مطالعه ویژگی‌های مهندسی اسلیت‌های شمال استان همدان به منظور تولید آجر

علیرضا طالب‌بیدختی*[۱]، رضا محمدی استاد کلایه[۲] و علی‌اکبر مومنی[۳]

۱- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
۲- کارشناس‌ارشد زمین‌شناسی، اداره کل استاندارد، همدان، ایران
۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

نویسنده مسئول: Beydokhti@sci.ikiu.ac.ir *

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۴ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۲۹ نوع مقاله: کاربردی

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی ویژگی‌های اسلیت‌ها و شیل‌های دگرگون شده شمال استان همدان به منظور استفاده در ساخت آجر می‌باشد. در این پژوهش ابتدا، گسترش اسلیت‌ها و واحدهای شیلی دگرگون شده‌ی در چهار ورقه از نقشه‌های یکصد هزارم زمین‌شناسی کبودرآهنگ، رزن، همدان، تویسرکان مورد مطالعه قرار گرفت و اطلاعات زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی واحدهای دگرگونی جمع‌آوری گردید. پس از بازدیدهای صحرایی، از پنج محل نمونه‌برداری بعمل آمد. نتایج آنالیز شیمیایی اکسیدهای اصلی و XRD نشان می‌دهد که ترکیب سنگ‌شناسی محل‌های نمونه‌برداری از نوع اسلیت و شیل‌های دگرگون شده می‌باشد. با توجه به نتایج داده‌های حاصل از آنالیز شیمیایی، ترکیب سنگ‌های مورد مطالعه، مطابق با استاندارد موجود با ساخت آجر (استاندارد شماره ۱۱۶۲ سازمان ملی استاندارد) می‌باشد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها اقدام به ساخت آجر گردید. بر روی آجرهای ساخته شده آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی انجام گرفت. مقادیر دانسیته آجر 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 از وضعیت مناسبی برخوردار بوده و به منظور استفاده برای آجر مهندسی، نما و توکار قابل استفاده می‌باشند. نتایج آزمون یخزدگی بر روی آجرهای تولیدی در ۵۰ چرخه از انجماد و آب‌شدگی نشان می‌دهد که افت وزنی نمونه‌ها در حد مجاز استاندارد ملی (شماره ۷) ایران می‌باشد. همچنین میزان نمک‌های محلول آجرهای تولیدی نیز در حد مطلوب می‌باشند. در مجموع تمام ویژگی‌های بررسی شده در آجرهای ساخته شده از سنگ‌های اسلیتی با استانداردهای مربوطه مطابقت دارند که نشان‌دهنده مرغوبیت آجرهای ساخته شده است به نحوی که می‌توان از آن‌ها در صنعت آجرسازی استفاده نمود که بسیار اقتصادی و از نظر زیست‌محیطی حائز اهمیت است.

واژه‌های کلیدی: آجر، اسلیت، شیل‌های دگرگون شده، ویژگی‌های مهندسی، همدان

۱- پیشگفتار

آجر، یکی از رایج‌ترین مصالح ساختمانی است که به دلیل خصوصیات ذاتی آن، یعنی پایداری در برابر سرما، گرما، رطوبت و زیبایی ظاهری، مورد توجه همگان قرار گرفته است (شکیر و محمد، ۲۰۱۳). این ویژگی‌ها باعث شده است تا آجر به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز، مورد استفاده قرار بگیرد. زیبایی و الگوی منظم حاصل از کاربرد آجر در معماری، موجب شده تا از آن به صورت نما در خارج ساختمان، به عنوان یک عنصر زیبا در طراحی مدرن داخلی، مفروش کردن کف، پله‌سازی و محوطه‌سازی در تمام شرایط اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد و هویتی خاصی به ساختمان‌ها ببخشد (مورمو و پتل، ۲۰۱۸).

کیفیت و مرغوبیت آجر به مواد اولیه و نحوه پخت آن بستگی دارد (فرنسیسکو و همکاران، ۲۰۰۹). مواد اولیه آجر را می‌توان از رس‌ها، شیل و مارن تامین کرد. کانی‌های مهم موجود در مواد اولیه آجر شامل کائولیت، ایلیت، اسمکتیت و به مقدار کمتر کلریت‌های منیزیم-آلومینیوم‌دار، اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیوم، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، کوارتز و مواد آلی می‌باشد. بخش اعظم ترکیب مواد اولیه را SiO_2 و Al_2O_3 تشکیل می‌دهند که در کانی‌های رسی و کوارتز و دانه‌های ریز فلدسپات وجود دارند. دیگر عناصر مانند K_2O عمدتاً در ایلیت، Ca و Na عمدتاً در مونتموریلونیت (بخشی از Ca می‌تواند در کلسیت باشد) و Mg و Fe در کلریت‌ها می‌باشند (حامی، ۱۳۸۸). مواد اولیه ساخت آجر باید

ویژگی‌هایی از قبیل نسبت رس و خاصیت خمیری مناسب، نسبت مطلوب سیلیس به آلومینیوم، نسبت مجاز ترکیبات قلیایی، آهن، کربنات کلسیم، اکسیدمنیزیم و کلریدهای سدیم و پتاسیم دارا باشد. همچنین مواد اولیه آجر می‌بایستی فاقد مواد ناخالصی از قبیل ژیپس باشد که باعث گسیختن ساختار آجر می‌شوند (آود و ابدالا، ۲۰۰۹).

در حال حاضر نیز نقش آجر در ساختمان‌سازی مدرن و پیشرفته امروزی بسیار برجسته است. آجر به عنوان رقیب اصلی بلوک‌های بتنی، بخش عمده‌ای از حجم سازه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. بدین جهت و نیز به دلیل افزایش تقاضا در سال‌های اخیر، بررسی و افزایش کمی و کیفی آجر مورد توجه بسیار قرار گرفته است. خاک مناسب، مهمترین عامل کیفی در تولید آجر به شمار می‌آید (مورمو و پتل، ۲۰۱۸). ماده خام تولید آجر بیشتر از خاک‌های رسی تامین می‌شود ولی از آنجایی که خاک رس مناسب در همه جا یافت نمی‌شود در چند دهه گذشته تمایل به استفاده از مصالح جایگزین ایجاد شد که مصالح سنگی شیل و مارن از آن جمله می‌باشند. از سوی دیگر خاک رس برای کشاورزی آنقدر اهمیت دارد که در کشورهای پیشرفته استفاده از خاک رس برای تهیه آجر با محدودیت همراه می‌باشد. تولید آجر شیل در کشورهایی از قبیل آلمان و انگلستان بیشتر مورد توجه بوده و نتایج خوبی را در برداشته است. این آجر در مقایسه با انواع مشابه از کیفیت بسیار خوبی برخوردار بوده و در نوع خود بی‌نظیر است (پرنتیس،۱۹۹۰). در خصوص استفاده از مصالح کوهی برای تولید آجر مطالعات و تجربیات زیادی در داخل و خارج از کشور وجود دارد. در اروپا واحدهای ماسه‌سنگی به سن دونین که برخلاف نام آن عمدتاً از مارن‌های قرمز رنگ تشکیل شده‌اند، به عنوان یک منبع مناسب برای تولید آجرهای رسی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد (پرنتیس،۱۹۹۰). نسبت بالای گل‌سنگ‌های کائولینیتی شده همراه با رخساره‌های ذغال‌سنگی کربونیفر موجب شده تا این ذخائر در تمام اروپای غربی به عنوان منبع اصلی تولید آجر رسی همراه با استخراج زغال‌سنگ شناخته شوند. همچنین گلسنگ‌های اکرینگتون[1] در شمال انگلستان که به ضخامت در حدود ۳۰ متر در میان زغال‌سنگ‌ها تشکیل شده‌اند برای تولید آجری به رنگ سرخ یکنواخت و مقاومت فشاری بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شرق و شمال آمریکا طیف گسترده‌ای از منابع رسی از شیل‌های پالئوزوئیک تا رس‌های یخچالی[2] و لس‌های عهد حاضر در دسترس و برای تولید آجر از آن‌ها استفاده می‌شود. در ایران نیز به دلیل نبود منابع مناسب خاک رس در استان کردستان جهت تولید آجر در سال ۱۳۸۷، کارخانه آجر ماشینی شیل به عنوان اولین واحد تولید آجر از ماده معدنی شیل در کشور، مورد بهره‌برداری قرار گرفت. در سال‌های اخیر در خصوص استفاده از منابع کوهی از جمله مارن‌ها و شیل برای تولید آجر در کشور مطالعاتی انجام پذیرفته است که در این خصوص می‌توان به منابع ذیل اشاره نمود.

پورکاسب و همکاران (۱۳۹۳) خصوصیات فنی و مهندسی مارن‌های سازند میشان در شمال اهواز را به منظور تولید آجر سبک مورد بررسی قرار داده و بر اساس مقادیر درصد جذب آب و مقاومت فشاری تک‌محوری آجرهای ساخته شده نتیجه گرفتند که این منابع برای تولید آجرهای توکار مناسب هستند و تعیین چگالی آجرها نیز گویای سبک‌تر بودن آن‌ها نسبت به آجر معمولی است. پروژه پی‌جویی و اکتشاف مواد اولیه آجر در سازندهای شیلی و مارنی در استان خراسان شمالی در سال ۱۳۹۳ توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی کشور انجام پذیرفت. در این طرح کیفیت سازندهای شیلی و مارنی موجود در ورقه‌های زمین‌شناسی استان خراسان شمالی با انجام نمونه‌برداری و آنالیز شیمیایی مورد بررسی و مناطق با اولویت بالا جهت مطالعات بیشتر انتخاب گردید (برنا، ۲۰۱۴). خاکسار و رضائی (۱۳۹۱) ژئوشیمی نهشته‌های مارنی سازند آغاجاری در باختر بندرعباس را برای تولید آجر رسی مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه‌گیری نمودند که امکان استفاده از مارن‌های سازند آغاجاری در منطقه مورد مطالعه به عنوان ماده اولیه بدون فرآوری برای تولید اقتصادی و انبوه آجر رسی وجود ندارد.

