

تحقیقات بتن  
سال ششم، شماره دوم  
پاییز و زمستان ۹۲  
ص ۳۹-۴۶  
تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۵  
تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۲

## بررسی مشخصات مکانیکی سبک‌دانه‌های مصنوعی لیاپور با اندازه قطر مختلف و بتن سبک سازه‌ای ساخته شده از این مصالح

مصطفی باغی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

محمود یزدانی\*

استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

### چکیده

در سال‌های اخیر، بتن سبک سازه‌ای به دلیل ویژگی‌هایی مانند وزن کم، عایق حرارتی و صوتی مناسب و مقاومت مناسب در برابر سرما و گرما مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در حال حاضر دانه‌های لیاپور یا شیل انبساط‌پذیر که به روش فرآیند خشک در داخل کوره‌گردان افقی تولید می‌شود، یکی از مهم‌ترین نوع سبک‌دانه‌های مصنوعی است که کاربرد گسترده‌ای در تولید بتن سبک سازه‌ای دارد.

در این تحقیق به منظور تعیین اثر اندازه قطر بر وزن مخصوص، درصد جذب آب و مشخصات مکانیکی سبک‌دانه‌های لیاپور، آزمایش‌های مختلف بر روی سه رده از دانه‌بندی لیاپور انجام شده است. همچنین با ترکیب سبک‌دانه‌ها و ملات ماسه و سیمان و ساخت نمونه‌های با درصد حجمی ۱۰ الی ۳۰ درصد از سبک‌دانه‌ها و تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول ارتجاعی استاتیکی و دینامیکی و ضریب پواسون دینامیکی به بررسی مشخصات مکانیکی ماده مرکب ساخته شده از آنها پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها بیانگر تأثیر قابل توجه اندازه قطر سبک‌دانه‌های لیاپور بر مشخصات مکانیکی دانه‌ها و بتن ساخته شده از آنها می‌باشد. با توجه به تصاویر SEM تهیه شده از ناحیه تماس بین سبک‌دانه و ملات، مشخص شد که ناحیه انتقال کمتر از ۱۰ میکرومتر می‌باشد و در نتیجه نمی‌تواند تأثیر چندانی بر خصوصیات مکانیکی سبک‌دانه‌ها داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: مشخصات مکانیکی، لیاپور، بتن سبک سازه‌ای، سبک‌دانه‌های مصنوعی.

---

\* نویسنده مسئول: mahyaz@gmail.com

## ۱- مقدمه

در این تحقیق به منظور تعیین اثر اندازه قطر بر وزن مخصوص، درصد جذب آب و مشخصات مکانیکی سبک‌دانه‌های لیاپور، سه رده از دانه‌بندی لیاپور تهیه و با انجام آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های سبک‌دانه و بتن‌های ساخته شده از آنها که شامل نسبت‌های حجمی ۱۰ الی ۳۰ درصد از سبک‌دانه هستند، ویژگی‌های سبک‌دانه‌ها و بتن‌های ساخته شده از آنها مقایسه شد.

## ۲- تحقیقات گذشته

تا به حال تحقیقات بسیاری در مورد بررسی اثر استفاده از سبک‌دانه‌های مختلف در ساخت بتن سبک صورت گرفته است. در این تحقیقات از سبک‌دانه‌های با دانه‌بندی مشخص به‌عنوان مصالح استفاده شده است و تفکیکی از نظر تأثیر قطر بر ویژگی ماده مرکب ساخته شده، صورت نگرفته است.

در تحقیقات داخل کشور از آنجایی که خط تولید سبک‌دانه لیاپور به تازگی درون کشور راه‌اندازی شده است، به‌طور عمده تحقیقات گذشته بر روی سبک‌دانه لیکا و سبک‌دانه‌های طبیعی انجام شده است و تا کنون تحقیقی بر روی خواص لیاپور صورت نگرفته است.

برخی از تحقیقات انجام گرفته بر روی سبک‌دانه لیکا و سبک‌دانه‌های طبیعی به شرح زیر است:

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 [۵].

اردکانی و یزدانی (۱۳۹۰) به مقایسه مشخصات دانه‌های رس منبسط شده با وزن مخصوص و قطرهای مختلف پرداختند [۶].

رحمانی و یزدانی (۱۳۹۰) به کاربرد روش تاگوچی در تعیین طرح اختلاط بهینه بتن سبک‌دانه ساخته شده با سبک‌دانه‌های اسکوریا پرداختند [۷].

شکرچی‌زاده و همکاران (۱۳۸۷)، به بررسی طرح اختلاط بتن بهینه با استفاده از لیکا پرداختند [۸].

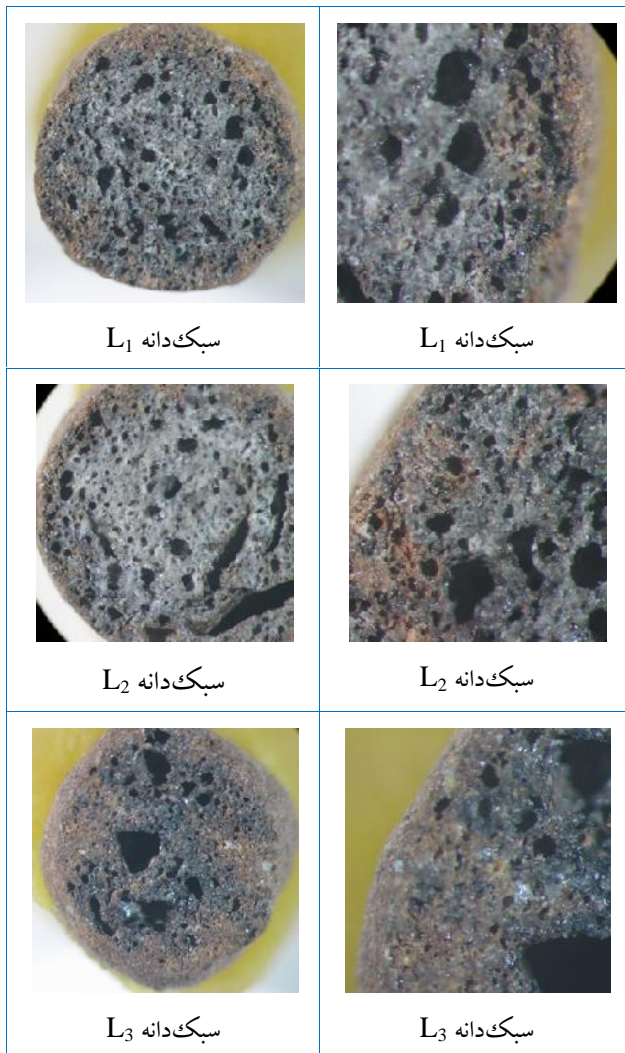
حسین افشین و علی اکبر بابا لو (۱۳۸۵)، به یافتن طرح اختلاط بهینه بتن‌های سبک‌دانه ساخته‌ای با روش تاگوچی پرداختند [۹].

