



دانشگاه تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۰
تالار شهید چمران - انستیتو مصالح ساختمانی
پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران



اولین کنفرانس ملی سبک

مقایسه مشخصات دانه‌های رس منبسط شده با وزن مخصوص و قطرهای مختلف

علیرضا اردکانی^۱، محمود یزدانی^۲

^۱دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس a.r.ardakani@gmail.com

^۲دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

مجموعه‌ای از ویژگی‌های قابل توجه، سبب گسترش کاربردهای سبک‌دانه‌های مصنوعی شده است. با توجه به کاربرد آنها در صنایع مختلف، تعیین خواص این نوع سنگ‌دانه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. به لحاظ عدم وجود سبک‌دانه‌های مصنوعی در ابعاد مناسب و غیر همسانی، تعیین ویژگی‌های سبک‌دانه‌های مصنوعی دارای پیچیدگی‌های ویژه‌ای می‌باشد. در حال حاضر رس منبسط شده یا لیکا در کشورمان با وزن مخصوص‌های مختلف تولید می‌شود. در این تحقیق به منظور تعیین اثر وزن مخصوص و اندازه بر جذب آب، مقاومت در برابر ساییدگی، ضربه و بار فشاری، آزمایش‌های مختلف بر روی دو گروه دانه انجام شده است. هر گروه دانه دارای ۴ اندازه دانه با قطرهای مختلف است که در شرایط یکسان تولید شده‌اند. همچنین با ترکیب سبک‌دانه‌ها و ملات ماسه سیمان و ساخت نمونه‌هایی استوانه‌ای ۱۵ در ۳۰ سانتیمتر با درصد حجمی ۱۰ الی ۴۰ درصد از سبک‌دانه‌ها، و با انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، به بررسی مقاومت ماده مرکب ساخته شده از آنها پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها حاکی از تاثیر قابل توجه قطر و چگالی دانه‌ها بر مشخصات مکانیکی مصالح، با وجود شرایط یکسان تولید می‌باشد.

کلمات کلیدی: رس منبسط شده، وزن مخصوص، قطر دانه، چگالی دانه، وزن مخصوص.

۱- مقدمه

سبک‌دانه‌ها را می‌توان به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم بندی نمود. استفاده از سبک‌دانه‌های طبیعی به سال‌های بسیار دور برمی‌گردد، اما استفاده از سبک‌دانه‌های مصنوعی از اواخر قرن ۱۹ آغاز شده است، به طوریکه کوکنتال در سال ۱۸۸۰ در آلمان، تکه‌های رس متخلخل را با استفاده از تخییر سریع آب رس تولید کرد [۱]. هایدی (۱۹۱۸) یک سازنده آجر و مهندس سرامیک، فرآیند کوره چرخان را ابداع کرد و کاربرد سنگدانه رس منبسط شده را توسعه بخشید [۲]. مجموعه‌ای از ویژگی‌های قابل توجه مانند وزن کم، هدایت حرارتی پایین، مقاومت در برابر آتش، دوام و پایداری شیمیایی و نظایر آن سبب گسترش کاربردهای متنوع این سبک‌دانه مصنوعی در صنعت ساختمان، طرح‌های عمرانی، کشاورزی، محیط زیست، راه‌سازی، صنایع نفت و ریخته‌گری و... شده است [۳-۴].

سبک‌دانه رسی یا لیکا در حال حاضر تنها در دو نوع اصطلاحاً معمولی و سازه‌ای در کشورمان تولید می‌شود. این سبک‌دانه، از رس انبساط پذیر به روش فرآیند تر در داخل کوره گردان افقی تولید می‌شود. به طوریکه از مخلوط کردن رس و آب و سایر افزودنی‌ها، گل ایجاد می‌شود و این گل از دریچه بالای کوره گردان وارد آن می‌شود. در طی حرکت درون کوره پس از خشک شدن، در ناحیه پخت که دمای آن در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد است، منبسط می‌شود [۱]. محصول خروجی از کوره غالباً دارای قطر صفر تا ۲۵ میلی متر است. با تغییر در مصالح اولیه، میزان افزودنی‌ها، درصد رطوبت اولیه و دمای کوره و سرعت گردش آن، می‌توان سبک‌دانه با وزن مخصوص متفاوت تولید کرد. سبک‌دانه‌های لیکا عموماً با توجه به وزن مخصوص توده‌ای خشک، در کشورهای اروپایی تقسیم بندی می‌شوند و وزن مخصوص توده‌ای تقریبی آن به دنبال نام لیکا قرار می‌گیرد [۵]. با توجه مشخص نبودن منحنی دانه‌بندی مصالح، عموماً این تقسیم‌بندی دقیق نمی‌باشد. شیوه دیگر دسته‌بندی سبک‌دانه‌ها که در ایران استفاده می‌شود، بر اساس اندازه قطر دانه‌ها می‌باشد. به طور مثال لیکا ۰-۴ یا لیکا ۴-۸. منظور از لیکا ۴-۸ سبک‌دانه‌هایی است که اندازه دانه‌های آنها بین ۴ تا ۸ میلیمتر می‌باشد. در این تحقیق به منظور بررسی اثر قطر و وزن مخصوص بر ویژگی‌های آنها، چهار اندازه یکنواخت، از هر یک از دو نوع سبک‌دانه تولید داخل، که هر یک در شرایط و با مواد اولیه یکسان (اصطلاحاً با نام‌های معمولی و سازه‌ای) تولید شده است، تهیه شده و با انجام آزمایش‌های مختلف، ویژگی‌های آنها مقایسه شده است.

۲- بررسی مطالعات گذشته

غالب تحقیقات انجام شده بر روی سبک‌دانه لیکا، مربوط به بررسی ویژگی ماده مرکب سیمانی (بتن و بلوک) ساخته شده از آنها می‌باشد. کوانده (۲۰۰۱) در غالب رساله دکتری به بررسی ویژگی‌های بلوک ساخته شده از لیکا نروژ پرداخت [۶]. شکرچی‌زاده و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی طرح اختلاط بتن بهینه، با استفاده از لیکا سازه‌ای ۵۰۰ و ۷۰۰ پرداختند [۲]. رئیس قاسمی و همکاران (۱۳۹۰) یک مدل دو فازي خمیر-دانه برای تعیین نسبت اختلاط بتن‌های سبک‌دانه حاوی لیکا برای رسیدن به روانی و مقاومت فشاری ارائه کردند [۷]. در این تحقیقات از دانه‌های لیکا با دانه‌بندی مشخص به عنوان مصالح استفاده شده است و تفکیکی از نظر تاثیر قطر بر ویژگی ماده مرکب ساخته شده، ارائه نشده است.

