

نشریه علمی مهندسی عمران و فناوری های نوین

سال اول، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲: صص ۶۳-۵۵

علمی

## ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن قلیا فعال حاوی متاکائولین و

### دوده سیلیسی

ابوالفضل حسینی<sup>۱\*</sup>، میلاد گهر<sup>۲</sup>، ابوالفضل محمدی جانکی<sup>۳</sup>، محمدحسین کیقبادی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۵

### چکیده

سیمان به عنوان دومین محصول پر مصرف جهان، سهمی حدود ۷ درصد در تولید کربن دی اکسید را دارا می باشد. ۹۴ درصد سهم انرژی مورد نیاز برای تولید بتن از سیمان پرتلند صرف سیمان پرتلند می شود جایگزینی بتن قلیا فعال بجای بتن با سیمان پرتلند می تواند راهکاری جهت کاهش آلودگی ها ناشی از سیمان باشد. همچنین میزان انرژی مورد نیاز برای تولید متاکائولین حدود ۷ درصد تولید سیمان پرتلند می باشد. این اثرات مخرب باعث شد تا توجه بیشتر به استفاده مواد پوزولانی گردد. در این پژوهش مقاومت فشاری، خمشی، کششی و نفوذپذیری یون کلر بتن قلیا فعال حاوی متاکائولین و دوده سیلیسی مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت فشاری، خمشی، کششی و نفوذپذیری یون کلر اندازه گیری شد. در این پژوهش با افزایش جایگزینی دوده سیلیسی بجای متاکائولین در بتن، مقاومت فشاری، خمشی، کششی و نفوذپذیری یون کلر کاهش یافت، در واقع بهترین نمونه بتن قلیا فعال حاوی متاکائولین خالص می باشد که دارای مقاومت فشاری ۴۸/۴۵ مگاپاسکال، مقاومت خمشی ۵/۶۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۵/۱ مگاپاسکال، جریان عبور یون کلر ۵۷۶۷ کولمب می باشد.

**کلید واژه ها:** بتن قلیا فعال، متاکائولین، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، نفوذ یون کلر

<sup>۱</sup> استاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران - نویسنده مسئول (hassani@modares.ac.ir)

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

<sup>۳</sup> مدرس و پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

## ۱- مقدمه

سیمان به عنوان دومین محصول پر مصرف جهان، سهمی حدود ۷ درصد در تولید کربن دی اکسید را دارا می‌باشد. ۹۴ درصد سهم انرژی مورد نیاز برای تولید بتن از سیمان پرتلند صرف سیمان پرتلند می‌شود جایگزینی بتن قلیا فعال بجای بتن با سیمان پرتلند می‌تواند راهکاری جهت کاهش آلودگی‌ها ناشی از سیمان باشد. همچنین میزان انرژی مورد نیاز برای تولید متاکائولین حدود ۷ درصد تولید سیمان پرتلند می‌باشد. این اثرات مخرب باعث شد تا توجه بیشتر به استفاده مواد پوزولانی گردد، در همین راستا استفاده از بتن قلیا فعال (ژئوپلیمری) در صنعت ساختمان به عنوان یک راه‌حل مطرح بوده است [۱،۲].

به طور کلی عموم مردم انتظار طول عمر و سرویس‌دهی طولانی‌تری از زیرساخت‌های عمرانی را دارند. حالت ایده‌آل برای زیرساخت‌ها این است که هزینه کمتری برای حفظ و مرمت آن‌ها در نظر گرفته شود. بسیاری از دانشمندان و مهندسان به دنبال راه حل صحیح برای طراحی ساختارهایی هستند که دوام بیشتر را نشان دهند و هزینه تعمیر کمتر و عمر طولانی‌تری را تضمین می‌کنند. روش بتن قلیا فعال حاوی متاکائولین و دوده سیلیسی یکی از روش‌هایی است که مجامع علمی جهان به آن توجه خاصی دارد [۳،۴].

پایه‌های علمی اساسی این بتن قلیا فعال توسط پوردن در سال ۱۹۴۰ بنا شد. پوردن بیش از ۳۰ نوع سرباره کوره آهنگدازی را با محلول هیدروکسید سدیم ترکیب کرد و در نهایت به ترکیبی قابل مقایسه با سیمان پرتلند دست یافت و بدین گونه زمینه شکل‌گیری نوع تازه‌ای از سیمان و بتن با نام قلیا فعال به دنیا معرفی گردید [۴].

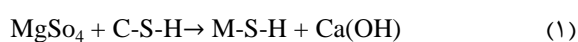
بتن سرباره قلیا فعال با توجه به ساختار آلومینو سیلیکاتی که دارد می‌تواند دوام بیشتری نسبت به بتن با سیمان معمولی داشته باشد. پلیمر معدنی آلومینیوسیلیکات که به آن بتن با سیمان قلیا فعال (بتن ژئوپلیمری) گفته می‌شود دارای ساختاری سه بعدی می‌باشد، که خمیر ژئوپلیمر می‌تواند به عنوان یک چسباننده در تولید بتن به جای خمیر سیمان مورد استفاده قرار گیرد [۵].