مهمترین مزیت سبک‌دانه‌ها مربوط به وزن مخصوص کم این مصالح است. بطوری که از آنها می‌توان برای ساخت بتن سبک، قطعات پیش ساخته و غیره استفاده نمود که با توجه به وزن کم آن‌ها، باعث کاهش بار مرده، نیروهای جانبی، نشست و تغییر مکان در سازه‌ها می‌شود. این ویژگی‌ها سبب گسترش استفاده از بتن سبک‌دانه در ساختمان‌های بلند، پل‌های با دهانه بلند، پلت فرم‌های دریایی و عایق‌سازی حرارتی و صدا در ساختمان‌ها شده است [۲،۱].

سبک‌دانه را می‌توان به دو نوع طبیعی و مصنوعی تقسیم کرد. از سبک‌دانه‌های طبیعی می‌توان به پومیس، اسکوریا و دیاتومه اشاره کرد. پومیس و اسکوریا منشأ آذرین و آتشفشانی دارند و دیاتومه از بقایای پوسته آهکی جانوران دریایی تشکیل شده است. سبک‌دانه‌های مصنوعی از رس، شیل، سنگ لوح، پرلیت، ورمیکولیت، خاکستر سوخت پودر شده، روباره کوره آهنگدازی، شیشه، ذرات چوب و پلاستیک ساخته می‌شوند [۳].

در کشور ما تولید سبک‌دانه‌های مصنوعی لیکای سازه‌ای و لیاپور سبب شده چشم‌انداز روشنی برای صنعت بتن سبک سازه‌ای کشور ترسیم شود. لیکا، از رس انبساط‌پذیر به روش فرآیند تر در داخل کوره گردان افقی و لیاپور، از شیل انبساط‌پذیر به روش فرآیند خشک در داخل کوره گردان افقی تولید می‌شود. در فرآیند خشک که برای تولید لیاپور استفاده می‌شود سنگ شیل ابتدا با کمک آسیاب به صورت پودر بسیار نرم در می‌آید و این پودر به صورت همگن است و برای فرآیند گندوله‌سازی انبار می‌شود [۴]. در فرآیند گندوله‌سازی با دستگاه پلوتایدر پودر شیل به همراه ذرات آب ترکیب و دانه‌های کروی ایجاد می‌شود که با تغییر در سرعت و زاویه دستگاه پلوتایدر می‌توان دانه‌های با ابعاد متفاوتی تولید کرد. در مرحله آخر، دانه‌های تولید شده در کوره گردان پخته می‌شوند که دانه‌های بیرون آمده از کوره غالباً یک شکل‌اند (این فرآیند تولید به روش آلمانی نیز معروف است).

با توجه به اینکه هرچه سبک‌دانه سنگین‌تر باشد دارای مقاومت بیشتری می‌باشد، قابلیت لیاپور در تولید بتن با مقاومت فشاری بالاتر بیشتر است.



شکل ۱- ریز ساختار سبک‌دانه‌های لیاپور

در این طرح سیمان مصرفی، سیمان پرتلند نوع ۲ و ماسه مورد استفاده از نوع شکسته دو بار شو و با مدول نرمی ۲/۵ بوده که در شکل ۲ نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده نشان داده شده است. همچنین از ابر روان کننده بر پایه کربوکسیلاتی برای روانی بیشتر استفاده شده است.

جدول ۱- طرح اختلاط ماتریس‌های انتخابی ( $\text{kg/m}^3$ )

ابر روان کننده	آب	سیمان	ماسه
3.1	257	545	1479

تدین (۱۳۸۱)، به بررسی مشخصات بتن سبک پر مقاومت با مصالح موجود در ایران پرداخت [۱۰].

### ۳- برنامه آزمایشگاهی و مصالح مصرفی

با توجه به هدف تحقیق، بر روی سبک‌دانه‌های انتخاب شده آزمایش‌های وزن مخصوص توده‌ای و دانه‌ای، درصد جذب آب، مقاومت در برابر ضربه و مقاومت در برابر خردشدگی براساس استانداردهای مختلف انجام شد. همچنین با ترکیب ماتریس ماسه سیمانی و سبک‌دانه، ماده مرکب دو فازی ساخته شده و با اندازه‌گیری مقاومت فشاری، مدول ارتجاعی استاتیکی و دینامیکی و ضریب پواسون دینامیکی مواد مرکب، به بررسی مقاومت و مدول آنها در قالب ماده مرکب بتنی پرداخته شد. همچنین برای تخمین ضخامت ناحیه انتقال بین سبک‌دانه و ملات، با تهیه مقاطع نازک از نواحی مورد بررسی، تصویر SEM گرفته شد.

با توجه به هدف تحقیق مصالح مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از:

سبک‌دانه: سبک‌دانه لیاپور از شرکت عمران پارس سیرجان کرمان تهیه شد و با توجه به اینکه هدف تحقیق تعیین اثر اندازه قطر بر مشخصات مکانیکی سبک‌دانه‌ها و بتن ساخته شده از آنها بود، سه رده از دانه‌بندی لیاپور با مشخصات زیر تهیه شد.

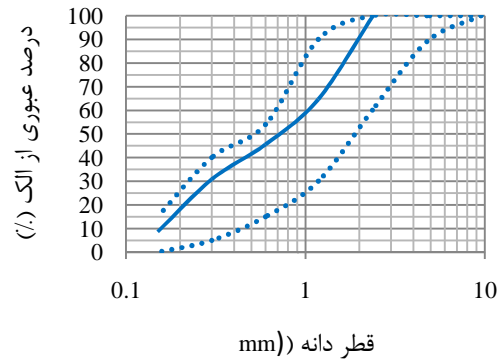
- دانه‌های  $L_1$ ، مانده بین الک "۰/۵" (۱۲/۷ میلی‌متر) و "۰/۳۷۵" (۹/۵۲ میلی‌متر) با قطر متوسط ۱۱/۱ میلی‌متر.

- دانه‌های  $L_2$ ، مانده بین الک "۰/۳۷۵" (۹/۵۲ میلی‌متر) و "۰/۲۵" (۶/۳۵ میلی‌متر) با قطر متوسط ۷/۹ میلی‌متر.

- دانه‌های  $L_3$ ، مانده بین الک "۰/۲۵" (۶/۳۵ میلی‌متر) و #۶ (۳/۳۵ میلی‌متر) با قطر متوسط ۴/۹ میلی‌متر.

