

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر ترکیب خاکستر پسماند ضایعات کاغذ با سیلیکافیوم در خواص مکانیکی بتن

جلال پورآذر (دانشجوی دکتری)

محسن نجارچی\* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اراک

بیژن صناعی (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد بکان، آذربایجان غربی

محمد مهدی نجفی زاده (استاد)

سید محمد میرحسینی هژاوه (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اراک

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)  
دوری ۲ - ۳۷، شمار ۱/۱، ص. ۶۰-۴۷

پژوهش حاضر به صورت آزمایشگاهی به بررسی تأثیر خاکستر پسماند کاغذ به همراه سیلیکافیوم در خواص مکانیکی بتن در سازه‌های بتنی پرداخته و در آن درصد‌های مختلفی از خاکستر پسماند کاغذ و سیلیکافیوم برابر با (۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد) جایگزین سیمان مصرفی شده است. ۲۵ طرح اختلاط تهیه شده و بر روی آنها آزمایش‌های فشار، کشش غیرمستقیم، کشش ناشی از خمش، ضربه، اسلامپ، سرعت پالس اولتراسونیک، خزش و آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی در سنین مختلف انجام شده است. روابطی برای بتن حاوی خاکستر پسماند کاغذ همراه سیلیکافیوم ارائه شده است، که با آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا و بتن ایران مقایسه و برای پیش‌بینی رفتار بتن حاوی خاکستر پسماند کاغذ همراه سیلیکافیوم پیشنهاد شده است. روابطی تجربی بر پایه‌ی نتایج پژوهش حاضر برای مقاومت کششی غیرمستقیم با مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، مقاومت کششی ناشی از خمش با مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی، مقاومت فشاری ارائه شده است، به طوری که بتوان از معادلات مذکور در پیش‌بینی رفتار بتن حاوی خاکستر پسماند کاغذ همراه سیلیکافیوم استفاده کرد.

jalal.pourazar2@gmail.com  
m.najarchi@iau-arak.ac.ir  
sanaatyjap@gmail.com  
m.najafizadeh@iau-arak.ac.ir  
m.mirhoseini@iau-arak.ac.ir

واژگان کلیدی: طرح اختلاط، بتن، سیلیکافیوم، خاکستر پسماند کاغذ، سیمان.

## ۱. مقدمه

تبدیل کرد. [۶] بعدها مطالعات دیگری انجام شد که این موضوع را تأیید کرد. [۷-۱۰] آثار ضایعات خاکستر پسماند کاغذ کارخانجات در خواص بتن‌های غیربرابر در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بررسی شد و از دو نوع پسماند کارخانه‌ی مقواسازی (پسماند نوع ۱: حاوی مقوا و ماسه و پسماند نوع ۲: حاوی نایلون، یونولیت و مقوا) که بیشترین حجم پسماندها را تشکیل می‌دهند، استفاده شد. مشخصات فیزیکی و میکروبی پسماندها مطابق دستورالعمل ASTM C۳۳، [۱۱] اندازه‌گیری شد. هانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، [۱۲] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی بتن‌های آبریز حاوی ضایعات خاکستر پسماند کاغذ پرداختند و اثر پسماند کاغذ را در کارایی، مقاومت و خواص انتقالی بتن از جمله: جذب آب، نفوذپذیری و هدایت الکتریکی بتن ارزیابی کردند. احمد و همکاران (۲۰۱۳)، [۱۳] مطالعات آزمایشگاهی با هدف امکان‌پذیری استفاده از ضایعات خاکستر پسماند کاغذ را در بتن بررسی کردند و

هدف از پژوهش حاضر، ارائه‌ی طرح‌های مناسب و اقتصادی در ساخت بتن با افزودنی‌های پسماند کاغذ است، تا مینایی جهت افزایش کاربرد و اقتصادی بودن این نوع بتن از سازه‌ها باشد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که بعضی از ضایعات حاصل از صنایع کاغذ و مقوا می‌تواند به عنوان مواد اولیه در صنعت ساختمان به کار رود. [۵-۱] مطالعات پیشین مرتبط با ضایعات پسماند خاکستر کاغذ بیشتر بر روی خواص هیدرولیکی و واکنش‌پذیری و استفاده‌ی بالقوه از آنها به عنوان مواد سیمانی بوده‌اند. به عنوان مثال، پرا و آمروژ<sup>۱</sup> (۱۹۹۸) نشان دادند که ضایعات خاکستر پسماند کاغذ در دمای ۷۰° تا ۷۵° درجه‌ی سانتی‌گراد را می‌توان به مواد آهکی چسبیده

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۹/۲/۱۷، پذیرش ۱۳۹۹/۳/۱۹.

DOI:10.24200/J30.2020.55176.2709

در یافتند که استفاده از خاکستر پسماند کاغذ به میزان ۵٪ وزنی سیمان و ذراتی کوچک‌تر از ۹۰ میکرومتر، بدون آن‌که کارایی بتن را کاهش دهد، می‌تواند در بهبود خواص بتن مؤثر واقع شود. یانگ شیک<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۲)،<sup>[۱۴]</sup> اثر پسماند کاغذ در اختلاط بتن و تأثیر آن در کاهش وزن و مقاومت فشاری بتن در محیط‌های سولفات سدیم و سولفات منیزیم را بررسی و بیان کردند که محیط‌های مذکور باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌شوند؛ اما نمونه‌های قرار گرفته در سولفات منیزیم، کاهش مقاومت بیشتری دارند. بیرا و کافی (سال انتشار)،<sup>[۱۵]</sup> نیز خواص مکانیکی بتن با استفاده از نسبت‌های مختلف پسماند کاغذ و پوزولان طبیعی را بررسی کردند و دریافتند که جایگزینی ۲۰٪ پوزولان طبیعی به جای سیمان سبب بهبود دوام بتن شده است.

همچنین سیفی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی عملکرد مکانیکی ملات بدون سیمان با استفاده از خاکستر پسماند ضایعات کاغذ و سرپاره کوره پرداختند.<sup>[۱۶]</sup> باسیم<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۸) نیز به بررسی تأثیر سیلیکافیوم و لاستیک در بتن خودمترکم پرداختند و دریافتند که سیلیکافیوم در بتن باعث بهبود مقاومت کششی و فشاری و کاهش ترک‌های خمشی می‌شود، در حالی که استفاده از لاستیک خرد شده به تنهایی تأثیر منفی در خصوصیات مکانیکی بتن دارد. در حالی که ترکیب سیلیکافیوم و لاستیک خرد شده در بتن باعث افزایش خواص مکانیکی بتن شده است.<sup>[۱۷]</sup>

سیتی شاهده و همکاران (۲۰۱۳) هم به بررسی تأثیر خاکستر پسماند کاغذ و مصالح بازیافتی در مقاومت فشاری در بتن سبک پرداختند و نتیجه گرفتند که استفاده از خاکستر پسماند کاغذ به میزان بیشینه ۲۰٪ و مصالح بازیافتی به میزان بیشینه ۱۵٪، باعث بهبود مقاومت فشاری در بتن سبک می‌شود.<sup>[۱۸]</sup> مالاوارا<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر خاکستر پسماند کاغذ در بتن را به عنوان جایگزین جزئی در سیمان بررسی کردند و بر اساس مطالعات ایشان، خاکستر پسماند کاغذ به میزان بیشینه ۵٪ وزنی سیمان باعث بهبود در مقاومت فشاری بتن، دوام بتن و کاهش جذب آب نسبت به بتن معمولی می‌شود.<sup>[۱۹]</sup>

همچنین لوگس‌واران و راماکریشنا<sup>۶</sup> (۲۰۱۹)، در بررسی خاکستر پسماند کاغذ به عنوان جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی در بتن دریافتند که خاکستر پسماند کاغذ، خاصیت پوزولانی خوبی را نشان می‌دهد که می‌تواند به عنوان یک ماده‌ی سیمانی مکمل در صنعت سیمان استفاده شود و خاکستر پسماند کاغذ باطله، مواد سازگار با محیط زیست است و هیچ‌گونه خطری برای محیط زیست ندارد.<sup>[۲۰]</sup> چریان وارکی<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، نیز استفاده از خاکستر پسماند کاغذ را به عنوان بخشی از سیمان مصرفی در بتن مطالعه کردند و دریافتند که استفاده از خاکستر پسماند کاغذ به میزان بیشینه ۵٪ وزنی سیمان، باعث بهبود مقاومت فشاری، مقاومت ترک‌خوردگی و مقاومت خمشی نسبت به بتن معمولی می‌شود.<sup>[۲۱]</sup>

از اوایل ۱۹۴۰، پژوهشگران و مؤسسان شرکت‌ها به دنبال شناسایی روش‌های مناسب برای مدیریت مواد زائد جامد صنعت کاغذ بوده‌اند. این تلاش‌ها در حجم قابل توجهی از پژوهش‌ها و تجربه‌های واقعی به طیف گسترده‌ی روش‌های مدیریت مواد زائد جامد منجر شده است. محصول برخی از روش‌های مذکور، گونه‌های مدیریت مواد زائد جامد بادوام و سازگار با محیط زیست است.<sup>[۲۲]</sup>

از آنجایی که به کاربرد ترکیب خاکستر پسماند ضایعات کاغذ با سیلیکافیوم در بتن کمتر توجه شده است، با توجه به افزایش روزافزون بتن بازیافتی و نیاز مبرم به شناخت خصوصیات کامل بتن حاصل و مطالعات بررسی شده در زمینه‌ی اخیر، مبحث افزودنی‌های پسماند کاغذ از مباحث جدید است، که پژوهش حاضر براساس آن انجام شده است. از مهم‌ترین اهداف کاربردی پژوهش حاضر، دست‌یابی به بتنی با درصد جذب آب پایین و داشتن مقاومتی مناسب جهت بالا بردن دوام بتن در

سازه‌های هیدرولیکی است، که نوآوری پژوهش حاضر است. استفاده از پسماند‌های ضایعاتی کاغذ کارخانه‌های کاغذسازی ضمن تولید بتنی آبریز می‌تواند در رسیدن به این اهداف کمک قابل توجهی داشته باشد:

صرفه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی، سودآوری و تولید اشتغال، کاهش هزینه‌های انتقال پسماندها به محل دفن، کاهش وزن سازه، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از سوزاندن و دفن پسماندها در خاکچال و تولید بتن سازگار با محیط زیست.

نوشتار حاضر، برای اولین بار تأثیر دو افزودنی خاکستر پسماند کاغذ و سیلیکافیوم را بررسی و طیف وسیعی از خواص بتن را مطالعه کرده است. همچنین یک سری روابط تجربی برای آزمون‌های مختلف در محدوده‌ی پژوهش حاضر ارائه شده است.

