

# بررسی آزمایشگاهی آثار ضربه در بتن سبک‌دانه‌ی حاوی باگاس و لیکا

علیرضا خاوی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

سیداحمد برسی\* (مربی)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، مرکز علمی کاربردی دزفول

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (۲۹-۳۸، پژوهشی)  
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۳۸-۲۹، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی خواص مکانیکی و مقاومت در برابر ضربه‌ی بتن حاوی سبک‌دانه‌ی لیکا و الیاف باگاس تحت بارهای فشاری و ضربه‌ی، ابتدا یک طرح اختلاط ثابت در نظر گرفته شده و سپس نمونه‌هایی براساس طرح اختلاط مذکور، بدون افزودن باگاس و لیکا ساخته شده و پس از عمل‌آوری، تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. سپس نمونه‌هایی با طرح اختلاط مذکور و با ترکیب باگاس و لیکا به نسبت وزنی ۱ به ۳ و همچنین نمونه‌هایی با استفاده از لیکا (بدون باگاس)، با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ جایگزین سنگ‌دانه‌ها، ساخته شده و پس از عمل‌آوری، آزمایش‌های مقاومت فشاری و ضربه‌ی بر روی آنها صورت گرفته و نتایج استخراج شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که بتن‌های حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد سبک‌دانه در رده‌ی بتن سبک جای دارند و بتن حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه، به عنوان بتن سبک سازه‌ی محسوب می‌شود و مقاومت ضربه‌ی بسیار بالاتری نسبت به بتن معمولی دارد.

واژگان کلیدی: مقاومت ضربه‌ی، مقاومت فشاری، باگاس، لیکا، بتن سبک.

## ۱. مقدمه

مقاومت ضربه‌ی در فرو کردن شمع‌های بتنی، پی ماشین‌هایی که بارهای ضربه‌ی اعمال می‌کنند، سازه‌های در معرض انفجار، همچنین هنگامی که وقوع ضربه‌های تصادفی ممکن باشد، اهمیت ویژه‌ی دارد. لازم به ذکر است با توجه به این‌که رابطه‌ی واحدی بین مقاومت فشاری و مقاومت ضربه‌ی بتن وجود ندارد، لازم است مقاومت ضربه‌ی مستقیماً مشخص شود.<sup>[۱۲]</sup> علاوه بر مقاومت در برابر ضربه، موضوع دیگر ارزیابی شده در پژوهش حاضر، بررسی وزن مخصوص بتن است. پایین بودن نسبت مقاومت به وزن بتن در مقایسه با فولاد، برای ساخت برج‌ها و دیگر سازه‌های بزرگ به عنوان یک مشکل در مسیر توسعه‌ی اقتصادی محسوب می‌شود. به همین دلیل، امروزه سبک‌سازی با حفظ مقاومت، مورد علاقه‌ی دست‌اندرکاران صنعت ساختمان است.<sup>[۴]</sup> با این حال، در زمینه‌ی مقاومت ضربه‌ی بتن سبک و الیافی در مقایسه با مقاومت فشاری، پژوهش‌های محدودتری انجام شده است، که در ادامه به معرفی بخشی از آنها پرداخته شده است.

مین<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱)، در مقایسه‌ی مقاومت ضربه‌ی دو مدل بتن، یکی با کامپوزیت‌های سیمانی سخت‌کننده‌ی کرنش و دیگری با آری پی سی دریافتند که استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی سخت‌کننده‌ی کرنش در مقایسه با آری پی سی، در مقاومت در برابر بارهای ضربه‌ی مؤثرتر است.<sup>[۱۳]</sup>

فناوری‌ها و صنایع بزرگ در کنار خدماتی که عرضه می‌کنند، به علت ایجاد آسیب‌های زیست‌محیطی در بلندمدت می‌توانند حیات جامعه‌ی بشری را در معرض خطرهای جبران‌ناپذیری قرار دهند. لذا در توسعه‌ی فناوری‌ها و صنایع باید به توسعه‌ی پایدار توجه شود. به این معنی که در توسعه‌ی فناوری به نحوی رفتار شود که رفع نیازهای زمان حال، خطری برای رفع نیازهای نسل آینده ایجاد نکند.<sup>[۱۱]</sup> با توجه به این‌که بتن یکی از صنایع بزرگ در جهان است و بعد از آب، پرمصرف‌ترین ماده در جهان است و همچنین با توجه به گره خوردن صنعت بتن با زندگی روزمره‌ی مردم، این صنعت می‌تواند نقش مهمی در تحقق توسعه‌ی پایدار ایفا کند.<sup>[۳]</sup> در پژوهش حاضر، با به کارگیری مفاهیم توسعه‌ی پایدار، مقاومت ضربه‌ی و همچنین کاهش وزن مخصوص بتن و تولید بتن سبک، سعی شده است که با کاربرد الیاف باگاس، که یکی از ضایعات صنایع نیشکر است و همچنین لیکا به علت وزن کم، عایق بودن در برابر حرارت و صوت و دیگر خصوصیات مطلوب بتن تولید شده با آن،<sup>[۵]</sup> در جهت تولید بتن سبک مقاوم در برابر ضربه، گامی در جهت تحقق توسعه‌ی پایدار برداشته شود.<sup>[۱۱-۶]</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴/۱۶/۱۴۰، اصلاحیه ۱۹/۲۶/۱۴۰، پذیرش ۲۸/۱۱/۱۴۰.

DOI:10.24200/J30.2023.61026.3140

استناد به این مقاله:

خاوی، علیرضا و برسی، سیداحمد، ۱۴۰۲. بررسی آزمایشگاهی آثار ضربه در بتن سبک‌دانه‌ی حاوی باگاس و لیکا. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۳۸-۲۹.

رامکومار<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، در ساخت بتن الیافی لایه‌بی دو مرحله‌بی سیمانی کم کربن، با استفاده از الیاف، کلینکر خاکستر بادی، خاک رس کلسینه و فولاد و نیز با استفاده از اشعه‌ی ایکس و تجزیه و تحلیل میکروسکوپ الکترونی روشی در بررسی نمونه‌ها دریافتند که نمونه‌ی پیشنهادی لایه‌بی، در مقایسه با مقطع کاملاً تقویت شده با مقادیر معادل فیبر، مقاومت بیشتری در برابر ضربه نشان می‌دهند.<sup>[۱۴]</sup>

ژو و همکاران (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ی تخریب موضعی دال‌های بتنی در اثر برخورد پرتابه‌ی اعطاف پذیر، به بررسی تأثیر سرعت پرتابه بر مود خرابی پرداخته‌اند.<sup>[۱۵]</sup> بنسیا<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، برای بررسی خواص مختلف بتن الیافی، ۱۵ نمونه‌ی مختلف از انواع بتن الیافی را بررسی کردند و دریافتند که از بین نمونه‌های مورد پژوهش، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی بیشترین مقاومت ضربه‌بی را ایجاد کرده‌اند.<sup>[۱۶]</sup> در سال‌های اخیر، نیز فعالیت‌هایی در زمینه‌ی مقاومت ضربه‌بی بتن حاوی الیاف فولادی انجام شده است، که نتایج رضایت‌بخشی در بر داشته است.<sup>[۱۷، ۱۸]</sup>

عبدالله‌زاده (۱۳۹۰)، نیز در نوشتاری با عنوان «ارزیابی رفتار بتن نیمه‌سبک با لیکا حاوی الیاف فولادی»، خواص مکانیکی بتن‌های نیمه‌سبک ساخته شده از لیکا با ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد جایگزینی با شن، را که با الیاف فولادی صنعتی با درصد‌های ۱/۵، ۱/۱ و ۱/۵ مسلح شده بودند، بررسی و مطالعه کردند و در مجموع ۱۲ ترکیب مختلف بتن را ساخته و دریافت‌اند که الیاف با تشکیل شبکه‌بی مانع از آن می‌شوند که سبک‌دانه از بقیه‌ی مصالح جدا شود و در هنگام شکستن نیز مصالح از هم پاشیده نمی‌شوند. طرح بتن ساخته شده با ۷۵٪ لیکا و ۱/۵٪ الیاف فولادی با وزن مخصوص ۱۹۸۱ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۲۶/۸۸ مگاپاسکال، که در چارچوب بتن سبک سازه‌بی قرار می‌گیرد، به عنوان طرح اختلاط مناسب پیشنهاد شده است.<sup>[۱۹]</sup>

همچنین شربتدار و همکاران (۱۳۹۰)، در مطالعه‌ی صفحات بتن‌آرمه‌ی دو لایه تحت بارگذاری ضربه‌بی به بررسی اثر ضخامت دال‌های بتن‌آرمه‌ی دو لایه و همچنین اثر وجود ضربه‌گیر بین دو لایه در برابر بارهای ضربه‌بی پرداختند و دریافتند که دو لایه ساختن و استفاده از ضربه‌گیر ارتجاعی در بین لایه‌ها، تأثیر زیادی در افزایش مقاومت صفحات بتن‌آرمه در برابر ضربه دارد.<sup>[۱۲]</sup>

