



Use of Zeolite in Reducing Adobe Erosion of Historical Site of Belqis Against Descending Moisture

Reza Hoseini Keshtan *¹

¹. *PhD in Conservation and Restoration of Historical Buildings, Faculty of Conservation and Restoration, Art University of Isfahan, Isfahan, IRAN.*

Received: 18/02/2022

Accepted: 21/07/2022

Abstract

The historical site of Belqis, consisting of clay and mud structures with an area of 180 hectares, is located 3 km south of the current city of Esfarayen in North Khorasan, Iran. Erodibility of adobe used in practical interventions of restoration against descending moisture in this area is an issue of this research. This study was conducted by using the mineral zeolite Clinoptilolite as an additive to adobe to improve soil quality with the aim of reducing erosion through soil investigation using physical, chemical and mineral studies. Destructive phases of calcite, muscovite and Dickite were identified as effective chemical parameters of soil in clay erosion. Zeolite by controlling the behavior of destructive phases caused the samples under test to have less erosion and show more stability for a longer period of time. The sample containing 6% additive under washing test was less eroded. After 15 minutes, minimal erosion was encountered, which showed significant stability compared to other samples.

Keywords: Adobe, Conservation, Zeolite, Descending humidity, Historical area, Belqis Esfarayen.

*Corresponding Author: hosynireza@yahoo.com

Introduction

Soil architecture is a type of architecture that can be seen in different lands. Its diversity is associated with different techniques and materials in any locations. Historical evidence of architecture and urbanism remains shows a widespread use adobe throughout history of human life around the world [1]. A well-known list of ancient and historical architectural structures of Iran can be prepared in which adobe has been used as an architectural element. The remnants of historical architecture in the archaeological site known as the city of Belqis, located south of the city of Esfarayen, North Khorasan province, which has been identified and added to this list during the studies of the last decade, including adobe structures that are subject to erosion. The remaining structures of historical site of Belqis include: citadel and surrounding moat, The Sharestan (downtown) includes towers and walls, remains of tomb called Sheikh Azari's, ruins known as Menar Tappeh (Grand Mosque), pottery kilns, reservoir (water storage underground), bAzAr (marketplace), caravanserai(inn), yaxdAn (Ice storage on the ground) in 700 meters in west of citadel and a vast cemetery near Eastern Gate [2]. Since 2009, conservation and restoration activities have been started decentralized by interventions in site. Although protective measures are underway in form of practical interventions as repairs or reconstructions, erosion seems to be at a relatively high rate in recent sectors. As a rule, renewal of interventional periods in a short period of time, regardless of quality of materials, does not provide favorable results [3]. This attitude is important in Belqis site which is at the beginning of the study path so that the erosion of structures is do do simultaneously during restoration measures and sensitivity to this issue should be at the forefront of the studies in the site. Although some preliminary studies have been done to make the adobe used in the restoration interventions, erosion due to descending moisture in the adobe used in this area is progressing significantly.

Methods and Materials

Soil was prepared from mine in near of Belqis in depth of 100 cm. additive material, is clinoptilolite zeolite, which for better dispersion and mixing with soil, was prepared in powder form. zeolite and soil were combined in dry state in amount of 2, 4, 6 and 8% of dry soil weight of each sample. After 24 hours in combination with water, that were mixed three times and each time for twenty minutes. Samples were prepared in standard molds and placed away from direct sunlight and wind in 27 °C. After three days and initial drying samples, they were placed in direct sunlight for 12 days. The tests were analyzed in laboratory environment using statistical methods and techniques and improved criteria (Table. 1). According to the research questions, physical and chemical studies methods was performed. Data analysis was performed by focusing on results obtained from laboratory and reviewing related studies in this field through scientific articles and documents. Elemental analysis was performed by (X-Ray Fluorescence) technique a S4 PIONEER device (made in Germany), a 4-kW wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometer (WDXRF) that ranges between 208 V, 60 Hz (1P/3P) and 230 V 50,60 Hz (3P). The detector gas is P10 gas (10 % methane, 90 % argon) by quality and safety (DIN EN ISO 9001:2000 CE) certified fully radiation protected system (BfS). Also X-ray diffraction was performed using a Bruker D8(made in Germany) Advance and K α radiation (K α 1=1.540598 Å, K α 2=1.544426 Å, K α ratio 0.5, K α av=1.541874 Å) within a scan range between 3° to 90° and a resolution of 0.05° per measurement step. All tests performed for this study are based on the American Society for Testing and Materials Standard (ASTM-D421-07, D422-07, D2487-11, D4318-10) and use standard tables and charts from Unified Soil Classification System (USCS).

Table. 1: Methodology for identifying composition of clay and soil of Belqis historical site

Physical studies	Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils (ASTM D422-63)
	Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants (ASTM D421-63)
	Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer (ASTM-D4221)
	Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (ASTM D4318-17E1)
	The Colloidal "Activity" of Clays Activity = Plasticity index / Clay fraction in soil (%)
Chemical and mineralogical studies	XRF (X-Ray Fluorescence)
	XRD (X-Ray Diffraction)

RESULTS

• **Soil texture**

Based on soil texture diagram and Table 2, soil composition in samples containing zeolite (N code), are fine grains of sand, silt and clay. The amount of silt and clay is higher than sand, which implicitly classifies the soil except the fine category, and the cumulative percentage of silt and clay (particles smaller than 0.075mm) in (N) samples is over 90%. Silt and clay are the main components of fine soils. The average quantity of silt in samples is (35.84%). The quantity of clay in samples (N) compared to mine soil (M) is associated with a decrease between 2% and 5%, proportional to the quantitative growth of clay in the samples, PI has not encountered the amplitude of extensive changes (Table. 3).

Table. 2: Percentage of soil particles in the samples containing zeolite

Particles smaller than 0.075mm	Clay	Silt	Sand	Gravel	Sample
94.8%	58%	36.8%	5.2%	0	N-2
93.1%	58%	35.1%	6.9%	0	N-4
92.3%	55%	37.3%	7.7%	0	N-6
91.8%	56%	35.8%	8.2%	0	N-8
94.2%	60%	34.2%	5.8%	0	M

Table. 3: Atterberg limits for Belqis samples

Soil Class	Plastic Index (PI)	Plastic Limit (PL)	Liquid Limit (LL)	Sample
CL	%13	%17	%30	N-2
CL	%13	%19	%32	N-4
CL	%12	%19	%31	N-6
CL	%13	%19	%32	N-8
CL	%15	%18	%33	M

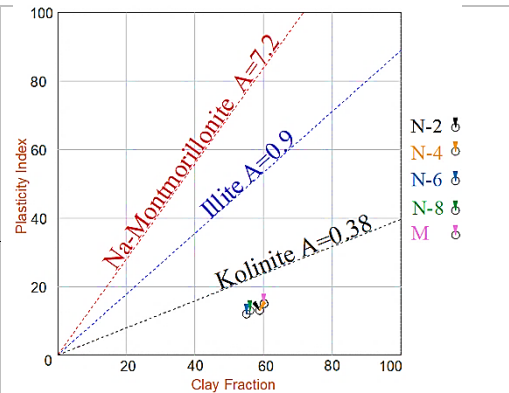
• **Soil Activity (A Index)**

With increasing clay and therefore water absorption, there is a risk of swelling and eventually cracking adobe. By adding zeolite to the soil and the amount of plasticity index (PI) and clay percentage in each sample, according to the index (A), the soil activity range for the samples is in the calcite range (Table. 4).

Table. 4: Activity of soil in Belqis sample

Activity	Clay (%)	(PI)	Sample
0.22	58%	%13	N-2
0.22	58%	%13	N-4
0.21	55%	%12	N-6
0.23	56%	%13	N-8
0.25	60%	%15	M

$$A = \frac{PI}{Clay\ fraction\ in\ soil\ (\%)}$$



• **plasticity chart**

Due to the amount of PI in all samples (PI<50), clay as a sticking factor of soil particles is lower than other particles such as silt and sand. What is identified as clay percentage in the gradation diagram does not necessarily include clay minerals in terms of mineralogy. Deficiency of clay minerals decreased soil PI in samples. Due to the fine-grained soil and according to the plasticity chart and according to the Unified standard (USCS), the soil type is in class (CL).

- **XRF Results**

In results (XRF), samples containing zeolite, silica, calcite and alumina elements as the three main phases are more quantitative than other elements (Table. 5). Silica (SiO₂) is the most abundant phase of mineralogy in the composition of (N) samples. In N samples, the zeolite added to the soil were 2%, 4%, 6% and 8%. There is an increase in the amount of silica from N-2 to N-4 samples. The decreasing trend of calcite (CaO) of samples is proportional to the increase in zeolite percentage. Metal oxides (Fe₂O₃), (K₂O) and (MgO) are secondary elements in the results of elemental composition.

Table 5: Elemental composition samples of historical site of Belgis

	Elements	N-2	N-4	N-6	N-8
High percentage Elements	SiO ₂	33.96	34.80	35.84	36.27
	CaO	23.66	22.64	21.85	21.82
	Al ₂ O ₃	10.40	10.10	10.40	10.20
low percentage Elements	Fe ₂ O ₃	4.84	4.69	4.35	4.43
	MgO	2.87	2.61	2.70	2.50
	K ₂ O	2.62	2.72	2.71	2.81
	Na ₂ O	0.613	0.759	0.792	0.869

- **Determination of soil mineralogical phases by Rietveld method**

By adding zeolite to the soil, mineralogical phases show significant qualitative and quantitative changes. According Table 6, three main soil phases including calcite, muscovite and quartz are qualitatively unchanged in all samples. calcite phase indicates on alkalinity of soil in region, which is result of limestone erosion. Calcite in limestone powder form does not show any reaction with water and will not a constructive role in quality of adobe. Muscovite is a disperser phase of soil and creates an inappropriate quality for adobe. quartz phase is due to presence of sand and silt in soil of region, which shows rich texture of silica in soil. dickite phase is a group of Illite that has potassium ion between its layers and dickite swells with water and shrinking after drying. Dickite phase decreases as zeolite increases.







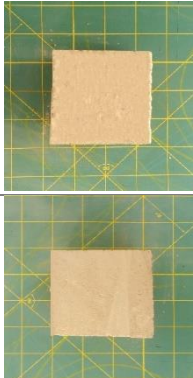
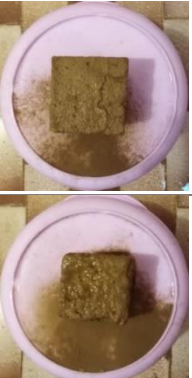




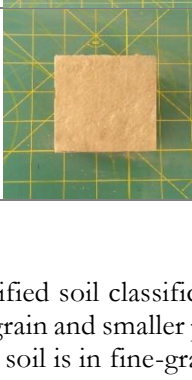
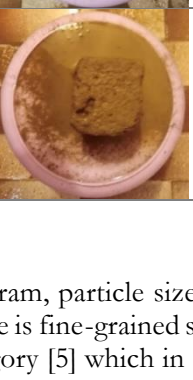
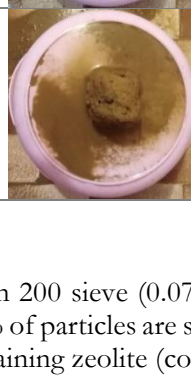
Table 6: Quantitative analysis of X-ray diffraction by Rietveld method in samples with zeolite

Soil Sample	M	N-2	N-4	N-6	N-8
Calcite (ICSD-028827)	44.1	35.6	34.1	29.1	29.9
Quartz (ICSD-027826)	26.2	25.4	21.0	24.4	24.4
Muscovite (ICSD-030297)	25.0	20.7	29.3	30.1	31.3
Dickite (ICSD-027679)	2.8	16.3	12.6	12.4	9.3
Zeolite (ICSD-066104)	0	2.3	3.1	4.1	5.1
Birnessite (ICSD-68918)	2.0	-	-	-	-

- **Erosion with water**

samples were subjected to water erosion at a constant speed through a shower at a height of 200 cm for 6 minutes. Time zero is beginning of erosion, third minute was average time of erosion and its end was recorded in sixth minute. Observations were documented to record changes due to erosion at regular intervals (Table. 8). Erosion of sample containing 2% zeolite was relatively slow in first three minutes and then accelerated more in second three minutes. sample 4% was like (N-2) except that erosion seemed slower and erosion rate was lower. sample 6%, eroded very slowly by the end of first 3 minutes. Sample (N-8) behaved like sample (N-2) and their structure was almost same at 3 and 6 minutes. sample without zeolite began to erode with very high speed at beginning of test process.

