Utilization of Bentonite as Partial Replacement of Cement in Low-Strength Concrete

*Seyedeh Marzieh Qiyami Taklymi[1], **Omid Rezaifar[2*]**, Majid Gholhaki[3]*
1. M.Sc., Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Orezayfar@semnan.ac.ir
3. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract:
Using pozzolanic materials in concrete manufacturing is intended as an optimal solution to lower the rate of greenhouse gas emission, and diminish energy resources and cement consumption. This research is aimed at evaluating Semnan bentonite as partial replacement of cement in low-strength concrete.
Ten bentonite mixes and control mix were examined. The main variable is the proportion of bentonite (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% , 35%, 40%, 45% and 50% by weight of cement) in replacement mode while the amount of cementitious material, water to cementitious material ratio, fine aggregate content were kept constant. To study properties of hardened concrete, compressive strength and splitting tensile strength tests were performed.
According to the results of compressive strength test, using bentonite (compressive strength of 5BC sample is 20.17 MPa) results in 2.7% increase in compressive strength as compared with the control mix (compressive strength of control mix CM is 19.62 Mpa). By replacing 50% of bentonite with the weight of cement (sample 50BC), the compressive strength is reduced by 40%. According to the results in mixtures containing bentonite, if the amount of bentonite is more than 25% by weight of cement, the tensile strength is reduced by 70% compared to CM.
Keyword: *Pozzolanic Materials, Bentonite, Low Strength Concrete, Compressive Strength,Tensile Strength*

استفاده از بنتونیت در جایگزینی بخشی از سیمان در بتن‌های کم مقاومت

دریافت مقاله: ۱۱-۰۲-۱۳۹۹
پذیرش مقاله: ۲۸-۰۷-۱۳۹۹

سیده مرضیه قیامی تکلیمی
کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

امید رضایی‌فر*
دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
Orezayfar@semnan.ac.ir

مجید قلهکی
دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده:
استفاده از مواد پوزولانی در ساخت بتن، راه‌حل مناسبی برای کاهش منابع انرژی، تولید گازهای گلخانه‌ای و مصرف سیمان می‌باشد. در این مقاله تاثیر استفاده از بنتونیت سمنان به جای بخشی از سیمان در بتن‌های کم مقاومت بررسی شده است. در این مقاله ۱۰ طرح مخلوط به همراه طرح مخلوط نمونه کنترل ساخته و مقایسه شده است. متغیر اصلی، تغییر نسبت بنتونیت به وزن سیمان می‌باشد که درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و۵۰ در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم شدن نمونه‌ها، برای بررسی خواص بتن، انجام شده است.
با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری، استفاده از بنتونیت به جای بخشی از سیمان (مقاومت فشاری نمونه 5BC، MPa ۲۰/۱۷) باعث افزایش ۲/۷٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد (مقاومت فشاری نمونه CM، MPa ۱۹/۶۲) شده است. با جایگزین کردن ۵۰٪ بنتونیت نسبت به وزن سیمان (نمونه 50BC)، مقاومت فشاری به میزان ۴۰٪ کاهش یافته است. با توجه نتایج در مخلوط‌های حاوی بنتونیت در صورتی که مقدار بنتونیت بیش از ۲۵٪ وزن سیمان شود، مقاومت کششی تا۷۰٪ نسبت به CM کاهش می‌یابد.
کلمات کلیدی: مواد پوزولانی، بنتونیت، بتن‌های کم مقاومت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر محیط زیست و توسعه پایدار در جوامع بشری مورد توجه قرار گرفته است. در سال ۱۹۸۷ موضوعاتی از قبیل آلودگی‌های محیط زیست، افزایش دمای زمین و از بین رفتن منابع انرژی طبیعی مورد توجه قرار گرفته است (۱). ساخت و ساز در حدود ۵۰٪ مواد خام طبیعی و ۴۰٪ از کل منابع انرژی را مصرف و نیمی از زباله‌های صنعتی جهان را تولید می‌کند (۲،۳) که بخش سیمان با مصرف حدود ۱۵٪ منابع انرژی، یکی از مهم‌ترین صنایع مصرف‌کننده و تولید کننده زباله و آلودگی به شمار می‌رود.

سیمان پرتلند معمول‌ترین و شناخته شده‌ترین نوع سیمان در سراسر جهان است. اما به منظور تحقق بخشیدن به اهداف توسعه پایدار و حفاظت از محیط‌زیست، سیمان‌هایی با کلینکر پایین نیز در سال‌های اخیر مورد توجه و استفاده قرار گرفته است (۴–۷). استفاده از سیمان روز به روز در حال افزایش است و با توجه به تولید آن و آسیب های وارده به محیط‌زیست، کشورهای مختلف برای حفاظت از محیط‌زیست روند تولید سیمان را محدود کرده و هزینه تولید را افزایش داده‌اند. تولید سیمان سهم مهمی در گرم شدن زمین، افزایش آسیب به محیط زیست و در نتیجه افزایش دی‌اکسیدکربن را به دنبال خواهد داشت (۸). یکی از راه‌حل‌های ارائه شده برای کاهش هزینه‌ها و کاهش تولید گاز کربن دی‌اکسید، اصلاح ساختار بتن می‌باشد (۹–۱۱). استفاده از مواد مکمل سیمانی به جهت کاهش مصرف سیمان و یا عدم مصرف آن و استفاده از مواد بازیافتی در تولید بتن و پیش بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی (۱۲)، رو به افزایش است. مطالعات زیادی بر روی استفاده از مواد مکمل سیمانی که دارای خاصیت سیمانی می‌باشند از جمله پوزولان‌های طبیعی و صنعتی برای جایگزینی سیمان و یا بهبود خواص بتن انجام شده است (۱۳–۱۷). مواد پوزولانی انواع مختلفی دارد از جمله منشأ طبیعی مانند بنتونیت و کائولن، منشأ صنعتی مانند خاکستر بادی و منشأ شیمیایی و معدنی 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. استفاده همزمان از آهک و بنتونیت در ساخت بتن باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود (۱۸).

مطابق تعریف پوزولان براساس استاندارد ASTM-C618 (۱۹) و مقررات ملی ایران مبحث نهم، پوزولان به ماده‌ای گفته می‌شود که «دارای سیلیس و یا سیلیس آلومینیومی باشد. ماده پوزولانی چسبندگی ندارد و یا چسبندگی خیلی کمی دارد به همین دلیل بهتر است به عنوان بخشی از سیمان مصرف شود. در صورت مجاورت ماده پوزولانی با آب، با هیدروکسیدکلسیم ($Ca(OH)_2$) واکنش داده و ترکیبات هیدراسیون جدیدی تولید می‌کند».