چوسلیپ<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۹)، در یک کار پژوهشی از خاکستر باگاس به عنوان یک ماده‌ی پوزولانی در بتن استفاده کرده‌اند. ایده‌ی پژوهش اخیر آن بوده است که یک ماده‌ی ارزان‌تر جایگزین سیمان شود تا بدون تغییر در کیفیت بتن، قیمت تمام شده‌ی بتن ارزان‌تر تمام شود. لذا با جایگزینی خاکستر باگاس با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی سیمان دریافت‌اند که بتن حاوی ۲۰٪ باگاس، مقاومت فشاری بیشتر و نفوذپذیری کمتری در مقایسه با بتن مینا در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه داشته است. همچنین مقدار بهینه‌ی نسبت خاکستر باگاس به سیمان ۲۰٪ وزنی سیمان بوده است.<sup>[۲۰]</sup>

خالو و همکاران (۱۳۹۸)، نیز در مطالعه‌بی به بررسی آزمایشگاهی عملکرد ضربه‌بی دال‌های بتنی مسلح شده به میلگرد GFRP پرداخته و ۷ نمونه‌ی دال بتنی با جزئیات و مشخصات مختلف از نظر میزان، چیدمان و نوع آرماتور مسلح‌کننده را آزمایش کرده‌اند. دال‌ها به شکل مربعی با ابعاد ۱۰۰ سانتی‌متر و ضخامت‌های ۵/۷ سانتی‌متر تحت بارگذاری ضربه‌بی ناشی از سقوط وزنه‌ی ۱۰۵ کیلوگرمی قرار گرفته و سپس جابه‌جایی دال‌ها، کرنش آرماتورهای طولی، شتاب ارتعاش قائم دال‌ها، گسترش ترک و عرض ترک و نحوه‌ی شکست نمونه‌ها ارزیابی شده‌اند. نتایج پژوهش اخیر نشان می‌دهد که افزایش میزان آرماتورهای طولی و افزایش ضخامت دال، تأثیر چشمگیری در بهبود عملکرد دینامیکی دال‌ها تحت بار ضربه‌بی دارند. همچنین

استفاده از میلگردهای GFRP گرچه در حالت کلی سبب کاهش ظرفیت دال‌ها در برابر ضربه می‌شود، اما با افزایش حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد میزان میلگرد نسبت به میلگرد فولادی می‌توان به عملکرد مشابه و یا حتی بهتر از دال‌های با میلگرد فولادی در برابر ضربه دست یافت.<sup>[۲۱]</sup>

در پژوهش حاضر، تأثیر کاربرد الیاف باگاس و سبک‌دانه‌ی لیکا با درصد‌های وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ جایگزین سنگ‌دانه‌ها از نظر مقاومت‌های فشاری و ضربه‌بی و وزن مخصوص در بتن بررسی شده است.

## ۲. روش پژوهش

در پژوهش حاضر، خواص مکانیکی بتن‌های سبک‌ساخته، با ساخت نمونه‌های مکعبی جهت آزمایش مقاومت فشاری و نمونه‌های دیسکی جهت آزمایش ضربه مطالعه شده است. بدین منظور، ابتدا یک طرح اختلاط ثابت براساس آیین‌نامه‌ی ACI ۲۱۱ در نظر گرفته شده و پیش از ساخت نمونه‌های اصلی، چند نمونه‌ی آزمایشی جهت به دست آوردن میزان بهینه‌ی فوق روان‌کننده و میکروسیلیس ساخته شده است. نمونه‌های بتن معمولی، براساس طرح اختلاط مذکور بدون افزودن باگاس و لیکا ساخته شده و پس از عمل‌آوری تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. سپس نمونه‌هایی با طرح اختلاط اخیر و با ترکیب باگاس و لیکا به نسبت وزنی ۱ به ۳ (۱ واحد باگاس، ۳ واحد لیکا) و همچنین نمونه‌هایی با استفاده از لیکا (بدون باگاس)، با درصد‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ جایگزین درشت‌دانه‌ها، ساخته شده و پس از عمل‌آوری، آزمایش‌های مقاومت فشاری و ضربه‌بی (با استفاده از دستورالعمل و دستگاه ساخته شده براساس آیین‌نامه‌ی ACI ۵۴۴) بر روی آنها صورت گرفته و نتایج استخراج شده است. لازم به ذکر است که عیار سیمان به طور ثابت، ۴۳۷ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده و در کلیه‌ی مخلوط‌ها به میزان ۶٪ وزن سیمان، میکروسیلیس و ۱٪ وزن سیمان، فوق روان‌کننده استفاده شده است. نمونه‌ها به صورت دیسکی به قطر ۱۵۲ میلی‌متر (۶ اینچ) و ارتفاع ۶۳/۵ میلی‌متر (۲/۵ اینچ) و مکعبی ۱۵ × ۱۵ سانتی‌متر، در دو سن ۱۴ و ۲۸ روزه و هر کدام ۴ تکرار و در مجموع ۶۴ نمونه‌ی مکعبی و ۶۴ نمونه‌ی دیسکی (۳۲ نمونه‌ی حاوی لیکا و باگاس و ۳۲ نمونه‌ی حاوی فقط لیکا) ساخته شده‌اند.

## ۳. مصالح استفاده شده

اولین گام به منظور طرح اختلاط دقیق و مناسب بتن، شناخت کامل مصالح اختلاط، شامل: سنگ‌دانه‌ها، سیمان، آب و سایر مواد افزودنی است. لازم به ذکر است که مشخصات مصالح استفاده شده در بتن براساس دستورالعمل‌های ASTM تعیین شده است.<sup>[۲۲]</sup>

## ۳.۱. مصالح سنگی

اسکلت اصلی بتن، سنگ‌دانه‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن هستند. اهمیت استفاده از سنگ‌دانه‌های مناسب و مرغوب در بتن از آن‌جا معلوم می‌شود که سنگ‌دانه‌های ریز و درشت عموماً ۶۰ تا ۷۵ درصد حجم بتن (۷۰ تا ۸۵ درصد وزن بتن) را اشغال می‌کنند و در خواص بتن تازه و سخت شده و نسبت‌های اختلاط بتن تأثیر بسزایی دارند. لذا سنگ‌دانه‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، پس از بررسی معادن مختلف و یافتن مرغوب‌ترین مصالح از لحاظ کیفیت و دانه‌بندی در منطقه انتخاب

جدول ۲. ترکیب شیمیایی باگاس.

هولسولوز	لیگنین	شکر	خاکستر	رطوبت
۷۱/۶۶	۱۷/۱۴	۰/۲-۲	۲/۷۸	۶/۷

است، لازم است که در انتخاب سیمان، کنترل‌های دقیقی به عمل آید. لذا سیمان استفاده شده در پژوهش حاضر، سیمان تپ II منطبق بر ضوابط ASTM-C150 با چگالی ۳/۱۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب و با سطح مخصوص ۳۳۵۰ سانتی‌مترمربع بر گرم انتخاب شده است. [۲۳]

### ۳.۳. باگاس

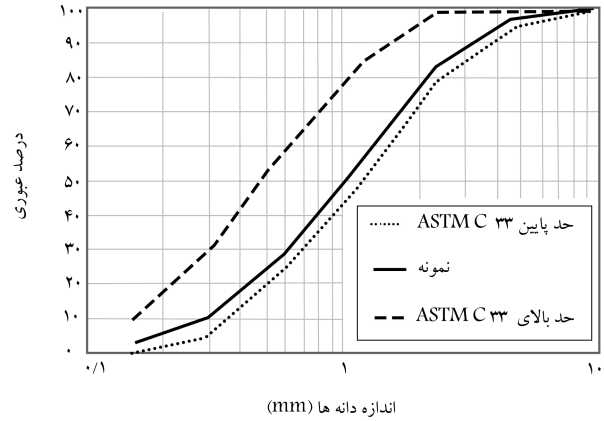
باگاس مصرفی از کارخانه‌ی کشت و صنعت نیشکر هفت تپه‌ی خوزستان تهیه شده است. وزن مخصوص متراکم و غیرمتراکم آن به ترتیب ۱۲۹ و ۶۴ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و ترکیب‌های شیمیایی آن مطابق جدول ۲ بوده است. لازم به ذکر است که به دلیل کنترل جذب آب و تأثیر شکر موجود در آن، قبل از اضافه کردن باگاس به مخلوط، با درصدی از سیمان طرح اختلاط مخلوط می‌شود. [۲۴ و ۲۵]

