



ارزیابی اثر بخشی الیاف کاه بر روی مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی زئولیت و بنتونیت

زهرا السادات زرگر، امید رضایی فر*، مجید قلعه‌کی

دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۸
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰

کلمات کلیدی:

زئولیت
بنتونیت
الیاف کاه
مقاومت فشاری
مقاومت کششی
مقاومت خمشی
پتانسیل گرمایش جهانی

خلاصه: سیمان یکی از مصالح پرمصرف در صنعت ساخت و ساز است که در هنگام تولید مقدار زیادی گاز دی‌اکسید کربن در محیط منتشر می‌کند. چالش‌های زیست محیطی پیش آمده و کاهش مصرف انرژی و استفاده از مواد خام طبیعی سبب افزایش مطالعه و تحقیق در جهت یافتن جایگزینی مناسب برای سیمان شده است. زئولیت و بنتونیت دارای خواص سیمانی هستند این مواد قابلیت سازگاری با محیط زیست داشته و به راحتی قابل استخراج می‌باشند و همچنین نسبت به سیمان هزینه تولید کمتری دارند. از آن جایی که بتن در کشش ضعیف عمل می‌کند از الیاف کاه که الیافی طبیعی می‌باشد نیز استفاده شده است. در این پژوهش ۹ نسبت اختلاط متفاوت با مقدار سیمان 250 kg/m^3 ساخته شده که در آن‌ها درصد‌های مختلف بنتونیت و زئولیت جایگزین بخشی از سیمان اولیه شده است و میزان درصد الیاف به صورت ۱٪ و ۳٪ متغیر می‌باشد. پس از ساخت، به مقایسه مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع در سنین ۷ و ۲۸ روز پرداخته شده است. سپس دو مخلوط بتن با میزان ۶٪ زئولیت، یک درصد الیاف کاه و میزان بنتونیت‌های ۶٪ و ۱۶٪ انتخاب شده و آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای بر روی تیرهایی به ابعاد $50 \times 10 \times 310 \text{ cm}$ انجام گرفته است. میزان مقاومت خمشی نمونه مرجع در این بخش که حاوی مقدار سیمان 350 kg/m^3 سیمان می‌باشد، 5.27 MPa حاصل شده است. بهترین ترکیب حاوی ۶٪ زئولیت، ۶٪ بنتونیت و یک درصد الیاف کاه بوده که توانسته به ۹۸٪ مقاومت خمشی نسبت به نمونه مرجع دست یابد.

۱- مقدمه

هستند که به تنهایی ارزش سیمانی ندارند و یا دارای فعالیت سیمانی کمی هستند. اگر این ذرات به خوبی تفکیک شوند، این قابلیت را دارند که در حضور رطوبت با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش شیمیایی داده و ترکیباتی با خواص محصولات سیمانی ایجاد کنند [۳]. این مواد سازگار با محیط زیست بوده و با گذشت زمان عملکردی مطلوب داشته و دوام بالایی دارند. برخی از پوزولان‌های طبیعی زئولیت‌ها و بنتونیت‌ها می‌باشند. زئولیت ماده‌ای معدنی بوده که عمدتاً از آلومینوسیلیکات تشکیل شده است که ساختاری سه بعدی داشته و دارای حفراتی با اندازه‌های منظم در ابعاد مولکولی می‌باشد [۴] هرگاه زئولیت به سیمان و آب اضافه گردد به دلیل بالا بودن pH محلول، با حمله OH شبکه آلومینوسیلیکاتی زئولیت تجزیه شده و آنیون‌های جدا شده وارد محلول می‌گردند. این آنیون‌ها با Ca^{2+} واکنش داده و ترکیباتی همچون سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم که تمایل به سخت شدن و افزایش مقاومت دارند را تولید می‌کنند [۵].

طبق مطالعاتی که در زمینه تاثیر زئولیت بر روی کارایی بتن انجام شده

یکی از مهم‌ترین مسائلی که امروزه توجه محققین را به خود جلب کرده است، پدیده تغییر اقلیم و گرم شدن جهانی در اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد [۱]. بتن یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی بوده و سیمان اساسی‌ترین ماده تشکیل دهنده بتن است که باعث چسباندن سنگدانه‌ها و توسعه خواص در آن می‌گردد. بر اساس تحقیقات انجام شده در فرایند تولید سیمان، نزدیک به ۷٪ گاز دی‌اکسید کربن کل جهان را به خود اختصاص داده و باعث گرم شدن هوای کره زمین و تشدید آثار مخرب پدیده گلخانه‌ای می‌گردد [۲]. مطالعات فراوانی در راستای توسعه پایدار و جایگزینی بخشی از سیمان با موادی که خصوصیات سیمانی، از لحاظ مقاومتی و دوام دارند انجام شده است که در این جایگزینی، مسائل اقتصادی و خواص مکانیکی بتن عوامل تعیین کننده‌ای می‌باشند. پوزولان‌های طبیعی می‌توانند جایگزین همه یا بخشی از سیمان شوند. پوزولان‌ها مواد سیلیسی یا سیلیسی-آلومیناتی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Orezaifar@semnan.ac.ir



است محققین به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش جایگزینی زئولیت، کارایی بتن کاهش پیدا می‌کند [۶]. بر اساس مطالعاتی که شکرچی و همکاران انجام دادند به این نتیجه رسیدند که برخی از زئولیت‌های طبیعی تاثیر کمی بر روی کارایی بتن دارند و این نتیجه نشان می‌دهد که عوامل متعددی همچون محل معدن زئولیت، رفتار شناسی سطحی و کریستال‌های زئولیت می‌تواند بر روی کارایی بتن تازه اثرگذار باشد [۷]. راگوتی، پراکی و همکاران به بررسی مقاومت فشاری بتن‌های حاوی زئولیت پرداخته‌اند بر اساس این پژوهش، مقاومت فشاری بتن‌های حاوی زئولیت نسبت به نمونه مرجع که فاقد زئولیت است در سنین ۷ و ۲۸ روز کمتر می‌باشد. با این حال، درصد کاهش در سنین بالاتر بتن ۹۰ و ۱۸۰ روز کمتر یا حتی صفر می‌باشد. این ممکن است به فعالیت پوزولانی زئولیت نسبت داده شود و توسعه مقاومت در طرح اختلاط مرجع عمدتاً به سرعت هیدراتاسیون کلینکر بستگی دارد، در حالی که در مخلوط‌های دیگر بستگی به ترکیب هیدراتاسیون کلینکر و فعالیت پوزولانی زئولیت دارد [۹ و ۸]. رضایی‌فر و همکاران به بررسی مقاومت فشاری بتن حاوی زئولیت و کائولن پرداختند که برای بتن مبتنی بر زئولیت-کائولن، ۱۰٪ زئولیت و ۱۵٪ کائولن بهترین نتیجه را داده است. میزان مقاومت فشاری این ترکیب $49/3 \text{ MPa}$ بوده و حدوداً ۱۵٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش مقاومت داشته است و طبق تحقیقات صورت گرفته تا حدودی بر میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید اثرگذار می‌باشد [۱۱ و ۱۰]. بر اساس مطالعه انجام شده توسط بیلیم بر روی اثر زئولیت بر مقاومت خمشی، نشان داد که نمونه‌های حاوی زئولیت دارای مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه مرجع می‌باشند [۱۲]. شربتدار و اروئی به بررسی خواص مکانیکی و سازه‌ای بتن‌های مسلح و غیرمسلح حاوی زئولیت و دوده سیلیسی پرداختند. در این پژوهش از پنج، ده و پانزده درصد زئولیت و ۷٪ دوده سیلیسی استفاده شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزودن پوزولان زئولیت در بتن در تمامی طرح‌های مخلوط باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی گردید که درصد بهینه ۱۰٪ به عنوان مناسب‌ترین درصد حاصل گردید. مقاومت فشاری ۷۲ روزه نسبت به مقاومت ۲۸ روزه بتن مرجع به میزان ۲۶٪ افزایش نشان داد. ضمناً افزودن دوده سیلیسی در بتن اثری بهتر از پوزولان زئولیت داشت به طوری که نسبت مقاومت خمشی ۷۲ روزه تیرهای حاوی ۱۰٪ زئولیت و ۷٪ دوده سیلیسی این دو نمونه نسبت به مقاومت خمشی تئوری نمونه مرجع به ترتیب ۲۷٪ و ۳۳٪ افزایش داشتند [۱۳]. در پژوهشی دیگر جوکار و همکاران به بررسی تاثیر بتن حاوی خرده‌های لاستیک و زئولیت پرداختند که در این پژوهش از ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ خرده

لاستیک و ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ درصد زئولیت جایگزین بخشی از سیمان کردند. طبق نتایج به دست آمده، برای تمام درصدهای مختلف لاستیک اضافه شده خصوصیات مکانیکی در مقایسه با بتن مرجع کاهش یافتند. بهترین عملکرد در مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های حاوی ۵٪ لاستیک، ۱۵٪ زئولیت می‌باشد که حدوداً ۳۳٪ افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه مرجع داشته است [۱۴].

بنتونیت ماده‌ای پوزولانی بوده که تقریباً ۹۰٪ مونت‌موریلونیت از کانی‌های گروه اسمکتیت شکل گرفته است [۱۵]. اکثر بنتونیت‌ها بر اثر هوازدگی و دگرسانی خاکسترهای آتشفشانی و اغلب در حضور آب تشکیل می‌شوند. استفاده از مواد بر پایه رس از جمله بنتونیت در مصالح ساختمانی رو به رشد است [۱۶]. شباب و همکاران به بررسی تاثیر هم افزایی خاکستر بادی و بنتونیت به عنوان جایگزینی جزئی سیمان در بتن انبوه پرداختند که بر اساس نتایج حاصله نمونه حاوی ۱۲/۵٪ خاکستر بادی و ۱۲/۵٪ بنتونیت در تولید افزایش دما در بتن‌های انبوه نقش به سزایی داشته است به این صورت که این ترکیب در سن ۹۰ روز حدوداً ۱۰٪ افزایش مقاومت نسبت به نمونه مرجع داشته است [۱۷]. محققین به بررسی تاثیر جایگزینی بنتونیت به جای سیمان بر روی مقاومت فشاری در بتن پرداخته شده است که بر اساس نتایج به دست آمده بنتونیت در سنین اولیه (۳ و ۷ روز) واکنش دارای مقاومت فشاری حدوداً $10-12 \text{ MPa}$ می‌باشد ولی در سنین بالاتر (۹۰ روز) دارای مقاومت فشاری خوب و متعارفی حدوداً $25-30 \text{ MPa}$ می‌باشد همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش جایگزینی بنتونیت به جای سیمان پرتلند، کارایی، تراکم بتن تازه و جذب آب نسبت به نمونه مرجع کاهش می‌یابد [۱۸-۲۰].

