

بررسی مشخصات مکانیکی سبکدانه شیل و تاثیر آن بر مقاومت بتن سبک

کد مقاله: C

سعید بزرگمهر¹، سید حسین حسینی لواسانی²، الهام آبادی³، مهتاب مردانی⁴

1-دکترای مهندسی سازه، مدیر R&D شرکت آپتوس ایران

2-دکترای مهندسی سازه، عضو هیات علمی دانشگاه خوارزمی

3-کارشناسی عمران، دانشگاه خوارزمی

4-کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشگاه خوارزمی

Elham.abadeh@gmail.com

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 کوره گردان 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 دانه بندی لیاپور انجام شده است. همچنین با ترکیب سبک‌دانه‌ها و ملات ماسه و سیمان و ساخت نمونه‌های با درصد حجمی 10 الی 30 درصد از سبک‌دانه‌ها و تعیین مقاومت فشاری تک محوری 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.

کلمات کلیدی

مشخصات مکانیکی، لیاپور، بتن سبک سازه‌ای، سبک‌دانه‌های مصنوعی، شیل.

۱- مقدمه

مهمترین مزیت سبک‌دانه‌ها مربوط به وزن مخصوص کم این مصالح است. بطوری‌که 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 [1,2,3]. این ویژگی‌ها سبب گسترش استفاده از بتن سبک‌دانه در ساختمان‌های بلند، پل‌های با دهانه‌ی بلند، پلت فرم‌های دریایی و عایق‌سازی حرارتی و صدا در ساختمان‌ها شده است [4,5].

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 [6].

در کشور ما تولید سبک‌دانه‌های مصنوعی لیکا‌ی سازه‌ای و لیاپور سبب شده چشم انداز روشنی برای صنعت بتن سبک سازه‌ای کشور ترسیم شود. لیکا، از رس انبساط پذیر 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 [7] در فرآیند گندوله‌سازی با دستگاه پلوتایندر پودر شیل به همراه ذرات آب ترکیب و دانه‌های کروی ایجاد می‌شود که با تغییر در سرعت و زاویه دستگاه پلوتایندر می‌توان دانه‌های با ابعاد متفاوتی تولید کرد. در مرحله‌ی 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 هر چه سبک‌دانه سنگین‌تر باشد دارای مقاومت بیشتری می‌باشد، قابلیت لیاپور در تولید بتن با مقاومت فشاری بالاتر بیشتر است.

در این تحقیق به منظور تعیین اثر اندازه قطر بر وزن مخصوص، درصد جذب آب و مشخصات مکانیکی سبک‌دانه‌های لیاپور، سه رده از دانه بندی لیاپور تهیه و با انجام آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های سبک‌دانه و بتن‌های ساخته شده از آنها که شامل نسبت‌های حجمی 10 الی 30 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 به عنوان 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 راه اندازی شده است، به طور عمده تحقیقات گذشته بر روی سبک‌دانه‌ی 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 سبک‌دانه‌ی لیکا و سبک‌دانه‌های طبیعی به شرح زیر است:

رئیس قاسمی و همکاران (1390) یک مدل دو فازی خمیر-دانه برای تعیین نسبت اختلاط بتن‌های سبک‌دانه حاوی لیکا برای رسیدن به روانی و مقاومت فشاری ارائه کردند [8].

اردکانی و یزدانی (1390) به مقایسه‌ی مشخصات دانه‌های رس منبسط شده با وزن مخصوص و قطرهای مختلف پرداختند [9].

رحمانی و یزدانی (1390) به کاربرد روش تاگوچی در تعیین طرح اختلاط بهینه‌ی بتن سبک سازه‌ای ساخته شده با سبک‌دانه‌های اسکوریا پرداختند [10].

شکرچی زاده و همکاران (1387)، به بررسی طرح اختلاط بتن بهینه، با استفاده از لیکا پرداختند [11].

حسین افشین و علی اکبر بابا لو (1385)، به یافتن طرح اختلاط بهینه بتن‌های سبک‌دانه سازه‌ای با روش تاگوچی پرداختند [12].

تدین (1381)، به بررسی مشخصات بتن سبک پر مقاومت با مصالح موجود در ایران پرداخت [13].

مصطفی باغی و همکاران (1395)، به بررسی مشخصات ارتجاعی سبک‌دانه‌های مصنوعی شیل و رس منبسط شده ایران پرداختند [14].