۳- برنامه آزمایشگاهی و مصالح مورد استفاده

در این تحقیق، مطالعه جامع بر روی خواص دانه‌های لیکا با چگالی و اندازه‌های مختلف، مدنظر است. بدین منظور بر روی دانه‌های انتخاب شده آزمایش‌های وزن مخصوص توده‌ای و ظاهری، مقاومت در برابر ساییدگی و ضربه، مقاومت در برابر خردشدگی بر اساس استانداردهای مختلف انجام شده است. همچنین با ترکیب ماتریکس سیمانی و سبک‌دانه، ماده مرکب دو فازي ساخته شده و با اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری مواد مرکب به بررسی مقاومت آنها در قالب ماده مرکب پرداخته شده است. مصالح مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از:

سبک‌دانه: با توجه به وزن مخصوص مصالح تولیدی کارخانه لیکا ایران، اصطلاحاً دو نوع سبک‌دانه معمولی و سازه‌ای تولید می‌شود. برای انجام این تحقیق با الک کردن، و مصالح بدست آمده میان دو الک، چهار اندازه یکنواخت از دانه‌های معمولی و سازه‌ای تهیه شده است. این چهار اندازه عبارتند از: الف- بین الک ۳/۳۶ میلیمتر (۶) و ۴/۷۶ میلیمتر (۴)، ب- بین الک ۶/۳۵ میلیمتر (۴) و ۸/۰ میلیمتر (۵/۱۶)، ج- بین الک ۸/۰ میلیمتر (۵/۱۶) و ۱۱/۲ میلیمتر (۷/۱۶) و د- بین الک ۱۲/۷ میلیمتر (۳/۱) و ۱۶/۰ میلیمتر (۵/۸). در جدول ۱، طبقه‌بندی اندازه‌های استفاده شده به همراه نام‌گذاری آنها نشان داده شده است. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود حرف نشانه نوع سبک‌دانه و شماره نشان دهنده اندازه سبک‌دانه است. سبک‌دانه‌های شماره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب دارای قطر متوسط ۴/۱، ۷/۲، ۹/۶ و ۱۴/۳ میلیمتر هستند.

ماتریکس: از ملات سیمانی، با ترکیبات ارائه شده در جدول ۲، به عنوان ماتریکس استفاده شده است. سیمان مصرفی، سیمان پرتلند نوع ۲ می‌باشد. ماسه مورد استفاده از نوع شکسته بوده و گذارانده شده از الک ۳/۳۶ میلیمتر می‌باشد. همچنین از فوق‌روان کننده پایه نفتالینی برای روانی بیشتر استفاده شده است.

جدول ۱- نام، اندازه و نوع سبک‌دانه‌های مورد استفاده

محدوده اندازه دانه (متوسط اندازه) -mm				
نوع	۴/۷۶ - ۳/۳۶	۸/۰ - ۶/۳۵	۱۱/۲ - ۸/۰	۱۶/۰ - ۱۲/۷
	(۴/۱)	(۷/۲)	(۹/۶)	(۱۴/۳)
معمولی	M1	M2	M3	M4
سازه‌ای	S1	S2	S3	S4

جدول ۲- طرح اختلاط ماتریکس در یک متر مکعب (کیلوگرم)

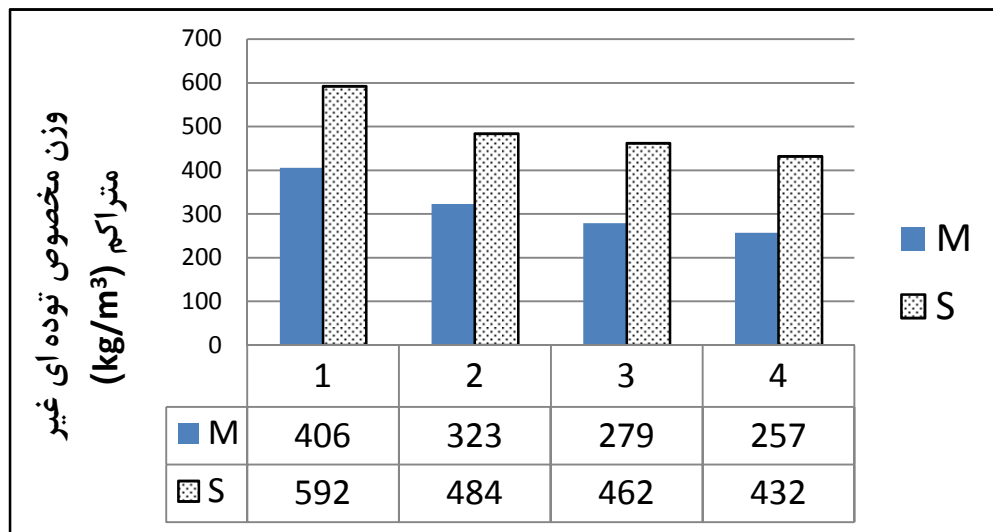
ماسه	سیمان	آب	فوق روان‌کننده
۱۳۷۵/۳	۵۶۰/۳	۲۸۰/۲	۷/۳