انواع بتن ژئوپلیمری از نظر جایگزین نسبت به سیمان شامل جایگزین درصدی از سیمان یا جایگزین کامل به همراه فعال کننده می‌باشد. در پژوهش صورت گرفته از مورد جایگزینی کامل به همراه فعال کننده استفاده شده است. نقش فعال کننده قلیایی شکستن باندهای موجود در ساختار فاز شیشه‌ای سرباره و در نتیجه افزایش سرعت حل شدن اجزای یونی است. واکنش ژئوپلیمریزاسیون، یک واکنش شیمیایی بین اکسیدهای آلومینوسیلیکات جامد و محلول‌های سیلیکات فلز قلیایی، در

محیطی با قلیابیت بالا است که حاصل آن، یک ساختار پلیمری سه بعدی غیر بلوری تا نیمه بلوری، شامل پیوندهای Si-O-Al می‌باشد [۶].

ربانی و همکارانش بر روی اثر پوزولان‌های مختلف بر عملکرد ملات در محیط سولفاته ۷٪ شامل دوده سیلیس ۱۰ و ۱۵ درصد، متاکائولن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزین سیمان، ژئولیت ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد با نسبت آب به سیمان ۰/۵۴ مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها ۵۰×۵۰×۵۰ mm ساخته شد، بعد از ۳ روز عمل آوری، در محیط سولفاته قرار داده شدند. نمونه‌های پوزولانی به جز نمونه حاوی ۲۵٪ ژئولیت، مقاومت فشاری بیشتری از ملات پایه نظیر خود داشت. بهترین عملکرد ملات‌ها مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۰٪ متاکائولین می‌باشد، که در تمامی سنین نسبت به سایر نمونه‌ها مقاومت فشاری بیشتری را نشان داد. در کل پوزولان‌ها باعث بهبود خواص مکانیکی ملات در مواجهه با حمله سولفات‌ها می‌شود که به ترتیب در میان نمونه‌ها متاکائولن، دوده سیلیسی و ژئولیت بیشترین دوام را در مقابله با حمله سولفات‌ها از خود نشان می‌دهد [۷].

بهفرنیا و همکاران به بررسی استفاده از پوزولان‌ها بر دوام در برابر حمله سولفات منیزیم پرداختند. در این تحقیق از دوده سیلیسی، متاکائولین و ژئولیت با درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد استفاده گردید، نمونه‌های بتنی بعد از ۶ و ۹ ماه غوطه‌وری در محلول سولفات منیزیم ۵ و ۱۰ درصد، مقاومت فشاری آن‌ها اندازه‌گیری شد. مطابق با نتایج به دست آمده بیشترین مقاومت فشاری را نمونه بتن با ۱۵٪ دوده سیلیسی داشت، اما دوده سیلیسی در برابر سولفات منیزیم کاهش مقاومت شدید دارد، علت این امر مطابق رابطه (۱) در این فرایند  $MgSO_4$  با C-S-H واکنش می‌دهد و M-S-H را تولید می‌نماید که ماده‌ای غیر چسبنده و مضر می‌باشد. متاکائولین و ژئولیت دوام بهتری در برابر حمله سولفات منیزیم داشته و کمترین انبساط مربوط به ژئولیت است [۸].



دیویدویتس بتن سیمانی و بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره و سیمان آلومینایی را در برابر محلول ۵٪ هیدروکلریک اسید (HCl) و سولفوریک اسید  $(H_2SO_4)$  بررسی کردند، نتایج نشان داد که بتن سیمانی و بتن ژئوپلیمری توانستند در برابر محلول HCl مقاومت کنند اما در برابر محلول اسید سولفوریک تنها بتن ژئوپلیمری مقاوم بود [۹].

با توجه به ماهیت واکنش‌های پوزولانی، استفاده از مواد جایگزین سیمان موجب کاهش میزان آهک و نیز بهبود نفوذپذیری بتن می‌گردد [۱۰].

<sup>1</sup> Hydrochloric acid

<sup>2</sup> Sulfuric acid

جهت ساخت نمونه‌های بتن، فعال کننده قلیایی (سیلیکات سدیم و سود) به دلیل این که انحلال سدیم هیدروکسید و آب در طی واکنش گرمازا انجام می‌شود، یک روز قبل از آزمایش ساخته شد. سپس مصالح را وارد میکسر کرده و به وسیله همزن مکانیکی اختلاط صورت می‌گیرد، مخلوط آماده شده سپس در داخل قالب، در دو لایه ریخته و ویبره می‌شود و سپس جهت عمل‌آوری در آب آهک قرار می‌گیرد.

پس از انتخاب مصالح مناسب، ۶ نسبت مخلوط برای ساخت نمونه‌ها در نظر گرفته شد، به همین منظور در این تحقیق دوده سیلیسی با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ جایگزین متاکائولین شده تا مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و نفوذپذیری یون کلر را محاسبه نموده تا بهترین نسبت مخلوط بتن قلیا فعال حاوی متاکائولین بدست آید.

### ۳- مواد و مصالح

برای تهیه نمونه‌های بتنی مورد استفاده در این تحقیق از سنگدانه‌ها (شامل هر دو گروه درشت‌دانه و ریزدانه)، متاکائولین، آب، دوده سیلیسی و محلول فعال کننده قلیایی استفاده شده است. که در ادامه به بیان مشخصات و ویژگی‌های هر کدام پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱- سنگدانه

دانه‌بندی مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C33 می‌باشد. اندازه اسمی بزرگترین سنگدانه ۱۹mm انتخاب گردید، مطابق استاندارد بتن ایران اندازه اسمی بزرگترین سنگدانه باید از یک پنجم کوچکترین بعد داخلی کوچکتر باشد مصالح ریز دانه و درشت دانه استفاده شده هر دو در محدوده مجاز قرار گرفته‌اند. مصالح ریز دانه و درشت دانه استفاده شده هر دو در محدوده مجاز قرار گرفته‌اند [۱۸]. در جدول (۱) دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی نشان داده شده است.