## ۲. روش تحقیق

در پژوهش حاضر، بررسی نمونه‌ها به صورت آزمایشگاهی و بر روی نمونه‌های استوانه‌ی مکعبی و منشوری انجام شده است. برای افزایش کیفیت و کاهش خطا، ابتدا دانه‌بندی و آزمایش‌های لازم در مورد مصالح مصرفی ۳ بار تکرار و پس از چند بار اصلاح، طرح‌های اختلاط و دست‌یابی به جواب‌های قابل قبول، طرح اختلاط‌ها نهایی شد. متغیرهای مورد بررسی در مطالعه‌ی حاضر، درصد خاکستر پسماند ضایعات کاغذ و میزان سیلیکافیوم است، که در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بررسی شده‌اند. پس از انجام آزمایش‌ها و با استفاده از مقادیر تنش و کرنش‌های به دست آمده برای بتن‌های حاوی خاکستر پسماند ضایعات کاغذ با سیلیکافیوم، روابط و معادلاتی ارائه شده است؛ به طوری که بتوان از آنها در پیش‌بینی رفتار بتن‌هایی حاوی خاکستر پسماند ضایعات کاغذ با سیلیکافیوم استفاده کرد. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه فنی و مهندسی راه و ترابری استان آذربایجان شرقی همچنین تصاویر SEM در مرکز پژوهش متالوژی رازی کرج انجام شده است.

## ۳. مواد و مصالح

### - سنگ‌دانه‌ها

دانه‌بندی مصالح مطابق با استاندارد کانادا CGSB،<sup>[۲۳]</sup> انجام شده است و سختی ریزدانه و درشت‌دانه‌ی مصرفی در پژوهش حاضر در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همچنین خواص (مشخصات) سنگ‌دانه‌ها در مخلوط‌های بتن در جدول ۱ خلاصه و ارائه شده است.

دانه‌بندی یکی از خصوصیات مهم سنگ‌دانه‌ها به شمار می‌رود. دانه‌بندی به تفکیک اندازه‌ی ذرات سنگ‌دانه با استفاده از الک و بر مبنای محدوده‌ی اندازه‌ی ذرات موجود در سنگ‌دانه مشخص شده است. شکل ۲، دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های طرح حاضر را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمایش دانه‌بندی با الک، از دستگاه «الک لرزان» آزمایشگاهی استفاده شده است. الک‌ها باید الزام‌های مندرج در استاندارد «هیئت استانداردهای کانادا - CGSB» را در مورد الک‌های سیمی بافته برآورده سازند.

### • سیلیکافیوم

مواد معدنی مختلفی برای بهبود و توسعه‌ی کارایی بتن و دوام آن استفاده می‌شود، که یکی از آنها، سیلیکافیوم است، که به عنوان مواد پُرکننده (فیلر) در بتن استفاده می‌شود، که باعث افزایش چسبندگی بین سیمان و سنگ‌دانه‌ها می‌شود.

جدول ۱. خواص (مشخصات) سنگ‌دانه‌ها در مخلوط‌های بتن.

| خواص (مشخصات)                 | سنگ‌دانه‌های درشت | سنگ‌دانه‌های ریز |
|-------------------------------|-------------------|------------------|
| چگالی نسبی (اشباع با سطح خشک) | ۲/۸۳              | ۲/۶۷             |
| چگالی نسبی ظاهری              | ۲/۹۱              | ۲/۷۸             |
| چگالی نسبی (خشک شده در کوره)  | ۲/۷۹              | ۲/۶۱             |
| جذب آب (بر حسب درصد)          | ۱/۲۹              | ۲/۴۴             |

جدول ۲. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی.

| نام ترکیب‌ها         | اکسیدهای تشکیل‌دهنده               | علامت اختصاری |
|----------------------|------------------------------------|---------------|
| ۳ کلسیم سیلیکات      | $3CaO \cdot SiO_2$                 | $C_3S$        |
| ۲ کلسیم سیلیکات      | $2CaO \cdot SiO_2$                 | $C_2S$        |
| ۳ کلسیم آلومینات     | $3CaO \cdot Al_2O_3$               | $C_3A$        |
| ۴ کلسیم آلومینوفیریت | $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ | $C_4aF$       |

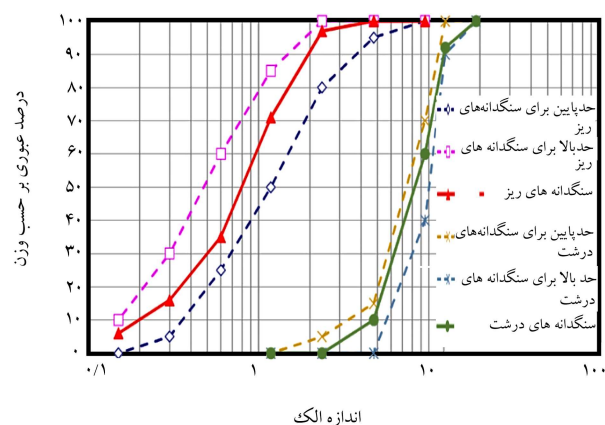
یک نمونه‌ی آزمایشگاهی و انجام چند آزمایش ساده روی نمونه، نتایج مراحل قبلی اصلاح می‌شود و به این ترتیب تأثیر خواص ویژه‌ی مصالح منطقه به نحو مناسب در نتایج طراحی دخالت داده می‌شود. برای هر طرح اختلاط، ۱۸ نمونه‌ی مکعبی و استوانه‌یی ساخته شده است. دو نمونه از هر طرح اختلاط تحت آزمون فشاری، کششی غیرمستقیم (آزمون شکافتن)، ضربه، سایش، درصد جذب آب و نفوذپذیری قرار گرفتند. تمام آزمون‌ها در بازه‌ی سنی ۲۸،۷ و ۹۰ روزه انجام شدند. یک نمونه از هر آزمون به عنوان شاهد و در صورت بروز اختلاف زیاد در بین نمونه‌ها جهت آزمون و رفع تئورانس بیش از حد نمونه‌ها حفظ شدند. در جدول ۳، طرح‌های اختلاط ارائه شده است. باید توجه کرد که مواد افزودنی بر اساس درصد وزن سیمان مصرفی به طرح اختلاط اضافه شده‌اند.

## ۵. نتایج

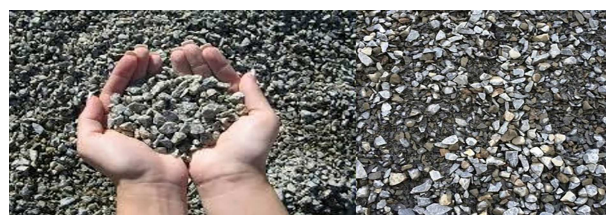
### ۱.۵. نتایج آزمون‌های فشاری

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن یا ملات، نمونه‌ی مکعب یا استوانه تحت اثر بار فشاری که بر حسب نیرو بر واحد سطح مقطع بیان می‌شود، قرار داده شده است. پس از معرفی مواد و مصالح استفاده شده در پژوهش حاضر به بیان آزمایش فشاری انجام گرفته بر روی بتن سخت شده و با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاه به این شرح پرداخته شده است:

آزمایش مقاومت فشاری بتن سخت شده مطابق استاندارد ASTM C۳۹ [۲۴]، بر روی آزمون‌های مکعبی به ابعاد  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متر انجام شده است (شکل ۳). بتن‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه دارای وزن مخصوص خشک شده در هوا معمولاً بین  $2398$  تا  $2450$  ( $\frac{kg}{cm^3}$ ) هستند. بعد از شکستن نمونه‌ها مشاهده شد که سطح بتن کاملاً صاف و خلل و فرج‌ها بسیار کمتر بوده است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که جهت ایجاد بافتی پیوسته‌تر در بتن و کاهش تخلخل آنها، می‌توان از سیلیکافیوم به عنوان مصالح مناسبی به جای درصدی از سیمان مصرفی استفاده کرد. نمونه‌های دارای سیلیکافیوم به دلیل حذف خلل و فرج‌ها، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی مطلوب‌تری نسبت به نمونه‌ی مشابه بدون سیلیکافیوم داشتند. در شکل ۴، روند تغییر مقاومت فشاری کل نمونه‌های ساخته شده با ۲۵ طرح داده



شکل ۱. منحنی‌های دانه‌بندی مصالح سنگ‌دانه.



شکل ۲. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ی استفاده شده در بتن.

#### • سیمان

سیمان مصرفی در آزمایشگاه از نوع سیمان پرتلند تیپ I تولیدی شرکت سیمان ارومیه است، که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

#### • آب اختلاط

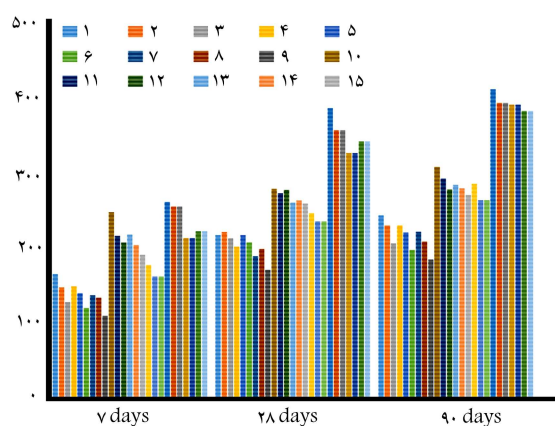
آب موجود در مخلوط بتن یا ملات یا دوغاب، غیر از آب جذب شده‌ی سنگ‌دانه است، که شامل آب پیمانه شده و رطوبت آزاد سنگ‌دانه است.

