برش سه‌محوری در دماهای مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که تحت شرایط مشابه هیدرومکانیکی با افزایش دما مقاومت برشی کاهش پیدا می‌کند؛ توجیه این کاهش را می‌توان به کاهش دو پارامتر چسبندگی و مدول الاستیک و افزایش فشار منفذی نسبت داد، هرچند تاثیر دما بر روی زاویه اصطکاک واضح نبود. [۱۰].

کویسینیر و همکاران (۲۰۱۴) تاثیر pH با قلیایی را بر خواص هیدرومکانیکی خاک رسی آرژلیت فشرده شده در درازمدت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از دو نوع محلول قلیایی استفاده کردند، یکی محلول قلیایی که با اضافه کردن ۱/۲ گرم بر لیتر quicklime بدست آمده بود و دیگری آب قلیایی محل به عنوان مرجع. نمونه به مدت هجده ماه تحت تماس با دو محلول قلیایی قرار گرفت و مشاهده شد که محلول قلیایی زاویه



شکل ۹- چگالی بالک بر حسب پتانسیل ماتریک برای چهار مقدار مقاومت فشاری در دو خاک Palotina و Casavel. خط چین چگالی بالک را در حالت فشرده نشده نشان می‌دهد (اقتباس شده از [۷])



شکل ۱۰- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی مس اکسیدی خرد شده میدوک برای مقادیر مختلف نرخ اسید (اقتباس شده از [۸])

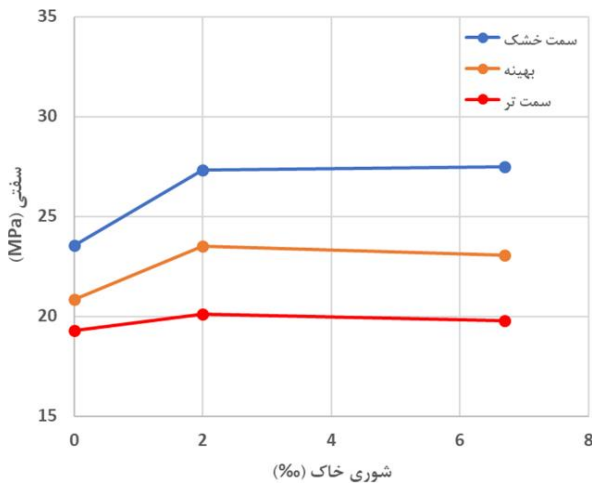
در شکل ۱۱ که منحنی مشخصه رطوبت رسم شده است و کاملاً مشخص است که شوری تاثیری در تغییرات پتانسیل ماتریک ندارد ولی باید به این نکته توجه داشت که در سمت خشک، نمونه

قاسم‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) تاثیر سولفوریک اسید بر خواص هیدرومکانیکی خاک توده مس اکسیدی معدن میدوک را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که زاویه اصطکاک بعد از مدت زمان هشت ماه فروشویی، ۲۵ درصد کاهش یافته است. در شکل ۱۰ زاویه اصطکاک بر حسب نرخ اسیدسولفوریک رسم شده است [۸].

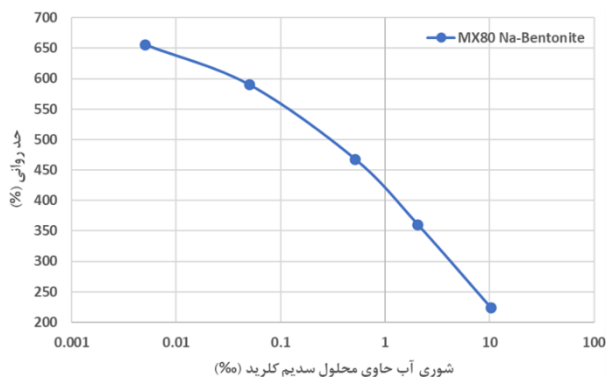
بینگ و همکاران (۲۰۲۱) تاثیر شوری را بر تحکیم، پتانسیل و سفتی خاک سیلتی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با کاهش شوری از ۲/۱۰٪ (گرم بر کیلوگرم خاک خشک) به صفر، باعث افزایش چگالی خشک بیشینه و کاهش آب محتوی بهینه شد، در حالی که با افزایش شوری از ۲/۱۰٪ به ۶/۷۶٪ تغییر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد [۶].

ولی از آن مقدار به بعد تقریباً ثابت می‌ماند [۶].

همچنین یینگ و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه دیگری، تاثیر شوری بر حد روانی خاک سیلتی و بنتونیت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی در شکل ۱۳ آورده شده است. همانطور که مشخص است در بنتونیت با افزایش شوری حد روانی کاهش می‌یابد و در خاک سیلتی با افزایش شوری مقدار حد روانی ثابت است [۵].