طرح اکتشاف سازندهای زمین‌شناسی جهت تولید آجر در استان کرمانشاه توسط سازمان صنایع و معادن در سال ۱۳۸۱ اجرا شد در این طرح لیتواستراتیگرافی سازندهای مستعد تهیه آجر که عمدتاً سازندهای شیلی می‌باشند در زاگرس مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و مناطق اولویت‌دار جهت بهره‌برداری مشخص گردید (قربانی و همکاران، ۲۰۰۳). طرح مطالعات افق‌های شیلی- مارنی

[1] Accrington mud stone

[2] Glacial clays

سازندهای میشان، آغاجاری و گچساران جهت مصرف در صنعت تولید آجر توسط اداره کل معادن و فلزات استان کهکیلویه و بویراحمد در سال ۱۳۷۷ انجام پذیرفت و بر اساس آنالیزهای شیمیایی انجام گرفته بر روی شیل‌های سازند گژدمی در تنگ ماغر و لایه‌های مارنی سازند میشان در شهرستان گچساران، کیفیت آن‌ها برای تولید آجر مورد ارزیابی قرار گرفت. پروژه پی‌جوئی مارن‌های استان همدان از دیدگاه کاربری در صنایع آجر در سال ۱۳۷۸ توسط اداره کل معادن و فلزات استان همدان در سه منطقه در نواحی اطراف دهکده های آجرلو و تجرک در شرق فامنین و ناحیه اطراف دهکده قلعه‌جوق در شمال شرق قهاوند انجام پذیرفت. بر اساس آنالیزها و تست‌های تکنولوژی بعمل آمده و تولید آجر در مقیاس آزمایشگاهی، نمونه‌ها از نظر مشخصات فیزیکی و مقاومتی وضع نسبتاً مناسبی را دارا می‌باشند. دوستی در سال ۱۳۹۱ به مطالعه زمین‌شناسی مهندسی مارن‌های سازند قم در شمال شرق استان همدان با تاکید بر مصالح ساخت آجر پرداخت. بر اساس نتایج آنالیز شیمیایی کیفیت مارن‌های منطقه مورد مطالعه مناسب برای تولید آجر می‌باشند. برای این منظور طی دو مرحله از مارن‌ها، آجر ساخته شد. در مرحله اول از پودر مارن، آجر ساخته شد و در مرحله دوم به پودر مارن ۷ درصد ماسه سیلیسی اضافه گردید. پس از تهیه آجر و انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مشخص گردید آجرهای حاصل از هر دو مرحله دارای خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مطابق با استانداردهای ارائه شده می‌باشند. مطالعات نشان می‌دهد در آجرهایی که با اضافه شدن ماسه به پودر مارن ساخته شده‌اند، تمام خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها بهبود یافته است. هم‌اکنون کارخانه‌های آجرپزی متعددی در نقاط مختلف کشور مشغول به کار هستند و برخی از آن‌ها با بهره‌گیری از فن‌آوری‌های روز دنیا آجرهایی با کیفیت مرغوب تولید می‌کنند. ذخایر مواد اولیه مصرفی این کارخانه‌ها عموماً خاک رس دشت‌ها می‌باشد. در حالی‌که با گسترش فعالیت کشاورزی، عرصه برای بهره‌برداری کارخانه‌ها از این ذخائر به تنگی می‌گراید. از همین رو نیاز به پی‌جویی و کشف منابع کوهی مناسب موجود در سازندهای زمین‌شناسی مطرح می‌گردد. با توجه به نیاز روزافزون به ساختمان‌ها و ساخت‌وساز جدید و وجود برونزدهای قابل‌توجه از سنگ‌های دگرگونی در استان همدان، بررسی امکان تولید آجر از این ذخایر مطرح گردید که تحقیق حاضر ما حصل این بررسی می‌باشد. لازم به ذکر است بر اساس مطالعات صورت گرفته تا کنون در خصوص امکان استفاده از اسلیت‌ها و شیل‌های دگرگون‌شده برای تولید آجر مطالعات منتشر شده‌ای در ایران وجود ندارد که این موضوع جزء نوآوری تحقیق حاضر می‌باشد.

۲- معرفی استانداردهای مربوط به تهیه آجر

ویژگی فیزیکی و مکانیکی آجرهای شیلی باید مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۷ (آجر رسی- ویژگی‌ها و روش آزمون) و استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۶۲ (خاک- خاک رس جهت ساخت آجر رسی- ویژگی‌ها و روش آزمون) باشد. در این استانداردها ضمن تقسیم‌بندی آجرها به انواع مهندسی، نما و توکار ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد خام مورد نیاز برای تهیه آجر و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی آجرهای تولید شده در قالب ویژگی‌های الزامی و اختیاری مورد توجه قرار گرفته است. مطابق استاندارد ۱۱۶۲ ویژگی‌های خاک مناسب برای تولید آجر به شرح جدول ۱ می‌باشد. مطابق استاندارد شماره ۷ ویژگی جذب آب آجرهای تولیدی می‌بایستی مطابق جدول ۲ باشند. همچنین حداقل مقاومت فشاری آجرهای تولیدی بر اساس استاندارد فوق الذکر به شرح جدول ۳ می‌باشد. میزان نمک‌های محلول در آب انواع آجرهای مهندسی و نما نباید از ۰/۶ درصد تجاوز نماید و انجام این آزمون برای آجر توکار الزامی نیست. همچنین حداکثر درصد افت وزنی آجرها در ۵۰ چرخه از یخ‌زدگی کمتر از ۳ درصد می‌باشد.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه و محل‌های نمونه‌برداری

برای رسیدن به اهداف این پژوهش که مطالعه اسلیت‌ها و شیل‌های دگرگون شده شمال استان همدان به منظور تولید آجر می‌باشد، ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای و بازدیدهای مقدماتی صحرایی انجام شد. برای این منظور برونزد و گسترش واحدهای دگرگونی و شیلی در چهار ورقه نقشه‌های زمین‌شناسی مربوط به همدان، رزن، کبودرآهنگ، تویسرکان با مقیاس یکصد هزارم مورد بررسی قرار گرفت. با تدقیق بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی مذکور واحدهایی که پتاسیل اکتشاف ذخایر مناسب اسلیتی و شیلی برای تولید آجر را دارا می‌باشند مشخص

گردید. که ویژگی‌های لیتواستراتیگرافی واحدهای مورد مطالعه به شرح زیر می‌باشد. در ورقه زمین‌شناسی کبودرآهنگ در کوه قره‌لر در شرق کبودرآهنک دو واحد سنگی $K_2^{sh.1}$ و K_2^{sh} مورد شناسایی قرار گرفت که واحد $K_2^{sh.1}$ شامل تناوبی از شیل‌های مدادی با میان لایه‌های نازک تا متوسط لایه سنگ‌آهک ماسه‌ای می‌باشد که در بخش بالایی آن ارتفاع ساز شده و رسوبات شیلی کمتری در آن دیده می‌شود. ضخامت این واحد در حدود ۷۰۰-۵۰۰ متر است و بر روی آن به صورت تدریجی واحد K_2^{sh} که شامل تناوبی از شیل‌های مدادی تا خاکستری تا سبز تیره دگرگون شده به ضخامت ۸۰۰-۵۰۰ متر قرار می‌گیرد (شفیعی، ۲۰۰۴). گسترش این دو واحد در حدود ۴۲ کیلومتر مربع برآورد می‌گردد.

جدول ۱. ویژگی‌های خاک مناسب برای تهیه آجر

Table 1. Characteristic of suitable soil for the brick's production

ویژگی	حد قابل قبول	نوع ویژگی
SiO_2	۶۰-۴۰ درصد	اجباری
Al_2O_3	۲۱- ۹ درصد	اجباری
Fe_2O_3	۱۲-۳ درصد	اجباری
CaO	۱۷> درصد	اختیاری
MgO	۴ > درصد	اجباری
SO_3	۰/۵ > درصد	اختیاری
درصد وزنی انیدرید کربنیک CO_2	۸/۵ > درصد	اختیاری
درصد افت وزنی L.O.I[1]	۱۶ >	اختیاری
درصد مانده بر روی الک ۱۵۰ میکررون	۷/۵>	اختیاری
حد خمیری خاک	۳۰- ۱۷ درصد	اختیاری

جدول ۲. ویژگی جذب آب آجر مطابق با استاندارد ملی شماره ۷

Table 2. Water absorption characteristics of the brick according to the national standard No. 7

نوع	جذب آب (حداکثر) درصد	
	میانگین ۱۰ آجر	آجر منفرد
آجر مهندسی (ماشینی)	۱۲	۱۵
آجر نما	۱۸	۲۰
آجر تو کار	-	-
۱- جذب آب انواع آجر نباید کمتر از ۸ درصد باشد. ۲- در صورت عدم انطباق جذب آب انواع آجر با ویژگی مندرج در جدول، انجام آزمون یخزدگی الزامی بوده و پذیرش آجر منوط به انطباق با ویژگی آزمون یخزدگی می‌باشد.		

جدول ۳. حداقل مقاومت فشاری انواع آجرها

Table 3. Minimum compressive strength of all brick's types

نوع آجر		حداقل مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	
		میانگین ۱۰ آجر	آجر منفرد
آجر مهندسی	درجه ۱	۳۵۰	۳۰۰
	درجه ۲	۲۵۰	۲۰۰
آجر نما	درجه ۱	۱۴۰	۱۱۰
	درجه ۲	۱۲۰	۹۰
آجر تو کار	باربر	۸۰	۶۰
	غیر باربر	۴۰	۳۰

[1] Loss on ignition

در ورقه زمین‌شناسی رزن تنها یک واحد سنگی jsh که در بر گیرنده کالک‌شیست‌های بیومیکرایتی تا اسپاری با رنگ خاکستری مورد شناسایی قرار گرفت که در بخش مرکزی ورقه دارای ضخامت و گسترش قابل‌ملاحظه‌ای می‌باشد. در ترکیب کانی‌شناختی این سنگ‌ها بلورهای کلسیت فراوان است و ناخالصی‌هایی از کانی کوارتز و به مقدار کم کانی‌هایی میکایی به ویژه سریسیت- مسکویت قابل ملاحظه‌اند و سن این واحد را به ژوراسیک نسبت داده می‌شود (علائی‌مهابادی و فودازی، ۲۰۰۳). مطالعات صحرایی نشان می‌دهد که بخش‌های شمال شرقی این واحد عمدتاً از اسلیت‌ها تشکیل شده است.