Table 7: Water erosion in Belqis samples containing Zeolite

Sample	Before Erosion	Erosion after 3min	Erosion after 6min
N-2			
N-4			
N-6			
N-8			
M			

Discussion

According to Unified soil classification diagram, particle size is larger than 200 sieve (0.075mm) including coarse grain and smaller particle size is fine-grained soil [4]. If 50% of particles are smaller than (0.075 mm), soil is in fine-grained category [5] which in samples containing zeolite (code N), minimum number of particles under sieve 200 is equal to 77% and maximum is 94%, than Soil of Belqis is in fine-grained category. lack of sand is related to geological conditions of region and formation of alluviums caused by erosion of highlands of Esfarayen region [6]. percentage of clay in sample (M) is not just clay and can be particles with clay sizes. With increase zeolite in N samples, PI level is relatively constant, which is related to mineralogical structure of zeolite. The main feature of clinoptilolite is water absorption and placement between three-dimensional positions (Site) and cavities (Cage) [7]. This is important to reducing cracks after drying adobe. The results (XRF) showed that elements of silica, calcite and alumina are three main phases of soil and zeolite has no role in changing this groups. The results (XRD) shown phases of calcite, quartz, muscovite, dickite and zeolite in “ N ” samples. calcite, as a destructive phase, does not have any reactions to improve soil quality on adobe. Dickite as a swollen phase in wet conditions and shrinkable in dry conditions can play a negative role in quality of adobe. Reducing amount of dickite with increasing zeolite has a positive indication of effect of additive on soil quality process in preparation of adobe. Regarding to reduction of dickite along with increase zeolite, can mention to cation exchange capacity (CEC) of clinoptilolite (typically 3-4 milliequivalents per gram) [8] that much higher than clay [9]. due to three-dimensional structure and surface area of zeolites that combination of many polar quadrilaterals, tendency to shift potassium of Dickite towards zeolite is more. than Dickite decomposes and its amount is reduced in results of quantitative analysis of X-ray diffraction by Rietveld method.

Conclusion

Studies on soil texture in Belgis Esfarayen historical site showed that soil of region in CL class of soil groups. Soil is made of inorganic clays with low to medium plasticity, which is classified as sandy, sandy and silty clays in terms of particle composition. XRF results showed that presence of 50% calcite in mine soil has led soil to alkalinity. XRD results confirmed the presence of a dispersive muscovite phase with dispersing properties. dickite, which is inflatable with quartz phase, is present in soil of area which in wet conditions can cause erosion of adobe. Zeolite, while stabilizing PI, has an effective role in controlling and reducing destructive phases of soil. Addition of 6% clinoptilolite zeolite to CL class soil with alkaline characteristic of calcite has a pozzolanic behavior and has caused relative control of soil destructive phases.

References

- [1] Houben H, Guillaud H. Earth Construction (A Comprehensive Guide): ITDG publishing; 2006.
- [2] Vahdati Aa. Archaeological Investigations in Sharh-E Balqays (Medieval Isfarayen) North Khorasan Province, Northeastern Iran. Bojnord: General Department of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism of North Khorasan Province [In Persian]; 2015.
- [3] Hoseini Keshtan R, Emami MA, zamanifard A. The role of chemical parameters and soil texture quality in the erosion of adobe in the Belgias historical site. Scientific Journal of Maremat & Me'mari-e Iran (quarterly). 2019;9(18):91-110 [In Persian].
- [4] Budhu M. Soil Mechanics and Foundations: Wiley; 2010.
- [5] Das BM. Principles of Geotechnical Engineering: Cengage Learning; 2021.
- [6] Fadaei A. The Geography of Esfarayen. Mashhad: Astan qhods Razavi. Printing and Publishing Institute. [In Persian]. 1995.
- [7] Bish DL, Ming DW. Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications: De Gruyter; 2018.
- [8] Sels B, Kustov L. Zeolites and Zeolite like Materials: Elsevier Science; 2016.
- [9] Munthali MW, Kabwadza-Corner P, Johan E, Matsue N. Decrease in cation exchange capacity of zeolites at neutral pH: examples and proposals of a determination method. Journal of Materials Science and Chemical Engineering. 2014 Aug 11;2014.



کاربرد زئولیت در کاهش فرسایش خشت محوطه تاریخی بلقیس

سید رضا حسینی کشتان^{*۱}

۱. دکتری حفاظت و مرمت بنا و بافت‌های تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹

چکیده

محوطه تاریخی بلقیس، شامل ساختارهای خشتی و گلی به وسعت ۱۸۰ هکتار در سه کیلومتری جنوب شهر کنونی "اسفراین" در خراسان شمالی ایران واقع گردیده است. فرسایش پذیری خشت‌های استفاده شده در مداخلات عملی مرمت در برابر رطوبت نزولی این محوطه مسئله‌ای است که این تحقیق بدان پرداخته است. این تحقیق با کاربرد ماده معدنی زئولیت کلاینوپتیلولیت به عنوان ماده افزودنی به خاک برای بهبود کیفیت خشت با هدف کاهش روند فرسایش در برابر رطوبت از طریق بررسی خاک به کمک مطالعات فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیک انجام یافته است و با تحلیل نتایج آزمون‌های بافت خاک، آبشویی، XRF، XRD، و بهره‌گیری از جداول طرح طبقه‌بندی خاک (USCS) (یونیفاید) فازهای مخرب کلسیت، مسکویت و دیکیت به عنوان پارامترهای شیمیایی مؤثر خاک در فرسایش خشت شناسایی شدند. زئولیت با ساختار کریستالی سه‌بعدی و آزادسازی آهسته رطوبت سبب کنترل در رفتارهای فازهای مخرب عنوان شده گردید و نمونه حاوی شش درصد ماده افزودنی تحت آزمون آبشویی، با فرسایش کمتری مواجه شد و پس از گذشت پانزده دقیقه همچنان با حداقل فرسایش مواجه گردید که در مقایسه با سایر نمونه‌ها پایداری قابل توجهی از خود نشان داد.

واژگان کلیدی: خشت، حفاظت، زئولیت، رطوبت نزولی، بلقیس اسفراین.

* نویسنده مسئول مکاتبات: خیابان حکیم نظامی، روبروی خیابان خاقانی، دانشگاه هنر اصفهان، کدپستی: ۸۱۷۳۸۷۶۸۱
پست الکترونیکی: hosynireza@yahoo.com

۱. مقدمه

فراوان‌ترین ماده در معماری که همپای تاریخ بشر تاکنون مورد استفاده قرار گرفته خاک است، که برحسب آنچه می‌تواند در جوامع به معنای کلی به انجام رساند، حائز اهمیت است [1]. نقش خاک به‌عنوان عنصر بنیادین و سازمان‌دهنده بخشی از معماری در مقاطع مختلف تاریخی جوامع انکارناپذیر است. معماری با خاک گونه‌ای از معماری است که در گستره سرزمین‌های مختلف برحسب فنون ساخت‌وساز با گوناگونی همراه است. گل حاصل ترکیب آب و خاک نخستین و ساده‌ترین اقدام بشر در مسیر شکل‌بخشی به انواع معماری بوده است [10]. ریوز (Reeves) معتقد است معماری خاکی شامل هرگونه فن ساخت مسکن است که ماده اصلی آن را خاک تشکیل دهد [11]. گستره وسیعی از ساختارهای معماری می‌تواند در این مفهوم شناخته شوند که با تفکیک روش‌های متنوع ساخت با خاک، معماری خشتی یکی از شناخته‌ترین شیوه‌ها در اغلب مناطق جهان به‌شمار می‌آید [12]. شواهد تاریخی معماری و شهری به‌جامانده، مبین استفاده گسترده از خشت در طول تاریخ حیات بشر در سراسر جهان است. بسیاری از سایت‌های باستانی با خشت، یا ترکیبی از خشت و گل ساخته شده‌اند که در مناطق مختلف به‌ویژه در خاورمیانه دیده می‌شوند [13]. بر مبنای شواهد باستان‌شناسی سابقه استفاده از خشت در ایران به هزاره ششم قبل از میلاد می‌رسد [14]. فهرست شناخته‌شده‌ای از ساختارهای معماری باستانی و تاریخی ایران را می‌توان تهیه نمود که خشت به‌عنوان عنصر سازنده معماری در آن‌ها به‌کار رفته است. بقایای معماری تاریخی در محوطه باستان‌شناسی معروف به شهر بلقیس واقع در سه کیلومتری جنوب شهر اسفراین استان خراسان شمالی که طی مطالعات دهه اخیر شناسایی و به این فهرست اضافه شده است، شامل ساختارهای خشتی است که در معرض فرسایش ناشی از بارندگی قرار دارد. این مسئله در تمام محوطه‌های باستان‌شناسی دارای ساختارهای خشتی دیده می‌شود؛ زیرا رطوبت مهم‌ترین عامل فرسایش خشت است [15]. مطالعات نشان می‌دهد که در زمان مداخلات حفاظتی، رفتار فرسایشی رطوبت

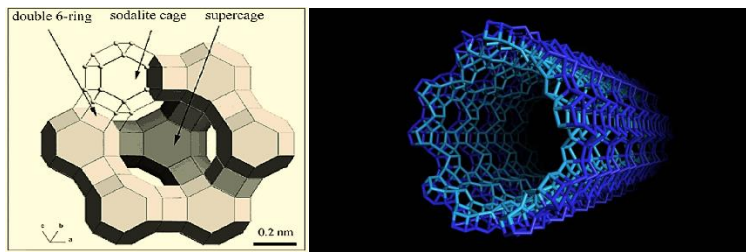
در بخش‌هایی که خشت نامرغوب استفاده شده، بیشتر است [16].

۲. پیشینه پژوهش

بر اساس اطلاعات باستان‌شناسی استفاده از خشت در ساختار معماری ایران به هزاره ششم قبل از میلاد می‌رسد [14]. مناطقی چون تپه‌علی‌کُش دهلران، تپه حسنلو و تپه زیویه از این جمله است. خشت‌های به‌نسبت بزرگ معبد تپه زاغه در قزوین که به‌صورت قالب‌نژده ساخته شده‌اند، جزو اولین نمونه‌های کاربرد خشت در تاریخ معماری ایران است [17]. همچنین در شهر سوخته سیستان از هزاره سوم پیش از میلاد طاق‌های خشتی رواج داشته است [18]. برخی آثار موجود در هفت‌تپه دارای ساختار خشتی است که برای پرکردن حجم‌های بزرگ مانند صدف و دیوار به‌کار می‌رفته است [19]. علاوه بر این، در نوشی‌جان تپه ملایر متعلق به دوره ماد و هخامنشی برای ساخت پایه‌ها، قوس‌ها و طاق از خشت به‌عنوان عایق استفاده شده است [20, 21]. قلعه کوه خواجه در زابل و ارگ بم، حاوی آثاری از دوره ساسانی تا قاجاری، دارای ساختار خشتی است [22, 23]. همچنین در بخش‌هایی از زیگورات چغازنبیل نیز از خشت استفاده شده است [24]. هرچند که بخش عمده‌ای از میراث فرهنگی جوامع در قالب تک‌بناها، محوطه‌های باستانی و شهرهای تاریخی شامل ساختارهای خشتی است که تا امروز دوام آورده‌اند؛ اما خشت خام همواره در معرض آسیب‌های ناشی از شرایط محیطی بوده و معماران سستی با هدف بهبود کیفیت آن تلاش‌هایی کرده‌اند [25]. تاب‌آوری خشت در برابر عوامل آسیب‌رسان از جمله رطوبت در رویکرد مقاوم‌سازی که مبتنی بر حفاظت است، اقدامی است که می‌تواند از طریق تثبیت خاک و به کمک مواد افزودنی به انجام رسد. مسئله فرسایش‌پذیری خشت در برابر رطوبت در دوره‌های مختلف تاریخی نزد معماران موضوع شناخته شده‌ای بوده است و استفاده از ماده‌ای غیر از خاک به‌شکل افزودنی با هدف بهبود خاک و دوام مصالح همواره مورد

مطالعات خشت، گویای این واقعیت است که در مواجهه با مسئله فسادپذیری مواد آلی و عدم اطمینان قطعی از نتایج استفاده از مواد سنتزی، استفاده از مواد معدنی به‌عنوان افزودنی به خشت با هدف تاب‌آوری در برابر فرسایش ناشی از رطوبت نزولی، نزد پژوهشگران و سازندگان خشت در حوزه حفاظت و مرمت در اولویت قرار دارد. گروهی از این مواد معدنی پوزولان‌ها هستند. مطابق استاندارد، ASTM C618- 9A، پوزولان ترکیب آلومینوسیلیسی است که به‌تنهایی خاصیت چسبندگی ندارد یا چسبندگی کمی دارد. این ماده معدنی در حالت پودر (ذرات ریز) با حضور رطوبت در دمای محیط با وجود هیدروکسید کلسیم می‌تواند تشکیل سیلیکات‌های کلسیم پایدار دهد که دارای خواص چسبندگی است [44]. این ماده رفتار دوگانهٔ سیمانی‌شدن و پیونددهی دارد [1] و سبب ایجاد ترکیبی با خاصیت سیمانی‌شدن در روند بهبود چسبندگی ذرات خاک می‌شود. به‌نظر می‌رسد ترکیب آلومینوسیلیس موجود در پوزولان به‌عنوان پیش‌شرط فرایند سیمانی‌شدن نقش مؤثری دارد. بر این اساس، اگر مادهٔ افزودنی دارای ترکیب آلومینوسیلیسی باشد، می‌توان انتظار رفتار مشابه پوزولان را در خاک داشت. ژئولیت‌ها گروهی از ترکیبات معدنی متشکل از کانی‌های آلومینوسیلیکات هستند [45] که در اغلب مناطق دنیا یافت می‌شود. ژئولیت در تعریف عمومی به آلومینوسیلیکات‌های آبدار با ساختار بلوری متشکل از عناصر قلیایی و قلیایی-خاکی گفته می‌شوند که در ترکیب آن تعداد زیادی از چهار وجهی‌های $[\text{SiO}_4]^{4-}$ و $[\text{AlO}_4]^{4-}$ وجود دارند [46] که توسط اتم‌های اکسیژن به‌هم متصل و ساختار سه‌بعدی ژئولیت را تشکیل می‌دهند [8] ژئولیت‌ها، بر اساس واحد بلورین آن‌ها با فرمول عمومی $M_{x/n}[(\text{AlO}_2)_x(\text{SiO}_2)_y] \cdot w\text{H}_2\text{O}$ نمایش داده می‌شود. مهم‌ترین ویژگی ژئولیت‌ها در مقایسه با سایر ترکیبات معدنی و حتی رس، ساختار سه‌بعدی و حفرات موجود در این نوع ترکیبات، آبگیری، پایداری در برابر (حرارت، تشعشع) و تبادل یونی است [45] (شکل ۱).