۴- انجام آزمایش‌ها و بررسی نتایج

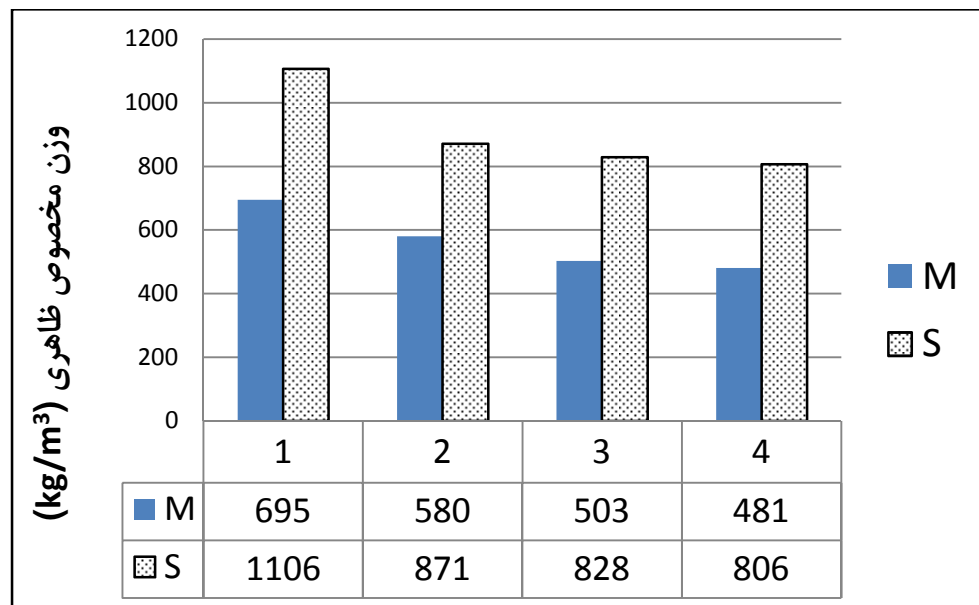
۴-۱- وزن مخصوص سبک‌دانه‌ها

وزن مخصوص توده‌ای دانه‌های مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C29 انجام گرفته است. با توجه اینکه در اینکه امکان خرد شدن سبک‌دانه‌ها در اثر متراکم شدن آنها توسط کوبه وجود دارد، وزن مخصوص میله‌خورده یا متراکم شده آنها اندازه‌گیری نشده است. همچنین عموماً از استاندارد ASTM C127-128 برای تعیین وزن مخصوص ظاهری سنگدانه‌های معمولی استفاده می‌شود. با توجه به تغییر جذب آب سبک‌دانه‌ها نسبت به زمان غوطه‌وری در آب، روند اندازه‌گیری آزمایش متفاوت از سنگ‌دانه‌های معمولی می‌باشد. به عبارت دیگر جذب آب سبک‌دانه‌ها نسبت به زمان در مقایسه با سنگ‌دانه معمولی بسیار متغییر است. در آزمایش تعیین چگالی ظاهری دانه‌ها، وزن مشخصی از سنگدانه‌ها در پیکنومتر ریخته می‌شود و پیکنومتر تا خط نشانه پر از آب می‌گردد و وزن می‌شود. پس از گذشت زمان مشخص با توجه به اینکه سبک‌دانه آب جذب می‌نمایند، با ریختن مقداری آب مجدداً پیکنومتر تا خط نشانه پر شده و وزن آن در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود و چگالی ظاهری مرطوب آن در زمان‌های مختلف تعیین می‌گردد. همچنین با داشتن درصد جذب آب در هر زمان می‌توان چگالی ظاهری خشک سبک‌دانه‌ها را یافت. توجه شود که، چگالی ویژه واقعی سبک‌دانه‌ها به این روش قابل محاسبه نیست، چون در اثر ۲۴ ساعت غوطه‌وری، کلیه حفرات موجود در آنها اشباع نمی‌شود. در شکل ۱ نتایج آزمایش وزن مخصوص توده‌ای و ظاهری سبک‌دانه‌ها ارائه شده است. مطابق آزمایش‌های وزن مخصوص با افزایش قطر، وزن مخصوص دانه‌ها کاهش می‌یابد.