بتن با خاصیت پلاستیسیته بالا که در دیوار آب‌بندها و سدها مورد استفاده قرار می‌گیرد، بتن پلاستیک نام دارد (۲۰). برای کاهش تراوش از پی سدها و آب‌بندها، باید از مصالحی استفاده شود که خاصیت نفوذپذیری پایین، مقاومت پایین و شکل‌پذیری بالایی داشته باشند. از ویژگی‌های بنتونیت می‌توان به مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری و تراکم پذیری مناسب، اشاره کرد. به همین دلیل از بنتونیت در ساخت بتن پلاستیک استفاده می‌شود. به دلیل خاصیت نفوذپذیری پایین، رفتار پلاستیکی و شکل‌پذیری مناسب، در دیوارهای آب‌بند و دیوار سدها از بتن پلاستیک استفاده می‌شود. در طراحی و تهیه بتن پلاستیک مقاومت فشاری، شکل‌پذیری و نفوذپذیری بتن به عنوان مهم‌ترین عامل در نظر گرفته می‌شود. بنتونیت به عنوان پایدارکننده در بتن پلاستیک استفاده می‌شود (۲۱).

کارایی و روانی بتن پلاستیک نسبت به بتن معمولی باید بیشتر باشد، به همین دلیل کارایی بالا یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بتن پلاستیک خوب، می‌باشد. همچنین باید توجه شود که در صورت کارایی بالا، بتن نباید دچار جداشدگی دانه‌ها شود. با استفاده از مصالح گردگوشه و تعیین اندازه حداکثری سنگ‌دانه، می‌توان کارایی بتن پلاستیک را افزایش داد (۲۲). مطالعه ارزشمندی در دانشگاه صنعتی شریف، در خصوص بهینه‌سازی طرح مخلوط

بتن پلاستیک (بتن بنتونیتی) و بررسی پارامترهای موثر بر رفتار بتن پلاستیک انجام شده است. یکی از مهم‌ترین موارد استفاده از بتن پلاستیک استفاده از آن در دیوار آب‌بند سد می‌باشد که در این مطالعه به بررسی پارامترهای موثر بر رفتار بتن پلاستیک در دیوار آب‌بند سد کرخه پرداخته شده است. سد کرخه یکی از بزرگ‌ترین سدهای خاکی دنیا و بزرگ‌ترین سد خاکی ایران می‌باشد. در این سد، دیوار آب‌بندی از جنس بتن پلاستیک به طول m ۲۹۴۰ و عمق m ۷۸ و ضخامت cm ۸۰ تا ۱۰۰ اجرا گردیده که در ساخت این دیوار آب‌بند در حدود m^3 ۱۰۰۰۰۰ بتن پلاستیک استفاده شده است. براساس این مطالعه، مواد سیمانی مخلوط، مقدار بنتونیت مورد استفاده، نسبت آب به سیمان، نسبت بنتونیت به سیمان و اندازه سنگدانه‌ها از جمله پارامترهای موثر بر رفتار بتن پلاستیک می‌باشد. کاهش مقاومت بتن پلاستیک و طراحی آن براساس حداقل مقاومت مجاز، سبب افزایش ضریب اطمینان نسبت به آب‌بندی دیوارهای آب‌بند و عدم ترک خوردگی آن‌ها می‌شود (۲۳).

استفاده از بنتونیت به دلیل ویژگی‌های ساختاری و مقاومتی و هم از لحاظ صرفه اقتصادی، می‌تواند در صنعت ساخت و ساز مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به نتایج مطالعات انجام شده بر روی بنتونیت کشور پاکستان، استفاده از درصدی بنتونیت می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری شود. با توجه به نتایج، مقاومت فشاری بتن حاوی بنتونیت در سنین اولیه نسبت به بتن کنترل رشد چندانی ندارد اما با افزایش سن، مقاومت فشاری بتن حاوی بنتونیت بیشتر از بتن کنترل می‌شود. در این مقاله از مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه استفاده شده است. نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ و عیار سیمان نمونه کنترل Kg/m^3 ۳۴۰ و حداکثر درصد بنتونیت جایگزین شده ۲۱ درصد می‌باشد. همچنین علاوه بر انجام آزمایش مقاومت فشاری، مواردی دیگری از جمله جذب آب نمونه‌ها و تاثیر استفاده از بنتونیت بر مقاومت در برابر حملات اسیدی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد استفاده از بنتونیت به جای بخشی از سیمان مصرفی باعث کاهش چگالی می‌شود. با توجه به نتایج نمونه‌های حاوی بنتونیت عملکرد بهتری نسبت به نمونه کنترل در برابر حملات اسیدی داشته‌اند (۲۴). از دیگر نتایج به دست آمده در صورت استفاده از بنتونیت به جای سیمان، می‌توان گفت با افزایش درصد بنتونیت عملکرد بتن ضعیف شده و مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن به شدت کاهش می‌یابد (۲۵). از دیگر مطالعات انجام شده، تاثیر طرح اختلاط و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن پلاستیک بنتونیتی می‌باشد. نتایج آزمایش مقاومت کششی نشان می‌دهد، افزایش درصد خاک رس بنتونیت، باعث کاهش مقاومت کششی بتن پلاستیک می‌شود. نتایج نشان می‌دهد طرح اختلاط‌های با نسبت سنگدانه کمتر و سیمان بیشتر، مقاومت فشاری بیش‌تر و جذب آب کمتری دارند و بهترین درصد استفاده از خاک رس بنتونیت در این مطالعه ۲۰ درصد می‌باشد(۲۶).

در این مقاله به بررسی تاثیر درصدهای مختلف (بازه ۵ تا ۵۰ درصد) جایگزینی بنتونیت به جای بخشی از سیمان پرداخته شده است، که با توجه به آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی می‌توان تاثیر استفاده از درصدهای مختلف را بر روی خصوصیات بتن حاوی بنتونیت مشاهده کرد. بتن‌های معمولی اغلب دارای عیار سیمان Kg/m^3 ۴۰۰ و در رده بتن‌های با مقاومت بالا قرار دارند که نمونه کنترل با کاهش ۵۰ درصدی عیار سیمان نسبت به بتن‌های با مقاومت بالا، با عیار سیمان Kg/m^3 ۲۰۰ ساخته شده و درصد بنتونیت جایگزین سیمان متناسب با آن اضافه شده که بتن تولید شده در رده بتن‌های کم مقاومت و متوسط مقاومت می‌باشد. بر همین اساس می‌توان گفت، هدف از انجام این مقاله، بررسی تاثیر استفاده از بنتونیت سمنان به جای بخشی از سیمان، به منظور کاهش مصرف سیمان و بهبود عملکرد و خصوصیات مکانیکی بتن (مقاومت فشاری و مقاومت کششی) است. همچنین به دلیل خصوصیات شیمیایی و فیزیکی بنتونیت، دارای بودن ویژگی‌های مواد پوزولانی (مطابق با استاندارد ASTM-C618)، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، کاهش مصرف سیمان و همچنین تاثیر مثبت و مطلوب بر مقاومت فشاری بتن، از بنتونیت استفاده شده است.