### ۴.۳. فوق روان‌کننده

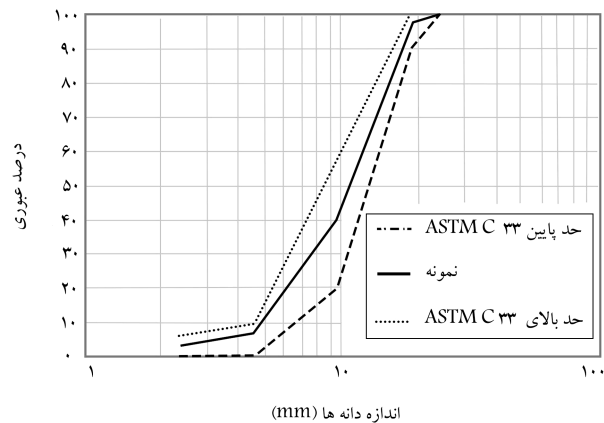
مواد فوق‌روان‌کننده می‌توانند در دو حالت استفاده شوند: در یک حالت، می‌توانند روانی بیشتری را در یک نسبت آب به سیمان ثابت در مقایسه با بتن شاهد ایجاد کنند و در حالت دیگر، باید قادر باشند تا یک روانی ثابت را در مقایسه با یک بتن شاهد با کاهش آب مخلوط فراهم کنند. به علت به دست آمدن خواص بسیار مطلوب در بتن تازه و سخت شده، همچنین با توجه به استفاده از میکروسیلیس جهت کمک به توزیع ذرات میکروسیلیس و ایجاد جریان‌پذیری مناسب در مخلوط بتنی، از فوق روان‌کننده استفاده شده است. فوق‌روان‌کننده‌ی استفاده شده در طرح اختلاط، از نوع power plast-ES با رنگ قهوه‌یی سوخته بوده است.

### ۵.۳. لیکا

سیک‌دانه‌ی لیکا (دانه‌های رس منبسط شده) در کشورهای اروپایی با عناوینی نظیر: لایتگ، لیکا، آگلایت و آرزاکس نامیده و عموماً در اروپا براساس وزن مخصوص توده‌یی خشک طبقه‌بندی می‌شوند، در حالی که روش طبقه‌بندی سیک‌دانه‌ی لیکا در ایران براساس قطر دانه‌ها صورت می‌گیرد، که به علت مشخص بودن دانه‌بندی، طبقه‌بندی اخیر روش مناسب‌تری جهت استفاده در طرح اختلاط پژوهش حاضر بوده است. برخی از ویژگی‌های لیکا، از جمله: مقاومت در برابر آتش، دوام و پایداری شیمیایی و نظایر آن باعث شده است تا در فعالیت‌های عمرانی و صنعتی کاربرد خوبی داشته باشد. از آن‌جا که دانه‌های لیکا در دمای نزدیک به ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تولید می‌شوند، قادرند شوک حرارتی تا ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد را بدون اشتغال تحمل کنند. از سوی دیگر، دانه‌های لیکا، قابلیت هدایت حرارتی پائینی دارند، که این موضوع نقش مؤثری در جلوگیری از انتقال آتش دارد. لذا با توجه به موضوع پژوهش حاضر، که احتمال مواجهه با آتش در اثر انفجار نیز برای بتن وجود دارد، استفاده از مصالح ذکر شده جهت کاهش وزن مخصوص بتن جهت تولید بتن سبک مناسب به نظر می‌رسد. [۲۶ و ۲۷] در پژوهش حاضر، برای کاهش وزن مخصوص بتن علاوه بر باگاس، از لیکا با بیشینه‌ی بعد ۱/۲۷ سانتی متر (۵/۰ اینچ) استفاده شده است.



شکل ۱. دانه‌بندی ماسه.



شکل ۲. دانه‌بندی شن.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی میکروسیلیس استفاده شده.

اندازه‌ی ذرات	$> 1$ میکرون
وزن حجمی متراکم شده	$480$ تا $720$ $\text{kg/m}^3$
وزن مخصوص (Gs)	۲/۲
سطح مخصوص	$15000$ تا $30000$ $\text{m}^2/\text{kg}$

شده‌اند. مصالح سنگی شکسته با بیشینه‌ی بعد ۱۹ میلی‌متر از معدن واقع در ۲۰ کیلومتری محور دزفول - شوشتر تهیه شده و براساس دستورالعمل ASTM-C33، آزمایش‌های لازم بر روی آنها صورت گرفته است. در شکل‌های ۱ و ۲، به ترتیب نمودارهای دانه‌بندی ماسه و شن مشاهده می‌شوند. چگالی شن و ماسه به ترتیب ۲/۶۲ و ۲/۶۵ بوده است.

### ۲.۳. سیمان و میکروسیلیس

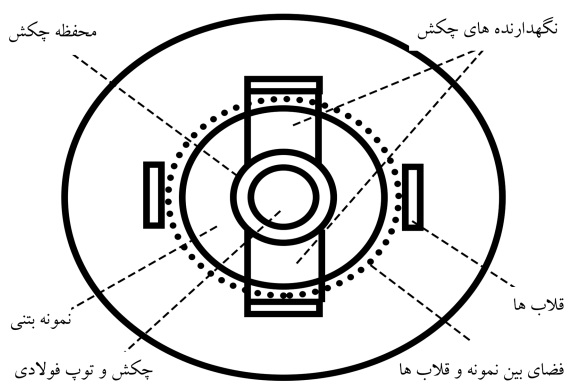
میکروسیلیس یا دوده‌ی سیلیسی، ماده‌یی پودری و خاکستری‌رنگ بوده است، که محصول فرعی کوره‌های قوس الکتریکی در فرایند تولید آلیاژهای فروسیلیس است. با توجه به مزایای کاربرد میکروسیلیس در بتن تازه و سخت شده، از جمله: افزایش چسبندگی، کاهش آب انداختن، افزایش مقاومت فشاری، افزایش دوام و پایداری، افزایش مدول کشسانی و کاهش نفوذپذیری در پژوهش حاضر جهت بهره‌مندی از خواص فوق از پودر میکروسیلیس با مشخصات مندرج در جدول ۱ استفاده شده است. از سوی دیگر، از آن‌جا که کیفیت سیمان در تولید یک بتن خوب بسیار مؤثر

جدول ۳. طرح اختلاط‌های استفاده شده.

ردیف	سبک‌دانه	فوق روان‌کننده	میکروسیلیس	آب	سیمان	ماسه	شن	درصد سبک‌دانه
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	(%)
۱	-	۴/۴	۲۶/۳	۱۳۶	۴۳۷	۹۰۰	۹۹۵	۰
۲	۲۱	۴/۴	۲۶/۳	۱۳۶	۴۳۷	۹۰۰	۸۰۵/۵	۱۰
۳	۴۲	۴/۴	۲۶/۳	۱۳۶	۴۳۷	۹۰۰	۶۱۶	۲۰
۴	۶۳	۴/۴	۲۶/۳	۱۳۶	۴۳۷	۹۰۰	۴۲۶/۵	۳۰

جدول ۴. نمونه‌های ساخته شده با سبک‌دانه (لیکا و باگاس).

ردیف	سبک‌دانه (درصد)	نمونه‌ی مکعبی			نمونه‌ی دیسکی		
		کد	۱۴ روزه	۲۸ روزه	کد	۱۴ روزه	۲۸ روزه
۱	۰	B۰	۴	۴	C۰	۴	۴
۲	۱۰	B۱	۴	۴	C۱	۴	۴
۳	۲۰	B۲	۴	۴	C۲	۴	۴
۴	۳۰	B۳	۴	۴	C۳	۴	۴



شکل ۳. شکل شماتیک نمونه‌ی بتنی و وسایل ضربه.

ضربه‌های لازم جهت رسیدن به خرابی نهایی ثبت می‌شود. براساس آیین‌نامه‌ی مذکور خرابی نهایی زمانی رخ می‌دهد که نمونه به ۳ عدد از قلاب‌ها برخورد کرده باشد.<sup>[۲۸]</sup>

طرح اختلاط‌های استفاده شده در جدول ۳ و مشخصات و تعداد نمونه‌های دیسکی و مکعبی آزمایش شده در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند.

