جمهوری اسلامی ایران
وزارت راه و شهرسازی

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

بسم الله الرحمن الرحیم

بررسی خواص حرارتی و مکانیکی عایق حرارتی فله‌ای سبک‌دانه رس منبسط و ارائه رهنمودهای کاربردی

دکتر سهراب ویسه
مهناز مظلومی

گزارش تحقیقاتی
شماره نشریه: گ-۷۱٤
چاپ اول: ۱۳۹۳

سرشناسه : ویسه، سهراب، ۱۳۳۹ -
عنوان و نام پدیدآور : بررسی خواص حرارتی و مکانیکی عایق حرارتی فله‌ای سبکدانه رس منبسط و ارائه رهنمودهای کاربردی/ سهراب ویسه، مهناز مظلومی: [به سفارش] شرکت لیکا، شرکت عمران پارس.
مشخصات نشر : تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری : ی. ۱۲۲ ص.: مصور، جدول، نمودار.
فروست : گزارش تحقیقاتی: شماره نشر گ-۷۱٤ .
شابک :۱-۱۲۷-۱۱۳-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی :فیپا
یادداشت : کتابنامه: ص ۹۹.
موضوع : عایق‌ها و عایق‌سازی حرارتی
موضوع : خاک رس
موضوع : مصالح ساختمانی
شناسه افزوده : مظلومی، مهناز. ۱۳۵۱-
شناسه افزوده : شرکت لیکا
شناسه افزوده : شرکت عمران پارس
شناسه افزوده : مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
رده‌بندی کنگره : ۱۳۹۳ ٤ ب ۹و/۱۷۱۵ TH
رده‌بندی دیویی : ۶۳۹/۸۳۲
شماره کتابشناسی ملی :۳۶۳۳۱۱۶

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

بررسی خواص حرارتی و مکانیکی عایق حرارتی فله‌ای سبک‌دانه رس منبسط و ارائه رهنمودهای کاربردی

دکتر سهراب ویسه، مهناز مظلومی

بخش پژوهشی: مصالح
شماره نشریه: گ-۷۱٤ چاپ اول: ۱۳۹۳
ناشر: **انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی**
شمارگان: **۲۵۰۰ نسخه**
بها: **۵۵۰۰ تومان**
لیتوگرافی، چاپ و صحافی: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
کلیه حقوق برای ناشر محفوظ است
نشانی: تهران - بزرگراه شهید شیخ فضل‌ا... نوری، روبروی فاز ۲ شهرک فرهنگیان، خیابان نارگل، خیابان شهید علی مروی، خیابان حکمت صندوق پستی: ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵
تلفن: ٦-۸۸۲۵۵۹٤۲ دورنگار: ۸۸۲۵۵۹٤۱
پست الکترونیک: president@bhrc.ac.ir صفحه الکترونیکی: http://www.bhrc.ac.ir

شابک: ۱-۱۲۷-۱۱۳-۶۰۰-۹۷۸ ISBN:978-600-113-127-1

پیشگفتار

عایق‌کاری حرارتی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی به دلیل کاهش هزینه‌ها و نیز حفظ محیط زیست بسیار با اهمیت است. در کشور ما بیش از نیمی از انرژی مصرف شده در ساختمان‌ها برای گرمایش وسرمایش به هدر می‌رود بنابراین عایق‌کاری حرارتی جدارهای ساختمان ضرورتی اجتناب ناپذیر است.

عایق کاری حرارتی نقش بسیار مهمی در گرم نگه داشتن ساختمان در فصل زمستان و خنک نگه داشتن آن در فصل تابستان دارد و به میزان چشمگیری مانع از اتلاف حرارتی ساختمان می‌شود. از دیگر مزایای عایق‌کاری می‌توان محافظت و آسایش حرارتی ساکنان، کاهش تغییرات و نوسانات دما، جلوگیری از میعان و یخبندان در جدار خارجی و کاهش آلودگی محیط‌زیست و کاستن از اتلاف منابع انرژی را نام برد.

یکی از وظایف مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، پژوهش و تحقیق در زمینه صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ساختمان است. در این گزارش نتایج به‌دست آمده از پروژه «بررسی خواص حرارتی و مکانیکی عایق حرارتی فله‌ای سبک‌دانه رس منبسط و ارائه رهنمودهای کاربردی» ارائه می‌شود. هدف آن است که بتوان قدم‌های موثری در آگاه‌سازی عمومی و گسترش صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ساختمان‌ها برداشت.

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

تقدیر و تشکر

در چارچوب قرارداد همکاری پژوهشی بین مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی با شرکت‌های لیکا و عمران پارس (تولیدکنندگان سبک‌دانه رس منبسط) پروژه «بررسی خواص حرارتی و مکانیکی عایق حرارتی فله‌ای سبک‌دانه رس منبسط و ارائه رهنمودهای کاربردی» با حمایت مالی شرکت‌های یاد شده در این مرکز انجام شد. از آقایان دکتر علیرضا نمدمالیان و مهندس ماکان محمدی که در مراحل مختلف پروژه با راهنمایی‌های خود باعث غنای علمی و فنی گزارش این پروژه شده‌اند، سپاسگزاری می‌شود.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده ..... م

فصل اول: خواص و مشخصات سبک‌دانه رس منبسط ۱

۱-۱. مقدمه ۱

۱-۲. مواد اولیه سبک‌دانه رس منبسط ۲

۱-۳. خواص سبک‌دانه رس منبسط ۳

۱-۳-۱. سبکی ۳

۱-۳-۲.عایق حرارتی ۳

۱-۳-۳.عایق صوتی ۳

۱-۳-٤.مقاومت در برابر آتش ۳

۱-۳-٥. تجزیه‌ناپذیری ٤

۱-۳-٦. جذب آب ٤

۱-۳-۷.توزیع اندازه دانه‌ها ٥

۱-۳-۸.سطح ویژه ۷

۱-۳-۹. ضریب هدایت حرارتی ۷

۱-۳-۱۰. زاویه اصطکاک داخلی و مدول ارتجاعی ۸

۱-۳-۱۱. چگالی در ارتباط با سطح آب زیرزمینی ۸

۱-۳-۱۲. خواص غیرموئینه ۹

۱-۳-۱۳. نفوذپذیری هوا ۱۰

۱-۳-۱٤. پرکننده سبک ۱۱
۱-۳-۱٤-۱. پایداری ۱۱
۱-۳-۱٤-۲. جلوگیری از نشست ۱۲
۱-۳-۱٤-۳. مقابله با بار ۱۲
۱-۳-۱٤-٤. بام سبز ۱۳
۱-٤. کاربرد لیکا ۱۵
۱-۵. اظهارنامه محصول ۱٦
۱-٦. تحقیقات اولیه در مورد خواص سبک‌دانه رس منبسط در کشور ترکیه ۱۷
۱-٦-۱. آماده‌سازی نمونه‌ها ۲۱
۱-٦-۲.آزمون‌های انجام شده بر روی سنگدانه تولید شده ۲۲
۱-۷. پیشرفت سبک‌دانه‌ها در کویت ۳۱
۱-۷-۱. مشخصات فیزیکی ۳۳
۱-۷-۲. حدود خمیری ۳۳
۱-۷-۳. خواص شیمیایی ۳٤
۱-۷-٤. خواص شیمیایی برای متورم شدن ۳۵
۱-۷-۵.تعیین ترکیب کانی‌شناسی ۳٦
۱-۷-٦. برنامه آزمایشگاهی ۳۷
۱-۷-۷.پخت ناگهانی ۳۸
۱-۷-۸. پخت همدمای آهسته ۳۹
۱-۷-۹.دمای پخت در مقابل وزن مخصوص ٤۱
۱-۷-۱۰. افزودن خاک اره به خاک رس بهرا ٤۲
۱-۷-۱۱. افزودن روغن ضایعاتی به خاک رس بهرا ٤۳
۱-۷-۱۲. ساز و کار تورم ٤۳
۱-۷-۱۳. جمع‌بندی بررسی‌ها ٤٤

فصل دوم: استانداردهای سبک‌دانه رس منبسط ٤٥
٢-١. استاندارد ملی ایران شماره ١-١١٠٥٩ ..... ٤٥
٢-٢ . استاندارد ملی ایران شماره ١- ١٤٨٧٥ سال ١٣٩١ ..... ٤٧
٢-٣ . استاندارد ملی ایران شماره ١٠-١٤٨٧٤ ..... ٥٠

فصل سوم: تولید سبک‌دانه رس منبسط در ایران ٥٥

فصل چهارم: نتایج آزمون‌های انجام شده بر روی سبک‌دانه رس منبسط ٦٣
٤-١. آزمون تعیین مقاومت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی ٦٣
٤-٢. آزمون اثر رطوبت بر ضریب هدایت حرارتی ٦٦
٤-٣. آزمون تعیین چگالی انبوهی فله‌ای ٦٧
٤-٤. آزمون تعیین توزیع اندازه دانه‌ها ٦٩
٤-٥. آزمون تعیین مقاومت در برابر خردشدگی ٧١
٤-٦. آزمون تعیین ارتفاع مکش آب ٧٣
٤-٧. آزمون تعیین مقدار جذب آب ٧٥
٤-٨. آنالیز شیمیایی ماده اولیه تولید سبک‌دانه رس منبسط ٧٧

فصل پنجم: ارائه رهنمودهای کاربردی و تحلیل فنی - اقتصادی ٨١
٥-١. توصیه‌های اجرایی در عایق‌کاری با سبک‌دانه رس منبسط شده ٨١
٥-١-١. فرآورده عایق ٨١
٥-١-٢. مناسب بودن ساختمان برای پذیرش فرآورده‌های عایق قبل از نصب ٨٢
٥-١-٣ .کف‌سازی و عایق‌کاری با سبک‌دانه رس منبسط ٨٤
٥-١-٣-١. عایق‌کاری کف صلب ٨٥
٥-١-٣-٢. روش کف‌سازی شناور ٨٦

۵-۱-۳-٤. روش بتن سبک ۸۸
۵-۱-۳-۵. عایق‌کاری بام با سبک‌دانه رس منبسط ۸۹
۵-۱-٤. روش‌های اجرای عایق فله‌ای سبک‌دانه رس منبسط ۹۰
۵-۲. تحلیل فنی - اقتصادی استفاده از فرآورده سبک‌دانه رس منبسط ۹۱

فصل ششم: نتیجه‌گیری ۹۵
مراجع ۹۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱. نمودار جذب آب ۵
شکل ۱-۲. منحنی‌های توزیع اندازه..... ۶
شکل ۱-۳. دستگاه اندازه‌گیری جذب آب لیکا..... ۹
شکل ۱-٤. نمودار نفوذپذیری ۱۱
شکل ۱-۵. استفاده از پرکننده لیکا در راه ۱۲
شکل ۱-٦. استفاده از پرکننده لیکا در زمین شیب‌دار ۱۳
شکل ۱-۷. استفاده از پرکننده لیکا در بام سبز ۱۳
شکل ۱-۸. بام سبز ۱٤
شکل ۱-۹. استفاده از پرکننده لیکا در راه‌سازی..... ۱۵
شکل ۱-۱۰. استفاده از پرکننده لیکا در پی‌سازی ساختمان..... ۱۵
شکل ۱-۱۱. استفاده از پرکننده لیکا در بنادر ۱٦
شکل ۱-۱۲. استفاده از پرکننده لیکا در راه آهن ۱٦
شکل ۱-۱۳. الگوی XRD ضایعات فلوتاسیون آلبیت..... ۲۱
شکل ۱-۱٤. انواع دانه‌های لیکای تولید شده..... ۲۲
شکل ۱-۱۵. مقادیر جذب آب دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس نوع A .....
و ضایعات فلوتاسیون..... ۲٤
شکل ۱-۱٦. مقادیر جذب آب دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس نوع B .....
و ضایعات فلوتاسیون..... ۲۵
شکل ۱-۱۷. مقادیر جذب آب دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس نوع B .....

و زغال سنگ ۲۵
شکل ۱-۱۸ مقادیر وزن مخصوص دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس A .....
و ضایعات فلوتاسیون ۲۷
شکل ۱-۱۹ مقادیر وزن مخصوص دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس B .....
و ضایعات فلوتاسیون ۲۷
شکل ۱-۲۰. مقادیر وزن مخصوص دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس B .....
و زغال سنگ ۲۷
شکل ۱-۲۱. ساختار منافذ سنگدانه ۲۹
شکل ۱-۲۲. بافت‌های سطحی سنگدانه‌ها ۲۹
شکل ۱-۲۳. توزیع اندازه دانه خاک رس بهرا ۳۳
شکل ۱-۲٤. دیاگرام ترکیب رایلی که وضعیت خاک بهرا را نشان می‌دهد ۳۵
شکل ۱-۲۵. الگوی دیفرکسیون پرتو ایکس بخش درشت دانه خاک بهرا ۳۷
شکل ۱-۲٦. منحنی DTA خاک رس بهرا ۳۷
شکل ۱-۲۷. سنگدانه‌های ساخته شده از مخلوط‌های مختلف خاک رس ٤۰
شکل ۱-۲۸. اثر دمای پخت بر وزن مخصوص خاک رس ٤۲
شکل ۱-۲۹. سنگدانه‌های تولید شده با افزودنی روغن ضایعاتی ٤۳
شکل۳-۱. افزودن آب و مازوت به نمونه آزمایشگاهی خاک ٥٦
شکل۳-۲. مرحله ورز دادن نمونه ٥٦
شکل۳-۳. گرانول‌های آزمایشگاهی ٥٦
شکل ۳-٤. پخت گرانول‌های آزمایشگاهی در کوره ٥٦
شکل ۳-۵. دپوی ماده اولیه ۵۷
شکل۳-٦. مخلوط‌کن- کلوخ‌شکنی و آسیاب اولیه ۵۷
شکل۳-۷. آسیاب غلتکی- افزودن آب به خاک ۵۷
شکل۳-۸. افزودن مازوت به خاک مرطوب ۵۸

شکل۳-۹. آسیاب والس-ورز دادن گل.....۵۸
شکل۳-۱۰. خروج ماکارونی از اکسترودر.....۵۸
شکل۳-۱۱. سرند گرانول‌ها بعد از مرحله خشک شدن.....۵۹
شکل۳-۱۲. کوره.....۵۹
شکل۳-۱۳. دانه‌بندی محصول نهایی.....۶۰
شکل ۳-۱٤. دپو سبک‌دانه تولید شده.....۶۰
شکل۳-۱۵. مونیتورهای اتاق کنترل.....۶۰
شکل۳-۱٦. فلوشیت تولید.....۶۰
شکل٤-۱. تعیین ضریب هدایت حرارتی.....٦٤
شکل٤-۲. نمودار ضریب هدایت حرارتی سبک‌دانه‌های رس منبسط.....٦٥
شکل ٤-۳. نمودار مقاومت حرارتی سبک‌دانه‌های رس منبسط.....٦٥
شکل٤-٤ . نمودار ضریب هدایت حرارتی سبک‌دانه رس منبسط در برابر رطوبت.....٦٦
شکل٤-٥. اندازه‌گیری چگالی انبوهی سبک‌دانه.....٦٧
شکل٤-٦ . نمودار چگالی انبوهی سبک‌دانه رس منبسط.....٦٨
شکل٤- ۷. رابطه مقاومت حرارتی و چگالی انبوهی سبک‌دانه رس منبسط.....٦٨
شکل ٤-۸. دستگاه شیکر و دانه‌بندی سبک‌دانه‌ها.....٦٩
شکل ٤-۹. نمودار دانه‌بندی سبک‌دانه‌های رس منبسط در چهار گروه – نمونه الف.....۷۰
شکل ٤-۱۰. نمودار دانه‌بندی سبک‌دانه‌های رس منبسط در چهار گروه – نمونه ب.....۷۱
شکل ٤-۱۱. دستگاه تعیین مقاومت در برابر خردشدگی سبک‌دانه.....۷۲
شکل ٤-۱۲. نمودار مقاومت خردشدگی اندازه دانه‌های مختلف سبک‌دانه رس منبسط..... ۷۲
شکل ٤-۱۳. نمودار رابطه مقاومت خردشدگی و چگالی انبوهی سبک‌دانه رس منبسط ۷۳
شکل ٤-۱٤. تعیین ارتفاع مکش آب.....٧٤
شکل ٤-۱۵. نمودار نتایج آزمون تعیین ارتفاع مکش سبک‌دانه رس منبسط نمونه الف...٧٤
شکل ٤-۱٦. نمودار نتایج آزمون تعیین ارتفاع مکش سبک‌دانه رس منبسط نمونه ب..... ۷۵

شکل ٤-١٧. تعیین مقدار جذب آب سبک‌دانه رس منبسط ٧٦
شکل ٤-١٨. نمودار مقایسه جذب آب سبک‌دانه رس منبسط ٧٧
شکل ٤-١٩. نمودار آنالیز شیمیایی..... ٧٩
شکل ٥-٢ . تسطیح کف با دانه‌های لیکا..... ٨٦
شکل ٥-١. پر کردن سطح با کیسه‌های لیکا..... ٨٦
شکل ٥-٤. برشی از لایه‌های عایق‌کاری با سبک‌دانه ٨٦
شکل ٥- ٣. پوشش با عایق رطوبتی ٨٦
شکل ٥-٥. پخش کردن سبک‌دانه در کف ٨٧
شکل ٥-٦. تسطیح سبک‌دانه در کف..... ٨٧
شکل ٥-٧. استفاده از یک لایه مش پلاستیکی..... ٨٧
شکل ٥-٨. اجرای ملات..... ٨٧
شکل ٥-٩. کاشی‌کاری وعایق سبک‌دانه ای همزمان..... ٨٨
شکل ٥-١٠ . کف‌سازی خشکه..... ٨٨
شکل ٥-١١. عایق‌کاری بام شیب‌دار با سبک‌دانه ٩٠
شکل ٥-١٢. استفاده از شبکه فلزی بر روی سبک‌دانه در بام..... ٩٠
شکل ٥-١٣. پوشش بام با سبک‌دانه رس منبسط ٩٠
شکل ٥-١٤. دمیدن سبک‌دانه رس منبسط اتاقک زیر شیروانی و کف صلب..... ٩٠
شکل ٥-١٥.دمیدن سبک‌دانه رس منبسط داخل دیوار دوجداره..... ٩١
شکل ٥-١٦. عایق‌کاری به روش دستی در کف صلب ٩١

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱. مقادیر سطح ویژه لیکا و لیکا- سبک ۷
جدول ۱-۲. مقادیر ضریب هدایت حرارتی لیکا و لیکا- سبک ۷
جدول ۱-۳. مقادیر مدول ارتجاعی و زاویه اصطکاک در کف ۸
جدول ۱-٤. مقادیر چگالی لیکا و لیکا- سبک ۹
جدول ۱-۵. مقدار رطوبت به درصد وزنی ۱۰
جدول ۱-٦. کاربردهای اصلی رس منبسط ۱٤
جدول ۱-۷. چگالی انبوهی و چگالی دانه‌ها در حالت خشک و مقاومت خردشدگی ۱٦
جدول ۱-۸. مقادیر کلرید و سولفات دانه‌های لیکا و لیکا- سبک ۱۷
جدول ۱-۹. ترکیب شیمیایی مواد خام ۲۰
جدول ۱-۱۰. ترکیب شیمیایی ضایعات فلوتاسیون آلبیت ۲۰
جدول ۱-۱۱. ترکیب و دمای پخت سنگدانه ۲۲
جدول ۱-۱۲. حدود خمیری نمونه‌های خاک رس بهرا ۳٤
جدول ۱-۱۳. آنالیز شیمیایی خاک رس بهرا ۳۵
جدول ۱-۱٤. ترکیب مخلوط‌های رس مورد استفاده در تولید سبک‌دانه‌های رس منبسط ۳۸
جدول ۱-۱۵. اثر دمای پخت بر وزن مخصوص ظاهری مخلوط‌های مختلف .....
خاک رس بهرا و سنگدانه لیکای تولید شده در مصر ٤۰
جدول ۱-۱٦. اثر دمای پخت بر جذب آب مخلوط‌های مختلف خاک رس بهرا ٤۰
جدول ٤-۱. نتایج آزمون تعیین مقاومت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی سبک‌دانه رس منبسط ٦٤
جدول ٤-۲. نتایج آزمون تعیین چگالی انبوهی سبک‌دانه رس منبسط ٦۷

جدول٤-٣. نتایج آزمون دانه‌بندی سبک‌دانه رس منبسط نمونه الف.....٦٩
جدول٤-٤. نتایج آزمون دانه‌بندی سبک‌دانه رس منبسط نمونه ب.....٧٠
جدول٤-٥. نتایج آزمون مقاومت در برابر خردشدگی سبک‌دانه رس منبسط.....٧٢
جدول ٤-٦. نتایج آزمون تعیین جذب آب سبک‌دانه رس منبسط ٧٦
جدول ٤-٧. نتایج آزمون تجزیه شیمیایی ماده اولیه سبک‌دانه رس منبسط ٧٩

چکیده

یکـــی از راه‌های مهم صرفه‌جویی در مصرف انرژی، اســـتفاده از عایق‌های حرارتی در ســـاختمان‌ها اســـت. این فرآورده‌ها در اجزای مختلف ســـاختمان (دیوارهای خارجی، بام و کف پایین‌ترین طبقه) به کار برده می‌شـــوند تا موجب کاهش مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش فضاهای داخلی ساختمان شوند. برای انتخاب عایق مناسب، آگاهی از خواص انواع عایق‌های حرارتی و شیوه کاربرد آنها ضرورت دارد. با توجه به خواص ویژه سبک‌دانه رس منبسط استفاده از این محصول در عایق‌کاری ساختمان مفید و مقرون به صرفه است. مزایای مهم سبک‌دانه رس منبسط شامل موارد زیر است:

وزن کم (به دلیل وجود فضاهای خالی داخل دانه‌ها)، قابلیت رســـانایی حرارتی ناچیز، مقاومت مکانیکی مناسب، میزان جذب آب کم دانه‌ها (در صورت وجود لایه روکش بر روی دانه‌ها)، خنثی بودن به لحاظ شـــیمیایی (که باعث خورندگی و پوســـیدگی نمی‌شود)، تحمل چرخه‌های متوالی یخبندان و عمر مفید زیاد. در این مرکز پروژه‌ای با عنوان «بررسی خواص حرارتی و مکانیکی عایق حرارتی فله‌ای سبک‌دانه رس منبسط و ارائه رهنمودهای کاربردی» انجام شـــد که نتایج آن در این گزارش ارائه می‌شـــود. در این پروژه مطالعات انجام شـــده در سایر کشورها بر روی خواص و تولید سبک‌دانه رس منبسط بررسی شد. دو استاندارد روش آزمون بر روی سبک‌دانه‌ها تدوین گردید.

در ادامه مراحل تولید این فرآورده‌ها مورد بررســـی قرار گرفت. همچنین بر روی کلیه محصولات داخل کشـــور آزمون‌های تعیین خواص انجام شـــد. در نهایت تاثیر اندازه دانه‌ها، چگالی و رطوبت دانه‌های رس منبسط در مقدار ضریب هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی مورد بررســـی قرار گرفت. در این گزارش علاوه بر موارد یاد شـــده برای اجرای عایق‌کاری حرارتی و کف‌ســـازی با این محصولات روش‌های مناســـب ارائه شـــد. همچنین با توجه به خـــواص این فرآورده‌هـــا تحلیل اقتصادی اســـتفاده از آنها به عنوان عایـــق حرارتی در دیوار دوجداره، بام تخت و شیب‌دار و کف ساختمان بیان شده است.

فصل اول

خواص و مشخصات سبک‌دانه رس منبسط

۱-۱. مقدمه

سبک‌دانه‌ها به دو گروه طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. یکی از سبک‌دانه‌های مصنوعی متداول در جهان سبک‌دانه رس منبسط است. این مصالح عایق حرارتی از مواد دانه‌ای سبک با ساختار سلولی و با منبسط کردن حرارتی کانی‌های رسی ساخته می‌شوند. لیکا (LECA)[1] به معنای دانه رس سبک منبسط شده است. انبساط خاک رس در کوره‌های گردان با حرارتی حدود ۱۲۰۰ درجه سلسیوس باعث تولید سبک‌دانه‌های لیکا می‌شود. انبساط خاک رس خمیری‌شکل در این دما به دلیل محبوس شدن گازها در خمیر است. دانه‌ها دارای شکل گرد و سطحی ناهموار و متخلخل هستند و بافت داخلی دانه‌ها اسفنجی‌شکل است. این تخلخل و فضاهای خالی بین دانه‌ها باعث ایجاد فضاهای خالی و بروز ویژگی‌های خاص و مهم مانند وزن کم، ضریب هدایت حرارتی پایین، افت صوتی، جلوگیری از نفوذ رطوبت و زهکشی، مقاومت در برابر آتش و دوام و پایداری شیمیایی زیاد می‌شود.

لیکا در سراسر جهان از منابع طبیعی و معادن محلی تولید می‌شود. بنابراین ممکن

1-Lightweight Expanded Clay Aggregate

اســت فرآورده‌های لیکا از کشــوری به کشــور دیگر متفاوت باشــد. اما روش‌های تولید و مزایای آن در همه جا یکســان اســت. لیکا فرآورده ای طبیعی و دوستدار محیط زیست است کــه تخریب‌ناپذیــر، مقاوم در برابر یخبنــدان، غیر قابل احتراق و مقاوم در برابر حشــرات و پوسیدگی ناشی از آب است [۱].

دانه‌های لیکا سبک و در همان حال مستحکم است. این فرآورده خواص مناسب برای عایق‌کاری حرارتی ســاختمان‌ها را دارد. این خواص هنگامی که لیکا در کف زیرین پرکننده ســازه‌ای در زیرزمین‌های عایق حرارتی شــده، تراس‌ها و بام‌ها استفاده می‌شود، ارزشمندند. انــدازه دانه‌های لیکا تعیین‌کننده آن اســت که کدام خاصیت غالب اســت و چگونه فرآورده در عمل باید اســتفاده شــود. بنابراین لیکا در اندازه‌های مختلف برای مصارف متفاوت به کار می‌رود [۱].

در دانمارک لیکا و لیکا–ســبک به صورت روکش‌دار بــرای کف‌های صلب نیز تولید می‌شــود. لیکا–سبک نام تجارتی نوعی لیکاســت که دارای چگالی دانه‌ها، چگالی انبوهی و ضریب هدایت حرارتی کمتری نسبت به لیکای معمول است اما مقاومت خردشدگی آن کمتر از لیکای معمول می‌باشــد. پوششی که کاملا غیرسمی است، خواص آب‌گریزی پدید آورده و مطمئن می‌ســازد که جذب رطوبت از خاک زیر لایه پی ساخته شده از لیکا یا لیکا– سبک گســترش نمی‌یابد. لیکای روکش‌دار و لیکا– سبک روکش‌دار فرآورده‌های خاصی هستند که خواص عایق‌کاری و خصوصیات غیرموئینگی را با هم ترکیب می‌کنند [۱].

بتن ســاخته شــده با سبک‌دانه دارای مزایای زیادی نســبت به بتن معمولی است مانند کاهش بار مرده‌سازه، کاهش هزینه پی، آسایش حرارتی و آکوستیکی بهتر و مقاومت بهتر در برابر آتش.

۱–۲. مواد اولیه سبک‌دانه رس منبسط

لیکا از رس خمیری نوع مونت‌موریلونیت / ایلیت ســاخته می‌شــود. مقدار کلســیم و منیزیم (به صورت اکســید) باید کمتر از ٦ درصد باشــد و مقدار زیاد آهن به شکل Fe_2O_3

مناسب است. انبساط لیکا به دلیل اکسید شدن مواد آلی موجود در رس است و وقتی به وجود می‌آید که سطح دانه‌ها مقاومت کافی به دست می‌آورد تا از فرار گازها به خارج جلوگیری کند [۱].

۱-۳. خواص سبک‌دانه رس منبسط

۱-۳-۱. سبکی

سبکی لیکا به دلیل فضاهای هوایی درون دانه‌ها و بین دانه‌هاست. چگالی سبک‌دانه بسته به اندازه دانه‌ها بین ۳۸۰ تا ۷۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب است [۲].