در شکل ۱ نمایی از ریز ساختار سبک‌دانه‌های لیاپور نشان داده شده است. با توجه به شکل تخلخل در دانه‌های ریز کمتر از دانه‌های متوسط و در دانه‌های متوسط کمتر از دانه‌های درشت است و همچنین دانه‌های ریز به مراتب دارای پوسته خارجی ضخیم تری نسبت به دانه‌های متوسط و درشت هستند. ماتریس: از ملات ماسه و سیمانی، با طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۱ به‌عنوان ماتریس استفاده شده است.

ASTM C330,331 [۱۴] سنگدانه‌های ریزدانه با وزن مخصوص غیرمتراکم  $1120 \text{ Kg/m}^3$  یا کمتر و سنگدانه‌های درشت‌دانه با وزن مخصوص غیرمتراکم  $80 \text{ Kg/m}^3$  یا کمتر را سبکدانه می‌داند. همچنین وزن مخصوص مخلوط درشت‌دانه و ریزدانه را به  $1040 \text{ Kg/m}^3$  محدود کرده است. فاصله قابل قبول وزن مخصوص توده‌ای لیاپور با حداکثر وزن مخصوص استاندارد، حاکی از مناسب بودن این سنگدانه از نظر سبکی می‌باشد. همچنین مطابق نتایج با افزایش قطر، وزن مخصوص دانه‌ها کاهش می‌یابد و ضریب تبدیل وزن مخصوص توده‌ای به دانه‌ای به طور متوسط  $1/7$  به دست آمده است.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده

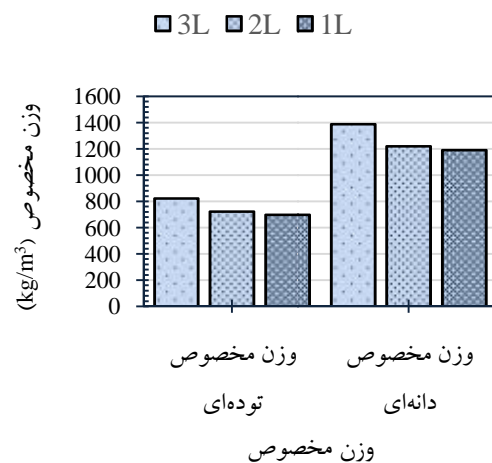
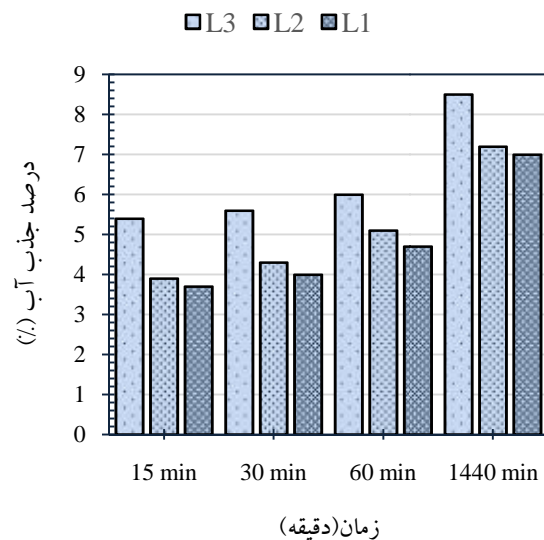
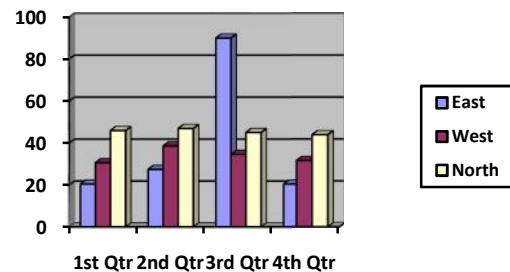
#### ۴- انجام آزمایش‌ها و بررسی نتایج

##### ۴-۱- وزن مخصوص سبک‌دانه‌ها

آزمایش وزن مخصوص توده‌ای و دانه‌ای براساس استاندارد ASTM C29 [۱۱] و EN 10976-8-c [۱۲] برای سه نوع دانه‌بندی لیاپور انجام شد که نتایج آن در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد. با توجه به اینکه امکان خرد شدن سبک‌دانه‌ها در اثر تراکم شدن آنها توسط کوبه وجود دارد، وزن مخصوص میله خورده آن‌ها اندازه‌گیری نشده است.

##### ۴-۲- درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها

برای تعیین درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها در بازه‌های زمانی مشخص، آنها را در زمان معین درون آب قرار داده و براساس استاندارد EN 1097-6-C [۱۵] درصد رطوبت جذبی آنها محاسبه شد. در شکل ۴ درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها در بازه‌های زمانی مشخص نشان داده شده است.



شکل ۴- درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها

شکل ۳- وزن مخصوص توده‌ای و دانه‌ای سبک‌دانه‌ها

### ۳-۴- مقاومت خردشدگی سبک‌دانه‌ها<sup>۱</sup>

این آزمایش به صورت غیرمستقیم معیاری برای نشان دادن مقاومت دانه‌ها و خردشدگی آن‌ها در اثر اعمال بار می‌باشد.

این آزمایش برطبق استاندارد EN 13055-1 [۱۵] انجام شده است و با توجه به بیشتر از  $150 \text{ Kg/m}^3$  بودن وزن مخصوص سبک‌دانه‌های لیاپور، از روش اول استاندارد مذکور استفاده شده است.

نتایج این آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. که مطابق آن با افزایش قطر مقاومت خردشدگی دانه‌ها کاهش می‌یابد و دانه‌های با قطر متوسط  $4/9$  میلی‌متر مقاومت خردشدگی به مراتب بیشتری نسبت به دو رده دانه‌بندی دیگر دارد.

### ۴-۴- ارزش ضربه‌ای سبک‌دانه‌ها<sup>۲</sup>

این آزمایش طبق استاندارد BS 812 - Part 112 [۱۶] بر روی سبک‌دانه‌های تک‌اندازه انجام می‌شود. در این آزمایش، ۱۵ مرتبه وزنه  $13/5$  کیلوگرمی از ارتفاع  $380$  میلی‌متری بر روی سنگدانه‌های متراکم شده در استوانه مخصوص، سقوط می‌کند و مقدار درصد عبوری از الک جداکننده گزارش می‌شود. با توجه به مقاومت کمتر سبک‌دانه‌ها نسبت به سنگدانه‌های معمولی، این آزمایش در حالت ۵ ضربه نیز تکرار شد.