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 خوردشدگی بر اساس استانداردهای مختلف انجام شد. همچنین با ترکیب ماتریس ماسه سیمانی و سبک‌دانه، ماده مرکب دو فازی ساخته شده و با اندازه‌گیری مقاومت فشاری، به بررسی مقاومت آنها در قالب ماده مرکب بتنی پرداخته شد. تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه همکار آپتوس ایران انجام شده است.

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

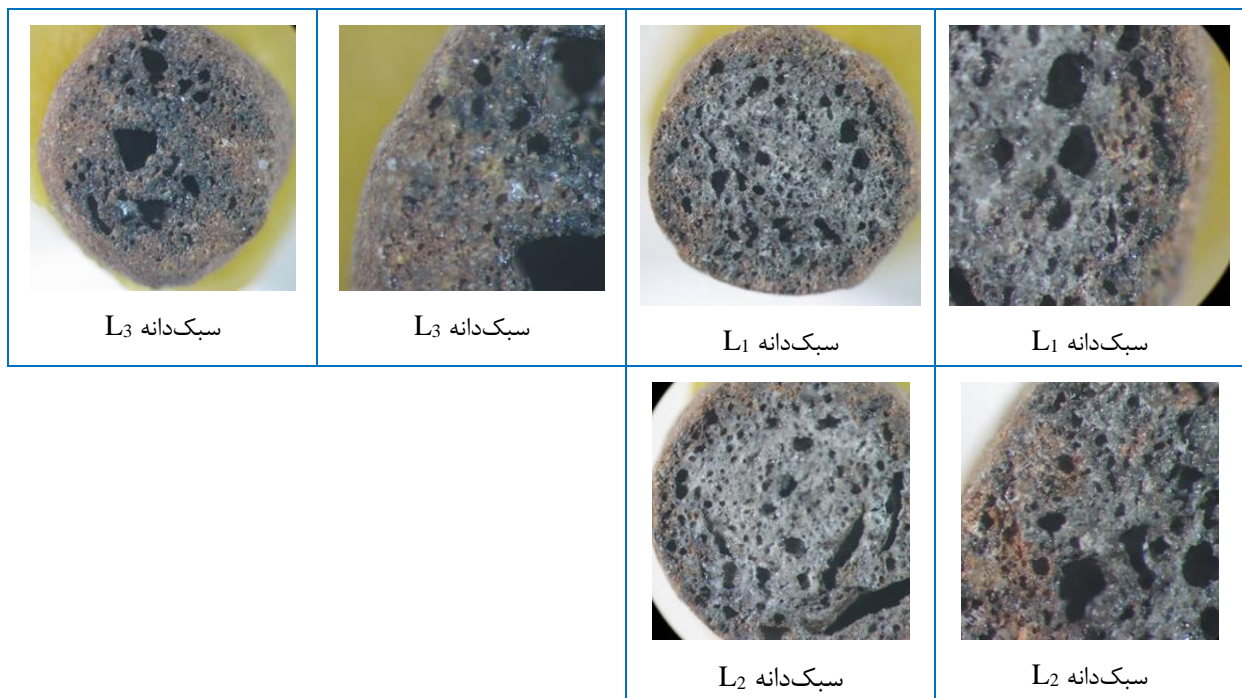
سبک‌دانه: سبک‌دانه لیاپور از شرکت عمران پارس سیرجان کرمان تهیه شد و با توجه به اینکه هدف تحقیق تعیین اثر اندازه قطر بر مشخصات مکانیکی سبک‌دانه‌ها و بتن ساخته شده از آنها بود، سه رده از دانه بندی لیاپور با مشخصات زیر تهیه شد.

- دانه‌های L₁، مانده بین الک "0/5" (12/7 میلی‌متر) و "0/375" (9/52 میلی‌متر) با قطر متوسط 11/1 میلی‌متر.

- دانه‌های L₂، مانده بین الک "0/375" (9/52 میلی‌متر) و "0/25" (6/35 میلی‌متر) با قطر متوسط 7/9 میلی‌متر.

- دانه‌های L₃، مانده بین الک "0/25" (6/35 میلی‌متر) و #6 (3/35 میلی‌متر) با قطر متوسط 4/9 میلی‌متر.

