

## تأثیر خاک رس کلسینه مینودشت استان گلستان بر نفوذپذیری، دوام و بهبود ریزساختار بتن

حسن قزلسفلی<sup>۱\*</sup>، امیر طریقت<sup>۲</sup>

۱. کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

\* Email: hassan.ghezel@sru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶

### چکیده

یکی از راه‌های رایج افزایش عمر بتن استفاده از پوزولان است، برخی از پوزولان‌ها که واکنش پذیری بالاتری نسبت به سیمان معمولی دارند با کاهش منافذ بتن منجر به مقاومت بیشتر و نفوذپذیری کمتر بتن می‌شوند. سازه‌های ساخته شده با بتن پرتلند معمولی، بیشتر دارای عملکرد مناسبی در شرایط سخت محیطی و عوامل مهاجم مخرب نیستند، حمله سولفاتی به فرآیند تخریب بتن در اثر انبساط ناشی از واکنش‌های سولفاتی درون بتن گفته می‌شود و در دراز مدت باعث کاهش پیوستگی، بروز ترک و ایجاد فروپاشی در ساختار بتن می‌شود که یک اثر آن کاهش مقاومت بتن است. افزودن متاکائولین باعث کاهش تخلخل در بتن می‌گردد، در نتیجه بتن‌های حاوی متاکائولین در مقایسه با بتن‌های معمولی نفوذپذیری کمتری دارند. در این تحقیق از خاک رس کلسینه شده به عنوان پوزولان استفاده شد، ابتدا خاک تا دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت حرارت داده شد تا فرایند کلسینه شدن صورت پذیرد سپس خاک رس کلسینه به همراه درصدی از پودر سنگ آهک و میکروسیلیس جایگزین سیمان شد. هدف از این ترکیب برای مواد سیمانی رسیدن به طرح مخلوطی است که بتن‌های ساخته شده توسط آن در برابر شرایط محیطی مهاجم و خورنده مقاومت بهتری از بتن‌های معمولی داشته باشند. بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده در محلول سولفات سدیم در این تحقیق بلورهای اترینگایت تشکیل شد که در نمونه‌های پوزولانی نسبت به نمونه شاهد کمتر بودند. در سنین ابتدایی ضریب جذب مویینه برای نمونه‌های حاوی خاک رس کلسینه از نمونه‌های شاهد بیشتر است اما با افزایش سن نمونه‌ها و کامل تر شدن واکنش‌های پوزولانی این تفاوت بسیار کاهش می‌یابد. مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌ها نیز با گذشت زمان و افزایش درصد جایگزینی پوزولان افزایش پیدا کرد. همچنین در تمامی آزمایش‌های انجام شده افزودن میکروسیلیس باعث پر شدن فضاهای خالی درون بتن شده و همچنین واکنش پذیری سریع‌تر میکروسیلیس در مدت زمان کوتاه‌تر ژل سیلیکاتی بیشتری نسبت به پوزولان خاک رس تولید کرده و باعث متراکم‌تر شدن بتن می‌شود. در این تحقیق از ۱۰٪ طرح مخلوط در ۲ نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و ۰/۴ استفاده شد. در هر نسبت از خاک رس در درصدهای ۱۰ و ۲۰ درصد، پودر سنگ آهک به ترتیب در درصدهای ۳۰ و ۲۰ درصد و میکروسیلیس نیز به همراه ترکیب خاک و آهک در ۷ درصد وزنی به عنوان مواد پودری جایگزین سیمان شد. جهت بررسی خواص خاک تهیه شده اطمینان از آمورف بودن ذرات خاک و حضور ترکیبات پوزولانی بر روی آن آزمایش XRD انجام گرفت، همچنین برای بررسی و تحلیل دوام بتن از آزمایش‌های مقاومت سولفاتی، جذب مویینه و مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی در سن ۲۸ و ۹۰ روزه استفاده شد. در این تحقیق طرح‌های شامل ۲۰ درصد رس کلسینه، ۲۰ درصد آهک و ۷ درصد میکروسیلیس دارای بهترین عملکرد در طرح‌های پوزولانی هستند و به عنوان طرح‌های بهینه پوزولانی معرفی می‌گردند.