جدول (۱): دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی

شماره الک	۱	۳/۴	۳/۸	۴	۸	درشت دانه
۱۰۰	۹۶	۳۸	۸	۰		
شماره الک	۱۶	۳۰	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	ریز دانه
۸۲	۵۸	۲۶	۷	۲		

از این رو طبق نتایج بدست آمده در پژوهش‌های صورت گرفته، استفاده از مواد جایگزین سیمان نظیر پوزولان‌های طبیعی سبب بهبود دوام بتن می‌شود [۱۱].

پمارو و همکاران به ارزیابی بتن قلیا فعال حاوی متاکائولین پرداختند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هر دو نوع سرباره تاثیر مثبتی بر خواص بتن تازه و خواص مکانیکی بتن سخت شده دارد [۱۲].

در این میان برخی محققین اثر استفاده از مواد جایگزین سیمان را بر دوام بتن منفی ارزیابی کرده‌اند، مشخصات فیزیکی، ترکیبات شیمیایی تشکیل دهنده، ریزی و فعالیت پوزولانی مواد جایگزین سیمان در کنار شرایط آزمایش‌های انجام شده می‌تواند عوامل تاثیر گذار بر وقوع چنین تضادی در نتایج تحقیقات به‌شمار روند. علاوه بر ملاحظات شرح داده شده، استفاده از مواد پلیمری و نیز بهره بردن از سنگدانه‌های مقاوم در برابر حملات شیمیایی نظیر سنگدانه‌های سیلیسی به جای سنگدانه‌های آهکی راهکارهای مناسبی برای افزایش مقاومت بتن در برابر حمله اسیدی به‌شمار می‌روند [۱۳، ۱۴].

نیوین و همکاران به بررسی بتن ژئوپلیمری پرداختند در این تحقیق بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن سیمانی مقاومت کششی، فشاری و خمشی بالاتری داشته است [۱۵].

ارزیابی صورت گرفته بر خواص چهار ماده فعال قلیایی و نتایج بدست آمده اسلامپ و مقاومت فشاری برای بتن ژئوپلیمر حاوی متاکائولین و ملات سرباره فعال شده با سیلیکات سدیم، سرباره متاسیلیکات سدیم و سرباره فعال شده با کربنات سدیم در مقایسه با ملات سیمان پرتلند معمولی نشان داده شده که مواد قلیا فعال به اندازه سیمان پرتلند نوع یک (معمولی) قوی هستند [۱۶].

در رابطه با مقاوم سازی تیرهای بتن مسلح یک ماده تعمیری با استفاده از بتن قلیا فعال حاوی متاکائولین با مقاومت فشاری اولیه بالا مورد بررسی قرار گرفت که در این تحقیق این نتیجه حاصل شد که با افزایش ۱۵ درصد متاکائولین مقاومت خمشی به اندازه ۱۴/۴ درصد نسبت بتن معمولی افزایش پیدا کرد [۱۷].

### ۲- روش تحقیق

جهت تهیه بتن مورد استفاده در این پژوهش از متاکائولین، دوده سیلیسی، آب، سنگدانه‌ها (شامل هر دو گروه درشت‌دانه و ریزدانه)، سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید بعنوان فعال کننده استفاده می‌شود. به منظور فعال سازی متاکائولین از ترکیب سیلیکات سدیم<sup>۱</sup> ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) و هیدروکسید سدیم<sup>۲</sup> ( $\text{NaOH}$ ) استفاده می‌شود.

<sup>۲</sup> Sodium hydroxide

<sup>۱</sup> Sodium silicate

مصرفی بر اساس آزمایش بالن لوشاتلیه ۳/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است. سطح ویژه این سیمان نیز با انجام آزمایش BET ۰/۹۸۸ متر مربع بر گرم بدست آمد.

#### ۴- نسبت‌های مخلوط و ساخت بتن

مواد سیمانی بتن ژئوپلیمری مواد جامدی هستند که از متاکائولین، دوده سیلیسی، سود و ذرات جامد سیلیکات سدیم ساخته شده است. جهت ساخت بتن، ابتدا کل مصالح سنگی درشت دانه را در داخل مخلوط کن ریخته و همراه با ۵۰ درصد فعال کننده و ۵۰ درصد ماده سیمانی به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شد، سپس کل مصالح ماسه و ۵۰ درصد باقی مانده ماده سیمانی و فعال کننده اضافه شد و به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط شدند. اختلاط به وسیله همزن مکانیکی صورت گرفته سپس مخلوط آماده شده را در داخل قالب‌هایی که از قبل آماده کرده می‌ریزیم. در سه لایه بتن ریخته و هر لایه ۲۵ ضربه وارد می‌کنیم و سپس وایبره کرده. بعد از ۲۴ ساعت ساخت نمونه‌ها، نمونه‌ها را از داخل قالب بیرون آورده و در داخل حوضچه عمل‌آوری آب آهک قرار داده. [۱۹]. عمل‌آوری نمونه‌ها در شکل (۱) نشان داده شد است.

دوده سیلیسی با درصد‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی جایگزین متاکائولین شدند. در جدول (۳) نسبت‌های مخلوط بتن نشان داده شده است.



