

## Investigation Experimental of the Effect of Bentonite as a Partial Replacement for Cement on Mechanical Properties of Concrete

S.M. Qiyami Taklymi<sup>1</sup>, O. Rezaifar<sup>2</sup>, and M. Gholhaki<sup>3</sup>

1- Phd. Candidate, Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

### ABSTRACT

The continuous growth of the population will guarantee a massive demand for cement in the near future. 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. Seven bentonite mixes and control mix (CM) were examined. The main variable is the proportion of bentonite (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% and 35% 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, splitting tensile strength tests and prediction of the modulus of rupture were performed. According to the results of compressive strength test, using 5% bentonite as partial replacement of cement, results in 8% increase in compressive strength 28 days as compared with the control mix. By replacing 35% of bentonite with the weight of cement, the compressive strength 28 days is reduced by 21%. According to the results in mixtures containing bentonite, if the amount of bentonite is more than 20% by weight of cement, the tensile strength 28 days is reduced by 45% compared to CM. According to the results, replacing 5% and 10% (by weight) of cement with bentonite, the predicted rupture modulus will increase by 3.7% and 3.1% compared to the CM, respectively.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 11 April 2021

**Revise Date:** 22 May 2021

**Accept Date:** 30 May 2021

### Keywords:

Replacement of Cement  
Bentonite  
Compressive Strength  
Tensile Strength  
Rupture Modulus

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.280223.2415>

\*Corresponding author: Omid Rezaifar  
Email address: orezayfar@semnan.ac.ir

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر بنتونیت در جایگزینی بخشی از سیمان بر خصوصیات مکانیکی بتن

سیده مرضیه قیامی تکلیمی<sup>۱</sup>، امید رضایی فر<sup>۲\*</sup>، مجید قلهکی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

رشد جمعیت و نیازهای متعدد جوامع، سبب افزایش روز افزون تقاضای سیمان شده است. استفاده از مواد پوزولانی در ساخت بتن، راه حل مناسبی برای کاهش مصرف منابع انرژی، تولید گازهای گلخانه‌ای و مصرف سیمان می‌باشد. در این مطالعه تأثیر استفاده از بنتونیت سمنان به جای بخشی از سیمان بررسی شده است. در این مقاله هفت طرح اختلاط به همراه طرح اختلاط نمونه کنترل (CM) ساخته و مقایسه شده است. متغیر اصلی، تغییر نسبت بنتونیت به وزن سیمان می‌باشد که در بازه ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۲۵٪، ۳۰٪ و ۳۵٪ در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکستگی نمونه‌ها و پیش‌بینی مدول گسیختگی برای بررسی خواص بتن، انجام شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری، استفاده از بنتونیت به جای بخشی از سیمان به میزان ۵ درصد، سبب افزایش ۸ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه کنترل (Control Mix-CM) شده است. با جایگزین کردن ۳۵٪ بنتونیت نسبت به وزن سیمان، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۲۱٪ کاهش یافته است. با توجه به نتایج مخلوط‌های حاوی بنتونیت در صورتی که مقدار بنتونیت بیش از ۲۰٪ وزن سیمان باشد، مقاومت کششی ۲۸ روزه نسبت به CM تا ۴۵٪ کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج، در صورت جایگزینی ۵٪ و ۱۰٪ بنتونیت، مدول گسیختگی پیش‌بینی شده نسبت به نمونه CM، به ترتیب ۳۷٪ و ۳۱٪ افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: جایگزین سیمان، بنتونیت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.280223.2415	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.280223.2415	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۳/۰۹	۱۴۰۰/۰۳/۰۹	۱۴۰۰/۰۳/۰۱	۱۴۰۰/۰۱/۲۲
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				امید رضایی فر		
				orezayfar@semnan.ac.ir		

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر توسعه پایدار و حفاظت از محیط زیست در جوامع مختلف به شدت مورد توجه قرار گرفته است. حفظ منابع طبیعی، پیشگیری از آلودگی‌های زیست محیطی، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و تغییر شرایط زندگی و متناسب کردن آن با شرایط آب و هوایی و اقلیمی از شیوه‌های نوین معماری است که در طراحی و ساخت سازه‌های مختلف به آن توجه می‌شود. در سال ۱۹۸۷ موضوعاتی از قبیل افزایش دمای زمین، آلودگی‌های زیست محیطی و کاهش منابع انرژی طبیعی مورد توجه و بحث قرار گرفته است [۱]. صنعت ساخت و ساز با مصرف ۵۰ درصدی مواد خام و همچنین مصرف ۴۰ درصدی کل منابع انرژی و تولید نیمی از زباله صنعتی جهان، یکی از صنایع مصرف کننده منابع و تولید کننده زباله و آلودگی در میان دیگر صنایع به شمار می‌آید [۲]-[۴].

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 گرفته‌اند [۵]-[۷]. با توجه به مصرف ۱۵ درصدی از منابع انرژی برای تولید سیمان [۴] و افزایش آلودگی‌های زیست محیطی، کشورهای مختلف برای کاهش مصرف انرژی و حفاظت از محیط زیست روند تولید سیمان را محدود و هزینه‌های تولید را افزایش داده‌اند. تولید سیمان نقش مهمی در افزایش تولید گاز دی‌اکسیدکربن و انرژی‌های حرارتی دارد [۸]-[۱۰]. یکی از راه‌حل‌های مطرح شده در جوامع برای کاهش هزینه‌های تولید سیمان و کاهش تولید گاز دی‌اکسیدکربن، اصلاح ساختار بتن با استفاده از مواد مکمل سیمانی می‌باشد [۱۱]-[۱۳].

مطالعات زیادی در خصوص تأثیر استفاده از مواد مکمل سیمانی از جمله پوزولان‌های طبیعی و صنعتی [۱۴] برای جایگزینی سیمان در بتن و بهبود مشخصات مکانیکی و خواص ساختاری بتن، انجام شده است. همچنین استفاده از مواد مکمل سیمانی به جهت کاهش مصرف سیمان و استفاده از مواد بازیافتی [۱۵]، [۱۶] یا مصالحی که برای تولید آن‌ها انرژی و هزینه کمتری مصرف شده است [۱۶]، رو به افزایش می‌باشد. مواد پوزولانی انواع مختلفی دارند از جمله مواد طبیعی مانند بنتونیت، کائولن و زئولیت، مواد صنعتی مانند خاکستر بادی و مواد شیمیایی و معدنی مانند آهک [۱۷]. از ویژگی‌های مواد پوزولانی خاصیت سیمانی است که باعث کاهش هزینه‌ها، افزایش مقاومت در برابر حملات قلیایی و اسیدی [۱۸] و کاهش سطح ترک‌خوردگی بتن می‌شود [۱۹]. مطالعه‌ای بر روی استفاده از متاکائولن و ژل سیلیکا در بتن خودمتراکم توسط شربتدار و همکاران در سال ۲۰۲۰ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از پوزولان‌های صنعتی از جمله متاکائولن و ژل سیلیکا در بتن خود متراکم، همانند دیگر مواد پوزولانی، سبب بهبود مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن خود متراکم می‌شود [۱۴].

مطابق تعریف پوزولان براساس استاندارد *ASTM-C618* [۲۰] پوزولان به ماده‌ای گفته می‌شود که «دارای سیلیس و یا سیلیس و آلومین 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».

بنتونیت یک پوزولان طبیعی است که از طریق استخراج از معدن به دست می‌آید و دارای فرمول شیمیایی  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 4H_2O$  می‌باشد [۲۱]. از ویژگی‌های بنتونیت می‌توان به مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری و تراکم‌پذیری مناسب اشاره کرد. بتن با خاصیت پلاستیسیته بالا که در دیوار آب‌بندها و سدها مورد استفاده قرار می‌گیرد، بتن پلاستیک نام دارد [۲۲]. به دلیل خاصیت نفوذپذیری پایین، رفتار پلاستیکی و شکل‌پذیری مناسب از بنتونیت در ساخت بتن پلاستیک استفاده می‌شود [۹].

در سال ۲۰۱۹، امیر توانا املشی و همکاران، با استفاده از محاسبات نرم، فرمول‌هایی برای کارایی (اسلامپ)، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن پلاستیک بنتونیتی پیش‌بینی و ارائه کرده است. ترکیب بنتونیت به همراه بتن معمولی بتن پلاستیک بنتونیتی (Bentonite Plastic Concrete- BPC) نامیده می‌شود. استفاده از بنتونیت در کامپوزیت‌ها، همچون مخلوط بتن یکی از راه‌کارها برای جذب فلزات سنگین می‌باشد [۲۳]. همچنین این نوع بتن معمولاً به عنوان ماده دیوارهای آب‌بند در زیر سدهای خاکی به هدف به حداقل رساندن یا جلوگیری از نشت آب، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۴]. همچنین در مطالعه دیگری که توسط توانا و همکاران در سال

۲۰۱۶ انجام شده است، نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از بتن پلاستیک، نفوذپذیری و جذب فلزات بهبود می‌یابد. همچنین استفاده از این ماده باعث کاهش ترک‌ها و افزایش عمر مفید بتن برای انواع سازه‌های مهندسی می‌شود [۲۵].