در شکل 1 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 پوسته‌ی خارجی ضخیم‌تری نسبت به دانه‌های متوسط و درشت هستند.

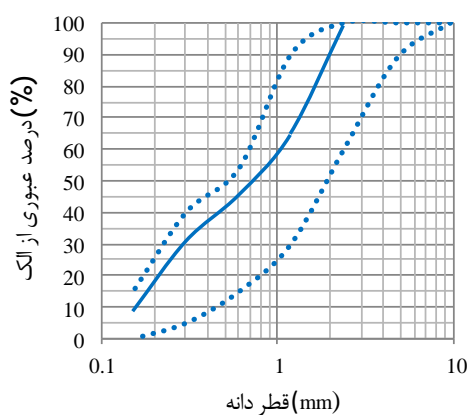


شکل 1. ریز ساختار سبک‌دانه‌های شیل (لیاپور)

ماتریس: از ملات ماسه و سیمانی، با طرح اختلاط ارائه شده در جدول 1 به عنوان ماتریس استفاده شده است. در این طرح سیمان مصرفی، سیمان پرتلند نوع 2 و ماسه مورد استفاده از نوع شکسته دو بار شو و با مدول نرمی 2/5 بوده که در شکل 2 نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده نشان داده شده است. همچنین از ابر روان‌کننده بر پایه‌ی کربوکسیلاتی برای روانی بیشتر استفاده شده است.

جدول 1. طرح اختلاط ماتریس‌های انتخابی (kg/m^3)

	ماسه	سیمان	آب	ابر روان‌کننده
وزن	1479	500	240	3.5
چگالی	2550	3150	1000	1100

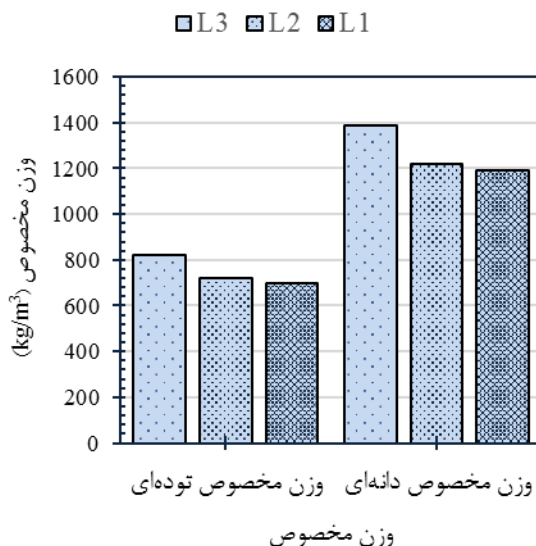


شکل 2. نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده

۴- انجام آزمایش‌ها و بررسی نتایج

۴-۱- وزن مخصوص سبک‌دانه‌ها

آزمایش وزن مخصوص توده‌ای و دانه‌ای بر اساس استاندارد ASTM C29 [15] و EN 10976-8-c [16] برای سه نوع دانه‌بندی لیاپور انجام شد که نتایج آن در شکل 3 ملاحظه می‌گردد. با توجه به اینکه امکان خرد شدن سبک‌دانه‌ها در اثر متراکم شدن آنها توسط کوبه وجود دارد، وزن مخصوص میله خورده آن‌ها اندازه‌گیری نشده است.



شکل 3. وزن مخصوص توده‌ای و دانه‌ای سبک‌دانه‌ها

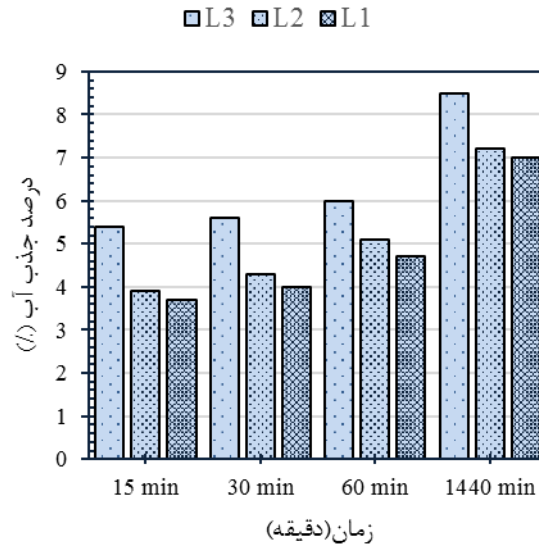
ASTM C330,331 [15] سنگدانه‌های ریزدانه با وزن مخصوص غیر متراکم 1120Kg/m^3 یا کمتر و سنگدانه‌های درشت دانه با وزن مخصوص غیر متراکم 880Kg/m^3 یا کمتر را سبک‌دانه می‌داند. همچنین وزن مخصوص مخلوط درشت دانه و ریزدانه را به 1040Kg/m^3 محدود کرده است. فاصله قابل قبول وزن مخصوص توده‌ای لیاپور با حداکثر وزن مخصوص 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 $1/7$ بدست آمده است.

