

بررسی اثر اندازه دانه بر مشخصات مکانیکی و مدول ارتجاعی دانه لیکای سازه‌ای

علیرضا اردکانی^۱، محمود یزدانی^{۲*}

پذیرش مقاله: ۹۰/۱۱/۵

دریافت مقاله: ۹۰/۷/۶

چکیده

مجموعه‌ای از ویژگی‌های قابل توجه، سبب گسترش کاربردهای سبک‌دانه‌های مصنوعی شده است. با توجه به کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف، تعیین خواص مکانیکی این نوع سنگ‌دانه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. به لحاظ عدم وجود سنگ مادر، تعیین ویژگی‌های مکانیکی سبک‌دانه‌های مصنوعی دارای پیچیدگی‌های ویژه‌ای می‌باشد. در حال حاضر رس منبسط شده یا لیکا تنها نوع سبک‌دانه صنعتی مورد استفاده در بتن سازه‌ای است که در کشور ما با وزن مخصوص‌های مختلف تولید می‌شود. لیکای با مقاومت بیشتر نسبت به لیکاهای متداول، اصطلاحاً لیکای سازه‌ای خوانده می‌شود و قابلیت استفاده از آن در تولید بتن سازه‌ای بیشتر است. در این تحقیق به منظور تعیین اثر اندازه بر وزن مخصوص، جذب آب، مقاومت در برابر ساییدگی، ضربه و بار فشاری، آزمایش‌های مختلف بر روی چهار اندازه از لیکای سازه‌ای که در شرایط یکسان تولید شده‌اند، انجام شده است. همچنین، از آنجایی که استاندارد برای تعیین مستقیم مدول ارتجاعی این سبک‌دانه‌ها وجود ندارد، از ترکیب روش آزمایشگاهی و تئوری مواد مرکب برای تخمین این پارامتر استفاده شده است. بدین منظور با ترکیب سبک‌دانه‌ها و ملات ماسه سیمان و ساخت نمونه‌هایی استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر از مواد مرکب با درصد حجمی ۳۰ و ۴۰ درصد از سبک‌دانه‌ها، مشخصات ارتجاعی ماتریس و ماده مرکب تعیین شده است. سپس توسط روش دیفرانسیلی و با استفاده از مشخصات ارتجاعی ماده مرکب و ماتریس، مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها تعیین شده است. نتایج آزمایش‌ها حاکی از تأثیر قابل توجه قطر دانه‌ها بر مشخصات مکانیکی مصالح، با وجود شرایط یکسان تولید است. با توجه به آزمایش‌های غیرمستقیم با افزایش قطر، میزان مقاومت و مدول ارتجاعی دانه‌ها روند کاهشی دارد.

کلید واژه‌ها: سبک‌دانه سازه‌ای، قطر دانه، مشخصات مکانیکی، مدول ارتجاعی، روش دیفرانسیلی

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، myazdani@modares.ac.ir

۱. مقدمه

با توجه به نیاز گسترده و روز افزون جامعه به عملیات عمران 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 طبیعی و مصنوعی تقسیم بندی نمود. استفاده از سبک‌دانه‌های طبیعی به سال‌های بسیار دور برمی‌گردد. اما استفاده از سبک‌دانه‌های مصنوعی متناظر با گسترش کاربرد بتن مسلح و کمبود سبک‌دانه‌های طبیعی در کشورهای پیشرفته، از اواخر قرن ۱۹ آغاز شده است (Clark, 1993). کوکتال در سال ۱۸۸۰ در آلمان، تکه‌های رس متخلخل را با استفاده از تبخیر سریع آب رس تولید کرد (Chandra and Berntsson, 2002).

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 این سبک‌دانه مصنوعی در صنعت ساختمان، طرح‌های عمرانی، کشاورزی، محیط‌زیست، راه‌سازی، صنایع نفت، ریخته‌گری و ... شده است. مهمترین مزیت این مصالح مربوط به چگالی کم این مصالح و ترکیبات تولید شده از آن‌ها است. به طوری که از آن‌ها می‌توان برای خاکریزهای سبک، مصالح پرکننده (backfill) پشت دیوارهای حائل و تونل‌ها، مصالح زهکش، بتن سبک، قطعات پیش‌ساخته و غیره استفاده نمود که با توجه به وزن کم آن‌ها، باعث کاهش نیروهای جانبی و نشست و تغییر مکان در سازه‌ها می‌شود (تهرانی، ۱۳۷۷، ESCSI 2011، Wisconsin Energy Corporation, 2004 Leca website).

مصالح مختلفی، از جمله پرلیت، ورمیکولیت، رس، اسلیت، شیل و غیره برای تولید سبک‌دانه‌های صنعتی استفاده می‌شود. در عصر صنعتی شدن و همزمان با توسعه فن‌آوری، کاربرد سبک‌دانه‌ها در کشورهای مختلف خصوصاً 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 حالیکه در کشور ما در حد بسیار کم و در حدود ۲ لیتر در سال است. (شکرچی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷). سبک‌دانه رسی یا لیکا در حال حاضر تنها نوع سبک‌دانه صنعتی مورد استفاده در بتن سازه‌ای می‌باشد که در کشور ما تولید می‌شود. 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).

محصول خروجی از کوره غالباً دارای قطر صفر تا ۲۵ میلی‌متر 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 تقسیم‌بندی می‌شوند و وزن مخصوص توده‌ای تقریبی آن به دنبال نام لیکا قرار می‌گیرد. به طور مثال لیکای ۵۰۰ یا لیکای ۷۰۰ از جمله لیکاهای سبک و سنگین می‌باشند (European Union document, 2000). با توجه به مشخص نبودن منحنی دانه‌بندی مصالح، عموماً این تقسیم‌بندی دقیق نیست. با توجه به این که هر چه لیکا سنگین‌تر باشد، دارای مقاومت بیشتری است، لیکای سنگین اصطلاحاً لیکای سازه‌ای گفته می‌شود و قابلیت آن در تولید بتن با مقاومت فشاری بزرگتر، بیشتر است.