شکل ۱۲- تاثیر شوری بر سفتی (اقتباس شده از [۶])

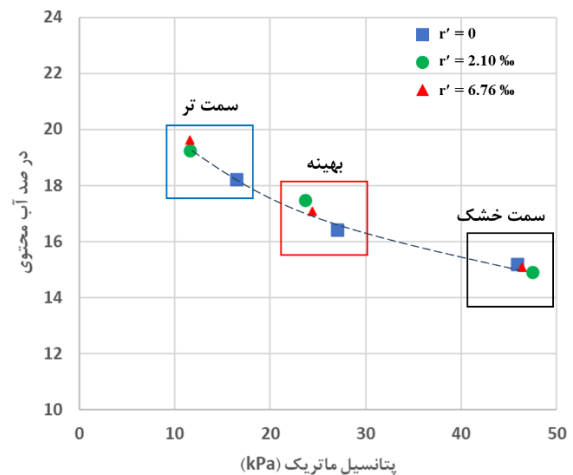


شکل ۱۳- تاثیر شوری بر حد روانی بنتونیت (سمت چپ) و خاک سیلتی (سمت راست) (اقتباس شده از [۵])

مقاومت یونی در جهت تقویت پیوند F-F (Face to Face) بین یون‌ها و ذرات موجود رس باشد. در شکل ۱۵ مقادیر مقاومت برشی بر حسب pH محلول و در مقادیر مختلف استحکام (IC، یعنی مقاومت خاک در برابر تغییر شکل و گسیختگی) برای کائولینیت و اسمکتیت رسم شده است.

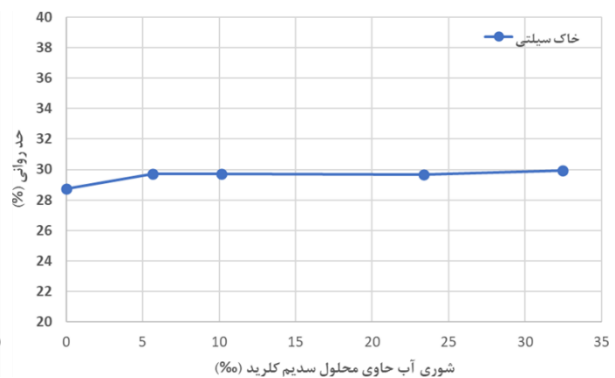
همانطور که در شکل ۱۵ مشخص است مقاومت برشی کائولینیت با افزایش و کاهش pH و افزایش استحکام افزایش پیدا کرده است ولی اسمکتیت با افزایش pH کاهش اندکی در مقاومت برشی نشان داده است [۱۴].

بی‌نمک و نمک‌دار تقریباً به هم نزدیک‌اند ولی در سمت مرطوب و بهینه نمونه نمک‌دار و بی‌نمک اختلاف زیادی دارند [۶].



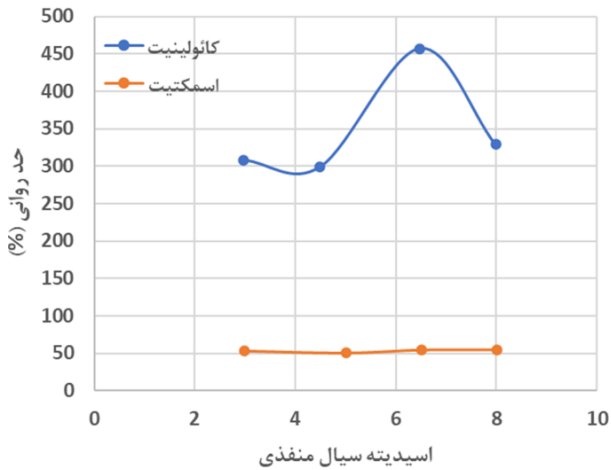
شکل ۱۱- نمودار منحنی مشخصه رطوبت در سمت خشک، سمت مرطوب و بهینه (اقتباس شده از [۶])

در شکل ۱۲ تاثیر شوری بر G_{max} (سفتی) مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است با حرکت از سمت خشک به سمت مرطوب سفتی کاهش پیدا می‌کند و در هر سه حالت با افزایش شوری تا مقدار ۲/۱۰% سفتی افزایش پیدا می‌کند



اسپاگنولی و همکاران (۲۰۱۲) تاثیر مقادیر مختلف pH را بر مقاومت برشی زهکش نشده کائولینیت و اسمکتیت مورد بررسی قرار دادند. در شکل ۱۴ حد روانی کائولینیت و اسمکتیت در مقادیر مختلف pH آورده شده است [۱۴].

