



## بررسی آزمایشگاهی اثرات افزودن پوزولان و سرباره بر خصوصیات مکانیکی کامپوزیت های سیمانی خودتراکم

عارف بسطامی، فریدون امیدوی نسب\*، احمد دالوند

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۲  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۹  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

### کلمات کلیدی:

کامپوزیت سیمانی خودتراکم  
Micro Silica Fume  
Fly Ash  
GGBFS  
خصوصیات مکانیکی

**خلاصه:** استفاده از بتن در صنعت رو به گسترش است. بتن کامپوزیتی خودتراکم به عنوان کامپوزیت سیمانی با کارایی و چسبندگی بالا شناخته می شود. این کامپوزیت دارای قابلیت روانی و کارایی زیادی می باشد به طوری که استفاده از این بتن علاوه بر کاهش زمان ساخت، به کاهش هزینه نیز می انجامد. کامپوزیت های خودتراکم بدون نیاز به ویبره در قالب جای می گیرند و از کوچکترین درزی عبور می کنند. در این مطالعه اثرات افزودن میکروسیلیس، خاکستر بادی و پوزولان GGBFS بر خصوصیات مکانیکی کامپوزیت سیمانی خودتراکم در ۸ طرح اختلاط بررسی شد. در ساخت نمونه ها از ۳ افزودنی جایگزین سیمان به میزان ۱۰ درصد در طرح اختلاط های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. در آزمایش مقاومت فشاری نمونه دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس افزایش مقاومت به میزان ۵/۴ درصد بیشتر از نمونه مرجع داشت که نتایج آزمایش ها بیان کننده آن بود افزودن میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت و جذب آب در نمونه ها می شود. این در حالی هست که این پوزولان موجب کاهش روانی بتن خودتراکم می شود. از طرف دیگر در طرح اختلاط های دارای خاکستر بادی، میزان مقاومت کاهش پیدا می کرد ولی برای سرباره تغییراتی به صورت چشمگیر مشاهده نشد. در مجموع آزمایش های دیگری همچون مقاومت کششی، مقاومت خمشی، جذب آب، مویبگی، امواج پالس آلتراسونیک و مقاومت ضربه ای بر روی طرح اختلاط ها انجام گرفت.

### ۱- مقدمه

ضعیف و شکننده است [۱۰]. تحقیقات نشان می دهد که ترکیب محصولات جانبی پوزولانی و سیمانی (یا افزودنی های معدنی در بتن) باعث افزایش قابل توجهی در حالت های تازه و سخت شده می شود [۱۱-۱۳]. سرباره (GGBFS) یک مخلوط معدنی است که از صنایع فولاد به دست می آید. این سرباره به عنوان جایگزینی سیمان در بتن استفاده می شود. استفاده سرباره (GGBFS) برخی از خواص بتن مانند، گرمای هیدراتاسیون، نفوذپذیری بتن و واکنش پذیری کلرید قلیایی را کاهش می دهد. در نتیجه تاثیر زیادی بر عملکرد بتن تقویت شده خواهد داشت [۱۴-۱۷]. به خوبی ثابت شده است که مواد افزودنی معدنی مانند خاکستر بادی و سرباره ممکن است کارایی، دوام و ویژگی های بلند مدت بتن را افزایش دهند [۲۰-۱۸]. Norrarat و همکاران [۲۱] نقش (GGBFS) با اندازه ذرات مختلف بر روی سینتیک هیدراتاسیون کامپوزیت سیمان معمولی (OPC) مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند سرعت هیدراتاسیون (CC) با کاهش اندازه (GG-) (BFS) افزایش و جایگزینی سیمان با سرباره (GGBFS) باعث افزایش واکنش شد. ویژگی های (GGBFS) نشان می دهد که جایگزینی (OPC)

بتن از جمله پرمصرف ترین مصالح ساختمانی در دنیا شناخته می شود. با گسترش استفاده از بتن ویژگی هایی همچون دوام، کیفیت، تراکم و بهینه سازی آن از اهمیت ویژه ای برخوردار می شوند [۱]. بتن از جمله مصالح ساختمانی مهم می باشد که از مزایای بسیاری مانند دوام بالا، هزینه کم و تامین مواد برخوردار است [۲]. بتن خودتراکم کامپوزیتی بسیار سیال، روان و مخلوطی همگن است که بسیاری از مشکلات بتن معمولی نظیر جدا شدگی، آب انداختن، جذب آب، نفوذپذیری و ... را رفع کرده است [۳-۵]. بتن خودتراکم اولین بار برای دستیابی به ساختار بتن پایدار در سال ۱۹۸۸ مطرح شد و مطالعات اولیه پیرامون بتن خودتراکم توسط Ozawa در سال ۱۹۸۹ و Okamura در سال ۱۹۹۳ در دانشگاه توکیو انجام گرفت [۶-۸]. مطابق تعریف بارتوس [۹] بتن خودتراکم بتنی است که تحت اثر وزن خود جاری شده و بدون نیاز به هر نوع لرزاندن قالب را پر کرده و همگنی خود را حفظ کند. بتن به ماده ای گفته می شود که در فشار قوی و در کشش

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: omidinasab.f@lu.ac.ir



جدول ۱. خصوصیات شیمیایی مواد مصرفی

Table 1. Chemical properties of materials

سیمان (%)	سرباره (%)	خاکستر بادی (%)	میکروسلیس (%)	آنالیز شیمیایی
-	-	-	۰/۸	H <sub>2</sub> O
-	-	-	۰/۵	C
-	-	-	۰/۳	SiC
۲۱/۱	۳۴/۴-۳۵/۷	۳۰/۸۴	۹۴/۶-۹۶/۴	SiO <sub>2</sub>
۴/۳۷	۹/۵۳-۱۱/۰۲	۱۶/۲۱	۱/۳۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۳/۸۸	۰/۶-۱/۲	۶/۰۹	۰/۸۷	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۶۳/۳۳	۳۷-۳۵	۲۷/۷	۰/۴۹	CaO
۱/۵۶	۱۱-۹/۸	۴/۸۵	۰/۹۷	MgO
۰/۳۹	۰/۶	۱/۳۸	۰/۳۱	Na <sub>2</sub> O
۰/۵۲	۰/۶۸	۰/۳	۱/۰۱	K <sub>2</sub> O
-	-	-	۰/۱۶	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
-	-	۲/۱۳	۰/۱	SO <sub>3</sub>
-	۰/۰۰۲	-	۰/۰۴	Cl
-	-	-	۰/۹۴	L.O.I

۲- مواد مورد استفاده

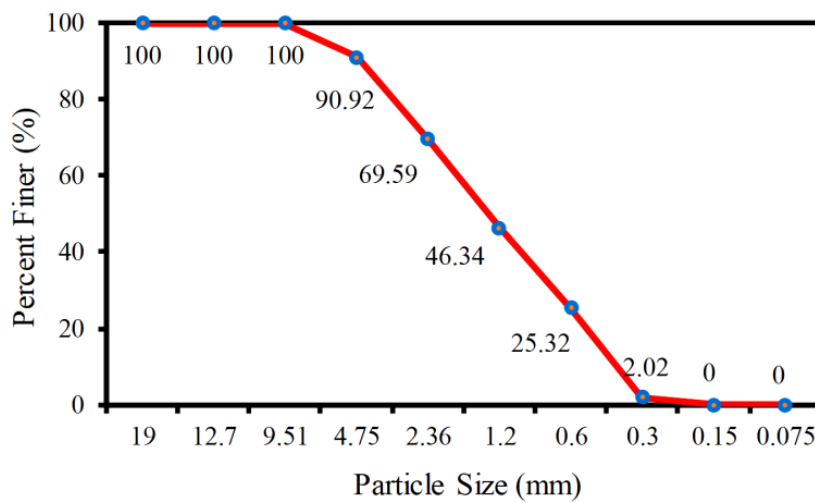
سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌های کامپوزیت سیمانی خودتراکم این تحقیق از نوع ریز دانه طبیعی عبوری از الک نمره ۸ (قطر حفره ۲/۳۶ میلی‌متر) می‌باشد. سیمان مورد استفاده از نوع سیمان تیپ ۲ و آب مصرفی نیز آب قابل شرب می‌باشد. همچنین از خاکستر بادی (سری C)، دوده سیلیسی (Micro Silica Fume) و سرباره GG- BFS در اختلاط‌های یک ترکیبی، دو ترکیبی و سه ترکیبی به عنوان جایگزین درصدی از سیمان در این تحقیق استفاده شد. برای ایجاد خاصیت خودتراکمی و کارایی لازم در کامپوزیت سیمانی مورد استفاده از یک نوع فوق روان کننده کربوکسیلاتی با نام تجاری Dezobuild 10 استفاده گردید. خصوصیات شیمیایی و تصویر مواد مصرفی در جدول ۱ و شکل ۱ و نمودار دانه‌بندی در شکل ۲ نشان داده شده است.

توسط (GGBFS) به طور معمول باعث کاهش مقاومت اولیه (۷ تا ۲۸ روز)، بیشتر شدن مقاومت در طولانی مدت، نفوذپذیری کم یون کلراید، خزش کمتر، مقاومت بیشتر در برابر سولفات، دوام در برابر واکنش سیلیکا قلیایی (ASR) و گرمای کم هیدراتاسیون می‌شود [۲۲-۲۴]. امواج پالس التراسونیک (UPV) یکی از تکنیک‌های محبوب برای ارزیابی یکنواختی مقاومت بتن و مقاومت فشاری سازه‌های موجود است [۲۵]. در تکنیک UPV، مقاومت و دیگر خواص مکانیکی بتن بر سرعت امواج فشرده تاثیر می‌گذارد. سرعت این امواج نیز بستگی به تراکم و انعطاف‌پذیری مواد دارد [۲۶]. Kaplan [۲۷] ارتباط بین مقاومت فشاری و UPV برای بتن در ستون‌ها را تعیین کرد. مشخص شد که مقاومت از رابطه پیش‌بینی شده ۱۸٪ کمتر از مقاومت بتن در ستون است. در این پژوهش سعی بر آن شد که علاوه بر سرباره GGBFS، از دو پوزولان (Micro Silica Fume، Fly Ash) نیز در طرح اختلاط‌ها استفاده و تاثیر افزودن این مواد بر خصوصیات مکانیکی کامپوزیت سیمانی، مورد بررسی قرار داده شد.



