



بررسی ژئوشیمی و تست صنعتی معادن باقرآباد، آب‌ملخ و مارسار در استان اصفهان برای کاربری در آجرهای نسوز ساختمانی

زهره اعلمی‌نیا^۱، فیروزه شواخی^{۲*}

۱- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

shavvakhi@sci.ui.ac.ir

چکیده:

این مقاله امکان استفاده از مواد خام استخراجی از شیل، بوکسیت و سنگهای آتشفشانی دگرسار را برای تولید آجر نمای ساختمانی ارزیابی می‌کند. از اینرو به معرفی و مقایسه ویژگی‌های هر کدام می‌پردازیم. نمونه‌ها بترتیب از باقرآباد اردستان، آب‌ملخ سمیرم و مارسار گل‌آباد نطنز جمع‌آوری شد. از نظر زمین‌شیمیایی، نمونه‌های باقرآباد با اکسید کلسیم بالا، نمونه‌های آب‌ملخ با آلومینا و آهن بالا همراه با مقدار کم سیلیکا و نمونه‌های مارسار با ترکیب عادی مشخص می‌شوند. در آزمایش تجربی تولید آجرهای نسوز، نمونه‌های هر معدن بین ۹۰۰ تا ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد پخت شدند. آجرهای نسوز به دلیل خاصیت ویژه‌ی ماده اولیه، طیف رنگ پرتقالی در باقرآباد، طرح انگلیسی در آب‌ملخ و رنگ شاموتی در مارسار دارند. آزمایش‌ها نشان داد که سنگهای آب‌ملخ برخلاف دو نوع دیگر برای آجر نسوز مناسب نیستند. نتایج نشان داد که تهیه آجر شیلی نسوز می‌تواند مشکلات زیست‌محیطی را کاهش دهد.

کلیدواژه: آجر نسوز ساختمانی، ژئوشیمیایی، سازند کرتاسه پسین، آتشفشانی دگرسار، اصفهان.

The study of geochemistry and industrial testing of Bagherabad, Abmalakh, and Marsar mines in the Isfahan province for using building firebricks

Zahra Alamini¹, Firouzeh Shavvakhi^{2*}

¹ Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Iran

² MSc student, Department of Geology, University of Isfahan, Iran

Abstract

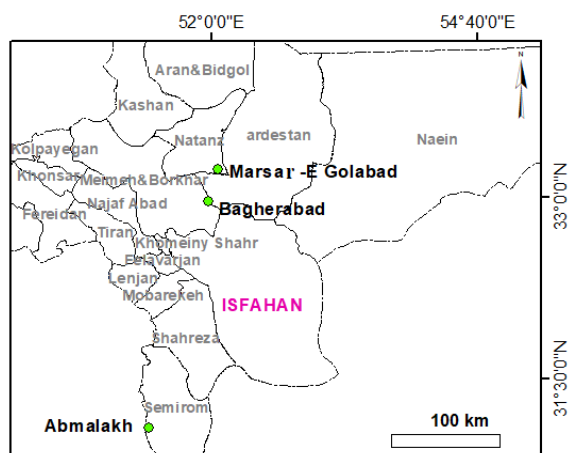
This paper assesses the possibility of using raw material extracted from shale, bauxite, and altered volcanic rocks for the production of building facade bricks. Hence, we introduce and compare the features of each refractory brick. Samples were collected from Bagherabad of Ardestan (BA), Abmalakh of Semirom (AM), and Marsar-e Golabad of Natanz (MG), respectively. Geochemically, samples are characterized by high CaO in BA, high alumina and iron contents associated with low silica content in AM, and normal composition in MG. In the experimental test, specimens of each mine were fired between 900 and 1180 °C to produce refractory bricks. Due to their special properties, firebricks coloured orange spectrum in BG, English design in AM, and chamotte colour in MG. The tests revealed the AM rocks are not suitable for firebricks, unlike the two others. The results indicated that preparing of fired shale bricks could reduce environmental problems.

Keywords: Building firebricks, Geochemical, Upper Cretaceous Formation, Altered volcanic, Isfahan.

مقدمه:

کانی‌های رسی، کانی‌های صنعتی مهمی هستند که سالیانه میلیون‌ها تن از آنها در کاربری‌های مختلف فن‌آوری مدرن از جمله در فرآورده‌های سرامیک، دیرگداز، کاغذسازی، ریخته‌گری، لاستیک‌سازی، رنگ، پلاستیک، حشره‌کش‌ها، داروسازی، نساجی و صنایع چسب استفاده می‌شود. دیرگدازها (نسوز) به گروه مواد سرامیکی تعلق دارند که برای دماهای بالاتر از ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بکار گرفته می‌شوند (Hassan, 2005; Bortnikov et al., 2016; Lomertwala et al., 2019).