مطالعه‌ای در دانشگاه صنعتی شریف توسط خالو و همکاران در سال ۱۹۹۶، در خصوص بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن پلاستیک (بتن حاوی بنتونیت) 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. 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 [۲۶].

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 در سال ۲۰۱۲ توسط مومن و همکارانش، 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. نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از بنتونیت به جای بخشی از سیمان مصرفی باعث کاهش چگالی می‌شود. همچنین نمونه‌های حاوی بنتونیت عملکرد بهتری نسبت به نمونه کنترل در برابر حملات اسیدی داشته‌اند [۱۸]. مطالعه‌ای بر روی بتن‌های کم مقاومت حاوی بنتونیت در سال ۲۰۲۰ توسط قیامی و همکاران انجام شده است، که نتایج آن نشان می‌دهد در صورت جایگزینی ۵۰٪ سیمان با بنتونیت، مقاومت فشاری آن به میزان ۴۰٪ کاهش می‌یابد و با افزایش میزان بنتونیت بیش از ۲۵٪، مقاومت کششی تا ۷۰٪ کاهش می‌یابد [۲۷]. نتایج مطالعه دیگری بر روی بنتونیت کلسیم‌دار پاکستان، که توسط ردی (Reddy) و همکاران در سال ۲۰۱۷ انجام شده، نشان می‌دهد با افزایش درصد بنتونیت (درصد بهینه بنتونیت در این مطالعه ۱۰ درصد می‌باشد) به جای بخشی از سیمان و کاهش مقدار، عملکرد بتن ضعیف شده و مقاومت فشاری و مقاومت کششی آن به شدت کاهش می‌یابد [۹]. از دیگر مطالعات انجام شده توسط توانا و همکاران در سال ۲۰۱۷، تأثیر 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 [۲۸]. براساس بررسی‌ها و مطالعات انجام شده توسط قیامی و همکاران در سال ۲۰۲۰، استفاده همزمان از آهک و بنتونیت در ساخت بتن سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود [۱۷]. مطالعه‌ای در مورد تأثیر بنتونیت بر مقاومت و دوام ملات سیمان سرباره در محیط‌های دریایی توسط لی (Lee) و همکارانش در سال ۲۰۲۱ انجام شده است که نتایج آن نشان می‌دهد دوام ملات سیمان سرباره در برابر حملات سولفاتی در صورت استفاده از بنتونیت بهبود یافته است. در صورت جایگزینی ۲۵٪ بنتونیت در ملات سیمان سرباره، نفوذناپذیری و مقاومت فشاری افزایش یافته و وزن بتن پس از انجام آزمایش مقاومت سولفات و ارزیابی نفوذپذیری کلرید، کاهش یافته است [۲۹]. مطالعه‌ای بر روی بتن-های بازیافتی حاوی بنتونیت کلسیم‌دار در سال ۲۰۲۰ توسط ماسود و همکاران انجام شده است که نتایج آن نشان می‌دهد با توجه به مزایای زیست محیطی بودن بتن‌های بازیافتی، استفاده از بنتونیت در این بتن‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر دوام و مقاومت داشته باشد [۳۰]. همچنین براساس مطالعه انجام شده بر روی تأثیر بنتونیت و کائولن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان توسط قیامی و همکاران در سال ۲۰۲۰، در صورت استفاده از بنتونیت و کائولن در بتن، مقاومت فشاری و مقاومت کششی کاهش می‌یابد. نتایج نشان داده است که مواد پوزولانی (بنتونیت و کائولن) را نمی‌توان به تنهایی استفاده نمود و باید به عنوان بخشی از سیمان، در نظر گرفته شوند [۳۱].

در این مقاله به بررسی تأثیر درصد‌های مختلف (بازه ۵ تا ۳۵ درصد) بنتونیت سدیم‌دار سیمان به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، پرداخته شده است. در پژوهش‌های پیشین درصد استفاده از بنتونیت کمتر از ۱۰ می‌باشد و همچنین تأثیر استفاده از بنتونیت به همراه مواد دیگری از جمله مصالح سنگی بازیافتی در بتن پرداخته شده است. همچنین بنتونیت مورد استفاده در مطالعات پیشین بنتونیت کلسیم‌دار می‌باشد. در مطالعات پیشین از مصالح سنگی با اندازه‌های مختلف استفاده شده اما در این مقاله به بررسی تأثیر استفاده از مصالح سنگی با یک اندازه پرداخته شده است. در این هدف اصلی این پژوهش، بررسی ساختار بنتونیت و تأثیر استفاده از آن بر بهبود فرآیند

هیدراسیون سیمان و همچنین بهبود عملکرد مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب می باشد. مقدار سیمان در نمونه کنترل (نمونه اولیه)  $400 \text{ Kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است.

## ۲- روش های آزمایش و مصالح

در این مقاله مراحل ساخت نمونه ها و نتایج به چهار بخش تقسیم شده است: (۱) بررسی مواد و خصوصیات اولیه آن ها، (۲) ساخت نمونه های مکعبی و استوانه ای، (۳) انجام آزمایش های مقاومت فشاری و مقاومت کششی، (۴) بررسی نتایج به دست آمده از انجام آزمایش ها.

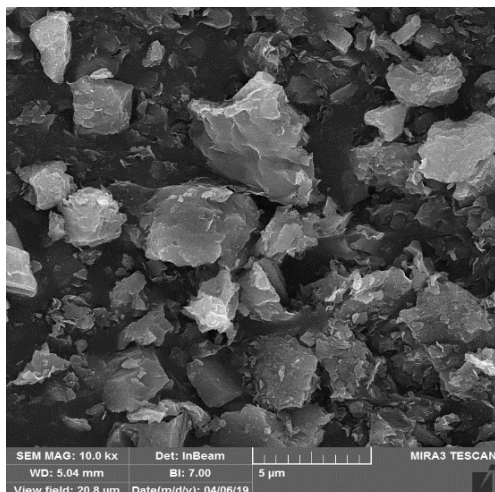
### ۲-۱- مصالح مورد استفاده

سیمان مصرفی در این مقاله از نوع سیمان پرتلند تیپ II شاهرود می باشد. بنتونیت مورد استفاده به رنگ زرد بوده و از معادن سمنان تهیه شده و به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شده است. شکل ۱ نمونه ای از بنتونیت عبوری از الک شماره ۲۰۰ و شکل ۲ تصویر SEM (میکروسکوپ الکترونیکی روبشی) بنتونیت به جهت بررسی خصوصیات ذرات آن، را نشان می دهد. با توجه به استاندارد *ASTM618-08a* بنتونیت مورد استفاده، الزامات مورد نیاز ترکیب شیمیایی پوزولان طبیعی را دارد. خصوصیات شیمیایی سیمان و بنتونیت مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: خصوصیات شیمیایی مصالح

بنتونیت	سیمان	چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )
۱/۸	۳/۲	
خصوصیات شیمیایی (%)		
۶۸/۵	۲۳/۱۲	SiO <sub>2</sub>
۱۵/۱۳	۴/۴۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۴/۶۵	۲/۱۶	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۵/۹۶	۶۵/۹۶	Na <sub>2</sub> O
۱/۹۲	۱/۵۱	MgO
۳/۲۷	۰/۳۲	CaO
۰/۴۷	۰/۵۱	K <sub>2</sub> O
۰/۱	-	TiO <sub>2</sub>
-	۲	SO <sub>3</sub>
-	۲/۰۲	LOI
-	۰/۳۲	باقی مانده نامحلول در اسید
-	۱/۲۳	آهک آزاد
-	۵۵/۲۵	C <sub>3</sub> S
-	۲۵/۴۴	C <sub>2</sub> S
-	۸/۰۶	C <sub>3</sub> A
-	۶/۵۶	C <sub>4</sub> AF

با توجه به شکل ۲، مشاهده می شود که ذرات بنتونیت مورد استفاده دارای شکل نامنظم (آمورف) و صفحه ای می باشد. همچنین با توجه به خصوصیات شیمیایی که از آزمایش *XRF (X-Ray Fluorescence)* به دست آمده است (جدول ۱) بنتونیت استفاده شده از نوع سدیم دار است که دارای خواص پوزولانی می باشد.

