Journal of Mineral Resources Engineering, 10(1): 61-75, (2025)

Imam Khomeini International University
Vol. 10, No. 1, Spring 2025

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Production of Building Bricks from Lorestan Shale and Investigation of Effective Parameters

Bayranvand F.[1], Barani K.[2*], Ghaedrahmati R.[2]

1- M.Sc Student, Dept. of Mining, Faculty of Engineering, Lorestan Unniversity, Khorramabad, Iran
2- Associate Professor, Dept. of Mining, Faculty of Engineering, Lorestan Unniversity, Khorramabad, Iran

Received: 27 Feb. 2024 **Accepted: 28 Apr. 2024**

Abstract: In this research, the possibility of producing building bricks from the shale reserves of Lorestan province has been investigated. Sampling was done in six different areas, and after conducting XRF tests, one sample was selected for brick production. 10 different combinations of bricks with different percentages of shale were made from the selected sample. Compressive and bending strength and water absorption tests were performed on the manufactured samples. The results of the tests showed that with the increase in the percentage of shale, the amount of water absorption increased, so that the samples consisting of 90 to 100% shale had 14.8% water absorption. The sample containing 10% shale has a water absorption rate of 11.1%. Also, the results showed that increasing the percentage of shale decreased the compressive and bending strengths of bricks. The sample with the highest compressive strength, with a value of 27.2 MPa, corresponds to the sample containing 10% shale, while the compressive strength of the sample containing 100% shale is only 11.2 MPa. Based on the INSO-7 (Iranian national standard), the manufactured bricks are of good quality and can be used as building bricks and facing bricks in buildings.

Keywords: Building brick, shale, Amiran formation, Lorestan province.

How to cite this article
Bayranvand, F., Barani, K., and Ghaedrahmati, R. (2025). *"Production of building bricks from Lorestan shale and investigation of effective parameters"*. Journal of Mineral Resources Engineering, 10(1): 61-75.
DOI: 10.30479/jmre.2024.20019.1683

*Corresponding Author Email: *barani.k@lu.ac.ir*

COPYRIGHTS
©2025 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.
This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

IINRODUCTION

Shale is a soft, brittle, fine-grained, and easily eroded sedimentary rock formed from mineral-rich silt or mud that was deposited in an aquatic environment, buried by other sediment, and compacted and cemented into hard rock [1,2]. One of the most important and effective parameters for determining the quality of building bricks is the selection of high-quality raw materials [3,4]. There have been many studies on the use of shale for brick production [5-17]. The possible utilization of different waste materials, such as oil shale ash mixed with marble and granite sludge, to produce low-cost, compressed, strong, lightweight masonry bricks was investigated. The results showed oil shale ash acted as a self-cementitious material and a good binding material if added to pozzolanic waste materials such as granite and marble sludge [18]. The effect of different contents of sewage sludge on the properties of green or fired shale bricks was examined experimentally. It was found that the physical, mechanical, and thermal performances, as well as the microstructure of the bricks, were apparently affected by the addition of sewage sludge [19]. Applications of oil shale in building materials were evaluated in Estonia. The results showed that shale ash has few cementing properties, which is due to its fine grain and mineralogical composition. By adding clay materials, brick porosity and insulation properties are improved. Also, manufactured bricks have an acceptable compressive strength [20]. In this research, the use of shale from the Amiran formation located in Lorestan province for the production of building bricks was investigated.

MATERIALS AND METHODS

The sample used in this research was obtained from six different points of the Amiran Formation. Table 1 shows the chemical compositions of the samples, determined by the XRF analysis. Sample number 2, which has the highest amount of SiO_2 and the lowest amount of CaO and LOI, was chosen as the sample used for brick manufacturing.

Bricks were manufactured in the Alla factory located in Isfahan. In order to find the best combination, the shale sample was gradually replaced by a part of the factory soil. 11 different combinations of bricks were made. The composition and mixing percentage of the bricks are shown in Table 2.

To manufacture bricks, 1 kg of soil along with 100 cc of water is poured into a mold and put under pressure in a molding machine. The raw bricks were placed in the furnace at a temperature of 800 for 24 hours. The water absorption, compressive strength, and bending strength of the manufactured brick samples were determined according to the Iranian national standard (INSO-7).

FINDINGS AND ARGUMENT

Figure 1 demonstrates the water adsorption of the bricks made from shale. It can be seen that by increasing the amount of shale from 10% to 20%, water absorption increases from 11.1 to 13.6%. With a

Table 1. Chemical composition of the samples

Sample No.	1	2	3	4	5	6
SiO_2	53.23	55.18	55.88	53.46	46.78	54.44
Al_2O_3	7.78	9.74	8.36	7.46	7.22	8.40
Fe_2O_3	7.13	9.33	8.33	7.10	7.45	9.33
CaO	12.23	5.11	9.27	11.73	15.07	8.25
Na_2O	0.45	0.42	0.38	0.36	0.44	0.48
K_2O	1.39	1.47	1.12	1.32	1.10	1.24
MgO	3.67	3.78	3.87	3.52	3.77	4.62
TiO_2	1.13	1.67	1.47	1.27	1.29	1.44
MnO	0.12	0.07	0.01	0.10	0.13	0.11
P_2O_5	0.16	0.17	0.017	0.15	0.17	0.19
LOI	12.37	9.89	10.83	13.14	16.23	11.24
S	0.22	0.06	0.02	0.21	0.21	0.10

Table 2. Compostions of the manufactured bricks

Sampel No.	Factory soil (mass%)	Shale (mass%)
1	90	10
2	80	20
3	70	30
4	60	40
5	50	50
6	40	60
7	30	70
8	20	80
9	10	90
10	0	100
11	100	10

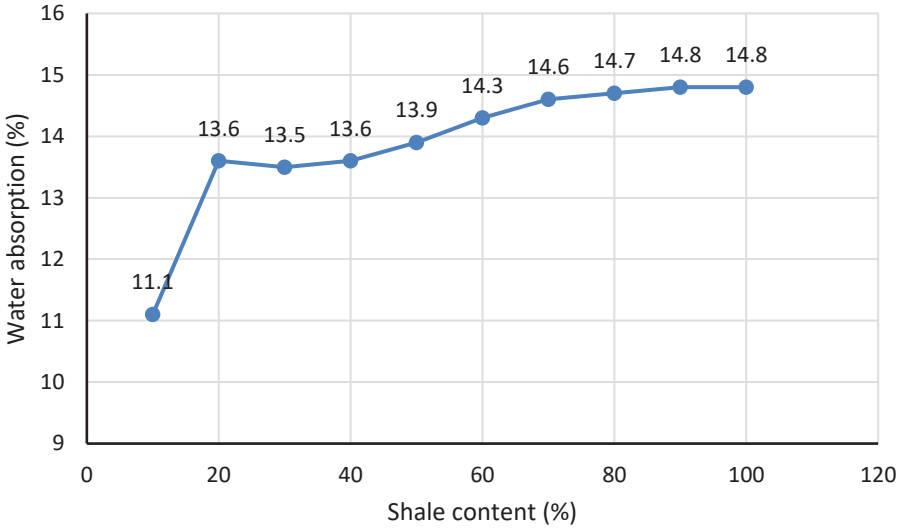


Figure 1. Effect of shale content on water absorption

further increase in the amount of shale, the water absorption increases with a slight slope. The maximum water absorption (14.8%) is related to samples containing 90-100% shale. In general, it can be concluded that increasing the amount of shale has a negative effect on the amount of water absorption.

Figure 2 shows the compressive strength of the bricks made from shale. It can be seen that by increasing the amount of shale from 10% to 100%, the compressive strength decreases from 272 kg/cm^2 (approximately 27.2 MPa) to 112 kg/cm^2 (approximately 11.2 MPa). 11.1 to 13.6%.

Figure 3 shows the results of the bending strength. It can be seen that the bending strength decreases from 70 kg/cm^2 (approximately 7 MPa) to 48 kg/cm^2 (approximately 4.8 MPa) by increasing the amount of shale from 10 to 100%.