نتایج نشان داد که با کاهش pH مقدار مقاومت برشی افزایش یافت که یکی از مهم‌ترین دلایل آن حل شدن یون Al^{3+} است که به عنوان منعقدکننده عمل می‌کند و باعث می‌شود که ذرات به یکدیگر بچسبند. همچنین با افزایش pH هم مقاومت برشی افزایش یافت که دلیل آن می‌تواند افزایش

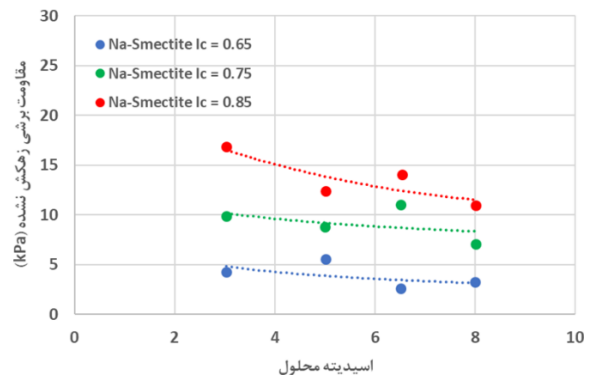
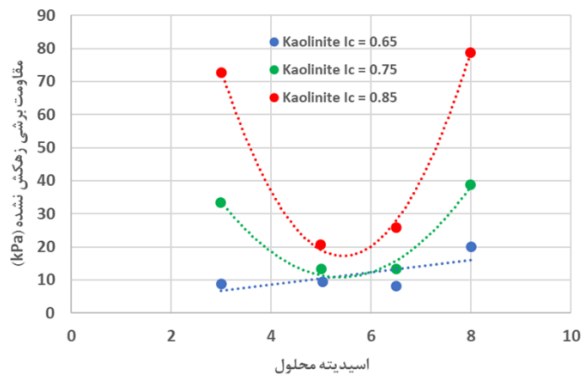


شکل ۱۴- حد روانی کائولینیت و اسمکتیت بر حسب pH سیال منفذی (اقتباس شده از [۱۴])

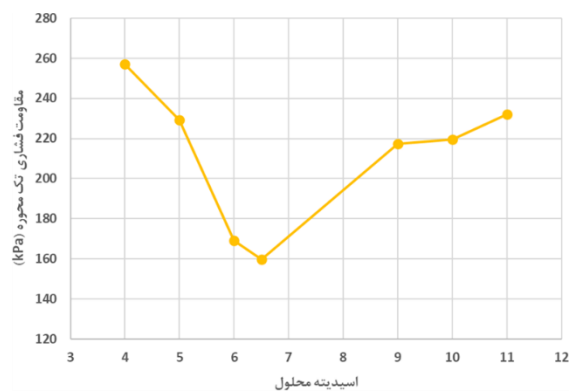
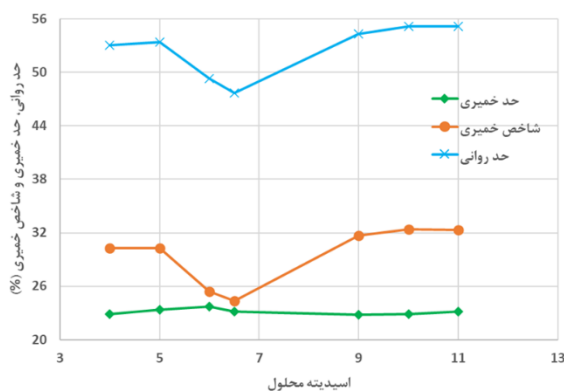
عابدی کویایی و همکاران (۲۰۲۰) تاثیر pH آب منفذی را بر ویژگی‌های مکانیکی خاک رس کائولینیت مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری، پارامترهای مقاومت برشی و حد روانی خاک به طور قابل توجهی با افزایش و کاهش pH، افزایش یافتند. [۱۳].

می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای مقاومت برشی با افزایش و کاهش pH افزایش یافته است. با توجه به رابطه $\tau = \sigma \tan(\phi) + c$ (چسبندگی) بیانگر عرض از مبدا و ϕ (زاویه اصطکاک) بیانگر زاویه خطوط با محور افقی است که در هر دو حالت افزایش و کاهش pH این دو پارامتر افزایش یافته‌اند [۱۳].

در شکل ۱۶ مقادیر حد روانی، حد خمیری و مقاومت برشی آورده شده است و کاملاً مشخص است که با افزایش و کاهش pH پارامترهای نامبرده شده افزایش می‌یابند.



شکل ۱۵- مقاومت برشی کائولینیت (سمت چپ) و اسمکتیت (سمت راست) بر حسب pH و استحکام (اقتباس شده از [۱۴])



شکل ۱۶- مقادیر حد روانی و حد خمیری خاک رس کائولینیت (سمت چپ) و مقاومت فشاری (سمت راست) در مقادیر مختلف pH (اقتباس شده از [۱۳])

وسيله آب را مورد بررسی قرار دادند. در شکل ۱۷ مقادیر حد روانی خاک بر حسب pH رسم شده است و مشخص است که با کاهش و افزایش pH مقدار حد روانی کاهش یافته است [۱۲].

