مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۳۳-۴۲

Original Article

تعیین مشخصات ارتجاعی سبک‌دانه‌های مصنوعی شیل و رس منبسط‌شده‌ی ایران

مصطفی باغی (کارشناس ارشد)
محمود یزدانی * (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
علیرضا اردکانی (استادیار)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

پژوهش‌های انجام‌شده در ایران بر روی سنگ‌دانه‌های مصنوعی، تاکنون بیشتر بر پایه‌ی سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده انجام شده است. این در حالی است که سنگ‌دانه‌های شیل منبسط‌شده یا لیاپور به‌دلیل عدم شناخت مهندسان کشور کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی که در این پژوهش برای تعیین مستقیم مشخصات ارتجاعی این سبک‌دانه‌ها به دلیل عدم وجود سنگ مادر استانداردی وجود ندارد، از ترکیب روش آزمایشگاهی با روش تئوری مواد مرکب، برای اولین بار خواص مکانیکی هر دو سبک‌دانه‌ی لیکا و لیاپور ساخت کشور به‌دست آمده و با سبک‌دانه‌های تولیدی سایر کشورها مقایسه شده است. در بخش آزمایشگاهی با ترکیب سبک‌دانه‌ها با ماتریس ماسه‌ی سیمان و ساخت نمونه‌های استوانه‌یی مرکب، مشخصات ارتجاعی ماده‌ی زمینه و ماده‌ی مرکب تعیین شده است. سپس در بخش تئوری مواد مرکب، با استفاده از روش میکرومکانیک و معکوس مدل همگن‌سازی موری ـ تاناکا، به تعیین مشخصات ارتجاعی سبک‌دانه براساس ویژگی ماده‌ی زمینه و ماده‌ی مرکب پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها بیانگر افزایش نمایی مدول ارتجاعی نسبت به افزایش وزن مخصوص دانه‌یی و افزایش خطی مدول ارتجاعی نسبت به افزایش مقاومت خردشدگی سبک‌دانه‌های مورد استفاده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که سنگ‌دانه‌های شیل منبسط‌شده، مدول ارتجاعی و مقاومت خردشدگی به مراتب بیشتری نسبت به دانه‌های رس منبسط‌شده دارند و حتی دانه‌های ریز آن باعث افزایش سختی ماتریس ملات ماسه‌سیمان می‌شود.

واژگان کلیدی: لیاپور، لیکا، روش میکرومکانیک، همگن‌سازی، مشخصات ارتجاعی، مقاومت خردشدگی.

mostafab14@gmail.com
mahyaz@gmail.com
a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

۱. مقدمه

کاربرد سبک‌دانه‌ها به‌خصوص در کشورهای پیشرفته گسترش قابل توجهی یافته است. به نحوی که در بعضی از کشورها، مصرف سرانه‌ی آن‌ها 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. این در حالی است که کاربرد مصالح سبک با توجه به مزایای متعدد آن خصوصاً به لحاظ لرزه‌خیزی کشور و لزوم سبک‌سازی ساختمان‌ها ضرورت زیادی دارد.[۱] در این میان کاربرد انواع بتن‌های سبک و به‌خصوص بتن سبک سازه‌یی جایگاه ویژه‌یی پیدا کرده است. با وجود این، اغلب پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه برروی بتن‌های ساخته‌شده صورت گرفته است و شاید کمتر بتوان پژوهش‌های پایه‌یی بر روی خواص مهندسی و مکانیکی که به خود مصالح سبک متمرکز بشوند، یافت. در نتیجه لازم است توجه بیشتری به شناخت و بررسی ویژگی‌های آنها شود.

سبک‌دانه‌ها را می‌توان به دو دسته‌ی طبیعی و مصنوعی تقسیم‌بندی کرد. استفاده از سبک‌دانه‌های طبیعی به بیش از ۲۰۰۰ سال پیش بر می‌گردد. اما سبک‌دانه‌های مصنوعی با توجه به کمبود سبک‌دانه‌های طبیعی در کشورهای پیشرفته، در اواخر قرن ۱۹ ابداع شدند. در سال ۱۸۸۰، تولید اولین تکه‌های رس متخلخل با استفاده از تبخیر سریع آب موجود در رس، توسط کوکنتال در آلمان صورت گرفت.[۲] بعد از آن در سال ۱۹۱۷، اولین سبک‌دانه‌ی شیل منبسط‌شونده با استفاده از کوره‌ی استوانه‌یی چرخان با عنوان هایدت[۱] ثبت شد، که با تولید آن در ایالات متحده‌ی آمریکا، استفاده از سنگ‌دانه‌های مصنوعی از این نوع در سطح جهانی، برای تولید بتن‌های مسلح یا پیش‌تنیده مورد قبول قرار گرفت.[۱]

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۲/۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۲/۱۲، پذیرش ۱۳۹۴/۱/۲۲.

مجموعه‌یی از ویژگی‌های قابل توجه مانند وزن کم، هدایت حرارتی پایین، اُفت صوت مناسب، مقاومت در برابر آتش، دوام و پایداری شیمیایی و نظایر آن سبب گسترش کاربردهای متنوع سبک‌دانه‌های‌مصنوعی در صنعت ساختمان، طرح‌های عمرانی، کشاورزی، محیط زیست، راه‌سازی، صنایع نفت، ریخته‌گری و... شده است. مهم‌ترین مزیت این مصالح مربوط به چگالی کم آنهاست. به‌طوری که از آنها می‌توان برای خاکریزهای سبک، مصالح پُرکننده‌ی پشت دیوارهای حائل و تونل‌ها، مصالح زهکش، بتن سبک، قطعات پیش‌ساخته و غیره استفاده کرد، که با توجه به وزن کم آنها، باعث کاهش نیروهای جانبی و نشست و تغییرمکان در سازه‌ها می‌شود.[۲،۳]

مصالح مختلفی از جمله: پرلیت، ورمیکولیت، رس، اسلیت، شیل، و غیره برای تولید سبک‌دانه‌های صنعتی استفاده می‌شود. سبک‌دانه‌های شیلی یا لیاپور و رسی یا لیکا در حال حاضر مهم‌ترین نوع سبک‌دانه‌های صنعتی قابل استفاده در بتن سبک کشورمان هستند.

لیکا از رس انبساط‌پذیر به روش فرایند تر در داخل کوره‌ی گردان افقی تولید می‌شود. در فرایند تر، خاک رس کم آهک‌دار ابتدا به کمک آسیاب غلطکی و آب به‌صورت گِل در می‌آید و این گِل از دریچه‌ی بالای کوره‌ی گردان وارد آن می‌شود و سپس از مجموعه‌ی زنجیرها (اکسترودر) عبور می‌کند، به نحوی که به قطعات کوچک‌تر تبدیل می‌شود. این قطعات در هنگام عبور از کوره‌ی گردان در حالی که به مصالح شیشه‌یی تبدیل می‌شوند، به سبک‌دانه‌های با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف تبدیل می‌شوند.[۱] در این فرایند، سبک‌دانه‌های ایجادشده ابعاد مختلفی دارند و تعیین اندازه‌ی سبک‌دانه در فرایند تولید مقدور نیست (این فرایند تولید به روش نروژی یا سوئدی نیز معروف است).

لیاپور از شیل انبساط‌پذیر به روش فرایند خشک در داخل کوره‌ی گردان افقی تولید می‌شود. در فرایند خشک، سنگ شیل ابتدا با کمک آسیاب به‌صورت پودر بسیار نرم در می‌آید و این پودر به‌صورت همگن است و برای فرایند گندوله‌سازی انبار می‌شود.[۱] در فرایند گندوله‌سازی با دستگاه پلوتایذر، پودر شیل به همراه ذرات آب ترکیب و دانه‌های کروی ایجاد می‌شوند، که با تغییر در سرعت و زاویه‌ی دستگاه پلوتایذر می‌توان دانه‌هایی با ابعاد متفاوت تولید کرد. در مرحله‌ی آخر، دانه‌های تولیدشده در کوره‌ی گردان پخته می‌شوند و دانه‌های بیرون‌آمده از کوره غالباً یک شکل هستند (این فرایند تولید به روش آلمانی نیز معروف است).