**کلمات کلیدی:** پوزولان، حمله سولفاتی، اترینگایت، جذب مویینه، مقاومت الکتریکی بتن.

## ۱- مقدمه

پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی مانند کائولن، به صورت فراوان و بلااستفاده در دسترس ما هستند که می‌توان با جایگزینی سهم مناسبی از آنها در سیمان، علاوه بر کاهش مصرف سیمان، خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشید. استفاده از پوزولان یکی از راه‌های رایج افزایش عمر بتن است. پوزولان‌ها با بهبود منافذ بتن منجر به مقاومت بیشتر و نفوذپذیری کمتر بتن می‌شوند [1-2]. موضوع مهمی که در سال‌های اخیر ذهن بسیاری از محققان این عرصه را به خود مشغول کرده است، بحث پایایی بتن‌ها در شرایط سخت و مهاجم محیطی می‌باشد. سازه‌های ساخته شده با بتن پرتلند معمولی، عموماً دارای عملکرد مناسبی در شرایط سخت محیطی و عوامل مهاجم نیستند راهکار پیشنهادی محققان، استفاده از سیمان‌های آمیخته<sup>۱</sup> است که امروزه، تولید آن‌ها با استفاده از پوزولان‌های مختلف بسیار گسترش پیدا کرده است [3]. یکی از فرایندهای مخرب برای بتن حمله سولفاتی است حمله سولفاتی به فرآیند تخریب بتن در اثر انبساط گفته می‌شود [4]. حمله سولفاتی با واکنش سولفات سدیم با آب آهک آغاز می‌شود که هنگام این واکنش سدیم هیدروکسید و گچ تشکیل می‌شود حمله سولفاتی با آثاری در بتن همراه است که در دراز مدت باعث کاهش چسبندگی و مقاومت در بتن و همچنین افزایش حجم آن و ایجاد ترک در آن می‌شود [5]. حمله سولفاتی می‌تواند بر اثر از استفاده از مصالح آلوده به یون سولفات صورت بگیرد (سیمان، شن، ماسه و یا آب آلوده به یون سولفات) و یا در پی تماس بتن با خاک و یا آب آلوده به یون سولفات صورت بگیرد [6]. متاکائولین می‌تواند با مقداری از هیدروکسید کلسیم تولید شده از هیدراسیون سیمان وارد واکنش شود و موجب چگال‌تر شدن ساختار خمیر سیمان هیدراته شده بشود. در واقع به دلیل قابلیت حل شدن هیدروکسید کلسیم در آب، ناحیه انتقال مستعد آسیب در مجاورت محیط‌های شیمیایی است و متاکائولین پس از

واکنش با این ماده تأثیر بسزایی در بهبود دوام بتن خواهد داشت و متاکائولین درشت‌تر برای کاهش نفوذپذیری در بتن تولید شده مؤثرتر است [7]. افزودن متاکائولین در اغلب نمونه‌های بتنی باعث کاهش تخلخل در بتن می‌شود. بتن‌های متاکائولینی در مقایسه با بتن‌های تهیه شده با سیمان پرتلند معمولی نفوذپذیری کمتری در برابر آثار کلرایدها و گازها دارند. این ماده در بهبود اندازه، توزیع و کاهش تعداد منافذ با قطر کمتر از ۱۶۰ نانومتر تأثیر گذار است [8]. در مطالعاتی که انجام شده است، بیش از ۵۰ درصد ذرات متاکائولین آنالیز شده ریزتر از اندازه ذرات سیمان می‌باشند که می‌تواند فضای خالی بین ذرات سیمان و سایر دانه‌های موجود در محیط بتن (سنگدانه) را پر کنند و باعث قطع حفرات مویینه و چگالتر شدن خمیر سیمان شوند [9]. در نتیجه افزایش تراکم خمیر سیمان، باعث کاهش بلازدگی آب و ضخامت ناحیه انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه می‌شود [10-11]. یکی از مهم‌ترین پارامترهای بررسی کارایی بتن تازه اسلامپ می‌باشد. وانگ<sup>۲</sup> و عبدل رزاق<sup>۳</sup> معتقدند که با افزایش مواد معدنی در مخلوط بتن، اسلامپ آن کاهش می‌یابد. در ادامه این دو محقق با مقایسه اثر میکروسیلیس و متاکائولین بر کارایی بتن تازه، این نتیجه را بیان کردند که استفاده از میکروسیلیس در مقایسه با متاکائولین، اثر بیشتری بر کاهش کارایی بتن تازه دارد [12]. درصد جایگزینی متاکائولین در زمان گیرش اولیه و نهایی بتن مؤثر است. بادوگیانیس<sup>۴</sup> در پژوهش خود به این نتیجه رسید که بتن با ۱۰ درصد جایگزینی متاکائولین به جای سیمان، زمان گیرش مشابهی با بتن شاهد دارد ولی جایگزینی ۲۰ درصد متاکائولین منجر به تأخیر در زمان گیرش خواهد شد [8]. در تحقیق دیگری میزان تأثیر کائولینیت کلسینه شده در دمای ۶۰۰ درجه بر خاصیت جذب مویینه بتن بررسی شد، در این تحقیق موادسیمانی استفاده شده شامل ۳۰٪ کائولین کلسینه و ۷۰٪ سیمان پرتلند معمولی می‌باشد و میزان

