

بررسی خصوصیات فنی و صنعتی مارن‌های سازند میشان در شمال اهواز برای تولید آجر سبک

هوشنگ پورکاسب^۱، سهراب ویسه^{۲*}، شراره نیکنام خیاط^۳، علیرضا زراسوندی^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، veisheh@bhrc.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز

(دریافت ۱۶ تیر ۱۳۹۲، پذیرش ۵ بهمن ۱۳۹۲)

چکیده

به منظور ارزیابی کیفیت مارن‌های سازند میشان جهت کاربرد آنها در صنعت آجر سبک، بخشی از این سازند در منطقه‌ای در ۱۰۰ کیلومتری شمال شرق اهواز مورد مطالعه قرار گرفت. جهت بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، آزمایشاتی از قبیل پراکندگی اندازه دانه‌ها، تعیین حدود روانی و خمیری خاک، جذب آب، چگالی کل و مقاومت فشاری صورت گرفت. پراکندگی اندازه دانه‌ها اغلب در حد سیلت و رس است. به علت مقدار بالای CaO رنگ آجرهای تولید شده روشن و یا زرد متمایل به قهوه‌ای می‌باشد. جذب آب آجرهای تولیدی بر اساس استاندارد ملی ایران برای آجر توکار مناسب است. اغلب آجرهای مارنی ساخته شده به لحاظ مقاومت فشاری برای تولید آجرهای توکار مناسب هستند. تعیین چگالی آجرها نیز گویای سبک‌تر بودن آنها نسبت به آجرهای معمولی است. به طور کلی می‌توان گفت منطقه مورد مطالعه به لحاظ کاربرد آن در صنعت آجر سبک در صورت بهره‌گیری از تمهیدات لازم جهت بهبود کیفیت مواد اولیه قابل استفاده است.

کلمات کلیدی

مارن، میشان، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، آجر سبک

۱. مقدمه

راه‌کاری مهم در جهت تولید فرآورده‌های صنعتی با کیفیت مطلوب می‌باشد. مواد اولیه آجر را می‌توان از شیل، مارن و رس‌ها تأمین کرد. مارن‌ها موادی شبیه سنگ یا خاک هستند که شامل ۳۵ تا ۶۵ درصد کربنات و مقداری مکمل رس هستند. کانی‌های غیر رسی اصلی، کلسیت و کوارتز هستند. دولومیت، میکا و فلدسپات‌ها در مقادیر کمتری حضور دارند. کانی‌های رسی اصلی شامل ایلیت، مونت‌موریلونیت، کائولینیت و کلریت هستند. در بعضی مارن‌های تیره رنگ ماده‌آلی در مقدار کم قابل تشخیص است [۴،۳،۵]. به طور کلی می‌توان بیان کرد که رس‌های آهکی به ویژه آنهایی که دارای کلسیت هستند تأثیر مثبت روی مقاومت مکانیکی دارند زیرا کربنات‌ها عامل تشکیل منافذ هستند و فازهای بلورین در طول پخت ایجاد می‌کنند که مقاومت مکانیکی را بالا می‌برد [۶]. در بعضی مناطق کشور از جمله استان‌های خوزستان، فارس و بوشهر، به دلیل نبود خاک مناسب برای آجرپزی، آجر مورد استفاده از مناطق دیگر و با صرف هزینه زیاد تأمین می‌شود. چنانچه بتوان از خاک مارنی این مناطق آجر سبک تولید نمود، کمک بزرگی در کاهش هزینه تمام شده مسکن خواهد شد [۲].

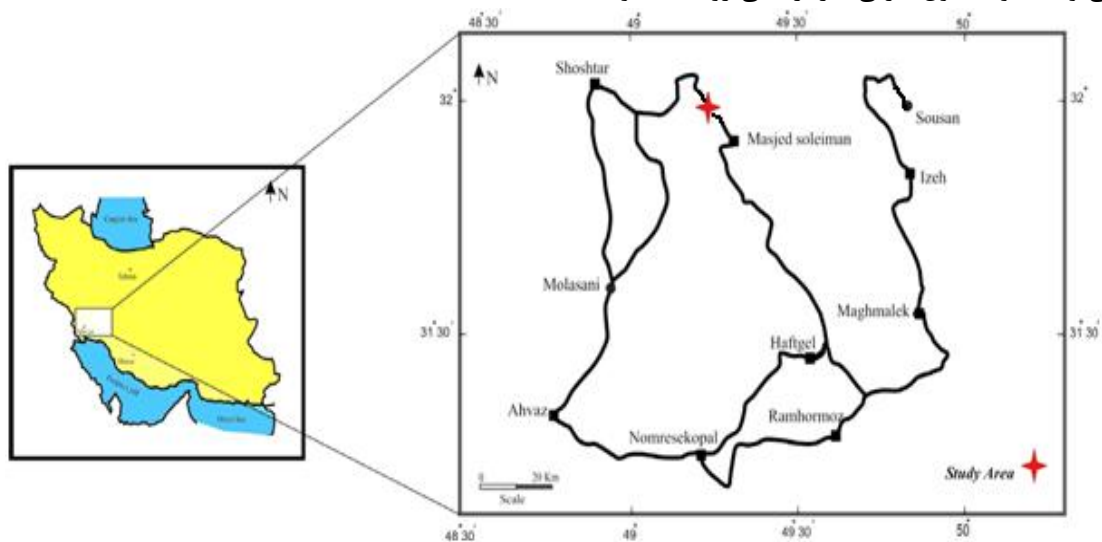
بررسی تمایلات کنونی در فعالیت‌های ساختمانی نشان می‌دهد که در طراحی و ساخت ساختمان‌هایی که در آینده ایجاد می‌شوند، متخصصان تلاش‌های مهمی برای به حداقل رساندن وزن ساختمان‌ها انجام می‌دهند. حل این مشکل خصوصا در شهرها جایی که کمبود فضای خالی برای ساخت و ساز ساختمان‌های بلند وجود دارد، ضروری است. استفاده از عایق حرارتی برای ساختمان‌های مسکونی و غیره به این مشکل می‌پیوندد. راهکار ممکن برای کاهش وزن ساختمان و بهینه‌سازی عایق حرارتی، کاربرد مصالح سبک وزن و عایق حرارت است [۱]. آجر به علت ویژگی‌هایش یکی از مواد مهم برای صنعت ساختمان محسوب می‌شود. از مزایای آجرهای سبک می‌توان کاهش چگالی آجر و در نتیجه کاهش جرم ساختمان و افزایش مقاومت آن در برابر نیروهای زلزله، بهبود خواص عایق حرارتی نسبت به آجرهای معمولی و در نتیجه کاهش مصرف انرژی، کاهش وزن جابجا شده و بنابراین، هزینه‌های کمتر حمل و نقل را نام برد [۲]. ماده اولیه مجموعه‌ای از کانی‌های مختلف با خواص فیزیکی، شیمیایی و ترمودینامیکی متفاوت است که شناخت آن

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲ ویژگی‌ها

از توابع شهرستان مسجد سلیمان واقع است. دسترسی به منطقه در مسیر جاده اهواز- ملائانی- مسجد سلیمان قرار دارد (شکل ۱).

