تأثیر مصالح طبیعی آهکی و رسی در جایگزینی سیمان در بتن‌های کم‌کربن

سیده مرضیه قیامی تکلیمی، کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
امید رضایی‌فر*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
مجید قلهکی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: Orezayfar@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۹ – پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰

چکیده

افزایش جمعیت در جوامع بشری و استفاده بی‌رویه از منابع تجدیدناپذیر و همچنین افزایش سرعت ساخت و ساز، تولید زباله و گازهای گلخانه‌ای، آسیب‌های زیست‌محیطی جدی به وجود آورده‌اند. صنعت ساخت یکی از بزرگ‌ترین منابع آلاینده دنیا به‌شمار می‌آید. در همین راستا، به دلیل افزایش تقاضا برای تولید سیمان و همچنین تحقق بخشیدن به الگوهای توسعه پایدار و محیط‌زیست پایدار باید موادی را که دارای خواص سیمانی هستند و می‌توان از آن‌ها به جای همه و یا بخشی از سیمان استفاده کرد، معرفی کرده و مورد ارزیابی قرار داد. در این تحقیق، به بررسی برخی از مواد پوزولانی که دارای خواص سیمانی هستند، پرداخته شده است. تولید و استفاده از این مواد آسیب کمتری به محیط‌زیست وارد می‌شود و بر همین اساس، در گروه مواد طبیعی قرار می‌گیرند. مواد پوزولانی مورد بررسی عبارتند از: بنتونیت، کائولن و آهک. در این پژوهش، ترکیب این مواد با انواع ماسه مورد بررسی قرار گرفته است تا بتوان به نتایج قابل قبولی برای استفاده در صنعت ساخت و ساز دست یافت. نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که در صورت استفاده از بنتونیت و کائولن در مخلوط بتن، نسبت به نمونه مرجع مشابه، ماسه کمتری استفاده می‌شود؛ اما می‌توان مقاومت فشاری در حدود ۱۷ مگاپاسکال را به‌دست آورد (مقاومت فشاری نمونه مرجع S7، برابر ۱۷/۱۳ مگاپاسکال می‌باشد). با توجه به نتایج به‌دست آمده، استفاده از ماسه شسته شده در نمونه‌هایی که سیمان کمتری دارند، به دلیل کمبود مواد چسبنده در مخلوط، مقاومت مناسبی کسب نکرده‌اند. استفاده همزمان از آهک به همراه بنتونیت و کائولن مقاومت مطلوب و حداقل سازه‌ای را ارائه نمی‌دهد. در صورت استفاده از آهک شکفته شده با میزان آب بهینه، به همراه سیمان، می‌توان نتایج بهتری به‌دست آورد.

واژه‌های کلیدی: توسعه پایدار، مواد پوزولانی، بنتونیت، کائولن، مقاومت فشاری

۱. مقدمه

افزایش رشد جمعیت و نیاز روز افزون به مسکن، باعث شده تا برای تأمین نیازها، ساخت و سازها با سرعت بیشتری انجام شوند. به همین دلیل باید تدابیری اندیشید تا در کوتاه‌ترین زمان و با کمترین آسیب‌های زیست‌محیطی و استفاده بهینه از منابع انرژی و مواد خام، ساخت و سازها انجام گیرند. اهداف توسعه پایدار و پایداری در راستای همین تدابیر می‌باشد. با تحقق

بخشیدن اهداف توسعه پایدار می‌توان ساخت و سازی بهینه و با بهترین کیفیت را ایجاد کرد. اگر بتوان مواد و مصالحی را جایگزین بخشی از سیمان مورد نیاز صنعت ساخت و ساز کرد، می‌توان به اهداف و ویژگی‌های توسعه پایدار و بحث پایداری نزدیک‌تر شد و با این کار می‌توان شهر، جامعه و زندگی مناسب‌تر و پایدارتری داشت. توسعه پایدار، توسعه‌ای است که به منظور دست-یابی به بهبود سطح کیفی زندگی و رفع نیازهای ابتدایی و با توجه به توانایی نسل‌های بعد، مطرح می‌شود. توسعه پایدار یکی از جامع‌ترین مفاهیم در طول ادوار است. از اهداف توسعه پایدار می‌توان، تأمین نیازهای اساسی، بهبود استانداردهای زندگی برای همه، حفاظت و مدیریت بهتر اکوسیستم‌ها را نام برد. در اواخر قرن بیستم، از سوی سازمان ملل، رهیافت توسعه پایدار با به روز شدن مشکلات زیست‌محیطی و کاهش سطح زندگی، به ویژه شهرها، عنوان شد و پایداری به عنوان هدفی کلی که بی‌نهایت و مستمر است، در برنامه‌های توسعه قرن بیست و یکم قرار گرفت. مؤلفه‌های زیست‌محیطی نقش مهمی در شکل‌گیری توسعه پایدار مناطق دارند. همچنین، استفاده از فناوری‌های پاک در تولید باعث می‌شوند تا آسیب‌هایی که انسان به محیط‌زیست وارد می‌کند، کمتر شود. در صنعت ساختمان، از جمله نکات مورد توجه کارفرما و پیمانکاران می‌توان انتخاب مصالح مصرفی را نام برد، که امروزه مصالح به‌کار رفته در این صنعت، بیشتر با نگاه اقتصادی و جلب نظر خریدار انتخاب می‌شوند و به آسیب‌های این مصالح به محیط‌زیست و جامعه توجه نمی‌شود. در مدیریت شهری پایدار، انتخاب مواد و مصالح سازگار از ضروریات انتخاب مصالح در صنعت ساخت می‌باشد. بر این اساس، می‌توان عوامل مؤثر بر کیفیت این مصالح را چنین عنوان کرد: سازگار بودن با محیط‌زیست، دوام و کاهش مصرف انرژی (گلینسکی و همکاران، ۲۰۱۶). تولید سیمان سهم مهمی در گرم شدن زمین، افزایش آسیب به محیط‌زیست و در نتیجه افزایش دی‌اکسید کربن را به دنبال خواهد داشت. ساخت و ساز، راه‌سازی، تونل و روسازی فرودگاه از جمله کارهای ساخت و سازی می‌باشند که مقدار زیادی دی‌اکسید کربن تولید می‌کنند. در ساختار روسازی‌ها و مواد پایه ساخت آن‌ها، از سیمان به عنوان ماده چسباننده استفاده می‌شود (اُنیلو و همکاران، ۲۰۱۹)، که با توجه به افزایش روز افزون مصرف سیمان، کشورهای مختلف برای حفاظت از محیط‌زیست روند تولید سیمان را محدود کرده‌اند و هزینه تولید آن را افزایش داده‌اند. بر همین اساس، استفاده از مواد مکمل سیمانی به جهت کاهش مصرف سیمان و یا عدم مصرف آن و استفاده از مواد بازیافتی در تولید بتن و پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی (حیدری و همکاران، ۲۰۱۷) رو به افزایش است. مواد مکمل سیمانی می‌تواند هم منشأ طبیعی داشته باشد مانند پوزولان‌های طبیعی همچون بنتونیت و کائولن، هم منشأ صنعتی داشته باشد مانند پوزولان‌های صنعتی همچون خاکستر بادی و هم منشأ شیمیایی و معدنی داشته باشد مانند آهک. تحقیق و توسعه در زمینه مواد جایگزین سیمان، مواد مکمل سیمانی برای ایجاد صنعتی مناسب، به منظور مدیریت گرمایش جهانی و کمبود انرژی به دلیل استفاده بی‌رویه از منابع انرژی تجدیدناپذیر و همچنین انتشار گازهای گلخانه‌ای که از طریق تولید و تکنولوژی سیمان انجام می‌شود، لازم و ضروری می‌باشد. محققان در حال تلاش برای جایگزینی سیمان پرتلند با مواد مکمل سیمانی و مواد سیمانی کم‌دما مانند سیمان‌های ویژه و مواد چسباننده ژئوپلیمری و استفاده از مواد پوزولانی به عنوان ماده اولیه برای روسازی‌ها هستند (اُنیلو و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر استفاده از مواد مکمل سیمانی به جای بخشی و یا همه سیمان پرتلند خالص، کامپوزیت‌های آن‌ها با سایر مواد معدنی می‌توانند به عنوان مصالح ساختمانی هوشمند در زمینه محیط‌زیست عمل کنند. استفاده از سیمان پرتلند دارای سنگ آهک، ویژگی‌های مناسبی از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی دارد (بارون و دُور، ۱۹۸۷؛ اشمیت، ۱۹۹۲؛ قوش و همکاران، ۱۹۹۲؛ تسیویلیس و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین، استفاده از