توجه این دسته معماران بوده است [26]. اما تلاش‌های آکادمیک آن به سال‌های ۱۹۲۰ میلادی برمی‌گردد که از آن تاریخ به بعد در حال تحقیق و توسعه بوده است. افزودنی‌های به خشت در دو دستهٔ عمدهٔ معدنی و آلی قابل شناسایی هستند. در زمینهٔ کاربرد مواد معدنی، افرادی چون [27, 28] دیدگاه‌های خود را مطرح کرده‌اند و به موازات ایشان در زمینهٔ کاربرد مواد آلی تحقیقات بسیاری انجام پذیرفته است که [29, 30] شامل این موارد هستند. گستردگی و فراوانی مواد افزودنی در تثبیت خاک به‌نحوی است که نمی‌توان و لزوماً شاید نیاز نباشد به طرح تمام آن‌ها پرداخته شود، زیرا در جغرافیای گسترده‌ای که معماری خاکی در قالب ساختارهای تاریخی به‌جا مانده‌اند و یا معماری امروزی که همچنان استفاده از خاک و خشت را متوقف نموده است، تحقیقات منوط به مقاوم‌سازی خشت یا تثبیت خاک در حال انجام است. بخشی از نوشتارهای کتاب ساخت‌وساز با خاک نوشته هوبن و گیولد [1] و نیز مشابه همین مباحث در کتاب مینکه [31] و طرح این موضوع به شکل کلی‌تر در کتاب وارن [12] بخشی از این مطالعات را دربرمی‌گیرند. مقالات متعددی در کنفرانس‌ها و نشست‌های تخصصی داخلی و بین‌المللی به مسئلهٔ فرسایش‌پذیری خشت در برابر رطوبت پرداخته و راهکارهای پیشنهادی خود را ارائه نموده‌اند. کاربرد گچ را در مطالعات [32, 33] می‌توان دید. استفاده از سیمان با هدف تثبیت خاک - که البته با توجه به رفتار سیمان که کاربرد سفارش شده‌ای در حوزهٔ حفاظت و مرمت برای آن نمی‌توان پیدا کرد- در مطالعات [28, 34] مطرح شده است. همچنین در استفاده از آهک برای تثبیت خاک به مطالعات [35, 40] می‌توان اشاره کرد. در زمینهٔ افزودنی‌های آلی، برخی اطلاعات از سال ۱۹۷۵ تا امروز به ثبت رسیده است. میزان تحقیقات به تناسب مواد موجود، از کمیت بالایی برخوردار است. برای نمونه می‌توان به مطالعات [29, 30, 38, 41, 43] اشاره نمود که در کاربرد و نتایج استفاده از انواع مواد آلی طبیعی با منشاء حیوانی و گیاهی، بررسی‌هایی را انجام داده‌اند. وجه مشترک



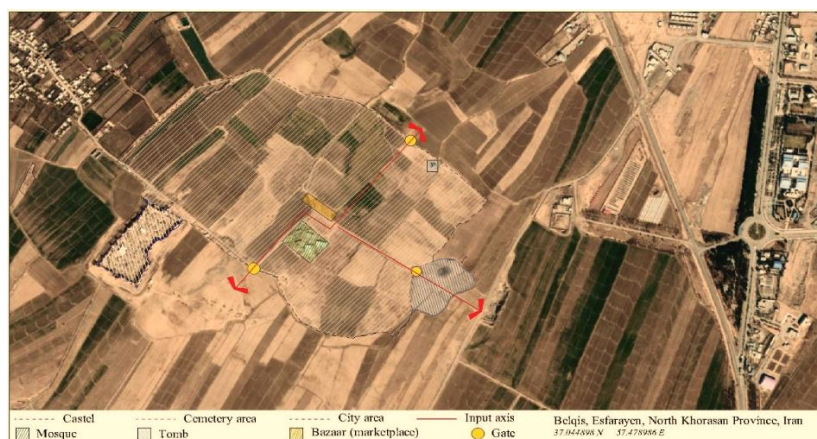
شکل ۱: شماتیک سه‌بعدی ساختار زئولیت و استقرار یون در موقعیت‌های مختلف
Fig. 1: Three-dimensional schematic of zeolite (Kulprathipanaja, 2010)

با نام اسفراین در کتاب «فتوح البلدان» به قرن دوم و سوم هجری قمری است [50]. با آنکه اسفراین طی حملات مغول، صدمات و خسارات متعددی متحمل شده بود اما با روی کار آمدن ایلخانان، ضرب سکه در اسفراین نشانه اهمیت و جایگاه شهر از منظر سیاسی و نیز استقلال نسبی آن در قیاس با نواحی مجاور همچون ابرشهر نیشابور است. این امر در دوران سربداران نیز ادامه یافت تا اینکه در قرن هشتم با حمله تیمور، اسفراین از رونق عهد ایلخانی می‌افتد. مجدداً در عهد صفوی اسفراین آباد و البته محدوده شهری آن در مقایسه با دوره ایلخانی کوچک‌تر می‌شود. با حمله ازبک‌ها و افغان‌ها، به اسفراین صدمات بسیاری وارد می‌شود. ساختارهای به‌جامانده از محوطه تاریخی بلقیس شامل ارگ و خندق پیرامون آن، شارستان شامل برج و بارو، بقایای یک بنای آرامگاهی به نام مقبره شیخ آذری، ویرانه‌های معروف به منارتپه (مسجد جامع)، کوره سفالگری، آب‌انبار، بازار، کاروانسرا، مجموعه یخدان‌ها در فاصله هفتصدمتری غرب ارگ و یک گورستان وسیع در نزدیکی دروازه شرقی است (شکل ۲).

از آنجا که زئولیت رفتار دوگانه فوق‌دار است [47] و ساختار این ماده شباهت زیادی به رس دارد [45]، به نظر می‌رسد بتوان در خاک‌های کلسیتی با توجه به فقر نسبی رس و درصد بالای سیلت و حضور کلسیت، رفتار شبه پوزولانی از خود نشان دهد و طی فرایند مقاوم‌سازی خاک با هدف دوام بیشتر خشت در برابر فرسایش از آن استفاده کرد.

۳. محوطه بلقیس

محوطه تاریخی بلقیس بقایای به‌جامانده از معماری خشتی است که بالغ بر ۱۸۰ هکتار وسعت دارد. این محوطه در سال ۱۳۸۰ به شماره ۴۴۹۷ در فهرست آثار ملی کشور به ثبت رسیده است [48]. بر اساس مطالعات تاریخی، باستان‌شناسی و معماری، نخستین بار در سده دوم یا سوم قمری مسکونی شده است [49] و تا سده ۵ و ۶ قمری تحت تأثیر فرهنگ نیشابور بوده است. نام اسفراین را در آثار به‌جامانده از تاریخ‌نگاران، جغرافی‌نویسان و متون برج‌مانده از سده‌های دوم تا یازدهم قمری شاهد هستیم. اولین اشارات به این منطقه



شکل ۲: موقعیت محوطه تاریخی بلقیس
Fig. 2: Location of Belqis Historical Site

محوطه است. مقایسه مدت زمان بروز فرسایش خشت‌ها در بخش‌های مرمت‌شده با سایر قسمت‌های تاریخی که اقدامات حفاظتی در آن صورت نگرفته است، گویای تفاوت معناداری در کیفیت مصالح مورد استفاده طی اقدامات مرمتی است که از منظر حفاظتی می‌باید مورد بازبینی قرار گیرد.

۴. آسیب‌شناسی در ساختارهای خشتی محوطه بلقیس و طرح مسئله برخورد با تأثیرات رطوبت نزولی

محوطه تاریخی بلقیس در کنار آسیب‌های حاصل از کاوش‌های غیرمجاز و عوارض ناشی از بازدید عموم، فرسایش ناشی از رطوبت نزولی را در خود دارد. دوغابی شدن سطوح دیوارها در اثر فرسایش و ایجاد ترک‌های سطحی در لایه دوغابی پس خشک‌شدن، بریدگی و فرسایش شدید دیوارها و شستگی عمیق در اثر روان آب حاصل از بارندگی در مدت زمان بسیار کوتاه پس از مداخلات مرمتی، بخشی از این آسیب‌ها به‌شمار می‌رود. مسئله‌ای که به‌صورت جدی در محوطه بلقیس با آن مواجهیم، دوام کم خشت‌های مورد استفاده در فرآیندهای مرمتی و در نتیجه توسعه آسیب‌های ناشی از رطوبت نزولی در بخش‌های مرمت شده است. شاهد این مدعا وجود ترک‌خوردگی‌های جدی طی فرآیند ساخت خشت در حین آماده‌سازی آن‌ها در کارگاه مرمت است (شکل ۳).

از سال ۱۳۸۸ محوطه تاریخی بلقیس به‌عنوان پایگاه میراث فرهنگی شناخته شد و هم‌زمان با مطالعات باستان‌شناسی، اقدامات حفاظتی و مرمتی تاکنون در محدوده محوطه انجام گرفته است. مداخلاتی همچون استحکام‌بخشی قسمت‌هایی از باروی نارین‌قلعه، آستر کاهگل باروی غربی، بدنه‌سازی در بقایای باروی شارستان و خواناسازی کنگره‌های باروی غربی از این جمله است. در محوطه بلقیس هرچند اقدامات حفاظتی به شکل مداخلات عملی به‌صورت تعمیر یا بازسازی در جریان بوده، اما به نظر می‌رسد فرسایش در بخش‌های اخیر از سرعت به‌نسبت بالایی برخوردار است. قاعدتاً تجدید دوره‌ای مداخلات در بازه زمانی کوتاه‌مدت بدون توجه به کیفیت مصالح نتایج مطلوبی را فراهم نمی‌سازد. توجه به این مسئله در محوطه بلقیس که در آغاز راه مطالعات است، از اهمیت برخوردار است تا زمینه فرسایش ساختارها هم‌زمان طی اقدامات مرمتی فراهم نگردد. هرچند برخی بررسی‌های اولیه برای ساخت خشت مورد استفاده در مداخلات مرمتی این محوطه انجام گرفته است، اما دوام کم خشت‌ها در برابر بارندگی در مدت زمان بسیار کوتاه پس از مداخلات سبب شده تا بخش‌های بازسازی شده همچنان با آسیب مواجه شوند. ایجاد شیارهای عمیق در بخش‌های مختلف، آره‌آره‌شدن رأس دیوارها و پوشانده‌شدن سطوح دیوار با دوغاب حاصل از آبشویی، بخشی از فرسایش ناشی از رطوبت نزولی در این



شکل ۳: فرسایش خشت‌ها و ساختار دیوارها در محوطه تاریخی بلقیس

Fig. 3: Erosion in adobes and walls structure in Belqis Historical Site

دارند [15] و اکثر فرسایش موجود در معماری خشتی به‌طور مستقیم به اثرات باران مرتبط است [51].