۱-۳-۲. عایق حرارتی

ضریب هدایت حرارتی سبک‌دانه لیکا معمولا بین ۰/۰۹ و ۰/۱۲ W/mK و برای بتن لیکا با چگالی ۸۰۰ kg/m^3حدود ۰/۲ W/mK است [۲]. آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه بلوک سیمانی لیکا تولید داخل کشور در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی نشان می‌دهد که ضریب هدایت حرارتی این محصول با چگالی ۹٤۰ kg/m^3حدود ۰/۱۷ W/mK است.

۱-۳-۳. عایق صوتی

سبک‌دانه و بلوک لیکا در بین بهترین عایق‌های صوتی قرار دارند. آزمایش‌های دیوار بلوک لیکا با ۱۵ سانتی‌متر ضخامت افت صوتی حدود db ٤٦ را نشان می‌دهد [۲]. آزمایش‌های انجام شده در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی بر روی دیوار بلوک لیکا تولید داخل کشور با ۱۸ سانتی‌متر ضخامت افت صوتی حدود db ٤۹ را نشان می‌دهد.

۱-۳-٤. مقاومت در برابر آتش

از آنجا که سنگدانه‌های لیکا در کوره دوار در معرض دمای حداکثر ۱۲۰۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند این سبک‌دانه‌ها مقاومت مناسبی در برابر آتش دارند. بلوک‌های لیکا

(با چگالی kg/m^3 ۱۳۰) را می‌توان به مدت ۳ ساعت در برابر آتش قرار داد [۲].

در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی آزمون آتش بر روی دیوار غیرباربر ساخته شـــده از بلوک سیمانی لیکا، تولید داخل کشور انجام شد. در این آزمون که در کوره مقاومت در برابر آتش مقیاس متوسط (کوره یک متر مربع) تحت شرایط مشخص آزمون انجام گرفت، آزمونه تا دقیقه ۱۲۰ شکست نخورد و معیارهای یکپارچگی و نارسانایی را برآورده کرد.

۱-۳-۵. تجزیه‌ناپذیری

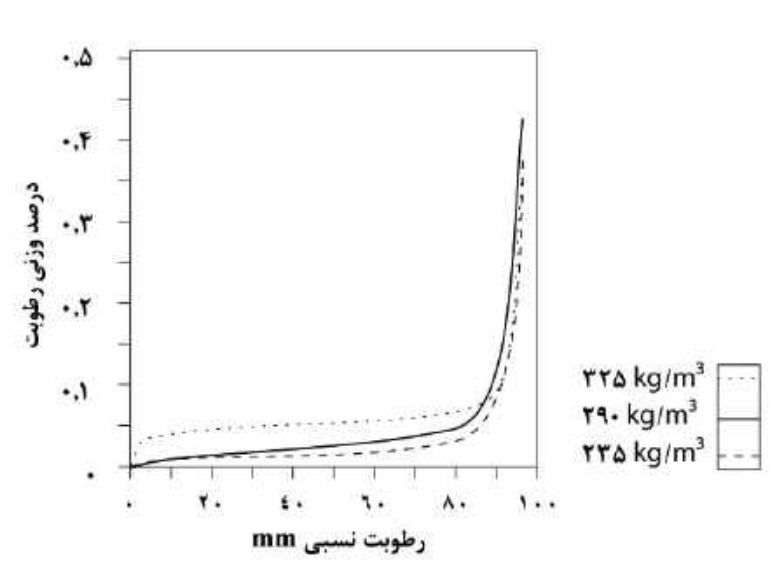
سبک‌دانه لیکا به شدت در برابر مواد اسیدی و قلیایی مقاوم است و pH نزدیک به ۷، آن را در برابر واکنش شیمیایی با بتن خنثی می‌سازد [۲].

۱-۳-٦. جذب آب

میانگین جذب آب ســبک‌دانه لیــکا (۰ تا ۲۵ میلی‌متر) حــدود ۱۸ درصد حجمی در حالت اشباع از آب طی ۷۲ ساعت است.

ماننــد همه مصالح ســاختمانی دیگر لیکا آب را تا هنگامی که شــرایط تعادل با مقدار رطوبت هوای محیط ایجاد شــود، جذب یا دفع می‌کند. این را می‌توان به وســیله منحنی‌های جذب نشان داد [۱].

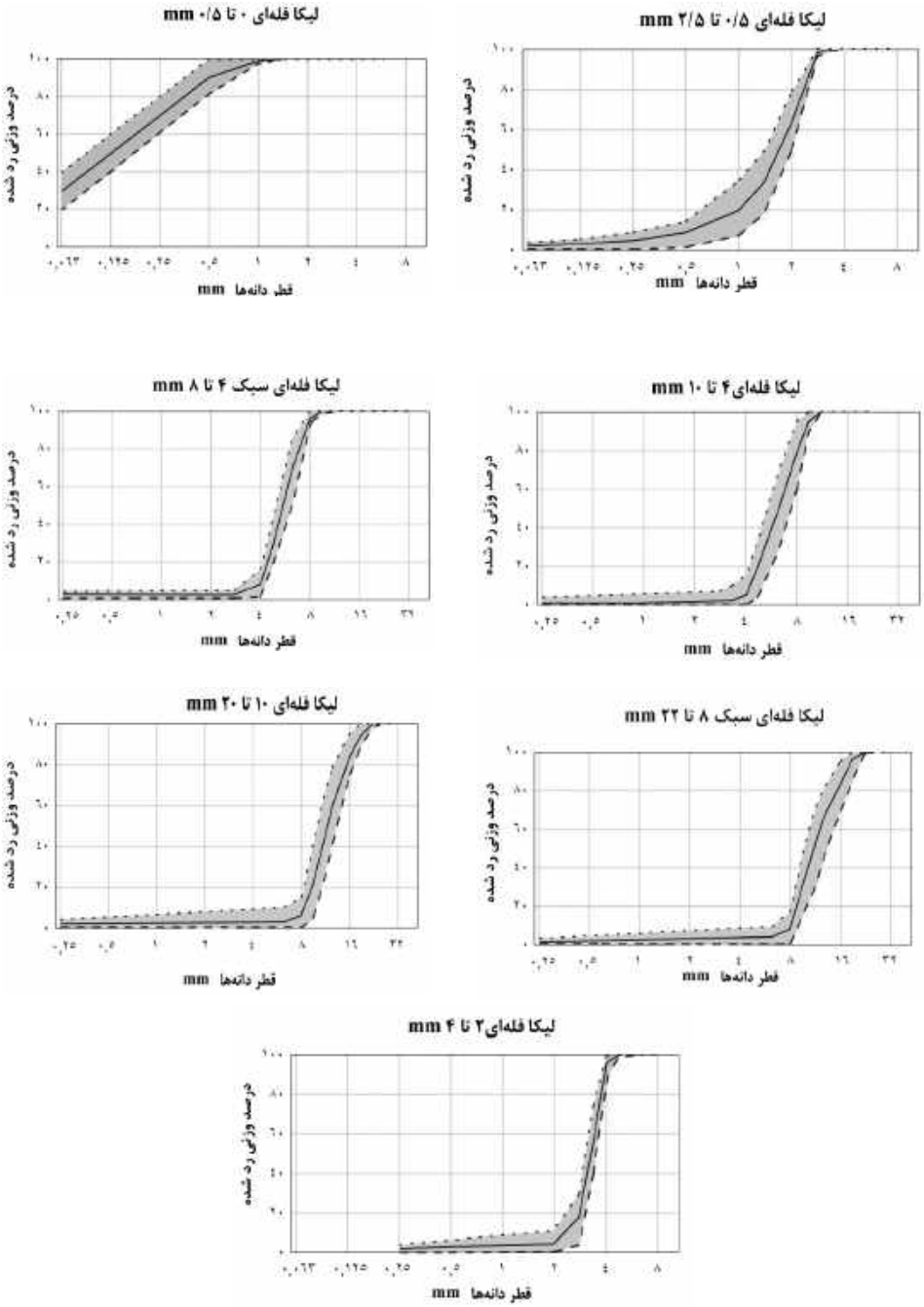
همدماهای جذب برای لیکا در ^oC ۲۳ در سه چگالی مختلف لیکا در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱. نمودار جذب آب [۱]

۱-۳-۷. توزیع اندازه دانه‌ها

منحنی‌های توزیع اندازه دانه‌ها بر اســاس استاندارد دانمارک DS 405.9 در شکل ۱-۲ رســم شده است. مقدار عبور کرده از هر الک به صورت درصد وزنی بیان می‌شود. منحنی‌ها مرز بالایی، مرز پایینی و مقادیر نمونه‌وار را نشان می‌دهند [۱].



شکل ۱-۲ . منحنی‌های توزیع اندازه [۱]

۱-۳-۸. سطح ویژه

سطح خارجی ویژه لیکا براساس مقادیر میانگین نمونه‌وار منحنی‌های توزیع اندازه دانه، چگالی متوسط نمونه‌وار و درصد فضاهای خالی برابر ٤٥ درصد محاسبه می‌شود. فرض می‌شود همه دانه‌ها کره‌های با سطوح صاف‌اند. سطح ویژه بر حسب متر مربع بر متر مکعب لیکا بیان می‌شود. دانه‌های کوچک‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر در محاسبه منظور نمی‌شوند [۱].

جدول ۱-۱. مقادیر سطح ویژه لیکا و لیکا- سبک [۱]

رده (میلی‌متر)		سطح ویژه نمونه‌وار m^2/m^3	
		خارجی	داخلی
لیکا	۰/۵-۲/۵	۲۲۰۰ *	–
	۲-٤	۱۰۰۰ *	۵۸۰
	٤-۱۰	۵۵۰	–
	۱۰-۲۰	۳۰۰	٤۵۱
لیکا - سبک	٤-۸	٦۰۰	–
	۸-۲۲	۳۰۰	–

* مقادیر تخمینی هستند.

۱-۳-۹. ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی، λ10، طبق استانداردهای EN12667 , EN823 , EN822 و ISO8302 کنترل می‌شود. ضریب هدایت حرارتی اعلام شده، λdeclared، براساس λ10 مطابق با استاندارد EN14063-1 محاسبه می‌شود. ضریب هدایت حرارتی طرح، λ، بر اساس شرایط دما و رطوبت محل استفاده محاسبه می‌شود. در دانمارک ضریب ایمنی برای ساختمان‌های روی زمین ۱/۲ در نظر گرفته می‌شود [۱].

جدول۱-۲ . مقادیر ضریب هدایت حرارتی لیکا و لیکا- سبک [۱]

رده، mm	ضریب هدایت حرارتی اعلام شده $\lambda_{declared}$، W/mK	ضریب هدایت حرارتی طرح، λ W/mK	
		ساختمان خشک	ساختمان روی زمین
لیکا ٤-۲، ۱۰-٤، ۲۰-۱۰	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵	۱/۲ × ۰/۰۸۵
لیکا - سبک ۸-٤، ۲۲-۸	۰/۰۷٦	۰/۰۷٦	۱/۲ × ۰/۰۷٦

۱-۳-۱۰. زاویه اصطکاک داخلی و مدول ارتجاعی

موسسه ژئوتکنیک دانمارک آزمایش‌های سه محوری را برای اندازه‌گیری زاویه اصطکاک داخلی و تعیین مدول ارتجاعی برای سبک‌دانه رس منبسط انجام داد. نتایج برای لیکای راه‌سازی در تراکم ۱۰ درصد، تراز تنش kN/m^2 ۲۰داده می‌شود. برای ساخت کف، زاویه اصطکاک داخلی و مدول ارتجاعی لیکا توسط موسسه فناوری دانمارک تعیین شد. برای کف‌سازی روی زمین در تراکم ۸ درصد، تراز تنش kN/m^2 ٤٠ – ۲۷۵ بود [۱].

کف‌های صنعتی با بارگذاری سنگین معمولاً با مدول ارتجاعی در MPa ٦ محاسبه می‌شود. مقادیر مدول ارتجاعی و زاویه اصطکاک داخلی برای مقاصد راه‌سازی، کف‌سازی و کف‌های صنعتی در جدول ۱-۳ ارائه شده است.

جدول۱-۳. مقادیر مدول ارتجاعی و زاویه اصطکاک در کف [۱]

	مدول ارتجاعی، MPa	زاویه اصطکاک داخلی
راه‌سازی	۲۰	> ٤٠
کف‌سازی	۷ – ۱۱	–
کف‌های صنعتی	٦	–

۱-۳-۱۱. چگالی در ارتباط با سطح آب زیرزمینی

اگر لیکا برای مدت طولانی در زیر سطح آب زیرزمینی قرار گیرد، حداکثر ۸۵ درصد فضاهای خالی آن با آب پر می‌شود. چگالی لیکا، بالای سطح زمین را می‌توان با مقدار آب ۳۰ درصد در فضاهای خالی محاسبه کرد. چگالی لیکا زیر سطح زمین و بالای سطح آب زیرزمینی را می‌توان با مقدار آب ٤٥ درصد در فضاهای خالی محاسبه کرد [۱].

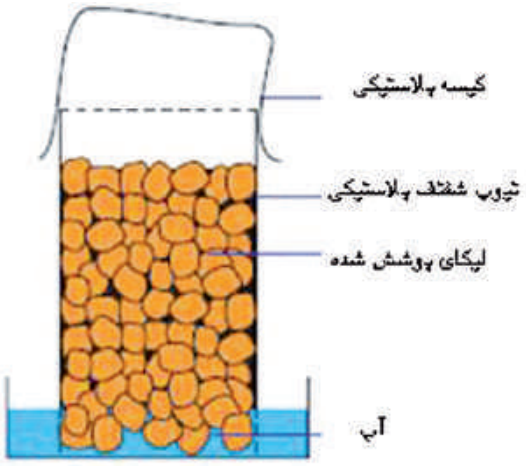
جدول ۱-٤. مقادیر چگالی لیکا و لیکا- سبک [۱]

	لیکا		لیکا - سبک	
	۱۰ - ۲۰ mm	٤ - ۱۰ mm	۸ - ۲۲ mm	٤ - ۸ mm
چگالی دانه‌ها	٤۰۰	٤۷۰	۳۱۰	٤۰۰
چگالی خشک انبوهی	۲۱۵	۲۵۵	۱۷۰	۲۱۵
چگالی خشک*	۲۳۵	۲۸۰	۱۸۵	۲۳۵
بالای سطح آب زیرزمینی، مقدار آب ۳۰٪*	۳۸۵	٤۲۵	۳٤۵	۳۸۵
بالای سطح آب زیرزمینی، مقدار آب ٤۵٪*	٤٦۰	۵۰۰	٤۲۵	٤٦۰
زیر سطح آب زیرزمینی، مقدار آب ۸۵٪*	۱۰۷۰	۱۱۰۰	۱۰۳۵	۱۰۷۰

* ۱۰ درصد متراکم شده

۱-۳-۱۲. خواص غیرموئینه

لیکای روکش‌دار نوع خاصی از فرآورده است که تنها برای استفاده به عنوان لایه غیرموئینه در نظر است. این فرآورده توسط دانشگاه فنی دانمارک و موسسه فناوری دانمارک آزمون شده است. نتایج هر دو سازمان اثربخشی لیکای روکش‌دار را به عنوان ماده‌ای غیرموئینه تایید می‌کند. آزمون اندازه‌گیری جذب آب لیکا توسط دانشگاه فنی برلین انجام شده است. شکل ۱-۳ دستگاه این آزمون را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱-۳. دستگاه اندازه‌گیری جذب آب لیکا

جدول۱-۵. مقدار رطوبت به درصد وزنی [۱]

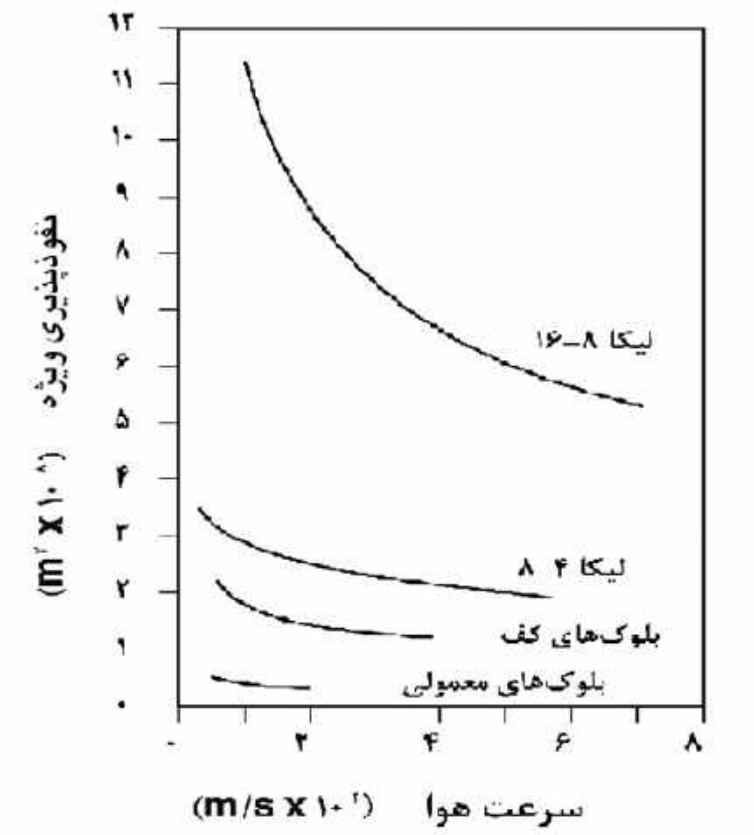
نتایج آزمون	۱	۲	۳
لایه زیرین(۲-۰ سانتی‌متر در تماس با آب)	۲۵/۰	۲۵/۰	۲۵/۰
لایه بالایی(۲۰-۳ سانتیمتر)	۰/۲	۰/۱	۰/۱

جذب آب پس از ۱٤ روز انجام شد. تنها لایه زیرین، حدود ۲ سانتی‌متر که در تماس با آب بود، دارای مقدار رطوبت زیاد است. ۳ تا ۲۰ سانتی‌متر بالایی تنها مقدار رطوبت هیگروسکوپیک ۰/۱ تا ۰/۲ درصد وزنی داشت [۱].

۱-۳-۱۳. نفوذپذیری هوا

نفوذپذیری هوای یک ماده نشانگر آن است که هوا به چه سهولتی می‌تواند از میان آن تنها به وسیله تفاوت در فشار عبور کند. هر چه نفوذپذیری بیشتر باشد، هوا به سهولت بیشتر در ماده نفوذ می‌کند.

نفوذپذیری لیکای فله‌ای و بلوک‌های لیکا در موسسه فناوری دانمارک مطابق روش آزمون نورد NTBUILD360 اندازه‌گیری شده است. نتایج بررسی در شکل ۱-٤ به صورت نفوذپذیری ویژه مواد بیان شده و به عنوان تابعی از سرعت هوا نشان داده شده است [۱].



شکل ۱-٤ . نمودارنفوذپذیری [۱]

۱-۳-۱٤. پرکننده سبک

لیـکا را می‌توان به عنوان پرکننده سـبک‌دانه در مواردی که نیاز به کسـب اطمینان از پایداری، جلوگیری از نشسـت و توزیع بارهای سـنگین وجود دارد، استفاده کرد. هر یک از این موارد در زیر شرح داده می‌شود.

۱-۳-۱٤-۱. پایداری

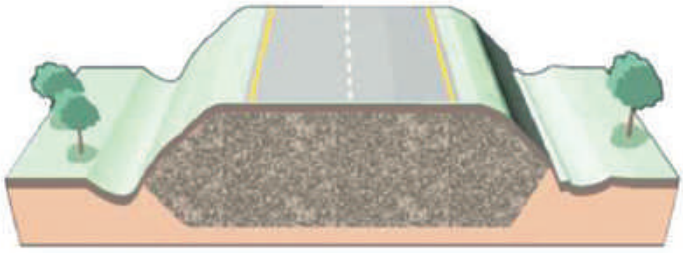
پرکننده لیکا برای دیواره راه سـاخته شـده بر روی شـیب‌های خاک رسی، برای سپر فلزی[1] دیواره‌های بندر و برای سـاختن راه‌های سـاحلی، پایداری زیادی فراهم می‌کند. برای

1- sheet-pile

جلوگیری از زمین لغزش یا شکســت شمع‌کوبی[1]، در خاکریزهای کاهش آلودگی صوتی[2] در طول جاده‌ها یا ساختمان‌های دارای شمع‌کوبی می‌توان از لیکا استفاده کرد [۱].

۱-۳-۱٤-۲. جلوگیری از نشست

ممکن اســت در راه و خاکریز آن بر روی زمین نرمی که در معرض بارگذاری سنگین قرار می‌گیرد، نشســت اتفاق افتد. برای جلوگیری از نشســت می‌توان از پرکننده لیکا استفاده کرد. ســاختمان‌های مســکونی که معمولاً به شــمع‌کوبی نیاز دارند را می‌توان با بالشتکی[3] از پرکننده سبک لیکا بنا کرد [۱].



شکل ۱-۵ . استفاده از پرکننده لیکا در راه

۱-۳-۱٤-۳. مقابله با بار

راه‌ها، ساختمان‌ها و فضاهای باز ساخته شده بر روی زمین‌های تراکم‌پذیر یا زمین‌های شیب‌دار را می‌توان با پرکننده لیکا تحکیم کرد [۱].

1- pilling
2- Noise-abatement ramparts
3- cushion

شکل ۱-٦ . استفاده از پرکننده لیکا در زمین شیب‌دار

۱-۳-۱٤-٤. بام سبز

لیکا برای مقاصد زهکشی و شیب‌بندی در بام‌های سبز ایده‌آل است. لیکای فله‌ای را می‌توان در باغچه‌های سبز برای مقاصد زهکشی و ساخت یا کاهش شیب به کار برد. با ترکیب زهکشی موثر و چگالی کم، لیکا مصالح کاملی برای ایجاد باغچه‌های بام بر روی ساختمان‌های موجود است. یک لایه از لیکا را بر روی عایق رطوبتی و عایق حرارتی پخش می‌کنند و سپس دانه‌ها را با پارچه الیافی می‌پوشانند تا لایه زیرین مناسبی برای باغچه فراهم شود. باغچه را می‌توان با استفاده از شن یا خاک/ مخلوط لیکا (لیکامیکس) برای پرورش گیاهان ساخت [۱].

شکل ۱-۷. استفاده از پرکننده لیکا در بام سبز

لیکامیکس مخلوطی است از لیکا و زغال‌سنگ نارس یا تورب که شرایط رشد گیاهان را با ایجاد خاک متخلخل‌تر و سبک‌تر فراهم می‌کند. زغال‌سنگ نارس توده متراکم قهوه‌ای تا سیاه‌رنگ خزه‌ها و گیاهانی است که به‌طور ناقص تجزیه شده‌اند و معمولاً در زمین‌های بسیار مرطوب و در مناطق معتدل و سردسیر جهان به وجود می‌آید.

تولید لیکامیکس ساده است و معمولاً از ۲۵ درصد لیکا و ۷۵ درصد زغال‌سنگ نارس ساخته می‌شود. لازم نیست زغال‌سنگ نارس نوع خاصی باشد. تجربه نشان داده است که افزودن بیش از ۲۵ درصد لیکا، نتیجه را بهتر نمی‌کند و برای بام سبز بهترین اندازه لیکا ۲ تا ٤ میلی‌متر است. لیکامیکس را می‌توان به صورت آماده و بسته‌بندی‌شده عرضه کرد [۱].

این فرآورده شرایط بسیار مناسبی را برای رشد گیاهان و طول عمر زیاد آنها به وجود می‌آورد. از فواید آن محافظت ریشه‌ها در برابر آبیاری بیش از حد است. از سوی دیگر لیکا میکس باعث تبادل هوا در خاک زراعی می‌شود [۱].

شکل ۱-۸. بام سبز

لیکا برای کاربردهای کشاورزی در جایی که اولویت با کمترین مراقبت و بیشترین محافظت بهداشتی است، سودمند می‌باشد. لیکا از نظر شیمیایی بی‌اثر است و نفوذ هوا به ریشه‌های گیاه را تامین می‌کند. همزمان با آن از ایجاد تخم‌های قارچ، باکتری و حشرات جلوگیری می‌کند [۱].

لیکا در کشاورزی کاربرد فراوان دارد و در کشت هیدروپونیک، گلخانه‌ها و نهالستآنها قابل استفاده است. کشت هیدروپونیک شیوه کشت بدون خاک است. در این نوع کشت متخصصان نیازهای غذایی گیاه را اندازه‌گیری کرده و به جای خاک با استفاده از آبی که به گیاه داده می‌شود با افزودن اجزای ماکرو و میکرو و نگه داشتن گیاه توسط مواد نگهدارنده بی‌اثر مانند لیکا عملاً نیاز به خاک منتفی می‌شود.

۱-٤. کاربرد لیکا

سبک‌دانه‌های لیکا برحسب اندازه دانه‌ها دارای مصارف مختلفی به شرح جدول۱-٦ است:

جدول۱-٦. کاربردهای اصلی رس منبسط [۲]

اندازه دانه‌ها (میلی‌متر)	چگالی (حداکثر) kg/m^3	کاربردهای اصلی
۰ - ٤	≤ ۷۱۰	بتن سبک‌دانه لیکا، بلوک سبک، پنل‌های پیش‌ساخته، پرکننده سبک، ملات لیکا، تصفیه آب، کشاورزی و آبزی‌پروری
٤ - ۱۰	≤ ٤۸۰	عایق حرارتی فله‌ای، بتن سبک، بلوک سبک، پنل پیش‌ساخته و آبزی‌پروری
۱۰ - ۲۵	≤ ۳۸۰	عایق حرارتی فله‌ای، بتن پرکننده سبک، سیستم فاضلاب، منظره طبیعی، کشاورزی، آبزی‌پروری و زهکشی
۰ - ۲۵	≤ ٤۳۰	شیب‌بندی کف و سقف، پرکننده سبک و راه‌سازی

شکل ۱-۹. استفاده از پرکننده لیکا در راه‌سازی

شکل ۱-۱۰. استفاده از پرکننده لیکا در پی‌سازی ساختمان

شکل ۱-۱۱. استفاده از پرکننده لیکا در بنادر شکل ۱-۱۲ .استفاده از پرکننده لیکا در راه آهن

۱-۵. اظهارنامه محصول

چگالی ظاهری و چگالی دانه‌ها باید در حالت خشک مطابق با استاندارد DIN 4226 بر مبنای سطح اطمینان ۹۰ درصد اعلام شود. مقاومت خردشدگی نیز باید مطابق با استاندارد DIN4226 بر اساس مقادیر حداقل اعلام شود. اسیدیته محصول به طور مرتب بررسی می‌شود و همیشه باید خنثی یا کمی قلیایی باشد. مقادیر ارائه شده در جدول ۱-۷ مقادیر نمونه‌وار چگالی انبوهی و چگالی دانه‌ها در حالت خشک و مقاومت خردشدگی در محدوده‌های اعلام شده است [۱].

جدول ۱-۷ . چگالی انبوهی و چگالی دانه‌ها در حالت خشک و مقاومت خردشدگی [۱]

فرآورده	رده (میلی‌متر)	چگالی انبوهی (خشک) kg/m³	چگالی دانه‌ها (خشک) kg/m³	مقاومت خردشدگی MN/m2
لیکا	۰-۰/۵	۶۰۰	۱۱۵۰ *	–
	۰/۵ – ۲/۵	۳۳۰	۶۳۰ *	–
	۲ – ٤	۲۷۵	۵۲۰	۱/۱۶ *
	٤ – ۱۰	۲۵۵	٤۷۰	۱/۱۲
	۱۰ – ۲۰	۲۱۵	٤۰۰	۰/۷۸
لیکا - سبک	٤ -۸	۲۱۵	٤۰۰	۰/۶۶
	۸ -۲۲	۱۷۰	۳۱۰	۰/٤۰

*** مقادیر تخمینی هستند.**

جدول ۱-۸ مقادیر کلرید و سولفات دانه‌های لیکا و لیکا- سبک را نشان می‌دهد. مقدار سولفات و کلرید با استاندارد EN 1744-1 مطابقت دارد. مقادیر اعلام شده بر حسب

درصد وزنی بیان می‌شود و بر اساس مقادیر حداکثر قرار دارد [۱].