شکل (۱): عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آب

#### ۲-۳- متاکائولین<sup>۱</sup>

در واقع متاکائولین یک سیلیکات آلومینیوم بوده که بدون شکل است. حالت بلوری ندارد و اصطلاحاً به آن آمورف گفته می‌شود و رنگ سفیدی دارد. این ماده واکنش پذیری خیلی بالایی با هیدروکسید کلسیم دارد و بعد از واکنش دادن ترکیبی سیمانی شکل و چسبنده ایجاد می‌کند. متاکائولین جزء پوزولان‌های فعال به حساب می‌آید که می‌تواند به عنوان جایگزین برای بخشی از سیمان و به عنوان جزء اصلی در بتن عمل کند و باعث بهبود خواص بتن شود. درصد وزنی ترکیب شیمیایی متاکائولین مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است.

#### ۳-۳- دوده سیلیسی

دوده سیلیسی پودری است به رنگ خاکستری روشن یا تیره که حاوی حدود ۹۴-۹۶ درصد دی اکسید سیلیسیوم  $(\text{SiO}_2)$  می‌باشد. که از فرآیند تولید فروسیلیسیوم در کوره‌های قوس الکتریکی به دست می‌آید و برای ارتقاء بعضی از خواص بتن در زمان ساخت، به بتن افزوده می‌شود. افزودن دوده سیلیسی به مخلوط بتن باعث می‌گردد، دی اکسید سیلیسیوم فعال آن با محلول هیدرو اکسید کلسیم  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  آزاد موجود در منافذ موئین بتن ترکیب گردد و کریستال سیلیکات کلسیم نامحلول تولید نماید و در نهایت باعث تراکم ساختار خمیر سیمان و افزایش مقاومت بتن می‌گردد. درصد وزنی ترکیب شیمیایی دوده سیلیسی مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است.

#### ۴-۳- فعال کننده قلیایی

به منظور فعال سازی متاکائولین از ترکیب سیلیکات سدیم  $(\text{Na}_2\text{SiO}_3)$  و سدیم هیدروکسید<sup>۵</sup>  $(\text{NaOH})$  استفاده می‌شود. از آنجا که واکنش سدیم هیدروکسید با آب گرمازا می‌باشد و ضمن حل شدن در آب حرارت زیادی تولید می‌گردد، استوانه حاوی محلول را در یک مکان آب سرد قرار داده تا از تبخیر آب موجود در محلول جلوگیری شود.

#### ۵-۳- سیمان

سیمان استفاده شده در این تحقیق سیمان تیپ II می‌باشد. مشخصات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی این سیمان با استاندارد سیمان پرتلند ASTM C150 نیز مطابقت دارد. چگالی سیمان

<sup>۱</sup> Metakaolin

<sup>۲</sup> Silicon dioxide

<sup>۳</sup> Calcium hydroxide

<sup>۴</sup> Sodium silicate

<sup>۵</sup> Sodium hydroxide

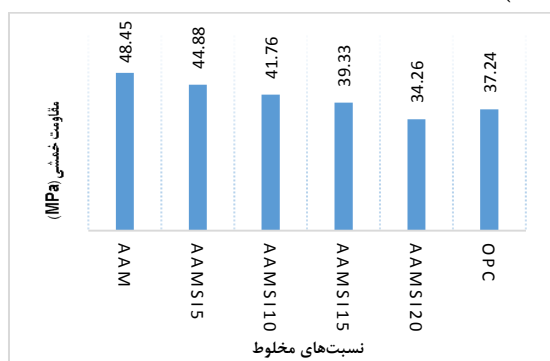
جدول (۲): درصد وزنی ترکیب شیمیایی متاکائولین و دوده سیلیسی

ماده تشکیل دهنده	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
درصد وزنی ترکیب شیمیایی متاکائولین	۵۲/۷	۴۶	۰/۱	---	۰/۳	۰/۴	۰/۱	۰/۳	۰/۱
درصد وزنی ترکیب شیمیایی دوده سیلیسی	۹۵/۱۵	۰/۷۹	۰/۴۳	۰/۳۳	---	۱/۵۷	۱/۳۱	۰/۳۸	---

جدول (۳): نسبت‌های مخلوط بتن

نسبت‌های مخلوط	درشت دانه kg/m <sup>3</sup>	ریز دانه kg/m <sup>3</sup>	سیمان kg/m <sup>3</sup>	متاکائولین kg/m <sup>3</sup>	دوده- سیلیسی kg/m <sup>3</sup>	سود kg/m <sup>3</sup>	سیلیکات سدیم kg/m <sup>3</sup>	آب kg/m <sup>3</sup>
متاکائولین ۱۰۰٪ (AAM <sup>1</sup> )	۹۱۵	۸۸۵	-	۴۰۰	-	۱۶/۱	۶۳	۱۵۷/۲
متاکائولین ۹۵٪ و دوده سیلیسی ۵٪ (5AAMSi <sup>2</sup> )	۹۱۵	۸۸۵	-	۳۸۰	۲۰	۱۶/۱	۶۳	۱۵۷/۲
متاکائولین ۹۰٪ و دوده سیلیسی ۱۰٪ (AAMSi10)	۹۱۵	۸۸۵	-	۳۶۰	۴۰	۱۶/۱	۶۳	۱۵۷/۲
متاکائولین ۸۵٪ و دوده سیلیسی ۱۵٪ (AAMSi15)	۹۱۵	۸۸۵	-	۳۴۰	۶۰	۱۶/۱	۶۳	۱۵۷/۲
متاکائولین ۸۰٪ و دوده سیلیسی ۲۰٪ (AAMSi20)	۹۱۵	۸۸۵	-	۳۲۰	۸۰	۱۶/۱	۶۳	۱۵۷/۲
سیمان (OPC)	۹۱۵	۸۸۵	۴۰۰	-	-	-	-	۱۸۰