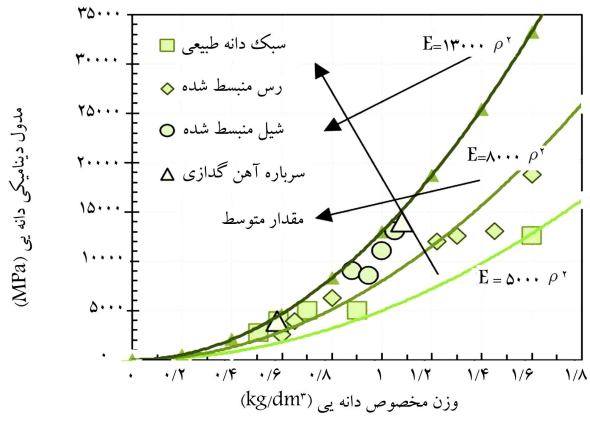
محصول خروجی از کوره‌ی پخت لیاپور و لیکا، غالباً دارای قطر صفر تا ۲۵ میلی‌متر است. با تغییر در مصالح اولیه، میزان افزودنی‌ها، درصد رطوبت اولیه، دمای کوره، و سرعت گردش آن می‌توان سبک‌دانه‌های با وزن مخصوص متفاوت تولید کرد. لیکا عموماً با توجه به وزن مخصوص توده‌یی خشک، درکشورهای اروپایی تقسیم‌بندی می‌شود و وزن مخصوص توده‌یی تقریبی آن به دنبال نام لیکا قرار می‌گیرد.[۵] با توجه به ثابت‌نبودن منحنی دانه‌بندی مصالح، عموماً این تقسیم‌بندی دقیق نیست.

با توجه به اینکه سبک‌دانه‌ی سنگین‌تر، مقاومت بیشتری دارند، قابلیت لیکای سنگین یا اصطلاحاً لیکای سازه‌یی و لیاپور در تولید بتن با مقاومت فشاری بالاتر بیشتر است. همچنین اغلب بتن‌های سبک سازه‌یی مقاوم با استفاده از سنگ‌دانه‌های شیل منبسط‌شده ساخته می‌شوند. این در حالی است که در ایران فقط یک کارخانه در یک مقطع زمانی کوتاه به تولید این نوع خاص سنگ‌دانه در شهر سیرجان پرداخته است، لیکن به‌دلیل عدم شناخت مهندسان ایرانی مورد توجه قرار نگرفته است. پژوهش‌های انجام‌شده در ایران بر روی بتن‌های سبک سازه‌یی نیز تاکنون بیشتر بر پایه‌ی سنگ‌دانه‌های لیکا، که مشخصات ضعیف‌تری دارند و چندان مناسب بتن سبک سازه‌یی نیستند، انجام شده است. در این پژوهش برای اولین بار خواص مکانیکی هر دو سنگ‌دانه‌ی لیکا و لیاپور ساخت کشور از طریق مطالعات آزمایشگاهی و با کمک مبانی میکرومکانیک به‌دست آمده و با سبک‌دانه‌های تولیدی سایر کشورها مقایسه شده است. برای این منظور، با انتخاب دو گروه چهارتایی لیکای معمولی و سازه‌یی و یک گروه سه‌تایی لیاپور به بررسی مشخصات ارتجاعی آنها پرداخته شده است.

۲. مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها و مطالعات انجام‌شده

به‌طور کلی مدول ارتجاعی عبارت از نسبت تنش نرمال به کرنش مرتبط آن تحت بار فشاری است. خواص ارتجاعی دانه‌های سنگی عموماً به‌صورت تقریبی با توجه به جنس و یا از آزمایش بر روی سنگ مادر آنها یافت می‌شود. با توجه به نبود سنگ مادر و ماهیت سبک‌دانه‌های مصنوعی، تعیین مشخصات ارتجاعی آنها پیچیدگی‌های ویژه‌یی دارد و امکان تعیین آن توسط انجام آزمایش مستقیم وجود ندارد.[۶] با توجه به ارتباط بین مدول ارتجاعی استاتیکی و دینامیکی بتن، برخی از پژوهشگران از مدول دینامیکی برای بررسی مدول استاتیکی سبک‌دانه‌ها استفاده کرده‌اند،[۷] که دلیل اصلی‌اش این است که مدول ارتجاعی دینامیکی یک دانه را می‌توان توسط دستگاه ماوراء صوت اندازه‌گیری کرد. در شکل ۱، سه رابطه برای ارتباط بین وزن مخصوص دانه‌یی و مدول دینامیکی برای سبک‌دانه‌های طبیعی، شیل منبسط‌شونده، و تمامی سبک‌دانه‌های مورد آزمایش نمایش داده شده است.

در پژوهشی در سال ۱۹۹۵ بیان شده است که به‌علت اثرات اعمال‌شده بر روی‌ه‌ی سبک‌دانه‌ها در آزمایش‌های تعیین مدول دینامیکی، نتایج دقت لازم را ندارند.[۸] در پژوهش اخیر، مدول ارتجاعی سه نوع سبک‌دانه‌ی شیل منبسط‌شده و همچنین در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۷،[۹] مدول ارتجاعی سه نوع سبک‌دانه‌ی حاصل از سیمان و خاکستر بر مبنای تئوری مواد مرکب اندازه‌گیری و از مدل موری ـ تاناکا و کاستر ـ توکسوز ساده‌سازی‌شده برای تعیین مدول ارتجاعی استفاده و با فرض یک مقدار ضریب پوآسون ثابت و کمتربودن مدول ارتجاعی سبک‌دانه از ملات، به تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه پرداخته شده است. برخی پژوهشگران نیز در پژوهش خود در سال ۲۰۰۱،[۱۰] با استفاده از روش عددی، رابطه‌یی را برای تعیین مدول ارتجاعی دانه به‌دست آورده و در مدل‌سازی خود، دانه‌ی کروی را در مرکز استوانه‌ی ملات قرار داده و با روش اجزاء محدود به تعیین مدول ارتجاعی ماده‌ی مرکب پرداخته‌اند. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۳، بر مبنای مدل دانه‌ی مرکزی[۲] و حل عددی آن، به تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها پرداخته شده،[۱] و رابطه‌ی ۱ برای محاسبه‌ی مدول ارتجاعی دانه (E_a) براساس مدول ملات (E_m)، مدول بتن (E_c)، و نسبت



شکل ۱. ارتباط بین مدول دینامیکی و وزن مخصوص سبک‌دانه‌ها.[۱۱]

حجمی دانه (W) پیشنهاد داده شده است:

$$E_a = ۶/۳E_c - ۵/۱E_m - ۹/۱W.E_c + ۸/۷W.E_m \quad (۱)$$

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۰،[۱۲] بر مبنای مدل سه فازی و فرض ضریب پوآسن، به تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌های رس و شیل منبسط‌شده پرداخته شده است.

در آخرین پژوهش انجام شده در سال ۲۰۱۴،[۱۳] به تعیین مدول ارتجاعی سبک دانه رس معمولی و سازه‌یی، براساس وزن مخصوص و قطر دانه پرداخته شد.

درجدول ۱، خلاصه‌یی از مشخصات مطالعات گذشته در مورد تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها ارائه شده است.