۲- روش آزمایش

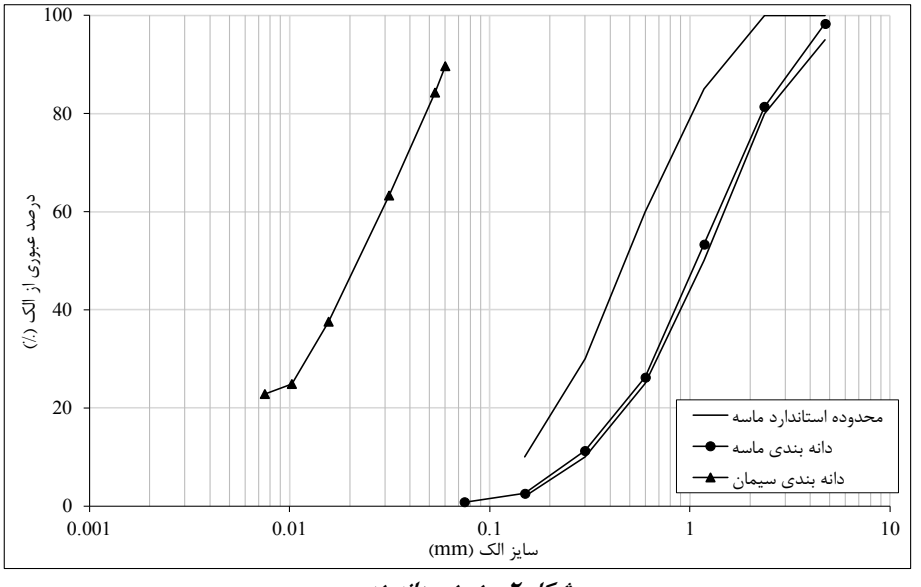
جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده است (شکل۱). مراحل ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های مختلف براساس استاندارد ASTM و BS انجام شده است. دانه‌بندی مصالح سنگی ریزدانه بر اساس ASTM-C136 (۲۷) و وزن مخصوص و جذب آب مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) براساس ASTM-C128 (۲۸) انجام شده است، نتایج آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ ارائه شده است.

شکل ۱: نمونه‌های ساخته شده

جدول ۱: مشخصات مصالح سنگی ریزدانه

مشخصات	ماسه
جذب آب (٪)	٪۴/۱
وزن مخصوص (kg/m^3)	۲۴۱۰

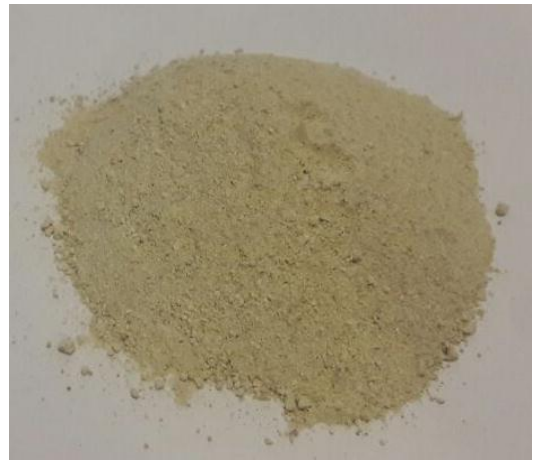
به دلیل آن که تولید مصالح سنگی درشت‌دانه انرژی بیشتری نسبت به مصالح ریزدانه مصرف می‌کند، همین امر بر خلاف اهداف توسعه پایدار و این مقاله می‌باشد بر همین اساس از مصالح سنگی درشت‌دانه استفاده نشده است. نمودار دانه‌بندی ماسه و دانه بندی متداول سیمان پرتلند در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی طبق استاندارد BS-EN-12390-3 (۲۹) و آزمایش کششی دو نیم شدن نمونه‌های استوانه‌ای براساس استاندارد ASTM-C496 (۳۰) انجام شده است. برای مقایسه نتایج به دست آمده نمونه CM با نمونه‌های حاوی بنتونیت آزمایش مقاومت فشاری و کششی در سنین ۷ و ۲۸ روزه (سنین متداول بتن معمولی) انجام شده است. همچنین نمونه‌های ساخته شده بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان انجام تست در حوضچه آب در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است.

بنتونیت مورد استفاده به رنگ زرد بوده و دارای دانه‌بندی ریز می‌باشد. در شکل ۳ نمونه بنتونیت نمایش داده شده است. سیمان مصرفی از نوع سیمان تیپ II شاهرود بوده است که خصوصیات سیمان و بنتونیت مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. طرح اختلاط‌های مورد نظر با نسبت آب به مواد چسبنده و مصالح سنگی ریزدانه ثابت ساخته و با یکدیگر مقایسه شده است. برای بررسی تاثیر بنتونیت در بتن‌های کم مقاومت و متوسط مقاومت، عیار اولیه سیمان در نمونه کنترل (CM)، kg/m^3 ۲۰۰ در نظر گرفته شده است.



شکل۳: نمونه بنتونیت

جدول ۲: مشخصات سیمان و مواد پوزولانی

چگالی (g/cm^3)	سیمان	بنتونیت
	۳/۲	۱/۸
ترکیبات شیمیایی (٪)		
SiO_2	۲۱/۱۱	۶۹/۸
Al_2O_3	۴/۴۲	۱۱/۸۸
Fe_2O_3	۳/۹۶	۱/۷۳
CaO	۶۳/۳۶	۰/۹۶
MgO	۱/۵۱	۱/۴۲
Na_2O	۰/۳۲	۰/۵
K_2O	۰/۵۱	۰/۴۷
TiO_2	-	۰/۱
P_2O_5	-	-
SO_3	-	-
LOI	۲/۰۲	-

چگالی (g/cm^3)	سیمان	بنتونیت
	۳/۲	۱/۸
ترکیبات شیمیایی (٪)		
باقی مانده نامحلول در اسید	۰/۳۲	-
آهک آزاد	۱/۲۳	-
C_3S	۵۳/۰	-
C_2S	۲۰/۸	-
C_3A	۵/۰	-

در بتن تولید شده در این پژوهش، بنتونیت به عنوان ماده چسبنده (جایگزین درصدی از سیمان) در نظر گرفته شده است و برخلاف بتن پلاستیک که بنتونیت به صورت کلوئیدی مصرف می‌شود، در این پژوهش به صورت خشک و همانند سیمان مورد استفاده قرار گرفته است تا بتوان تاثیر استفاده از آن را بر مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن بررسی کرد. درصد استفاده از بنتونیت در مقالات مختلف عموماً کمتر از ۱۰ درصد (حدود ۳ الی ۶ درصد) می‌باشد، که به جهت بررسی عملکرد و خصوصیات بتن حاوی بنتونیت با درصدهای بیشتر، درصد جایگزینی بنتونیت در بازه ۵ درصد الی ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است. برای آن که بتوان تاثیر استفاده از بنتونیت به مقدار مساوی سیمان در بتن‌های کم مقاومت بررسی و ارزیابی شود، عیار سیمان در نمونه 50BC تا مقدار kg/m^3 ۱۰۰ کاهش یافته است. زمان ساخت نمونه‌ها بین ۵ تا ۶ دقیقه بوده که با افزایش درصد بنتونیت زمان ساخت بیشتر می‌شود. طرح اختلاط نمونه‌های ساخته شده در جدول ۳ ارائه شده است.