## ۵. نتایج آزمایش‌ها و بحث

در بخش حاضر، نتایج حاصل از آزمایش‌های ضربه، مقاومت فشاری و میزان وزن مخصوص ارائه شده است. لازم به ذکر است که جدول‌های تحلیل آماری و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار متلب<sup>۵</sup> انجام شده است. هر مقاومت فشاری و ضربه‌ی ثبت شده در جدول نتایج، میانگین ۴ نمونه است. مقاومت فشاری نمونه‌ها براساس نمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری و مقاومت ضربه‌ی براساس نمونه‌ی دیسکی به قطر ۱۵/۲ و ارتفاع ۶/۳۵ سانتی‌متری اندازه‌گیری شده است. در پژوهش حاضر، سبک‌دانه به معنی ترکیب یک واحد باگاس و سه واحد لیکاست. در ادامه، در قالب نمودارها و جدول‌ها به تجزیه و تحلیل نتایج

## ۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

بهبود مقاومت در برابر ضربه (جذب انرژی دینامیکی)، یکی از خواص مهم بتن الیافی است؛ که جهت به کارگیری این ویژگی در موقعیت‌هایی که مقاومت در برابر ضربه برای بتن مورد نیاز باشد، لازم است میزان مقاومت در برابر ضربه سنجیده شود. چندین نوع آزمایش برای اندازه‌گیری مقاومت ضربه‌ی بتن الیافی وجود دارد، که این آزمایش‌ها براساس مکانیسم ضربه و پارامتری که در جریان آزمایش ضربه، اندازه‌گیری و بازدید می‌شود، طبقه‌بندی می‌شوند. یکی از روش‌های آزمایش ضربه، آزمایش ضربه‌های مکرر به وسیله‌ی سقوط وزنه است، که تعداد ضربه‌های لازم برای رسیدن به یک سطح خرابی از پیش تعیین شده را بر روی نمونه‌ی مورد آزمایش ارائه می‌دهد. تعداد ضربه‌ها به عنوان یک تخمین کیفی جذب انرژی نمونه در سطح خرابی تعریف شده است. آزمایش اخیر می‌تواند برای مقایسه‌ی نسبی قابلیت مخلوط‌های متفاوت بتن الیافی و اثبات بهبود کارایی بتن الیافی نسبت به بتن معمولی استفاده شود. لذا در پژوهش حاضر، با توجه به استفاده از الیاف باگاس در نمونه‌های ساخته شده و همچنین امکان استفاده از روش ذکر شده در شرایط کارگاهی، از شیوه‌ی ضربه‌های مکرر استفاده شده است. در پژوهش حاضر، آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با استفاده از جک فشاری و آزمایش ضربه بر روی نمونه‌های دیسکی با استفاده از دستگاهی که براساس آیین‌نامه‌ی ACI ۵۴۴ ساخته، انجام گرفته است. نمونه‌های دیسکی با ضخامت ۶۳/۵ میلی‌متر (۲/۵ اینچ) و قطر ۱۵۲ میلی‌متر (۶ اینچ) در قالب قرار می‌گیرند، ولی فقط نمونه در یک لایه ریخته می‌شود. جهت حفظ توزیع یکنواخت الیاف، ویریه‌ی خارجی انجام می‌گیرد. می‌توان قالب را تا ارتفاع ۶۳/۵ میلی‌متر (۲/۵ اینچ) پُر و سطح آن را صاف کرد، یا یک نمونه‌ی استوانه‌ی کامل ساخت و نمونه‌ی مورد نظر را از آن جدا کرد. نمونه در قسمت پایین با لایه‌ی نازکی از یک ماده‌ی نفتی لُج یا گریس پوشیده می‌شود و بر روی صفحه پایه بین زبانه‌ها قرار می‌گیرد، به طوری که سطح تمام شده‌ی نمونه رو به بالا باشد. سپس توپ فولادی به قطر ۶۳/۵ میلی‌متر (۲/۵ اینچ) بر روی نمونه قرار می‌گیرد (شکل ۳). تعداد ضربه‌های لازم جهت وقوع اولین ترک قابل مشاهده، همچنین

جدول ۵. نمونه‌های ساخته شده با فقط لیکا.

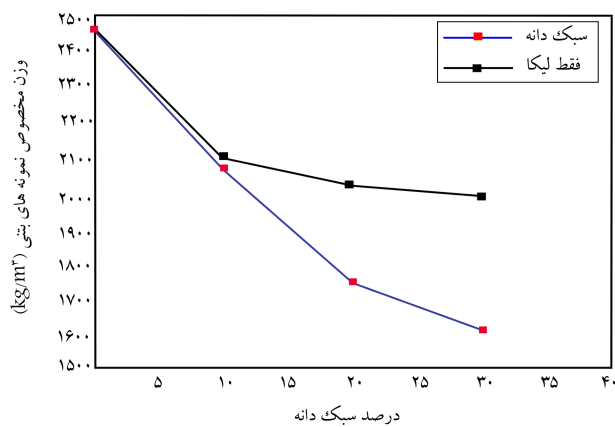
ردیف	سبک‌دانه (درصد)	نمونه مکعبی			نمونه دیسکی		
		کد	۱۴ روزه	۲۸ روزه	کد	۱۴ روزه	۲۸ روزه
۱	۰	L۰	۴	۴	D۰	۴	۴
۲	۱۰	L۱	۴	۴	D۱	۴	۴
۳	۲۰	L۲	۴	۴	D۲	۴	۴
۴	۳۰	L۳	۴	۴	D۳	۴	۴

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های نمونه‌های حاوی سبک‌دانه (ترکیب لیکا و باگاس).

وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت ضربه‌یی خرابی نهایی اولین ترک	مقاومت فشاری (kg/m <sup>2</sup> )	سن بتن (Days)	درصد سبک‌دانه (%)
۲۴۵۸	۲۲	۲۹۸	۱۴	۰
	۳۳	۴۰۵	۲۸	۰
۲۰۶۳	۱۲۹	۱۶۳	۱۴	۱۰
	۱۸۳	۲۲۰	۲۸	۱۰
۱۷۳۹	۲۱۳	۱۲۹	۱۴	۲۰
	۳۰۸	۱۷۳	۲۸	۲۰
۱۶۰۵	۹۳	۷۸	۱۴	۳۰
	۱۲۳	۱۰۰	۲۸	۳۰

جدول ۷. نتایج آزمایش‌های نمونه‌های حاوی فقط لیکا.

وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت ضربه‌یی خرابی نهایی اولین ترک	مقاومت فشاری (kg/m <sup>2</sup> )	سن بتن (Days)	درصد لیکا جایگزین حجمی شن (%)
۲۰۸۰	۲۰	۲۵۸	۱۴	۱۰
	۲۷	۳۷۸	۲۸	۱۰
۲۰۳۷	۲۹	۲۳۱	۱۴	۲۰
	۴۳	۳۴۰	۲۸	۲۰
۲۰۲۱	۶۸	۲۰۰	۱۴	۳۰
	۱۰۰	۲۸۶	۲۸	۳۰



شکل ۴. نمودار رابطه بین وزن مخصوص با درصد سبک‌دانه.

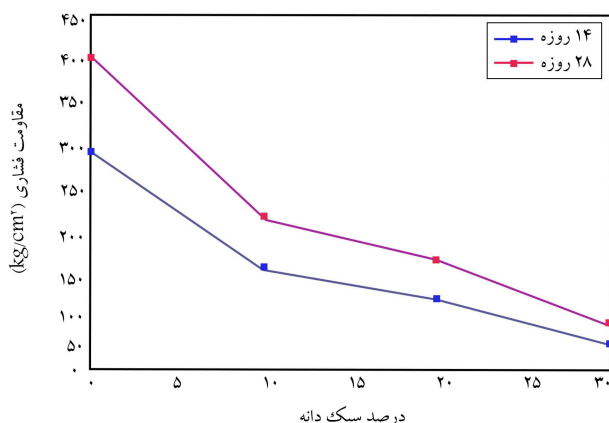
پرداخته شده است. لازم به ذکر است که بتن حاوی ۷۰٪ سبک‌دانه به جای سنگ‌دانه‌ها، قادر به تحمل هیچ نیرویی نیست و پس از قالب‌برداری، بتن فرو می‌ریزد.

### ۱.۵. بررسی وزن مخصوص نمونه‌ها

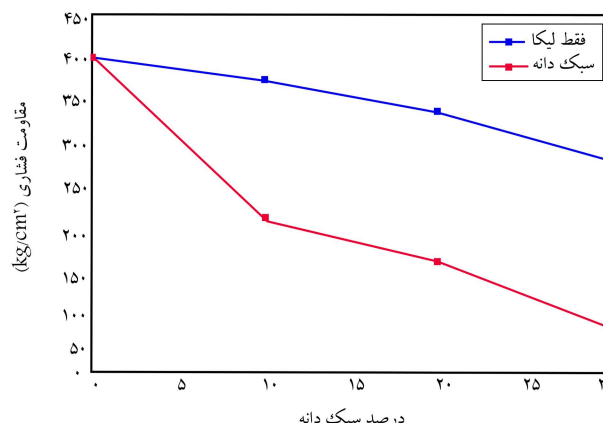
همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، کلیه بتن‌های حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه و بیشتر را می‌توان به عنوان بتن سبک در نظر گرفت. همچنین براساس تعریف بتن سبک سازه‌یی، بتن حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه را می‌توان به عنوان بتن سبک سازه‌یی به شمار آورد. با دقت در جدول‌های ۶ و ۷ و شکل ۴ نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش درصد سبک‌دانه، وزن مخصوص کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، شیب نمودار کاهش وزن، با افزایش درصد سبک‌دانه کمتر شده

جدول ۸. میزان تغییرات مقاومت فشاری، ضربه‌یی و وزن مخصوص نمونه‌ها نسبت به بتن معمولی.

وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت ضربه‌یی (تعداد ضربات) خرابی نهایی اولین ترک	مقاومت فشاری (kg/m <sup>2</sup> )	سن بتن (Days)	درصد سبک‌دانه (%)
-۱۶	+۴۸۶%	-۴۵	۱۴	۱۰
	+۵۶۸%	-۴۵	۲۸	
-۲۹	+۸۶۸%	-۵۶	۱۴	۲۰
	+۸۳۳%	-۵۷	۲۸	
-۳۴	+۳۲۲%	-۷۳	۱۴	۳۰
	+۲۷۲%	-۷۵	۲۸	



شکل ۶. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به درصد سبک‌دانه.



شکل ۵. نمودار رابطه بین مقاومت فشاری با درصد سبک‌دانه.

انرژی نمونه‌ها برای بتن حاوی سبک‌دانه به صورت قابل ملاحظه‌یی افزایش یافته است. همچنین با دقت در شکل‌های ۴ و ۵ و ملاحظه‌ی جدول ۷ مشاهده می‌شود که شدت کاهش مقاومت فشاری و وزن مخصوص در نمونه‌های حاوی فقط لیکا بسیار کمتر از نمونه‌ی حاوی باگاس بوده است. لازم به ذکر است که شیب نمودار مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی صفر تا ۱۰ درصد لیکا کمتر از همین محدوده در نمونه‌های حاوی ترکیب لیکا و باگاس بوده است. این در حالی است که شیب قسمت ۱۰ تا ۲۰ درصد و همچنین ۲۰ تا ۳۰ درصد در هر دو طرح اختلاط با لیکا و با سبک‌دانه‌ی مخلوط، نزدیک به هم هستند. از سوی دیگر، با دقت در داده‌های مربوط به مقاومت فشاری و همچنین وزن مخصوص در جدول‌های ۶ و ۷ و شکل ۶ و همچنین شکل ۴ مشاهده می‌شود که در هر دو سری نمونه‌ها، وزن مخصوص با مقاومت فشاری رابطه‌ی عکس دارد، که این موضوع منطقی و به علت جایگزین شدن سنگ‌دانه‌ها با سبک‌دانه‌ی لیکا و الیاف باگاس است؛ به طوری که در نمونه‌ی ۲۸ روزه‌ی بتن با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد سبک‌دانه، مقاومت فشاری در بتن با سبک‌دانه‌ی مخلوط به ترتیب ۴۵، ۵۷ و ۷۵ درصد و در بتن حاوی لیکا، ۱۶، ۲۹ درصد کاهش یافته است. با وجود این، با دقت در شکل ۶ و بررسی شیب نمودار ملاحظه می‌شود که در محدوده‌ی بین ۱۰ تا ۲۰ درصد سبک‌دانه، نرخ کاهش مقاومت فشاری به کمترین میزان خود رسیده است. همچنین با توجه به داده‌های جدول ۶ و شکل ۶ مشاهده می‌شود که بتن با ۲۰٪ سبک‌دانه، علاوه بر وزن مخصوص کم، مقاومت خوبی دارد و می‌تواند به عنوان بتن سبک‌سازیه‌یی به کار رود. همچنین بتن‌های با سبک‌دانه‌ی بیشتر از ۲۰٪ به عنوان بتن سبک محسوب می‌شوند. لازم به ذکر است که براساس آزمایش‌های انجام گرفته، بتن‌های حاوی

است، که این کاهش شیب با ایجاد شکستگی‌هایی در نمودار مشاهده می‌شود. میزان شکستگی نمودار در نقطه‌ی مربوط به ۲۰٪ سبک‌دانه به طور مشخصی نسبت به شکستگی مربوط به نقطه‌ی ۱۰٪ سبک‌دانه، شدیدتر شده است. بنابراین به ازاء درصد سبک‌دانه‌ی بالاتر از ۲۰٪، شدت کاهش وزن مخصوص به طور محسوسی کمتر شده است. از سوی دیگر، با مقایسه‌ی میزان کاهش وزن نمونه‌ی حاوی سبک‌دانه (ترکیب لیکا و باگاس) با نمونه‌ی حاوی فقط لیکا مشاهده می‌شود که در نمونه‌های با ۱۰٪ سبک‌دانه و کمتر، میزان کاهش وزن در هر دو سری نمونه‌ها نزدیک به هم بوده و پس از آن شدت کاهش وزن نمونه‌های حاوی باگاس بسیار بیشتر شده است، به طوری که کاهش وزن نمونه‌های با ۲۰ و ۳۰ درصد سبک‌دانه به ترتیب ۱/۷ و ۱/۹ برابر میزان کاهش وزن در نمونه‌های با فقط لیکا بوده است.

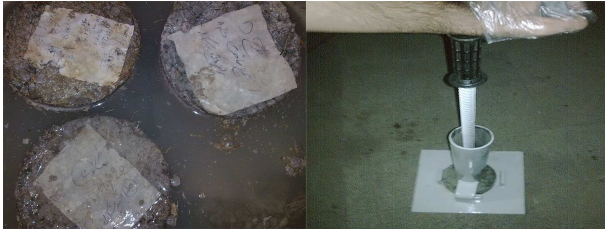
## ۲.۵. مقاومت فشاری

در جدول ۶، میزان مقاومت‌های فشاری و ضربه‌یی و وزن مخصوص نمونه‌های سبک‌دانه و در جدول ۸، میزان تغییرات مقادیر اخیر نسبت به بتن معمولی (بدون سبک‌دانه) ارائه شده است.

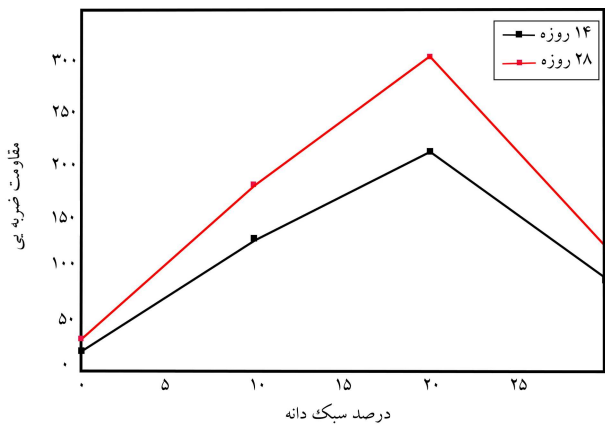
همچنین در شکل ۵، نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های سبک‌دانه (ترکیب لیکا و باگاس) و در کنار آن نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های با فقط لیکا جهت مقایسه ترسیم شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ و شکل ۵ مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی حاوی ترکیب باگاس و لیکا در کلیه‌ی دوره‌های عمل‌آوری، کاهش قابل ملاحظه‌یی نسبت به نمونه‌ی بتن معمولی و همچنین نسبت به نمونه‌های حاوی فقط لیکا از خود نشان داده‌اند. در مقابل، مقاومت ضربه‌یی و میزان جذب



شکل ۸. شکست قطری نمونه‌ی بتن معمولی و شکست قطاعی نمونه با سبک‌دانه.



شکل ۹. آزمایش ضربه بر روی نمونه‌های دیسکی.



شکل ۱۰. نمودار رابطه‌ی مقاومت ضربه‌ی بی با درصد سبک‌دانه.