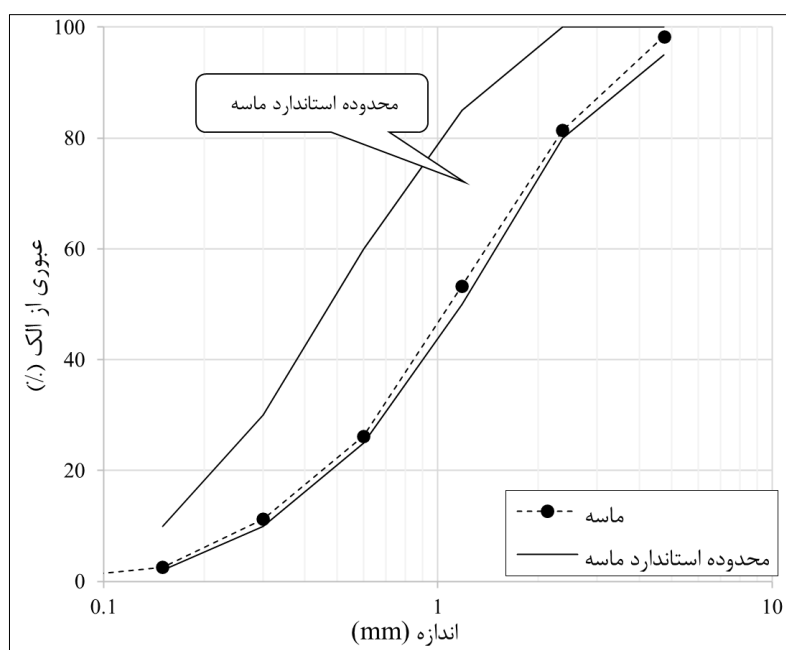


شکل ۲: SEM بنتونیت



شکل ۱: نمونه بنتونیت

مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) از نوع شکسته با ابعاد کمتر از  $4/75 \text{ mm}$  (عبوری از الک شماره ۴) و مصالح سنگی درشت‌دانه با ابعاد یکسان حدوداً  $9/5 \text{ mm}$  (عبوری از الک شماره  $3/8''$ ) در نظر گرفته شده است. دانه‌بندی مصالح سنگی ریزدانه بر اساس *ASTM-C136* [۳۲] انجام شده است که در شکل ۳ نمودار دانه‌بندی ماسه نشان داده شده است.



شکل ۳: منحنی دانه‌بندی مصالح ریزدانه

وزن مخصوص و جذب آب ریزدانه‌ها براساس *ASTM-C128* [۳۳] و وزن مخصوص و جذب آب درشت‌دانه براساس *ASTM-C127* [۳۴] انجام شده است و نتایج آن در جدول ۲ و تصاویر جذب آب مصالح سنگی (درشت‌دانه و ریزدانه) در شکل ۴ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات سنگ‌دانه‌ها

مشخصات	ماسه	شن
جذب آب (%)	۲/۴	۱/۲
وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )	۱۸۹۰	۱۹۶۰



شکل ۴: وسایل آزمایش جذب آب مصالح سنگی (درشت‌دانه و ریزدانه)

## ۲-۲- نمونه‌های ساخته شده

در این مقاله تعداد ۸۴ نمونه مکعبی و استوانه‌ای به ابعاد  $100 \times 100 \text{ mm}$  و  $100 \times 200 \text{ mm}$  برای ۸ طرح مخلوط (نمونه کنترل و نمونه‌های حاوی بنتونیت) ساخته شده است (شکل ۵). نمونه‌های ساخته شده بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان انجام آزمایش در حوضچه‌های آب در دمای ۲۳ درجه سانتی گراد قرار گرفتند و پس گذراندن ۷ و ۲۸ روز، تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی قرار گرفتند. مراحل ساخت نمونه‌ها، انجام آزمایش‌های مختلف و بررسی نمونه‌ها، براساس استاندارد *ASTM* و *BS* انجام شده است.



(ب) نمونه استوانه‌ای ساخته شده

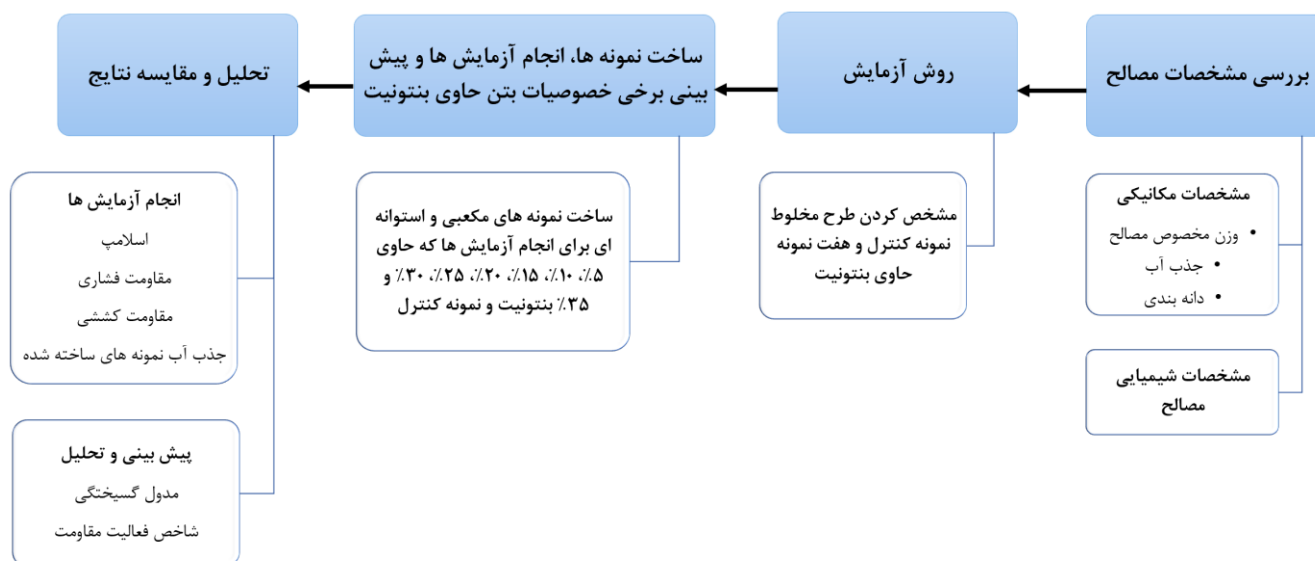


(الف) نمونه‌های مکعبی

شکل ۵: نمونه‌های ساخته شده

برای بررسی کارایی مخلوط، آزمایش اسلامپ براساس استاندارد *ASTM-C143* [۳۵] انجام شده است. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی طبق استاندارد *BS-EN-12390-3:2009* [۳۶] انجام شده و با توجه به ضرایب استاندارد مبحث ۹، تبدیل به نمونه‌های استوانه‌ای شده‌اند. همچنین آزمایش مقاومت کششی شکافتگی نمونه‌های استوانه‌ای براساس استاندارد *ASTM-C496* می‌باشد. پیش‌بینی مدول گسیختگی بتن حاوی بنتونیت براساس استاندارد *ACI 318-14* است. جذب آب نمونه‌های سخت شده براساس استاندارد *ASTM-C642* انجام شده است. مطابق استاندارد *ASTM-C642* نمونه از آب خارج شده و سطح آن‌ها در محیط آزمایشگاه خشک و وزن اشباع با

سطح خشک نمونه اندازه گیری شده و سپس برای اندازه گیری وزن خشک به مدت ۲۴ ساعت در Oven قرار داده شده است. در شکل ۶، روند انجام آزمایش‌ها ارائه شده است.



شکل ۶: روند انجام آزمایش‌ها

### ۳-۲- طرح مخلوط

در این مقاله هشت ترکیب مختلف انتخاب شده است که شامل یک طرح مخلوط کنترل (*Control mix*) بدون بنتونیت و هفت طرح دیگر با نسبت‌های مختلف بنتونیت به عنوان جایگزینی بخشی از سیمان، ساخته شده است. طرح مخلوط‌های حاوی بنتونیت شامل: ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۲۵٪، ۳۰٪ و ۳۵٪ جایگزینی نسبت به وزن سیمان می‌باشد. عیار سیمان اولیه در طرح مخلوط طراحی (نمونه کنترل-CM)  $400 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است. جزئیات طرح مخلوط نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: طرح مخلوط

مواد پوزولانی ( $\text{kg/m}^3$ )	مصالح مورد استفاده ( $\text{kg/m}^3$ )				طرح مخلوط
	سیمان	آب	ماسه	شن	
بنتونیت	400	300	800	800	CM
-	380	300	800	800	5BC
20	360	300	800	800	10BC
40	340	300	800	800	15BC
60	320	300	800	800	20BC
80	300	300	800	800	25BC
100	280	300	800	800	30BC
120	260	300	800	800	35BC
140					

طرح مخلوط نمونه‌ها به روش وزنی انجام شده و براساس استاندارد *ACI-211* می‌باشد. مخلوط‌ها دارای دو نوع نام‌گذاری هستند، CM نمونه کنترلی (*Control Mix*) و بدون بنتونیت می‌باشد و اسامی XBC، X میزان درصد بنتونیت جایگزین سیمان و B نماد بنتونیت و