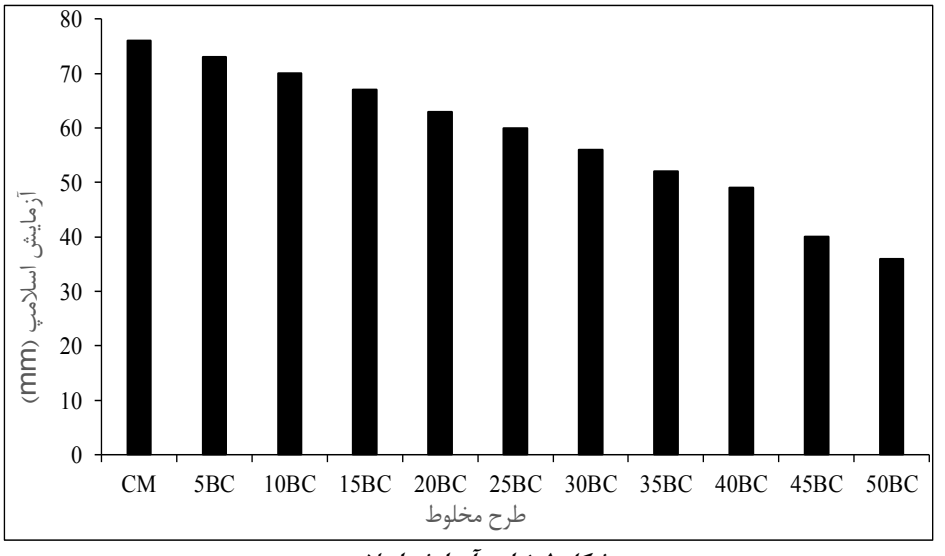
جدول۳: طرح اختلاط نهایی

نام طرح مخلوط	مواد تشکیل دهنده اصلی			ماده پوزولانی	نسبت آب به مواد چسبنده	درصد استفاده از بنتونیت (٪)
	سیمان	آب	ماسه	بنتونیت		
CM	۲۰۰	۱۵۰	۱۹۵۰	-	۰/۷۵	۰
5BC	۱۹۰	۱۵۰	۱۹۵۰	۱۰	۰/۷۵	۵
10BC	۱۸۰	۱۵۰	۱۹۵۰	۲۰	۰/۷۵	۱۰
15BC	۱۷۰	۱۵۰	۱۹۵۰	۳۰	۰/۷۵	۱۵
20BC	۱۶۰	۱۵۰	۱۹۵۰	۴۰	۰/۷۵	۲۰
25BC	۱۵۰	۱۵۰	۱۹۵۰	۵۰	۰/۷۵	۲۵
30BC	۱۴۰	۱۵۰	۱۹۵۰	۶۰	۰/۷۵	۳۰
35BC	۱۳۰	۱۵۰	۱۹۵۰	۷۰	۰/۷۵	۳۵
40BC	۱۲۰	۱۵۰	۱۹۵۰	۸۰	۰/۷۵	۴۰
45BC	۱۱۰	۱۵۰	۱۹۵۰	۹۰	۰/۷۵	۴۵
50BC	۱۰۰	۱۵۰	۱۹۵۰	۱۰۰	۰/۷۵	۵۰

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

برای بررسی کارایی مخلوط، آزمایش اسلامپ براساس استاندارد ASTM-C143 (۳۱) انجام شده است (شکل ۴). نتایج آزمایش اسلامپ در شکل ۵ ارائه شده است. کاهش اسلامپ در نمونه‌های حاوی بنتونیت نسبت به نمونه کنترل (CM) ناشی از کوچیک بودن و سطح نسبتاً بزرگ ذرات بنتونیت می‌باشد (بلورهای مونت موریلونیت موجود در بنتونیت مسطح بوده و دارای سطح فوق‌العاده زیادی است به همین دلیل موجب افزایش تماس با آب و در نتیجه باعث جذب آب بالا می‌شود).

شکل ۴: اسلامپ نمونه



شکل ۵: نتایج آزمایش اسلامپ

بنتونیت دارای سطح ویژه بالا و ابعاد بسیار ریزی می‌باشد و مونت موریلونیت موجود در بنتونیت میل به جذب آب بالایی نسبت به دیگر کانی‌های رس دارد. همچنین قابلیت افزایش حجم و عدد اکتیویته در مونت موریلونیت که یکی از کانی‌های اصلی بنتونیت است، بیشتر از دیگر کانی‌های رس می‌باشد بنابراین؛ می‌توان نتیجه گرفت نمونه‌های حاوی بنتونیت با نسبت آب به مواد چسبنده مشابه نمونه CM، کارایی کمتری دارند، زیرا با افزایش درصد بنتونیت جذب آب بیشتر شده و در نتیجه باعث کاهش کارایی مخلوط می‌شود.

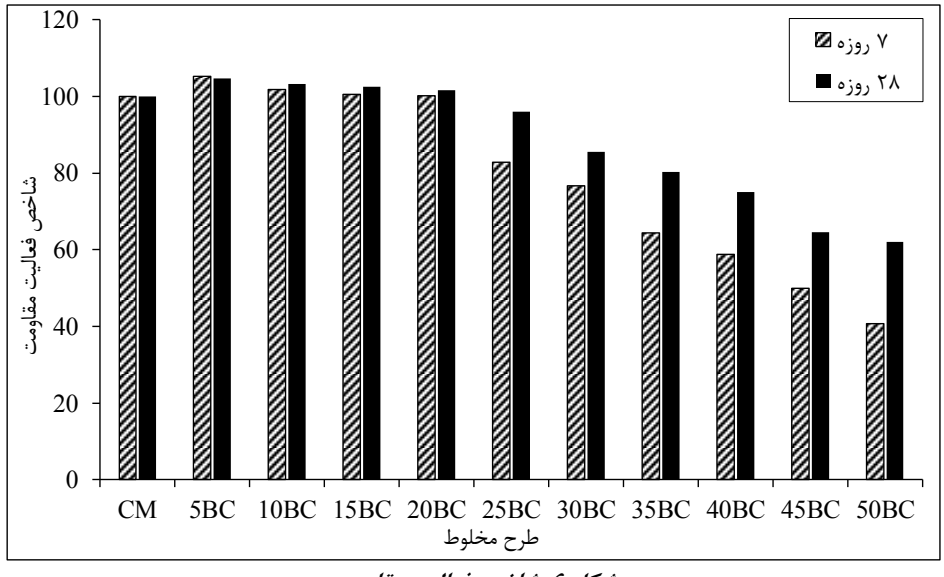
براساس استاندارد ASTM C618 شاخص فعالیت مقاومت ۷ و ۲۸ روز در بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی و خاکستری بادی، باید حداقل ۷۵٪ بتن مرجع باشد. نتایج به دست آمده از شاخص فعالیت مقاومت (Strength

Aactivity Index-SAI) در شکل ۶ نشان داده شده است. برای محاسبه شاخص فعالیت مقاومت مواد پوزولانی با سیمان پرتلند براساس استاندارد ASTM-C311-30 (۳۲) از معادله ۱ استفاده شده است.

$$\text{Strength activity index with portland cement} = (A/B)\times 100 \quad (1)$$