و جذب انرژی با افزایش میزان سبک‌دانه از صفر تا ۱۰ درصد با شیب بیشتری رشد کرده و در نقطه‌ی با درصد سبک‌دانه‌ی ۱۰، مقاومت ضربه‌ی بی جهت نمونه‌ی ۲۸ روزه به ۱۸۰ رسیده است؛ در حالی که پس از عبور میزان سبک‌دانه از ۱۰٪، شیب نمودار یا به عبارتی شدت افزایش مقاومت ضربه‌ی بی کمتر شده است. با عبور میزان سبک‌دانه از مرز ۳۰٪، نمودار نزولی شده و میزان مقاومت ضربه‌ی بی شروع به کاهش کرده است؛ به طوری که در انتهای نمودار برای بتن ۲۸ روزه حاوی ۳۰٪ سبک‌دانه، عدد ضربه ۱۲۱ است. در شکل ۱۱، نمودارهای مقاومت ضربه‌ی بی نمونه‌های حاوی سبک‌دانه (لیکا و باگاس) و نمونه‌های حاوی فقط لیکا مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آنها و همچنین مشاهده‌ی جدول ۹ ملاحظه می‌شود که مقاومت ضربه‌ی بی نمودارهای حاوی سبک‌دانه‌ی مخلوط با نرخ بسیار سریع‌تری افزایش یافته است، به طوری که در ۲۰٪، بیشینه‌ی اختلاف را با نمونه‌ی حاوی لیکا داشته است، که میزان آن در حدود ۷ برابر نمونه‌ی حاوی فقط لیکا بوده است. در شکل ۱۲، رابطه‌ی بین تغییرات مقاومت ضربه‌ی بی در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه‌ی بتن، نسبت به مقاومت فشاری در همین سنین مشاهده می‌شود. هر یک از نقاط مشخص شده در نمودارها مربوط به یک طرح اختلاط با درصد سبک‌دانه‌ی ثابت است. در ضلع افقی نمودار، تغییرات مقاومت فشاری در بازه‌ی زمانی ۱۴ تا ۲۸ روزه و در محور



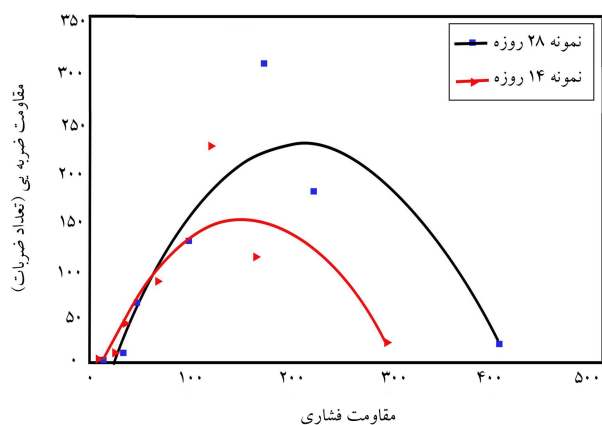
شکل ۷. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی.

۶۰٪ سبک‌دانه، به علت افت ۹۰ درصدی مقاومت فشاری، کاربرد محدودی دارند و بتن‌های حاوی ۷۰٪ سبک‌دانه قادر به تحمل هیچ نیرویی نیستند. رابطه‌ی بین مقاومت فشاری با درصد سبک‌دانه، در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های بتنی حاوی سبک‌دانه (ترکیب لیکا و باگاس) در شکل ۶ مشاهده می‌شوند. همان طور که در جدول ۶ نیز مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌ی ۲۸ روزه بدون سبک‌دانه، ۴۰۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است، که با افزایش درصد سبک‌دانه و الیاف باگاس، مقاومت فشاری کاهش شدیدی داشته و در نمونه با ۱۰٪ سبک‌دانه، مقاومت فشاری کاهش یافته و به ۲۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است؛ ولی پس از آن، با رسیدن میزان درصد سبک‌دانه به ۲۰٪، همان طور که از شکستگی و کاهش شیب نمودار نیز مشخص است، با افزایش مقدار سبک‌دانه، کاهش مقاومت شدت کمتری از خود نشان داده است، که این موضوع می‌تواند به علت جای‌گیری سبک‌دانه‌ها در فضاهای خالی ایجاد شده در مصالح و همچنین در اثر اشغال فضای کمتر به علت فشردگی الیاف باگاس باشد. و در نهایت در نمونه‌ی حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه، مقاومت فشاری به مقدار ۱۷۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است. پس از آن، تا انتهای نمودار مجدداً شیب افزایش یافته و نرخ کاهش مقاومت بیشتر شده است، تا نهایتاً در بتن با ۳۰٪ سبک‌دانه، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است. روند کلی نمودار در نمونه‌های با سن ۱۴ روزه نیز تا حدود زیادی مشابه نمونه‌های ۲۸ روزه است. در شکل ۷، تصویر نمونه‌های مکعبی و آزمایش مقاومت فشاری بر روی آنها مشاهده می‌شود.

### ۳.۵. مقاومت ضربه‌ی بی

همان طور که در تصویر سمت راست شکل ۸ مشاهده می‌شود، شکست نمونه‌های دیسکی فاقد سبک‌دانه تحت آزمایش ضربه به صورت قطری است، در حالی که با توجه به تصویر سمت چپ در همان شکل، در نمونه‌های دیسکی حاوی سبک‌دانه، به علت وجود الیاف باگاس تحت آزمایش ضربه، شکست نمونه‌های مذکور به صورت قطاعی رخ داده است. در شکل ۹، تصویر نمونه‌های دیسکی و آزمایش مقاومت ضربه‌ی بی بر روی آنها مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۰، میزان مقاومت ضربه‌ی بی (تعداد ضربه‌های وارده از سوی چکش مخصوص تا رسیدن به اولین ترک قابل مشاهده) نسبت به درصد سبک‌دانه مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن و همچنین با دقت در جدول ۶ می‌توان دریافت که بیشینه‌ی مقاومت ضربه‌ی بی، مربوط به بتن ۲۸ روزه، با ۲۰٪ سبک‌دانه و به میزان ۳۰۵ است. این در حالی است که این رقم در بتن با سن ۲۸ روز و بدون سبک‌دانه، ۳۱ بوده است، که از این جا می‌توان به تأثیر چشمگیر سبک‌دانه و الیاف به کار رفته در مخلوط، در قابلیت جذب انرژی و مقاومت بتن در برابر ضربه پی برد. همچنین با دقت در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که میزان افزایش مقاومت ضربه‌ی بی



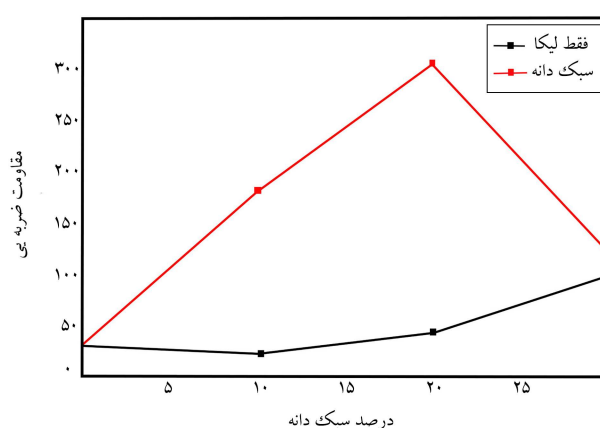
شکل ۱۲. رابطه‌ی بین مقاومت‌های فشاری و ضربه‌یی.

جدول ۹. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های نمونه‌های ۲۸ روزه‌ی سبک‌دانه (لیکا و باگاس) با نمونه‌ی حاوی فقط لیکا.

درصد سبک‌دانه (%)	مقاومت فشاری		مقاومت ضربه‌یی	
	لیکا	سبک‌دانه	لیکا	سبک‌دانه
۱۰	۳۷۸	۲۲۰	۲۷	۱۸۰
۲۰	۳۴۰	۱۷۳	۴۳	۳۰۵
۳۰	۲۸۶	۱۰۰	۱۰۰	۱۲۱

اعداد مذکور، ملاحظه می‌شود با وجود این‌که نمودار رابطه‌ی مقاومت‌های فشاری و ضربه‌یی، دید خوبی از روند ارتباط بین دو مقاومت مذکور و نقاط بیشینه و کمینه‌ی نمودارها و شیب‌ها ارائه می‌دهد، ولی از بررسی نمودارها، نمی‌توان یک رابطه‌ی مشخص و دقیق جهت محاسبه‌ی مقادیر مقاومت ضربه‌یی با استفاده از مقاومت فشاری به دست آورد و مقاومت ضربه‌یی باید جداگانه محاسبه شود. با بررسی نسبت مقاومت ضربه‌یی ۱۴ به ۲۸ روزه، که این نسبت تأثیر زمان (سن بتن) در روند افزایش هر مقاومت را مشخص می‌کند، نتیجه گرفته می‌شود که این نسبت در اغلب موارد عددی نزدیک به  $0.75/0$  است. با بررسی این نسبت در نقاط  $0$ ،  $10$ ،  $20$  و  $30$  درصد سبک‌دانه ملاحظه می‌شود که با توجه به کوچک‌تر بودن نسبت مقاومت ضربه‌یی ۱۴ به ۲۸ روزه، در مقایسه با مقاومت فشاری ۱۴ به ۲۸ روزه، زمان تأثیر بیشتری در روند کسب مقاومت فشاری به نسبت مقاومت ضربه‌یی دارد، که این موضوع می‌تواند به تأثیر مقدار شکر باقی‌مانده در باگاس در تأخیر درگیرش بتن مرتبط باشد. با توجه به ساخت نمونه‌هایی با فقط لیکا، جهت مقایسه با نتایج نمونه‌های حاوی ترکیب لیکا و باگاس، علاوه بر ترسیم نمودارهای مقایسه‌یی نتایج وزن مخصوص، مقاومت در برابر ضربه و مقاومت فشاری و نمایش نتایج در جدول‌های ۶ و ۷، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و ضربه‌یی هر دو سری نمونه‌ها جهت مقایسه، به صورت عددی در جدول ۹ نیز ارائه شده است.