شکل ۱. (الف): Microsilica، (ب): سرباره GGBFS، (ج): سیمان، (د): خاکستر بادی (Fly Ash)

Fig. 1. (a) cement, (b) fly ash, (c) GGBFS slag, (d) micro silica fume



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده

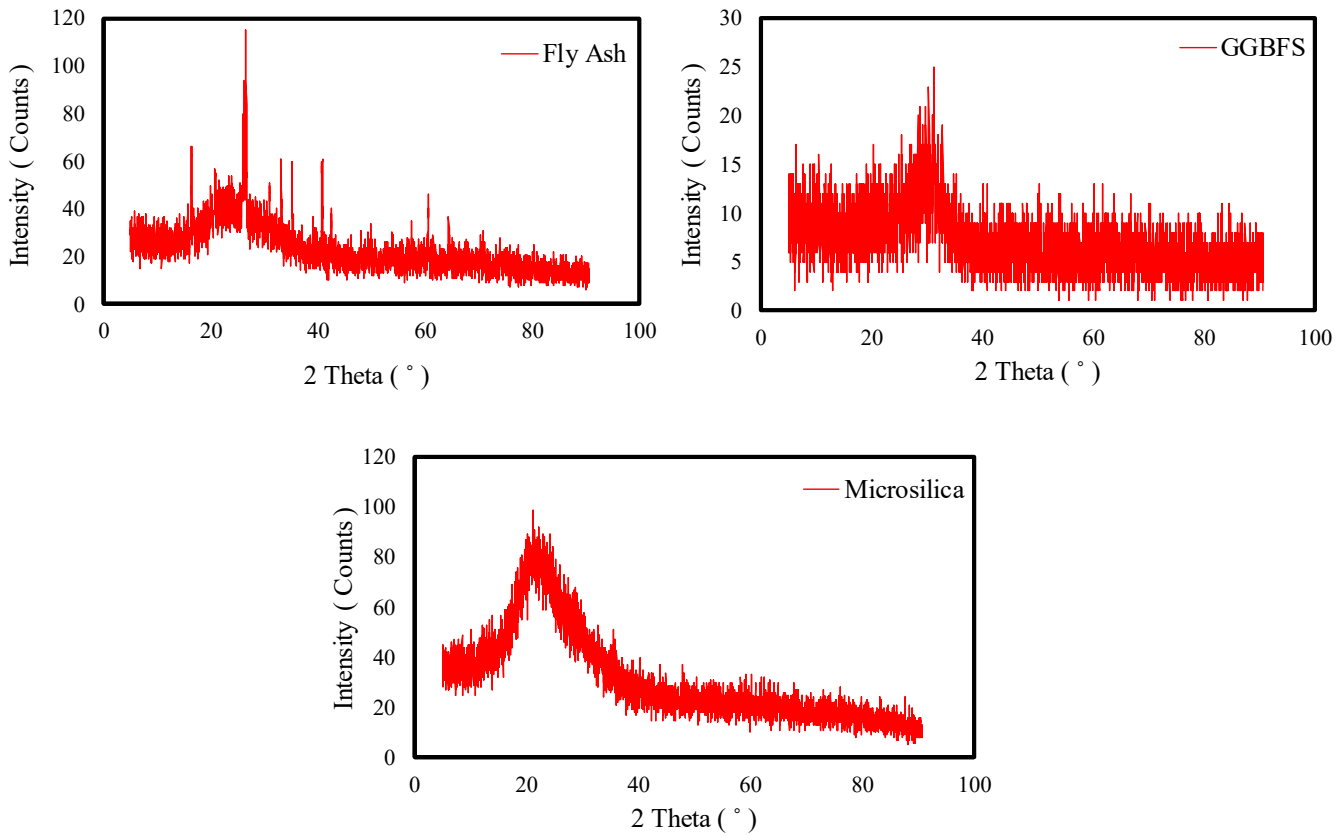
Fig. 2. Granulation graph of stone materials used in the present study

#### ۴- روش انجام آزمایشات

آزمایشات حلقه J (J-Ring)، جعبه L (L-box)، جعبه U (U-box) و قیف V (V-funnel)، جهت اندازه‌گیری کارایی بتن تازه انجام شد. نتایج آزمایش‌های بتن تازه بر اساس استاندارد [۴۱] EFNARC می‌باشد. آزمایش مقاومت فشاری کامپوزیت‌های سیمانی با استفاده از چک فشاری ۲۰۰ تنی و بر اساس استاندارد ASTM C39 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مکعب، آزمایش کشش برزیلی (دو نیم شدن) بر اساس استاندارد ASTM C496 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مربع، مقاومت خمشی بر اساس آزمایش بار سه نقطه ای مرکزی ASTM C293-79 می‌باشد. به همین منظور

#### ۳- شیوه ساخت نمونه‌ها

به منظور انجام مطالعه بر روی اثرات افزودن خاکستر بادی، سرباره (GGBFS) و میکروسیلیس، ۸ طرح اختلاط مطابق با جدول ۲ است. در ابتدا سنگدانه‌ها و مواد سیمانی به همراه مواد افزودنی خشک درون میکسر ریخته شد. در ادامه و بعد از ترکیب شدن مواد خشک، حدود ۹۰٪ آب مورد نیاز به مخلوط اضافه گردید. باقی مانده آب مصرفی به همراه فوق روان کننده به مرور به مخلوط اضافه شد. پس از اختلاط مناسب مواد در میکسر نمونه‌ها درون قالب ریخته شد. بعد از گذشت ۲۴ ساعت نمونه‌ها از درون قالب خارج گردید. در نهایت نمونه‌های ساخته شده به منظور عمل‌آوری مناسب به مدت ۲۸ روز در آب قرار داده شدند.



شکل ۳. آزمایشگاه (Micro Silica)، (Fly Ash)، (GGBFS): (XRD)

Fig. 3. XRD: X-Ray Diffraction: (a) GGBFS, (b) fly ash, (c) micro silica fume

جدول ۲. طرح اختلاط مورد استفاده برای یک متر مکعب

Table 2. The mix designs used for one cubic meter

شماره	عنوان طرح اختلاط	سیمان (kg)	سنگدانه ریز مصرفی (kg)	سرباره (G%)	خاکستر بادی (FA%)	میکروسیلیس (MS%)	فوق روان کننده (kg)
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰	۰	۰	۳/۶
۲	G0FA0MS10	۱۰۸۰	۱۲۰۰	۰	۰	۱۰	۴/۸
۳	G0FA10MS0	۱۰۸۰	۱۲۰۰	۰	۱۰	۰	۳/۶
۴	G10FA0MS0	۱۰۸۰	۱۲۰۰	۱۰	۰	۰	۳/۶
۵	G0FA10MS10	۹۶۰	۱۲۰۰	۰	۱۰	۱۰	۳/۶
۶	G10FA0MS10	۹۶۰	۱۲۰۰	۱۰	۰	۱۰	۴/۸
۷	G10FA10MS0	۹۶۰	۱۲۰۰	۱۰	۱۰	۰	۳/۶
۸	G10FA10MS10	۸۴۰	۱۲۰۰	۱۰	۱۰	۱۰	۴/۸



شکل ۴. قالب‌گیری نمونه‌ها

Fig. 4. Molding of specimens

#### ۵- نتایج آزمایش‌های انجام شده

##### ۵-۱- نتایج آزمایش‌های فاز روانی بتن تازه

در جدول ۳ نتایج آزمایش صفحه J-Ring ارائه شده است. همچنین در شکل ۵ نحوه انجام آزمایش‌های روانی بر روی بتن تازه نشان داده شده است. اسلامپ روانی برای طرح اختلاط G0FA0MS0 که نمونه مرجع (بدون هیچ افزودنی پوزولان و سرباره)، مقدار ۷۷۰ میلی‌متر به دست آمد. این مقدار نشان دهنده‌ی خودتراکم بودن بتن کامپوزیت سیمانی مورد استفاده می‌باشد [۲۸]. کمترین اسلامپ برای نمونه دارای میکروسیلیس به مقدار ۱۰ درصد وزن سیمان (G0FA0MS10)، به مقدار ۶۸۰ میلی‌متر شد، که نسبت

مطابق با استاندارد ذکر شده، آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های خمشی انجام گرفت. نمونه‌های خمشی دارای ابعاد  $۳۲۰ \times ۸۰ \times ۶۰$  میلی‌متر مکعب بودند. آزمایش جذب آب طبق استاندارد ASTM C642 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای  $۵۰ \times ۱۰۰$  میلی‌متر مربع، آزمایش موینگی طبق استاندارد ASTM C1585، آزمایش امواج آلتراسونیک طبق استاندارد ASTM C597 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۱۰۰$  میلی‌متر مکعب، همچنین آزمایش ضربه افتان مطابق با آیین‌نامه ACI 544 انجام شد. به منظور انجام آزمایش ضربه افتان نمونه‌های دیسکی  $۶۵ \times ۱۵۰$  میلی‌متر مربع ساخته شد.





شکل ۵. آزمایش‌های. (الف) جعبه U، (ب) جعبه L، (ج) قیف V، (د) حلقه J

Fig. 5. Tests: (a) U-box, (b) L-box, (c) V-funnel, (d) J-Ring

داشت. این ترکیب (G10FA10MS0) نسبت به نمونه دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0)، دارای اسلامپ برابر بود. قطر دایره این ترکیب نسبت به نمونه دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، ۲/۷۴ درصد بیشتر شد.

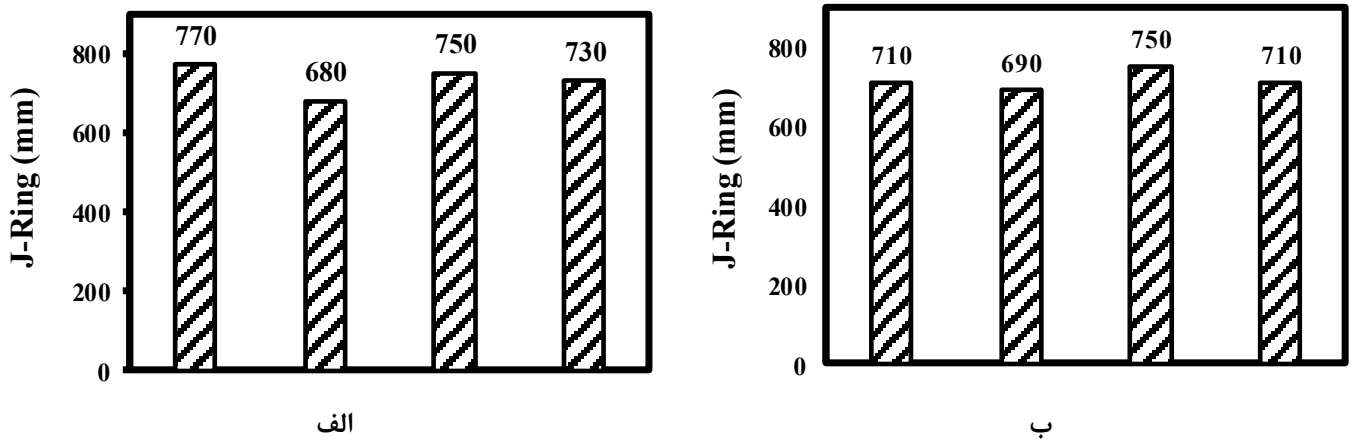
در طرح اختلاط ۳ ترکیبی (میکروسیلیس، خاکستر بادی، سرباره) هر کدام به مقدار ۱۰ درصد (G10FA10MS10)، اسلامپ روانی ۷۱۰ میلی‌متر شد که نسبت به نمونه مرجع، ۷/۷۹ درصد کاهش داشت. دلیل این مقدار کاهش روانی بتن وجود میکروسیلیس (که تاثیر منفی روی روانی بتن می‌گذارد) می‌باشد.