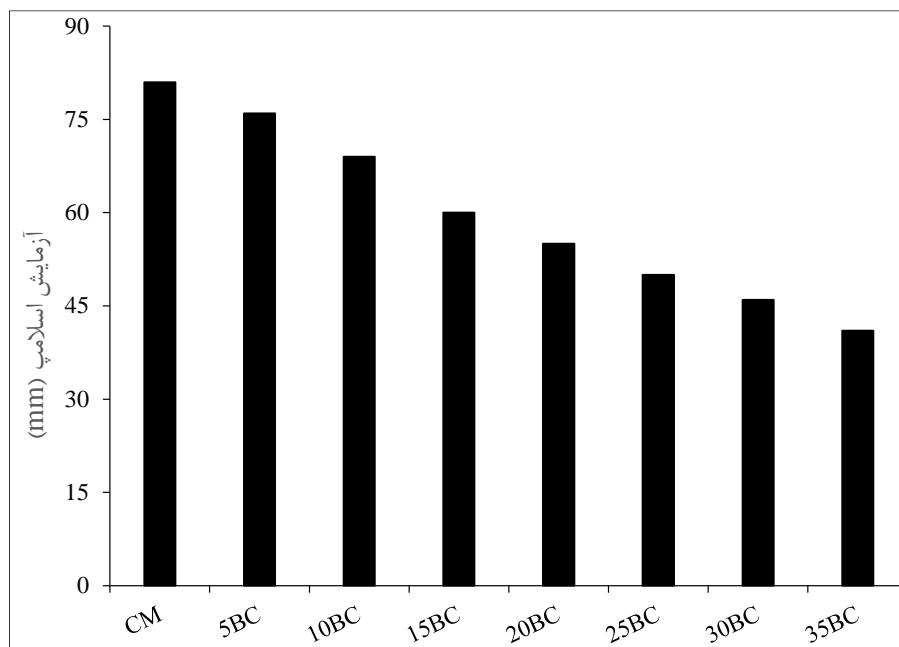
C نماد سیمان را نشان می‌دهد. به عنوان مثال در نمونه 10B، 10BC نشان دهنده ۱۰٪ جایگزینی بنتونیت نسبت به وزن سیمان است. نسبت آب به مواد چسبنده در همه نمونه‌ها ثابت (۰/۷۵) در نظر گرفته شده است. به دلیل استفاده از مصالح سنگی کاملاً خشک و بدون رطوبت به همراه بنتونیت (با توجه به خصوصیات آن، بنتونیت جذب آب بالایی دارد) نسبت آب به مواد چسبنده مقدار ۰/۷۵ در نظر گرفته شده است. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا مصالح سنگی ریزدانه و درشت دانه به همراه بخشی از آب در میکسر به خوبی مخلوط شده و سپس سیمان به همراه مقداری آب به مخلوط اضافه و به خوبی ترکیب می‌شوند تا فرآیند جذب آب و تشکیل لایه سیمانی بر روی مصالح سنگی ریزدانه و درشت دانه آغاز شود. سپس بنتونیت و آب باقی مانده را به میکسر اضافه کرده و به مدت ۴ الی ۵ دقیقه به خوبی ترکیب شدند.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی

در این قسمت به بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی که با استفاده از ضرایب استاندارد به مقاومت استوانه‌ای تبدیل یافته و با نمونه کنترل، مقایسه شده‌اند پرداخته شده است. همچنین مقاومت کششی شکافتگی نمونه‌های استوانه‌ای به همراه تحلیل نتایج مقاومت فشاری و مقاومت کششی، پیش‌بینی مدول گسیختگی، جذب آب نمونه‌ها و شاخص فعالیت پوزولانی بنتونیت در بتن با توجه به استاندارد ASTM-C618 مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

#### ۳-۱- آزمایش اسلامپ

نتایج به دست آمده از آزمایش اسلامپ در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود با افزایش درصد بنتونیت جایگزین بخشی از سیمان، اسلامپ نمونه به شدت کاهش یافته است. اسلامپ همه نمونه‌ها، 5BC، 10BC، 15BC، 20BC و 25BC، 30BC و 35BC، نسبت به CM به ترتیب ۶٪، ۱۵٪، ۲۶٪، ۳۲٪، ۳۸٪، ۴۳٪ و ۴۹٪ کاهش یافته است. براساس نتایج مشاهده می‌شود در صورت افزایش درصد بنتونیت بیش از ۱۰٪ کارایی مخلوط به شدت کاهش می‌یابد. آزمایش اسلامپ یکی از نمونه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۷: نتایج آزمایش اسلامپ

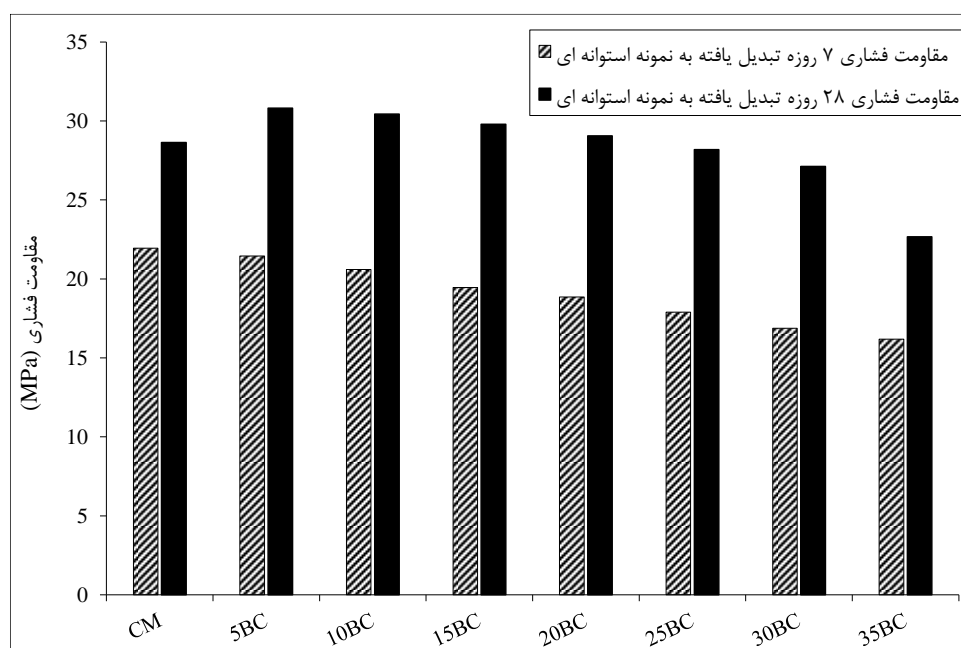
درصد مونت موریلونیت بنتونیت بسیار زیاد است به همین دلیل باعث کاهش اسلامپ بتن حاوی بنتونیت می شود زیرا ذرات آن بسیار کوچک و سطح بزرگی دارند و همچنین مونت موریلونیت درصد جذب آب بالایی دارد که با نسبت آب به مواد چسبنده مشابه با CM، کارایی (اسلامپ) کمتری کسب می کند که در مطالعات پیشین همین نتایج به دست آمده است [۳۷]، [۳۸].



شکل ۸: اسلامپ نمونه 15BC

## ۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی

در شکل ۹، نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی  $10 \times 10 \text{ cm}$  تبدیل یافته به مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای استاندارد ارائه شده است. برای تبدیل مقاومت فشاری نمونه های مکعبی به مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای استاندارد از ضرایب مبحث ۹ مقررات ملی ایران استفاده شده است. در شکل ۱۰ نمونه مکعب بعد از آزمایش مقاومت فشاری نشان داده شده است.



شکل ۹: نتایج مقاومت فشاری



شکل ۱۰: نمونه مکعبی تحت آزمایش مقاومت فشاری

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد:

سرعت واکنش هیدراسیون بنتونیت نسبت به سیمان کمتر است و به همین دلیل مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌ها نسبت به نمونه CM کمتر می‌باشد، یعنی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی بنتونیت، در سنین اولیه رشد چشمگیری نداشته و با افزایش سن، سرعت فرآیند هیدراسیون بین بنتونیت و سیمان افزایش یافته که سبب افزایش مقاومت فشاری شده است [۳۹].

با توجه به نتایج، مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌ها نسبت به نمونه CM کاهش یافته است، می‌توان گفت به دلیل خاصیت پرکنندگی بنتونیت، تأثیر بنتونیت در مقاومت فشاری ۷ روزه کمتر می‌باشد [۴۰]، [۴۱]. مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های حاوی بنتونیت، 5BC، 10BC، 15BC، 20BC، 25BC، 30BC و 35BC به ترتیب ۰.۲٪، ۰.۶٪، ۱.۱٪، ۱.۴٪، ۱.۸٪، ۲.۳٪ و ۲.۶٪، کمتر از CM به دست آمده است.

براساس نتایج، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های 5BC، 10BC، 15BC و 20BC نسبت به CM (به ترتیب ۰.۸٪، ۰.۶٪، ۰.۴٪ و ۰.۱۵٪) افزایش یافته، اما مقاومت فشاری ۲۸ روزه تبدیل یافته نمونه‌های 25BC، 30BC و 35BC نسبت به CM ۲٪، ۵٪ و ۲۱٪ کاهش یافته است؛ در نتیجه با توجه به نتایج مقاومت فشاری تبدیل یافته، درصد مناسب استفاده از بنتونیت در مخلوط‌های حاوی  $400 \text{ kg/m}^3$  سیمان، حداکثر جایگزینی ۲۰ درصد نسبت به وزن سیمان، می‌باشد.