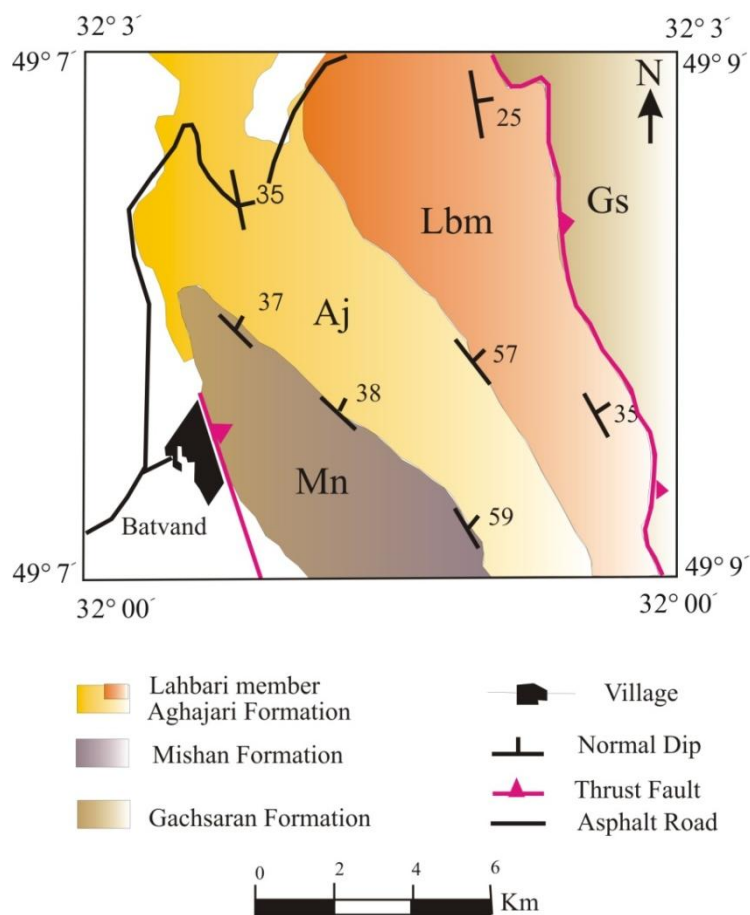
منطقه مورد مطالعه در جنوب غرب ایران و در بخش شمال شرقی استان خوزستان در فاصله ۱۰۰ کیلومتری شهرستان اهواز قرار دارد. این منطقه با مختصات جغرافیایی 32° و 2° عرض شمالی و 49° و 8° طول شرقی، در نزدیکی روستای بتوند



شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به منطقه

پلیوسن)، بخش لهبری (پلیوسن) می‌باشند. در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. این منطقه حاوی مارن‌های خاکستری و قرمز است و رگه‌های نازکی از ژئپس به صورت میان لایه در آنها دیده می‌شود.

منطقه مذکور جزئی از سازند میشان است. این ناحیه به لحاظ تقسیم بندی واحدهای رسوبی- ساختاری ایران جزئی از زون چین‌خورده زاگرس محسوب می‌شود. سازندهای اطراف این منطقه از قدیم به جدید جدید شامل سازند گچساران (میوسن زیرین)، میشان (میوسن میانی)، آغاچاری (میوسن بالایی تا



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

۲-۲ آنالیزهای شیمیایی و کانی‌شناسی

آنالیز کانی‌شناسی نمونه‌های برداشت شده توسط روش پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شد. ۶ نمونه نیز برای تعیین مقدار کانی‌ها برای آنالیز XRD کمی انتخاب گردید. به منظور بررسی زمین‌شیمیایی مارن‌های سازند میشان در منطقه مورد مطالعه، نمونه‌ها با روش فلورسانس اشعه ایکس (XRF) مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. از نمونه‌های مارن آجرهایی در مقیاس آزمایشگاهی به ابعاد $70 \times 70 \times 70$ میلی‌متر تهیه گردید. آنالیز کانی‌شناسی نمونه‌های پخته شده توسط آنالیز XRD انجام شد.

نمونه‌برداری در منطقه در دو جهت عمود بر هم به صورت افقی و عمودی و به طور نظام‌مند در رخنمون سازند میشان انجام گرفت. در پیمایش افقی فاصله هر نمونه‌برداری در حدود ۷۰ متر و در برش عمودی تقریباً ۳ متر انجام گرفت. از هر مکان نمونه‌برداری نمونه‌هایی به وزن ۲ کیلو گرم برداشت شد. در مجموع ۱۲ نمونه برداشت شد. ۴ نمونه از برش عمودی و تعداد ۷ نمونه مربوط به برش افقی است. مقداری از هر نمونه به جهت مطالعات آزمایشگاهی، پودر شده و سپس از الکی به اندازه مش (Mesh) ۶۰ عبور داده شدند. مقداری دیگر از نمونه‌ها نیز جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی از قبیل حدود آتربرگ و غیره جدا شدند.

۳-۲ بررسی حدود آتربرگ

ارزیابی پلاستیسیته توسط روش حدود آتربرگ انجام گرفت. این حدود شامل حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری است.

حد روانی و خمیری با استفاده از روش کاساگرانده محاسبه شده است. نشانه خمیری از تفاضل بین حد خمیری از حد روانی به دست می‌آید.

۴-۲ پراکندگی اندازه ذرات

برای تعیین پراکندگی اندازه ذرات از روش الک کردن و شستشو با آب استفاده گردید. نمونه‌ها برای رسیدن به وزن ثابت در دمای 110 ± 5 درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه

خشک شدند. حدود ۱۰۰ گرم از هر نمونه جدا گردیده و برای انجام این آزمایش الک‌هایی در اندازه ۱۰۰ مش و ۲۰۰ مش مورد استفاده قرار گرفت.

۵-۲ آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی آجر

ابتدا نمونه‌های مارن را در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس خشک کرده و پس از آسیاب کردن و عبور دادن از الک مش ۴۰ (۴۲۵ میکرومتر)، خاک را مرطوب کرده تا گل پلاستیک بدست آید. سپس آن را در قالب‌هایی به ابعاد $70 \times 70 \times 70$ میلی‌متر ریخته، نمونه‌های شکل داده شده پس از خشک شدن کامل در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ روز، انقباض خشک نمونه‌ها توسط اندازه‌گیری طول نمونه‌ها بدست می‌آید. سپس آنها را در داخل کوره الکتریکی آزمایشگاهی گذاشته تا در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس به مدت حداقل ۲ ساعت پخته شوند. ویژگی‌های پخت (انقباض پخت، جذب آب و مقاومت فشاری)

اندازه‌گیری شد و کانی‌های تشکیل شده توسط آنالیز XRD شناسایی گردید.

روش ارشمیدوس برای تعیین چگالی کل، جذب آب استفاده شده است. برای این منظور نمونه‌های آجر در حرارت ۱۱۰ تا ۱۱۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. نمونه‌ها در حالت خشک وزن شده (W_1) سپس برای بار دوم وزن آنها را در آب بدست آورده (W_2) بعد به مدت ۲۴ ساعت در آب سرد به حالت غوطه‌وری قرار گرفتند. پس از این مدت بلافاصله از آب خارج کرده و وزن شدند (W_3). چگالی کل و جذب آب نمونه‌ها بر طبق روابط زیر محاسبه می‌شود.

$Water\ abs. = \frac{W_2 - W_1}{W_1}$	(1)
$Bulk\ Den. = \frac{W_1}{W_3 - W_2}$	(2)
$\%Sd = \frac{L_p - L_d}{L_p} \times 100$	(3)
$\%SF = \frac{L_d - L_f}{L_d} \times 100$	(4)
$\%St = \frac{L_p - L_f}{L_p} \times 100$	(5)
$\%Ps = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100$	(6)

طول خمیری (طول اولیه)، L_d طول بعد از خشک شدن در آن، L_f طول بعد از پخت است.

همچنین مقادیر انقباض خشک (Sd)، انقباض پخت (Sf) و انقباض کل نمونه‌ها (St) و پلاستیسیته (Ps)، با استفاده از روابط بالا محاسبه شده است. Sd درصد انقباض خشک، L_p

۳- بحث

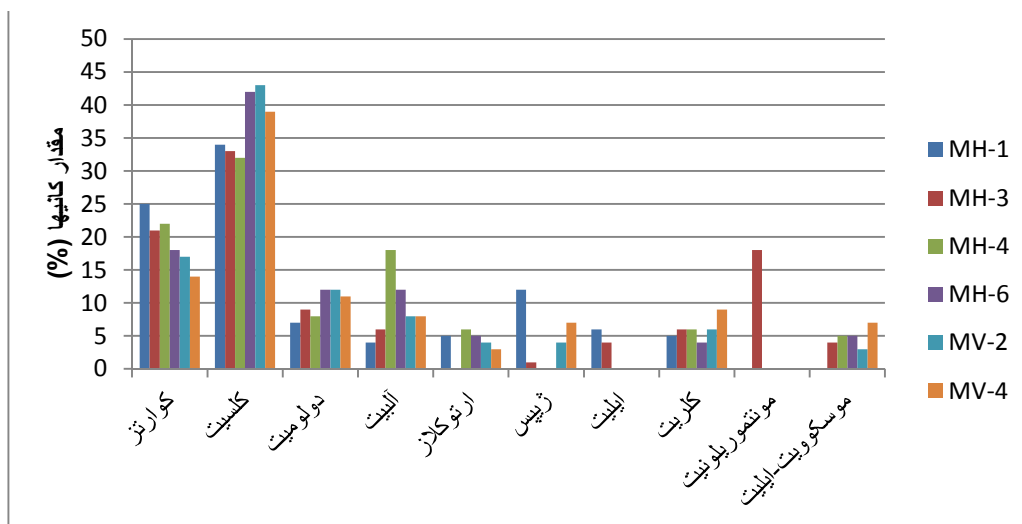
۳-۱ ترکیب شیمیایی و کانی شناسی

بررسی ترکیب کانی‌شناسی مارن‌های نمونه‌برداری شده نشان می‌دهد کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده منطقه در اکثر نمونه‌های برداشت شده، کوارتز، کلسیت، دولومیت و آلپیت است. کانی‌های