در نقشه زمین‌شناسی همدان واحد $J^{sh,s}$، پتانسیل اکتشاف ذخایر اسلیتی برای تولید آجر را دارا می‌باشد. این واحد دارای برونزدهای گسترده‌ای از سنگ‌های تخریبی دانه ریز می‌باشد که متحمل دگرگونی خفیفی شده‌اند که بیشترین حجم آن را شیل‌های مدادی، اسلیت و فیلیت و به مقدار کمتر شیست پدید آورده است که دارای گسترش قابل ملاحظه‌ای در این ورقه می‌باشد. با توجه به وجود فسیل‌های گیاهی و جانوری از جمله آمونیت‌های ژوراسیک در آن‌ها این سنگ‌ها معادل سازند شمشک می‌باشند. ضخامت این واحد بیش از ۱۲۰۰ متر برآورد می‌گردد و بخش قابل‌توجهی از نیمه شرقی ورقه زمین‌شناسی همدان را بخود اختصاص داده است (اقلیمی، ۱۳۷۹). بخش گسترده‌ای از ورقه تویسرکان را سنگ‌های دگرگونی می‌پوشانند که در روی نقشه تحت عنوان واحد mt^h نشان داده شده است. این واحد سنگی به طور معمول زیر نام شیست‌ها یا اسلیت‌های همدان شناخته شده و از ضخامت و گسترش زیادی برخوردار است و رخنمون آن در ورقه همدان، ملایر، نهاوند نیز دیده می‌شود. سنگ خاستگاه اولیه واحد یاد شده بیشتر شیل و ماسه‌سنگ (پلیتی) است و عدسی‌های سنگ‌آهکی و مواد حاصل از فوران آتشفشانی نیز درمیان آن‌ها تشکیل شده است. ضخامت واحد mt^h به گمان به حدود ۲۰۰۰ متر می‌رسد. سن این واحد پیش از تریاس پایانی می‌باشد (اشراقی و محمودی، ۲۰۰۳). همچنین واحد $OM^{s,c}$ در نیمه شمالی ورقه تویسرکان شامل تناوبی از شیل‌های دگرگون شده، کنگلومرا، ماسه‌سنگ و سیلتستون برونزد دارد که این دو واحد مورد اشاره پتانسیل اکتشافی مناسب برای تولید آجر را دارا می‌باشند. جهت انتخاب محل‌های نمونه‌برداری، ابتدا تغییرات سنگ‌شناسی واحدهای مورد بررسی در محل برونزد آن‌ها در سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفت و با لحاظ نمودن ترکیب سنگ‌شناسی مناسب به همراه حجم ذخیره بالا و در کنار سهولت دسترسی به راه‌های اصلی، اقدام به تعیین محل‌های نمونه‌برداری شد. همچنین به منظور سهولت نمونه‌برداری و پرهیز از نمونه‌برداری از بخش‌های سطحی و هوازده، نمونه‌برداری از ترانشه‌های موجود در واحدهای مورد مطالعه مد نظر قرار گرفت. برای این منظور پنج محل جهت تعیین نمونه‌برداری تعیین شد که موقعیت محل‌های نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه‌برداری به روش روزنه‌ای با ایجاد شبکه نمونه‌برداری بر روی خطوط طولی با فواصل ۱/۵ متر از همدیگر و بر روی خطوط عرضی به فواصل ۱ متر از همدیگر و در هر کدام از این نقاط حفر گودال به عمق ۴۰ سانتی‌متر بر اساس استاندارد شماره ۱۱۶۲ سازمان ملی استاندارد ایران انجام شد. در جدول ۴ مشخصات و مختصات محل‌های نمونه‌برداری ارائه شده است. همچنین در شکل ۲ تصویر رخنمون محل‌های نمونه‌برداری نشان داده شده است.

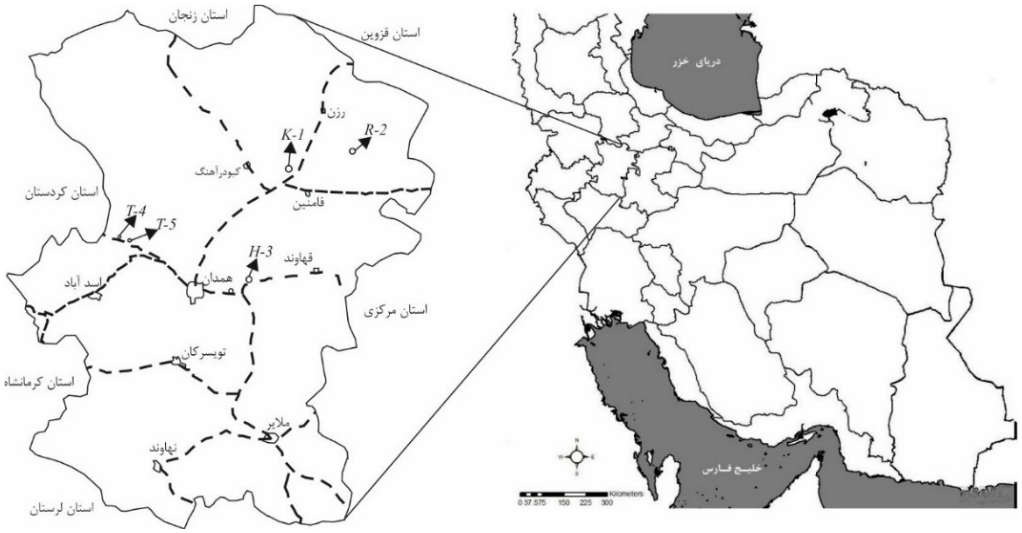
۳- ۲- کانی شناسی و ترکیب شیمیایی نمونه های مورد مطالعه

برای تعیین ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، از آنالیز XRD[1]، توسط دستگاه Philips-Xpert Pro موجود در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران و برای تعیین ترکیب عناصر اصلی نمونه‌های مورد مطالعه از روش ذوب قلیایی با دستگاه خوانشی ICP-OES مدل Agilent 725 موجود در شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزما استفاده شد.

۳-۳- آزمایش تعیین حد روانی و خمیری

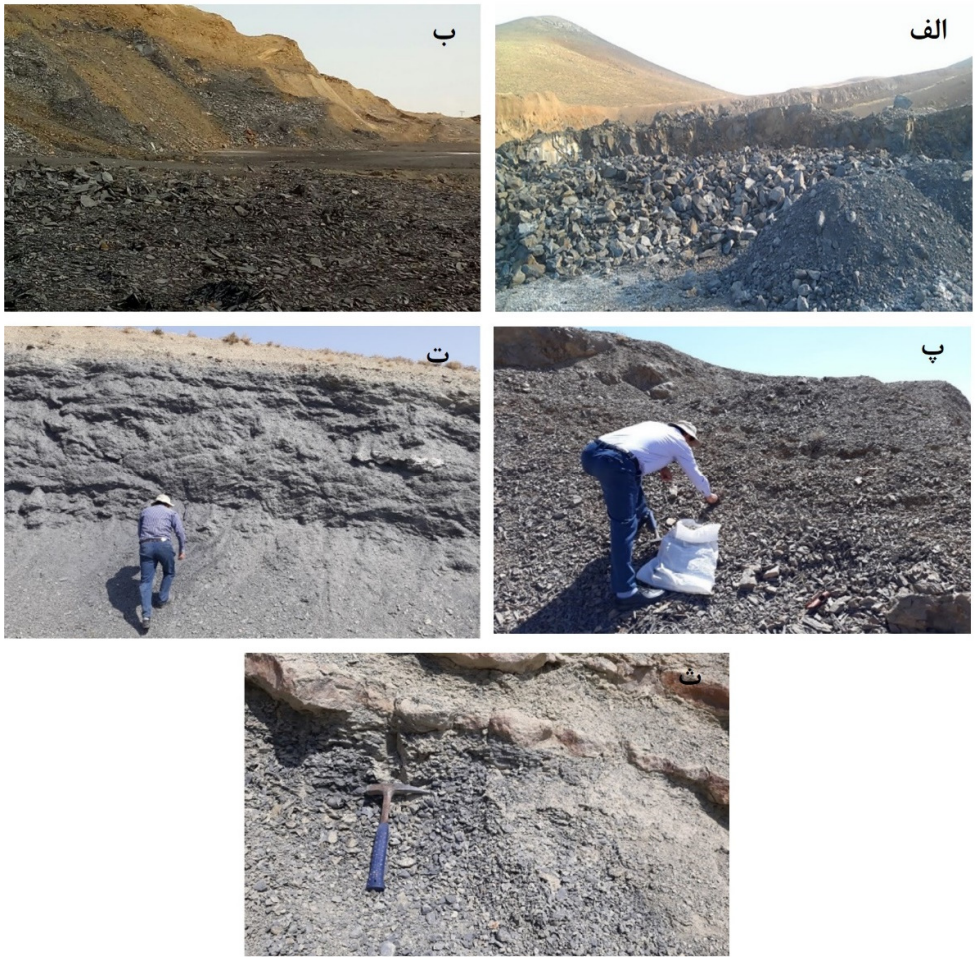
به منظور تعیین حدود آتربرگ نمونه‌های مورد مطالعه، ابتدا نمونه‌ها خرد و پودر شده و الک شماره ۴۰ عبور داده شدند. سپس با استفاده از استاندارد ASTM D4318-84 حدود آتربرگ نمونه‌ها مشخص شده است.