در این تحقیق به منظور بررسی اثر قطر بر ویژگی‌های مکانیکی، چهار اندازه یکنواخت، از سبک‌دانه سازه‌ای تولید

سبک‌دانه‌ها، انجام آزمایش مستقیم بر روی آن‌ها امکان‌پذیر نیست (Chen et al, 2003). بنابراین در نظر است مشخصات آن‌ها در قالب یک ماده مرکب و با استفاده از معکوس تئوری‌های همگن‌سازی محاسبه شود. به عبارت دیگر مدنظر است که به وسیله این دانه‌ها و ماتریس ملات سیمانی، نمونه مرکب دو فازي ساخته شود. سپس با فرض معلوم بودن ویژگی ماتریس و نمونه مرکب، با استفاده از تئوری‌های همگن‌سازی ویژگی دانه تعیین شود.

تاکنون مدل‌های مختلفی بر مبنای تئوری مواد مرکب، برای پیش‌بینی مدول ارتجاعی بتن، بر اساس مشخصات دانه‌ها و ملات تشکیل دهنده آن پیشنهاد شده است که با حل آن‌ها می‌توان به مدول دانه‌ها رسید. برخی از این روابط عبارتند از (Ballbaki et al, 1992):

مدل Voigt:

$$E_c = E_m g_m + E_a g_a \quad (1)$$

مدل Reuss:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{g_m}{E_m} + \frac{g_a}{E_a} \quad (2)$$

مدل Hirsch-Dougil:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_c^{Voigt}} + \frac{1}{E_c^{Reuss}} \right) \quad (3)$$

مدل Popvics:

$$E_c = \frac{1}{2} (E_c^{Voigt} + E_c^{Reuss}) \quad (4)$$

مدل Counto:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - \sqrt{g_a}}{E_m} + \left(\frac{1 - \sqrt{g_a}}{\sqrt{g_a}} E_m + E_a \right)^{-1} \quad (5)$$

مدل Hashin:

$$E_c = \left[\frac{(E_m + E_a) + (E_a - E_m) g_a}{(E_m + E_a) - (E_a - E_m) g_a} \right] \cdot E_m \quad (6)$$

مدل Bache and Nepper-Cheistensen:

$$E_c = (E_m)^{g_m} \cdot (E_a)^{g_a} \quad (7)$$

داخل که در شرایط و با مواد اولیه یکسان تولید شده است، تهیه شده و با انجام آزمایش‌های مختلف، ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها تعیین شده است.

خواص ارتجاعی دانه‌های سنگی عموماً به صورت تقریبی با توجه به جنس و یا از آزمایش بر روی سنگ مادر آن‌ها تعیین می‌شود. حال آنکه برای دانه‌های مصنوعی یا فرآوری شده سنگ مادری وجود ندارد و حتی در دانه‌هایی مثل شن و ماسه طبیعی که سنگ مادر وجود دارد، ممکن است به علت هوازدگی، تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان سنگ مادر و نمونه موجود باشد. در نتیجه برای تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها از روش غیرمستقیم استفاده شده است.

۲. مطالعات گذشته

بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی سبک‌دانه لیکا، مربوط به بررسی ویژگی ماده مرکب سیمانی (بتن و بلوک) ساخته شده از آن‌ها می‌باشد. شندی (۱۹۹۰) به بررسی تأثیر نحوه آرماتورگذاری بر رفتار تیرهای ساندویچی ساخته شده از بتن لیکا پرداخت. کوانده (۲۰۰۱) در قالب رساله دکتری به بررسی ویژگی‌های بلوک ساخته شده از لیکای نروژ پرداخت. شکرچی‌زاده و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی طرح اختلاط بتن بهینه، با استفاده از لیکای سازه‌ای ۵۰۰ و ۷۰۰ پرداختند. 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. در این تحقیقات از دانه‌های لیکا با دانه‌بندی مشخص به عنوان مصالح استفاده شده است و تفکیکی از نظر تأثیر قطر یا ویژگی ارتجاعی دانه بر ویژگی ماده مرکب ساخته شده، ارائه نشده است.

یکی از اهداف این تحقیق، بررسی تأثیر قطر بر مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌های لیکا است. با توجه به ماهیت و ابعاد

برای اغلب حالات جایگزین ماتریس می‌شود، اما آن‌ها همچنین جایگزین قدری از اینکلوژن‌ها که از قبل جاسازی شده‌اند، نیز می‌شوند.

در نتیجه کل اینکلوژن‌ها به صورت تابعی ساده که حاصل از اضافه کردن اینکلوژن‌ها باشد، نیست. مکلایگین (۱۹۷۷) نشان داد، تمرکز حجم کلی فاز اینکلوژن با پارامتر Γ به صورت $C=1-\exp(-\Gamma)$ تعیین می‌شود.

اگر اینکلوژن‌ها کروی و هر دو جز به صورت همسان‌گرد باشند، دو معادله دیفرانسیل برای مشخصات ارتجاعی به روابط ۸ و ۹ بدست می‌آید (Norris, 1985):

$$\frac{1}{K} \frac{dK}{d\Gamma} = F_K = \frac{(3K+4G)(K_i - K)}{(3K_i + 4G)K} \quad (8)$$

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{d\Gamma} = F_G = \frac{(15K+20G)(G_i - G)}{(6K+12G)G_i + (9K+8G)G} \quad (9)$$

در معادلات ۸ و ۹، K و G به ترتیب مدول بالک و برشی ماده مرکب و K_i و G_i مدول بالک و برشی اینکلوژن می‌باشد. همچنین $d\Gamma$ بیانگر تغییرات اینکلوژن است.

شرایط مرزی این دو معادله عبارتند از: مشخصات ماده مرکب وقتی که میزان اینکلوژن‌ها برابر صفر است که در این حالت ویژگی ماده مرکب برابر است با مشخصات ماتریس به عبارت دیگر، $G_{(0)}=G_{(m)}$ و $K_{(0)}=K_{(m)}$.

این معادلات دیفرانسیل به صورت همبسته^۳ و غیرخطی هستند. زیمرمن (۱۹۸۴ و ۱۹۹۱) حل بسته^۴ را برای دو حالت مهم اینکلوژن‌های صلب و حفرات توخالی به دست آورد و نشان داد نتایج تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. رابطه بین K و G با مدول ارتجاعی E و ضریب پواسون ν به صورت روابط ۱۰ و ۱۱ می‌باشد:

$$E = \frac{9KG}{3K+G} \quad (10)$$

$$\nu = \frac{3K-2G}{6K+2G} \quad (11)$$

در روابط ۱ الی ۷، E_a ، E_m و E_c به ترتیب مدول ارتجاعی دانه، ماتریس و بتن، g_a و g_m نسبت حجمی ماتریس و دانه است. همچنین E_c^{Voigt} و E_c^{Reuss} مدول ارتجاعی بتن بر اساس مدل Voigt و Reuss است.