بتن ماده‌ای است که در فشار قوی ولی در کشش ضعیف و شکننده می‌باشد. ضعف در کشش با میلگردهای مرسوم تقویت می‌شود ولی امروزه با گسترش تکنولوژی استفاده از الیاف برای اصلاح ضعف کششی گسترش یافته است. انواع مختلفی از الیاف را می‌توان در بتن و ملات‌های سیمانی استفاده کرد. الیاف‌ها به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. الیاف کاه جزء الیاف طبیعی به حساب می‌آید که از دیر باز با گل مخلوط شده و استفاده شده است. این الیاف سازگار با محیط زیست بوده و به راحتی قابل دسترس می‌باشند و برای تهیه آن‌ها نیاز به صرف انرژی زیادی نمی‌باشد. افزودن الیاف کاه به بتن ماسه‌ای، ویژگی‌های حرارتی و فیزیکی آن را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد و سبب مقاومت در برابر ترک در کشش می‌شود [۲۱]. پرتالا و همکاران به بررسی اثر مقاومت فشاری و مقاومت

به جای بخشی از سیمان و الیاف طبیعی گاه می‌باشد. هر یک از این مواد سازگاری با محیط زیست داشته و نیاز به صرف انرژی زیادی جهت تولید ندارند همچنین لازم به ذکر است که منظور از بتن‌های کم‌سیمان، بتن‌هایی است که مصرف مقدار سیمان پایین‌تری نسبت به بتن‌های معمولی دارند که در این مقاله میزان سیمان مصرفی در نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع kg/m^3 ۱۰۰ کاهش یافته است.

در این پژوهش ابتدا تعدادی نمونه با نسبت اختلاط مورد نظر ساخته شده و سپس آزمایش مقاومت فشاری و کششی بر روی نمونه‌ها انجام شده است. پس از مقایسه نتایج نمونه‌ها با نمونه مرجع، به بررسی نتایج مقاومت خمشی دو نسبت اختلاط منتخب بر روی تیرهایی به ابعاد $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$ پرداخته شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق ابتدا ۹ نسبت اختلاط با مقدار سیمان kg/m^3 ۲۵۰ با نسبت‌های جایگزینی متفاوت مواد پوزولانی و الیاف گاه در نظر گرفته شده است. میزان جایگزینی برای ژئولیت با توجه به انجام آزمایش‌های فشاری و کششی بر روی درصدهای متفاوت ژئولیت و بنتونیت، به عنوان درصد بهینه، مقدار ثابت ۶٪ در نظر گرفته شده است [۲۷]. برای بنتونیت سه درصد مختلف (۶، ۱۰، و ۱۶) و همچنین برای الیاف گاه دو درصد مختلف (۱ و ۳) می‌باشد. نسبت ریز دانه به درشت دانه در مخلوط بتن ۳۰ به ۷۰ است. پس از ساخت، نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری و کششی در سنین ۷ و ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس از بین نمونه‌های تست شده دو طرح اختلاط منتخب، که طرح اختلاط اول دارای بهترین مقاومت فشاری و کششی نسبت به سایر نمونه‌ها و طرح اختلاط دوم که حاوی کم‌ترین میزان سیمان با در نظر گرفتن مقاومت فشاری و کششی متناسب باشد، انتخاب شده است. نمونه‌های منتخب بر روی تیرهایی به ابعاد $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$ تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که دو طرح اختلاط منتخب با نمونه مرجع که حاوی عیار سیمان kg/m^3 ۳۵۰ می‌باشد مقایسه می‌شوند. در واقع هدف از انجام این کار این است که بررسی گردد که با حذف kg/m^3 ۱۰۰ نتایج طرح اختلاط‌های منتخب چه میزان به نمونه مرجع (C۳۵۰) نزدیک می‌شوند.

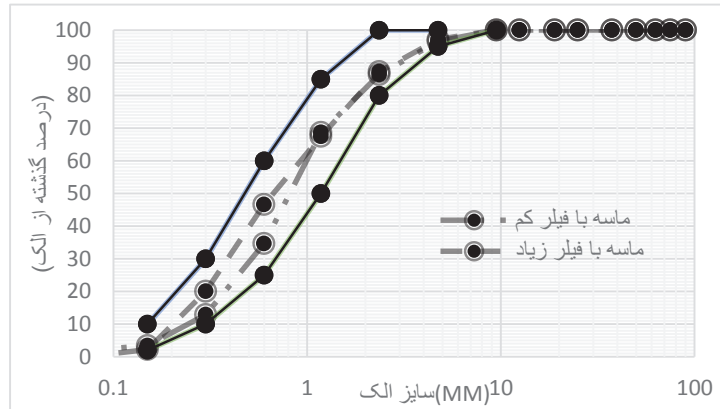
۲-۱- مشخصات مصالح

۲-۱-۱- مصالح سنگی

در این پژوهش، از شن و ماسه کوهی موجود در شهر سمنان استفاده

خمشی بتن‌های حاوی الیاف گاه پرداختند. در تحقیق مذکور از الیاف گاه با درصدهای مختلف یک تا پنج درصد حجم بتن استفاده شده است. نتایج مقاومت خمشی و مقاومت فشاری نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی سه درصد الیاف گاه به ۷۰٪ مقاومت خمشی نمونه مرجع و نمونه‌های حاوی یک درصد الیاف گاه حدوداً به ۵۰٪ مقاومت فشاری نمونه مرجع دست یافته‌اند [۲۲]. در تحقیقی دیگر مرتا و همکاران به بررسی انرژی شکست بتن مسلح شده با الیاف طبیعی پرداختند. در این مقاله به بررسی تجربی انرژی شکست بتن تقویت شده با الیاف طبیعی مانند کنف، الیاف شاهدانه و گاه گندم پرداخته شده است. بر اساس نتایج الیاف شاهدانه انرژی شکست بتن را تا ۷۰٪ نسبت به بتن مرجع افزایش داده است و مقاومت کششی مستقیم نمونه‌های تقویت شده با الیاف در مقایسه با نمونه‌های مرجع برای الیاف کنف، گاه و شاهدانه به ترتیب ۴٪، ۷٪ و ۸٪ افزایش یافته است [۲۳]. ابدو و همکاران به بررسی اثر پوزولانی خاکستر گاه گندم پرداختند بر اساس نتایج حاصله با جایگزینی ۲۰٪ از خاکستر گاه گندم به جای سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری تا حدوداً ۱۵٪ نسبت به نمونه مرجع شده است [۲۴]. خشنود و همکاران به بررسی اثر خاکستر گاه و بنتونیت حرارت دیده و خام بر روی بتن‌های خود متراکم پرداختند در این پژوهش دریافتند که در سن ۲۸ روز نمونه حاوی ۱۰٪ خاکستر گاه حدوداً ۱۰٪ و ۷٪ سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی نسبت به نمونه مرجع شده است. نمونه‌های حاوی ۱۰٪ بنتونیت خام ۱۵٪ و ۳۸٪ و همچنین نمونه‌های حاوی ۱۰٪ بنتونیت حرارت دیده ۳٪ و ۵٪ سبب کاهش مقاومت فشاری و خمشی نسبت به نمونه مرجع شده‌اند [۲۵]. وانگ به بررسی تاثیر الیاف گاه بر مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن پرداخته است بر اساس نتایج با افزودن الیاف گاه تا یک درصد حدوداً به اندازه ۱۰٪ و ۲۵٪ سبب کاهش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نسبت به نمونه مرجع شده است. همچنین بر اساس این پژوهش با افزودن بیش از یک درصد الیاف گاه روند کاهش مقاومت فشاری و خمشی نسبت به نمونه مرجع بیشتر شده است [۲۶].

به دلیل اهمیت اثرگذاری الیاف در بتن و بررسی تاثیر مواد پوزولانی ژئولیت و بنتونیت به جای بخشی از سیمان در این پژوهش، با توجه به مغفول ماندن اثرات الیاف بر این نوع بتن‌ها در تحقیقات پیشین استفاده از الیاف طبیعی در این نوع بتن مورد توجه قرار می‌گیرد که به علت اثرات مناسب الیاف گاه بر بتن از جمله بهبود مقاومت کششی و خمشی از آن استفاده شده است. هدف از انجام این پژوهش بررسی خواص مکانیکی بتن‌های کم‌سیمان با جایگزینی همزمان ژئولیت، درصدهای مختلف بنتونیت



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ها

Fig. 1. Sand granulation curve

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی زئولیت مصرفی

Table 1. Physical properties of zeolite used

مقدار باقی مانده روی الک ۴۵ و ۹۰ میکرومتر (%)	سطح مخصوص ویژه (g/cm ²)	وزن مخصوص (g/cm ³)
۰	۱۰۰۰۰	۲/۲

شرکت نگین پودر سیمان تهیه شده است. وجود ترکیبات شیمیایی Al_2O_3 و SiO_2 سبب خواص پوزولانی زئولیت‌ها می‌باشد. خصوصیات فیزیکی زئولیت مصرفی در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۱-۳- سیمان

سیمان مصرفی در این پژوهش سیمان پرتلند تیپ دو شرکت سیمان شاهرود می‌باشد. زمان گیرش سیمان مصرفی در جدول ۲ آورده شده است.

۲-۱-۴- بنتونیت

رنگ بنتونیت سدیم دار استفاده شده کرم رنگ بوده و یکی از ویژگی‌های اصلی آن جذب مقادیر زیاد آب است. بنتونیت مصرفی نیز از معادن سیمان تهیه شده است. خصوصیات فیزیکی بنتونیت مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است.

خصوصیات شیمیایی مصالح سیمانی در جدول ۴ گزارش شده است.

گردیده است. برای مشخص کردن توزیع دانه‌بندی مصالح سنگی، آزمایش دانه‌بندی انجام گرفته است که دانه‌بندی مصالح سنگی از استاندارد ASTM-C33 [۲۸] پیروی می‌کند. در این مقاله به جهت بررسی تاثیر نوع ریزدانه بر مقاومت فشاری نمونه‌ها و با توجه به اینکه از سیمان کمتری نسبت به حد معمول استفاده شده است، از دو نوع ماسه با فیلر کم و فیلر زیاد استفاده شده است که پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری، ماسه با فیلر کم در سایر آزمایشات مورد مصرف قرار گرفته است. این ماسه پس از خشک کردن مورد مصرف قرار گرفت. منحنی دانه‌بندی انواع ماسه در شکل ۱ ارائه شده است. این ماسه پس از خشک کردن مورد مصرف قرار گرفت. شن تهیه شده از نوع شکسته با حداکثر اندازه اسمی ۹ mm می‌باشد که از الک ۳/۸ اینچ عبور کرده و بر روی الک شماره ۴ باقی می‌ماند.

