مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار و تابستان ۱۳۹۶، جلد دهم، شماره ۱ و ۲، صفحه ۳۱ تا ۴۳

تولید سبکدانه از شیل و مقایسه مشخصات آن با سبکدانه‌های تولیدی در ایران

محمدکاظم امیری[۱]، محمدرضا نیکودل[۲*]

دریافت مقاله: ۹۴/۰۷/۲۳ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۹/۱۳

چکیده

از سبکدانه‌ها به منظور کاهش وزن، عایق‌کاری حرارتی و صوتی، ساخت فرآورده‌های سبک مانند انواع بتن‌های سبک، ملاتها و اندودها، فرآورده‌های قیری و خاک کشاورزی استفاده می‌شود. با توجه به فروان بودن سازندهای شیلی در زونهای مختلف ساختاری ایران و از طرف دیگر ارزشمند بودن منابع خاک رس مورد نیاز برای تولید سبکدانه‌ها از لحاظ زیست محیطی و کشاورزی، شیل‌ها جایگزین مناسبی برای تولید این مصالح‌اند. در این مقاله آنالیزهای شیمیایی بر روی شیل‌ها و مارن‌های استان فارس انجام گرفت، سپس با توجه به مطالعات صورت گرفته شیل‌های آرژیلیتی بکت و نورآباد برای حرارت‌دهی و تولید سبکدانه‌ها مناسب تشخیص داده شد. سپس برخی خصوصات، فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی نمونه‌های حرارت داده شده و ویژگی‌های اولیه سبکدانه‌های تولیدی مورد بررسی قرار گرفت و با سبکدانه‌های تولیدی حال حاضر در ایران مقایسه شد. نتایج نشان داد که سبکدانه‌های شیل منبسط‌شده تولیدی وزن مخصوص کمتر، درصد جذب آب، ارزش فشاری و ضربه‌ای بیشتری از لیکا و لیاپور دارند و از لحاظ دانه‌بندی و pH هر سه سبکدانه در یک محدوده قرار دارند. با توجه به نتایج بدست آمده، شیل منبسط‌شده تولید شده سبکتر از نمونه‌های تولیدی در ایران است اما مقاومت کمتری از آنها دارد و می‌توان از آن به عنوان پرکننده، ساخت عایق‌های حرارتی و ساختن بتن برای دیوارهای جداکننده و غیربابر استفاده کرد.

کلید واژه ها: *شیل منبسط شده، تئوری ریلی، حرارت‌دهی، لیکا، لیاپور، خواص فیزیکی و مکانیکی*

[۱] دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
[۲] دانشیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران nikudelm@modares.ac.ir
*مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

با توجه به نیاز گسترده و روز افزون جامعه به عملیات عمرانی و آبادانی، استفاده از روش‌ها و مصالح جدید اهمیت بیشتری دارد. یکی از این مصالح جدید سبکدانه‌های مصنوعی می‌باشد. سبکدانه‌ها را می‌توان به دو دسته سبکدانه‌های طبیعی مانند اسکوریا (سنگ پا)، پومیس و پرلیت و سبکدانه‌های مصنوعی مانند لیکا، لیاپور و یونولیت تقسیم کرد. به‌دلیل محدودیت منابع و ذخایر مربوط به سبکدانه‌های طبیعی در دنیا, لزوم تولید یکنواخت و انبوه صنعتی سبکدانه‌ها به منظور کاربردهای مختلف و ساخت مصالح براساس این نوع سبکدانه‌ها به عنوان یک ضرورت در صنعت مطرح گردیده است. مجموعه‌ای از ویژگی‌های قابل توجه مانند وزن کم، هدایت حرارتی پایین، افت صوت مناسب، مقاومت در برابر آتش، دوام و پایداری شیمیایی و نظایر آن سبب گسترش کاربردهای متنوع سبکدانه‌های مصنوعی نسبت به سبکدانه‌های طبیعی در صنعت ساختمان، طرح‌های عمرانی(خاکریزهای سبک، مصالح پرکننده (backfil) پشت دیواره‌های حائل و تونل‌ها، مصالح زهکش، بتن سبک، قطعات پیش ساخته و غیره استفاده نمود که با توجه به وزن کم آن‌ها، باعث کاهش نیروهای جانبی، نشست و تغییر مکان در سازه‌ها می شود)، کشاورزی، محیط زیست، راه‌سازی، صنایع نفت، ریخته‌گری و... شده است. مهمترین مزیت این مصالح مربوط به وزن مخصوص کم آن‌ها و ترکیبات تولید شده از آن‌ها است (Abdullah, 2005 ، تهرانی ۱۳۷۷، ESCSI 2011).

در عصر صنعتی شدن و همزمان با توسعه فناوری، کاربرد سبکدانه‌ها در کشورهای مختلف خصوصا در کشورهای پیشرفته گسترش قابل توجهی یافته است. به نحوی که در بعضی از کشورها مصرف سرانه سبکدانه‌ها به حدود ۲۰۰ لیتر در سال می‌رسد؛ در حالی که در کشور ما در حد بسیار کم و در حدود ۲ لیتر در سال است (شکرچی‌زاده و همکاران ۱۳۸۷). در دنیا مصالح مختلفی از جمله پرلیت، ورمیکولیت، رس، اسلیت، شیل و غیره برای تولید سبکدانه-های مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