۳. روش میکرومکانیک و فرمولاسیون

هدف میکرومکانیک تعیین ویژگی‌های ماکروسکوپی (یا مؤثر) مواد مرکب از طریق مدل‌هایی است که مشخصات ریزساختارهای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها را ترکیب می‌کند. دو راهکار ممکن است مورد استفاده قرار گیرد: راهکار اول، استفاده از شیوه‌های همگن‌سازی است. این شیوه‌ها برای یافتن معادلات همگن‌شده (متوسط‌گیری‌شده) به‌کار می‌روند، که در آن‌ها از المان معرف حجم (یا RVE) که به مراتب بزرگ‌تر از ناهمگنی ساختاری است، استفاده می‌شود. تئوری‌های مختلف متوسط‌گیری، غالباً به بررسی توزیع تصادفی ناهمگنی در RVE می‌پردازند و براساس آن‌ها، میانگین حجمی دامنه‌ی تنش و کرنش در هر یک از فازهای ماده‌ی مرکب تعیین می‌شود.[۱۴و۱۵]

راهکار دوم، شیوه‌های میدان متناوب[۳] است، که در آن‌ها فرض می‌شود ناهمگنی‌ها در مکان‌های از پیش تعیین‌شده (و یا منظم) قرار می‌گیرند و همچنین در آن‌ها برای تعیین ویژگی‌های ماکروسکوپی، از مدل‌سازی عددی و یا تحلیل پاسخ مکانیکی یک سلول واحد با شرایط مرزی مشخص استفاده می‌شود.[۱۶] در پژوهشی در سال ۲۰۱۳[۱۷] در زمینه تاثیر حفرات بر رفتار مکانیکی توده سنگ، انطباق مناسب روش میکرو مکانیک با مطالعات آزمایشگاهی نشان داده شده است. در این پژوهش با استفاده از راهبرد اول، به تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها پرداخته شده است. در نتیجه بتن ساخته‌شده از سبک‌دانه‌های مذکور به‌عنوان یک ماده‌ی مرکب دو فازی، که حاصل توزیع تصادفی اینکلوژن (دانه‌ها) در ماده‌ی زمینه (ماده‌ی زمینه‌ی ملات ماسه سیمان) است، در نظر گرفته شده است. اگر نسبت حجمی ماده‌ی مرکب شامل دو فاز اینکلوژن و ماده‌ی زمینه برابر ۱ در نظر گرفته شود، نسبت حجمی اینکلوژن (V_i) که بیانگر حجم دانه‌هاست، به صورت رابطه‌ی ۲ با نسبت حجمی ماده‌ی زمینه (V_m) ارتباط دارد:

$$V_i = ۱ - V_m \quad (۲)$$

در میکرومکانیک و تئوری مواد مرکب، تانسور سختی مؤثر (C_e) در معادله‌ی رفتاری خطی مطابق رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شوند:[۱۴]

$$\langle\sigma\rangle = C_e \langle\varepsilon\rangle \quad (۳)$$

که در آن، σ و ε به ترتیب تانسور تنش و کرنش هستند. همچنین اندیس‌های i و m نشان‌دهنده‌ی اینکلوژن و ماده‌ی زمینه هستند. تانسور تمرکز کرنش (A) که ارتباط‌دهنده‌ی متوسط کرنش RVE و اینکلوژن است، به‌صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:

$$\langle\varepsilon\rangle_i = A \langle\varepsilon\rangle \quad (۴)$$

و تانسور سختی مؤثر، به‌صورت رابطه‌ی ۵ تعیین می‌شود:

$$C_e = C_m + V_i(C_i - C_m)A \quad (۵)$$

طبق رابطه‌ی ۵، تعیین ویژگی‌های مؤثر نیاز به تعیین تانسور تمرکز کرنش دارد، که براساس مدل‌های مختلف همگن‌سازی تعیین می‌شود. ساده‌ترین مدل‌های همگن‌سازی مدل ویت،[۱۸] و مدل رئوس،[۱۹] است، که در آن‌ها به ترتیب کرنش و تنش داخل ماده‌ی مرکب به‌صورت یکنواخت فرض می‌شود. در اواسط قرن بیستم، مدل اشلبی،[۲۰و۲۱] که یکی از اصلی‌ترین دستاوردهای روش تحلیلی برای یافتن ویژگی‌های مؤثر ماده‌ی مرکب است، ارائه شده است. مدل اشلبی بعدها مبنای بسیاری از روش‌های همگن‌سازی قرارگرفته و در آن به بررسی حل مسئله‌ی اینکلوژن بیضی‌گون در ماده‌ی زمینه‌ی بی‌نهایت پرداخته شده است. تانسور تمرکز تنش براساس مدل اشلبی به صورت رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:[۲۰]

$$A^{Eshelby} = [I + SC_m(C_i - C_m)]^{-۱} \quad (۶)$$

که در آن، I تانسور واحد مرتبه‌ی چهار و S تانسورهای مرتبه‌ی چهار اشلبی است. تانسورهای اشلبی با توجه به هندسه‌ی اینکلوژن و ضریب پوآسون ماده‌ی زمینه محاسبه می‌شود. تانسورهای اشلبی به‌صورت رابطه‌ی ۷ متقارن هستند:[۲۰]

$$S_{ijkl} = S_{jikl} = S_{ijlk} \quad (۷)$$

مدل اشلبی،[۲۱] اندرکنش بین اینکلوژن‌ها را در نظر نمی‌گیرد و در نتیجه برای مواد مرکب با نسبت پایین اینکلوژن مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل موری ـ تاناکا،[۲۰] یکی از پرکاربردترین روش‌های همگن‌سازی است، که در آن اندرکنش بین اینکلوژن‌ها توسط کرنش اغتشاشی غیریکنواخت در نظر گرفته می‌شود و تانسور تمرکز تنش برای آن به‌صورت رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود:[۲۲]

$$A^{MT} = A^{Eshelby}[(۱ - V_i)I + V_i A^{Eshelby}]^{-۱} \quad (۸)$$

جدول ۱. مطالعات انجام‌شده در مورد تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها.

پژوهش‌گر	سال	روش	سبک‌دانه
مولر و رچولز[۱۲]	۱۹۷۹	آزمایش ماوراءصوت	شیل منبسط‌شده
نیلسن و همکاران[۸]	۱۹۹۵	مدل موری ـ تاناکا و کاستر ـ توکسوز	شیل منبسط‌شده
یانگ[۹]	۱۹۹۷	مدل موری ـ تاناکا و کاستر ـ توکسوز	سیمان و خاکستر منبسط‌شده
چن و همکاران[۱۰]	۲۰۰۳	مدل دانه مرکزی	شیل منبسط‌شده
کی و همکاران[۱۱]	۲۰۱۰	مدل سه فازی	شیل و رس منبسط‌شده
اردکانی و یزدانی [۱۳]	۲۰۱۴	مدول مودی - تاناکا	رس منبسط شده

درنتیجه با توجه به رابطه‌ی ۵، سختی اینکلوژن را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۹ بیان کرد:

$$C_i = C_m + 1/V_i(\bar{C} - C_m) : A^{-1} \qquad (۹)$$

مطابق رابطه‌ی ۹، در صورت داشتن ضریب تمرکز کرنش A، می‌توان مشخصات اینکلوژن را به راحتی تعیین کرد. اما ضریب تمرکزکرنش A، نیز وابسته به مشخصات اینکلوژن (C_i) است (مشابه روابط ۶ و ۸). در نتیجه استفاده‌ی مستقیم از رابطه‌ی ۹ برای تعیین تانسور سختی اینکلوژن ممکن نیست. با فرض مصالح ایزوتروپ و جایگزین‌کردن مؤلفه‌های تانسورهای اشلبی و تانسور سختی بر حسب مدول ارتجاعی (E) و ضریب پوآسون (ν)، میزان مدول ارتجاعی و ضریب پوآسون اینکلوژن برای مدل موری ـ تاناکا را می‌توان تعیین کرد، که برای اطلاع از جزئیات بیشتر به تحقیق انجام شده مراجعه شود.[۲۳]

۴. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۴. مصالح مصرفی

۱.۱.۴. سبک‌دانه

در این پژوهش از سه نوع سبک‌دانه‌ی لیکای معمولی، لیکای سازه‌یی، و لیاپور استفاده شده است، که لیکا از شرکت لیکا ایران و لیاپور از شرکت پرلیکا عمران پارس سیرجان تهیه شده است.

برای انجام این پژوهش با الک‌کردن مصالح، ۴ اندازه‌ی یکنواخت از دانه‌های لیکای معمولی و سازه‌یی و ۳ اندازه‌ی یکنواخت از دانه‌های لیاپور تهیه شده است.