کالبد‌های خشتی به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم در معرض آسیب حاصل از حضور بیش‌ازحد رطوبت قرار

ابتدا زئولیت آسیاب و در حالت خشک با خاک ترکیب گردید. برای هر درصد از نمونه‌ها، شش عدد تهیه و نتایج به صورت میانگین ثبت گردیده است. برای تعیین بافت خاک، آزمون دانه‌بندی مطابق استاندارد (ASTM-D422-07) انجام گرفت و داده‌ها به کمک جداول استاندارد طرح طبقه‌بندی خاک (USCS) (یونیفاید) با استاندارد ASTM-D2487-11 تحلیل و نتایج فراهم شد. در تعیین درصد ذرات خاک، داده‌های مستخرج از نمودار دانه‌بندی به کمک منحنی توزیع اندازه ذرات بررسی و نتایج این آزمون ثبت گردید. خواص اندیسی خاک از طریق تست حدود آتربرگ مطابق با استاندارد (ASTM-D4318-10) انجام شد. در تعیین شاخص فعالیت خاک (Index A)، با کمک داده‌های درصد ذرات خاک و حدود آتربرگ، با استفاده از فرمول مربوط به "فعالیت" کلئیدی خاک رس مطابق نمودار اسکمپتون تعیین گردید. برای تعیین فازهای مینرالی خاک در نمونه‌ها و تحلیل نتایج XRD، داده‌های خروجی دستگاه (Bruker D8) ساخت کشور آلمان و توسط بانک اطلاعات کریستالوگرافی جهانی با مرجع ICSD مقایسه گردید و داده‌های خام به کمک نرم‌افزار Xpert HighScore تحلیل علمی شد. خاک نمونه‌های آزمودنی به صورت پودر آماده گردید و بررسی ترکیب عنصری به کمک دستگاه طیف‌سنجی فلئورسانس اشعه ایکس (S4 PIONEER) انجام شد. داده‌های خام بر اساس جداول استاندارد مراجع علمی [53] در زمینه ترکیب عنصری خاک، تحلیل و نتایج ثبت شده است. همچنین آزمون آبشویی، که مقایسه میزان فرسایش‌پذیری نمونه‌ها در شرایط یکسان است و با مشاهده میزان فرسایش‌یافتگی نمونه‌ها که در بازه‌های زمانی معین قابل ثبت و تحلیل است، روی نمونه‌ها انجام گرفت. در این آزمون در بازه‌های زمانی معین تحت فرسایش آبی یکسان مقدار فرسایش‌یافتگی هر نمونه مشاهده و میزان دوام هر خشت در مقایسه با سایرین ثبت گردید (جدول ۱).

از طرفی، آسیب‌های وارده در محوطه‌های خشتی تحت تأثیر رطوبت شامل (باران، زهکشی و اثر موئینه)، آب‌شستگی، انبساط حرارتی و انقباض است که این مسئله می‌تواند با کیفیت مواد سازنده مرتبط باشد [52] در مطالعه‌ای در محوطه بلقیس، مشخص گردید خاک مورد استفاده در تهیه خشت‌های مرمتی در دسته CL قرار دارد که از خانواده خاک‌های حاوی رس کم توأم با سیلت است [3] این امر سبب می‌گردد اقدامات مرمتی در مداخلات موضعی با خشت‌هایی انجام پذیرد که در برابر فرسایش ناشی از رطوبت نزولی از مقاومت کمی برخوردار گردد. کاربرد خشت‌های نامرغوب سبب کاهش طول عمر اقدامات و در نتیجه توسعه آسیب به نواحی جانبی و گسترش فرسایش در ساختارهای محوطه بلقیس شده است. به نظر می‌رسد با توجه به کیفیت خاک منطقه بتوان راهبردی از طریق تقویت خاک به کمک ماده افزودنی با هدف بهبود کیفی آن برای تهیه خشت تدوین و نخستین گام حائز اهمیت در پیشبرد سیاست‌های حفاظتی در این محوطه را برداشت.

۵. مواد و روش‌ها

این پژوهش زمینه شرایط افزایش مقاومت خشت در برابر رطوبت نزولی در ساختار تاریخی را بررسی می‌کند. تحقیق از نظر روش، جزو تحقیقات آزمایشی و از نوع آزمایشگاهی، میدانی و طبیعی است. نتایج آزمون حاصل مقایسه بین نمونه‌های آزمایشی ساخته‌شده در ابعاد ۵×۵ استاندارد از خاک معدن نزدیک محوطه است که در تهیه خشت مرمتی مورد استفاده قرار گرفته است. با هدف بررسی و مقایسه تغییرات، نمونه‌های ساخته‌شده در آزمایشگاه حاوی ۲درصد، ۴درصد، شش درصد و ۸درصد وزنی خاک خشک از ماده افزودنی زئولیت کلینوپتیلولیت است (با کد معرف N) که از معدن زئولیت افرازند سمنان به صورت گرانول تهیه شده است. برای این تحقیق با هدف پراکنش حداکثری و توزیع مناسب دانه‌بندی

۶. یافته‌ها

۶.۱. بررسی بافت خاک

بر مبنای اطلاعات مستخرج از نمودار دانه‌بندی و بر اساس (جدول ۲) ترکیب خاک در نمونه‌های حاوی زئولیت (با کد معرف N)، شامل ریزدانه‌های ماسه، سیلت و رس است. درصد تجمعی میزان سیلت و رس (بالغ بر ۹۰ درصد) در مقایسه با ماسه بیشتر است که بر اساس استاندارد (ASTM-D2487-11) خاک جزو دسته ریزدانه طبقه‌بندی می‌شود. بالا بودن مقدار ذرات در ابعاد رس و سیلت در نمونه‌ها ناشی از شرایط معدن است. معدن مورد استفاده پایگاه تاریخی بلقیس برای تهیه خشت در ناحیه جنوب‌غربی محوطه، حاصل آبرفت رودخانه فصلی اسفراین است و لایه بالایی خاک تا عمق صد سانتی‌متر و در برخی قسمت‌ها حتی عمیق‌تر، فاقد شن است. لذا در نمونه‌ها شاهد صفر شدن درصد شن و کاهش درصد ماسه

هستیم. میزان ماسه زیر 10 درصد است که می‌تواند مربوط به شرایط زمین‌شناختی منطقه باشد. سیلت و رس اصلی‌ترین اجزای سازنده خاک‌های ریزدانه است. میانگین کمیت سیلت در نمونه‌ها (35.84%) است. کمیت رس در نمونه‌های (N) در مقایسه با خاک معدن (M) با کاهش بین 2 درصد تا 5 درصد همراه است. به شکل معمول، متناسب با رشد کمی رس، دامنه خمیری نیز افزایش می‌یابد، در نمونه‌های بلقیس، هرچند درصد رس (ذرات در ابعاد رس) عدد قابل توجهی را نشان می‌دهد اما تغییرات دامنه خمیری نسبتاً عدد ثابتی است (جدول ۳). نتایج بافت خاک نشان می‌دهد بالغ بر 50 درصد ترکیب خاک حاوی رس است، ولی دامنه محدود شاخص خمیری گویای این موضوع است که ریزدانه بودن برای شناخت خاک کافی نیست بلکه نوع ریزدانه (مثلاً کوارتز خرد شده یا کانی‌های رسی) باید مشخص شود.

جدول ۱: روش تحقیق برای تعیین ترکیب خاک

Table 1: Methodology for identifying the composition of Soil

مطالعات فیزیکی	دانه بندی	تعیین بافت خاک
	حدود آتبرگ	
	آبشویی	
مطالعات شیمیایی	طیف‌سنجی فلئورسانس اشعه ایکس	تعیین ترکیب شیمیایی
	طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس	تعیین فازهای خاک

جدول ۲: درصد ذرات خاک نمونه‌های حاوی زئولیت

Table 2: Percentage of soil particles in the samples containing zeolite

Particles smaller than 0.075mm	Clay	Silt	Sand	Gravel	Sample
94.8%	58%	36.8%	5.2%	0	N-2
93.1%	58%	35.1%	6.9%	0	N-4
92.3%	55%	37.3%	7.7%	0	N-6
91.8%	56%	35.8%	8.2%	0	N-8
94.2%	60%	34.2%	5.8%	0	M

جدول ۳: حدود آتبرگ برای نمونه‌های بلقیس

Table 3: Atterberg limits for Belqis samples

Soil Class	Plastic Index (PI)	Plastic Limit (PL)	Liquid Limit (LL)	Sample
CL	%13	%17	%30	N-2
CL	%13	%19	%32	N-4
CL	%12	%19	%31	N-6
CL	%13	%19	%32	N-8
CL	%15	%18	%33	M

۲.۶. فعالیت خاک (شاخص A)

عدد فعالیت خاک (Activity Number) نسبت دامنه خمیری (PI) به درصد وزنی ذرات ریزتر از (0/002mm) است. آگاهی نسبت به اینکه با افزودن زئولیت به ترکیب، نسبت فعالیت رس چه تغییری می‌کند حائز اهمیت است. زیرا با افزایش رس و در نتیجه جذب آب، خطر تورم و در نهایت ترک وجود دارد. وقتی در خاک‌های ریز دانه بر اساس جدول بافت خاک شاهد مقادیر چشم‌گیر ذرات در ابعاد ریزتر از (0/002mm) باشیم و از طرفی شاخص خمیری (PI) عدد قابل توجهی را نشان ندهد، بررسی غیرشیمیایی ترکیب خاک به کمک شاخص فعالیت خاک می‌تواند محدوده نمونه خاک را به لحاظ ترکیبات همراه با خاک و احتمال وجود ذرات در ابعاد رسی را تخمین زند. این شاخص در نمونه‌های بلقیس با توجه به (PI) و درصد رس موجود در هر نمونه طبق فرمول شاخص (A) در محدوده کلسیت است که احتمال بالابودن ذرات رسی را در خاک نمونه‌ها تأیید نمی‌کند (جدول ۴).

۳.۶. نمودار خمیری

با توجه به (PI) کم در همه نمونه‌ها ($PI < 50$)، مقدار رس به عنوان فاکتور چسباننده ذرات خاک در مقایسه با سایر ذرات همچون سیلت و ماسه، کمتر است. هرچند عامل کمی رس نخستین فاکتور در فرسایش‌پذیری ساختارها در برابر رطوبت محسوب می‌گردد [4]، از طرفی، عامل کیفی رس نیز در رفتار خاک مؤثر است، زیرا رس‌ها به علت ساختار بلوری دارای نیروهای سطحی هستند که نوع رس و ساختار آن در میزان و رفتار نیروی سطحی آن‌ها مؤثر است [54]. همچنین آنچه به عنوان درصد رس در نمودار دانه‌بندی شناسایی می‌شود، لزوماً به لحاظ مینرالوژی شامل کانی‌های رسی نمی‌باشند. ممکن است عدد کمی مقدار رس صرفاً به خاطر وجود رس در ترکیب خاک نباشد و ذراتی در اندازه رس و با ترکیب شیمیایی دیگر همراه رس باشند و مقدار کمی

را تغییر دهند. نتایج عدد فعالیت رس نشان داد بخشی از کانی‌های موجود در خاک شامل کلسیت و کوارتز است که مبین فقر کانی‌های رسی در مجموع درصد عبوری از الک ۲۰۰ در هر نمونه است [3]. فقر کانی‌های رسی سبب کاهش (PI) خاک در نمونه‌ها شده است که با توجه به ریزدانه بودن خاک، مطابق نمودار خمیری بر اساس استاندارد یونیفاید (USCS) نوع خاک نمونه‌ها در کلاس (CL) قرار می‌گیرد (شکل ۴).