در شکل ۱۳، رابطه‌ی ریاضی بین درصد سبک‌دانه و مقاومت ضربه‌یی با یک منحنی درجه‌ی ۳ تقریب زده شده است، که در آن متغیر  $i$  مقاومت ضربه‌یی و یا به عبارتی، تعداد ضربه‌ها جهت ایجاد اولین ترک قابل مشاهده و  $V$  درصد سبک‌دانه‌ی جایگزین شده به جای سنگ‌دانه‌ها هستند. همچنین در جدول ۱۰، به مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش ضربه بر روی نمونه‌های دیسکی ۲۸ روزه و نتایج حاصل از مدل ریاضی پیشنهادی پرداخته شده است. لازم به ذکر است که جهت دقت بیشتر مدل ریاضی، نمونه‌های با درصد سبک‌دانه‌های  $40$ ،  $50$  و  $60$  نیز ساخته شده و در سن ۲۸ روزه بر روی آنها آزمایش ضربه انجام شده است. جهت ایجاد



شکل ۱۱. نمودار مقایسه‌ی رابطه‌ی مقاومت ضربه‌یی با درصد سبک‌دانه و درصد لیکا.

عمودی میزان مقاومت ضربه‌یی متناظر با هر مقاومت فشاری نمایش داده شده است. خطوط منحنی و نقاط قرمز رنگ مربوط به بتن با سن ۱۴ روز و خطوط منحنی و نقاط مشکی رنگ مربوط به بتن با سن ۲۸ روز است. نمودارهای ترسیم شده، براساس نقاط به دست آمده از آزمایش‌ها و پوش دادن منحنی درجه‌ی ۲ با استفاده از نرم‌افزار اکسل به دست آمده است. جهت مقایسه‌ی هر چه بهتر، منحنی‌های ۱۴ و ۲۸ روزه در قالب یک نمودار ترسیم شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، شکل کلی نمودار ۱۴ روزه مشابه نمودار ۲۸ روزه است؛ با این تفاوت که نمودار ۱۴ روزه به سمت چپ حرکت کرده و مقادیر بیشینه‌ی آن کاهش یافته‌اند. با مشاهده‌ی نمودارها ملاحظه می‌شود که با افزایش مقاومت فشاری از صفر تا ۲۰ درصد، هم در نمونه‌ی ۱۴ روزه و هم ۲۸ روزه، شیب نمودارها کاهش یافته است. در نقاط اولیه‌ی نمودار با مقاومت‌های فشاری کم، شیب نمودار ۱۴ روزه کمتر از ۲۸ روزه بوده است، که این موضوع با مشاهده‌ی تلاقی نمودارها در محل مقاومت فشاری  $(78 \text{ kg/cm}^2)$  و شروع نمودار ۱۴ روزه از مقادیر مقاومت فشاری پایین‌تر مشخص است. در بررسی دقیق‌تر نمودارها می‌توان با محاسبه‌ی نسبت مقاومت ضربه‌یی به مقاومت فشاری آنها، به میزان تأثیر تغییرات مقاومت فشاری در مقاومت ضربه‌یی دست یافت. بیشترین نسبت به دست آمده مربوط به نقطه با مقاومت فشاری  $(173 \text{ kg/m}^2)$  (نمونه با  $20\%$  سبک‌دانه) و کمترین نسبت به دست آمده مربوط به نقطه با مقاومت فشاری  $(15 \text{ kg/m}^2)$  (نمونه با  $60\%$  سبک‌دانه) است. این موضوع نشان می‌دهد که در نمونه با  $20\%$  سبک‌دانه به ازاء هر واحد افزایش در مقاومت فشاری، مقاومت ضربه‌یی به نسبت دیگر نمونه‌ها، بیشترین مقدار افزایش را داشته است. همچنین، با بررسی نمودارهای موجود در شکل ۱۲ می‌توان دریافت که نسبت مقاومت ضربه‌یی به فشاری در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه با افزایش درصد سبک‌دانه تا  $20\%$ ، افزایش یافته و برای بتن با  $30\%$  سبک‌دانه، نسبت اخیر در مقایسه با بتن حاوی  $20\%$  سبک‌دانه (ترکیب لیکا و باگاس) کاهش یافته است. در نتیجه، بتن حاوی  $20\%$  سبک‌دانه، با داشتن وزن مخصوص و مقاومت فشاری مناسب و بالاترین مقاومت ضربه‌یی، نمونه‌ی بهینه است.

نسبت مقاومت ضربه‌یی به فشاری در بتن با  $20\%$  سبک‌دانه برابر با  $1/76$  بوده است، که بیشترین نسبت مقاومت ضربه‌یی به فشاری است. این نسبت در بتن با صفر درصد سبک‌دانه، برابر  $0.76/0$ ، در بتن با  $10\%$  سبک‌دانه برابر  $0.82/0$  و در بتن با  $30\%$  سبک‌دانه، برابر  $1/21$  بوده است. با دقت در نمودار و محاسبه‌ی



نسبت به بتن معمولی دارد. تحت بارگذاری ضربه‌یی، اغلب بتن‌های معمولی به صورت قطری ترک می‌خورند و گسیخته می‌شوند، ولی بتن‌های حاوی لیکا و باگاس به صورت جدا شدن قطاعی از دیسک، گسیخته می‌شوند (شکل ۸).

۲- بتن‌های حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد سبک‌دانه را می‌توان به عنوان بتن سبک در نظر گرفت. همچنین براساس تعریف بتن سبک سازه‌یی، بتن حاوی ۲۰٪ سبک‌دانه را می‌توان به عنوان بتن سبک سازه‌یی به شمار آورد، که مزیت دیگر آن نسبت به بتن معمولی، مقاومت ضربه‌یی و میزان جذب انرژی بالای آن است.

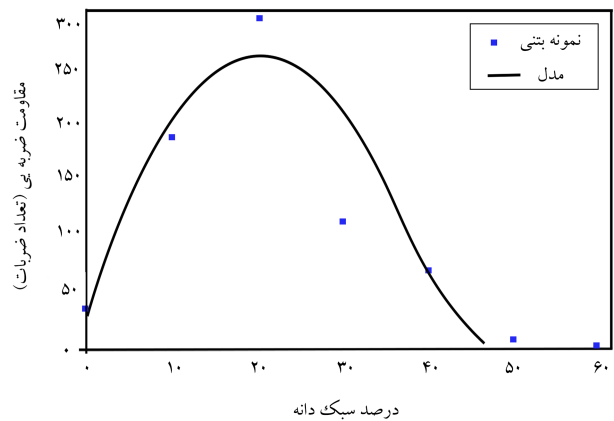
۳- نسبت مقاومت ضربه‌یی به مقاومت فشاری با افزایش درصد سبک‌دانه تا ۲۰٪، افزایش یافته و برای بتن ۳۰٪ سبک‌دانه، نسبت اخیر شروع به کاهش کرده است. بیشترین نسبت مقاومت ضربه‌یی به فشاری مربوط به بتن حاوی ۲۰٪ باگاس بوده است، که ۱/۷۶ است.

۴- در نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد مخلوط باگاس و لیکا، میزان افزایش مقاومت ضربه‌یی در حدود ۷ برابر نمونه‌های حاوی فقط لیکا و در نمونه‌های ۳۰٪، مقاومت ضربه‌یی آنها نزدیک به هم بوده است. همچنین، میزان کاهش وزن مخصوص نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد مخلوط باگاس و لیکا، به ترتیب ۱/۷ و ۱/۹ برابر میزان کاهش وزن در نمونه‌های با فقط لیکاست.

۵- مقاومت فشاری بتن با جایگزینی سبک‌دانه به جای سنگ‌دانه‌ها کاهش می‌یابد، که این امر را می‌توان به ضعیف شدن و حذف اسکلت اصلی بتن یعنی سنگ‌دانه‌ها نسبت داد.

۶- مقاومت ضربه‌یی و میزان جذب انرژی بتن با ۲۰٪ سبک‌دانه در کلیه‌ی سنین از بتن معمولی، بسیار بیشتر است، که این امر با داشتن مقاومت فشاری قابل قبول ۲۸ روزه‌ی آن یک مزیت محسوب می‌شود.