مصالح بازیافتی در زیرساخت‌های عمرانی و حمل و نقل یک راه مهم برای جایگزینی مواد معمول در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند در رسیدن به اهداف ساخت و ساز کم‌کربن نقش به‌سزایی داشته باشد. یکی از مواد بازیافتی که در زیرساخت‌های حمل و نقل مورد بررسی قرار گرفته است، لاستیک می‌باشد (صابریان و همکاران، ۲۰۱۸). از جمله موادی که برای جایگزینی سیمان مورد استفاده و بررسی قرار گرفته است، خاک کوره سیمان می‌باشد. استفاده از خاک کوره سیمان تأثیر زیادی بر مقاومت و دوام بتن تولیدی ندارد. همچنین، استفاده از خاک رس قرمز در تولید بتن به همراه خاک کوره سیمان می‌تواند باعث کاهش مقاومت بتن تولیدی شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که برای استفاده از خاک کوره سیمان برای تولید بتن با مقاومت فشاری، کششی یا خمشی، سختی و دوام مناسب، بهترین و مناسب‌ترین میزان استفاده بین ۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین، با اضافه کردن خاک کوره سیمان به خاک با شکل‌پذیری کم می‌توان مقاومت فشاری خاک را به طور قابل توجهی افزایش داد (صدیق و همکاران، ۲۰۱۲؛ الرزاکی و همکاران، ۲۰۱۸). یکی از موضوعاتی که به بررسی رفتار سیمان به همراه مواد دیگر انجام شده است (اشمیت، ۱۹۹۲؛ شیلر و اِلربروک، ۱۹۹۲؛ ووک و همکاران، ۲۰۰۱)، بررسی تأثیر استفاده از سنگ آهک در واکنش‌های هیدراتاسیون کلینکر (راماچاندران، ۱۹۸۸؛ اینگرام و همکاران، ۱۹۹۰؛ کِلِم و آدامز، ۱۹۹۰؛ بارکر و کوری، ۱۹۹۱؛ اینگرام و دافرتی، ۱۹۹۲؛ تسیویلیس و همکاران، ۱۹۹۸؛ کاکالی و همکاران، ۲۰۰۰؛ بوناوتی و همکاران، ۲۰۰۱) و استفاده از آهک به جای بخشی از سیمان مصرفی (دمیرهان و همکاران، ۲۰۱۹) و بررسی عملکرد مواد سیمانی کم‌کربن پایه آهکی (وو و همکاران، ۲۰۱۸) می‌باشد. سیمان‌های حاوی سنگ آهک دارای مقاومت مطلوبی هستند و به طور کلی میزان جذب آب کمتری نسبت به سیمان‌های خالص دارند. استفاده از سیمان پرتلند حاوی آهک می‌تواند باعث بهبود خواص بتن از جمله دوام شود (تسیویلیس و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین، مطالعه‌ای روی مقاومت سیمان‌های حاوی آهک در دماهای کم انجام شده است که رابطه بین انتشار گرما و مقاومت فشاری ملات در دماهای ۱۰ تا ۲۳ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفته است. در تجزیه و تحلیل‌های انجام شده، از جمله XRD و SEM، نشان داده شده است که پودر سنگ آهک نه تنها به تشکیل فازهای MC[1] و HC[2] کمک می‌کند، بلکه نسبت ایجاد این فازها با دماهای مختلف، متفاوت است. همچنین، سیستم‌هایی که با سیمان پرتلند آهکی تولید شده‌اند نسبت به سیمان-های پرتلند معمولی در مقابله با آب و هوای سرد دارای مقاومت بیشتری هستند. در سیستم‌هایی که حاوی سیمان پرتلند آهکی هستند، فرایند هیدراتاسیون می‌تواند در دمای کم و با سرعت کمتری انجام شود و همچنین محصولات هیدراتاسیون بیشتری تولید شود. اما در سیستم‌هایی که از سیمان پرتلند معمولی استفاده می‌شود چنین امکانی وجود ندارد (بنتس و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به محاسبات ترمودینامیک و همچنین مشاهدات آزمایشگاهی مخلوط کردن سیمان پرتلند با سنگ آهک و تأثیر هیدراته شدن آن بر فرایند هیدراتاسیون سیمان، نشان می‌دهد که در حضور آهک، مونوکربنات‌ها نسبت به مونوسولفات‌ها پایدارتر هستند. اندازه‌گیری تخلخل بین سیمان بدون سنگ آهک که شامل کمتر از ۳٪ دی-اکسید کربن می‌باشد و سیمانی که شامل ٤٪ سنگ آهک می‌باشد، بسیار کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است (لوتنباخ و همکاران، ۲۰۰۸). از دیگر مواد پوزولانی که برای جایگزینی سیمان مورد بررسی قرار گرفته است کائولن و متاکائولن می‌باشد (رضایی فر و همکاران، ۲۰۱٦). در اثر حرارت، کائولن به ماده پوزولانی جدیدی با نام متاکائولن (MK) تبدیل می‌شود. استفاده از

[1]- Mono-carbonate

[2]- Hemi-carbonate

متاکائولن می‌تواند در بهبود خواص ملات و بتن تولید شده، از جمله مقاومت فشاری، تأثیر داشته باشد (رشاد، ۲۰۱۳). عواملی که بر مقاومت بتن در اثر استفاده از متاکائولن مؤثر هستند عبارتند از: اثر فیلر یا پرکننده‌ها، میزان شتاب واکنش هیدراسیون سیمان پرتلند معمولی و واکنش پوزولانیک متاکائولن و هیدروکسید کلسیم. تأثیر فیلر یا پرکننده در لحظات اولیه واکنش نشان داده می‌شود. شتاب واکنش هیدراسیون سیمان پرتلند معمولی در ٢٤ ساعت نخست و حداکثر تأثیر پوزولانیک متاکائولن بین ۷ تا ١٤ روز است (وایلد و همکاران، ١٩٩٦).

مواد پوزولانی موادی هستند که در گروه مواد مکمل سیمانی قرار می‌گیرند و می‌توان آن‌ها را به عنوان مواد جایگزین بخشی از سیمان استفاده کرد (صدیق و کلاوس، ۲۰۰۹). با توجه به مصرف رو به رشد سیمان در صنعت ساخت، که باعث تولید روز افزون سیمان می‌شود و یکی از بزرگ‌ترین صنایع آلاینده می‌باشد، مطالعات و استفاده از مواد پوزولانی برای جایگزینی سیمان مورد توجه قرار گرفته است. از جمله ویژگی‌های مواد پوزولانی داشتن خواص سیمانی است که باعث کاهش هزینه‌ها، صرفه‌جویی اقتصادی، افزایش مقاومت در برابر حملات قلیایی و اسیدی سنگ‌دانه‌ها و کاهش سطح ترک‌خوردگی بتن می‌گردد. براساس استاندارد ASTM-C618-94 (ASTM، ۲۰۱۰) و مقرارت ملی ایران مبحث ۹، پوزولان به ماده‌ای گفته می‌شود که دارای عناصر سیلیس یا سیلیس آلومینیومی است که به تنهایی خاصیت چسبندگی ندارد و یا چسبندگی کمی دارد و با ماده چسبنده دیگری از جمله سیمان ترکیب می‌شود. در صورت مجاروت این مواد با آب، طی واکنش‌های شیمیایی با هیدروکسیدکلسیم موجود در سیمان، ترکیباتی با خاصیت سیمانی تولید می‌شود. یکی از پوزولان‌های طبیعی مورد بررسی و مطالعه در این پژوهش، بنتونیت می‌باشد. مهم‌ترین ماده تشکیل‌دهنده بنتونیت، اسمکتیت‌ها هستند. این مواد دارای خواص مهمی از جمله شکل‌پذیری، انبساط و انقباض یونی می‌باشند. اسمکتیت‌ها در آب و هوای خشک در اثر هوازدگی تشکیل می‌شوند. بنتونیت یکی از کانی‌های خانواده مونت موریلونیت می‌باشد که در صورت مجاورت با آب، افزایش حجم پیدا می‌کند (متورم می‌شود). استفاده از بنتونیت در تولید بتن، دوام بتن تولید شده را به شدت بالا می‌برد و بعد از خشک شدن بتن از ترک‌خوردگی آن جلوگیری می‌کند. وجود مواد معدنی مختلف در مواد پوزولانی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد، مقاومت و دوام بتن تولید شده دارد (رمضانیان‌پور و پورخورشیدی، ٢٠٠٤).

کائولن یکی دیگر از پوزولان‌های طبیعی و مورد بررسی می‌باشد. اصلی‌ترین جزء کائولن، کائولینیت است. کائولن یک ماده خام بسیار مفید می‌باشد. همچنین، کائولینیت، یک ماده پوزولانی فعال به حساب می‌آید که به صورت دی‌سیلیکات آلومینیوم هیدراته ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) می‌باشد (موری، ۱۹۹۱؛ پراساد و همکاران، ۱۹۹۱؛ نکومبو و همکاران، ۲۰۰۹).

سنگ آهک یکی از قدیمی‌ترین مصالحی می‌باشد که در تولید بتن مورد استفاده قرار گرفته است. از دلایل استفاده از آهک در ملات‌ها و تولید بتن کاهش نفوذپذیری، کاهش جمع‌شدگی بعد از خشک شدن ملات و افزایش مقاومت فشاری ملات و بتن تولید شده می‌باشد. همچنین، از دیگر دلایل استفاده از آهک در تولید انواع ملات‌ها و بتن می‌توان به افزایش دوام، که یکی از مهم‌ترین عوامل مهم در تولید بتن است، اشاره کرد.

روسازی، سازه‌ای است که روی بستری طبیعی یا اصلاح شده به جهت به وجود آوردن سطحی هموار و مناسب احداث می‌شود. روسازی‌های بتنی به دلیل پایداری و دوام زیاد، مقرون به صرفه‌تر هستند. دوره نگهداری، نوسازی و ترمیم روسازی‌های بتنی در مقایسه با دیگر روسازی‌ها طولانی می‌باشد (نادرپور و همکاران، ۲۰۱۷). اما مورد قابل توجه درباره روسازی‌های بتنی

پوسته پوسته شدن آن‌ها می‌باشد. از جمله کارهای انجام شده برای رفع پوسته پوسته شدن سطح روسازی بتنی، بررسی عملکرد بتن غلتکی حاوی تراس[1] می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که تراس نمی‌تواند مقاومت فشاری و کششی بتن غلتکی را افزایش دهد. اما می‌تواند باعث افزایش خاصیت نفوذناپذیری بتن غلتکی شود (قهاری و همکاران، ۲۰۱۷).

هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر استفاده از پوزولان‌های طبیعی همچون بنتونیت و کائولن به همراه پوزولان‌های معدنی و شیمیایی همچون آهک به عنوان بخشی از سیمان در روسازی‌های بتنی، به منظور کاهش مصرف سیمان و بهبود عملکرد بتن به دلیل کاهش مصرف سیمان، می‌باشد. همچنین، از دیگر اهداف مورد نظر استفاده از پوزولان در بتن، کسب حداقل مقاومت فشاری جهت استفاده در ساخت و ساز، علاوه بر استفاده در روسازی‌ها، می‌باشد.