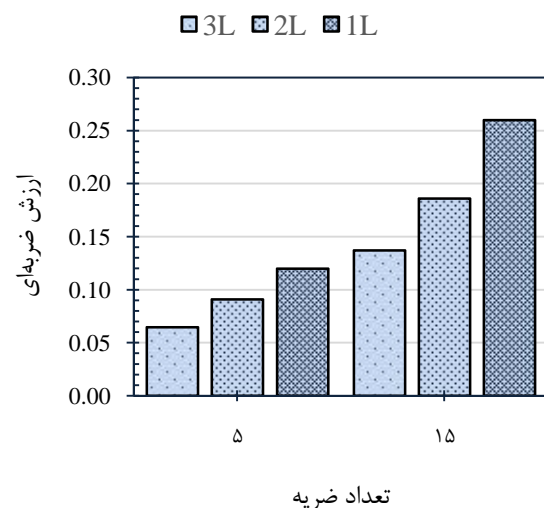
نتایج این آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ با افزایش قطر، ارزش ضربه‌ای دانه‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به این روند به نظر می‌رسد این آزمایش بیشتر متأثر از دانه‌بندی دانه‌ها می‌باشد.

### ۴-۵- ارزش خردشوندگی<sup>۳</sup> و ارزش ده درصد ریز تر سبک‌دانه‌ها<sup>۴</sup>

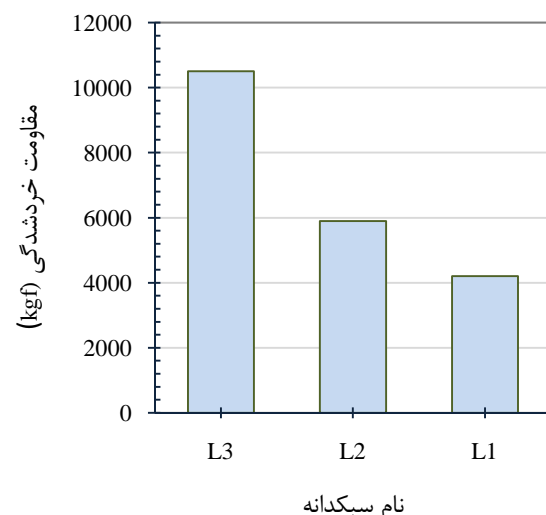
آزمایش ارزش خردشوندگی طبق استاندارد BS 812 - Part 110 [۱۶] انجام می‌شود. در این آزمایش برای دانه‌های  $3/35$  الی  $10$  میلی‌متری از استوانه‌ای به قطر حدود  $75$  میلی‌متر و بار  $100 \text{ KN}$  استفاده می‌شود.

طبق استاندارد، سنگدانه‌ها باید به صورت تک‌اندازه در آیند و بر روی نمونه‌ها، بار مورد نظر اعمال گردد و سپس از الک جداکننده استاندارد عبور داده و درصد عبوری به‌عنوان نتیجه آزمایش اعلام شود.

نتیجه آزمایش عدد خرد شدن سبک‌دانه‌ها به واسطه نفوذ زیاد پیستون و درصد عبوری خیلی زیاد از الک جداکننده معتبر نمی‌باشد. در نتیجه مطابق استاندارد این آزمایش مناسب نمی‌باشد و به جای آن از آزمایش ارزش ده درصد ریز تر استفاده می‌شود.



شکل ۶- ارزش ضربه‌ای سبک‌دانه‌ها



شکل ۵- مقاومت خردشدگی سبک‌دانه‌ها

<sup>3</sup> Crushing value

<sup>4</sup> Ten percent fines value

تحقیقات بتن، سال ششم، شماره دوم / ۳۹

<sup>1</sup> Crushing resistance

<sup>2</sup> Impact Value

#### ۴-۶- ساخت و تعیین مقاومت و مدول ارتجاعی

##### نمونه‌های ماتریس و مواد مرکب شامل لیاپور

جهت تعیین مقاومت و مدول ارتجاعی استاتیکی نمونه‌های ماتریس و مواد مرکب شامل لیاپور، نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر از ماتریس (ملات ماسه و سیمانی) به تنهایی و همچنین مواد مرکب با ترکیب حجمی ۹۰ درصد ماتریس و ۱۰ درصد سبک‌دانه، ۸۰ درصد ماتریس و ۲۰ درصد سبک‌دانه و ۷۰ درصد ماتریس و ۳۰ درصد سبک‌دانه 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 باز شده و تا سن ۲۸ روزگی در حوضچه آب حدود ۲۰ درجه غوطه‌ور شدند. سپس از آب خارج شده، و در هوای آزاد خشک و بعد از کپینگ کردن (کلاهک‌گذاری)، مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی استاتیکی آنها تعیین شد. برای تعیین مدول ارتجاعی استاتیکی، از حلقه استاندارد، سنسور تغییر مکان (LVDT)، کرنش سنج و سیستم اتوماتیک قرائت داده (دیتالاگر) استفاده شده است (شکل ۹).

براساس استاندارد ASTM C-469 [۱۴]، بهترین شیب خط گذرنده از منحنی تنش-کرنش طولی در حد فاصل بین کرنش  $10^{-6} \times 5$  و کرنش ۴۰ درصد بار نهایی به‌عنوان مدول ارتجاعی منظور شده است.

شکل ۱۰ نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها و شکل ۱۱ نمونه‌ای از نحوه محاسبه مدول ارتجاعی استاتیکی را نشان می‌دهد.



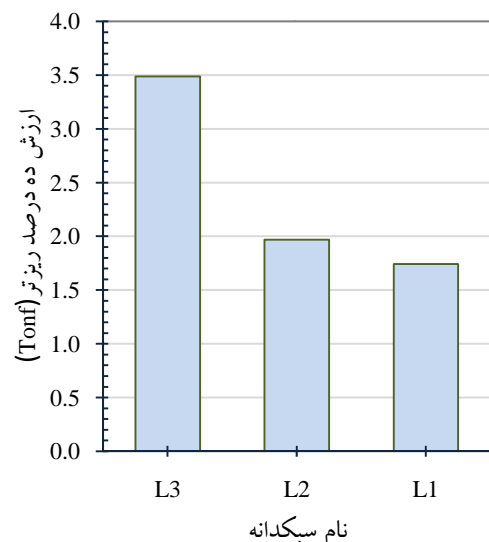
شکل ۹- استفاده از حلقه استاندارد و سنسور تغییر مکان برای

