

# 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

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

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 به دلیل 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 استاندارد وجود ندارد، از ترکیب روش آزمایشگاهی با روش تئوری مواد مرکب، برای اولین بار خواص مکانیکی هر دو سبک‌دانه‌ی لیکا و لیاپور ساخت کشور به دست آمده و با سبک‌دانه‌های تولیدی سایر کشورها مقایسه شده است. در بخش آزمایشگاهی با ترکیب سبک‌دانه‌ها با ماتریس ماسه‌ی سیمان و ساخت نمونه‌های استوانه‌ی 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 - 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 دانه‌ی 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

پایه‌ی 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.<sup>[۱]</sup> بعد از آن در سال ۱۹۱۷، اولین سبک‌دانه‌ی شیل منبسط‌شونده با استفاده از کوره‌ی استوانه‌ی چرخان با عنوان هایدت<sup>۱</sup> 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 پیش‌تنبیده مورد قبول قرار گرفت.<sup>[۱]</sup>

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.<sup>[۱]</sup> در این میان کاربرد انواع بتن‌های سبک و به‌خصوص بتن سبک سازه‌ی جایگاه ویژه‌ی پیدا کرده است. با وجود این، اغلب پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه بر روی بتن‌های ساخته‌شده صورت گرفته است و شاید کمتر بتوان پژوهش‌های

\* نویسنده مسئول

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

مبانی میکرومکانیک به دست آمده و با سبک‌دانه‌های تولیدی سایر کشورها مقایسه شده است. برای این منظور، با انتخاب دو گروه چهارتایی لیکای معمولی و سازه‌ی یک و یک گروه سه‌تایی لیاپور به بررسی مشخصات ارتجاعی آنها پرداخته شده است.

## ۲. مدل ارتجاعی سبک‌دانه‌ها و مطالعات انجام شده

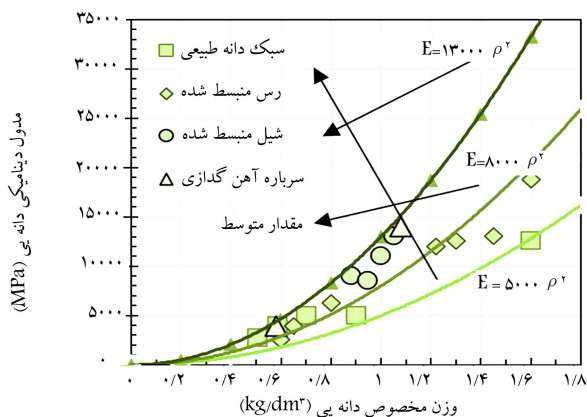
به‌طور کلی مدل ارتجاعی عبارت از نسبت تنش نرمال به کرنش مرتبط آن تحت بار فشاری است. خواص ارتجاعی دانه‌های سنگی عموماً به‌صورت تقریبی با توجه به جنس و یا از آزمایش بر روی سنگ مادر آنها یافت می‌شود. با توجه به نبود سنگ مادر و ماهیت سبک‌دانه‌های مصنوعی، تعیین مشخصات ارتجاعی آنها پیچیدگی‌های ویژه‌ی دارد و امکان تعیین آن توسط انجام آزمایش مستقیم وجود ندارد.<sup>[۶]</sup> با توجه به ارتباط بین مدل ارتجاعی استاتیکی و دینامیکی بتن، برخی از پژوهشگران از مدل دینامیکی برای بررسی مدل استاتیکی سبک‌دانه‌ها استفاده کرده‌اند.<sup>[۷]</sup> که دلیل اصلی‌اش این است که مدل ارتجاعی دینامیکی یک دانه را می‌توان توسط دستگاه ماوراء صوت اندازه‌گیری کرد. در شکل ۱، سه رابطه برای ارتباط بین وزن مخصوص دانه‌ی و مدل 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 اعمال شده بر روی سبک‌دانه‌ها در آزمایش‌های تعیین مدل دینامیکی، نتایج دقت لازم را ندارند.<sup>[۸]</sup> در پژوهش اخیر، مدل ارتجاعی سه نوع سبک‌دانه‌ی شیل منبسط‌شده و همچنین در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۷،<sup>[۹]</sup> مدل ارتجاعی سه نوع سبک‌دانه‌ی حاصل از سیمان و خاکستر بر مبنای تئوری مواد مرکب اندازه‌گیری و از مدل موری - تاناکا و کاستر - توکسوز ساده‌سازی شده برای تعیین مدل ارتجاعی استفاده و با فرض یک مقدار ضریب پواسون ثابت و کم‌تر بودن مدل ارتجاعی سبک‌دانه از ملات، به تعیین مدل ارتجاعی سبک‌دانه پرداخته شده است. برخی پژوهشگران نیز در پژوهش خود در سال ۲۰۰۱<sup>[۱۰]</sup> با استفاده از روش عددی، رابطه‌ی را برای تعیین مدل ارتجاعی دانه به‌دست آورده و در مدل‌سازی خود، دانه‌ی کروی را در مرکز استوانه‌ی ملات قرار داده و با روش اجزاء محدود به تعیین مدل ارتجاعی ماده‌ی مرکب پرداخته‌اند. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۳، بر مبنای مدل دانه‌ی مرکزی<sup>۱</sup> و حل عددی آن، به تعیین مدل ارتجاعی سبک‌دانه‌ها پرداخته شده،<sup>[۱]</sup> و رابطه‌ی ۱ برای محاسبه‌ی مدل ارتجاعی دانه ( $E_a$ ) براساس مدل ملات ( $E_m$ )، مدل بتن ( $E_c$ )، و نسبت