<sup>2</sup> Wong<sup>3</sup> Abdul Razak<sup>4</sup> Badogiannis<sup>1</sup> Blended Cements

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

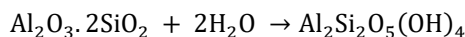
## ۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی در تحقیق

## ۲-۱-۱- مواد سیمانی

مشخصات ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی مصرفی در این تحقیق در جدول (۱) آورده شده است.

## ۲-۱-۲- خاک رس کلسینه

در این تحقیق از خاک رس کلسینه شده به عنوان پوزولان استفاده شد، بدین گونه که ابتدا خاک از منطقه مینودشت استان گلستان تهیه شد سپس با استفاده از کوره تا دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد تا عمل کلسینه شدن صورت پذیرفت سپس به همراه درصدی از پودر آهک جایگزین سیمان شد. کائولینیت دارای ترکیب آلومینوسیلیکاتی است بطوری که ورقه‌های هشت وجهی آلومینا با ورقه‌های چهار وجهی سیلیکا به صورت متناوب روی هم قرار گرفته‌اند [16]. مرغوب‌ترین کائولین‌ها دارای ۲۰ درصد ناخالصی هستند که برای کاهش این ناخالصی‌ها به طرق مختلف فرآوری می‌شوند [17]. فرایند کلسینه شدن خاک رس شامل کائولینیت در دمایی بین ۵۵۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد که نتیجه آن تولید یک ترکیب سیلیسی آمورف به نام متاکائولین است که یک پوزولان آلومینوسیلیکاتی می‌باشد، فرمول شیمیایی فرایند کلسینه شدن در زیر آورده شده است [18].



برای اطمینان از درستی فرایند کلسینه سازی، اطمینان از آمورف بودن ذرات و کریستاله نشدن ناشی از حرارت زیاد آزمایش XRD<sup>۲</sup> روی رس کلسینه مینودشت استان گلستان انجام شد با مشاهده نتایج این آزمایش و اطمینان از آمورف بودن ذرات خاک رس کلسینه می‌توان از آن به عنوان جایگزین درصد قابل توجهی از سیمان و تولید بتنی با عملکرد سازه‌ای استفاده کرد. در شکل (۱) نتایج آزمایش XRD ارائه شده است.

جذب آب نمونه شاهد از نمونه‌های پوزولانی بیشتر است به این علت که کائولین کلسینه در متراکم کردن بتن و کاهش نفوذ پذیری آن موثر است و تاثیر بسیار چشمگیری بر خواص مکانیکی و دوام بتن دارد علاوه بر کائولین کلسینه از ایلیت و مونتمورلونیت کلسینه نیز به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده است که در نتیجه آن نشان داده شد که کائولینیت دارای بالاترین پتانسیل برای فعال سازی است. این امر به دلیل محتوای بیشتر گروه‌های هیدروکسیل و موقعیت آنها در ساختار بلوری خاک رس است. نمونه‌های حاوی کائولینیت کلسینه شده بیشترین واکنش را نشان می‌دهد، به دنبال آن مونتموریلونیت کلسینه شده که در سنین بعدی کمی واکنش نشان می‌دهد و ایلیت کلسینه شده که مانند یک پرکننده بی اثر عمل می‌کند [13]. میزان درصد یون کلراید نفوذ کرده در بتن معمولی و بتن (Lc<sup>3</sup>)<sup>۱</sup> را بر حسب عمق نفوذ در نمونه بررسی شده است در این تحقیق نمونه‌های بتنی برای انجام آزمایش به مدت دو سال در محلول NaCl نیم مولار نگهداری شده‌اند و نتایج آن نشان می‌دهد که نمونه‌های (Lc<sup>3</sup>) در برابر حملات کربیدی بسیار مقاوم‌تر هستند استفاده از پودر سنگ آهک باعث در اختیار گذاشتن مقدار بیشتری آب آهک برای واکنش پوزولانی خاک رس و در نتیجه افزایش سرعت واکنش‌های پوزولانی شود [14]. در تحقیقی مشابه آزمایش فوق عمل‌آوری به مدت دو سال در محلول NaCl ۳٪ وزنی (۳۰ گرم نمک در ۱ کیلوگرم آب) برای بتن معمولی شاهد و سه طرح (Lc<sup>3</sup>) (۱:۶۵٪ کلینکر ۱۵٪ رس کلسینه و ۱۵٪ پودر سنگ آهک و ۲:۶۵٪ کلینکر ۲۰٪ رس کلسینه و ۱۰٪ پودر سنگ آهک و ۵:۵۰٪ کلینکر ۳۰٪ رس کلسینه و ۱۵٪ پودر سنگ آهک و ۵٪ گچ) انجام شد که نفوذ در هر سه طرح بتن‌های (Lc<sup>3</sup>) کمتر از طرح شاهد می‌باشد و در طرح‌های (Lc<sup>3</sup>) نیز طرحی که رس کلسینه در آن بیشتر بوده نفوذ کمتری داشته است [15].