۲-۴- درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها

برای تعیین درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها در بازه‌های زمانی مشخص، آنها را در زمان معین درون آب قرار داده و بر اساس استاندارد EN 1097-6-C [16] درصد رطوبت جذبی آنها محاسبه شد. در

شکل 4 درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها در بازه‌های زمانی مشخص نشان داده شده است.

با توجه به شکل، ارتباط مشخصی بین درصد جذب آب و قطر دانه وجود ندارد و حداکثر درصد جذب آب 24 ساعته دانه‌های لیاپور $8/5$ درصد بدست آمده است.



شکل 4. درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها

۴-۳- مقاومت خردشدگی سبک‌دانه‌ها^۱

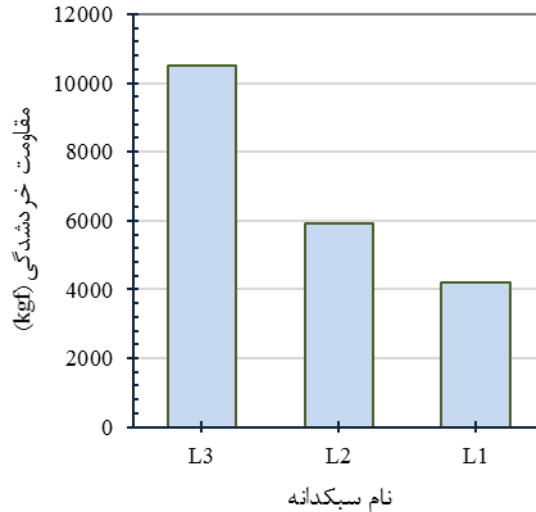
این آزمایش به صورت غیر مستقیم معیاری برای نشان دادن مقاومت دانه‌ها و خردشدگی آنها در اثر اعمال بار می‌باشد. این آزمایش بر طبق استاندارد EN 13055-1 [16] انجام شده است و با توجه به بیشتر از 150Kg/m^3 بودن وزن مخصوص سبک‌دانه‌های لیاپور، از روش اول استاندارد مذکور استفاده شده است. نتایج این آزمایش در شکل 5 نشان داده شده است. مطابق نتایج 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^۲

این آزمایش طبق استاندارد BS 812 - Part 112 [17] بر روی سبک‌دانه‌های تک اندازه انجام می‌شود. در این آزمایش، 15 مرتبه وزنه $13/5$ کیلوگرمی از ارتفاع 380 میلی‌متری بر روی سنگدانه‌های متراکم شده‌ی 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 5 ضربه نیز تکرار شد.

¹ Crushing resistance

² Impact Value



شکل 5. مقاومت خردشدگی سبکدانه‌ها

نتایج این آزمایش در شکل 6 نشان داده شده است. مطابق شکل 6 با افزایش قطر، ارزش ضربه‌ای دانه‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به این روند به نظر می‌رسد این آزمایش بیشتر متأثر از دانه‌بندی دانه‌ها می‌باشد.