۲. آزمایش

۲-۱. برنامه آزمایشگاهی

مناسب‌ترین نسبت مخلوط با بهترین مقاومت فشاری، با استفاده از مواد و مصالح مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر (براساس استاندارد BS-EN-12390) در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن (براساس استاندارد ASTM-C496) روی نمونه‌های استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر در سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام شده است (شکل‌های ۱ و ۲). نمونه‌ها با مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان ثابت ساخته شده‌اند و فقط درصد استفاده از مواد پوزولانی متفاوت می‌باشد تا نمونه‌های ساخته شده در شرایط یکسان مورد بررسی و مقایسه قرار گیرند. از هر طرح اختلاط، سه نمونه ساخته و بعد از عمل‌آوری تحت آزمایش قرار گرفته و در نهایت مقدارمیانگین نمونه‌ها برای هر طرح گزارش شده است.

شکل ۱. نمونه‌های مکعبی ساخته شده

[1]- Trass

شکل ۲. نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده

برخی مراحل انجام کار براساس استاندارد ASTM می‌باشد. دانه‌بندی مصالح سنگی ریزدانه براساس ASTM-C136 (ASTM، ۲۰۰۶) و وزن مخصوص و جذب آب مصالح سنگی ریزدانه براساس ASTM-D6473 (ASTM، ۲۰۰۱) انجام شده است. مشخصات مصالح سنگی ریزدانه مورد استفاده و نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۳، وسایل مورد استفاده برای انجام جذب آب ماسه‌های مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی ریزدانه

مشخصات	ماسه شکسته	ماسه شسته
جذب آب (٪)	٤/١	٣/٧
وزن مخصوص (kg/m^3)	٢٣٠٠	٢٣١٠

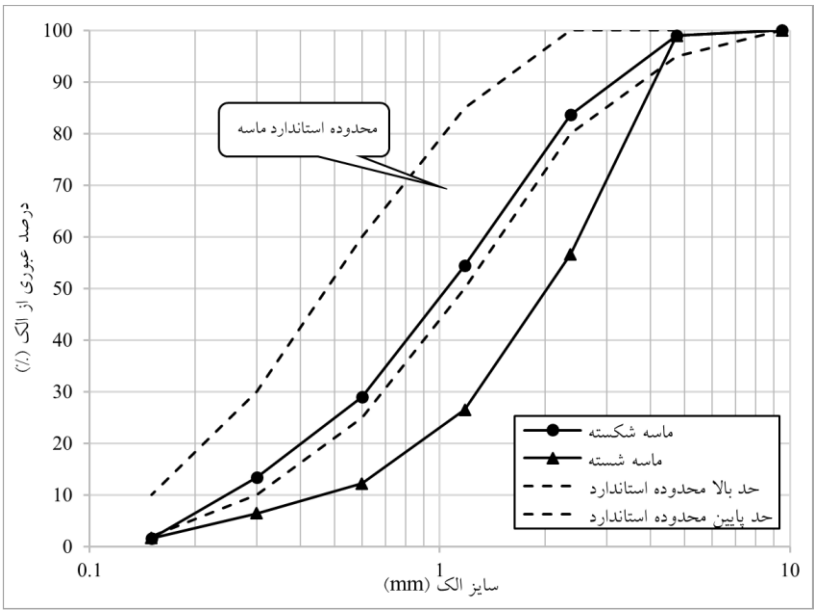
شکل ۳. وسایل مورد استفاده برای آزمایش جذب آب ماسه

۲-۲. مواد

مصالح سنگی مورد استفاده در این آزمایش در محدوده زیر الک ٤ و از نوع شکسته و شسته می‌باشد تا بتوان

تأثیر استفاده از هر کدام به همراه مواد پوزولانی (بنتونیتف کائولن و آهک) را بررسی کرد. منحنی دانه‌بندی ماسه های مورد استفاده در شکل ٤ نشان داده شده است.

بنتونیت مورد استفاده، به رنگ زرد، به صورت پودر با دانه‌بندی ریز استفاده شده است. همچنین، کائولن مورد استفاده به رنگ زرد متمایل به خاکستری بوده و همانند بنتونیت به صورت پودر با دانه‌بندی ریز استفاده شده است. سیمان مصرفی، سیمان تیپ II شاهرود بود. آهک یا کلسیم اکسید (CaO) به صورت پودر سفیدرنگ با دانه‌بندی ریز به دو صورت شکفته شده (آهک زنده یا همان کلسیم اکسید در صورت مجاورت با آب به کلسیم هیدروکسید تبدیل می‌شود) و شکفته نشده (آهک زنده) مورد استفاده قرار گرفته است. خصوصیات فیزیکی کائولن، بنتونیت مصرفی و آنالیز شیمیایی مصالح مورد استفاده، به ترتیب در جداول ۲ تا ٤ ارائه شده است.



شکل ٤. منحنی دانه‌بندی ماسه

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی بنتونیت

آنالیز	واحد	پاسخ
جذب آب	%	۳۰۰-۷۰۰
تورم	MI/gr^2	۲۲-۲۵
رطوبت	%	٤-۸
دانه‌بندی	Mesh	٤۰۰
مونت‌موریلونیت	%	۸٦<
ظرفیت تبادل کاتیونی	mEq/100mgr	۱۰۰-۱۱۰

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی کائولن

آنالیز	نتیجه	واحد
دانسیته	۱/٦۳	-
ویسکوزیته	٤٥	Sec
مقاومت خشک	۳۹	kg/cm^2
دمای پخت	۱۱۹٥	C
مقاومت بعد از پخت	۲۷۰	kg/cm^2
جذب آب	۱>	%
درصد سفیدی	۳	%

جدول ٤. خصوصیات شیمیایی مواد

ترکیبات	سیمان	بنتونیت	کائولن
SiO_2	۲۱/۱۱	٦۹/۸	٥۲/٤۸
Al_2O_3	٤/٤۲	۱۱/۸۸	۲۷/٥۹
Fe_2O_3	۳/۹٦	۱/۷۳	۲/۲٤
CaO	٦۳/۳٦	۰/۹٦	۰/۳٦
MgO	۱/٥۱	۱/٤۲	۰/۷٦
Na_2O	۰/۳۲	۰/٥	۰/۲۳
K_2O	۰/٥۱	۰/٤۷	۰/٥
TiO_2	-	۰/۱	۱/۰٤
P_2O_5	-	-	۰/۱۳
SO_3	-	-	۰/۷٥

۲-۳. شرح آزمایش

از اهداف این آزمایش، بررسی نسبت‌های مخلوط ترکیبی از بنتونیت به همراه آهک و کائولن، دستیابی به طرح مخلوط جدید و کاهش مصرف سیمان براساس الگوهای توسعه پایدار است. نسبت‌های مخلوط مورد استفاده در این آزمایش با تغییر درصد استفاده از مواد پوزولانی و سیمان، شرایط مختلف استفاده از آهک و دو نوع ماسه مختلف، ساخته و با یکدیگر مقایسه شده است. در این پژوهش، حدود ۱٥۰ نمونه مکعبی و استوانه‌ای برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی ساخته شده است. نسبت‌های مخلوط مورد نظر در جدول ٥ ارائه شده است.

جدول ۵. نسبت مخلوط مواد جایگزین سیمان برای یک متر مکعب

طرح اختلاط	ماسه شسته (kg)	ماسه شکسته (kg)	آب (kg)	سیمان (kg)	بنتونیت (kg)	کائولن (kg)	آهک شکفته نشده (kg)	آهک شکفته شده (kg)	نسبت آب به سیمان
S1	۱۹۲۶	۰	۱۵٤	۱۱۰	۰	۰	۱۱۰	۰	۰/۷
S2	۱۹۷۱	۰	۱۵۸	۷۵	۰	۰	۱۵۰	۰	۰/۷
S3	۱۹۱۷	۰	۱۵۸	۱۵۰	۰	۰	۱۵۰	۰	۰/۷
S4-1	۱۹۱۷	۰	۱۵۸	۱۵۰	۰	۰	۰	۷۵	۰/۷
S4-2	۱۹۱۷	۰	۱۵۸	۱۵۰	۰	۰	۰	۷۵	۰/۷
S4-3	۱۹۱۷	۰	۱۵۸	۱۵۰	۰	۰	۰	۷۵	۰/۷
S5	۰	۱۷۲۰	۱٤۰	۲۰۰	۱۳۰	۱۱۰	۰	۰	۰/۷
S6	۰	۱۷۲۰	۱٤۰	۲۰۰	۲٤۰	۰	۰	۰	۰/۷
S7 (مرجع)	۰	۱۹٦۰	۱٤۰	۲۰۰	۰	۰	۰	۰	۰/۷
S8 (مرجع)	۱۹٦۰	۰	۱٤۰	۲۰۰	۰	۰	۰	۰	۰/۷
S9	۱۷۲۰	۰	۱٤۰	۲۰۰	۱۳۰	۱۱۰	۰	۰	۰/۷
S10	۱۷۲۰	۰	۱٤۰	۲۰۰	۲٤۰	۰	۰	۰	۰/۷
S11	۰	۱۷۹۰	۲٤۰	۰	۱٤۵	۱۲۵	۰	۰	۰/۷
S12	۰	۱۷۹۰	۲٤۰	۰	۰	۲۷۰	۰	۰	۰/۷
S13	۰	۱۷۹۰	۲٤۰	۰	۲۷۰	۰	۰	۰	۰/۷

نمونه‌های تولید شده با شرایط و نحوه آماده‌سازی-های متفاوتی ساخته شده‌اند: نمونهS1 دارای یک واحد سیمان و یک واحد آهک است. در نمونه S2 مقدار آهک مصرفی دو برابر سیمان مورد نیاز می‌باشد. در این نمونه، سعی شده تا بتوان با مقدار کمتر سیمان به نتیجه بهتری دست یافت. نمونه S3 مقدار سیمان بیشتری نسبت به نمونه‌های قبلی داشته است. تمام نمونه‌های گفته شده دارای مقادیری آب اضافه هستند که جدای از مقدار آب به سیمان، به ترکیب اضافه شده‌اند و می‌توان عنوان کرد که این آب اضافه، نقش روان‌کنندگی را در ملات ایفا می‌کند. همچنین، در ترکیب نمونه‌های ذکر شده، آهک مصرفی بدون آن که قبل از مصرف شکفته شود، استفاده گردیده است و مقدار آب جداگانه‌ای برای شکفته شدن آهک در نظر گرفته نشده است. در ترکیب‌های بعدی (نمونه S4-1، S4-2 و S4-3) مقدار سیمان حدوداً دو برابر آهک می‌باشد؛ اما آهک استفاده شده به صورت جداگانه شکفته شده و سپس استفاده گردیده است. نحوه شکفته شدن آهک این سه نمونه با یکدیگر متفاوت می‌باشد.