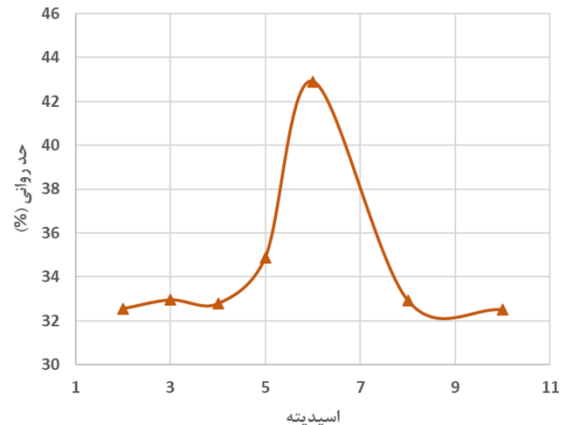
ماتسوموتو و همکاران (۲۰۱۸) تاثیرات تغییرات pH بر ویژگی‌های فیزیکی خاک (شامل ۳۶٫۷ درصد ماسه، ۲۶٫۷ درصد سیلت و ۳۶٫۶ درصد رس) برای بررسی توسعه فرسایش خاک به

تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مدول ادنومتریک، ضریب تحکیم، ضریب ثانویه تراکم، پارامترهای پورومکانیکی و هدایت هیدرولیکی مشاهده نشد [۱۱].

محمد و همکاران (۲۰۰۲) ویژگی‌های هیدرومکانیکی باطله مواد معدنی را در اثر اصلاح با آهک، آلومینیوم و خاکستر زغال نوع C بررسی کردند. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان داد به کار بردن آهک، آلومینیوم و خاکستر زغال نوع C در باطله‌های محتوی گوگرد زیاد، باعث بهبود خاصیت پلاستیک، کارایی و پایداری حجمی آن می‌شود. ترکیب ۵ درصد آهک، ۱۰ درصد خاکستر زغال نوع C و ۱۱۰ ppm آلومینیوم باعث ایجاد ساختار محکم و مونولیت شد که قادر به تحمل ۱۰۰۰ کیلوپاسکال و بیشتر تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره بود و همچنین کاهش ضریب نفوذپذیری به 10^{-6} سانتی‌متر بر ثانیه در منابع حفاظت محیط زیستی (10^{-5} سانتی‌متر بر ثانیه) کمتر است. در شکل ۱۹ تاثیر ترکیبات مختلف اصلاح‌کننده‌های نامبرده شده بر مقاومت فشاری آورده شده است. همانگونه که مشخص است بعد از گذشت ۲۸ روز از زمان اصلاح با ترکیب ۵ درصد آهک، ۱۰ درصد خاکستر زغال نوع C و ۱۱۰ ppm آلومینیوم (S3L5A110F10) خاک باطله به بیشترین مقاومت خود رسیده است [۱۵].

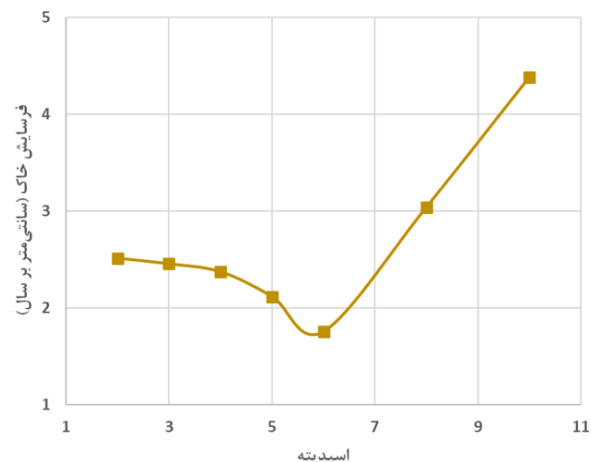
در شکل ۲۰ تاثیر ترکیبات مختلف بر هدایت هیدرولیکی آورده شده است که می‌توان نتیجه گرفت که در طی مدت زمان ۲۸ روز از اصلاح، کمترین ضریب نفوذپذیری از ترکیب ۵ درصد آهک، ۱۰ درصد خاکستر زغال نوع C و ۱۱۰ ppm آلومینیوم (S3L5A110F10) حاصل شده است. می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر کمی از آلومینیوم می‌تواند نتیجه بسیار مطلوبی در پایداری خاک باطله داشته باشد.