فرعی مشخص شده بیشتر شامل ارتوکلاز، کلریت و موسکوویت است. طبق نتایج بدست آمده، به طور کلی می‌توان در مورد کانی‌شناسی منطقه چنین اظهار نظر کرد که ترکیب کانی‌شناسی مارن‌های قرمز و خاکستری محدوده مطالعاتی تفاوت قابل توجهی با هم ندارند و فقط مقدار کانی‌ها متغیر

مختلط موسکوویت- ایلیت ۷-۳٪ هستند. کانی‌های غیررسی، کوارتز ۲۵-۱۴٪، کلسیت ۴۳-۳۲٪، دولومیت ۱۲-۷٪، آلپیت ۱۸-۴٪، ارتوکلاز ۶-۳٪ و ژپس ۱۲-۱٪ می‌باشند (شکل ۳).

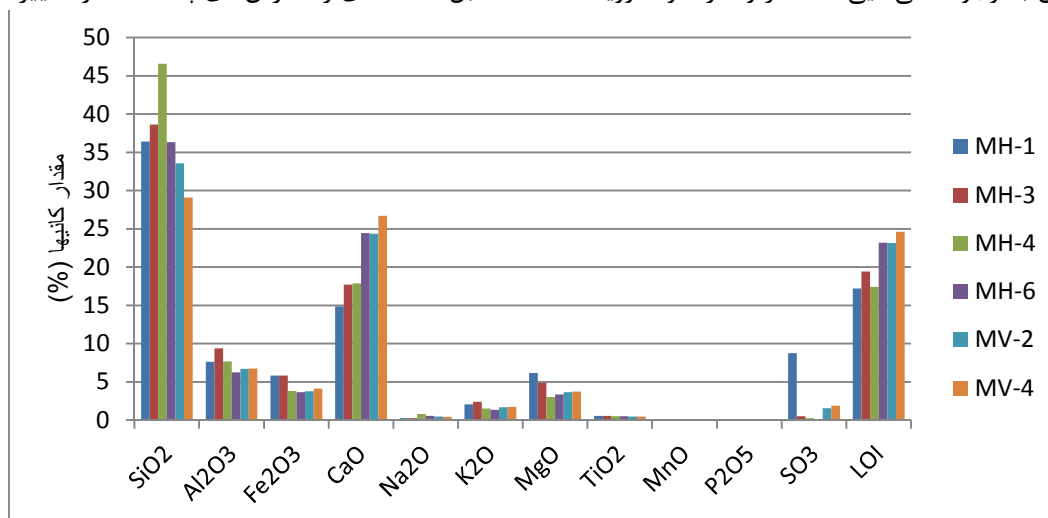
است. بررسی‌های آنالیز XRD کمی ۶ نمونه مارن نشان می‌دهد مقدار کانی‌های رسی شناسایی شده از قبیل ایلیت در حدود ۶-۴٪، کلریت ۹-۴٪، مونت‌موریلونیت ۱۸٪، لایه‌های



شکل ۳: نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) کمی ۶ نمونه برداشت شده از سازند میشان

و ایلیت در مارن‌ها ربط داد. مقدار نسبتاً CaO و MgO حضور کربنات‌ها را اثبات می‌کند. میزان Fe_2O_3 در حدود ۵/۸۱٪- ۳/۴۷ گزارش شده است که علاوه بر نقش گدازآور بودن آن رنگ قرمز به محصول پخته شده می‌دهد. با وجود این Fe_2O_3 تنها عامل مؤثر برای رنگ اجسام سرامیکی نیست. بلکه اجزاء دیگری از قبیل CaO ، MgO ، MnO ، TiO_2 ، می‌توانند به طور قابل ملاحظه‌ای رنگ رس‌های پخته شده را تغییر می‌دهد [۶].

بر اساس مطالعات آنالیز XRF (شکل ۴)، CaO ، SiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 و MgO به ترتیب فراوان‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده نمونه مارن‌های تجزیه شده است. مقادیر این اکسیدها با ترکیب کانی‌شناسی بدست آمده سازگاری نشان می‌دهد به عنوان مثال مقدار MgO (۶/۱۴٪- ۳/۰۲٪) با حضور دولومیت بین کانی‌های فرعی سازگاری دارد. همچنین مقدار Al_2O_3 و K_2O را می‌توان به وجود کانی‌هایی مانند ارتوکلاز، موسکوویت



شکل ۴: نتایج حاصل از آنالیز XRF ۶ نمونه برداشت شده از سازند میشان

کانی‌های جدید تشکیل یافته هستند. این کانی‌ها پیروکسن‌های فقیر از سیلیسیم بوده و در این نمونه جزء فازهای اصلی هستند.

ترکیب کانی‌شناسی آجر پخته شده نشان می‌دهد در مرحله پخت ژلنیت ($Ca_2Al_2SiO_7$) و آکرمائیت ($Ca_2MgSi_2O_7$)

می‌شود. پیروکسن Fe^{3+} را در ساختارش وارد می‌کند و مانع تشکیل هماتیت ریز پراکنده به عنوان فاکتور رنگ می‌گردد [۵].

لایه‌های مختلط ایلیت-اسمکتیت) و حضور مواد آلی کنترل می‌شود. یک روش ساده و معتبر برای ارزیابی مواد رسی بر اساس حدود آتبرگ پایه‌ریزی شده است، امروزه به طور معمول در بهینه‌سازی تولید آجر استفاده می‌شود [۹]. جدول (۱) نتایج آزمون حدود آتبرگ را نشان می‌دهد.

لارنیت دیگر سیلیکات کلسیم تشکیل یافته در این مرحله است. این کانی در جایگاه کانی‌های فرعی قرار گرفته است. تشکیل پیروکسن در رس‌های دارای حداقل ۱۰٪ وزنی CaO آغاز

۲-۳ بررسی حدود آتبرگ

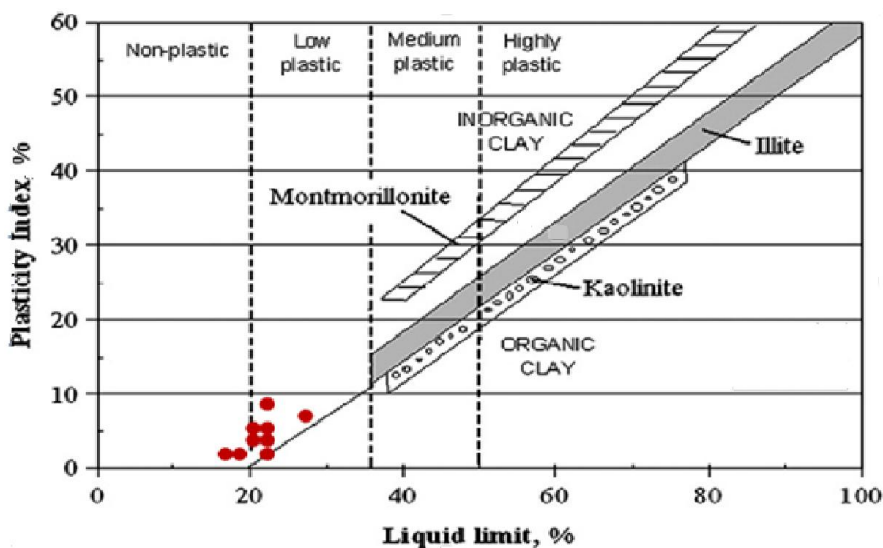
پلاستیسیته از ویژگی‌های تکنولوژیکی مواد خام رسی در نظر گرفته می‌شود. این ویژگی به طور دقیق به ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی و بافت (پراکندگی اندازه دانه‌ها) مواد خام مورد نظر برای استفاده در صنعت سرامیک، بستگی دارد. خاصیت خمیری مواد رسی توسط چندین فاکتور از قبیل فراوانی نسبی اندازه دانه‌ها، مقدار کانی‌های رسی با قابلیت تورم (اسمکتیت و