الف



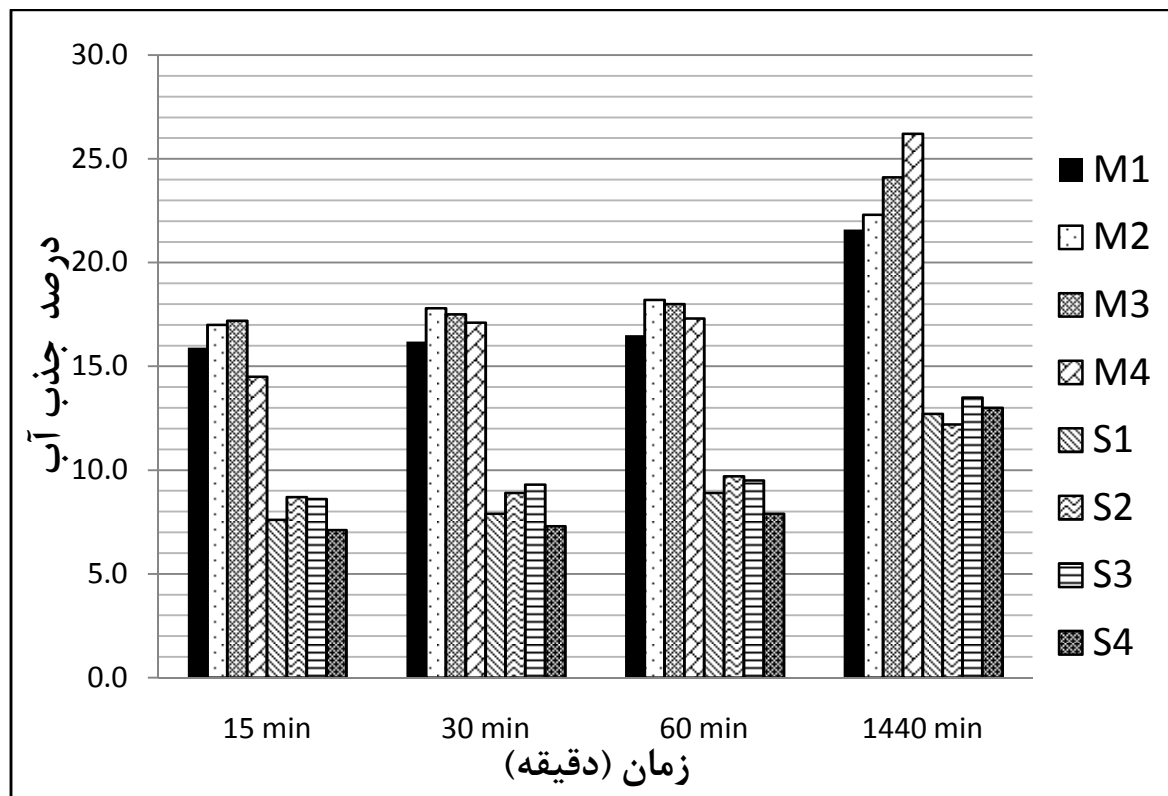
ب



شکل ۱- وزن مخصوص سبک‌دانه‌ها: الف) توده‌ای، ب) ظاهری

۴-۲- جذب آب سبک‌دانه

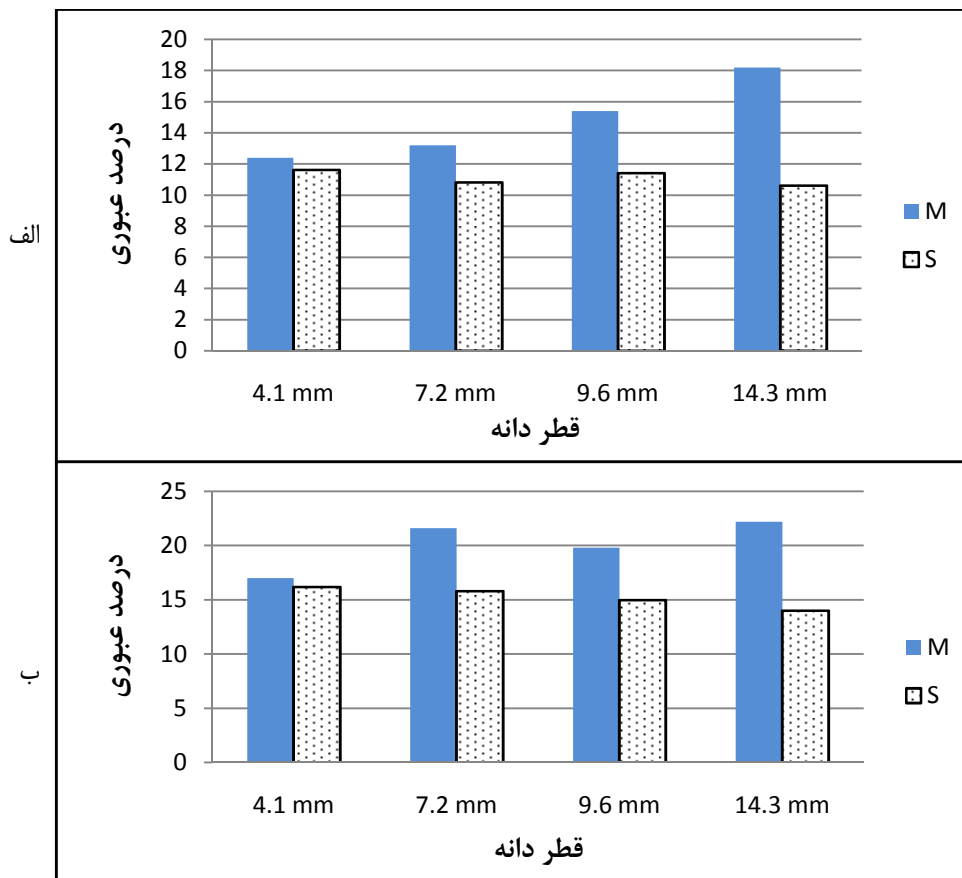
به منظور تعیین ظرفیت جذب آب سبک‌دانه‌ها، آنها را بر اساس زمان معین درون آب قرار داده و بر اساس استاندارد ASTM C566 درصد رطوبت جذبی آنها محاسبه شده است. در شکل ۲، درصد جذب آب ۱۵ دقیقه الی ۱۴۴۰ دقیقه سبک‌دانه‌های مورد استفاده ارائه شده است. با توجه به میزان جذب آب سبک‌دانه‌ها مشاهده می‌شود که جذب سبک‌دانه‌های سازه‌ای به مراتب کمتر از سبک‌دانه‌های معمولی می‌باشد. همچنین ارتباط مشخصی بین درصد جذب آب و قطر دانه وجود ندارد.



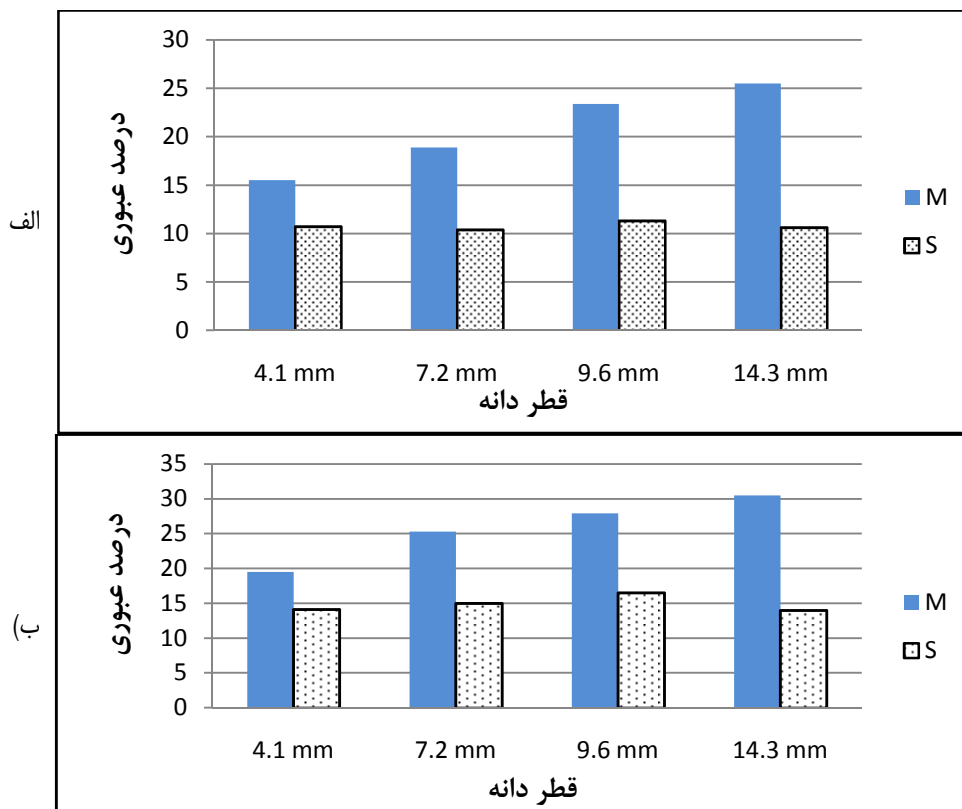
شکل ۲- درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها

۴-۳- تعیین مقاومت در برابر ساییدگی و ضربه

این آزمایش توسط دستگاه لوس آنجلس و مشابه استاندارد ASTM C131 به منظور سنجش مقاومت سنگ‌دانه‌های معدنی در برابر سایش و ضربه انجام می‌شود. با توجه به مقاومت به مراتب کمتر سبک‌دانه‌ها نسبت دانه‌های معمولی و اینکه وزن مخصوص توده‌ای آنها تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد، این آزمایش با شرایط مختلفی انجام شده است. به طوری از تعداد دور ۱۰۰، تعداد گوی ۸ و ۱۲ و همچنین در دو حالت حجم و وزن برابر انجام شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ نتایج آزمایش‌های انجام شده ارائه شده است. با توجه به رابطه معکوس چگالی دانه‌ها با قطر، انتظار می‌رود که هر چه اندازه دانه بزرگتر شود، مقاومت آنها در برابر ضربه کاهش پیدا کند. از طرفی با توجه به اینکه این سبک‌دانه‌ها در شرایط یکسان تولید می‌شود، انتظار می‌رود که جنس رویه آنها و مقاومت سایشی آنها یکسان باشد. با توجه به آزمایش‌های بر روی دانه‌های سازه‌ای، در دو حالت وزن و حجم برابر به نظر می‌رسد که ارتباط مشخصی بین قطر دانه و خروجی آزمایش وجود دارد. اما در آزمایش‌های انجام شده بر روی دانه‌های معمولی و در حالت حجم برابر، درصد خردشده‌گی دانه با افزایش قطر زیاد می‌شود. این حالت در آزمایش‌ها با وزن برابر و تعداد ۱۲ گوی مشاهده نمی‌شود. لازم به توضیح است که بر اساس استاندارد برای کلیه قطرهای از الک نمره ۱۲# استفاده شده است. با توجه به تفاوت قابل توجه چگالی دانه‌ها با اندازه آنها و لزوم شرایط یکسان آنها در دستگاه لس آنجلس، استفاده از حجم یکسان، به جای وزن یکسان می‌تواند نتایج منطقی‌تری ارائه دهد.



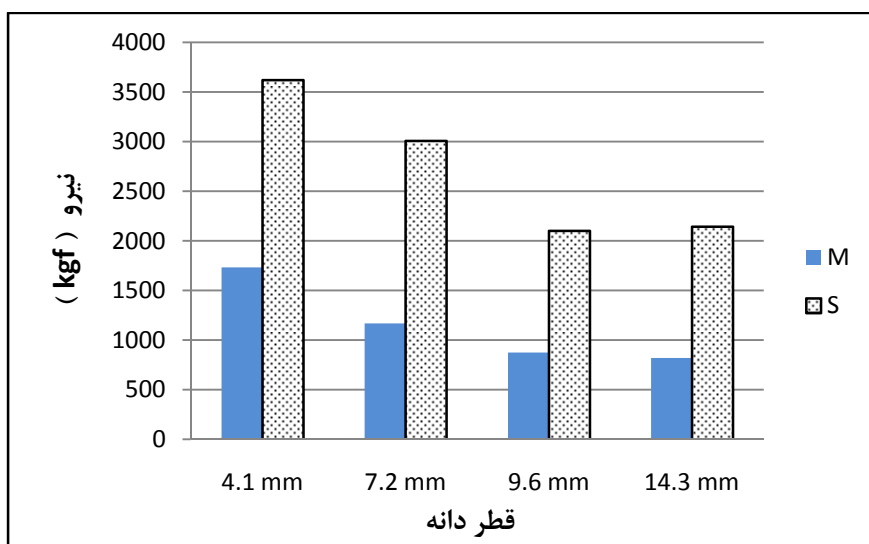
شکل ۴- آزمایش لس آنجلس در حالت وزن برابر: الف) گوی ۸ (ب) گوی ۱۲



شکل ۵- آزمایش لس آنجلس در حالت حجم برابر: الف) گوی ۸ (ب) گوی ۱۲

۴-۴- تعیین مقاومت در برابر خردشدگی (Crushing Strength)

این آزمایش بر اساس استاندارد EN 13055-1 انجام شده است. این آزمایش به صورت غیر مستقیم معیاری در برابر مقاومت دانه‌ها و خردشدگی آنها در اثر اعمال بار می‌باشد. با توجه به اینکه وزن مخصوص سبک‌دانه‌های این تحقیق بیشتر از ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است، از روش اول استاندارد مذکور استفاده شده است. در شکل ۶ نتایج آزمایش‌های انجام شده ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت در برابر خردشدگی، با افزایش قطر دانه میزان مقاومت دانه در برابر خردشدگی کاهش پیدا می‌کند، البته دانه‌های دارای قطر ۱۴/۳ و ۹/۶ میلیمتر، دارای مقاومت خردشدگی نزدیک به هم می‌باشند.