۵-۴- ارزش خردشوندگی^۱ و ارزش ده درصد ریزتر سبکدانه‌ها^۲

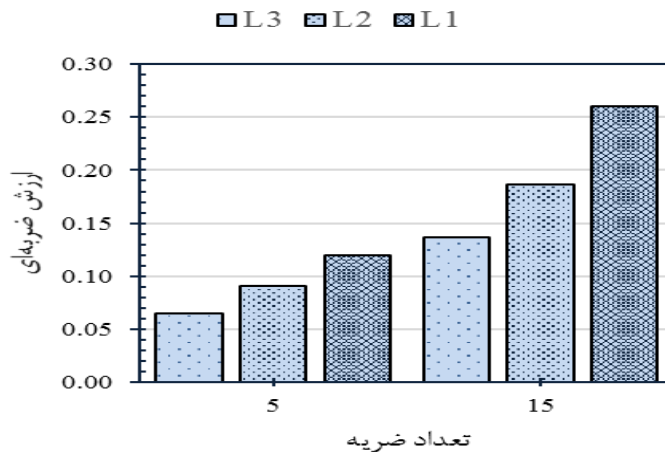
آزمایش ارزش خردشوندگی طبق استاندارد BS 812 - Part 110 [17] انجام می‌شود. در این آزمایش برای دانه‌های 3/35 الی 10 میلی‌متری از استوانه‌ای به قطر حدود 75 میلی‌متر و بار 100KN استفاده می‌شود.

طبق استاندارد، سنگدانه‌ها باید به صورت تک اندازه در آیند و بر روی نمونه‌ها، بار مورد نظر اعمال گردد و سپس از الک جداکننده استاندارد عبور داده و درصد عبوری به عنوان 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 ریزتر استفاده می‌شود.

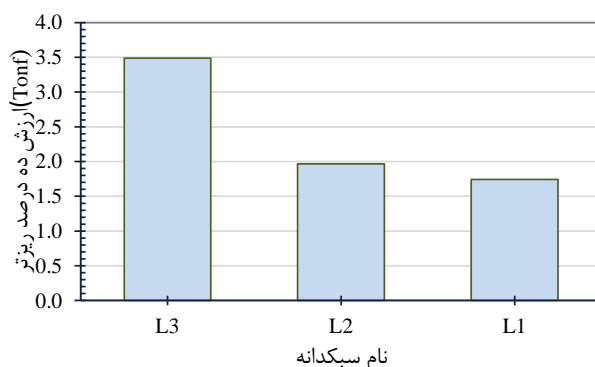
¹ Crushing value

² Ten percent fines value

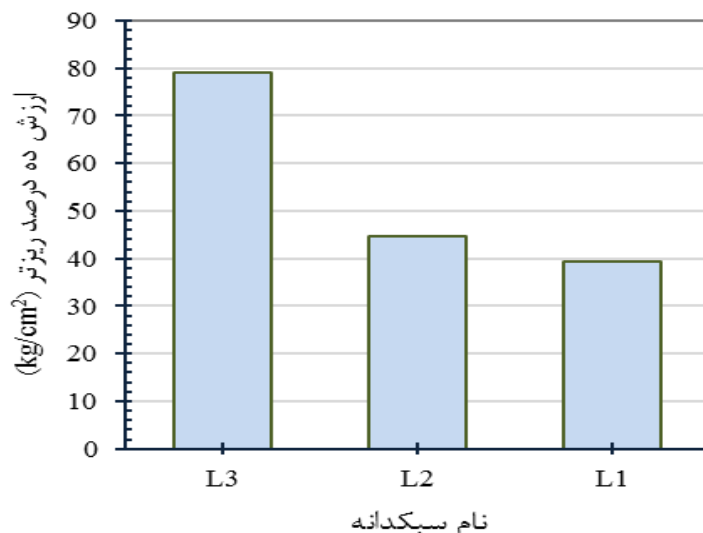


شکل 6. ارزش ضربه‌ای سبک‌دانه‌ها

آزمایش ارزش ده درصد ریزتر طبق استاندارد BS 812 - Part 111 [17] با همان وسایل آزمایش عدد خردشدگی بر روی نمونه‌های آماده شده‌ی تک اندازه صورت می‌گیرد. در این آزمایش مقدار بار فشاری بر اساس آزمون و خطا طوری تعیین می‌شود که در حدود 10 درصد دانه‌ها از الک جدا کننده عبور کند. نتایج این آزمایش در دو حالت نیرو و نیرو بر مساحت قالب در شکل 7 و شکل 8 نشان داده شده است. مطابق نتایج با افزایش قطر ارزش ده درصد ریزتر دانه‌ها کاهش می‌یابد و دانه‌های با قطر متوسط $4/9$ میلی‌متر مقاومت به مراتب بیشتری نسبت به دو رده دانه‌بندی دیگر دارند.