بیشتر دیرگدازها از اکسیدهای طبیعی با نقطه ذوب بالا مانند SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Cr_2O_5 و ZrO ساخته شده‌اند (Jock et al., 2013). سازنده اصلی نسوزها، خاک رس است که از طریق فرآیندهای شیمیایی همچون هوازگی یا دگرسانی سنگها تولید می‌شود. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد آنها سبب مقاومتشان در برابر سایش فیزیکی، دمای بالا و خوردگی شیمیایی شده است (Borode et al., 2000). آنها یکی از سازنده‌های اصلی کوره‌ها، مبدل‌های حرارتی، زباله‌سوزها و آجرهای نسوز هستند (Irabor, 2002; Lomertwala et al., 2019). کاربری‌های آنها بشدت به ساختار بلوری، ترکیب شیمیایی و خصوصیات فیزیکی آنها وابسته است و تعیین ترکیب کانی‌شناسی و عنصری آنها اهمیت ویژه‌ای دارد. پهناوری، تنوع زونه‌های ساختاری و زمین‌شناسی خاص استان اصفهان، آن را به یکی از قطبهای مهم معدنی ایران تبدیل نموده است بطوری که جایگاه دوم کشوری از دید میزان ذخایر معدنی را کسب نموده است. سهم ایران از ذخایر خاک نسوز دنیا کمتر از یک درصد است که در حال حاضر از این میان، شش معدن فعال خاک نسوز در پهنه‌های مختلف ساختاری استان پهناور اصفهان در حال بهره‌برداری هستند. در این تحقیق سه معدن شیل، خاک‌صنعتی و خاک‌نسوز با نامهای باقرآباد اردستان، مارسار گل‌آباد نطنز و آب‌ملخ سمیرم که بترتیب در پهنه‌های ساختاری ایران مرکزی، کمربند ارومیه-دختر و زاگرس چین‌خورده واقعند، انتخاب شده‌اند (شکل ۱). در این تحقیق کوشش شده است تا زمین‌شناسی، ژئوشیمی و پتانسیل کاربری آنها در ساخت آجرهای نسوز نما مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. آجرهای نسوز نما، علاوه بر اینکه در برابر شرایط گوناگون آب و هوایی، باران‌های اسیدی و آتش‌سوزی مقاومت و استحکام دارند، مانع اتلاف انرژی در ساختمان شده و عایق گرمایی خوبی هستند.



شکل ۱- موقعیت سه منطقه مطالعاتی باقرآباد، آب‌ملخ و مارسار گل‌آباد، در پهنه استان اصفهان نمایش داده شده است.

روش کار:

پس از انجام بازدید و پیمایش صحرایی، بمنظور نمونه‌برداری و مقایسه کمی و کیفی افق‌های معدنی، تعداد دوازده نمونه از ماده معدنی از هر سه منطقه باقرآباد اردستان، آب‌ملخ سمیرم، و مارسار نطنز انتخاب و پس از مراحل آماده‌سازی و پودر کردن جهت تعیین ترکیب شیمیایی اکسیدهای اصلی از روش فلورسانس پرتو ایکس (XRF) به آزمایشگاه سنگ‌شناسی ارسال گردید. برای آگاهی از کیفیت آجر نسوز، از ۹ نمونه آسیاب و قالب‌گیری شده، در شرایط گوناگون دمایی و اکسایشی، در کارخانه آجر کمالی نمای اصفهان تست آجر بصورت تک‌پخت انجام پذیرفت.

زمین‌شناسی:

افق‌های معدنی خاک نسوز در محدوده‌های باقرآباد و آب‌ملخ در میان سنگهای رسوبی سازند کرتاسه پسین جای دارد در حالی که ماده معدنی در منطقه مارسار در میان سنگهای آتشفشانی دگرسان‌شده دیده می‌شود (شکل ۲).

- معدن شیل باقرآباد اردستان

معدن باقرآباد در ۴۵ کیلومتری شمال شهر اصفهان، پهنه ایران مرکزی، در میان شیلهای خاکستری با سن کرتاسه پسین قرار دارد. بر اساس نقشه یکصد هزار زمین‌شناسی طرق (شکل ۳)، کهن‌ترین واحدها مربوط به نهشته‌های تریاس میانی بوده

که با دولومیت‌های نخودی رنگ ضخیم تا توده‌ای سازند شتری (T_2) شروع شده و با یک ناپیوستگی فرسایشی به واحد آواری سازند نایبند (T_3) با سن تریاس بالایی تبدیل می‌شود (شکل ۳). بخاطر رویداد زمین‌ساختی سیمیرین میانی، نهشته‌های ژوراسیک در این منطقه وجود ندارد. توالی‌های کرتاسه با ردیفی از تخریبی و آواری‌های قاعده‌ای سرخ‌رنگ (K_1) شامل کنگلومرا و ماسه‌سنگ قرمز رنگ متوسط لایه (۳متر)، شروع شده و به‌طور دگرشیب بر روی نهشته‌های زیرین قرار گرفته و به سمت بالا ریزدانه می‌شود و سپس با آهک ماسه‌ای، دارای لایه‌بندی نازک تا متوسط (۱۲متر) به رنگ زرد تا نارنجی (K_2) و در بالای آن، آهک خاکستری متوسط تا ضخیم لایه (۳۶متر) حاوی اوربیتولین (K_2^t)، ادامه می‌یابد (منانی، ۱۳۸۹). واحد شیلی مارنی ایران مرکزی دارای آمونیت‌های معرف آشکوپ آلبین (کرتاسه پسین) است و سنگهای اوربیتولین دار کرتاسه زیرین را می‌پوشاند. سستبرای واقعی ۱۴۷ متر و شامل شیل‌های مدادی به رنگ سبز زیتونی متمایل به خاکستری همراه با نودول‌هایی (حاوی میگو و آمونیت) در اندازه‌های متفاوت هستند که بصورت میان‌لایه، شیل‌های آهکی با سن آلبین دارند و با یک ناپیوستگی توسط سنگ آهک ماسه‌ای گلاکونیت‌دار به سن تورونین پیشین پوشیده شده است (هفت لنگ و همکاران، ۱۳۹۶). جوان‌ترین رخنمون‌های منطقه مربوط به رسوبات دوران چهارم است و شامل نهشته‌های مخروط‌افکنه‌ای و ته‌نشست‌های سخت نشده قله‌دار (Q_3) و ریگ و ماسه‌های ریزدانه و عناصر درشت (Q^{al}) است که در اثر بارندگی شدید و جریان سیلاب‌ها در بستر رودخانه‌های منطقه برجای نهاده شده‌اند.