## ۴. طرح‌های اختلاط

در پژوهش حاضر، طرح اختلاط بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ی ۲۱۱-ACL انجام شده است. مزیت استفاده از روش اخیر آن است که در مراحل پایانی طراحی، با ساخت

جدول ۳. طرح‌های اختلاط.

| شماره طرح | سیمان | ماسه | شن   | نسبت آب به سیمان | خاکستر پسماند ضایعات کاغذ (درصد) | سیلیکا فوم (درصد) |
|-----------|-------|------|------|------------------|----------------------------------|-------------------|
| ۱         | ۴۰۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴              | ۰                                | ۰                 |
| ۲         | ۳۹۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۱             | ۰                                | ۲/۵               |
| ۳         | ۳۸۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۲             | ۰                                | ۵                 |
| ۴         | ۳۷۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۳             | ۰                                | ۷/۵               |
| ۵         | ۳۶۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۴             | ۰                                | ۱۰                |
| ۶         | ۳۹۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۱             | ۲/۵                              | ۰                 |
| ۷         | ۳۸۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۲             | ۲/۵                              | ۲/۵               |
| ۸         | ۳۷۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۳             | ۲/۵                              | ۵                 |
| ۹         | ۳۶۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۴             | ۲/۵                              | ۷/۵               |
| ۱۰        | ۳۵۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۵             | ۲/۵                              | ۱۰                |
| ۱۱        | ۳۸۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۲             | ۵                                | ۰                 |
| ۱۲        | ۳۷۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۳             | ۵                                | ۲/۵               |
| ۱۳        | ۳۶۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۴             | ۵                                | ۵                 |
| ۱۴        | ۳۵۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۵۷            | ۵                                | ۷/۵               |
| ۱۵        | ۳۴۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۷             | ۵                                | ۱                 |
| ۱۶        | ۳۷۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۳             | ۷/۵                              | ۲/۵               |
| ۱۷        | ۳۶۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۴             | ۷/۵                              | ۲/۵               |
| ۱۸        | ۳۵۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۵۷            | ۰/۴                              | ۷/۵               |
| ۱۹        | ۳۴۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۷             | ۰/۴                              | ۷/۵               |
| ۲۰        | ۳۳۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۸             | ۰/۴                              | ۷/۵               |
| ۲۱        | ۳۶۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۴             | ۰/۴                              | ۱۰                |
| ۲۲        | ۳۵۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۵۷            | ۰/۴                              | ۱۰                |
| ۲۳        | ۳۴۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۷             | ۰/۴                              | ۱۰                |
| ۲۴        | ۳۳۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۴۸             | ۰/۴                              | ۱۰                |
| ۲۵        | ۳۲۰   | ۶۰۴  | ۱۱۷۲ | ۰/۵              | ۰/۴                              | ۱۰                |



شکل ۴. روند تغییر مقاومت فشاری کلیه طرح‌های اختلاط.



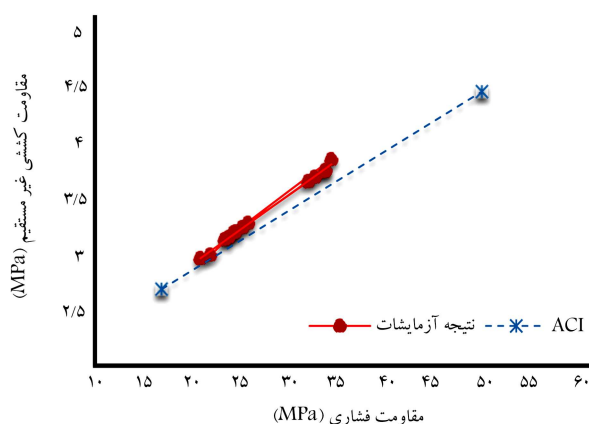
شکل ۳. آزمایش فشاری تک‌محور.

که علت آن داشتن مقاومت کششی غیرمستقیم خوب بتن اخیر است. همچنین با بررسی نمودارها مشاهده می‌شود که در کلیه طرح‌های اختلاط با افزایش وزن مخصوص مقاومت فشاری نیز به نسبت افزایش یافته است. شکل ۴، روند افزایش میانگین مقاومت فشاری با وزن مخصوص در کل ۲۵

شده مشاهده می‌شود، که مطابق آن نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه به نمونه‌های ۹۰ روزه بین ۶۷/۰ و ۸۱/۰ بوده و با توجه به این که نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کششی بتن‌های معمولی در حدود ۱۰ درصد است، این نسبت در بتن‌های انتخابی و بهینه در پژوهش حاضر بین ۱۳/۵۵ تا ۱۷/۷۹ بوده است.



شکل ۷. دستگاه آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم.



شکل ۸. رابطه‌ی مقاومت کششی غیرمستقیم با مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن و مقایسه با ACI.

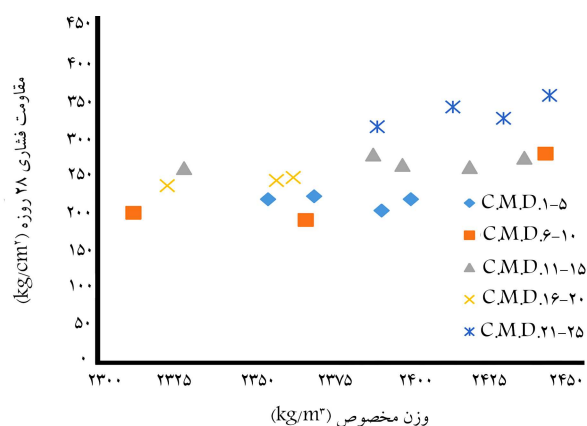
با توجه به نتایج به دست آمده و استفاده از روش رگرسیون می‌توان معادله‌ی ۱ را جهت پیش‌بینی مقاومت کششی غیرمستقیم براساس مقاومت فشاری ۲۸ روزه، برای طرح‌های اختلاط با مواد افزودنی سیلیکافیوم و پسماند کاغذ در پژوهش حاضر پیشنهاد کرد:

$$f_t = 0.612 \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

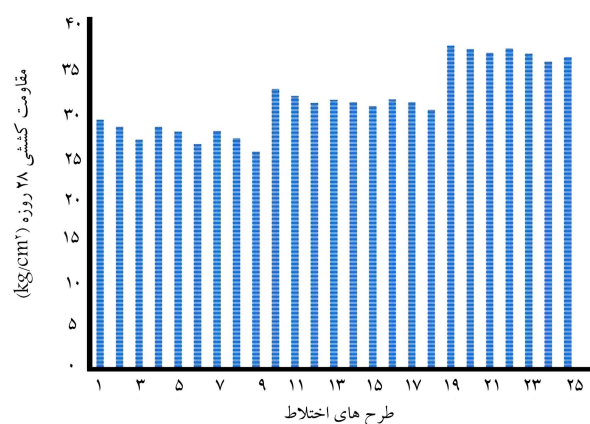
که در آن،  $f'_c$  مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ی مکعبی  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متر است. رابطه‌ی ۱ در مقایسه با رابطه‌ی پیشنهادی ACI ( $f_t = 0.59 \sqrt{f'_c}$ )، مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتری را نتیجه می‌دهد، که علت آن استفاده از مواد افزودنی سیلیکافیوم در اختلاط تمامی طرح‌هاست.

### ۳.۵. نتایج آزمون‌های کشش ناشی از آزمون خمشی

برای اندازه‌گیری مقاومت کششی بتن در کشش ناشی از خمش در آزمایشگاه، آزمایشی طبق استاندارد ASTM C ۱۰۱۸<sup>[۲۶]</sup> وجود دارد، که در آن یک تیر بتنی ساده روی دو تکیه‌گاه قرار می‌گیرد و دو بار نقطه‌یی به فاصله‌ی  $\frac{L}{4}$  از تکیه‌گاه روی آن قرار داده می‌شود و بار P آنقدر زیاد می‌شود تا قطعه‌ی مذکور ترک بخورد (شکل ۹).



شکل ۹. رابطه‌ی میانگین مقاومت فشاری با وزن مخصوص در ۲۵ طرح اختلاط.



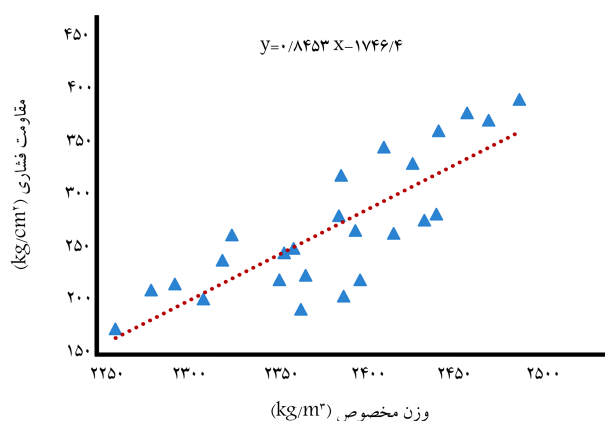
شکل ۱۰. روند افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های بتنی.

طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مشاهده می‌شود، که مطابق آن با توجه به نتایج به دست آمده برای وزن مخصوص و بررسی آنها از روی نمودارها مشخص می‌شود که وزن مخصوص در تمامی طرح‌ها، همخوانی مناسبی با یکدیگر دارند. اگرچه در بعضی از طرح‌ها، از جمله طرح ۱۰، همخوانی ذکر شده تا حدی کمتر شده است. دلیل پدیده‌ی اشاره شده ممکن است عدم امکان تراکم کافی در طرح‌های با مقدار زیاد افزودنی پسماند کاغذ باشد. همچنین روند افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های بتنی در شکل ۵ مشاهده می‌شود، که مطابق آن با افزایش وزن مخصوص، همچنان که مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، مقاومت کششی نیز افزایش پیدا می‌کند؛ که علت آن داشتن رابطه‌ی مقاومت کششی با مقاومت فشاری است. در شکل ۶، نیز روند افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های بتنی مشاهده می‌شود.

### ۲.۵. نتایج آزمون‌های کششی غیرمستقیم

برای انجام آزمایش مورد نظر طبق استاندارد ASTM C ۴۹۶<sup>[۲۵]</sup>، نمونه‌ی بتنی استوانه‌یی شکل به طور افقی توسط گیره‌ی نگهدارنده، داخل دستگاه آزمایش قرار گرفت (شکل ۷). پس از روشن شدن دستگاه، نیرو به نوار تکیه‌گاهی وارد و باعث گسیختگی نمونه در جهت قطر شد. لازم به ذکر است که مقاومت کششی ۲۸ روزه آزمایش شده است.

نمودار رابطه‌ی مقاومت کششی غیرمستقیم با مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن، در شکل ۸ مشاهده می‌شود. همچنین نتایج به دست آمده با روابط استاندارد ACI برای بتن معمولی مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۲. رابطه‌ی مقاومت فشاری و وزن مخصوص.

را جهت پیش‌بینی مقاومت کششی ناشی از خمش از مقاومت فشاری ۲۸ روزه، برای بتن‌های با افزودنی سیلیکافیوم و پسماند کاغذ پیشنهاد کرد:

$$f_r = 0.633 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

که در آن،  $f'_c$  مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ی مکعبی  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متر است. رابطه‌ی ۲ در مقایسه با رابطه‌ی پیشنهادی ACI ( $f_r = 0.63 \sqrt{f'_c}$ ) و آیین‌نامه‌ی بتن ایران (آبا) ( $f_r = 0.6 \sqrt{f'_c}$ ) برای بتن معمولی، مقاومت کششی ناشی از خمش با مقادیر بالاتری را ارائه می‌کند. مشاهده می‌شود با استفاده از ۱۰٪ سیلیکافیوم در تمامی طرح‌ها، مقاومت کششی غیرمستقیم و هم مقاومت کششی ناشی از خمش به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

## ۶. رابطه‌ی مقاومت فشاری و وزن مخصوص

همچنان که قبلاً نیز گفته شد، با توجه به نتایج ارائه شده، بالاترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط وزن مخصوص بالاتر بوده است. معمولاً با افزایش وزن مخصوص بتن، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. این مسئله را می‌توان به صورت یک معادله، که بیان‌گر رابطه‌ی خطی بین مقاومت فشاری و وزن مخصوص است، نشان داد (شکل ۱۲).