CONCLUSIONS

The results of this research show that increasing the amount of shale in bricks increases water absorption and decreases the compressive and bending strengths. However, even when the weight composition of the brick is 100% shale, according to the INSO-7 national standard, the manufactured bricks have good quality and can be used in buildings. There are very few brick factories in Lorestan province, and most of the consumption needs of Lorestan province are met by Isfahan province. The results of this research show that the shale reserves of the province are of suitable quality for the development and operation of many brick factories.

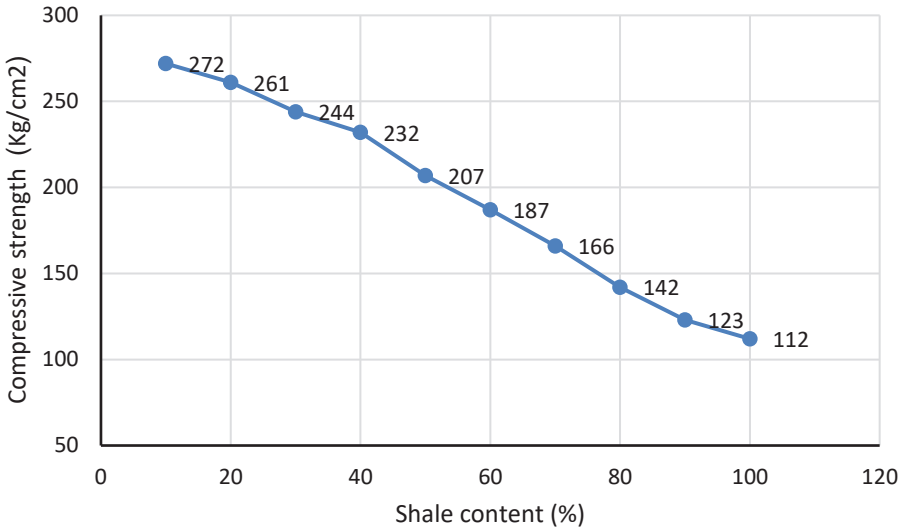


Figure 2. Effect of shale content on compressive strength

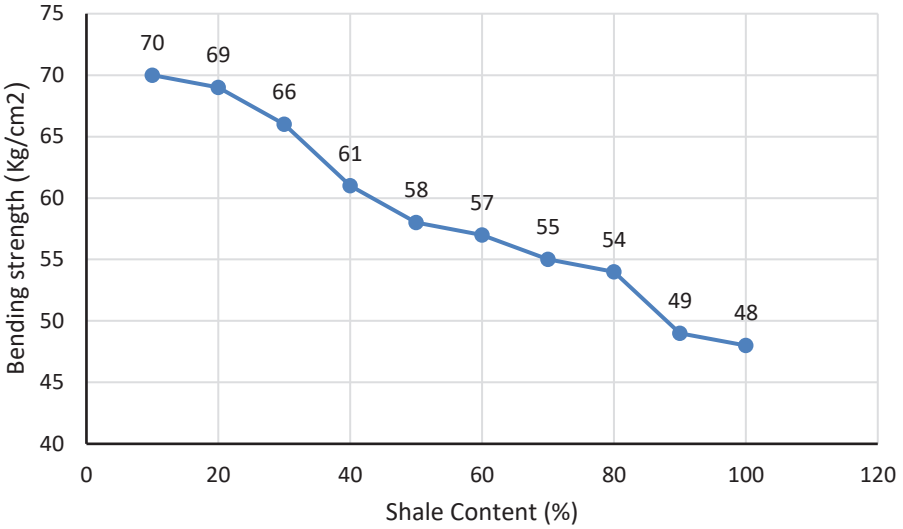


Figure 3. Effect of shale content on bending strength

REFERENCES

[1] Karimpour, M. H. (2010). *"Industrial minerals and rocks"*. The Fifth Ed., Ferdosi University, pp. 398. (In Persian)

[2] Nasiri, Y., Mosaviharami, R., Mahbobi, A., and Yeganeh, B. (2011). *"Facies and sedimentary environment of Amiran formation in Lorestan region"*. In: The 15th conference of the Geological Society of Iran. (In Persian)

[3] Mahdavinejad, M. J. (2005). *"Creativity and the process of creative education in architectural design"*. Beautiful Arts, 21: 66-57. (In Persian)

[4] Zomorshidi, H., and Habibabad, A. S. (2018). *"Bricks and the art of brickwork from ancient times to today"*. Iranian-Islamic City, 9(33): 5-17. (In Persian)

[5] Mor, F., and Moradi, S. (2005). *"Investigating the geochemistry and mineralogy of brick-making and production brick soils, Kovar and Marvdasht, Fars province"*. In: The 9th conference of the Geological Society of Iran. (In Persian)

[6] Khan, M. H., Yousaf, W., Sadaqat, B., Javed, N., and Olukade, A. (2022). *"A Workflow for Shale Play Exploration and Exploitation"*. In: Offshore Technology Conference Asia, Virtual and Kuala Lumpur, Malaysia, March 2022. DOI: https://doi.org/10.4043/31504-MS.

[7] Hossein Miremad, S., Mallayeri, S., and Shakeri, M. (2015). *"Investigating the effect of shale on the qualitative characteristics of clay bricks"*. In: The 7th Conference of the Economic Geology Society of Iran. (In Persian)

[8] Passey, Q. R., Bohacs, K. M., Esch, W. L., Klimentidis, R., and Sinha, S. (2012). *"My source rock is now my reservoir-Geologic and petrophysical characterization of shale-gas reservoirs"*. AAPG Search and Discovery Article, 80231: 1-47.

[9] Lotfiyar, A., Chehrazi, A., and Sabeti, N. (2016). *"Investigating shales as unconventional resources"*. Journal of Exploration & Production Oil & Gas, 135: 65-72. (In Persian)

[10] Kaykha, S., Mosavi, M., Rahanamrad, J., and Golkahzar, M. (2013). *"Introduction of shale mineral for making bricks in Saravan region"*. In: The second National Conference on New Materials and Structures in Civil Engineering. (In Persian)

[11] Tabatabaie, H., Haroni, H. A., and Ayati, F. (2012). *"Investigating areas with the potential of brick raw materials in order to solve environmental problems in Isfahan province"*. Advanced Applied Geology, 2(3): 41-58. (In Persian)

[12] Sobhani, E., and Zolfaghari, S. (2013). *"Using shale brick as a sustainable building material in urban buildings"*. In: The Third International Conference on Sustainable Development and Urban Development. (In Persian)

[13] Taleb Beydokhti, A., Mohamadi Ostadkalayeh, R., and Moomeni, A. (2024). *"Study of the engineering characteristics of slates for brick production in north Hamadan province"*. New Findings in Applied Geology, 18(35): 203-219. DOI: 10.22084/nfag.2023.27632.1549. (In Persian)

[14] Li, L., and He, Y. (2023). *"Exploration on the Utilization, Treatment, and Resource Utilization of Oil-Based Rock Cuttings in Shale Gas Extraction Process"*. Probe - Environmental Science and Technology, 5(3): 9-12.

[15] Hu, W., and Liu, Q. (2022). *"Research Progress on Thermal Properties of Aerated Concrete, Sintered Shale Brick and Composite Materials"*. Highlights in Science, Engineering and Technology, 28: 428-434.

[16] Zhao, H., Ding, J., Li, S., Wang, P., Chen, Y., Liu, Y., and Tian, Q. (2020). *"Effects of porous shale waste brick lightweight aggregate on mechanical properties and autogenous deformation of early-age concrete"*. Construction and Building Materials, 261: 120450.

[17] Nweke, O. M., and Omeokachie, A. I. (2023). *"Ceramics Properties of Indurated-Shale Quarry Wastes from Abakaliki, Southeastern Nigeria: Application as Raw Materials in Roofing-Tile Production"*. Clays and Clay Minerals, 71(2): 143-165.