شکل ۲- عکس صحرایی و نمای کلی، A. دیپوی شیل باقرآباد در معدن، B. نمای نزدیک از شیل‌های مدادی، در نزدیکی باقرآباد، C. نمایی از معدن آب‌ملخ، D. معدن مارسار نطنز، ماده معدنی از دگرسانی سنگهای آتشفشانی پدید آمده است.

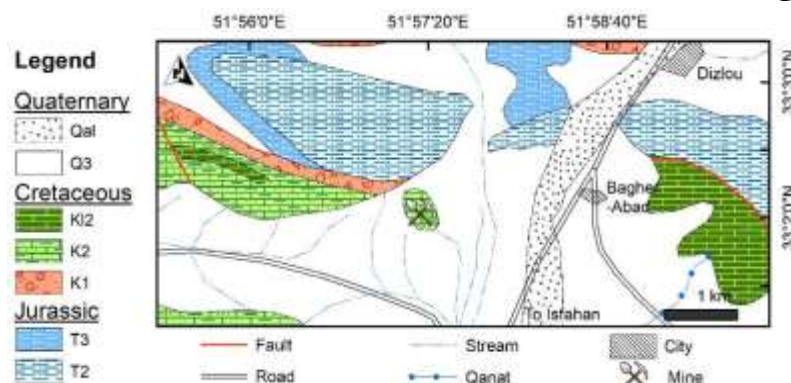
- معدن خاک‌سرخ آب‌ملخ سمیرم

معدن آب‌ملخ در ۲۲۵ کیلومتری شهر اصفهان، ۳۶ کیلومتری جنوب‌غرب سمیرم و پهنه زاگرس چین‌خورده، زیر پهنه سمیرم واقع شده است. این کانسار رسوبی بصورت لایه‌ای در بین دو سازند سروک و ایلام در کرتاسه پسین قرار گرفته است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی دنا با مقیاس یکصد هزارم (شکل ۴)، قدیمی‌ترین واحدها مربوط به نهشته‌های سنگ آهک خاکستری با لایه‌بندی خوب (۲/۲ متر)، با میان‌لایه‌های مارن مربوط به دوره کرتاسه (سازند سورمه) در نظر گرفته است. سپس با آهک‌های ائیدی کرم رنگ و مارن‌های زرد رنگ سازندهای داریان فلهیان و گدوان ادامه می‌یابد. حد پایین افق معدنی آهک و مارن زرد خاکستری، سازند کزدمی است. آهک با میان‌لایه‌های مارن در سازند سروک میزبان اصلی کانسار خاک نسوز آب‌ملخ است. افق زیرین ماده معدنی لایه رسی قرمز رنگ با ضخامت متغیر است که با لایه رسی زرد تا خاکستری ادامه یافته است (اعتمادی، ۱۳۸۵). ضخامت این افق معدنی در منطقه آب‌ملخ به ۵۳ متر می‌رسد. جوان‌ترین لایه نیز شامل شیل خاکستری با میان‌لایه ماسه سنگ گلوکونیتی می‌باشد این واحد به سازند گورپی تعلق دارد. سازند تاربور از آهک توده‌ای و صخره‌ای فسیل‌دار و سازند بختیاری بیشتر کنگلومرا و ماسه‌سنگ آهکی هستند.

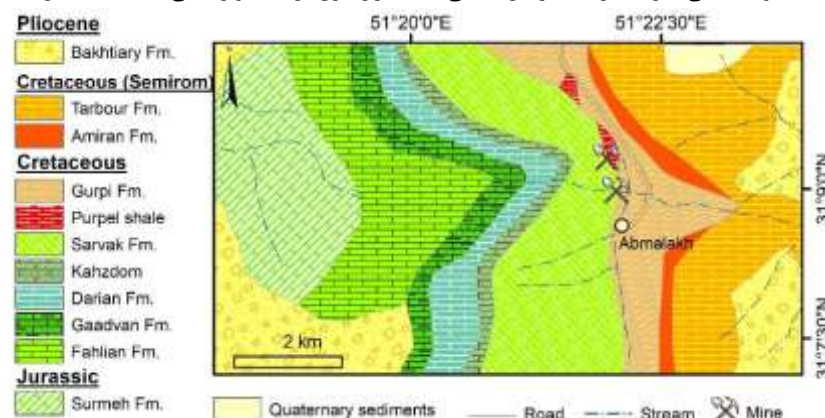
- معدن خاک‌صنعتی مارسار نطنز

معدن مارسار در ۲۵ کیلومتری جنوب شرق نطنز قرار دارد. بررسی رخنمون‌های موجود نشان داده است که در منطقه گل‌آباد، سنگهای قدیمی‌تر از اتوسن وجود ندارد و عمده سنگهای منطقه از نوع آذرین شامل تنوعی از سنگهای آتشفشانی و گدازه‌های آندزیتی-ریولیتی اتوسن است (شکل ۵). بر اساس نقشه یکصد هزار زمین‌شناسی اردستان، کهن‌ترین مجموعه آتشفشانی شامل برش‌های داسیت - آندزیتی قرمز رنگ و توفهای داسیتی با ضخامت ناچیز است که در جنوب باختری