در جدول ۲، طبقه‌بندی اندازه‌ی دانه‌های استفاده شده به همراه نام‌گذاری آنها نشان داده شده است. حروف M، S و L، نشانه‌ی نوع سبک‌دانه و شماره‌های ۱ الی ۴، نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی سبک‌دانه است.

در شکل ۲، ریز ساختار سبک‌دانه‌ها نشان داده شده است، که با توجه به آن تخلخل دانه‌های لیاپور و لیکای سازه‌یی به مراتب کمتر از دانه‌های لیکای معمولی است.

برای شناخت خصوصیات فیزیکی هر گروه از سبک‌دانه‌ها طبق استانداردهای

شکل ۲. ریزساختار سبک‌دانه‌ها.

جدول ۲. نام‌گذاری نمونه‌های مورد استفاده.

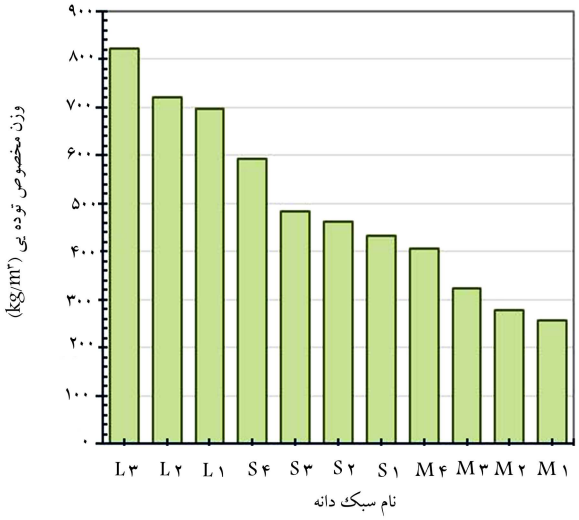
نام نمونه	نوع	اندازه (mm)								
		۳٫۴	۴٫۸	۶٫۴	۸٫۰	۹٫۵	۱۱٫۲	۱۲٫۷	۱۶٫۰	۲۰
$L_۳$	لیاپور		۴٫۹۰							
$L_۲$				۷٫۹۰						
$L_۱$						۱۱٫۱				
$S_۴$	لیکای سازه‌یی	۴٫۱۰								
$S_۳$				۷٫۲۰						
$S_۲$					۹٫۶۰					
$S_۱$								۱۴٫۳		
$M_۴$	لیکای معمولی	۴٫۱۰								
$M_۳$				۷٫۲۰						
$M_۲$					۹٫۶۰					
$M_۱$								۱۴٫۳		

ASTM C ۲۹،[۲۴] EN ۱۰۹۷-۳،[۲۵] و EN ۱۰۹۷-۶،[۲۶] وزن مخصوص توده‌یی و دانه‌یی آنها تعیین شده است، که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

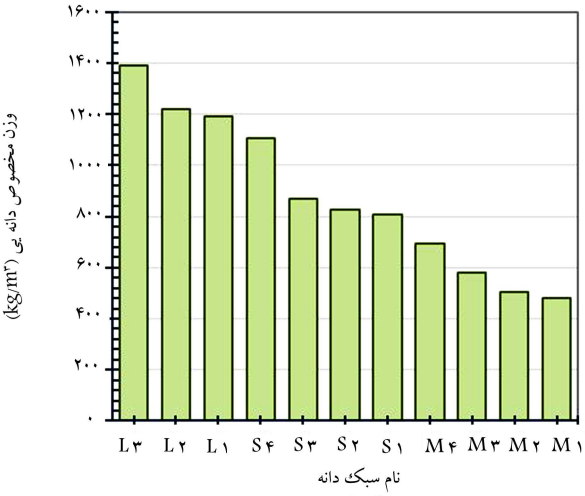
همچنین برای تخمینی از تخلخل داخلی سبک‌دانه‌ها، طبق استاندارد EN ۱۰۹۷-۳،[۲۵] درصد جذب آب ۳۰ دقیقه و یک روزه‌ی آنها تعیین شده است، که در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

روند تغییرات شکل‌های ۳ تا ۶ با توجه به تفاوت در تخلخل و ضخامت پوسته‌ی خارجی سبک‌دانه‌ها قابل توجیه است. مطابق این روند مشخص است که دانه‌های لیاپور به دلیل چگالی بیشتر و همچنین درصد جذب آب کمتر، تخلخل و پوسته‌ی ضخیم‌تری نسبت به دانه‌های لیکا دارند.

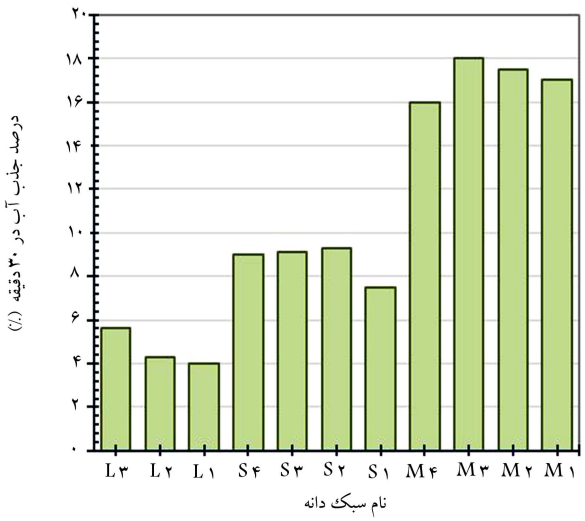
آزمایش مقاومت خردشدگی، به‌صورت غیرمستقیم معیاری در برابر مقاومت دانه‌ها و خردشدگی آنها در اثر اعمال بار است. این آزمایش براساس استاندارد EN ۱۳۰۵۵-۱،[۲۷] بر روی سبک‌دانه‌ها انجام و نتایج آن در شکل ۷ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه وزن مخصوص سبک‌دانه‌های این پژوهش بیشتر از ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است، از روش اول استاندارد مذکور استفاده شده است.



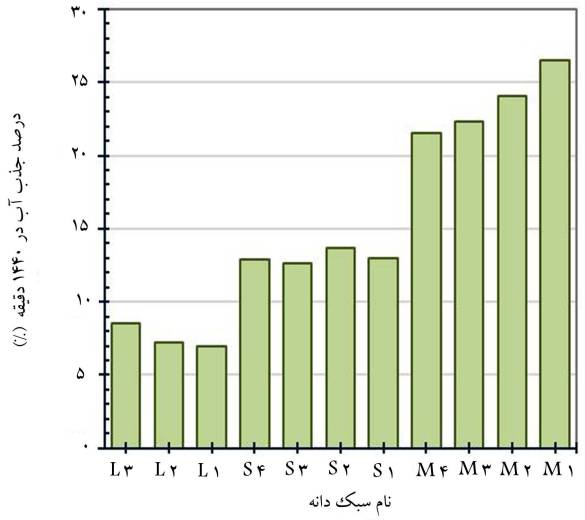
شکل ۳. وزن مخصوص توده‌یی سبک‌دانه‌ها.



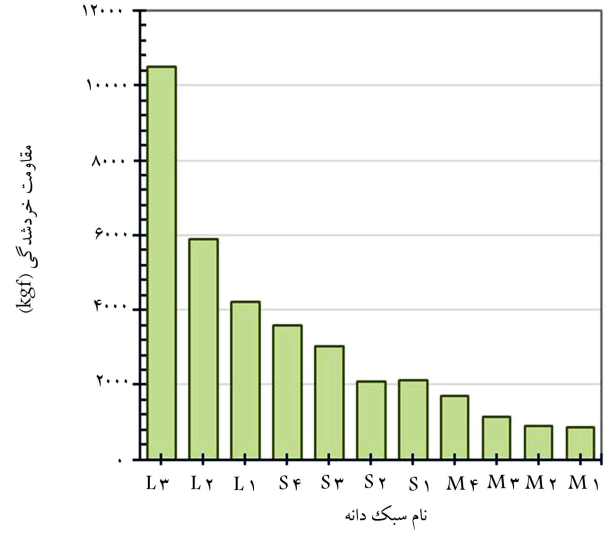
شکل ۴. وزن مخصوص دانه‌یی سبک‌دانه‌ها.