مجموعه‌ی از ویژگی‌های قابل توجه مانند وزن کم، هدایت حرارتی پایین، آفت صوت مناسب، مقاومت در برابر آتش، دوام و پایداری شیمیایی و نظایر آن سبب گسترش کاربردهای متنوع سبک‌دانه‌های مصنوعی در صنعت ساختمان، طرح‌های عمرانی، کشاورزی، محیط زیست، راه‌سازی، صنایع نفت، ریخته‌گری و... شده است. مهم‌ترین مزیت این مصالح مربوط به چگالی کم آنهاست. به‌طوری‌که از آنها می‌توان برای خاکریزهای سبک، مصالح پرکننده‌ی 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.<sup>[۳،۴]</sup> 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 آهک دار ابتدا به کمک آسیاب غلطکی و آب به‌صورت گِل در می‌آید و این گِل از درجه‌ی بالای کوره‌ی گردان وارد آن می‌شود و سپس از مجموعه‌ی زنجیرها (اکستردر) عبور می‌کند، به نحوی که به قطعات کوچک‌تر تبدیل می‌شود. این قطعات در هنگام عبور از کوره‌ی گردان در حالی که به مصالح شیشه‌ی تبدیل می‌شوند، به سبک‌دانه‌های با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف تبدیل می‌شوند.<sup>[۱]</sup> 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.<sup>[۱]</sup> در فرایند گندوله‌سازی با دستگاه پلوتایدر، پودر شیل به همراه ذرات آب ترکیب و دانه‌های کروی ایجاد می‌شوند، که با تغییر در سرعت و زاویه‌ی دستگاه پلوتایدر 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 توده‌ی خشک، در کشورهای اروپایی تقسیم‌بندی می‌شود و وزن مخصوص توده‌ی تقریبی آن به دنبال نام لیکا قرار می‌گیرد.<sup>[۵]</sup> با توجه به ثابت بودن منحنی دانه‌بندی مصالح، عموماً این تقسیم‌بندی دقیق نیست. با توجه به اینکه سبک‌دانه‌ی سنگین‌تر، مقاومت بیشتری دارند، قابلیت لیکای سنگین یا اصطلاحاً لیکای سازه‌ی و لیاپور در تولید بتن با مقاومت فشاری بالاتر بیشتر است. همچنین اغلب بتن‌های سبک سازه‌ی 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 سازه‌ی نیز تاکنون بیشتر بر پایه‌ی سنگ‌دانه‌های لیکا، که مشخصات ضعیف‌تری دارند و چندان مناسب بتن سبک سازه‌ی 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



شکل ۱. ارتباط بین مدل دینامیکی و وزن مخصوص سبک‌دانه‌ها.<sup>[۱۱]</sup>

در میکرومکانیک و تئوری مواد مرکب، تانسور سختی مؤثر ( $C_e$ ) در معادله‌ی رفتاری خطی مطابق رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شوند: [۱۲]

$$\langle \sigma \rangle = C_e \langle \varepsilon \rangle \quad (3)$$

که در آن،  $\sigma$  و  $\varepsilon$  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:

$$\langle \varepsilon \rangle_i = A \langle \varepsilon \rangle \quad (4)$$

و تانسور سختی مؤثر، به‌صورت رابطه‌ی ۵ تعیین می‌شود:

$$C_e = C_m + V_i(C_i - C_m)A \quad (5)$$

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 روثس، [۱۹] است، که در آن‌ها به ترتیب کرنش و تنش داخل ماده‌ی مرکب به‌صورت یکنواخت فرض می‌شود. در اواسط قرن بیستم، مدل اشلبی، [۲۰، ۲۱] 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 قرار گرفته 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]

$$A^{Eshelby} = [I + SC_m(C_i - C_m)]^{-1} \quad (6)$$

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

$$S_{ijkl} = S_{jikl} = S_{ijik} \quad (7)$$

مدل اشلبی، [۲۰] اندرکنش بین اینکلوژن‌ها را در نظر نمی‌گیرد و در نتیجه برای مواد مرکب با نسبت پایین اینکلوژن مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل موری - 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]

$$A^{MT} = A^{Eshelby}[(1 - V_i)I + V_i A^{Eshelby}]^{-1} \quad (8)$$

حجمی دانه ( $V$ ) پیشنهاد داده شده است:

$$E_a = 6_f 3 E_c - 5_f 1 E_m - 9_f 1 W.E_c + 8_f 7 W.E_m \quad (1)$$

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۰، [۱۲] بر مبنای مدل سه فاز و فرض ضریب پواسن، 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 سازه‌ی، براساس وزن مخصوص و قطر دانه پرداخته شد. در جدول ۱، خلاصه‌ی از مشخصات مطالعات گذشته در مورد تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها ارائه شده است.