جدول ۱-۸. مقادیر کلرید و سولفات دانه‌های لیکا و لیکا- سبک [۱]

رده لیکا (میلی‌متر)		لیکا						لیکا - سبک	
		۰-۰/۵	۰/۵-۲/۵	۲-٤	٤-۱۰	۱۰-۲۰	۸-۲۲	٤-۸	
مقدار کلرید (درصد)	حداکثر مقدار	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	
	مقدار نمونه‌وار	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	
مقدار سولفات (درصد)	حداکثر مقدار	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	
	مقدار نمونه‌وار	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	

۱-٦. تحقیقات اولیه در مورد خواص سبک‌دانه رس منبسط در کشور ترکیه [۳]

در این تحقیق، مطالعه بر روی سبک‌دانه حاصل از انبساط خاک رس، ضایعات پودر آجر و ضایعات فلوتاسیون البیت و زغال‌سنگ در دماهایی در محدوده ۹۰۰ °C تا ۱۲۵۰ °C انجام شد. پس از ساخت نمونه‌ها، خواص فیزیکی و ریزساختار سبک‌دانه‌ها تعیین شد. تاثیر نوع خاک رس، دمای فرآیند (پخت)، مقدار و نوع مواد تخلخل‌زا، در درصد جذب آب، مقدار وزن مخصوص، ساختار منافذ و بافت سطح دانه‌های منبسط شده مورد آزمون قرار گرفت [۳].

نتایج آزمون‌ها نشانگر این امر بود که تولید سبک‌دانه با جذب آب تقریبی صفر درصد را می‌توان با استفاده از خاک رس و ضایعات فلوتاسیون البیت به عنوان ماده تخلخل‌زا انجام داد. تاثیر نوع ماده خام و دمای عمل‌آوری بر روی خواص سبک‌دانه‌ها بسیار مهم است. این امر با بررسی خصوصیات سطحی و ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری ثابت شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که پودر آجر ضایعاتی می‌تواند در تولید دانه‌های انبساط یافته سبک استفاده شود. در هر صورت مقادیر وزن مخصوص و جذب آب سبک‌دانه‌های تولید شده از خاک رس عموماً کمتر از سبک‌دانه‌های تولید شده از پودر آجر است [۳].

در آینده نزدیک استفاده از سنگدانه سبک در صنعت ساختمان افزایش بسیاری خواهد یافت چون مزایای اقتصادی و کاربردی به ویژه در پروژه‌های ساخت مسکن به وجود می‌آورد. حفره‌ها و منافذ این سبک‌دانه‌ها خصوصیت عایق بودن در برابر حرارت و صدا را

بهبود می‌بخشد. علاوه بر این در محصولات با چگالی کم، وزن خود، اندازه پی و هزینه‌های ساخت‌وساز را کاهش می‌دهند [۳].

برای اهداف ساخت و ساز انواع مختلفی سبک‌دانه وجود دارد. آنها در تراکم، بافت سطحی، تخلخل و ظرفیت جذب آب با هم متفاوت‌اند. برخی از سبک‌دانه‌ها به طور طبیعی به وجود می‌آیند و برخی، از مواد طبیعی یا محصولات جانبی صنعتی تولید می‌شوند. سبک‌دانه‌های طبیعی استفاده گسترده‌ای ندارند چرا که تنها در بخش‌هایی از دنیا پیدا می‌شوند. به علاوه خواص فیزیکی و ریزساختاری سبک‌دانه‌های مصنوعی به وسیله برخی فرآیند ها کاملا قابل کنترل است. پرمصرف‌ترین سبک‌دانه ، رس منبسط شده، شیشه منبسط شده، پرلیت و ورمیکولیت منبسط شده و خاکستر سینتره شده است. سبک‌دانه رس منبسط شده (لیکا) به دلیل استفاده از خاک رس که در تمام دنیا وجود دارد متداول‌ترین سبک‌دانه مصنوعی است [۳].

تولید و استفاده از لیکا در ترکیه گسترده نیست زیرا سنگدانه‌های سبک طبیعی در دسترس هستند و نیز استفاده از اجزای ساختمانی سبک در ساخت ساختمان‌ها متداول نیست.

رس منبسط شده محصول پخت رس طبیعی است که در دمای بین ۱۰۰۰°C تا ۱۲۰۰°C به دلیل تولید گاز در توده متورم می‌شود. سبکی این محصول عمدتاً به واسطه سهم نسبتا زیاد منافذ نیمه بسته است که ممکن است بالغ بر ۹۰ درصد حجم دانه شود. لیکا به طور معمول با پخت، انبساط و تورم یک جسم کف مانند با نسبت زیادی از منافذ نیمه بسته تولید می‌شود. ساختار متخلخل دانه‌های رس منبسط ترکیبی است و از فضاهای خالی شکل گرفته مابین دانه‌های منفرد و فضاهای خالی پر شده از هوا در داخل دانه‌ها تشکیل می‌شود [۳].

علت انبساط ایجاد شده در بدنه سرامیکی، بخارها و گازها هستند که در دماهای مختلف شکل می‌گیرند و به دلایل متفاوت قادر به خروج از بدنه نیستند. این پدیده ممکن است با ترکیبات آلی خاک رس و پیدایش بخار آب و گازها به وجود آید.

یکی از متداول‌ترین روش‌ها در فرآیند تخلخل‌زایی خاک رس منبسط شده، افزودن

دانه‌های شیشـــه منبسط است. تخلخل‌زایی توسط دانه‌های شیشـــه منبسط شده را می‌توان با اضافـــه کردن مواد افزودنی قابل احتراق ترکیب کرد. ایـــن کار عموماً به دلایل اقتصادی و به منظور کاهش هزینه‌های تولید اســـت. از طرف دیگر استفاده از مواد تخلخل‌زا می‌تواند باعث خروج گازهای مضر و افزایش هزینه‌های مرتبط با اســـتفاده از تجهیزات فنی برای فرآوری و سهم‌بندی مواد تخلخل‌زا، دستگاه‌های مکش و خارج‌سازی گازها و هزینه‌های مواد تخلخل‌زا شـــود. به علاوه در نتیجه ســـوختن و خارج شـــدن مواد تخلخل‌زا، اغلب دمای موضعی بدنه رســـی افزایش می‌یابد که منتهی به کاهش منافذ با حجم کم می‌شـــود که دقیقا عامل اصلی در بهبود عایق‌کاری حرارتی است [۳].

در این تحقیق آزمایشـــگاهی از ضایعات فلوتاســـیون آلبیت به عنـــوان ماده تخلخل‌زا استفاده شده و دانه‌های لیکای متفاوتی از دو نوع خاک رس متفاوت در دماهای پخت مختلف بین ۹۰۰ °C تا ۱۲۵۰ °C تولید شـــد. تاثیر خواص خاک رس، مواد تخلخل‌زا و دمای پخت بر خواص فیزیکی و ریزساختار دانه‌های لیکا بررسی شد [۳].

تولید ســـنگدانه مصنوعی سبک (LWA) به دلیل کمبود منابع طبیعی، رایج شده است. در بین ســـنگدانه‌های مصنوعی، سبک‌دانه رس منبسط (LECA) از اهمیت بیشتری برخوردار اســـت چون از خاک رس که ماده قابل دسترس اســـت تولید می‌شود. از طرف دیگر خواص محصـــول نهایی به نوع خـــاک رس، نوع و مقدار مواد تخلخل‌زا و دمای پخت در طی فرآیند ارتباط چشمگیری دارد [۳].

هدف اصلی از این تحقیق آزمایشـــگاهی، آزمودن اثر اســـتفاده از ضایعات فلوتاسیون آلبیت به عنوان ماده تخلخل‌زا بر روی خواص فیزیکی و ریزســـاختار محصول لیکای حاصل از خاک‌های رس متفاوت در دماهای متفاوت پخت بود [۳].

در این تحقیق، سبک‌دانه رس منبسط (لیکا) ساخته شده از دو نوع خاک رس با ترکیب شـــیمیایی متفاوت بررسی شد. یک نوع لیکا از خاک رس صنعت تولید سفال (خاک رسA) و دومـــی از خـــاک رس حاصل از پودر ضایعات آجر(خاک رس B) به دســـت آمد. ترکیبات شیمیایی هر دو نوع خاک در جدول شماره ۱-۹ آورده شده است [۳].

جدو ل ۱-۹ .ترکیب شیمیایی مواد خام [۳]

نوع خاک رس	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	TiO2	Na2O	K2O
خاک رسA	۵۸/۰	۲۷/۰	۱/۰	۰/۲	۰/٤	۱/۳	۰/۳	۲/۳
خاک رسB	۵۱/۸	۱۵/٦	۱۳/۰	۹/۳	٦/۱	۱/۷	۱/۲	۱/۳

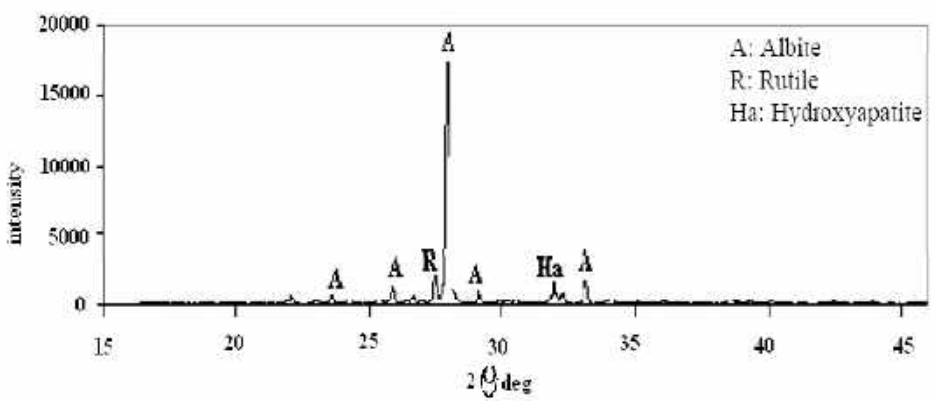
ضایعات فلوتاسیون آلبیت از فرآیند آماده‌سازی سنگ معدن آلبیت به ویژه در مرحله فلوتاسیون کوارتز به دست می‌آید که به عنوان ماده تخلخل‌زا نیز استفاده شد. ترکیب شیمیایی این ماده در جدول شماره ۱-۱۰ مشاهده می‌شود. آنالیز شیمیایی این ضایعات به‌روشنی نشان‌دهنده وجود مقدار زیادی اکسیدهای گدازآور مانند CaO, Na_2O, P_2O_5 در این ضایعات است [۳].

تجزیه دیفراکسیون پرتو ایکس (XRD) در شکل ۱-۱۳ آمده است که نشان می‌دهد ضایعات فلوتاسیون از فازهای آلبیت، رتیل و هیدرکسیل آپاتیت تشکیل شده است.

جدول ۱-۱۰. ترکیب شیمیایی ضایعات فلوتاسیون آلبیت [۳]

SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	TiO2	Na2O	K2O	P2O5	L.O.I
۳٤/۷	۱۰/۳	۰/٤۰	۱۱/۰	۲۲/۲	۰/۲۰	۵/۲۰	۰/۲۰	۱۵/۱	۰/۷۰

L.O.I: افت سرخ شدن



شکل ۱-۱۳. الگوی XRD ضایعات فلوتاسیون آلبیت [۳]

۱-٦-۱. آماده‌سازی نمونه‌ها

خاک رس A و خاک رس B با ضایعات فلوتاسیون آلبیت در نسبت‌های متفاوت از ۱۰ تا ٤۰ درصد مخلوط و گل خمیری‌شکل تهیه شد. در یکی از مخلوط‌ها از زغال‌سنگ به عنوان ماده تخلخل‌زا استفاده شد. در ابتدا مواد اولیه در آسیاب حلقه‌ای آسیاب و سپس در آسیاب گلوله‌ای به طور همگن مخلوط شدند. گل آماده شده در یک ظرف سنگی متخلخل خشک شد تا حالت خمیری مناسب به‌دست آید. در نهایت گل با عملیات شکل‌دهی به شکل کره در آمد. پس از آماده‌سازی دانه‌های گلی گرد شده، ابتدا در دمای ٦۷ درجه سلسیوس به مدت ۲٤ ساعت در آون خشک شدند و سپس محصولات داخل کوره الکتریکی با دماهای پخت متفاوت از ۹۰۰ °C تا ۱۲۵۰ °C به مدت ۱۰ دقیقه گرما داده شد. نرخ افزایش دمای کوره ۱۰ °C بر دقیقه بود. در این تحقیق جمعاً ۳۸ فرمولاسیون متفاوت تهیه و آزمایش شد. ترکیبات و دماهای پخت در جدول شماره ۱-۱۱ آمده است [۳].

جدول ۱-۱۱ . ترکیب و دمای پخت سنگدانه [۳]

نوع خاک رس	نوع ماده تخلخل‌زا	مقدار ماده تخلخل‌زا (درصد)	دمای پخت (درجه سلسیوس)					
			۹۰۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۱۲۵	۱۱۵۰	۱۲۰۰	۱۲۵۰
خاک رس A	ضایعات فلوتاسیون آلبیت	۱۰	+		+			+	+
		۲۰			+			+	+
		۳۰	+		+			+	+
		٤۰			+			+	+
خاک رس B	ضایعات فلوتاسیون آلبیت	۱۰		+	+	+	+	+	
		۲۰			+			+	ذوب
		۳۰		+	+	+		+	ذوب
		٤۰			+			+	ذوب
	زغال‌سنگ	۵		+		+	+		ذوب
		۷/۵		+		+	+		ذوب

+: انجام شد

ذوب: سنگدانه در حین عملیات حرارتی ذوب شد.

دانه‌های لیکای تولید شـــده در شـــکل ۱-۱٤ نشان داده شده است. قطر این سنگدانه‌ها بین ۳ تا ۸ میلی‌متر است. سنگدانه‌های به رنگ روشن، قرمز و مشکی به ترتیب از خاک‌های رس A و رس B و رس B به اضافه زغال سنگ تولید شد [۳].

شکل ۱-۱٤. انواع دانه‌های لیکای تولید شده

۱-٦-۲. آزمون‌های انجام شده بر روی سنگدانه تولید شده

پـــس از تولیـــد، آزمون‌های تعیین وزن مخصـــوص و جذب آب بـــر روی نمونه‌های سنگدانه انجام شد. در این آزمایش سنگدانه‌ها تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۰۵°Cخشک می‌شوند. سپس جرم آنها اندازه‌گیری می‌شود. بعد آنها را به مدت ۲٤ ساعت در آب غوطه‌ور ســـاخته و بعد ســـطح آنها را خشـــک نموده و دوباره وزن می‌شود. مقدار جذب آب از طریق معادله (۱) به دست می‌آید:

$$WA\,\% = \frac{W_{SSD} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن:

WA: درصد جذب آب سنگدانه

W_{SSD}: وزن سنگدانه در حالت اشباع با سطح خشک شده

W_{dry}: وزن سنگدانه خشک شده در آون است.

در آزمـــون تعیین وزن مخصوص، جرم نمونه ســـنگدانه در هـــوا و در آب اندازه‌گیری

می‌شود و سپس وزن مخصوص با استفاده ازمعادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$SG = \frac{W_d}{W_w - W_s} \quad (۲)$$

که در آن:

SG: وزن مخصوص سنگدانه

W_d: وزن نمونه خشک

W_w: وزن نمونه اشباع با سطح خشک شده در هوا

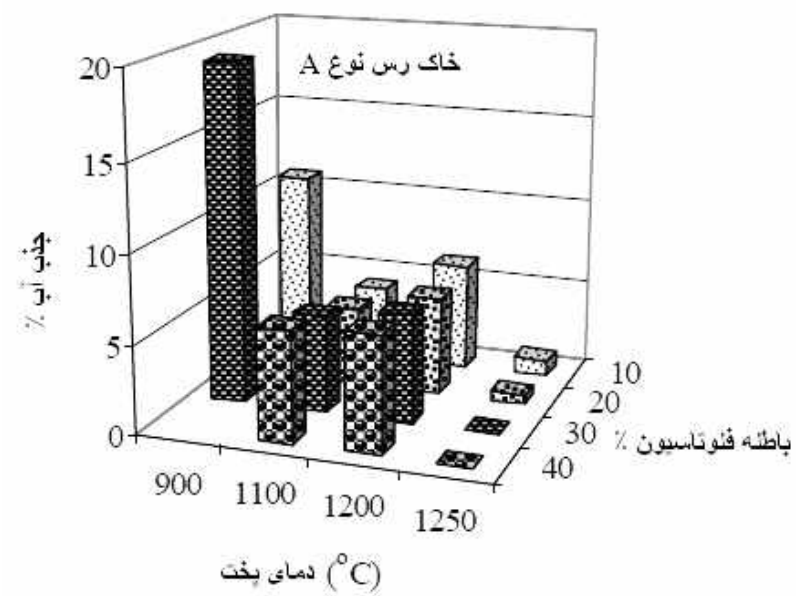
W_s: وزن نمونه اشباع شده در آب است.

ریزساختار سبک‌دانه تولید شده در دماهای متفاوت توسط یک میکروسکوپ نوری بررسی شد [۳].

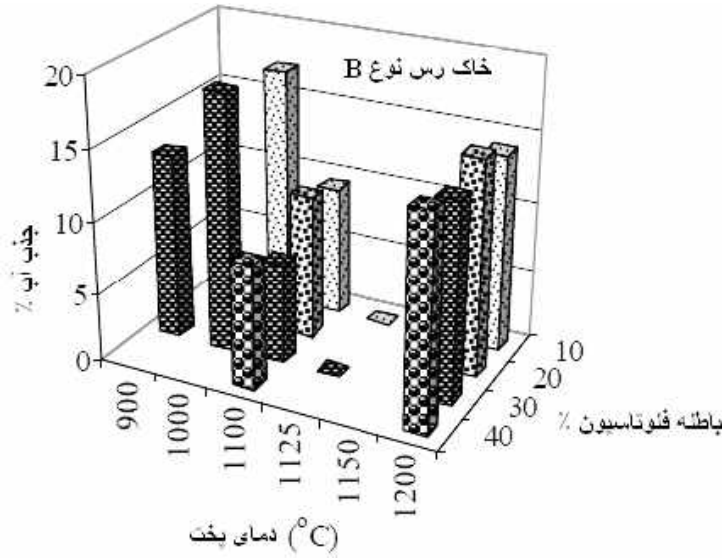
خواص جذب آب دانه‌های لیکای تولید شده در این تحقیق در شکل ۱-۱۵ نشان داده شده است. بنابر نتایج آزمون مقدار جذب آب سبک‌دانه‌های تولید شده از خاک رس A با افزایش دمای پخت، کاهش پیدا می‌کند. کمترین مقدار جذب آب سبک‌دانه (صفر درصد) در مورد سنگدانه‌های تولید شده در دمای ۱۲۵۰ °C به دست آمده است. به نظر می‌رسد که در این تراز دمایی یک لایه شیشه‌ای متراکم خارجی و همگن روی سطح سنگدانه ساخته می‌شود که آن را در برابر آب نفوذناپذیر می‌سازد [۳].

گنارو و همکاران[1] نتایج مشابهی در مورد زئولیت منبسط تولید شده در دمای ۱۴۰۰ °C به دست آورند. تاثیر مقدار ضایعات فلوتاسیون بر جذب آب را نمی‌توان برای گرمادهی کمتر از ۱۲۵۰ °C تعمیم داد. در هر صورت جذب آب دانه‌های پخته شده در دمای ۱۲۵۰ °C با افزایش ضایعات فلوتاسین آلبیت کاهش می‌یابد [۳].

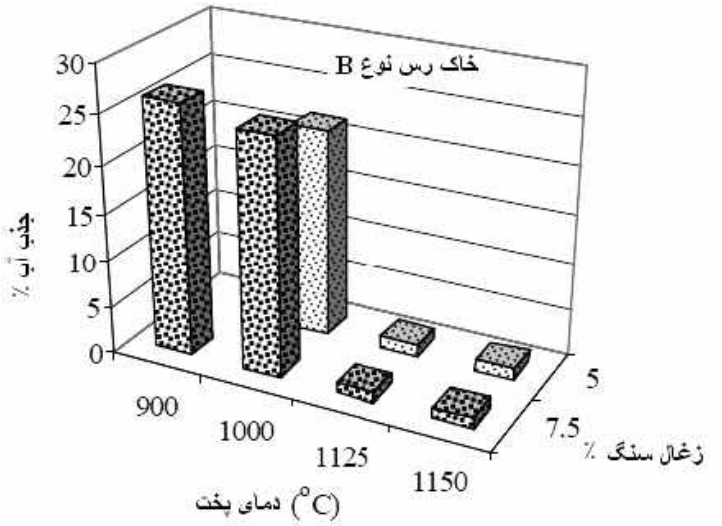
1- Gennaro



شکل ۱-۱۵. مقادیر جذب آب دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس نوع A و ضایعات فلوتاسیون [۳]



شکل ۱-۱٦ . مقادیر جذب آب دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس نوع B و ضایعات فلوتاسیون [۳]



شکل ۱-۱۷. مقادیر جذب آب دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس نوع B و زغال سنگ [۳]

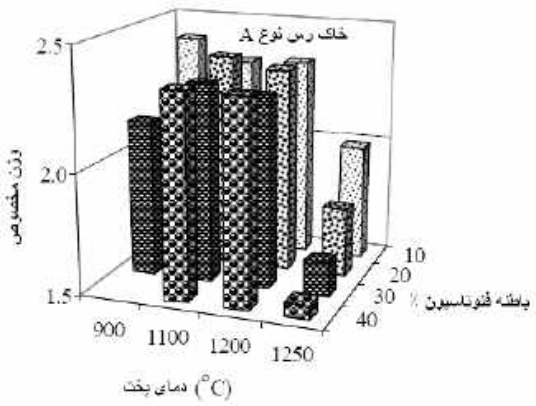
تاثیر دمای پخت بر مقادیر جذب آب را به دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس نوع B نمی‌توان عمومیت داد؛ حتی برای عملیات حرارتی در ۱۲۰۰ °C مقادیر جذب آب بین ۱۰ تا ۱۵ درصد بوده است (شکل ۱-۱۳). با وجود این جذب آب تقریبی صفر درصد در دمای ۱۲۵۰ °C به دست آمد. می‌توان مشاهده کرد که مقادیر جذب آب سنگدانه تولید شده از خاک رس نوع A به طور کلی کمتر از این مقادیر در محصول ساخته شده از خاک رس نوع B است [۳].

شکل ۱-۱۷ مقادیر جذب آب سنگدانه تولید شده از خاک رس نوع B با زغال سنگ را نشان می‌دهد. مشابه شکل ۱-۱۶در دماهای ۱۱۲۵ °C و ۱۱۵۰ °C مقادیر جذب آب خیلی کم به دست آمد. شایان ذکر است که مقادیر جذب آب دانه‌های لیکای تولید شده در دمای ۱۱۲۵ °C مشخصاً کمتر از لیکای تولید شده در ۱۰۰۰ °C است. به نظر می‌رسد در تولید سبک‌دانه‌هایی از خاک رس نوع B صرف نظر از مواد تخلخل‌زا، دماهای ۱۱۲۵ °C و۱۱۵۰ °C برای کاهش در مقدار جذب آب مناسب است.

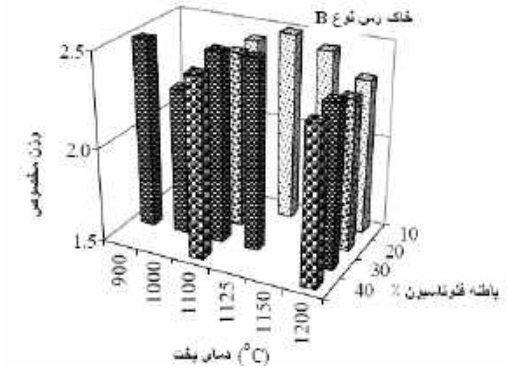
یکی از مهم‌ترین خواص دانه‌های سبک، وزن مخصوص است. این خصوصیت نقشی مهم را در طراحی ساختمان‌های بتنی و خواص عایق‌کاری حرارتی اعضای ساختمانی ایفا می‌کند [۳].

مقادیر وزن مخصوص دانه‌های سبک‌دانه رس منبسط لیکای تولید شده در این تحقیق در شـــکل‌های ۱–۱۵ تا ۱–۱۷ ارائه شـــده است. در شکل ۱–۱۵ به‌طور واضح مشخص است که دانه‌های لیکا با وزن مخصوص بین ۱/۵ تا ۲ را می‌توان از خاک رس نوع A در ۱۲۵۰ °C تولید کرد. عملیات حرارتی کمتر از ۱۲۵۰ °C برای تولید دانه‌های سبک‌تر کافی نیست [۳].

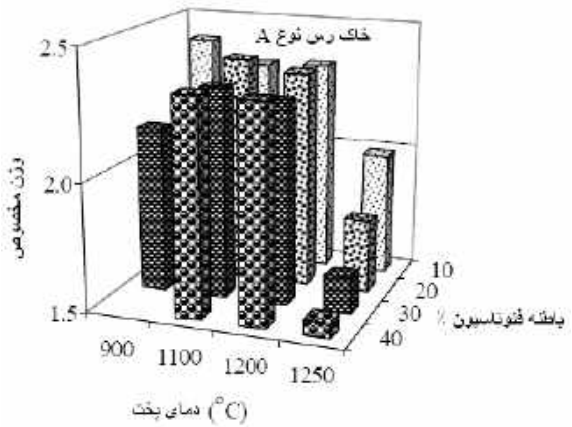
نتایج آزمون‌ها نشـــان می‌دهد که مقادیر وزن مخصوص با افزایش ضایعات فلوتاسیون آلبیت کاهش پیدا می‌کند. برای مثال مقادیر وزن مخصوص برای سنگدانه تولید شده با ۴۰ و ۱۰ درصد ضایعات فلوتاسیون به ترتیب برابر ۱/۵۵ و ۱/۹۵ است. (شکل ۱–۱۸).



شکل ۱–۱۸ . مقادیر وزن مخصوص دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس A و ضایعات فلوتاسیون [۳]



شکل ۱–۱۹. مقادیر وزن مخصوص دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس B و ضایعات فلوتاسیون [۳]



شکل ۱-۲۰ . مقادیر وزن مخصوص دانه‌های لیکای تولید شده از خاک رس B و زغال سنگ [۳]

مقادیر وزن مخصوص دانه‌های تولید شـده از خاک رس نوع B حتی اگر دمای پخت تا ۱۲۰۰ °C افزایش پیدا کند، بین ۲/۲ تا ۲/٤ است (شکل ۱-۱۹).

در تحقیـق حاضر تولید دانه‌هـای لیکا با وزن مخصوص کمتـر از ۲/۰ از خاک رس نـوع B و ضایعات فلوتاسـیون، غیرممکن بـود. از طرف دیگر دانه‌های لیـکا با مقدار وزن مخصوص کمتر از ۲/۰ را می‌توان در دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس و با استفاده از زغال سنگ به عنوان ماده تخلخل‌زا، تولید کرد (شکل ۱-۲۰).