نتایج شکل (۳) نشان داد که افزودن دوده سیلیسی و متاکائولین باعث کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌گردد. علت این کاهش مقاومت این است که ماده چسباننده با افزایش دوده سیلیسی و متاکائولین در بتن ژئوپلیمری از ماده چسباننده کم می‌شود. همان طور که در این شکل دیده می‌شود. میزان ۱۰۰ درصد متاکائولین عملکردی به مراتب بهتر از سایر نمونه‌ها داشته است. این درحالی است که نمونه (AAM) از نظر مقاومت از نمونه بتن شاهد (OPC) بهتر بوده است. نمونه‌های AAM، AAMSi5، AAMSi10، AAMSi15 و AAMSi20 بهتر از نمونه شاهد (OPC) بوده است، به بیانی دیگر به راحتی قابل تشخیص است که بتن سیمانی عملکردی به مراتب ضعیف‌تر از بتن قلیا فعال داشته است. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه AAM (۴۸/۴۵ مگاپاسکال) که ۳۰ درصد بیشتر از نمونه بتن شاهد (OPC) است.



شکل (۳): مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

## ۵- روش‌های آزمایش، نتایج و بحث

### ۵-۱- آزمایش مقاومت فشاری

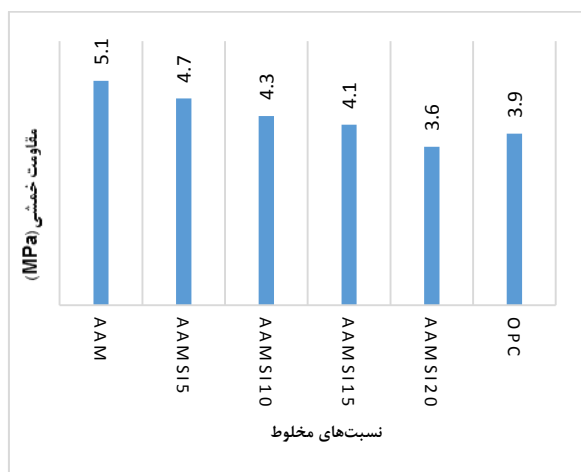
آزمایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری طبق استاندارد BS 1881-116 صورت گرفت، در این آزمایش نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ mm ساخته شدند و در جهت عمود بر جهت بتن‌ریزی زیر جک قرار گرفتند، سرعت بارگذاری ۱ میلیمتر بر دقیقه اجرا شد، برای انجام آزمایش مقاومت فشاری از دستگاه تست یونیورسال ۱۰۰ تنی استفاده گردید، شکل (۲) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.



شکل (۲): نحوه تنظیم دستگاه آزمایش مقاومت فشاری و نمونه بتنی

<sup>1</sup> Alkali activated metakaolin

<sup>2</sup> Alkali activated metakaolin silica fume



شکل (۵): نتایج مقاومت کششی ۲۸ روزه

### ۵-۳- آزمایش نفوذپذیری یون کلر

مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر از روش تسریع شده انتقال یون کلر در بتن، مطابق استاندارد ASTM-C1202 بر روی نمونه های ۲۸ روزه صورت گرفت.

در این روش میزان کل جریان عبوری از نمونه‌های بتنی اشباع به قطر ۱۰ و ضخامت ۵ سانتی‌متر تحت جریان ثابتی با اعمال ۶۳ ولت اختلاف پتانسیل از نمونه‌ها عبور داده شد و بعد از ۶ ساعت، میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌ها اندازه گیری شد. فرض بر این است که عبور جریان از نمونه و از طریق محلول منفذی بتن که به عنوان الکترولیت عمل می‌کند، صورت می‌گیرد. مقدار و پیوستگی منافذ نمونه‌های متخلخل با منافذ پیوسته دارای جریان عبوری زیاد و نمونه‌های با تخلخل و پیوستگی منافذ کم دارای جریان عبوری کم است. این روش در حقیقت میزان بار الکتریکی عبوری از میان نمونه بتنی را در طول زمان آزمایش به عنوان شاخص نفوذپذیری یون کلر بتن اندازه‌گیری می‌کند. شکل (۶) دستگاه آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلر را نشان می‌دهد.



شکل (۶): دستگاه آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلر

نتایج آزمایش تسریع شده مقاومت بتن در برابر نفوذ بتن در شکل (۷) نشان داده شده است، بیشترین جریان عبوری مربوط

### ۵-۲- آزمایش کشش غیر مستقیم

آزمایش مقاومت کششی طبق استاندارد ASTM C496 بر روی نمونه‌های عمل‌آوری ۲۸ روز صورت گرفت [۲۰]. در این روش آزمایش به منظور بررسی دوده سیلیسی بر بتن قلیا فعال شامل متاکائولین، از هر نوع نمونه بتنی ۳ تکرار ساخته شد، نمونه‌های آزمایش مقاومت کششی در ابعاد استوانه‌ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر ساخته شد. و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، با اعمال نیروی فشاری قطری روی نمونه که بصورت افقی بین دو صفحه دستگاه آزمایش قرار گرفته، بار بطور مداوم، یکنواخت و بدون تغییرات ناگهانی با سرعت ثابتی در حدود ۷۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلو پاسکال بر دقیقه تا هنگام گسیختگی بتن اعمال شد. برای جلوگیری از تنش‌های فشاری موضعی خیلی بالا در خطوط بارگذاری نوارهای تخته سه لایی باریکی به ضخامت ۳ میلی‌متر و به عرض ۲۵ میلی‌متر و طولی برابر با طول قالب استفاده گردد. این نوارها بایستی بین نمونه و رکاب‌های بالا و پایین دستگاه آزمایش، یا بین نمونه و صفحات تکیه گاهی مکمل (در صورت نیاز) قرار گیرند نوارهای تکیه گاهی نباید بیش از یکبار مصرف شوند. شکل (۴) آزمایش کشش غیر مستقیم بتن را نشان می‌دهد.