۲-۱-۲- زئولیت

زئولیت مصرفی به رنگ کرم و از معادن سیمان به صورت پودری از

جدول ۲. زمان گیرش سیمان مصرفی

Table 2. Setting time of cement used

نتیجه	آنالیز
۳۰۵۵	سطح مخصوص بلین (gr/cm^2)
۰/۰۳۷	آزمون اتوکلاو (%)
۱۴۸	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۳:۵۰	زمان گیرش نهایی (ساعت)
۲۴۶	مقاومت فشاری ۳ روزه (kg/cm^2)
۳۱۵	مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)
۴۱۳	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm^2)

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی بنتونیت مصرفی

Table 3. Physical properties of consumed bentonite

پاسخ	آنالیز
۷۰۰-۳۰۰	جذب آب (%)
۲۵-۲۲	تورم MI/gr^2
۴-۸	رطوبت (%)
۴۰۰	دانه بندی Mesh
۸۶<	مونت موریلونیت (%)
۱۰۰-۱۱۰	ظرفیت تبادل کاتیونی $\text{mEq}/100\text{mgr}$

جدول ۴. خصوصیات شیمیایی مصالح پودری مصرفی

Table 4. Chemical properties of powdered materials used

ترکیبات	بنتونیت (%)	زئولیت (%)	سیمان (%)
SiO_2	۶۹/۸	۶۹/۲۸	۲۱/۱۱
Al_2O_3	۱۱/۸۸	۱۰/۴۳	۴/۴۲
Fe_2O_3	۱/۷۳	۰/۴۹	۳/۹۶
CaO	۰/۹۶	۳/۵۶	۶۳/۲۳
MgO	۱/۴۲	۰/۵	۱/۵۱
Na_2O	۰/۵	۰/۷۳	۰/۳۲
K_2O	۰/۴۷	۱/۲۷	۰/۵۱
TiO_2	۰/۱	۰/۱۶۶	-



ب- زئولیت مصرفی
b. Consumed zeolite



الف- بنتونیت مصرفی
a. Consumed bentonite

شکل ۲. مصالح مصرفی جایگزین بخشی از سیمان

Fig. 2. Consumables replacing part of the cement



شکل ۳. الیاف کاه مصرفی

Fig. 3. Consumed straw fibers

۳- نسبت‌های اختلاط بتن و روند ساخت

نسبت اختلاط نمونه‌ها به روش وزنی و ACI211 می‌باشد. نسبت اختلاط نمونه‌ها با نسبت آب به مصالح سیمانی (مجموع مقدار سیمان و زئولیت و بنتونیت) $0/75$ ، در جدول ۵ ارائه شده است. نسبت آب به مصالح سیمانی با توجه به انجام آزمایشات متعدد و خصوصیات مصالح مصرفی از جمله زئولیت و بنتونیت $0/75$ حاصل شده است. مقدار سیمان در تمامی موارد به جز مورد آخر 250 kg/m^3 می‌باشد. در نوشتن نام طرح‌های مورد

در شکل ۲ تصویر زئولیت و بنتونیت مصرفی که جایگزین بخشی از سیمان شده‌اند، آورده شده است.

۲-۱-۵- الیاف طبیعی کاه

الیاف کاه مصرفی به صورت خشک استفاده شده است. چگالی، ضخامت و طول کاه مصرفی به ترتیب برابر با $0/2 \text{ g/cm}^3$ ، $0/5 \text{ mm}$ و $40-30 \text{ mm}$ می‌باشد. در شکل ۳ الیاف طبیعی مصرفی کاه را نشان می‌دهد.

جدول ۵. طرح اختلاط نمونه‌های مورد مطالعه

Table 5. Mixing design of studied samples

ردیف	نام طرح	عیار سیمان	آب / مصالح سیمانی	آب	شن	ماسه	سیمان	درصد زئولیت	درصد بنتونیت	الیاف کاه (vf)
۱	6b6z-1st	۲۵۰	۰/۷۵	۱۸۷/۵	۵۵۸/۸	۱۳۰۳/۸	۲۱۷/۵	۶	۶	۱
۲	10b6z-1st	۲۵۰	۰/۷۵	۱۸۷/۵	۵۵۸/۸	۱۳۰۳/۸	۲۰۷/۵	۶	۱۰	۱
۳	16b6z-1st	۲۵۰	۰/۷۵	۱۸۷/۵	۵۵۸/۸	۱۳۰۳/۸	۱۹۲/۵	۶	۱۶	۱
۴	6b6z-3st	۲۵۰	۰/۷۵	۱۸۷/۵	۵۵۸/۸	۱۳۰۳/۸	۲۱۲/۵	۶	۶	۳
۵	10b6z-3st	۲۵۰	۰/۷۵	۱۸۷/۵	۵۵۸/۸	۱۳۰۳/۸	۲۰۲/۵	۶	۱۰	۳
۶	16b6z-3st	۲۵۰	۰/۷۵	۱۸۷/۵	۵۵۸/۸	۱۳۰۳/۸	۱۸۷/۵	۶	۱۶	۳
۷	C250-1st	۲۵۰	۰/۷۵	۱۸۷/۵	۵۵۸/۸	۱۳۰۳/۸	۲۴۷/۵	۰	۰	۱
۸	C250-3st	۲۵۰	۰/۷۵	۱۸۷/۵	۵۵۸/۸	۱۳۰۳/۸	۲۴۲/۵	۰	۰	۳
۹	C250	۲۵۰	۰/۷۵	۱۸۷/۵	۵۵۸/۸	۱۳۰۳/۸	۲۵۰	۰	۰	۰
۱۰	C350	۳۵۰	۰/۷۵	۱۸۷/۵	۵۵۸/۸	۱۳۰۳/۸	۳۵۰	۰	۰	۰

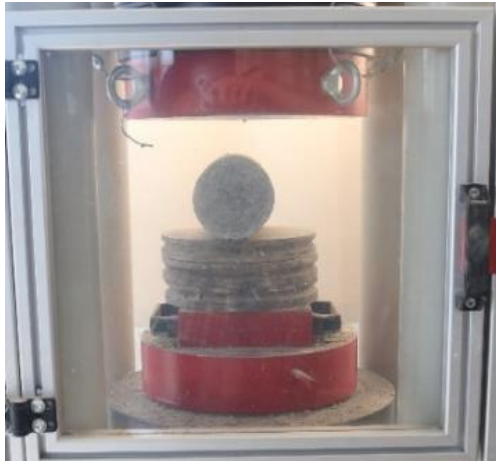
شده را در قالب ریخته و تراکم بتن در قالب‌ها با استفاده از میز لرزان موجود در آزمایشگاه طبق استاندارد ASTM C31 [۳۰] انجام شده است. عمل لرزش باعث کاهش اصطکاک داخلی بین سنگ‌ها شده و موجب نزدیک شدن سنگ‌ها به یکدیگر می‌شود و همچنین باعث رسیدن حباب‌های هوا به سطح نمونه می‌گردند. نمونه‌ها در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده و پس از خارج کردن نمونه‌های بتنی از قالب‌ها، طبق استاندارد ASTM C31 [۳۰] در حوضچه‌ای غرقاب شده تا برای سنین ۷ و ۲۸ روزه عمل آوری شوند.

۴- مشخصات آزمایش‌ها

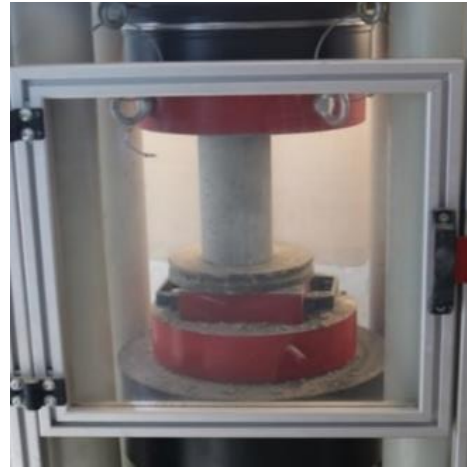
آزمایش مقاومت فشاری با کمک استاندارد ASTM-C39 [۳۱] طبق شکل ۴-الف انجام شده است. استاندارد ASTM C496 [۳۲] برای سنجش مقاومت کششی بتن تحت کشش خالص، آزمایش شکافت کششی یا آزمایش شکافت استوانه را معرفی می‌کند. شکل ۴-ب نمونه حین آزمایش کشش غیرمستقیم را نشان می‌دهد. آزمایش مقاومت خمش سه نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM C293 [۳۳] به منظور تعیین کشش بتن ناشی از

استفاده حرف b مخفف بنتونیت، حرف Z مخفف کلمه زئولیت، حرف St مخفف کلمه کاه و حرف C مخفف سیمان مصرفی می‌باشد و اعداد کنار این حروف نشان دهنده درصد مواد استفاده شده در طرح می‌باشد. به عنوان مثال طرح 6b6z-1st حاوی ۶٪ بنتونیت، ۶٪ زئولیت و یک درصد الیاف کاه می‌باشد. نمونه C250 به عنوان نمونه مرجع جهت مقایسه نتایج مقاومت فشاری و کششی در نظر گرفته شده است.