[1] X-Ray Diffraction



شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه و محل نمونه‌برداری در روی نقشه

Fig. 1. Study area and sampling location on the map



شکل ۲. رخنمون محل‌های نمونه‌برداری، الف- واحد شیلی دگرگون شده K-1 ، ب- واحد اسلیت R-2، پ- واحد اسلیت ایستگاه H-3، ت- واحد اسلیت T-4 و ث- واحد شیلی دگرگون شده همراه با تناوبی از ماسه سنگ T-5

Fig. 2. Outcrop of sampling locations (a) K-1 metamorphosed shale unit (b) R-2 slate unit (c) H-3 slate unit (d) T-4 slate unit (e) T-5 Metamorphosed shale unit with an interval of sandstone

جدول ۴. مشخصات و مختصات محل‌های نمونه‌برداری

Table 4. Characteristics and coordinates of sampling locations

شماره نمونه	نام واحد زمین‌شناسی	ورقه زمین‌شناسی	رنگ نمونه	مختصات
K-1	K_2^{sh}	کبودرآهنگ	خاکستری مایل به سیاه	N 35˚09.3´ E 48˚58.4´
R-2	J^{sh}	رزن	نخودی متمایل به خاکستری	N 35˚18.3´ E 49˚10.6´
H-3	$J^{sh,s}$	همدان	خاکستری تیره	N 34˚49.3´ E 48˚43.30´
T-4	mt^{h}	تویسرکان	سیاه	N 34˚57.3´ E 48˚11.9´
T-5	$OM^{s,c}$	تویسرکان	خاکستری متمایل به سیاه	N 34˚57.2´ E 48˚13.5´

۳-۴- ساخت آجر

به منظور تهیه آجر ابتدا اقدام به خردایش نمونه‌ها توسط آسیاب فکی گردید. سپس با الک کردن نمونه‌ها در حدود ۱۰ کیلوگرم خاک عبوری از الک شماره ۴۰ (۴۲۵ میکرون) تهیه و پس از مخلوط کردن با آب اقدام به تهیه گل گردید. میزان آب مصرفی برای تهیه گل در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد وزنی خاک خشک می‌باشد. گل تهیه شده بعد از حداقل ۷ روز کاملاً ورز داده می‌شود. سپس به روش دستی در قالب با ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر قرار گرفت. در شکل ۳ مراحل آماده‌سازی و قالب‌گیری نمونه‌ها نشان داده شده است. بعد از قالب‌گیری به منظور جلوگیری از انقباض‌های ناگهانی نمونه‌ها که ممکن است در نتیجه خشک شدن سریع نمونه‌ها پدید آید و به دنبال آن ترک خوردگی ایجاد شود، نمونه‌ها به مدت ۷ روز در هوای آزاد قرار داده شده و پس از آنکه رطوبت نمونه‌ها به مقدار قابل توجهی کاهش یافت برای پخت به کوره‌های آجرپزی منطقه شال قزوین منتقل گردید. نمونه‌ها در دمای در حدود ۹۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت در کوره آجرپزی نوع هافمن قرار گرفت و پس از سرد شدن و خروج از کوره، آجرهای تهیه شده جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی به آزمایشگاه انتقال داده شد. مشاهدات چشمی بر روی نمونه‌های آجر تهیه شده نشان می‌دهد که کلیه آجرهای تهیه شده، سالم و بودن هیچ نقض و ترک خوردگی می‌باشند. در شکل ۴ تصویر تعدادی از آجرهای ساخته شده مشاهده می‌گردد.

۳-۵- ویژگی‌های مهندسی آجرهای ساخته شده

آشنایی با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح ساختمانی از جمله آجر جهت پیش‌بینی رفتار مصالح در زمان کاربری آن‌ها امری لازم و ضروری است. با استفاده از این ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌توان نحوه رفتار مصالح در برابر تنش‌های وارده بر آن‌ها و دوام‌پذیری آن‌ها را پیش‌بینی نمود. هدف از انجام مطالعات در این بخش، تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آجرهای ساخته شده از نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد.

۳-۵-۱- ویژگی‌های فیزیکی

شناخت ویژگی‌های فیزیکی از ابتدایی‌ترین مرحله مطالعه و بررسی آجرها است. زیرا خواص فیزیکی با سایر ویژگی‌های آجر در ارتباط است. در این بخش به بررسی مهمترین خواص فیزیکی آجرهای تولید شده می‌پردازیم. در این پژوهش، ویژگی‌های فیزیکی شامل تخلخل، دانسیته خشک، دانسیته اشباع، درصد جذب آب، و دوام آجرها در چرخه‌های انجماد و آب‌شدگی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

تخلخل، دانسیته خشک و اشباع: پارامترهای مذکور با استفاده از حداقل ۱۰ نمونه آجر برای هر محل نمونه‌برداری و بر اساس استاندارد ASTM C20-00 تعیین شده است. در اندازه‌گیری میزان تخلخل موثر و دانسیته اشباع و خشک از روش اشباع نمودن و اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌های مکعبی آجر استفاده شده است.

درصد جذب آب: میزان منافذ و خلل و فرج آجر بالا می‌باشد و زمانی که آجر در معرض آب ناشی از نزولات جوی قرار می‌گیرد به دلیل نفوذ آب به داخل منافذ آجر در صورت کاهش دما به زیر صفر درجه سلسیوس منجر به انجماد آب در داخل منافذ می‌گردد. به دلیل افزایش حجم آب منجمد شده در داخل منافذ این عملکرد منجر به تخریب و ترک‌خوردگی سطح آجر می‌شود و در نهایت

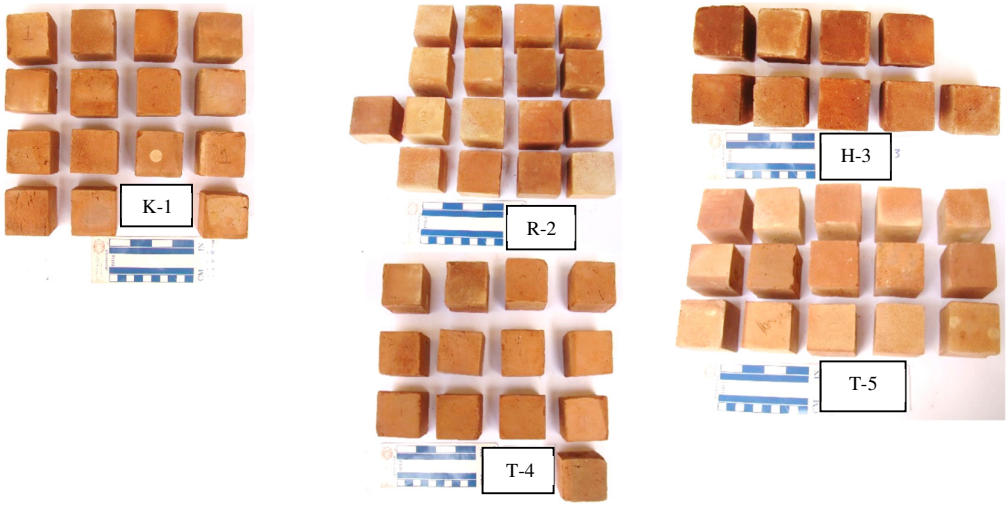
باعث کاهش مقاومت مکانیکی آجر می‌شود. درصد جذب آب آجر بین ۳۲-۱۰ درصد متغیر است (فرنسیکو و همکاران، ۲۰۰۹). با توجه به تاثیر درصد جذب آب در مقاومت مکانیکی آجر و دوام‌پذیری آن در مقابل انجماد، آزمایش تعیین درصد جذب آب برای آجرهای ساخته شده انجام شده است. روش انجام آزمون بر اساس استاندارد ملی شماره ۷ ایران می‌باشد. برای این منظور تعداد ۱۰ عدد از آجر سالم را انتخاب و سطوح آن را از مواد سست پاک نموده و سپس در آون در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت، نمونه‌هاخشک می‌شوند. پس از سرد شدن، هر نمونه را وزن کرده و وزن آن‌ها یاداشت می‌گردد. بعد از توزین، نمونه‌ها در داخل ظرف آب قرار گرفته به‌نحوی که آب به صورت آزاد در کلیه سطوح نمونه‌ها جریان یابد. سپس آب موجود در ظرف می‌بایستی در ظرف یک ساعت به جوش آورده شود و سپس برای مدت ۵ ساعت در حالت جوش نگهداری شود. پس از این مدت باید منبع حرارتی قطع شود تا نمونه‌ها با از دست دادن حرارت به طور طبیعی در زمانی بین ۱۶ تا ۱۹ ساعت به درجه حرارت اتاق برسند. در این مرحله نمونه‌ها را باید از مخزن آب خارج کرده و سطح آن‌ها را با پارچه نم‌دار خشک و بلافاصله توزین شوند. سپس با استفاده از رابطه زیر درصد جذب آب محاسبه می‌گردد.

$$\%w_{abs} = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100$$

که W_1 وزن نمونه خشک بر حسب گرم و W_2 وزن نمونه پس از آزمون می‌باشد.

شکل ۳. مراحل مختلف آماده‌سازی، قالب‌گیری و تهیه خشت خام از نمونه‌های مورد مطالعه

Fig. 3. Different stages of preparation, molding and production of mud brick from the studied samples



شکل۴. تصویر آجرهای ساخته شده از نمونه‌های مورد مطالعه

Fig. 4. Picture of bricks made from the studied samples

آزمایش دوام یخزدن و آب شدن (تعیین یخزدگی): برای این منظور مطابق با استاندارد ملی ایران (شماره ۷) تعداد ۵ عدد آجر از هر نمونه انتخاب گردید. سپس بعد از خشک کردن نمونه‌ها در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس و سرد شدن نمونه‌ها، نسبت به توزین آن‌ها اقدام شد. سپس نمونه‌ها در مخزن آب به مدت ۴ ساعت قرار می‌گیرند. بعد از طی شدن این مدت نمونه‌ها در داخل سینی قرار می‌گیرند به نحوی که به اندازه‌ای در داخل سینی آب ریخته شود که ۱/۵ سانتی‌متر از آجرها در داخل آب قرار گیرند. سپس نمونه‌ها به داخل فریزر با دمای ۹- درجه سلسیوس منتقل شده و به مدت ۲۰ ساعت نگه‌داری می‌شوند. پس از این مدت نمونه‌ها به مخزن آب منتقل شده و به مدت ۴ ساعت در داخل آن نگهداری می‌شوند و دوباره در معرض چرخه یخ زدن قرار می‌گیرند. این آزمون تا ۵۰ چرخه یخ زدن و ذوب شدن متوالی ادامه پیدا می‌کند. پس از کامل شدن ۵۰ چرخه، یا زمانی که به موجب شواهدی مبنی بر از هم پاشیدگی، از آزمون خارج شوند، نمونه‌ها باید در آون خشک و سپس توزین گردند. سپس از رابطه زیر درصد افت وزنی بدست می‌آید.

$$\text{درصد افت وزنی} = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100$$

که W_1 وزن نمونه‌ها (۵ عدد آجر) قبل از انجام آزمون بر حسب گرم و W_2 وزن نمونه‌ها بعد از ۵۰ چرخه انجماد و آب‌شدگی بر حسب گرم می‌باشد.