تعیین مدول ارتجاعی بتن

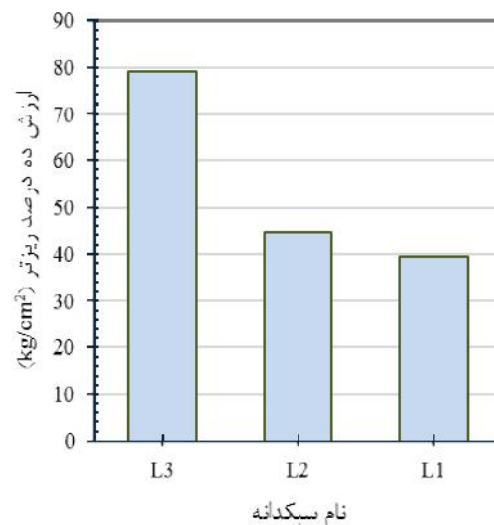
#### ارزش ده درصد ریزتر طبق استاندارد - BS 812

Part 111 [۱۶] با همان وسایل آزمایش عدد خردشدگی بر روی نمونه‌های آماده شده تک اندازه صورت می‌گیرد. در این آزمایش مقدار بار فشاری براساس آزمون و خطا طوری تعیین می‌شود که در حدود ۱۰ درصد دانه‌ها از الک جداکننده عبور کند. نتایج این آزمایش در دو حالت نیرو و نیرو بر مساحت قالب در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است.

مطابق نتایج با افزایش قطر ارزش ده درصد ریزتر دانه‌ها کاهش می‌یابد و دانه‌های با قطر متوسط ۴/۹ میلی‌متر مقاومت به مراتب بیشتری نسبت به دو رده دانه‌بندی دیگر دارند.



#### شکل ۷- ارزش ده درصد ریزتر سبک‌دانه‌ها بر حسب نیرو



#### شکل ۸- ارزش ده درصد ریزتر سبک‌دانه‌ها بر حسب نیرو بر

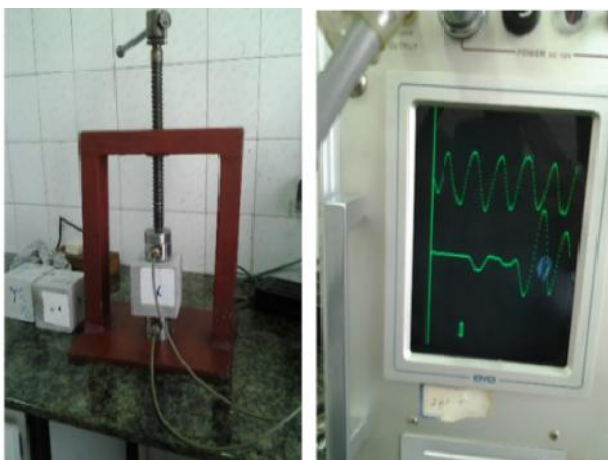
مساحت

در شکل ۱۲ روند اندازه گیری سرعت موج برشی و طولی در نمونه‌ها نشان داده شده است.

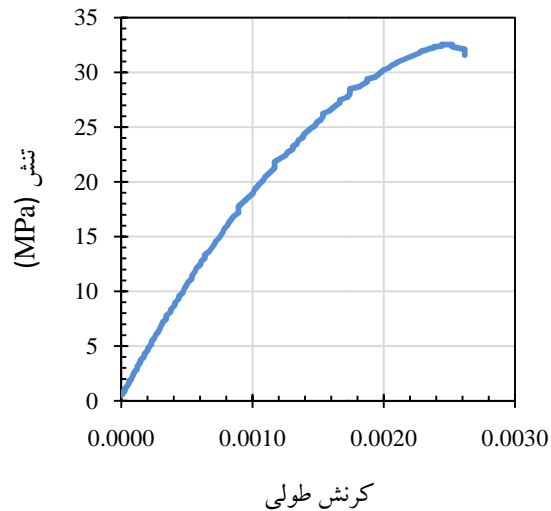
نتایج حاصل از آزمایش‌ها تعیین مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی استاتیکی به دست آمده از سه نمونه آزمایش در هر سری از ترکیب و مدول ارتجاعی دینامیکی و ضریب پوآسون دینامیکی به دست آمده از یک نمونه آزمایش در هر سری در جدول ۲ ارائه شده است.

در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ تغییرات مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی استاتیکی ماده مرکب نسبت قطر سبک دانه مورد استفاده نمایش داده شده است.

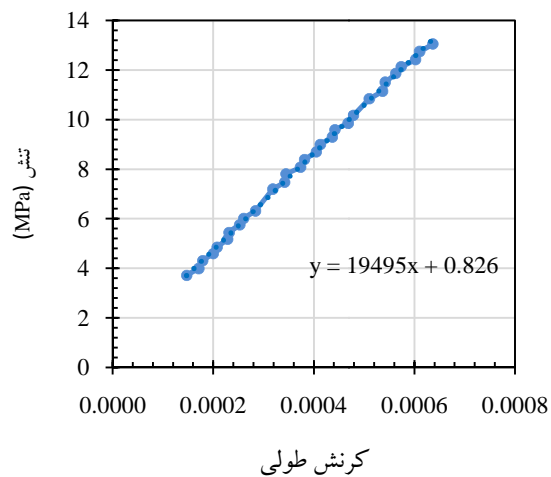
در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ نمودارها برحسب نسبت حجمی سبک دانه به کار رفته در آنها مجزا شده‌اند. که نسبت ۰/۰ مربوط به ماتریس یا بتن بدون سبک دانه است. مطابق این دو شکل مشاهده می‌شود با افزایش قطر، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول ارتجاعی استاتیکی ماده مرکب کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش نسبت حجمی سبک دانه ۱۱/۱ و ۷/۹ میلی‌متری در بتن، مقاومت و مدول ارتجاعی استاتیکی کاهش پیدا می‌کند ولی با افزایش نسبت حجمی سبک دانه ۴/۹ میلی‌متری در بتن، مقاومت و مدول ارتجاعی استاتیکی افزایش پیدا می‌کند. این موضوع به این معنی است که دانه‌های لیاپور با قطر متوسط ۱۱/۱ و ۷/۹ میلی‌متر در ماتریس انتخابی نقش ناهمگنی تضعیف‌کننده و دانه‌های لیاپور با قطر متوسط ۴/۹ میلی‌متر نقش ناهمگنی تقویت‌کننده را دارند.



شکل ۱۲- تعیین مدول ارتجاعی دینامیکی با اندازه گیری سرعت موج برشی و طولی در نمونه‌ها



شکل ۱۰- منحنی تنش- کرنش یک نمونه بتن آزمایشی



شکل ۱۱- محاسبه مدول ارتجاعی

با ساخت نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری و اندازه گیری وزن مخصوص، سرعت موج برشی و فشاری در نمونه‌ها، با استفاده از رابطه ۱ و ۲ مدول ارتجاعی دینامیکی و ضریب پوآسون دینامیکی نمونه‌ها تعیین شد.