دلیل این تفاوت، میزان آب مورد استفاده برای شکفتن آهک است. برای عمل‌آوری، این نمونه‌ها برخلاف بتن معمولی، غرق آب نمی‌شوند و فقط در مجاورت با آب و در محیط مرطوب قرار می‌گیرند.

نمونه‌های دارای بنتونیت و کائولن با شرایط، مواد و مقدارهای متفاوتی ساخته شده‌اند. نمونه S5 دارای سیمان پرتلند تیپ II به همراه ماسه شکسته، کائولن و بنتونیت می‌باشد و نسبت آب به سیمان، مطابق آیین‌نامه همان‌طور که میزان آب به سیمان برای ملات‌ها (بتن بدون درشت‌دانه) ۰/٤۹ تا ۰/۷۹ در نظر گرفته شده، در تمام نمونه‌ها، نسبت آب به سیمان ۰/۷ در نظر گرفته شده است. در نمونه‌های S1 تا S4 نسبت آب به مواد چسبنده (مجموع سیمان و آهک) ۰/۷ در نظر گرفته شده است. نسبت‌های مخلوط براساس آیین‌نامه ACI 211-89 و به روش وزنی انجام شده است. نمونه‌های S7 و S8، نمونه های مرجع هستند که هر کدام یک بار با ماسه شسته و یک بار با ماسه شکسته ساخته شده‌اند. نمونه‌های S11، S12 و S13 نمونه‌هایی هستند به جهت بررسی رفتار بنتونیت و کائولن روی مخلوط، بدون سیمان و تنها با مواد پوزولانی (بنتونیت و کائولن).

این نمونه‌ها دارای شرایط نگهداری و عمل‌آوری متفاوتی می‌باشند. نمونه‌هایی که دارای درصدی سیمان به همراه آهک هستند، به دلیل وجود سیمان، عمل‌آوری و انجام فرایند هیدراتاسیون، پس از ٢٤ ساعت از قالب خارج شده و به مدت ۷ و ۲۸ روز در محیط مرطوب، غرق آب نشده، نگهداری شده است. نمونه‌های حاوی بنتونیت و کائولن که بدون سیمان هستند، به دلیل وجود مواد پوزولانی، پس از ٢٤ ساعت از قالب خارج شده و به مدت یک هفته در آون نگهداری شده و برای آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه از آون خارج شده‌اند و باقی نمونه‌ها در جای خشک و محفظه بدون رطوبت آزمایشگاه نگهداری شده‌اند تا به مقاومت ۲۸ روزه برسند. پس از آن، برای آزمایش مقاومت فشاری در ۹۰ روز، در محیط آزمایشگاه نگهداری شده‌اند.

۳. نتایج و بحث

در شکل ۵- الف دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی ارائه شده است. در شکل‌های ۵- ب و ٦ به ترتیب نمونه مکعبی و نمونه استوانه‌ای که تحت آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است.با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که استفاده از آهک پخته پودر شده (آهک پخته پودر شده از حرارت دادن سنگ آهک به‌دست می‌آید)، به همراه مقداری ناخالصی نمی‌تواند مقاومت قابل توجهی در بتن ایجاد کند و برای استفاده از آهک حتماً باید آهک مصرفی با آب بهینه شکفته شود تا بتواند تأثیر مطلوبی بر مقاومت فشاری داشته باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، از مقالات و کارهای انجام شده توسط پژوهشگران دیگر، می‌توان گفت که استفاده از پودر سنگ آهک، که از آهک پخته نشده به‌دست آمده است، در مخلوط بتن می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری بتن شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، نمونه‌های دارای بنتونیت و کائولن در میان نمونه‌های دیگر، بیشترین مقاومت را کسب کرده‌اند.

نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، نمونه‌هایی که با ماسه شسته به همراه بنتونیت و کائولن ساخته شده‌اند (S9 و S10) مقاومت کمتری نسبت به دیگر نمونه‌های حاوی بنتونیت و کائولن (S5 و S6) کسب کرده‌اند. در میان نمونه‌هایی که دارای

سیمان به همراه آهک هستند، نمونه S4-3 که با آهک شکفته با درصد آب بهینه ساخته شده، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به دیگر نمونه‌های دارای آهک به‌دست آورده است. با توجه به نتایج نمونه‌های بدون سیمان (S11، S12 و S13) که ترکیبی از بنتونیت و کائولن می‌باشند، مشاهده می‌شود که استفاده از مواد پوزولانی به تنهایی نمی‌تواند مقاومت فشاری قابل قبولی داشته باشند و باید به همراه سیمان مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، با توجه به ساختار شیمیایی بنتونیت و کائولن (دارا بودن Si_2O، CaO و Al_2O_3)، استفاده از این مواد به تنهایی (بدون سیمان) نمی‌تواند باعث افزایش محصولات هیدراتاسیون (C_3S، C_2S و C_3A) شود که در نتیجه مقاومت فشاری قابل قبولی به‌دست نمی‌آید.

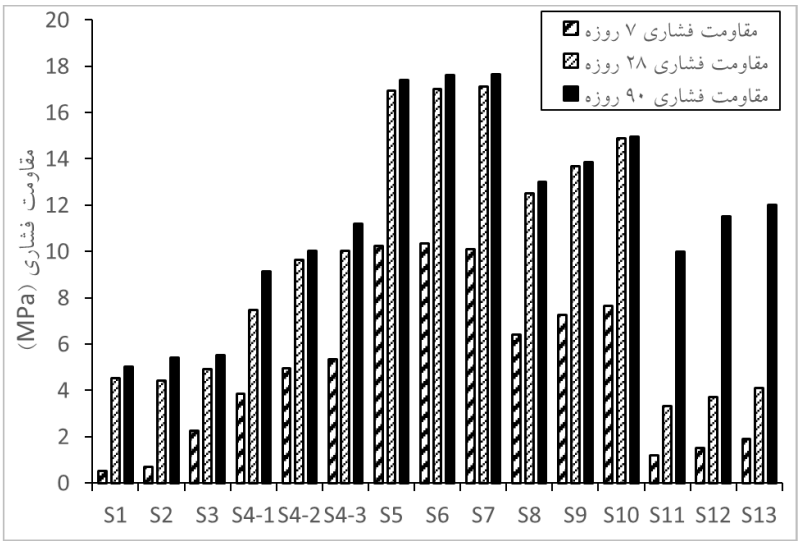
در شکل ۸، مقاومت فشاری نمونه‌هایی که با ماسه شکسته ساخته شده، با نمونه مرجع (S7) مقایسه شده تا تأثیر استفاده از بنتونیت و کائولن به همراه ماسه شکسته بررسی شود. در شکل ۸، نمونه‌های دارای بنتونیت و کائولن، مقاومت فشاری سنین مختلف آنها نزدیک به نمونه مرجع (S7) بوده است که می‌توان گفت استفاده از بنتونیت به تنهایی و یا با ترکیب کائولن می‌تواند بر مقاومت فشاری نمونه تأثیر داشته باشد. با توجه به شکل ۸، براساس ضریب رگرسیون به‌دست آمده، می‌توان گفت که به دلیل آنکه مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌ها در حدود ۵۰٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌باشد ضریب رگرسیون (همبستگی) کمتری به‌دست آمده است. همچنین، استفاده از سیمان کمتر و ماسه شکسته می‌تواند در کسب مقاومت فشاری ۷ روزه تأثیر قابل توجهی داشته باشد.

(الف) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری

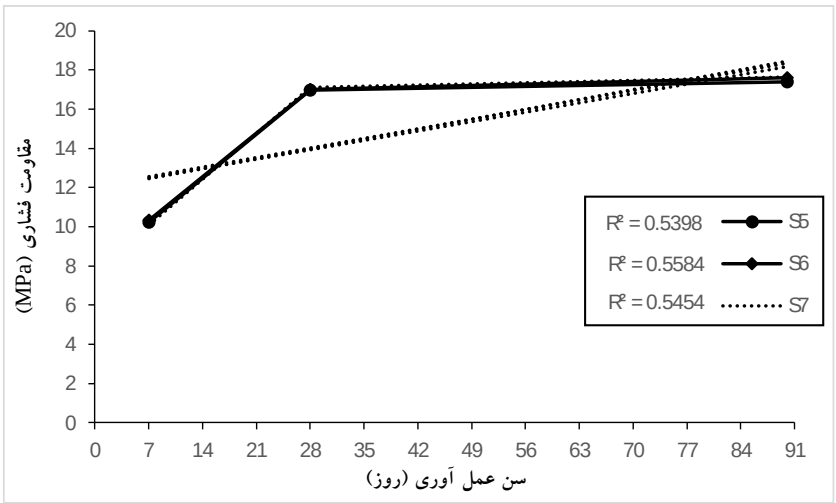
(ب) نمونه مکعبی بعد از آزمایش مقاومت فشاری

شکل ۵. نمونه مکعبی تحت آزمایش مقاومت فشاری

شکل ٦. نمونه استوانه‌ای بعد از آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن



شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای مقاومت فشاری نمونه‌ها

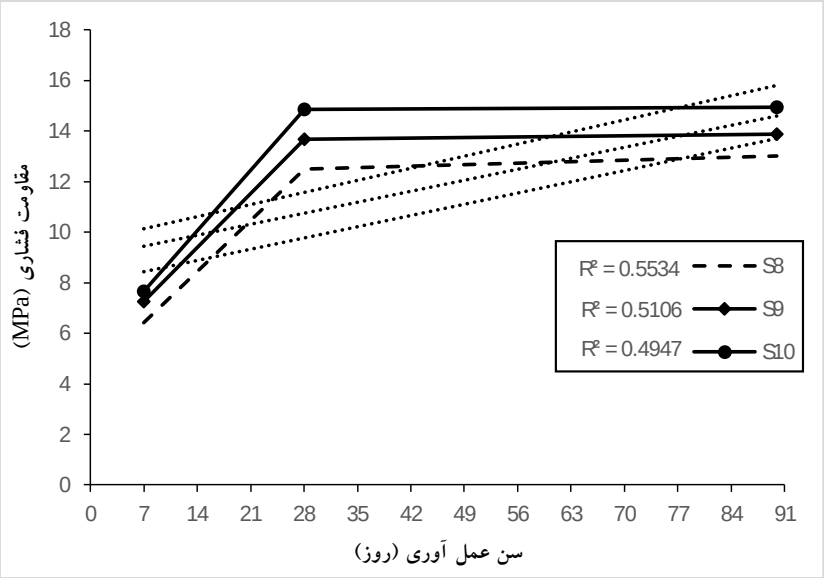


شکل ۸. منحنی مقایسه نمونه‌های ساخته شده با ماسه شکسته

با توجه به نتایج ضریب رگرسیون نمونه S6 که در شکل ۸ نشان داده شده است، می‌توان گفت که استفاده از بنتونیت و کائولن (به دلیل ساختار شیمیایی و وجود عناصر مهم و تأثیرگذار بر محصولات هیدراتاسیون) به همراه سیمان می‌تواند تأثیر بیشتری در مقاومت فشاری در سنین مختلف داشته باشد. همچنین، برای نمونه‌های ساخته شده با ماسه شکسته می‌توان گفت که افزایش سن نمونه تأثیر مناسبی بر افزایش مقاومت فشاری آن داشته است. در نمونه S6، ضریب رگرسیون (همبستگی) در حدود ۰/۵٦ می‌باشد که بیانگر آن است که ضریب تعیین این نمونه در حدود ۰/۳۱ (۳۱ درصد) است که نشان می‌دهد افزایش سن نمونه در حدود ۳۱ درصد بر افزایش مقاومت فشاری آن تأثیر داشته است. همچنین، هنگامی که از ماسه شکسته استفاده می‌شود، استفاده از بنتونیت و کائولن تأثیر زیادی بر افزایش مقاومت فشاری ندارد.

در شکل ۹، مقاومت فشاری نمونه‌هایی که با ماسه شسته ساخته شده‌اند با نمونه مرجع (S8) مقایسه شده است تا تأثیر استفاده از بنتونیت و کائولن به همراه ماسه شسته بررسی شود. براساس نتایج نشان داده شده در شکل ۹، دلیل افزایش مقاومت در نمونه‌های دارای بنتونیت و کائولن نسبت به نمونه مرجع (S8) آن است که در صورت استفاده از ماسه شسته، ریزدانه کمتری در مخلوط وجود دارد و بر همین اساس ماسه مصرفی تنها نقش مصالح سنگی را در مخلوط ایفا می‌کند و در نتیجه در صورت استفاده از بنتونیت و کائولن، میزان چسبندگی نمونه افزایش می‌یابد و در نهایت باعث افزایش مقاومت فشاری بتن به‌دست آمده می‌شود.

با توجه به ضریب رگرسیون (همبستگی) به‌دست آمده در شکل ۹، مشاهده می‌شود در نمونه‌هایی که از بنتونیت و کائولن به همراه سیمان و ماسه شسته استفاده شده، ضریب همبستگی کمتری به‌دست آمده است. در این نمونه‌ها، به دلیل کمبود ماده چسبنده، بنتونیت و کائولن در سنین اولیه (۷ روزه) تأثیر زیادی در کسب مقاومت فشاری نداشته‌اند.



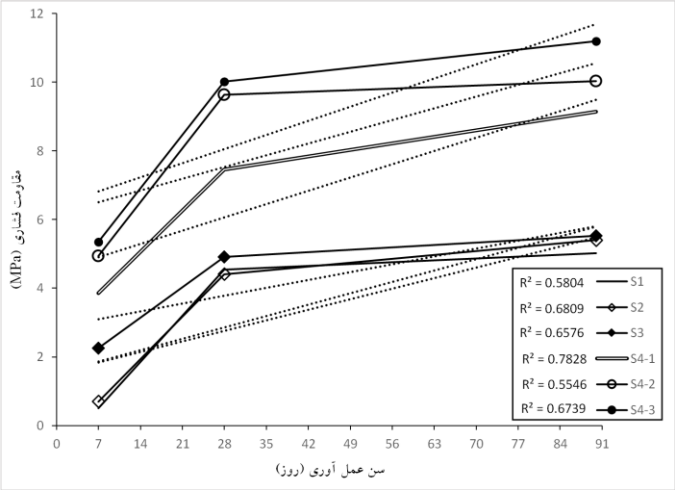
شکل ۹. منحنی مقایسه نمونه‌های ساخته شده با ماسه شسته

تفاوت در رگرسیون نمونه‌های ساخته شده با ماسه شسته را می‌توان این چنین بیان کرد که در صورت استفاده از ماسه شسته، افزایش سن نمونه نمی‌تواند تأثیر به سزایی در افزایش مقاومت فشاری داشته باشد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در نمونه S10، ضریب رگرسیون به‌دست آمده در حدود ۰/٤۹ می‌باشد که یعنی افزایش سن نمونه S10 نتوانسته است تأثیر مناسبی بر افزایش مقاومت فشاری نمونه داشته باشد. اما در نمونه S8، افزایش سن نمونه تأثیر مناسب‌تری بر افزایش مقاومت داشته است. همچنین، براساس نتایج

به‌دست آمده، ضریب تعیین نمونه S10 در حدود ۰/۲٤ (۲٤ درصد) می‌باشد که بیانگر آن است که افزایش سن نمونه تنها می‌تواند ۲٤ درصد بر افزایش مقاومت فشاری آن تأثیر داشته باشد. با توجه به نتایج، هنگامی که از ماسه شسته استفاده می‌شود، می‌توان تأثیر استفاده از بنتونیت و کائولن را بر مقاومت فشاری مشاهده کرد. نمونه S8 بدون بنتونیت و کائولن ساخته شده است و به همین دلیل کمترین مقاومت فشاری را کسب کرده است. در نمونه S9 از بنتونیت به همراه کائولن استفاده شده است. به همین دلیل، مقاومتی بیشتر از S8 و کمتر از S10 کسب کرده است. نمونه S10 تنها با بنتونیت به همراه سیمان ساخته شده است که می‌توان تأثیر استفاده از بنتونیت بر افزایش مقاومت فشاری را مشاهده کرد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از شکل‌های ۸ و ۹ و مقایسه آن‌ها علاوه بر تأثیر استفاده از ماسه شکسته بر مقاومت فشاری، می‌توان تأثیر استفاده از بنتونیت و کائولن را بر تأثیر نوع ماسه مصرفی و در نهایت روی مقاومت فشاری بتن مشاهده کرد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از شکل‌های ۸ و ۹، نمونه‌های ساخته شده با ماسه شکسته، مقاومت‌های بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر کسب کرده‌اند. دلیل این امر، افزایش ماده چسبنده یعنی ماسه شکسته به همراه بنتونیت و کائولن می‌باشد که سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه می‌شود.

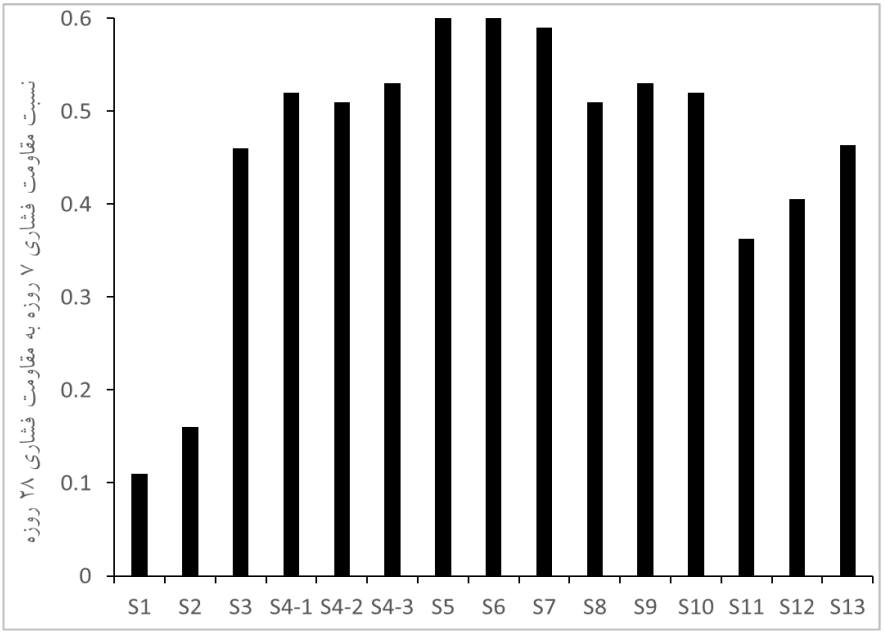
در شکل ۱۰، مقایسه مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های ساخته شده با آهک نشان داده شده است. نمونه‌هایی که با آهک شکفته شده ساخته شده‌اند، مقاومت فشاری بهتری کسب کرده‌اند. بر همین اساس، می‌توان گفت که استفاده از آهک شکفته می‌تواند C_3S و C_2S که محصول هیدراتاسیون می‌باشند، را افزایش دهد (چلیک و همکاران، ۲۰۱۹). محصولات هیدراتاسیون C_3S و C_2S سیلیکات‌های کلسیم می‌باشند که به C-S-H معروف هستند. این سیلیکات‌ها یکی از مهم‌ترین ترکیبات سیمان هستند، که نقش مقاومت خمیر سیمان هیدراته شده را بر عهده دارند. لذا، در صورت استفاده از آهک شکفته شده با درصد آب کمتر در بتن، می‌تواند سبب افزایش مقاومت فشاری بتن شود. در این میان، نمونه‌های حاوی آهک، نمونه‌هایی که آب اضافی برای شکفتن آهک آن‌ها در نظر گرفته شده است، رشد مقاومتی بهتری داشته‌اند و به همین دلیل نمونه‌های گروه S4 بهترین شرایط را با استفاده از آهک شکفته کسب کرده‌اند که در این گروه نمونه S4-3 (به دلیل استفاده از آب کمتر برای شکفته شدن) مقاومت فشاری بهتری نسبت به دیگر نمونه‌های این گروه به‌دست آورده است.