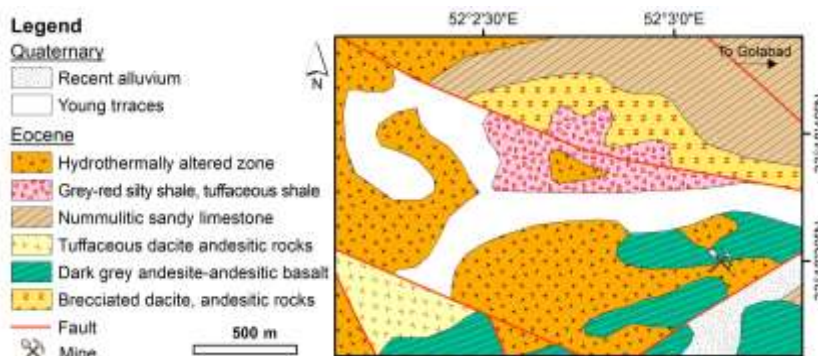
روستای گل‌آباد رخنمون دارد (رادفر، ۱۳۷۸). واحد آندزیت و آندزیت-بازالت بصورت تیره تا خاکستری‌رنگ با ضخامت تقریبی ۴۰ تا ۱۰۰ متر گسترش دارد. در ادامه تناوبی از توف سنگهای داسیت آندزیتی، توف ماسه‌ای و آهک ماسه‌ای به‌صورت گسله بر روی واحدهای آتشفشانی قبلی مشاهده می‌شود. سنگهای رسوبی آهک‌های ماسه‌ای نومولیت‌دار تیره تا خاکستری رنگ با لایه‌بندی منظم و توف ماسه‌ای سبز متمایل به خاکستری دیده می‌شود. سنگهای جوانتر مربوط به ریولیت تا ریوداسیت و توف‌های ریولیتی می‌باشد. نهشته‌های کواترنری معمولاً در سطوح مختلف توپوگرافی آشکار می‌گردند و شامل نهشته‌های مخروطه‌افکنه‌ای و تهنشست‌های سخت نشده قلوه‌دار است. ماده معدنی همان پهنه دگرسانی آرژیلیک است که در میان سنگهای فلسیک دیده می‌شود.



شکل ۳- محدوده معدنی باقرآباد در نقشه زمین‌شناسی یکصد هزار طبق (زاهدی و رحمتی، ۱۳۸۱) نمایش داده شده است.



شکل ۴- محدوده معدنی آب‌ملخ در برگه زمین‌شناسی یکصد هزار دنا (صدافت و قریب، ۱۹۹۹) جای دارد.



شکل ۵- محدوده معدنی مارسار در نزدیکی روستای گل‌آباد و در نقشه یکصد هزار زمین‌شناسی اردستان (رادفر، ۱۳۷۸) قرار دارد.

ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمی خاک نسوز

یکی از نمونه‌های سفیدرنگ معدن مارسار، برای تعیین کانی‌شناسی به روش پراش پرتوایکس (XRD) مورد بررسی قرار گرفت. کانی‌های کوارتز، ایلیت و آلپیت از مهمترین اجزا سنگ و کانیهای فرعی آن فلدسپار، کلریت و هماتیت می‌باشد

(شکل ۶). نمونه‌های سرخ رنگ کانسار آب‌ملخ سمیرم عمدتاً از کانی‌های کائولینیت، کوارتز، آناتاز، همتایت و گوئیتیت تشکیل شده است (اعتمادی و پیرنجم‌الدین، ۱۳۸۵).

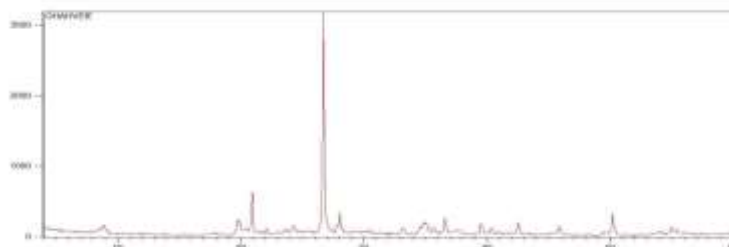
جدول ۱- ترکیب شیمیایی خاک صنعتی مارسار گل‌آباد نطنز، خاک سرخ آب‌ملخ و شیل باقرآباد، عناصر اصلی بر حسب درصد.

Type	Marsar Golabad								Abmalakh			Bagherabad	
Sample	MF1	IF2	MA1	MA2	MB	MC	MA3	MA4	AM01	AM10*	AM02	SB04	SB03
SiO ₂	73.4	73.3	70.48	70.2	70.00	68.47	65.32	62.90	27.34	32.01	25.45	61.14	59.21
Al ₂ O ₃	18.85	19.21	16.95	20.39	21.48	23.98	15.56	16.84	38.18	28.11	40.48	17.34	17.09
CaO	0.54	0.095	1.60	0.88	0.86	0.08	0.42	0.40	0.45	0.32	2.08	4.34	4.48
Fe ₂ O ₃	0.44	0.29	0.68	1.05	0.68	0.62	6.95	3.60	17.99	26.1	16	5.48	6.20
K ₂ O	0.029	0.015	1.84	0.01	0.35	0.03	3.82	4.26	0.25	0.22	0.38	1.78	1.77
MgO	0.23	0.31	0.18		0.30		1.45	0.47	0.77	0.47	0.99	1.40	1.41
MnO				0.01		0.014			0.08	0.02	0.048	0.15	0.14
Na ₂ O	0.18	0.18	1.29	0.03	0.85	0.16	1.18	2.44	0.05	0.16	0.07	0.07	0.08
P ₂ O ₅				0.23		0.037		0.10	0.02	0.01	0.007		
SO ₃	0.19	0.09	0.42	1.1	0.45	0.213	0.08	1.98	<0.01		0.14	0.22	0.36
TiO ₂	0.7	0.7	0.08	0.9	0.06	0.902	0.74	0.81	1.94	1.30	1.09	0.35	0.34
LOI	4.35	4.4	5.62	5.2	5.20	5.27	4.41	6.04	12.91	11.21	12.76	7.51	8.76
Total	98.909	98.59	99.14	99.97	99.93	99.776	99.81	99.84	99.99	99.93	99.495	99.78	99.84