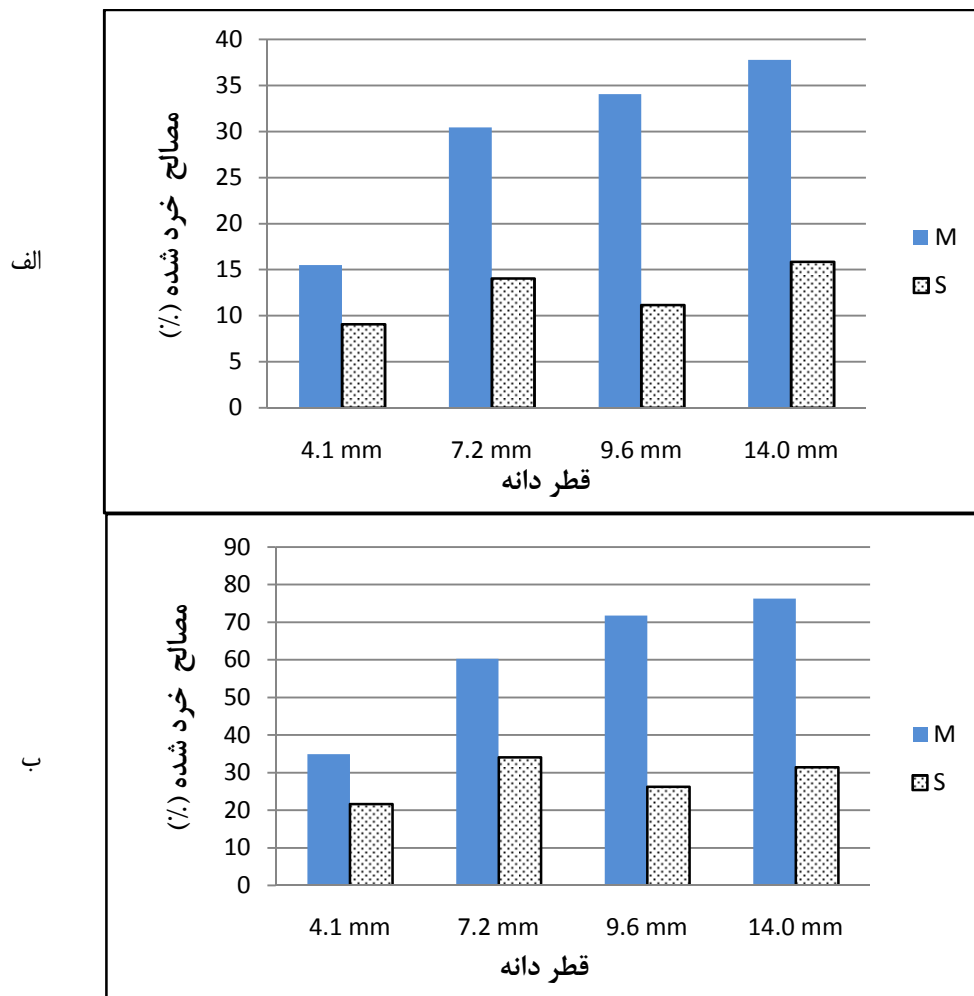
شکل ۶- نتایج آزمایش مقاومت خردشدگی

۴-۵- آزمایش ارزش ضربه‌ای

این آزمایش به منظور مقایسه نسبی مقاومت سنگ‌دانه‌ها در برابر ضربه ناگهانی استفاده می‌شود. این آزمایش طبق استاندارد BS 812 - Part 112 بر روی سبک‌دانه‌های تک اندازه انجام می‌شود. در این آزمایش ضرباتی با انرژی معین بر روی سنگدانه متراکم شده در استوانه مخصوص سقوط می‌کند و درصد مصالح شکسته شده، که از الک جداکننده عبور می‌کند، گزارش می‌گردد. اندازه الک جدا کننده، بر اساس استاندارد وابسته به قطر دانه‌های مورد آزمایش است که بر اساس جدول ۳ تعیین می‌شود. با توجه به اینکه سبک‌دانه‌ها مقاومت به مراتب کمتری نسبت به سنگ‌دانه‌های معمولی دارند، این آزمایش در حالت‌های ۵ و ۱۵ ضربه انجام شده است. در شکل ۸ و ۹ نتایج این آزمایش نمایش داده شده است. مطابق آزمایش‌های ارزش ضربه‌ای، در دانه‌های معمولی اثر افزایش قطر بر کاهش مقاومت ضربه‌ای مشهود است لیکن ارتباط مشخصی برای دانه‌های سازه‌ای وجود ندارد.

جدول ۳- تعیین الک جدا کننده در آزمایش ارزش ضربه‌ای و ارزش ده درصد

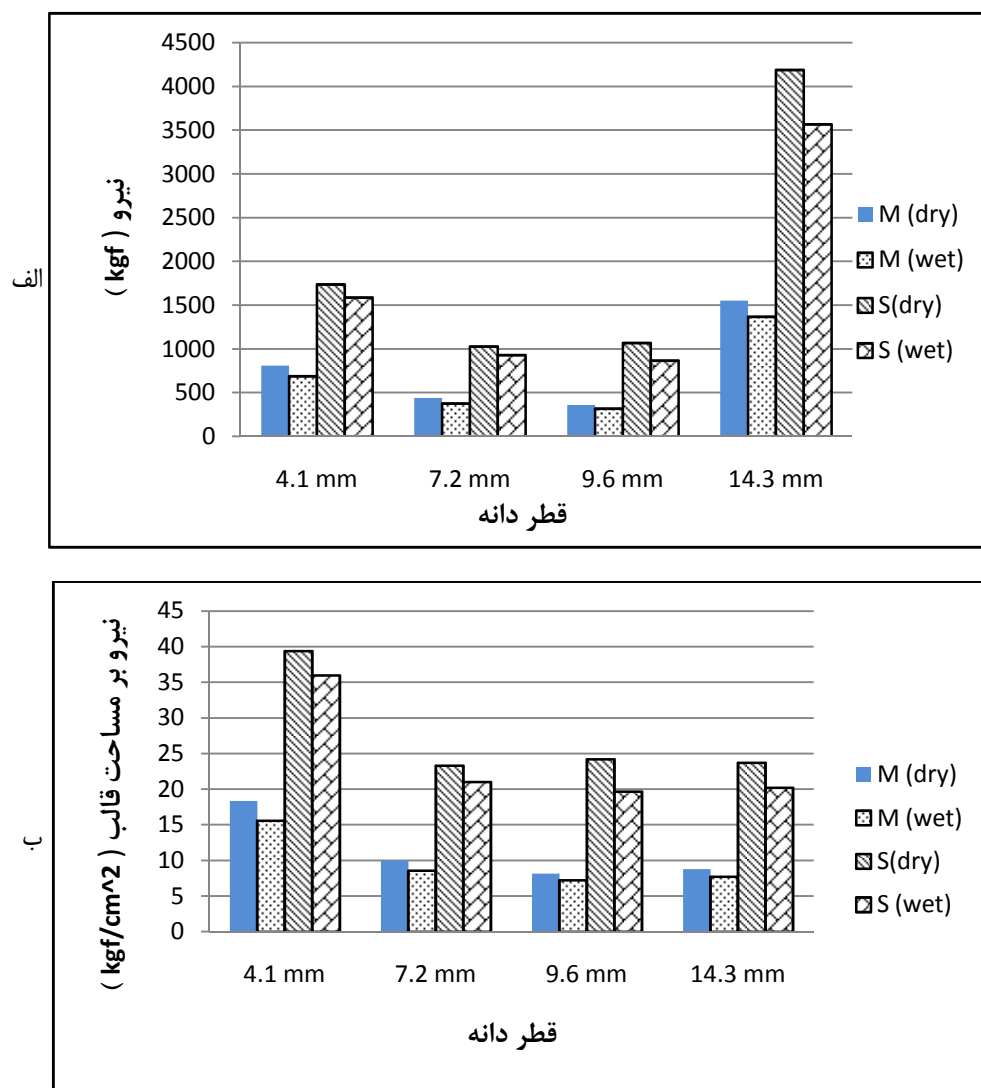
اندازه دانه (میلیمتر)	< ۱۴	۱۰-۱۴	۶/۳-۱۰	۵-۶/۳	۳/۳۵-۵	۳/۵۳-۳/۳۶
اندازه الک جدا کننده (میلیمتر)	غیر قابل انجام	۲/۳۶	۱/۷۰	۱/۱۸	۰/۸۵۰	۰/۶۰۰