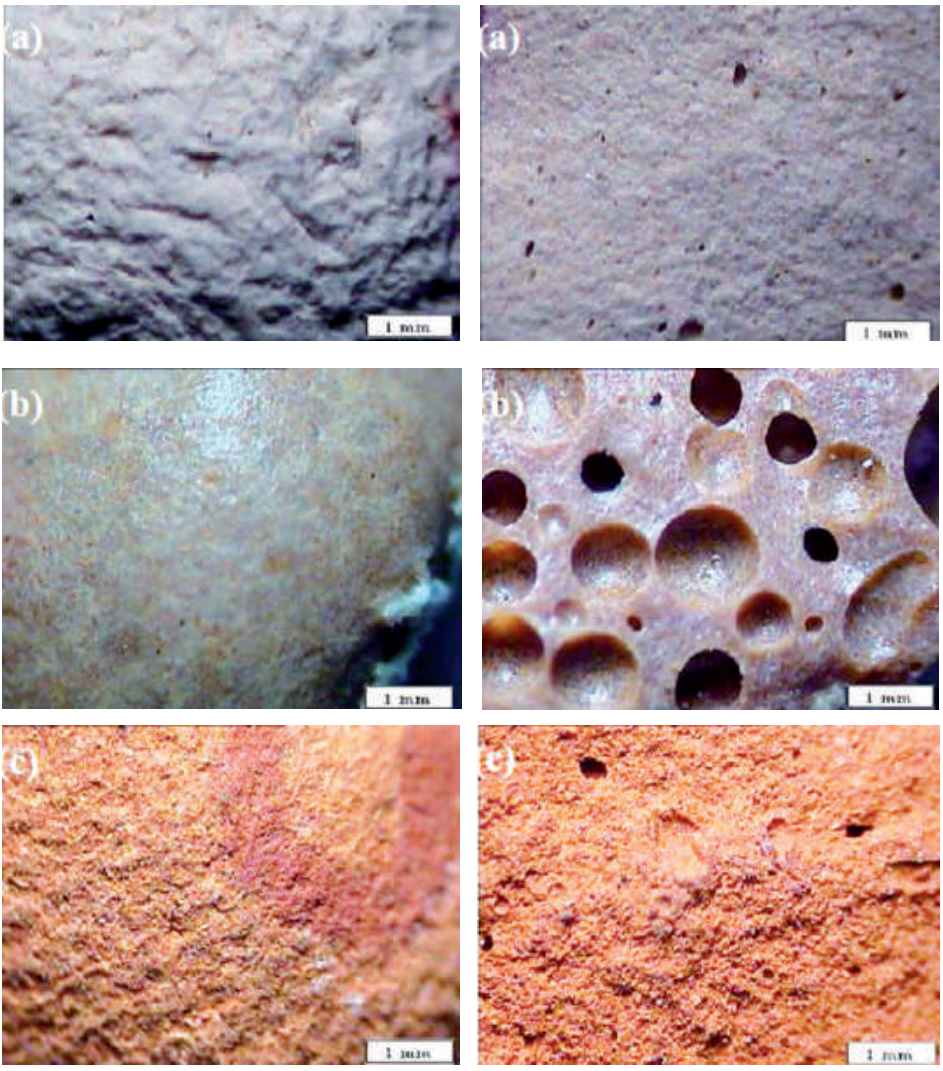
سـاختارهای منفذ و بافت‌های سـطحی سـنگدانه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱-۲۱ و ۱-۲۲ مشـاهده می‌شود. واضح است که ساختار منفذ و خواص سطحی سنگدانه‌ها به شدت تحت‌تاثیر نوع ماده اولیه و عملیات پخت است [۳].

توزیـع، مقدار و انـدازه منافذ در صورتی که مواد تخلخـل‌زا ٤۰ درصد و دمای پخت ۱۲۵۰ °C با خاک رس نوع A باشد خیلی مناسب است (شکل ۱-۲۱ b).

محدوده اندازه منافذ ۰/۲ تا ۱ میلی‌متر است و هیچ ارتباطی بین منافذ برقرار نیست. این ممکن است وزن مخصوص سنگدانه را کاهش دهد و عایق حرارتی بهتری به وجود آید.

در شـکل ۱-۱۸ دیده می‌شـود که کمترین مقدار وزن مخصوص اندازه‌گیری شده در سنگدانه‌های تولید شده از خاک رس نوع A با افزودن ٤۰ درصد ضایعات فلوتاسیون آلبیت

در عملیات پخت با دمای ºC ۱۲۵۰ به دســت آمده اســت. این مورد با استفاده از خاک رس نوع B حتی با ٤٠ درصد مواد تخلخل‌زا و عملیات پخت در دمای ºC ۱۲۰۰ به دســت نیامد (شــکل ۱-۲۱ c). منافذ این ســنگدانه‌ها کوچک و ناپیوسته هستند. همچنین روشن است که عملیــات پخت با دمــای ºC ۱۱۰۰ برای خاک رس نوع A حتی با ٤٠ درصد مواد تخلخل‌زا، کافی نیست تا ساختار منفذ مناسبی تشکیل شود (شکل۱-۲۱ a) [۳].



(a) خاک رس A، ۴۰ درصد فلوتاسیون آلبیت، ۱۱۰۰ °C
(b) خاک رس A، ۴۰ درصد فلوتاسیون آلبیت، ۱۲۵۰ °C
(c) خاک رس B، ۴۰ درصد فلوتاسیون آلبیت، ۱۲۰۰ °C

شکل ۱-۲۱. ساختار منافذ سنگدانه

(a) خاک رس A، ۴۰ درصد فلوتاسیون آلبیت، ۱۱۰۰ °C
(b) خاک رس A، ۴۰ درصد فلوتاسیون آلبیت، ۱۲۵۰ °C
(c) خاک رس B، ۴۰ درصد فلوتاسیون آلبیت، ۱۲۰۰ °C

شکل ۱-۲۲. بافت‌های سطحی سنگدانه‌ها

خواص سطحی سـنگدانه‌ها در ظرفیت جذب آب سنگدانه‌ها بسیار مهم است. گنارو و همکارانش نشـان دادند که سـنگدانه‌های منبسط شده یک لایه شیشه‌ای خارجی متراکم و همگن دارند که آنها را در برابر آب غیر قابل نفوذ می‌سـازد. مشـخص شد که عملیات پخت و نوع خاک رس نقش مهمی در خواص سطحی دانه‌های لیکا دارند.

سـطح سنگدانه‌ها در مورد خاک رس نوع A استفاده شده در عملیات پخت ۱۲۵۰°C (شکل ۱-۱۹ b) صاف و غیرقابل نفوذ به نظر می‌رسد. این امر جذب آب سنگدانه‌ها را کاهش خواهد داد. مطابق شـکل ۳ در سـنگدانه‌های تولید شـده از خاک رس نوع A با ٤٠ درصد ضایعات فلوتاسیون آلبیت در دمای ۱۲۵۰ °C کمترین مقدار جذب آب مشاهده شد. از طرف دیگر وقتی که خاک رس نوع A در دمای ۱۱۰۰ °C پخته شـد، بافت سـطحی زبر و ظاهراً نفوذپذیر بود(شـکل ۱-۱۹ a). سـطح سنگدانه‌های تولید شده از خاک رس B، با وجودی که دمای پخت تا ۱۲۰۰ °C افزایش یافت زبر و نفوذپذیر است [۳].

به طور کلی نتایج زیر از آزمایش‌های این تحقیق به دست می‌آید [۳]:

– مقادیر جذب آب سنگدانه‌های تولید شده از خاک رس سفال‌پزی (نوع A) در دمای ۱۲۵۰ °C با افزایش مقدار ضایعات فلوتاسیون، کاهش پیدا می‌کند.

– در دمـای پخـت ۱۱۲۵ °C صـرف نظر از نوع مـواد تخلخـل‌زا مقادیر جذب آب سنگدانه‌های تولید شده از ضایعات پودر آجر(نوع B) تقریباً صفر درصد است.

– مقادیر جذب آب سنگدانه‌های تولید شده از خاک رس نوع A عموماً از سنگدانه‌های تولید شده از خاک رس نوع B کمتر است.

– سبک‌دانه‌های رس منبسط شده با وزن مخصوص بین ۱/۵تا ۲/۰ و جذب آب تقریباً صفر درصد را می‌توان از خاک رس نوع B با استفاده از ضایعات فلوتاسیون آلبیت تهیه کرد. وزن مخصوص سنگدانه‌ها عموماً با افزایش مقدار ضایعات فلوتاسیون کاهش می‌یابد.

– پـودر ضایعات آجر می‌تواند در تولید دانه‌های لیکا اسـتفاده شـود اما مقادیر وزن مخصوص حتی وقتی‌که دمای پخت به ۱۲۰۰ °C افزایش یابد زیاد می‌شود. از طرف دیگر وزن مخصوص تا حدودی کمتر برای سـنگدانه‌های تولید شده با افزودن زغال‌سنگ، اندازه‌گیری

شده است.

– ساختار منافذ و خواص سطحی سنگدانه‌ها به شدت تحت اثر نوع مواد اولیه و دمای اعمال شـــده در تولید دانه‌ها است. وقتی که مواد تخلخل‌زا ۴۰ درصد و دمای پخت ۱۲۵۰°C و خاک رس نوع A باشد توزیع، اندازه و مقدار منافذ خیلی مناسب است. وقتی‌که خاک رس نوع A در عملیات گرمادهی ۱۲۵۰ °C قرار گیرد ســـطح ســـنگدانه‌ها صاف و غیر قابل نفوذ به‌نظر میرسد.

– مشخص شد که در خواص سنگدانه سبک رس منبسط شده یا لیکا، نوع خاک، نوع و مقدار مواد تخلخل‌زا و دمای پخت خیلی مهم است.

– نتایج آزمایش‌ها نشان داد که دانه‌های لیکا را می‌توان از خاک رس با مقادیر مختلفی از ضایعات فلوتاسیون آلبیت تولید کرد.

– به کارگیری ضایعات فلوتاســـیون برای تخلخل‌زایی، می‌تواند هزینه تولید را کاهش دهد. این ضایعات را می‌توان در این بخش استفاده کرد. از آن جایی که خاک رس مصالح در دسترس محلی است، امکان تولید سبک‌دانه با هزینه کم وجود دارد. این امر در کشورهایی با منابع کم سبک‌دانه طبیعی مفید است. دانه‌های لیکا می‌توانند در تولید بتن سبک و بلوک‌های سبک استفاده شوند و هزینه مصرف انرژی در ساختمان را کاهش دهند [۳].

در این تحقیق از ضایعات فلوتاســـیون آلبیت در تولید ســـبک‌دانه خاک رس منبســـط شـــده استفاده شـــد. با وجود این استفاده از مواد تخلخل‌زای مختلف مانند پرلیت و شیشه نیز مناسب اســـت. نتایج چنین مطالعاتی مقایسه تاثیر مواد تخلخل‌زا را برای انواع متفاوت خاک امکان‌پذیر می‌سازد [۳].

۱-۷. پیشرفت سبک‌دانه‌ها در کویت

کشـــور کویت به دلیل فقدان سنگدانه‌های معدنی مناسب برای کاربردهای ساختمانی، در حال حاضر منابع ســـنگدانه‌های خود را از کشورهای همسایه تامین می‌کند. این وضعیت توجه پژوهشـــگران محلی و ناحیه‌ای را جلب کرده اســـت. مطالعات آنها ضرورت پیشرفت

سبک‌دانه‌های رس منبسط از مواد اولیه بومی را برجسته می‌کند. مطالعات اولیه در این جهت در موسسه تحقیقات علمی کویت با استفاده از سیلت رسی دریایی از خلیج سولیبی خات انجام شده است که نشان می‌دهد سنگدانه‌های با چگالی انبوهی ۷۰۰ تا ۸۰۰ kg/m^3 در مقایسه با سبک‌دانه‌های لیکا با چگالی انبوهی ۳۵۰ kg/m^3 (که در حال حاضر در مصر ساخته می‌شود) را می‌توان به وسیله پختن سیلت رسی دریایی در کوره دوار در ۱۱۰۰ ^oC تا ۱۱۵۰ ^oC تولید کرد [٤].

ادبیات فنی سبک‌دانه‌ها مربوط به سازوکار جنبه‌های ساخت و مهندسی برای کاربرد در بتن و غیر گسترده است. مطالعه برجسته‌ای توسط رایلی[1] انجام شد که نشان داد ترکیب شیمیایی مواد اولیه نپخته مشخص می‌کند که آیا می‌توان ویسکوزیته مناسبی را که برای محبوس کردن گاز برای متورم شدن لازم است در نقطه ذوب ایجاد کرد؟ بر اساس کاربرد رس‌ها و شیل‌ها که با استفاده از ملاک‌های بالا ارزیابی شده است، سبک‌دانه‌ها در آمریکا و انگلستان و سایر کشورهای اروپایی توسعه یافتند و این صنعت پیشرفت پایداری را تا دهه ۱۹۵۰ نشان داد. توسعه بعدی در مصرف ضایعات صنعتی (مانند سرباره کوره آهن‌گدازی وضایعات زغال‌سنگ) به عنوان مواد اولیه بود [٤].

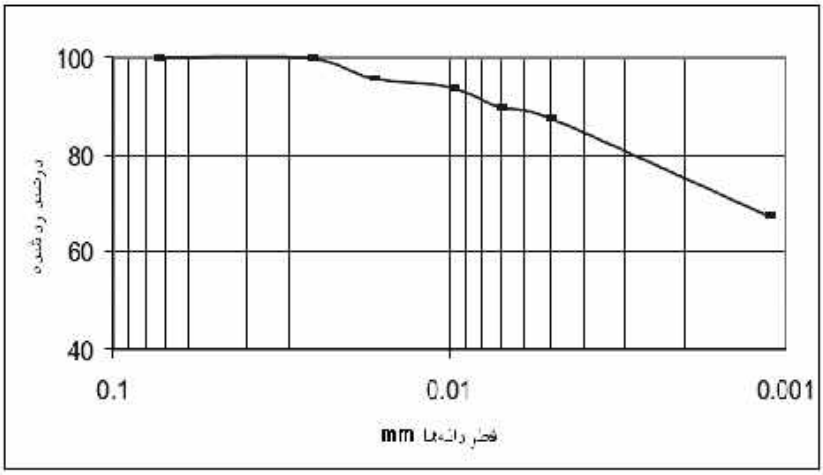
هدف این تحقیق مشخص کردن ویژگی‌های ذاتی مواد رسی بهرا بود تا بدین وسیله ترکیبات مطلوبی برای متورم شدن با آمیختن افزودنی‌ها مانند خاک اره و روغن ضایعاتی ایجاد شود. این موضوع به وسیله ایجاد شرایط فرآیند از نظر ریزی مواد، ترکیب مخلوط و عملیات حرارتی بهینه که برای تولید سبک‌دانه مطلوب است، پیگیری شد.

مواد استفاده شده در تولید سبک‌دانه : خاک رسی از منطقه بهرا واقع در شمال شرق کویت، به عنوان مواد اولیه اصلی استفاده شد. از مواد افزودنی (مواد تورم‌زا) شامل خاک اره حاصل از صنایع چوبی و روغن ضایعاتی در واحدهای تعویض روغن اتومبیل‌ها استفاده شد. سبک‌دانه تولید شده به‌وسیله لیکای مصر (تنها امکان محلی)، برای اهداف مقایسه‌ای استفاده شد. [٤].

1- Riely

۱-۷-۱. مشخصات فیزیکی

توزیع اندازه دانه خاک رس بهرا در شـــکل ۱-۲۳ ارائه شـــده است. مقدار رس بهرا در ابتدا به وسیله روش آزمون رسوب‌گذاری (هیدرومتری) تعیین شد. هرچند، روش هیدرومتری محدودیت‌های خود را دارد که منتج به افزایش ظاهری در مقدار رس به علت تداخل ذرات ســـیلت بر بخش اندازه رس می‌شـــود. بنابراین، مقدار رس نمونه بهرا به وســـیله آنالیز لیزری توزیع اندازه دانه تعیین شـــد. ســـه ســـری آنالیز لیزری میانگین مقدار رس ۳۵/۸ درصد را در نمونه بهرا ارائه داد [٤].



شکل ۱-۲۳ . توزیع اندازه دانه خاک رس بهرا [٤]

۱-۷-۲. حدود خمیری

آزمون‌های حد حالت روانی (LL)، حد حالت خمیری (PL)، و نشـــانه حالت خمیری (PI) روی دو نمونه بهرا (از یک مخلوط همگن شـــده با غلظت یکنواخت) مطابق استاندارد ASTM D4318:1994 انجام شـــد. نتایج ارائه شـــده در جدول ۱-۱۲ نشان می‌دهد که خاک بهرا، خاکی خمیری با PI زیاد بین ۲۰ تا ۲۷ و مقدار رس به طور محسوس زیاد است [٤].

جدول ۱-۱۲ . حدود خمیری نمونه‌های خاک رس بهرا [٤]

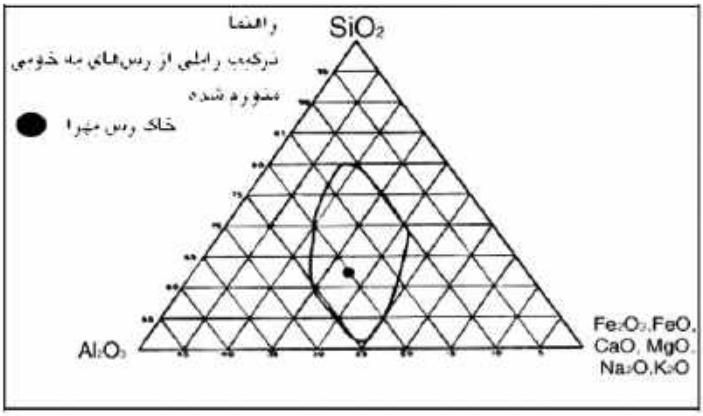
خواص	نمونه خاک رس بهرا	
	نمونه ۱	نمونه ۲
حد حالت روانی (درصد)	٤۰	۳۰/۵
حد حالت خمیری (درصد)	۱۳	۱۰
نشانه حالت خمیری (درصد)	۲۷	۲۰/۵

۱-۷-۳. خواص شیمیایی

تجزیه شـیمیایی یک نمونه نماینده رس بهرا به وسـیله روش فلورسانس پرتو ایکس (XRF) انجام شـد که در جدول ۱-۱۳ ارائه شـده اسـت. مقدار قابل ملاحظه Al_2O_3 نمونه خاک بهرای مورد بررسی (۱۹/۷۸درصد) نشان می‌دهد که خاکی با کیفیت مناسب است (حد تقریبی ۱۷درصد است) [٤].

وجود CaO و MgO در خاک بهرا نشـان می‌دهد که این خاک شامل موادی (کلسیت، دولومیت، یا منیزیت) اسـت که در دمایی که در آن فاز شیشـه‌ای تشکیل می‌شود CO2 آزاد خواهد کرد. این مورد در بخش زیر (خواص شیمیایی برای متورم شدن) مشخص شده است [٤].

وجود گدازآورها(CaO, MgO, K_2O, Na_2O و Fe_2O_3) در خاک بهرا توسعه فازهای شیشـه‌ای دمای بالا دارای ویسـکوزیته کافی را مطمئن می‌سـازد. این مورد توسـط دیاگرام ترکیبی Riley در شکل ۱-۲٤ توضیح داده شده است [٤].



شکل ۱-۲٤. دیاگرام ترکیب رایلی که وضعیت خاک بهرا را نشان می‌دهد [٤]

جدول ۱-۱۳ . آنالیز شیمیایی خاک رس بهرا [٤]

اکسیدها	درصد وزنی
SiO2	٦۱/۸٥
Al2O3	۱۹/۷۸
Fe2O3	۹/٥۲
CaO	۱/۰٥
MgO	۰/۷۸
K2O	٤/۱
Na2O	۰/۱۷
TiO2	۰/۹۲
افت سرخ شدن	۱٥/۱۱

۱-۷-٤. خواص شیمیایی برای متورم شدن

دو شرط لازم برای متورم شدن خاک رس برای تولید سبک‌دانه‌ها به شرح زیر است:

۱- مواد رسی باید فاز شیشه‌ای دمای بالا را با ویسکوزیته کافی برای محبوس کردن گازها تولید کنند.

۲- برخی مواد مانند کربنات باید در مواد رسی وجود داشته باشد تا در دمایی که در

آن فاز شیشه‌ای تشکیل می‌شود گاز آزاد کند.

رایلی نموداری از اکسیدهای اصلی (اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیوم و اکسیدهای گدازآور) را پیشنهاد کرد که ناحیه‌ای را نشان می‌دهد که در آن رس‌ها تا جرمی با ویسکوزیته کافی برای اطمینان از پف کردن خوب پخته می‌شوند. شکل ۱-۲۱ نسبت اجزای سازنده خاک بهرا مورد استفاده در این تحقیق را همراه با ناحیه رایلی که روی آن اضافه شده است (خط ضخیم) نشان می‌دهد. روشن است که ترکیب خاک بهرا داخل ناحیه متورم شدن قرار دارد که نشان می‌دهد خاک بهرا جوابگوی متورم شدن بدون تنظیم ترکیب اجزای اکسیدی است [٤].

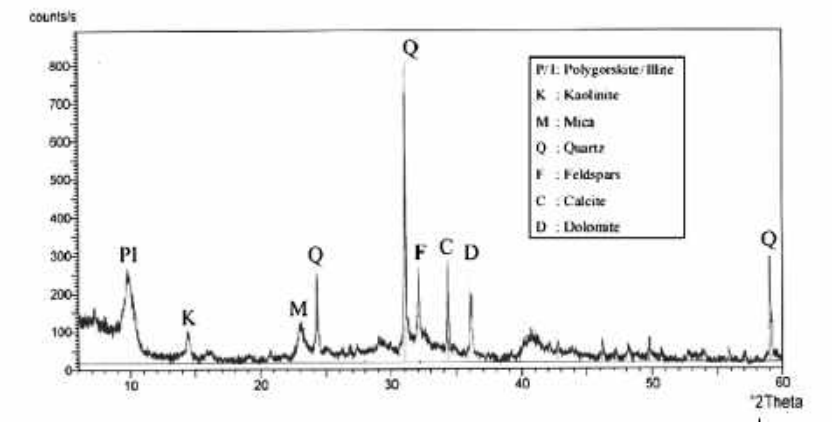
۱-۷-۵. تعیین ترکیب کانی‌شناسی

نمودار دیفراکسیون پرتو ایکس و منحنی آنالیز حرارتی (DTA) برای بخش درشت خاک بهرا به ترتیب در شکل ۱-۲۵ و شکل ۱-۲٦ ارائه شده است.

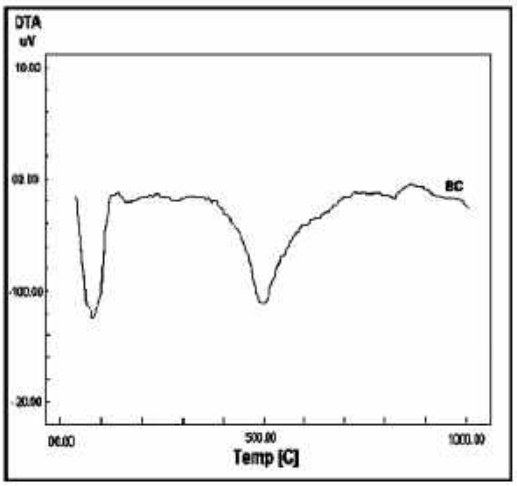
نمودار دیفراکسیون پرتو ایکس خاک بهرا نشان می‌دهد که کائولینیت، سیلیس و پلیگورسکایت/ ایلیت کانی‌های عمده موجود هستند. کانی‌های فرعی شامل فلدسپار، کلسیت، دولومیت و میکا هستند [٤].

منحنی آنالیز حرارتی (DTA) برای خاک بهرا به وسیله یک قله قوی گرماگیر در ۸۸/٦°C در ارتباط با آب فیزیکی جذب شده و یک قله گرماگیر کاملاً مشخص در ۵۰۰/۱°C مربوط به هیدروکسیل‌گیری از کانی رسی است [٤].

این به وسیله یک قله گرمازا در ۸۵۰°C مربوط به تشکیل مولیت ادامه می‌یابد (یک فاز انتقالی در پیوند با کسب مقاومت بدنه پخته شده). به طور کلی DTA نتایج آنالیز XRD را تایید و تکمیل می‌کند.



شکل ۱-۲۵. الگوی دیفرکسیون پرتو ایکس بخش درشت دانه خاک بهرا [٤]



شکل ۱-۲٦ . منحنی DTA خاک رس بهرا [٤]

۱-۷-٦. برنامه آزمایشگاهی

یک نمونه از خاک رس بهرا خشک شده، در یک آزمایشگاه توسط سنگ‌شکن غلتکی خرد شـــده و از الک ۱/۱۸ میلی‌متری عبور داده شـــد. به بخش الک شده آب اضافه شد تا به قدر کافی خمیری شود. مخلوط ورز داده شده را به حال خود گذاشتند تا به مدت ۲٤ ساعت قبل از آنکه به سه بخش جداگانه تقسیم شود، عمل‌آوری شود. به یک بخش خاک اره افزوده شـــد تا توده خمیری با غلظت مناســـب برای شکل دادن آن با دست به دست آید. بخش دوم

به طور مشابه با روغن ضایعاتی به عنوان افزودنی آماده‌سازی شد و مقدار وزن شده‌ای خاک رس خشک به دقت افزوده شد تا توده خمیری با غلظت مناسب برای شکل دادن آن به دست آید. بخش سوم خاک رس اولیه بدون افزودنی به عنوان نمونه مقایسه استفاده شد. از هر بخش آزمونه‌های کروی با قطر تقریبی ۱۷ میلی‌متر با دست ساخته شد. ترکیب سه مخلوط آماده شده در جدول ۱-۱٤ ارائه شده است [٤].

آزمونه‌های شکل داده شده به مدت ۲٤ ساعت در هوا خشک شدند و به مدت ۲٤ ساعت قبل از پختن در یک گرم‌خانه در دمای ۱۱۰°C قرار داده شدند.

جدول ۱-۱٤ ترکیب مخلوط‌های رس مورد استفاده در تولید سبک‌دانه‌های رس منبسط [٤]

شماره مخلوط و مشخصه آن	وزن خاک رس (گرم)	نوع افزودنی	وزن افزودنی (گرم)	وزن آب (گرم)
1.C	۳۳۰	–	–	۱۵۲/۳
2.C+s	۵۵۰	خاک اره	۳۵	۲۵۳/۸
3.C+O	۵۹۵	روغن خام	٦/۸	۲۷٤/٦

۱-۷-۷. پخت ناگهانی

محدوده عمومی دمای استفاده شده به وسیله پژوهشگران قبلی برای تولید سنگدانه‌های رس متورم شده به وسیله پخت آهسته، به طور تقریبی ۱۲۰۰ °C تا ۱۲۵۰ °C است. آنها نشان داده‌اند که رس‌ها به وسیله پخت سریع در دمایی تقریباً ۱۰۰ °C کمتر از پخت آهسته متورم می‌شوند. بنابراین، در ابتدا پخت سریع (ناگهانی) در یک دمای انتخاب شده ۱۰۸۰ °C، برای پخت آزمونه‌ها پذیرفته شد. پخت سریع در دمای ۱۰۸۰ °C انجام شد تا بررسی شود آیا مخلوط‌های رسی تحت این شرایط قابل متورم شدن هستند یا خیر. پخت سریع بافت متورم سلولی مناسبی را در خاک رس پخته تولید نمی‌کند و این امر منطقی است، پخت معمولی حتی در دمای بالاتر از ۱۱۸۰ °C یک محصول مطلوب را به دست نخواهد داد [٤].

برای پخت سریع، اتمسفر کوره تحت شرایط اکسید کردن، نگه داشته شد. پخت‌های

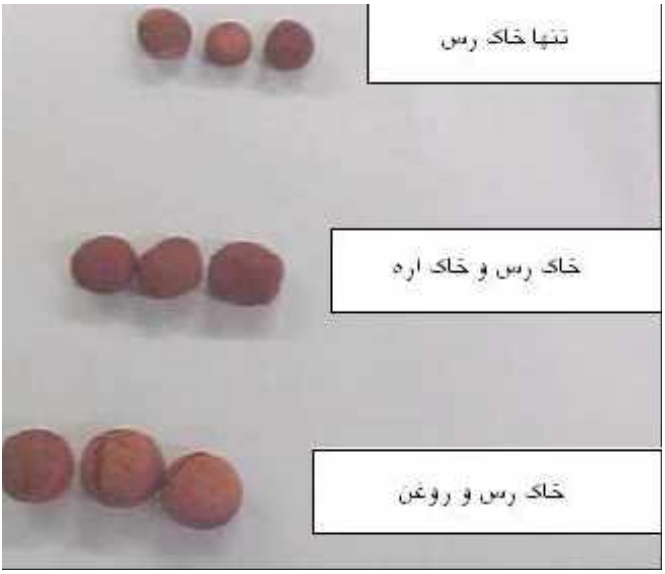
آزمایشـــی در دمای ۱۱۸۰ °C، با قرار دادن نمونه‌ها در کوره به مدت ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه انجام شد. نمونه‌ها برای این پخت‌ها به طور مستقیم در منطقه داغ کوره قرار داده شدند. سنگدانه‌های رس متورم تولید شده با استفاده از این روش پخت آزمایشی، نشان داد که سنگدانه‌های منفرد دارای بافت داخلی متورم سلولی بودند. میانگین وزن مخصوص سنگدانه‌ها حدود ۱/۰۳ بود. دراین پخت آزمایشـــی ســـریع قابلیت تورم خاک رس نشان داده شـــد و روش پخت آهسته عملی‌تر در مرحله بعدی تحقیق مورد پذیرش قرارگرفت [٤].