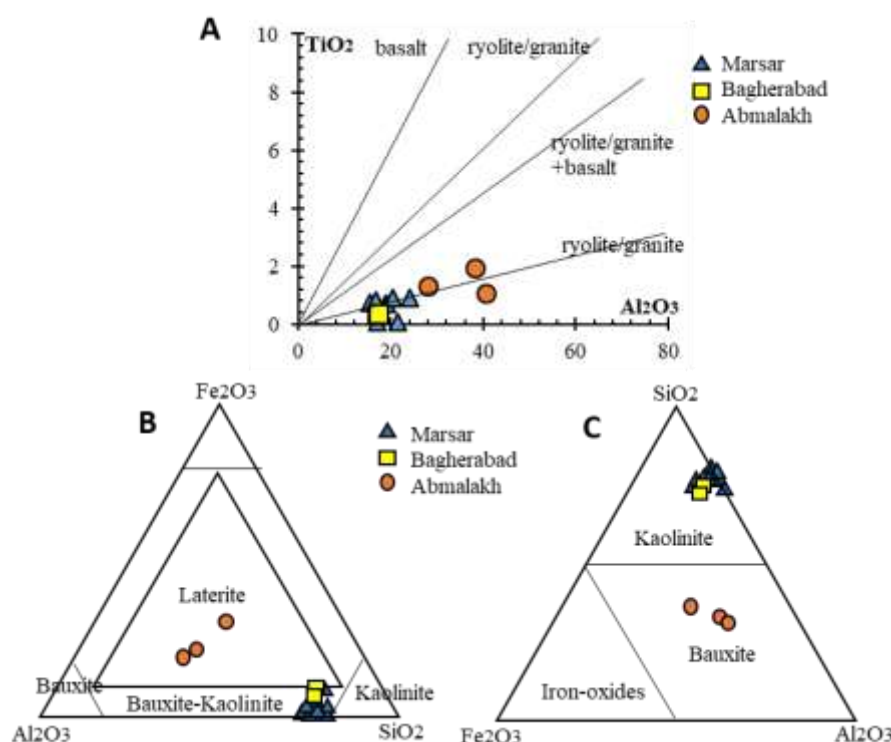
* نتایج نمونه AM10 از پایان‌نامه فیروزی، ۱۳۹۷.

تجزیه شیمیایی در رس‌های نسوز اهمیت زیادی دارد. معمولاً رس‌های نسوز با مقدار آلومینای ۲۵ تا ۴۵ درصد، TiO₂ بین ۱ تا ۴ درصد، و آهن کمتر از ۲/۵ درصد رده‌بندی می‌شود. افزایش اکسید آهن سبب گدازآر شدن محصول می‌شود. مجموع اکسیدهای Na₂O+K₂O+CaO+MgO نباید بیشتر از ۶ درصد باشد (Abu-Hamattah et al., 2003). بمنظور بررسی و مقایسه ژئوشیمی ماده معدنی، نتایج تجزیه زمین شیمیایی مربوط به ۸ نمونه سنگ سفید مارسار نطنز، ۳ نمونه سنگ سرخ آب‌ملخ سمیرم و ۲ نمونه شیل خاکستری باقرآباد اصفهان در جدول یک نشان داده شده است. اکسیدهای اصلی می‌توانند بر کیفیت ماده خام و محصول نسوز نقش اساسی بوجود آورند. میانگین SiO₂ نمونه‌های باقرآباد ۶۰/۱۸، آب‌ملخ ۲۸/۲۷ و مارسار ۶۹/۲۶ درصد است. مقدار بالای سیلیکا در مارسار و باقرآباد نشان می‌دهد کوارتز بصورت آزاد در آنها وجود دارد. مقدار سیلیکا در نتایج آب‌ملخ در محدوده استاندارد برای کاربری نسوز قرار نمی‌گیرد. از طرفی افزایش مقدار سیلیکا نسبت به استاندارد (Hughes et al., 2006)، می‌تواند سبب افزایش خشنی، دیرگدازی، مقاومت خشک و تغییر شکل هنگام پخت، کاهش MOR و انقباض پخت فرآورده نسوز شود (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۰). میانگین اکسید آلومینیوم در نمونه‌های باقرآباد ۱۷/۲۲، آب‌ملخ ۳۵/۵۹ و مارسار ۱۹/۱۶ درصد می‌باشد. با توجه به افزایش سیلیکا در نمونه‌های باقرآباد و مارسار، انتظار می‌رود آلومینا در آنها کمتر باشد. با افزایش آلومینا مقدار MOR، مقاومت فیزیکی و شیمیایی در برابر ضربه فشاری و کششی بیشتر می‌شود (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۰). درست است که آلومینا در مقایسه با سایر سرامیک‌های سیلیسی و مولیتی، مقاومت بالایی در برابر خوردگی نشان می‌دهد اما هدایت حرارتی بالای آلومینا در آجرهای نسوز، باید کاهش یابد که این مشکل کاهش رسانایی حرارت با افزایش تخلخل در آجر، بهبود داده می‌شود (Shimizu et al., 2013). همبستگی منفی میان اکسیدهای سیلیسیوم و آلومینیوم نشانگر شرایط اسیدی تشکیل کانسار می‌باشد. میانگین اکسید تیتانیوم در نمونه‌های باقرآباد ۰/۳۵، آب‌ملخ ۱/۴۴ و مارسار ۰/۳۵ درصد می‌باشد. مقدار تیتانیا در نمونه‌های هر سه منطقه در حد مناسبی است، Wilder and Dodd (1953) گزارش کردند که تیتانیا در مقادیر کمتر از ۲ درصد اثرات قابل چشم‌پوشی روی دیرگدازی رس‌های نسوز خواهد داشت. اکسید تیتانیوم دارای رنگ سفید است، ولی بر شدت قدرت رنگ‌زائی اکسیدهای فلزی کروموفور (رنگ‌دهنده)، به ویژه اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن پس از پخت می‌افزاید (پایدار، ۱۳۸۷). بالا بودن مقدار تیتانیا باعث تغییر حجم و ایجاد ترک می‌شود (پایدار، ۱۳۸۴). مقدار اکسید کلسیم در نمونه‌های باقرآباد ۴/۴۱، آب‌ملخ ۰/۹۵ و مارسار ۰/۶۱ درصد می‌باشد. کلسیم موجود در باقرآباد می‌تواند در گدازآر بودن ساخت آجر مفید باشد. بالا بودن محتوای MgO باعث چسبندگی کم آجر یا پودر شدن آجر بعد از تولید می‌گردد. مقدار منیزیا در هر سه منطقه مناسب است. بیشترین مقدار سولفور در نمونه‌های دگرسار شده مارسار دیده می‌شود. برای تشخیص سنگ مادر، نتایج شیمیایی هر سه کانسار در نمودار