که A، میانگین مقاومت فشاری مخلوط مکعب‌ها براساس MPa و B میانگین مقاومت فشاری مکعب‌های مرجع براساس MPa نتایج شاخص فعالیت مقاومت نشان می‌دهد:

شاخص فعالیت مقاومت ۷ و ۲۸ روزه 5BC، 10BC، 15BC و 20BC بیشتر از CM می‌باشد. در مقایسه با CM در سن ۷ روزه درصد افزایش به ترتیب ۵/۲٪، ۱/۸٪، ۰/۵٪ و ۰/۲٪ و در سن ۲۸ روزه به ترتیب ۴/۸٪، ۳/۲٪، ۲/۵٪ و ۱/۶٪ بوده است. همانطور که در مطالعات پیشین که توسط Marsh و Day (۳۳) ارائه شده است و نتایج به دست آمده، در صورت استفاده از پوزولان‌ها تا حدود سن ۱۴ روز، این مواد نمی‌توانند تاثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت داشته باشند. با توجه به نتایج به دلیل شاخص فعالیت مقاومت بالای بنتونیت سمنان می‌توان از آن در تولید بتن استفاده کرد. به جز نمونه 5BC باقی مخلوط‌ها شاخص فعالیت مقاومت ۲۸ روزه بیشتری نسبت به ۷ روزه دارند.



شکل ۶: شاخص فعالیت مقاومت

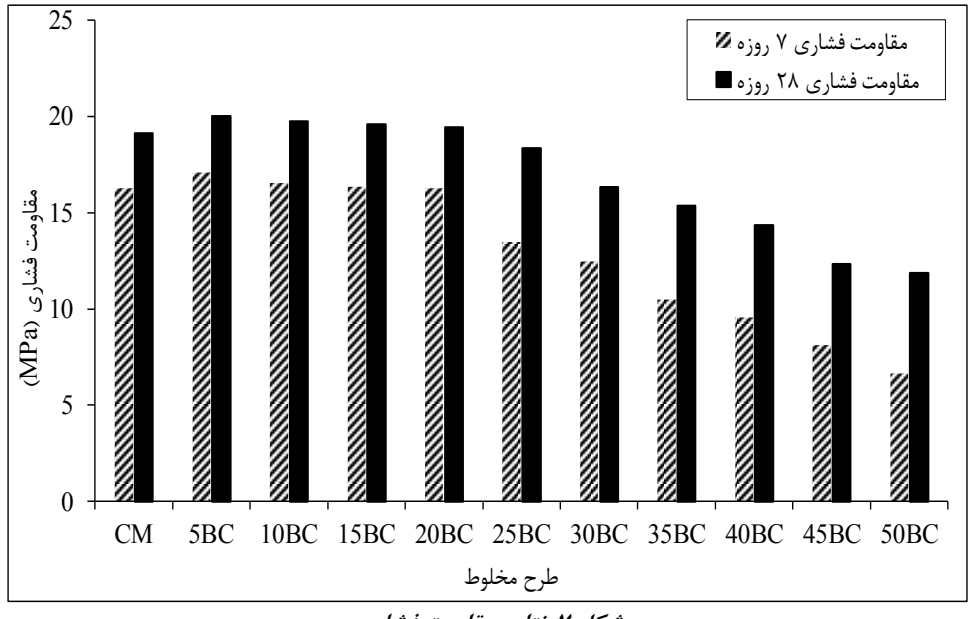
با مقایسه نتایج شاخص فعالیت مقاومت در مقاله مشابه مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از بنتونیت به میزان ۳٪، ۶٪ و ۹٪ شاخص فعالیت مقاومت ۷ و ۲۸ روزه نسبت به نمونه کنترل افزایش می‌یابد (۲۴). همچنین با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود در صورت استفاده از بنتونیت به میزان ۳٪ و ۵٪ شاخص فعالیت در سن ۷ روزه بیشتر از ۲۸ روزه نمونه است، اما با افزایش درصد بنتونیت شاخص فعالیت مقاومت ۲۸ روزه بیشتر از ۷ روزه می‌شود، دلیل این امر را می توان کم بودن درصد بنتونیت عنوان کرد. با مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با نتایج مرجع (۲۴) مشاهده می‌شود که شاخص فعالیت در مرجع (۲۴) بیشتر از نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها می‌باشد که می‌توان دلیل این تفاوت را کمتر بودن عیار سیمان و بیشتر بودن درصد بنتونیت در نمونه‌های ساخته شده در مقاله حاضر عنوان کرد. با توجه به نتایج به دست آمده، هر چه سیمان مصرفی کمتر و بنتونیت بیشتر باشد، نمونه ضعیف‌تر می‌شود که باعث کاهش مقاومت فشاری می گردد و در نتیجه شاخص فعالیت مقاومت نیز کاهش می‌یابد.

در شکل ۷ می‌توان مقاومت فشاری سنین ۷ و ۲۸ روزه نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد:

در همه نمونه‌ها با افزایش سن نمونه از ۷ به ۲۸ روز، مقاومت فشاری افزایش یافته است، به دلیل آن که، واکنش پوزولانی بنتونیت کندتر از واکنش هیدراتاسیون سیمان می‌باشد و همچنین به دلیل خاصیت پرکنندگی بنتونیت، تاثیر بنتونیت بر روی مقاومت فشاری در سن ۷ روزه کم است (۳۴،۳۵).

با توجه به نتایج، در نمونه‌های 5BC، 10BC، 15BC و 20BC مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نسبت به CM بیشتر می‌باشد.

در نمونه‌های حاوی بنتونیت اگر میزان استفاده از بنتونیت بیشتر از ۲۰٪ شود (نمونه‌های 25BC، 30BC، 35BC، 40BC، 45BC و 50BC)، مقاومت فشاری در سن ۷ روزه به ترتیب ۱۷٪، ۲۳٪، ۳۵٪، ۴۱٪، ۵۰٪ و ۵۹٪ کمتر از نمونه CM می‌باشد. همچنین در این نمونه‌ها مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به CM، به ترتیب ۴٪، ۱۴٪، ۲۰٪، ۲۵٪، ۳۵٪ و ۳۸٪ کاهش یافته است، در نتیجه با توجه به نتایج می‌توان گفت درصد مناسب بنتونیت در مخلوط‌های حاوی ۲۰۰kg/m^3 سیمان، بین ۵ الی ۲۰ درصد جایگزین وزن سیمان می‌باشد.