استفاده از سبکدانه‌های طبیعی به سال‌های دور برمی‌گردد. اما استفاده از سبکدانه‌های مصنوعی از اواخر قرن ۱۹ آغاز شده است (Clarke, 1993). کوکنتال در سال ۱۸۸۰ در آلمان، تکه‌های رس متخلخل را با استفاده از تبخیر سریع آب رس تولید کرد (Chandra and Berntsson, 2002). از اوایل قرن بیستم مطالعات بر روی انبساط شیل‌ها و رس‌ها شروع شد. Jacson در سال ۱۹۰۳ اولین تئوری را برای توضیح انبساط و پف‌کرده‌گی (Bloating) رس‌ها و شیل‌ها ارائه کرد او معتقد بود که وجود اکسید آهن در رس‌ها و شیل‌ها برای انبساط در اثر حرارت دادن لازم است چون در ضمن تجزیه اکسید آهن اکسیژن خارج شده و باعث حفره‌دار شدن شیل و رس می‌شود (El-Hady, 1990).Riley(1951) با استفاده از تعداد آنالیزهای شیمیایی زیادی بر روی رس‌های منبسط‌شونده و غیر منبسط‌شونده موفق به تعیین محدوده‌ای به نام محدوده انبساط در یک نمودار مثلثی شد. سه راس اصلی این مثلث شامل SiO_2 ، Al_2O_3 و راس سوم شامل مجموعه‌ای از اکسیدهای گدازآور است محدوده ترکیب شمیایی ماده اولیه برای تولید سبکدانه‌ها که ریلی پیشنهاد کرد در نمودار مثلثی تعریف می‌شود(شکل۳). مواد اولیه‌ای که در محدوده مشخص شده قرار می‌گیرد داری خاصیت منبسط شوندگی است (Voland and Brotz, 2015, Medri et al., 2015).

مواد اولیه‌ای دارای خاصیت انبساط مناسب‌اند که دو شرط داشته باشند :

۱. دارای موادی باشند تا در دمای بالا مقداری گاز آزاد کنند.

۲. مواد اولیه در دمای بالا یک فاز مایع با ویسکوزیته بالا تولید کند تا بتواند گازهای آزاد شده را به دام بیاندازد.

طبق مطالعات صورت گرفته به طور کلی گازهایی که از مواد سست شده بوسیله حرارت آزاد می‌شود و باعث انبساط شیل‌ها و رس‌ها می‌شوند عبارتند از (Medri et al., 2015):

•بخار آب آزاد شده از تبخیر مولکول‌های آب بین لایه‌ای یا بین بلوری کانی‌های رسی و یا سایر سیلیکاتها

•CO و CO_2 آزاد شده از مواد آلی

•CO_2 آزاد شده از گسستگی کربناتها

•CO_2 و O_2 تشکیل شده از کاهش ترکیبات آهن

•SO_X آزاد شده از اکسیداسیون سولفیدها

•F و Cl آزاد شده از کانی‌های رسی

در کشور ما سبکدانه‌های رسی لیکا و لیاپور در حال حاظر تنها نوع سبکدانه‌های مصنوعی تولیدی می‌باشد. این سبکدانه، از رس انبساط‌پذیر به روش فرآیند تر در داخل کوره گردان افقی تولید می‌شود. چنان که از مخلوط کردن رس و آب و سایر افزودنی‌ها، گل ایجاد می‌شود و این گل از دریچه بالای کوره گردان وارد آن می‌شود. قطعات کوچک گل در طی حرکت درون کوره پس از خشک شدن در ناحیه پخت که دمای آن در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است، منبسط می‌شوند (Chandra and Berntsson, 2002). این در حالی است که منابع رس مناسب برای تولید سبکدانه در کشور فروان نیست و مقدار زیادی از منابع رس موجود خاک‌های کشاورزی را شامل می‌شوند. با توجه به فروان بودن و گستردگی شیل‌ها در زون‌های ساختاری مختلف ایران، هدف این تحقیق، بررسی ترکیب شیمیایی شیل‌ها و مارن‌های استان فارس جهت تولید مصالح سبکدانه و مقایسه ویژگی-های سبکدانه‌های تولیدی از آن‌ها با سبکدانه‌های تولیدی در ایران می‌باشد.

۲. نمونه‌برداری و زمین‌شناسی عمومی منطقه

منطقه مورد مطالعه شامل برونزدهای سازندهای شیلی پابده و گورپی در استان فارس(شهرستان شیراز، شهرستان سپیدان و شهرستان ممسنی) می باشد(شکل ۱ و ۲).

شکل ۱. محدوده مطالعاتی

شکل ۲. نمایی از رخنمونهای مورد مطالعه: الف) مارن رازک ب) مارن میشان ج) شیل گورپی د)شیل ارغوانی سازند پابده

به منظور انجام مطالعات شیمیایی، کانی،شناختی و آزمایش-های اولیه مکانیک خاک، نمونه‌برداری از شیل‌های مورد نظر به روش روزنه‌ای و شبکه‌بندی سیستماتیک انجام شد (موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۵). به این

ترتیب که ابتدا ۹ نقطه بر روی گوشه‌های مربع‌هایی به طول ۱/۵ متر انتخاب و روی هریک از این نقاط روزنه‌ای به عمق ۳۰ سانتی‌متر ایجاد شد. سپس نمونه‌هایی به وزن ۲ کیلوگرم از هر روزنه برداشت شد سپس خردایش بر روی نمونه‌ها انجام شد و کلیه نمونه‌های برداشتی با هم مخلوط شد و نمونه مرکب بدست آمد. از نمونه کل به روش چهار بخش کردن، نمونه نهایی به دست آمد، نمونه حاصل بوسیله آسیاب پودر شد و سپس از الک ۲۰۰ عبور داده شد.

۳. آزمایشات

جهت تعیین خصوصیات شیمیایی و کانی‌شناسی مواد خام اولیه و تعیین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی شیل منبسط‌شده، لیکا و لیاپور آزمایش‌ها انجام شد که خلاصه‌ای از آزمایشات و دلایل توجهی آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. آزمایشات انجام شده و دلیل انجام آن‌ها

نام آزمایش	استاندارد آزمایش	دلیل انجام آزمایش
XRD	ASTM D3906	تعیین کانی‌شناسی
XRF	ASTM D5381	تعیین درصد اکسیدها
دانه‌بندی	AASHTO T: 88-81 و ASTM C136 / C136M-14	تعیین توزیع اندازه دانه‌ها نسبت به قطر
وزن مخصوص	ASTM C29	تعیین وزن مخصوص توده‌ای و دانه‌ای نمونه‌ها
درصد جذب آب	EN 1097-6-C	تعیین جذب آب نمونه‌ها نسبت به زمان و نسبت به قطر دانه‌ها
ارزش ضربه‌ای	BS 812 - Part 112	تعیین مقاومت سبکدانه‌ها در برابر ضربه
ارزش فشاری	BS 812 - Part 110	تعیین مقاومت سبکدانه‌ها در برابر فشار
pH	ASTM D1293 - 12	تعیین pH عصاره اشباع نمونه‌ها