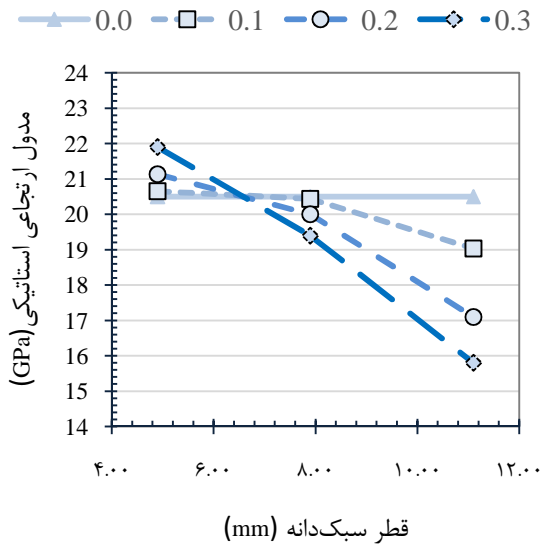
$$E = \rho V_T^2 \frac{V_L^2 - 4V_T^2}{V_L^2 - V_T^2} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{1 - 2(V_T/V_L)^2}{2(V_T/V_L)^2} \quad (2)$$

در این روابط،  $E$  مدول ارتجاعی دینامیکی،  $\nu$  ضریب پوآسون دینامیکی،  $\rho$  وزن مخصوص،  $V_L$  سرعت موج طولی و  $V_T$  سرعت موج برشی در نمونه آزمایشی است.

جدول ۲- مقاومت فشاری، مدول ارتجاعی استاتیکی، مدول ارتجاعی دینامیکی و ضریب پواسون دینامیکی نمونه‌ها

سبک‌دانه موجود در ماده مرکب (بتن)	نسبت حجمی دانه موجود در ماده مرکب (%)	متوسط مقاومت استوانه‌ای (MPa)	متوسط مدول ارتجاعی استاتیکی (GPa)	مدول ارتجاعی دینامیکی (GPa)	ضریب تبدیل مدول دینامیکی به استاتیکی	ضریب پواسون دینامیکی
-	0	31.1	20.5	27.0	0.76	0.24
-	10	32.2	20.7	25.9	0.80	0.22
L <sub>3</sub>	20	34.9	21.1	26.5	0.80	0.23
-	30	35.8	21.9	26.6	0.82	0.22
L <sub>2</sub>	10	32.0	20.4	28.9	0.71	0.21
-	20	29.7	20.0	26.8	0.75	0.25
-	30	28.1	19.4	25.0	0.78	0.24
L <sub>1</sub>	10	28.3	19.0	25.5	0.75	0.25
-	20	25.4	17.1	23.9	0.72	0.24
-	30	22.8	15.8	-	-	-



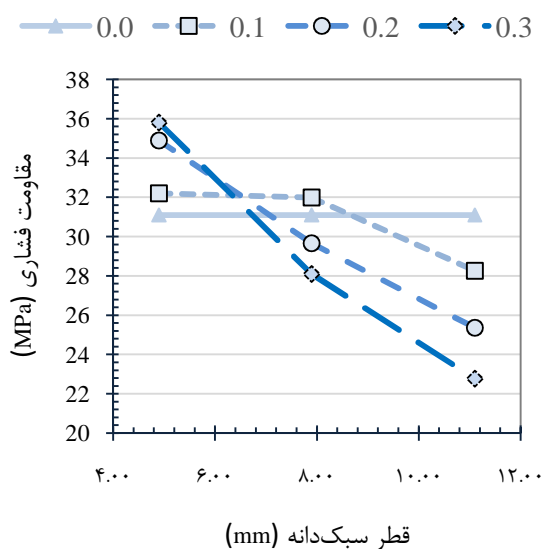
شکل ۱۴- تغییرات مدول ارتجاعی استاتیکی ماده مرکب نسبت قطر

#### ۴-۷- بررسی ناحیه تماسی بین ملات و سبک‌دانه

در بتن با سنگدانه‌های معمولی به دلیل صیقلی بودن و درصد جذب آب کم سنگدانه‌های معمولی، در مرز میان سنگدانه و خمیر ملات سیمانی ناحیه‌ای به نسبت ضعیف تشکیل می‌شود که ناحیه انتقال<sup>۱</sup> نام دارد. ضخامت این ناحیه با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش پیدا می‌کند [۳] و در بتن‌های معمولی بین ۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر می‌باشد [۱۷، ۱۸].

در بتن‌های سبک‌دانه از آنجایی که آب موجود در حفره‌های سبک‌دانه به تدریج در داخل خمیر سیمان در حال هیدراته شدن حرکت می‌کند ناحیه انتقال کمتری تشکیل می‌شود [۳]. در تحقیقات مختلف ضخامت ناحیه انتقال در مرز بین سبک‌دانه و خمیر سیمان بین ۵ تا ۶۰ میکرومتر گزارش شده است [۱۷، ۱۸] که بسته به نوع سبک‌دانه و ملات سیمان مورد بررسی، نتایج با هم تفاوت دارند.

ضخامت ناحیه انتقال در مرز بین سنگدانه و ملات رفتار مکانیکی سنگدانه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به طوری که در بتن با سنگدانه معمولی رشد ترک از این ناحیه عبور می‌کند و سنگدانه نمی‌تواند به طور کامل رفتار مکانیکی خود را نشان دهد.



شکل ۱۳- تغییرات مقاومت فشاری ماده مرکب نسبت قطر سبک‌دانه

<sup>1</sup> interfacial transition zone (ITZ)



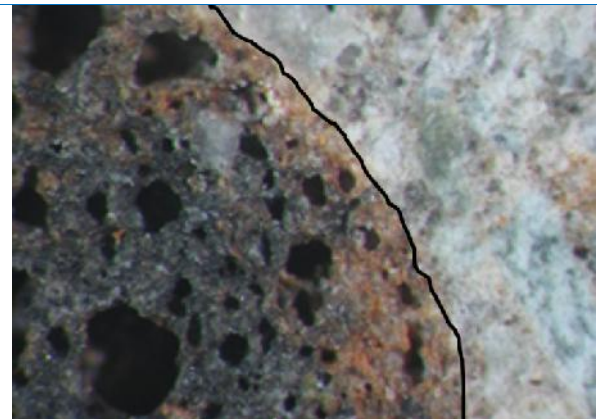
این اتفاق رخ نمی‌دهد و رشد ترک از خود سبک‌دانه عبور می‌کند.