شکل ۱۰. منحنی مقایسه نمونه‌های ساخته شده با آهک

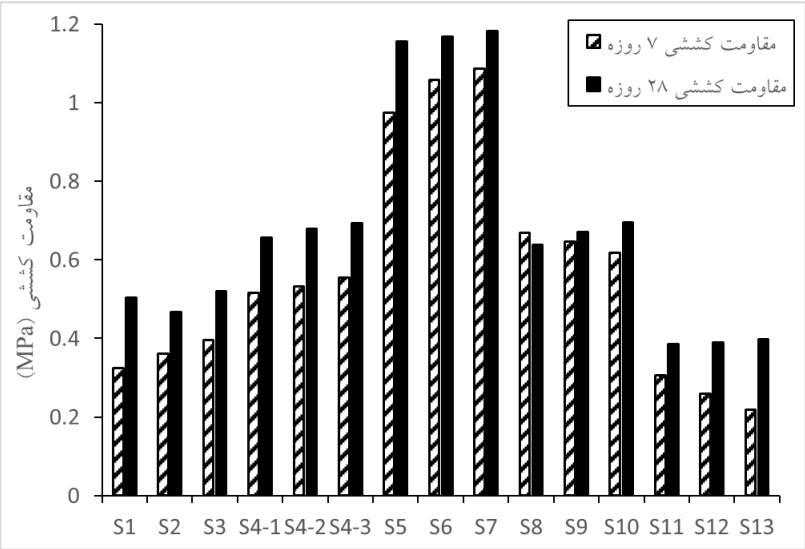
با توجه به نتایج به‌دست آمده در شکل ۱۰، ضریب رگرسیون نمونه‌های ساخته شده با آهک شکفته شده بیشتر از نمونه‌های با آهک شکفته نشده می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان این چنین توضیح داد که افزایش سن، می‌تواند بر افزایش مقاومت فشاری در صورت استفاده از آهک شکفته شده تأثیر به سزایی داشته باشد. برای مثال، می‌توان گفت ضریب تعیین نمونه S4-1، در حدود ۰/۶۱ (۶۱ درصد) می‌باشد؛ یعنی افزایش سن نمونه ۶۱ درصد بر افزایش مقاومت فشاری تأثیر دارد.

در شکل ۱۱، نسبت مقاومت فشاری ۷ به ۲۸ روزه نمونه‌ها ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، در اغلب نمونه‌ها، نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه به مقاومت فشاری ۲۸ روزه حدود ۰/۵ به‌دست آمده است. با توجه به نتایج ارائه شده، نمونه‌های حاوی آهک و سیمان کمتر، رشد قابل توجهی کسب نکرده‌اند. با توجه به نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه به ۲۸ روزه که در اغلب نمونه در حدود ۰/۵ می‌باشد، می‌توان گفت که در حدود نیمی از مقاومت نهایی نمونه در سن ۷ روزه کسب شده است. همچنین، در نمونه‌هایی که بدون سیمان هستند، افزایش مقاومت فشاری مشاهده می‌شود.



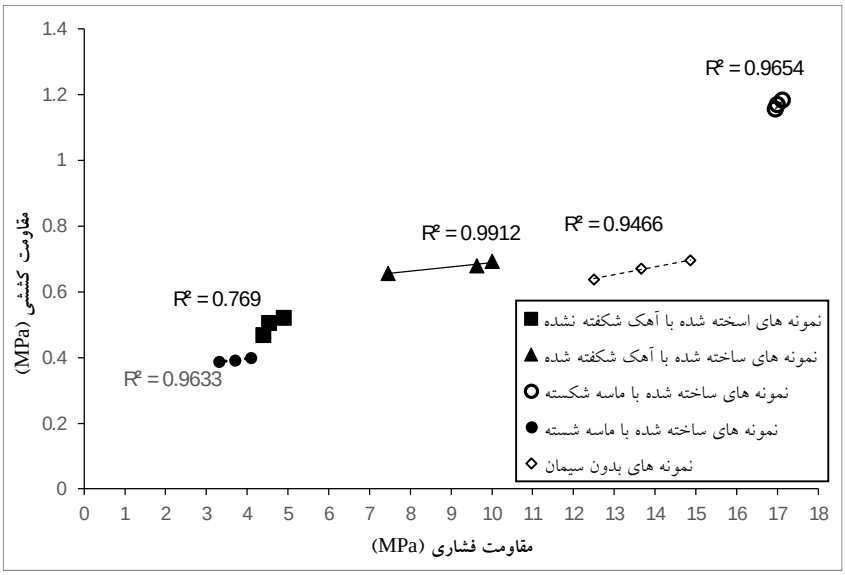
شکل ۱۱. نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه به ۲۸ روزه

نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌هایی که با ماسه شکسته ساخته شده‌اند (S5، S6 و S7) مقاومت کششی بهتری نسبت به دیگر نمونه‌ها کسب کرده‌اند. در نمونه‌های ساخته شده با آهک به همراه سیمان، همانند مقاومت فشاری نمونه‌هایی که با آهک شکفته شده ساخته شده‌اند مقاومت کششی دو نیم شدن بیشتری کسب کرده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، نمونه‌های بدون سیمان همانند مقاومت فشاری، کمترین مقاومت کششی را به‌دست آورده‌اند، می‌توان یکی از دلایل کاهش مقاومت کششی نمونه‌های بدون سیمان را این چنین بیان کرد که بنتونیت و کائولن به دلیل ساختار فیزیکی ذرات و ضعیف بودن پیوند بین مولکول‌های تشکیل‌دهنده، در صورت عدم حضور سیمان، عملکرد کششی مناسبی نخواهند داشت.



شکل ۱۲. مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای

با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم شدن نمونه‌ها، رابطه‌ای برای اثربخشی این دو آزمایش بر یکدیگر و مقایسه ضریب رگرسیون به‌دست آمده برای هر نمونه، در شکل ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱۳. رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم شدن ۲۸ روزه

با توجه به ضرایب رگرسیون به‌دست آمده برای همه نمونه‌ها، مشاهده می‌شود که نمونه‌های ساخته شده با آهک، کمترین ضریب رگرسیون (همبستگی) را دارند. این بدان معنی است که افزایش مقاومت فشاری تأثیر مناسبی بر افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن نداشته است و ضریب تعیین این نمونه‌ها در حدود ۰/۵۹ (۵۹ درصد) می‌باشد؛ یعنی افزایش مقاومت فشاری تنها ۵۹ درصد باعث افزایش مقاومت کششی این نمونه‌ها می‌شود. همچنین، برای دیگر نمونه‌ها، ضریب رگرسیون مناسبی (نزدیک به ۱) به‌دست آمده است که بیانگر تأثیر قابل توجه مقاومت فشاری بر تغییر مقاومت کششی می‌باشد.

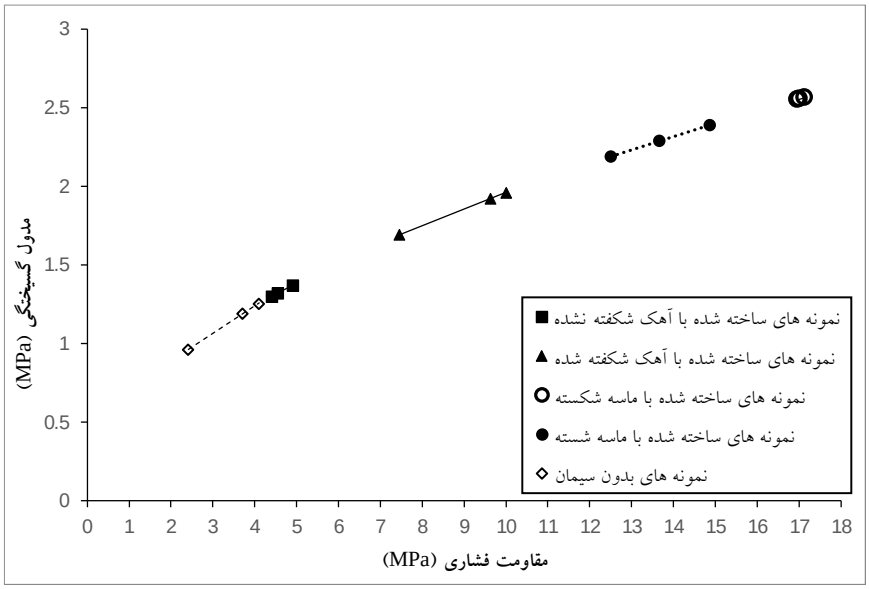
مقاومت کششی ناشی از خمش، مقاومت خمشی و یا مدول گسیختگی نامیده می‌شود که با f_r' نشان داده می‌شود. با توجه به مشاهدات تجربی در بتن‌های با

مقاومت کم، مدول گسیختگی تا حدود دو برابر مقاومت کششی مستقیم بتن می‌باشد. آزمایش خمش برای کنترل کیفی بتن در تیرها، دال‌ها و روسازی‌های صنعت حمل و نقل دارای اهمیت می‌باشد زیرا رفتار بتن را در خمش به‌دست می‌آورد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مقاومت فشاری بتن‌های تولید شده، می‌توان مدول گسیختگی این بتن‌ها را براساس آیین‌نامه ACI 318-14 پیش‌بینی کرد. رابطه ارائه شده در آیین‌نامه به صورت زیر می‌باشد:

$$f_r' = 0.62\lambda\sqrt{f_c'} \qquad (۱)$$

که λ یک ضریب اصلاحی می‌باشد که برای بتن‌های با وزن معمولی برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.