روش دوم پخت (و متورم شـــدن) یک برنامه مشـــخص حرارت دادن آهسته با پخت تحت شـــرایط همدما[1] در دمای حداکثر است. از مدت زمآنها ی قرارگیری در شرایط همدما در حداکثر دما برای درجات بالاتر عملیات حرارتی استفاده شد. جزئیات در بخش زیر ارائه شده است [٤].

۱-۷-۸. پخت همدمای آهسته

آزمونه‌هـــای نماینده ســـه مخلوط در یک کـــوره الکتریکی موفل در هـــوا در دماهای ۹۰۰ °C، ۹۲۵ °C، ۹۵۰ °C و ۱۰۰۰ °C پختـــه شـــدند. زمـــان قرارگیری ۱۲۰ دقیقه در بالاترین دما استفاده شد. سرعت حرارت دادن ۲۰° C/min بود. بعد از پخت، وزن مخصوص ظاهری نمونه‌های ســـنگدانه‌ها (شکل ۱-۲۷) با اســـتفاده از حجم‌سنج جیوه‌ای تعیین شد. جذب آب ســـنگدانه‌ها به وســـیله غوطه‌ور کردن آنها در آب به مدت ٢٤ ساعت تعیین شد. میانگین ۱۲ اندازه‌گیری به صورت درصد جذب آب محسوب شد. تغییرات نتایج آزمون حدود ۵ درصد بود. مقادیر وزن مخصوص ظاهری و جذب آب به دســـت آمده از ســـه نمونه به ترتیب در جدول ۱-۱۵ و جدول ۱-١٦ نشـــان داده شده است. این جدول‌ها دماهای پخت به کار رفته برای تولید سنگدانه‌ها از خاک رس بهرا با استفاده از افزودنی‌های مختلف و خواص فیزیکی سنگدانه‌های به دست آمده را ارائه می‌دهند. برای اهداف مقایسه‌ای، خواص فیزیکی سنگدانه لیـــکا که به طور تجاری در مصر با اســـتفاده از مـــواد اولیه مختلف تولید می‌شـــود، نیز ارائه می‌شود [٤].

1[1]- Isothermal



شکل ۱-۲۷. سنگدانه‌های ساخته شده از مخلوط‌های مختلف خاک رس به وسیله پخت آهسته [٤]

جدول ۱-۱۵. اثر دمای پخت بر وزن مخصوص ظاهری مخلوط‌های مختلف خاک رس بهرا و سنگدانه لیکای تولید شده در مصر [٤]

شرح	خاک رس بهرا										لیکا
دمای پخت °C	۹۰۰			۹۲۵			۹۵۰		۱۰۰۰		۱۲۰۰
مواد اولیه	C	C+O	C+S	C	C+O	C+S	C	C+S	C	C+S	
وزن مخصوص	۲/۰۰	۱/۳۵	۱/٦٤	۲/۵۰	۱/٤۷	۱/٦۷	۱/۸۰	۱/۵۸	۱/۹۰	۱/۵٦	۰/۳٦

جدول ۱-۱٦. اثر دمای پخت بر جذب آب مخلوط‌های مختلف خاک رس بهرا و سنگدانه لیکای تولید شده در مصر [٤]

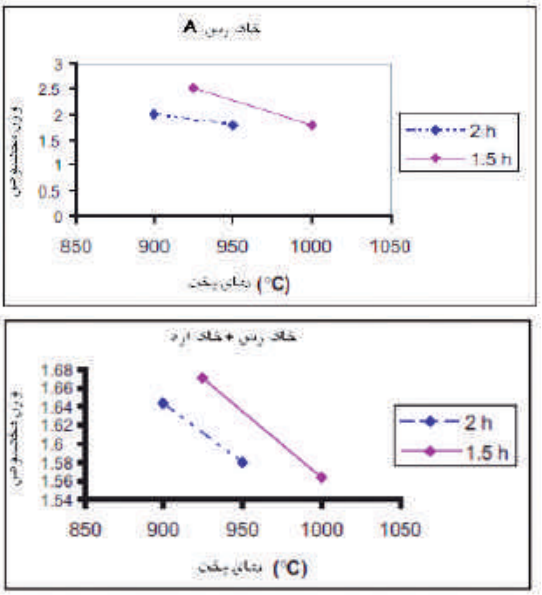
شرح		خاک رس بهرا					لیکا
دمای پخت °C		۹۰۰		۹۲۵		۹۵۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰
مواد اولیه		C+O	C+S	C+O	C+S	C+S	C+S	
جذب آب (درصد)	۱۰دقیقه	۲/۵۷	۵/٤۱	۲/۰۸	٤/۳	۱۱/۹	۱۱/۲	۲۵/۹۱
	۲٤ساعت	۱۰/۸۱	۸/۷٤	۱۱/۳۲	۷/۱۷	۱٤/۵	٤۰/٦	۳٤/٤۱

۱-۷-۹. دمای پخت در مقابل وزن مخصوص

به آسانی می‌توان مشاهده کرد که حالت پخت، مدت زمان و دمای پخت دارای اثر مهمی بر وزن مخصوص نمونه‌های پخته شده است. جدول ۱-۱۵ اثر دمای پخت بر وزن مخصوص نمونه‌های خاک رس (C)، خاک رس+ خاک اره (C+S) و خاک رس+ روغن (C+O) را نشان می‌دهد و بنابراین عمل متورم شدن آنها را مشخص می‌کند. آشکار است که تغییرات کلی در وزن مخصوص نمونه خاک رس (C)، پخته شده در دماهای مختلف تحت مدت توقف ثابت تقریبا از ۲/۵ تا ۱/۸ است در حالی که تغییرات برای نمونه خاک رس+ خاک اره (C+S) از ۱/٦۷ تا ۱/٥٦ است [٤].

اساساً وزن مخصوص کمتر مربوط به نمونه‌های خاک رس+روغن (C+O)، پخته شده در دمای ۹۲۵ °C و ۹۰۰ °C (۱/٤۷ تا ۱/۳۵) است. این پخت‌های آزمایشی نشان می‌دهد که استفاده از خاک اره و روغن به عنوان افزودنی‌ها در خاک رس باعث کاهش چشمگیری در وزن مخصوص سنگدانه تولید شده می‌شود. این اثر در نمونه‌های خاک رس حاوی روغن برجسته‌تر است. هرچند، آخری نسبت به خشک شدن اولیه بعد از شکل دادن حساس‌تر است. به عنوان یک نتیجه، نمونه‌های پخته شده ترک‌خوردگی در اثر جمع شدن را نشان می‌دهند که نشانگر لزوم خشک شدن کنترل شده در ساخت سنگدانه‌های رس منبسط با روغن است. جزئیات آزمایش‌های پخت ناگهانی در زیر خلاصه شده است [٤].

تغییرات وزن مخصوص با مدت زمان پخت برای پخت ناگهانی نمونه‌های خاک رس (C) و خاک رس+ خاک اره (C+S) نشان می‌دهد که کمترین وزن مخصوص (۰/٦) مربوط به نمونه خاک رس + خاک اره در ۹۰۰ °C تحت مدت زمان توقف ۱۳ دقیقه است (شکل ۱-۲۸). این، اثربخشی پخت ناگهانی در متورم شدن مواد رسی را نشان می‌دهد. با این وجود ملاحظه شد که انتقال تحقیق آزمایشگاهی به تولید تجاری با این حالت پخت با مشکلات عملی زیادی مواجه خواهد بود. به علاوه مشاهده شد که اگر دمای نمونه‌ها طی دوره‌ای که چند ساعت طول می‌کشد، به دماهای متورم شدن رسانده شود اثر متورم شدن از بین خواهد رفت. احتمالاً، عمل ذوب گسترده کربنات‌ها به ایجاد محصول سینتر شده (جذب آب ۳/۲۲ درصد بعد از ۲٤ ساعت) با وزن مخصوص زیاد (۱/۸۵) می‌انجامد [٤].



شکل ۱-۲۸. اثر دمای پخت بر وزن مخصوص خاک رس (a) و خاک رس + خاک اره (b) [٤]

جذب آب بسیار زیاد نمونه‌های سنگدانه (١٤/٥ درصد) با خاک رس + خاک اره در دمای ۹۵۰ °C به وجود آمد. این مورد هنگامی که با نمونه‌های پخته شده در دمای کم مقایسه می‌شود نشان دهنده ماهیت تورمی مواد است که در یک دمای بحرانی ۹۵۰ °C اتفاق می‌افتد (جدول ۱-۱۵ را ببینید) [٤].

۱-۷-۱۰. افزودن خاک اره به خاک رس بهرا

در جدول ۱-۱۵ مشاهده می‌شود هنگامی‌که دمای پخت از ۹۲۵ °C به ۹۵۰ °C و به ۱۰۰۰ °C افزایش یافت افزودن خاک اره باعث کاهش شدید وزن مخصوص می‌شود. مقادیر وزن مخصوص در این دماها به ترتیب ١/٦٧، ١/٥٨ و ١/٥٦ است. هنگام مقایسه با مقادیر وزن مخصوص مربوط به نمونه‌های فقط خاک رس (C) پخته شده در دماهای مختلف، نمونه‌های خاک رس + خاک اره (C+S) پخته شده در یک محدوده دمای یکسان مقادیر وزن مخصوص نسبتا کم نشان دادند. درصد کاهش وزن مخصوص در ۹۰۰ °C مقدار ١٤/٦ بود در حالی که در ۹۲۵ °C و ۹۵۰ °C به ترتیب ٥/٩٧ و ١٨/٣٤ بود [٤].

۱-۷-۱۱. افزودن روغن ضایعاتی به خاک رس بهرا

هنگامی که روغن ضایعاتی به عنوان یک افزودنی به خاک رس بهرا افزوده شد، همان‌طور که از مقادیر نسبتا کم وزن مخصوص نمونه‌های سنگدانه تولید شده پیدا بود، اثر بیشتر تورم‌زایی ملاحظه شد. با وجود این اکثر سنگدانه‌های به دست آمده ترک‌های انبساطی نشان دادند که در شکل ۱-۲۹ نشان داده شده است. این موضوع یا به علت جمع‌شدگی جزء به جزء در اثر خشک شدن در مرحله خشت است یا به علت مقدار بیشتر روغن است که باعث پیدایش مقدار زیادی گاز می‌شود[٤].

این ضرورت انجام آزمایش‌های بیشتر با مقدار کمتر افزودنی روغن ضایعاتی و انجام اقدامات احتیاطی برای کنترل جمع‌شدگی خشک شدن سنگدانه شکل یافته / گلوله شده را نشان می‌دهد [٤].

شکل ۱-۲۹ . سنگدانه‌های تولید شده با افزودنی روغن ضایعاتی [٤]

۱-۷-۱۲. ساز و کار تورم

تورم لازم برای ساخت سبک‌دانه رس منبسط با محبوس شدن گازها به وسیله مذاب ویسکوز در دمای پخت مورد استفاده به وجود می‌آید. چنانچه شیشه فراوانی به سبب تغییرات کانی‌شناسی در مواد رسی در زمان رسیدن به حد بالاتر پخت تشکیل نشود، هرگونه گاز تشکیل شده از میان ساختار تخلخل باز فرار خواهد کرد. در این مورد، می‌توان انتظار داشت که کلسیت ($CaCO_3$) موجود در خاک رس بهرا (شکل ۱-۲۵ را ببینید) نه تنها

در طـی پخت CO2 تولید کند، بلکه CaO تولید شـده نیز به عنـوان یک گدازآور عمل کند و تشـکیل شیشه در توده رس در دماهای نسـبتاً پایین را تسریع بخشد. به علت مقدار کافی کلسـیت موجود، این عمل گدازآوری مطلوب برای جبران مقدار رس کم نامطلوب به اندازه کافی موثر بود [٤].

به منظور تایید واقعیت بالا، یک نمونه منفرد از خاک رس در دمای ۱۲۰۰ °C پخته شد. نمونه تبدیل به یک سنگدانه متراکم سینتر شده با وزن مخصوص بالاتر ۱/۸۵ شد که احتمالاً به علت تشکیل شیشه زیاد در دمای بالاتر پخت است [٤].

۱-۷-۱۳. جمع‌بندی بررسی‌ها

بر اساس بررسی انجام شده در این تحقیق، نتایج زیر را می‌توان به دست آورد.

۱- خـاک رس بهرا را می‌تـوان به عنوان ماده اولیه برای تولید سـبک‌دانه دارای وزن مخصـوص تقریبی ۱/۵ (که معمولا حد پذیرفته شـده برای تفکیک سـنگدانه‌های متراکم و سبک است)، با خاک اره به عنوان افزودنی به کار برد.

۲- روغـن ضایعاتـی هنگامـی که بـه عنوان افزودنی بـا خاک رس بـه کار می‌رود، سـنگدانه‌های به دسـت آمـده دارای وزن مخصوص بـاز هم کمتری هسـتند، با وجود این مشـخص شد شرایط کنترل شده در خشـک کردن برای جلوگیری از ترک‌خوردگی و جمع شدگی لازم است [٤].

۳- پخـت همدمای بهینه برای تولید سـبک‌دانه رس بهرا دمای ۹۵۰ °C با مدت زمان قرارگیری در دمای حداکثر ۱۲۰ دقیقه است.

٤- پخت ناگهانی در دمای ۱۰۸۰ °C باعث تولید سـنگدانه‌ها با وزن مخصوص کمتر از آنچه از طریق پخت همدمای آهسته به دست می‌آید، می‌شود [٤].

فصل دوم

استانداردهای سبک‌دانه رس منبسط

در این فصل به تعدادی از استانداردهای روش آزمون و ویژگی‌های فرآورده‌های رس منبسط پرداخته می‌شود. اولین استاندارد با عنوان «ویژگی‌های سبک‌دانه رس منبسط اجرا شده درجا» مربوط به فرآورده‌های فله‌ای قبل از نصب است.

۲-۱. استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۱۰۵۹

مصالح ساختمانی- فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی- سبک‌دانه رس منبسط اجرا شده درجا - قسمت اول: فرآورده‌های فله‌ای قبل از نصب - ویژگی‌ها [۵و۶]

تعیین ویژگی‌ها برای سبک‌دانه رس منبسط به عنوان فرآورده فله‌ای قبل از نصب، مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۱-۱۱۰۵۹ با عنوان «مصالح ساختمانی- فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی- سبک‌دانه رس منبسط اجرا شده درجا - قسمت اول: فرآورده‌های فله‌ای قبل از نصب - ویژگی‌ها انجام می‌شود.

این استاندارد الزامات برای دو گروه مختلف کاربرد را ارائه می‌دهد:

۱. عایق‌کاری بام، سقف و کف

۲. عایق‌کاری کف زمین صلب زیر ساختمان

اختلاف بین دو کاربرد در الزام، به خاطر ارتفاع مکش آب است. جسم عایق در کف زمین صلب زیر ساختمان نباید ارتفاع مکش آبی بیشتر از ۷۵ میلی‌متر داشته باشد، در حالی که برای ارتفاع مکش آب هنگامی که فرآورده‌ها به عنوان عایق‌کاری بام، سقف و کف مورد استفاده قرار می‌گیرند، الزامی وجود ندارد.

الزامات برای تمام کاربردها

مقاومت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی: مقاومت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی باید در دمای متوسط مرجع ۱۰_{oC} اندازه‌گیری شود. مقادیر اندازه‌گیری شده باید با سه رقم معنی‌دار بیان شود. مقاومت حرارتی اعلام شده، R_D، باید از ضخامت عایق و ضریب هدایت حرارتی، λ_D محاسبه شود. مقدار ضریب هدایت حرارتی λ_D باید با تقریب ۰/۰۰۱ W/m.K رو به بالا گرد و در ترازهایی با فواصل ۰/۰۰۱W/m.K بیان شود. مقدار مقاومت حرارتی، R_D، باید با تقریب ۰/۰۵ m^2K/W رو به پایین گرد و در ترازهایی با فواصل ۰/۰۵ m^2K/W اعلام شود.

چگالی انبوهی فله: چگالی انبوهی فله باید در محدوده ٪۱۵± مقدار اعلام شده توسط تولیدکننده باشد. مقدار چگالی باید به kg/m^3 بیان شود. چگالی انبوهی فله خشک برای فرآورده‌های مختلف رس منبسط معمولاً در محدوده $_{kg/m3}$ ۸۰۰- $_{kg/m3}$ ۱۵۰ قرار دارد.

توزیع اندازه دانه: اندازه ذره باید به وسیله دو اندازه الک مشخص شود که مقدار اصلی دانه‌ها بین آنها قرار می‌گیرد. اندازه‌ها باید به میلی‌متر بیان شوند. اندازه سبک‌دانه برای فرآورده‌های مختلف رس منبسط معمولاً در محدوده صفر میلی‌متر تا ۳۲ میلی‌متر خواهد بود. مقدار مواد کوچک‌تر از اندازه نباید بیشتر از ۱۵ درصد وزنی باشد. مقدار مواد بزرگ‌تر از اندازه نباید بیشتر از ۱۰ درصد وزنی باشد.

واکنش در برابر آتش: سبک‌دانه رس منبسط به عنوان فرآورده طبقه A گروه‌بندی می‌شود.

الزامات برای کاربردهای ویژه

مقاومت در برابر خردشدگی باید به N/mm^2 بیان شود. اعلام مقاومت در برابر خردشدگی فقط هنگامی مورد نیاز است که فرآورده تحت شرایط بارگذاری‌شده استفاده می‌شود.

نشست برای سبک‌دانه رس منبسط ناچیز است و نیازی به اندازه‌گیری ندارد.

سبک‌دانه رس منبسط دارای ساختاری باز است که در برابر بخار آب بسیار نفوذپذیر است. مقدار اعلام شده برای ضریب مقاومت در برابر نفوذ بخار آب، μ، را می‌توان ۱ فرض کرد.

ارتفاع مکش آب باید به میلی‌متر بیان شود و در صورت نیاز باید توسط تولیدکننده اعلام شود. اعلام ارتفاع مکش آب فقط هنگام کاربرد فرآورده در کف زمین صلب مورد نیاز است و در این مورد باید کمتر از ۷۵ میلی‌متر باشد.

دو استاندارد با عناوین «سنگدانه- سبک‌دانه برای بتن، ملات و گروت- ویژگی‌ها» و «سنگدانه- خواص فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌ها - تعیین ارتفاع مکش آب- روش آزمون» با همکاری تولیدکنندگان سبک‌دانه رس منبسط در کشورو نیز استادان دانشگاه تهران تدوین شد. متن استانداردهای مذکور در ادامه این گزارش آمده است. علاوه بر این پیش‌نویس استاندارد «مصالح ساختمانی- فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی- سبک‌دانه رس منبسط اجرا شده درجا - بخش دوم: فرآورده‌های فله‌ای بعد از نصب - ویژگی‌ها» که بعد از دو استاندارد مذکور آمده، تهیه شده که مراحل اخذ شماره ملی را طی خواهد کرد.

۲-۲ . استاندارد ملی ایران شماره ۱- ۱۴۸۷۵ سال ۱۳۹۱

سنگدانه - سبک‌دانه‌ها برای بتن، ملات و گروت- ویژگی‌ها [۷ و۸]

هدف از تدوین این استاندارد تعیین الزامات سبک‌دانه‌ها و سبک‌دانه‌های پرکننده به دست آمده از طریق فرآوری مواد طبیعی، مصنوعی یا بازیافتی و مخلوط‌هایی از این سنگدانه‌ها برای استفاده در بتن، ملات و گروت در ساختمان‌ها، جاده‌ها و کارهای مهندسی عمران است.

این استاندارد سبک‌دانه‌هایی با منشاء معدنی دارای چگالی دانه‌های معادل یا کمتر از ۲۰۰۰ kg/m^3 یا چگالی‌های انبوهی فله‌ای معادل یا کمتر از ۱۲۰۰ kg/m^3 را در بر می‌گیرد که شامل موارد زیر است:

- سنگدانه‌های طبیعی؛
- سنگدانه‌های تولید شده از مواد طبیعی و/ یا از محصولات فرعی فرآیندهای صنعتی؛
- محصولات فرعی فرآیندهای صنعتی؛
- سنگدانه‌های بازیافت شده

الزامات مشخص شده در این استاندارد ممکن است مربوط به همه انواع سبک‌دانه‌ها نباشد. برای کاربردهای ویژه، این الزامات و رواداری‌ها را می‌توان برای مصرف نهایی وفق داد. الزامات در این استاندارد بر اساس تجربه در مورد انواع سنگدانه با یک الگوی مشخص کاربرد است. هنگام در نظر گرفتن استفاده از سنگدانه‌ها از منابعی بدون هیچ الگوی کاربردی، مانند سنگدانه‌های بازیافت شده و سنگدانه‌های به دست آمده از برخی محصولات فرعی صنعتی، باید دقت شود. چنین سنگدانه‌هایی که باید با همه الزامات این استاندارد مطابقت داشته باشند، می‌توانند دارای خصوصیات دیگری باشند که برای عموم انواع سنگدانه‌ها با الگوی کاربرد مشخص الزامی نیست. در صورت نیاز می‌توان از تمهیداتی در محل کاربرد برای ارزیابی مناسب بودن آنها استفاده کرد.

الزامات فیزیکی

ضرورت انجام آزمون و اعلام همه خواص مشخص شده باید مطابق کاربرد ویژه در مصرف نهایی یا منشاء سنگدانه محدود شود. در صورت لزوم، آزمون‌های مشخص شده باید برای تعیین خواص فیزیکی متناسب انجام شود.

۱. چگالی انبوهی فله؛

۲. چگالی دانه‌ها؛

۳. اندازه سنگدانه؛

٤. دانه‌های زیراندازه؛

٥. دانه‌های بیش‌اندازه؛

٦. دانه‌بندی؛

٧. شکل ذرات؛

٨. ریزدانه‌ها؛

٩. جذب آب؛

١٠. مقدار آب؛

١١. مقاومت در برابر خردشدگی؛

١٢. درصد دانه‌های شکسته؛

١٣. مقاومت در برابر فروسایی؛

١٤. مقاومت در برابر یخ زدن و آب شدن.

الزامات شیمیایی

١. کلراید؛

٢. گوگرد موجود در ترکیبات؛

٣. سولفات قابل حل در اسید؛

٤. گوگرد کل؛

٥. افت وزن در اثر حرارت (فقط برای خاکسترها) ؛

٦. آلاینده‌های آلی؛

٧. واکنش‌زایی قلیایی- سیلیس سبک‌دانه‌های طبیعی.

۲-۳ . استاندارد ملی ایران شماره ۱۰-۱۴۸۷۴
سنگدانه - خواص فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌ها - تعیین ارتفاع مکش آب
روش آزمون

هدف از تدوین این استاندارد، ارائه روش تعیین ارتفاع مکش آب سنگدانه‌ها در تماس مستقیم با سطح آزاد آب است. این استاندارد برای سنگدانه‌های طبیعی و مصنوعی کاربرد دارد. بالا آمدن رطوبت از میان لایه سنگدانه زیرسطح زمین ممکن است مشکلات رطوبتی برای ساختمان ایجاد کند. اگر ضخامت لایه سنگدانه بیشتر از ارتفاع مکش آب سنگدانه مورد استفاده باشد، این لایه، لایه قطع‌کننده آب در نظر گرفته می‌شود.

سنگدانه خشک در داخل یک استوانه در تماس با سطح آزاد آب قرار می‌گیرد و می‌گذارند تا سنگدانه از طریق مکش، آب جذب کند. زمانی که تعادل ایجاد شد، ارتفاع مکش آب توسط اندازه‌گیری تغییرات مقدار رطوبت در بخش مورد آزمون تعیین می‌شود [۹ و ۱۰].

۲-۴ . پیش‌نویس استاندارد مصالح ساختمانی- فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی- سبک‌دانه رس منبسط اجرا شده درجا - بخش دوم: فرآورده‌های فله‌ای بعد از نصب - ویژگی‌ها [۱۱]

هدف از تدوین این استاندارد تعیین ویژگی‌های فرآورده‌ها ی سبک‌دانه رس منبسط فله‌ای(LWA)[1] نصب شده در بام، سقف، کف طبقه و کف زمین است و بخش دوم آن، ویژگی فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی نصب شده را در بر می‌گیرد. این استاندارد بررسی‌ها و آزمون‌های مورد استفاده برای اعلام‌های انجام شده توسط نصاب فرآورده را نیز شامل می‌شود.

این استاندارد تراز مورد نیاز یک خاصیت معین برای آن که یک فرآورده در کاربرد خاصی مناسب باشد را مشخص نمی‌کند. ترازهای مورد نیاز برای یک کاربرد معین را باید در مقررات یا استانداردهایی که با این استاندارد مغایرت ندارند یافت.

1- Expanded clay lightweight aggregate

ویژگی‌ها

نصاب باید از فرآورده عایقی که مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۱۰۵۹ است، استفاده کند. همچنین باید مطابق رهنمودهای تولیدکننده برای تعیین مناسب بودن کاربرد فرآورده، ساختمان را بازرسی کند.

رهنمودهایی برای نصب

برای نصب فرآورده آیین‌نامه‌های ملی، استانداردهای ملی، مقررات ملی یا ضوابط محلی ممکن است وجود داشته باشد. در نبود آیین‌نامه‌های ملی، استانداردهای ملی، مقررات ملی یا ضوابط محلی اطلاعات فنی تولیدکننده باید همراه با روش ارائه شده پیروی شود [۱۱].

مقاومت حرارتی اعلام شده عایق بعد از نصب، R_D

مقاومت حرارتی، R_D، باید به وسیله اندازه‌گیری ضخامت عایق نصب شده همراه با ضریب هدایت حرارتی اعلام شده، λ_D، تعیین شود.

ضخامت اعلام شده عایق حرارتی بعد از نصب، dm

مقدار متوسط ضخامت عایق نصب شده، d_m، نباید کمتر از ضخامت تجویز شده توسط طراح باشد. هیچ مقدار منفردی نباید کمتر از ۸۰ درصد مقدار مشخص شده باشد.

مقدار رطوبت اعلام شده

هنگامی‌که مقدار رطوبت مورد نیاز است باید مطابق استاندارد مربوط اندازه‌گیری شده و برحسب درصد وزنی اعلام شود. اعلام مقدار رطوبت در مواقعی که فرآورده‌ها در تماس با مصالح چوبی مانند بین شاهتیرهای زیر شیروانی و تیرهای چوبی قرار گیرد الزامی است [۱۱].

نشست

نشســت فرآورده‌های ســبک‌دانه‌های رس منبسط ناچیز اســت و بنابراین هیچ روش اندازه‌گیری مشخص نشده است.

تراکم

نصاب باید اطمینان حاصل کند که درجه تراکم مشخص شده توسط مشتری یا طراح به دست می‌آید. درجه تراکم برحسب درصد (C_p) را باید با استفاد از معادله (۱) محاسبه کرد:

$$Cp= 100\times(d_{m,.b}- d_{m,a})/d_{m,.b} \quad (۱$$

که در آن:

$d_{m,b}$: میانگین ضخامت عایق نصب شده قبل از متراکم کردن برحسب m

$d_{m,a}$: میانگیــن ضخامت عایق حرارتی نصب شــده بعد از متراکم کردن برحســب m است.

در صورت اختلاف نظر، تعیین چگالی و درجه تراکم عایق حرارتی نصب شــده باید توســط روش ارائه شده در این استاندارد تعیین شــود. درجه تراکم نمونه‌وار ۵ تا ۱۵ درصد برای سنگدانه‌های گرد شده و مقدار بیشتری برای سایر انواع شکل است [۱۱].

محاسبه میانگین ضخامت عایق حرارتی نصب شده

میانگین ضخامت عایق حرارتی نصب شده $d_{m,a}$، بعد از تراکم چنانچه تجویز شده باشد، نباید کمتر از ضخامت طرح عایق حرارتی باشــد. حداقل پنج آزمون اندازه‌گیری ضخامت در نقاط مختلف برای هر m^2 ۱۰۰ مســاحت عایق حرارتی باید انجام شود. یک پین یا خط‌کش مدرج برحسب میلی‌متر باید معمولاً برای این اندازه‌گیری‌ها استفاده شود. در صورت اختلاف نظــر ضخامت عایق حرارتی نصب شــده باید مطابق روش صفحه و پین اســتاندارد مربوط اندازه‌گیری شود [۱۱].