از دلایل کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه بتن‌های حاوی بنتونیت به خصوص بنتونیت سدیم‌دار نسبت به CM، کاهش تولید  $C_3S$  می‌باشد. براساس معادلات بوگ [۴۲] که مربوط به تشکیل ترکیبات اصلی سیمان است، اصلی‌ترین اکسید ترکیب  $C_3S$ ،  $CaO$  می‌باشد که مقدار آن در بنتونیت سدیم‌دار (با توجه به خصوصیات شیمیایی بنتونیت-جدول ۱) بسیار کم است و با کاهش مقدار سیمان، مقدار  $CaO$  ترکیب کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش تولید  $C_3S$  می‌گردد.

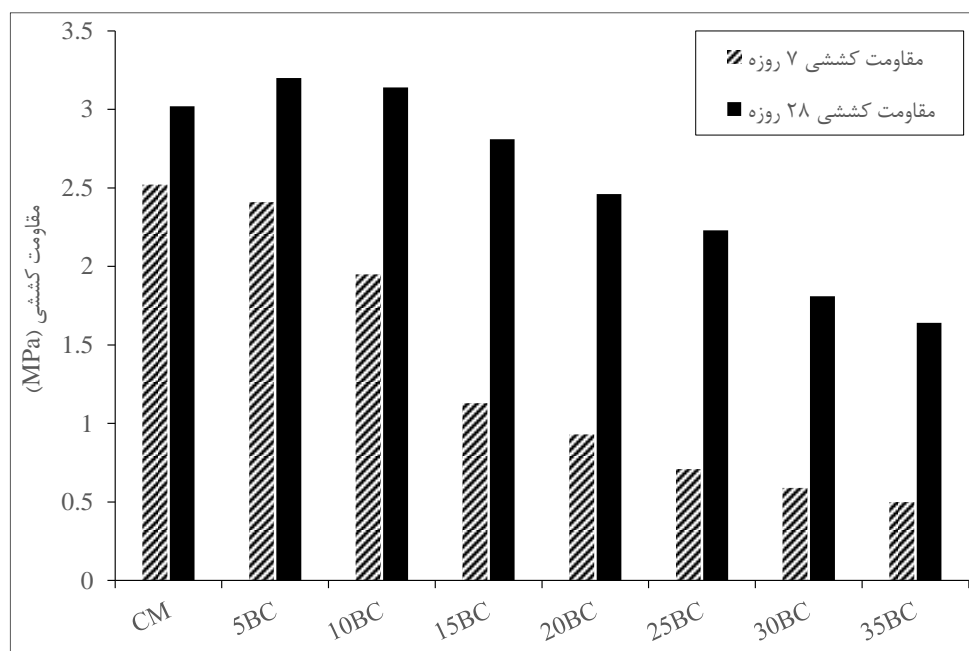
همچنین  $C_3S$  در مقاومت ابتدایی نقش موثری دارد زیرا بسیار سریع‌تر از  $C_2S$  هیدراته شده و باعث افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه می‌شود.  $C_2S$  که در مواد پوزولانی بیشتر تشکیل می‌گردد بعد از گذشت ۷ روز و یا بیشتر هیدراته شده و نقش موثری در افزایش مقاومت فشاری در دراز مدت (سنین بالاتر) دارد. با توجه به خصوصیات شیمیایی بنتونیت افزایش درصد جایگزینی سیمان، باعث کاهش ژل توپرموریت ( $C-S-H$ ) می‌شود که از دیگر دلایل کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی بنتونیت بیشتر نسبت به CM می‌باشد. ژل توپرموریت ( $C-S-H$ ) یک کلسیم سیلیکات هیدراته معدنی کریستالی شکل است که محصول ترکیب مولکول‌های آهک، سیلیس و آب می‌باشد.

با افزایش درصد بنتونیت سدیم‌دار به جای سیمان، میزان آهک در مخلوط کاهش می‌یابد (با توجه به خصوصیات شیمیایی بنتونیت-جدول ۱) و باعث کاهش نسبت  $C/S$  می‌شود که همین امر سبب ضعیف شدن پیوند ژل سیلیکات هیدراته یا ژل توپرموریت ( $C-S-H$ ) می‌گردد که در نتیجه تولید محصولات  $C_2S$  و  $C_3S$  کاهش می‌یابد. براساس نتایج مقاومت فشاری (مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی تبدیل شده به نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد)، می‌توان درصد بهینه استفاده از بنتونیت در بتن را (برای کسب مقاومت فشاری بهتر نسبت به نمونه کنترل) ۵٪ و ۱۰٪ در نظر گرفت.

آزمایش مقاومت کششی شکافتگی نمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از نیروی فشاری به دست آمده به هنگام آزمایش محاسبه شده است. مقاومت کششی نمونه از طریق معادله استاندارد که در رابطه (۱) ارائه شده، به دست آمده است:

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1)$$

در شکل ۱۱ نتایج مقاومت کششی ارائه شده است. از عوامل موثر بر مقاومت کششی می‌توان به خاصیت کیفیت ملات و سنگدانه‌ها اشاره کرد [۴۳]، [۴۴]. بنتونیت به دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا و ابعاد بسیار ریز (در حدود ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ آنگستروم) خاصیت پرکنندگی دارد. همچنین مونت موریلونیت موجود در بنتونیت خاصیت خمیری بیشتری دارد، در نتیجه سبب ایجاد نرمی در بتن حاوی بنتونیت نسبت به نمونه CM می‌گردد [۴۵]، [۴۶].



شکل ۱۱: نتایج مقاومت کششی

از دیگر عوامل موثر بر مقاومت کششی؛ شکل مولکولی، درجه بلورینگ و پیوند بین مولکولی می‌باشد [۴۵]، [۴۶]. از لحاظ شکل و درجه بلورینگ بنتونیت می‌توان گفت بنتونیت به دلیل داشتن شکل آمورف و پسته پسته (حالتی که مولکول‌ها در یکدیگر گره خورده و شکل منظمی ندارند) و درجه بلورینگ پایین، خاصیت شکنندگی و سختی کمتری دارد (شکل ۲). به همین دلیل رفتار نمونه حاوی بنتونیت در مقاومت کششی نسبت به نمونه CM (بتن معمولی) باید بهتر باشد، اما با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۱۱ این چنین نیست. در شکل ۱۲ نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش مقاومت کششی نشان داده شده است.



شکل ۱۲: نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش مقاومت کششی

یکی از عوامل موثر بر مقاومت کششی پیوند بین مولکولی می‌باشد. همین امر دلیل ضعف بنتونیت در مقاومت کششی نسبت به نمونه CM (بتن معمولی) است؛ زیرا بنتونیت پیوند مولکولی از نوع واندروالسی دارد (پیوند واندروالسی از لحاظ قدرتی در میان انواع پیوندهای مولکولی ضعیف‌ترین می‌باشد) و با افزایش درصد بنتونیت جایگزین، آزمایش مقاومت کششی شکافتگی این نمونه‌ها نسبت به CM کاهش می‌یابد [۴۵]، [۴۶].

در میان عوامل موثر بر مقاومت کششی، مهم‌ترین آن‌ها در رابطه با استفاده از مواد پوزولانی، پیوند بین مولکولی است [۴۴]. نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها نشان می‌دهد:

مقاومت کششی ۷ روزه همه نمونه‌ها نسبت به نمونه CM کاهش یافته است. همان‌طور که برای مقاومت فشاری گفته شد، دلیل کاهش مقاومت کششی ۷ روزه نمونه‌های حاوی بنتونیت نسبت به نمونه CM پایین بودن سرعت واکنش هیدراسیون بنتونیت نسبت به سیمان است. همچنین بنتونیت در سنین اولیه نمی‌تواند تأثیر مطلوبی بر مقاومت بتن داشته باشد.

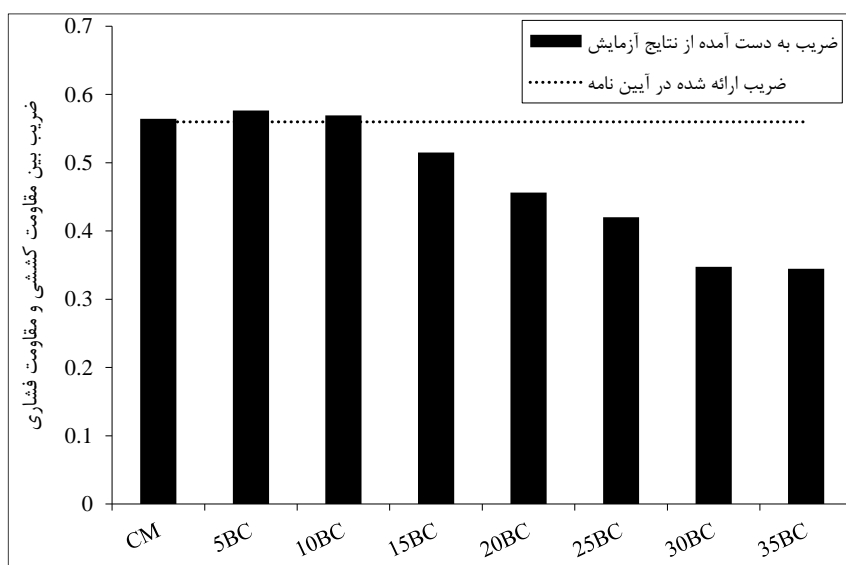
در نمونه‌های 5BC و 10BC مقاومت کششی ۲۸ روزه نسبت به CM، به ترتیب ۶٪ و ۴٪ افزایش یافته است. در نمونه‌های 15BC، 20BC، 25BC، 30BC و 35BC مقاومت کششی ۲۸ روزه نسبت به CM، به ترتیب ۷٪، ۱۸/۵٪، ۲۶٪، ۴۰٪، ۴۶٪ کاهش یافته است. به دلیل آن که پیوند بین مولکولی ذرات بنتونیت ضعیف می‌باشد و به راحتی شکسته می‌شوند، با افزایش درصد بنتونیت بیش از ۱۰٪ نسبت به وزن سیمان، مقاومت کششی به شدت کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۳ ضریب به دست آمده از رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی نشان داده شده است. بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی رابطه‌ای وجود دارد اما تناسب مستقیمی با یکدیگر ندارند. براساس استاندارد [۴۷] *ACI-318-14* رابطه‌ای بین مقاومت کششی میانگین اندازه‌گیری شده از آزمایش شکافتگی نمونه‌های استوانه‌ای ( $f_t$ ) و مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد ( $f'_c$ ) ارائه شده، که در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$f_t = 0.56\sqrt{f'_c} \quad (2)$$