شکل ۵. درصد جذب آب ۳۰ دقیقه‌یی سبک‌دانه‌ها.



شکل ۶. درصد جذب آب ۱۴۴۰ دقیقه‌یی سبک‌دانه‌ها.



شکل ۷. مقاومت خردشدگی سبک‌دانه‌ها.

۲.۱.۴. ماده‌ی زمینه

از دو ملات ماسه و سیمانی، با طرح اختلاط ارائه‌شده در جدول ۳ به‌عنوان ماده‌ی زمینه استفاده شده است. سیمان مصرفی، سیمان پرتلند نوع ۲ و ماسه‌ی مورد استفاده از نوع شکسته و گذرانده‌شده از الک ۳٫۳۶ میلی‌متر است. همچنین از روان‌کننده برای روانی بیشتر استفاده شده است. در ماده‌ی زمینه‌ی نوع ۱ از فوق روان‌کننده‌ی پایه‌ی نفتالینی و در ماده‌ی‌زمینه‌ی نوع ۲ از ابر روان‌کننده‌ی پایه‌ی کربوکسیلاتی استفاده شده است.

از ماده‌ی زمینه‌ی نوع ۱ برای ساخت مواد مرکب شامل سبک‌دانه‌های لیکا و از ماده‌ی زمینه‌ی نوع ۲ برای ساخت مواد مرکب شامل سبک‌دانه‌های لیاپور استفاده شده است. علت تفاوت در ماده‌ی زمینه‌های انتخابی تفاوت در زمان انجام آزمایش‌هاست. در انتخاب ماده‌ی زمینه‌ها با ساخت نمونه‌های آزمایشی مقدماتی سعی شده است تا آنجا که امکان دارد هر دو ماده‌ی زمینه، خصوصیات ارتجاعی تقریباً یکسانی داشته باشند.

۲.۴. ساخت ماده‌ی مرکب و مشخصات ارتجاعی ماده‌ی زمینه و ماده‌ی مرکب

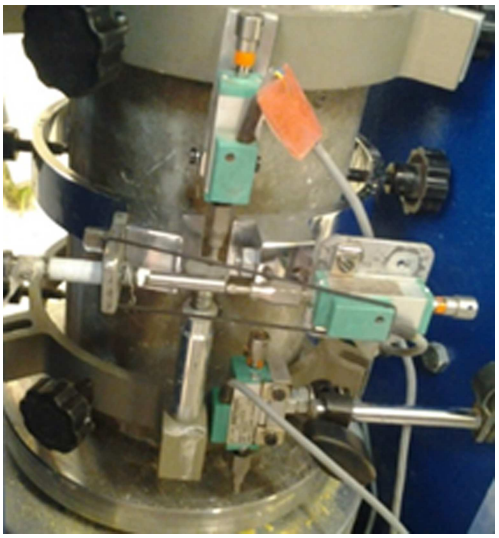
جهت تعیین مدول ارتجاعی دانه‌ها، نمونه‌های استوانه‌یی استاندارد با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر از ماده‌ی زمینه (ملات سیمانی) به تنهایی و همچنین ماده‌ی مرکب با نسبت حجمی ۱۰ الی ۳۰ درصد سبک‌دانه ساخته شده است. به‌منظور جلوگیری از جذب آب ماده‌ی زمینه توسط سبک‌دانه، قبل از اختلاط آنها، سبک‌دانه‌ها را به مدت ۳۰ دقیقه درون آب قرار داده و سپس با پارچه‌ی جاذب آب، آب سطحی آن‌ها گرفته شده است. نمونه‌های ساخته‌شده پس از ۲۴ ساعت از قالب باز و تا سن ۲۸ روزگی در حوضچه‌ی آب حدود ۲۰ درجه غوطه‌ور و سپس از آب خارج و در هوای آزاد خشک و برای انجام آزمایش آماده شده‌اند. مطابق شکل ۸، برای تعیین مدول ارتجاعی، از حلقه‌ی استاندارد، حس‌گر تغییرمکان (LVDT)، کرنش‌سنج، و سیستم اتوماتیک قرائت داده (دیتالاگر) استفاده شده است. براساس استاندارد ASTM C-469، بهترین شیب خط گذرنده از منحنی تنش ـ کرنش طولی در حد فاصل کرنش ۵×۱۰^{-۶} تا کرنش متناظر با ۴۰٪ بار نهایی به‌عنوان مدول ارتجاعی و بهترین شیب خط گذرنده از منحنی کرنش عرضی ـ کرنش طولی در حد فاصل کرنش ۵×۱۰^{-۶} تا کرنش متناظر با ۴۰٪ بار نهایی به‌عنوان ضریب پوآسون منظور شده است.

شکل ۹، نمونه‌یی از منحنی تنش ـ کرنش نمونه‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۱۰، نمونه‌یی از محاسبه‌ی مدول ارتجاعی و شکل ۱۱، نمونه‌یی از محاسبه‌ی ضریب پوآسون را نشان می‌دهد.

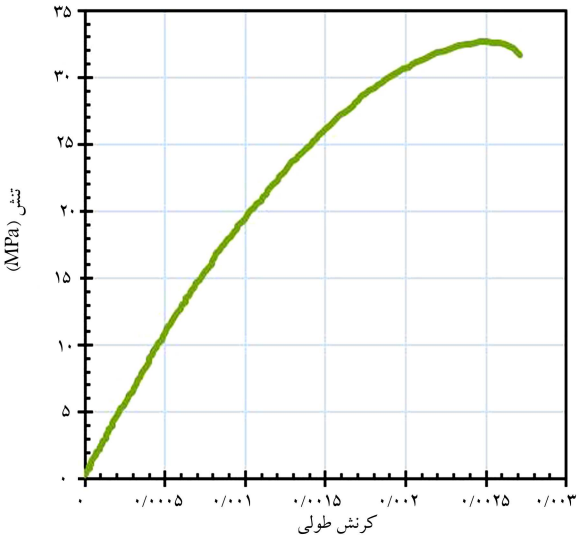
در شکل ۱۲، میانگین مدول ارتجاعی نمونه‌ها نسبت به حجم سبک‌دانه نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور مشاهده می‌شود که مدول ارتجاعی نمونه‌های حاوی سبک‌دانه‌ی لیاپور (سری L) بیشتر از نمونه‌های حاوی سبک‌دانه‌ی لیکای سازه‌یی (سری S) و مدول ارتجاعی نمونه‌های حاوی سبک‌دانه‌ی لیکای سازه‌یی

جدول ۳. طرح اختلاط ماده‌ی زمینه‌های انتخابی (kg/m^3).

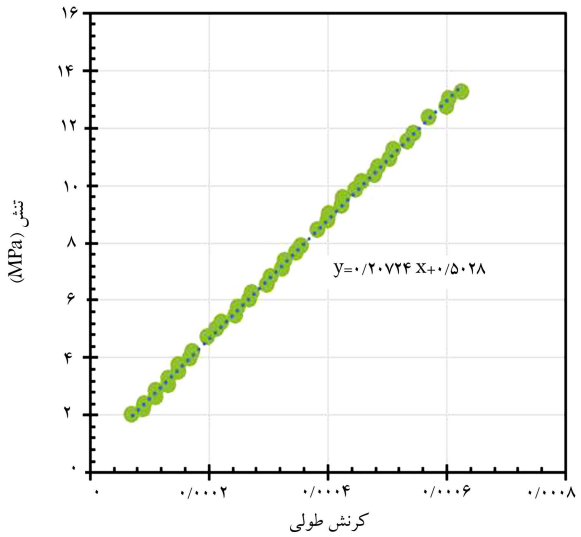
نوع ماده‌ی زمینه	ماسه	سیمان	آب	روان‌کننده
۱	۱۳۷۵٫۳	۵۶۰٫۳	۲۸۰٫۲	۷٫۳
۲	۱۴۷۹	۵۴۵	۲۵۷	۳٫۱



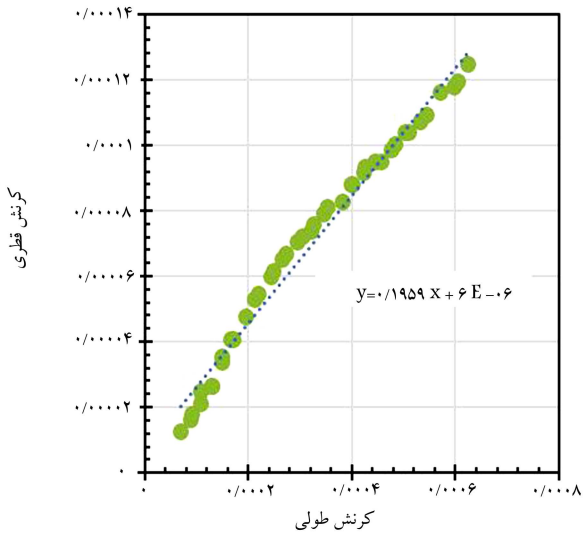
شکل ۸. ابزار مورد استفاده برای تعیین مدول ارتجاعی و ضریب پوآسون.