نتایج به‌دست آمده از پیش‌بینی مدول گسیختگی در برابر مقاومت فشاری در شکل ١٤ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مدول گسیختگی پیش‌بینی شده در حدود دو برابر مقاومت کششی می باشد. همچنین، با توجه به شکل ١٤، مدول گسیختگی نمونه‌های بدون سیمان نسبت به دیگر نمونه‌ها کمتر به‌دست آمده است. نمونه‌های ساخته شده با آهک شکفته نشده همانند مقاومت فشاری کم نسبت به دیگر نمونه‌ها، مدول گسیختگی کمتری نیز به‌دست آورده‌اند. با استفاده از رابطه ۱، مدول گسیختگی نمونه‌ها پیش‌بینی شده است. اما برای دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر، نیازمند انجام آزمایش مقاومت خمشی می‌باشد.

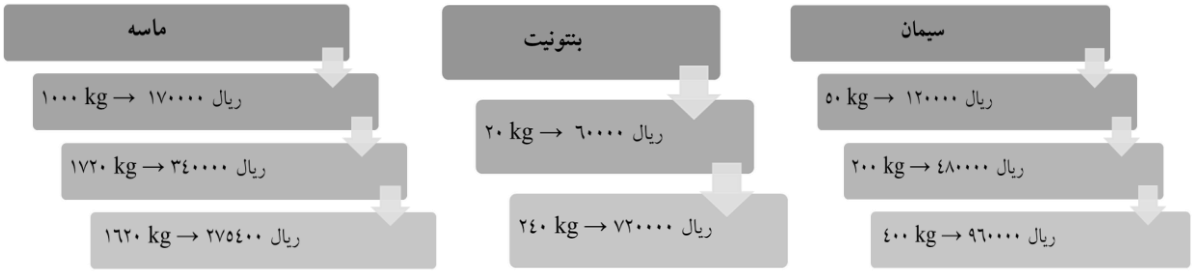


شکل ١٤. نمودار مقاومت فشاری در برابر مدول گسیختگی

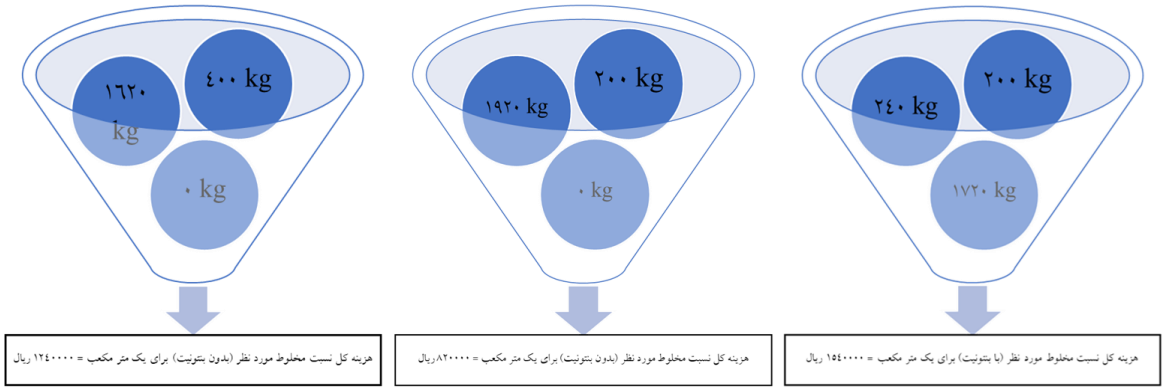
٤. بررسی اقتصادی

با توجه به نسبت‌های مخلوط به‌دست آمده در شکل‌های ۱۵ و ١٦، بررسی اقتصادی استفاده از مواد پوزولانی ارائه شده است (تحلیل اقتصادی در باره یکی از مواد محاسبه شده است). قیمت‌های در نظر گرفته شده مربوط به سال ۱۳۹۷ و به صورت خرید خرد و با بسته‌بندی می‌باشد که در صورت خرید به میزان زیاد و فله، قیمت کاهش می‌یابد. همچنین، طرح ارائه شده، طرح اولیه بوده که می‌توان با در نظر گرفتن شرایط و کسب مقاومت‌های مختلف و در صورت استفاده از مواد دیگر، درصد استفاده از مواد پوزولانی متغیر می‌باشد. در شکل ۱۵، قیمت سیمان، بنتونیت و ماسه به میزان مورد استفاده برای نسبت‌های مخلوط مورد نظر محاسبه و ارائه شده است. در شکل ١٦، به بررسی قیمت کل یکی از نسبت‌های مخلوط برای یک متر مکعب با شرایط قیمتی اعلام شده در شکل ۱۵ پرداخته شده است. همان طور که در شکل

۱۶ نشان داده شده، قیمت یک متر مکعب بتن کم‌کربن حاوی بنتونیت، بیشتر از قیمت یک متر مکعب بتن بدون بنتونیت با همان عیار سیمان می‌باشد. اما باید خاطر نشان کرد که بر اساس موارد گفته شده و تغییر شرایط، قیمت کل نسبت مخلوط تغییر می‌کند. میزان افزایش قیمت در حدود ۲۴ درصد می‌باشد که در مقادیر بیشتر این مقدار افزایش پیدا خواهد کرد.



شکل ۱۵. قیمت مصالح مورد استفاده برای یک نسبت مخلوط



الف. عیار سیمان ۲۰۰kg به همراه بنتونیت ب. عیار سیمان ۲۰۰kg بدون بنتونیت ج. عیار سیمان ۴۰۰ kg بدون بنتونیت

شکل ۱۶. قیمت کل نسبت اختلاط

۵. نتیجه‌گیری

- براساس نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که یکی از دلایل کاهش مقاومت در نمونه‌های ساخته شده آهکی، استفاده از آهک شکفته نشده می‌باشد. استفاده از آهک هیدراته شده باعث می‌شود تا محصول هیدراتاسیون مخلوط (C_3S و C_2S)، بیشتر شود. محصولات هیدراتاسیون C_3S و C_2S سیلیکات‌های کلسیم است که این هیدرات‌های کلسیم سیلیکات، ژل C-S-H (ژل توبرموریتی[1]) می‌باشند. این سیلیکات‌ها یکی از مهم‌ترین ترکیبات سیمان می‌باشند که نقش مقاومت خمیر سیمان هیدراته شده را دارند. به همین دلیل، هنگامی که آهک با میزان آب کمتری (درصد آب بهینه جهت شکفته شدن آهک مصرفی) شکفته شده باشد، مخلوط به‌دست آمده مقاومت فشاری بهتری کسب می‌کند.
- نمونه‌هایی که در آن‌ها از بنتونیت و کائولن به همراه سیمان استفاده شده است، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به دیگر نمونه‌ها و نمونه مرجع مشابه کسب کرده‌اند. با توجه به ساختار شیمیایی بنتونیت و کائولن (دارا بودن SiO_2 ،CaO)، در صورت مجاورت این مواد با آب و آهک موجود در سیمان، محصولات هیدراتاسیون (C_3S و C_2S) می‌تواند افزایش یابد و در نتیجه موجب مقاومت فشاری مخلوط شود. همچنین، به دلیل آن که بنتونیت و کائولن دارای Al_2O_3

[1]- Tobermorite Gel

می‌باشند، C_3A مخلوط (که از دیگر محصولات هیدراتاسیون می‌باشد و باعث افزایش مقاومت اولیه بتن می‌شود) نیز می‌تواند افزایش یابد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌توان تأثیر Al_2O_3 موجود در بنتونیت و کائولن را در افزایش مقاومت اولیه نمونه‌های S5 و S6 نسبت به نمونه مرجع مشابه (S7) مشاهده کرد.

- براساس نتایج به‌دست آمده، نمونه مرجع S8 نسبت به دیگر نمونه مرجع S7 به دلیل استفاده از ماسه شسته، مقاومت فشاری کمتری به‌دست آورده است. نمونه‌هایی که در آن‌ها از ماسه شسته استفاده شده است (S9 و S10)، نسبت به دیگر نمونه‌ها که در آن‌ها از ماسه شکسته استفاده شده (S5 و S6)، به دلیل کمبود ماده چسبنده در مخلوط حاصله، مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است. اما در نمونه‌هایی که با ماسه شسته ساخته شده‌اند، به دلیل استفاده از بنتونیت و کائولن در مخلوط، مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع مشابه (S8)، شرایط بهتری به‌دست آورده است.
- با توجه به نتایج به‌دست آمده از نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه به ۲۸ روزه نمونه‌ها، می‌توان گفت که در اغلب نمونه‌ها، مقاومت فشاری ۷ روزه در حدود ٪۵۰ مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مقاومت فشاری نهایی) می‌باشد. بر همین اساس، می‌توان تأثیر استفاده از بنتونیت و کائولن را در افزایش مقاومت اولیه نمونه‌ها مشاهده کرد.
- براساس نتایج به‌دست آمده، طرح اختلاط S5 و S6 با توجه به اهداف مورد نظر این پژوهش، با مقاومت‌های فشاری به ترتیب ۱۷/۶۱ و ۱۷/۴۱ مگاپاسکال، می‌توانند مناسب‌ترین طرح اختلاط برای استفاده در روسازی‌های بتنی و سازه‌های یک الی دو طبقه باشند. در این نمونه‌ها، از ماسه شکسته به همراه بنتونیت و کائولن استفاده شده است. با توجه به عملکرد این بتن، در صورت استفاده از سیمان به میزان ۲۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و کاهش میزان ماسه مورد استفاده برای ساخت، می‌توان مقاومت فشاری مشابه با نمونه با شرایط یکسان (S7) به‌دست آورد. در نتیجه می‌توان گفت استفاده از بنتونیت و کائولن برای به‌دست آوردن مقاومت فشاری حداقل قابل قبول می‌باشد.
- با توجه به روابط به‌دست آمده از مقایسه افزایش سن با مقاومت فشاری نمونه‌ها، می‌توان گفت نمونه‌هایی که با آهک شکفته شده به‌دست آمده‌اند، افزایش سن نمونه بیشترین تأثیر را بر مقاومت فشاری آنها خواهد داشت. بر این اساس، ضریب تعیین نمونه‌های ساخته شده با آهک شکفته نشده حدود ۳۳ تا ٤٦ درصد می‌باشد. یعنی افزایش سن در این نمونه‌ها کمتر از ٪۵۰ بر افزایش مقاومت فشاری مؤثر می‌باشد. اما در نمونه‌های ساخته شده با آهک شکفته شده، ضریب تعیین در حدود ٪٦۱ بوده که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر از ۵۰ درصدی افزایش سن بر مقاومت فشاری می‌باشد.
- با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی و بررسی روابط بین این دو آزمایش، می‌توان گفت که براساس ضرایب رگرسیون حاصله، در نمونه‌هایی که با آهک شکفته نشده ساخته شده‌اند تأثیر مقاومت فشاری بر مقاومت کششی کمترین میزان می‌باشد و مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با آهک شکفته بیشترین تأثیر را در تغییر (افزایش) مقاومت کششی داشته است.
- استفاده از بنتونیت و کائولن به همراه ماسه شکسته می‌تواند نقش به سزایی در افزایش مقاومت فشاری در بتن‌های با عیار سیمان کم داشته باشد. همچنین، در نمونه‌هایی که فقط از بنتونیت استفاده شده مقاومت فشاری بهتری نسبت به نمونه‌هایی که با بنتونیت به همراه کائولن ساخته شده، کسب کرده است. در نتیجه با حذف کائولن و استفاده از بنتونیت می‌توان مقاومت فشاری بهتری به‌دست آورد.
- مدول گسیختگی به‌دست آمده برای بتن‌های تولیدی در بازه ۱ تا ۲/۵ مگاپاسکال می‌باشد که برای بتن‌های