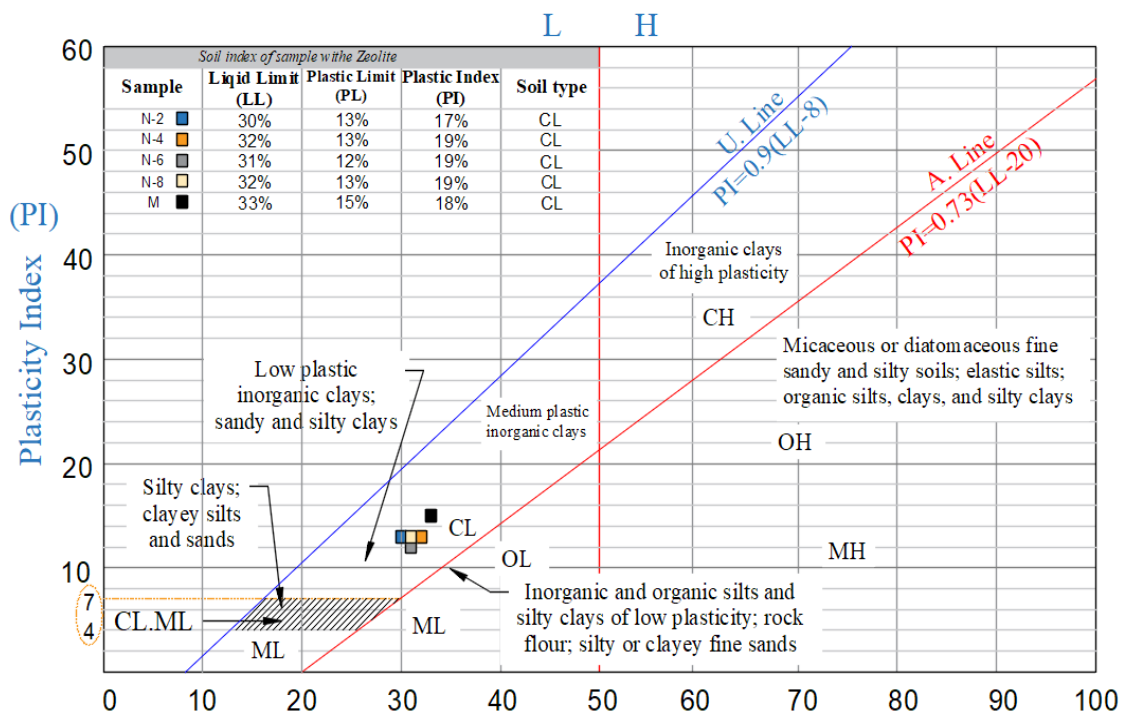
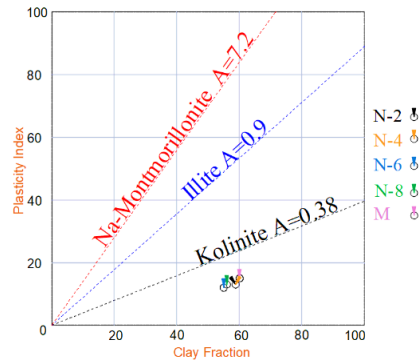
۴.۶. ترکیب عنصری خاک در نمونه‌های حاوی زئولیت محوطه تاریخی بلقیس

در نتایج (XRF) نمونه‌های حاوی زئولیت، عناصر سیلیس، کلسیت و آلومین به عنوان سه فاز اصلی نسبت به سایر عناصر از کمیت بیشتری برخوردارند (جدول ۵). سیلیس (SiO_2) فراوان‌ترین فاز در ترکیب نمونه‌های N محسوب می‌شود. وجود سیلیس را با میانگین 35 درصد سیلت در خاک نمونه‌های N می‌توان مرتبط دانست. زیرا خاک منطقه بر مبنای نتایج به دست آمده در نمودار دانه‌بندی (شکل ۵)، حاوی سیلت و ماسه است که درصد کمی سیلیس با میزان سیلت و ماسه خاک ارتباط دارد [۵۵] افزایش مقدار سیلیس در نمونه‌های N-2 تا N-4 متناسب با افزایش درصد زئولیت است و مقدار کلسیت (CaO) در نمونه‌ها، روند کاهشی دارد. در خصوص حضور اکسیدهای فلزی (Fe_2O_3)، (K_2O) و (MgO) در نتایج تست ترکیب عنصری نمونه‌های N درصد پایین آن‌ها بر خلاف سیلیس، آلومین و کلسیت، جزو عناصر ثانویه محسوب می‌شوند. در واقع، خاک منطقه اسفراین دارای ترکیبات سیلیکاتی و کربناتی است و کمبود آلومین به عنوان کانی رسی سبب کاهش میزان چسبندگی خاک می‌شود. به عبارت ساده‌تر، ترکیب خاک ضمن قلیایی بودن با وجود سیلیس ناشی از منابعی همچون کوارتز دارای چسبندگی کم است.

جدول ۴: شاخص فعالیت رس در نمونه‌های بلقیس

Table 4: Activity of soil in Belqis sample

Activity	Clay (%)	(PI)	Sample
0.22	58%	%13	N-2
0.22	58%	%13	N-4
0.21	55%	%12	N-6
0.23	56%	%13	N-8
0.25	60%	%15	M

$$A = \frac{PI}{\text{Clay fraction in soil (\%)}}$$


شکل ۴: گروه خاک نمونه‌های بلقیس در نمودار پلاستیسیته

Fig. 4: Soil class of Belqis samples in plasticity chart

جدول ۵: ترکیب عنصری نمونه‌های محوطه تاریخی بلقیس

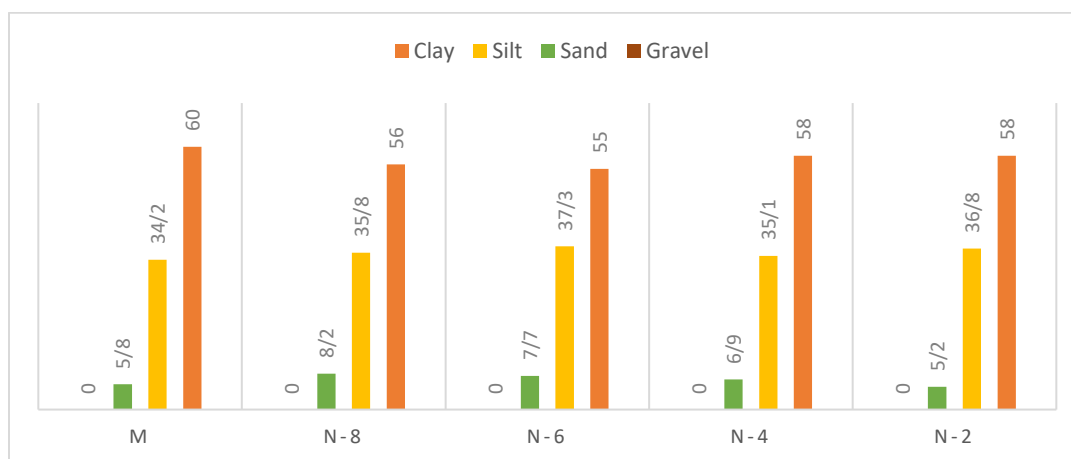
Table 5: Elemental composition samples of historical site of Belqis

	Elements	N-2	N-4	N-6	N-8
High percentage Elements	SiO ₂	33.96	34.80	35.84	36.27
	CaO	23.66	22.64	21.85	21.82
	Al ₂ O ₃	10.40	10.10	10.40	10.20
low percentage Elements	Fe ₂ O ₃	4.84	4.69	4.35	4.43
	MgO	2.87	2.61	2.70	2.50
	K ₂ O	2.62	2.72	2.71	2.81
	Na ₂ O	0.613	0.759	0.792	0.869

می‌شود [56]. از آنجاکه سطح ویژه دیکیت در مقایسه با کائولن بیشتر و از مونت‌موریلونیت کمتر است [54] سبب شده دیکیت به لحاظ سطح ویژه و رفتار در محدوده بین کائولن و خانواده اسمکتیت یا همان مونت‌موریلونیت دسته‌بندی شود. این نوع کانی رسی که سیلیکات آبدار توأم با (پتاسیم، آلومینیم، آهن و منیزیم) است، بر اثر خیس شدن متورم و هنگام خشک شدن منقبض می‌شوند [54]. وجود رس با سطح ویژه زیاد در حالت خمیری با آگیری فراوان سبب تورم خشت و بعد از خشک شدن دارای انقباض می‌شوند [31]. فاز دیکیت هم‌زمان با افزایش زئولیت رو به کاهش می‌رود. زئولیت از نوع کلینوپتیلولیت در تمام نمونه‌ها مطابق انتظار بر حسب افزایش درصدی در بین فازها دیده می‌شود.

۶. تعیین فازهای مینرالوژی خاک حاوی زئولیت به روش ریتولد

با اضافه کردن زئولیت به ترکیب، فازهای مینرالوژی تغییرات کیفی و کمی قابل توجهی از خود نشان می‌دهند. مطابق (جدول ۶) سه فاز اصلی خاک شامل کلسیت، مسکویت و کوارتز به لحاظ کیفی بدون تغییر در همه نمونه‌ها حضور دارند. فاز کلسیت با قلیائیت خاک منطقه مرتبط است و بیشتر حاصل فرسایش سنگ آهک است [37]. مسکویت به‌عنوان فاز مؤثر بر روند پراکنش، با چسبندگی ضعیف در خاک وجود دارد. کوارتز با توجه به حضور ماسه و سیلت مبین بافت غنی از سیلیس در خاک منطقه است. فاز دیکیت، با دارا بودن یون پتاسیم بین لایه‌های خود، کانی رسی از خانواده ایلیت محسوب



شکل ۵: درصد ذرات خاک حاوی زئولیت

Fig. 5: Percentage of soil particles with the addition of zeolite

جدول ۶: تجزیه و تحلیل کمی پراش اشعه ایکس به روش ریتولد در نمونه‌های دارای زئولیت

Table 6: Quantitative analysis of X-ray diffraction by Rietveld method in samples with zeolite

Soil Sample	M	N-2	N-4	N-6	N-8
Calcite (ICSD-028827)	44.1	35.6	34.1	29.1	29.9
Quartz (ICSD-027826)	26.2	25.4	21.0	24.4	24.4
Muscovite (ICSD-030297)	25.0	20.7	29.3	30.1	31.3
Dickite (ICSD-027679)	2.8	16.3	12.6	12.4	9.3
Zeolite (ICSD-066104)	0	2.3	3.1	4.1	5.1
Birnessite (ICSD-68918)	2.0	-	-	-	-












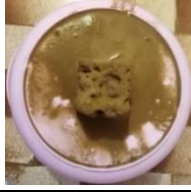



۷. آزمون آبشویی

نمونه‌ها در این آزمون، تحت فرسایش آبی با سرعت ثابت از طریق دوش در ارتفاع دویست سانتیمتر طی شش دقیقه قرار گرفتند. زمان صفر، آغاز فرسایش آبی، دقیقه سوم میانگین زمان فرسایش و پایان آن در دقیقه ششم ثبت گردید. با آغاز آزمون، مشاهدات برای ثبت تغییرات حاصل از فرسایش در فاصله‌های زمانی مشخصی، مستند گردید (جدول ۷). فرسایش نمونه حاوی ۲ درصد زئولیت، در سه دقیقه نخست روند نسبتاً آرامی داشت؛ سپس در سه دقیقه دوم این روند شتاب بیشتری گرفت. نمونه ۴ درصد زئولیت مشابه (N-2) بود با این تفاوت که روند فرسایش آهسته‌تر و میزان فرسایش کمتر به نظر می‌رسید. نمونه حاوی شش درصد با شروع آزمون و تا پایان سه دقیقه نخست با

فرسایش بسیار کندی پیش رفت. دوغاب ناشی از انحلال بسیار کم و بقایای حاصل از فرسایش نسبت به تمام نمونه‌ها از کمترین مقدار برخوردار بود. با آغاز سه دقیقه دوم و انتظار فرسایش بیشتر با توجه به مرطوب بودن خشت، همچنان روند فرسایش کند و دوغاب ناشی از آن نیز رقیق، ولی درمقایسه با دقیقه دوم بیشتر شده بود. نمونه (N-8) مانند نمونه (N-2) رفتار کرد و ساختار ظاهری هر دو نمونه در بازه‌های زمانی سه و شش دقیقه تقریباً مشابهت دارند. نمونه فاقد ماده افزودنی با آغاز روند آزمون با سرعت زیاد شروع به فرسایش نمود. روند افزایشی این اتفاق از دقیقه دوم یکباره سرعت گرفت، به نحوی که در پایان دقیقه ششم، ضمن فرسایش شدید، با ادامه روند آزمون، کالبد خشت به کلی انحلال پیدا کرد.

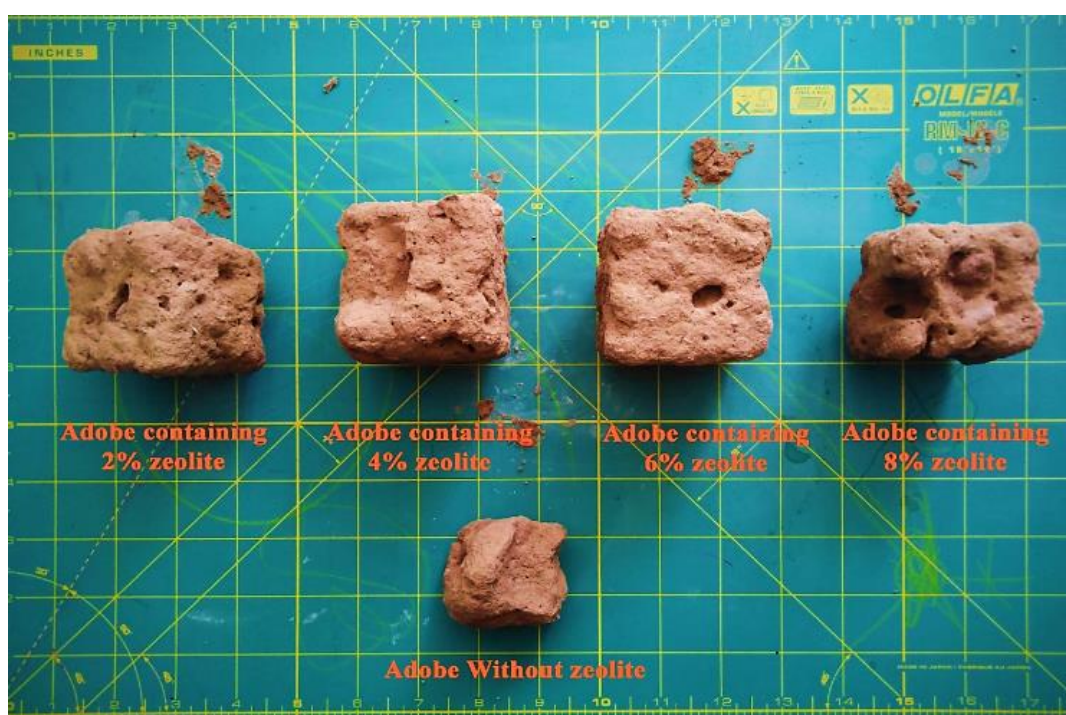
جدول ۷: آبشویی نمونه‌های حاوی زئولیت

Table. 7: Water erosion in Belqis samples containing Zeolite

Sample	Before Erosion	Erosion after 3min	Erosion after 6min
N-2			
N-4			
N-6			
N-8			
M			

آبی است. با عبور از این مقدار و افزودن کمیت ژئولیت، مجدداً روند فرسایش زیاد، اما مشابه مقدار ۲ درصد رفتار می‌کند (شکل ۶). برای اطمینان بیشتر در خصوص نقش شش درصد ژئولیت در کاهش روند فرسایش خشت، فرایند فرسایش آبی پس از گذشت دو ترم سه دقیقه‌ای، همچنان تا پایان پانزده دقیقه ادامه پیدا کرد. نتایج برای مقدار شش درصد ژئولیت افزوده به خشت در (شکل ۷) ارائه شده است.