مهنی و همکاران (۲۰۱۶) تاثیر اصلاح خاک بر رو فرسایشی داخلی و ویژگی‌های هیدرومکانیکی خاک را مورد بررسی قرار دادند. اصلاح خاک سیلتی با بنتونیت، آهک و سیمان انجام شد. مقدار مقاومت فشاری خاک سیلتی قبل از اصلاح برابر ۱۴۲ کیلوپاسکال و مقدار هدایت هیدرولیکی آن برابر 10^{-9} سانتی‌متر بر ثانیه بود. علت پایین بودن مقدار هدایت هیدرولیکی (K) به دلیل درصد بالای (۹۹٫۲ درصد) ذرات ریز (زیر ۸۰ میکرون) و تحکیم اولیه بود. اصلاح با رس (بنتونیت و کائولینیت) تغییری در مقاومت فشاری ایجاد نکرد ولی مقدار هدایت هیدرولیکی را کاهش داد (جدول ۲).



شکل ۱۷- حد روانی خاک در مقادیر مختلف pH (اقتباس شده از [۱۲])

در شکل ۱۸ مقادیر فرسایش خاک نشان داده شده است. کاهش در مقدار حد روانی خاک در محدوده pH ۶ تا ۲ باعث توسعه فرسایش خاک هرچند اندک می‌شود که این می‌تواند به دلیل انعقاد ذرات خاک به وسیله یون Al^{3+} باشد. در مقادیر pH بالای ۶ به دلیل دافعه ذرات منفی موجود، تحرک ذرات بیشتر و در نتیجه حد روانی خاک کمتر شده است که این امر خود باعث افزایش چشمگیر فرسایش خاک با آب است.

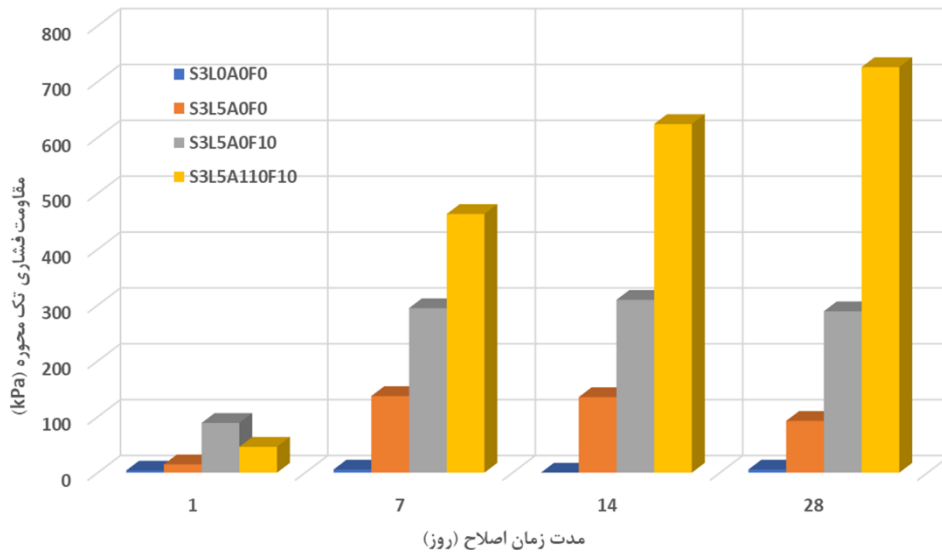


شکل ۱۸- میزان فرسایش سالیانه خاک در مقادیر مختلف pH (اقتباس شده از [۱۲])

۵- برخی کاربردهای پدیده کوپلینگ در ژئوتکنیک زیست‌محیطی

۵-۱- کوپلینگ پارامترهای ترموهیدرومکانیکی و تزریق CO_2

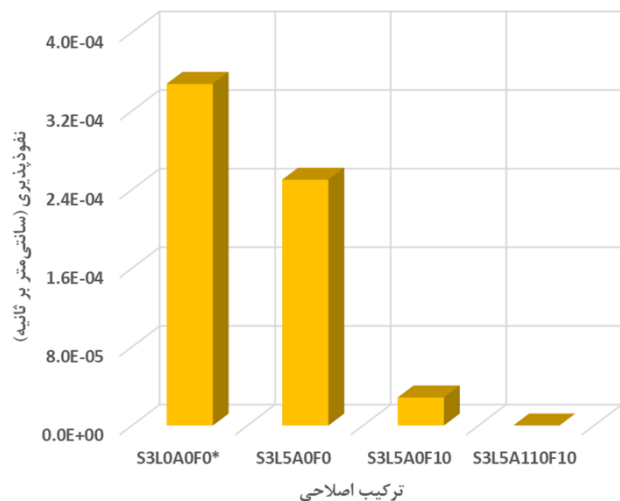
فاورو و لالویی (۲۰۱۸) تاثیر تزریق CO_2 بر رفتار هیدرومکانیکی Caprock را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که خواص هیدرومکانیکی هیچ تغییری نکرده است زیرا