شکل 7. ارزش ده درصد ریزتر سبک‌دانه‌ها بر حسب نیرو



شکل 8. ارزش ده درصد ریزتر سبکدانه‌ها بر حسب نیرو بر مساحت

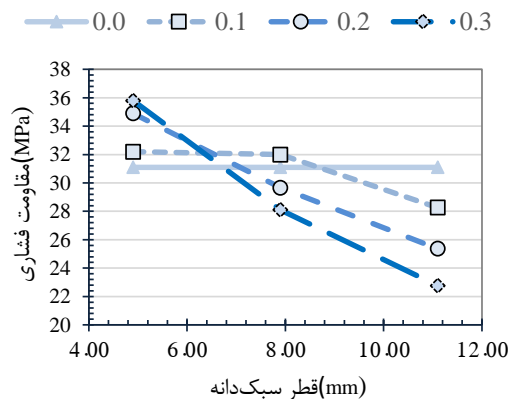
۶-۴- ساخت و تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های ماتریس و مواد مرکب شامل لیاپور

جهت تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های ماتریس و مواد مرکب شامل لیاپور، نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با قطر 15 و ارتفاع 30 سانتیمتر از ماتریس (مالات ماسه و سیمانی) به تنهایی و همچنین مواد مرکب با ترکیب حجمی 90 درصد ماتریس و 10 درصد سبکدانه، 80 درصد ماتریس و 20 درصد سبکدانه و 70 درصد ماتریس و 30 درصد سبکدانه ساخته شد. به منظور جلوگیری از جذب آب ماتریس توسط سبکدانه، قبل از اختلاط آنها سبکدانه‌ها را به مدت 30 دقیقه درون آب قرار داده و سپس توسط پارچه‌ی جاذب آب، آب سطحی آن گرفته شد. نمونه‌های ساخته شده پس از 24 ساعت از قالب باز شده و تا سن 28 روزگی در حوضچه آب حدود 20 درجه غوطه‌ور شدند. سپس از آب خارج شده، و در هوای آزاد خشک و و بعد از کپینگ کردن (کلاهدک گذاری)، مقاومت فشاری آنها تعیین شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها تعیین مقاومت فشاری بدست آمده از یک نمونه آزمایش در هر سری در جدول 2 ارائه شده است. با افزایش قطر سبکدانه همان طور که در شکل 3 مشاهده شد وزن مخصوص توده ای سبکدانه کاهش میابد این امر موجب سبکتر شدن وزن مخصوص کل بتن ساخته شده میشود. همچنین افزایش درصد جایگزینی سبکدانه نیز کاهش وزن مخصوص بتن را در پی دارد. تغییرات وزن مخصوص نمونه ها در جدول 2 آورده شده است که طبق استاندارد نمونه هایی که دارای وزن مخصوص کمتر از 1800 kg/m³ هستند، بتن سبک محسوب میشوند. در شکل 9 تغییرات مقاومت فشاری نسبت قطر سبکدانه مورد استفاده نمایش داده شده است.

در شکل 9 نمودارها بر حسب نسبت حجمی سبکدانه به کار رفته در آنها مجزا شده‌اند. که نسبت 0/0 مربوط به ماتریس یا بتن بدون سبکدانه است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود با افزایش قطر، مقاومت فشاری تک محوری کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش نسبت حجمی سبکدانه 11/1 و 7/9 میلی‌متری در بتن، مقاومت کاهش پیدا می‌کند ولی با افزایش نسبت حجمی سبکدانه 4/9 میلی‌متری در بتن، مقاومت افزایش پیدا می‌کند. این موضوع به این معنی است که دانه‌های لیاپور با قطر متوسط 11/1 و 7/9 میلی‌متر در ماتریس انتخابی نقش ناهمگنی تضعیف کننده و دانه‌های لیاپور با قطر متوسط 4/9 میلی‌متر نقش ناهمگنی تقویت کننده را دارند.