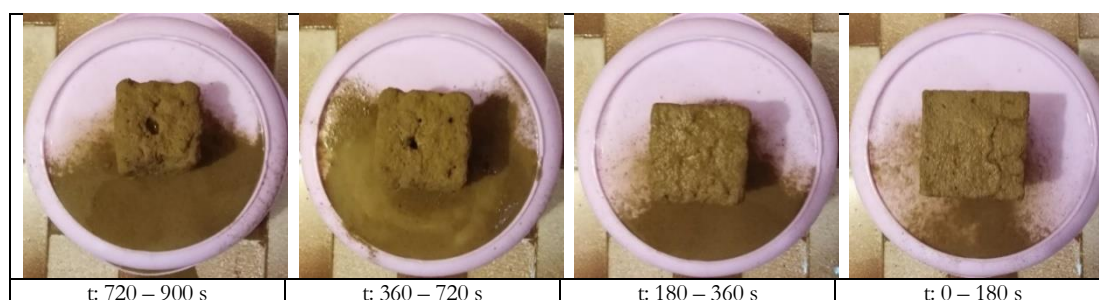
ماده افزودنی به مقدار ۲ درصد و همچنین ۸ درصد تقریباً روند فرسایش را یکسان کنترل می‌کند و تنها در مقدار شش درصد ماده افزودنی، خشت مقاومت قابل توجهی در برابر فرسایش آبی از خود نشان می‌دهد. بر این اساس خاک معدن فاقد ژئولیت، دارای بیشترین میزان فرسایش است. با اضافه کردن مقدار ۲ درصد و ۴ درصد ژئولیت، روند فرسایش به ترتیب کاهش می‌یابد. در مقدار شش درصد حداقل فرسایش و حداکثر مقاومت خشت در برابر فرسایش



شکل ۶: مقایسه فرسایش نمونه‌ها پس از شش دقیقه

Fig. 6: Comparison of erosion of samples after 6 minutes

مهم: نمونه حاوی شش درصد ژئولیت مربوط به فرسایش آبی پس از پانزده دقیقه است
Note: The sample contains %6 zeolite related to water erosion after 15 minutes



شکل ۷: میزان فرسایش نمونه حاوی شش درصد ژئولیت در پانزده دقیقه

Fig. 7: Erosion rate of sample containing %6 zeolite in 15 minutes

۸. بحث

خاک محوطه بلقیس، جزو دسته ریزدانه است، زیرا مطابق نمودار طبقه‌بندی خاک یونیفاید اندازه ذرات بزرگ‌تر از الک دویست (0.075mm) شامل درشت‌دانه و ذرات کوچک‌تر از آن، خاک ریزدانه است و چنانچه ۵۰ درصد ذرات ریزتر از (0.075mm) باشد، خاک در دسته ریزدانه قرار می‌گیرد [4] که در نمونه‌ها کم‌ترین مقدار ذرات زیر الک ۲۰۰ معادل ۷۷ درصد و بیشترین آن بالغ بر ۹۴ درصد است. فقدان شن حاکی از انتخاب خاک بدون ذرات درشت‌دانه نیست، این مسئله با شرایط زمین‌شناختی منطقه و تشکیل آبرفت‌های ناشی از فرسایش ارتفاعات بالادست منطقه اسفراین مرتبط است [55]. هرچند با هدف افزایش مقاومت فشاری و تاب‌آوری خشت تحت فشار ماسه به‌عنوان پرکننده افزوده می‌شود [31]، اما مقدار کم ماسه صرفاً ناشی از ترکیب و بافت خاک مورد استفاده در تهیه آن‌ها بوده است. درصد بالای سیلت نمونه‌ها نتیجه تغییر در رژیم خشک و تر زمین در منطقه و آشویی طی فصل‌های توأم با بارش است که سبب جابه‌جایی ذرات سیلت در خاک می‌شود [57]. انتظار می‌رفت با اضافه کردن زئولیت که دارای ترکیب آلومینوسیلیکات مشابه کانی‌های رسی است، افزون بر مقدار کانی‌های رسی نمونه (M)، کانی‌های رس‌ساز سایر نمونه‌ها از مقدار بیشتری برخوردار گردد ولی این اتفاق نیفتاده است. این مسئله از این منظر قابل توضیح است که لزوماً مقدار کمی رس نمونه (M) صرفاً رس نیست و می‌تواند شامل ذرات با ابعاد رسی باشد. این موضوع با بررسی شاخص فعالیت رس (A) که نشان داد دامنه فعالیت خاک در محدوده کلسیت است، قابل دفاع است. تغییر در کمیت رس علاوه بر مقدار موجود آن در خاک معدن می‌تواند ناشی از افزودن زئولیت به خاک باشد که سبب جابه‌جایی ذراتی با ابعاد رس - که البته رس محسوب نمی‌شوند - و در انتهای دامنه سیلت (در نمودار دانه‌بندی)، با ابعاد 0.002mm قرار دارند [58]، قرار می‌گیرند و سبب تغییر در کمیت دانه‌بندی رس می‌شود. ضمن افزایش زئولیت، میزان PI نسبتاً ثابت است. افزودن زئولیت، بخشی از رفتار رس را در جذب آب تحت تأثیر قرار می‌دهد که نتیجه آن کاهش PI در

مقایسه با نمونه M است. اما ثبات نسبی PI مربوط به ساختار مینرالوژی زئولیت است. از آنجا که زئولیت اضافه‌شده در خاک، کلینوپتیلولیت است، ویژگی عمده آن جذب و استقرار آب در بین موقعیت‌های سه‌بندی (Site) و حفره‌ها (Cage) است [44]. هرچند در نمونه‌های N مقدار ذرات با ابعاد رسی در مقایسه با نمونه M یک‌الی دو درصد تغییر کرده است، اما ثبات نسبی میزان پلاستیسیته خاک مبین عدم تأثیرگذاری مقدار زئولیت در دامنه خمیری نمونه‌هاست که نتیجه ساختار سه‌بندی و بار الکتریکی سطوح زئولیت است [46] بر این اساس، ضمن بالا رفتن درصد رس، ثبات نسبی PI را شاهدیم. این موضوع در کاهش ایجاد ترک پس از خشک‌شدن خشت حایز اهمیت است. نتایج (XRF) نشان می‌دهد سیلیس، کلسیت و آلومین سه فاز اصلی عناصر نمونه‌ها را تشکیل می‌دهند و افزایش زئولیت به خاک در تغییر گروه‌های عناصر اصلی خاک نقشی ندارد. منابع تأمین‌کننده سیلیس خاک با شرایط زمین‌شناختی منطقه مرتبط است [57]. پیش‌تر نتایج به‌دست‌آمده از نمودار خمیری مشخص کرد که خاک مورد استفاده در نمونه‌ها در محدوده CL قرار دارد که آن را در گروه خاک‌های رسی ماسه‌دار و سیلتی طبقه‌بندی می‌کند [5,4]. ماهیت خاک منطقه اسفراین با ترکیب عنصری (جدول ۵) با نهشته‌های مارنی تشکیل شده [55, 59] و رسوبات آبرفتی حمل‌شده از نواحی شمالی منطقه از طریق رودخانه فصلی که تا محدوده محوطه تاریخی بلقیس امتداد دارند، مرتبط است. دشت جنوبی و بخشی که محوطه بلقیس استقرار یافته، نتیجه حمل رسوبات حاوی خاک تراس‌ها، مخروطه‌افکن‌ها، واریزه‌ها، لُس و ماسه بادی پایین دست رشته کوه آلاداغ است [6]. در واقع، هم زئولیت هم سیلت همراه خاک در تأمین SiO₂ این نمونه‌ها نقش مؤثر دارد. ساختار بلوری زئولیت‌ها متشکل از عناصر قلیایی و قلیایی - خاکی است که در ترکیب آن تعداد زیادی از چهار وجهی‌های [SiO₄]⁴⁻ و [AlO₄]⁴⁻ وجود دارند. از کنار هم قرارگرفتن این چهار وجهی‌ها، یک شبکه گسترده سه‌بندی ایجاد می‌شود. چنین آرایش ساختاری سبب پدیدآمدن شبکه بلوری می‌شود که حاوی کانال‌ها و

شرایط مرطوب و آبشویی کلسیت، کاهش تراکم ناشی از خروج کلسیت، می‌تواند مسئله‌ساز باشد. به‌ویژه اینکه خاک منطقه اسفراین بر اساس مطالعات زمین‌شناسی قلیایی است [55] که تهدید مؤثری در روند دوام خشت در محوطه بلقیس خواهد بود. حضور کلسیت و اکسید منیزیم (MgO) در خاک نمونه‌ها مؤید حضور کربنات‌ها از گروه تبخیری‌ها به‌ویژه کربنات کلسیم و دولومیت است. زیرا دولومیت $(CaMg(CO_3)_2)$ و سنگ آهک یکی از منابع مهم منیزیم به‌ویژه در مناطق خشک محسوب می‌گردند. با توجه به استقرار اسفراین در ناحیه آب و هوایی خشک [63] و همچنین قلیائیت خاک [6] این موضوع دور از انتظار نیست. با دقت به درصد فراوانی اکسید آهن، اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم مشاهده می‌شود با افزایش زئولیت در نمونه‌های N، از میزان Fe_2O_3 کاسته می‌شود که فرآیندی که در توضیح کلسیت اشاره شد، درباره اکسید آهن سه‌ظرفیتی نیز صادق است. در گام دوم، اکسید منیزیم (MgO) دوظرفیتی قادر به مشارکت در تبادل یونی با زئولیت خواهد بود و در گام سوم اکسید پتاسیم (K_2O) تک‌ظرفیتی می‌تواند در تبادل یونی با زئولیت شرکت نماید. نتایج (XRD) نشان‌دهنده فازهای کلسیت، کوارتز، مسکویت و دیکیت به‌همراه زئولیت در نمونه‌های N است. کلسیت به‌عنوان فاز مخرب، فاقد هرگونه واکنش شیمیایی در جهت بهبود شرایط کیفی خاک در خشت رفتار می‌کند و صرفاً جذب رطوبت در خشت را افزایش می‌دهد و با حضور بیش از حد رطوبت شسته و از سیستم خارج می‌شود. حضور فاز مسکویت با خاصیت بسط‌دهنده در ترکیب نمونه‌ها وجود دارد و کوارتز مبین بافت غنی از سیلیس خاک در ترکیب دیده می‌شود. دیکیت به‌عنوان فاز متورم‌شونده در شرایط مرطوب و در عین حال انقباض‌پذیر در شرایط خشک، در کیفیت خشت می‌تواند نقش منفی ایفا نماید. کاهش مقدار دیکیت با افزایش زئولیت نشانه مثبتی از تأثیر ماده افزودنی بر روند کیفی خاک در تهیه خشت دارد. بر این اساس، وقتی زئولیت در ترکیب نمونه‌ها وارد شده است، در واقع، رقیبی برای رس در سیستم حاضر شده که به‌لحاظ ساختاری و نیز خواص الکترواستاتیکی رفتاری مؤثرتر نسبت به رس