یکی از فرضیات طراحی سازه‌های بتنی، دانستن وزن مخصوص بتن است. از آنجایی که بتن با انواع افزودنی سبک سازه‌ی می‌تواند وزن‌های مخصوص متفاوتی داشته باشد، با داشتن معادله‌ی که رابطه‌ی بین وزن مخصوص و مقاومت فشاری برای یک نوع طرح اختلاط پیشنهادی بیان کند، می‌توان با توجه به مقاومت فشاری در نظر گرفته شده، وزن مخصوص را با تقریب قابل قبولی حدس زد. شکل ۱۳، رابطه‌ی بین مقاومت فشاری ۹۰ روزه از ۲۸ روزه را با معادله‌ی خطی نشان می‌دهد.

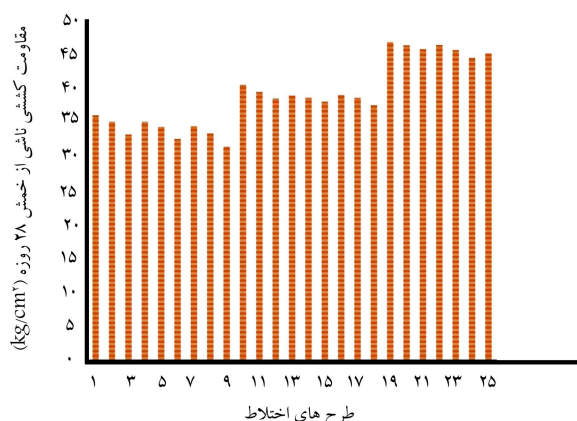
## ۷. آزمون ضربه‌ی نمونه‌ها

در پژوهش حاضر، از روش پیشنهادی توسط کمیته‌ی ACI 544<sup>[۲۷]</sup> برای بررسی مقاومت ضربه‌ی استفاده شده است. در روش مذکور، چکش ۴٫۵ کیلوپی از ارتفاع ۴۵ سانتی‌متری بر نمونه‌های دیسکی شکل، ضربات متوالی وارد می‌کند. در شکل ۱۴، دستگاه آزمون ضربه در پژوهش حاضر مشاهده می‌شود.

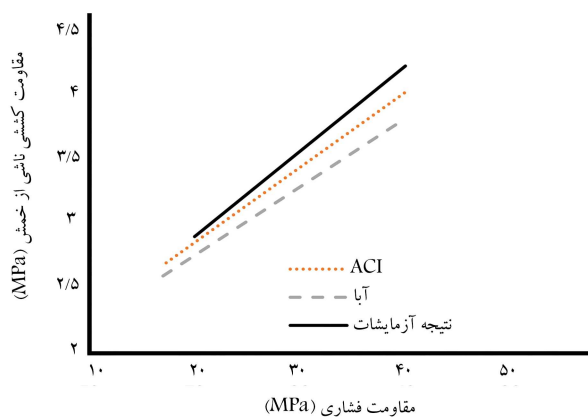
- دو مشخصه‌ی تعیین‌کننده‌ی مقاومت ضربه‌ی نمونه‌ها



شکل ۹. دستگاه آزمایش مقاومت کششی ناشی از خمش.



شکل ۱۰. روند افزایش مقاومت کششی ناشی از خمش نمونه‌های بتنی.



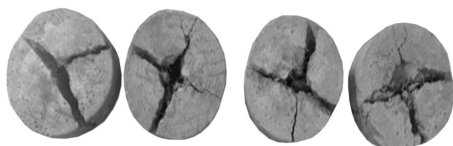
شکل ۱۱. رابطه‌ی مقاومت کششی ناشی از خمش با مقاومت فشاری ۲۸ روزه.

روند تغییر مقاومت کششی ناشی از آزمون خمش طرح‌ها، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

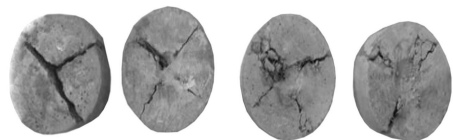
نمودار رابطه‌ی مقاومت کششی ناشی از خمش با مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین در شکل مذکور، جهت مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با آیین‌نامه‌ی ACI و آبا، نمودار حاصل از روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های مذکور مشاهده می‌شود.

با توجه به نتایج به دست آمده و با استفاده از روش رگرسیون می‌توان معادله‌ی ۲





شکل ۱۵. نمونه‌ها با ۵٪ سیلیکافیوم و ۲/۵٪ پسماند کاغذ در مقایسه با نمونه‌ی بتن معمولی پس از آزمایش ضربه.



شکل ۱۶. نمونه‌ها با ۵٪ سیلیکافیوم و ۷/۵٪ پسماند کاغذ در مقایسه با نمونه‌ی بتن معمولی پس از آزمایش ضربه.



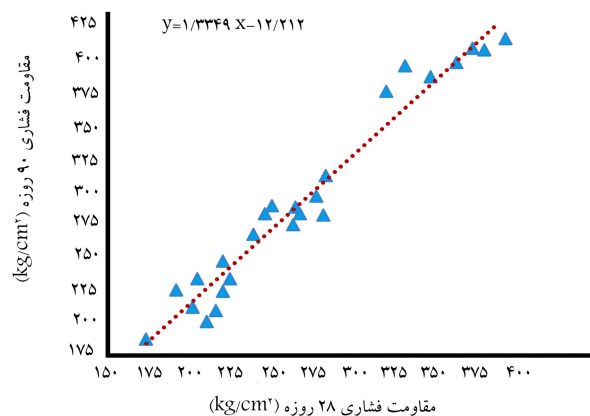
شکل ۱۷. اسلامپ بتن طرح‌های اختلاط.

ساخته شده به منظور دست‌یابی به میزان روانی آنها، آزمون اسلامپ نیز به عمل آمده است. شکل ۱۷، نحوه‌ی انجام آزمایش‌های ذکر شده را نشان می‌دهد. اسلامپ یکی از پارامترهای مهم در سنجش مقاومت فشاری است، زیرا بیان‌کننده‌ی نسبت آب به سیمان است. در جدول ۴، تأثیر سیلیکافیوم و پسماند کاغذ در خواص مکانیکی بتن ارائه شده است.

همه‌ی طرح‌های اختلاط برای اسلامپ در محدوده‌ی ۶۰-۱۰۰ mm طراحی شده‌اند و لذا هرگونه کاهش اسلامپ ناشی از استفاده‌ی سیلیکافیوم با افزودن فوق روان‌کننده جبران شده است. سیلیکافیوم تغییر مهمی در مقاومت فشاری تا سن ۷ روزه‌ی بتن نداشته است. صرف‌نظر از نسبت سیلیکافیوم به مصالح سیمانی، مقاومت‌های فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن افزایش یافته و مقداری افزایش متناسب با مقدار سیلیکافیوم مصرفی در مخلوط بوده است. کلبه‌ی بتن‌های با سیلیکافیوم، مقاومت‌های بیشتری در مقایسه با بتن‌های نظیر بدون سیلیکافیوم داشته و مقدار افزایش مقاومت حدود ۱۰٪ به ازاء هر ۲/۵٪ افزایش در مقدار سیلیکافیوم مصرفی به ازاء سیمان بوده است.

#### • آزمون سرعت پالس اولتراسونیک (UPV)

آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک، شامل اندازه‌گیری زمان سیریک پالس اولتراسونیک است، که از نمونه‌های بتن پژوهش می‌گذرد. زمان سیر بین رفت و برگشت پالس



شکل ۱۳. تخمین مقاومت فشاری ۹۰ روزه از ۲۸ روزه.



شکل ۱۴. دستگاه آزمون ضربه.

اولین مشخصه، تعداد ضربات متناظر با اولین ترک قابل رؤیت است. دومین مشخصه، تعداد ضربات لازم تا گسیختگی نهایی است، یعنی زمانی که نمونه‌ی دیسکی بتنی ۳ قسمت از ۴ قسمت نگهدارنده‌های روی صفحه‌ی فلزی را لمس کند. پس از انجام آزمون ضربه بر روی نمونه‌ها مشاهده شد که نمونه‌های بتنی بدون سیلیکافیوم (شاهد) پس از تعداد ضربات اندکی، گسیخته می‌شوند؛ در صورتی که نمونه‌های بتنی با سیلیکافیوم پس از ایجاد ترک اولیه، ضربات بیشتری را تا گسیختگی نهایی تحمل می‌کنند.

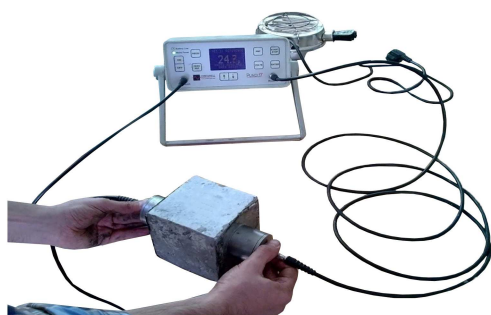
میزان سیلیکافیوم تأثیر به سزایی در رسیدن به گسیختگی نهایی نمونه‌ها دارد و نمونه‌های با درصد سیلیکافیوم بالاتر در تعداد ضربات بالاتری گسیخته می‌شوند. این مقاومت پس از ترک اولیه برای نمونه‌های بتنی مسلح با ۵٪ سیلیکافیوم، ۸۳ الی ۱۶۶ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافته است. همچنین پارامتر مذکور برای نمونه‌های مسلح با ۵٪ سیلیکافیوم، ۹۳ الی ۱۵۷ درصد افزایش یافته است. شکل‌های ۱۵ و ۱۶، نمونه‌های دارای سیلیکافیوم و پسماند کاغذ با نمونه‌ی شاهد (بتن معمولی) را پس از انجام آزمون ضربه در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهند.