### ۳. روش میکرومکانیک و فرمولاسیون

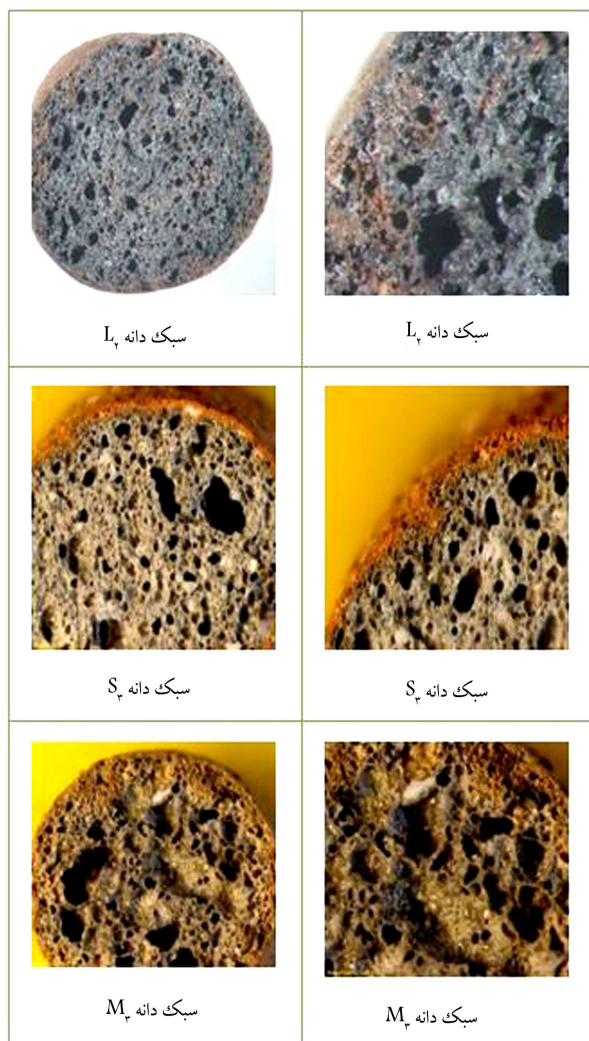
هدف میکرومکانیک تعیین ویژگی‌های ماکروسکوپی (یا مؤثر) مواد مرکب از طریق مدل‌هایی است که مشخصات ریزساختارهای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها را ترکیب می‌کند. دو راهکار ممکن است مورد استفاده قرار گیرد: راهکار اول، استفاده از شیوه‌های همگن‌سازی است. این شیوه‌ها برای یافتن معادلات همگن‌شده (متوسط‌گیری‌شده) به‌کار می‌روند، که در آن‌ها از امان 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. [۱۵، ۱۲]

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 زمینه‌ی تاثیر حفرت 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 فاز، 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:

$$V_i = 1 - V_m \quad (2)$$

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

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



در نتیجه با توجه به رابطه‌ی ۵، سختی اینکلوژن را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۹ بیان کرد:

$$C_i = C_m + \nu/V_i(\bar{C} - C_m) : A^{-1} \quad (9)$$

مطابق رابطه‌ی ۹، در صورت داشتن ضریب تمرکز کرنش  $A$ ، می‌توان مشخصات اینکلوژن را به راحتی تعیین کرد. اما ضریب تمرکز کرنش  $A$ ، 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 جایگزین کردن مؤلفه‌های تانسورهای اشلپی و تانسور سختی بر حسب مدول ارتجاعی ( $E$ ) و ضریب پواسون ( $\nu$ )، میزان مدول ارتجاعی و ضریب پواسون اینکلوژن برای مدل موری - 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 ال‌کردن 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.

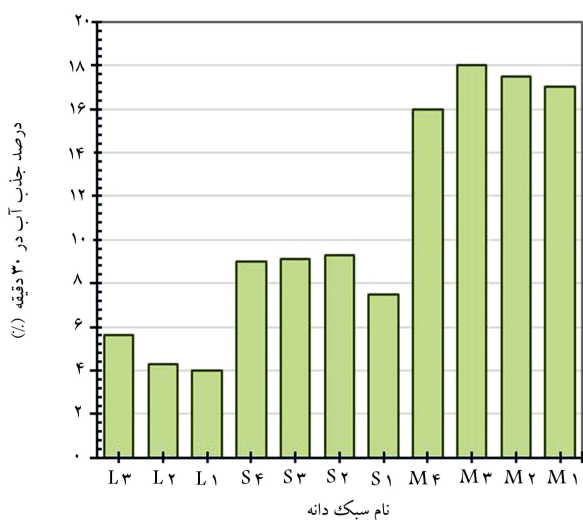
در شکل ۲، ریز ساختار سبک‌دانه‌ها نشان داده شده است، که با توجه به آن تخلخل دانه‌های لیاپور و لیکای سازه‌یی به مراتب کمتر از دانه‌های لیکای معمولی است.