شکل ۷: نتایج مقاومت فشاری

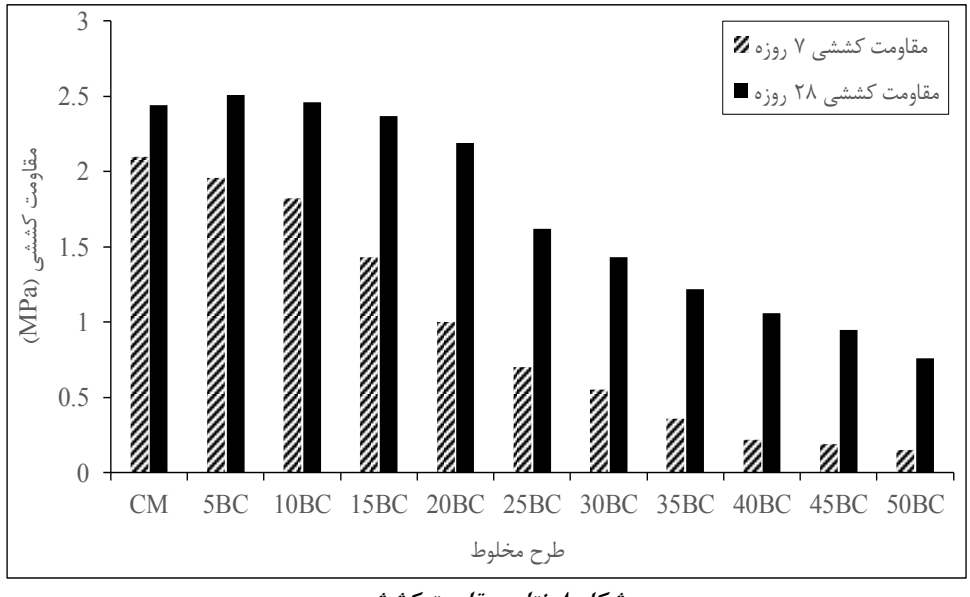
دلیل اصلی افزایش مقاومت در برخی نمونه‌ها (5BC، 10BC، 15BC و 20BC) آن است که واکنش هیدراتاسیون پوزولانی آهسته‌تر از واکنش هیدراتاسیون سیمان انجام می‌شود که فرآیند این واکنش با خاصیت پرکنندگی بنتونیت همراه می‌باشد (۳۶). با توجه به نتایج، در نمونه‌های حاوی بنتونیت نسبت مقاومت فشاری ۷ به ۲۸ روزه در صورتی که درصد جایگزین بنتونیت نسبت به وزن سیمان کمتر از ۲۰٪ باشد، در حدود ۸۰٪ است که نشان می‌دهد درصد بهینه بنتونیت در حدود ۲۰٪ می‌باشد.

مقاومت کششی دو نیم شدن براساس استاندارد ASTM-C496 انجام شده است. براساس این استاندارد، با استفاده از نیروی به دست آمده از آزمایش دو نیم شدن استوانه‌ای از طریق معادله ۲ می‌توان مقاومت کششی دو نیم شدن نمونه‌های استوانه‌ای به دست آورد و در شکل ۸ نتایج مقاومت کششی ارائه شده است.

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \qquad (۲)$$

که در آن P نیروی ارائه شده توسط دستگاه، L طول نمونه استوانه‌ای، D قطر نمونه استوانه‌ای و f_t مقاومت کششی دو نیم شدن نمونه استوانه‌ای می‌باشد.

از عوامل موثر بر مقاومت کششی می‌توان به خاصیت کیفیت ملات و سنگدانه‌ها (۳۷،۳۸) اشاره کرد. استفاده از بنتونیت باعث ایجاد نرمی بیشتری نسبت به بتن معمولی می‌شود، زیرا بنتونیت به دلیل دارای بودن سطح ویژه بالا و همچنین ابعاد بسیار ریز ذرات آن (که در حدود ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ آنگستروم است)، خاصیت پرکنندگی دارد. همچنین مونت موریلونیت موجود در بنتونیت خاصیت خمیری زیادی دارد به همین دلیل در صورت استفاده در بتن، سبب نرمی حاوی بنتونیت نسبت نمونه CM می‌شود. یکی از دلایلی که باعث بهبود مقاومت کششی نمونه‌های حاوی بنتونیت می‌شود، شکل مولکولی، درجه بلورینگ و پیوند بین مولکولی این مواد می‌باشد. از لحاظ شکل و درجه بلورینگ در رابطه با بنتونیت می‌توان گفت به دلیل شکل مولکول‌های بنتونیت که در یکدیگر گره خورده و شکل منظمی ندارند، و درجه بلورینگ پایین؛ خاصیت شکنندگی و سختی کمتری دارد، به همین دلیل انتظار می رود رفتار نمونه حاوی بنتونیت در مقاومت کششی نسبت به نمونه کنترل بهتر باشد، اما با توجه به نتایج شکل ۸ مشاهده می‌شود در صورت استفاده از بنتونیت بیشتر از ۲۰٪ این چنین نیست. یکی از عوامل مهم بر مقاومت کششی پیوند مولکولی است، به همین دلیل مقاومت کششی در نمونه‌هایی که درصد بنتونیت آن‌ها بیش از ۲۰٪ است، نسبت به نمونه CM به شدت کاهش یافته است، زیرا بنتونیت پیوند مولکولی ضعیف‌تری نسبت به سیمان دارد و نوع پیوند بین مولکولی آن از نوع واندروالسی می‌باشد و تحت شرایط آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن عملکرد ضعیف‌تری نشان می‌دهد (۳۹،۴۰). در میان عوامل ذکر شده، موثرترین آن‌ها در رابطه با استفاده از مواد پوزولانی، پیوند بین مولکولی می‌باشد (۳۸)، که بر همین اساس درصد استفاده از مواد پوزولانی همچون بنتونیت بسیار مهم می‌باشد .



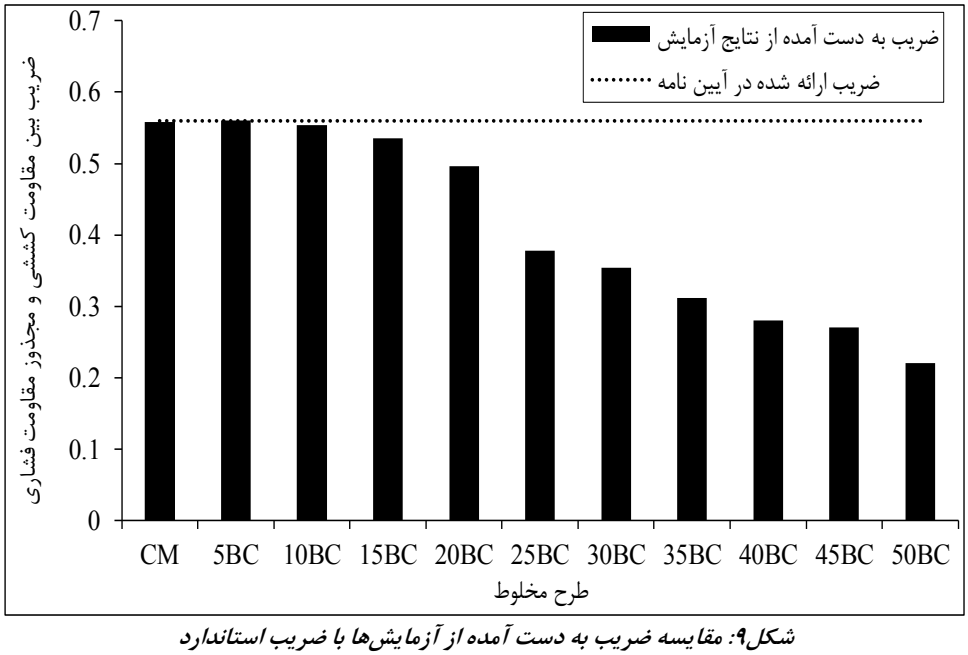
شکل ۸: نتایج مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن استوانه‌ای نشان می‌دهد:
نمونه‌های 5BC و 10BC نسبت به CM مقاومت کششی بهتری به دست آورده‌اند (به ترتیب ۲/۸۷٪ و ۰/۸۲٪) و در نمونه‌های 15BC و 20BC کاهش مقاومت کششی نسبت به CM، ۳٪ و ۱۰٪ می‌باشد اما در دیگر نمونه‌ها، 25BC، 30BC، 35BC، 40BC، 45BC و 50BC، به دلیل افزایش درصد بنتونیت جایگزین شده نسبت به CM، مقاومت کششی به شدت کاهش یافته است. به دلیل ضعیف بودن پیوند بین مولکولی ذرات بنتونیت، پیوندهای آن به راحتی قابل شکستن هستند به همین دلیل در صورت استفاده از بنتونیت با درصد بالا در بتن، مقاومت کششی به شدت کاهش می‌یابد.