#### ۵-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی مطابق استاندارد [۳۳] ASTM C39 در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج حاصل از این آزمایش بیانگر این بود که میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود ولی خاکستر بادی و سرباره تاثیر بالعکس بر روی مقاومت داشتند. مقاومت فشاری برای طرح اختلاط (G0FA0MS0) که نمونه مرجع است، مقدار ۸۱/۴ مگاپاسکال به دست آمد. نتیجه مقاومت فشاری برای نمونه مرجع با توجه به نسبت طرح اختلاط برابر سیمان و مصالح سنگی که ۸۰ مگاپاسکال مد نظر بود، که این مقدار قابل قبول است. مقاومت فشاری طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس (G0FA0MS10)، ۸۵/۸ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۵/۴ درصد افزایش داشت که نشان دهنده تاثیر مستقیم این افزودنی بر روی مقاومت فشاری بتن است. مقاومت

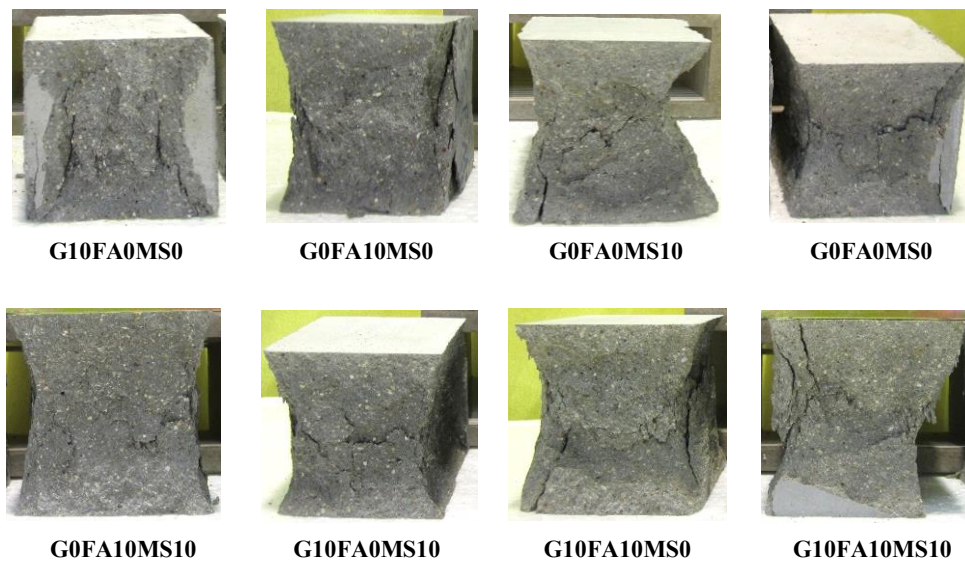
به نمونه مرجع ۱۱/۶۹ درصد کاهش داشت. این کاهش اسلامپ با توجه به جذب آب بالای میکروسیلیس دور از ذهن نبود. افزودن خاکستر بادی و سرباره در مقایسه با میکروسیلیس، تاثیر زیادی در کاهش روانی بتن نداشتند که نشان دهنده جذب آب پایین این دو افزودنی بود. قطر صفحه J-Ring نمونه دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0)، ۷۵۰ میلی‌متر شد که ۲/۶ درصد نسبت به نمونه مرجع و همچنین افزودن ۱۰ درصد سرباره (GGBFS)، قطر صفحه J-Ring مقدار ۷۳۰ میلی‌متر شد که نسبت به نمونه مرجع ۵/۱۹ درصد کاهش داشتند.

در طرح اختلاط ۲ ترکیبی دارای میکروسیلیس و خاکستر بادی (G0FA10MS10)، اسلامپ روانی ۷۱۰ میلی‌متر شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۷/۷۹ درصد کاهش داشت. در این ترکیب با وجود میکروسیلیس (که به تنهایی باعث کاهش بیشتر اسلامپ شده بود)، وجود خاکستر بادی در ترکیب موجب کاهش جذب آب بالای میکروسیلیس در طرح اختلاط شد. در طرح اختلاط دارای میکروسیلیس و سرباره (G10FA0MS10)، اسلامپ روانی ۶۹۰ میلی‌متر شد که نسبت به نمونه مرجع ۱۰/۳۹ درصد کاهش داشت. این ترکیب نسبت به نمونه دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، ۵/۴۸ درصد کاهش روانی بتن دارد که دلیل این کاهش، وجود میکروسیلیس در ترکیب است، که با توجه به نتیجه این طرح اختلاط مشخص شده سرباره تاثیر در کاهش جذب آب توسط میکروسیلیس و افزایش روانی بتن نداشته است. در طرح اختلاط ۲ ترکیبی دارای خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS0)، اسلامپ روانی ۷۵۰ میلی‌متر شد که نسبت به نمونه مرجع ۲/۶ کاهش



شکل ۶. نمودار تغییرات قطر حلقه J در طرح اختلاط های: الف) یک ترکیبی، ب) چند ترکیبی

Fig. 6. Graph of J-Ring diameter variations in: (a) one-combination mixtures, (b) the multi-combination mix designs



شکل ۷. مد انهدام نمونه های مکعبی مقاومت فشاری

Fig. 7. Failure modes of cubic specimens of compressive strength test

جدول ۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

Table 4. Results of the compressive strength test

شماره	عنوان طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)			انحراف معیار	
		نمونه				
		۱	۲	۳		
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۸۱/۸	۸۲/۳	۸۰/۱	۸۱/۴	۱/۱۵
۲	G0FA0MS10	۸۹/۱	۸۲/۲	۸۶/۱	۸۵/۸	۳/۴۶
۳	G0FA10MS0	۸۵	۷۵/۱	۸۳/۲	۸۱/۱	۵/۲۷
۴	G10FA0MS0	۷۴/۹	۷۷/۵	۷۸/۹	۷۷/۱	۲/۰۳
۵	G0FA10MS10	۷۹/۹	۷۸/۲	۷۳/۳	۷۷/۱۳	۳/۴۳
۶	G10FA0MS10	۹۱/۶	۸۳/۷	۷۴/۶	۸۳/۳	۸/۵۱
۷	G10FA10MS0	۷۲/۱	۸۶/۶	۷۲/۷	۷۱/۱۳	۲/۲۱
۸	G10FA10MS10	۸۰/۹	۷۱/۲	۷۶/۶	۷۶/۲۳	۴/۸۶

است. مشاهدات این آزمایش نشان داد که برخلاف آزمایش مقاومت فشاری، میکروسلیس تاثیر زیادی در افزایش و کاهش مقاومت کششی ندارد. مقاومت کششی برای طرح اختلاط (G0FA0MS0) که نمونه مرجع (بدون هیچ افزودنی پوزولان و سرباره) است، ۴/۶۵ مگاپاسکال شد. در طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد میکروسلیس (G0FA0MS10)، مقاومت کششی ۴/۴۵ مگاپاسکال شد که ۴/۳ درصد نسبت به نمونه مرجع کاهش یافت. مقاومت کششی طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0)، ۴/۶۷ مگاپاسکال شد که ۰/۴۳ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش داشت. مقاومت کششی طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، ۳/۷۹ مگاپاسکال شد که ۱۸/۴۹ درصد نسبت به نمونه مرجع کاهش داشت. بنابراین با افزودن سرباره میزان مقاومت کششی بتن خودتراکم کاهش یافت.

مقاومت کششی در طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسلیس و خاکستر بادی (G0FA10MS10)، ۳/۶۷ مگاپاسکال شد که ۲۱/۰۷ درصد نسبت به نمونه مرجع کاهش پیدا کرد. مقاومت کششی در طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسلیس و سرباره (G10FA0MS10)، ۳/۳۵ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۲۷/۹۶ درصد کاهش داشت. مقاومت کششی در طرح اختلاط دو ترکیبی خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS0)، ۴/۰۱ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۱۳/۷۶ درصد کاهش یافت.

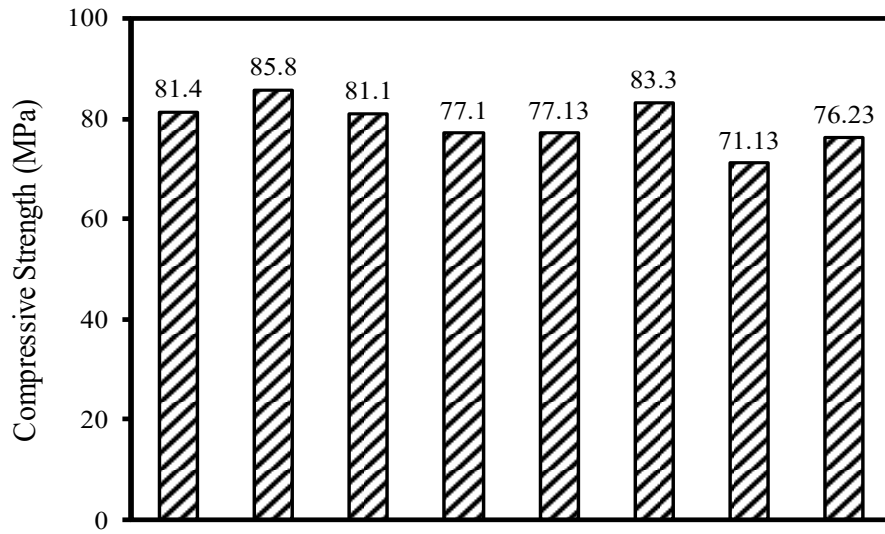
فشاری طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0)، ۸۱/۱ مگاپاسکال شد که ۰/۳۷ درصد و طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، ۷۷/۱ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۵/۲۸ درصد کاهش مقاومت داشت.