نحوه ساخت نمونه‌ها بدین صورت است که ابتدا شن و ماسه در داخل مخلوط‌کن ریخته شده و به مدت ۱ دقیقه به صورت خشک مخلوط می‌گردند سپس یک چهارم از آب طرح اختلاط داخل مخلوط‌کن ریخته شده تا شن و ماسه به خوبی مخلوط گردند سپس سیمان و مواد پوزولانی که از قبل با یکدیگر مخلوط شده‌اند، به صورت خشک به مخلوط‌کن اضافه می‌شود، برای ۱ دقیقه دیگر نیز ترکیب می‌گردند. پس از آن آب به همراه کاه خشک به آهستگی به مخلوط اضافه می‌شود. آزمون اسلامپ بر اساس آیین‌نامه ASTM C143 [۲۹] انجام شده است و مقدار پایین آمدگی متوسط سطح بتن بین ۶۰ mm الی ۸۰ mm می‌باشد. قالب‌های استفاده شده جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی، شامل قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ mm و ارتفاع ۲۰۰ mm است. مخلوط آماده



ب- آزمایش کششی غیر مستقیم
b. Indirect tensile test



الف-آزمایش فشاری
a. Compression test



ج- آزمایش خمش سه نقطه‌ای
C- Three-point bending test

شکل ۴. نحوه قرارگیری نمونه‌ها حین انجام آزمایش

Fig. 4. How to place the samples during the test

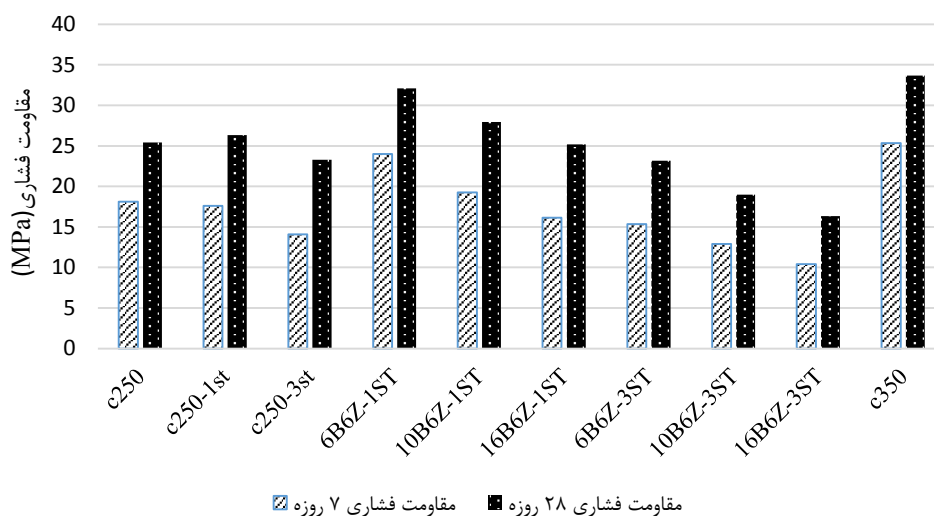
گزارش شده است. روند رشد نسبت مقاومت فشاری هفت روزه به مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها ($f_{c,7}/f_{c,28}$) مطابق جدول ۶ می‌باشد. با مقایسه نمونه‌های c۲۵۰، c250-1st و c250-3st که فاقد مواد پوزولانی می‌باشند مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه c250-1st به ازای یک درصد کاه در سن ۷ روز به ۹۷٪ مقاومت نمونه مرجع دست یافته است و در سن ۲۸ روز ۳٪ بیشتر از مقاومت فشاری نمونه مرجع می‌باشد. در نمونه c250-3st با افزودن سه درصد الیاف مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ۲۳٪ و ۹٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است. در واقع با افزودن الیاف تا یک درصد نتیجه تقریباً یکسانی نسبت به نمونه مرجع حاصل شده است.

خمش بر روی نمونه‌های منشوری انجام می‌گیرد. نحوه انجام آزمایش بدین صورت است که وسط تیر تعیین و علامت گذاری شده و بر روی دو تکیه‌گاه که به فاصله ۴۵ cm از هم هستند قرار داده می‌شود. سپس با سرعت ثابت و یکنواخت نمونه تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. شکل ۴-ج نمونه تحت آزمایش خمش را نشان می‌دهد. همچنین آزمایش چگالی بتن طبق استاندارد ASTM-C138 [۳۴] انجام گرفته است.

۵- نتایج آزمایش

۵-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری متوسط نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز در شکل ۵



شکل ۵. نتایج مقاومت فشاری متوسط نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز

Fig. 5. Results of average compressive strength of samples at 7 and 28 days

جدول ۶. روند رشد نسبت مقاومت فشاری هفت به ۲۸ روزه نمونه‌ها

Table 6. Growth trend of compressive strength ratio of 7 to 28 days of samples

نام نمونه	fc,7/fc,28	نام نمونه	fc,7/fc,28
C250	۷۱	16b6z-1st	۶۴
C250-1st	۶۷	6b6z-3st	۶۶
C250-3st	۶۰	10b6z-3st	۶۴
6b6z-1st	۷۰	16b6z-3st	۶۳
10b6z-1st	۶۸		

داده شده است که افزودن مواد پوزولانی در سنین اولیه سبب کاهش مقاومت نسبت به نمونه مرجع می‌گردد به این علت که فرایند هیدراسیون این مواد نسبت به سیمان کمتر بوده و همچنین با جایگزینی مواد پوزولانی با بخشی از سیمان مقدار کلسیم هیدروکسید کافی در دسترس نبوده و ژل سلیکاتی در سنین اولیه به میزان کافی تولید نمی‌شود و با افزایش سن نمونه و تکمیل فرایند عمل‌آوری این اختلاف مقاومت نسبت به نمونه تا حدی از بین می‌رود [۲۰ و ۳۵]. در این قسمت قابل مشاهده است که مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین اولیه تا بتونیت ۱۰٪ از مقاومت فشاری نمونه مرجع بیشتر شده و برای نمونه حاوی ۱۶٪ بتونیت در سن ۲۸ روز نتیجه تقریباً یکسانی حاصل شده است که به نظر می‌رسد این روند رشد می‌تواند به دلیل سازگاری الیاف کاه

در نمونه‌های 16b6z-1st و 10b6z-1st، 6b6z-1st در سنین ۷ و ۲۸ روز با ثابت بودن مقدار زئولیت و درصد الیاف، با افزودن بتونیت تا ۱۰٪ سبب افزایش مقاومت در سنین ۷ و ۲۸ روز نسبت به نمونه مرجع شده است. این افزایش مقاومت نسبت به نمونه مرجع برای نمونه‌های 6b6z-1st و 10b6z-1st در سن ۷ روز به ترتیب ۳۲٪ و ۵٪ و برای سن ۲۸ روز به ترتیب ۲۶٪ و ۹٪ می‌باشد. برای نمونه 16b6z-1st مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه مرجع ۱۲٪ کاهش مقاومت داشته ولی در سن ۲۸ روز مقاومت تقریباً یکسانی حاصل شده است. به طور کلی می‌توان گفت که با افزودن بتونیت در صورت ثابت بودن میزان زئولیت و یک درصد الیاف کاه، مقدار مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. در تحقیقات گذشته نشان

نمونه‌ها وجود دارد بتنوتیت نتوانسته است تغییر چندانی در روند رشد مقاومت فشاری ایجاد کند که این نشان دهنده آن است که بتنوتیت جهت تکمیل فرایند عمل‌آوری نیازمند زمان بیشتری می‌باشد.

در نمونه‌های 6b6z-3st، 10b6z-3st و 16b6z-3st قابل مشاهده است که میزان رشد مقاومت فشاری از ۷ به ۲۸ روز نسبت به نمونه‌های حاوی یک درصد الیاف کمی کاهش یافته است. در این بخش نیز قابل مشاهده است که با افزایش میزان بتنوتیت تغییر چندانی در روند افزایش مقاومت از ۷ به ۲۸ روز وجود ندارد. مقدار سیمان مصرفی در نمونه‌ها به ترتیب ۲۱۲/۵، ۲۰۲/۵ و ۱۸۷/۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد همان طور که در قسمت قبل توضیح داده شد با وجود اختلاف کمی که بین مقدار سیمان وجود دارد بتنوتیت مصرفی تغییر چشمگیری در روند رشد مقاومت حاصل نکرده است.

۵-۲- مقاومت کششی

مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها با رابطه پیشنهادی استاندارد ASTM C496 بر حسب مگاپاسکال در سنین ۷ و ۲۸ روز گزارش شده است. P حداکثر بار اعمال شده برحسب نیوتن و L و D به ترتیب طول و قطر نمونه استوانه‌ای برحسب میلی‌متر می‌باشند.

$$f_t = \frac{2p}{\pi.L.D} \quad (1)$$

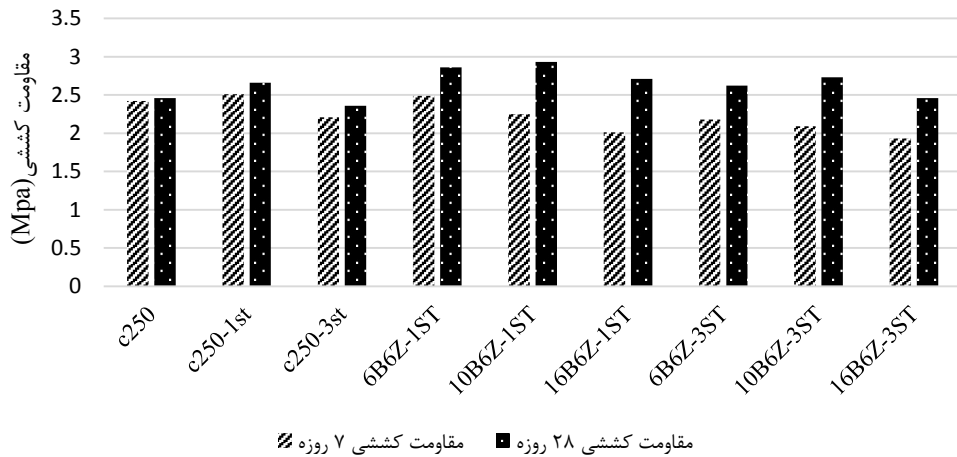
نتایج مقاومت کششی متوسط نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز در شکل ۶ گردآوری شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، مقاومت کششی ۷ روزه برای نمونه فاقد زئولیت و بتنوتیت، برای نمونه حاوی یک درصد کاه نسبت به نمونه مرجع موجب افزایش مقاومت کششی تا ۳٪ و برای نمونه حاوی سه درصد کاه نسبت به نمونه مرجع موجب کاهش مقاومت تا ۹٪ شده است و در سن ۲۸ روز نمونه حاوی یک درصد کاه موجب افزایش مقاومت نسبت به نمونه مرجع (C250) تا ۸٪ و برای نمونه حاوی ۳٪ کاه موجب کاهش مقاومت تا ۴٪ نسبت به نمونه مرجع شده است. افزودن الیاف تا یک درصد سبب بهبود نتایج مقاومت کششی در سنین ۷ و ۲۸ روز شده است.