برای محاسبه ضریب میان مقاومت کششی و مقاومت فشاری از نتایج مقاومت فشاری تبدیل یافته به نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد استفاده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۳، ضریب به دست آمده بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی آزمایشگاهی نسبت به ضریب ارائه شده در استاندارد ACI، در برخی نمونه‌های حاوی بنتونیت کمتر می‌باشد. با توجه به افزایش مقاومت

فشاری و مقاومت کششی نمونه‌های 5BC و 10BC نسبت به CM، ضریب به دست آمده بین هر دو مقاومت برای این نمونه‌ها، بیشتر از ضریب پیشنهادی استاندارد است. می‌توان گفت دلیل این امر استفاده از درصد بهینه بنتونیت (۵ و ۱۰ درصد بنتونیت) می‌باشد.



شکل ۱۳: مقایسه ضریب بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری با ضریب استاندارد ACI

دلیل کاهش ضریب میان مقاومت فشاری و مقاومت کششی در دیگر نمونه‌ها نسبت به ضریب ارائه شده در استاندارد، افزایش درصد بنتونیت است، زیرا با افزایش درصد بنتونیت مقاومت کششی بتن به شدت کاهش می‌یابد و به همین دلیل ضریب به دست آمده بین این دو مقاومت کمتر از ضریب پیشنهادی استاندارد می‌باشد.

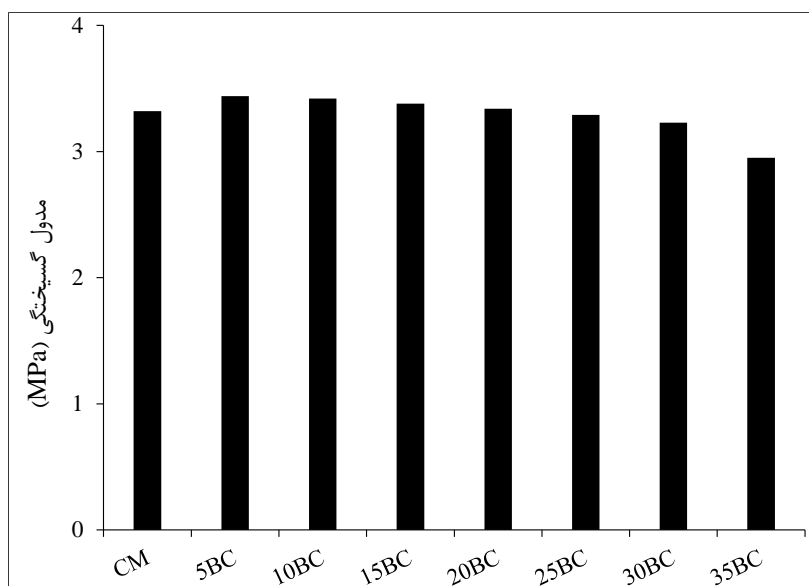
### ۳-۳- پیش‌بینی مدول گسیختگی

مقاومت کششی ناشی از خمش، مقاومت خمشی و یا مدول گسیختگی نامیده می‌شود که با  $f_r'$  نشان داده می‌شود. آزمایش خمش برای کنترل کیفی بتن در تیرها، دال‌ها و روسازی‌های صنعت حمل و نقل دارای اهمیت می‌باشد زیرا رفتار بتن را در خمش به دست می‌آورد [۱۷]. نتایج به دست آمده از پیش‌بینی مدول گسیختگی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از مقاومت فشاری بتن‌های تولید شده (مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی تبدیل یافته به مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد)، می‌توان مدول گسیختگی این بتن‌های را براساس استاندارد ACI 318-14 پیش‌بینی کرد. رابطه ارائه شده در استاندارد ACI 318-14 در رابطه ۳ نشان داده شده است.

$$f_r' = 0.62\lambda\sqrt{f_c'} \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $\lambda$  یک ضریب اصلاحی می‌باشد که برای بتن‌های با وزن معمولی برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.

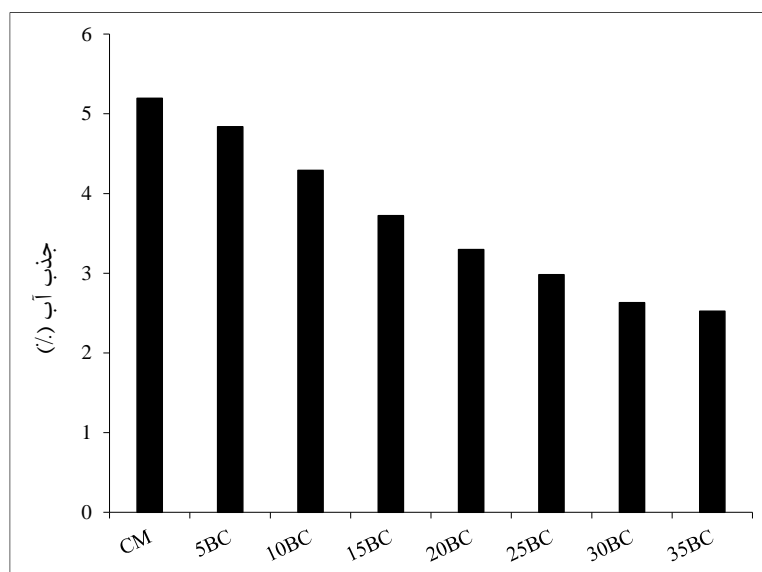
همان طور که مشاهده می‌شود مدول گسیختگی پیش‌بینی شده نمونه‌های 5BC، 10BC، 15BC و 20BC (به ترتیب ۳/۷٪، ۳/۱٪، ۲٪ و ۱/۷٪) نسبت به CM افزایش یافته اما نمونه‌های 25BC، 30BC و 35BC نسبت به CM به ترتیب ۰/۸٪، ۲/۷٪ و ۱/۱٪ کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان تاثیر نامطلوب بنتونیت در مقاومت خمشی بتن عنوان کرد، اما برای نظر دقیق‌تر باید نمونه‌های خمشی ساخته و مورد آزمایش مقاومت خمشی قرار گیرند. با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی و همچنین پیش‌بینی مدول گسیختگی، برای دستیابی به بهترین نتایج درصد بنتونیت جایگزین سیمان باید کمتر از ۱۵٪ باشد.



شکل ۱۴: نتایج مدول گسیختگی پیش‌بینی شده

## ۴-۳- جذب آب

نتایج جذب آب در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، با افزایش درصد بنتونیت جذب آب نمونه‌ها کاهش یافته است. طی انجام واکنش شیمیایی بین پوزولان‌های طبیعی (بنتونیت) و هیدروکسید کلسیم ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) خمیر سیمان هیدراته، به جای تولید آهک، آهک مصرف می‌شود و به دلیل خاصیت پرکنندگی و کوچک بودن اندازه ذرات بنتونیت نسبت به سیمان، در صورت استفاده و افزایش درصد جایگزینی، تخلخل بتن کاهش یافته و به همین دلیل جذب آب نمونه کاهش می‌یابد و در نتیجه سبب بهبود دوام مخلوط می‌شود [۴۸]–[۵۰]. با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین در خصوص بررسی تأثیر استفاده از بنتونیت در جایگزینی سیمان، با افزایش بنتونیت تا مقدار ۳۰٪ جذب آب نیز کاهش یافته است [۳۷]. هر چه مقدار بنتونیت جایگزین سیمان افزایش یابد (5BC، 10BC، 15BC، 20BC، 25BC، 30BC و 35BC)، جذب آب نمونه نسبت به CM (۰.۷٪، ۱.۷٪، ۲.۸٪، ۳.۶٪، ۴.۲٪، ۴.۹٪ و ۵.۱٪) کاهش می‌یابد.