[18] Hadi, N. A. R. A., and Abdelhadi, M. (2018). *"Characterization and utilization of oil shale ash mixed with granitic and marble wastes to produce lightweight bricks"*. Oil Shale, 35(1): 56-69.

[19] Wu, J., Yin, S., Zhang, L., and Song, X. (2021). *"Manufacture of sustainable fired shale bricks using sewage sludge as raw material"*. Materials Research Express, 8(9): 95510.

[20] Usta, M. C., Yörük, C. R., Hain, T., Paaver, P., Snellings, R., Rozov, E., Gregor, A., Kuusik, R., Trikkel, A., and Uibu, M. (2020). *"Evaluation of new applications of oil shale ashes in building materials"*. Minerals, 10(9): 765.

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

دانشگاه بین المللی امام خمینی
IMAM KHOMEINI INTERNATIONAL UNIVERSITY

دوره دهم، شماره ۱، بهار ۱٤۰٤، صفحه ٦٦ تا ۷۵
Vol. 10, No. 1, Spring 2025, pp. 66-75

علمی-پژوهشی

تولید آجر ساختمانی از سنگ شیل لرستان و بررسی پارامترهای موثر

فروزان بیرانوند[۱]، کیانوش بارانی بیرانوند[۲*]، رضا قائدرحمتی[۲]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه لرستان، لرستان

۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه لرستان، لرستان

دریافت: ۱٤۰۲/۱۲/۰۸ پذیرش: ۱٤۰۳/۰۲/۰۹

چکیده

در این تحقیق امکان تولید آجر ساختمانی از ذخایر شیل استان لرستان بررسی شده است. از ۶ موقعیت جغرافیایی مختلف نمونه‌برداری به عمل آمد و بعد از انجام آزمایش‌های XRF یک نمونه برای تولید آجر انتخاب شد. از نمونه انتخاب شده تعداد ۱۱ ترکیب مختلف آجر با درصد شیل مختلف ساخته شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی و جذب آب بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد با افزایش میزان درصد شیل میزان جذب آب افزایش می‌یابد به طوری که نمونه‌هایی که از ۹۰ تا ۱۰۰ درصد شیل تشکیل شده‌اند، ۱۴٫۸ درصد جذب آب دارند. نمونه حاوی ۱۰ درصد شیل دارای جذب آب ۱۱٫۱ درصد است. همچنین نتایج نشان داد افزایش درصد شیل باعث کاهش مقاومت فشاری و خمشی آجرها می‌شود. بیشترین مقاومت فشاری با مقدار ۲۷٫۲ مگاپاسکال مربوط به نمونه حاوی ۱۰ درصد شیل است، در حالی که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰۰ درصد شیل فقط ۱۱٫۲ مگاپاسکال است. بر اساس استاندارد ملی INSO-7 آجرهای ساخته شده کیفیت مطلوبی دارند و می‌توان از آنها به عنوان آجر بنایی و آجر نما در ساختمان‌ها استفاده کرد.

کلمات کلیدی

آجر ساختمانی، سنگ شیل، سازند امیران، استان لرستان.

استناد به این مقاله

بیرانوند، ف.، بارانی بیرانوند، ک.، قائد رحمتی، ر.؛ ۱۴۰۴؛ "**تولید آجر ساختمانی از سنگ شیل لرستان و بررسی پارامترهای موثر**". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دهم، شماره ۱، ص ۷۵-۶۱.

DOI: 10.30479/jmre.2024.20019.1683

*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: barani.k@lu.ac.ir

حق‌مؤلف © نویسندگان
ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

۱- مقدمه

امروزه به کارگیری آجر، حتی در نماها و محوطه‌سازی‌ها به عنوان رقیب اصلی بلوک‌های بتنی بخش عمده‌ای از حجم ابنیه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. بدین جهت و نیز به دلیل افزایش تقاضا، در سال‌های اخیر، بررسی و افزایش کمی و کیفی تولید آجر مورد توجه بسیار قرار گرفته است. خاک مناسب، مهم‌ترین عامل کیفی در تولید آجر به شمار می‌آید. ماده خام تولید آجر بیشتر از خاک‌های رسی، شیل و مارن تامین می‌شود [۳-۱]. شیل نوعی سنگ رسوبی ریزدانه است که از فشردگی سیلت و ذرات معدنی تشکیل شده است. شیل‌ها در مکان‌هایی تشکیل می‌شوند که سرعت حرکت آب آهسته است و رسوب‌گذاری به راحتی انجام می‌شود، بنابراین شیل‌ها را عمدتا می‌توان در دریاچه‌ها، دلتای رودخانه‌ها و دشت‌های رسوبی یافت. مشخصه شیل دارا بودن صفحات موازی و لایه لایه است که به سهولت ورقه ورقه می‌شوند و ضخامت هر ورقه کمتر از یک سانتی‌متر است. شیل‌ها عمدتا ترکیبی از کانی‌های رسی و دانه‌های کوارتز هستند و رس مهم‌ترین جزء سازنده آنها است [۶-۴]. برخی از شیل‌ها خواص ویژه‌ای دارند که آن‌ها را به منابع مهمی تبدیل می‌کند. شیل‌های سیاه حاوی مواد آلی هستند که گاهی اوقات تجزیه می‌شوند و گاز طبیعی یا نفت را تشکیل می‌دهند. شیل‌های دیگر را می‌توان خرد کرده و با آب مخلوط کرد تا به خاک رس تبدیل شوند که می‌توان اشیاء مفید و مختلفی از آنها تولید کرد [۶].

برای تولید آجر ابتدا خمیری عمدتا از خاک رس تهیه شده و قالب‌ریزی می‌شود که بعد از خشک شدن به آن خشت می‌گویند. در ادامه خشت‌ها در کوره پخته شده و به یک محصول سرامیکی تبدیل می‌شوند که به آن آجر گفته می‌شود. پختن آجر فرآیندی است که در آن آب شیمیایی گل رس گرفته می‌شود و در واقع هیدروسیلیکات آلومینیم به سیلیکات آلومینیم تبدیل می‌شود و در نتیجه این فرآیند مقاومت ماده افزایش می‌یابد. کیفیت خاکی که در آجر نما استفاده می‌شود باید بالاتر از کیفیت خاکی باشد که برای تولید آجر معمولی به کار می‌رود. مواد مضر این نوع خاک باید کم باشد و وجود مقداری کائولینت ممکن است مطلوب باشد. شیل‌های تشکیل شده از ایلیت و کوارتز که عموما با مقداری کلریت و کائولینیت همراهند به طور گسترده‌ای در تولید آجر نما مصرف می‌شوند[۸،۷]. در جدول ۱ ویژگی‌های شیمیایی خاک مناسب برای آجرپزی آمده است.

جدول ۱: ویژگی‌های شیمیایی خاک آجرپزی مطابق با استاندارد ۱۶۰۲ ایران

ترکیب شیمیایی	حد قابل قبول (درصد)
اکسید سیلسیم	۴۰ تا ۶۰
اکسید آلومینیم	۹ تا ۲۱
اکسید آهن	۳ تا ۱۲
اکسید کلسیم	۱۷
اکسید منیزیم	۴
انیدرید کربنیک	۸/۵
انیدرید سولفوریک	۰/۵
کلریدهای سدیم و پتاسیم	۰/۱
افت وزن در اثر سرخ شدن در ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد	۱۶

یکی از پارامترهای مهم و موثر بر کیفیت آجرهای رسی انتخاب مواد اولیه مرغوب و مناسب است. امروزه خاک رس بیشترین مصرف به عنوان مواد اولیه در تولید آجر را دارد. البته در موارد متعددی هم از خاک رس به همراه سنگ شیل و یا سنگ شیل به تنهایی جهت تولید آجر استفاده می‌شود. دو مساله مهم در استفاده از خاک رس برای تولید آجر وجود دارد. مساله اول اینکه مطالعات نشان می‌دهد در موارد مختلفی آجرهای رسی کیفیت مطلوب جهت استفاده در یک سازه مقاوم و سبک را ندارند. مساله دوم استفاده بی‌رویه از خاک رس است که باعث تخریب محیط زیست و کاهش منابع مفید کشاورزی می‌گردد. برای بهبود این وضعیت در بسیاری از کشورها از سنگ شیل به جای خاک رس برای تولید آجر استفاده می‌شود یا در مواردی با اختلاط شیل با درصدهای مختلف به خاک رس، می‌توان شاخصه‌های کیفی آجرهای رسی را افزایش داد و همچنین از مصرف بی‌رویه خاک رس جلوگیری کرد.