در این تحقیق از روش دیفرانسیلی که دارای جزئیات بیشتری نسبت به سایر مدل‌های بیان شده است، استفاده شده و سبک‌دانه‌ها، ملات ماسه سیمان و نمونه‌های ساخته شده از آن‌ها (بتن) به ترتیب نقش اینکلوژن^۱، ماتریس^۲ و ماده مرکب را دارند.

۳. روش دیفرانسیلی

این روش برای محاسبه مدول ارتجاعی یک جامد که دارای توزیع تصادفی اینکلوژن کروی می‌باشد، استفاده شده است. مبنای این روش به این صورت است که مقدار کمی از اینکلوژن‌ها، به میزان $\delta\Gamma$ به ماتریس همگن اضافه می‌شود. فرض کنید که میزان اینکلوژن‌ها نسبت به حجم ماتریس کم باشد، در نتیجه اندرکنش تنش میان اینکلوژن‌ها ناچیز است و می‌توان مدول الاستیک مصالح جدید را به‌طور مثال توسط روش اشلبی (۱۹۵۷) محاسبه کرد. سپس به صورت ذهنی این مصالح مرکب را که مدول آن $M(\delta\Gamma)$ است، با یک مصالح همگن که دارای همان میزان مدول است، جایگزین نمود. حال تصور کنید به ماده مرکب دوباره میزان $\delta\Gamma$ از اینکلوژن‌ها اضافه شود و مدول جدید $M(2\delta\Gamma)$ دوباره محاسبه شود و به همین ترتیب کار ادامه پیدا کند تا به میزان مد نظر اینکلوژن درون ماتریس قرار گیرد. حال اگر $\delta\Gamma$ به سمت صفر میل کند، یک معادله دیفرانسیلی که تغییر مدول ارتجاعی مؤثر را به عنوان تابعی از تمرکز اینکلوژن‌ها ارائه می‌دهد، ایجاد خواهد شد. از آنجایی که فرض می‌شود اینکلوژن‌ها به صورت تصادفی درون ماتریس قرار می‌گیرند، سری دوم اینکلوژن‌ها

۴. برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق مطالعه جامع بر روی خواص دانه‌های لیکای سازه‌ای با اندازه‌های مختلف که با مواد اولیه و شرایط یکسان تولید شده‌اند، صورت گرفت. بدین منظور بر روی دانه‌های انتخاب شده آزمایش‌های وزن مخصوص توده‌ای و ظاهری، مقاومت در برابر ساییدگی و ضربه و همچنین مقاومت در برابر خردشدگی بر اساس استانداردهای مختلف انجام شده است.

تعیین وزن مخصوص توده‌ای سبک‌دانه‌های مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C29 انجام گرفته است. با توجه اینکه امکان خردشدن سبک‌دانه‌ها در اثر متراکم شدن آن‌ها توسط کوبه وجود دارد، وزن مخصوص میله خورده یا متراکم شده آن‌ها اندازه‌گیری نشده است. همچنین وزن مخصوص ظاهری سبک‌دانه‌ها با استفاده از پیکنومتر و با توجه به تغییر آب جذبی آن‌ها نسبت به زمان تعیین شده است.

به منظور بررسی مقاومت سبک‌دانه‌ها تحت سایش و ضربه از دستگاه لس آنجلس و مشابه استاندارد ASTM C131 استفاده شده است. 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 که از تعداد دور ۱۰۰، تعداد گوی ۸ و ۱۲ و همچنین در دو حالت حجم و وزن برابر انجام شده است. لازم به توضیح است که بر اساس استاندارد برای کلیه قطرها از الک نمره ۱۲# استفاده شده است.

به منظور بررسی مقاومت سبک‌دانه‌ها در برابر خردشدگی از آزمایش مقاومت خردشدگی^۵ بر اساس استاندارد اروپایی EN 13055-1 استفاده 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.

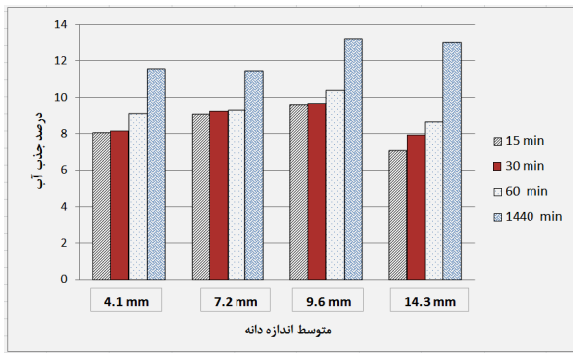
ارزش خردشدگی سنگ‌دانه، شاخص مقاومت نسبی آن در برابر خردشدن در اثر بار به هم فشردگی است که به تدریج بر

آن وارد می‌شود. این آزمایش طبق استاندارد BS812- Part110 انجام می‌شود. در این آزمایش برای دانه‌های ۱۰ تا ۲۸ میلی‌متر از استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و بار ۴۰۰ کیلونیوتن، و برای دانه‌های ۳/۳۵ الی ۱۰ میلی‌متر از استوانه‌ای به قطر ۷۵ میلی‌متر و بار ۱۰۰ کیلونیوتن استفاده می‌شود. با توجه به اینکه ارزش خردشدگی سبک‌دانه‌ها به مراتب بیش از سی درصد می‌باشد، مطابق استاندارد این آزمایش مناسب نیست و به جای آن، آزمایش ارزش ده درصد ریزتر انجام می‌شود.

آزمایش ارزش ده درصد ریزتر طبق استاندارد BS 812 - Part111 با همان وسایل آزمایش ارزش خردشدگی 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. این آزمایش در دو حالت خشک و مرطوب برای سبک‌دانه‌ها انجام شده است.

آزمایش ارزش ضربه‌ای به منظور مقایسه نسبی مقاومت سنگ‌دانه‌ها در برابر ضربه ناگهانی استفاده می‌شود. این آزمایش طبق استاندارد BS812-Part112 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، اندازه‌گیری 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.