برای نمونه‌های حاوی بتنوتیت و زئولیت ۶٪ و کاه یک درصد، مقاومت کششی ۷ روزه از نمونه مرجع کمتر شده ولی در سن ۲۸ روز مقاومت کششی نسبت به نمونه مرجع حدودا ۷٪ افزایش یافته است. به این دلیل است که

با بتنوتیت باشد. روی سطح الیاف کاه مواد آلی فراوانی وجود دارد که سبب کاهش اتصال بهتر با بتن می‌شود [۳۶ و ۲۶] ولی از آن جایی که بتنوتیت خاصیت کلئیدی داشته و مونتوربونیت موجود در آن خاصیت سوسپانسیون کنندگی مناسبی به آن می‌دهد، می‌تواند مواد آلی را در ساختمان داخلی یا خارجی خود حفظ کند [۳۷]. به نظر می‌رسد بتنوتیت، مواد آلی موجود در کاه را جذب کرده، با آن سازگار بوده و سبب افزایش مقاومت شده است که جهت اثبات این ادعا نیازمند انجام آزمایش‌های جانبی می‌باشد.

در نمونه‌های 6b6z-3st، 10b6z-3st و 16b6z-3st مشاهده می‌گردد که با افزودن مواد پوزولانی به همراه سه درصد الیاف مقدار مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است. کاهش مقاومت فشاری در سن ۷ روز برای نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع به ترتیب برابر با ۱۷٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ می‌باشد و کاهش مقاومت در سن ۲۸ روز برای نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع به ترتیب برابر با ۹٪، ۳۳٪ و ۵۵٪ است. افزودن بتنوتیت از ۶٪ به ۱۶٪ این روند کاهشی را بیشتر کرده است. با مقایسه قسمت قبل قابل مشاهده می‌باشد که افزودن الیاف تا ۳٪ روند کاهشی داشته است. در واقع افزودن الیاف تا این میزان پیوند ماتریس سیمان را تحت تاثیر قرار داده و سبب کاهش پیوند ژل سیمان و سنگدانه‌ها شده است [۳۸ و ۲۶]. با مقایسه کاهش مقاومت در سنین ۷ و ۲۸ روز نشان داده می‌شود که با افزایش سن عمل‌آوری نمونه‌ها این اختلاف مقاومت نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته و با تکمیل فرایند عمل‌آوری نمونه حاوی ۶٪ بتنوتیت، ۶٪ زئولیت و ۳٪ الیاف نتیجه تقریبا یکسانی با نمونه مرجع حاصل شده است.

در جدول ۶ روند رشد نسبت مقاومت فشاری هفت به ۲۸ روزه نمونه‌ها نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصله به طور میانگین تمامی نمونه‌ها در سن ۷ روز به ۶۰ الی ۷۰ درصد مقاومت مقاومت ۲۸ روزه دست یافته‌اند. با مقایسه نمونه‌های C250-1st و C250-3st نسبت به نمونه مرجع قابل مشاهده است که الیاف روند رشد مقاومت فشاری را در سن ۷ روز تا حدودی کاهش می‌دهند که می‌تواند به دلیل حضور حباب‌های ایجاد شده حین استفاده از الیاف باشد. مقدار رشد مقاومت از ۷ به ۲۸ روز حدودا ۴۰٪ است. در نمونه‌های حاوی ۶٪ زئولیت و یک درصد الیاف کاه، با افزایش بتنوتیت میزان رشد مقاومت از ۷ به ۲۸ روز تقریبا یکسان است و تغییر چشمگیری قابل مشاهده نیست. میزان عیار سیمان در نمونه‌های 6b6z-1st، 10b6z-1st و 16b6z-1st به ترتیب برابر با ۲۱۷/۵، ۲۰۷/۵ و ۱۹۲/۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد با وجود اختلاف سیمانی که بین



شکل ۶. نتایج مقاومت کششی متوسط نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز

Fig. 6. Results of average tensile strength of samples at 7 and 28 days

۵-۳- چگالی

نتایج حاصل از انجام این آزمایش در جدول ۷ گزارش شده است. بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش ژئولیت و بتنویت میزان وزن مخصوص بتن کاهش یافته است. از طرفی وزن مخصوص ژئولیت و بتنویت نسبت به سیمان کمتر می‌باشد، طبیعی است که با افزایش بتنویت، وزن مخصوص طرح‌های حاوی ژئولیت و بتنویت نسبت به نمونه مرجع کاهش می‌یابد. وزن مخصوص دو نمونه C250-1st و C250-3st نسبت به نمونه مرجع تقریباً یکسان است و تغییر چندانی قابل مشاهده نیست.

۵-۴- مقاومت خمش سه نقطه‌ای

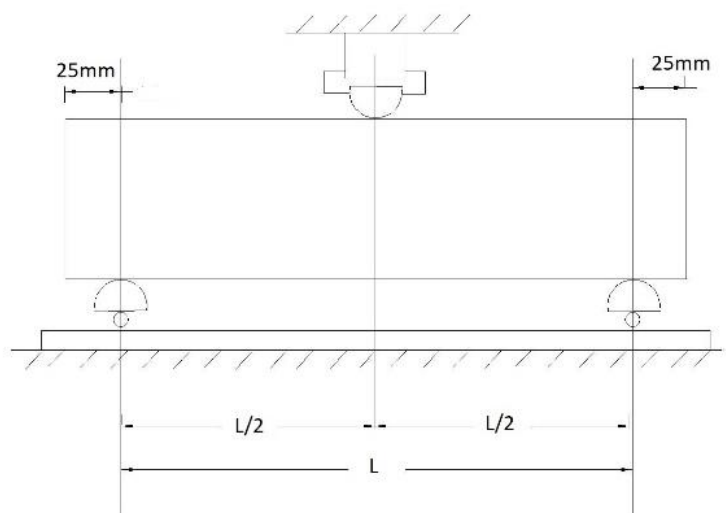
با بررسی نتایج مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها، دو نمونه 6b6Z-1st و 16b6Z-1st جهت آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. قابل ذکر است که با بررسی نتایج کششی نمونه حاوی ۱۰٪ بتنویت نسبت به نمونه مرجع افزایش مقاومت بیشتری داشته است همچنین قابل ذکر است که طبق تحقیقات پیشین در صورتی که میزان درصد ژئولیت تغییر کند، درصد بهینه بتنویت همچنان ۱۰٪ می‌باشد [۲۷]. ولی در این پژوهش هدف بررسی دو طرح اختلاطی می‌باشد که طرح اول دارای بهترین مقاومت فشاری و کششی نسبت به سایر نمونه‌ها و طرح اختلاط دوم حاوی کمترین میزان سیمان با در نظر گرفتن مقاومت فشاری

عمل‌آوری پوزولان‌ها نسبت به سیمان پرتلند طولانی‌تر می‌باشد. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش بتنویت تا ۱۰٪ موجب افزایش مقاومت کششی تا میزان ۱۰٪ نسبت به نمونه مرجع (C250-1st) در سن ۲۸ روز می‌گردد ولی با افزودن ۱۶٪ بتنویت به طرح اختلاط روند کاهش در مقاومت کششی در سن ۲۸ روز رخ داده ولی همچنان نسبت به نمونه مرجع حدوداً ۲٪ افزایش مقاومت مشاهده می‌گردد. این روند دقیقاً برای نمونه‌های حاوی شش درصد ژئولیت و سه درصد کاه نیز تکرار می‌شود. میزان مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی یک درصد کاه نسبت به نمونه‌های دارای سه درصد کاه بیشتر می‌باشد با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که نمونه‌های 10b6Z-1st و 10b6Z-3st نسبت به سایر نمونه‌ها دارای مقاومت کششی بیشتری می‌باشند. بتنویت به دلیل خواص ذاتی که دارد خاصیت انعطاف‌پذیری به نمونه‌ها می‌دهد ولی با افزودن بیش از حد بتنویت، نمونه حالت تردی به خود گرفته و مقاومت آن در کشش کاهش می‌یابد. با بررسی نتایج قابل مشاهده است که با افزودن الیاف، روند افزایش مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی بیشتر می‌باشد که می‌تواند به دلیل نحوه عملکرد مناسب کاه و بتنوت و اندازه الیاف مصرفی باشد. بر اساس تحقیقات گذشته استفاده از الیاف طبیعی تا حدوداً ۶ mm تاثیر بیشتری بر رفتار کششی نمونه‌ها داشته است [۳۶ و ۳۹]. در این پژوهش از الیاف کاه به طول حدوداً ۳۰-۴۰ mm استفاده شده است.

جدول ۷. وزن مخصوص نمونه‌ها

Table 7. Specific gravity of samples

وزن مخصوص نمونه‌ها (kg/m^3)	نام طرح
۲۳۱۲	C250
۲۳۱۳	C250-1st
۲۳۱۷	C250-3st
۲۲۹۸	6b6z-1t
۲۲۸۷	6b10z-1st
۲۲۷۳	6b16z-1st
۲۲۹۵	6b6z-3t
۲۲۹۰	6b10z-3st
۲۲۸۶	6b16z-3st

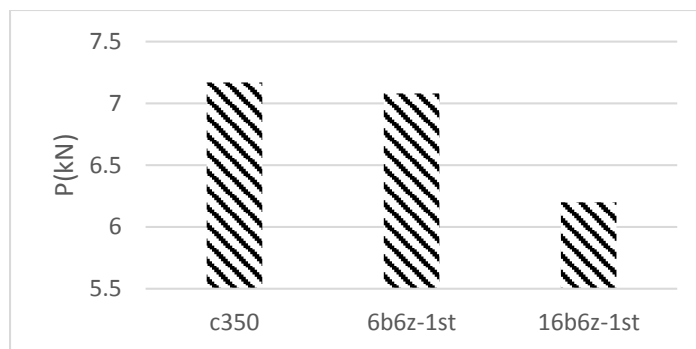


شکل ۷. شکل شماتیک آزمایش خمش سه نقطه‌ای

Fig. 7. Schematic of a three-point bending test

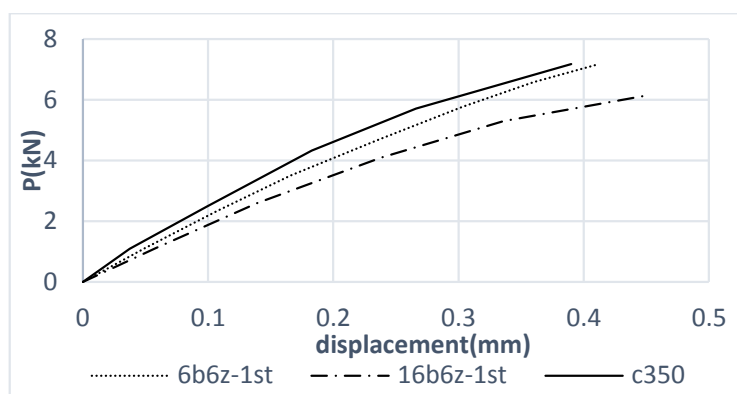
یکی از طرح اختلاط‌ها دو تیر جهت اطمینان از نتایج ساخته شده است. شکل شماتیک آزمایش خمش سه نقطه‌ای در شکل ۷ آورده شده است. نتایج مقاومت خمشی متوسط نمونه‌ها در شکل ۸ گزارش شده است. همان‌طور که قابل پیش‌بینی است نمونه C۳۵۰ دارای بیشترین مقاومت خمشی می‌باشد و نمونه 6b6z-1st مقاومت خمشی بسیار نزدیکی نسبت به نمونه مرجع کسب کرده است. در واقع با حذف 100 kg/m^3 سیمان و