مقاومت فشاری طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسلیس و خاکستر بادی (G0FA10MS10)، ۷۷/۱۳ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۵/۲۵ مقاومت کاهش یافت. بررسی این امر نشان می‌دهد که هر چند میکروسلیس موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود ولی خاکستر بادی باعث تغییر این خاصیت میکروسلیس شد. مقاومت فشاری طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسلیس و سرباره (G10FA0MS10)، ۸۳/۳ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۲/۳۳ درصد افزایش پیدا کرد. مقاومت فشاری طرح اختلاط دو ترکیبی خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS0)، ۷۱/۱۳ مگاپاسکال شد که ۱۲/۶۲ درصد کاهش نسبت به نمونه مرجع داشت. مقاومت فشاری طرح اختلاط سه ترکیبی میکروسلیس، خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS10)، ۷۶/۲۳ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۶/۳۵ کاهش یافت.

۵-۳- نتایج آزمایش مقاومت کششی

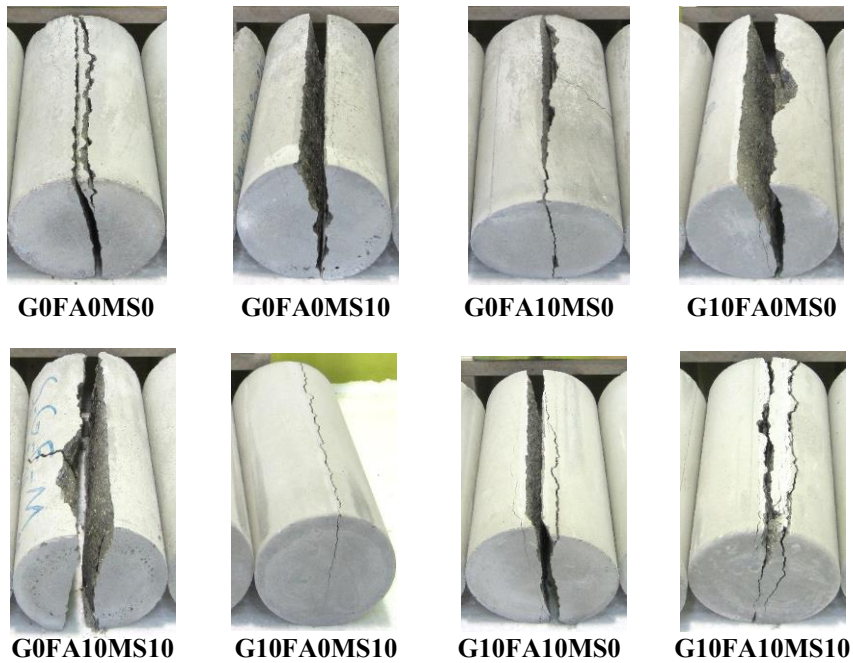
نتایج آزمایش کشش برزلی (دو نیم شدن) نمونه‌های کامپوزیت سیمانی مطابق با ASTM C496[۳۴] در جدول ۵ نشان داده شده





شکل ۸. نمودار مقاومت فشاری (MPa)

Fig.8. Graph of the compressive strength (MPa)



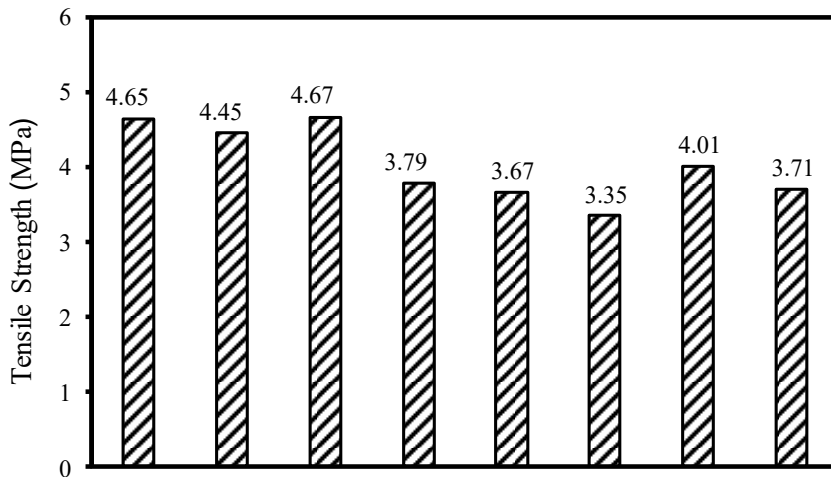
شکل ۹. مد انهدام نمونه های آزمایش مقاومت کشش برزیلی (دو نیم شدن)

Fig. 9. Failure modes of specimens in the (splitting) Brazilian tensile strength test

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی

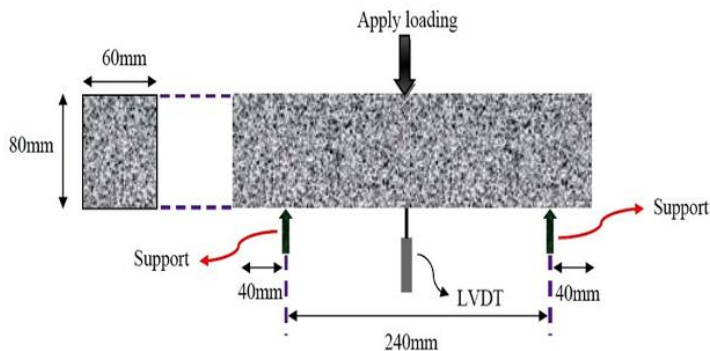
Table 5. Results of the tensile strength test

شماره	عنوان طرح اختلاط	نمونه ۱		نمونه ۲		نمونه ۳		انحراف معیار	
		(MPa)	(kg)	(MPa)	(kg)	(MPa)	(kg)		
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۳/۶۳	۱۱/۴	۴/۱۴	۱۳	۶/۱۸	۱۹/۴	۴/۶۵	۱/۳۵
۲	G0FA0MS10	۴/۹۴	۱۵/۵	۳/۲۵	۱۰/۲	۵/۱۶	۱۶/۲	۴/۴۵	۱/۰۴
۳	G0FA10MS0	۴/۳۴	۱۳/۶	۵/۲۹	۱۶/۶	۴/۳۹	۱۳/۸	۴/۶۷	۰/۵۳
۴	G10FA0MS0	۳/۹۲	۱۲/۳	۴/۷۸	۱۵	۲/۶۷	۸/۴	۳/۷۹	۱/۰۶
۵	G0FA10MS10	۴/۶۸	۱۴/۷	۳/۴۴	۱۰/۸	۲/۹	۹/۱	۳/۶۷	۰/۹۱
۶	G10FA0MS10	۳/۴۷	۱۰/۹	۳/۳۴	۱۰/۵	۳/۲۵	۱۰/۲	۳/۳۵	۰/۱۱
۷	G10FA10MS0	۴/۱۱	۱۲/۹	۴/۰۴	۱۲/۷	۳/۸۸	۱۲/۲	۴/۰۱	۰/۱۲
۸	G10FA10MS10	۴/۷۱	۱۴/۸	۲/۹۴	۹/۲	۳/۴۷	۱۰/۹	۳/۷۱	۰/۹۱



شکل ۱۰. نمودار مقاومت کشش برزیلی (MPa)

Fig. 10. Graph of Brazilian tensile strength (MPa)



ب



الف

شکل ۱۱. الف) و ب) نحوه انجام آزمایش مقاومت خمشی

Fig. 11. (a) and (b): The flexural strength test

کاهش یافت. این موضوع نشان داد که در طرح اختلاط یک ترکیبی همانند آزمایش مقاومت فشاری، خاکستر بادی تاثیر منفی در افزایش مقاومت دارد. در طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسیلیس و خاکستر بادی (G0FA10MS10)، مقاومت خمشی ۶/۴۳ مگاپاسکال به دست آمد که ۲۵/۶ درصد نسبت به نمونه مرجع کاهش دارد. مقاوت خمشی طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسیلیس و سرباره (G10FA0MS10)، ۷/۱۳ مگاپاسکال به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع ۱۷/۵ درصد کاهش داشت. مقاومت خمشی طرح اختلاط دو ترکیبی خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS0)، ۷/۲۶ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۱۵/۹۸ درصد کاهش یافت. با توجه به این نتایج در طرح اختلاطهای دو ترکیبی حاوی خاکستر بادی، می توان گفت که تاثیر منفی خاکستر بادی برتری بیشتری نسبت به میکروسیلیس دارد.

مقاومت خمشی طرح اختلاط سه ترکیبی میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS10)، ۷/۰۹ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۱۷/۹۴ درصد کاهش یافت. پس می توان نتیجه گرفت که فقط در طرح اختلاط دارای میکروسیلیس (G0FA0MS10)، افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) را داشتیم ولی در سایر طرح اختلاطها مقاومت خمشی نسبت به نمونه مرجع کاهش پیدا کرد.

مقاومت کششی در طرح اختلاط سه ترکیبی میکروسیلیس و خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS10)، ۳/۷۱ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۲۰/۲۱ درصد کاهش پیدا کرد. بررسی این امر نشان می دهد افزودن خاکستر بادی و سرباره چه به صورت جداگانه (۱۰ درصد جایگزین سیمان) و چه به صورت ترکیب دو یا چندتایی مقاومت کششی را به شکل چشم گیری کاهش می دهند.