جهت تعیین مدول ارتجاعی دانه‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر از ماتریس (ملات سیمانی) به تنهایی و ترکیب حجمی ۷۰٪ ماتریس - ۳۰٪ سبک‌دانه، و ۶۰٪ ماتریس - ۴۰٪ سبک‌دانه، ماده مرکب دوفازی ساخته شده و مشخصات ارتجاعی و مقاومتی مواد مرکب ساخته شده و ماتریس به تنهایی اندازه‌گیری شده است.



شکل ۱. درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها

ماتریس: از ملات سیمانی، با طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۲، به عنوان ماتریس استفاده شده است. سیمان مصرفی، سیمان پرتلند نوع ۲ می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است. ماسه مورد استفاده از نوع شکسته و عبور داده شده از الک ۳/۳۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین از فوق‌روان کننده پایه نفتالینی برای روانی بیشتر استفاده شده است.

جدول ۲. طرح اختلاط ماتریس در یک متر مکعب (کیلوگرم)

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

جدول ۳. مشخصات سیمان مصرفی

خواص فیزیکی و مکانیکی		ترکیبات شیمیایی (%)	
۳۱۵۰	چگالی (kg/m^3)	۲۰/۱	SiO_2
۳۰۵۰	سطح مخصوص (gr/cm^3)	۴/۹۲	Al_2O_3
۰/۷	انبساط (%)	۴/۳۴	Fe_2O_3
۱۳۰	گیرش اولیه (min)	۱/۷۰	MgO
۲۵۰	گیرش ثانویه (min)	۶۳/۸۰	CaO
	مقاومت فشاری (MPa)	۲/۰۰	SO_3
۲۲	۳ روز	۰/۶۶	K_2O
۳۲/۵	۷ روز	۰/۴۸	Na_2O
۴۱/۵	۲۸ روز		

۵. مصالح مصرفی

سبک‌دانه: دانه‌های لیکا با توجه به نحوه تولیدشان، دانه‌های نسبتاً همگن و با شکل کروی و بیضی‌گون می‌باشند. برای انجام این تحقیق با الک کردن و مصالح به دست آمده میان دو الک، چهار اندازه یکنواخت از دانه‌های لیکای سازه‌ای تهیه شده است.

این چهار اندازه عبارتند از:

- بین الک ۳/۳۶ میلی‌متر (#۶) و ۴/۷۶ میلی‌متر (#۴)
 - بین الک ۶/۳۵ میلی‌متر (۱/۴") و ۸/۰ میلی‌متر (۵/۱۶")
 - بین الک ۸/۰ میلی‌متر (۵/۱۶") و ۱۱/۲ میلی‌متر (۷/۱۶")
 - بین الک ۱۲/۷ میلی‌متر (۱/۲") و ۱۶/۰ میلی‌متر (۵/۸").
- در جدول ۱، اندازه متوسط، وزن مخصوص توده‌ای و ظاهری دانه‌های استفاده شده نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱، درصد جذب ۱۵ الی ۱۴۴۰ دقیقه سبک‌دانه‌ها ارائه شده است.

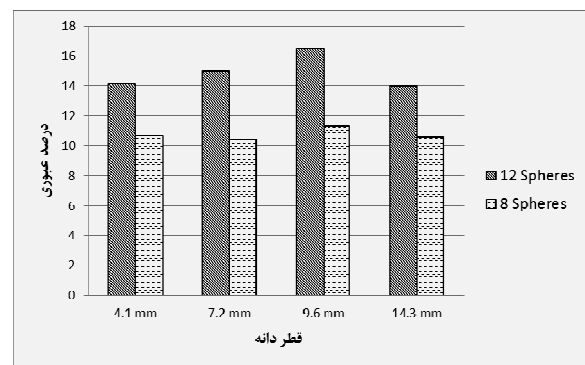
جدول ۱. اندازه سبک‌دانه‌های مورد استفاده

محدوده اندازه سبک‌دانه‌ها				اندازه متوسط
۱۲/۷-۱۶	۸-۱۱/۲	۶/۳۵-۸	۳-۳۶-۴/۷۶	
۱۴/۳mm	۹/۶mm	۷/۲mm	۴/۱mm	اندازه متوسط
۴۳۲	۴۶۲	۴۸۴	۵۹۲	وزن مخصوص توده‌ای (kg/m^3)
۸۰۶	۸۲۸	۸۷۱	۱۱۰۶	ظاهری (kg/m^3)

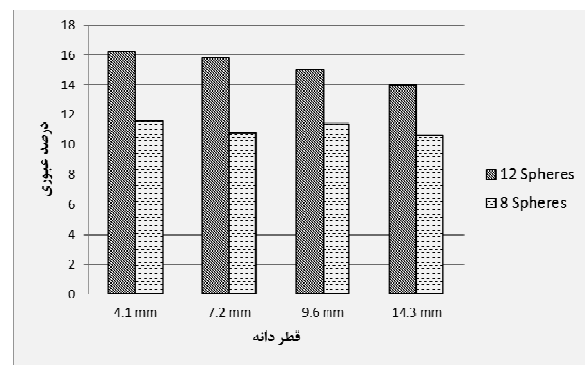
۶. آزمایش‌ها و بررسی نتایج

۶-۱. بررسی مقاومت در برابر ساییدگی و ضربه

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 می‌شوند، انتظار می‌رود که جنس رویه آن‌ها و مقاومت سایشی آن‌ها یکسان باشد. لازم به توضیح است که بر اساس استاندارد برای تعیین میزان خردشدگی، برای کلیه قطرها، درصد عبوری از الک نمره #۱۲ تعیین شده است. در شکل‌های ۳ و ۲ نتایج آزمایش‌های لس‌آنجلس ارائه شده است.



شکل ۲. آزمایش لس‌آنجلس در حالت حجم برابر



شکل ۳. نتایج آزمایش لس‌آنجلس در حالت وزن برابر

عامل خردشدگی دانه‌ها در این آزمایش، دو عامل سایش دانه‌ها با جداره دستگاه و برخورد گوی‌ها با دانه‌ها می‌باشد. در نتیجه این انتظار وجود دارد که هر چه تعداد گوی‌ها

افزایش یابد، تأثیر ضربه ناشی از آن‌ها بیشتر از سایش دانه‌ها با جداره دستگاه شود و برعکس.