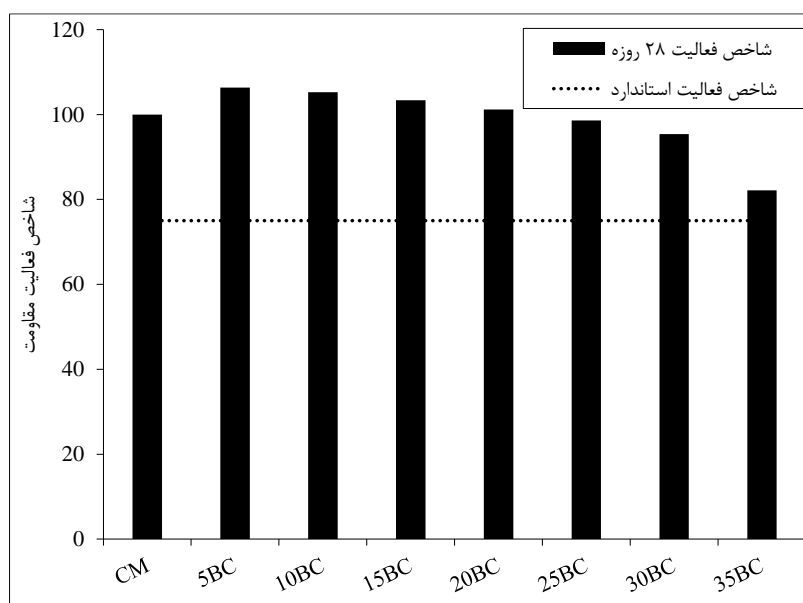
شکل ۱۵: نتایج جذب آب

## ۳-۵- شاخص فعالیت مقاومت

براساس استاندارد ASTM C618 شاخص فعالیت ۲۸ روزه در بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی، باید حداقل ۷۵٪ بتن مرجع باشد. نتایج به دست آمده از شاخص فعالیت مقاومت (Strength Activity Index-SAI) در شکل ۱۶ نشان داده شده است. برای محاسبه شاخص فعالیت مقاومت مواد پوزولانی با سیمان پرتلند براساس استاندارد ASTM-C311-30 [۵۱] از رابطه (۴) استفاده شده است.

$$SAI = \frac{A}{B} \times 100 \quad (۴)$$

که A، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی حاوی بنتونیت (مواد پوزولانی) براساس MPa و B مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی مرجع (نمونه کنترل) براساس MPa است.



شکل ۱۶: شاخص فعالیت پوزولانی نمونه‌ها

نتایج شاخص فعالیت مقاومت نشان می‌دهد:

شاخص فعالیت ۲۸ روزه نمونه‌های 5BC، 10BC، 15BC، 20BC نسبت به CM به ترتیب ۸٪، ۶٪، ۴٪ و ۱٪ افزایش یافته است. در صورت استفاده از پوزولان‌ها تا سن حدود ۱۴ روز، این مواد نمی‌توانند تأثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت فشاری داشته باشند. با توجه به نتایج شاخص فعالیت، می‌توان از بنتونیت در تولید بتن استفاده کرد.

در خصوص تأثیر استفاده از بنتونیت بر چگالی و مدول الاستیسیته بر بتن، به دلیل وزن کم بنتونیت چگالی نمونه‌های حاوی بنتونیت نسبت به نمونه کنترلی کاهش می‌یابد. در خصوص مدول الاستیسیته با توجه به فرمول محاسبه مدول الاستیسیته در استانداردها، می‌توان پیش‌بینی کرد با توجه به مقاومت فشاری به دست آمده در نمونه‌هایی که درصد بنتونیت آن‌ها افزایش یافته است، مدول الاستیسیته نسبت به نمونه کنترل، کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده از نمونه‌های حاوی درصدهای بیشتر بنتونیت می‌توان نتیجه گرفت که در صورت افزایش درصد بنتونیت جایگزین سیمان بیش از ۳۵٪، تأثیر منفی در خصوصیات مکانیکی بتن (مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول گسیختگی) خواهد داشت به دلیل درصد استفاده از بنتونیت در بتن، حداکثر ۱۵٪ می‌باشد.



## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر استفاده از بنتونیت برای جایگزینی بخشی از سیمان پرداخته شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده عبارت است از:

- با توجه به مشخصات بنتونیت، استفاده از آن می‌تواند به عنوان پوزولان طبیعی و گزینه سازگار با محیط زیست، به منظور جایگزین کردن بخشی از سیمان، در صنعت ساخت بتن مورد استفاده قرار گیرد و سبب افزایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن گردد.

- استفاده از بنتونیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، سبب کاهش کارایی بتن می‌شود. 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 ۱۰٪ اسلامپ بتن تولید شده نسبت به CM کاهش می‌یابد اما همچنان اسلامپ مناسبی دارد.

- با توجه به نتایج مقاومت فشاری، اگر درصد استفاده از بنتونیت جایگزین سیمان کمتر از ۲۵٪ باشد (5BC, 10BC, 15BC و 20BC)، نسبت به CM مقاومت فشاری بالاتری کسب می‌شود. بر همین اساس برای به دست آوردن مقاومت فشاری مناسب در بتن‌های با عیار سیمان  $400 \text{ kg/m}^3$ ، حداکثر درصد استفاده از بنتونیت به عنوان جایگزین سیمان، ۲۰٪ می‌باشد.

- با توجه به خصوصیات شیمیایی سیمان و بنتونیت سدیم‌دار، با افزایش درصد بنتونیت جایگزین سیمان، میزان آهک تولید شده از خمیر سیمان هیدراته کاهش یافته و به همین دلیل ژل C-S-H کاهش می‌یابد. همچنین در صورت استفاده از بنتونیت به دلیل کاهش مقدار آهک تولیدی از خمیر سیمان هیدراته شده  $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$  مقاومت فشاری در سنین اولیه نسبت به CM کاهش یافته و با افزایش سن نمونه و شروع فرآیند هیدراسیون بنتونیت مقاومت فشاری نسبت به CM افزایش می‌یابد.

- با توجه به نتایج مقاومت کششی، استفاده از ۵٪ و ۱۰٪ بنتونیت به جای سیمان، نسبت به CM مقاومت کششی بهتری کسب شده است. با افزایش درصد جایگزینی سیمان بیش از ۱۰ درصد مقاومت کششی بتن حاوی بنتونیت جایگزین شده، کاهش می‌یابد. همچنین اگر درصد استفاده از بنتونیت بیش از ۱۵٪ شود (20BC, 25BC, 30BC و 35BC) مقاومت کششی بتن تولید شده نسبت به CM به شدت کاهش می‌یابد. به همین دلیل با توجه به نتایج به دست آمده، برای کسب مقاومت کششی مناسب 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) بیشتر از ۱۰٪، ضریب به دست آمده بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری، کمتر از ضریب ۰/۵۶ ارائه شده در استاندارد ACI 318-14 می‌باشد. بر همین اساس حداکثر درصد بنتونیت جایگزین سیمان، برای کسب مقاومت فشاری و مقاومت کششی مطلوب، ۱۰٪ است.

- با توجه به نتایج مدول گسیختگی پیش‌بینی شده از رابطه استاندارد، در نمونه‌های دارای ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ بنتونیت به جای بخشی از سیمان، مدول گسیختگی نسبت به نمونه CM افزایش داشته است. در صورت افزایش درصد بنتونیت بیش از ۲۰٪ مدول گسیختگی به شدت کاهش می‌یابد، زیرا همانند مقاومت کششی چسبندگی و پیوند بین مولکولی بنتونیت و دیگر ذرات ضعیف شده و به همین دلیل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول گسیختگی کمتری به دست می‌آید. همچنین با توجه به نتایج مقاومت فشاری، با افزایش درصد بنتونیت جایگزین سیمان بیش از ۲۰٪، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد در نتیجه مدول گسیختگی پیش‌بینی شده که تابعی از مقاومت فشاری است، کاهش می‌یابد.

- با توجه به نتایج جذب آب به دست آمده، با افزایش درصد بنتونیت جایگزین سیمان، جذب آب نمونه‌های حاوی بنتونیت نسبت به CM کاهش می‌یابد، اما با افزایش درصد بیش از ۳۰٪ (نمونه 35BC) جذب آب نسبت به CM روند رو به افزایش پیدا کرده

است که می‌توان دلیل این امر را کاهش مقدار سیمان و چسبندگی لازم (پیوند بین مولکولی) بین ذرات در مخلوط تولید شده عنوان کرد.

با توجه به اهداف این پژوهش و براساس یافته‌های آن، می‌توان از بنتونیت که یک پوزولان طبیعی است به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده کرد. این جایگزینی باعث بهبود مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن و کاهش مصرف سیمان و حفظ منابع انرژی و مواد اولیه می‌شود و در نتیجه سبب کاهش آسیب‌های زیست محیطی تولید سیمان و بتن می‌گردد. درصد بهینه جایگزینی بنتونیت نسبت به وزن سیمان در بتن (با عیار سیمان  $400 \text{ kg/m}^3$ )،  $5\%$  و  $10\%$  می‌باشد که بتن به دست آمده مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول گسیختگی (نتایج پیش‌بینی شده) و نفوذپذیری (نتایج جذب آب) مناسبی را برای استفاده در سازه‌ها کسب کرده است.