جدول ۱: حدود آتبرگ نمونه‌های مارن

نمونه	حد روانی (LL %)	حد خمیری (PL %)	نشانه خمیری (PI %)
MH-1	۲۷	۲۱	۶
MH-2	۱۹	۱۴	۵
MH-3	۲۸	۱۶۲	NP
MH-4	۱۷	۱۶	۱
MH-5	۲۰	۲۰	NP
MH-6	۱۹	۱۵	۴
MH-7	۲۰	۱۶	۴
MH-8	۳۹	۴۵	NP
MV-1	۱۵	۱۳	۱
MV-2	۱۹	۱۵	۴
MV-3	۲۰	۱۷	۲
MV-4	۲۱	۱۳	۷

می‌شود. شکل (۵) نشان می‌دهد نمونه‌های مارن سازند میشان در محدوده رس‌های غیرآلی و دارای خاصیت خمیری کم قرار می‌گیرند.

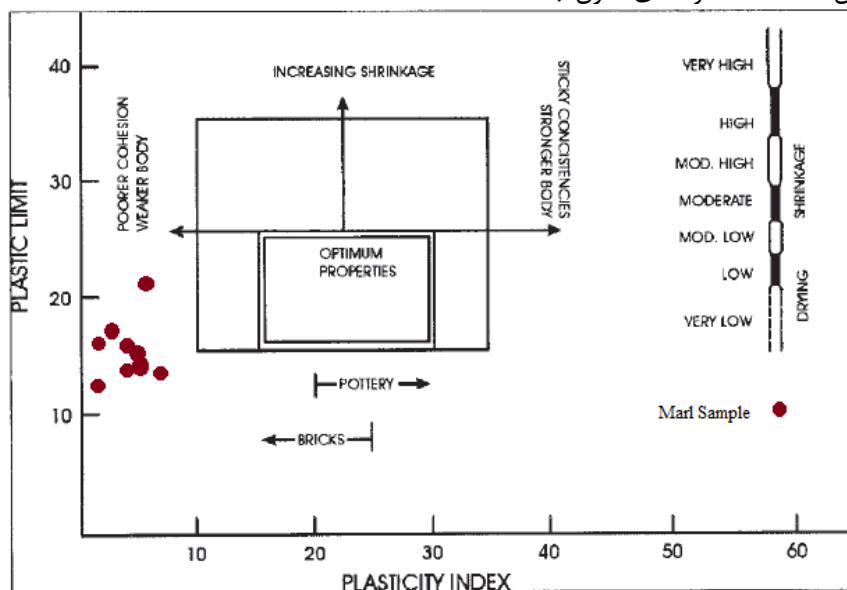
جهت کاربردی کردن داده‌ها در صنعت از نمودارهای هولتز و کاواکس (۱۹۸۱) و نمودار کاساگرانده استفاده می‌گردد. نمودار هولتز و کاواکس بر مبنای حد روانی و نشانه خمیری ترسیم



شکل ۵: موقعیت نمونه‌ها بر روی دیاگرام نشانه خمیری و حد روانی [۱۰].

خاصیت خمیری در محدوده ساخت آجر قرار می‌گیرند و امکان ساخت آجر با این خاک وجود دارد (شکل ۶).

نمودار کاساگرانده نشانگر موارد مصرف رس‌ها در ارتباط با خاصیت خمیری آنها می‌باشد. ترسیم داده‌های مارن‌های میشان در این نمودار نشانگر این است که نمونه‌های مارن به لحاظ



شکل ۶: نمودار کاساگرانده [۱۱]

۳-۳ پراکندگی اندازه ذرات

میکرومتر (درصد مانده روی الک ۱۰۰)، بین ۷۵ تا ۱۵۰ میکرومتر (درصد مانده روی الک ۲۰۰) و کوچکتر از ۷۵ میکرومتر (درصد عبوری از الک ۲۰۰) استفاده شد (جدول

پراکندگی اندازه دانه‌های رس، عاملی جهت تعیین مناسبت آن برای کاربردهای مختلف است و برای تولیدات سرامیکی باید به اندازه دانه‌های کوچکتر توجه ویژه‌ای شود [۸، ۱۲].

برای تعیین پراکندگی اندازه ذرات، نمونه‌های مارن در ۳ گروه دانه‌بندی شدند. گروه‌های مورد نظر در اندازه‌های بزرگتر از ۱۵۰

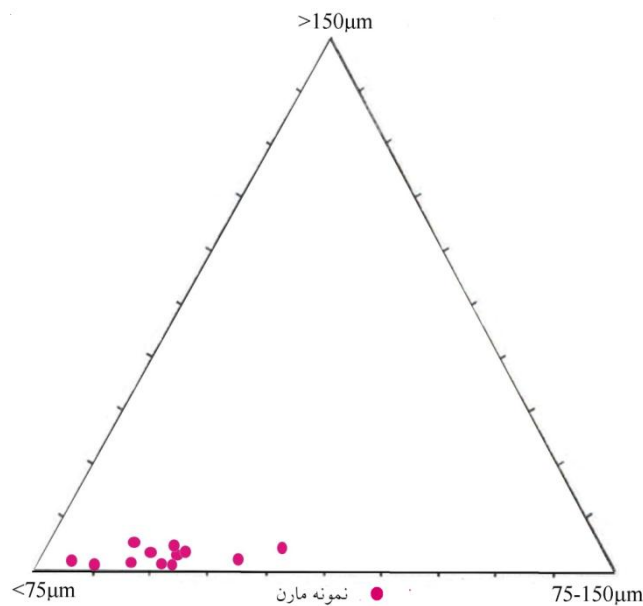
(۲)

جدول ۲: پراکندگی اندازه‌های نمونه‌های مارن

نمونه	درصد مانده روی الک ۱۰۰	درصد عبوری از الک ۱۰۰	درصد مانده روی الک ۲۰۰	درصد عبوری از الک ۲۰۰
MH-1	۰/۱۸	۹۹/۸۲	۱۶/۹۶	۸۳/۰۴
MH-2	۲/۶۰	۹۷/۳۹	۲۴/۴۱	۷۵/۵۹
MH-3	۰/۴۹	۹۹/۵۰	۲۲/۲۵	۷۷/۷۵
MH-4	۵/۱۱	۹۴/۸۹	۴۲/۵۸	۵۷/۴۲
MH-5	۰/۹۹	۹۹/۰۱	۲۳/۲۳	۷۶/۷۷
MH-6	۰/۳	۹۹/۷	۱۰/۸۸	۸۹/۱۲
MH-7	۳/۴۷	۹۶/۵۳	۳۵/۰۳	۶۴/۹۷
MH-8	۱/۰۱	۹۹/۹۹	۵/۸۲	۹۴/۱۸
MV-1	۶/۱۵	۹۳/۸۵	۱۷/۶۸	۸۲/۳۲
MV-2	۵/۵۲	۹۴/۴۸	۲۵/۰۷	۷۴/۹۳
MV-3	۴/۴۰	۹۵/۶	۲۵/۴۵	۷۴/۵۵
MV-4	۴/۳۰	۹۵/۷	۲۰/۸۲	۷۹/۱۸

درصد اندازه‌های بزرگتر از ۱۵۰ میکرون در حد استاندارد (کمتر از ۷/۵ درصد) قرار دارد. از نظر تئوریک می‌توان با چنین دانه‌بندی‌هایی آجر پخت.