#### • آزمون اسلامپ

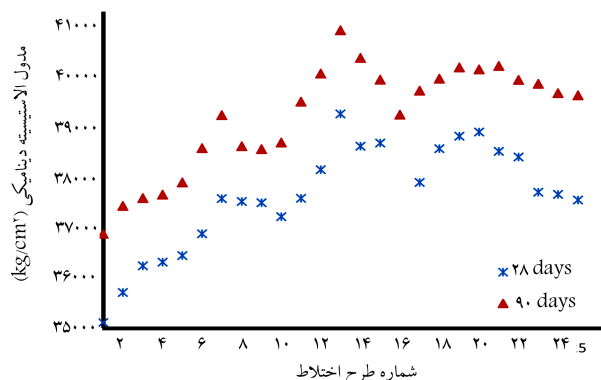
بتن در قالب‌های استوانه‌یی که قبلاً تمیزکاری و روغن‌کاری شده بود، که طبق استاندارد ACI 440<sup>[۲۷]</sup> طی سه مرحله با حجم، ارتفاع تقریباً مساوی و با کوبه‌ی هر مرحله ۲۵ ضربه و ۵ ضربه با چکش لاستیکی جهت درهم روی کامل مواد انجام گرفت، که این کار جهت متراکم ساختن و یکنواختی بتن صورت گرفت؛ اما از بتن‌های

جدول ۴. بررسی تأثیر سیلیکافیوم و پسماند کاغذ در خواص مکانیکی بتن.

| شماره طرح | خاکستر پسماند ضایعات کاغذ | سیلیکافیوم | اسلامپ (mm) |
|-----------|---------------------------|------------|-------------|
| ۱         | ۰                         | ۰          | ۸۶          |
| ۲         | ۰                         | ۲٫۵        | ۸۲          |
| ۳         | ۰                         | ۵          | ۷۸          |
| ۴         | ۰                         | ۷٫۵        | ۷۴          |
| ۵         | ۰                         | ۱۰         | ۷۰          |
| ۶         | ۲٫۵                       | ۰          | ۸۴          |
| ۷         | ۲٫۵                       | ۲٫۵        | ۸۱          |
| ۸         | ۲٫۵                       | ۵          | ۷۵          |
| ۹         | ۲٫۵                       | ۷٫۵        | ۷۲          |
| ۱۰        | ۲٫۵                       | ۱۰         | ۶۹          |
| ۱۱        | ۵                         | ۰          | ۸۰          |
| ۱۲        | ۵                         | ۲٫۵        | ۷۵          |
| ۱۳        | ۵                         | ۵          | ۶۸          |
| ۱۴        | ۵                         | ۷٫۵        | ۶۳          |
| ۱۵        | ۵                         | ۱۰         | ۶۲          |
| ۱۶        | ۷٫۵                       | ۰          | ۹۰          |
| ۱۷        | ۷٫۵                       | ۲٫۵        | ۸۵          |
| ۱۸        | ۷٫۵                       | ۵          | ۷۴          |
| ۱۹        | ۷٫۵                       | ۷٫۵        | ۷۰          |
| ۲۰        | ۷٫۵                       | ۱۰         | ۶۵          |
| ۲۱        | ۱۰                        | ۰          | ۹۳          |
| ۲۲        | ۱۰                        | ۲٫۵        | ۸۷          |
| ۲۳        | ۱۰                        | ۵          | ۸۲          |
| ۲۴        | ۱۰                        | ۷٫۵        | ۷۱          |
| ۲۵        | ۱۰                        | ۱۰         | ۶۷          |



شکل ۱۸. سونیسکوپ استفاده شده در آزمایش اولتراسونیک (تعیین مدول کشسانی دینامیکی).



شکل ۱۹. مدول کشسانی دینامیکی ۲۵ طرح اختلاط در سنین مختلف.



شکل ۲۰. نمونه‌های بتنی تحت آزمون خزش.

دینامیکی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشخص است، حضور هم‌زمان پسماند کاغذ و سیلیکافیوم در طرح‌های اختلاط ۶ تا ۲۵، در کل باعث افزایش مدول کشسانی دینامیکی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه شده است. لیکن در طرح‌های اختلاط با ۱۰٪ خاکستر پسماند کاغذ، کاهش زمان انتقال امواج به دلیل بیشترین تداخل از دلایل کاهش مدول کشسانی در طرح‌های مذکور بوده است. با افزایش خاکستر پسماند کاغذ به دلیل پخش غیریکنواخت خاکستر پسماند کاغذ، مدول کشسانی کاهش یافته است.

#### • خزش در بتن

به طور کلی، پدیده‌ی خزش به صورت تغییر شکل سازه‌ی بتنی تحت اثر بار پایداری تعریف می‌شود. آزمایش مذکور در پژوهش حاضر طبق استاندارد ASTM C۱۳۳۷-۱۷<sup>[۲۹]</sup> انجام شده است (شکل ۲۰).

به طور الکترونیکی اندازه‌گیری می‌شود. از تقسیم طول مسیر بین انتقال‌دهنده‌ها بر زمان سیر، سرعت میانگین انتشار موج به دست می‌آید. دستگاه اندازه‌گیری سونیسکوپ نامیده می‌شود (شکل ۱۸). طبق استاندارد ASTM C۵۹۷-۱۶<sup>[۲۸]</sup>، سه روش برای اندازه‌گیری سرعت پالس در بتن وجود دارد: (۱) انتقال مستقیم، (۲) انتقال غیرمستقیم و (۳) انتقال سطحی. در پژوهش حاضر، از روش مستقیم با قرار دادن انتقال‌دهنده‌ها بین دو سطح مقابل نمونه‌های بتنی استفاده شده است.

در پژوهش حاضر، برای مقایسه‌ی ۲۵ طرح اختلاط، بر روی آنها آزمایش اولتراسونیک انجام شده است، تا تأثیر سیلیکافیوم و خاکستر پسماند کاغذ در بتن بررسی شود (نتایج در جدول ۵ ارائه شده است).

پخش مناسب خاکستر پسماند کاغذ و سیلیکافیوم نیز در مدول کشسانی تأثیر زیادی گذاشته است، به طوری که نقاط اوج منحنی شکل ۱۹ در طرح ۱۳ اتفاق افتاده و بیشتر به دلیل تأثیر سیلیکافیوم در پخش مناسب خاکستر پسماند کاغذ بوده است. افزایش چگالی بتن در مدول کشسانی تأثیر گذاشته و این افزایش در نسبت سیلیکافیوم ۷/۵ تا ۱۰ درصد، که شرایط مناسبی می‌باشد، تأثیرگذاری بیشتری داشته است. در طرح‌های اختلاط ۱ تا ۵، که درصد پسماند کاغذ صفر بوده و فقط سیلیکافیوم به طرح‌های اختلاط اضافه شده است، سیر صعودی مدول کشسانی



جدول ۵. نتایج آزمایش التراسونیک نمونه‌های بتنی.

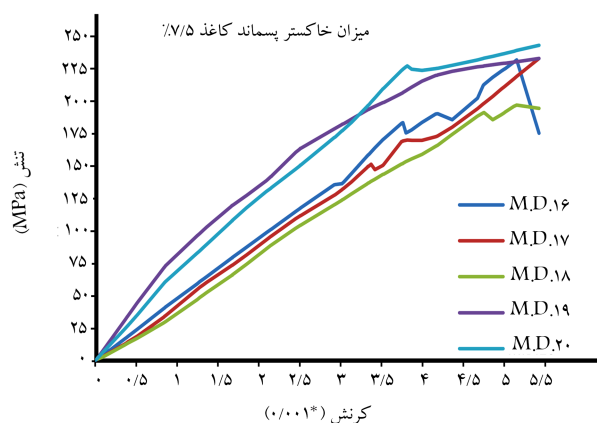
| شماره طرح<br>اختلاط | نتایج ۲۸ روزه<br>(kg/cm <sup>۲</sup> ) | میانگین ۲۸ روزه<br>(kg/cm <sup>۲</sup> ) | نتایج ۹۰ روزه<br>(kg/cm <sup>۲</sup> ) | میانگین ۹۰ روزه<br>(kg/cm <sup>۲</sup> ) |
|---------------------|--|--|--|--|
| ۱                   | ۳۵۰۷۶                                  | ۳۵۱۳۴                                    | ۳۶۴۷۳                                  | ۳۶۸۹۱                                    |
|                     | ۳۵۱۲۱                                  |  | ۷۳۳۰۹                                  |  |
|                     | ۳۵۲۰۵                                  |  | -                                      |  |
| ۲                   | ۳۵۵۲۷                                  | ۳۵۷۳۱                                    | ۳۷۶۲۹                                  | ۳۷۴۴۴                                    |
|                     | ۳۵۸۹۳                                  |  | ۳۷۲۵۹                                  |  |
|                     | ۳۵۷۷۳                                  |  | -                                      |  |
| ۳                   | ۳۵۹۹۱                                  | ۳۶۲۵۸                                    | ۳۷۴۲۳                                  | ۳۷۶۰۰                                    |
|                     | ۳۶۳۷۰                                  |  | ۳۷۶۲۸                                  |  |
|                     | ۳۶۴۱۳                                  |  | ۳۷۷۴۹                                  |  |
| ۴                   | ۳۶۱۷۱                                  | ۳۶۳۲۹                                    | ۳۷۶۰۱                                  | ۳۷۶۶۶                                    |
|                     | ۳۶۴۲۸                                  |  | ۳۷۵۶۸                                  |  |
|                     | ۳۶۳۸۸                                  |  | ۳۷۸۲۹                                  |  |
| ۵                   | ۳۶۳۴۲                                  | ۳۶۴۶۲                                    | ۳۷۷۱۶                                  | ۳۷۹۱۰                                    |
|                     | ۳۶۴۵۶                                  |  | ۳۷۹۵۳                                  |  |
|                     | ۳۶۵۸۹                                  |  | ۳۸۰۶۲                                  |  |
| ۶                   | ۳۶۶۲۷                                  | ۳۶۸۹۳                                    | ۳۷۹۶۳                                  | ۳۸۵۸۸                                    |
|                     | ۳۷۱۵۹                                  |  | ۳۸۸۲۹                                  |  |
|                     | -                                      |  | ۳۸۹۷۲                                  |  |
| ۷                   | ۳۷۴۷۳                                  | ۳۷۵۸۹                                    | ۳۹۰۰۹                                  | ۳۹۲۴۱                                    |
|                     | ۳۷۸۱۹                                  |  | ۳۹۴۷۳                                  |  |
|                     | ۳۷۴۷۵                                  |  | -                                      |  |
| ۸                   | ۳۷۸۷۱                                  | ۳۷۵۳۰                                    | ۳۹۲۴۸                                  | ۳۸۶۲۸                                    |
|                     | ۳۷۴۲۸                                  |  | ۳۸۱۰۷                                  |  |
|                     | ۳۷۲۹۱                                  |  | ۳۸۵۲۹                                  |  |
| ۹                   | ۳۷۱۷۸                                  | ۳۷۵۰۹                                    | ۳۸۱۷۱                                  | ۳۸۵۶۷                                    |
|                     | ۳۷۸۱۲                                  |  | ۳۹۰۳۴                                  |  |
|                     | ۳۷۵۳۷                                  |  | ۳۸۴۹۶                                  |  |
| ۱۰                  | ۳۷۱۵۲                                  | ۳۷۲۳۳                                    | ۳۸۴۱۱                                  | ۳۸۷۰۲                                    |
|                     | ۳۷۲۱۸                                  |  | ۳۸۷۳۲                                  |  |
|                     | ۳۷۳۲۹                                  |  | ۳۸۹۶۳                                  |  |
| ۱۱                  | ۳۷۸۷۲                                  | ۳۷۵۹۳                                    | ۳۹۲۵۳                                  | ۳۹۵۱۰                                    |
|                     | ۳۷۴۳۱                                  |  | ۳۹۷۲۹                                  |  |
|                     | ۳۷۴۷۶                                  |  | ۳۹۵۴۸                                  |  |
| ۱۲                  | ۳۷۹۹۱                                  | ۳۸۱۶۱                                    | ۴۰۱۲۳                                  | ۴۰۰۶۵                                    |
|                     | ۳۸۲۱۷                                  |  | ۴۰۰۰۷                                  |  |
|                     | ۳۸۲۷۵                                  |  | -                                      |  |
| ۱۳                  | ۳۹۱۱۷                                  | ۳۹۲۶۷                                    | ۴۱۱۱۱                                  | ۴۰۹۲۲                                    |
|                     | ۳۹۰۰۲                                  |  | ۴۰۷۸۹                                  |  |
|                     | ۳۹۶۸۲                                  |  | ۴۰۸۶۶                                  |  |

ادامه‌ی جدول ۵.