شکل ۱۹- تاثیر ترکیبات مختلف از آهک، آلومینیوم و خاکستر زغال نوع C بر مقاومت فشاری در مدت زمان ۲۸ روز (S محل نمونه برداری، L آهک، A آلومینیوم و F خاکستر زغال نوع C) (اقتباس شده از [۱۵])

جدول ۲- تاثیر اصلاح بر مقدار هدایت هیدرولیکی خاک سیلتی (اقتباس شده از [۱۶])

هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)	نحوه اصلاح
6×10^{-9}	سیلت اصلاح نشده
$2/3 \times 10^{-9}$	۲ درصد کائولینیت
$1/3 \times 10^{-9}$	۵ درصد کائولینیت
$7/3 \times 10^{-10}$	۹ درصد کائولینیت
$2/2 \times 10^{-10}$	۲ درصد بنتونیت
$5/1 \times 10^{-11}$	۵ درصد بنتونیت
$2/6 \times 10^{-11}$	۹ درصد بنتونیت
9×10^{-9}	۱ درصد آهک (۹۰ روز)
$9/7 \times 10^{-10}$	۳ درصد آهک (۹۰ روز)
$1/9 \times 10^{-9}$	۳ درصد سیمان (۹۰ روز)
$7/3 \times 10^{-10}$	۶ درصد سیمان (۹۰ روز)



شکل ۲۰- تاثیر ترکیبات مختلف بر ضریب نفوذپذیری خاک باطله در مدت زمان ۲۸ روز اصلاح (۹۰ روز اصلاح نشده) (اقتباس شده از [۱۵])

برخی از پارامترهای مشابه بر خواص ترموهیدرومکانیکی یکسان نبوده است و با هم تفاوت دارند که این مساله می‌تواند مربوط به نوع خاک، شدت و مدت زمان تاثیر پارامترها و نظایر آن باشد. می‌توان نتیجه گرفت که شرایط هر مساله و آزمایش متفاوت است و باید روند انجام بررسی‌ها و آزمایش‌های موجود کاملا با دقت انجام شود تا به نتایج واقعی دست پیدا کرد. از این رو توصیه می‌شود که در خلال انجام آزمایش از ابزار و آزمایش‌های متناسب با هدف و دقیق استفاده شود و تاثیر پارامترهای مختلف بر خواص ترموهیدرومکانیکی در طول زمان به خوبی و با دقت مورد ارزیابی قرار گیرد.

در شکل ۲۱ تاثیر اصلاح خاک سیلتی با آهک و سیمان آورده شده است. همانطور که قابل مشاهده است تاثیر بر افزایش مقاومت فشاری خاک در طول زمان بسیار زیاد است و با افزایش مقدار آن به ۶ درصد و گذشت ۹۰ روز مقاومت فشاری خاک به بیش از ۱۵۰۰ کیلوپاسکال رسیده است [۱۶].

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مطالعات متعددی در رابطه با خواص ترموهیدرومکانیکی مواد انجام شده است و پارامترهای مختلفی بر روی این خواص تاثیرگذار بوده‌اند. در بعضی از مطالعات مشاهده شد که تاثیر

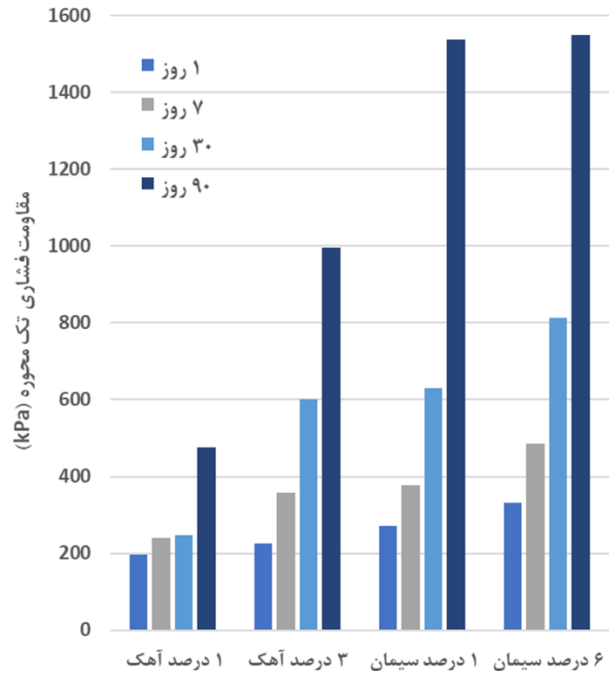
واکنش‌های شیمیایی و تولید مواد جدید و گرما ممکن است دیگر پارامترهای موجود اعم از هیدرولیکی و مکانیکی دچار تغییرات متفاوتی بشوند و این مساله در نهایت از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی اهمیت زیادی دارد. بنابراین توصیه می‌شود مطالعات دمایی- هیدرولیکی- مکانیکی و شیمیایی به صورت جدی در این سازه مورد بررسی قرار بگیرد.