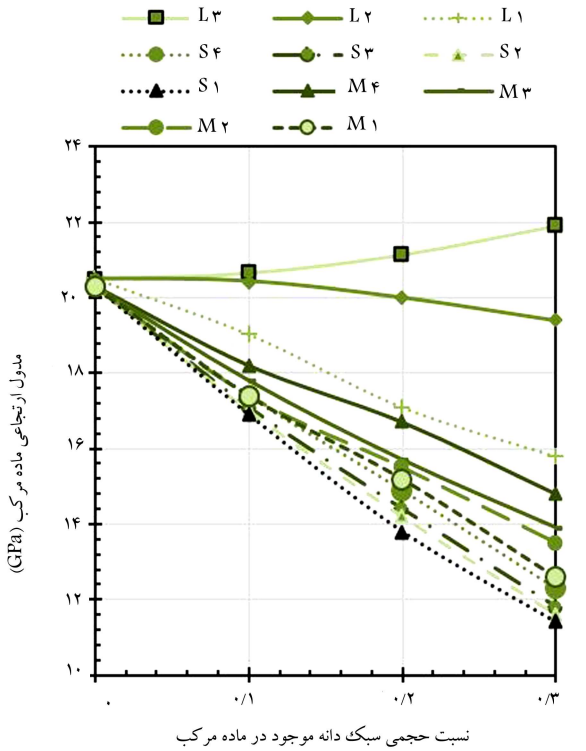
شکل ۹. منحنی تنش ـ کرنش یک نمونه‌ی بتن آزمایشی.



شکل ۱۰. محاسبه‌ی مدول ارتجاعی یک نمونه از ماتریس مورد آزمایش.



شکل ۱۱. محاسبه‌ی ضریب پوآسون یک نمونه از ماتریس مورد آزمایش.



شکل ۱۲. متوسط مدول ارتجاعی نمونه‌ها نسبت به حجم سبک‌دانه.

بیشتر از نمونه‌های حاوی سبک‌دانه‌های لیکای معمولی (سری M) است.

مطابق شکل ۱۲ با افزایش قطر سبک‌دانه، مدول ارتجاعی نمونه‌های مرکب ساخته‌شده توسط آن کاهش یافته است. این نتیجه با توجه به تفاوت وزن مخصوص میان‌دانه‌ها منطقی است. همچنین به جز در دانه‌های L_3 که با افزایش حجم سبک‌دانه، مدول ارتجاعی نمونه‌های مرکب ساخته‌شده از آن‌ها افزایش یافته است، در باقی موارد با افزایش حجم سبک‌دانه، مدول ارتجاعی نمونه‌های مرکب ساخته‌شده توسط آن‌ها کاهش یافته است.

در شکل ۱۳، متوسط ضریب پوآسون ماده‌ی مرکب نسبت به حجم ماده‌ی مرکب نمایش داده شده است. مطابق شکل مذکور، به جز در نمونه‌های حاوی L_3 با افزایش حجم سبک‌دانه، میزان ضریب پوآسون ماده‌ی مرکب افزایش ناچیز و در نمونه‌های حاوی L_3 با افزایش حجم سبک‌دانه، میزان ضریب پوآسون ماده‌ی مرکب کاهش بسیار ناچیزی پیدا کرده است.

۵. تعیین مشخصات ارتجاعی سبک‌دانه‌ها

برای تعیین مشخصات ارتجاعی هرگروه از سبک‌دانه‌ها، کافی است مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها در روابط کلی به‌دست‌آمده از مدل موری ـ تاناکا،[۲۱] جایگذاری شود.

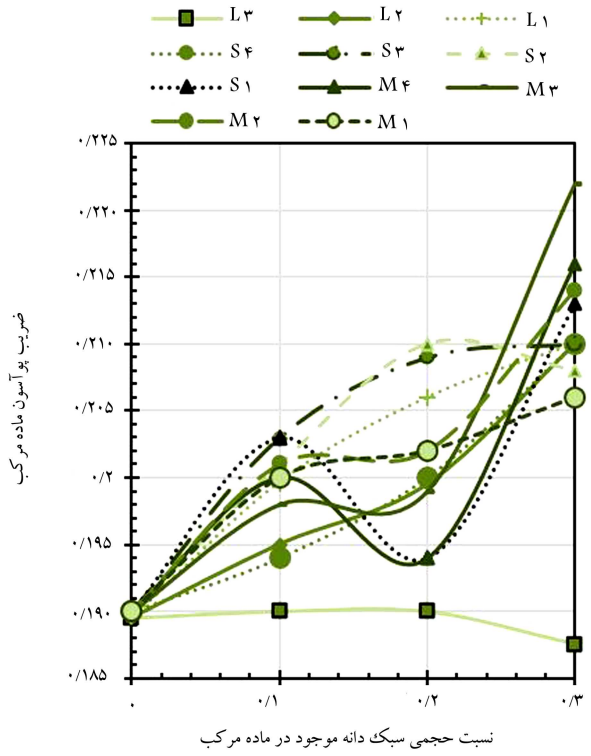
با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، مدول ارتجاعی ماده‌ی زمینه‌ی نوع ۱ برابر ۲۰٫۳ گیگاپاسکال و ضریب پوآسون آن ۰٫۱۹۳ و مدول ارتجاعی ماده‌ی زمینه‌ی نوع ۲ برابر ۲۰٫۵ گیگاپاسکال و ضریب پوآسون آن ۰٫۱۹ در نظرگرفته شده است. همچنین مشخصات ارتجاعی نمونه‌های مرکب مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳ استفاده شده است.

در جدول‌های ۴ و ۵، ترتیب مدول ارتجاعی و ضریب پوآسون به‌دست‌آمده‌ی سبک‌دانه‌ها ارائه شده است.

مطابق جدول ۴، مدول ارتجاعی دانه‌های سری M در محدوده‌ی ۰٫۵۵ الی ۲٫۳۷ گیگاپاسکال و مدول ارتجاعی دانه‌های سری S در محدوده‌ی ۲٫۷۵ الی ۶٫۳۹ گیگاپاسکال و مدول ارتجاعی دانه‌های سری L در محدوده‌ی ۸٫۶ الی ۲۳٫۹ گیگاپاسکال قرار دارد.

مطابق جدول ۵، متوسط ضریب پوآسون به‌دست‌آمده دانه‌های سری M، S و L به ترتیب برابر ۰٫۳۵، ۰٫۲۸ و ۰٫۲۴ تعیین شده است.

در شکل ۱۴، ارتباط بین وزن مخصوص دانه‌یی و مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها



شکل ۱۳. متوسط ضریب پوآسون نمونه‌ها نسبت به حجم سبک‌دانه.

جدول ۴. مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها.