جدول 2. مقاومت فشاری و وزن مخصوص نمونه‌ها

سبک‌دانه موجود در ماده مرکب (بتن)	وزن مخصوص بتن متناظر Kg/m ³	نسبت حجمی دانه موجود در ماده مرکب (%)	متوسط مقاومت فشاری استوانه‌ای (MPa)
-	-	-	-
ماتریس	2220	0	41.1
L ₃	2097	10	32.2
	1957	20	34.9
	1800	30	35.8
	2088	10	32.0
L ₂	1940	20	29.7
	1790	30	28.1
	2080	10	28.3
L ₁	1930	20	25.4
	1780	30	22.8



شکل 9. تغییرات مقاومت فشاری ماده مرکب نسبت قطر سبک‌دانه

۵- نتیجه‌گیری

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 جدا کننده می‌کند و هم با انجام آزمایش‌های مقاومت خردشدگی و تعیین مقاومت فشاری تک محوری ماده مرکب که مقاومت دانه‌ها را وابسته به الک جدا کننده نمی‌کند مقایسه‌ی تأثیر اندازه قطر بر مشخصات مکانیکی آنها صورت گرفت. در حالت کلی مشاهده شد وزن مخصوص و مقاومت 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 جدا کننده نمی‌کند این مشکل وجود ندارد.

۶- منابع

- [1] Wisconsin Energy Corporation, "Coal Combustion Products Utilization Handbook", Chapter 10: Minergy LWA – Structural, Masonry, and Geotechnical Lightweight Aggregates., 2004
- [2] <http://www.liapor.com>
- [3] شکرچی‌زاده، محمد، امدادی، آرزو، و لیبر، نیکلاس علی، "بتن سبک‌دانه، دانش، فن آوری و کاربردها"، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، 1387.
- [4] K. Melby, E.A. Jordet, C. Hansvold, "Long-span bridges in Norway constructed in high-strength LWA concrete", Eng. Struct. 18 (11) (1996) 845–849.
- [5] A.K. Haug, S. Fjeld, "A floating concrete platform hull made of lightweight aggregate concrete", Eng. Struct. 18 (11) (1996) 831–836
- [6] European Union-Brite Euram III, "LAW Material Properties State-of-the-Art", Eurolight Con, Document BE96-3942/R2, 1998.
- [7] Chandra, S., and Berntsson, L., "Lightweight Aggregate Concrete, Science, Technology and Applications", Noyes Publications, United States, 2002.
- [8] رئیس قاسمی، امیر مازیار؛ پرهیزگار، طیبه؛ و فامیلی، هرمز؛ "ارائه مدل دو فازی خمیر-دانه برای تعیین نسبت اختلاط بتن‌های سبک‌دانه حاوی لیکا". مجله علمی و پژوهشی عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره 1، بهار 1390.
- [9] اردکانی، علیرضا، و محمود یزدانی، "مقایسه مشخصات دانه‌های رس منبسط شده با وزن مخصوص و قطرهای مختلف"، اولین کنفرانس ملی بتن سبک، تهران، دانشگاه تهران، انستیتو مصالح دانشکده فنی، 1390.
- [10] رحمانی، حمیدرضا، و محمود یزدانی، "کاربرد روش تاگوچی در تعیین طرح اختلاط بهینه بتن سبک سازه‌های ساخته شده با سبک‌دانه‌های اسکوریا"، اولین کنفرانس ملی بتن سبک، تهران، دانشگاه تهران، انستیتو مصالح دانشکده فنی، 1390.
- [11] شکرچی‌زاده، محمد؛ لیبر، نیکلاس علی؛ ماهوتیان، مهرداد؛ و آشوری، احسان؛ "راهنمای کاربردی بتن سبک‌دانه سازه‌ای لیکا". گزارش شماره CMI-8707294، انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران، 1387.
- [12] افشین، حسن، و علی اکبر بابالو، "یافتن طرح اختلاط بهینه بتن‌های سبک‌دانه سازه‌ای با استفاده از روش تاگوچی"، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران، تهران، 1385.
- [13] تدین، محسن، "بررسی و ارزیابی مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، ضریب پواسون و شدت خوردگی بتن سبک پر مقاومت با مصالح موجود در ایران"، رساله دکتری در رشته مهندسی عمران-سازه، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، 1381.
- [14] باغی، مصطفی، یزدانی، محمود، و اردکانی، علیرضا "تعیین مشخصات ارتجاعی سبک‌دانه‌های مصنوعی شیل و رس منبسط شده ایران" مهندسی عمران شریف، دوره 32-2 شماره 2/2، 1395
- [15] ASTM, "American Society For Testing And Materials", 1999.
- [16] The European Standard EN 10976-8-c and 13055-1 : 2002
- [17] BSI, "British Standards Institution", BS 812-110 to 112, 1990.