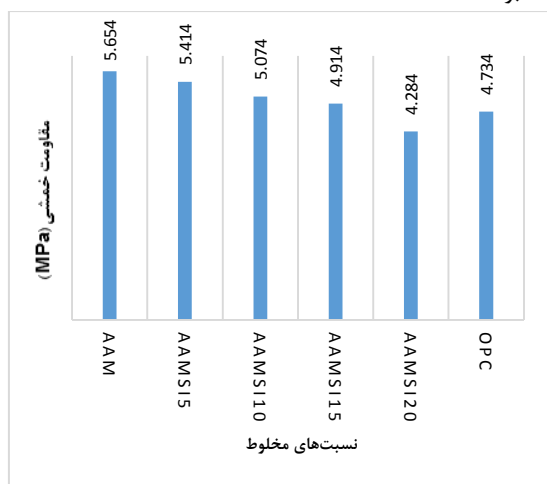


شکل (۴): آزمایش کشش غیر مستقیم

نمودار شکل (۵) مقاومت کششی برای نمونه‌های مختلف بتن را نشان می‌دهد.

بررسی نتایج نشان داد که گسیختگی همه نمونه‌ها از قسمت سنگدانه اتفاق افتاد و نمونه‌های AAMSi15 و AAMSi20 به دلیل ضعیف بودن چسبندگی بین ملات و مصالح، از ناحیه ملات دچار گسیختگی شده‌اند. مقدار حداقل مقاومت کششی مربوط به AAMSi20 (۳/۶ مگا پاسکال) و بیشترین مقاومت کششی مربوط به AAM (۵/۱ مگا پاسکال) می‌باشد. همچنین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های AAM، AAMSi15، AAMSi10 و AAMSi15 بیشتر از نمونه OPC بوده است

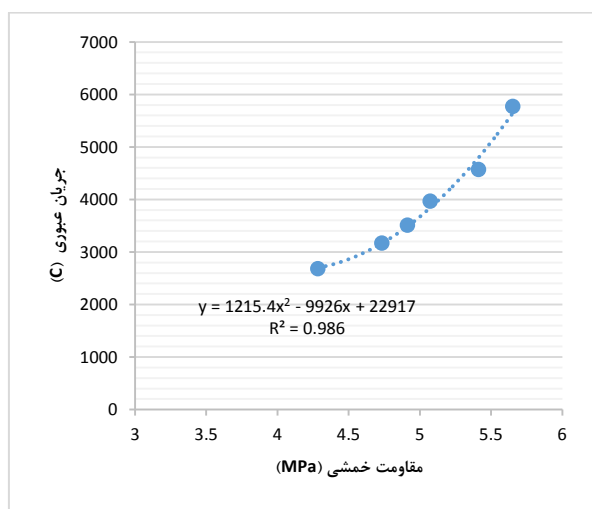
نتایج نمودار شکل (۹) نشان داد که با افزایش دوده سیلیسی و کاهش متاکائولین، مقاومت خمشی کاهش می‌یابد. و همچنین بیشترین مقاومت خمشی را دارد (۵/۶۵ مگاپاسکال) و مقاومت خمشی آن نسبت به OPC، ۱۹/۴ درصد افزایش یافته است. همچنین مشاهده شد که نمونه‌های AAM، AAMSi10، AAMSi15 و AAMSi20 بهتر از نمونه شاهد (OPC) بوده است.



شکل (۹): نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه

#### ۵-۵- رابطه بین مقاومت خمشی و نفوذ یون کلر

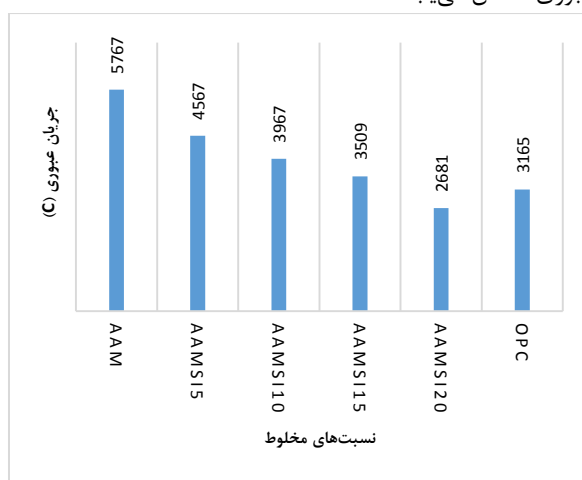
طبق نمودار شکل (۱۰) با افزایش مقاومت خمشی، جریان عبوری در بتن افزایش می‌یابد. بتن قلیا فعال خالص (AAM) به دلیل دارا بودن مقاومت‌های بالاتر نسبت به بتن شاهد، کمتر دچار ترک، ناشی از تنش داخلی می‌شوند که خود باعث کمتر شدن نفوذپذیری یون کلر در بتن شده و جریان عبوری بیشتری دارد.



شکل (۱۰): ارتباط بین مقاومت خمشی و جریان عبوری

به AAM (۵۷۶۷ کولمب) می‌باشد و کمترین جریان عبوری مربوط به AAMSi20 (۲۶۸۱ کولمب) می‌باشد.