ترسیم پراکندگی اندازه‌های مارن بر روی نمودار مثلثی شکل (۷) نشان می‌دهد اکثر نمونه‌های مارن دانه‌هایی کوچکتر از ۷۵ میکرون (در اندازه سیلت و رس) دارند. دو نمونه هم بخش قابل توجهی دانه‌هایی بین ۷۵ و ۱۵۰ میکرون دارند دو نمونه هم بخش قابل توجهی دانه‌هایی بین ۷۵ و ۱۵۰ میکرون دارند.



شکل ۷: نمودار پراکندگی اندازه‌های ذرات نمونه‌های مارن

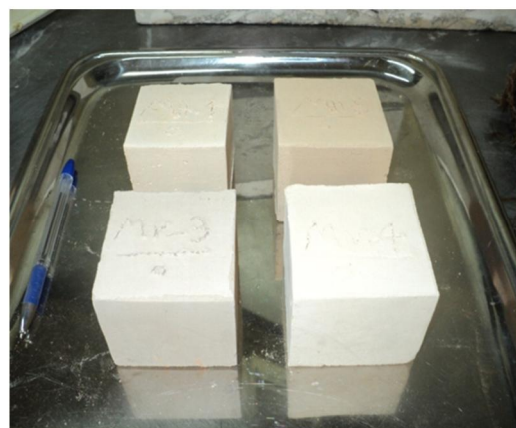
۴-۳ ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آجر

کیفیت محصولات سینتر شده ارتباط اساسی با جذب آب دارد و همچنین تابعی از مقاومت فشاری و چگالی کل محصولات سینتر شده است [۱۳]. بدین جهت کیفیت مکانیکی محصولات سینتر شده توسط آزمایشات مقاومت فشاری، چگالی کل و میزان جذب آب تخمین زده می‌شوند [۱۴]. عامل اصلی رنگ در آجرهای رسی اکسید آهن است. رنگ‌های قرمز یا قرمز قهوه‌ای معمولاً به علت دانه‌های ریز و پراکنده هماتیت و دیگر کانی‌های آهن (گوتیت، سیدریت، پیریت و غیره) تحت شرایط اکسیداسیون پخت به دست می‌آید [۱۵]. از دیگر عوامل مؤثر بر رنگ محصول کلسیت است. رس‌های غنی از کربنات با مقدار CaO بیش از ۷٪ در موقع پخت به رنگ زرد کمرنگ، زرد یا زرد متمایل به قهوه‌ای در می‌آیند. مقادیر بیشتر کربنات‌ها رنگ رس‌هایی که پس از پخت قرمز می‌شوند، سفید یا روشن می‌کنند. فرآیندهایی که باعث این تغییر رنگ می‌گردند هنوز به درستی شناخته نشده است [۱۶] اما احتمالاً ناشی از ورود مقداری از آهن به درون کربنات‌های کمپلکسی مانند انکریت به فرمول $CaMgFe(CO_3)$ است که رنگ تند هماتیت را ندارد [۱۷]. به دلیل مقدار CaO بالا (تقریباً بالای ۲۰ درصد) رنگ نمونه آجرهای ساخته شده، روشن و یا زرد متمایل به قهوه‌ای است (شکل ۸-الف). در نمونه‌های مورد بررسی، بعد از مرحله پخت در کوره، در یکی از نمونه‌های آجر، (MH-3) هسته سیاه مشاهده شد (شکل ۸-ب). رس‌ها همیشه شامل مواد آلی از منشأ و انواع مختلف هستند. در طول فرآیند پخت بدنه‌های سرامیکی، مواد آلی موجود در رس‌ها می‌توانند باعث تشکیل یک ناحیه مرکزی در بدنه سرامیکی با

رنگ متفاوت باشند که به هسته سیاه معروف است. این پدیده به علت تجزیه حرارتی مواد آلی و واکنش‌های اکسیداسیون و احیا مواد معدنی است [۱۸]. سوخت مواد آلی بین ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد و اگر مقدار اکسیژن برای ایجاد واکنش کامل کافی باشد به طور کامل تخریب می‌شوند. اساساً هنگامی که مقدار مواد آلی بیشتر از مقدار معین و یا نفوذپذیری بدنه سرامیکی پایین باشد، به علت کمبود اکسیژن، کامل نمی‌سوزد و کربن در مرکز بدنه تا دماهای بالاتر باقی می‌ماند. اندازه هسته سیاه به عوامل مختلفی از قبیل دما و چرخه پخت، تخلخل بدنه سرامیکی و اتمسفر کوره بستگی دارد [۱۹، ۲۰]. برخی ترکیبات نیز در تشکیل هسته سیاه مؤثر هستند. در دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس کلسیت تجزیه شده و دی اکسید کربن آزاد می‌کند که در تغییر اتمسفر اکسیدکننده درون آجر و کمک به ایجاد اتمسفر احیا کننده نقش دارد و موجب تشکیل هسته سیاه می‌شود. مقدار زیاد تولید گاز (SO_3) در دمای خاصی و در مرحله‌ای که سطح بیرونی آجر شیشه‌ای شده باشد، باعث می‌شود محیطی احیاکننده بوجود آید و هسته مرکزی آجر سیاه می‌شود [۲۱]. همچنین بالا بودن اکسیدهای قلیایی به تشکیل هسته احیایی کمک می‌نماید [۱۶]. در مورد نمونه MH-3 به نظر می‌رسد که دلیل تشکیل هسته سیاه، حضور مقداری مواد آلی در مارن‌ها بوده است. همچنین وجود اکسیدهای قلیایی و کربنات کلسیم زیاد در مارن‌ها، در ایجاد محیط احیا کننده در آجر و نهایتاً تشکیل هسته سیاه مؤثر بوده‌اند.



(ب)



(الف)

شکل ۸: (الف) چند نمونه از آجرهای مارنی پخته شده به رنگ روشن (ب) هسته سیاه تشکیل شده در مرکز آجر مارنی نمونه MH-3

انقباض و ویژگی مهم اجسام سرامیکی است. قطعات سرامیکی در مراحل مختلف فرآیند ساخت، انقباض را متحمل می‌گردند. مقدار و میزان انقباض در طی خشک شدن بستگی به ترکیب، وجود یا فقدان ناخالصی‌ها و مقدار آب تشکیل دهنده ساختار، دارد در مرحله پخت مواد متحمل انقباض مجدد می‌شوند [۲۲]، [۲۳]. مقدار انقباض خشک بین ۰ و ۰/۵ درصد برای ممانعت از ایجاد شکاف‌های ریز در اطراف دانه‌های شن لازم است [۸، ۲۴]. ترک‌های کوچکی ممکن است در طول مرحله خشک شدن ایجاد شوند که باعث شکسته شدن آجر در طول مرحله پخت می‌شود. همچنانکه خشک شدن انقباض را افزایش می‌دهد باعث افزایش فشار می‌شود و بدنه رسی بیشتر مستعد شکاف برداشتن می‌گردد [۲۵].

افزایش دمای پخت، انقباض را افزایش می‌دهد. افزایش در این پارامتر به طور تدریجی صورت می‌گیرد. زمانی که فاز مایع تشکیل می‌شود انقباض بیشتری رخ می‌دهد. گسترش فاز مایع بالای 900°C منجر به شیشه‌ای شدن نمونه‌های رسی پخته شده می‌شود. محدوده شیشه‌ای شدن دمای بین شروع تشکیل فاز مایع (دما در زمانی که سرعت انقباض به علت شروع تشکیل فاز مایع سریعتر می‌شود) و ایجاد مایع کافی برای شیشه‌ای شدن بدنه رسی پخته بدون از بین رفتن شکل آن است [۲۶]. جمع‌شدگی‌های اندازه‌گیری شده در مراحل خشک شدن و پخت نمونه آجرها در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳: نتایج آزمایشات فیزیکی و مکانیکی نمونه آجرهای مارنی