٤. نتایج

٤-۱. آزمایش XRD و XRF

نتایج آزمایش XRF و XRD در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول۲. نتایج XRF

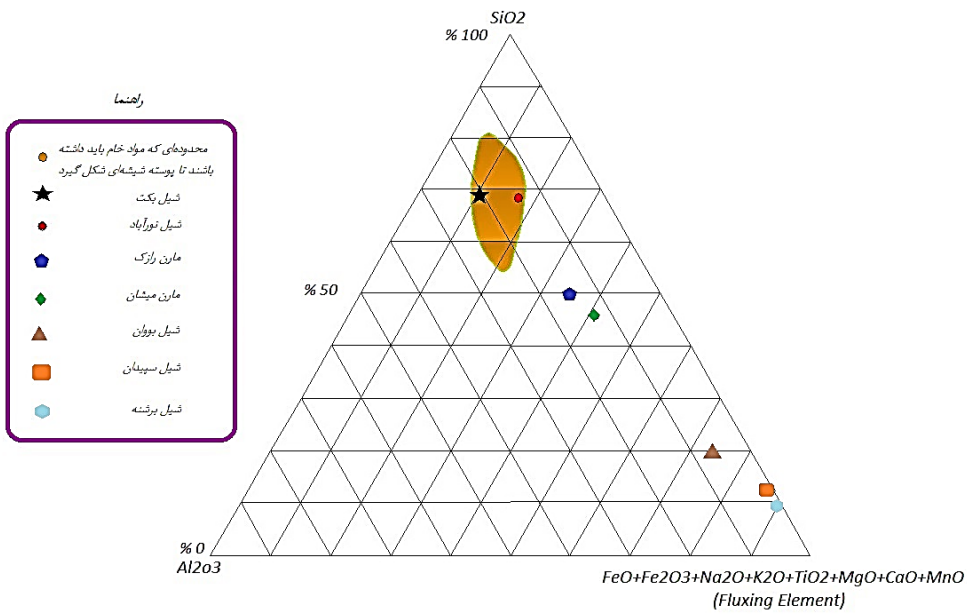
نام نمونه اکسید	شیل بکت	شیل نورآباد	شیل سپیدان	شیل بووان	شیل برشنه	مارن رازک	مارن میشان
L.O.I.(%)	۷/۲	۱٤/٤٥	۳٦/٥	۳٥	۳٤/۳	۱۷/٦۳۰	۲۲/۹۸۰
Na_2O(%)	۱/۰٤٤	۰/۲٤٥	–	–	–	۰/۷۳٥	۰/۳٥٥
MgO(%)	۱/۹۱۲	۸/۷۷	۰/٥۸۸	–	–	٥/٦۷٤	٦/۲٦۸
Al_2O_3(%)	۱۷/۷۸٥	۱۰/٥۱۱	٤/۲٤۱	–	–	۱۱/۳۲۳	۹/۳٤۸
SiO_2(%)	٥۹/۰٤	٤٥/٤٤۹	۱۱/۹۸۷	٦/۳۲٤	۹/۱۹٤	۳۹/٦۳	۳۳/۱٤۲
P_2O_5(%)	۰/۱٥	۰/۱۱٤	۰/۱۰٥	–	–	۰/۱٦۹	۰/۱۳۹
SO_3(%)	۰	۱/٥٤٥	۰/٤۷۳	–	–	۰/۱٥٥	۰/۲٦٤
CaO(%)	۲/۲۲٦	۷/٥۹۸	٤۳/٦۳٤	٥٦/۹۲۱	٦۷/۲۱۹	۱۷/٤۹۹	۲۱/۳٤۹
K_2O(%)	۳/۲۱٥	۰/۹۹٥	۰/٦۳٥	–	–	۱/۹٤٥	۱/۷۳۲
TiO2(%)	۰/۸٥۳	۰/۸۳٤	۰/۲۱۳	–	–	۰/۷۲۷	۰/٥۰۷
Fe_2O_3(%)	٦/٥٥۱	۹/۱۸۳	۱/٥۸۱	۱/٦۸۲	۲/٥۹۳	٤/٤۰۷	۳/۷۸٥
Ni+Sr+Zr(%)	%۱ >	%۱ >	%۱ >	%۱ >	%۱ >	%۱ >	%۱ >

جدول۳. کانی‌های موجود در نمونه‌ها بر اساس آزمایش *XRD*

نام نمونه	کانی‌های موجود در نمونه بر اساس فروانی
شیل بکت	کوارتز، ورمیکولیت، آلبیت، کلسیت،دولومیت، ژیپس
شیل نورآباد	کوارتز، آلبت، کلینوکلر، کلسیت، مسکوویت
شیل سپیدان	کلسیت، کوارتز، ساپونیت، گرینیلیت
شیل بووان	کلسیت، کوارتز، گرینیلیت، ساپونیت
شیل برشنه	کلسیت، کوارتز، گرینیلیت، ساپونیت
مارن رازک	کوارتز، کلسیت، دولومیت، کلینوکلر، مسکوویت، آلبیت
مارن میشان	کوارتز، دولومیت، کلسیت، آلبیت، مسکوویت، کلینوکلر

طبق تئوری Riley (1951) نمونه‌هایی داری خاصیت منبسط شوندگی می‌باشند که محل قرارگیری آنها در نمودار سه بعدی ریلی در محدوده منبسط‌شوندگی قرار داشته باشد. بعداز تعیین درصد اکسید موجود در نمونه‌ها محل قرارگیری آنها به کمک نرم‌افزار minpet در نمودار ریلی تعیین شد. باتوجه به محل نمونه‌ها در نمودار ریلی نمونه‌های شیل بکت و شیل نورآباد که هردو متعلق به عضو شیل‌های ارغوانی سازنده پایده است در محدوده منبسط‌شوندگی قرار گرفت. یکی دیگر از پارامترهای موثر در انتخاب نوع مواد خام اولیه نوع و مقدار کانی رسی موجود در نمونه‌ها است. نمونه‌هایی که میزان کانی رسی بالایی دارند، و طبق مطالعات Hyddn and Smith (1958) نمونه‌هایی که کانی‌های رسی از خانواده مونت‌موریونیت دارند برای حرارت‌دهی مناسب‌ترند و منبسط‌شوندگی بهتری دارند. که با توجه به آنالیز انجام گرفته نمونه شیل بکت و شیل نورآباد دارای کانی رسی از خانواده مونت موریونیت هستند.