نام سبک‌دانه	مدول ارتجاعی حاصل از آزمایش روی نمونه‌ها (GPa) حاوی ۱۰٪ سبک‌دانه	حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه	حاوی ۳۰٪ سبک‌دانه	میانگین (GPa)
M_4	۲٫۵۶	۲٫۶۰	۱٫۹۵	۲٫۳۷
M_3	۱٫۴۷	۱٫۵۵	۱٫۱۶	۱٫۳۹
M_2	۱٫۱۲	۱٫۱۵	۰٫۸۵	۱٫۰۴
M_1	۰٫۷۷	۰٫۳۳	۰٫۵۴	۰٫۵۵
S_4	۵٫۹۰	۶٫۹۶	۶٫۳۲	۶٫۳۹
S_3	۴٫۱۴	۴٫۴۱	۴٫۶۵	۴٫۴۰
S_2	۲٫۵۶	۳٫۹۴	۳٫۹۴	۳٫۴۸
S_1	۲٫۵۶	۳٫۲۶	۲٫۴۳	۲٫۷۵
L_3	۲۲٫۱۷	۲۳٫۷۷	۲۵٫۸۵	۲۳٫۹
L_2	۱۹٫۵۷	۱۸٫۲۰	۱۷٫۱۰	۱۸٫۲
L_1	۹٫۳۷	۸٫۰۷	۸٫۴۷	۸٫۶

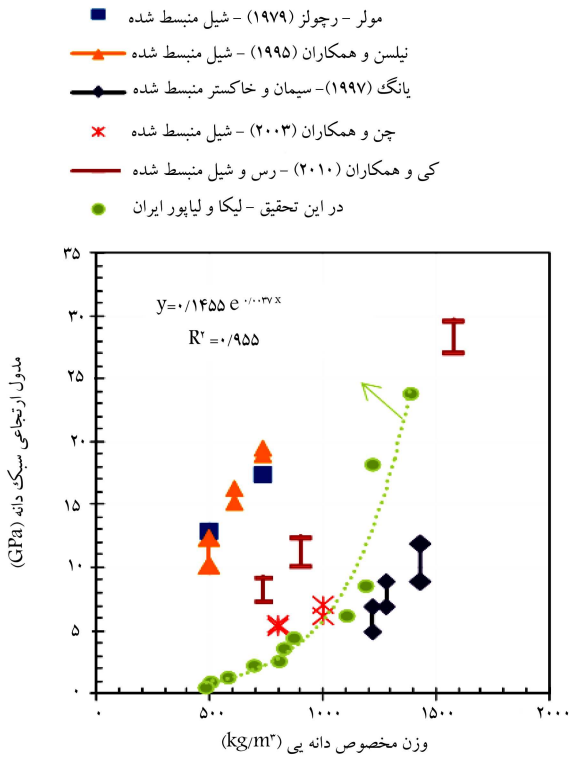
جدول ۵. ضریب پوآسون سبک‌دانه‌ها.

نام سبک‌دانه	ضریب پوآسون حاصل از آزمایش روی نمونه‌ها حاوی ۱۰٪ سبک‌دانه	حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه	حاوی ۳۰٪ سبک‌دانه	میانگین
M_4	۰٫۳۰	۰٫۲۹	۰٫۳۰	۰٫۳۰
M_3	۰٫۳۳	۰٫۳۲	۰٫۳۳	۰٫۳۳
M_2	۰٫۳۵	۰٫۳۴	۰٫۳۶	۰٫۳۵
M_1	۰٫۳۸	۰٫۴۳	۰٫۳۸	۰٫۴۰
S_4	۰٫۲۶	۰٫۲۶	۰٫۲۶	۰٫۲۶
S_3	۰٫۲۸	۰٫۲۷	۰٫۲۷	۰٫۲۷
S_2	۰٫۳۰	۰٫۲۷	۰٫۲۷	۰٫۲۸
S_1	۰٫۳۰	۰٫۲۸	۰٫۳۰	۰٫۲۹
L_3	۰٫۱۹	۰٫۱۹	۰٫۱۸	۰٫۱۹
L_2	۰٫۲۴	۰٫۲۴	۰٫۲۵	۰٫۲۴
L_1	۰٫۲۹	۰٫۲۹	۰٫۲۶	۰٫۲۸

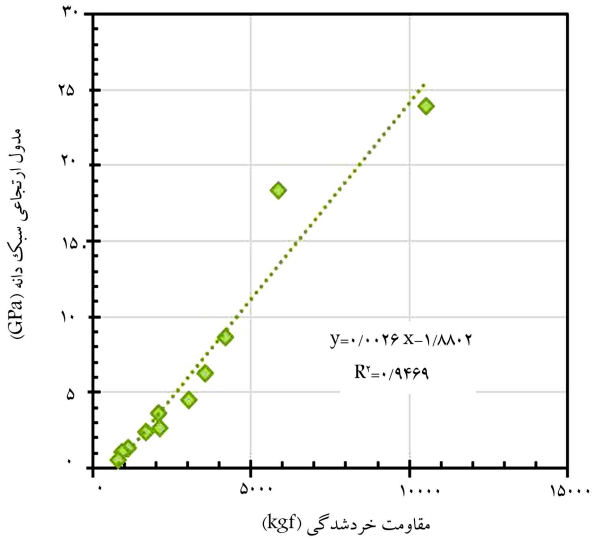
نشان داده شده است. همچنین برای مقایسه، نتایج حاصل از سایر پژوهش‌گران نیز در شکل مذکور ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۴ به نظر می‌آید که با تنوع در جنس سبک‌دانه، نتایج می‌تواند بسیار متفاوت از هم باشند. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از اندازه، شکل، ضخامت پوسته‌ی خارجی سبک‌دانه، اندازه، و نحوه‌ی قرارگیری خلل و فرج در سبک‌دانه‌ها باشد، که تمامی موارد ذکرشده به نحوه‌ی تولید و روش پخت سبک‌دانه‌ها بر می‌گردد. همچنین با توجه به شکل مذکور می‌توان افزایش مدول ارتجاعی در اثر افزایش وزن مخصوص دانه‌یی سبک‌دانه‌های لیکا و لیاپور ایران را به‌صورت غیرخطی از طریق رابطه‌ی ۱۰ بیان کرد:

$$E_{(\mathrm{GPa})} = ۰٫۱۴۵۵\mathrm{EXP}(۰٫۰۰۳۷\rho_{(\mathrm{kg/m^3})}) \qquad (۱۰)$$

در شکل ۱۵، ارتباط بین مقاومت خردشدگی و مدول ارتجاعی نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور می‌توان افزایش مدول ارتجاعی در اثر افزایش مقاومت خردشدگی را به‌صورت خطی نمایش داد. با توجه به برازش انجام‌شده ارتباط بین مقاومت خردشدگی (F) و مدول ارتجاعی لیکا و لیاپور ایران را می‌توان از طریق



شکل ۱۴. ارتباط بین وزن مخصوص دانه‌یی و مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها.



شکل ۱۵. ارتباط بین مقاومت خردشدگی و مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها.

رابطه‌ی ۱۱ بیان کرد:

$$E_{(\mathrm{GPa})} = ۰٫۰۰۲۶F_{(\mathrm{kgf})} - ۱٫۹ \qquad (۱۱)$$

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ویژگی‌های ارتجاعی سبک‌دانه‌های شیل و رس منبسط‌شده مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا با استفاده از مدل همگن‌سازی موری - تاناکا، رابطه‌ی تعیین مشخصات اینکلوژن براساس مشخصات ارتجاعی ماده‌ی زمینه

و ماده‌ی مرکب به‌دست آمده و سپس با تعیین مشخصات ارتجاعی ماده‌ی زمینه‌ی ملات ماسه‌ی سیمان و ماده‌ی مرکب ساخته‌شده توسط آن‌ها، مشخصات ارتجاعی سبک‌دانه محاسبه شده است. طبق نتایج مدول ارتجاعی دانه‌های لیکای معمولی در محدوده‌ی ۰٫۵۵ - ۲٫۳۷ گیگاپاسکال و مدول ارتجاعی دانه‌های لیکای سازه‌یی در محدوده‌ی ۲٫۷۵ - ۶٫۳۹ گیگاپاسکال و مدول ارتجاعی دانه‌های لیاپور در محدوده‌ی ۸٫۶ - ۲۳٫۹ گیگاپاسکال قرار دارد. با توجه به مطالعات انجام‌شده مشاهده شده است که رابطه‌ی مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌های شیل و رس منبسط‌شده با وزن مخصوص آنها به‌صورت نمایی و رابطه‌ی مدول ارتجاعی با مقاومت خردشدگی آنها به صورت خطی است و با استفاده از رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان مدول ارتجاعی آنها را تخمین زد. همچنین متوسط ضریب پوآسون سبک‌دانه‌ی لیاپور، لیکای سازه‌یی و معمولی به ترتیب برابر ۰٫۲۴، ۰٫۲۸ و ۰٫۳۵ تخمین زده شده است.