در نمونه بتن با سیمان پرتلند ۸۲/۲ درصد نسبت به نمونه قلیا فعال خالص (AAM) کاهش در جریان عبوری بتن مشاهده شده است. نتایج نشانگر کاهش قابل توجه در نفوذپذیری یون کلر به داخل بتن قلیا فعال خالص (AAM) و در واقع افزایش جریان عبوری شده است. نهایتاً به این نتیجه رسیده شد که با افزایش دوده سیلیسی در بتن ژئوپلیمری حاوی متاکائولین، جریان عبوری کاهش می‌یابد.



شکل (۷): جریان عبوری در بتن

#### ۴-۵- آزمایش مقاومت خمشی

مقاومت خمشی یکی از مهم‌ترین پارامترها در بتن است. به همین منظور جهت بررسی تأثیر مقاومت خمشی نمونه‌های ژئوپلیمری آزمایش مقاومت خمشی چهارنقطه‌ای انجام شد. مقاومت خمشی طبق استاندارد ASTM C78 صورت گرفت. نمونه‌های آزمایش مقاومت خمشی در ابعاد  $500 \times 100 \times 100$  mm ساخته شدند و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری آزمایش مقاومت خمشی صورت گرفت. شکل (۸) نحوه تنظیم دستگاه UTM و نمونه بتنی را نشان می‌دهد.



شکل (۸): نحوه تنظیم دستگاه UTM و نمونه بتن

می‌یابد. (در این رابطه  $y$  معرف جریان عبوری و  $x$  معرف مقاومت خمشی می‌باشد.)

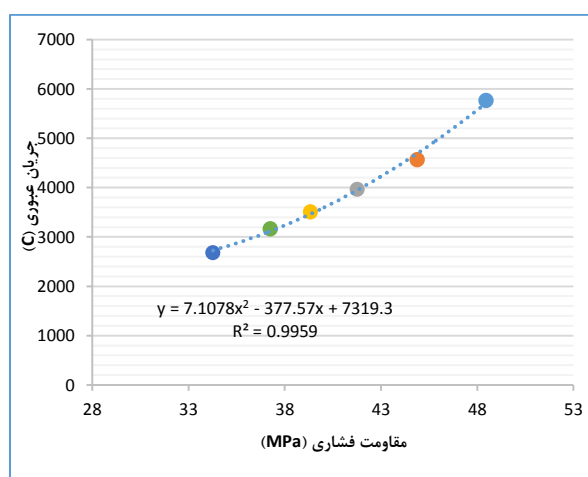
- با افزایش مقاومت فشاری جریان عبوری در بتن مطابق با رابطه  $y = 7.1078x^2 - 377.57x + 7319.3$  افزایش می‌یابد. (در این رابطه  $y$  معرف جریان عبوری و  $x$  معرف مقاومت فشاری می‌باشد.)

## ۷- مراجع

- [1] Arent, W.L., Kohn, S., Piggott, R.W., Berry, J.R., Larsen, R.L., Ragan, S.A., Cole, L., Lopez, R.W., Rice, J.L., Colucci, B., & McComb, R.A. (1994). State of the Art Report on Roller Compacted Concrete Pavements. *Journal ACI Materials*, vol. 91(5), p.509.
- [2] Du, S., Wu, J., AlShareedah, O., & Shi, X. (2019). Nanotechnology in Cement-Based Materials: A Review of Durability, Modeling, and Advanced Characterization. *Nanomaterials*, 9(9), 1213.
- [3] Jalali Mosallama, Sh., Pesaran Behbahania, H., Shahparib, M. & Abaeian, R. (2021). The effect of carbon nanotubes on mechanical properties of structural lightweight concrete using LECA aggregates. *Journal of Structures.*, Vol.24, PP. 35-44.
- [4] Mostavi. E, Asadi. S, Hassan. M.M, & Alansari. M. (2015). Evaluation of self-healing mechanisms in concrete with double-walled sodium silicate microcapsules, *Journal of Material Civil Engineering*, Vol. 52, no. 05, 2102122.
- [5] Davidovits, J., 1979. Synthesis of New High-temperature Geopolymers for Reinforced Plastics. *Journal of Composites, Proc Pactec*, vol. 4, pp.151-154.
- [6] حسنی، ا. اکبری مقدم، م. و مشایخی، م.، ۱۳۹۶، «خواص بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره قلبایی به عنوان جایگزین سیمان در روسازی‌های بتنی»، مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی رویه‌های بتن، ایران.
- [7] Building Research Establishment Digest 363., 1996. Sulfate and Acid Resistance of Concrete in The Ground.
- [8] Behfarnia, K., and Farshadfar, O., 2013. The Effects of Pozzolanic Binders and Polypropylene Fibers on Durability of SCC to Magnesium Sulfate Attack. *Journal of Construction and Building Material*, vol. 38, pp. 64-71.

## ۵-۶- رابطه بین مقاومت فشاری و نفوذ یون کلر

طبق نمودار شکل (۱۱) با افزایش مقاومت فشاری، جریان عبوری در بتن افزایش می‌یابد. بتن قلبیا فعال خالص (AAM) به دلیل دارا بودن مقاومت‌های بالاتر نسبت به بتن شاهد، کمتر دچار ترک، ناشی از تنش داخلی می‌شوند که خود باعث کمتر شدن نفوذپذیری یون کلر در بتن شده و جریان عبوری بیشتری دارد.