تحقیقات متعددی در مورد استفاده از شیل برای تولید آجر صورت گرفته است که از این میان می‌توان به چند مورد زیر اشاره کرد:

تولید آجر ساختمانی از یک معدن شیل در منطقه سراوان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان داده که شیل سراوان برای پخت آجر بسیار مناسب است و معدن یاد شده می‌تواند نیاز منطقه را برای سال‌های طولانی تامین کند[۹].

در یک پژوهش، مناطق دارای پتانسیل مواد اولیه آجر در

منطقه اصفهان بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که با اختلاط بهینه مواد رس و شیل می‌توان به آجری استاندارد با مقاومت فشاری و جذب آب مناسب دست یافت. از طرفی با شناسایی و اولویت‌بندی مناطق دارای پتانسیل بالای مواد اولیه آجر در خارج از محدوده شهری اصفهان، می‌توان کارخانه‌های آجر نزدیک شهر را در آینده به این مناطق تغییر مکان داد[۱۰].

در یک پژوهش استفاده از آجر شیلی به عنوان مصالح ساختمانی پایدار در ساختمان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که آجرهای شیلی در مقایسه با آجرهای رسی دارای مقاومت فشاری، دوام و پایداری بیشتر، درصد جذب آب کمتر، تحمل تعداد سیکل یخزدگی بیشتر و نیز مقاومت حرارتی و دفع رطوبت بالاتری هستند[۱۱].

ویژگی‌های اسلیت‌ها و شیل‌های دگرگون شده شمال استان همدان برای استفاده در ساخت آجر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داده است که ترکیب سنگ‌های مورد مطالعه، مطابق با استاندارد موجود با ساخت آجر (استاندارد شماره ۱۱۶۲ سازمان ملی استاندارد) است. مقادیر دانسیته آجرهای تولیدی گویای سبک‌تر بودن آنها نسبت به آجرهای معمولی است. جذب آب آجرهای تولیدی بر اساس استاندارد شماره ۷ سازمان ملی استاندارد ایران برای آجرنما و آجر توکار مناسب است. همه آجرهای ساخته شده به لحاظ مقاومتی وضعیت مناسبی داشته و جهت استفاده برای آجر مهندسی، نما و توکار قابل استفاده هستند [۱۲].

در کشور اردن تولید آجرهای بنایی سبک و مقاوم از ضایعات خاکستر سنگ شیل نفتی، مرمر و گرانیت بررسی شده است. آجرهایی با مخلوط کردن هر سه ماده در نسبت‌های مختلف تولید شده است. نتایج نشان داده است که به طور متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای آجر خاکستر شیل- گرانیت ۳٫۵ مگاپاسکال و برای آجر خاکستر شیل- مرمر ۳٫۸ مگاپاسکال است. این در حالی است که مقاومت آجرهای معمولی سیمانی ۳٫۵ مگاپاسکال است. مقاومت بیشتر آجرهای با ترکیب خاکستر شیل به واکنش‌های آلکالکی-پوزولانیک حین شکل‌گیری آجر نسبت داده شده است. نفوذپذیری نمونه‌های تولید شده بین ۳×۱۰^{-۶} تا $۷٫۲\times۱۰^{-۶}$ سانتی‌متر بر ثانیه گزارش شده است و دانسیته خشک آنها نیز بین ۱٫۱۴ تا ۱٫۲۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است [۱۳].

تولید آجر از سنگ شیل به همراه ماده افزودنی لجن کارخانجات سنگبری در کشور چین بررسی شده است. مقدار پودر لجن بین صفر تا ۳۰ درصد مورد استفاده قرار گرفته و آجرها در دمای بین ۹۲۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد پخته شده‌اند. نتایج نشان داده است که با افزایش پودر لجن درصد رطوبت و نرخ انقباض افزایش و به تبع آن شاخص پلاستیسیته، چگالی ظاهری و مقاومت فشاری آجرهای تولید شده کاهش می‌یابد. در بهترین شرایط مقدار درصد وزنی پودر لجن ۱۵ درصد و دمای پخت ۹۴۰ درجه سانتی‌گراد بوده است [۱۴].

تولید آجر ساختمانی از خاکستر ناشی از سوختن شیل‌های نفتی در کشور استونی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که خاکستر شیل به تنهایی خاصیت سیمان‌شدگی کمی دارد که این امر به دلیل دانه ریز بودن و ترکیب کانی‌شناسی آن است. با افزودن مواد رسی تخلخل آجر و خواص عایق بهبود می‌یابد. همچنین آجرهای تولیدی مقاومت فشاری قابل قبولی دارند[۱۵].

در کشور چین استفاده از ضایعات سنگی ناشی از استخراج شیل‌های نفتی مورد بررسی قرار گرفته است. پیشنهاد شده است برای کاهش اثرات محیط زیستی و همچنین دستیابی به منافع اقتصادی، از این ضایعات می‌توان به عنوان منبع حرارتی، منابع شیمیایی و تولید مصالح ساختمانی استفاده مجدد کرد[۱۶].

کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها مقوله‌ای بسیار مهم است که بسیاری از کشورها به دنبال بهبود آن هستند. تحقیقات در کشور چین نشان داده است که می‌توان از سنگ شیل برای ساخت دیوارهای بتنی هوادهی شده متخلل استفاده کرد. این دیوارهای پیش ساخته عایق بودن ساختمان را افزایش می‌دهند و باعث کاهش مصرف انرژی گرمایشی در ساختمان می‌شوند [۱۷].

یکی از مشکلات بتن‌های با مقاومت و کارآیی بالا این است که در اوایل عمر بتن ترک‌های خودزایی در آن ایجاد می‌شود که به شدت بر دوام بتن تاثیر می‌گذارد. در کشور چین استفاده از سنگ دانه‌های حرارت داده شده و سبک شده شیل در ساخت این بتن‌ها برای کاهش این ترک‌های خودزا بررسی شده است. نتایج نشان داده است که اضافه کردن شیل به ترکیب بتن زمان گیرش اولیه و نهایی را به تاخیر می‌اندازد. در بتن با ترکیب ۱۵ درصد سنگدانه شیل حرارت داده شده، ابتدا بتن منبسط می‌شود، سپس یک پسرفت جزیی اتفاق می‌افتد و سپس تا ۲۸ روز به طور مداوم منبسط می‌شود که این امر در کاهش عارضه ترک‌های خودزا بسیار سودمند است[۱۸].

در نیجریه خواص کانی‌شناسی، ژئوشیمیایی و تکنولوژیکی ضایعات معادن سنگ شیل برای کاربرد در ساخت کاشی‌های پوشش پشت بام بررسی شده است. نمونه‌های سنگ، خرد و دانه‌بندی شده و تحت عملیات حرارتی بالا قرار گرفته است. مطالعات کانی‌شناسی نشان داده است که نمونه‌های شیل مورد بررسی عمدتا شامل آلومینوسیلیکات‌ها (ایلیت، کائولینیت، اسمکتیت، کلریت) همراه با مقادیر زیاد کوارتز و درصدهای متغیری از کربنات و فلدسپات هستند. نتایج نشان داده است که بعد از دمای پخت ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد وزن نمونه‌ها، مقدار انقباض خطی و جذب آب به مقدار قابل توجهی کاهش و مقاومت خمشی به مقدار جزیی افزایش یافته است. بر اساس نتایج به دست آمده نمونه‌های شیل برای ساخت سرامیک‌های پوشش پشت بام مناسب هستند[۱۹].