مطابق شکل‌های ۲ و ۳، در دو حالت وزن برابر و حجم برابر، خردشدگی دانه‌ها با اندازه مختلف، در حالت ۸ گوی (تأثیر بیشتر سایش) تقریباً برابر است که می‌تواند ناشی از مقاومت سایشی برابر دانه‌ها باشد.

مطابق شکل ۲، در حالت حجم برابر و تعداد ۱۲ گوی (تأثیر بیشتر ضربه)، در سه اندازه اول، با افزایش قطر، درصد عبوری افزایش می‌یابد که می‌تواند ناشی از ارتباط بین کاهش مقاومت دانه‌ها در برابر ضربه با افزایش قطر باشد. اما در حالت دانه‌های با قطر متوسط ۱۴/۳ میلی‌متر این روند ادامه نیافته که می‌تواند ناشی از یکسان بودن الک جدا کننده (نمره #۱۲) برای کلیه اندازه دانه‌ها باشد. با توجه به شکل ۳، در حالت ۱۲ گوی (تأثیر بیشتر ضربه) و وزن برابر، با افزایش قطر، درصد عبوری کاهش پیدا کرده و این‌طور برداشت می‌شود که با افزایش قطر، مقاومت دانه‌ها در برابر ضربه افزایش می‌یابد که بر خلاف انتظار است و می‌تواند گمراه کننده باشد. در نتیجه با توجه به تفاوت قابل توجه چگالی دانه‌ها با اندازه آن‌ها و شرایط یکسان آن‌ها در دستگاه لس‌آنجلس، استفاده از حجم یکسان، به جای وزن یکسان نتایج منطقی‌تری ارائه می‌دهد. همچنین با توجه به الک جداکننده یکسان، تعیین ارتباط میان درصد عبوری و قطر دانه، دشوار است.

۶-۲. بررسی مقاومت در برابر خردشدگی

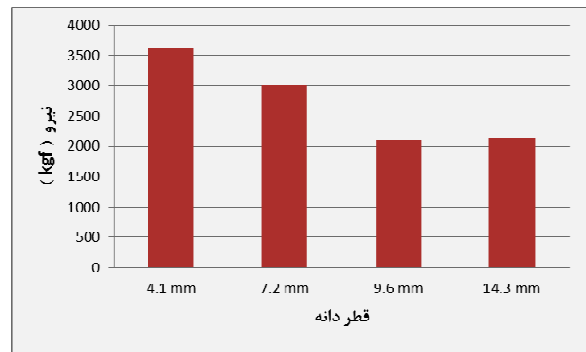
در شکل ۴ نتایج آزمایش‌های مقاومت در برابر خردشدگی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که به طور کلی با افزایش قطر، مقاومت دانه‌ها کاهش پیدا می‌کند، البته دانه‌های دارای قطر ۱۴/۳ و ۹/۶ میلی‌متر، دارای مقاومت خردشدگی نزدیک به هم می‌باشند.

بر مقاومت ضربه‌ای دانه‌ها ممکن است گمراه کننده باشد، و مطابق شکل ۴ مشاهده می‌شود که ارتباط مشخصی بین قطر دانه و خروجی آزمایش وجود ندارد.

جدول ۴. الک جدا کننده در آزمایش ارزش ضربه‌ای و ارزش

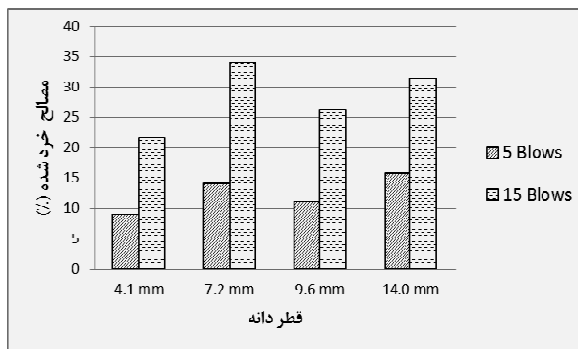
ده درصد

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



شکل ۴. نتایج آزمایش مقاومت خردشدگی

همچنین در شکل ۵، نتایج آزمایش ارزش ۱۰ درصد ریزتر، ارائه شده است. بر اساس نتایج این آزمایش، نیروی لازم برای خرد شدن ۱۰٪ دانه‌ها در حالت اشباع، بین ۸ الی ۱۵ درصد، کمتر از حالت خشک می‌باشد. لازم به توضیح است که برای انجام آزمایش بر روی دانه‌های قطر ۱۴/۳ میلی‌متری از سیلندر به قطر ۱۵ سانتی‌متر و برای سایر قطرها از سیلندر به قطر ۷/۵ سانتی‌متر استفاده شده است. همچنین در این آزمایش اندازه الک جدا کننده، وابسته به قطر دانه‌های مورد آزمایش است، که بر اساس جدول ۴ تعیین می‌شود. با توجه به این موارد، مقایسه تغییر نتایج نسبت به قطر سبک‌دانه، منطقی نمی‌باشد و علت تفاوت چشم‌گیر دانه‌های بزرگ‌تر ناشی از استفاده از سیلندر با قطر بزرگ‌تر است.



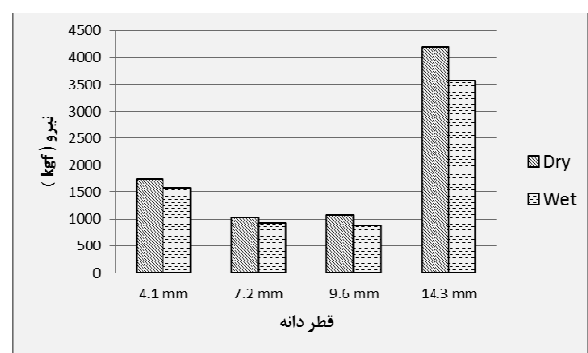
شکل ۶. نتایج آزمایش ارزش ضربه‌ای

۴-۶. ساخت ماده مرکب و تعیین مدول ارتجاعی و مقاومت

تک‌محوره ماتریس و ماده مرکب

جهت تعیین مدول ارتجاعی دانه‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر از ماتریس (ملات سیمانی) به تنهایی و همچنین ترکیب حجمی ۷۰٪ ماتریس و ۳۰٪ سبک‌دانه و همچنین ۶۰٪ ماتریس و ۴۰٪ ماده مرکب دوفازی ساخته شد.