در شکل ۹ ضریب بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه پیش‌بینی شده است. اگر چه رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی وجود دارد اما نسبت مستقیمی با یکدیگر ندارند. براساس استاندارد ACI318-14 (۴۱) رابطه‌ای بین مقاومت کششی میانگین اندازه‌گیری شده از آزمایش دو نیم شدن، f_t، و مقاومت فشاری، f_c'، برای ارائه شده که در معادله ۳ نشان داده شده است.

$$f_t = 0.56\sqrt{f_c'} \qquad (۳)$$

با توجه به نتایج شکل ۹، در نمونه‌هایی که درصد جایگزین بنتونیت نسبت به وزن سیمان کمتر از ۲۰٪ می‌باشد، ضریب بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری، در حدود آیین‌نامه است، اما در نمونه‌هایی که درصد استفاده از بنتونیت بیش از ۲۰٪ وزن سیمان است، ضریب بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری به شدت کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش درصد بنتونیت (بیش از ۲۰٪) عملکرد بتن ضعیف می‌شود در نتیجه حتی اگر نمونه مقاومت فشاری قابل قبولی داشته باشد (25BC و 30BC) اما ضریب بین مقاومت فشاری و کششی به دست آمده از نتایج آزمایش نسبت به استاندارد بسیار کمتر می‌باشد. منظور از عملکرد ضعیف بتن آن است که مقاومت فشاری و مقاومت کششی، در صورت افزایش درصد بنتونیت جایگزین، کاهش می‌یابد به همین دلیل سبب ضعیف شدن عملکرد مقاومتی بتن می‌شود. با توجه به ضرایب به دست آمده از رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی، در برخی نمونه‌ها با توجه به افزایش درصد بنتونیت در صورت کسب مقاومت فشاری مناسب، به دلیل کاهش مقاومت کششی و عملکرد ضعیف مقاومتی بتن در کشش، ضریب به دست آمده بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی بسیار کم می‌باشد.



شکل۹: مقایسه ضریب به دست آمده از آزمایش‌ها با ضریب استاندارد

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر استفاده از بنتونتیت برای جایگزینی بخشی از سیمان در بتن‌های کم مقاومت پرداخته شده است. نتایج به دست آمده از بررسی‌ها و آزمایش‌های انجام شده عبارت است از:

*استفاده از بنتونیت به عنوان پوزولان طبیعی و یک گزینه سازگار با محیط زیست با توجه به خصوصیات آن می تواند در صنعت ساخت بتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مورد استفاده قرار گیرد و باعث بهبود عملکرد بتن شود.

*در صورت استفاده از بنتونیت به عنوان جایگزین سیمان کارایی بتن، کاهش می‌یابد. همچنین با توجه نتایج آزمایش اسلامپ، با افزایش درصد جایگزینی بنتونیت نسبت به وزن سیمان، خاصیت چسبندگی و نرمی مخلوط نیز افزایش می‌یابد، اما سبب کاهش کارایی مخلوط به دست آمده، می‌شود. در نمونه‌هایی که درصد استفاده از بنتونیت بیش از ۲۰٪ می‌باشد (25BC، 30BC، 35BC، 40BC، 45BC و 50BC) اسلامپ نمونه به شدت کاهش یافته است.

*بررسی و محاسبه شاخص فعالیت مقاومت (SAI) نمونه‌ها، مطابق آیین‌نامه ASTM-C618 و ASTM-C311 می‌باشد. با توجه به نتایج، نمونه‌هایی که درصد جایگزینی بنتونیت به جای سیمان کمتر از ۲۰٪ است SAI آن‌ها نسبت به نمونه مرجع (CM) بیشتر می‌باشد.

*با توجه به نتایج مقاومت فشاری، نمونه‌هایی که درصد استفاده از بنتونیت جایگزین سیمان کمتر از ۲۰٪ می‌باشد (5BC، 10BC، 15BC و 20BC)، نسبت به CM مقاومت فشاری بالاتری کسب کرده‌اند. برهمین اساس می‌توان گفت برای به دست آوردن مقاومت فشاری مناسب در بتن‌های کم مقاومت، حداکثر درصد استفاده از بنتونیت به عنوان جایگزین سیمان، ۲۰٪ می‌باشد.

*با توجه به نتایج مقاومت کششی، نمونه‌های ۵٪ و ۱۰٪ بنتونیت مقاومت کششی بهتری نسبت به CM دارند. به همین دلیل برای کسب مقاومت کششی مناسب در بتن‌های کم مقاومت حداکثر درصد استفاده از بنتونیت به جای سیمان ۱۰٪ می‌باشد.

*با توجه به نتایج مشاهده می‌شود با افزایش درصد بنتونیت (به دلیل کاهش مقاومت فشاری و مقاومت کششی)، ضرایب به دست آمده از رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری، کمتر از ضریب ارائه شده در استاندارد (۰/۵۶) می‌باشد. به همین دلیل حداکثر درصد جایگزینی بنتونیت ۲۰٪ است.

با توجه به اهداف این پژوهش و براساس یافته‌های آن، می‌توان از پوزولان‌های طبیعی از جمله بنتونیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده کرد. این جایگزینی باعث بهبود عملکرد بتن و کاهش مصرف سیمان و همچنین حفظ منابع انرژی و مواد اولیه و در نتیجه سبب کاهش آسیب‌های زیست محیطی می‌شود. درصد بهینه جایگزینی بنتونیت نسبت به وزن سیمان در بتن، ۵٪ و ۱۰٪ می‌باشد که بتن به دست آمده مقاومت فشاری و مقاومت کششی مطلوبی کسب می‌کند. همچنین باید در نظر داشت امروزه در کشورهای پیشرفته از موادی همچون بنتونیت به جای سیمان، به منظور صرفه‌جویی در انرژی و افزایش دوام بتن استفاده نمی‌شود.