سپس محل قرارگیری ترکیب شیمیایی تمام نمونه ها در نمودار مثلثی Riley موقعیت‌یابی شد(شکل ۳). باتوجه با محل قرارگیری نمونه‌ها در نمودار Riley ، شیل‌های بکت و نورآباد به عنوان مواد اولیه مناسب برای حرارت‌دهی انتخاب شدند.



شکل ۳. محل قرارگیری نمونه‌ها در نمودار Riley (1951)

٤-۲. فرآیند تولید سبکدانه از نمونه‌ها

برای تولید سبکدانه‌هایی با اندازه(قطر) مناسب ابتدا خردایش صورت گرفت. خردایش در مقیاس آزمایشگاهی بوسیله سنک‌شکن فکی انجام گرفت. سپس با توجه به مطالعات صورت گرفته و داشتن یک ایده اولیه از دمای مورد نیاز کوره (Al-Ajeel et al., 2011; Ozguven and Gunduz, 2012)، ابتدا بر روی ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد و بعداز ۵ دقیقه حرارت‌دهی وضعیت نمونه‌ها بررسی گردید و با توجه به تکرار حرارت‌دهی دمای مناسب برای تولید سبکدانه‌ها بدست آمد. جدول ٤ و شکل ٤ وضعیت نمونه‌ها از لحاظ انبساط، دمای انبساط و دلیل انتخاب یا رد نمونه‌ها را ارائه می‌کند.

شکل ٤. الف) دمای مناسب برای شیل بکت، ب) نمونه منبسط شده شیل نورآباد، ج) نمونه منبسط شده شیل بکت، د)نمونه منبسط شده مارن رازک، ه) حالت انفجاری شیل نورآباد

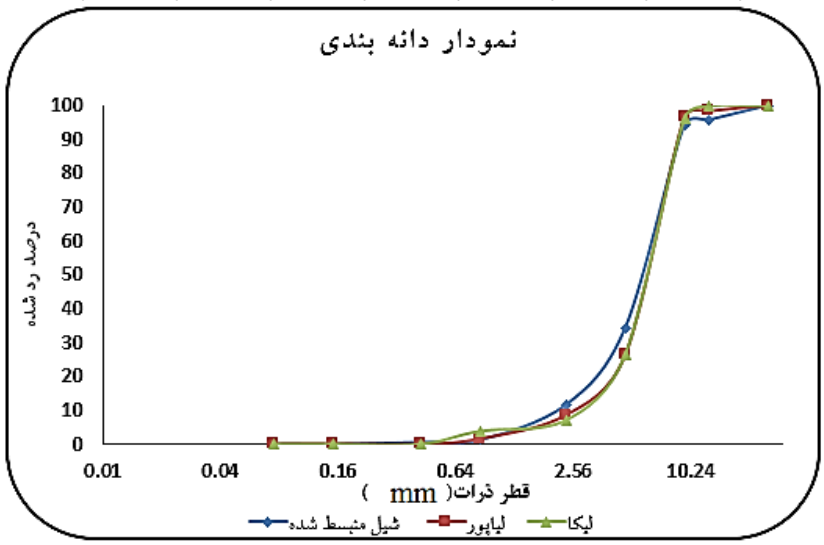
جدول ٤. وضعیت نمونه‌ها از لحاظ انبساط، دمای انبساط و دلیل انتخاب یا رد نمونه‌ها

نام نمونه	دمای منبسط-شوندگی	وضعیت منبسط-شوندگی	دلیل انتخاب یا رد نمونه
شیل بکت	۱۱۵۵	مناسب	انبساط بسیار مناسب، دمای حرارت‌دهی کمتر از سایر نمونه‌ها و دارای بودن رس‌هایی از خانواده مونت‌موریونیت سبب انتخاب این نمونه به عنوان نمونه اصلی شد.
شیل نورآباد	۱۱۸۵	مناسب	با وجود انبساط نسبتا مناسب، اما به دلیل دارا بودن حالت انفجاری در حرارت‌دهی (شکل ٤ قسمت ه) و دمای حرارت‌دهی بالاتر و از طرف دیگر در دسترس نبودن کوره مناسب (از لحاظ ابعاد و زمان قابل استفاده) این نمونه نیز کنار گذاشته شد.
مارن رازک	۱۱٦۰	نامناسب	با توجه بالا بودن درصد کربنات کلسیم بالای آن و اندک بودن کانی‌های رسی در ترکیب آن از مقاومت و منبسط‌شوندگی مناسب برای تولید سبکدانه‌ها مناسب برخوردار نبود و همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد در محدوده انبساط نمودار Riley هم قرار نمی‌گیرد.
مارن میشان	-	بسیار نامناسب	این نمونه در بازه‌ی دمایی در نظر گرفته شده (۱۱۰۰ تا ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) انبساطی نشان نداد و و همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد در محدوده انبساط نمودار Riley هم قرار نمی‌گیرد.