با توجه به اینکه در تحقیقات مختلف اعداد متفاوت و گاه متناقضی را برای ناحیه انتقال موجود در مرز بین سبک‌دانه‌ها ارائه داده‌اند، در این تحقیق با توجه به تصاویر SEM ضخامت این ناحیه تخمین زده شد. با توجه به شکل ۱۵-الف و ب از آنجایی که تفاوتی در نوع ساختار موجود در مرز بین ملات و سبک‌دانه دیده نمی‌شود، حداکثر ضخامت ناحیه انتقال بین سبک‌دانه لیاپور و خمیر سیمان ۱۰ میکرومتر تخمین زده می‌شود. این مقدار از ناحیه انتقال نشان می‌دهد که ناحیه انتقال موجود در مرز لیاپور نمی‌تواند تأثیری چندانی در رفتار مکانیکی لیاپور داشته باشد و می‌توان از این فاز صرف نظر کرد.

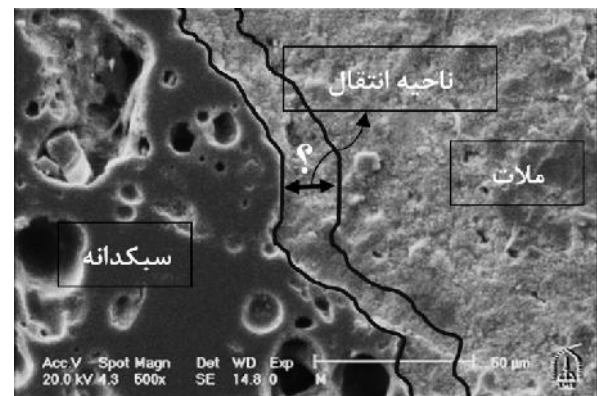
#### ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر قطر دانه‌های لیاپور بر ویژگی‌هایی مثل وزن مخصوص، درصد جذب آب و مشخصات مکانیکی آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور مقایسه مشخصات مکانیکی آن‌ها، هم با انجام آزمایش‌های ارزش ضربه‌ای و ارزش ده درصد که مقاومت دانه‌ها را وابسته به الک جداکننده می‌کند و هم با انجام آزمایش‌های مقاومت خردشدگی و تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول ارتجاعی ماده مرکب که مقاومت دانه‌ها را وابسته به الک جداکننده نمی‌کند مقایسه تأثیر اندازه قطر بر مشخصات مکانیکی آن‌ها صورت گرفت. در حالت کلی مشاهده شد وزن مخصوص، مقاومت و مدول ارتجاعی دانه‌ها با افزایش قطر کاهش می‌یابد و رابطه خاصی بین درصد جذب آب و اندازه قطر دانه‌ها وجود ندارد. همچنین در آزمایش ارزش ده درصد قضاوت در مورد تأثیر قطر بر نتیجه آزمایش مشکل است ولی در آزمایش ارزش ضربه‌ای و آزمایش‌هایی که مقاومت دانه‌ها را وابسته به الک جداکننده نمی‌کند این مشکل وجود ندارد. با توجه به تصاویر SEM تهیه شده از ناحیه تماس بین سبک‌دانه و ملات، مشخص شد که ناحیه انتقال کمتر از ۱۰ میکرومتر است و در نتیجه تأثیری چندانی بر خصوصیات مکانیکی سبک‌دانه‌های موجود در بتن ندارد.

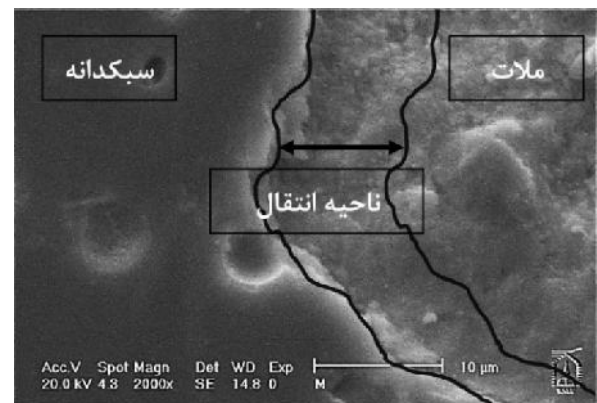
در حالی که در بتن‌های حاوی سبک‌دانه به دلیل کوچک بودن ضخامت ناحیه انتقال و همچنین کمتر بودن مقاومت سبک‌دانه‌ها



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۵-الف) تصویر میکروسکوپ نوری گرفته شده از ناحیه انتقال بین سبک‌دانه و ملات، (ب) تصویر SEM از ناحیه انتقال بین سبک‌دانه و ملات با بزرگ‌نمایی ۵۰ میکرومتر، (پ) تصویر SEM از ناحیه انتقال بین سبک‌دانه و ملات با بزرگ‌نمایی ۱۰ میکرومتر.