سازه مورد توجه دیگر انباشتگاه باطله است؛ این سازه نیز به دلیل محتویاتی که در درون خود جای داده است و در تعامل با سیال آب می‌تواند زهاب اسیدی را در درون خود ایجاد کند و این فرآیند موجب تغییرات pH در ساختار انباشتگاه می‌شود و در نتیجه این تغییر همانطور که در بخش‌های گذشته مورد بررسی قرار گرفت می‌تواند ویژگی‌های مختلف خاک را دستخوش تغییرات کند. در سازه سد باطله نیز می‌توان فرآیندهای مشابه دیگر سازه‌ها را مشاهده کرد و تاثیر مهم سیال در این سازه را به صورت جدی مورد بررسی قرار داد. سیال موجود در سد باطله از لحاظ ساختار ژئوشیمیایی و رفتار هیدرولیکی اهمیت زیادی دارد و ممکن است ساختار پورومکانیکی آن دچار تغییراتی شود که در نهایت ممکن است مشکلاتی را از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک و هیدروژئولوژی زیست‌محیطی ایجاد کند.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به ساختار خاکی- سنگی سازه‌های معدنی و وجود عوامل مختلفی که در این مطالعه به آن اشاره شد، ممکن است تاثیرات منفی و نامتناسبی را بر سازه اعمال کند، از همین رو باید گسترده‌تری مطالعات کوپلینگ و بررسی توامان پارامترها و فرآیندهای مختلف در آن‌ها، مد نظر قرار گیرد زیرا همانطور که مشاهده شد متغیرهایی مانند شوری، اسیدیته، واکنش‌های شیمیایی و نظایر آن بر ساختار دمایی- هیدرولیکی- مکانیکی و شیمیایی تاثیر به‌سزایی دارد و ممکن است در طولانی‌مدت روند بهره‌برداری از این سازه‌ها را دچار مشکل کند و خسارات جبران‌ناپذیری را از خود بر جای بگذارد.

منابع

1. R. W. Sarsby, *Environmental geotechnics*. Thomas Telford, 2000.
2. O. Ojo and N. Brook, "The effect of moisture on some mechanical properties of rock," *Min. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 145-156, 1990.
3. J. Constantz, "Temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils,"



شکل ۲۱- تاثیر اصلاح خاک سیلتی با آهک و سیمان بر مقاومت فشاری آن در مدت زمان ۱، ۷، ۳۰ و ۹۰ روز بعد از اصلاح (اقتباس شده از [۱۶])

در سازه‌های معدنی از قبیل کاواک معادن، توده‌های فروشویی، انباشتگاه‌های باطله و سدهای باطله نیز با توجه به کاربرد و ماهیت ذاتی‌اشان ممکن است تحت تاثیر عوامل مختلف از منظر دمایی- هیدرولیکی- مکانیکی و شیمیایی قرار بگیرند. در کاواک معادن به دلیل تعامل ساختار سنگی موجود با سیال منفذی، این مساله اهمیت پیدا می‌کند و باید تاثیر سیال بر ساختار مکانیکی کاواک و یا بالعکس را مورد مطالعه قرار داد. حتی در بعضی از معادن مساله آب شور وجود دارد و سیال منفذی دارای مقادیر EC بسیار بالایی است؛ این مساله نیز می‌تواند بر ساختار مکانیکی و نوع رفتار سیال در محیط شکسته- متخلخل کاواک معدن نیز تاثیرگذار باشد، بنابراین مطالعات کوپلینگ و ترکیبی بسیار مهم است.

در سازه توده فروشویی به دلیل فعل و انفعالاتی که در ساختار آن به دلیل فروشویی با اسید و یا محلول‌های دیگری که مورد استفاده قرار می‌گیرد، رخ می‌دهد مطالعات ترکیبی و بررسی توامان پارامترها بسیار ضروری است. با اضافه شدن محلول فروشویی ممکن است تغییراتی در ساختار مکانیکی (تغییرات چسبندگی، زاویه اصطکاک، مقاومت فشاری و نظایر آن) ایجاد شود و همچنین این تغییرات منتج به تغییر نحوه حرکت سیال در درون توده شود. در این سازه به دلیل انجام