٤-۳. ویژگی‌های سبکدانه‌های تولیدی و مقایسه آن با سبکدانه‌های تولیدی در ایران

٤-۳-۱. دانه بندی

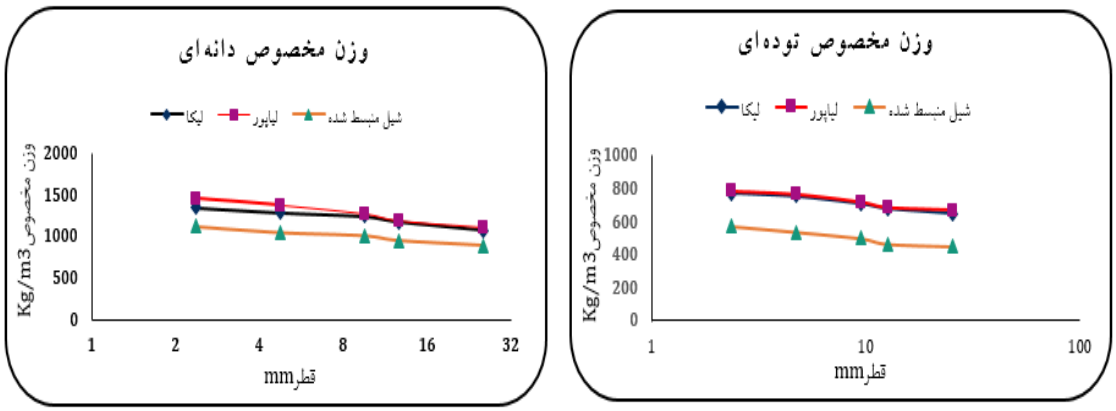
دانه‌بندی با استفاده از استانداردهای ذکر شده بر روی شیل منبسط‌شده، لیکا (تهیه شده از شرکت لیکای ساوه) و لیاپور (تهیه شده از شرکت عمران پارس کرمان) انجام گرفت(شکل ۵). دانه‌بندی شیل منبسط شده نیز نزدیک به دانه‌بندی لیکا و لیاپور بود و دانه‌های ریزتر از ۱/۱۸ میلی-متر(الک ١٦) وجود نداشت دلیل آن نیز این است که وقتی نمونه خام اولیه در کوره قرار داده می‌شود ذارت ریز به دلیل قطر کمی که دارند توانایی تحمل فشار ناشی از گازهای آزاد شده را ندارند و دچار ترکیدگی می‌شوند و به ذرات ریزتری که فاقد ساختار متخلخل‌اند تبدیل می شوند که عملا ذراتی با همان وزن مخصوص اولیه می‌باشند.



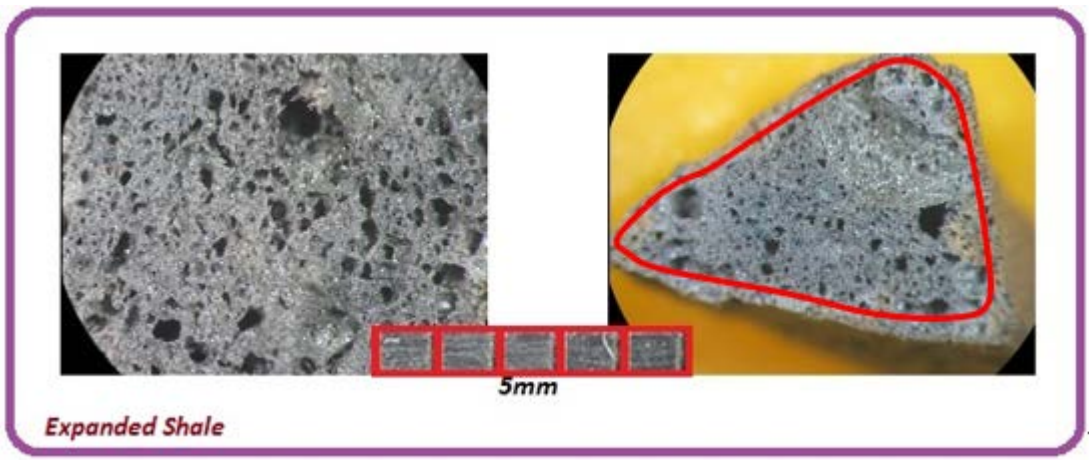
شکل ۵. نمودار دانه‌بندی شیل منبسط‌شده، لیکا و لیاپور

٤-۳-۲. وزن مخصوص

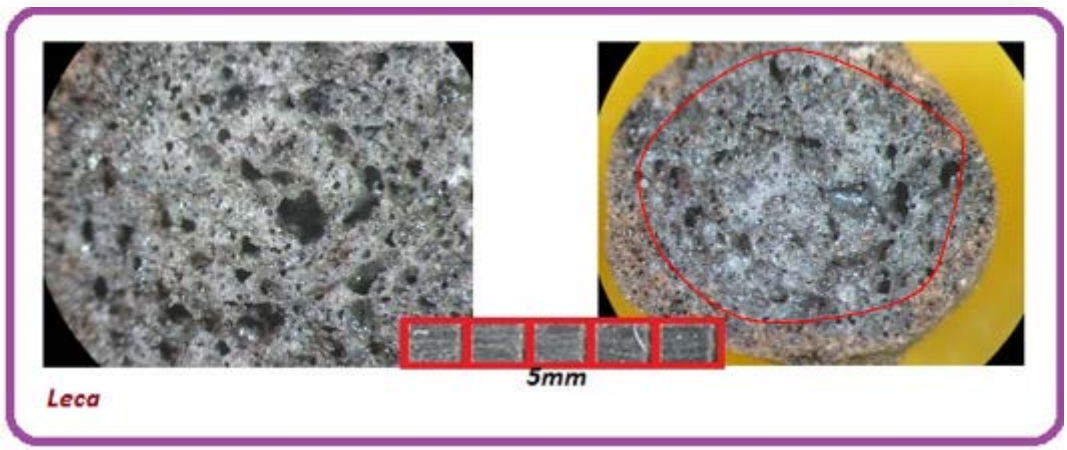
آزمایش وزن مخصوص توده‌ای و دانه‌ای براساس استانداردهای ذکر شده و بر اساس کارهای Ozawa et al. (1996) و Buyle-Bodin and Madhkhan (2002) برای شیل منبسط شده، لیکا و لیاپور انجام شد. وزن مخصوص دانه‌های ریز بیشتر از وزن مخصوص دانه‌های درشت است و این تفاوت به ساختار دانه‌های ریز و درشت برمی‌گردد. دانه-های ریز به دلیل اینکه کمتر منبسط می‌شوند به طور کلی حفرات کوچکتری نسبت به دانه‌های درشت دارند (شکل٦) و درصد کمتری از حجم دانه را حفرات تشکیل می‌دهد در حالی که دانه‌های درشت‌تر حفرات بزرگتری دارند و به طور نسبی درصد بیشتری از حجم دانه را حفرات تشکیل می‌دهند (شکل۷). به همین دلیل دانه‌های ریز دارای وزن مخصوص بیشتری از دانه‌های درشت می‌باشند. از طرف دانه‌های لیاپور حفرات ریزتری از دانه لیکا دارند و دانه‌های لیکا نیز حفرات ریزتری از شیل منبسط دارند (شکل۷، ۸ و۹) به همین دلیل وزن مخصوص آن‌ها بیشتر از شیل منبسط است.