۳-۵-۲- ویژگی‌های مکانیکی

آزمون تعیین مقاومت فشاری: آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری رایج‌ترین روش ارزیابی مقاومت مصالح ساختمانی است. در این پژوهش، آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری بر اساس استاندارد ملی شماره ۷ بر روی نمونه‌های آجر ساخته شده در دو حالت خشک و اشباع انجام شده است. برای انجام این آزمون از جک ۲۰۰۰ کیلو نیوتنی شرکت ELE استفاده شد. برای این منظور تعداد ۱۰ عدد آجر برای هر نمونه انتخاب گردید و مورد آزمایش قرار گرفت. سرعت اعمال تنش بر روی نمونه‌ها ۰/۵ مگاپاسکال در ثانیه انتخاب گردید و آزمایش تا زمانی که بار وارده حداکثر تا ۵ درصد، حداکثر نیرو کاهش پیدا کند ادامه می‌یابد و حداکثر نیرو یاداشت می‌گردد. سپس مقاومت فشاری از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$P = \frac{f}{A}$$

که در این رابطه f حداکثر بار وارده بر حسب کیلوگرم نیرو، A سطح مقطع آجر بر حسب سانتی‌متر مربع و P مقاومت فشاری آجر برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. در شکل ۵ دستگاه و نمونه‌های آجر مورد آزمایش نشان داده شده است.

۳-۵-۳-تعیین نمک‌های محلول در آب آجرهای ساخته شده

برای انجام این آزمون نسبت به خردایش و آسیاب آجرها اقدام شد و پس از الک کردن پودر نمونه‌ها از الک شماره ۱۰۰، در حدود مقدار ۲۵ گرم از پودر آجر تهیه گردید. برای انجام آزمون می‌بایستی ۱۰ گرم از پودر خشک شده را به داخل بشر انتقال داده و ۱۰۰ سی‌سی آب مقطر هم‌دمای محیط به آن افزوده و مگنت همزن مغناطیسی را داخل آن انداخته و به مدت ۶۰ دقیقه با سرعت ۳۰ دور در دقیقه توسط همزن مغناطیسی همزده شود. سپس محلول حاصله را بر روی کاغذ صافی با منافذ ریز صاف می‌نماییم. لازم به ذکر است محلول زیر کاغذ صافی می‌بایستی صاف و شفاف باشد. سپس محلول حاصل را در گرمخانه قرار داده تا خشک شود. سپس ظرف را پس از سرد شدن با دقت ۰/۰۱ گرم وزن می‌نماییم. سپس از رابطه زیر درصد نمک‌های محلول در آب نمونه محاسبه می‌گردد (استاندارد شماره ۷ سازمان ملی استاندارد ایران).

$$\text{درصد نمک محلول در آب} = \frac{w_2 - w_1}{m} \times 100$$

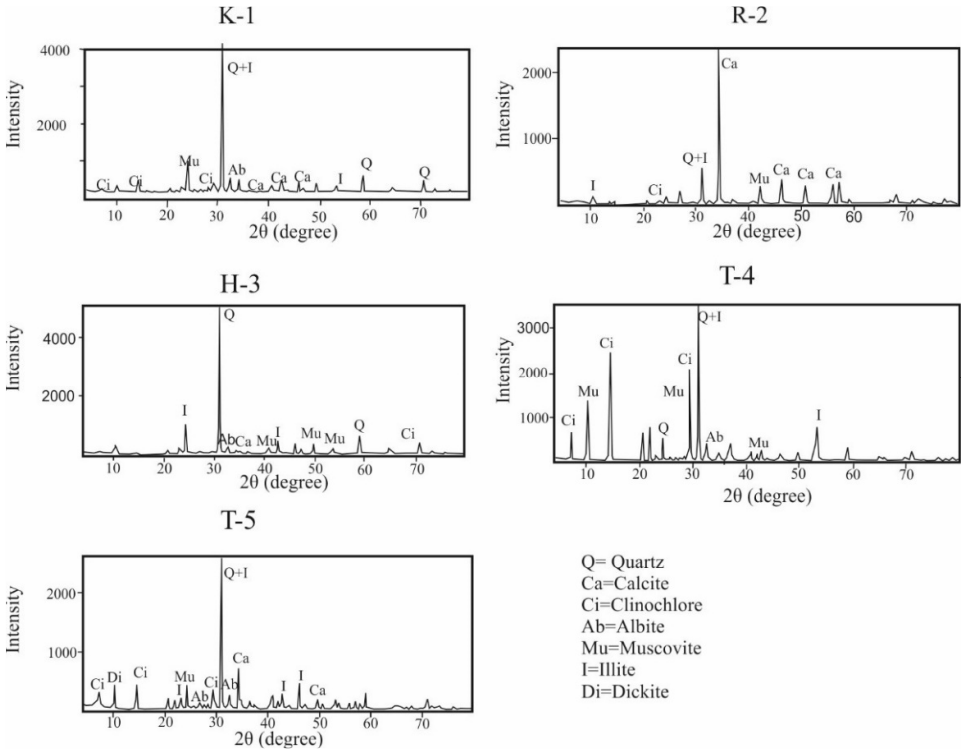
در این رابطه W_2 وزن بشر محتوی نمک‌های خشک شده حاصل از تبخیر، W_1 وزن بشر خالی بر حسب گرم و m وزن اولیه پودر آجر بر حسب گرم می‌باشد.

۴- نتایج و بحث

نتایج آزمون XRD نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۵ و نمودارهای آن در شکل ۶ ارائه شده است. بررسی ترکیب کانی‌شناسی اسلیت‌ها و شیل‌های دگرگونی مورد مطالعه نشان می‌دهد که کانی‌های اصلی تشکیل دهنده آن‌ها کوارتز، کلینوکلریت، آلبیت، ایلیت موسکویت و کلسیت می‌باشد. همچنین کلینوکلریت و ایلیت از مهم‌ترین کانی‌های رسی موجود در نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشند.

شکل ۵. تصاویر انجام آزمون مقاومت فشاری نمونه های آجر ساخته شده

Fig. 5. Pictures of the compressive strength test of the brick samples



شکل ۶. نمودار حاصل از آنالیز XRD بر روی نمونه‌های مورد مطالعه

Fig. 6. X-ray diffractograms of the studied samples

جدول ۵. نتایج آنالیز XRD نمونه‌های مورد مطالعه

Table 5 . XRD analysis results of the studied samples

شماره نمونه	کانی‌های تشکیل دهنده سنگ
K-1	کوارتز، ایلیت، موسکویت، آلبیت، کلینو کلریت،کلسیت
R-2	کوارتز، کلسیت، کلینوکلریت، ایلیت، آلبیت
H-3	کوارتز، مسکویت، کلسیت، آلبیت، کلینوکلریت، ایلیت
T-4	کوارتز، کلینوکلریت، ایلیت، آلبیت، مسکویت
T-5	کوارتز، کلسیت، کلینوکلریت، آلبیت، دیکیت[1]، ایلیت، موسکویت

[1] Dickite (phyllosilicate clay mineral)

طبق نتایج بدست آمده به طور کلی می‌توان در مورد کانی‌شناسی نمونه‌ها چنین اظهار نظر کرد که ترکیب کانی‌شناسی اسلیت‌ها و شیل‌های دگرگون شده در محدوده مطالعاتی تفاوت قابل‌توجهی با هم ندارند. همچنین وجود موسکویت به همراه آلبیت و فقدان کانی آنالسیم در نمونه‌ها نشان دهنده درجه دگرگونی پایین نمونه‌ها و در حد اسلیت می‌باشد. ترکیب شیمیایی مواد اولیه مورد استفاده برای ساخت آجر یک شاخص مهم می‌باشد که باید مورد بررسی قرار گیرد. بهترین روش برای تشخیص ترکیب ماده اولیه مورد استفاده در ساخت آجر، بدست آوردن درصد اکسیدهای عناصر اصلی موجود در آن‌ها می‌باشد. ویژگی خاک رس مورد استفاده در ساخت آجر باید مطابق استاندارد ملی ۱۱۶۲ باشد. مقایسه نتایج آنالیز شیمیایی سنگ‌های مورد مطالعه (جدول ۶) و مقادیر استاندارد ملی ۱۱۶۲ نشان می‌دهد به جز مقادیر SiO_2 دو نمونه K-1 وH-3 که مقداری بالاتر از استاندارد می‌باشد، ترکیب شیمیایی کلیه نمونه‌ها، مطابق استاندارد ارائه شده است و برای ساخت آجر مناسب می‌باشند. افزایش میزان SiO_2 در نمونه می‌تواند منجر به کاهش قوام گل و در نتیجه مشکلاتی را هنگام قالب‌گیری آجر، ایجاد نماید. نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه دارای مقادیر L.O.I کمتر از حداکثر حد مجاز (۱۶ درصد >) می‌باشد. بالا بودن مقدار L.O.I نمونه R-2 و T-5 در مقایسه با سایر نمونه‌ها به دلیل مقادیر بیشتر درصد کربنات کلسیم نسبت به سایر نمونه‌ها است. مطالعه نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد که SiO_2 و Al_2O_3 به ترتیب فراوان‌ترین اجزای تشکیل دهنده اسلیت‌ها و شیل‌های دگرگون شده می‌باشند. همچنین مقادیر اکسیدهای بدست آمده از آنالیز شیمیایی با ترکیب کانی‌شناسی سازگاری نشان می‌دهد. به عنوان مثال مقدار Al_2O_3 وK_2O را می‌توان به وجود کانی‌هایی مانند موسکویت و ایلیت ربط داد.