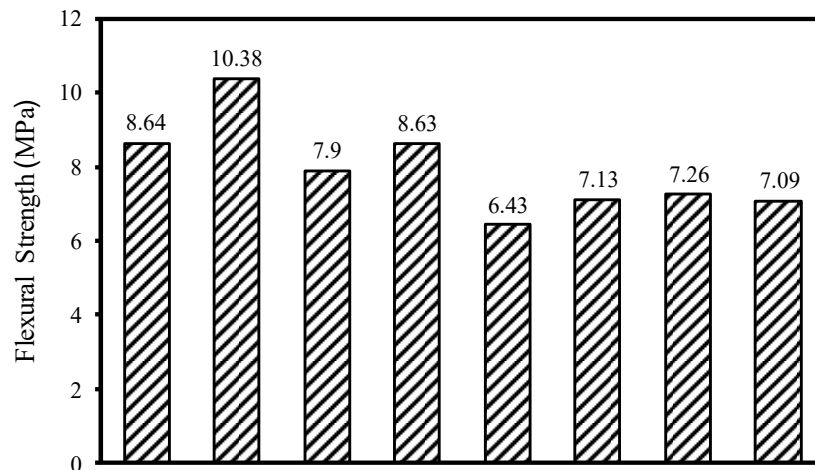
#### ۴-۵ نتایج آزمایش مقاومت خمشی

در این تحقیق مقاومت های خمشی نمونه های کامپوزیتی بر اساس استاندارد [۳۵] ASTM C293 محاسبه گردید. برخلاف آزمایش مقاومت کششی، در این آزمایش میکروسیلیس تاثیر مثبت در افزایش مقاومت داشت. مقاومت خمشی برای طرح اختلاط نمونه مرجع، ۸/۶۴ مگاپاسکال به دست آمد. با افزودن ۱۰ درصد میکروسیلیس (G0FA0MS10)، مقاومت خمشی ۱۰/۳۸ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۲۰/۱۴ درصد افزایش پیدا کرد که نشان دهنده تاثیر مثبت میکروسیلیس بود. در طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0)، مقاومت خمشی ۷/۹۱ مگاپاسکال به دست آمد که ۸/۵۲ درصد نسبت به نمونه مرجع کاهش یافت. طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، مقاومت خمشی ۸/۶۳ مگاپاسکال شد که ۰/۱۲ درصد نسبت به نمونه مرجع

جدول ۶. نتایج آزمایش مقاومت خمشی تیرها

Table 6. Test results of the flexural strength of beams

شماره	عنوان طرح اختلاط	مقاومت خمشی		تغییر مکان نقطه تسلیم $\Delta_y$ (mm)	تغییر مکان نهایی $\Delta_u$ (mm)	شکل پذیری	انحراف معیار
		(MPa)	(kg)				
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۸/۶۴	۸۵۵/۳۲	۰/۶۵	۰/۹۵	۱/۴۶	۲/۲۱
۲	G0FA0MS10	۱۰/۳۸	۸۷۰/۲۳	۰/۹۴	۱/۰۷	۱/۱۴	۰/۵۷
۳	G0FA10MS0	۷/۹۱	۸۳۱/۵۳	۰/۶	۰/۹۹	۱/۶۵	۲/۱۷
۴	G10FA0MS0	۸/۶۳	۸۹۶/۳۱	۰/۵۸	۰/۹۱	۱/۵۷	۲/۲۳
۵	G0FA10MS10	۶/۴۳	۵۴۸/۰۲	۰/۳۷	۰/۷۹	۲/۱۳	۰/۵۲
۶	G10FA0MS10	۷/۱۳	۶۳۰/۷۶	۰/۵۹	۰/۷۹	۱/۳۴	۰/۶۷
۷	G10FA10MS0	۷/۲۶	۵۸۹/۱۶	۰/۲۶	۰/۶۷	۲/۵۸	۰/۱
۸	G10FA10MS10	۷/۰۹	۵۸۴/۳۸	۰/۲۴	۰/۸۷	۳/۶۳	۰/۳۴



شکل ۱۲. نمودار میزان مقاومت خمشی تیرها (MPa)

Fig. 12. Graph of the flexural strength of beams (MPa)

جدول ۷. نتایج آزمایش درصد جذب آب

Table 7. Results of water absorption percentage

شماره	عنوان طرح اختلاط	درصد جذب آب			انحراف معیار
		۱	۲	۳	
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۷/۴	۷/۲۸	۷/۵۱	۰/۱۲
۲	G0FA0MS10	۹/۱۲	۷/۱۳	۸/۴۴	۰/۵۴
۳	G0FA10MS0	۷/۴۲	۷/۳۷	۷/۱	۰/۱۷
۴	G10FA0MS0	۶/۶۲	۷/۱۳	۷/۰۱	۰/۲۶
۵	G0FA10MS10	۵/۵۱	۵/۷	۵/۷۹	۰/۱۴
۶	G10FA0MS10	۵/۷۲	۵/۵۳	۶/۲۲	۰/۳۶
۷	G10FA10MS0	۷/۷	۷/۸۷	۸/۱۴	۰/۲۲
۸	G10FA10MS10	۶/۱۵	۵/۹۷	۶/۱۸	۰/۱۱

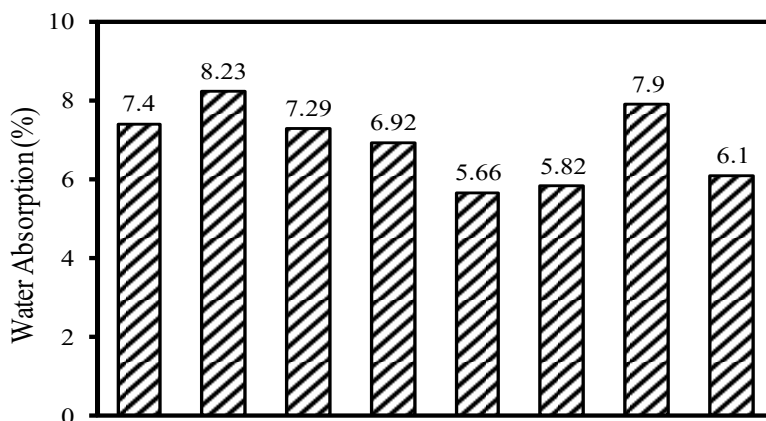
۵-۵- نتایج آزمایش جذب آب

جذب آب ۲۱/۳۵ درصد کاهش یافت. این ترکیب در مقایسه با نمونه دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس (G0FA0MS10)، ۲۹/۲۸ درصد کاهش در جذب آب داشت. در مقایسه با نمونه دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، مقدار جذب آب ۱۵/۹ درصد کاهش یافت. در طرح اختلاط دو ترکیبی ترکیبی خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS0)، مقدار جذب آب نسبت به نمونه مرجع ۶/۷۶ درصد بیشتر شد. این ترکیب در مقایسه با نمونه دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0)، ۸/۳۷ درصد آب بیشتری جذب کرد. همچنین در مقایسه با نمونه دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، مقدار جذب آب ۱۴/۱۶ درصد بیشتر شد. از این نتایج می‌توان این گونه برداشت کرد که خاصیت خاکستر بادی در کاهش جذب آب حتی در ترکیب با دیگر جایگزین‌های سیمان همانند میکروسیلیس، تاثیر به مراتب بیشتر دارد.

در طرح اختلاط سه ترکیبی میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS10) مقدار جذب آب نسبت به نمونه مرجع ۱۷/۵۷ درصد کاهش داشت. این طرح اختلاط در مقایسه با نمونه دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس (G0FA0MS10)، ۲۵/۸۸ درصد مقدار آب کمتری جذب کرد. همچنین در مقایسه با نمونه دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0)، ۱۶/۳۲ درصد آب کمتری جذب کرد. از طرفی در مقایسه با نمونه دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، مقدار جذب آب ۱۱/۸۵ درصد کاهش یافت.

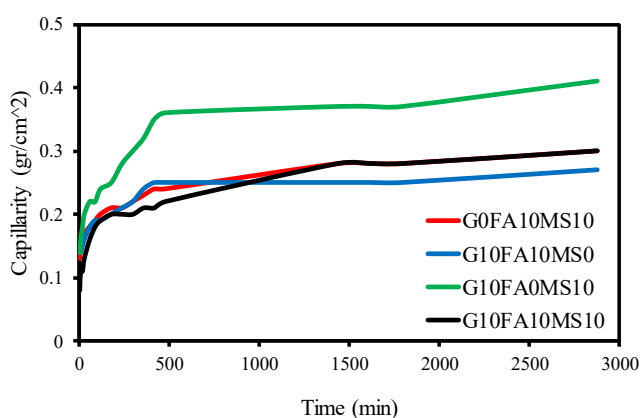
نتایج این آزمایش طبق استاندارد [۳۶] ASTM C642 در جدول ۷ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق این نتایج جذب آب برای نمونه مرجع، ۷/۴ درصد شد. با افزودن ۱۰ درصد میکروسیلیس (G0FA0MS10)، مقدار جذب آب ۸/۲۳ شد که نسبت به نمونه مرجع ۱۱/۲۲ درصد بیشتر شد. با توجه خاصیت میکروسیلیس، این افزایش درصد جذب آب کاملاً مورد انتظار بود. در ترکیب دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0) و ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، مقدار جذب آب ۷/۲۹ درصد و ۶/۹۲ درصد به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱/۴۹ و ۶/۴۹ درصد کاهش داشتند که با توجه به نتایج آزمایش روانی بتن و عدم تاثیر این دو پارامتر بر روی کاهش روانی، این کاهش جذب آب امری قابل قبول بود. در طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسیلیس و خاکستر بادی (G0FA10MS10)، جذب آب مقدار ۵/۶۶ درصد شد که نسبت به نمونه مرجع ۲۳/۵۱ درصد کاهش داشت. این ترکیب در مقایسه با نمونه دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس (G0FA0MS10)، ۳۱/۲۳ درصد آب کمتری را جذب کرد. همچنین در مقایسه با ترکیب دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0)، مقدار جذب آب ۲۲/۳۶ درصد کاهش یافت. این موضوع نشان داد که خاکستر بادی در کاهش جذب آب در کنار میکروسیلیس که ماده‌ای با خاصیت جذب آب هست، تاثیر به مراتب بیشتر داشته است. در طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسیلیس و سرباره (G10FA0MS10)،



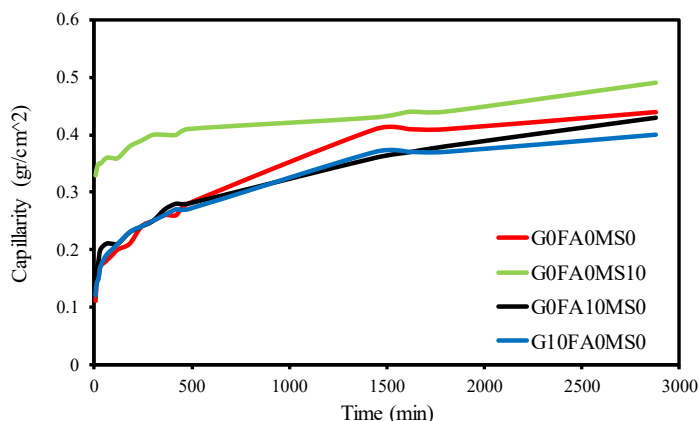


شکل ۱۳. نمودار درصد جذب آب طرح اختلاط ها

Fig. 13. Graph of water absorption percentage of mix designs



ب



الف

شکل ۱۴. نمودار درصد جذب آب طرح اختلاط: (الف) یک ترکیبی، (ب) چند ترکیبی

Fig. 14. Graph showing the water absorption percentage of the: (a) one-combination mix designs, (b) multi-combination mix designs

خاصیت میکروسلیس، همانطور که در آزمایش جذب آب حاصل شد دور از انتظار نبود. میانگین مویبگی در طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0)، ۰/۲۶ گرم بر سانتی متر مربع شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۴ درصد افزایش داشت. در طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، میانگین مویبگی نسبت به نمونه مرجع تغییری نداشت. این موضوع نشان داد که همانند نتایج آزمایش جذب آب، خاکستر بادی و سرباره میزان جذب آب پایینی دارند.