به منظور جلوگیری از جذب آب ماتریس توسط سبک‌دانه، قبل از اختلاط آن‌ها، سبک‌دانه‌ها را به مدت ۳۰ دقیقه درون آب قرار داده و سپس توسط پارچه جاذب آب، آب سطحی آن گرفته شد. نمونه‌های ساخته شده پس از ۲۴ ساعت از قالب



شکل ۵. نتایج آزمایش ده درصد ریزتر

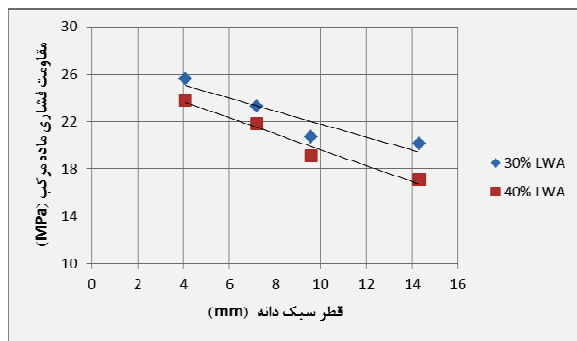
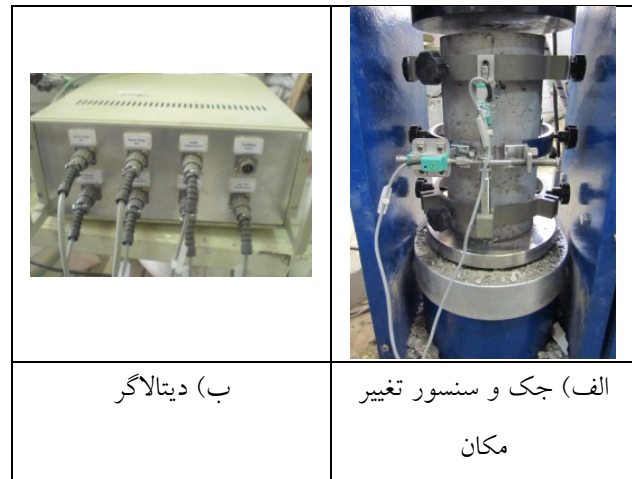
۳-۶. بررسی مقاومت در برابر ضربه

نتایج آزمایش ارزش ضربه‌ای در شکل ۶ نشان داده شده است. در این آزمایش طبق استاندارد و جدول ۴، از الک جدا کننده متناسب با قطر دانه‌ها، استفاده شده است. با توجه به این عامل (اندازه الک‌های جدا کننده متفاوت)، قضاوت تأثیر قطر

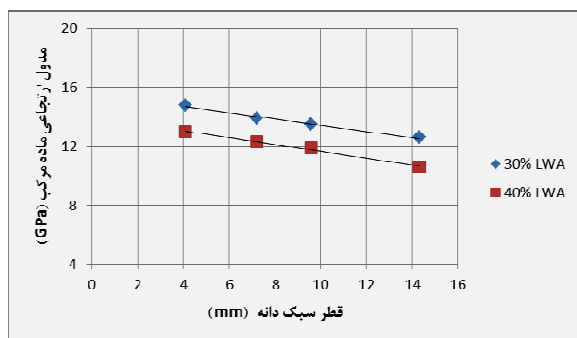
باز شده و تا ۲۸ روز در حوضچه آب حدود ۲۰ درجه غوطه‌ور شدند. سپس از آب خارج شده، و به مدت یک هفته در هوای آزاد خشک شدند. سپس مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری تک محوره آن‌ها تعیین شده است.

مطابق شکل ۷، برای تعیین مدول ارتجاعی، از حلقه استاندارد، حسگر تغییر مکان (LVDT)، کرنش سنج و سیستم خودکار داده خوان (دیتالاگر) استفاده شده است. بهترین شیب خط گذرنده از منحنی تنش-کرنش در حد فاصل کرنش 5×10^{-6} و کرنش ۴۰ درصد بار نهایی به عنوان مدول ارتجاعی منظور شده است.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب تغییرات میانگین مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی ماده مرکب نسبت به قطر سبک‌دانه‌های مورد استفاده نمایش داده شده است. مطابق این شکل‌ها با افزایش اندازه سبک‌دانه مقاومت و مدول ارتجاعی ماده مرکب به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش قطر، مقاومت سبک‌دانه‌ها کاهش پیدا می‌کند.

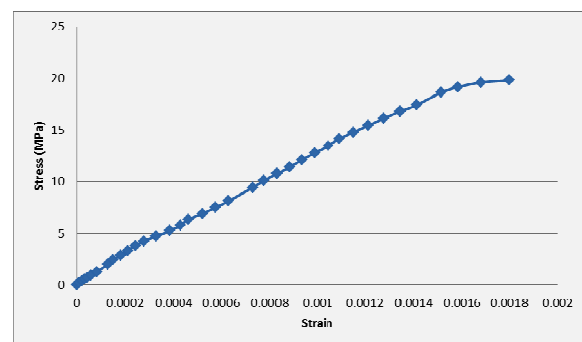


شکل ۹. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مرکب نسبت به قطر سبک‌دانه



شکل ۱۰. تغییرات مدول ارتجاعی نمونه‌های مرکب نسبت به قطر سبک‌دانه

شکل ۷. تجهیزات مورد استفاده جهت تعیین مدول ارتجاعی برای هر ترکیب سه الی چهار آزمایش انجام شده است. مقادیر مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری به همراه میانگین آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. در شکل ۸ یک نمونه از منحنی تنش-کرنش نشان داده شده است.