دوتایی Al_2O_3 - TiO_2 قرار گرفته‌اند (Ekosses, 2001). نمونه‌های دو کانسار باقرآباد و مارسار در پنجره ریولیت-گرانیت قرار گرفته‌اند در حالیکه خاستگاه کانسار آب‌ملخ سنگ‌های فلسیک با تاثیر پذیری از سنگهای مافیک معرفی می‌شود (شکل ۷). در نمودارهای سه‌تایی، نمونه‌های باقرآباد و مارسار در محدوده کائولینیتی و نمونه‌های سرخ رنگ آب‌ملخ، بیشتر ویژگی بوکسیت-لاتریتی نشان می‌دهند (شکل ۷).



شکل ۶- الگوی XRD وابسته به نمونه معدنی مارسار گل‌آباد.



شکل ۷- موقعیت نمونه‌های باقرآباد، آب‌ملخ و مارسار در نمودارهای دوتایی و سه‌تایی زمین‌شیمیایی.

بررسی کیفیت ماده معدنی با آزمایش‌های تجربی

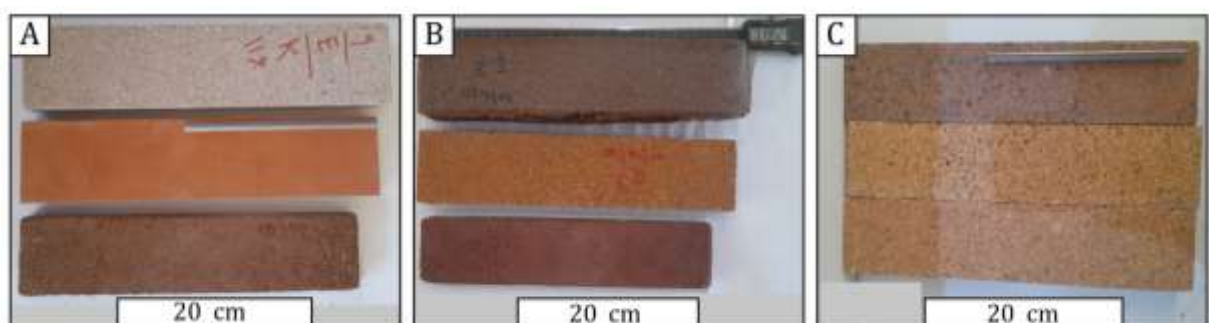
افزایش دما در هر مرحله از پخت سبب تغییراتی بر روی آجر می‌شود. آجر در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شود، در دمای ۲۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد آب تبلور خود را از دست می‌دهد، در دمای ۵۷۳ درجه آل‌فا کوارتز به بتا کوارتز و در دمای ۸۷۰ درجه بتا کوارتز به تری‌دیمیت و در دمای ۱۷۳۰ درجه سانتی‌گراد ماده مذابی بوجود آمده که موجب چسبندگی مواد به هم می‌شود. با افزایش دما، افت حرارتی تا دمای ۱۰۰۰ درجه رخ می‌دهد، همچنین آب تبلور آزاد و موجب کاهش حجم آجر می‌شود. کلسینه کردن (calcining) به فرآیند پخت در دمای بالا گفته می‌شود که برای کاهش شrinkage (shrinkage) و تقویت ترکیب و پایداری حجم دیرگداز بکار می‌رود. اگر میزان سوخت و هوا (هوا و گاز متناسب مخلوط باشند) در زمانی که آجرها در کوره چیده می‌شوند کنترل شود پخت در شرایط اکسیدی بوده و آهن به اکسید/ هیدروکسید تبدیل و باعث قرمزی آجر می‌شود. اگر در مراحل نهایی پخت بالاتر برده شود، و یا مقدار گاز بیش از اندازه بوده و سوختن ناقص انجام شود، پخت در شرایط احیایی بوده و آهن به ایلمنیت و سیلیکات‌های آهن دو ظرفیتی تبدیل می‌شود و دانه‌های

سیاه در اندازه های گوناگون در آن پدید می آید. در صورتیکه پخت در شرایط احیایی بوده و میزان CaO بیشتر از اکسید آهن باشد آجر روشن تر و در شرایط معمولی بسته به میزان آهن آجر تیره تر خواهد بود.

برای تهیه آجر در نمونه های آزمایشگاهی، ماده معدنی خردایش (crushing)، آسیاب شده، در دمای اتاق از الک مش ۱۰ عبور داده می شوند. حدود ۵ درصد حجم خاک، به آن آب افزوده تا به خاک مرطوب تبدیل و نباید چسبندگی به دست داشته باشند. به مدت تقریبی ۱۲ ساعت بمنظور همگن شدن خاک، در دمای اتاق قرار داده شده، سپس قالب گیری و قالب تحت فشار (press) قرار می گیرد. بعد آن را از قالب بیرون آورده و حدود ۱۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد قرار داده می شود. در روش پخت سریع به مدت ۳ ساعت در شرایط اکسیداسیون در دستگاه رولر و یا ۳ روز در شرایط احیا، در شاتل و یا کوره هافمن با دماهای مختلفی پخته می شوند. بعد از سرد شدن، علاوه بر آزمون های جذب آب، استحکام فشاری، تعیین یخ زدگی و نمک محلول بر روی آن، ویژگی های هندسی، مدول گسیختگی، مواد منبسط شونده و کوتاه شدگی (shrinkage) هم طبق آیین نامه استاندارد ملی ایران شماره ۷ بررسی می شود.