۵-۶ نتایج آزمایش مویبگی

آزمایش مویبگی نمونه‌های کامپوزیت سیمانی بر اساس استاندارد [۳۷] ASTM C1585 انجام شد. نتایج این آزمایش را می‌توان با نتایج آزمایش جذب آب برابر دانست. مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۱۴ میانگین مویبگی برای طرح اختلاط مرجع (G0FA0MS0)، ۰/۲۵ گرم بر سانتی متر مربع محاسبه گردید. با افزودن ۱۰ درصد میکروسلیس (G0FA0MS10)، میانگین مویبگی ۰/۳۹ گرم بر سانتی متر مربع به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع، ۵۶ درصد افزایش داشت. این افزایش مویبگی با توجه به



شکل ۱۵. دستگاه تست امواج آلتراسونیک

Fig. 15. The ultrasonic pulse velocity testing machine

شد که وجود خاکستر بادی همانند نتایج آزمایش جذب آب، باعث کاهش خاصیت مویبندی می‌شود.

در طرح اختلاط سه ترکیبی میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS10)، مویبندی ۰/۲ گرم بر سانتی‌متر مربع شد که نسبت به نمونه مرجع، G0FA0MS10، G0FA10MS0 و G10FA0MS0 به ترتیب ۲۰، ۴۸/۷۲، ۲۳/۰۸ و ۲۰ درصد کاهش داشت.

#### ۵-۷- نتایج آزمایش امواج پالس آلتراسونیک

این آزمایش بر اساس استاندارد [۳۸] ASTM C597 انجام شد. دستگاه مورد استفاده به منظور انجام این آزمایش در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نتایج آزمایش آلتراسونیک انجام شده بر روی ۸ طرح اختلاط در شکل ۱۶ ارائه شده است. این آزمایش به روش مستقیم انجام شد. مطابق با طبقه‌بندی ارائه شده توسط Whitehurst [۴۰] کیفیت بتن

در طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسیلیس و خاکستر بادی (G0FA10MS10)، میانگین مویبندی ۰/۲۲ گرم بر سانتی‌متر مربع شد نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۱۲ درصد کاهش داشت. طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسیلیس و سرباره (G10FA0MS10)، مویبندی ۰/۲۱ گرم بر سانتی‌متر مربع شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۱۶ درصد کاهش داشت. این ترکیب در مقایسه با نمونه دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس (G0FA0MS10)، ۴۶/۱۵ درصد و همچنین در مقایسه با نمونه دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، ۱۶ درصد کاهش داشت. طرح اختلاط دو ترکیبی خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS0)، میانگین مویبندی ۰/۲۸ گرم بر سانتی‌متر مربع شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۱۲ درصد کاهش داشت. این ترکیب در مقایسه با نمونه دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0) و نمونه دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0) به ترتیب ۱۱/۵۴ و ۱۶ درصد افزایش داشت. با توجه به نتایج طرح اختلاط‌های دو ترکیبی، این نتیجه برداشت

جدول ۸. نتایج تست امواج آلتراسونیک

Table 8. Results of the ultrasonic pulse velocity test

شماره	عنوان طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)	سرعت پالس اولتراسونیک (km/s)	درصد افزایش نسبت به نمونه مرجع	Fc=13.305e0.1264vp
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۸۱/۴	۳/۵۱	۰	۲۰/۷۳
۲	G0FA0MS10	۸۵/۸	۳/۶۵	۴	۲۱/۱
۳	G0FA10MS0	۸۱/۱	۳/۶۱	۲/۸	۲۱
۴	G10FA0MS0	۷۷/۱	۳/۵۵	۱/۱	۲۰/۸۴
۵	G0FA10MS10	۷۷/۱۳	۳/۷۲	۶	۲۱/۲۹
۶	G10FA0MS10	۸۳/۳	۳/۷۱	۵/۷	۲۱/۲۶
۷	G10FA10MS0	۷۱/۱۳	۳/۶۹	۵/۱	۲۱/۲۱
۸	G10FA10MS10	۷۶/۲۳	۳/۹۳	۱۲	۲۱/۸۶

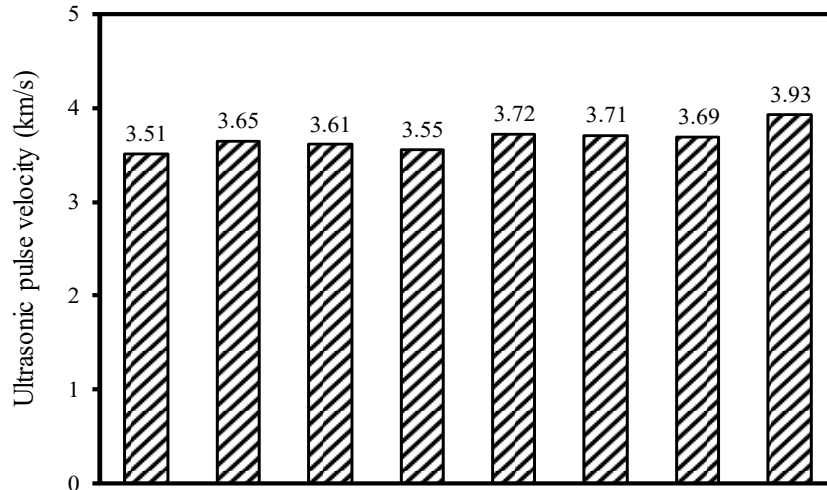
نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای این دو ماده جایگزین سیمان، می‌توان گفت این دو ماده در آزمایشات مقاومت فشاری و امواج آلتراسونیک رابطه عکس با یکدیگر دارند.

سرعت در طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسیلیس و خاکستر بادی (G0FA10MS10)، ۳/۷۲ کیلومتر بر ثانیه شد که نسبت به نمونه مرجع ۵/۹۸ درصد افزایش یافت سرعت در طرح اختلاط دو ترکیبی خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS0)، ۳/۶۹ کیلومتر بر ثانیه شد که نسبت به نمونه مرجع ۵/۱۳ درصد افزایش داشت. سرعت امواج آلتراسونیک در این دو طرح اختلاط نسبت به نمونه مرجع بیشتر بود که نشان دهنده تخلخل بهتر است اما نتایج این دو نمونه در آزمایش مقاومت فشاری متفاوت با آزمایش سرعت امواج بود که می‌توان گفت وجود خاکستر بادی موجب ایجاد این اختلاف شده است. سرعت در طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسیلیس و سرباره (G10FA0MS10)، ۳/۷۱ کیلومتر بر ثانیه شد که نسبت به نمونه مرجع ۵/۷ درصد افزایش داشت. با توجه به مقاومت فشاری و وجود میکروسیلیس در این طرح اختلاط، نتیجه قابل قبول بود.

سرعت امواج در طرح اختلاط سه ترکیبی میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS10)، ۳/۹۳ کیلومتر بر ثانیه شد که نسبت به نمونه مرجع ۱۱/۹۷ درصد افزایش یافت.

بر مبنای UPV در محدوده‌ی کمتر از ۲ km/sec خیلی ضعیف، بین ۲ km/sec تا ۳ km/sec ضعیف، ۳ km/sec تا ۳/۵ km/sec مشکوک و ۳/۵ km/sec تا ۴/۵ km/sec خوب تلقی می‌شود. مطابق با این رده‌بندی، کیفیت بتن‌های آزمایش شده در این تحقیق در محدوده خوب قرار دارد.

سرعت امواج در طرح اختلاط نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۳/۵۱ کیلومتر بر ثانیه شد. این مقدار نشان داد که بتن خودتراکم مصرفی دارای کیفیت خوبی است. سرعت امواج با افزودن ۱۰ درصد میکروسیلیس (G0FA0MS10)، ۳/۶۵ کیلومتر بر ثانیه شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) ۴ درصد افزایش داشت. افزایش سرعت امواج نشان دهنده کاهش خلل و فرج نمونه است که با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری و تاثیر میکروسیلیس بر افزایش این پارامتر، نتیجه قابل قبول است. سرعت امواج در طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0)، ۳/۶۱ کیلومتر بر ثانیه شد که نسبت به نمونه مرجع افزایش ۲/۸۵ درصدی داشت. سرعت امواج در طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، ۳/۵۵ کیلومتر بر ثانیه شد که نسبت به نمونه مرجع ۱/۱۴ درصد افزایش یافت. در این دو طرح اختلاط هر چند سرعت امواج به دلیل تخلخل خوب نسبت به نمونه مرجع بیشتر بود ولی با توجه به



شکل ۱۶. نمودار سرعت عبور امواج آلتراسونیک در طرح اختلاط ها

Fig. 16. Graph showing the ultrasonic pulse velocity in the mix designs

نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۱۰ ضربه شد. مقاومت ضربه‌ای اولین ترک طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس (G0FA0MS10)، ۱۳ ضربه شد که نسبت به سایر طرح اختلاطها مقاومت بیشتری داشت و نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۳۰ درصد بیشتر شد. این افزایش مقاومت با توجه به خاصیت میکروسیلیس و نتایج آزمایش مقاومت فشاری دور از انتظار نبود. مقاومت اولیه طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد خاکستر بادی (G0FA10MS0)، نسبت به نمونه مرجع تغییری نداشت. همچنین مقاومت اولیه طرح اختلاط دارای ۱۰ درصد سرباره (G10FA0MS0)، ۹ ضربه شد که نسبت به نمونه مرجع ۱۰ درصد کاهش یافت. با توجه به نتایج این دو ماده، مشخص شد تاثیری بر روی افزایش مقاومت ندارند، همانطور که نتایج آزمایش مقاومت فشاری درستی این موضوع را بیان کرد.