نمونه‌ها	چگالی کل g/cm^3	جذب آب $\text{wt}\%$	مقاومت فشاری kg/cm^2	انقباض خشک %	انقباض پخت %	انقباض کل %
MH-1	۱/۵۸	۲۵/۱۷	۱۰۶/۶	۸/۶	۱/۶۵	۱۰/۱۱
MH-2	۱/۷	۱۸/۰۲	۲۵/۳۶	۲/۴۸	-	۲/۴۸
MH-3	۱/۷۳	۱۷/۹۶	۴۴/۶۶	۷/۹۱	-	۷/۹۱
MH-4	-	-	-	-	-	-
MH-5	۱/۱۹	۵۰/۰۵	۵۴/۵۲	۳/۳۱	-	۳/۳۱
MH-6	۱/۷	۲۰/۳۱	۶۰/۱۲	۲/۸۴	-	۲/۸۴
MH-7	۱/۷۳	۱۷/۷۴	۱۰۱/۵۷	۶/۱	-	۶/۱
MH-8	۱/۶۷	۱۹/۲۹	۱۶۴/۴۱	۱۱/۷	-	۱۱/۷
MV-1	-	-	-	-	-	-
MV-2	-	-	-	-	-	-
MV-3	۱/۵۵	۱۸/۰۷	۱۱۲/۱۷	۴/۳۴	-	۴/۳۴
MV-4	۱/۲۴	۳۸/۸	۵۶/۱۲	۵/۷۱	-	۵/۷۱

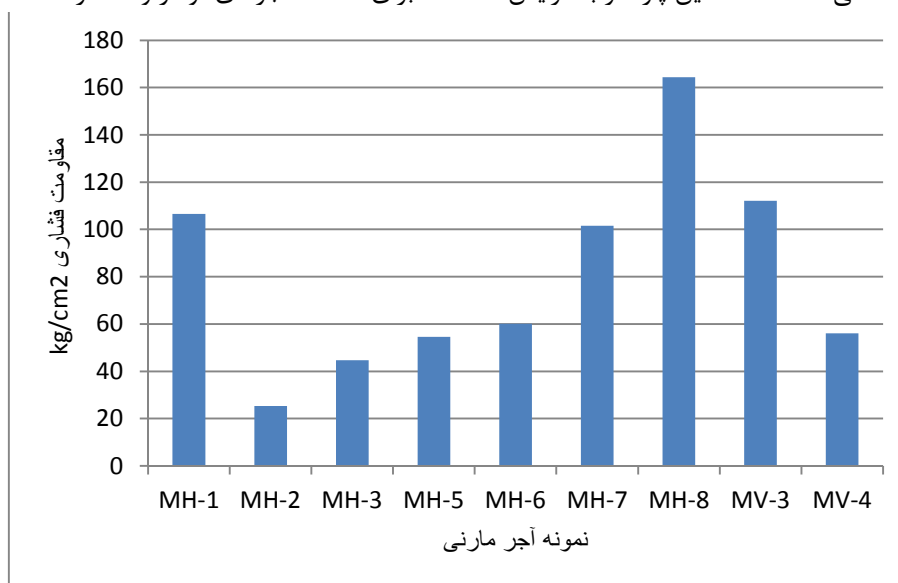
همه نمونه‌های آجر به غیر از نمونه MH-1 بعد از فرآیند پخت منبسط شده‌اند. علت انبساط بعد از پخت نمونه‌ها را می‌توان به مقدار زیاد کربنات کلسیم و منیزیم ربط داد. زیرا کلسیت و دولومیت جمع‌شدگی ناشی از پخت را کاهش می‌دهند. به طور کلی کربنات‌ها منجر به کاهش جمع‌شدگی و رفتار غیریکنواختی (آنیزوتروپی) می‌شوند [۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰] چنانچه مقدار کربنات کلسیم کم، در حد ۱۰ درصد باشد، کلسیت باعث افزایش مقاومت فشاری آجرهای پخته شده می‌شود. در مقادیر بیشتر مقاومت فشاری کاهش می‌یابد [۲].

علت متلاشی شدن نمونه‌های MV-1 و MV-2 به دلیل آهک زیاد، و احتمالاً در اثر جذب رطوبت تشخیص داده شد. ترک برداشتن نمونه MH-4 به علت داشتن ماسه کوارتزی زیاد نسبت به بقیه نمونه‌ها بوده زیرا ماسه باعث کاهش چسبندگی (پلاستیسیته) شده و به عنوان ماده بازکننده عمل می‌کند. SiO_2 بیشتر از بقیه نمونه‌ها، نتایج XRF و همچنین مقدار کم درصد عبوری از الک ۲۰۰ نمونه مذکور نیز این موضوع را تایید می‌کند.

جذب آب یک فاکتور کلیدی مؤثر در استحکام و ماندگاری آجرهاست و اندازه‌گیری غیرمستقیم تخلخل محسوب می‌شود. جذب آب کمتر، دوام زیادتر بدنه سرامیکی و مقاومت در برابر

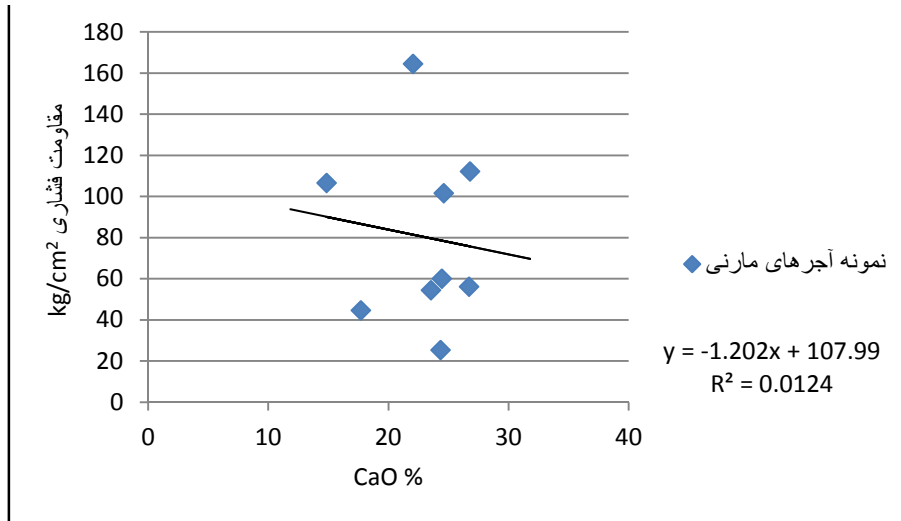
دمای پخت افزایش می‌یابد [36]. در جدول (۳) نتایج آزمایش مقاومت فشاری، و شکل (۹)، نمودار ستونی مقاومت فشاری نمونه‌های آجر مارنی ساخته شده از مارن‌های نمونه‌برداری شده از منطقه مورد مطالعه، نشان داده شده است. مطابق استاندارد شماره ۷ ایران، حداقل مجاز مقاومت فشاری برای آجر توکار برابر ۸۰ و غیر برابر ۴۰ و آجر نما ۱۲۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، تنها نمونه MH-2 به لحاظ مقاومت فشاری برای ساخت هیچ‌گونه آجر مناسب نیست. نمونه آجرهای MH-3، MH-5، MH-6 و MV-4 که مقاومت فشاری بیشتر از ۴۰ و کمتر از ۸۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع دارند، برای تولید آجر توکار غیر برابر مناسبند. نمونه‌های MH-1، MH-7، MH-3 و MV-3 که مقاومت فشاری آنها بیشتر از ۸۰ و کمتر از ۱۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد، برای تولید آجر توکار برابر و غیر برابر مناسب هستند. نمونه آجر MH-8 با داشتن مقاومت فشاری ۱۶۴/۴۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای ساخت آجرهای توکار و نما در حد استاندارد است.