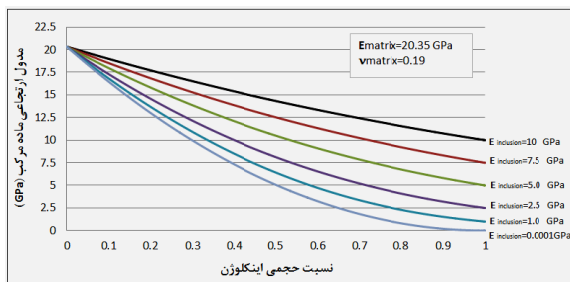
شکل ۸. یک نمونه از منحنی تنش-کرنش

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی

میانگین مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	میانگین مدول ارتجاعی (GPa)	مدول ارتجاعی (GPa)	سبکدانه (%)	اندازه متوسط سبکدانه (mm)
۲۵/۶	۲۴/۰	۱۴/۸	۱۴/۷	۳۰	۴/۱
	۲۸/۳		۱۵/۱		
	۲۵/۱		۱۴/۶		
	۲۵/۲		--		
۲۳/۸	۲۴/۳	۱۳/۰	۱۳/۵	۴۰	
	۲۳/۶		۱۲/۸		
	۲۳/۳		۱۲/۷		
	۲۴/۱		--		
۲۳/۳	۲۳/۸	۱۳/۹	۱۳/۸	۳۰	
	۲۳/۱		۱۴/۱		
	۲۳/۰		۱۳/۸		
۲۱/۸	۲۲/۱	۱۲/۳	۱۲/۶	۴۰	۷/۲
	۲۱/۹		۱۲/۳		
	۲۱/۳		۱۲/۰		
	۲۱/۷		--		
۲۰/۷	۱۸/۹	۱۳/۵	۱۳/۲	۳۰	
	۲۲/۱		۱۴/۰		
	۲۱/۷		۱۳/۴		
	۲۰/۱		--		
۱۹/۱	۱۹/۷	۱۱/۹	۱۱/۵	۴۰	
	۱۸/۸		۱۲/۲		
	۱۸/۹		۱۱/۶		
۲۰/۰	۲۰/۷	۱۲/۶	۱۳/۰	۳۰	۱۴/۳
	۲۱/۳		۱۲/۸		
	۱۸/۲		۱۲/۱		
	۱۹/۶		--		
۱۷/۳	۱۶/۶	۱۰/۶	۱۰/۴	۴۰	
	۱۷/۶		۱۱/۲		
	۱۷/۲		۱۰/۳		
	۱۷/۷		--		
۳۲/۷	۳۵/۰	۲۰/۳	۲۱/۴	ملات شاهد (بدون سبک دانه)	
	۳۰/۷		۲۰/۶		
	۳۲/۳		۱۹/۱		
	۳۲/۹		--		

۵-۶. تعیین مدول ارتجاعی سبکدانه‌ها

بر اساس میانگین نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی ملات شاهد، به منظور تعیین مدول ارتجاعی سبکدانه‌ها مقدار مدول ارتجاعی و ضریب پواسون ماتریس (ملات) به ترتیب برابر $20/3$ GPa و $0/19$ در نظر گرفته شد. همچنین ضریب پواسون اینکلوژن (سبکدانه) برابر $0/2$ فرض گردید. توسط روش عددی، به سادگی قابل نمایش است که تأثیر تغییرات ضریب پواسون بر مدول ارتجاعی ماده مرکب ناچیز است. سپس معادلات ۸ و ۹ به روش تفاضل محدود برای مقادیر مختلف مدول ارتجاعی سبکدانه حل شد. در شکل ۱۱، مقادیر مدول ارتجاعی ماده مرکب به ازای مقادیر مختلف مدول ارتجاعی اینکلوژن، حاصل از حل عددی معادلات نمایش داده شده است.



شکل ۱۱. مقادیر مدول ارتجاعی ماده مرکب به ازای

مشخصات ارتجاعی ملات و مقادیر مختلف مدول ارتجاعی اینکلوژن

برای تعیین مدول ارتجاعی هر گروه از سبکدانه‌ها، کافی است مقدار مدول ارتجاعی اینکلوژن طوری در نظر گرفته شود، که مدول ارتجاعی به دست آمده از آزمایش با مدول ارتجاعی ماده مرکب حاصل از حل معادلات، در درصد حجمی مشخص با هم یکسان شود. در جدول ۶ مقادیر مدول ارتجاعی به دست آمده برای اندازه‌های مختلف سبکدانه‌ها، با توجه به آزمایش‌های انجام شده در دو حالت نسبت حجمی ۳۰ و ۴۰ درصد ارائه شده است.

جدول ۶. مدول ارتجاعی سبک‌دانه

قطر سبک‌دانه (mm)	۴/۱ (mm)	۷/۲ (mm)	۹/۶ (mm)	۱۴/۳ (mm)
مدول ارتجاعی حاصل از آزمایش نمونه‌های حاوی ۳۰٪ سبک‌دانه (GPa)	۶/۵۸	۵/۰۹	۴/۴۷	۳/۰۷
مدول ارتجاعی حاصل از آزمایش نمونه‌های حاوی ۴۰٪ سبک‌دانه (GPa)	۶/۲۱	۵/۲۹	۴/۷۱	۳/۱۸

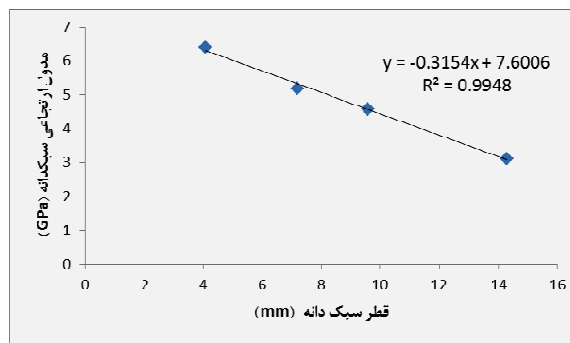
مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌های سازه‌ای که در شرایط یکسان تولید شده‌اند، به صورت تقریباً خطی، نسبت به قطر کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۱۳ نیز تغییرات مدول ارتجاعی نسبت به چگالی توده‌ای سبک‌دانه نشان داده شده است.