با مقاومت کم عددی قابل قبول می‌باشد. اما می‌تواند با تغییر شرایط ساخت و درصد مصالح مورد استفاده تا حدودی افزایش یابد.

- با توجه به بررسی اقتصادی انجام شده می‌توان گفت که استفاده از مواد پوزولانی به طور حتم نمی‌تواند باعث افزایش هزینه‌های ساخت و تولید بتن کم‌کربن شود زیرا قیمت‌گذاری مصالح مورد نظر به عوامل مختلفی بستگی دارد. اما تا حدودی می‌تواند باعث تغییر در هزینه‌های تولید گردد. مطالعات و یافته‌های این پژوهش در مراحل ابتدایی بوده و با توجه به پیش‌بینی‌های انجام شده می‌توان با تغییر درصد استفاده از مواد پوزولانی و تغییر نوع خرید این مواد، هزینه‌های تولید را تا حدودی کاهش داد.

براساس یافته‌های این پژوهش و اهداف مورد نظر آن و با توجه به کمبود منابع آب و انرژی، برای دستیابی به شرایط مطلوب‌تر بتن تولید شده، از قبیل خصوصیات مکانیکی و عملکرد سازه‌ای آن، بهتر است به جای ماسه شسته از ماسه شکسته استفاده شود. همچنین، بهتر است از مواد پوزولانی به همراه مقدار کمتری سیمان برای تولید بتن‌های کم‌کربن (با مقاومت‌های کم و متوسط) برای مصارف مختلفی از جمله روسازی‌های بتنی کم‌کربن و سازه‌های یک الی دو طبقه استفاده شود.

این شیوه‌ها می‌توانند گام مؤثری برای تحقق بخشیدن به اهداف توسعه پایدار به شمار روند.

٦. مراجع

Al-Rezaiqi, J., Alnuaimi, A. and Hago, A. W. 2018. "Efficiency factors of burnt clay and cement kiln dust and their effects on properties of blended concrete". Appl. Clay Sci., 157: 51-64.

ASTM C618. 2010. "Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete". American National Standard.

ASTM D6473. 2001. "Standard test method for specific gravity and absorption of rock for erosion control". *ASTM* International, West Conshohocken, PA.

ASTM C136. 2006. "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates". *ASTM* International, West Conshohocken, PA.

Barker, A. and Cory, H. 1991. "The early hydration of limestone-filled cements". International Conference on Blended Cements in Construction, Sheffield, UK, Sep. 9-12, pp. 107-124.

Baron, J. and Douvre, C. 1987. "Technical and economical aspects of the use of limestone filler additions in cement". World Cement, 18(4): 100-104.

Bentz, D. P., Stutzman P. E. and Zunino, F. 2017. "Low-temperature curing strength enhancement in cement-based materials containing limestone powder". Mater. Struct., 50(3): 173.

Bonavetti, V. L., Rahhal, V. F. and Irassar, E. F. 2001. "Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements". Cement Concrete Res., 31(6): 853-859.

Celik, K., Hay, R., Hargis, C. W. and Moon, J. 2019. "Effect of volcanic ash pozzolan or limestone replacement on hydration of Portland cement". Constr. Build. Mater., 197: 803-812.

Demirhan, S., Turk, K. and Ulugerger, K. 2019. "Fresh and hardened properties of self consolidating Portland limestone cement mortars: Effect of high volume limestone powder replaced by cement". Constr. Build. Mater., 196: 115-125.

Ghahari, S. A., Mohammadi, A. and Ramezanianpour, A. A. 2017. "Performance assessment of natural pozzolan roller compacted concrete pavements". Case Stud. Constr. Mater., 7: 82-90.

Ghosh, S. N., Sarkar, S. L. and Harsh, S. 1993. "Mineral admixtures in cement and concrete". Abi Books.

Glinskiy, V., Serga, L. and Khvan, M. 2016. "Assessment of environmental parameters impact on the level of sustainable development of territories". Procedia CIRP, 40: 625-630.

Heidari, A., Hashempour, M. and Tavakoli, D. 2017. "Using of backpropagation neural network in estimating of compressive strength of waste concrete". Soft Comput. Civ. Eng., 1(1): 54-64.

Ingram, K., Poslusny, M., Daugherty, K. and Rowe, W. 1990. "Carboaluminate reactions as influenced by limestone additions". PP. 14-23. *In:* Klieger, P. and Hooton, R. (Eds.), Carbonate Additions to Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Ingram, K. D. and Daugherty, K. E. 1992. "Limestone additions to Portland cement: Uptake, chemistry, and effects". 9th International Congress on Chem. Cement, New Delhi, India.

Kakali, G., Tsivilis, S., Aggeli, E. and Bati, M. 2000. "Hydration products of C3A, C3S and Portland cement

in the presence of $CaCO_3$". Cement Concrete Res., 30(7): 1073-1077.
Klemm, W. A. and Adams, L. D. 1990. "An investigation of the formation of carboaluminates". *In:* Klieger, P. and Hooton, R. (Eds.), Carbonate Additions to Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E. and Scrivener, K. 2008. "Influence of limestone on the hydration of Portland cement". Cement Concrete Res., 38(6): 848-860.
Murray, H. H. 1991. "Overview-clay mineral applications". Appl. Clay Sci., 5(5-6): 379-395.
Murray, H. H. 2000. "Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: A general overview". Appl. Clay Sci., 17(5-6): 207-221.
Naderpour, H., Fakharian, P. and Moradalian, K. 2017. "Comparison of concrete and asphalt pavement behavior with emphasis on life cycle parameters and environmental considerations". The Second National Conference on Concrete Pavements.
Nkoumbou, C., Njoya, A., Njoya, D., Grosbois, C., Njopwouo, D., Yvon, J. and Martin, F. 2009. "Kaolin from Mayouom (Western Cameroon): Industrial suitability evaluation". Appl. Clay Sci., 43(1): 118-124.
Onyelowe, K. C., Amhadi, T., Ezugwu, C., Ugwuanyi, H., Iro, U., Jideofor, I., Amanamba, E., Bui Van, D., Salahudeen, A. B. and Sosa, F. 2019. "Strength of pozzolan soil blend in chemically improved lateritic soil for pavement base material purpose". Int. J. Low-Carbon Technol., 14(3): 410-416.
Prasad, M.S., Reid, K. J. and Murray, H. H. 1991. "Kaolin: Processing, properties and applications". Appl. Clay Sci., 6(2): 87-119.
Ramachandran, V. S. 1988. "Thermal analyses of cement components hydrated in the presence of calcium carbonate". Thermochimica Acta, 127: 385-394.
Ramezanianpour, A. A. and Pourkhorshidi, A. R. 2004. "Durability of concretes containing supplementary cementing materials under hot and aggressive environment". Mater. Sci., 221: 633-646.
Rashad, A. M. 2013. "Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition- A comprehensive overview". Constr. Build. Mater., 41: 303-318.
Rezaifar, O., Hasanzadeh, M. and Gholhaki, M. 2016. "Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using response surface method". Constr. Build. Mater., 123: 59-68.
Saberian, M., Li, J., Nguyen, B. and Wang, G. 2018. "Permanent deformation behaviour of pavement base and subbase containing recycled concrete aggregate, coarse and fine crumb rubber". Constr. Build. Mater., 178: 51-58.
Schiller, B. and Ellerbrock, H. G. 1992. "Grinding and properties of cements with several principal constituents". ZKG Int., Ed. B, 45(7): 325-334.
Schmidt, M. 1992. "Cement with interground additives- capabilities and environmental relief". ZKG Int., Ed. B, 45(2): 64-69.
Siddique, R. and Klaus, J. 2009. "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review". Appl. Clay Sci., 43(3): 392-400.
Siddique, R. and Rajor, A. 2012. "Use of cement kiln dust in cement concrete and its leachate characteristics". Resour., Conserv. Recy., 61: 59-68.
Tsivilis, S., Chaniotakis, E., Kakali, G. and Batis, G. 2002. "An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete". Cement Concrete Comp., 24(3-4): 371-378.
Tsivilis, S., Kakali, G., Chaniotakis, E. and Souvaridou, A. 1998. "A study on the hydration of Portland limestone cement by means of TG". J. Therm. Anal. Calorim., 52(3): 863-870.
Vuk, T., Tinta, V., Gabrovšek, R. and Kaučič, V. 2001. "The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement". Cement Concrete Res., 31(1): 135-139.
Wild, S., Khatib, J. M. and Jones, A. 1996. "Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete". Cement Concrete Res., 26(10): 1537-1544.
Wu, M., Zhang, Y., Liu, G., Wu, Z., Yang, Y. and Sun, W. 2018. "Experimental study on the performance of lime-based low carbon cementitious materials". Constr. Build. Mater., 168: 780-793.