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که سنگ شیل مورد استفاده برای تولید آجر باید دارای مشخصات شیمیایی و فنی لازم باشد، بنابراین برای این منظور سازندهای زمین‌شناسی حاوی شیل در هر ناحیه مورد استفاده باید به طور جداگانه مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند.

در استان لرستان ذخایر زیادی از سنگ شیل وجود دارد. بخش زیادی از این ذخایر در سازند امیران قرار دارند. سازند امیران یک واحد آواری-کربناته است که تنها در قسمت‌های شمال‌غربی زاگرس مرتفع و ناحیه لرستان دیده می‌شود. این سازند از توالی شیلی و سیلت‌های زیتونی تیره، سیاه و ماسه‌سنگ تیره‌رنگ تشکیل شده که به طور متناوب با یکدیگر قرار دارند. به طور محلی، لایه‌های کنگلومرا که عناصر آن را چرت‌های رادیولاریتی تشکیل می‌دهند در این سازند دیده می‌شود. همچنین سازند امیران دارای میان لایه‌هایی از رسوبات‌سنگ آهکی دریایی (با فسیل‌های پلاژیک) و به طور کلی شامل انواع رخساره‌های توربیدیتی و کربناته است[۲۰]. در این تحقیق استفاده از شیل سازند امیران واقع در استان لرستان برای تولید آجر ساختمانی بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه

برای تهیه نمونه مورد نیاز برای این تحقیق از ۶ نقطه مختلف از سازند امیران نمونه‌برداری شد. جدول ۲ موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد. از هر نقطه تقریبا مقدار ۵۰ کیلوگرم نمونه برداشت شد. شکل ۱ تصویر هوایی نقاط نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد. محیط چندضلعی نمونه‌برداری شده ۱۲۰ کیلومتر و مساحت آن ۴۲۲ کیلومتر مربع است. بجز نقطه C که در اطراف خرم‌آباد قرار دارد سایر نقاط در امتداد آزاد راه خرم‌آباد- اندیمشک و بعد از شهرستان معمولان قرار دارند.

نمونه‌های برداشت شده برای انجام کارهای آماده‌سازی و فرآوری به آزمایشگاه کانه‌آرایی گروه معدن دانشگاه لرستان منتقل شدند. پس از خردایش با سنگ‌شکن فکی و مخروطی با رسیدن به دانه‌بندی مورد نظر هر کدام از نمونه‌ها همگن شده و سپس یک نمونه معرف ۲۰۰ گرمی از هر نمونه جهت آنالیز XRF به آزمایشگاه شرکت زر آزما فرستاده شد. جدول ۳ نتایج آنالیز XRF نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بخش اعظم ترکیب نمونه‌ها را SiO_2، CaO، Fe_2O_3 و Al_2O_3

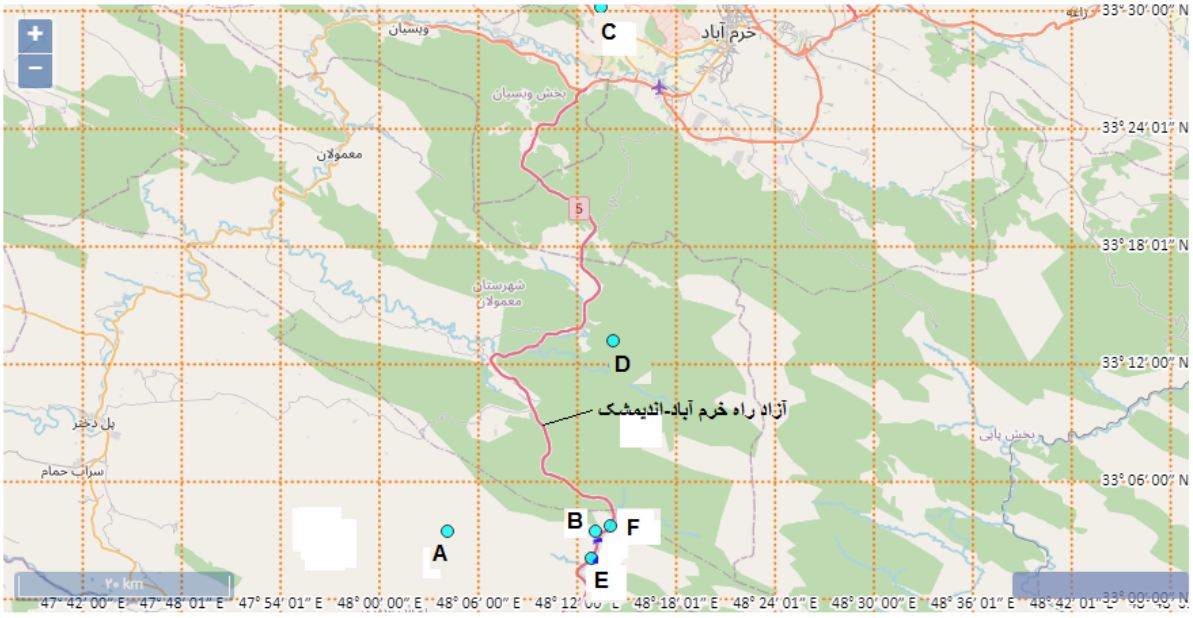
جدول ۲: مختصات جغرافیایی (UTM) نقاط نمونه‌برداری شده

شماره نمونه	کد نمونه	x	y	شماره زون	ارتفاع (متر)
۱	A	۲۲۶۲۹۳	۳۶۶۱۵۷۵	۳۹	۱۱۲۶
۲	B	۲۴۰۲۲۵	۳۶۶۱۱۹۵	۳۹	۱۱۲۰
۳	C	۲۴۲۰۸۲	۳۷۱۰۴۷۸	۳۹	۱۱۳۱
۴	D	۲۴۲۴۱۳	۳۶۷۹۱۴۳	۳۹	۱۱۲۸
۵	E	۲۳۹۷۹۳	۳۶۵۸۵۸۶	۳۹	۱۱۲۹
۶	F	۲۴۱۷۶۸	۳۶۶۱۶۱۷	۳۹	۱۱۱۶