و کششی متناسب است، انتخاب شده است. جهت مقایسه عملکرد این دو طرح اختلاط در بخش خمش، از نمونه مرجع (C۳۵۰) استفاده شده است. در واقع هدف از انجام این کار این است که با حذف 100 کیلوگرم بر متر مکعب سیمان در طرح‌های اختلاط نتایج چه میزان به نمونه حاوی kg/m^3 ۳۵۰ نزدیک می‌شود. این آزمایش طبق استاندارد ASTM C293 [۲۸] بر روی تیرهایی به ابعاد $50 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ انجام شده است. از هر



شکل ۸. نتایج مقاومت خمشی متوسط طرح اختلاط‌های منتخب

Fig. 8. Results of the average flexural strength of the selected mix design



شکل ۹. نمودار مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌ها

Fig. 9. Three-point flexural strength diagram of the specimens

محاسباتی قابل قبول آئین‌نامه‌ای برای این الیاف نیازمند مطالعات، تحقیق و بررسی‌های بیشتر می‌باشد.

مدول گسیختگی به عنوان معیار مقاومت کششی تیرها یا دال‌های بتنی محسوب می‌شود. مقاومت خمشی میزان تنش و نیرو را در یک دال بتنی غیرمسلح، تیر یا سازه‌های دیگر که می‌توانند در برابر هرگونه شکست خمشی مقاومت کنند، شناسایی می‌کند. جهت محاسبه مدول گسیختگی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C293 از رابطه ۲ استفاده شده است.

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

$$f_r = 0.62\lambda\sqrt{f_{cc}} \quad (3)$$

جایگزینی ۱۲٪ ژئولیت و بنتونیت و یک درصد الیاف تقریباً به ۹۸٪ مقاومت خمشی نمونه مرجع رسیده است. در نمونه 16b6z-1st کاهش مقاومت خمشی نسبت به نمونه مرجع صورت گرفته است. با جایگزینی ۲۲٪ پوزولان و الیاف تقریباً ۸۷٪ مقاومت خمشی نمونه مرجع حاصل شده است. با مقایسه دو طرح 6b6z-1st و 16b6z-1st می‌توان گفت که با جایگزینی ۱۶٪ بنتونیت نمونه از خود رفتار تردتری نشان داده و زودتر دچار شکست شده است پیشتر در قسمت کشش نیز اشاره شد که با افزایش میزان بنتونیت تا ۱۶٪ نمونه مقاومت کششی کمتری از خود نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل ۹ مشخص است که الیاف کمک زیادی به نمونه‌ها نکرده و نمونه‌ها به یک باره دچار شکست شده‌اند در واقع حضور الیاف در نمونه‌ها بیشتر به بخش فشاری کمک کرده است. با توجه به مقایسه نتایج نمونه‌ها، الیاف عملکرد تقریباً مناسبی داشته است ولی جهت ایده استفاده از روابط

جدول ۸. مقایسه مدول گسیختگی آزمایشگاهی و تئوری نمونه‌ها

Table 8. Comparison of experimental rupture modulus and sample theory

نام نمونه	Pmax (kN)	(f _r) _{exp} (MPa)	(f _r) _{the} (MPa)	(f _r) _{exp} / (f _r) _{the}
C350	۷/۱۷	۵/۳۷	۳/۶۸	۱/۴۶
6b6z-1st	۷/۱۵	۵/۳۶	۳/۵۷	۱/۵۰
16b6z-1st	۶/۱۸	۴/۶۴	۳/۰۸	۱/۵۱

کششی نیز افزایش می‌یابد. طبق ACI318-14 [۴۰] مقاومت کششی متوسط اندازه‌گیری شده از آزمایش دو نیم شدن f_{ct} طبق رابطه ۴ محاسبه می‌گردد در این رابطه f_{cm} مقاومت فشاری بتن بوده که می‌توان آن را معادل f'_c لحاظ کرد. همچنین استاندارد CEB-FIP برای مقاومت کششی متوسط آزمایش شکافت (f_{cm}) رابطه ۵ را پیشنهاد داده است.

$$f_{ct} = 0.56\sqrt{f_{cm}} \quad (۴)$$

$$f_{ctm} = 0.3\sqrt[3]{f_{cc}^2} \quad (۵)$$

نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس روابط ۴ و ۵ در سنین ۷ و ۲۸ روز در جدول ۹ گزارش شده است. نمونه مرجع در سن ۷ روز نتیجه تقریباً یکسانی با ضریب رابطه ۴ دارد با مقایسه سایر نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی پوزولان با یک درصد الیاف کاه در سن ۷ روز در کشش ضعیف‌تر هستند ولی با افزایش سن در ۲۸ روز عملکرد بتن در کشش نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است نمونه‌های حاوی پوزولان و سه درصد کاه در سنین ۷ و ۲۸ نتایج تقریباً یکسان یا بیشتری کسب کرده‌اند. بر اساس رابطه ۵ نیز دقیقاً همین روند تکرار شده است و قابل مشاهده است که نمونه‌های حاوی ۱۰٪ بنتونیت در سن ۲۸ روز ضریب بزرگ‌تری دارند و نشان دهنده عملکرد خوب بنتونیت در کشش است.

در رابطه ۲، R مقاومت خمشی، برحسب مگاپاسکال، P حداکثر نیروی اعمال شده بر حسب نیوتون و b و d و l برحسب میلی‌متر می‌باشند. طبق پیشنهاد آیین‌نامه ACI318 [۳۴] میان مقاومت فشاری نمونه‌ها و مدول گسیختگی ارتباط وجود دارد که طبق رابطه ۳ قابل محاسبه است. در این رابطه f_r مدول گسیختگی پیشنهادی بر حسب مگاپاسکال، λ ضریب اصلاحی با توجه نوع بتن بوده که در این قسمت با توجه به آیین‌نامه، مقدار λ برای بتن‌های با وزن معمولی برابر یک است و f_{cc} مقاومت فشاری نمونه بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. در جدول ۸ به بررسی میزان مدول گسیختگی آزمایشگاهی و تئوری پرداخته شده است. در ستون آخر نسبت مدول گسیختگی آزمایشگاهی به تئوری محاسبه شده است.

مشاهده می‌شود که مدول گسیختگی حاصل از آزمایش سه نقطه‌ای حدوداً ۴۰٪ الی ۵۰٪ بیشتر از میزان مدول گسیختگی پیش‌بینی شده آیین‌نامه می‌باشد که این اختلاف را می‌توان به این صورت توجیه کرد که رابطه پیش‌بینی شده توسط آیین‌نامه برای بتن‌های معمولی حاوی درشت دانه است در صورتی که در این مقاله برای طرح اختلاط بتن از شن‌های با حداکثر اسمی ۹ mm استفاده شده است و از طرفی حضور الیاف و پوزولان‌ها موجب افزایش چسبندگی در خمیر سیمان شده و مقاومت کششی را افزایش داده‌اند.

۶- بررسی روابط

۶-۱- مقاومت فشاری و مقاومت کششی

میان مقاومت فشاری و مقاومت کششی در بتن‌های معمولی رابطه وجود دارد و به این صورت است که با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقاومت

جدول ۹. نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بر اساس روابط ۴ و ۵ در سنین ۷ و ۲۸ روز

Table 9. Tensile strength to compressive strength ratio based on relationships 4 and 5 at the ages of 7 and 28 days

سن ۲۸ روز		سن ۷ روز		نام طرح
$(f_{ct}/\sqrt[3]{f_{cm}^2})$	$(f_{ct}/\sqrt{f_{cm}})$	$(f_{ct}/\sqrt[3]{f_{cm}^2})$	$(f_{ct}/\sqrt{f_{cm}})$	
۰/۲۸	۰/۴۹	۰/۳۵	۰/۵۷	C250
۰/۳	۰/۵۲	۰/۳۷	۰/۶	C250-1st
۰/۲۹	۰/۴۹	۰/۳۸	۰/۵۹	C250-3st
۰/۲۸	۰/۵	۰/۳	۰/۵۱	6b6z-1st
۰/۳۲	۰/۵۵	۰/۳۱	۰/۵۱	10b6z-1st
۰/۳۲	۰/۵۴	۰/۳۱	۰/۵	16b6z-1st
۰/۳۲	۰/۵۴	۰/۳۵	۰/۵۷	6b6z-3st
۰/۳۸	۰/۶۲	۰/۳۸	۰/۵۸	10b6z-3st
۰/۳۸	۰/۶۱	۰/۴۱	۰/۶	16b6z-3st

۶-۲- مقاومت فشاری و سن نمونه

بر اساس استاندارد ACI209.2R [۴۱] رابطه ۶ بین مقاومت فشاری و سن عمل‌آوری نمونه ساخته شده با سیمان نوع دو و در دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد که به صورت مرطوب عمل‌آوری شده پیشنهاد شده است. بر اساس این رابطه مقدار t زمان مورد نظر پس از ریختن بتن بر حسب روز، $f_c(t)$ و $f_{c,28}$ به ترتیب مقاومت فشاری بتن پس از گذشت t روز و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن است. استاندارد اروپایی CEB-FIP [۴۲] در شرایط مشابه رابطه ۷ را جهت ارزیابی مقاومت فشاری بتن در طول زمان ارائه کرده است. مقادیر $f_c(t)$ و $f_{c,28}$ به ترتیب مقاومت فشاری متوسط بتن در زمان t و سن ۲۸ روزه می‌باشد و ضریب S وابسته به نوع سیمان است که برای سیمان‌های معمولی ۰/۲۵ لحاظ می‌گردد. در جدول ۱۰ مقاومت فشاری تئوری و آزمایشگاهی بر اساس روابط ۶ و ۷ با یکدیگر مقایسه شده و اختلاف نتایج در ستون آخر قابل مشاهده است.

$$f'_c(t) = f'_{c,28} \left(\frac{t}{4 + 0.85t} \right) \quad (6)$$

$$f_c(t) = \exp \left[s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right] f_{c,28} \quad (7)$$

رابطه ۶ و ۷ برای نمونه‌های با مقاومت فشاری ۷ روزه به ترتیب با اختلاف حدودا ۵٪ و ۲/۵٪ قابل استفاده است. اختلاف مقاومت فشاری ۲۸ روزه در رابطه ۶ و نمونه‌های آزمایشگاهی کمتر از یک درصد می‌باشد.