جدول ۲- ویژگی های قبل و بعد از پخت (تک پخت) نمونه های باقرآباد، آب ملخ و مارسار گل آباد

منطقه	رنگ قبل پخت	شرایط پخت (°C)	رنگ و طرح بعد از پخت
شیل باقرآباد	سبز روشن تا خاکستری تیره	اکسیدی ۹۰۰ درجه سانتی گراد	طیف رنگ پرتقالی
بوکسیت آبملخ	قرمز با میان لایه زرد	اکسیدی، ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد	انگلیسی روشن
بوکسیت آبملخ	قرمز با میان لایه زرد	احیایی، ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد	انگلیسی تیره
آرژلیک مارسار گل آباد	سفید، کرم، پرتقالی و ..	احیایی، دمای ۱۰۵۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد	شاموتی روشن تا تیره
		اکسیدی، دمای ۱۱۵۰ و ۱۱۶۰ درجه سانتی گراد	



شکل ۷- نمونه آجر تک پخت A: شرایط اکسیدان، از بالای تصویر: نمونه روشن از مارسار نطنز در دمای ۱۱۶۰ درجه سانتی گراد، نمونه پرتقالی از باقرآباد در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد، نمونه تیره از آبملخ در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی گراد، به نبود استحکام کافی در اطراف آجر قهوه ای توجه کنید، **B:** شرایط احیایی، از بالای تصویر: نمونه قهوه ای باقرآباد در دمای ۱۱۶۰ درجه سانتی گراد در این دما شیل تغییر حجم داده است، کولیس اندازه ۳۱۹/۵۲ میلی متر را نشان می دهد. نمونه روشن از مارسار نطنز در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد، نمونه آبملخ در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد (طرح انگلیسی)، به نبود استحکام کافی در اطراف آجر آبملخ توجه کنید. **C:** پخت نمونه های مارسار گل آباد نطنز در رنگ های گوناگون و دماهای ۱۰۵۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد، طرح شاموتی برگرفته از دانه های سیاه رنگ در زمینه می باشد. در A، B و C همه نمونه ها قبل از پخت اندازه یکسانی داشته اند.

نتایج و بحث:

با مقایسه آجرهای تک پخت از سه معدن باقرآباد، آبملخ و مارسار، به علت بالا بودن مقادیر Al_2O_3 ، Fe_2O_3 و تا حدی TiO_2 و همچنین مقدار کم SiO_2 از استحکام آجر تولیدی آبملخ کاسته و سبب ترک و کاهش طول ابعاد (بطول تقریبی ۲۰ میلیمتر) شده است (شکل ۷-B) و بعبارتی آجرها پلاستیسیته و شریکیج مناسبی ندارند. در نمونه های آجر پخت شده از معدن مارسار، افزایش طول ابعاد (بطول تقریبی ۱۰ میلیمتر) مشاهده شد. بالا بودن مقدار گوگرد می تواند سبب شوره زدگی آجر تولیدی از سنگ های آتشفشانی دگرسان باشد هرچند نمونه های قبلی مارسار، مقدار مناسبی از اکسید گوگرد (۵۷/۰ درصد) دارند. علاوه بر این پیدایش ترکیبات اسیدی و سمی ناشی از آن در زمان پخت، اثرات پنهانی بر سلامت زیستی نیروی کار و اثرات تخریبی در جداره کوره خواهد داشت. از آنجا که بالا بودن میزان اکسید کلسیم در نمونه ها، پیامدهای مخربی چون



شکفته شدن آجر را به همراه دارد بهتر است در ماده اولیه باقرآباد که کمی با آهک همراه هست در نظر گرفته شود و مورد میکرونیزه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری:

سازنده اصلی آجر نسوز نما، رسها و سیلتهای دیرگداز هستند که از منابع رسوبی یا آذرین تامین شود. در این مطالعه ترکیب شیمیایی و پخت شیلهای خاکستری باقرآباد اردستان و بوکسیت-لاتریت آبلخ سمیرم با ترکیب اکسیدهای اصلی و پخت نمونه‌های مربوط به سنگهای آتشفشانی دگرسان شده (آرزیلیک) مارسار گل‌آباد نطنز مقایسه و بررسی شدند. عمدتاً آجرهای نسوز تولید شده بترتیب رنگهای پرتقالی، انگلیسی و شاموتی داشتند. خاک معدن آبلخ بدلیل آهن و آلومینای زیاد همراه با سیلیکای کم برای تولید آجر نسوز مناسب نمی‌باشد و در تک پخت آن شرینگیج و کوتاه شدگی مشاهده شد هرچند رنگ آن مشابه آجرهای انگلیسی می‌باشد لذا امکان استفاده آن به عنوان ماده اولیه برای تولید آجر با کیفیت وجود نداشته است. پیشنهاد می‌شود از مخلوط خام دو خاک با نسبت ۳۰٪ آبلخ، ۷۰٪ مارسار پخت شود. آجر تک‌پخت از معدن مارسار، زیبایی طرح و رنگ (شاموتی) داشته و مورد تست چندپخت نیز قرار گرفته است. ولی با افزایش احتمالی گوگرد در ماده اولیه، علاوه بر شوره‌زدگی آجر، ممکن است مشکلات زیست محیطی و اثرات تخریبی در جداره کوره ایجاد نماید. آجر حاصل از شیلهای رسوبی باقرآباد علاوه بر نداشتن اثرات زیست‌محیطی، تنوع رنگ پرتقالی داشته، ضد شوره، مقاومت فشاری بالا، جذب آب و ثبات رنگ با قرار گرفتن در زیر نور مستقیم خورشید دارند و می‌توانند جایگزین مناسبی برای آجرهای فعلی بازار همچون قراقی یا قمی باشند.