شکل ۷- نتایج آزمایش ارزش ضربه‌ای- الف) ۵ ضربه ب) ۱۵ ضربه

۴-۶- ارزش خردشوندگی و ارزش ده درصد

ارزش خردشوندگی سنگ‌دانه شاخص مقاومت نسبی آن در برابر خرد شدن در اثر بار بهم‌فشرده‌گی است که تدریجاً بر آن وارد می‌شود. در این آزمایش برای دانه‌های ۱۰ تا ۲۸ میلیمتر از استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلیمتر و بار ۴۰۰ کیلو نیوتن، و برای دانه‌های ۳/۳۵ الی ۱۰ میلیمتر از استوانه‌ای به قطر ۷۵ میلیمتر و بار ۱۰۰ کیلو نیوتن استفاده می‌شود. بر اساس استاندارد اندازه الک جدا کننده، وابسته به قطر دانه‌های مورد آزمایش است که بر اساس جدول ۳ تعیین می‌شود. با توجه به اینکه ارزش خردشوندگی سبک‌دانه‌ها به مراتب بیش از سی درصد می‌باشد، مطابق استاندارد این آزمایش مناسب نمی‌باشد و بجای آن، انجام آزمایش ارزش ده درصد ریزتر انجام می‌شود. آزمایش ارزش ده درصد ریزتر طبق استاندارد BS 812 - Part 111 با همان وسایل آزمایش ارزش خردشوندگی بر روی نمونه‌های آماده شده تک اندازه صورت می‌گیرد. در این آزمایش مقدار بار فشاری بر اساس آزمون و خطا، طوری تعیین می‌شود، که در حدود ۱۰ درصد دانه‌ها از الک جدا کننده عبور کند. نتایج این آزمایش در دو حالت خشک و مرطوب شکل ۸ نمایش داده شده است. بر اساس استاندارد مذکور نتیجه این آزمایش بر حسب نیرو می‌باشد، لیکن از آنجایی که برای دانه‌های M4 و S4 از قالب بزرگ استفاده شده است، به منظور مقایسه دانه‌های مورد آزمایش، نتیجه آزمایش بر حسب نیرو بر مساحت قالب نیز ارائه شده است. مطابق آزمایش ارزش ده درصد ریزتر، نسبت نیروی لازم به مساحت قالب، برای خرد شدن ۱۰٪ دانه‌ها، برای دانه‌های ۴/۱ میلیمتری به مراتب بیشتر از سایر دانه‌ها می‌باشد و همچنین در کلیه دانه‌ها در حالت اشباع ارزش ۱۰ درصد ریزتر، بین ۸ الی ۱۵ درصد، کمتر از حالت خشک می‌باشد.



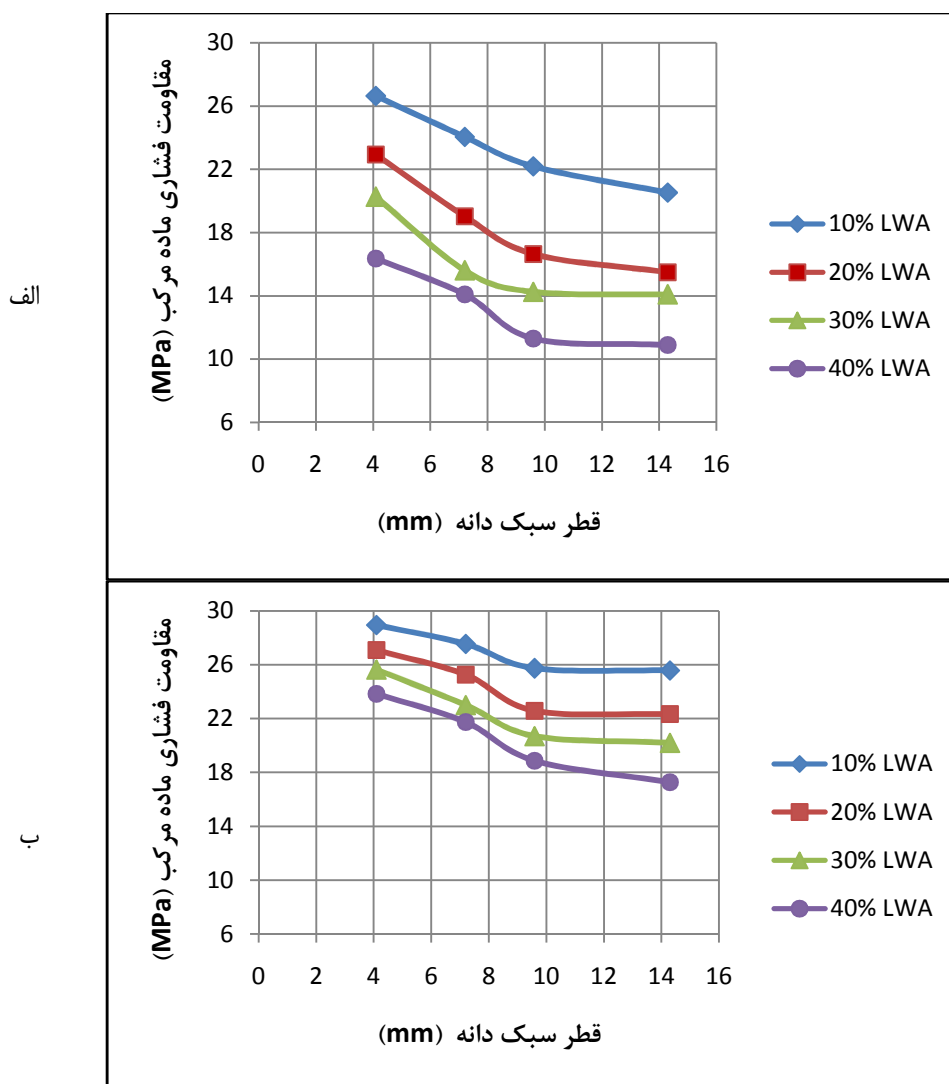
شکل ۸- نتایج آزمایش ارزش ده درصد ریزتر-الف) بر حسب نیرو، ب) بر حسب نیرو بر مساحت قالب