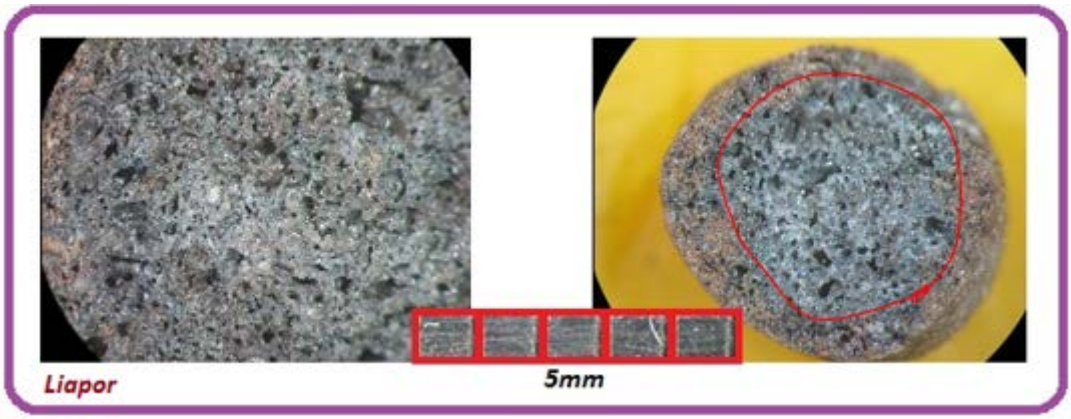
شکل٦. نمودار وزن مخصوص شیل منبسط شده، لیکا و لیاپور نسبت به قطر



شکل۷. ریز ساختار حفرات در شیل منبسط شده



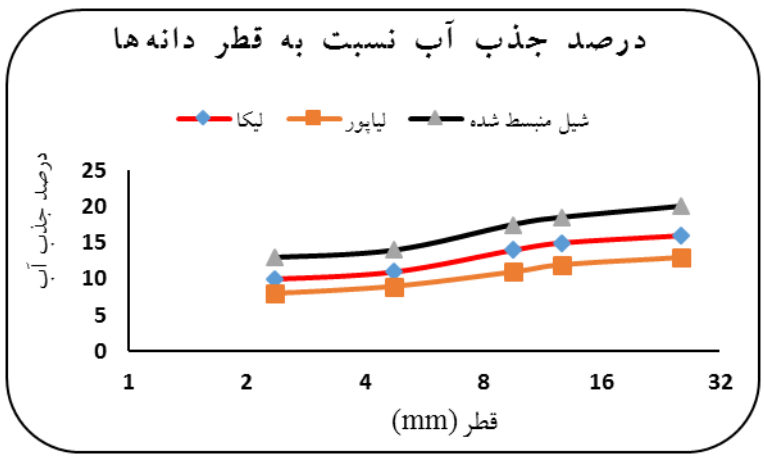
شکل۸. ریز ساختار حفرات لیکا



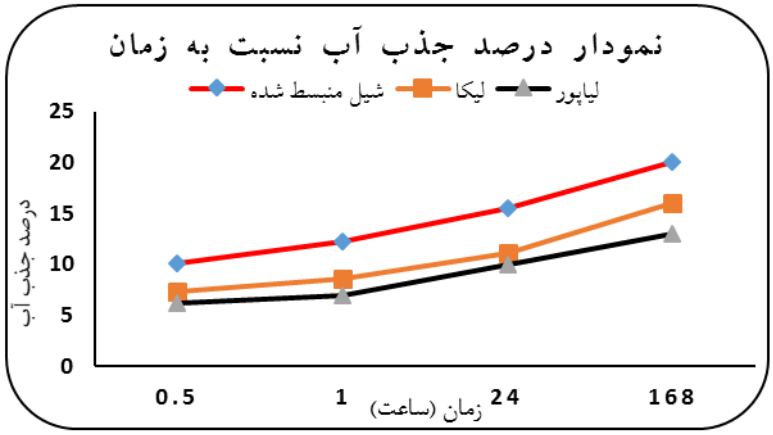
شکل۹. ریز ساختار حفرات لیاپور

٤-۳-۳. درصد جذب آب

برای تعیین درصد جذب آب سبکدانه‌ها در بازه‌های زمانی مشخص، آنها را در زمان معین درون آب قرار داده و درصد رطوبت جذبی آنها بر اساس استاندارد ذکر شده و کار Ouchi et al (1996) محاسبه شد (میزان درصد جذب آب هر سه نوع سبکدانه به سه عامل ساختار متخلخل شکل گرفته، قطر دانه و زمان بستگی دارد. با افزایش قطر دانه‌ها اندازه حفرات بیشتر شده و درصد تخلخل افزایش و در نتیجه درصد جذب آب افزایش می‌یابد و با کاهش قطر دانه‌ها اندازه حفرات ریزتر شده و ارتباط حفرات محدودتر می‌شود و در نتیجه درصد تخلخل دانه‌ها کمتر و درصد جذب آب نیز کمتر می‌گردد(شکل۱۰). و با افزایش مدت زمان قرارگیری سبکدانه‌ها در آب درصد جذب آب در هر سه نوع سبکدانه افزایش می یابد(شکل۱۱).