شکل (۱۱): ارتباط بین مقاومت فشاری و جریان عبوری

## ۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به بررسی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن قلبیا فعال حاوی متاکائولین و دوده سیلیسی پرداخته شد، در این پژوهش به نتایج زیر رسیده شد:

- به طور کلی افزودن دوده سیلیسی بجای متاکائولین در بتن ژئوپلیمری باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده، این در حالی است که نمونه دارای تماما متاکائولین از نظر مقاومت از نمونه بتن شاهد بهتر عملکرده است.
- مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه بتن سرباره قلبیا فعال خالص از نمونه‌های بتن شاهد بیشتر است.
- با افزایش دوده سیلیسی در بتن ژئوپلیمری، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن کاهش می‌یابد.
- ارزیابی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر از روش تسریع شده انتقال یون کلر در بتن نشان می‌دهد، که با افزایش دوده سیلیسی جریان عبوری کاهش می‌یابد.
- بهترین نمونه، بتن ژئوپلیمری قلبیا فعال خالص (AAM) می‌باشد که دارای مقاومت فشاری ۴۸/۴۵ مگاپاسکال، مقاومت خمشی ۵/۶۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۵/۱ مگاپاسکال و جریان عبوری یون کلر ۵۷۶۷ کولمب می‌باشد.
- با افزایش مقاومت خمشی جریان عبوری در بتن مطابق با رابطه  $y = 1215.4x^2 - 9926x + 22917$  افزایش



- [15] Neupane, K., Chalmers. D, and Kidd, D. (2018) "High-Strength Geopolymer Concrete-Properties, Advantages and Challenges". *Journal of Advances in Materials.*, Vol.7, PP. 15-25.
- [16] Hugo, L., Virginie, B., Vincent T., Thomas W., Raphaël B, and Martin C. (2021) "Robustness to water and temperature, and activation energies of metakaolin - based geopolymer and alkali-activated slag binders". *Journal of Construction and Building Materials.*, Vol.300.
- [17] Karmegam, A., Avudaiappan, S., Amran, M., Guindos, P., Ivanovich Vatin, N, and Fediuk, R. (2022) "Retrofitting RC beams using high-early strength alkali-activated concrete".
- [18] *Journal of Case Studies in Construction Materials.*, Vol 17.
- [19] ASTM C33-03. (2003) "Standard Specification for Concrete Aggregates". ASTM International.
- [20] ASTM C171-16. (2016) "Standard Specification for Sheet Materials for Curing Concrete". ASTM International.
- [21] ASTM C496-96. (1996) "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens". ASTM International.
- [22] ASTM C78-09. (2009) "Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)". ASTM International
- [9] Davidovits, J., 2011. *Geopolymer Chemistry and Applications: Geopolymer Institute.*
- [۱۰] رضانیان پور، ع.، ذوالفقارنسب، آ. بهمین زاد، ف. رمضان یانیور، ا. (۱۳۹۷)، "اثر سرباره گرانوله شده کوره قوس الکتریکی بر دوام بتن در برابر حمله سولفاتی". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره پنجاه، شماره چهار، ص. ۱۳۸-۱۲۱.
- [11] Alexander and Fourie, 2011 and] Aydın, Yiğiter, and Baradan, 2007 Monteny, De Belie, [and Taerwe, 2003.
- [12] Pomaro, B., Granegna, F., Roberto, C., Nadal, V., Salomoni, V., and Faleschini, F., 2019. Gamma-ray shielding properties of heavyweight concrete with Electric Arc Furnace slag as aggregate: An experimental and numerical study. *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 200(6), pp. 188–197.
- [13] Monteny, J., Vince, E., Beeldens. A., De Belie, N., Taerwe. L., Gemert. D, and Verstraete, W., (2000). "Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete". *Cement and Concrete Research.*, Vol. 30, PP. 623-634.
- [14] Vincke. E., Wanseele, E., Monteny. J., Beeldens. A., De Belie, N., Taerwe. L., Gemert. D, and Verstraete, W., (2002) "Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete". *International biodeterioration & biodegradation.*, Vol.49, PP. 283-292.

## Evaluation of mechanical properties and durability of alkali-activated concrete containing metakaolin and silica fume

Abolfazl Hassani\*, Milad Gohar , Abolfazl Mohammadi , Mohammad Hossein Keyghobadi

\*Civil Engineering – Tarbiyat modares University- hassani@modares.ac.ir

### Abstract

As the second most consumed product in the world, cement has a share of about 7% in the production of carbon dioxide. 94% of the energy required to produce concrete from Portland cement is spent on Portland cement. Substituting alkali-activated concrete instead of concrete with Portland cement can be a solution to reduce pollution caused by cement. Also, the amount of energy needed to produce metakaolin is about 7% of Portland cement production. These destructive effects caused more attention to be paid to the use of pozzolanic materials. In this research, the compressive, bending, tensile strength and chlorine ion permeability of active alkali concrete containing metakaolin and silica fume were investigated. Compressive, bending, tensile strength and chlorine ion permeability were measured. In this research, by increasing the replacement of silica fume instead of metakaolin in concrete, the compressive, bending, tensile strength and permeability of chlorine ions decreased. In fact, the best example of alkali-activated concrete containing pure metakaolin has a compressive strength of 45.48 MPa, resistance The bending strength is 5.65 MPa, the tensile strength is 1.5 MPa, the chlorine ion passage current is 5767 coulombs.

**Keywords:** Alkali-active concrete, metakaolin, compressive strength, bending strength, tensile strength, chlorine ion penetration