محاسبه مقاومت حرارتی عایق حرارتی بعد از نصب، R_D

مقاومت حرارتی اعلام شـــده عایق حرارتی بعد از نصب، R_D، برای میانگین ضخامت عایق حرارتی بعد از متراکم کردن باید با استفاده از معادله (۲) محاسبه شود:

$$R_D=d_{m,a}/\lambda_D \qquad (۲)$$

که در آن:

$d_{m,a}$: میانگیـــن ضخامت اعلام شـــده عایق حرارتی نصب شـــده بعـــد از متراکم کردن برحسب m

λ_D: ضریب هدایت حرارتی اعلام شده برحسب W/(mK) (مطابق اعلام تولیدکننده)

مقاومت حرارتی باید به‌صورت کمترین مقدار گرد شـــده که بیشتر از دو رقم اعشاری یا سه رقم معنی‌دار نداشته باشد اعلام شود [۱۱].

اعلام نصاب

نصاب باید به مشـــتری اعلام کند که کار مطابق الزامات این اســـتاندارد با اســـتفاده از فرآورده عایق حرارتی مطابق استاندارد مربوط انجام شده است. نصاب باید حداقل اطلاعات زیر را اعلام کند:

– نام تجاری و کد مشخصه فرآورده عایق حرارتی بعد از نصب؛

– ایـــن موضـــوع که میانگین ضخامت اعلام شـــده عایق حرارتی نصب شـــده کمتر از ضخامت طراحی نیست؛

– مقاومت حرارتی اعلام شده، R_D، مطابق بند ۵–۲ گرد شده به سوی پایین با تقریب ۰/۰۵ $m^2.K/W$؛

– حجم کل مصالح مورد استفاده برحسب m^3؛

– تاریخ نصب [۱۱].

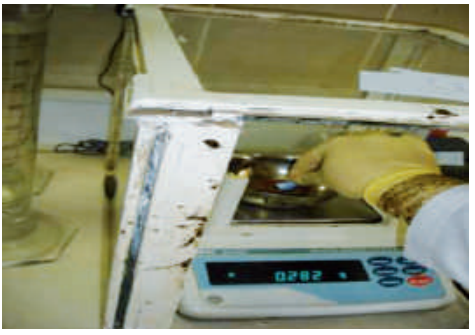
فصل سوم

تولید سبک‌دانه رس منبسط در ایران

سبک‌دانه رس منبسط در داخل کشور توسط کارخانه‌های لیکا و عمرن پارس تولید می‌شود. کارخانه لیکا در شهرستان مامونیه و کارخانه عمران پارس در شهر سیرجان واقع شده است. محصولات این کارخانه‌ها سبک‌دانه رس منبسط شده در اندازه‌های ٤-٠ میلی‌متر، ١٠-٤ میلی‌متر، ٢٥-١٠میلی‌متر، ٢٥-٠ میلی‌متر(مخلوط) است. برای این تحقیق از خط تولید وآزمایشگاه کارخانه‌ها بازدید به عمل آمد واز کلیه محصولات سبک‌دانه و نیز ماده اولیه (خاک رس معدن) نمونه‌برداری شد و در آزمایشگاه مصالح مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی آزمون‌های لازم انجام شد. در ادامه به روند تولید و کنترل کیفیت در کارخانه‌های مذکور پرداخته می‌شود.

ماده اولیه تولید سبک‌دانه ، خاک رس است که از معادن محلی تامین می‌شود. هنگام برداشت خاک از معدن، باطله‌های خاک (خاک آلی) به محل اولیه برگردانده می‌شود. قبل از ورود خاک رس به کارخانه با انجام آزمون‌های لازم، مناسب بودن ماده اولیه جهت ورود به خط تولید کارخانه مورد تایید قرار می‌گیرد. آزمون به این ترتیب انجام می‌شود که نمونه خاک آسیاب می‌شود. بعد از مخلوط کردن آن با مقدار مشخصی آب و افزودن یک درصد

ماده آلی (مازوت) کاملاً ورز داده می‌شـود. سـپس گرانول‌هایی به قطر حدود یک سانتی‌متر به صورت دسـتی تهیه می‌شـود که پس از خشـک شـدن در گرمخانه، به مدت ۵ دقیقه در دمای ۱۱۳۰ درجه سلسـیوس در کوره قرار می‌گیرد. سـپس چگالی سبک‌دانه آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شـود. چنانچه چگالی انبوهی کمتر از kg/m^3 ۲۰۰ باشد، دپو مورد تایید واحد کنترل کیفی برای خط تولید است.



شکل۳-۱ . افزودن آب‌ومازوت به نمونه آزمایشگاهی‌خاک

شکل۳-۲. مرحله ورز دادن نمونه

شکل۳-۳. گرانول‌های آزمایشگاهی

شکل ۳-٤. پخت گرانول‌های آزمایشگاهی در کوره

خاک رس پس از حمل به محل کارخانه، در انبار مواد اولیه تخلیه و نگهداری می‌شود. بهترین مدت زمان ماندگاری خاک در انبارها دو سال است.

شکل ۳-۵ .دپوی ماده اولیه

در شـــروع خط تولید، خاک با رطوبت ۱۰ درصد جهت مخلوط شـــدن و آسیاب شدن وارد مخلوط‌کن می‌شـــود. سپس توسط نوار نقاله وارد آسیاب غلتکی می‌شود. جهت افزایش رطوبت خاک به میزان ۲۰ تا ۲۵ درصد وزنی به آن آب اضافه می‌شـــود. در مرحله بعدی به خاک مرطوب و آســـیاب شـــده حدود یک درصد مازوت اضافه می‌شود. گل مخلوط شده با مازوت وارد آسیاب والس شده تا خوب ورز داده و کاملاً آسیاب شود. مواد پس از خروج از آســـیاب والس توسط نوار نقاله وارد دستگاه اکسترودر می‌شوند. در این دستگاه مجدداً عمل مخلوط و پرس‌کردن گل صورت می‌گیرد.

شکل۳-٦ .مخلوط‌کن- کلوخ‌شکنی و آسیاب اولیه شکل

۳-۷ .آسیاب غلتکی- افزودن آب به خاک

شکل۳-۸. افزودن مازوت به خاک مرطوب

شکل۳-۹. آسیاب والس- ورز دادن گل

گل مخلوط شـــده با فشار از قالب اکســـترودر خارج می‌شود و به صورت ماکارونی با قطر ۱۰ الی ۱۲ میلی‌متر و طول نامشـــخص در می‌آید. رطوبت گرانول خارج شده از دستگاه اکسترودر ۲۸ تا ۳۰ درصد است. این گرانول‌ها وارد تونل خشک‌کن با طول ۱٤ متر و دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس می‌شوند و رطوبت آنها به ۸ تا ۱۲ درصد کاهش می‌یابد.

کارخانه لیکا

کارخانه عمران پارس

شکل۳-۱۰. خروج ماکارونی از اکسترودر

پس از این مرحله گرانول‌ها به وســـیله الک به دو گروه با اندازه بزرگ‌تر از ۳ میلی‌متر و کوچک‌تر از ۳ میلی‌متر تقســـیم و در ســـیلوهای جداگانه نگهداری می‌شـــوند. گرانول‌های بـــا اندازه کمتـــر از ۳ میلی‌متر به خط تولید بازگردانده می‌شـــوند و گرانول‌های بزرگ‌تر از ۳ میلی‌متر توسط بالابرها جهت انبساط به کوره منتقل می‌گردند.

شکل۳-۱۱ . سرند گرانول‌ها بعد از مرحله خشک شدن

تغذیه کوره توسط فیدر لرزان با سرعت مشخص و قابلیت برنامه‌ریزی صورت می‌گیرد. غبـــار گاز کوره در دو مرحله توســـط فیلترهـــای مختلف گرفته و مجدد بـــه خط بازگردانده می‌شود.

گرانول‌ها وارد کوره با دمای آغازین حدود ۱۰۰ درجه سلســـیوس می‌شوند. زمان طی مســـیر کل کوره تا دمای نهایی ۱۱۵۰ درجه سلســـیوس، یک ســـاعت است. انبساط کامل در دمای ۱۱۵۰ درجه سلســـیوس صورت می‌گیرد. از گازهای خروجی کوره برای خشک کردن استفاده می‌شود. انبساط، ناشی از مواد آلی و آب موجود در ماده است.

کارخانه لیکا

کارخانه عمران پارس

شکل۳-۱۲. کوره

گرانول‌ها با دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس از کوره خارج و وارد خنک‌کن‌های ماهواره‌ای می‌شـــوند. چنانچه گرانول‌ها چگالی زیادی داشته باشند مراحل خنک شدن به خوبی صورت

نخواهـد گرفت. محصولات پس از دانه‌بندی در سـیلوهای مخصوص نگهداری می‌شـوند. سبک‌دانه‌ها به وسیله نوار نقاله به بخش دانه‌بندی توسط سرند منتقل می‌شوند و به سه گروه با اندازه بیشتر از ۱۰ میلی‌متر بین ٤ تا ۱۰ میلی‌متر و کمتر از ٤ میلی‌متر تقسیم می‌شود.

کارخانه لیکا

کارخانه عمران پارس

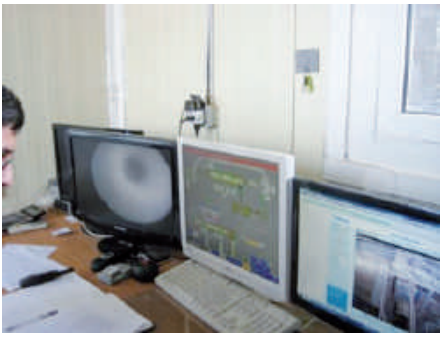
شکل۳-۱۳. دانه‌بندی محصول نهایی

کارخانه لیکا

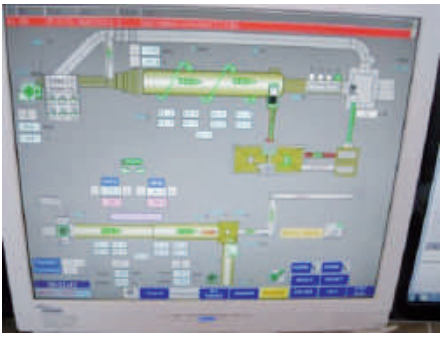
کارخانه عمران پارس

شکل ۳-۱٤. دپو سبک‌دانه تولید شده

در کلیـه مراحل تولیـد، از خاک نمونه‌بـرداری و آزمون پخت انجام می‌شـود. برای تعیین چگالی سـبک‌دانه‌های تولید شـده در فواصل زمانی یک ساعته، از خروجی خط تولید نمونه‌برداری می‌شود. گزارش آزمون را مدیر تولید و اپراتور کنترل می‌کند و در صورت تایید مقدار چگالی، محصول نهایی انبار می‌شـود. در قسـمت کنترل کیفیـت تمامی مراحل تولید سبک‌دانه توسط سیستم رایانه‌ای کنترل و بررسی می‌شود.



شکل۳-۱۵. مونیتورهای اتاق کنترل



شکل۳-۱٦. فلوشیت تولید

فصل چهارم

نتایج آزمون‌های انجام شده بر روی سبک‌دانه رس منبسط در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

آزمون‌ها در مورد سبک‌دانه‌های رس منبسط تولید شرکت‌های لیکا و عمران پارس و در چهار گروه با اندازه‌های ٤-٠ میلی‌متر، ١٠-٤ میلی‌متر، ٢٥-١٠میلی‌متر و ٢٥-٠ میلی‌متر (مخلوط) به شرح زیر انجام شده است.

٤-١. آزمون تعیین مقاومت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی

آزمون تعیین مقاومت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ٨٦٢١ «تعیین مقاومت حرارتی به روش جریان حرارت‌سنج فرآورده‌های با مقاومت حرارتی زیاد و متوسط» بر روی سبک‌دانه‌های رس منبسط انجام شد. در این روش نمونه خشک شده به طور دستی در سه مرحله در قاب اندازه‌گیری تا پر شدن آن ریخته شد. بعد از هر مرحله پر کردن قاب به میزان یک‌سوم، با دست سطح آن تراز شد تا سطح کاملاً در تماس با ورق‌های اتصال دستگاه ضریب هدایت حرارتی قرار گیرد. سپس قاب درون دستگاه قرار داده شد و ضریب هدایت حرارتی در دمای ١٠ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. مقدار مقاومت حرارتی با تقسیم ضخامت به ضریب هدایت حرارتی آزمونه محاسبه شد.

دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی

قاب اندازه‌گیری عایق‌های حرارتی فله‌ای

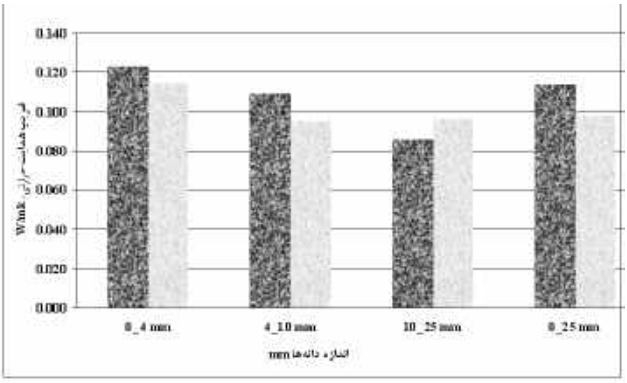
شکل٤-١ . تعیین ضریب هدایت حرارتی

در جدول٤-١ نتایج آزمون تعیین ضریب هدایت حرارتی بر روی سبک‌دانه‌های رس منبسط در چهار گروه با اندازه‌های ٤-٠ میلی‌متر، ١٠-٤ میلی‌متر، ٢٥-١٠میلی‌متر و ٢٥-٠ میلی‌متر(مخلوط) درج شده است.

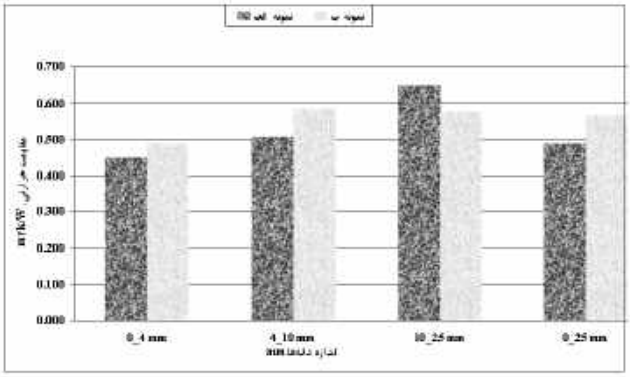
جدول٤-١ . نتایج آزمون تعیین مقاومت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی سبک‌دانه رس منبسط

اندازه سبک‌دانه (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)	ضریب هدایت حرارتی W/mK نمونه الف	مقاومت حرارتی m^2K/W نمونه الف	ضریب هدایت حرارتی W/mK نمونه ب	مقاومت حرارتی m^2K/W نمونه ب
٤-٠	٥٥/٦	٠/١٢٣٢	٠/٤٥	٠/١١٣٩	٠/٤٩
١٠-٤	٥٥/٦	٠/١٠٩٢	٠/٥١	٠/٠٩٥٠	٠/٥٨
٢٥-١٠	٥٥/٦	٠/٠٨٥٥	٠/٦٥	٠/٠٩٦٣	٠/٥٨
مخلوط	٥٥/٦	٠/١١٣٧	٠/٤٩	٠/٠٩٨٣	٠/٥٧
حداقل		٠/٠٨٥٥	٠/٤٥	٠/٠٩٥٠	٠/٤٩
حداکثر		٠/١٢٣٢	٠/٦٥	٠/١١٣٩	٠/٥٨
میانگین		٠/١٠٧٩	٠/٥٤	٠/١٠٠٩	٠/٥٥

در شکل‌های٤-٢ و٤-٣ به ترتیب نمودار ضریب هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی (در ضخامت ٥٥/٦ میلی‌متر) سبک‌دانه‌های رس منبسط در چهار گروه اندازه، نشان داده شده است.



شکل٤-٢ . نمودار ضریب هدایت حرارتی سبک‌دانه‌های رس منبسط

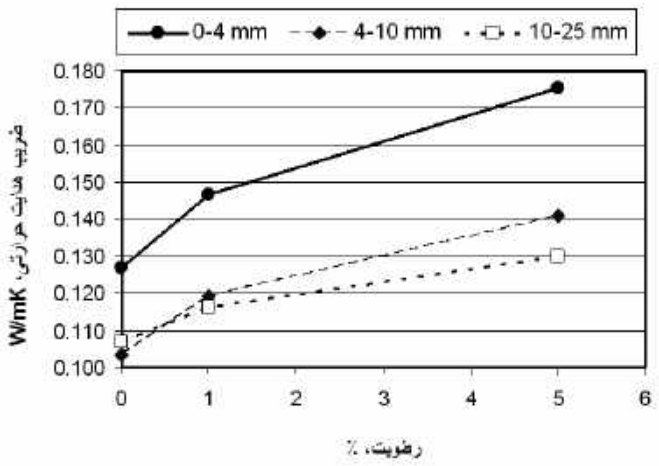


شکل ٤-٣. نمودار مقاومت حرارتی سبک‌دانه‌های رس منبسط

میانگین ضریب هدایت حرارتی سبک‌دانه رس منبسط تولیدی هر دو کارخانه حدود ۰/۱ W/mK به دست آمده است. این مقدار نشان‌دهنده خواص عایق‌کاری حرارتی مطلوب این فرآورده‌ها است. با توجه به اینکه ارتفاع قاب دستگاه ٥٥/٦ میلی‌متر است مقاومت حرارتی هر دو محصول حدود ۰/۵۵ m^2K/W می‌باشد. در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان آمده است که عایق حرارتی قابل استفاده در ساختمان به عایقی اطلاق می‌شود که دارای ضریب هدایت حرارتی کمتر یا مساوی ۰/۰٦٥ W/mK و مقاومت حرارتی مساوی یا بیشتراز ۰/۵ m^2K/W باشد. بنابراین مقدارمقاومت حرارتی برای عایق‌کاری حرارتی جدارهای خارجی با استفاده از این سبک‌دانه‌ها با ضخامت ٥٥/٦ میلی‌متر کافی نیست. برای آنکه مقاومت حرارتی به بیش از ۱ m^2K/W برسد، لازم است ضخامت عایق فله‌ای به بیش از ۱۱۰ میلی‌متر افزایش یابد.

٤-٢. آزمون اثر رطوبت بر ضریب هدایت حرارتی

هدف از انجام این آزمون تاثیر رطوبت بر مقدار ضریب هدایت حرارتی فرآورده عایق است. در این آزمون ابتدا ضریب هدایت حرارتی سبک‌دانه رس منبسط با اندازه‌های ٤-٠ میلی‌متر، ١٠-٤ میلی‌متر و٢٥-١٠میلی‌متر خشک شده در آون اندازه‌گیری شد. سپس طی دو مرحله رطوبت یک و ٥ درصد وزنی با اسپری و به طور یکنواخت به نمونه‌ها داده شد و بلافاصله نمونه در دستگاه جریان حرارت سنج قرار گرفت و اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی انجام شد. نتایج در شکل٤-٤ ارائه شده است.



شکل٤-٤. نمودار ضریب هدایت حرارتی سبک‌دانه رس منبسط در برابر رطوبت

عایق‌کاری حرارتی با استفاده از خاصیت عایق بودن هوا صورت می‌گیرد بدین صورت که هوای خشک ساکن عایق بسیار خوبی است و چنانچه در فضاهای کوچک مصالح عایق‌کاری و از جمله سبک‌دانه رس منبسط محبوس شود و همرفت به علت کوچکی فضا به حداقل برسد، از انتقال گرما جلوگیری می‌کند. اما آب هادی بسیار خوبی است و وجود آن دراین فضاها بازدهی عایق را کم می‌سازد. شکل ٤-٤ نشان می‌دهد که با افزودن ١ درصد رطوبت، ضریب هدایت حرارتی ١٠ تا ١٥ درصد افزایش می‌یابد. اضافه کردن ٥ درصد رطوبت به سبک‌دانه رس منبسط باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی به میزان ٢٢ تا ٣٨ درصد شد.

٤-٣. آزمون تعیین چگالی انبوهی فله‌ای

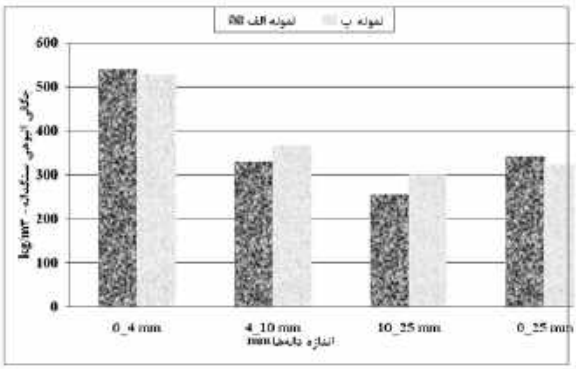
آزمون تعیین چگالی انبوهی فله‌ای بر اساس استاندارد ASTM C29:2009 برروی سبک‌دانه‌های رس منبسط انجام شد. در این آزمون میانگین چگالی انبوهی سنگدانه در حالت متراکم یا فله‌ای و فضاهای خالی بین دانه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از روش میله ضربه‌زن، پیمانه با حجم مشخص شده را طی سه مرحله از سنگدانه پر کرده و هر بار از میله ضربه‌زن با اعمال ٢٥ ضربه برای توزیع یکسان سنگدانه در پیمانه استفاده می‌شود. با اندازه‌گیری جرم سنگدانه و مشخص بودن حجم پیمانه، چگالی انبوهی محاسبه می‌شود. این آزمون سه بار تکرار و مقدار میانگین اعلام می‌شود.

شکل ٤-٥. اندازه‌گیری چگالی انبوهی سبک‌دانه

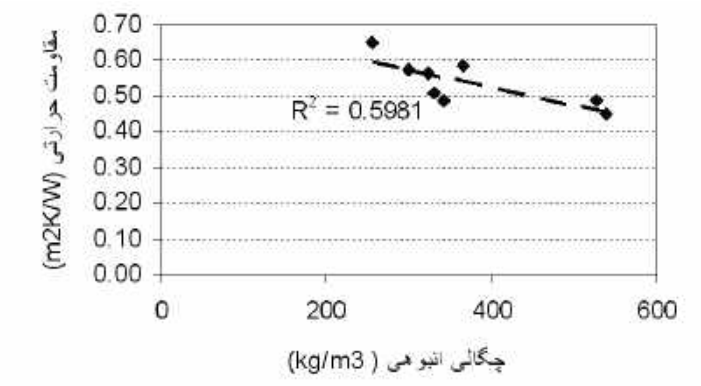
در جدول ٤-٢ نتایج آزمون تعیین چگالی انبوهی بر روی سبک‌دانه‌های رس منبسط در چهار گروه اندازه آمده است.

جدول ٤-٢ . نتایج آزمون تعیین چگالی انبوهی سبک‌دانه رس منبسط

اندازه سبک‌دانه (میلی‌متر)	میانگین چگالی انبوهی سبک‌دانه kg/m³ – نمونه الف	میانگین چگالی انبوهی سبک‌دانه kg/m³ – نمونه ب
٠-٤	٥٤٠/١٨	٥٢٧/٧٥
٤-١٠	٣٣٠/٢٥	٣٦٥/٠٨
١٠-٢٥	٢٥٦/٤٨	٢٩٩/٠٣
مخلوط	٣٤٢/٣٢	٣٢٣/١٣



شکل٤-٦ . نمودار چگالی انبوهی سبک‌دانه رس منبسط



شکل٤- ٧ . رابطه مقاومت حرارتی و چگالی انبوهی سبک‌دانه رس منبسط

شکل‌های٤-٦ و٤-٧ نشان می‌دهد که همبستگی ضعیفی بین چگالی انبوهی و مقاومت حرارتی این سبک‌دانه‌ها وجود دارد (حدود ٠/٦). با افزایش چگالی، مقاومت حرارتی کاهش یافته یعنی افزایش فاز جامد به دلیل زیاد شدن چگالی که نقش مثبتی در عایق‌کاری ندارد، ضریب هدایت حرارتی را زیاد کرده است. بنابر استاندارد ملی ایران شماره ١-١١٠٥٩ چگالی انبوهی فله خشک برای فرآورده‌های مختلف رس منبسط معمولاً در محدوده ١٥٠ kg/m^3 تا ٨٠٠ kg/m^3 قرار دارد. چگالی انبوهی فله خشک فرآورده‌های هر دو کارخانه در محدوده مجاز استاندارد قرار دارند.

برای فرآورده‌های منفرد، چگالی انبوهی فله در فواصل کوچک اعلام می‌شود. همبستگی بین ضریب هدایت حرارتی و چگالی انبوهی فله/توزیع اندازه دانه‌ها، مخصوص هر محصول و هر تولیدکننده وجود دارد که می‌توان آن را برای آزمون غیرمستقیم به کار برد [٥و٦].

٤-٤. آزمون تعیین توزیع اندازه دانه‌ها

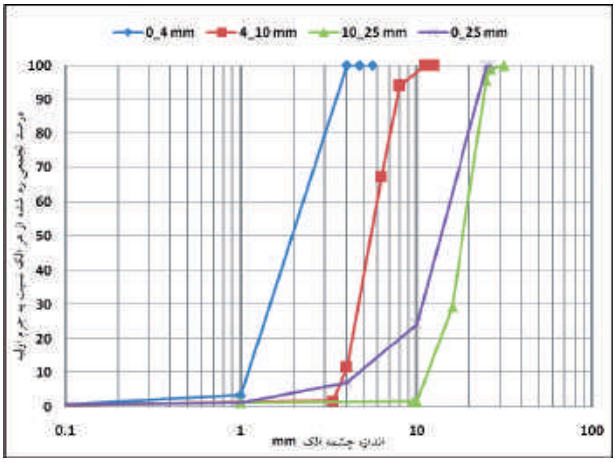
آزمون توزیع اندازه دانه بر اساس استاندارد EN 933-1:1997 برروی سبک‌دانه‌های رس منبسط انجام شد. در این روش جرم مشخصی از سنگدانه‌ها پس از شسته شدن و عبور از الک ٦٣ میکرون و خشک شدن، با یکسری الک متناسب با اندازه دانه‌ها، الک می‌شوند. درصد مقدار مواد باقیمانده بر روی الک‌ها به ماده اولیه به صورت دانه‌های زیراندازه و بیش‌اندازه محاسبه شده و نمودار درصد وزنی و اندازه دانه ترسیم می‌شود.

شکل ٤-٨ دستگاه شیکر و دانه‌بندی سبک‌دانه‌ها

در جدول ٤-٣ و شکل ٤-٩ آزمون دانه‌بندی سبک‌دانه‌های رس منبسط نمونه الف در چهار گروه اندازه آمده است.

جدول٤-٣. نتایج آزمون دانه‌بندی سبک‌دانه رس منبسط نمونه الف

اندازه سبک‌دانه (میلی‌متر)	دانه‌های زیراندازه درصد	دانه‌های بیش‌اندازه درصد
٠-٤	٠/٠٠	٠/٠٨
٤-١٠	١١/٥١	٠/٠٠
١٠-٢٥	١/٥٨	٤/٣١
مخلوط	٠/٠٠	٠/٢٩

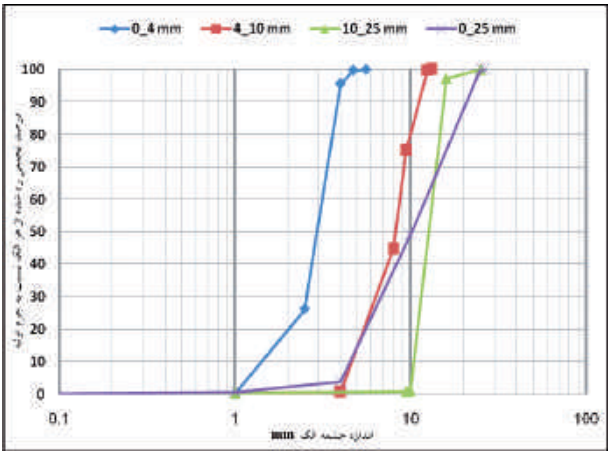


شکل ٤-٩ . نمودار دانه‌بندی سبک‌دانه‌های رس منبسط در چهار گروه - نمونه الف

در جدول ٤-٤ و شـــکل ٤-١٠ نتایج آزمون دانه‌بندی سبک‌دانه رس منبسط نمونه ب در چهار گروه بـــا اندازه‌های ٤-٠ میلی‌متر، ١٠-٤ میلی‌متر، ٢٥-١٠میلی‌متر و ٢٥-٠ میلی‌متر (مخلوط) آمده است.