برای شناخت خصوصیات فیزیکی هر گروه از سبک‌دانه‌ها طبق استانداردهای

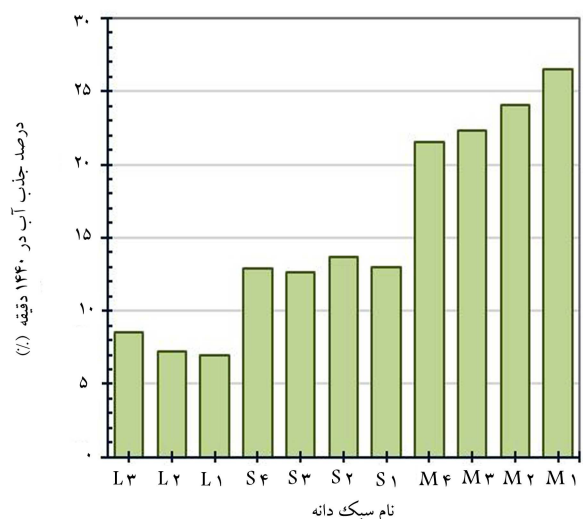
شکل ۲. ریزساختار سبک‌دانه‌ها.

جدول ۲. نام‌گذاری نمونه‌های مورد استفاده.

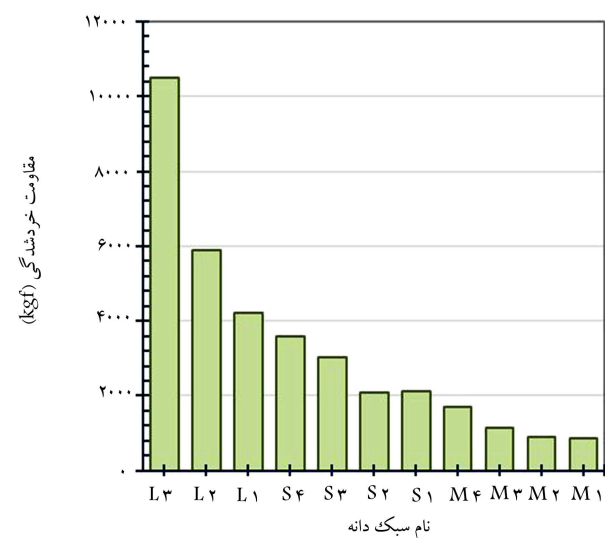
نام نمونه	نوع	اندازه (mm)
$L_3$	لیاپور	۳,۴
		۴,۸
		۶,۴
$L_2$	لیاپور	۷,۹
		۱۱,۱
$L_1$	لیاپور	۱۱,۱
$S_4$	لیکای سازه‌یی	۴,۱
		۷,۲
		۹,۶
		۱۴,۳
$M_4$	لیکای معمولی	۴,۱
		۷,۲
		۹,۶
		۱۴,۳



شکل ۵. درصد جذب آب ۳۰ دقیقه‌یی سبک دانه‌ها.



شکل ۶. درصد جذب آب ۱۴۴۰ دقیقه‌یی سبک دانه‌ها.



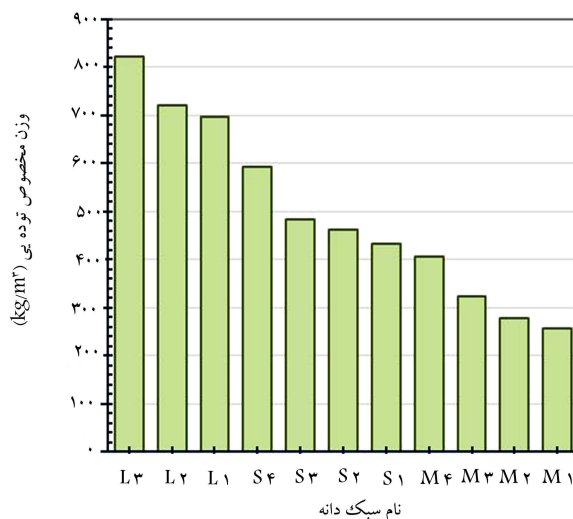
شکل ۷. مقاومت خردشدگی سبک دانه‌ها.

ASTM C ۲۹ [۲۲]، 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.