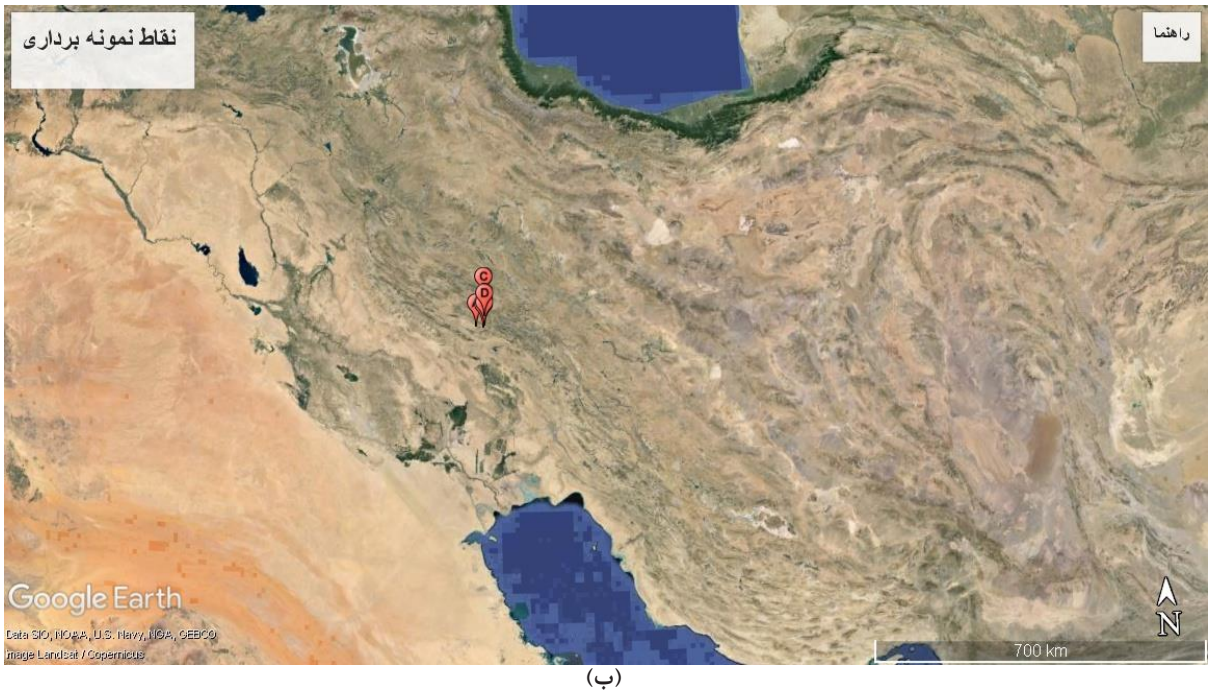
جدول ۳: آنالیز XRF نمونه‌ها

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
SiO_2	۵۳٫۲۳	۵۵٫۱۸	۵۵٫۸۸	۵۳٫۴۶	۴۶٫۷۸	۵۴٫۴۴
Al_2O_3	۷٫۷۸	۹٫۷۴	۸٫۳۶	۷٫۴۶	۷٫۲۲	۸٫۴۰
Fe_2O_3	۷٫۱۳	۹٫۳۳	۸٫۳۳	۷٫۱۰	۷٫۴۵	۹٫۳۳
CaO	۱۲٫۲۳	۵٫۱۱	۹٫۲۷	۱۱٫۷۳	۱۵٫۰۷	۸٫۲۵
Na_2O	۰٫۴۵	۰٫۴۲	۰٫۳۸	۰٫۳۶	۰٫۴۴	۰٫۴۸
K_2O	۱٫۳۹	۱٫۴۷	۱٫۱۲	۱٫۳۲	۱٫۱۰	۱٫۲۴
MgO	۳٫۶۷	۳٫۷۸	۳٫۸۷	۳٫۵۲	۳٫۷۷	۴٫۶۲
TiO_2	۱٫۱۳	۱٫۶۷	۱٫۴۷	۱٫۲۷	۱٫۲۹	۱٫۴۴
MnO	۰٫۱۲	۰٫۰۷	۰٫۰۱	۰٫۱۰	۰٫۱۳	۰٫۱۱
P_2O_5	۰٫۱۶	۰٫۱۷	۰٫۱۷	۰٫۱۵	۰٫۱۷	۰٫۱۹
LOI	۱۲٫۳۷	۹٫۸۹	۱۰٫۸۳	۱۳٫۱۴	۱۶٫۲۳	۱۱٫۲۴
S	۰٫۲۲	۰٫۰۶	۰٫۰۲	۰٫۲۱	۰٫۲۱	۰٫۱۰

تشکیل می‌دهد. CaO اغلب در کلسیت وجود دارد. وجود کلسیت یا قطعات آهکی موجب تشکیل CaO در آجر می‌شود که آب را به خود جذب می‌کند و شکفته می‌شود و باعث ترک خوردن و از هم پاشیدگی آجر می‌شود. SiO_2 در سیلیکات‌ها به ویژه کوارتز قرار دارد. کوارتز در مرحله پخت تغییر ترکیب نمی‌دهد و وجود آن در آجر موجب افزایش مقاومت می‌شود. با توجه به محدودیت در بودجه تحقیقاتی بر اساس بررسی ترکیب شیمیایی از میان این ۶ نمونه، نمونه شماره ۲ که دارای بیشترین مقدار SiO_2 و کمترین مقدار CaO و LOI است به عنوان نمونه مورد استفاده برای آجرسازی انتخاب شد.



(الف)



(ب)

شکل ۱: تصویر هوایی نقاط نمونه‌برداری شده؛ الف) تهیه شده در گوگل مپ، ب) تهیه شده در گوگل ارث

۲-۲- ساختن آجرها

برای ساختن نمونه‌های آجر، نمونه شماره ۲ به کارخانه آجر نما آلا اصفهان ارسال شد. این کارخانه در منطقه صنعتی دولت‌آباد شهر اصفهان قرار دارد. برای یافتن بهترین ترکیب، نمونه شیل مورد بررسی به تدریج جایگزین بخشی از خاک رس نمونه آجر کارخانه آلا اصفهان شد. بر این اساس ۱۱ ترکیب مختلف از آجر ساخته شد. ترکیب و درصد اختلاط نمونه آجرها در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴: ترکیب آجرهای ساخته شده

ردیف	درصد خاک کارخانه	درصد شیل لرستان
۱	۹۰	۱۰
۲	۸۰	۲۰
۳	۷۰	۳۰
۴	۶۰	۴۰
۵	۵۰	۵۰
۶	۴۰	۶۰
۷	۳۰	۷۰
۸	۲۰	۸۰
۹	۱۰	۹۰
۱۰	۰	۱۰۰
۱۱	۱۰۰	۰

بعد از تعیین ترکیب آجرها، مقدار خاک مورد نیاز برای تولید یک آجر (حدود ۱ کیلوگرم) از نمونه شیل لرستان و خاک کارخانه توزین شده سپس با مقداری آب (۱۰۰ سی سی) مخلوط شد. مقدار این آب به اندازه‌ای بود که ذرات حالت چسبندگی پیدا کنند. این کار تاثیر بسزایی در سهولت قالب‌زنی آجرها داشته از طرفی باید توجه داشت که هرچه میزان آب ملات تولیدکننده یک آجر بیشتر باشد، به احتمال زیاد سبک‌تر و پوک‌تر بوده و به این ترتیب مقاومت کمتری دارد. همچنین هزینه و زمان لازم جهت خشک شدن آن نیز بیشتر خواهد بود. شکل ۲ یک نمونه خیس شده را نشان می‌دهد. پس از خیس کردن، نمونه ورز داده شده تا جایی که هوای داخلی آن خارج شده و خمیری یک‌دست و بدون ذرات درشت به دست آید. در ادامه نمونه ورز داده شده درون قالب مخصوص (۳۱۰×۷۰×۲۴mm) ریخته شد. قالب پر شده در زیر دستگاه پرس قرار گرفته و فشرده می‌شود (شکل ۳).

شکل ۲: نمونه خیس شده

شکل ۳: دستگاه پرس آجر

پس از گذشت چند ساعت از خشت‌زنی به طوری که خشت شکل و شمایل گرفته باشد و خیسی یا حالت شل اولیه خودش را دیگر نداشته باشد، آجرها درون کوره چیده شدند. نحوه چینش آن‌ها هم به گونه‌ای باید باشد که از همه جهات در معرض هوا باشند. این کار به سریع‌تر خشک شدن خشت کمک می‌کند. شکل ۴ نمای داخلی و نحوه چینش آجرها داخل کوره آجرپزی برای خشک شدن را نشان می‌دهد. زمان تقریبی مورد نیاز برای خشک کردن حدودا ۲۴ ساعت در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

شکل ۴: نمای داخلی و نحوه چینش آجرها داخل کوره آجرپزی

۲-۳- انجام آزمایش‌های جذب آب، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی

اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی فیزیکی نمونه‌های آجری ساخته شده بر اساس استاندارد ملی INSO-7 صورت گرفته است[۲۱]. برای تعیین مقاومت خمشی از روش استاندارد ملی ایران شماره ۸۲۲۹ استفاده گردید. خوانندگان محترم می‌توانند برای جزییات بیشتر به این استانداردها مراجعه کنند.