تشکر:

بدین‌وسیله از آقای محمدرضا طاهری، مدیرتولید گروه کارخانجات آجر کمالی‌نما منطقه صنعتی دولت‌آباد، خانم قیومیان سازمان صمت استان و آقای صداقت از اعضای نظام مهندسی معدن استان اصفهان و همچنین همکاری بهره‌برداران محترم سه معدن باقرآباد، آبلخ و مارسار سپاسگزاری می‌شود.

منابع:

- اعتمادی، ب.، پیرنجم‌الدین، ح.، ۱۳۸۵، زمین‌شیمی و منشا کانسار خاک نسوز سمیرم، بیست و پنجمین گردهمایی علوم‌زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.
- پایدار، ح.، ۱۳۸۷، تکنولوژی فرآورده‌های چینی، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی، ۳۶۹ صفحه.
- پایدار، ح.، ۱۳۸۴، مواد اولیه در صنایع سرامیک، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی.
- رادفر، ج.، ۱۳۷۹، نقشه زمین‌شناسی ورقه اردستان، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- زاهدی، م.، رحمتی، م.، ۱۳۸۱، نقشه زمین‌شناسی ورقه طرق، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- ذبیحی، ر.، ابراهیمی، خ.، زرین‌کوب، م. ح.، ۱۳۹۰، بررسی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی نهشته‌ی کانی خاک رس کائولینیتی شده‌ی شیخ‌آباد (جنوب-غربی بیرجند) با نگرشی بر کاربردهای صنعتی آن، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال ۱۹، شماره ۱، ۱۰۳ تا ۱۱۲.
- صداقت، م. ا.، قریب، ف.، ۱۹۹۹، نقشه زمین‌شناسی ورقه دنا، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- فیروزی، ع.، ۱۳۹۷، بررسی قابلیت فرآوری خاک نسوز سمیرم با هدف حذف آهن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، ایران، ۸۶ صفحه.
- منانی، م.، ۱۳۸۹، زیست‌چینه‌نگاری و سنگ‌چینه‌نگاری نهشته‌های رتولایس منطقه شمال اصفهان، رساله دکترا، دانشگاه اصفهان، ایران، ۱۶۵ صفحه.
- هفت‌لنگ، ر.، افقه، م.، آقاباتی، س.، ع.، پروانه‌نژاد شیرازی، م.، ۱۳۹۶، چینه‌شناسی، دیرینه‌شناسی و محیط رسوبی ردیف‌های کرتاسه بالایی برش بهار، جنوب اصفهان (ایران مرکزی) و مقایسه آن با برش تاقدیس پشت جنگل (جنوب - خاور لرستان)، فصلنامه علوم‌زمین، دوره ۲۶، شماره ۱۰۴، ۳۰۹-۳۱۸.
- Abu-Hamattah, Z.S., Al-Taie, M., 2003, Improvement of chemical and thermal properties of fire-clay refractory bricks. Journal of Applied Sciences, 3(2), 103-109.
- Borode, J.O., Onyemaobi, O.O., Omotoyinbo, J.A., 2000, Suitability of some Nigerian clay as refractory raw materials. Nigerian Journal of Engineering Management, 1, 14-18.
- Bortnikov, N.S., Savko, A.D., Novikov, V.M., Boeva, N.M., Soboleva, S.V., Zhegallo, E.A., Dmitriev, D.I., Krainov, A.V., Zhukhlistov, A.P. and Bushueva, E.B., 2016, The Latnenskoe refractory clay deposit (Central Russia). Lithology and Mineral Resources, 51(6), 425-438.
- Ekosse, G., 2001. Provenance of the Kgwakgwe kaolin deposit in Southeastern Botswana and its possible utilization. Applied clay science, 20(3), 137-152.
- Hassan, S. B., 2005, Modern Refractories: Production, Properties, Testing and Application. Timo Commercial Printers, Zaria, Nigeria, 13-22.



- Hughes, D., Rodriguez, J., Smith, E. P., Johnson, D. J., Stevenson, H. C., Spicer, P., 2006, Parents' ethnic-racial socialization practices: a review of research and directions for future study. *Developmental psychology*, 42, 747.
- Irabor, P.S.A., 2002, Physical and Chemical Investigation on some Nigerian Kaolinite Clays for use in the Ceramics and Allied Industries. *Nigerian Journal of Engineering Research and Development* 1 (1), 54-59.
- Jock, A. A., Ayeni, F. A., Jongs, L. S., Kangpe, N. S., 2013, Development of Refractory Bricks from Nigerian NAFUTA clay deposit. *International journal of materials, methods and technologies*, 1(10), 189-195.
- Lomertwala, H.M., Njoroge, P.W., Opiyo, S.A., Ptoon, B.M., 2019, Characterization of Clays from selected sites for Refractory Application.
- Shimizu, T., Matsuura, K., Furue, H., Matsuzak, K., 2013, Thermal conductivity of high porosity alumina refractory bricks made by a slurry gelation and foaming method. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(15-16), 3429-3435.
- Wilder, D. R., Dodd, C. M., 1953, Some effects of titania on refractory clays: *Am. Ceramic Soc. Jour.*, 36(12), 400-403.