۷- محاسبه پتانسیل گرمایش جهانی (GWP^۱) مصالح مصرفی

انتشار گازهای گلخانه‌ای یکی از مسائلی است که سبب پدیده تغییر اقلیم و گرم شدن جهانی شده است. هر مصالحی که تولید می‌شود، به ازای هر تن مقداری گاز گلخانه‌ای تولید می‌کند که این میزان برای مصالح مختلف متفاوت می‌باشد. با توجه به دستورالعمل برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از فرایندهای صنعتی به محاسبه مقدار GWP نمونه‌های منتخب پرداخته شده است. همان طور که ذکر شد مصالح مصرفی در این تحقیق سیمان، شن، ماسه، زئولیت، بنتونیت و یاف کاه می‌باشد که میزان GWP برای زئولیت،

1 Global warming potential

جدول ۱۰. مقایسه مقاومت فشاری تئوری و آزمایشگاهی بر اساس رابطه ۶ و ۷

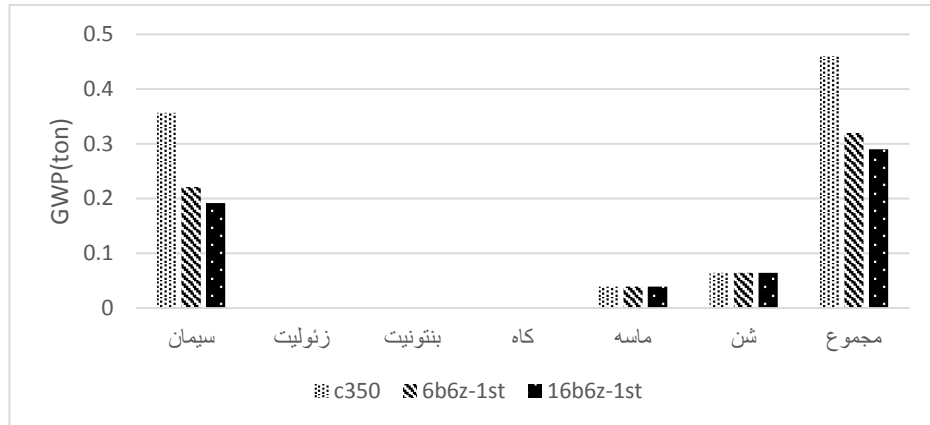
Table 10. Comparison of theoretical and experimental compressive strength based on equations 6 and 7

اختلاف		$f'c(the')$			سن (روز)	نام طرح اختلاط
رابطه ۷	رابطه ۶	$f'c(exp')$	رابطه ۷	رابطه ۶		
۱/۶۸	۰/۲۳	۱۸/۱۲	۱۹/۸	۱۷/۸۹	۷	C250
۰	۰/۱۸	۲۵/۴۳	۲۵/۴۳	۲۵/۶۱	۲۸	
۲/۹	۰/۹۲	۱۷/۵۹	۲۰/۴۹	۱۸/۵۱	۷	C250-1st
۰	۰/۱۸	۲۶/۳۱	۲۶/۳۱	۲۶/۴۹	۲۸	
۴/۰۴	۲/۲۹	۱۴/۰۸	۱۸/۱۲	۱۶/۳۷	۷	C250-3st
۰	۰/۱۶	۲۳/۲۷	۲۳/۲۷	۲۳/۴۳	۲۸	
۰/۹۹	۱/۴۲	۲۴/۰۰	۲۴/۹۹	۲۲/۵۸	۷	6b6z-1st
۰	۰/۲۳	۳۲/۱۰	۳۲/۱۰	۳۲/۳۳	۲۸	
۲/۵۵	۰/۴۵	۱۹/۲۰	۲۱/۷۵	۱۹/۶۵	۷	10b6z-1st
۰	۰/۲	۲۷/۹۴	۲۷/۹۴	۲۸/۱۴	۲۸	
۳/۴۵	۱/۵۶	۱۶/۱۵	۱۹/۶۰	۱۷/۷۱	۷	16b6z-1st
۰	۰/۱۸	۲۵/۱۷	۲۵/۱۷	۲۵/۳۵	۲۸	
۲/۶۸	۰/۹۴	۱۵/۳۶	۱۸/۰۴	۱۶/۳۰	۷	6b6z-3st
۰	۰/۱۶	۲۳/۱۷	۲۳/۱۷	۲۳/۳۳	۲۸	
۱/۸۸	۰/۴۵	۱۲/۹۱	۱۴/۷۹	۱۳/۳۶	۷	10b6z-3st
۰	۰/۱۳	۱۹/۰۰	۱۹/۰۰	۱۹/۱۳	۲۸	
۲/۳۲	۱/۰۹	۱۰/۴۰	۱۲/۷۲	۱۱/۴۹	۷	16b6z-3st
۰	۰/۱۱	۱۶/۳۴	۱۶/۳۴	۱۶/۴۵	۲۸	

¹ Theory
² Experimental

سیمان 350 kg/m^3 می‌باشد دارای بیشترین GWP و نمودار 16b6z-1st دارای کمترین میزان GWP می‌باشد. در واقع با جایگزینی ۲۲٪ مواد پوزولانی به جای سیمان، میزان سیمان مصرفی در این نسبت اختلاط به $187/5 \text{ kg/m}^3$ کاهش یافته است بدیهی است که با کاهش مقدار سیمان مقدار پتانسیل گرمایش جهانی کاهش می‌یابد. همچنین مقدار گاز گلخانه‌ای تولید شده برای تولید شن نسبت به ماسه بیشتر می‌باشد به همین علت در این پژوهش از شن‌های با حداکثر اندازه اسمی ۹ mm استفاده شده است. میزان GWP نمونه 6b6z-1st و 16b6z-1st به ترتیب حدوداً ۴۳٪ و ۵۶٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته‌اند. با توجه به اثرات زیست‌محیطی و گلخانه‌ای مواد پوزولانی و الیاف مصرفی و تاثیرات مثبتی که سیمان و این مواد بر روی هم دارند که پیش‌تر به آن اشاره شد، استفاده از بتن‌های

بتونیت و الیاف کاه صفر می‌باشد به این علت که الیاف کاه در واقع پسماند محصول زراعی گندم است و هزینه‌ای جهت تولید در بر نخواهد داشت همچنین زئولیت و بتونیت نیز چون به صورت خام و طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند مقدار GWP برای آن‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود [۱]. بر اساس دستورالعمل برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از فرایندهای صنعتی مقدار GWP برای نمونه‌های منتخب C350، 6b6z-1st و 16b6z-1st محاسبه شده و با یکدیگر در نمودار شکل ۱۰ مقایسه شده‌اند. بر اساس دستورالعمل برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای، برای تولید یک تن سیمان، یک تن ماسه و یک تن شن به ترتیب حدوداً یک، ۰/۰۳ و ۰/۱۱۴ تن گاز گلخانه‌ای CO_2 تولید می‌شود. بر اساس نمودار قابل مشاهده است که نمونه $\text{C}350$ که حاوی مقدار



شکل ۱۰. نمودار GWP برای مصالح مصرفی و طرح اختلاطهای منتخب

Fig. 10. GWP diagram for consumables and design of selected mixes

روز نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است. افزودن بنتونیت از ۰.۰۶ به ۰.۱۶٪ این روند کاهش را بیشتر کرده است. در واقع افزودن الیاف تا سه درصد میزان پیوند ماتریس سیمان را تحت تاثیر قرار داده و سبب کاهش پیوند ژل سیمان و سنگدانه‌ها شده است.

- مقاومت کششی ۲۸ روزه برای نمونه c250-1st نسبت به نمونه مرجع حدوداً ۰.۰۸٪ افزایش یافته است و برای نمونه حاوی سه درصد کاه در سن ۲۸ روز ۰.۰۴٪ کاهش مقاومت نسبت به نمونه مرجع مشاهده شده است. با ثابت بودن میزان زئولیت و یک درصد الیاف کاه، افزودن بنتونیت تا ۰.۱۰٪ سبب افزایش مقاومت کششی ۲۸ روزه شده و با افزودن ۰.۱۶٪ بنتونیت سبب کاهش مقاومت ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های حاوی ۰.۰۶٪ و ۰.۱۰٪ بنتونیت می‌گردد. میزان مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی یک درصد کاه نسبت به نمونه‌های دارای سه درصد کاه بیشتر می‌باشد. نمونه‌های 10b6z-1st و 10b6z-3st نسبت به سایر نمونه‌ها دارای مقاومت کششی بیشتری می‌باشند.

- با مقایسه روابط فشار و کشش مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی ۰.۱۰٪ بنتونیت به همراه یک درصد الیاف کاه حدوداً ۰.۲۰٪ سبب افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه مرجع شده است.