شرایط آب و هوایی را باعث می‌شود [31]. جذب آب بالای یک نمونه احتمالاً به علت تورم بعضی از کانی‌های رس است [32]. مقدار جذب و تخلخل با دمای پخت ارتباط معکوس دارند به دلیل این که پی‌آمد آن تشکیل فاز شیشه‌ای است [33]. فاز شیشه‌ای در دمای زیاد جریان می‌یابد و منافذ کوچکتر را می‌بندد به همین دلیل تخلخل را کاهش داده در نتیجه جذب آب نیز کاهش می‌یابد [34]. واکنش‌های تجزیه کربنات نیز تخلخل ایجاد می‌کنند بنابراین معمولاً مقدار جذب آب نمونه‌های با کربنات بیشتر زیادتر از بقیه است [33,35]. در مورد جذب آب نمونه آجرهای مارنی مورد آزمایش، نمونه‌های MH-1، MV-4 و MH-5 بنا بر استاندارد شماره ۷ ایران جذب آب بالایی را نشان می‌دهند و برای ساخت آجر نما و مهندسی مناسب نیستند. ولی سایر نمونه‌های آجر به لحاظ جذب آب در حد استاندارد تولید آجر نما می‌باشند. مقاومت فشاری مواد سرامیکی مهم‌ترین شاخص کیفیت مهندسی برای مواد ساختمانی است [31]. این پارامتر با افزایش



شکل ۹: نمودار ستونی مقاومت فشاری آجرهای مارنی آزمایش شده

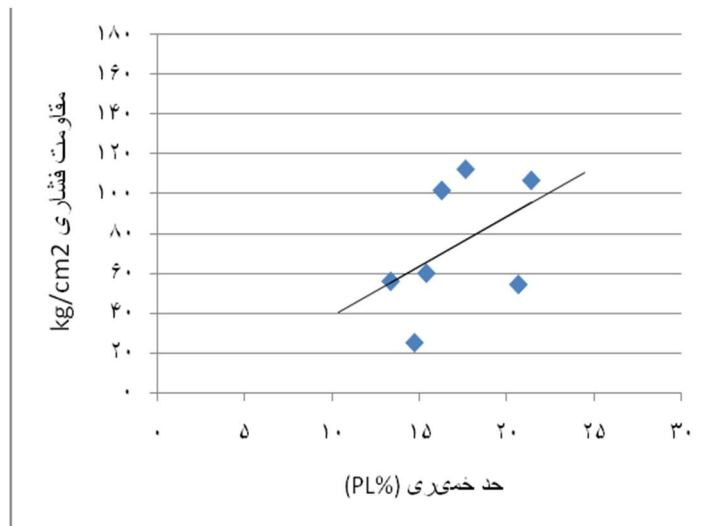
به دلیل اهمیت پارامترهایی از قبیل اکسید کلسیم و پلاستیسیته، ارتباط آنها با مقاومت فشاری در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۰: تغییرات مقاومت فشاری آجرهای مارنی نسبت به درصد وزنی اکسید کلسیم در مارن

فشاری تحت تأثیر عوامل گوناگون و پیچیده‌ای از جمله کانی-های اصلی تشکیل دهنده، کانی‌های فرعی، ناخالصی و مواد مضر و به طور کلی ترکیب شیمیایی خاک آجرپزی، دانه‌بندی خاک، شرایط اکسیداسیون و احیاء در کوره و غیره قرار دارد [۱۶].

چنانچه در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، وابستگی نزدیکی بین مقاومت فشاری آجر و مقدار اکسید کلسیم در نمونه آجرهای مارنی مورد آزمایش وجود ندارد. دلیل آن می‌تواند مربوط به تأثیر عوامل متعدد در مقاومت فشاری آجر باشد. مقاومت



شکل ۱۱: نمودار تغییرات مقاومت فشاری آجرهای مارنی نسبت به درصد حد خمیری مارن

نقش می‌کنند، که چنانچه در نمودار دیده می‌شود باعث پراکندگی داده‌ها شده‌اند. شکل (۱۲-الف) آجرهای شکسته بعد از آزمون و شکل (۱۲-ب) دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.

طبق نمودار شکل (۱۱) با افزایش حد خمیری، مقدار رس افزایش می‌یابد. افزایش رس در مجموع سبب چسبندگی بیشتر و در نتیجه بیشتر شدن مقاومت فشاری می‌شود [۲]. همانطور که قبلاً اشاره شد عوامل متعددی در مقاومت فشاری ایفای



(ب)

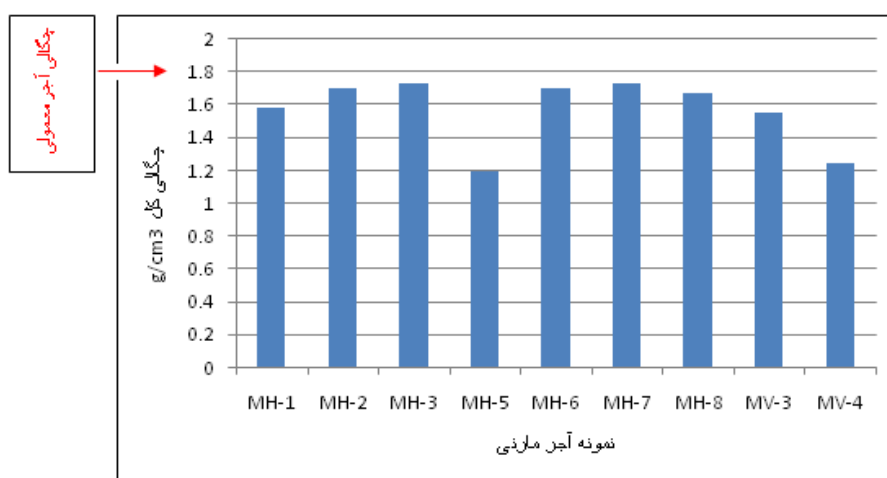


(الف)

شکل ۱۲: (الف) نمونه آجرهای شکسته بعد از آزمون مقاومت فشاری و (ب) دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری

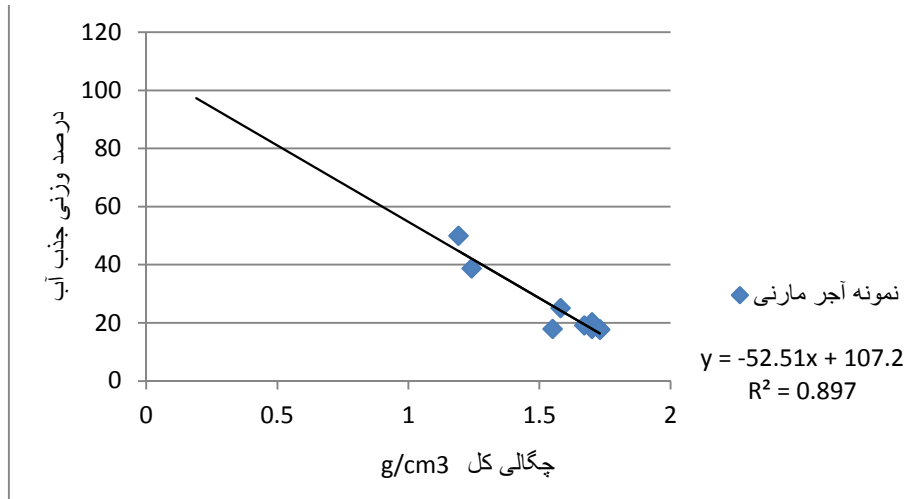
معمولی است. علت آن است که به دلیل تجزیه کربنات کلسیم که در مارن‌ها زیاد است، گاز دی‌اکسید کربن متصاعد شده از آجر خارج می‌شود و وزن آجر کاهش می‌یابد. به طور کلی انتخاب مواد خام و واکنش مواد بر چگالی کل می‌تواند تأثیر گذار باشد [۱].

بر اساس نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری چگالی کل آجرها (جدول ۳) چنانچه نمودار ستونی نیز در شکل (۱۳) نشان می‌دهد تمام نمونه‌های آجر، از چگالی آجر معمولی که $1/84$ گرم بر سانتی‌متر مکعب است، متجاوز نیستند و این نشان دهنده سبک بودن آجرهای مارنی ساخته شده، نسبت به آجر



شکل ۱۳: نمودار ستونی چگالی کل نمونه‌های آجر مارنی آزمایش شده

بین چگالی کل و جذب آب رابطه معکوس وجود دارد (شکل ۱۴). با افزایش درصد جذب آب نمونه‌ها چگالی کل آنها کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴: نمودار تغییرات درصد وزنی آب نسبت به چگالی کل

۴- نتیجه‌گیری

کلسیت و دولومیت) سبب انبساط بعد از پخت نمونه‌ها و باعث متلاشی شدن دو نمونه گردیده است. جذب آب نمونه آجرهای مارنی برای ساخت آجر نما و توکار مطلوب است. از نظر مقاومت فشاری، برای تولید آجر توکار غیربرابر مناسب هستند. تمام نمونه‌های آجر تولیدی چگالی کمتر از آجر معمولی دارند و این نشان دهنده سبک بودن آجرهای مارنی ساخته شده است. به طور کلی می‌توان گفت منطقه مورد مطالعه به لحاظ کاربرد آن در صنعت آجر سبک در صورت بهره‌گیری از تمهیدات لازم جهت بهبود کیفیت و تغییر فرمولاسیون مواد اولیه قابل استفاده می‌باشد.