جدول٤-٤ . نتایج آزمون دانه‌بندی سبک‌دانه رس منبسط نمونه ب

اندازه سبک‌دانه (میلی‌متر)	دانه‌های زیراندازه درصد	دانه‌های بیش‌اندازه درصد
٤-٠	٠/٠٠	٤/١٣
١٠-٤	٠/٧٦	٠/١٣
٢٥-١٠	٠/٩٦	٠/٠٠
مخلوط	٠/٠٠	٠/٠٠



شکل ٤-١٠. نمودار دانه‌بندی سبک‌دانه‌های رس منبسط در چهار گروه - نمونه ب

بنابر اســتاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۱۰۵۹ اندازه سبک‌دانه برای فرآورده‌های مختلف رس منبســط معمولاً در محدوده صفر میلی‌متر تا ۳۲ میلی‌متر خواهد بود. برای فرآورده‌های منفرد، اندازه دانه‌ها در محدوده‌های کوچک اعلام می‌شود.

همبســتگی بین ضریــب هدایت حرارتی و توزیع اندازه دانه‌هــا / چگالی انبوهی فله، مخصوص هر محصول و هر تولیدکننده وجود دارد که می‌توان آن را برای آزمون غیرمستقیم به کار برد.

مقــدار مواد کوچک‌تر از اندازه (دانه‌های زیراندازه) نباید بیشــتر از ۱۵درصد وزنی و مقــدار مــواد بزرگ‌تر از اندازه (دانه‌های بیش‌اندازه) نباید بیشــتر از ۱۰ درصد وزنی باشــند [۵ و ٦].

نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد که دانه‌های زیراندازه و دانه‌های بیش‌اندازه سبک‌دانه‌های رس منبسط شده با ویژگی‌های استاندارد مطابقت دارند.

٤-٥. آزمون تعیین مقاومت در برابر خردشدگی

آزمون اندازه‌گیری مقاومت در برابر خردشــدگی بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱٤۸۷۵اسفند ۱۳۹۱ بر روی سبک‌دانه‌های رس منبسط انجام شد. در این روش نمونه آماده

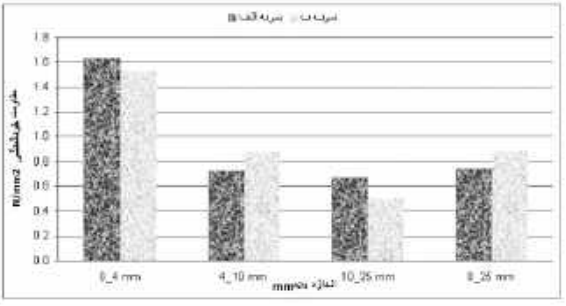
شـــده از سبک‌دانه در اســـتوانه فولادی مشخصی قرار داده می‌شود و به وسیله لرزاندن فشرده می‌شـــود. سپس یک پیســـتون برای یک فاصله معین به داخل آن استوانه فشار داده می‌شود و نیروی مورد نیاز اندازه‌گیری و به عنوان مقاومت در برابر خردشدگی گزارش می‌شود.

شکل ٤-١١. دستگاه تعیین مقاومت در برابر خردشدگی سبک‌دانه

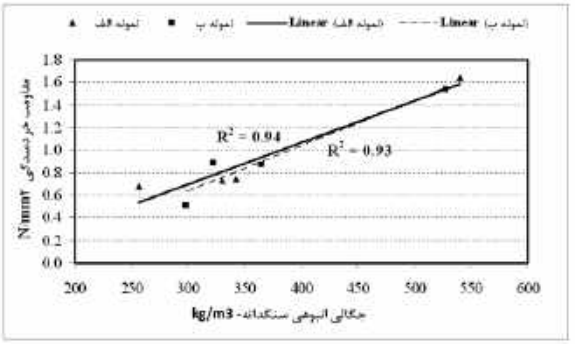
در جدول ٤-٥ نتایج آزمون مقاومت در برابر خردشـــدگی ســـبک‌دانه رس منبسط در چهار گروه اندازه ارائه شده است.

جدول٤-٥ . نتایج آزمون مقاومت در برابر خردشدگی سبک‌دانه رس منبسط

اندازه سبک‌دانه (میلی‌متر)	مقاومت خردشدگی آزمونه نمونه الف N/mm2	مقاومت خردشدگی آزمونه نمونه ب N/mm2
٠-٤	١/٦	١/٥٣
٤-١٠	٠/٧٣	٠/٨٧
١٠-٢٥	٠/٦٧	٠/٥٠
مخلوط	٠/٧٤	٠/٨٨



شکل ٤-١٢. نمودار ستونی مقاومت خردشدگی برای اندازه دانه‌های مختلف سبک‌دانه رس منبسط



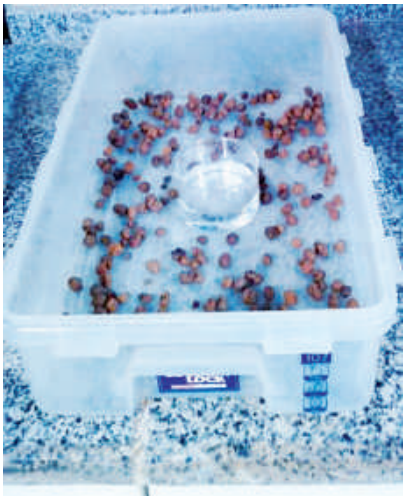
شکل ٤-١٣ . نمودار رابطه مقاومت خردشدگی و چگالی انبوهی سبک‌دانه رس منبسط

اعـلام مقاومت در برابر خردشـدگی فقط هنگامی مورد نیاز اسـت که فرآورده تحت شرایط بارگذاری‌شده استفاده می‌شود.

٤-٦. آزمون تعیین ارتفاع مکش آب

آزمون تعیین ارتفاع مکش آب بر اسـاس استاندارد ملی ایران شماره ۱۰-۱٤۸۷٤ اسفند سـال ۱۳۹۱ بر روی سبک‌دانه رس منبسط انجام شد. در این روش مقدار معینی از سبک‌دانه در ظرفی که از طریق لوله‌های موئینه در تشـت آب با سـطح آب مشـخص قرار دارد، جای می‌گیـرد. طی مدت زمان آزمون با توجه به مکش آب توسـط سـبک‌دانه وزن کل مجموعه افزایش می‌یابد. با اسـتفاده از رسم نمودار تغییرات مقدار رطوبت لایه‌های متفاوت سبک‌دانه داخل اسـتوانه نسبت به ارتفاع لایه سبک‌دانه ، ارتفاع مکش آب محاسبه می‌شود. همزمان با این آزمایش جذب هیگروسـکوپی سـبک‌دانه نیز اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمون جذب رطوبت حاصل از محلول سـولفات پتاسیم اشباع در یک محفظه سربسته توسط سبک‌دانه از طریق توزین نمونه قبل و بعد از آزمون قابل محاسبه است.

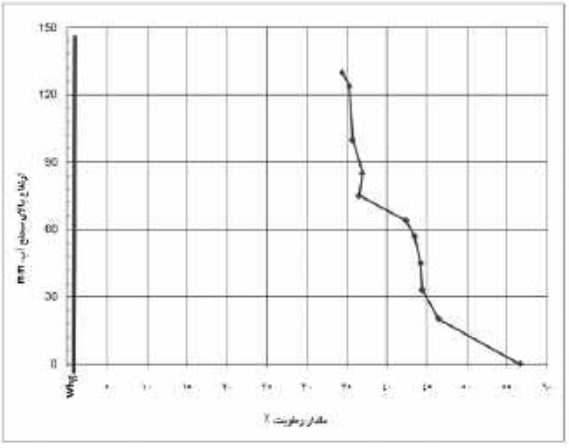
دستگاه مکش آب



ظرفیت جذب آب هیگروسکوپی

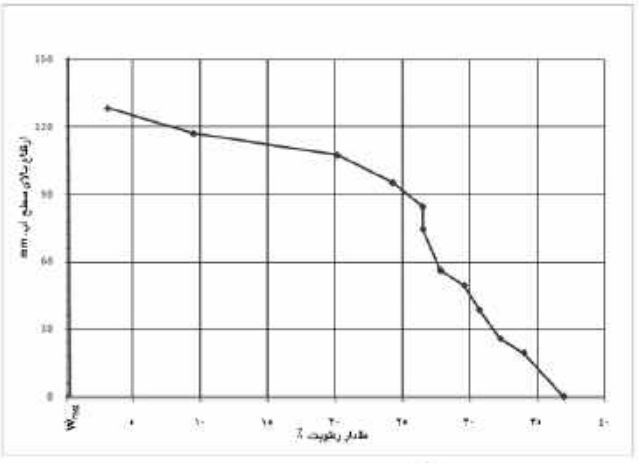
شکل ٤-١٤. تعیین ارتفاع مکش آب

در شـــکل ٤-١٥ نمودارتعیین ارتفاع مکش آب ســـبک‌دانه رس منبسط نمونه الف در اندازه ١٠-٤ میلی‌متر آمده است.



شکل ٤-١٥ . نمودار نتایج آزمون تعیین ارتفاع مکش سبک‌دانه رس منبسط نمونه الف

در نمودار ٤-١٦ نتایج آزمون تعیین ارتفاع مکش آب ســـبک‌دانه رس منبسط نمونه ب در اندازه ١٠-٤ میلی‌متر ارائه است.



شکل ٤-١٦ . نمودار نتایج آزمون تعیین ارتفاع مکش سبک‌دانه رس منبسط نمونه ب

جسم عایق حرارتی در کف زمین صلب زیر ساختمان نباید ارتفاع مکش آبی بیشتر ۷۵ میلی‌متر داشته باشد، در حالی که برای ارتفاع مکش آب هنگامی که فرآورده‌ها به عنوان عایق‌کاری بام، سقف و کف مورد استفاده قرار می‌گیرند، الزامی وجود ندارد. از آنجا که ارتفاع مکش آب هر دو محصول بیشتر از ۷۵ میلی‌متر است، فرآورده‌های کارخانه‌های مورد نظر برای استفاده در کف زمین صلب زیر ساختمان مناسب نیست اما برای بام، سقف و کف مناسب است.

٤-۷. آزمون تعیین مقدار جذب آب

برای تعیین مقدار جذب آب سبک‌دانه‌های رس منبسط از اختلاف توزین سبک‌دانه‌های خشک شده در آون و غوطه‌ور شده به مدت ٢٤ ساعت در آب استفاده می‌شود.

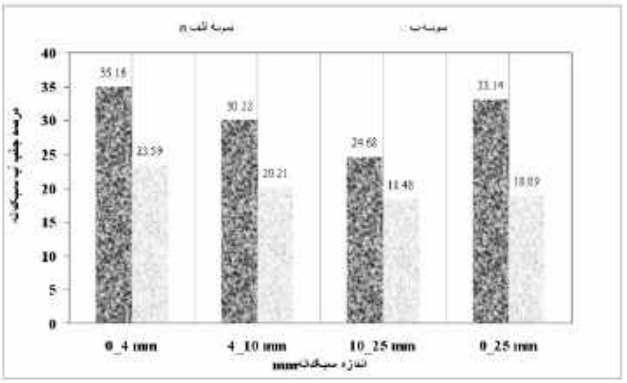
شکل ٤-١٧. تعیین مقدار جذب آب سبک‌دانه رس منبسط

در جـدول ٤-٦ نتایج آزمون تعیین جـذب آب نمونه الف و ب در چهار گروه اندازه نشان داده شده است.

جدول ٤-٦ . نتایج آزمون تعیین جذب آب سبک‌دانه رس منبسط

اندازه سبک‌دانه (میلی‌متر)	مقدار جذب آب (درصد)	
	نمونه الف	نمونه ب
٠-٤	٣٥/١٦	٢٣/٥٩
٤-١٠	٣٠/٢٢	٢٠/٢١
١٠-٢٥	٢٤/٦٨	١٨/٤٨
مخلوط	٣٣/١٤	١٨/٨٩

در شـکل ٤-١٨ نمـودار جـذب آب سـبک‌دانه رس منبسـط براسـاس اندازه‌های ٤-٠ میلی‌متر، ١٠-٤ میلی‌متر، ٢٥-١٠میلی‌متر و ٢٥-٠ میلی‌متر(مخلوط) آمده است.



شکل ٤-١٨ نمودار مقایسه جذب آب سبک‌دانه رس منبسط

٤-٨ آنالیز شیمیایی ماده اولیه تولید سبک‌دانه رس منبسط

آنالیز شیمیایی ماده اولیه تولید سبک‌دانه (خاک رس برداشت شده از معادن) بر اساس دستورالعمل استاندارد در مرکز تحقیقات انجام شد. در این آزمون خاک آماده شده با کربنات سدیم و پتاسیم در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس ذوب قلیایی شد. حاصل ذوب پس از آنکه وارد محلول یک به یک آب و اسید کلریدریک شد، بر روی حمام بن‌ماری تبخیر شد. سیلیکات‌های فلزات با کربنات‌های قلیایی ذوب شده تولید سیلیکات‌های قلیایی و کربنات می‌کنند.

$SiO3Fe + CO3Na2 \rightarrow SiO3Na2 + CO3Fe$

$SiO3Ca + CO3Na2 \rightarrow SiO3Na2 + CO3Ca$

حال اگر حاصل ذوب در اسید کلریدریک حل شود:

$SiO3\ Na2 + 2HCl \rightarrow SiO2 + H2O + 2ClNa$

$CO3Fe + 2HCl \rightarrow CO2 + H2O + FeCl2$

$CO3Ca + 2HCl \rightarrow CaCl2 + H2O + CO2$

همه سیلیکات‌ها، آلومینوسیلیکات‌ها و سایر ترکیبات حل می‌شوند به جز $SiO2$ که به صورت کلوئید رسوب می‌کند. برای اینکه این $SiO2$ از صورت کلوئیدی خارج شود باید محلول اسیدی را تبخیر کرد تا خشک شود. باقیمانده خشک حاصل را در محلول اسید

کلریدریک وارد کرده و پس از جدا کردن SiO_2، مقدار سایر عناصر (آهن و آلومینیوم، کلسیم و منیزیم) در محلول تعیین می‌شود.

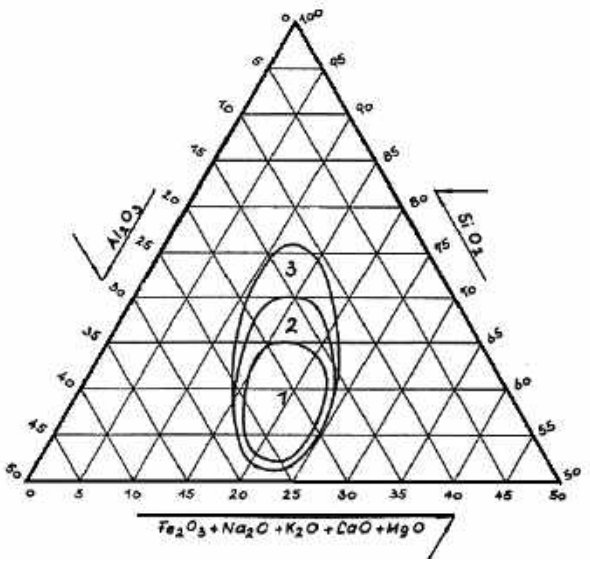
برای اندازه‌گیری افت وزن بر اثر سرخ شدن مقدار معینی ازماده اولیه به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس قرار داده شد و با اختلاف وزن نمونه قبل و بعد از قرارگیری در کوره، افت وزن به دست آمد.

برای تعیین میزان انیدریدسولفوریک مقداری از نمونه با محلول اسیدکلریدریک یک به پنج جوشانده شد. محلول صاف شده با محلول کلروربااریم ۱۰ درصد تا تکمیل رسوب‌گیری جوشانده شد. سپس حاصل بر روی کاغذ صافی صاف شد و با استفاده از وزن رسوب درصد so_3 به دست آمد.

برای اندازه‌گیری کلرورها نمونه خشک شده در آب مقطر جوش حل شد. مقدار کلر در محلول زیر صافی در برابر معرف کرومات پتاسیم با محلول نیترات نقره با عیار مشخص به روش حجم‌سنجی اندازه‌گیری شد.

ویژگی‌های فیزیکی و کاربرد سبک‌دانه‌های رس منبسط به اندازه دانه‌ها بستگی دارد. دانه‌بندی در اندازه‌های ۲۵-۰ میلی‌متر وجود دارد که بستگی به نوع ماده معدنی اولیه، نحوه فرآوری و نوع و سرعت و حرارت کوره دارد.

از جمله مهم‌ترین عوامل موثر بر انبساط‌پذیری خاک، ترکیب شیمیایی خاک است. پهنه‌بندی قابلیت انبساط مواد در نمودار ٤-۱۹ نشان داده شده است. تحقیقات نشان داده است چنانچه ویژگی‌های مواد در منطقه ۱ باشد رس بیشترین انبساط را خواهد داشت. در منطقه ۲ انبساط‌پذیری خوب و در منطقه ۳ انبساط‌پذیری کم را دارد.



شکل ٤-١٩. نمودار آنالیز شیمیایی

ازآنالیز شـــیمیایی بر روی ماده اولیه تولید ســـبک‌دانه رس منبســـط نتایج جدول ٤-٧ حاصل شد.

جدول ٤-٧. نتایج آزمون تجزیه شیمیایی ماده اولیه سبک‌دانه رس منبسط

ترکیبات شیمیایی (درصد)	نتایج آزمون نمونه الف	نتایج آزمون شرکت نمونه ب
کاهش وزن در ۱۰۰۰ °C	۸/۷۳	۹/۰۲
SiO2	۵۵/۵۰	٥٦/٦٢
Al2O3	۱۵/۷۵	۱۸/۸۰
Fe2O3	۷/۰۰	۷/٤۰
CaO	۸/٤۰	۱۱/٤۰
MgO	٤/٤۰	٤/۰۰
SO3	۰/۰۰	۰/۰۰
Cl -	۰/۰۵	۰/۰۸

نتایج تجزیه شـــیمیایی خاک دو معدن مورد استفاده در تولید سبک‌دانه‌ها در مقایسه با شکل شماره ٤-١٩ نشان می‌دهد ترکیب شیمیایی مواد هر دو معدن در منطقه ۱ است که رس بیشترین انبساط‌پذیری را نشان می‌دهد.

فصل پنجم

ارائه رهنمودهای کاربردی در عایق‌کاری حرارتی با سبک‌دانه رس منبسط و تحلیل فنی - اقتصادی

۵-۱. توصیه‌های اجرایی در عایق‌کاری با سبک‌دانه رس منبسط شده

سبک‌دانه رس منبسط به عنوان فرآورده عایق کاری حرارتی فله‌ای اجرا شده درجا دو کاربرد دارد:

- عایق‌کاری بام، سقف و کف
- عایق‌کاری کف زمین صلب زیر ساختمان

اختلاف بین دو کاربرد در الزام، به خاطر ارتفاع مکش آب است. جسم عایق در کف زمین صلب زیر ساختمان نباید ارتفاع مکش آبی بیشتر از ۷۵ میلی‌متر داشته باشد، در حالی که برای ارتفاع مکش آب هنگامی که فرآورده‌ها به عنوان عایق‌کاری بام، سقف و کف مورد استفاده قرار می‌گیرند، الزامی وجود ندارد.

۵-۱-۱. فرآورده عایق

عایق‌کار باید اطمینان حاصل کند که بسته‌های فرآورده عایق بازرسی می‌شود تا از

مطابقت جزییات اجرایی با آنچه که طراح ارائه کرده است، اطمینان حاصل شود.

۵-۱-۲. مناسب بودن ساختمان برای پذیرش فرآورده‌های عایق قبل از نصب

عایق‌کار باید اطمینان حاصل کند که بام‌ها، سقف‌ها، دیوارها و کف‌ها از نظر سازه‌ای سالم هستند و سطح برای پذیرش فرآورده‌های فله‌ای مناسب است. این ارزیابی باید با توجه به کلیه جنبه‌های عایق پیشنهاد شده در نظر گرفته شود. بر روی سقف و کف با سازه‌های تیر یا تیرچه، سطح زیرکار باید پیوسته باشد تا از باقی ماندن عایق فله‌ای اطمینان حاصل شود. سطوح بام و کف باید تمیز، خشک و عاری از مواد خارجی باشد. برای تهویه اتاقک زیرشیروانی و بخاربندها پیش از اجرای فرآورده عایق مطابق مقررات و آیین‌نامه‌های موجود ساختمان باید پیش‌بینی لازم انجام شود. در جایی که سرویس‌ها مانند لوله‌ها از میان قسمت مورد نظر عبور می‌کنند، تمهیدات لازم را باید برای اطمینان از باقی ماندن فرآورده عایق در ناحیه‌ای که قرار است عایق شود، در نظر گرفت.

اتاقک‌های زیر شیروانی

قبل از نصب فرآورده عایق، نصاب باید عیوب آشکار اتاقک زیر شیروانی را بیابد. هرگونه عیب معلوم شده باید قبل از پر کردن اصلاح شود. ساخت سقف و بام باید تکمیل شود. خطر بارش برف یا باران که از میان ساختمان بام به داخل عایق وارد می‌شود نباید وجود داشته باشد. فضای اتاقک زیرشیروانی باید تهویه داشته باشد. ساختمان باید از ورود هوای بیرون به درون عایق جلوگیری کند. دسترسی به همه قسمت‌های اتاقک زیرشیروانی که ممکن است بعد از نصب فرآورده عایق، نیاز به مواظبت داشته باشند، باید امکان‌پذیر باشد. ترتیباتی باید اتخاذ شود تا از رسیدن عایق به قسمت‌هایی از اتاقک زیرشیروانی که عایق‌کاری آن مورد نظر نیست مانند دودکش‌ها، هواکش‌ها و فرورفتگی‌های لوازم برقی، جلوگیری شود. لوله‌های آب، کانال‌های تهویه و مخزن‌های ذخیره برای جلوگیری از میعان و یخ زدن باید عایق‌کاری شوند.

دیوارهای بنایی دوجداره

هنگام ارزیابی مناسب بودن دیوارهای دوجداره برای پر شدن با عایق فله‌ای موارد زیر باید در نظر گرفته شوند:

الف- شکل ساختمان و شرایط کارگاه ساختمانی؛

ب- شرایط حفره؛

پ- وسعت حفره‌ای که قرار است پر شود؛

ت- ماهیت و شرایط جدار بیرونی؛

ث- ماهیت و شرایط جدار درونی؛

ج- تاسیسات درون حفره؛

چ- تهویه در میان حفره.

همه دودکش‌های وسایل احتراق که به‌طور سرتاسری از درون دیوار دوجداره عبور می‌کنند، یا نزدیک دیوار دوجداره هستند باید مطابق مقررات ملی مورد آزمون قرار گیرند.

در جایی که حفره به عنوان منبع هوای احتراق یا به عنوان وسیله تهویه (مانند سازه‌های چوبی، برای کف‌های چوبی معلق یا بام‌های تخت) استفاده می‌شود یا چنانچه به غلط به عنوان دودکش به کار می‌رود، یک کانال تهویه یا سایر وسایل مناسب برای برقراری جریان مناسب گاز دودکش یا هوا نصب شود.

آجر سوراخ‌دار که لایه زیر کف، اتاق، اتاقک زیر شیروانی و ... را تهویه می‌کند، یا هوای احتراق را فراهم می‌کند، اگر به‌طور مناسبی غلاف گذاری نشده باشد باید برای جلوگیری از بسته شدن حفره به‌وسیله عایق، کانال‌کشی شود.

سرهای باز حفره باید بسته شوند، در جایی که تهویه بام بستگی به باز بودن حفره دارد، ترتیبات جایگزین برای اطمینان از تهویه مناسب باید فراهم شود.

در جایی که لازم است دررفت عایق به حداقل برسد سوراخ‌های جدار درونی دیوار باید بسته یا درزبندی شوند.

ساختمان‌های قاب‌دار

ساختمان قاب‌دار دیوارهای با ستونک‌های فلزی یا چوبی، بام شیب‌دار با عایق بین تیرک‌های زیرشیروانی است. برای ساختمان‌های جدید توصیه می‌شود ساختمان قاب‌دار قبل از قرار دادن جدار درونی، عایق کاری حرارتی شود به شرط آنکه بخش درونی قاب به‌وسیله یک فویل شفاف مانند یک بخاربند پوشانده شود به ترتیبی که عایق را در محل در بر گیرد. سپس بازرسی ساختمان آسان شده و پر کردن قاب را از میان فویل می‌توان مشاهده کرد.

هنگام ارزیابی مناسب بودن ساختمان‌های قاب‌دار، موارد زیر باید در نظر گرفته شود:

الف- شکل ساختمان و شرایط کارگاه

ب- شرایط قاب؛

پ- ابعاد قاب مانند ضخامت؛

ت- ماهیت و شرایط جدار بیرونی؛

ث- ماهیت و شرایط جدار درونی؛

ج- ماهیت و کاربرد جدار درونی؛

چ- تهویه ساختمان قاب دار.

همچنین اطمینان از موارد زیر اهمیت دارد:

۱- در جایی که تهویه سازه لازم است یک کانال یا وسیله مناسب دیگری نصب شود تا جریان هوای مناسب برقرار شود.

۲- سوراخ‌ها در جدار درونی یا بیرونی باید برای به حداقل رساندن دررفت عایق، درزبندی شوند.

۳- کیفیت کار، قبل از نصب جدار درونی بررسی شود.

۵-۱-۳ .کف‌سازی و عایق‌کاری با سبک‌دانه رس منبسط

کف‌سازی و شیب‌بندی در ساختمان‌ها اقدامی است که به منظور ایجاد لایه‌ای جهت هموارسازی و تسطیح یا ایجاد اختلاف ارتفاع بین کاربری‌های مختلف، هدایت آب‌های

سطحی، رساندن تراز سطوح مختلف به سطح پایه و تامین عایق‌بندی حرارتی و صوتی صورت می‌پذیرد. با توجه به متفاوت بودن انتظارات و مشخصات فنی مورد نیاز این لایه جهت تامین نیازهای مصرف‌کننده، روش‌ها و مصالح متفاوتی پیشنهاد می گردد. در بسیاری از موارد این لایه فقط نقش پرکننده داشته و احتیاجی به داشتن مقاومت مکانیکی بالایی نیست. در این موارد سعی می‌شود حتی‌المقدور از مصالح سبک با چگالی پایین استفاده شود. در مواردی مانند کف‌سازی‌های کف پارکینگ‌های طبقاتی علاوه بر سبکی، داشتن مقاومت فشاری جهت تحمل بار ترافیکی از الزامات فنی است.