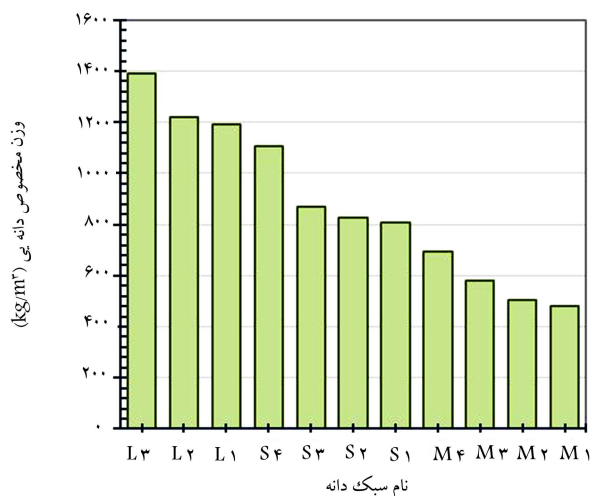
همچنین برای تخمینی از تخلخل داخلی سبک دانه‌ها، طبق استاندارد EN ۱۰۹۷-۳ [۲۵] درصد جذب آب ۳۰ دقیقه و یک روزه‌ی آنها تعیین شده است، که در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

روند تغییرات شکل‌های ۳ تا ۶ با توجه به تفاوت در تخلخل و ضخامت پوسته‌ی خارجی سبک دانه‌ها 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.

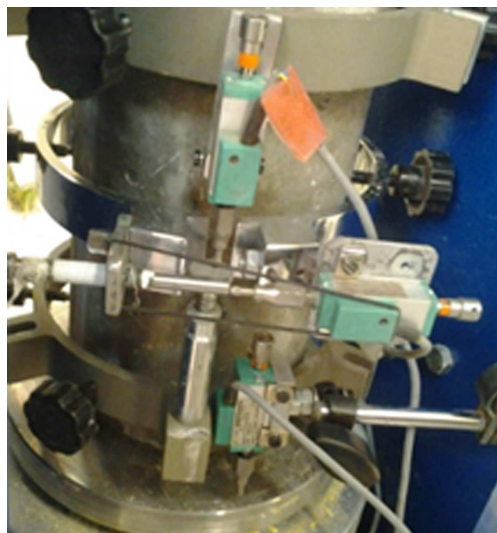
آزمایش مقاومت خردشدگی، به صورت غیرمستقیم معیاری در برابر مقاومت دانه‌ها و خردشدگی آنها در اثر اعمال بار است. این آزمایش براساس استاندارد EN ۱۳۰۵۵-۱ [۲۷] بر روی سبک دانه‌ها انجام و نتایج آن در شکل ۷ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه وزن مخصوص سبک دانه‌های این پژوهش بیشتر از ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است،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



شکل ۳. وزن مخصوص توده‌یی سبک دانه‌ها.



شکل ۴. وزن مخصوص دانه‌یی سبک دانه‌ها.

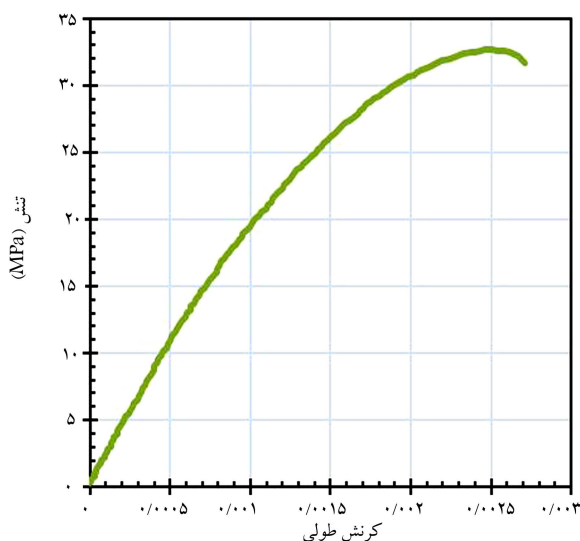


#### ۲.۱.۴. ماده‌ی زمینه

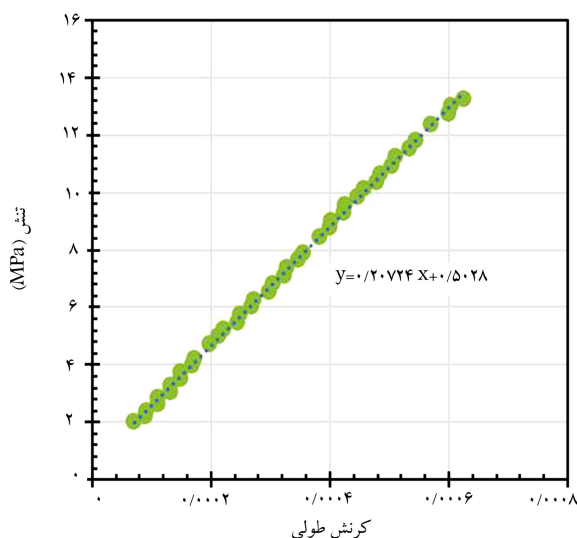
از دو ملات ماسه و سیمانی، با طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۳ به عنوان ماده‌ی زمینه استفاده شده است. سیمان مصرفی، سیمان پرتلند نوع ۲ و ماسه‌ی مورد استفاده از نوع شکسته و گذرانده شده از الک ۳/۳۶ میلی‌متر است. همچنین از روان‌کننده برای روانی بیشتر استفاده شده است. در ماده‌ی زمینه‌ی نوع ۱ از فوق روان‌کننده‌ی پایه‌ی نفتالینی و در ماده‌ی زمینه‌ی 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.