۴-۷- ساخت ماده مرکب و تعیین مدول ارتجاعی و مقاومت تک محوره ماتریکس و ماده مرکب

در این تحقیق نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد ۱۵ در ۳۰ سانتیمتری از ماتریکس ملات سیمانی به تنهایی و همچنین ترکیب آن با سبک‌دانه‌ها با نسبت حجمی ۱۰ الی ۴۰ درصدی سبک‌دانه به ۹۰ الی ۶۰ درصد ماتریکس، ساخته شده است. به منظور جلوگیری از جذب آب ماتریکس توسط سبک‌دانه، قبل از اختلاط آنها، سبک‌دانه‌ها را به مدت ۳۰ دقیقه درون آب قرار داده و سپس توسط پارچه جذب آب، آب سطحی آن گرفته می‌شود. نمونه‌های ساخته شده پس از ۲۴ ساعت از قالب باز شده و تا سن ۲۸ روزگی در حوضچه آب حدود ۲۰ درجه غوطه‌ور شدند. سپس از آب خارج شده، و بعد از کپینگ کردن مقاومت فشاری تک محوره آنها تعیین شده است. برای هر ترکیب چهار آزمایش انجام شده است. میانگین مقاومت فشاری‌های بدست آمده در جدول ۳ و شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به اینکه مقاومت ماتریکس تنها (Mpa7/32) به مراتب بیشتر از مقاومت نمونه‌های مرکب ساخته شده می‌باشد، مقاومت سبک‌دانه‌ها به مراتب کمتر از ماتریکس می‌باشد و جز حاکم مقاومت ماده مرکب می‌باشد. مطابق شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش قطر، مقاومت فشاری تک محوری ماده مرکب کاهش پیدا می‌کند. همچنین با توجه به شیب نمودارها نرخ کاهش مقاومت ماده مرکب در بازه ۴ الی ۹ میلیمتر به مراتب بیشتر از ۹ الی ۱۴ میلیمتر می‌باشد. این نتیجه تشابه زیادی با نتایج آزمایش مقاومت خردشدگی که در شکل ۶ نشان داده شد، دارد.

جدول ۳- مقاومت فشاری تک محوری ماده مرکب بر حسب مگاپاسکال

نوع و قطر دانه مورد استفاده در ماده مرکب								درصد	درصد
سازه‌ای				معمولی				حجمی	حجمی
S4	S3	S2	S1	M4	M3	M2	M1	سبک‌دانه	ماتریکس
۳۲/۷				۳۲/۷				۰	۱۰۰٪
۲۵/۶	۲۵/۷	۲۷/۶	۲۹/۰	۲۰/۵	۲۲/۲	۲۴/۱	۲۶/۶	۱۰٪	۹۰٪
۲۳/۳	۲۲/۶	۲۵/۳	۲۷/۱	۱۵/۵	۱۶/۶	۱۹/۰	۲۲/۹	۲۰٪	۸۰٪
۲۰/۲	۲۰/۷	۲۳/۰	۲۵/۷	۱۴/۱	۱۴/۳	۱۵/۶	۲۰/۳	۳۰٪	۷۰٪
۱۷/۳	۱۸/۹	۲۱/۸	۲۳/۸	۱۰/۹	۱۱/۳	۱۴/۱	۱۶/۴	۴۰٪	۶۰٪



شکل ۹- میزان مقاومت فشاری ماده مرکب نسبت قطر سبک‌دانه مورد استفاده (الف) سبک‌دانه معمولی (ب) سبک‌دانه سازه‌ای

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر قطر دانه‌های لیکا معمولی و سازه‌ای که هر یک در شرایط یکسان تولید شده است، بر ویژگی‌های آنها مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور مقایسه مقاومت آنها به صورت کیفی، آزمایش‌های مختلف تحت بار فشاری، ضربه و سایش بر روی سبک‌دانه‌ها به طور مستقیم انجام شد. همچنین به بررسی مقاومت ماده مرکب ساخته شده از هر یک از آنها، در شرایط یکسان پرداخته شد. در حالت کلی با توجه به اینکه با افزایش قطر دانه، وزن مخصوص آن کاهش می‌یابد، این انتظار وجود دارد که

مقاومت دانه با افزایش قطر کاهش یابد. لیکن در آزمایش‌هایی که مقاومت دانه را نسبت به خردشدگی به الک جدا کننده ارزیابی می‌کنند (لس آنجلس، ارزش ضربه‌ای و ارزش ده درصد)، قضاوت در مورد تاثیر قطر بر نتیجه آزمایش مشکل است و به صورت مستقیم امکان پذیر نمی‌باشد. اما در آزمایش‌هایی که قضاوت در مورد مقاومت دانه وابسته به الک جدا کننده نیست (مقاومت خردشدگی و مقاومت فشاری تک محوری ماده مرکب) با افزایش قطر کاهش مقاومت دانه مشهود می‌باشد. به منظور قضاوت در مورد مقاومت دانه‌ها، همبستگی مناسبی بین آزمایش مقاومت خردشدگی و مقاومت فشاری ماده مرکب وجود دارد.

۶- قدرت دانی

این کار تحقیقاتی با حمایت فنی شرکت لیکا ایران انجام شده است، نویسندگان کمال قدرت دانی و سپاسگذاری را از شرکت مذکور به ویژه آقای دکتر نمدمالیان اصفهانی، مهندس رفعت‌خواه و مهندس محمدی دارند.

۷- مراجع

1. Chandra, S., and Berntsson, L., "LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE, Science, Technology and Applications", Noyes Publications, United States, 2002.
۲. شکرچی‌زاده، محمد؛ لیبر، نیکلاس علی؛ ماهوتیان، مهرداد؛ و آشوری، احسان؛ راهنمای کاربردی بتن سبک‌دانه سازه‌ای لیکا. گزارش شماره CMI-8707294، انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
۳. تهرانی، فریبرز؛ راهنمای جامع لیکا: دانه‌های رس منبسط شده و فرآورده‌های آن. ناشر شرکت لیکا، ۱۳۷۷.
4. LECA (Light Expanded Clay Aggregate) Co., <http://www.leca.cc>.
5. European Union – Brite EuRam III, "Composite models for short- and long-term strength and deformation properties of LWAC", Document BE96-3942/R35, June 2000.
6. Kvande, T., "Investigation of Some Material Properties for Structural Analysis of LECA Masonry", Ph.D Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2001.
۷. رئیس قاسمی، امیر مازیار؛ پرهیزگار، طیبه؛ و فامیلی، هرمز؛ ارائه مدل دو فازی خمیر-دانه برای تعیین نسبت اختلاط بتن‌های سبک‌دانه حاوی لیکا. مجله علمی و پژوهشی عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۰.
8. ASTM., "American Society For Testing And Materials", C-29, C-566, C-131, 1999.
9. BSI, "British Standards Institution", BS 812-110 to 112, 1990.
10. The European Standard EN, EN 13055-1, 2002.