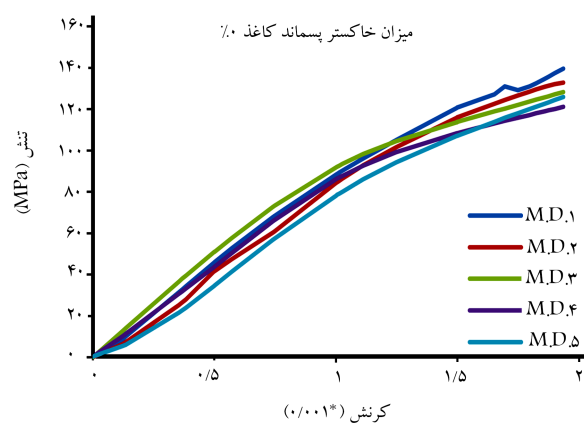
| شماره طرح<br>اختلاط | نتایج ۲۸ روزه<br>(kg/cm <sup>۲</sup> ) | میانگین ۲۸ روزه<br>(kg/cm <sup>۲</sup> ) | نتایج ۹۰ روزه<br>(kg/cm <sup>۲</sup> ) | میانگین ۹۰ روزه<br>(kg/cm <sup>۲</sup> ) |
|---------------------|--|--|--|--|
| ۱۴                  | ۳۸۵۷۶                                  | ۳۸۶۲۹                                    | ۴۰۲۱۷                                  | ۴۰۳۷۸                                    |
|                     | ۳۸۶۸۲                                  |  | ۴۱۰۷۰                                  |  |
|                     | -                                      |  | ۳۹۸۴۷                                  |  |
| ۱۵                  | ۳۸۶۰۱                                  | ۳۸۶۸۹                                    | ۴۰۱۷۹                                  | ۳۹۹۴۵                                    |
|                     | ۳۸۶۵۳                                  |  | ۳۹۸۱۵                                  |  |
|                     | ۳۸۸۱۴                                  |  | ۳۹۸۴۲                                  |  |
| ۱۶                  | ۳۷۱۵۷                                  | ۳۷۳۱۲                                    | ۳۹۴۳۰                                  | ۳۹۲۵۲                                    |
|                     | ۳۷۶۲۹                                  |  | ۳۹۰۷۴                                  |  |
|                     | ۳۷۱۵۰                                  |  | -                                      |  |
| ۱۷                  | ۳۷۸۷۳                                  | ۳۷۹۱۱                                    | ۳۹۶۰۰                                  | ۳۹۷۲۸                                    |
|                     | ۳۷۹۲۷                                  |  | ۳۹۹۷۶                                  |  |
|                     | ۳۷۹۳۳                                  |  | ۳۹۶۰۸                                  |  |
| ۱۸                  | ۳۷۶۷۳                                  | ۳۸۵۷۹                                    | ۴۰۱۲۳                                  | ۳۹۹۶۵                                    |
|                     | ۳۷۴۸۵                                  |  | ۳۹۹۲۳                                  |  |
|                     | -                                      |  | ۳۹۸۴۹                                  |  |
| ۱۹                  | ۳۸۹۲۷                                  | ۳۸۸۲۷                                    | ۴۰۲۷۳                                  | ۴۰۱۹۰                                    |
|                     | ۳۸۳۷۳                                  |  | ۴۰۰۰۷                                  |  |
|                     | ۳۹۱۸۱                                  |  | ۴۰۲۹۰                                  |  |
| ۲۰                  | ۳۸۹۳۲                                  | ۳۸۹۰۸                                    | ۴۰۲۲۴                                  | ۴۰۱۴۹                                    |
|                     | ۳۸۸۸۴                                  |  | ۴۰۱۲۷                                  |  |
|                     | -                                      |  | ۴۰۰۹۸                                  |  |
| ۲۱                  | ۳۸۶۳۱                                  | ۳۸۵۲۷                                    | ۴۰۲۷۵                                  | ۴۰۲۱۹                                    |
|                     | ۳۸۶۲۵                                  |  | ۴۰۲۳۳                                  |  |
|                     | ۳۸۵۹۷                                  |  | ۴۰۱۴۹                                  |  |
| ۲۲                  | ۳۸۵۵۷                                  | ۳۸۴۱۲                                    | ۳۹۹۶۲                                  | ۳۹۹۳۹                                    |
|                     | ۳۸۴۲۱                                  |  | ۳۹۹۷۴                                  |  |
|                     | ۳۸۲۵۹                                  |  | ۳۹۸۸۱                                  |  |
| ۲۳                  | ۳۷۷۹۳                                  | ۳۷۷۱۷                                    | ۳۹۸۱۴                                  | ۳۹۸۶۴                                    |
|                     | ۳۷۷۲۷                                  |  | ۳۹۹۰۶                                  |  |
|                     | ۳۷۶۳۳                                  |  | ۳۹۸۷۳                                  |  |
| ۲۴                  | ۳۷۶۹۱                                  | ۳۷۶۷۴                                    | ۳۹۸۵۶                                  | ۳۹۶۷۷                                    |
|                     | ۳۷۶۴۷                                  |  | ۳۹۴۲۳                                  |  |
|                     | ۳۷۶۸۵                                  |  | ۳۹۷۴۴                                  |  |
| ۲۵                  | ۳۷۶۲۷                                  | ۳۷۵۶۰                                    | ۳۹۶۸۵                                  | ۳۹۶۳۵                                    |
|                     | ۳۷۵۷۳                                  |  | ۳۹۶۷۲                                  |  |
|                     | ۳۷۴۸۱                                  |  | ۳۹۵۴۸                                  |  |

بارگذاری نمونه‌ها در آزمایش حاضر، ۲۸ روز بوده و تنشی معادل ۲۰٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه بر آنها اعمال شد. سپس مقدار تغییرمکان قائم با استفاده از یک کرنش‌سنج با دقت اسمی ۰/۰۰۲ میلی‌متر در طول زمان در ۴ طرف مقطع نمونه‌ی بتنی اندازه‌گیری و میانگین ۴ مقدار قرائت شده به عنوان تغییرمکان نمونه‌ها در نظر گرفته شد. کلیه‌ی نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز تحت بار قرار داشتند. با اندازه‌گیری کرنش کل و کرنش جمع‌شدگی، کرنش خزشی محاسبه شده است. لازم به ذکر است که برای حفظ دما و رطوبت، نمونه‌ها در فویل آلومینیومی پیچیده شدند و سپس در

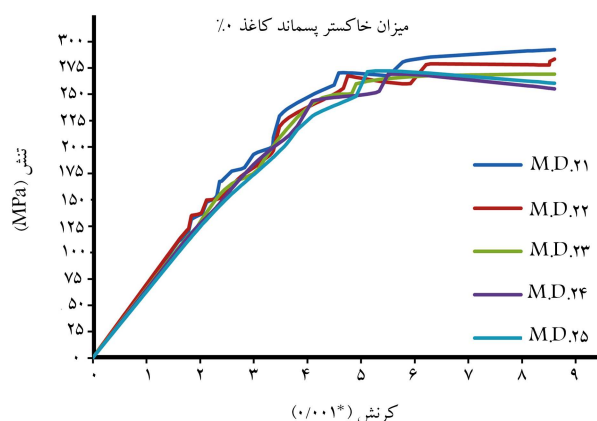
پس از ساخت نمونه‌های مورد نظر، با گذشت ۲۴ ساعت، قالب‌برداری صورت گرفت و سپس آنها در شرایط استاندارد ۲۰ (درجه‌ی سلسیوس و ۱۰۰٪ رطوبت) عمل‌آوری شدند. زمان عمل‌آوری نمونه‌ها جهت ارزیابی کرنش ناشی از جمع‌شدگی، ۲۸ روز مقرر شد. از آن‌جا که آثار خزش و جمع‌شدگی قابل جمع هستند، خزش را به صورت اختلاف بین کل تغییرشکل وابسته به زمان نمونه‌ی بارگذاری شده و جمع‌شدگی نمونه‌ی مشابهی که تحت بار قرار نگرفته و در همان شرایط محیطی و به همان مدت نگهداری شده باشد، محاسبه می‌کنند. سن



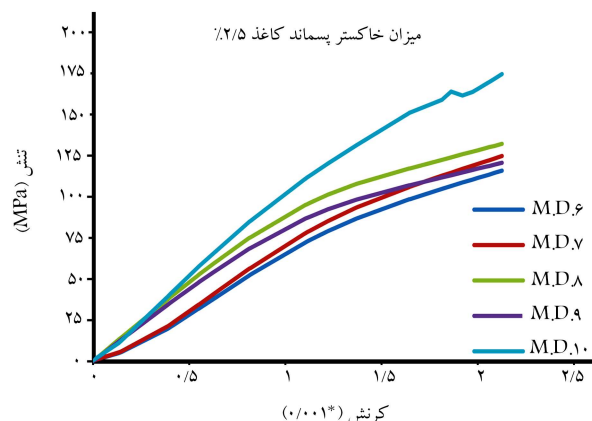
شکل ۲۰. تنش - کرنش خزشی طرح‌های ۲۵ گانه (طرح‌های ۱۶-۲۰).



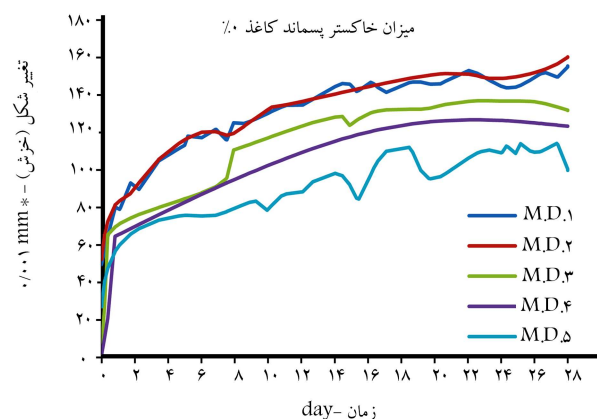
شکل ۲۱. تنش - کرنش خزشی طرح‌های ۲۵ گانه (طرح‌های ۱-۵).