رنگ آجر تابع ترکیب شیمیایی مواد خام، دمای پخت و روش‌های کنترل آن است. میزان Fe_2O_3، CaO، MgO، MnO و TiO2 می‌توانند به طور قابل‌ملاحظه‌ای رنگ رس پخته شده را تغییر دهند. از میان مجموعه اکسیدهای فلزی موجود در خاک‌های رسی، اکسیدهای آهن معمولاً بیشترین اثر را بر رنگ آجر دارند. رس‌ها، صرف‌نظر از رنگ اولیه آن‌ها و صرف‌نظر از نوع اکسید آهن موجود، در مرحله اکسیداسیون پخت به علت تشکیل اکسید فریک، به رنگ قرمز در می‌آیند و چنانچه در هنگام پخت در شرایط احیا قرار گیرند، به علت تشکیل اکسید فرو، به رنگ آبی تیره یا ارغوانی تبدیل می‌شوند. ایجاد شرایط احیا در کوره پخت را Flashing می‌نامند که با وارد ساختن سوخت مشتعل نشده یا برخی مواد دیگر به کوره حاصل می‌شود. وجود آهک زیاد در مواد خام موجب تولید رنگ زرد در آجر می‌گردد. برای یک نوع ماده خام معین، هر چه دمای پخت بیشتر باشد، رنگ آجر تیره‌تر، میزان قابلیت جذب آب آن کمتر و مقاومت فشاری آن بیشتر خواهد بود. اما در صورت متفاوت بودن ماده خام اولیه تولید آجر، رابطه مستقیمی بین رنگ، میزان قابلیت جذب آب و مقاومت فشاری آن وجود ندارد. در کوره پخت پس از گذشتن از دمای سرخ شدن، با افزایش دما، رنگ آجر از قرمز به صورتی، سفید، زرد، زرد مایل به سبز، سبز و سبز زیتونی (مرحله ذوب شدن مواد و تولید آجر جوش) تبدیل می‌شود. میزان Fe_2O_3 نمونه‌های مورد مطالعه در حدود (٪ ۷/۱۲ - ٪ ۴/۷۹) گزارش شده است که علاوه بر نقش گدازآور بودن آن، رنگ قرمز به محصول پخته شده می‌دهد. همچنین نمونه R-2 و T-5 به دلیل داشتن درصد CaO بالاتر از بقیه نمونه‌ها دارای رنگ روشن‌تری هستند.

پلاستیسیته از ویژگی‌های تکنولوژیکی مواد خام رسی در نظر گرفته می‌شود. این ویژگی به ترکیب کانی‌شناسی و پراکنندگی اندازه دانه‌ها و وجود مواد آلی بستگی دارد. یک روش معتبر برای ارزیابی مواد رسی بر اساس حدود آتربرگ پایه‌ریزی شده است. جدول ۷ نتایج حاصل از آزمایش تعیین حدود آتربرگ را نشان می‌دهد.

جهت کاربردی کردن داده‌ها در صنعت از نمودارهای کاساگرانده (۱۹۴۸) و هولتز و کاواکس (۱۹۸۱) استفاده می‌گردد. نمودار کاساگرانده نمایانگر موارد مصرف رس‌ها در ارتباط با خاصیت خمیری آن‌ها است. ترسیم داده‌های نمونه‌های مورد مطالعه در این نمودار نشانگر این است که نمونه‌های مورد مطالعه به لحاظ خاصیت خمیری در محدوده ساخت آجر قرار می‌گیرند و امکان ساخت آجر با این مواد خام وجود دارد (شکل۷- الف). نمودار هولتز و کاواکس بر مبنای حد روانی و نشانه خمیری ترسیم می‌شود. شکل ۷- ب نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده رس‌های غیرآلی و دارای خاصیت خمیری کم قرار می‌گیرند. همچنین بررسی داده‌های

حدود آتربرگ سنگ‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که پلاستیسیته پایین نمونه‌ها به علت وجود کانی‌های ایلیت، کلریت و حضور کانی‌های کربناته می‌باشد. همچنین نتایج حد خمیری نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که حد خمیری نمونه‌ها در محدوده مجاز استاندارد شماره ۱۱۶۲ سازمان ملی استاندارد قرار می‌گیرد و برای ساخت آجر مناسب می‌باشد. بررسی نتایج دانسیته آجرهای تولید شده (جدول ۸) نشان می‌دهد که دانسیته خشک نمونه‌های مورد مطالعه بین ۱/۶ تا ۱/۸۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است و تمامی نمونه‌ها دارای دانسیته کمتر از آجر معمولی ($1/84 gr/cm^2$) می‌باشند. این نشان دهنده سبک بودن آجرهای ساخته شده است.

جدول۶. نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه

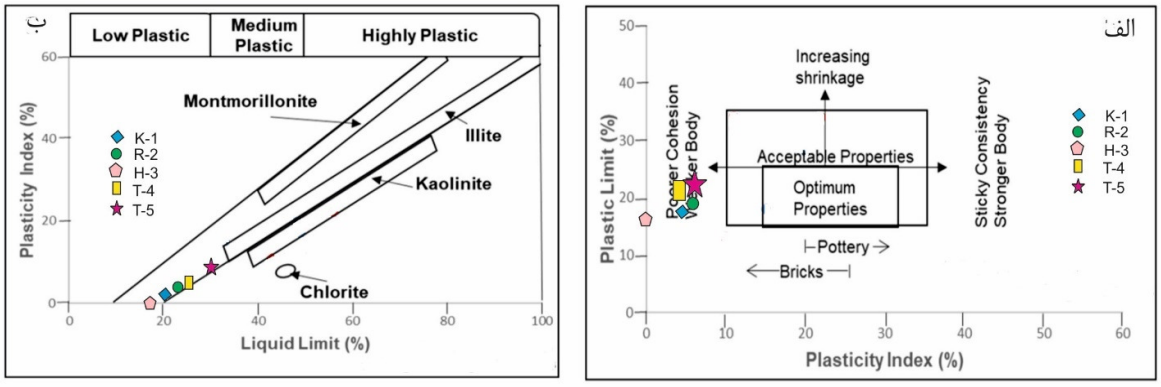
Table 6. Chemical analysis results of the studied samples

نمونه	SiO_2 %	Al_2O_3 %	CaO %	Fe_2O_3 %	K_2O %	MgO %	MnO %	Na_2O %	P_2O_5 %	SO_3 %	TiO_2 %	LOI %
K-1	64.60	15.41	2.08	4.79	2.69	1.58	-	1.06	0.12	0.48	0.85	5.73
R-2	52.88	16.14	8.01	5.72	2.79	1.67	0.06	1.05	0.07	-	0.76	10.83
H-3	67.78	15.03	1.54	5.45	2.43	0.73	0.05	0.88	0.11	-	0.81	5.18
T-4	58.19	19.88	1.22	7.12	3.59	2.06	0.12	1.41	0.16	-	1.04	5.2
T-5	51.26	16.14	7.88	5.77	3.26	2.02	0.07	0.77	0.1	-	0.74	11.99
استاندارد 1162	40-60	9-21	<17	3-12	-	<4	-	-		<0.5	-	<16

جدول ۷. نتایج حدود آتربرگ نمونه‌های مورد مطالعه

Table 7. Results of Atterberg limits of the studied samples

نمونه	LL	PL	PI
K-1	21	18	3
R-2	24	20	4
H-3	17	17	N. P
T-4	26	22	4
T-5	29	23	6



شکل ۷. الف- موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار کار پذیری رس‌ها و ب- موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی دیاگرام هولتز و کواکس

Fig. 7. Position of the studied samples on (a) clay workability chart (b) the Holtz and Kovacs diagram

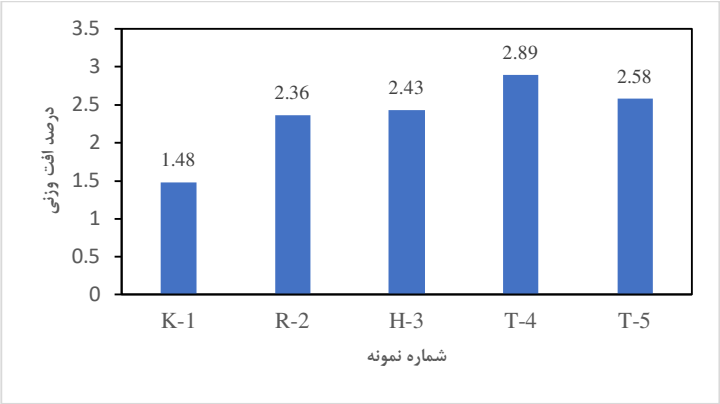
جذب آب یکی از فاکتورهای موثر در استحکام و ماندگاری آجرها می‌باشد و به طور غیرمستقیم معرف میزان تخلخل نمونه است. جذب آب کمتر، دوام زیادتر بدنه آجر و مقاومت در برابر شرایط آب و هوایی را باعث می‌شود (الیش کسادا و همکاران، ۲۰۱۱). مقدار جذب و تخلخل با دمای پخت ارتباط معکوس دارند به دلیل این که پی آمد آن تشکیل فاز شیشه‌ای است (بالز و همکاران، ۲۰۰۳). فاز شیشه‌ای در دمای زیاد جریان می‌یابد و منافذ کوچک‌تر را می‌بندد و به همین دلیل تخلخل را کاهش می‌دهد و در نتیجه جذب آب هم کاهش می‌یابد (لیائو و هوانگ،۲۰۱۱).