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



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



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

#### ۲.۲. 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. به منظور 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 ساخته شده پس از ۲۴ ساعت از قالب باز و تا سن ۲۸ روزه‌گی 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 قرانت داده (دیتالاگر) استفاده شده است. براساس استاندارد ASTM C-۴۶۹، بهترین شیب خط گذرنده از منحنی تنش - کرنش طولی در حد فاصل کرنش  $5 \times 10^{-6}$  تا کرنش متناظر با ۴۰٪ بار نهایی به عنوان مدول ارتجاعی و بهترین شیب خط گذرنده از منحنی کرنش عرضی - کرنش طولی در حد فاصل کرنش  $5 \times 10^{-6}$  تا کرنش متناظر با ۴۰٪ بار نهایی به عنوان ضریب پواسون منظور شده است.

شکل ۹، نمونه‌یی از منحنی تنش - کرنش نمونه‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۱۰، نمونه‌یی از محاسبه‌ی مدول ارتجاعی و شکل ۱۱، نمونه‌یی از محاسبه‌ی ضریب پواسون 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 I) بیشتر از نمونه‌های حاوی سبک‌دانه‌ی لیکای (سری S) و مدول ارتجاعی نمونه‌های حاوی سبک‌دانه‌ی لیکای سازه‌یی

جدول ۳. طرح اختلاط ماده‌ی زمینه‌های انتخابی ( $\text{kg/m}^3$ ).

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



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

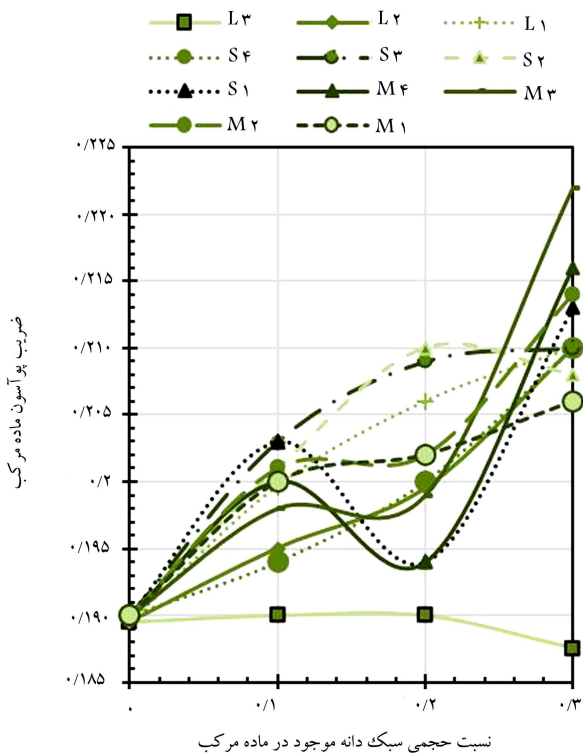
### ۵. تعیین مشخصات ارتجاعی سبک‌دانه‌ها

برای تعیین مشخصات ارتجاعی هر گروه از سبک‌دانه‌ها، کافی است مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها در روابط کلی به‌دست‌آمده از مدل موری - تاناکا،  $^{[1]}$  جایگذاری شود. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، مدول ارتجاعی ماده‌ی زمینه‌ی نوع ۱ برابر  $20/3$  گیگاپاسکال و ضریب پواسون آن  $0/193$  و مدول ارتجاعی ماده‌ی زمینه‌ی نوع ۲ برابر  $20/5$  گیگاپاسکال و ضریب پواسون آن  $0/19$  در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصات ارتجاعی نمونه‌های مرکب مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳ استفاده شده است.

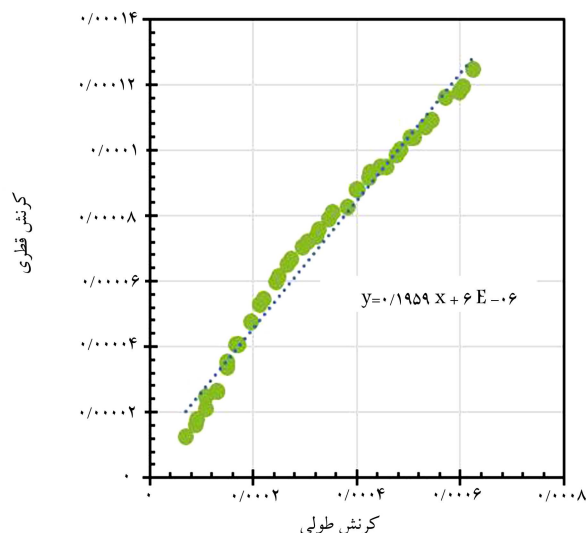
در جدول‌های ۴ و ۵، ترتیب مدول ارتجاعی و ضریب پواسون به‌دست‌آمده‌ی سبک‌دانه‌ها ارائه شده است.

مطابق جدول ۴، مدول ارتجاعی دانه‌های سری  $M$  در محدوده‌ی  $0/55$  الی  $2/37$  گیگاپاسکال و مدول ارتجاعی دانه‌های سری  $S$  در محدوده‌ی  $2/75$  الی  $6/39$  گیگاپاسکال و مدول ارتجاعی دانه‌های سری  $L$  در محدوده‌ی  $8/6$  الی  $23/9$  گیگاپاسکال قرار دارد.