مطابق نتایج، مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌هایی که در شرایط یکسان تولید شده‌اند، به‌صورت تقریباً خطی، نسبت به قطرکاهش پیدا می‌کند. به طوری که کلیه‌ی دانه‌های لیکای معمولی و سازه‌یی و همچنین دانه‌های لیاپور با قطر متوسط ۱۱٫۱ و ۷٫۹ میلی‌متر نقش ناهمگنی تضعیف‌کننده را در ماده‌ی زمینه‌ی انتخابی دارد و یا به‌عبارت دیگر، این دانه‌ها از ماده‌ی زمینه نرم‌تر هستند. در حالی که دانه‌های لیاپور با قطر متوسط ۴٫۹ میلی‌متر نقش ناهمگنی تقویت‌کننده را در ماده‌ی زمینه انتخابی دارد، به این معنی که این دانه‌ها از ماده‌ی زمینه سخت‌تر هستند.

یکی از نتایج مهم این پژوهش مناسب‌بودن سنگ‌دانه‌های شیل منبسط‌شده‌ی تولید ایران برای ساخت بتن سبک سازه‌یی است. به طوری که برخلاف سایر سبک‌دانه‌های مورد بررسی، سبک‌دانه‌های ریز شیل منبسط‌شده باعث افزایش مدول ارتجاعی یک ماتریس معمولی (ملات ماسه و سیمان) می‌شوند.

استفاده از نتایج این پژوهش در تعیین مشخصات ارتجاعی و مقاومت طرح اختلاط بتن سبک سازه‌یی بسیار مفید است. به این صورت که با تعیین خواص ارتجاعی سبک‌دانه‌ها و استفاده از روابط میکرومکانیکی می‌توان خواص ارتجاعی مواد مرکب ساخته‌شده از سبک‌دانه‌های مد نظر را تعیین کرد. برای این کار کافی است خواص ارتجاعی ماتریس به‌کاررفته در طرح اختلاط را تعیین و براساس نسبت حجمی سبک‌دانه‌ی مصرفی، خواص ارتجاعی بتن ساخته‌شده از ماتریس و سبک‌دانه را محاسبه کرد. با به‌دست‌آوردن خواص ارتجاعی بتن متشکل از سبک‌دانه و ماتریس مدنظر و استفاده از روابط تجربی موجود بین خواص ارتجاعی با مقاومت بتن (همچون روابط ACI)، می‌توان مقاومت بتن ساخته‌شده را نیز پیش‌بینی کرد. این روش مدل‌سازی ماده‌ی مرکب با استفاده از روش‌های میکرومکانیک، روشی کم هزینه و سریع است، که جایگزین بسیار مناسبی برای روش‌های قدیمی سعی و خطا و روش‌های آماری برای رسیدن به طرح اختلاط مناسب است.

پانوشت‌ها

1. Haydite
2. Central aggregate model
3. periodic field

منابع (References)

1. Chandra, S. and Berntsson, L., *Lightweight Aggregate Concrete, Sceince, Technology and Applications*, translated by Shekarchizadeh, M., Emdadi, A. and Libre, N., Noyes Publications, United States (2002).
2. Ding, P. and Yin, L. "Study on ceramsite", *Advanced Materials Research*, **374-377**, pp. 1278-1282 (2012).
3. Italy and Iran with the `Leca`, *Lightweight Expanded Clay Aggregate*, Trade Mark (viewed: 4 December 2012). http://Lecaworld.com/whatis.html.
4. Wisconsin Energy Corporation, *Coal Combustion Products Utilization Handbook*, Chapter 10: Minergy LWA – Structural, Masonry, and Geotechnical Lightweight Aggregates (2004).
5. European Union-Brite EuRam II, *Structural LWAC Specification and Guideline for Materials and Production*, Document BE 96-3942/R14 (2000).
6. Chen, H.J., Yen, T. and Chen, K.H. "Evaluating elastic modulus of lightweigt aggregate", *ACI Material Journal*, **100**(2), pp. 108-113 (2003).
7. FIP, Federation Internationale de la Precontrainte, *FIP Manual of Lightweight Aggregate Concrete*, 2nd Edition, Surrey University Press & Halsted Press (1983).
8. Nilsen, A.U., Monteiro, P.J.M. and Gjfrv, O.E. "Estimation of the elastic moduli of lightweight aggregate", *Cement and Concrete Research*, **25**(2), pp. 276-280 (1995).
9. Yang, C.C. "Approximate elastic moduli of lightweight aggregate", *Cement and Concrete Research*, **27**(7), pp. 1021-1030 (1997).
10. Chen, H.J. and Chan, H.C. "Numerical prediction on the elastic modulus of aggregate", *Structural Engineering, Mechanics and Computation*, **2**, Elsevier Science Ltd., pp. 1423-1430 (2001).
11. Muller-Rochholz, J. "Determination of the elastic properties of lightweight aggregate by ultrasonic pulse velocity measurement", *The International Journal of Lightweight Concrete*, **1**(2), pp. 87-90 (1979).
12. Ke, Y. and et al. "Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ)", *Cement and Concrete Research*, **40**(11), pp. 1590-1600 (2010).
13. Ardakani, A., and yazdani, M., "The relatino between particle density and moduli of Lightweight expanded clay aggregates", Applied clay Science, 93-94, pp.28-34 (in Persian) (2014).
14. Nemat-Nasser, S. and Hori, M., *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*, Amsterdam, New York, North-Holland (1993).

15. Torquato, S. "Effective stiffness tensor of composite media: II. Applications to isotropic dispersions", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **46**(8), pp. 1411-1440 (1998).

16. Bohm, H.J. "Continuum models for the thermomechanical behavior of discontinuously reinforced materials", *Advanced Engineering Materials,* **6**(8), pp. 626-633 (2004).

17. Ardakani, A., Yazdani, M., and Tizabi, S.Q. " Exprimental study on the effect of large pores on mechanical behaviour of rock masses and evaluation results by micromechanics method", *Iranian Journal of mining Engineering*, **7**(17), pp.73-82, (in Persian) (2013).

18. Voigt, W. "On the relationship between the two elastic contacts of an isotropic body", *Ann. Phys,* **38**, pp. 573-587 (1889).

19. Reuss, A. "Estimation of yield surface of polycrystals based on the plastic behaviour of single crystals", *Zeit. Ang. Math. Mech.*, **9**, pp. 44-58 (1929).

20. Eshelby, J.D. "The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems", *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **241**(1226), pp. 376-396 (1957).

21. Mura, T., *Micromechanics of Defects in Solids*, 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands (1987).

22. Mori, T. and Tanaka, K. "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions", *Acta Metall,* **21**(5), pp. 571-574 (1973).

23. Ardakani, A. "Determination elastic properties of artificial lightweight aggregates by composite theory, numerical method and laboratory investigation", Ph.D. Dissertation in Persian, Tarbiat Modares University (2012).

24. ASTM C29, *Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate*, American Society For Testing And Materials (ASTM) (1999).

25. EN 1097 3, *Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates – Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids*, European Committee for Standardization (1998).

26. EN 1097 6, *Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates – Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption*, European Committee for Standardization (2002).

27. EN13055-1, *Lightweight Aggregates –Part1: Lightweight Aggregates for Concrete, Mortar and Grout*, The European Standard (2002).