واکنش‌های تجزیه کربنات در دماهای پخت نیز تخلخل ایجاد می‌کند، بنابراین معمولاً مقدار جذب آب نمونه‌های با کربنات بیشتر افزایش می‌یابد (ترینداری و همکاران، ۲۰۰۹). بررسی ویژگی جذب آب آجرهای تولید شده (جدول ۸) و مقایسه آن با استاندارد ملی شماره ۷ (جدول شماره ۲) نشان می‌دهد که درصد جذب آب نمونه آجرهای K-1 وH-3 مطابق مقادیر ارائه شده برای آجر نما و در مورد آجرهای R-2، T-4 و T-5 کمی بیشتر از حد استاندارد می‌باشد. همچنین درصد جذب آب کلیه آجرهای تولید شده بالاتر از مقادیر ارائه شده برای آجر مهندسی (ماشینی) می‌باشد. بنابراین با توجه به عدم انطباق جذب آب آجرهای مورد مطالعه با استاندارد مربوطه، انجام آزمون افت وزنی نمونه‌ها در چرخه‌های انجماد و آب‌شدگی ضروری به نظر می‌رسد و پذیرش آجر منوط به انطباق با ویژگی آزمون یخزدگی می‌باشد. بررسی میزان افت وزنی نمونه‌های مورد مطالعه بعد از ۵۰ چرخه انجماد و آب شدگی که در شکل ۸ ارائه شده است گویای آن است که میزان افت وزنی همه نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده مجاز استاندارد ملی شماره ۷ سازمان ملی استاندارد می‌باشد. مقاومت فشاری مصالح مهمترین شاخص کیفیت مهندسی برای مصالح ساختمانی است و این پارامتر با افزایش دمای پخت افزایش می‌یابد (الیش کسادا و همکاران، ۲۰۱۱). جدول ۹ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های آجر ساخته شده را نشان می‌دهد. بررسی ویژگی‌های مقاومتی آجرهای تولید شده و مقایسه آن‌ها با شرایط استاندارد ملی شماره ۷ نشان می‌دهد که تمامی آجرهای ساخته شده از سنگ‌های اسلیتی و شیلی مقاومت خیلی خوبی دارند. بطوری که نمونه آجرهای K-1 و T-5 به عنوان آجر مهندسی (ماشینی) درجه دو با مقاومتی بالاتر از ۲۵۰ Kg/Cm^2 و آجرهای نمونه R-2، H-3 و T-4 به عنوان آجر نما درجه ۱ با مقاومتی بالاتر از ۱۴۰Kg/Cm^2 کاربرد دارند. لازم به ذکر است حداقل مقاومت آجرتوکار باربر و غیر باربر بر اساس استاندارد ملی شماره ۷ به ترتیب ۸۰ و ۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. بنابراین از کلیه آجرهای تولید شده می‌توان به منظور آجر توکار نیز استفاده کرد. نتایج میزان نمک‌های محلول در آب آجرهای ساخته شده در جدول ۱۰ ارائه شده است. نتایج آزمایش تعیین نمک‌های محلول در نمونه‌های آجر تولید شده نشان می‌دهد که مقادیر بدست آمده مطابق با استاندارد ارائه شده برای آجر نما (استاندارد شماره ۱۱۶۲ سازمان ملی استاندارد) می‌باشند.

جدول۸. نتایج ویژگی‌های فیزیکی نمونه آجرهای تولید شده

Table 8. The results of the physical properties of the produced bricks

شماره نمونه	K-1	R-2	H-3	T-4	T-5
رنگ	قهوه ای	نارنجی	آجری	قرمز تیره	کرم- قهوه ای
درصد تخلخل	۱۴/۰	۲۰/۰	۱۸/۳	۲۲/۰	۲۱/۸
دانسیته خشک (gr/cm^3)	۱/۸۰	۱/۶۴	۱/۷۰	۱/۶۳	۱/۶۰
دانسیته اشباع (gr/cm^3)	۲/۰۵	۱/۹۷	۲/۰۱	۱/۹۷	۱/۹۵
میانگین درصد جذب آب	۱۳/۱	۱۹/۳	۱۷/۶	۲۱	۲۰/۶



شکل ۸. درصد افت وزنی نمونه آجرهای ساخته شده در ۵۰ چرخه از یخ زدن و آب شدن

Fig. 8. Percentage weight loss of brick samples in 50 cycles of freezing and thawing

جدول ۹. نتایج آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری آجرهای ساخته شده

Table 9. Test results of uniaxial compressive strength for bricks produced

نمونه	مقاومت فشاری تک محوری (کیلو گرم بر سانتی‌متر مربع)	
	خشک	اشباع
K-1	۲۶۲	۲۲۵
R-2	۱۹۵	۱۵۲
H-3	۱۹۸	۱۵۶
T-4	۱۵۴	۹۹
T-5	۲۵۱	۲۲۹

جدول ۱۰. نتایج میزان املاح محلول در آب آجرهای ساخته شده

Table 10. The results of the dissolved solutes in the water of the manufactured bricks

شماره نمونه	K-1	R-2	H-3	T-4	T-5	استاندارد ملی شماره ۱۱۶۲
درصد نمک‌های محلول در آب	۰/۵۱	۰/۵۷	۰/۴۱	۰/۴۶	۰/۶۲	آجر نما ۰/۶ >
						آجر مهندسی(ماشینی) ۱/۸۵ >

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ویژگی‌های مهندسی پنج نمونه اسلیت و شیل دگرگون شده شمال استان همدان به منظور تولید آجر مورد بررسی قرار گرفت. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده اسلیت‌ها و شیل‌های دگرگون شده شامل کوارتز، ایلیت، موسکویت، کلسیت، کلینوکلزیت و آلبیت می‌باشند. نتایج آنالیزشیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقادیر SiO_2 دو نمونه کمی بالاتر از حد مجاز استاندارد ولی بقیه اکسیدها کمتر از حد مجاز استاندارد شماره ۱۱۶۲ سازمان ملی استاندارد می‌باشد و برای ساخت آجر مناسب می‌باشند. همچنین مقادیر L.O.I نمونه‌های مورد مطالعه کمتر از حداکثر مجاز استاندارد می‌باشد. نتایج حدود آتربرگ نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه به لحاظ خاصیت خمیری در محدوده ساخت آجر قرار می‌گیرند. تمامی نمونه‌های آجر تولید شده دانسیته کمتری از آجر معمولی دارند که نشان‌دهنده سبک بودن آجرهای ساخته شده می‌باشد. درصد جذب آب آجرهای ساخته شده مطابق استاندارد شماره ۷ سازمان ملی استاندارد برای آجر نما و آجر توکار مناسب می‌باشند. بررسی مقاومت فشاری نمونه آجرهای تولید شده بیانگر کیفیت مطلوب آن‌ها بوده و با کاربرد آجر مهندسی، آجر نما و آجر توکار قابل استفاده می‌باشند. نتایج آزمون انجماد و آب‌شدگی نشان‌دهنده افت مجاز نمونه آجرها در ۵۰ چرخه از این آزمون می‌باشد. همچنین میزان نمک‌های محلول در آجرهای ساخته شده در حد مجاز می‌باشد. بطور کلی می‌توان گفت که امکان استفاده از اسلیت‌ها و شیل‌های دگرگون شده شمال استان همدان با توجه به برونزد قابل توجه آن‌ها به عنوان ماده‌ی اولیه صنعت آجر سبک با کیفیت مطلوب وجود دارد که این موضوع از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی حائز اهمیت است.

References

Alai-Mahabadi, M. and Foudazi, M (2003) Geological map of Razan, Scale 1:100,000, Geological survey & mineral exploration of Iran. (In persian).

ASTM (1985) Standards Specification for Brick, American Standard for testing and Materials, Vol.4.02, PA.USA.

ASTM (2017) Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils, No. D4318-17E1.

ASTM C20-00 (2010) Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water. DOI: 10.1520/C0020-00R10.

Awadh S. M. & Abdalla H. H (2009) Mineralogical, geochemical and geotechnical evaluation of Al-Sowera soil for building bricks industry in Iraq. Journal of Geology and Mining Research, 1: 118-125. doi.org/10.1007/s12517-009-0081-x.

Bauluz, B., Mayayo, M., Femandez- Nieto, C., Cultrone, G., Gonzlez Lopez, J. M (2003) Assessment of technological properties of calcareous and non-calcareous clays used for the brick-making industry of Zaragoza (Spain). Applied Clay Sciense. 24: 121-126. doi.org/10.1016/S0169-1317(03)00152-2.

Borna, B (2014) Exploration of brick raw materials in shaley and marly Formations in North

Khorasan province, Geological survey & mineral exploration of Iran. (In Persian).

Casagrande, A (1948) Classification and identification of soils. Transactions of the American of Civil, 113: 901–930.

Danesh Zemin Engineering Company (1999) The project of regional exploration of non-metallic minerals in Hamadan province: Marl exploration project in Hamedan province from the point of view of use in brick industries. Organization of Industries and Mines of Hamedan province. (In Persian).

Dosti Roudi, Y (2013) Study of engineering geology properties of Qom Formation marls in the North-East of Hamadan province with an emphasis on brick-making materials, M. SC. thesis, Bu-Ali Sina University. (In Persian).

Eghlimi, B (2000) Geological map of Hamadan, Scale 1:100,000, Geological survey & mineral exploration of Iran. (In Persian).

Eliche- Quesada, D., Martinez- Garcia, C., Martinez- Cartas, M. L., Cotes- Palomino, M. T., Perez- Villarejo, N., Cruz- Perez, N., CorpasIglesias, F. A (2011) The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. Applied Clay Science, 52: 270- 276. doi.org/10.1016/j.clay.2011.03.003.

Eshragi, S. A., and Mahmoudi-Garai, M (2003) Geological map of Tuserkan, 1:100000 sheet, Geological survey & mineral exploration of Iran. (In Persian).