- نمونه‌های 16b6z-1st و 6b6z-1st در مقاومت خمشی سه نقطه‌ای به ترتیب به ۰.۹۸٪ و ۰.۸۷٪ مقاومت نمونه مرجع که حاوی kg/m^3 ۳۵۰ می‌باشد دست یابند. نمونه‌ها به صورت ترد و به یک باره دچار شکست

پوزولانی حاوی الیاف می‌تواند توجیه‌پذیر باشد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عملکرد بتن‌های کم سیمان پرداخته شده است. در واقع بخشی از سیمان با مواد پوزولانی زئولیت و بنتونیت و الیاف کاه جایگزین شده است. طرح‌های اختلاط تحت مقاومت فشاری و کششی قرار گرفته‌اند و پس از بررسی نتایج بر روی طرح اختلاط‌های منتخب آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای انجام شده است. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته نتایج زیر حاصل شده است:

- درصد بهینه افزودن الیاف جهت افزایش مقاومت فشاری یک درصد می‌باشد. با توجه به انجام آزمایشات مختلف بر روی درصد‌های گوناگون زئولیت و بنتونیت و بررسی مطالعات پیشین مقدار زئولیت ۰.۰۶٪ می‌باشد. در صورت ثابت بودن زئولیت با افزودن بنتونیت تا ۰.۱۰٪ و استفاده از یک درصد الیاف در سن ۷ و ۲۸ روز افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع مشاهده شده است. افزودن ۰.۱۶٪ بنتونیت نسبت به نمونه مرجع نتیجه تقریباً یکسانی در سن ۲۸ روز ارائه داده است. به نظر می‌رسد این روند رشد به دلیل سازگاری الیاف طبیعی کاه و بنتونیت مصرفی می‌باشد که بنتونیت با جذب مواد آلی موجود در سطح الیاف کاه از کاهش اتصال الیاف با بتن جلوگیری کرده و سبب افزایش مقاومت بتن شده است. با افزودن مواد پوزولانی به همراه سه درصد الیاف مقدار مقاومت فشاری در سن ۷ و ۲۸

- (2011).
- [3] M.S. Morsy, S.S. Shebl, Effect of silica fume and metakaoline pozzolana on the performance of blended cement pastes against fire, *Ceramics Silikaty*, 51(1) (2007) 40.
- [4] J. Cejka, H. Van Bekkum, A. Corma, F. Schueth, *Introduction to zeolite molecular sieves*, Elsevier, 2007.
- [5] T. Perraki, G. Kakali, F. Kontoleon, The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement, *Microporous and mesoporous materials*, 61(1-3) (2003) 205-212.
- [6] B. Ahmadi, M. Shekarchi, Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement and Concrete Composites*, 32(2) (2010) 134-141.
- [7] M. Shekarchi, B. Ahmadi, M. Najimi, Use of natural zeolite as pozzolanic material in cement and concrete composites, (2012).
- [8] B.B. Raggiotti, M.J. Positieri, Á. Oshiro, Natural zeolite, a pozzolan for structural concrete, *Procedia Structural Integrity*, 11 (2018) 36-43.
- [9] T. Perraki, E. Kontori, S. Tsivilis, G. Kakali, The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements, *Cement and Concrete Composites*, 32(2) (2010) 128-133.
- [10] S.A. Abdul-Wahab, E.M. Hassan, K.S. Al-Jabri, K. Yetilmesoy, Utilizing zeolite/kaolin combination for partial cement clinker replacement to manufacture environmentally sustainable cement in Oman, (2019).
- [11] O. Rezaifar, M. Hasanzadeh, M. Gholhaki, Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: optimization using response surface method, *Construction and building materials*, 123 (2016) 59-68.
- [12] C. Bilim, Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material, *Construction and Building Materials*, 25(8) (2011) 3175-3180.
- [13] M. Sharbatdar, M. Oruei, Improved compressive, tensile and flexural strength of unreinforced concrete specimens and reinforced concrete beams containing zeolite, *Journal*

شده‌اند که در واقع اندازه طول الیاف مصرفی دلیل آن است.

- در صورتی که میزان درصد زئولیت تغییر کند، درصد بهینه بنتونیت در خمش همچنان ۱۰٪ می‌باشد.
- مدول گسیختگی نمونه‌های 6b6z-1st و 16b6z-1st بر اساس روابط تئوری و آزمایشگاهی حدوداً ۴۰٪ الی ۵۰٪ با یکدیگر اختلاف دارند رابطه پیش‌بینی شده توسط آیین‌نامه برای بتن‌های معمولی با درصد‌های مختلف عبوری از الک برای درشت دانه می‌باشد ولی در این پژوهش از سنگ‌دانه‌ها با حداکثر اندازه اسمی ۹ mm که از الک ۳/۸ اینچ عبور کرده و بر روی الک شماره ۴ باقی می‌ماند استفاده شده است.
- با جایگزینی بیشتر مواد پوزولانی مقدار GWP کاهش می‌یابد. نمونه 16b6z-1st دارای کمترین میزان GWP است.
- وزن مخصوص نمونه‌های حاوی زئولیت و بنتونیت نسبت به نمونه مرجع کمتر است.
- طبق مقررات ملی ساختمان مبحث ۹ میزان مقاومت فشاری برای بتن‌های سازه‌ای ۲۰-۳۵ Mpa مکفی بوده و همچنین در برخی از المان‌های سازه‌ای مانند دیوارهای حجیم مقاومت فشاری بیشتر از ۱۵ مگاپاسکال ضرورتی نداشته و دلیل استفاده از این نوع بتن را توجه می‌کند. نمونه 6b6z-1st به عنوان طرح بهینه پیشنهاد می‌گردد به این علت که با جایگزینی ۱۲٪ مواد پوزولانی، یک درصد الیاف کاه و حذف 100 kg/m^3 سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری و کششی به اندازه ۲۶٪ و ۱۵٪ نسبت به نمونه مرجع شده و به ۹۸٪ مقاومت خمشی نسبت به نمونه مرجع دست یافته است.

تقدیر و تشکر

با تشکر از مجموعه آزمایشگاهی حوزه عمران دانشگاه سمنان که با کمک‌های وافر و بی‌دریغ خود مرا در پیش برد این پژوهش علمی یاری نمودند.

منابع

- [1] A. Heath, K. Paine, M. McManus, Minimising the global warming potential of clay based geopolymers, *Journal of Cleaner Production*, 78 (2014) 75-83.
- [2] Y.H. Cheng, K. Hazlinda, A. Mohd Mustafa Al-Bakri, M. Luqman, K. Nizar, Y. Liew, Potential application of kaolin without calcine as greener concrete: a review,

- 161-179.
- [23] I. Merta, E. Tschegg, Fracture energy of natural fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 991-997.
- [24] A. Qudoos, H.G. Kim, J.-S. Ryou, Effect of mechanical processing on the pozzolanic efficiency and the microstructure development of wheat straw ash blended cement composites, *Construction and Building Materials*, 193 (2018) 481-490.
- [25] R.A. Khushnood, S.A. Rizwan, S.A. Memon, J.-M. Tulliani, G.A. Ferro, Experimental investigation on use of wheat straw ash and bentonite in self-compacting cementitious system, *Advances in materials science and engineering*, 2014 (2014).
- [26] G. Wang, Y. Han, Research on the Performance of Straw Fiber Concrete, in: *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, pp. 032080.
- [27] F. Abdolshah, O. Rezaifar, M. Gholhaki, Study of changes in mechanical properties of concrete containing bentonite and zeolite in cement replacement, *Journal of Civil Engineering Amirkabir*, (2020). (in persian)
- [28] C. ASTM, Standard specification for concrete aggregates, Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, (2003).
- [29] A. Standard, C143 (2015) Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete, ASTM International, West Conshohocken.
- [30] C. ASTM, C31M (2003) Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field, West Conshohocken, PA.
- [31] A. Standard, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM C39, (2010).
- [32] A. Standard, C496/C496 M- 11, 2011, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2011).
- [33] ASTM, Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading), (2015).
- of Civil and Environmental Engineering, University of Tabriz, 48.4 (93) (2019) 103-113. (in persian)
- [14] F. Jekar, M. Khorram, G. Karimi, N. Hataf, Experimental investigation of mechanical properties of crumbed rubber concrete containing natural zeolite, *Construction and Building Materials*, 208 (2019) 651-658.
- [15] A. Terzić, L. Pezo, N. Mijatović, J. Stojanović, M. Kragović, L. Miličić, L. Andrić, The effect of alternations in mineral additives (zeolite, bentonite, fly ash) on physico-chemical behavior of Portland cement based binders, *Construction and Building Materials*, 180 (2018) 199-210.
- [16] M. Nehdi, Clay in cement-based materials: Critical overview of state-of-the-art, *Construction and Building Materials*, 51 (2014) 372-382.
- [17] M. Shabab, K. Shahzada, B. Gencturk, M. Ashraf, M. Fahad, Synergistic effect of fly ash and bentonite as partial replacement of cement in mass concrete, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(5) (2016) 1987-1995.
- [18] M. Karthikeyan, P.R. Ramachandran, A. Nandhini, R. Vinodha, Application on partial substitute of cement by bentonite in concrete, *International Journal of ChemTech Research*, 8(11) (2015) 384-388.
- [19] G.V.K. Reddy, V.R. Rao, M.A.K. Reddy, Experimental investigation of strength parameters of cement and concrete by partial replacement of cement with Indian calcium bentonite, *Technology*, 8(1) (2017) 512-518.
- [20] S.A. Memon, R. Arsalan, S. Khan, T.Y. Lo, Utilization of Pakistani bentonite as partial replacement of cement in concrete, *Construction and building materials*, 30 (2012) 237-242.
- [21] B. Belhadj, M. Bederina, Z. Makhloufi, R. Dheilly, N. Montrelay, M. Quéneudéc, Contribution to the development of a sand concrete lightened by the addition of barley straws, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 513-522.
- [22] A. Petrella, D. Spasiano, S. Liuzzi, U. Ayr, P. Cosma, V. Rizzi, M. Petrella, R. Di Mundo, Use of cellulose fibers from wheat straw for sustainable cement mortars, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 8(3) (2019)

- of the properties of a sand concrete containing barley straws—treatment of the barley straws, *Construction and Building Materials*, 115 (2016) 464-477.
- [39] M. Bazrafkan, Laboratory study of the effect of using wheat straw on compressive strength, psychological strength and toughness of paving roller concrete mix, *Concrete Research*, 10 (1) (2017) 47-62.
- [40] A. Committee, I.O.f. Standardization, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary, in, American Concrete Institute, 2008.
- [41] A.C.I. Committee, ACI 209.2 R-08: Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete, in, American Concrete Institute Committee, 2008.
- [42] M. CEB-FIP, 90, Design of concrete structures. CEB-FIP Model Code 1990, British Standard Institution, London, (1993).
- [34] A. Standard, C138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air-Content (Gravimetric) of Concrete, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013).
- [35] Kh. Ebrahim, M. Nozar, Experimental study of the effect of nanoclay and fly ash on compressive strength of cement sand mortar. (in persian)
- [36] F. Ataie, Influence of rice straw fibers on concrete strength and drying shrinkage, *Sustainability*, 10(7) (2018) 2445.
- [37] D. Lima-Guerra, I. Mello, R. Resende, R. Silva, Use of bentonite and organobentonite as alternatives of partial substitution of cement in concrete manufacturing, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(1) (2014) 15-26.
- [38] M. Bederina, B. Belhadj, M. Ammari, A. Gouilleux, Z. Makhloufi, N. Montrelay, M. Quéneudéc, Improvement

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. S. Zargar, O. Rezaifar, M. Gholhaki, Evaluation of the effectiveness of straw fibers on the mechanical properties of concrete containing zeolite and bentonite, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(3) (2022) 811-830.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18986.7034