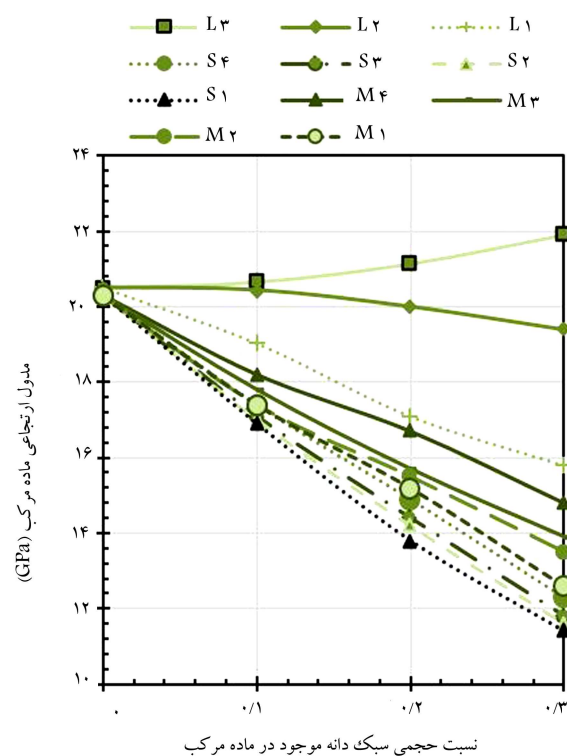
مطابق جدول ۵، متوسط ضریب پواسون به‌دست‌آمده دانه‌های سری  $M$ ،  $S$  و  $L$  به ترتیب برابر  $0/35$ ،  $0/28$  و  $0/24$  تعیین شده است. در شکل ۱۴، ارتباط بین وزن مخصوص دانه‌ی و مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها



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



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

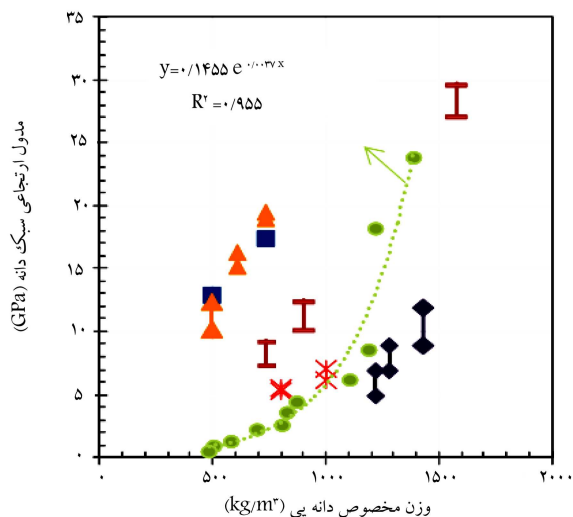


شکل ۱۲. متوسط مدول ارتجاعی نمونه‌ها نسبت به حجم سبک‌دانه.

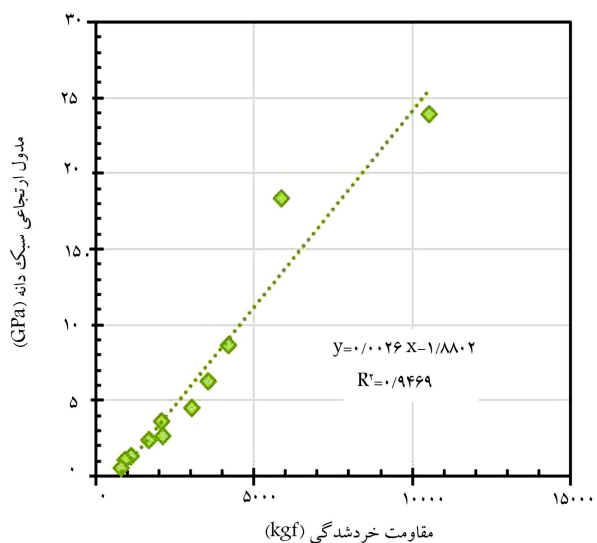
بیشتر از نمونه‌های حاوی سبک‌دانه‌های لیکای معمولی (سری  $M$ ) است. مطابق شکل ۱۲ با افزایش قطر سبک‌دانه، مدول ارتجاعی نمونه‌های مرکب ساخته‌شده توسط آن کاهش یافته است. این نتیجه با توجه به تفاوت وزن مخصوص میان‌دانه‌ها منطقی است. همچنین به جز در دانه‌های  $L_3$  که با افزایش حجم سبک‌دانه، مدول ارتجاعی نمونه‌های 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 پواسون ماده‌ی مرکب نسبت به حجم ماده‌ی

- مولر - رچولز (۱۹۷۹) - شیل منبسط شده
- ▲ نیلسن و همکاران (۱۹۹۵) - شیل منبسط شده
- ◆ یانگ (۱۹۹۷) - سیمان و خاکستر منبسط شده
- ✱ چن و همکاران (۲۰۰۳) - شیل منبسط شده
- کی و همکاران (۲۰۱۰) - رس و شیل منبسط شده
- در این تحقیق - لیکا و لیاپور ایران



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



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

رابطه‌ی ۱۱ بیان کرد:

$$E_{(GPa)} = 0.0026F_{(kgf)} - 1/9 \quad (11)$$

## 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

جدول ۴. مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها.