Francisco, M., Fernandes, P., Lourence, B. & Fernando, C (2009) Ancient Clay Bricks: Manufacture and Properties (chapter 3), Materials & Technologies and practice in Historic Heritage Structures, Eds M. Bostenaru Dan et al, Springer, pp. 1-21.

Ghorbani, M., Ajayebi, K., Sadeghi, S (2003) Exploration plan of geological Formations for brick production, Organization of Industries and Mines of Kermanshah Province, 159 p. (In Persian).

Hami, A (2009) Building materials, Tehran university press, 299 p. (In Persian).

Holtz, R. D., Kovacs, W. D (1981) An Introduction to Geotechnical Engineering; Prentice-Hall, Inc.: Upper Saddle River, NJ, USA.733 p.

INSO (1997) Iranian National Standardization Organization, Soil – Soil clay for making clay brick – Specification and test method, 1th-Revision, No. 1162. (In Persian).

INSO (2006) Iranian National Standardization Organization, Clay Brick-Specification and Test methods, 4th- Revision, No. 7. (In Persian).

Khaksar, M. and Rezaei, P (2013) Geochemical study of marl deposits of Aghajari Formation in West of Bandar Abbas (Soro section) for clay brick production, 4th Conference of Iranian Society of Economic Geology, pp.546-550. (In Persian).

Liao, Y. C., Huang, C. Y (2011) Effects of heat treatment on the physical properties of lightweight aggregate from water reservoir sediment. Ceramics International, 37: 3723-3730. doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.04.122.

Murmu A. L., Patel, A (2018) Towards sustainable bricks production: An overview. Construction and Building Materials, 165: 112–125. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.038.

Organization of Industries and Mines of Kohkilouyeh and Boyer-ahmad (1998) Report on the study shaley-marly units of Mishan-Aghajari-Gachsaran Formations for use in brick production industry, 99 p. (In Persian).

Pourkaseb, H., Veuseh, S., Niknam, S. H., Zarosvandi, A. R (2014) Investigating the technical and engineering characteristics of the marls of the Mishan Formation in the north of Ahvaz for the production of light bricks, Iranian Journal of Mining Engineering, 9 (22): 37-51. (In Persian).

Prentice, J. E (1990) Geology of Construction Materials, Springer Science & Business Media, 202 P.

Shafeii, A (2004) Geological map of Kabodar Ahang, Scale 1:100,000, Geological survey & mineral exploration of Iran. (In persian).

Shakir, A. A., Mohammed, A. A (2013) Manufacturing of Bricks in the Past, in the Present and in the Future: A state of the Art Review. International Journal of Advances in Applied Sciences, 2: 145-156.

Trindade, M. J., Dias, M. I., Coroado, J., Rocha, F (2009) Mineralogical transformations of calcareous rich clays with firing: a comparative study between calcite and dolomite rich clays from Algarve, Portugal. Applied Clay Science, 42: 345– 355.

Study of the engineering characteristics of slates for brick production in north Hamadan province

A. R. Taleb beydokhti[*1], R. Mohammadi Ostadkallayeh[2] and A. A. Momeni[3]

1- Assist. Prof., Dept. of Geology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
2- M. Sc., of Geology, national standards organization, Hamedan, Iran
3- Assoc. Prof., Dept. of Geology, Earth Sciences Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

* Beydokhti@sci.ikiu.ac.ir

Recieved: 2023.3.15 Accepted: 2023.6.19

Abstract

The objective of this study is to investigate the characteristics of slates and metamorphosed shales in Hamadan province for their potential use in brick production. Firstly, the slatey and shaley units of geological Formations in Kabudar Ahang, Razen, Hamedan, and Tuserkan with a scale of 1:100,000 were identified, and their geological and petrological data of metamorphic units were collected. Following field visits, five sampling locations were selected. The results of the chemical analysis of the main oxides and X-Ray Diffraction analyses confirmed that the lithological composition of the sampling sites is slate and metamorphosed shales. According to the results of the data obtained from the chemical analysis, the composition of the studied rocks meets the required standards for brick preparation (Standard No. 7 of the National Standards Organization of Iran). After preparing the samples, physical, chemical, and mechanical tests were conducted on the bricks. The density values of the manufactured bricks indicate they are lighter than regular bricks. Water absorption of the produced bricks is within the acceptable range for facing bricks and pressed bricks according to Iran's national standard. All the slate and metamorphosed shale bricks are in good condition in terms of strength and can be used for engineering, facing, and pressed bricks. Results of the freezing test on the bricks subjected to 50 cycles of freezing and thawing show that the weight loss percentage of the samples falls within the permissible limit of Iran's national standard (No.7). Also, the amount of soluble salts in the bricks is at the optimal level. Overall, all the properties examined in the slate bricks comply with relevant standards, indicating their suitability for use in the brick-making industry, which is economically and environmentally significant.

Keywords: Brick, Slate, Metamorphosed shales, Engineering characteristics, Hamedan

Introduction

Brick is one of the most commonly used building materials in construction due to its stability against cold, heat, humidity, and aesthetic appeal. Its inherent properties have made it the most widely used material in the construction industry. The quality of bricks depends on the raw materials and the burning method employed. Raw materials for bricks can be obtained from clays, shale, and marl. Important minerals found in brick raw materials include kaolinite, illite, smectite, as well as lesser amounts of magnesium-aluminum chlorites, aluminum oxide and hydroxides, iron oxide and hydroxides, quartz, and organic materials. SiO_2 and Al_2O_3 are the main components of raw materials, which are commonly found in clay minerals, quartz, and small grains of feldspar. Currently, the primary raw material for brick production is mostly obtained from the clay soils of alluvial plains. However, due to the economic importance of clay soils in agriculture and the lack of suitable clay soils in some areas, the use of alternative materials such as shale and marl found in geological Formations is being considered.

Considering the increasing demand for construction and the significant outcrops of slate and metamorphosed shales in Hamedan province, this research proposes to investigate the feasibility of producing bricks from these sources. This study presents the findings of this investigation.

Materials and Methods

Selecting the Sampling Area: The outcrop and dispersion of slate and metamorphosed shales units in four geological map sheets of Kabudar Ahang, Razan, Hamedan, and Tuserkan were investigated with a scale of 1/100,000. After conducting field visits, five locations were

selected for sampling, and they were labeled as K-1, R-2, H-3, T-4, and T-5.

Petrographic Studies: The mineralogical composition of the studied rocks was identified through X-ray diffraction (XRD) after preparing the samples. Additionally, the chemical composition of the samples was evaluated via ICP-OES analysis.

Atterberg Limits Test: To determine the Atterberg limit, including the liquid limit and the plastic limit of the samples, they were prepared according to the ASTM D4318-84 standard. Then, the tests were conducted.

Production of Bricks: The samples were crushed and sieved, and the soil that passed through sieve No. 40 was prepared. After mixing with water, mud was prepared. The prepared mud was then kneaded for at least 7 days and manually placed in a mold. After the samples were removed from the mold, they were placed outdoors for 7 days to decrease the water content significantly before being transferred to the brick kilns for firing. After production, physical, mechanical, and chemical tests were conducted on the brick samples.

Brick Physical, Mechanical, and Chemical Tests: Physical characteristics, including porosity, dry density, saturated density, percentage of water absorption, and durability of bricks in freezing and thawing cycles, were evaluated in this research. Additionally, the uniaxial compressive strength of the bricks and the amount of water-soluble salts in the produced bricks were determined.

Discussion and Conclusion

The chemical composition of raw materials used in brick production is a crucial factor that needs to be studied. ICP-OES method is the most reliable method to determine the composition of raw materials. The characteristics of the clay soil should also conform to the national standard 1162.

Comparing the chemical analysis results of the studied samples with national standard 1162 values revealed that all samples meet the standard and are suitable for brick production. The L.O.I values of the samples were found to be lower than the maximum limit (<16%). The high L.O.I values of samples R-2 and T-5 were due to their higher calcium carbonate content compared to other samples.

The chemical analysis results indicated that SiO_2 and Al_2O_3 were the most abundant constituents of slate and metamorphosed me shales, respectively. The oxides values were also compatible with the mineralogical composition. For instance, the amount of Al_2O_3 and K_2O was linked to the presence of minerals like muscovite and illite. The amount of Fe_2O_3 in the samples ranged from 4.79% to 7.12%, and it acted as a flux substance, providing a red color to the fired product. Other components such as CaO, MgO, MnO, and TiO_2 can also significantly alter the color of fired clay. Samples R-2 and T-5 had a brighter color than other samples due to their higher CaO content. The darker color of the T-4 brick sample was due to its higher iron, magnesium, and manganese oxide content compared to other samples.

The XRD analysis of the sampled rocks indicates that clinochlorite and illite are the most abundant clay minerals in the slates of the study area. The Atterberg limits of the rocks show that the plastic limit value is consistent with the mineralogical composition and falls within the permissible range of the national standard 1162.

The density results of the produced bricks reveal that the dry density of the samples ranges from 1.6 to 1.80 g/cm3, and all samples have a lower density than regular bricks (1.84 g/cm3). This suggests that the slatey and shaley bricks are lightweight.

In terms of water absorption characteristics, comparing the results with national standard No.7 demonstrates that the percentage of water absorption of K-1 and H-3 bricks meets the values recommended for facing bricks, while R-2, T-4, and T-5 bricks show slightly higher values than the standard.

The weight loss of the studied samples after 50 cycles of freezing and thawing is within the permissible range for samples K-1, R-2, H-3, and T-5, while the weight loss percentage of sample T-4 is slightly higher than the standard limit. All the bricks made from slates and metamorphosed shales exhibit very good strength, with K-1 and T-5 bricks classified as second-grade engineering bricks with a strength higher than 250 Kg/cm^2, and R-2, H-3, and T-4 bricks classified as grade 1 facing bricks with a strength higher than 140 Kg/Cm^2. The minimum strength for load-bearing and non-load-bearing brickwork according to national standard No. 7 is 80 and 40 kg/cm^2, respectively, indicating that all the produced bricks can be used for building purposes.

The test results for determining the soluble salts in the produced brick samples show that they comply with the standard values set for facing bricks.