شکل۱۰. درصد جذب آب نسبت به قطر دانه‌ها



شکل ١١. درصد جذب آب نسبت به زمان

٤-٣-٤. ارزش ضربه‌ای سبکدانه‌ها

این آزمایش بر روی سبکدانه‌های تک‌اندازه انجام می‌شود. در این آزمایش، ١٥ مرتبه وزنه ١٣/٥ کیلوگرمی از ارتفاع ٣٨٠ میلیمتری بر روی سنگدانه‌های متراکم شده در استوانه مخصوص، سقوط می‌کند و مقدار درصد عبوری از الک جداکننده گزارش می‌شود (Nehdi et al., 2003) (جدول ٥).

٤-٣-٥. ارزش فشاری سبکدانه‌ها

در این آزمایش برای دانه‌های ٣٥/٣ الی ١٠ میلیمتری از استوانه‌ای به قطر حدود ٧٥ میلی متر و بار ١٠٠ KN استفاده می‌شود. طبق استاندارد، سنگدانه‌ها باید به صورت تک‌اندازه درآیند و بر روی نمونه‌ها، بار مورد نظر اعمال گردد و سپس از الک جداکنندهٔ استاندارد عبور داده و درصد عبوری به عنوان نتیجه آزمایش اعلام شود (Nehdi et al., 2003) (جدول ٥).

و در نهایت برای پیش‌بینی وضعیت واکنش‌پذیری سبکدانه‌ها، pH عصاره اشباع آنها تعیین شد که pH عصاره اشباع آنها خنثی بود و بنابراین واکنش‌پذیری ندارند(جدول٥).

جدول٥. سایر ویژگی‌های مصالح

نام نمونه	ارزش ضربه‌ای	ارزش فشاری	pH پودر نمونه
شیل منبسط شده	٣٥	٥٧	٧/١
لیکا	٣١	٥٤	٧/٢
لیاپور	٢٨	٤٩	٦/٩

نتایج نشان داد که لیاپور کمترین ارزش ضربه‌ای و ارزش فشاری را دارد و شیل منبسط‌شده بیشترین ارزش ضربه‌ای و فشاری را دارد. این تفاوت را می‌توان به ساختار متخلخل و ضخامت قشر شیشه‌ای دانه‌ها نسبت داد به گونه‌ای که لیاپور و لیکا هم قشر شیشه‌ای ضخیم‌تری از شیل منبسط شده دارند و هم میزان تخلخل آنها از شیل منبسط‌شده کمتر است. لیاپور و لیکا با وجود اینکه قشر شیشه‌ای تقریبا یکنواختی دارند ولی میزان تخلخل لیاپور از لیکا کمتر است و همین سبب مقاومت

بیشتر لیاپور از لیکا می‌شود. به طور کلی رابطه بین تخلخل و وزن مخصوص سبکدانه‌ها با مقاومت آنها رابطه‌ای معکوس است. همچنین pH سبکدانه‌ها تقریبا خنثی بوده و هیچگونه آسیبی به تاسیسات عبور داده شده از لایه آنها وارد نمی‌کند وباعث هیچ نوع خورندگی و پوسیدگی سایر اجزا نمی‌شود.

نتایج حاصل از آزمایشات و نتیجه‌گیری نهایی در جدول شماره ٦ آورده شده است :

جدول ٦. نتایج حاصل از آزمایشات و نتیجه‌گیری نهایی

نام ویژگی	مقایسه ویژگی‌های سبکدانه تولیدی با سبکدانه‌های موجود در بازار ایران
دانه‌بندی	دانه‌بندی شیل منبسط شده مشابه دانه‌بندی لیکا و لیاپور است و در هر سه سبکدانه به دلیل اینکه ذرات ریز توانایی تحمل فشار ناشی از گازهای آزاد شده را نداشتند ذارات ریزتر از ١/١٨ میلی‌متر(الک ١٦) وجود نداشت.
وزن مخصوص	در هر سه نوع سبکدانه وزن مخصوص دانه‌های ریز بیشتر از وزن مخصوص دانه‌های درشت بود.
جذب آب	در هر سه نوع سبکدانه با افزایش قطر دانه‌ها درصد جذب آب افزایش و با کاهش قطر دانه‌ها درصد جذب آب نیز کاهش می‌یابد و با افزایش مدت زمان قرارگیری سبکدانه‌ها در آب درصد جذب آب در هر سه نوع سبکدانه افزایش می‌یابد.
ارزش ضربه‌ای	از لحاظ ارزش ضربه‌ای، سبکدانه‌های شیل منبسط شده بیشترین ارزش ضربه‌ای را دارا بود.
ارزش فشاری	از لحاظ ارزش فشاری، سبکدانه‌های شیل منبسط شده بیشترین ارزش فشاری را دارا بود.
pH	عصاره اشباع، هر سه نوع سبکدانه در محدوده خنثی قرار داشتند.