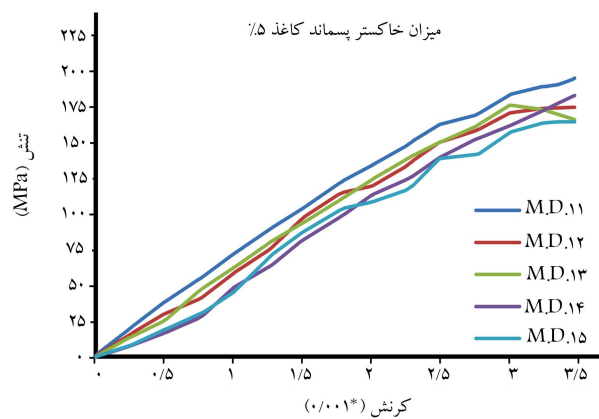
شکل ۲۲. تنش - کرنش خزشی طرح‌های ۲۵ گانه (طرح‌های ۲۱-۲۵).



شکل ۲۳. تنش - کرنش خزشی طرح‌های ۲۵ گانه (طرح‌های ۶-۱۰).



شکل ۲۴. نمودار خزش - زمان طرح‌های ۲۵ گانه (طرح‌های ۱-۵).

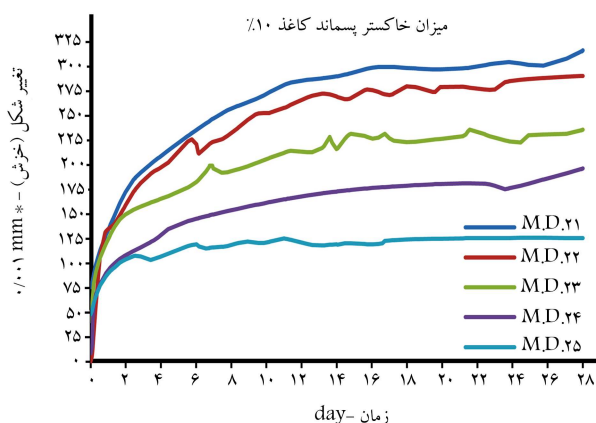


شکل ۲۵. تنش - کرنش خزشی طرح‌های ۲۵ گانه (طرح‌های ۱۱-۱۵).

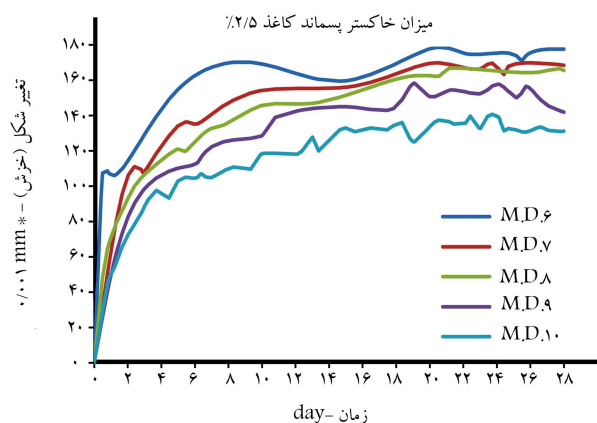
که مقاومت فشاری کمتری دارند. با توجه به این‌که در تعیین نسبت‌های مخلوط بتن، نمی‌توان عاملی را بدون تغییر دادن کمینه‌ی یک عامل دیگر تغییر داد، بدیهی است که با افزایش میزان سیلیکافیوم و ثابت بودن نسبت آب به سیمان، مقدار آب اختلاط کاهش می‌یابد. این امر منجر به تولید خمیر سیمانی با مقاومت و مدول کشسانی بالاتر و در نتیجه کاهش خزش می‌شود.

بدین منظور خزش بتن در مدت ۲۸ روز برای ۲۵ طرح اختلاط پژوهش محاسبه و در قالب نمودارهایی در شکل‌های ۲۶ الی ۳۰، میزان خزش در برابر زمان در نمونه‌های آزمایشگاهی برای طرح‌های اختلاط مشاهده می‌شود.

دستگاه قرار گرفتند. شکل‌های ۲۱ الی ۲۵، نشان‌دهنده‌ی میزان کرنش خزشی در برابر تنش ایجاد شده در نمونه‌های آزمایشگاهی برای طرح‌های اختلاط هستند. با توجه به نتایج به دست آمده، خزش به میزان تنش نیز بستگی دارد، هنگامی که تنش تحمل شده کمتر از حدوداً نیمی از مقاومت فشاری بتن باشد، کرنش خزشی تقریباً متناسب با میزان تنش است و منحنی خزش خطی می‌شود. در سطوح بالاتر تنش، خزش با نرخ سریع‌تری افزایش می‌یابد و نسبت به تنش غیرخطی می‌شود. این رفتار غیرخطی خزش در سطوح بالای تنش، که مرتبط با افزایش مقدار خزش نمونه‌هایی است که مقاومت فشاری بالاتری دارند، کمتر از نمونه‌هایی است



شکل ۲۵. نمودار خزش - زمان طرح‌های ۲۵ گانه (طرح‌های ۲۱-۲۵).



شکل ۲۶. نمودار خزش - زمان طرح‌های ۲۵ گانه (طرح‌های ۶ تا ۱۰).

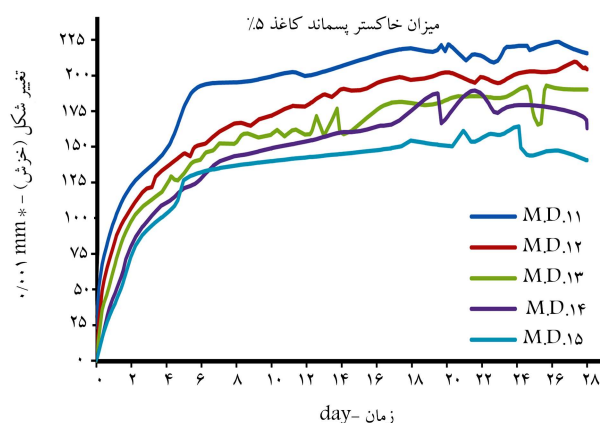
می‌شود، مربوط به ناحیه‌ی انتقال مدل‌سازی شده بین خمیر و افزودنی‌هاست. چنان‌که در تصاویر اخیر مشخص است، حضور سیلیکافیوم به تراکم ساختار خمیر سیمان کمک کرده و ساختار خمیر به وضوح در حضور ماده‌ی مذکور، تراکم و یکپارچگی بیشتری داشته است. شکل ۳۱، مقایسه‌ی بین تراکم و یکپارچگی ساختار خمیر سیمان در ۴ نمونه‌ی ۲۸ روزه مشاهده می‌شود، که تفاوت بین تراکم نمونه‌ی شاهد و ۳ نمونه دیگر به روشنی مشخص است.

## ۹. نتیجه‌گیری

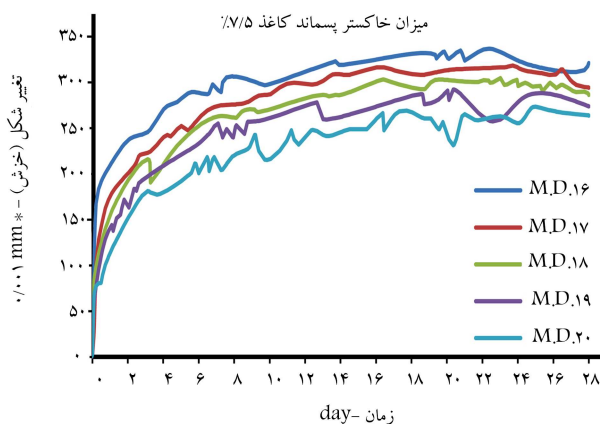
در پژوهش حاضر، به صورت آزمایشگاهی به بررسی تأثیر ضایعات پسماند کاغذ به همراه سیلیکافیوم در خواص مکانیکی بتن پرداخته شده است. در مطالعه‌ی حاضر، درصد‌های مختلفی از خاکستر پسماند ضایعات کاغذ (۵، ۲/۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد) و سیلیکافیوم (۵، ۲/۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد) جایگزین سیمان مصرفی شد. ۲۵ طرح اختلاط ساخته شدند و بر روی نمونه‌های بتنی، آزمایش‌های مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم (برزیلی)، کشش ناشی از خمش، ضربه، اسلپ، آزمون اولتراسونیک، آزمون خزش و آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی در سنین مختلف انجام شد. همچنین معادلاتی برای بتن‌های حاوی خاکستر پسماند ضایعات کاغذ با سیلیکافیوم بر اساس روابط و معادلات موجود ارائه شد، که با آیین‌نامه‌های ACI و آیین‌نامه بتن ایران (آبا) مقایسه شدند. معادلات ذکر شده برای پیش‌بینی رفتار بتن‌های حاوی خاکستر پسماند ضایعات کاغذ با سیلیکافیوم پیشنهاد شده است. نتایج پژوهش حاضر به این شرح است:

- نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کششی بتن‌های معمولی، در حدود ۱۰ است، که نسبت مذکور در بتن‌های حاوی خاکستر پسماند ضایعات کاغذ با سیلیکافیوم در پژوهش حاضر بین ۱۳/۵۵ تا ۱۷/۷۹ بوده است.
- نسبت مقاومت فشاری با سن ۲۸ روزه به سن ۹۰ روزه نمونه‌های پژوهش حاضر بین ۶۷/۰ و ۸۱/۰ بوده است، در حالی که نسبت اخیر در بتن‌های معمولی بین ۵۵/۰ تا ۶۰/۰ است.

- همان‌طور که مشاهده می‌شود، در آزمون ضربه، نمونه‌های فاقد سیلیکافیوم (شاهد) پس از انجام آزمایش به ۳ قسمت جداگانه تقسیم شده‌اند. در صورتی که نمونه‌های سیلیکافیومی به دلیل انتقال نیروی ضربه و پل زدن بین ترک‌ها، چهار ترک نسبتاً متقارن برداشته و همچنان پیوسته باقی مانده‌اند.



شکل ۲۷. نمودار خزش - زمان طرح‌های ۲۵ گانه (طرح‌های ۱۱ تا ۱۵).