۷- بتن‌های الیافی عمدتاً مقاومت ضربه‌یی و توانایی جذب انرژی بالاتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند، که این موضوع را می‌توان به قابلیت جذب انرژی الیاف موجود در بتن الیافی نسبت داد. هر چه این قابلیت الیاف بیشتر باشد، بتن حاصل، مقاومت ضربه‌یی بالاتری از خود نشان می‌دهد. با بررسی مطالعات پیشین بر روی مقاومت ضربه‌یی بتن حاوی الیاف فولادی و مقایسه‌ی نتایج آن با بتن حاوی الیاف باگاس ملاحظه می‌شود که بتن حاوی الیاف باگاس، مقاومت ضربه‌یی بسیار بالاتر و البته مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن حاوی الیاف فولادی دارد. در شرایطی که امکان وقوع ضربه‌ها بر بتن وجود دارد (با توجه به این‌که محاسبه از طریق فرمول با استفاده از مقاومت فشاری بتن ممکن است، دقت لازم را نداشته باشد)، لازم است مقاومت ضربه‌یی مستقیماً از طریق آزمایش ضربه به دست آورده شود، که به نظر می‌رسد روش ضربه‌های مکرر در دسترس‌ترین و کم‌خطرترین روش در مقایسه با دیگر روش‌هاست و در کارگاه نیز به راحتی انجام می‌شود.



شکل ۱۳. رابطه‌ی بین مقاومت ضربه‌یی و درصد سبک‌دانه.

جدول ۱۰. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های نمونه‌های ۲۸ روزه با نتایج حاصل از مدل.

درصد سبک‌دانه (%)	مقاومت فشاری مدل نتایج واقعی	مقاومت فشاری مدل نتایج واقعی	مقاومت ضربه‌یی
۰	۲۱/۳	۴۰/۵	۳۱
۱۰	۲۳۴	۲۲۰	۱۸۰
۲۰	۲۲۱/۸	۱۷۳	۳۰۵
۳۰	۱۴۹	۱۰۰	۱۲۱

معادله، ابتدا اعداد حاصل از آزمایش‌ها بر روی نمودار مشخص و سپس با استفاده نرم‌افزار اکسل و پوش دادن چندین نمودار و سعی و خطا، نزدیک‌ترین معادله به ارقام واقعی انتخاب شده است. همان‌طور که در جدول ۱۰ نیز مشاهده می‌شود در اغلب موارد نتایج حاصل از معادله، اختلاف اندکی با نتایج واقعی دارند. بنابراین، جهت محاسبه‌ی مقادیر مقاومت ضربه‌یی نسبت به درصد سبک‌دانه در محدوده‌ی نشان داده شده و با شرایط مشابه آزمایش‌های صورت گرفته در پژوهش حاضر، می‌توان با دقت خوبی از معادله استفاده کرد. با توجه به شکل ۱۳ و تحلیل آماری داده‌ها، رابطه‌ی بین مقاومت ضربه‌یی (i) و درصد سبک‌دانه (v) در نمونه‌های ۲۸ روزه به صورت رابطه‌ی ۱ تقریب زده می‌شود:

$$i = 0.01v^2 - 1/13v + 29/0.5v + 24/88$$

$$R^2 = 0.89 \quad (1)$$

## ۶. نتیجه‌گیری

۱- بتن حاوی لیکا و باگاس، مقاومت ضربه‌یی و میزان جذب انرژی بسیار بالاتری

## پانویس‌ها

1. Min
2. Ramkumar
3. Banthia
4. Chusilp
5. MATLAB

## منابع (References)

1. WCED, "Our common future", *London Oxford University Press* (1987).
2. Linnerud, K. "Closing the sustainable development gap a global study of goal interactions", *Wiley Online*, **29**(1), p. 238281/F60 (2021).
3. Meyer, C. "The greening of the concrete industry", *Cement & Concrete Composites*, **31**, pp. 601-605 (2009).
4. Borsi, S.A. "Investigation of mechanical properties of concrete containing leca grain and bagasse mortar under compressive and impact loads", *M.Sc. thesis, Azad University of Dezful*, pp. 1-50 (In Persian) (1390/2012).
5. Gagg, C.R. "Cement and concrete as an engineering material an historic appraisal and case study analysis", *Engineering Failure Analysis*, **40**, pp. 114-40 (2014).
6. Budafpour, S. "Study of strength behavior of lightweight concrete types and their application in structural reinforcement", *First National Conference on Infrastructure Engineering and Management*, University of Tehran (In Persian) (1387/2009).
7. José, A. and Bogas, J. "Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete", *Figueiredo, J. of Cleaner Production*, Elsevier, **89**, pp 187-195 (2015).
8. Osama, Y., Reza, H., Julie, E. and et al. "An experimental investigation of the mechanical performance and structural application of LECA-Rubcrete", *Construction and Building Materials*, **175**, pp. 239-253 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.18>.
9. Jovana, J. "Analytical prescription models of lightweight concrete mixtures with (leca) expanded clay aggregate", *Journal of SSRG*, **7**(4), pp. 22-27 (2020).
10. Kuutti, J. "Modelling of projectile penetration into lightweight expanded clay aggregate", *J. of Dynamic Behavior Material Springer*, **2**, pp. 425-437 (2016).
11. Modi, F., Medrasi, Sh. and Dashti, P. "Evaluation of properties of lightweight structural concrete containing slag and the effect of concrete pumping on the properties of the optimal mix design", *12th National Concrete Conference*, Tehran (In Persian) (1398/2020).
12. Sharbatdar, M.K., Ghasemi Naghibdehi, M.V. and Dehghan, M. "Investigation of the behavior of two-layer reinforced concrete slabs under impact loading", *6th National Congress of Civil Engineering*, Semnan University (2011) (In Persian) (1389/2011).
13. Min, K., Hong, C. and Wonsik, S. "Development of impact resistant high-strength strain-hardening cementitious composites (HS-SHCC) superior to reactive powder concrete (RPC) under flexure", *Journal of Building Engineering Elsevier* (2021).
14. Ramkumar, G., Murali, B., Neha, P. and et al. "Development of a novel low carbon cementitious two stage layered fibrous concrete with superior impact strength", *Journal of Building Engineering*, **25**, 100841 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100841>.
15. Xu, L.Y., Cai, F. and XueYing, Y. "Numerical analyses of local damage of concrete slabs by normal impact of deformable solid projectiles", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **23**(1), pp. 5121-5132 (2019).
16. Bantia, N., Bindiganavile, V. and Jones, J. "Fiber reinforced concrete in precast", *PCI Journal*, **57**(3), pp. 33-46 (2012).
17. Ameri, F. and Jorge, D. "Steel fibre-reinforced high-strength concrete incorporating copper slag mechanical, gamma-ray shielding, impact resistance, and microstructural characteristics", *J. of Building Engineering, Elsevier*, **29**, p. 101118 (2020).
18. Saif, K. and Mezzal, Z. "Effect of discarded steel fibers on impact resistance, flexural toughness and fracture energy of high strength self compacting concrete exposed to elevated temperatures", *Fire Safety Journal*, **121**, p. 103271 (2021).
19. Abdollahzadeh, R. and Ranjbar, M. "Evaluation of the behavior of semi-lightweight concrete with steel fiber lycopene", *6th National Congress of Civil Engineering*, University of Semnan (In Persian) (1389/2011).
20. Chusilp, N., Jaturapitakhul, C. and Kaittikomol, K. "Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete", *Construction and Building Materials Journal*, Elsevier, **23**(11), pp. 3352-3358 (2009).
21. Sadraei, H., Khaloo, A., Abdous, H. and Taherkhani, A. "Laboratory study of impact performance of concrete slabs reinforced with GFRP rebar", *3rd International Conference on Applied Research in Structural Engineering and Construction Management*, Tehran (In Persian) (1397/2019).
22. Steven, K. and William P. *Design and Control of Concrete Mixes*, Tehran, Sharif University of Technology, Translated by Alireza khaloo, Mahmoud Irajian, Scientific Publishing Institute, pp. 70-110 (2009).
23. ASTM C150. "Standard specification for portland cement", *American Standards for Testing and Materials* (2004).
24. Golbabaie, F. "The use of bagasse in the construction of reinforced wood-fiber cement composite", *4th Technology Development Conference and International Conference on New Findings of Iranian Architecture and Construction Industry* (In Persian) (1398/2020).
25. Rezende, C.A., de Lima, M.A. and Maziero, P. "Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility", *Biotechnol Biofuels*, **4**, p. 54 (2011).
26. Priyanka, M., Karthikeyan, M. and Sri Rama, M. "Development of mix proportions of geopolymer lightweight aggregate concrete with LECA", *Materials Today*, **27**(2), pp.958-962 (2020). DOI:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.271>.
27. Ardakani, A. and Yazdani, M. "Comparison of the characteristics of expanded clay grains with specific gravity and different diameters", *The 1st National Conference on Lightweight Concrete University of Tehran* (In Persian) (1389/2011).
28. ACI committee, "State of the art report on fiber reinforced concrete", *ACI Structural Journal* (2021).