٥- نتیجه‌گیری

تولید مصالح سبک در کشور ما محدود است و شرکت لیکای ساوه و اخیرا شرکت عمران پارس کرمان تنها تولیدکننده‌های مصالح سبک می‌باشند که این شرکت‌ها سبکدانه‌ها را از کلوخه‌سازی و اضافه کردن ماده‌های افزودنی به خمیر رسی و سپس حرارت دادن تولید می‌کنند این در حالی است که منابع رس مناسب برای تولید سبکدانه‌ها اندک است و اکثر منابع رس موجود، خاکهای مرغوب کشاورزی را تشکیل می‌دهند. با توجه به فراوانی شیل در زون‌های مختلف ساختاری ایران استفاده از شیل برای تولید سبکدانه‌ها می‌تواند جایگزین مناسبی بجای خاک رس برای تولید مصالح سبک باشد. در این تحقیق شیل‌ها نسبت به مارن‌ها برای تولید مصالح سبک مناسب‌تر تشخیص داده شدند و در بین شیل‌ها به دلیل تنوعی که در ترکیب شیمیایی آنها وجود دارد، شیل‌ها ی آرژیلیتی بکت و نورآباد که ترکیب شیمیایی آن در محدوده منبسط‌شوندگی در نمودار ریلی قرار گرفت و داری مقادیر بالایی از کانی رسی و میزان مواد آلی آنها بالاتر است برای تولید مصالح سبک مناسب‌تر بودند. دمای انبساط برای مارن رازک ١١٦٠ºC بود با توجه بالا بودن درصد کربنات کلسیم بالا در مارن رازک و اندک بودن کانی‌های رسی در ترکیب آن از مقاومت و منبسط‌شوندگی مناسب برای تولید سبکدانه‌ها مناسب برخوردار نبود. شیل بکت در دمای C ١١٥٥º و شیل نورآباد در دمای ١١٨٥ºC دچار انبساط شدند شیل نورآباد در هنگام حرارت‌دهی حالت انفجاری داشت. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق شیل منبسط شده تولید شده سبکتر از نمونه‌های تولیدی در ایران است اما مقاومت کمتری از آنها دارد و می‌توان از آن به عنوان پرکننده، ساخت عایق‌های حرارتی و ساختن بتن برای دیوارهای جداکننده و غیربابر استفاده کرد.

تشکر و قدردانی:

در پایان از همکاری شرکت زمین فیزیک پویا خراسان وگروه بهداشت محیط دانشگاه تربیت مدرس، شرکت لیکای ساوه و شرکت عمران پارس کرمان بابت در اختیار گذاشتن امکانات و مصالح برای انجام تحقیقات، صمیمانه قدردانی می‌شود.

منابع:

آقانباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۷۰۷ ص.

تهرانی، ف،۱۳۷۷،راهنمای جامع لیکا: دانه‌های رس منبسط شده و فرآورده‌های آن.شرکت لیکا،تهران، ۱۴۳ص.

شکرچی‌زاده،م؛امدادی،ا؛لیبر،ن.ع؛۱۳۸۷. بتن سبکدانه، فناوری وکاربردها. موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۱۱۵ ص.

موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۵. دفتر امرو تدوین استاندارد، فهرست استانداردهای ساختمان، مصالح ساختمانی و مواد معدنی، استاندارد ۱۱۶۲، ۱۷ ص.

AASHTO, Designation T 88, 2000, Particle size analysis of soils.

AASHTO The Voice of Transportation. T0 27. (2006)

Al-Ajeel, A, Muslim, W., Joodi, M., 2011. Bloating characteristic of low grade Ca-Montmorillonite claystone and the effective of some additive. Iraqi Bulletin of Geology and Mining, 7(2): 57-67.

ASTM C29 / C29M-16, 2016, Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org

ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

ASTM C136 / C136M-14, 2014. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

ASTM D1293-12, 2012. Standard Test Methods for pH of Water. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

ASTM D3906-03), 2013. Standard Test Method for Determination of Relative X-ray Diffraction Intensities of Faujasite-Type Zeolite-Containing Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

ASTM D5381-93, 2014, Standard Guide for X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy of Pigments and Extenders, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

British Standards Institution, 2000. Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates: Part 6 Determination of Particle Density and Water Absorption. British Standards Institution.

BS 812-112, 1990, esting aggregates. Method for determination of aggregate impact value (AIV).

Burdett, J.K., Price, G.L., Price, G.L., 1982. Role of the crystal-field theory in determining the structures of spinels. Journal of American Chemical Society, 104: 92–95.

Buyle-Bodin , F., Madhkhan, M., 2002. Performance and modelling of steel fiber reinforced piles under seismic loading.Engineering Structures, 24: 1049-1056.

Chandra, S., Berntsson, L., 2002. Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technalogy and Applications. First ed., Noyes Puplications, New York, 250p.

Clarke, J.L., 1993. Structural Lightweight Aggregate. First ed., Blackie Academic, Professional, Londen.

El-Hady, A., 1990, Analictical and Mechanical Investigation of Lightweight Expanded Clay Aggregate for Utilizationin Concrete. Master of science thesis, Ain shams University, Cairo, 114p.

Haydn, H., Smith, M., 1958. Lightweight Aggregate Potentialities of Some Indiana Shale. Indiana Department of Conservation Geologival Survey, Report of Progress, 12.

ESCSI, 2011 . Expanded Shale, Clay and Slate Inistitute. Document 7600, available at www.escsi.org.

Medri, V., Papa, E., Mazzocchi, M., Laghi, L., Morganti, M., Francisconi, J., Landi, E., 2015. Production and characterization of lightweight vermiculite/ geopolymer-based panels. Materials and Design, 85: 266–274.

Nehdi, M., Duquette, J., Damatty, E.L., 2003. Performance of rice husk ash produced using a new technology as mineral admixtures in concrete. Cement and Concrete Research, 33: 1203-1210.

Ouchi, M., Hibino, M., Okamura, H. 1996. Effect of super plasticizer on self-compact ability of fresh concrete, Journal of Transportation Research Board, 1574: 37- 40.

Ozawa, K., Maekawa, K., Okamura, H., 1996. Self-Compacting high performance concrete , Collected Papers (University of Tokyo: Department of Civil Engineering), 34: 135-149.

Ozguven, A., Gunduz, L., 2012 .Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate. Cement & Concrete Composites, 34(28): 781-787.

Riley, C.M., 1951. Relation of chemical properties to the bloating of clays. Minnesota Geological Survey, Summary Report , Minnesota, 5: 121–28.

Sabtan, A.A., 2005. Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia. Journal of Asian Earth Sciences, 25: 747–757.

UNE-EN 1097-6, 2000. Test for mechanical and physical properties of aggregates, Part 6: determination of particle density and water absorption.

Volland, S., Brötz, J., 2015. Lightweight aggregates produced from sand sludge and zeolitic rocks. Construction and Building Materials, 85: 22–29.