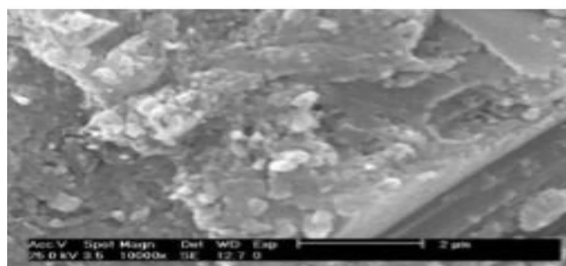


شکل ۲۸. نمودار خزش - زمان طرح‌های ۲۵ گانه (طرح‌های ۱۶ تا ۲۰).

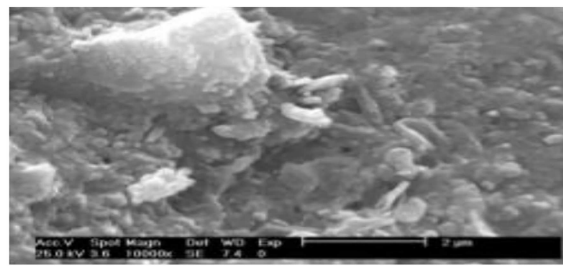
## ۸. نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM

### نمونه‌های بتنی

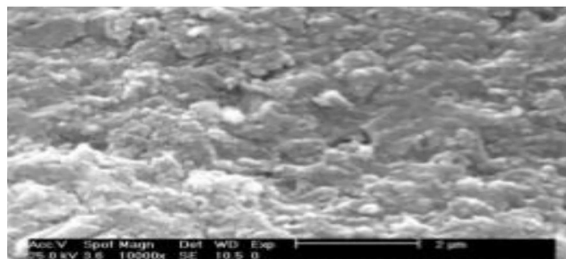
عکس‌های میکروسکوپ الکترونی برای ۴ طرح اختلاط بتن، شامل: طرح اول، بتن شاهد بدون افزودنی سیلیکافیوم؛ طرح دوم، بتن حاوی ۱۰٪ خاکستر پسماند کاغذ؛ طرح سوم، بتن حاوی ۱۰٪ سیلیکافیوم و طرح چهارم، بتن حاوی ۱۰٪ سیلیکافیوم و خاکستر پسماند کاغذ بوده است، که واکنش هیدراتاسیون آنها به وسیله‌ی استون در سن ۲۸ روزگی متوقف شده بود، انجام شد. تصاویر گرفته شده که در شکل ۳۱ مشاهده



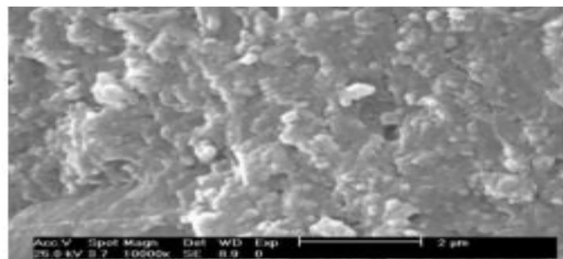
ب) نمونه بتن با ۱۰٪ خاکستر پسماند کاغذ؛



الف) نمونه بتن شاهد بدون افزودنی؛



د) نمونه بتن با ۱۰٪ سیلیکافیوم و خاکستر پسماند کاغذ.



ج) نمونه بتن با ۱۰٪ سیلیکافیوم؛

شکل ۳۱. مقایسه‌ی تراکم و یکنواختی ساختار نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر.

- در آزمون اولتراسونیک، نتایج تا حدودی شبیه نتایج درصد افزایش مقاومت فشاری است، ولی درصد‌های افزایش به مراتب از مقاومت فشاری کمتر است.
- در آزمون خزش با توجه به نتایج می‌توان بیان کرد که با افزایش خاکستر پسماند کاغذ در طول زمان مقدار خزش افزایش می‌یابد. افزودن سیلیکافیوم باعث بهبود رفتار و کاهش میزان خزش می‌شود. با افزایش درصد خاکستر پسماند کاغذ از ۵٪/۲ به ۱۰٪ و با مقادیر یکسان سیلیکافیوم مقدار خزش دو برابر شده است.
- همان‌طور که در نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی ملاحظه می‌شود، سیلیکافیوم و خاکستر پسماند کاغذ بیشترین اثر خود در افزایش مقاومت فشاری را در سنین اولیه نشان داده‌اند و دقت در نتایج، بیان‌گر کاهش اثر مواد مذکور با افزایش سن بتن هستند. بیشترین فعالیت مربوط به محدوده‌ی سنی ۳ تا ۲۸ روز است، همچنین دقت در سیر افزایش دوام نمونه‌های بتنی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی سیلیکافیوم سرعت بیشتری در افزایش دوام بتن نسبت به نمونه‌های خاکستر پسماند کاغذ داشته‌اند.

## پانویس‌ها

1. Pera & Amrouz
2. Hong
3. Young-Shik
4. Basem
5. Mallavarapu Rama
6. Logeswaran & Ramakrishna
7. Cherian Varkey

## منابع (References)

1. SeyyedAlipour, F., Yousefi Kebria, D. and Dehestani, M. "Application of paper making industry wastes in construction materials", *7th National Congress on Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran* (7-8 May, 2013).
2. Martinez, C., Cotes, T. A. and Corpas, F.A. "Recovering wastes from the paper industry: development of ceramic materials", *Fuel Processing Technology*, **103**, pp. 117-124 (2012).
3. Sutcu, M. and Akkurt, S. "Utilization of recycled paper processing residues and clay of different sources for the production of porous anorthite ceramics", *Journal of the European Ceramic Society*, **30**(8), pp. 1785-1793 (2010).
4. Ismail, M.A., Ismail, M.E. and Lau, S.K. "Fabrication of bricks from paper sludge and palm oil fuel ash", *Concrete Research Letters*, **1**(2), pp. 70-77 (2010).
5. British Standards Institution, BS 7052: Part 8., "Pre-cast concrete masonry units guide for specifying precast concrete masonry units", (2008).
6. Pera, J. and Amrouz, A. "Development of highly reactive metakaolin from paper sludge", *Adv. Cem. Based Mater.*, **7**(2), pp. 49-56 (1998).
7. Bai, J., Chaipanich, A., Kinuthia, J.M. and et al. "Compressivestrength and hydration of wastepaper sludge ash-ground granulated blastfurnace slag blended pastes", *Cem. Concr. Res.*, **33**(8), pp. 1189-1202 (2003).

8. Banfill, P. and Frias, M. "Rheology and conduction calorimetry of cement modified with calcined paper sludge", *Cem. Concr. Res.*, **37**(2), pp. 184-190 (2007).
9. Frias, M., Sanchez de Rojas, M.I., Rodriguez, O. and et al. "Characterisation of calcined paper sludge as an environmentally friendly source of metakaolin for manufacture of cementitious materials", *Adv. Cem. Res.*, **20**(1), pp. 23-30 (2008).
10. Segui, P., Aubert, J.E., Husson, B. and et al. "Characterisation of wastepaper sludge ash for its valorisation as a component of hydraulic binders", *Appl. Clay Sci.*, **57**, pp. 79-85 (2012).
11. Philadelphia PA: American Society for Testing and Materials, C22-01 Standard Specification for concrete aggregates, Annual Book of Astm Standards (2004).
12. Wong, H.S., Barakat, R., Alhilali, A. and et al. "Hydrophobic concrete using waste paper sludge ash", *Cement and Concrete Research*, **70**, pp. 9-20 (2015).
13. Ahmad, S., Iqbal Malik, M., Bashir Wani, M. and et al. "Study of concrete involving use of waste paper sludge ash as partial replacement of cement", *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)* e- , ISSN: 2250-3021, p-ISSN: 2278-8719, **3**(11), pp.06-15 (November. 2013).
14. Young-Shik, P., Jin-kook, S., Jae-Hoon, L. and et al. "Strength deterioration of high strength concrete in sulfate environment", *Cement and Concrete Research*, **24**, pp. 305-316 (2002).
15. Afsoos Biria, H. and Kaafi Siaestalkhi, P. "Improvement of oncrete's durability and permeability by adding natural pozzolans1st international congress on durability of concrete (ICD2012)", Trondheim, Norway RefrenceNo, ICDC2012-D12-00002IR, www.icdc2012.com. (2012).
16. Seifi, S., Sebaibi, N., Levacher, D. and et al. "Mechanical performance of a dry mortar without cement, based on paper fly ash and blast furnace slag", *Journal of Building Engineering*, **22**, pp. 113-121 (2018).
17. Basem, H., AbdelAleem, Assem A. and Hassan, A. "Development of self-consolidating rubberized concrete incorporating silica fume" *Construction and Building Materials*, **161**, pp. 389-397 (2018).
18. Siti Shahidah Sharipudin, Ahmad Ruslan Mohd Ridzuan "Influence of waste paper sludge ash (WPSA) and fine recycled concrete aggregate (FRCA) on the compressive strength characteristic of foamed concrete", *Advanced Materials Research*, **626**, pp. 376-380 (2013).
19. Mallavarapu Rama Harshitha, Sk., Mahaboob Basha, V., Leelaveni, U. and et al. "Study of concrete by replacement of waste Paper sludge ash as a partial replacement in the cement", *International Journal For Research In Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, **7**(5), pp. 2007-2012 (Apr., 2019) (available at www.ijraset.com, ISSN: 2321-9653; IC value: 45.98; SJ impact factor: 6.887) (2019).
20. Logeswaran, V. and Ramakrishna, G. "Waste paper sludge ash - state of art", *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, **8**(9), pp. 2333- 2338 (July, 2019).
21. Varkey, Ch., John, J.P., Neema, V.N. and et al. "Study on the utilization of paper mill sludge as partial cement replacement in concrete", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, **3**(5), pp. 589-592 (May, 2016).
22. Ayomoh, M.K.O., Oke, S.A., Adedeji, W.O. and et al. "An approach to tackling the environmental and health impacts of municipal solid waste disposal in developing countries", *Journal of Environmental Management*, **88**(1), pp. 108-114 (2008).
23. Kodur, V.R. "Properties of concrete at elevated temperatures", *ISRN Civ. Eng.*, **2014**(2), pp. 1-15 (2014).
24. ASTM C39 / C39M-21, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, www.astm.org (2021).
25. ASTM C496 / C496M-17, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, www.astm.org (2017).
26. ASTM C1018-97, "Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)". (Withdrawn 2006), *ASTM International*, West Conshohocken, PA, www.astm.org (1997).
27. "Guide to design with fiber-reinforced concrete", ACI 544.4R-18 Reported by ACI Committee 544 First Printing (July 2018).
28. ASTM C597-16, "Standard test method for pulse velocity through concrete", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, www.astm.org (2016).
29. ASTM C1337 - 17, "Standard test method for creep and creep rupture of continuous fiber-reinforced advanced ceramics under tensile loading at elevated temperatures". *ASTM International*, West Conshohocken, PA, www.astm.org (2017).