ویژگی مارن‌های سازند میشان در ۱۰۰ کیلومتری اهواز توسط آنالیزهای شیمیایی، کانی‌شناسی تعیین شده‌اند. کانی‌های اصلی مارن‌های میشان عمدتاً شامل کوارتز، کلسیت و دولومیت است. پراکندگی اندازه دانه‌های مارن منطقه به طور میانگین ۷۱ درصد در اندازه سیلت و رس (کوچکتر از ۷۵ میکرون) است. میزان ذرات بزرگتر از ۱۵۰ میکرون نیز در حد قابل قبولی قرار دارد. بنابراین دانه‌بندی مناسبی برای ساخت آجر دارد. به لحاظ پلاستیسیته مارن‌ها در محدوده ساخت آجر هستند. رنگ آجرهای تولید شده به دلیل مقدار بالای CaO روشن و یا زرد متمایل به قهوه‌ای است. انقباض خشک نمونه‌ها در حد متوسط بوده (۱۱/۷٪ - ۲/۴۸) و میزان بالای کربنات کلسیم و منیزیم

منابع

- [۵] Erker, A., 2002. The thermal conductivity of the brick ceramic body (part 2). *Ziegelindustrie Int.* 55 (11), 32-37.
- [۶] Gualtieri, M. L., Gultieri, A.F., Gagliardi, S., Ruffini, P., Ferrari, R., Hanuskova, M., 2010. Thermal conductivity of fired clays: Effects of mineralogical and physical properties of the raw materials. *Applied Clay Science.* 49, 269- 275.
- [۷] Kreimeyer, R., 1987. Some notes on the firing colour of clay bricks. *Applied Clay Science.* 2, 176-183.
- [۸] Celik, H., 2010. Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry. *Applied Clay Science.* 50, 245- 254.
- [۹] Marsigli, M., Dondi, M., 1997. Plasticità delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggatura. *L'Industria dei Laterizi* 46, 214- 222.
- [۱] Mueller, A., Sokolova, S.N., Vereshagin, V.I., 2008. Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials, *Constr. Build. Mater.* 22,703-712.
- [۲] Veisheh, S., Khodabandeh N., 2004. Lightweight Brick with Limestone Powder. In Farsi, *Building and Housing Research Center, Publication.* No. 403, 15-31.
- [۳] Tsiambaos, G., 1991. Correlation of mineralogy and index properties with residual strength of Iraklion marls. *Engineering Geology.* 30, 357- 369.
- [۴] Strazzera, B., Dondi, M., Marsigli, M., 1997. Composition and ceramic properties of Tertiary clays from southern Sardinia (Italy). *Applied Clay Science.* 12, 247-266.

- [۲۶] Mandour, M.A., Taha, A.S., Serry, M.A., 1989. Ceramic properties of some Egyptian clayey deposits as related to their mineralogical and chemical composition. *Applied Clay Science*. 4, 83-94.
- [۲۷] Tite, M.S., Maniatis, Y., 1975. Examination of ancient pottery using the scanning electron microscope, *Nature*. 257, 122-123.
- [۲۸] Peters, T., Iberg, R., 1978. Mineral changes during firing of calcium-rich brick clays, *Ceramic Bulletin*. 57, 503-509.
- [۲۹] Cultrone, G., Sebastian, E., Cazalla, O., De la Torre López, M.J., 1998. Physical, mineralogical and textural features of ceramic clays from Granada Province (Spain), in: C.S.F. Gomes (Ed.), *Proceedings of the Second Mediterranean Clay Meeting*, Aveiro, Portugal, 16-19 September. pp. 298-303.
- [۳۰] Elert, K., Cultrone, G., Navaro, C. R., Sebastian Pardo, E., 2003. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings influence of composition and microstructure. *Journal of Cultural Heritage*. 4, 91-99.
- [۳۱] Eliche- Quesada, D., Martinez- Garcia, C., Martinez- Cartas, M.L., Cotes- Palomino, M.T., Perez- Villarejo, N., Cruz- Perez, N., Corpas- Iglesias, F.A., 2011. The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. *Applied Clay Science*. 52, 270-276.
- [۳۲] Oti, J.E., Kinuthia, J. Bai., 2009. Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Engineering Geology*. 107, 130-139.
- [۳۳] Bauluz, B., Mayayo, M., Fernandez- Nieto, C., Cultrone, G., Gonzalez 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 Science*. 24, 121-126.
- [۳۴] Liao, Y. C., Huang, C.Y., 2011. Effects of heat treatment on the physical properties of lightweight aggregate from water reservoir sediment. *Ceramics International*. doi:10.1016/j.ceramint. 4,122.
- [۳۵] 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.
- [۳۶] Yavaz, H., Demirdag, S., Caran, S., 2010. Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 47, 94-103.
- [۱۰] Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981. Kansas Geotechnical Survey, Current Research in Earth Science, Bulletin 244, part 3, The Relationship Between Geology and Landslide Hazards of Atchison, Kansas and Vicinity.
- [۱۱] Casagrande, A., 1948. Plasticity chart for the classification of cohesive soils. *Trans. Am Soc. Civ. Eng.* 113, 901.
- [۱۲] Mahmoudi, S., Srasra, E., Zargouni, F., 2008. The use of Tunisian Barremian clay in the traditional ceramic industry: optimization of ceramic properties. *Appl. Clay Sci.* 42, 125-129.
- [۱۳] Wang, K.S., Chiang, K.Y., Perng, J.K., 1998. The characteristics study on sintering of municipal solid waste incinerator ashes. *J. Hazard. Mater.* 59, 201-210.
- [۱۴] Wang, X., Jin, Y., Wang, Z., Nie, Y., Huang, Q., Wang, Q., 2009. Development of lightweight aggregate from dry sewage sludge and coal ash. *Waste Management*. 29, 1330-1335.
- [۱۵] Stepkowska, E.T., Jefferis, S.A., 1992. Influence of microstructure on firing colour of Clays. *Applied Clay Science*. 6, 319-347.
- [۱۶] Veisoh, S., 1994. Clay Bricks properties and production. In Farsi, Building and Housing Research Center, Publ. No. 206, 47-60.
- [۱۷] Mikulas, S., 2001. Elimination of the reduction core in the clay roofing tile body, Slovak Technical University, SK- Bratislava.
- [۱۸] Barba, A., Moreno, A., Negre, F., Basco, A., 1991. Oxidation of black cores in firing, *Tile and Brick Int.* 6, p. 17.
- [۱۹] Elias, X., 1980. The formation and consequences of black core in ceramic ware, *Interceram* 3, p. 380.
- [۲۰] Diz, H. M. M., Rand, B., Inwang, I. B., 1990. The effect of organic matter and electrolyte on the rheological behaviour of ball clays, *Br. Ceram Trans.* 89, p. 124.
- [۲۱] Prentice, J. E., 1990. *Geology of Construction Materials* by Chapman and Hall, 97-101.
- [۲۲] Lefond, S.J., 1972. *Industrial minerals and rocks*. 4th ed. Am. Inst. of Min. Metall and Petrol. Engineers. New York.
- [۲۳] Eze, E.O., Onabanjo, S.A., 1995. Heating effects on physical and strength characteristics of fireclay from the Nigerian Coal Measures Formation. *Applied Clay Science*. 9, 397-406.
- [۲۴] Baccour, H., Medhioub, M., Jamoussi, F., Mhiri, T., Daoud, A., 2008. Mineralogical evaluation and industrial applications of the Triassic clay deposits, Southern Tunisia. *Mater. Charact.* 59, 1613-1622.
- [۲۵] Demir, I., 2008. Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste Management*. 28, 622-627.