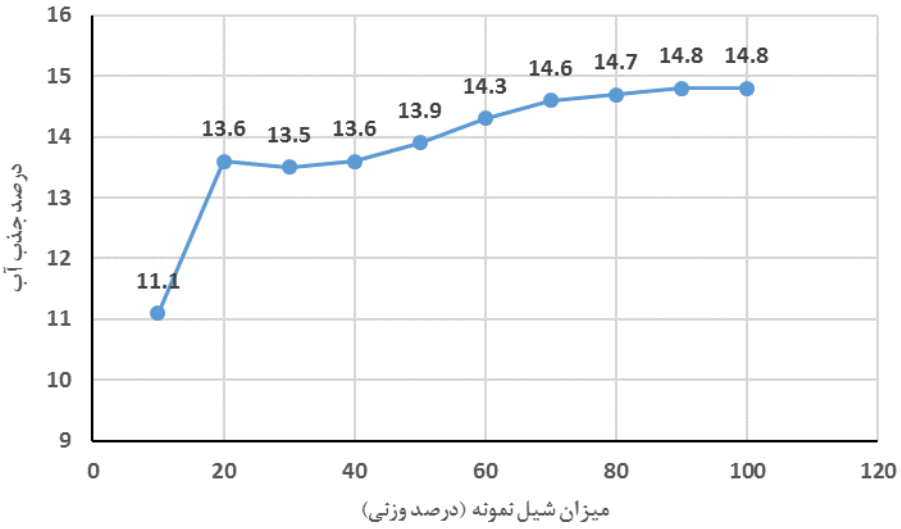
۳- نتایج و بحث

شکل ۵ نتایج آزمون تعیین میزان درصد جذب آب را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان شیل از ۱۰ درصد به ۲۰ درصد، جذب آب از ۱۱٫۱ به ۱۳٫۶ درصد افزایش یافته است. با افزایش بیشتر میزان شیل درصد جذب آب با یک شیب ملایم افزایش یافته است. بیشترین جذب آب با ۱۴٫۸ درصد مربوط به نمونه‌هایی هست که ۹۰ تا ۱۰۰ درصد وزن آنها را شیل تشکیل داده است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش میزان شیل تاثیر منفی بر میزان جذب آب دارد. جدول ۵ میزان حداقل و حداکثر جذب آب را برای آجر ساختمانی بر اساس استاندارد ملی INSO-7 نشان می‌دهد. بر اساس اطلاعات جدول ۵، میزان جذب آب نمونه‌های ساخته شده از شیل لرستان قابل قبول بوده و حتی در مقادیر بالای ۹۰ تا ۱۰۰ درصد وزنی شیل، قابلیت استفاده به عنوان آجر نما و آجر بنایی را دارند.

جدول ۵: ویژگی جذب آب آجر بر اساس استاندارد ملی INSO-7 [۲۱]

نوع آجر	جذب آب (درصد)		
	حداقل	حداکثر	
		نمونه منفرد	میانگین ده آجر
آجر با مقاومت بالا	۶	۱۵	۱۲
آجر نما	۶	۲۰	۱۸
آجر بنایی	۶	۲۵	۳۰

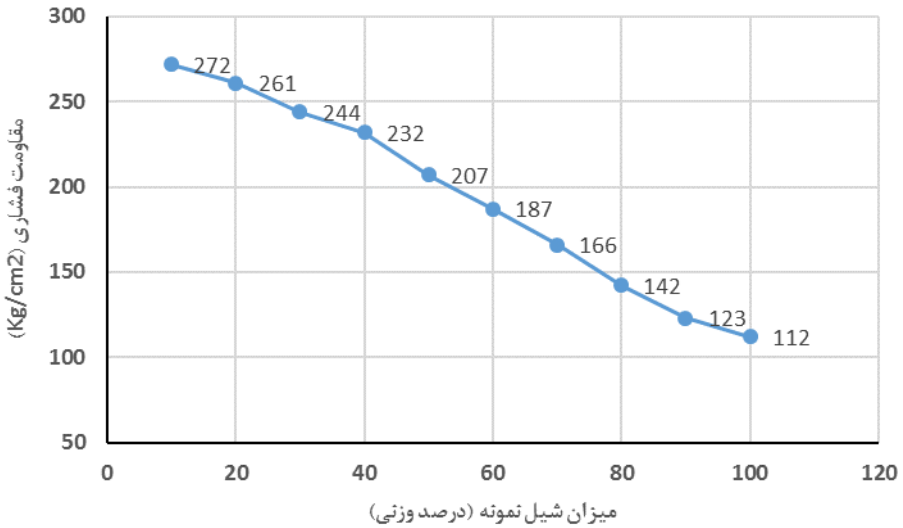
نکته ۱: در صورت عدم انطباق جذب آب انواع آجر با مقادیر حداکثر ویژگی‌های مندرج در جدول یاد شده، انجام آزمون یخزدگی الزامی است.
نکته ۲: ویژگی جذب آب برای آجر برای هر نوع شکل اعم از توپر یا سوراخ‌دار تفاوتی ندارد.



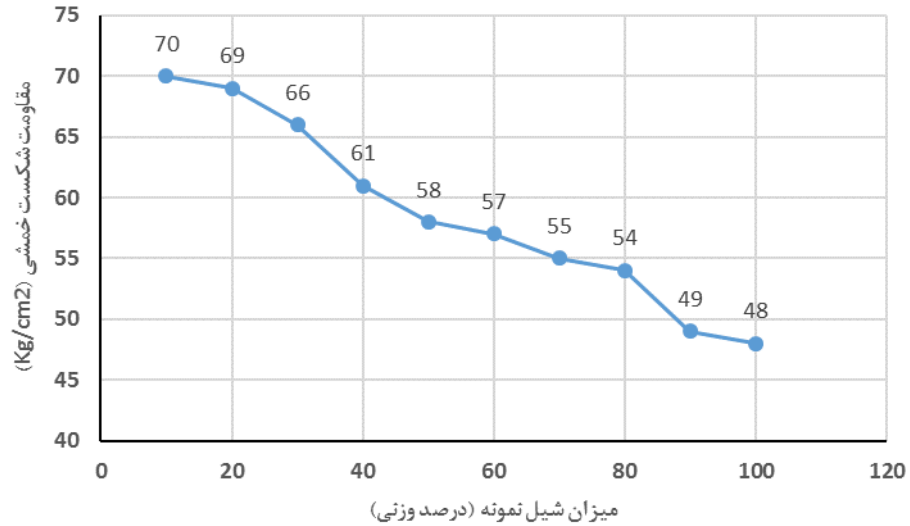
شکل ۵: تاثیر مقدار شیل بر میزان درصد جذب آب

شکل ۶ نتایج آزمون تعیین مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان درصد وزنی شیل لرستان در نمونه‌ها، مقاومت فشاری کاهش یافته است. با افزایش درصد وزنی شیل از ۱۰ به ۱۰۰ درصد مقاومت فشاری از ۲۷۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (تقریبا ۲۷٫۲ مگاپاسکال) به ۱۱۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (تقریبا ۱۱٫۲) مگاپاسکال کاهش یافته است. جدول ۶ میزان حداقل و حداکثر مقاومت را برای آجر ساختمانی بر اساس استاندارد ملی INSO-7 نشان می‌دهد. بر اساس اطلاعات جدول ۶، زمانی که مقدار درصد وزنی شیل در نمونه‌ها ۱۰۰ درصد است، میزان مقاومت نمونه‌ها پایین است با این وجود قابلیت کاربرد به عنوان آجر بنایی درجه یک را دارند.

شکل ۷ نتایج مقاومت خمشی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان درصد وزنی شیل لرستان در نمونه‌ها مقاومت خمشی کاهش یافته است. با افزایش درصد وزنی شیل از ۱۰ به ۱۰۰ درصد مقاومت خمشی از ۷۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (تقریبا ۷ مگاپاسکال) به ۴۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (تقریبا ۴٫۸ مگاپاسکال) کاهش یافته است.