## مراجع

- [1] M. Yılmaz and A. Bakış, "Sustainability in Construction Sector," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 195, pp. 2253–2262, 2015, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.06.312.
- [2] N. D. Oikonomou, "Recycled concrete aggregates," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 315–318, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>.
- [3] S. Marinković, J. Dragaš, I. Ignjatović, and N. Tošić, "Environmental assessment of green concretes for structural use," *J. Clean. Prod.*, vol. 154, pp. 633–649, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.015>.
- [4] V. Glinskiy, L. Serga, and M. Khvan, "Assessment of Environmental Parameters Impact on the Level of Sustainable Development of Territories," *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 625–630, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.145>.
- [5] C.-H. Huang, S.-K. Lin, C.-S. Chang, and H.-J. Chen, "Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 46, pp. 71–78, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.016>.
- [6] D. Nagrockiene, I. Pundienė, and A. Kicaite, "The effect of cement type and plasticizer addition on concrete properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 45, pp. 324–331, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.076>.
- [7] D. Nagrockiene and G. Girskas, "Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition," *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 964–969, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.133>.
- [8] F. Cassagnabère, P. Diederich, M. Mouret, G. Escadeillas, and M. Lachemi, "Impact of metakaolin characteristics on the rheological properties of mortar in the fresh state," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, pp. 95–107, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.001>.
- [9] G. V. K. Reddy, V. R. Rao, and M. A. K. Reddy, "Experimental investigation of strength parameters of cement and concrete by partial replacement of cement with Indian calcium bentonite," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 512–518, 2017.
- [10] K. C. Onyelowe *et al.*, "Strength of pozzolan soil blend in chemically improved lateritic soil for pavement base material purpose," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 410–416, 2019, doi: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz035>.
- [11] A. Trümer, H.-M. Ludwig, M. Schellhorn, and R. Diedel, "Effect of a calcined Westerwald bentonite as supplementary cementitious material on the long-term performance of concrete," *Appl. Clay Sci.*, vol. 168, pp. 36–42, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.10.015>.
- [12] L. Zhang, P. De Schryver, B. De Gussemé, W. De Muynck, N. Boon, and W. Verstraete, "Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: a review," *Water Res.*, vol. 42, no. 1–2, pp. 1–12, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.013>.
- [13] T. Noeiaghajaei, A. Mukherjee, N. Dhama, and S.-R. Chae, "Biogenic deterioration of concrete and its mitigation technologies," *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 575–586, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.144>.
- [14] M. K. Sharbatdar, M. Abbasi, and P. Fakharian, "Improving the Properties of Self-compacted Concrete with Using Combined Silica Fume and Metakaolin," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 2020, doi:

- 10.3311/PPci.11463.
- [15] S.-H. Chen, H.-Y. Wang, and J.-W. Zhou, "Investigating the properties of lightweight concrete containing high contents of recycled green building materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 98–103, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.040>.
- [16] D. Tavakoli, P. Fakharian, and J. de Brito, "Mechanical properties of roller-compacted concrete pavement containing recycled brick aggregates and silica fume," *Road Mater. Pavement Des.*, pp. 1–22, 2021.
- [17] S. M. Qiyami Taklimy, Rezaifar.Omid, and M. Gholhaki, "Effect of Substitution of Natural Calcareous and Clay Materials with Cement in Low-Carbon Concretes," *Transp. Infrastruct. Eng. (JTIE)-(In Persian)*, vol. 5, no. 4, pp. 40–49, 2019, doi: 10.22075/jtie.2019.19135.1431.
- [18] S. A. Memon, R. Arsalan, S. Khan, and T. Y. Lo, "Utilization of Pakistani bentonite as partial replacement of cement in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 237–242, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.021>.
- [19] A. A. Ramezani pour and A. R. Pourkhorshidi, "Durability of concretes containing supplementary cementing materials under hot and aggressive environment," *Spec. Publ.*, vol. 221, pp. 633–646, 2004.
- [20] A. Standard, "ASTM C618-08a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete." American Society for Testing and Materials, 2010.
- [21] S. M. Qiyami Taklymi, O. Rezaifar, and M. Gholhaki, "Application of hot and dry climate pozzolans in structural materials and load bearing walls (In Persian-Book)," in *Application of hot and dry climate pozzolans in structural materials and load bearing walls*, Tehran, 2020, p. 147.
- [22] R. Moghanloo and H. Aghajani, "Study of the effect of bentonite and cement on the strength and permeability of plastic concrete in laboratory conditions (In Persian)," 2013.
- [23] A. T. Amlashi, P. Alidoust, A. R. Ghanizadeh, S. Khabiri, M. Pazhouhi, and M. S. Monabati, "Application of computational intelligence and statistical approaches for auto-estimating the compressive strength of plastic concrete," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, pp. 1–32, 2020.
- [24] A. T. Amlashi, S. M. Abdollahi, S. Goodarzi, and A. R. Ghanizadeh, "Soft computing based formulations for slump, compressive strength, and elastic modulus of bentonite plastic concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 230, pp. 1197–1216, 2019.
- [25] H. Abbaslou, A. R. Ghanizadeh, and A. T. Amlashi, "The compatibility of bentonite/sepiolite plastic concrete cut-off wall material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 1165–1173, 2016.
- [26] A. Khaloo, "Parameters Influencing Behavior of plastic Concrete (In Persian)." Sharif University of Technology, Tehran, 1996.
- [27] S. M. Qiyami Taklymi, O. Rezaifar, and M. Gholhaki, "Utilization of bentonite as partial replacement of cement in low-strength concrete (In Persian)," *J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 5, no. 2, pp. 25–40, 2020, doi: 10.30478/jcsm.2020.228745.1156.
- [28] H. Abbaslou, A. Tavana Amlashi, A. Ghanizadeh, and S. Azemi, "Effects of mixing design and curing time on compressive and tensile strength of bentonite plastic concrete (In Persian)," *Concr. Res.*, vol. 10, no. 2, pp. 109–124, 2017, doi: doi:10.22124/JCR.2017.2418.
- [29] H. H. Lee, C.-W. Wang, and P.-Y. Chung, "Experimental Study on the Strength and Durability for Slag Cement Mortar with Bentonite," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 3, p. 1176, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/app11031176>.
- [30] B. Masood, A. Elahi, S. Barbhuiya, and B. Ali, "Mechanical and durability performance of recycled aggregate concrete incorporating low calcium bentonite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 237, p. 117760, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117760>.
- [31] S. M. Qiyami Taklymi, O. Rezaifar, and M. Gholhaki, "Investigating the properties of bentonite and kaolin modified concrete as a partial substitute to cement," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 12, pp. 1–14, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03380-z>.
- [32] C. ASTM, "ASTM-C136: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates." 2006.
- [33] C. ASTM, "ASTM-C128: Standard test method for specific gravity and absorption of," 2001.
- [34] A. Standard, "ASTM-C127-07: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate," *Stand. test method Specif. gravity Absorpt.*, 2007.
- [35] C. ASTM, "ASTM-C143: Standard test method for slump of hydraulic cement concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA," vol. 4. 1996.

- [36] BSI, "Standard: Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens/ BS EN 12390-3: 2009." BRITISH STANDARD, 2011.
- [37] S. Ahmad, S. A. Barbhuiya, A. Elahi, and J. Iqbal, "Effect of Pakistani bentonite on properties of mortar and concrete," *Clay Miner.*, vol. 46, no. 1, pp. 85–92, 2011, doi: <https://doi.org/10.1180/claymin.2011.046.1.85>.
- [38] J. Mirza, M. Riaz, A. Naseer, F. Rehman, A. N. Khan, and Q. Ali, "Pakistani bentonite in mortars and concrete as low cost construction material," *Appl. Clay Sci.*, vol. 45, no. 4, pp. 220–226, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.06.011>.
- [39] T. Akram, S. A. Memon, and K. Iqbal, "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*, pp. 235–245.
- [40] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete microstructure, properties and materials*. 2017.
- [41] P. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing, 2006.
- [42] A. Nevill, G. Broxe, A. A. RamezaniPour, and N. Araby, *Concrete Technology (Book)*. Tehran: Negarande Danesh, 2016.
- [43] J. A. Bogas, J. de Brito, and J. M. Figueiredo, "Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 89, pp. 187–195, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.015>.
- [44] A. M. Neville, *Properties of concrete*, vol. 4. Longman London, 1995.
- [45] H. Erfany, *Crystallography (in Persian)*. Tehran: Tehran University.
- [46] R. Falihi, "Causes of using sodium bicarbonate in cement slurry for injection in rocks (In Persian)."
- [47] A. C. I. Committee and I. O. for Standardization, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary," 2008.
- [48] S.-C. Pan, D.-H. Tseng, C.-C. Lee, and C. Lee, "Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 11, pp. 1749–1754, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00165-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00165-0).
- [49] B. B. Sabir, S. Wild, and J. Bai, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 23, no. 6, pp. 441–454, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5).
- [50] M. J. Shannag, "High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 6, pp. 399–406, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00037-8).
- [51] A. Standard, "ASTM-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.