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

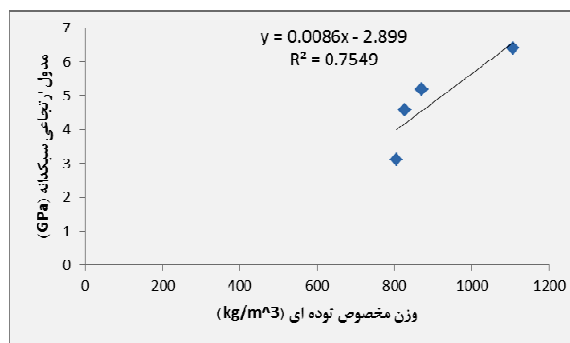
در این پژوهش، تأثیر قطر دانه‌های لیکای سازه‌ای که در شرایط یکسان تولید شده است، بر ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور مقایسه مقاومت آن‌ها به صورت کیفی، آزمایش‌های مختلف تحت بار فشاری، ضربه و سایش بر روی سبک‌دانه‌ها به طور مستقیم انجام شد. همچنین به بررسی مقاومت ماده مرکب ساخته شده از هر یک از آن‌ها، در شرایط یکسان پرداخته شد. سپس با ترکیب روش آزمایشگاهی و تئوری مواد مرکب به بررسی میزان مدول ارتجاعی آن‌ها به صورت کمی پرداخته شد. در این تحقیق از روش دیفرانسیلی برای تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها استفاده شد.

با توجه به کارهای انجام شده در این تحقیق نتایج ذیل قابل ارائه می‌باشد:

- ۱- با توجه به آزمایش‌های لس‌آنجلس انجام شده، انجام آزمایش در حالت حجم برابر، بر روی سبک‌دانه‌ها منطقی‌تر و انجام آزمایش در حالت وزن برابر می‌تواند نتایج گمراه‌کننده‌ای به دنبال داشته باشد. همچنین مقاومت سایشی آن‌ها وابسته به قطر آن‌ها نمی‌باشد.
- ۲- در آزمایش‌هایی که خرد شدن دانه‌ها را نسبت به یک الک جداکننده خاص، که وابسته به قطر دانه است، ارزیابی می‌کند، قضاوت در مورد تأثیر قطر بر نتیجه آزمایش به صورت مستقیم امکان‌پذیر نمی‌باشد.
- ۳- با توجه به آزمایش مقاومت فشاری بر روی مواد مرکب ساخته شده و همچنین آزمایش فشاری مستقیم بر روی



شکل ۱۲. مدول ارتجاعی سبک‌دانه لیکای سازه‌ای نسبت به قطر



شکل ۱۳. مدول ارتجاعی سبک‌دانه لیکای سازه‌ای نسبت به

وزن مخصوص توده‌ای

در تئوری مواد مرکب فرض اساسی همگنی ماده مرکب و محیط بی‌نهایت است. در نتیجه بازه تغییرات نتایج آزمایشگاهی می‌تواند ناشی از تغییر فرضیات مذکور باشد. در شکل ۱۲، مدول ارتجاعی متوسط حاصل از آزمایش‌ها نسبت به اندازه سبک‌دانه نمایش داده شده است. مطابق این شکل،

- آن‌ها، با افزایش قطر دانه، مقاومت دانه‌ها روند کاهشی دارد.
- ۴- با توجه به آزمایش‌های انجام شده، مقاومت فشاری نمونه مرکب با افزایش قطر سبک‌دانه به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند.
- ۵- مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌های سازه‌ای که در شرایط یکسان تولید شده‌اند، به صورت تقریباً خطی، نسبت به قطر کاهش پیدا می‌کند.
- تشکر و سپاس**
- این کار تحقیقاتی با حمایت فنی شرکت لیکا ایران انجام شده است، نویسندگان کمال قدردانی و سپاسگذاری را از شرکت فوق دارند.

منابع

- تهرانی، ف.، ۱۳۷۷. راهنمای جامع لیکا: دانه‌های رس منبسط شده و فرآورده‌های آن. شرکت لیکا، تهران.
- رئیس قاسمی، ا.م.، پرهیزگار، ط.، فامیلی، ه.، ۱۳۹۰. ارائه مدل دو فازی خمیر-دانه برای تعیین نسبت اختلاط بتن‌های سبک‌دانه حاوی لیکا. مجله علمی و پژوهشی عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۱، ص. ۱۶-۱.
- شکرچی‌زاده، م.، امدادی، آ.، لیبر، ن.ع.، ۱۳۸۷. بتن سبک‌دانه، دانش، فن آوری و کاربردها. موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- شکرچی‌زاده، م.، لیبر، ن.ع.، ماهوتیان، م.، آشوری، ا.، ۱۳۸۷. راهنمای کاربردی بتن سبک‌دانه سازه‌ای لیکا. گزارش شماره CMI-8707294. انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- Baalbaki, W., Aitcin, P.C., Ballivy, G., 1992. On predicting modulus of elasticity in high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, 89(5): 517-520.
- Chandra, S., Berntsson, L., 2002. *Lightweight Aggregate Concrete, Science, Technology and Applications*. First ed. Noyes Publications, New York.
- Chen, H.J., Yen, T., Chen, K.H., 2003. Evaluating Elastic Modulus of Lightweight Aggregate. *ACI Material Journal*, 100:108-113.
- Clarke, J.L., 1993. *Structural Lightweight Aggregate Concrete*, First ed. Blackie Academic & Professional, London.
- ESCSI, 2011. Expanded Shale, Clay and Slate Institute. Document 7600, available at www.escsi.org.
- Eshelby, J.D., 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. *Proceeding of Royal Society London*, A241(1226): 376-396.
- European Union – Brite EuRam III, 2000. Composite models for short- and long-term strength and deformation properties of LWAC. Document BE96-3942/R35.
- Kvande, T., 2001. Investigation of Some Material Properties for Structural Analysis of LECA Masonry. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- LECA (Light Expanded Clay Aggregate) Co, <http://www.leca.cc>.
- McLaughlin, R., 1977. A study of the differential scheme for composite materials. *International Journal of Engineering Science*, 15(4):237-244.
- Norris, A.N., 1985. A differential scheme for the effective moduli of composites. *Mechanics of Materials*, 4(1): 1-16.
- Shendy, M.E., 1991. A Comparative Study of LECA Concrete Sandwich Beams With and Without Core Reinforcement. *Cement and Concrete Composites*, 13(2): 143-149.
- Wisconsin Energy Corporation, 2004. *Coal Combustion Products Utilization Handbook*. Second Ed. Chapter 10: Minergy LWA – Structural, Masonry, and Geotechnical Lightweight Aggregates, United States, pp. 229.231.
- Zimmerman, R.W., 1991. Elastic moduli of a solid containing spherical inclusions. *Mechanics of Materials*, 12(1): 17-24.
- Zimmerman, R.W., 1984. Elastic moduli of a solid with spherical pores: new self-consistent method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 21(6): 339-343