شکل ۶: تاثیر مقدار شیل بر مقاومت فشار



شکل ۷: تاثیر مقدار شیل بر مقاومت خمشی

جدول ۶: ویژگی مقاومت فشاری آجرها بر اساس استاندارد ملی INSO-7 [۲۱]

نوع آجر		حداقل مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	
		میانگین ده آجر	آجر منفرد
آجر با مقاومت بالا	درجه ۱	۳۵	۳۰
	درجه ۲	۲۵	۲۰
آجر با مقاومت پایین	درجه ۱	۱۴	۱۱
	درجه ۲	۱۲	۹
آجر بنایی	درجه ۱	۱۰	۸
	درجه ۲	۸	۶

نکته: ویژگی مقاومت فشاری آجر برای هر نوع شکل آجر اعم از سوراخ‌دار و یا توپر، تفاوتی ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش میزان درصد وزنی شیل در نمونه‌های آجر باعث افزایش درصد جذب آب و کاهش مقاومت فشاری و خمشی می‌شود. با این وجود حتی زمانی که ترکیب وزنی آجر ۱۰۰ درصد از شیل لرستان تشکیل شده است بر اساس استاندارد ملی INSO-7 آجرهای ساخته شده کیفیت مطلوبی دارند و می‌توان از آنها به عنوان آجر بنایی و آجر نما در ساختمان‌ها استفاده کرد.

بر اساس استاندارد INSO-7 ویژگی‌های هندسی مانند میزان تحدب و تقعر، میزان نمک‌های محلول در آب، مقاومت در برابر یخ زدن و آب شدن، مدول گسیختگی و میزان مواد منبسط شونده از دیگر پارامترهای تاثیرگذار بر کیفیت آجر هستند که متاسفانه در این تحقیق به آنها پرداخته نشده و اندازه‌گیری نشده‌اند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی این پارامترها نیز مورد بررسی قرار گرفته و اندازه‌گیری شوند.

استان لرستان دارای ذخایر شیل زیادی است که در بخش‌های مختلف استان پراکنده هستند. در این تحقیق فقط از سازند شیل امیران نمونه‌گیری شده است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی پراکندگی و جامعه آماری نمونه‌گیری افزایش یابد و نمونه‌های دیگر مربوط به سایر نقاط نیز مورد بررسی و آزمایش قرار گیرند.

در استان لرستان کارخانه‌های آجرسازی بسیار کمی وجود دارد و اکثرا نیاز مصرف استان لرستان از استان اصفهان تامین می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ذخایر شیل استان کیفیت مناسب برای احداث و راه‌اندازی کارخانه‌های متعدد آجرپزی را دارند.

۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از کارخانه آلا اصفهان که امکانات لازم برای آماده‌سازی نمونه‌ها و ساخت آجر را فراهم کردند و آزمایشگاه مهندسین مشاور کارا آزمون سازه آزما که همه آزمایش‌های مقاومت و تعیین درصد جذب آب را انجام داده‌اند کمال تقدیر و تشکر را دارند.

۶- مراجع

[۱] مر، ف.، مرادی، س.؛ ۱۳۸۴؛ "**بررسی زمین شیمی و کانی‌شناسی خاک آجرپزی و آجر تولیدی، دشت کوار و مرودشت استان فارس**". نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.

[۲] کریم پور، م. ح.؛ ۱۳۸۹؛ "**کانی‌ها و سنگ‌های صنعتی-چاپ پنجم**". انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

[۳] مهدوی نژاد، م. ج.؛ ۱۳۸۴؛ "**آفرینشگری و روند آموزش خلاقانه در طراحی معماری**". هنرهای زیبا، شماره ۲۱، ص ۶۶-۵۷.

[4] Khan, M. H., Yousaf, W., Sadaqat, B., Javed, N., and Olukade, A. (2022). *"A Workflow for Shale Play Exploration and Exploitation"*. In: Offshore Technology Conference Asia, Virtual and Kuala Lumpur, Malaysia, March 22-25. DOI: https://doi.org/10.4043/31504-MS.

[۵] میرعماد، س. ح.، ملایری، س.، شاکری، م.؛ ۱۳۹۴؛ "**بررسی اثر شیل بر روی ویژگی‌های کیفی آجرهای رسی**". همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.

[6] Passey, Q. R., Bohacs, K. M., Esch, W. L., Klimentidis, R., and Sinha, S. (2012). *"My source rock is now my reservoir-Geologic and petrophysical characterization of shale-gas reservoirs"*. AAPG Search and Discovery Article, 80231: 1-47.

[۷] لطفی یار، ا.، چهرازی، ع.، ثابتی، ن.؛ ۱۳۹۵؛ "**بررسی شیل‌ها به عنوان منابع نامتعارف**". ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۳۵، ص ۷۲-۶۵.

[۸] زمرشیدی، ح.، صادقی حبیب آبادی، ع.؛ ۱۳۹۷؛ "**آجر و هنر آجرکاری از دوران باستان تا امروز**". مطالعات شهر ایرانی اسلامی، دوره۹، شماره ۳۳، ص ۱۸-۵.

[۹] کیخا، س.، موسوی، س. م.، رهنما راد، ج.، گل کهراز، م.؛ ۱۳۹۲؛ "**معرفی ماده معدنی شیل جهت ساخت آجر در منطقه سراوان**". دومین کنفرانس ملی مصالح و سازه‌های نوین در مهندسی عمران.

[۱۰] طباطبایی، س. ح.، اسدی هارونی، ه.، آیتی، ف.؛ ۱۳۹۱؛ "**بررسی مناطق دارای پتانسیل مواد اولیه آجر به منظور رفع مشکلات**

زیست محیطی در استان اصفهان". زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره دوم، شماره سوم، ص ۵۸-۴۱.

[۱۱] سبحانی، ا.، ذوالفقاری، ش.؛ ۱۳۹۲؛ "**استفاده از آجر شیلی به عنوان مصالح ساختمانی پایداردر ساختمان‌های شهری**". سومین کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار و عمران شهری.

[۱۲] طالب بیدختی، ع.، محمدی استاد کلایه، ر.، مومنی، ع. ا.؛ ۱۴۰۳؛ "**مطالعه ویژگی‌های مهندسی اسلیت‌های استان همدان به منظور تولید آجر**". یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۸، شماره ۳۵، ص ۲۱۹-۲۰۳.

[13] Hadi, N. A. R. A., and Abdelhadi, M. (2018). *"Characterization and utilization of oil shale ash mixed with granitic and marble wastes to produce lightweight bricks"*. Oil Shale, 35(1): 56-69.

[14] Wu, J., Yin, S., Zhang, L., and Song, X. (2021). *"Manufacture of sustainable fired shale bricks using sewage sludge as raw material"*. Materials Research Express, 8(9): 95510.

[15] Usta, M. C., Yörük, C. R., Hain, T., Paaver, P., Snellings, R., Rozov, E., Gregor, A., Kuusik, R., Trikkel, A., and Uibu, M. (2020). *"Evaluation of new applications of oil shale ashes in building materials"*. Minerals, 10(9): 765.

[16] Li, L., and He, Y. (2023). *"Exploration on the Utilization, Treatment, and Resource Utilization of Oil-Based Rock Cuttings in Shale Gas Extraction Process"*. Probe - Environmental Science and Technology, 5(3): 9-12.

[17] Hu, W., and Liu, Q. (2022). *"Research Progress on Thermal Properties of Aerated Concrete, Sintered Shale Brick and Composite Materials"*. Highlights in Science, Engineering and Technology, 28: 428-434.

[18] Zhao, H., Ding, J., Li, S., Wang, P., Chen, Y., Liu, Y., and Tian, Q. (2020). *"Effects of porous shale waste brick lightweight aggregate on mechanical properties and autogenous deformation of early-age concrete"*. Construction and Building Materials, 261: 120450.

[19] Nweke, O. M., and Omeokachie, A. I. (2023). *"Ceramics Properties of Indurated-Shale Quarry Wastes from Abakaliki, Southeastern Nigeria: Application as Raw Materials in Roofing-Tile Production"*. Clays and Clay Minerals, 71(2): 143-165.

[۲۰] نصیری، ی.، موسوی حرمی، س. ر.، محبوبی، ا.، یوسفی، ب.؛ ۱۳۹۰؛ "**رخساره‌ها و محیط رسوبی سازند امیران در منطقه لرستان**". پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.

[۲۱] استاندارد ملی ایران شماره ۷، ویرایش ششم؛ ۱۳۹۷؛ "**آجر رسی- ویژگی‌ها و روش‌های آزمون**". سازمان ملی استاندارد ایران.