## ۶- مراجع

- [12]. Ozawa K, Maekawa K, Okamura H. "Self-Compacting high performance concrete", Collected Papers (University of Tokyo: Department of Civil Engineering), 34, pp135-149, 1996.
- [13]. Okamura H. "Self Compacting High-Performance Concrete", Concrete International, PP 50-54, 1997.
- [14]. Okamura H, Ozawa K. "Self-Compactable high performance concrete in japan", International Workshop on High Performance Concrete, SP 169, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp 31-44, 1994.
- [15]. Ouchi M, Hibino M, Okamura H. "Effect of super plasticizer on self-compact ability of fresh concrete", TRR 1574, pp 37-40, 1996.
- [16]. Nehdi M, El-Chabib H, El-Naggar H. "Cost-effective SCC for deep foundations". *ConcrInt*;25(3):95-103, 2003.
- [17]. KhayatKH. "Workability, testing, and performance of self-consolidating Concrete". *ACI Mater J*;96(3):346-5, 1999.
- [18]. Md. Safiuddin, J.S. West, K.A. Soudki. "Flowing ability of the mortars formulated from self-compacting concretes incorporating rice husk ash". *Construction and Building Materials*, 25 973-978, (2011).
- [19]. G. Fischer, Victor C. Li, "Effect of fiber reinforcement on the response of structural members", *Engineering Fracture Mechanics*, 74, pp 258-272., 2007.
- [20]. A. Carpinteri, A. Spagnoli, S. Vantadori, "An elastic-plastic crack bridging model for brittle-matrix fibrous composite beams under cyclic loading", *International journal of solids and structures*, 43, pp 4917-4936, 2006.
- [21]. Campione G., Letizia Mangiavillano M, "Fibrous reinforced concrete beams in flexure: experimental investigation, analytical modelling and design considerations", *Engineering structures*, 30, pp 2970-2980, 2008.
- [22]. G. Campione, S. Mindess and N. Banthia, "Monotonic and cyclic flexural behaviour of medium and high strength fiber reinforced concrete", *Fiber reinforced concrete (FRC) BEFIB' 2000*, Proceedings of the fifth international RILEM symposium, pp 461-470, 2000.
- [23]. S. N. Sinha, K. S. Naraine, "Energy dissipation in brick masonry under cyclic
- [1]. Wisconsin Energy Corporation, "Coal Combustion Products Utilization Handbook", Chapter 10: Minergy LWA – Structural, Masonry, and Geotechnical Lightweight Aggregates., 2004.
- <http://www.liapor.com>.
- [۲] شکرچی زاده، محمد، امدادی، آرزو، و لیبر، نیکلاس علی، "بتن سبک‌دانه، دانش، فن آوری و کاربردها"، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- [۳]. K. Melby, E.A. Jordet, C. Hansvold, "Long-span bridges in Norway constructed in high-strength LWA concrete", *Eng. Struct.* 18 (11) 845-849, 1996.
- [4] Priestley M.J.N. Performance based seismic design. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Eng., Auckland, New Zealand, 2000, State of the Art Paper No. 2831; 325-346 (2000).
- [5]. Binggeng Lu and F.S. Pedro. Estimating equivalent viscous damping ratio for RC members under seismic and blast loadings. *Mech. Res. Communications*, 33; 787-795 (2006).
- [6]. Hose Y.D., P.F. Silva and F. Seible. Performance evaluation of concrete bridge components and systems under simulated seismic loads. *EERI Earthquake Spectra*, 16(2); 413-442 (2000)
- [7]. Daniel L. and A. Loukili. Behaviour of high-strength fiber-reinforced concrete beams under cyclic loading. *ACI Stru. J.*, 99(3); 248-256 (2002).
- [8]. Clough R.W. and J. Penzien. Dynamics of Structures, second ed. McGraw Hill Inc., New York, NY, pp 635 (1993).
- [9]. Ergin Atimtay, P.E., M.ASCE, and Recep Kanit, "Learning seismic design from the Earthquake itself", *Practice periodical on structural design and construction*, (ASCE) Vol. 11, No.3, August, 2006.
- [10]. Durgesh C. Rai, , "Future Trends in earthquake-resistance design of structures", *Current Science*, Vol. 79, No.9, pp 1291-1300, 2000.
- [11]. F. Buyle-Bodin and M. Madhkan, , "Performance and modelling of steel fibre reinforced piles under seismic loading", *Engineering Structures*, 24, pp 1049-1056, 2002.

international RILEM Symposium, 13-15 September, Lyon, France, pp 193-202, 2000,

[33]. Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components FEMA 461 /pp13-24 June 2007.

[34]. The European Guideline for self compacting concrete specification , production and use . May 2005.

biaxial compressive loading", Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 91, pp 173-181 , 1991.

[24]. A. Filiatrault, S. Pineau, and J. Houde, "Seismic behaviour of steel-fiber reinforced concrete interior beam-column joints", ACI Structural journal, V.92, No.5 ., 1995.

[25]. H. Kimura, Y. Ishikawa, A. Kambayashi, and H. Takatsu, "Seismic behaviour of 200 MPa Ultra-High-Strength steel-fiber reinforced concrete columns under varying axial load", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.5, No.2, pp 193-200 ., 2007.

[26]. L. Daniel, A. Loukili, and J. Lamirault, "Experimental behaviour of high strength fiber concrete beams under cyclic and alternated loadings", Fiber reinforced concrete (FRC) BEFIB' 2000, Proceedings of the fifth international RILEM symposium, pp 577-586 , 2000.

[27]. K. Holschemacher, T. Muller, "Influence of fiber type and concrete composition on properties of steel fiber reinforced concrete", Proceedings of International conference on "Advances in cement based materials and applications in civil infrastructure (ACBM-ACI)" Lahore-Pakistan, December 12-14, 2007, pp 633-642, 2007.

[28]. A. Domingo; C. Lazaro; and P. Serna "Construction of JCHYPAR, A steel fiber reinforced concrete thin shell structure", Fiber-Reinforced Concretes BEFIB, Sixth international RILEM Symposium, 20-22 Varenna, Italy, pp 1143-1152, 2004,

[29]. B. Chiaia; A.P. Fantilli; and P. Vallini "Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings", Engineering Structures, Vol. 31, pp 1600-1606, 2009,

[30]. R.Hameed, Q. S. Khan, A.Turatsinze, Z. A. Siddiqi, F. Duprat, A.Sellier, "Equivalent Viscous Damping of Metallic Fiber-Reinforced Concrete (MFRC)", Pakistan Journal of Science, Vol. 65 No. 2 June, 2013.

[۳۱]. توکلی، حمیدرضا و فلاح تبار، مسعود، "ارزیابی تجربی

رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه خودتراکم حاوی الیاف تحت

بارگذاری سیکلی" مجله علمی و پژوهشی شریف، شماره مرجع

۳۰/۸۰۸/۹۲۰۸۱۳، بهمن ماه ۱۳۹۲.

[32]. B. Massicotte and P.H. Bischoff "Fiber reinforced concrete: A structural perspective", Fiber Reinforced Concrete (FRC) BEFIB 2000, Fifth

## Evaluation of Mechanical Properties of Artificial Lightweight Aggregate Liapor with Different Diameters and Lightweight Concrete Made of Them

M. Baghi

MSc, Department of Civil and Environmental Engineering Tarbiat Modares University

M. Yazdani\*

Assistant professor, Department of Civil and Environmental Engineering Tarbiat Modares University

( Received: 2014/5/26 - Accepted: 2015/3/3)

### Abstract

In recent years, the structural concrete have been considered by many because of its advantages as low weight, improved thermal and acoustic insulations and better resistance to frost and fire. At present, Liapor or Expanded shale which produced using expansible shale by the dry process and cooking in a horizontal rotary kilns, are one of the most important artificially lightweight aggregate which have widespread application in the construction of concrete structures.

In this study, order to determine the effect of diameter size on specific weight, water absorption and mechanical properties of Liapor lightweight aggregates, various tests were carried out on the three categories of gradation of Liapor. Also, by combining the lightweight aggregate and cement mortar and making concrete specimens with the 10 to 30 volume percent of lightweight aggregate and determining the uniaxial compressive strength, static and dynamic modulus of elasticity and dynamic poisson's ratio, mechanical properties the composite material made of them was evaluated. The results showed that the diameter of lightweight aggregates has significant effect on the the mechanical properties of the aggregates and concrete made of them. According to the SEM images taken from the area of contact between lightweight aggregate and mortar, it was found that the transition zone is less than 10 micrometers and therefore can not have an influence on the mechanical properties of lightweight aggregates.

**Keywords** :Mechanical properties, Liapor, Lightweight aggregate concrete, Artificial lightweight aggregate.

---

\*Corresponding author: mahyaz@Gmail.com