مقاومت اولین ترک طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسیلیس و خاکستر بادی (G0FA10MS10)، ۱۱ ضربه شد که نسبت به نمونه مرجع ۱۰ درصد افزایش پیدا کرد. در این طرح اختلاط می‌توان گفت مقدار تاثیر میکروسیلیس در افزایش مقاومت به مراتب بیشتر از تاثیر منفی خاکستر بادی بوده است. مقاومت اولین ترک طرح اختلاط دو ترکیبی میکروسیلیس و سرباره (G10FA0MS10)، نسبت به نمونه مرجع تغییری نکرد. مقاومت اولین ترک طرح اختلاط دو ترکیبی خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS0)، ۷ ضربه شد که نسبت به نمونه مرجع ۳۰ درصد کاهش را نشان داد. این کاهش مقاومت ضربه‌ای با توجه به نتیجه آزمایش مقاومت فشاری و تاثیر خاکستر بادی بر کاهش مقاومت قابل قبول بود.

#### ۵-۷-۱- رابطه‌ی سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری

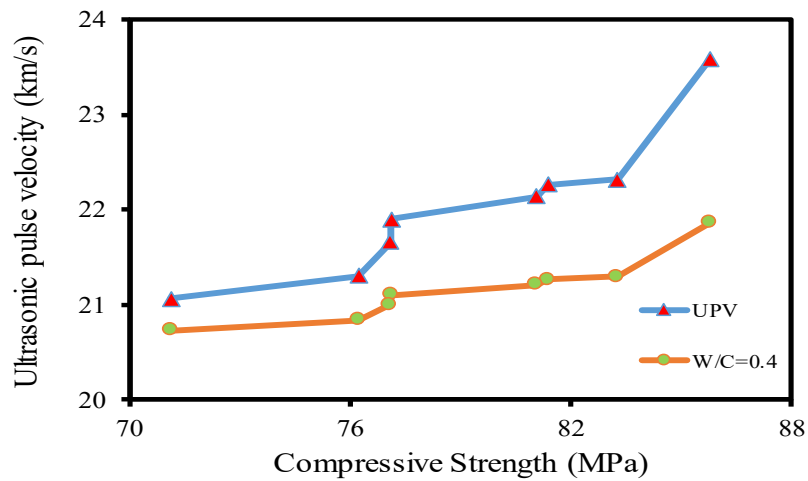
از سال ۱۹۷۰ میلادی تاکنون روش‌های مختلفی به منظور تخمین مقاومت بتن ارائه شده است ولی هر یک از این روش‌ها از محدودیت‌هایی برخوردار هستند. این محدودیت‌ها باعث شد از اوایل سال ۱۹۹۵ میلادی، با پیشرفت‌های به وجود آمده در تعیین سرعت موج مافوق صوت در اجسام، دانشمندان به این نتیجه رسیدند با استفاده از تعیین سرعت موج در بتن، رابطه‌ای میان مقاومت و دیگر مشخصه‌های بتن برقرار کنند [۲۹-۳۱].

به همین منظور رابطه مقاومت فشاری برای طرح اختلاطها و نسبت آب به سیمان مختلفی ارائه شد. با توجه به نسبت آب به سیمان  $0.38$  در این پژوهش، رابطه مقاومت فشاری بر اساس امواج پالس آلتراسونیک با توجه به رابطه ذیل حاصل شد [۳۲]. در این رابطه VP (امواج پالس آلتراسونیک) برحسب کیلومتر بر ثانیه است:

$$f_c' = 13.305e^{0.1264vp} \quad (1)$$

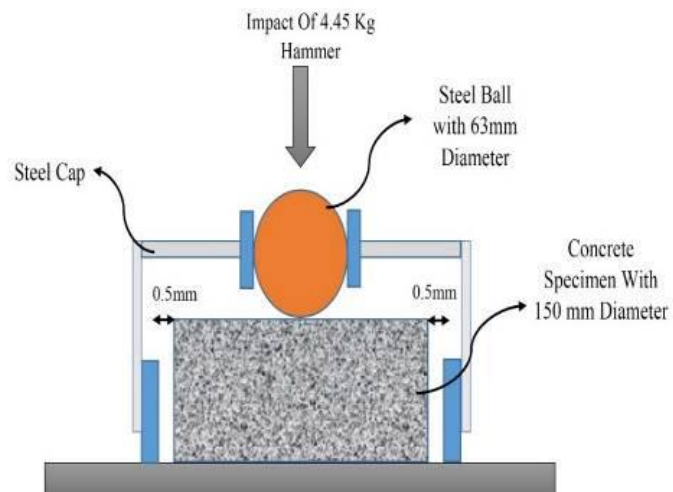
#### ۵-۸- نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای

این آزمایش بر اساس استاندارد ACI 544 [۳۹] انجام شد. نتایج آزمایش وزنه افتان بر روی ۲۴ دیسک در ۸ طرح اختلاط در جدول ۹ نشان داده شده است. در شکل ۱۸ نمایی شماتیک از دستگاه تست ضربه نشان داده شده است. مطابق جدول ۱۲ متوسط مقاومت اولین ترک در طرح اختلاط



شکل ۱۷. نمودار مقایسه امواج پالس آلتراسونیک

Fig. 17. The ultrasonic pulse velocity comparative graph



شکل ۱۸. نمای شماتیک و گرافیکی دستگاه تست ضربه افتان

Fig. 18. Used test setup and apparatus for execution of drop weight impact test

فیزیکی (سقوط جسم آزاد) برابر با ۲۰/۳۴۵ کیلونیوتن میلی‌متر می‌باشد. انرژی جذب شده به وسیله دیسک بتنی برای مقاومت اولین ضربه و مقاومت انهدام و همچنین پارامتر PINPB نشان دهنده درصد افزایش ضربات بعد از رخ دادن اولین ترک در جدول ۹ ارائه شده است.

مقاومت اولین ترک طرح اختلاط سه ترکیبی میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (G10FA10MS10)، ۹ ضربه شد که نسبت به نمونه مرجع ۱۰ درصد کمتر شد.

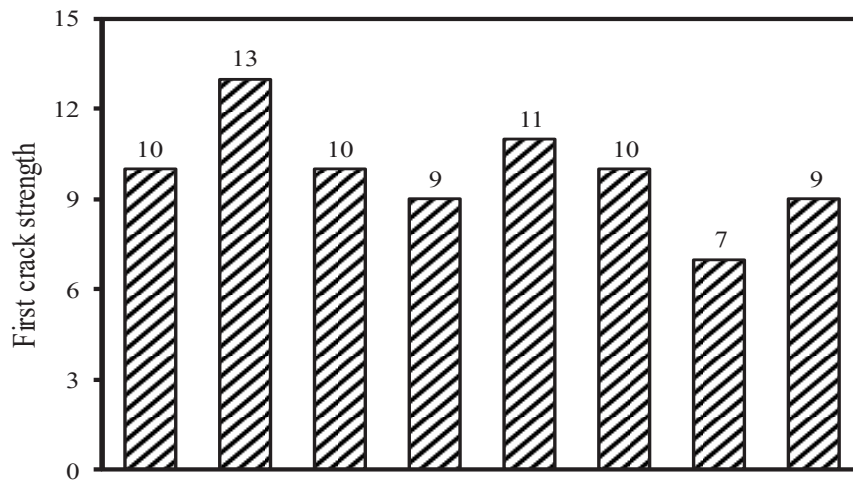
انرژی حاصل از یک مرتبه افتادن وزنه ۴/۴۵ کیلوگرم از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متر بر روی گوی فولادی به قطر ۶۳۵ میلی‌متر با توجه به روابط



جدول ۹. نتایج آزمایش تست ضربه افتان

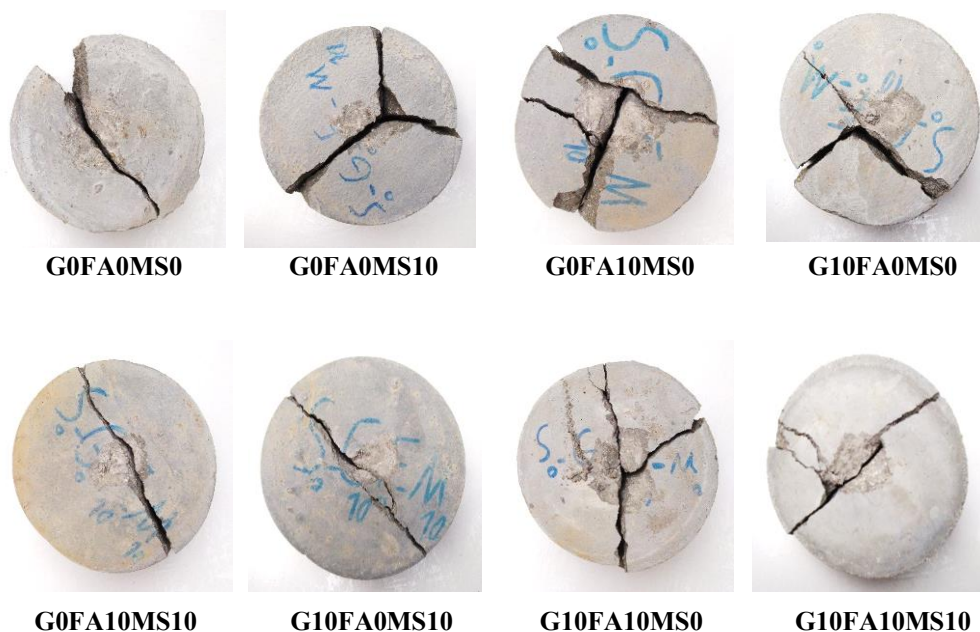
Table 9. Impact Resistance test results for all group

شماره	عنوان طرح اختلاط	FC <sub>۳</sub>	UC <sup>۲</sup>	PINPB <sup>۱</sup>	جذب انرژی (J)
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۱۰	۱۱	۱۰	۲۲۳/۸
۲	G0FA0MS10	۱۳	۱۵	۱۵/۴	۳۰۵/۲
۳	G0FA10MS0	۱۰	۱۱	۱۰	۲۲۳/۸
۴	G10FA0MS0	۹	۱۰	۱۱/۱	۲۰۳/۵
۵	G0FA10MS10	۱۱	۱۳	۱۸/۲	۲۶۴/۵
۶	G10FA0MS10	۱۰	۱۱	۱۰	۲۲۳/۸
۷	G10FA10MS0	۷	۸	۱۴/۳	۱۶۲/۸
۸	G10FA10MS10	۹	۱۰	۱۱/۱	۲۰۳/۵



شکل ۱۹. نمودار مقاومت اولین ترک ایجاد شده طرح اختلاط ها

Fig. 19. Graph of the first-crack strength of mix designs



شکل ۲۰. مد انهدام نمونه های آزمایش ضربه افتان

Fig. 20. Failure modes of reinforced disks under drop weight impact load

شد ولی خاکستر بادی و سربراره تاثیری بر روی مقاومت فشاری نداشتند و باعث کاهش این مقاومت شدند. در تیرهای خمشی غیرمسلح به محض ایجاد اولین ترک مقاومت خود را از دست داد و نمونه به دو نیم تقسیم شد. ۳- با توجه به نتایج آزمایش مقاومت کششی، استفاده از دو پوزولان میکروسیلیس و خاکستر بادی و همچنین سربراره تاثیری بر روی مقاومت کششی نداشتند و حتی باعث کاهش مقاومت کششی شدند. به عبارت دیگر می توان نتیجه گرفت در طرح اختلاط های دارای خاکستر بادی به دلیل واکنش شیمیایی که این ماده با سیمان و دیگر افزودنی های جایگزین سیمان می دهد، به طور کلی مقاومت کاهش پیدا می کند.