نام سبک‌دانه	مدول ارتجاعی حاصل از آزمایش روی نمونه‌ها (GPa)			میانگین (GPa)
	حاوی ۱۰٪ سبک‌دانه	حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه	حاوی ۳۰٪ سبک‌دانه	
M <sub>۴</sub>	۲,۵۶	۲,۶۰	۱,۹۵	۲,۳۷
M <sub>۳</sub>	۱,۴۷	۱,۵۵	۱,۱۶	۱,۳۹
M <sub>۲</sub>	۱,۱۲	۱,۱۵	۰,۸۵	۱,۰۴
M <sub>۱</sub>	۰,۷۷	۰,۲۳	۰,۵۴	۰,۵۵
S <sub>۴</sub>	۵,۹۰	۶,۹۶	۶,۳۲	۶,۳۹
S <sub>۳</sub>	۴,۱۴	۴,۴۱	۴,۶۵	۴,۴۰
S <sub>۲</sub>	۲,۵۶	۳,۹۴	۳,۹۴	۳,۴۸
S <sub>۱</sub>	۲,۵۶	۳,۲۶	۲,۴۳	۲,۷۵
L <sub>۳</sub>	۲۲,۱۷	۲۳,۷۷	۲۵,۸۵	۲۳,۹
L <sub>۲</sub>	۱۹,۵۷	۱۸,۲۰	۱۷,۱۰	۱۸,۲
L <sub>۱</sub>	۹,۳۷	۸,۰۷	۸,۴۷	۸,۶

جدول ۵. ضریب پواسون حاصل از آزمایش روی نمونه‌ها.

نام سبک‌دانه	ضریب پواسون حاصل از آزمایش روی نمونه‌ها			میانگین
	حاوی ۱۰٪ سبک‌دانه	حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه	حاوی ۳۰٪ سبک‌دانه	
M <sub>۴</sub>	۰,۳۰	۰,۲۹	۰,۳۰	۰,۳۰
M <sub>۳</sub>	۰,۳۳	۰,۳۲	۰,۳۳	۰,۳۳
M <sub>۲</sub>	۰,۳۵	۰,۳۴	۰,۳۶	۰,۳۵
M <sub>۱</sub>	۰,۳۸	۰,۴۳	۰,۳۸	۰,۴۰
S <sub>۴</sub>	۰,۲۶	۰,۲۶	۰,۲۶	۰,۲۶
S <sub>۳</sub>	۰,۲۸	۰,۲۷	۰,۲۷	۰,۲۷
S <sub>۲</sub>	۰,۳۰	۰,۲۷	۰,۲۷	۰,۲۸
S <sub>۱</sub>	۰,۳۰	۰,۲۸	۰,۳۰	۰,۲۹
L <sub>۳</sub>	۰,۱۹	۰,۱۹	۰,۱۸	۰,۱۹
L <sub>۲</sub>	۰,۲۴	۰,۲۴	۰,۲۵	۰,۲۴
L <sub>۱</sub>	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، 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 دانه‌ی سبک‌دانه‌های لیکا و لیاپور ایران را به صورت غیرخطی از طریق رابطه‌ی ۱۰ بیان کرد:

$$E_{(GPa)} = 0.1455 \text{EXP}(0.0037 \rho_{(kg/m^3)}) \quad (10)$$

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 به صورت خطی نمایش داد. با توجه به برازش انجام‌شده ارتباط بین مقاومت خردشدگی ( $F$ ) و مدول ارتجاعی لیکا و لیاپور ایران را می‌توان از طریق



به این معنی که این دانه‌ها از ماده‌ی زمینه سخت‌تر هستند.

یکی از نتایج مهم این پژوهش مناسب بودن سنگ‌دانه‌های شیل منبسط‌شده‌ی تولید ایران برای ساخت بتن سبک سازه‌ی 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 سازه‌ی 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 مدنظر 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.

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 سازه‌ی 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 پواسون سبک‌دانه‌ی لیاپور، لیکای سازه‌ی 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 قطر کاهش پیدا می‌کند. به طوری که کلیه‌ی دانه‌های لیکای معمولی و سازه‌ی و همچنین دانه‌های لیاپور با قطر متوسط ۱۱/۱ و ۷/۹ میلی‌متر نقش ناهمگنی تضعیف‌کننده را در ماده‌ی زمینه‌ی انتخابی دارد و یا به عبارت 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،

## پانویس‌ها

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

## منابع (References)

1. Chandra, S. and Berntsson, L., *Lightweight Aggregate Concrete, Science, 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 lightweight 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. "Experimental 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).