۵- سپاسگزاری

بدینوسیله از آزمایشگاه دانشگاه سمنان و مسئولین مربوطه که با مساعدت و راهنمایی‌ها و تدابیر اتخاذ شده، برای به انجام رسیدن آزمایشات موفق و دستیابی به نتایج قابل اطمینان نقش موثری داشته‌اند، کمال تشکر و سپاس به عمل می‌آید.

۶- مراجع

1. *Yılmaz M, Bakış A. Sustainability in Construction Sector. Procedia - Soc Behav Sci. 2015;195:2253–62.*
2. *Oikonomou ND. Recycled concrete aggregates. Cem Concr Compos. 2005;27(2):315–8.*
3. *Marinković S, Dragaš J, Ignjatović I, Tošić N. Environmental assessment of green concretes for structural use. J Clean Prod. 2017;154:633–49.*
4. *Bouzoubaa N, Zhang MH, Malhotra VM. Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash. Cem Concr Res. 2001;31(10):1393–402.*

5. *Lübeck A, Gastaldini ALG, Barin DS, Siqueira HC. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. Cem Concr Compos. 2012;34(3):392–9.*
6. *Huang C-H, Lin S-K, Chang C-S, Chen H-J. Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. Constr Build Mater. 2013;46:71–8.*
7. *Nagrockiene D, Pundienė I, Kicaite A. The effect of cement type and plasticizer addition on concrete properties. Constr Build Mater. 2013;45:324–31.*
8. *Onyelowe KC, Amhadi T, Ezugwu C, Ugwuanyi H, Iro U, Jideofor I, et al. Strength of pozzolan soil blend in chemically improved lateritic soil for pavement base material purpose. Int J Low-Carbon Technol. 2019;14(3):410–6.*
9. *Trümer A, Ludwig H-M, Schellhorn M, Diedel R. Effect of a calcined Westerwald bentonite as supplementary cementitious material on the long-term performance of concrete. Appl Clay Sci. 2019;168:36–42.*
10. *Zhang L, De Schryver P, De Gusseme B, De Muynck W, Boon N, Verstraete W. Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: a review. Water Res. 2008;42(1–2):1–12.*
11. *Noeiaghaei T, Mukherjee A, Dhami N, Chae S-R. Biogenic deterioration of concrete and its mitigation technologies. Constr Build Mater. 2017;149:575–86.*
12. *Heidari A, Hashempour M, Tavakoli D. Using of backpropagation neural network in estimating of compressive strength of waste concrete. Soft Comput Civ Eng. 2017;1(1):54–64.*
13. *Polder RB. Effects of slag and fly ash on reinforcement corrosion in concrete in chloride environment: Research from the Netherlands. Heron, 57 3. 2012;*
14. *Caballero CE, Sanchez E, Cano U, Gonzalez JG, Castano V. On the effect of fly ash on the corrosion properties of reinforced mortars. Corros Rev. 2000;18(2–3):105–12.*
15. *Aydın S, Yiğiter H, Baradan B. Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete. Build Environ. 2007;42(2):717–21.*
16. *Goyal S, Kumar M, Sidhu DS, Bhattacharjee B. Resistance of mineral admixture concrete to acid attack. J Adv Concr Technol. 2009;7(2):273–83.*
17. *Mane KM, Kulkarni DK, Prakash KB. Prediction of Flexural strength of Concrete Produced by Using Pozzolanic Materials and Partly Replacing NFA by MS. J Soft Comput Civ Eng [Internet]. 2019 Apr 1 [cited 2019 Nov 16];3(2):69–77. Available from: http://www.jsoftcivil.com/article_95795.html*
18. *Qiyami Taklimy SM, Rezaifar.Omid, Gholhaki M. Effect of Substitution of Natural Calcareous and Clay Materials with Cement in Low-Carbon Concretes. Transp Infrastruct Eng (JTIE)-(In Persian) [Internet]. 2019;5(4):40–9. Available from: https://jtie.semnan.ac.ir/article_4174.html*
19. *Astm C. ASTM-C618. 2010.*
20. *Moghanloo R, Aghajani H. Study of the effect of bentonite and cement on the strength and permeability of plastic concrete in laboratory conditions (In Persian). In 2013.*
21. *Faday M, Nekoiy M, Javadi P. Investigation of the effects of dry and saturated bentonite on the compressive strength of plastic concrete (In Persian) [Internet]. 2nd National Conference on Applied Researches in Structural Engineering and Construction Management. Tehran: University Sharif; 2018. Available from: https://www.civilica.com/Paper-SECM02-SECM02_006.html*
22. *Khaloo A, Bahadori S. Parameters Influencing Behavior of plastic Concrete (In Persian). In: The 1st Seminar on Erth & Rockfill Dams. Tehran; 1997. p. 334–45.*
23. *Khaloo A. Parameters Influencing Behavior of plastic Concrete (In Persian). Tehran: Sharif University of Technology; 1996.*
24. *Memon SA, Arsalan R, Khan S, Lo TY. Utilization of Pakistani bentonite as partial replacement*

of cement in concrete. Constr Build Mater. 2012;30:237–42.

25. *Reddy GVK, Rao VR, Reddy MAK. Experimental investigation of strength parameters of cement and concrete by partial replacement of cement with Indian calcium bentonite. Int J Civ Eng Technol. 2017;8(1):512–8.*
26. *Abbaslou H, Tavana Amlashi A, Ghanizadeh A, Azemi S. Effects of mixing design and curing time on compressive and tensile strength of bentonite plastic concrete (In Persian). Concr Res. 2017;10(2):109–24.*
27. *ASTM C. ASTM-C 136: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. 2006.*
28. *ASTM C. ASTM-C128: Standard test method for specific gravity and absorption of. 2001;*
29. *BSI. BS EN 12390-3: 2009: Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens. BSI London, UK; 2011.*
30. *ASTM C. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. 496, editor. 2011.*
31. *ASTM C. ASTM-C143: Standard test method for slump of hydraulic cement concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. Vol. 4. 1996.*
32. *Standard A. C311-07: Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. Annu B ASTM Stand. 2007;*
33. *Marsh BK, Day RL. Pozzolanic and cementitious reactions of fly ash in blended cement pastes. Cem Concr Res. 1988;18(2):301–10.*
34. *Monteiro P. Concrete: microstructure, properties, and materials. McGraw-Hill Publishing; 2006.*
35. *Mehta PK, Monteiro PJM. Concrete microstructure, properties and materials. 2017.*
36. *Akram T, Memon SA, Iqbal K. Utilization of bagasse ash as partial replacement of cement. In: International Conference on Advances in Cement Based Materials and Applications in Civil Infrastructure ACBM-ACI, Lahore, Pakistan. 2007. p. 235–45.*
37. *Bogas JA, de Brito J, Figueiredo JM. Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. J Clean Prod. 2015;89:187–95.*
38. *Neville AM. Properties of concrete. Vol. 4. Longman London; 1995.*
39. *Falihy R. Causes of using sodium bicarbonate in cement slurry for injection in rocks (in Persian). In.*
40. *Erfany H. Crystallography (in Persian). Tehran: Tehran University;*
41. *318 ACIC. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): An ACI Standard: Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14): an ACI Report. American Concrete Institute; 2014.*