حفره‌های متعددی خواهد بود [7]. بار منفی چهار وجهی‌ها در سطح ساختار دارای ویژگی تبادل کاتیونی است که این فرصت را برای جذب و جایگزینی کاتیون‌های فلزات قلیایی از جمله سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم فراهم می‌کند [60]. تبادل یونی در زئولیت‌ها بسیار قوی‌تر از رس‌هاست. زیرا زئولیت‌ها به‌واسطه توسعه ساختار در فرم سه‌بعدی که نتیجه کنار هم قرارگیری تعداد بسیاری چهار وجهی قطبی است، به‌وجود می‌آیند. افزایش تعداد چهاروجهی‌ها سبب افزایش سطح ویژه و در نتیجه افزایش قدرت تبادل یونی می‌شود [46]. در نمونه‌های بلقیس میزان کلسیت (CaO)، متناسب با افزایش درصد زئولیت در هر نمونه N رو به کاهش است. ساختار سه‌بعدی زئولیت با دارا بودن حفره‌ها و کانال‌های بسیار که در پیوند با هم کریدورهای به‌هم پیوسته طولی را تشکیل می‌دهد [7] امکان به‌دام‌انداختن مولکول‌های آب و کاتیون‌ها را فراهم می‌سازد [60] کلسیت (Ca^{+2}) جزو کاتیون‌های دوظرفیتی است و ویژگی تبادل یونی در ساختار زئولیت‌ها تمایل به پیوند با کاتیون‌های ظرفیت بالا است [46]. به‌عبارتی وقتی سیستم حاوی کاتیون‌های فلزی متعددی باشد، کاتیون‌های دوظرفیتی و بیشتر، در اولویت پیوند یونی با زئولیت است تا کاتیونی مانند پتاسیم [61]. بر این اساس، با افزایش میزان زئولیت در نمونه‌های N، شاهد کاهش هم‌زمان کلسیت در سیستم هستیم و کلسیت دوظرفیتی توأم با آب قادر به حرکت در سایت‌ها و کریدورهای زئولیت است و با خروج آب طی فرآیند خشک‌شدن خشت، کاتیون در ساختار زئولیت باقی می‌ماند تا اگر طی دوره مرطوب، کاتیونی با ظرفیت بیشتر در سیستم مستقر شد، جایگزین کلسیت شود. علت کاهش درصد کلسیت در تست ترکیب عنصری هم‌زمان با صعود مقدار رقمی زئولیت، طی فرآیند مذکور قابل توضیح است. کلسیت به شکل سنگ آهک قادر به واکنش با آب نیست [62] لذا نمی‌تواند در ساختار خشت رفتار پوزالانی و تثبیت‌کننده از خود نشان دهد. وجود درصد کلسیت غیرفعال در سیستم صرفاً از میزان آلومین یا سیلیس می‌کاهد که رفتار رس را تحت تأثیر قرار می‌دهد و از چسبندگی خاک می‌کاهد و به‌موازات آن در

کلسیت زئولیت، این پتاسیم به‌همراه سیلیس در تشکیل دیکیت دخالت دارند. بخشی دیگر از این پتاسیم آزاد در محیط به‌همراه سیلیس و آلومین اندک خاک، گسترش مسکویت را منجر می‌شوند. در نمونه N-6 مجدداً کلسیت طی تبادل یونی با حجم بیشتری از زئولیت در فرآیند شرکت می‌کند. به همین دلیل نزدیک به 10 درصد نسبت به نمونه خاک معدن فاز کلسیت را از دست داده است. در این مرحله ساز و کار ایجاد دیکیت مشابه نمونه N-4 است. کوارتز و مسکویت تقریباً نسبت به نمونه N-4 تفاوت زیادی نداشته است. در نمونه‌های N-8 صرفاً تغییر عمده را در کاهش دیکیت شاهدیم. در زمینه چگونگی کاهش دیکیت توأم با افزایش زئولیت، می‌توان موضوعیت توان تبادل کاتیونی کلینوپتیلولیت را مطرح کرد. زیرا در حالت مرطوب با حضور دیکیت و زئولیت، قابلیت ربایش کاتیون‌هایی همچون کلسیم، سدیم و منیزیم که همگی از ظرفیت دو برخوردار هستند، اولویت تبادل یونی با زئولیت است که در رقابت با دیکیت قرار می‌گیرد. با توجه به گستردگی سطح ویژه و موقعیت‌های بار منفی پراکنده در تمامی سطوح زئولیت، با کاهش یون‌های آزاد، شرایط و تمایل جابه‌جایی پتاسیم محبوس بین لایه دیکیت و گرایش آن به سمت زئولیت فراهم می‌شود [45]. در عمل پیوند یونی نگهدارنده واحدهای دولایه دیکیت آزاد و ساختار متلاشی و از میزان آن در نتایج آنالیز کمی پراش پرتو ایکس به روش ریتولد کاسته شده است.

۹. نتیجه‌گیری

مطالعات در زمینه بافت خاک در محدوده محوطه تاریخی بلقیس اسفراین نشان داد خاک منطقه برای تهیه خشت به‌منظور استفاده در مداخلات عملی مرمتی از ترکیب مناسبی برخوردار نیست. زیرا نمودار خمیری این خاک را در کلاس CL از گروه‌های خاکی تعیین کرد. خاکی با ترکیب رس‌های غیرآلی با پلاستیسیته کم تا متوسط که به لحاظ ترکیب ذرات، جزو رس‌های شنی، ماسه‌دار و سیلت‌دار طبقه‌بندی می‌شود. نتایج XRF نشان داد وجود ۵۰ درصد کلسیت در خاک معدن، ویژگی خاک را به سمت

به‌ویژه دیکیت دارد. در بررسی تئوری در خاک معدن، درصد زیادی در حدود 50 درصد از کل به کلسیت اختصاص دارد که مبین قلیائیت خاک منطقه است. میزان کوارتز و مسکویت حدود یک سوم درصد کل و دیکیت از خانواده ایلیت‌ها در کمترین میزان وجود دارد. درصد کوارتز تقریباً به تناسب افزودن به درصد زئولیت، از ثبات نسبی برخوردار است. از آنجاکه کوارتز بافت اصلی ماسه و سیلت را تشکیل می‌دهد، بدون وارد شدن به واکنش شیمیایی با زئولیت، صرفاً در ترکیب وجود دارد. میزان کلسیت هم‌زمان با افزایش زئولیت روند نزولی می‌گیرد. یعنی کلسیت در فرآیند تبادل کاتیونی که از خصیصه‌های بارز و مهم زئولیت کلینوپتیلولیت است [64]، شرکت کرده است. از آنجاکه کلینوپتیلولیت با فرمول عمومی $(\text{NaK})_6[(\text{Al}_2\text{O}_3)_6(\text{SiO}_2)_{30}].24\text{H}_2\text{O}$ فراوان‌ترین زئولیت طبیعی است، تبادل یونی سدیم و پتاسیم تک‌ظرفیتی کلینوپتیلولیت با کلسیت دو ظرفیتی موجود در خاک امری طبیعی است. در این حالت سدیم و پتاسیم محیط افزایش می‌یابد و درصد کلسیت کاهش پیدا می‌کند. مسکویت ماده معدنی فیلو سیلیکات آلومینیوم پتاسیم‌داری هست که در حدود یک‌چهارم درصد کمی مواد خاک معدن را به خود اختصاص داده است. در نمونه (N-2)، مقدار مسکویت 4.3 درصد کاهش پیدا می‌کند که به واسطه مشارکت پتاسیم موجود در مسکویت در تبادل یونی با زئولیت است. این پتاسیم به‌همراه پتاسیم آزاد شده از زئولیت در تبادل کاتیونی با کلسیت، محیط را مهیای ایجاد دیکیت می‌کنند. چون مقدار دیکیت اولیه در خاک معدن 2.8 درصد است که با تبدلات یونی از مسکویت و کلسیت، سیلیس و آلومین محیط برای بازیابی دیکیت در دسترس است. وجود کاتیون پتاسیم طی روند شکل‌گیری دیکیت در محیط مرطوب خاک فراهم می‌شود که سبب شده است حداکثر میزان دیکیت در نمونه N-2 باشد. در نمونه N-4 کلسیت روند نزولی دارد. کوارتز در نتیجه کاهش درصد سیلت و ماسه در خاک نمونه، از درصد کمتری برخوردار است. در این نمونه مسکویت بیشتری طی تبادل یونی با زئولیت، پتاسیم از دست می‌دهد. با افزایش کلینوپتیلولیت در خاک و جایگزینی پتاسیم با

در ترکیب شیمیایی خاک و کنترل نسبی فازهای مخرب، می‌تواند خشت‌هایی مقاوم‌تر در برابر فرسایش ناشی از رطوبت نزولی ایجاد نماید. این موضوع می‌تواند کمک شایانی به کاهش فرسایش ناشی از تکرار مداخلات مرمتی طی فرآیندهای تعمیر و بازسازی از طریق جایگزینی پی در پی خشت در چهارچوب سیاست حفاظتی گردد.

پژوهش صورت‌گرفته در استفاده از زئولیت در کاهش فرسایش خشت، برگرفته بخشی از نتایج رساله دکتری در رشته حفاظت و مرمت بناهای تاریخی به نگارش نویسنده است. برخورد لازم می‌دانم مراتب تشکر و قدردانی خود را از زحمات و راهنمایی‌های استادان محترم، آقایان دکتر محمد امین امامی و دکتر علی زمانی‌فرد به‌عمل آورم.

قلیایی شدن سوق داده است که ترکیب اکسید کلسیم طبیعی در بهبود کیفی خشت در شرایط مرطوب کارایی ندارد. از طرفی، فقر رس در کاهش چسبندگی خاک مؤثر است. نتایج XRD به‌وضوح وجود فاز مخرب مسکویت با ویژگی پراکنده‌سازی و همچنین دیکیت با قابلیت تورم‌پذیری را در خاک منطقه تأیید کرد که در کنار فاز کوارتز که بافت غنی از سیلیس خاک را نشان می‌دهد، سبب فرسایش‌های ناشی از رطوبت نزولی در خشت می‌شوند. زئولیت با ساختاری مشابه رس ضمن تثبیت PI در کنترل و کاهش فازهای مخرب خاک نقش مؤثری دارد. نتایج آزمون آبشویی نشان داد که افزودن شش درصد زئولیت کلینوپیتولیت در خاک کلاس CL با مشخصه قلیایی حاوی کلسیت رفتار شبه‌پوزالانی داشته و با تغییر

References

- [1] Houben H, Guillaud H. Earth Construction (A Comprehensive Guide): ITDG publishing; 2006.
 - [2] Vahdati Aa. Archaeological Investigations in Sharh-E Balqays (Medieval Isfarayen) North Khorasan Province, Northeastern Iran. Bojnord: General Department of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism of North Khorasan Province [In Persian]; 2015.
 - [3] Hoseini Keshtan R, Emami MA, zamanifard A. The role of chemical parameters and soil texture quality in the erosion of adobe in the Belgias historical site. Scientific Journal of Maremat & Me'mari-e Iran (quarterly). 2019;9(18):91-110 [In Persian].
 - [4] Budhu M. Soil Mechanics and Foundations: Wiley; 2010.
 - [5] Das BM. Principles of Geotechnical Engineering: Cengage Learning; 2021.
 - [6] Fadai A. The Geography of Esfarayen. Mashhad: Astan qhods Razavi. Printing and Publishing Institute. [In Persian]. 1995.
 - [7] Bish DL, Ming DW. Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications: De Gruyter; 2018.
 - [8] Sels B, Kustov L. Zeolites and Zeolite like Materials: Elsevier Science; 2016.
 - [9] Munthali MW, Kabwadza-Corner P, Johan E, Matsue N. Decrease in cation exchange capacity of zeolites at neutral pH: examples and proposals of a determination method. Journal of Materials Science and Chemical Engineering. 2014 Aug 11;2014.
 - [10] Farshad M. History of engineering in Iran. Tehran: Mirmah [in Persian]. 2011.
 - [11] Reeves GM, Ian Sims JCC. Clay Material Used in Construction. United Kingdom London: Geological Society; 1989.
- [فدایی احمد، جغرافیای اسفراین. مشهد: مؤسسه نشر و انتشار آستان قدس رضوی؛ (۱۳۷۳)]
- [وحدتی علی‌اکبر. پژوهش‌های باستان‌شناختی در شهر بلیس (اسفراین کهن). بجنورد: اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان خراسان شمالی؛ (۱۳۹۴)]
- [حسینی کشتان رضا، امامی محمدمین، زمانی‌فرد علی. نقش پارامترهای شیمیایی و کیفیت بافت خاک در فرسایش خشت محوطه تاریخی بلیس. فصلنامه علمی مرمت و معماری ایران. ۱۳۹۷؛ ۹ (۱۸): ۹۱-۱۱۰]