17. O. Kolditz, H. Shao, W. Wang, and S. Bauer, "Thermo-hydro-mechanical chemical processes in fractured porous media: modelling and benchmarking", vol. 25. Springer, 2016.
18. O. Kolditz *et al.*, "OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media," *Environ. Earth Sci.*, vol. 67, no. 2, pp. 589–599, 2012.
19. J. Rutqvist and O. Stephansson, "The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering," *Hydrogeol. J.*, vol. 11, no. 1, pp. 7–40, 2003.
20. H. F. Wang and P. University, "Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology". Princeton University Press, 2000.
21. T. D. Sullivan, "Hydromechanical coupling and pit slope movements," in *Slope Stability 2007: Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, 2007, pp. 3–43.
22. M. V. Villar and A. Lloret, "Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite," *Appl. Clay Sci.*, vol. 26, no. 1–4, pp. 337–350, 2004.
23. B. L. McNeal and N. T. Coleman, "Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 30, no. 3, pp. 308–312, 1966.
24. Liu, Naifei, Ning Li, Shuangjie Wang, Guofeng Li, and Zhanping Song. "A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for fractured rock masses in cold regions." *Cold Regions Science and Technology* 205 (2023): 103707.
25. Zhang, Nanlin, Zhifeng Luo, Zhangxin Chen, Fushen Liu, Pingli Liu, Weiyu Chen, Lin Wu, and Liqiang Zhao. "Thermal-hydraulic-mechanical-chemical coupled processes and their numerical simulation: a comprehensive review." *Acta Geotechnica* 18, no. 12 (2023): 6253-6274.
۲۶. صمیم‌نیا، سارا، ناصرین، امیر، دریایی، مهدی، جعفری، احمد، انصاری، محمد رضا. تاثیر شوری آب منفذی و ماسه بادی بر مقاومت تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک‌های رسی. تحقیقات آب و خاک ایران، ۱۳۹۹؛ ۵۱(۳): ۶۴۱-۶۵۸. doi: 10.22059/ijswr.2019.289980.668339
۲۷. خدابنده، محمد علی، کرامتی، محسن، حسینی، سید مهدی، نوکنده، صابر. بررسی تاثیر pH شیرابه بر میزان فروریزش و پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های رمبند. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۱۳۹۸؛ ۵۱(۱): ۴۵-۵۸. doi: 10.22060/ceej.2018.12963.5301
4. D. Puma Contreras, "Hydromechanical characterization of granular materials from copper mining waste," 2017.
5. Z. Ying, Y.-J. Cui, M. Duc, N. Benahmed, H. Bessaies-Bey, and B. Chen, "Salinity effect on the liquid limit of soils," *Acta Geotech.*, vol. 16, no. 4, pp. 1101–1111, 2021.
6. Z. Ying, Y.-J. Cui, N. Benahmed, and M. Duc, "Salinity effect on the compaction behaviour, matric suction, stiffness and microstructure of a silty soil," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 855–863, 2021.
7. S. Assouline, D. Tessier, and J. Tavares-Filho, "Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experimental results and modeling," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 61, no. 2, pp. 390–398, 1997.
8. H. Ghasemzadeh, M. S. Pasand, and M. M. M. Shamsi, "Experimental study of sulfuric acid effects on hydro-mechanical properties of oxide copper heap soils," *Miner. Eng.*, vol. 117, pp. 100–107, 2018.
9. O. Cuisinier, D. Deneele, F. Masrouri, A. Abdallah, and N. Conil, "Impact of high-pH fluid circulation on long term hydromechanical behaviour and microstructure of compacted clay from the laboratory of Meuse-Haute Marne (France)," *Appl. Clay Sci.*, vol. 88, pp. 1–9, 2014.
10. H. Yu, W. Chen, Z. Gong, Y. Ma, G. Chen, and X. Li, "Influence of temperature on the hydro-mechanical behavior of Boom Clay," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 108, pp. 189–197, 2018.
11. V. Favero and L. Laloui, "Impact of CO2 injection on the hydro-mechanical behaviour of a clay-rich caprock," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 71, pp. 133–141, 2018.
12. S. Matsumoto, S. Ogata, H. Shimada, T. Sasaoka, A. Hamanaka, and G. J. Kusuma, "Effects of pH-induced changes in soil physical characteristics on the development of soil water erosion," *Geosciences*, vol. 8, no. 4, p. 134, 2018.
13. J. Abedi Koupai, M. Fatahizadeh, and M. R. Mosaddeghi, "Effect of pore water pH on mechanical properties of clay soil," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 79, no. 3, pp. 1461–1469, 2020.
14. G. Spagnoli, D. Rubinos, H. Stanjek, T. Fernández-Steeger, M. Feinendegen, and R. Azzam, "Undrained shear strength of clays as modified by pH variations," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 71, no. 1, pp. 135–148, 2012.
15. A. Mohamed, M. Hossein, and F. Hassani, "Hydro-mechanical evaluation of stabilized mine tailings," *Environ. Geol.*, vol. 41, no. 7, pp. 749–759, 2002.
16. A. Mehenni, O. Cuisinier, F. Masrouri, and E. Lavallée, Impact of soil treatment on internal erosion resistance and hydromechanical characteristics of a silty soil. 2016.