۵-۱-۳-۱. عایق‌کاری کف صلب

می‌توان لیکا را به طور مستقیم در محل اجرا از طریق شلنگ‌های قابل انعطاف دستگاه پنوماتیک دمید. لیکا برای کف‌های صلب بسیار مناسب است زیرا خواص عایق‌کاری حرارتی، آب گریزی و غیرموئینگی دارد و سازه‌های کف سبک ساده‌ای با قیمت‌های معقول فراهم می‌کند. چنانچه لیکا به صورت فله‌ای استفاده شود، هیچ‌گونه ضایعاتی ندارد چون دانه‌ها با یکدیگر مطابقت می‌یابند و به طور کامل در فضاهای خالی در محل مصرف برای مثال پی‌ها یا در اطراف آب‌روها جای خود را می‌یابند. همچنین می‌توان عایق‌کاری کف را با کیسه‌های لیکا انجام داد. در این روش ابتدا سبک‌دانه رس منبسط را روی سطح می‌ریزند و سپس کیسه‌های حاوی سبک‌دانه بر روی آن قرار داده می‌شود تا سطح کف پوشانده شود. اگر لایه دوم هم وجود داشته باشد، از یک الگوی آجری استفاده می‌شود. برای تراز شدن سطح رویی از دانه‌های سبک‌دانه رس منبسط استفاده می‌شود. در نهایت از عایق رطوبتی پلاستیکی به ضخامت کم بر روی عایق‌های پرکننده استفاده می‌شود. (شکل‌های ۵-۱ تا ۵-٤)

شکل ۵-۱. پرکردن سطح با کیسه‌های لیکا

شکل ۵-۲. تسطیح کف با دانه‌ای لیکا

شکل ۵- ۳. پوشش با عایق رطوبتی شکل

۵-٤. برشی از لایه‌های عایق‌کاری با سبک‌دانه

۵-۱-۳-۲. روش کف‌سازی شناور

در این روش سبک‌دانه رس منبسط به صورت خشکه در سطح و بین لوله‌های تاسیسات ریخته شده و به‌وسیله تخته کوب تسطیح می‌شود. روی این لایه به‌وسیله یک لایه مش پلاستیکی پوشانیده شده و روی آن ملات به ضخامت ۳ تا ٤ سانتی‌متر اجرا می‌شود. در صورتی که اجرای کف‌سازی همزمان با اجرای سنگ یا سرامیک کف صورت پذیرد از ملات ریخته شده به‌عنوان ملات سنگ‌کاری استفاده می‌شود و هزینه‌ها کاهش می‌یابد. در این حالت حداکثر میزان عایق‌کاری حرارتی و سبکی برای کف‌سازی نسبت به دو روش دیگر (که در ادامه شرح داده می‌شود) تامین می‌شود. علاوه بر آن طبق نتایج به‌دست آمده در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی اجرای کف‌سازی شناور با ٦ سانتی‌متر ضخامت سبک‌دانه

رس منبسط باعث افت صدای کوبه‌ای در سقف‌ها به میزان ۱۶ دسی‌بل می‌شود و شرایط آسایش صوتی ساکنین را تامین می‌کند.

در به کارگیری این روش باید دقت شود که کلیه فضاها از سبک‌دانه رس منبسط پر شده و جایی خالی نماند. با توجه به ضخامت لایه کف‌سازی پیشنهادی که بین ۶-۸ سانتی‌متر است استفاده از سبک‌دانه‌های متوسط و ریز رس منبسط توصیه می‌شود. این روش در واحدهای مسکونی و شیب‌بندی بام که بارهای بیش از اندازه و آمد و شد وسایل نقلیه ندارند، پیشنهاد می‌شود. با توجه به چگالی سبک‌دانه رس منبسط که در حدود ۳۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب است وزن یک متر مربع کف‌سازی به ضخامت ۶ تا ۸ سانتی‌متر حدود ۲۰ تا ۲۷ کیلوگرم خواهد بود

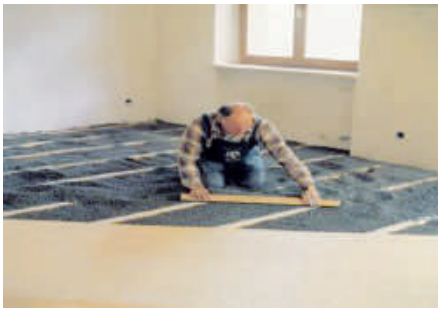
شکل ۵-۵. پخش کردن سبک‌دانه در کف

شکل ۵-۶ . تسطیح سبک‌دانه در کف

شکل ۵-۷. استفاده از یک لایه مش پلاستیکی

شکل ۵-۸. اجرای ملات

شکل ۵-۹ . کاشی‌کاری و عایق سبک‌دانه‌ای همزمان



شکل ۵-۱۰. کف‌سازی خشکه.

۵-۱-۳-۳ . روش کف سبک به وسیله دوغاب‌ریزی

در این روش ابتدا سبک‌دانه رس منبسط به‌صورت خشکه ریخته شده و تسطیح اولیه صورت می‌پذیرد. سپس به‌وسیله پمپ دوغاب‌ریز، دوغاب روی کلیه سطوح ریخته شده و به وسیله شمشه تسطیح نهایی صورت می‌پذیرد. در صورت نبودن پمپ دوغاب می‌توان از آب‌پاش‌های بزرگ استفاده کرد. در این حالت برای هر آب‌پاش که ظرفیت تقریباً ۱۲ لیتر دوغاب را دارد با مخلوط کردن ۷ کیلو سیمان و ۷ لیتر آب، دوغاب مناسب تهیه شده و روی سطح ریخته می‌شود. کیفیت دوغاب باید به‌گونه‌ای باشد که نه به‌دلیل سفتی در روی سطح گیر کند و نه آنقدر روان باشد که همه دوغاب به لایه زیرین منتقل شود. این روش پرسرعت‌ترین روش کف‌سازی با سبک‌دانه رس منبسط است. از این روش در کف‌سازی طبقات مسکونی، کف‌سازی‌های وسیع سبک تجاری، پر کردن فضاهای خالی و رسانیدن ترازهای متفاوت به تراز پایه و شیب‌بندی بام استفاده می‌شود. در این روش از دانه‌های مخلوط و درشت لیکا می‌توان استفاده کرد.

۵-۱-۳-٤. روش بتن سبک

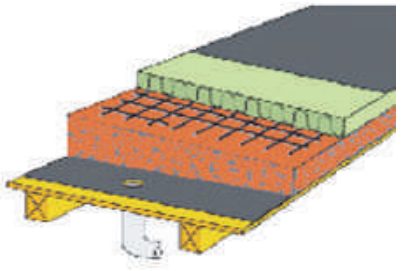
از این روش بیشتر در قسمت‌هایی که نیاز به مقاومت فشاری بیشتری است استفاده می‌شود. می‌توان به جای استفاده از سنگدانه‌های طبیعی یا پوکه سنگ‌های معدنی در تولید بتن سبک از سبک‌دانه رس منبسط استفاده کرد. با توجه به نسبت زیاد مقاومت سبک‌دانه رس

منبســط به چگالی، بتن ساخته شده با آن، مقاومت مکانیکی مناسبی خواهد داشت. با در نظر گرفتن تنوع کاربری و مقاومت فشاری خواسته شده و ضخامت لایه کف‌سازی نوع دانه‌بندی تعیین شــده و با طرح اختلاط پیشنهادی سبک‌دانه در بتونیر با سیمان و آب مخلوط می‌شود. در بعضی موارد مقدار کمی ماسه (نسبت حجمی ۳ سبک‌دانه رس منبسط به ۱ ماسه) جهت افزایش مقاومت فشاری اضافه می‌شود. در این روش معمولاً از دانه‌های مخلوط و درشت‌تر ســبک‌دانه رس منبســط استفاده می‌شــود. طبیعتاً با افزودن میزان سیمان و ماسه مقاومت بتن تولیدی افزایش یافته اما باید با توجه به بالاتر رفتن چگالی و کم شدن اثر عایق حرارتی بتن این میزان کنترل شود.

۵-۱-۳-۵. عایق‌کاری بام با سبک‌دانه رس منبسط

سبک‌دانه رس منبسط فله‌ای برای ایجاد شیب و عایق‌کاری حرارتی در بام نیز استفاده می‌شــود. ســبک‌دانه‌ها بر روی بام پخش و به شــیب موردنظر هموار می‌شــود. بر روی آن می‌توان شــبکه فلزی قرار داد تا اســتحکام و پایداری بیشتری به دست آید. بر روی آن عایق حرارتی قرار داده می‌شــود و در نهایت عایق رطوبتی و پوشش بام اجرا می‌شود (شکل۵-۱۰ و ۵-۱۱).

در بازســازی بام چنانچه حفره‌ها و فرورفتگی‌هایی در ســطح بام وجود داشــته باشد سبک‌دانه رس منبسط را می‌توان برای پر کردن این قسمت‌ها استفاده کرد. در مناطقی که قرار اســت بعداً نفوذ ســازه‌ای وجود داشته باشد سبک‌دانه رس منبسط را می‌توان با سیمان و آب مخلوط کرد.



شکل ۵-۱۱ . عایق‌کاری بام شیب‌دار با سبک‌دانه

شکل ۵-۱۲. استفاده از شبکه فلزی بر روی سبک‌دانه در بام

شکل. ۵-۱۳. پوشش بام با سبک‌دانه رس منبسط

۵-۱-٤. روش‌های اجرای عایق فله‌ای سبک‌دانه رس منبسط

برای اجرای عایق‌کاری با عایق فله‌ای از دو روش استفاده می‌شود:

۱- اجرا با استفاده از دستگاه پنوماتیک که در آن از هوا برای دمیدن سبک‌دانه رس منبسط استفاده می‌شود.

اتاقک زیر شیروانی

کف صلب

شکل ۵-۱٤. دمیدن سبک‌دانه رس منبسط اتاقک زیر شیروانی و کف صلب

داخل دیوار دوجداره

شکل ۵-۱۵. دمیدن سبک‌دانه رس منبسط داخل دیوار دو جداره

۲- اجرا به روش دستی که در آن ریختن و نصب سبک‌دانه رس منبسط به طور مستقیم از بسته انجام می‌شود.

شکل ۵-۱۶. عایق‌کاری به روش دستی در کف صلب

۵-۲. تحلیل فنی - اقتصادی استفاده از فرآورده سبک‌دانه رس منبسط

عایق فله‌ای رس منبسط به عنوان عایق پی

این عایق زمان کار و در نتیجه هزینه‌ها را به شـدت کاهش می‌دهد. با این نوع مصالح عایق‌کاری پی در فرآیندی آسـان توسط یک کارگر انجام می‌شود. این مصالح در کیسه انبار، حمل و در سـاختگاه بر روی زمین قرار داده می‌شـود و در حالی که باز هم در کیسـه باقی می‌ماند با بتن پوشانده می‌شود.

عایق فله‌ای رس منبسط به عنوان پرکننده دیوار دوجداره

یکی از روش‌های عایق‌کاری حرارتی اسـتفاده از مواد عایق فله‌ای در بین دو دیوار از جنس مصالح بنایی از جمله آجر و بلوک اسـت. میانگین ضریب هدایت حرارتی سـبک‌دانه

رس منبسط تولیدی هر دو کارخانه حدود W/mK ۰/۱ به دست آمده است. این مقدار نشان‌دهنده خواص عایق‌کاری حرارتی مطلوب این فرآورده‌ها ست. برای آنکه مقاومت حرارتی به بیش از m^2K/W ۱ برسد، لازم است ضخامت عایق فله‌ای بیش از ۱۱۰ میلی‌متر باشد. چنین دیواری الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان را پاسخگو است.

مقایسه سبک‌دانه رس منبسط با پوکه معدنی

وزن فضایی پوکه معدنی ۷۰۰ تا ۱۳۰۰ kg/m^3 است در حالی‌که این مقدار در مورد سبک‌دانه رس منبسط kg/m^3 ۳۵۰ است. بنا براین وزن فضایی پوکه معدنی ۲ تا ٤ برابر سنگین‌تر از سبک‌دانه رس منبسط است. مقدار ضریب هدایت حرارتی رس منبسط W/mK ۰/۰۹ و ضریب هدایت حرارتی پوکه معدنی W/mK ۰/۵۲ تا W/mK ۰/٤٦ است. بنا براین برای آنکه لایه عایق با پوکه معدنی مقاومت حرارتی یکسانی با رس منبسط داشته باشد ضخامت آن باید بیش از ۲/۵ برابر سبک‌دانه رس منبسط باشد. از این نظر استفاده از رس منبسط در مقایسه با پوکه معدنی علی رقم قیمت بیشتر سبک‌دانه رس منبسط در هر متر مکعب، دارای توجیه اقتصادی است. به دلیل باز بودن منافذ پوکه‌های معدنی تا میزان ۷۰ درصد حجمی خود جذب آب دارند در حالی‌که این مقدار در مورد رس منبسط ١٦ تا ۱۸ درصد است. زیاد بودن جذب آب باعث افزایش قابل ملاحظه ضریب هدایت حرارتی پوکه معدنی فله‌ای می‌شود، این مشکل به ویژه در اقلیم‌های مرطوب موجب کاهش شدید مقاومت حرارتی بام خواهد بود بنابراین با ضخامت کمتر لایه عایق بام و شیب‌بندی هزینه اجرای سبک‌دانه رس منبسط کمتر از پوکه معدنی خواهد بود. همچنین سبک‌دانه مخلوط رس منبسط که در شیب‌بندی بام استفاده می‌شود دانه‌بندی صفر تا ۲۵ میلی‌متر داشته و دارای دانه‌بندی اصلاح شده و مناسب جهت شیب‌بندی است در حالی‌که پوکه‌های معدنی غالباً فاقد دانه‌بندی مناسب بوده و به‌همین دلیل تثبیت و پایدارسازی لایه پوکه‌ریزی شده در شیب‌بندی مشکل‌ساز خواهد بود. بر طبق اصول صحیح شیب‌بندی ضخامت لایه شیب‌بندی شده باید حداقل ۳ برابر اندازه بزرگ‌ترین دانه مورد استفاده باشد. با توجه به اندازه‌های بزرگ برخی

از پوکه‌های معدنی این امر امکان‌پذیر نیســت. به عنوان مثال با استفاده از پوکه نوع پامیس یا اسکوریا با اندازه تقریبی ۸ سانتی‌متر ضخامت لایه پوکه ریزی باید حداقل ٢٤ سانتی‌متر باشد. به دلیل عدم نفوذ دوغاب سیمانی به درون منافذ سبک‌دانه رس منبسط میزان مصرف سیمان در اجرای شیب‌بندی با این محصول ١٦٠ کیلوگرم به ازای هر متر مکعب است که این مقدار باعث صرفه‌جویی به میزان ۳۰ درصد در مقایسه با پوکه معدنی می‌شود.

فصل ششم

نتیجه‌گیری

سبک‌دانه رس منبسط ابتدا در دهه ۱۹۳۰ در اسکاندیناوی برای تولید بلوک سبک‌دانه تولید شد. به فاصله کمی کشف شد که این مواد در شاهراه‌ها و خطوط راه‌آهن می‌توانند مفید باشند. در سال ۱۹۵۸ بعد از چند سال آزمایش این سبک‌دانه به‌عنوان مواد پرکننده اختصاصی در کشورهای اسکاندیناوی مورد قبول قرار گرفت.

از آنجا که خاک رس مصالح در دسترس محلی است، امکان تولید سبک‌دانه با هزینه کم وجود دارد. این امر در کشورهایی با منابع کم سبک‌دانه طبیعی مفید است. سبک‌دانه‌های رس منبسط می‌توانند در تولید بتن سبک و بلوک‌های سبک استفاده شوند و هزینه مصرف انرژی در ساختمان را کاهش دهند.

انتخاب مواد اولیه و تولید این سبک‌دانه‌ها به شدت کنترل می‌شود تا از یکنواختی و کیفیت بالای محصول اطمنیان حاصل شود. امروزه لیکا در کاربردهای گوناگونی به مصرف می‌رسد از جمله پرکننده ژئوتکنیکی، بلوک‌های بنایی، مخلوط‌های کشاورزی فیلتراسیون و فیلتراسیون زیستی. خاک استخراج شده پس از فرآوری به داخل کوره دوار منتقل و در دمای حدود ^{o}C ۱۱۵۰ پخته می‌شود. این فرآیند باعث می‌شود که مواد ٤ تا ٥ برابر حجم اولیه خود

منبسط شوند و دانه‌های سرامیکی با ساختار داخلی سلولی پدید آید.

سبک‌دانه رس منبسط فرآورده‌ای دوستدار محیط زیست است که مانند سفال به طور کامل از مواد طبیعی تشکیل می‌شود. لیکا تخریب‌ناپذیر، غیرقابل احتراق و مقاوم در برابر حمله قارچ و حشرات است.

سبک‌دانه رس منبسط مطابق با اصول و روش یکسانی در کشورهای الجزایر، آرژانتین، اتریش، بلژیک، چین، دانمارک، مصر، فنلاند، آلمان، ایران، ایتالیا، نروژ، پرتغال، سوئد، سوئیس و بریتانیا تولید می‌شود.

تحقیقات برخی پژوهشگران در کویت نشان داد برای تولید سبک‌دانه رس منبسط می‌توان از خاک اره به‌عنوان افزودنی به خاک منطقه مورد نظر استفاده کرد. با استفاده از این روش سبک‌دانه دارای وزن مخصوص تقریبی ۱/۵ (که معمولاً حد پذیرفته شده برای تفکیک سنگدانه‌های متراکم و سبک است) شد. در مورد روغن ضایعاتی هنگامی که به عنوان افزودنی با خاک رس به کار می‌رود، سبک‌دانه‌های به دست آمده دارای وزن مخصوص باز هم کمتری هستند، با وجود این مشخص شد شرایط کنترل شده خشک کردن برای جلوگیری از ترک‌خوردگی جمع شدگی در این مورد لازم است.

تحقیقات دیگر پژوهشگران در ترکیه نشان داد سبک‌دانه‌های رس منبسط شده با وزن مخصوص بین ۱/۵تا ۲/۰ و جذب آب تقریباً صفر درصد را می‌توان از خاک رس منطقه‌ای در ترکیه با استفاده از ضایعات فلوتاسیون آلبیت تهیه کرد. وزن مخصوص سنگدانه‌ها عموماً با افزایش مقدار ضایعات فلوتاسیون کاهش می‌یابد. به‌کارگیری ضایعات فلوتاسیون برای تخلخل‌زایی، می‌تواند هزینه تولید را کاهش دهد. این ضایعات را می‌توان به شایستگی در این بخش استفاده کرد.

پودر ضایعات آجر می‌تواند در تولید دانه‌های لیکا استفاده شود. همچنین با افزودن زغال‌سنگ وزن مخصوص کمتری برای سبک‌دانه‌های تولید شده به دست می‌آید. خواص سبک‌دانه رس منبسط شده یا لیکا به نوع خاک، نوع و مقدار مواد تخلخل‌زا و دمای پخت بستگی دارد.

برخی محققان بر آنند که استفاده از مواد تخلخل‌زای مختلف مانند پرلیت و شیشه در تولید سبک‌دانه رس منبسط مناسب است. نتایج چنین مطالعاتی مقایسه تاثیر مواد تخلخل‌زا را برای انواع متفاوت خاک امکان‌پذیر می‌سازد.

در کشور دو کارخانه تولید سبک‌دانه رس منبسط با ٤ خط تولید در حال فعالیت هستند. کارخانه لیکا در شهرستان مامونیه و کارخانه عمران پارس در شهر سیرجان واقع شده‌اند. محصولات این کارخانه‌ها سبک‌دانه رس منبسط شده در اندازه‌های ٤-۰ میلی‌متر، ۱۰-٤ میلی‌متر، ۲۵-۱۰میلی‌متر، ۲۵-۰ میلی‌متر(مخلوط) است. در این تحقیق از کلیه محصولات سبک‌دانه و نیز ماده اولیه (خاک رس معدن) نمونه‌برداری و آزمایش شد. میانگین ضریب هدایت حرارتی سبک‌دانه رس منبسط تولیدی هر دو کارخانه حدود ۰/۱ W/mK به دست آمده است. این مقدار نشان‌دهنده خواص عایق‌کاری حرارتی مطلوب این فرآورده‌ها ست. ارتفاع قاب دستگاه ۵۵/٦ میلی‌متر است بنابراین میانگین مقاومت حرارتی هر دو محصول حدود ۰/۵۵ m^2K/W است. این مقدار مقاومت حرارتی برای عایق‌کاری حرارتی جدارهای خارجی کافی نیست. برای آنکه مقاومت حرارتی به بیش از ۱ m^2K/W برسد، لازم است ضخامت عایق فله‌ای به بیش از ۱۱۰ میلی‌متر(۱۱ سانتی‌متر) افزایش یابد.

با افزودن ۱ درصد رطوبت، ضریب هدایت حرارتی ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. اضافه کردن ۵ درصد رطوبت به سبک‌دانه رس منبسط باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی به میزان ۲۲ تا ۳۸ درصد شد.

بنابر استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۱۰۵۹ چگالی انبوهی فله خشک برای فرآورده‌های مختلف رس منبسط معمولاً در محدوده ۱۵۰ kg/m^3 تا ۸۰۰ kg/m^3 قرار دارد. فراورده‌های هر دو کارخانه در محدوده مجاز استاندارد قرار دارند.

همبستگی ضعیفی بین چگالی انبوهی و مقاومت حرارتی این سبک‌دانه‌ها وجود دارد (حدود ۰/٦). با افزایش چگالی، مقاومت حرارتی کاهش یافته یعنی افزایش فاز جامد به دلیل زیاد شدن چگالی که نقش مثبتی در عایق‌کاری ندارد، ضریب هدایت حرارتی را زیاد کرده است.

همبستگی بین ضریب هدایت حرارتی و توزیع اندازه دانه‌ها /چگالی انبوهی فله، مخصوص هر محصول و هر تولیدکننده وجود دارد.

بنابر استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۱۰۵۹، مقدار مواد کوچک‌تر از اندازه (دانه‌های زیراندازه) نباید بیشتر از ۱۵ درصد وزنی باشد. مقدار مواد بزرگ‌تر از اندازه (دانه‌های بیش‌اندازه) نباید بیشتر از ۱۰ درصد وزنی باشد. نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد که دانه‌های زیراندازه و دانه‌های بیش‌اندازه فرآورده‌های مختلف کارخانه‌های لیکا و عمران پارس با ویژگی‌های استاندارد مطابقت دارند.

جسم عایق حرارتی در کف زمین صلب زیر ساختمان نباید ارتفاع مکش آبی بیشتر از ۷۵ میلی‌متر داشته باشد، در حالی که برای ارتفاع مکش آب هنگامی که فرآورده‌ها به عنوان عایق‌کاری بام، سقف و کف مورد استفاده قرار می‌گیرند، الزامی وجود ندارد. از آنجا که ارتفاع مکش آب هر دو محصول بیشتر از ۷۵ میلی‌متر است، فرآورده‌های کارخانه‌های مورد نظر برای استفاده در کف زمین صلب زیر ساختمان مناسب نیست اما برای بام، سقف و کف مناسب است.

نتایج تجزیه شیمیایی خاک دو معدن مورد استفاده در تولید سبک‌دانه‌ها نشان می‌دهد ترکیب شیمیایی مواد هر دو معدن دارای انبساط‌پذیری بسیار زیاد است.

مراجع

1. Lightweight, Insulating Building Materials, www.gpnm.org, , Leca Trading & Concession A/S, 2013

2. Light Expanded Clay Aggregate, www.lecaindia.org, GBC INDIA

3. Arioz O., Kilinc K., Karasu B., Kaya G., Arslan G., Tuncan M., Tuncan A., Korkut M. ve Kivrak S. (2008) ‘’A Preliminary Research On The Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate’’, Journal of the Australian Ceramic Society, 44(1), 23-30.

4. Al-Bahar Suad, Bogahawatta V.T.L., “Development of Lightweight Aggregate in Kuwait”, Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 31, Number 1C.

۵. استاندارد ملی ایران شماره۱ – ۱۱۰۵۹ سال ۱۳۸۷، مصالح ساختمانی– فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی– سبک‌دانه رس منبسط اجرا شده درجا – قسمت اول: فرآورده‌های فله‌ای قبل از نصب – ویژگی‌ها

6. EN 14063-1:2004, Thermal insulation products for buildings -In- situ formed expanded clay lightweight aggregate products -part 1: Specification for the loose-fill products before installation

۷. استاندارد ملی ایران شماره ۱– ۱٤۸۷۵ سال ۱۳۹۱، سنگدانه– سبک‌دانه‌ها برای بتن، ملات و گروت– ویژگی‌ها

8. BS EN 13055-1:2002, Lightweight aggregates-Part1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout

۹. استاندارد ملی ایران شماره ۱۰–۱٤۸۷٤ سال ۱۳۹۱، مصالح و فرآورده‌های ساختمانی – خواص فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌ها – بخش ۱۰: تعیین ارتفاع مکش آب– روش آزمون

10. BS EN 1097-10:2002, Tests for mechanical and physical properties of aggregates-Part 10: Determination of water suction height

11. EN 14063-2:2004, Thermal insulation products for buildings -In- situ formed expanded clay lightweight aggregate products -part 2: Specification for the installed products

12. Central Building Research Institute, India, “Building Materials and Components” in Technology for Developing Countries, 1990, pp. 211–212.

13. RILEM Workshop, Use of Recycled Materials as Aggregates in the Construction. Brussels, September 2000.

14. Riley C.M., “Relation of Chemical Properties to the Bloating of Clays”, Journal of the American Ceramic Society, 1951, pp. 121-128.

15. www.leca.com

۱۶. استاندارد ملی ایران شماره ۸۶۲۱: سال ۱۳۸۵، مصالح ساختمانی، فرآورده‌ها ی عایق‌کاری حرارتی، تعیین مقاومت حرارتی به وسیله لوح گرم محافظت شده و روش جریان حرارت‌سنج فرآورده‌های با مقاومت حرارتی زیاد و متوسط – روش آزمون.

۱۷. استاندارد ملی ایران شماره ۸۲۹۹: سال ۱۳۸٤، واکنش در برابر آتش برای مصالح و اجزای ساختمانی، طبقه‌بندی

۱۸. استاندارد ملی ایران شماره ۲-۷۲۷۱: سال۱۳۸۳، واکنش در برابر آتش برای فرآورده‌های ساختمانی- قسمت دوم- قابلیت نسوختن مواد

۱۹. استاندارد ملی ایران شماره ٤-۷۲۷۱: سال۱۳۸٤، واکنش در برابر آتش برای فرآورده‌های ساختمانی- قسمت دوم- قابلیت نسوختن مواد

۲۰. استاندارد ملی ایران شماره ۵-۷۲۷۱: سال ۱۳۸۳، واکنش در برابر آتش برای فرآورده‌های ساختمانی-روش آزمون- قسمت پنجم- تعیین گرمای ناشی از سوختن مواد

۲۱. استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۰۵۸: سال ۱۳۸۷، مصالح ساختمانی- فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی – ارزیابی انطباق

22. EN 932-1:1996, Tests for general properties of aggregates-part1: Methods for sampling

23. EN 932-2:1999, Tests for general properties of aggregates-part2: Methods for reducing laboratory samples

24. EN 933-1:1997, Tests for geometrical properties of aggregates-part1: Determination of particle size distribution-sieving method

25. EN 1021:2006, Reaction to fire tests-Ignitability-Determination of burning degrees of materials, which melt or shrink from a fixed single flame

26. EN 1097-3:1998, Tests for mechanical and physical properties of aggregates-part3: Determination of loose bulk density and voids

27. EN 1097-10:2002, Tests for mechanical and physical properties of aggregates-part10: Determination of water suction height

28. EN12939:2000, Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – thick products of high and medium thermal resistance

29. EN13055-1:2004 Lightweight aggregates-part1: Lightweight aggregates for concrete and mortar

30. EN13055-2:2004 Lightweight aggregates-part2: Lightweight aggregates for applications other than concrete and mortar

31. EN ISO10456:1999, Building materials and products – procedures for determining declared and design thermal values

32.BS EN1097-5:1999, Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the water content by drying in a ventilated oven

33. EN 14063-1:2004, Thermal insulation products for buildings -In- situ formed expanded clay lightweight aggregate products -part 1: Specification for the loose-fill products before installation

۳٤. راهنمای جامع لیکا، فریبرز محمدی تهرانی، دفتر فنی شرکت لیکا

35. Insulation fill ,www.netweber.co.uk/flooring-systems

Abstract

One of the main ways of saving energy is using thermal insulation in buildings. These products in different parts of the building (Exterior walls, roof and floor of the lowest storey) are used to reduce energy consumption for heating and cooling of indoor spaces. To select appropriate insulation, it is necessary to have the knowledge of thermal insulation properties and methods of their use. Due to special properties of lightweight expanded clay (leca), this product is useful and economically reasonable when it is used in insulation of building.

Leca's important advantages include the following:

Low weight (due to the presence of voids within the grains),

Low thermal conductivity,

good mechanical strength,

low water absorption rate of the grain (in the case of coated layers),

being chemically inert (it does not cause any corrosion and rot)

resistance to freezing and thawing

long useful life.

Reducing the thermal conductivity of leca is possible by reducing bulk density. It can be done with coarser grain size and increasing expansion occurs during the firing process. The objectives of this research are study of the Effect of grain size, density and moisture content of expanded clay aggregate in the thermal resistance. Due to the high thermal resistance of leca can be used as thermal insulation of the cavity walls, roofs and floors in the building.

An investigation on mechanical and thermal properties of loose fill Lightweight expanded clay and providing applicational guidelines

Dr.S. Veiseh

M.Mazloomi Sani

Research Report