- 2006.
- [12] Warren J. Conservation of Earth Structures: Butterworth-Heinemann; 1999.
- [13] Snamai A, editor Conservation of archaeological daga (adobe) structures, Domboshaba National Monument, Botswana. Terra 2008: Proceedings of the 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage ;2008 ; Bamako,Mali: The Getty Conservation Institute.
- [14] Ayvazian S. Brick work in architecture of Iran. In: Kiani Y, editor. architecture Decorations of Iran during Islamic period. Tehran: Ministry of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism. [In Persian]; 1997.
- [آیوآزبان سیمون. آجرکاری در معماری ایران. ویراستار: کیانی یوسف. تزئینات معماری ایران در دوره اسلامی. تهران: وزارت میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری؛ (۱۳۷۵)]
- [15] Clifton JR. Preservation of Historic Adobe Structures: A Status Report. Washington,DC: Dept of Commerce, National Bureau of Standards; 1977.
- [16] Alessandrini G, Boscarino S, Bugini R, Emmi D, Giuffré L. The walls of Capo Soprano at Gela (southern Sicily): Materials and their decay. In La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo: Influenza dell'ambiente costiero e dello spray marino sulla pietra calcarea e sul marmo; Brescia, Italy: Grafo; 1990.(87-94)
- [17] Negahban E, editor. painted Temple of zageh in Qazvin plain. Congress of History of Architecture and Urban Planning of Iran; Kerman- Bam, April 1995;(2), (235-242) [In Persian].
- [نگهبان عزت‌الله. معبد منقوش زاغه دشت قزوین. مجموعه مقالات سومین کنگره تاریخ معماری و شهرسازی ایران. سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری: ۲۵-۳۰ فروردین ۱۳۸۵، ارگ بم، کرمان، جلد ۲ (۲۳۵-۲۴۲)]
- [18] Sajjadi SMS. Beginning urbanization in eastern half of Iranian plateau. Anthropology. 2004;6:63-96. [In Persian].
- [سیدسجادی سیدمنصور. آغاز شهرنشینی در نیمه شرقی فلات ایران. فصلنامه انسان‌شناسی. ۱۳۸۳؛ (۶): ۹۶-۹۳]
- [19] Negahban E. Excavation of Haft Tappe Khuzestan Plain. Tehran: Ministry of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism.[In Persian]; 1993.
- [نگهبان عزت‌الله. حفاری هفت‌تپه دشت خوزستان. تهران: سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری؛ (۱۳۷۳)]
- [20] Pirniya MK. Iranian architectural styles. Tehran: Islamic Art Publications; 2002.[In Persian].
- [پیرنیا محمدکریم. سبک‌شناسی معماری ایران. تهران: انتشارات هنر اسلامی؛ (۱۳۸۰)]
- [21] Tajvidi A. New knowledge about art and archeology of Achaemenid era based on five-year excavations of Takht Jamshid. Tehran: Ministry of Culture and Arts; 1976. [In Persian].
- [تجویدی اکبر. دانستی‌های نوین درباره هنر و باستان‌شناسی عصر هخامنشی بر بنیاد کاوش‌های پنج‌ساله تخت جمشید. تهران: انتشارات اداره کل نگارش وزارت فرهنگ و هنر؛ (۱۳۵۵)]
- [22] Mehriyar M. Historical vision of Arg Bam. Asar:2004;(36-37):39-54
- [مه‌ریار محمد. سیمای تاریخی ارگ بم. اثر. ۱۳۸۳: (۳۶-۳۷): ۳۹-۵۴]
- [23] Mousavi M, editor. Remainder adobe structure of Khwaja mountain in Zabol. History of architecture and urban planning of Iran; Ministry of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism. Kerman-Bam. March 2 1996; (114-137). [In Persian].
- [موسوی محمود. یادمان خشتی کوه خواجه زابل و خلاصه‌ای از نتایج مطالعات و کاوش‌های انجام‌شده در آن. مجموعه مقالات کنگره تاریخ معماری و شهرسازی ایران. سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری: ۷-۱۲ اسفند ۱۳۷۴، ارگ بم، کرمان، جلد ۲، (۱۳۷-۱۱۴)]
- [24] Zareei ME. Knowledge of world architecture. Tehran: Fanavar. 2018; [in persian].
- [زارعی محمدابراهیم. آشنایی با معماری جهان. همدان: فن‌آوران؛ (۱۳۷۹)]
- [25] Kasaei R. Adobe. Art and architecture. 1976;17(5): 17-35.[In Persian].

- [کسایى رضا. خشت. هنر و معماری. ۱۳۵۴؛ ۱۷ (۵): ۳۵-۱۷]
- [26] Falamaki M. location of problem of adobe and adobe architecture in Iran. *Art and architecture*. 1976;35-36(2):5-6.[In Persian].
- [فلامکی منصور. مسئله خشت و معماری خشتی در ایران. هنر و معماری. ۱۳۵۴؛ ۳۵-۳۶ (۲): ۵-۶]
- [27] Bui Q-B, Prud'homme E, Grillet A-C, Prime N, editors. An experimental study on earthen materials stabilized by geopolymer. *Proceedings of the 4th Congrès International de Géotechnique-Ouvrages-Structures: CIGOS 2017, 26-27 October, Ho Chi Minh City, Vietnam 4; 2018: Springer.*(464-472)
- [28] Reddy BV, Latha M. Retrieving clay minerals from stabilised soil compacts. *Applied Clay Science*. 2014;101:362-8.
- [29] Oliver A. Modified earthen materials. *Terra Literature Review*. 2008;97.
- [30] Rijven T. Between earth and straw: Éd. Goutte de sable; 2007.
- [31] Minke G. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*; Birkhäuser; 2013.
- [32] Degirmenci N, Baradan B. Chemical resistance of pozzolanic plaster for earthen walls. *Construction and Building Materials*. 2005;19(7):536-42.
- [33] Wong L, Rickerby S, Rava A, Sharkawi A, El-Din A, editors. Developing approaches for conserving painted plasters in the royal tombs of the Valley of the Queens. *Proceedings of the 11th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage*; 2012, (324-330).
- [34] Cuchi A, editor *El patrimonio como model. El nuevo teatro de Balaguer (Catalunya)*. In *Terra 2000: 8th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architecture*; 2000; Torquay: London: James and James.
- [35] Guillaud H, Hardy M. *Terra literatures review an overview of research in earthen architecture conservation*. Los Angeles; 2008.
- [36] Liongso P, editor *Field evaluation of stabilization in swelling clay for concrete pavement*. International conference on sustainable design and construction, ASCE Texas section, Fall; 2012, (85-99).
- [37] Mishra E, Kumar N. Strength characteristics of clayey sub-grade soil stabilized with fly ash and lime for road works. *Indian Geotechnical Journal*. 2012;42(3):206-11.
- [38] Qisheg D, editor *Traditional measures of moistureproof in raw soil architecture in China. " Preservation and restoration of cultural heritage Proceeding of the 1995 LCP Congress, Montreux 24-29, september, 1995, (137-148)*.
- [39] Sharma NK, Swain S, Sahoo UC. Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: a micro level investigation. *Geotechnical and geological engineering*. 2012;30(5):1197-205.
- [40] Silva RA, Oliveira DV, Miranda T, Cristelo N, Escobar MC, Soares E. Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal. *Construction and Building Materials*. 2013;47:181-91.
- [41] Dias P, José G, editors. *A conservação das estruturas antigas em terra crua*. 7th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architecture; 1993; Silves, Portugal: Lisbon: Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais.
- [42] Kéré B. *Architecture et cultures constructives du Burkina Faso*. 1995.
- [43] Saag LMK, Sanderson GR, Moyna P, Ramos G. Cactaceae mucilage composition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1975;26(7):993-1000.
- [44] Kulprathipanja S. *Zeolites in Industrial Separation and Catalysis*; Wiley; 2010.
- [45] Baerlocher C, McCusker LB, Olson DH. *Atlas of Zeolite Framework Types*; Elsevier Science; 2007.
- [46] Pang W, Yu J, Xu R, Huo Q, Chen J. *Chemistry of Zeolites and Related Porous Materials: Synthesis and Structure*; Wiley; 2009.
- [47] Treacy MMJ, Higgins JB. *Collection of*

- Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites: Elsevier Science; 2001.
- [48] Ministry of Cultural Heritage HaT. Efficiency report of cultural heritage of historical site of Belqis Esfarayen. Bojnurd; 2015.
- [49] Vazifeshenas H, Nikgoftar A, Najafi A. historical city of Belqis Esfarayen (study on effects of art and architecture). Esfarayen: Shokoufe sib; 2016. [In persian].
- [وظیفه‌شناس حامد، نیک‌گفتار احمد، نجفی علیرضا. شهر تاریخی بلقیس اسفراین: سیری بر جلوه‌های هنر و معماری. اسفراین: شکوفه سیب؛ (۱۳۹۵)]
- [50] Hitti PK, Murgotten FC, Baladhuri AIY. The Origins of the Islamic State: Being a Translation From the Arabic, Accompanied With Annotations, Geographic and Historic Notes of the Kitâb Fitûh Al-buldân of Al-Imâm Abu-l Abbâs Ahmad Ibn-Jâbir Al-Balâdhuri: Creative Media Partners, LLC; 2022.
- [51] Odul P. Pathologie humide de constructions en. In 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture: Adobe90 Preprints. 1990 October 14–19:(404-13).
- [52] Brown RB, Sandoval B, Orea M H. The protection and conservation of the adobe structures at Paquimé, Casas Grandes, Chihuahua, Mexico. In 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture: Adobe 90 preprints: Las Cruces, New Mexico, USA, October 14-19, 1990 (204-208).
- [53] Hortensius D, Heinardi C, editors. ISO/TC 190—Soil Quality, First Steps Towards a World-Wide Standardized Approach of Soil Problems. Contaminated Soil'88: Second International TNO/BMFT Conference on Contaminated Soil, 11–15 April 1988, Hamburg, Federal Republic of Germany; 1988: Springer.
- [54] Bergaya F, Theng BKG, Lagaly G. Handbook of Clay Science: Elsevier Science; 2011.
- [55] shabaniyan R. Geology of Iran. Tehran: Amir Kabir; 2015 [In Persian].
- [شعبانیان رحیم. جغرافیای ایران. تهران: امیرکبیر؛ (۱۳۹۳)].
- [56] Murray HH. Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskitesepiolite, and Common Clays: Elsevier Science; 2006.
- [57] BaiBordi M. Soil: origin and classification (classification of Iranian soils) .Tehran: Tehran University Publications; 1999. [In Persian].
- [بایبوردی محمد. خاک: منشا و طبقه‌بندی (طبقه‌بندی خاک‌های ایران). تهران: انتشارات دانشگاه تهران؛ (۱۳۷۷)].
- [58] Centre ECJR. Global Soil Biodiversity Atlas: Publications Office of the European Union; 2016.
- [59] Hasanzadeh M, Feiznia S, Ahmadi H, Ghayoumian J. Study on effect of physical and chemical properties of marls on sediment yield, using rainfall simulator. Journal of Iranian Association of Engineering Geology. 2008;1(1):35. [In Persian].
- [حسن‌زاده نفوتی محمد، فیض‌نیا سادات، احمدی حسن، پیروان حمیدرضا، غیومیان جعفر. بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مارن‌ها بر میزان رسوبدهی با استفاده از مدل فیزیکی باران‌ساز. مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران. ۱۳۸۶؛ ۱(۱):۳۵].
- [60] Jacobs PA, Flanigen EM, Jansen JC, van Bekkum H. Introduction to Zeolite Science and Practice: Elsevier Science; 2001.
- [61] Ji Z-Y, Yuan J-S, Li X-G. Removal of ammonium from wastewater using calcium form clinoptilolite. Journal of Hazardous Materials. 2007;141(3):483-8.
- [62] Foroutani S. Materials and construction. Tehran: Rozaneh; 2015. [In Persian].
- [فروتنی سام. مصالح و ساختمان. تهران: روزنه؛ (۱۳۹۳)].
- [63] Hoseini Sediq SM, Gholamreza MM, Ebrahimi M. Study of wind and rainfall in the urban design of Esfrayen city. The third international congress on civil engineering, architecture and urban development: Tehran; Desember 29, 2015, (176-191). [In Persian].

[حسینی صدیق سید محمود، مقامی مقیم غلامرضا، ابراهیمی مسلم، واکاوی عناصر اقلیمی باد و بارش در طراحی شهری شهرستان اسفراین. سومین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری: تهران؛ ۸ دی ۱۳۹۴، (۱۷۶-۱۹۱)].

[64] Sultan MJS, Haghigi M, Khudiev A, Etamidi B. Comparison of the efficiency of natural and synthetic zeolites in water purification. 8th

National Iranian Chemical Engineering Congress: Mashhad; October 17, 2013, (87- 112). [In Persian].

[سلطان محمدزاده جعفر صادق، حقیقی محمد، خودیف انور، اعتمادی بهروز. مقایسه عملکرد زئولیت‌های طبیعی و سنتزی در تصفیه آب. هشتمین کنگره ملی مهندسی شیمی: مشهد؛ ۲۵ مهر ۱۳۹۲، (۸۷-۱۱۲)].