۴- با توجه به نتیجه حاصل از آزمایش سرعت پالس آلتراسونیک می توان گفت ریزدانه بودن مصالح سنگی باعث افزایش سرعت امواج می شود چون فضای خالی بین مصالح کم می باشد، به طوری که در طرح اختلاط دارای میکروسیلیس مقدار سرعت امواج و مقاومت فشاری افزایش پیدا کرد که نشان دهنده تخلخل خوب این طرح اختلاط بود. در طرح اختلاط دارای خاکستر بادی مقدار سرعت امواج کمی افزایش یافت که با توجه به سایر نتایج مقاومت انجام گرفته شده بر روی نمونه ها می توان گفت این ماده فقط بر روی تخلخل تاثیر مثبت داشته که باعث افزایش سرعت امواج آلتراسونیک شد.

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بر روی کامپوزیت سیمانی خودتراکم انجام شد. همچنین آزمایشات مقاومت ضربه ای، جذب آب، مویینگی و سرعت امواج آلتراسونیک جهت نتیجه گیری بهتر انجام گرفت. در این پژوهش از میکروسیلیس، خاکستر بادی و سربراره GGBFS به عنوان جایگزین سیمان به مقدار ۱۰ درصد در ۸ طرح اختلاط استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده از تست های آزمایشگاهی، موارد زیر به عنوان بخشی از نتایج این تحقیق قابل بیان می باشد:

۱- مطابق با نتایج آزمایشات روانی کامپوزیت سیمانی خودتراکم ملاحظه گردید که استفاده از میکروسیلیس (به دلیل جذب آب) باعث کاهش روانی کامپوزیت سیمانی شد. در صورتی که خاکستر بادی و سربراره تاثیری چندانی در تغییرات روانی کامپوزیت سیمانی نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) نداشتند. این خاصیت میکروسیلیس در نتایج آزمایشات جذب آب و مویینگی کاملا مشهود بود.

۲- میکروسیلیس تاثیر مثبت در افزایش مقاومت فشاری و خمشی داشت به طوری که مقاومت فشاری طرح اختلاط های (G0FA0MS10) و (G10FA0MS10)، ۲۷/۸ و ۲/۳۳ درصد نسبت به نمونه مرجع بیشتر

A. Makhloufi., Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC), *Construction and Building Materials*, 82 (2015) 89–100.

- [10] A. Terzić, L. Pezo, V. Mitić, Z. Radojević., Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances, *Ceramics International*, 41 (2015) 2714–2726.
- [11] Y. Jeong, H. Park, Y. Jun, J. H. Jeong, J. E. Oh., Microstructural verification of the strength performance of ternary blended cement systems with high volumes of fly ash and GGBFS, *Construction and Building Materials*, 95 (2015) 96–107.
- [12] Y. S. Won, K. S. Jun., Effects of cold joint and loading conditions on chloride diffusion in concrete containing GGBFS, *Construction and Building Materials*, 115 (2016) 247–255.
- [13] Y. Wanga, X. He, Y. Su, H. Tan, J. Yang, M. Lan, M. Ma, B. Strnadel., Self-hydration characteristics of ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) by wet-grinding treatment, *Construction and Building Materials*, 167 (2018) 96–105.
- [14] J. Musdif Their, M. Özakça., Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate, nano-silica, and steel fiber, *Construction and Building Materials*, 180 (2018) 12–22.
- [15] J. Yu, C. Lu, Christopher K.Y. Leung, G. Li., Mechanical properties of green structural concrete with ultrahighvolume fly ash, *Construction and Building Materials*, 147 (2017) 510–518.
- [16] P. Dinakar, K. Prasanna Sathy, Umesh C. Sahoo., Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag, *Materials and Design*, 43 (2013) 161–169.
- [17] P. Zhang, Y. N. Zhao, Q. F. Li, P. Wang, T. H. Zhang., Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced High Performance Concrete Containing Nano-SiO<sub>2</sub> and Fly Ash, *The Scientific World Journal*, (2014) 11 pages.
- [18] Oh J.E, Jun Y, Jeong Y, Monteiro P.J.M., The importance of the network-modifying element content in fly ash as a simple measure to predict its strength potential for alkali-

۵- مقاومت ضربه‌ای ترک اولیه در طرح اختلاط‌های دارای میکروسیلیس نسبت به سایر طرح اختلاط‌ها بیشتر شد به طوری که طرح اختلاط (G0FA0MS10) دارای بیشترین مقاومت است. تاثیر این ماده بر روی مقاومت ضربه‌ای با توجه به نتایج مقاومت‌های فشاری و خمشی کاملا مورد انتظار بود. به طور کلی طرح اختلاط‌های دارای میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت ضربه‌ای شدند.

## منابع

- [1] M. Soleymani Ashtiani, Allan N. Scott, Rajesh P. Dhakal., Mechanical and fresh properties of high-strength self-compacting concrete containing class C fly ash, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1217-1224.
- [2] N. Banthia, M. Sappakittipakom., Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007) 1366-1372.
- [3] Wild S, Sabir BB, Khatib JM., Factors influencing strength development of concrete containing silica fume, *Cement and Concrete Research*, 25 (1995) 1567-1580.
- [4] Ozawa K, Maekawa K, Okamura H., Self-Compacting high performance concrete, *Structural Engineering International*, 6 (1996) 269-270.
- [5] Okamura H., Self-Compacting High-Performance Concrete, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1 (4) (1997) 50-54.
- [6] Bartos P.J.M, Gibbs J.C, Zhu W., Uniformity of in situ properties of Self-Compacting Concrete in full scale structural elements, *Cement and Concrete Composites*, 23 (2001) 57-64.
- [7] Song P.S, Hwang S, Sheu B.C., Strength properties of nylon-and polypropylene-fiber reinforced concretes, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 1546-1550.
- [8] M. Shariq, J. Prasad, A. Masood., Effect of GGBFS on time dependent compressive strength of concrete, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 1469–1478.
- [9] Y. Ghernouti, B. Rabehi, T. Bouziani, H. Ghezraoui,

- Jaganathan, M.P. Anwar., Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 369–375.
- [28] Carino N.J, Lew H.S., Re-examination of the relation between splitting tensile and compressive strength of normal weight concrete, *ACI Materials Journal*, 79 (1982) 214–219.
- [29] Ruiz W. M., Effect of volume of aggregate on the elastic and inelastic properties of concrete, *Technology & Engineering*, (1966) 88 pages.
- [30] M. Akbari, F. Khademi, S. Asghar Khademi., Aggregate size effect evaluation on ultrasonic pulse velocity and 28 Days compressive strength of concrete, 6th National Conference on IRAN concrete, (2014) 7-9. (In Persian)
- [31] M. Mastali, P. Kinnunen, A. Dalvand, R. Mohammadi Firouz, M. Illikaine., Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review, *Construction and Building Materials*, 190 (2018) 533–550.
- [32] M. Mastali, A. Dalvand, A. Sattarifard., The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages, *Composites Part B: Engineering*, 92 (2016) 360-376.
- [33] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2018).
- [34] ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).
- [35] ASTM C293-79, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Centre Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, (2012).
- [36] ASTM C642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, ASTM International, (2012).
- [37] ASTM C1585, Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes. West Conshohocken, PA: American Society activation, *Cement & Concrete Composites*, 57 (2014) 44-54.
- [19] M. Gesoglu, E. Güneyisi, E. Özbay., Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 1847–1854.
- [20] G. Joseph, K. Ramamurthy., Influence of fly ash on strength and sorption characteristics of cold-bonded fly ash aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 1862–1870.
- [21] S. Ioannou, M. Shehzad Chowdhury, A. Badr., Rheological, hydration and mechanical characteristics of microsilica fibre reinforced cement combinations with incremental fly ash contents, *Construction and Building Materials*, 191 (2018) 423–430.
- [22] S. Ahmad, K. Own Mohaisen, S. Kolawole Adekunle, S. Al-Dulaijan, M. Maslehuddin., Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures, *Construction and Building Materials*, 198 (2019) 437–444.
- [23] W. Micah Hale, Seamus F. Freyne, Thomas D. Bush Jr., Bruce W. Russell., Properties of concrete mixtures containing slag cement and fly ash for use in transportation structures, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 1990–2000.
- [24] X. Chen, A. Lu, G. Qu., Preparation and characterization of foam ceramics from red mud and fly ash using sodium silicate as foaming agent, *Ceramics International*, 39 (2013) 1923–1929.
- [25] W. Sha, G.B. Pereira., Differential scanning calorimetry study of hydrated ground granulated blast-furnace slag, *Cement and Concrete Research*, 31 (2001) 327–329.
- [26] M. M. Hossain, M.R. Karim, M. Hasan, M.K. Hossain, M.F.M. Zain., Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review, *Construction and Building Materials*, 116 (2016) 128–140.
- [27] H.Y. Leung, J. Kim, A. Nadeem, Jayaprakash

- (1999).  
[40] E. A. Whitehurst., Soniscope tests concrete structures, Journal of the American Concrete Institute, 47 (1951) 443–444.  
[41] EFNARC S., Guidelines for self-compacting concrete, EFNARC UK, (2005), [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org).
- for Testing and Materials, (2004).  
[38] ASTM C 597, Standard test method for pulse velocity through concrete, American Society for Testing Materials, Pennsylvania, USA, (2016).  
[39] ACI 544.2R, State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. Technical report, American Concrete Institute,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Bastami, F. Omidinasab , A. Dalvand, *Experimental investigation of the effects of pozzolan and slag addition on mechanical properties of self-compacting cementitious composites*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(10) (2023) 3943-3966.

DOI: [10.22060/ceej.2022.20906.7569](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20906.7569)