<sup>2</sup> X-Ray diffraction analysis

<sup>1</sup> Imestone Calcined clay cements

جدول ۱. مشخصات ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی در تحقیق

| %Weight     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | FreeCaO | IR  | LOI   | Total |
|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|------------------|-------------------|---------|-----|-------|-------|
| Cement      | 20.8             | 5.2                            | 3.65                           | 62.1 | 1.8  | 2.5             | 0.55             | 0.3               | 1.2     | 0.3 | 1.5   | 99.9  |
| Silica fume | 93.95            | 0.9                            | 0.8                            | 1    | 1.25 | 0.06            | 0.25             | 0.4               |         |     | 1     | 99.61 |
| Clay        | 57.6             | 17.7                           | 5.6                            | 6.3  | 3.3  | 0.03            |                  |                   |         |     | 9.68  | 99.67 |
| Limestone   | 5.6              |                                | 0.05                           | 51.7 | 1.4  |                 |                  |                   |         |     | 41.15 | 99.9  |

Table 1. Characteristics of chemical compounds of cement materials

شکل ۱. نتایج حاصل از آزمایش XRD روی خاک رس کلسینه مینودشت استان گلستان

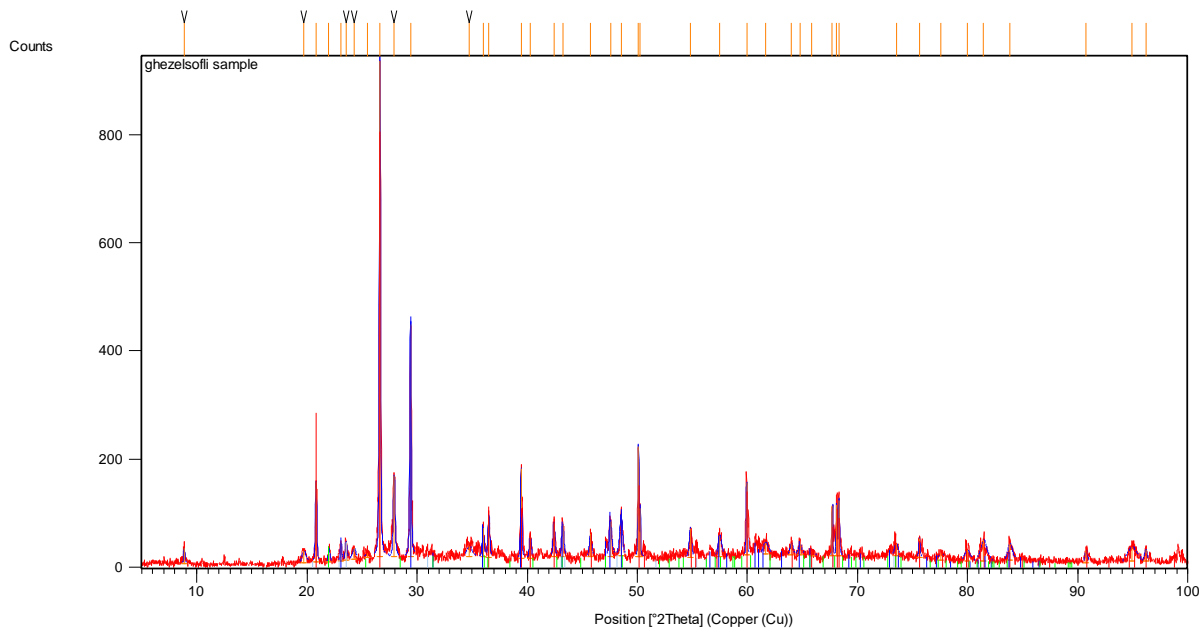


Fig. 1. The results of the XRD test on calcine clay of Minodasht, Golestan province

مقایسه کائولین مورد استفاده با کائولین موجود در مناطق دیگر کشور مشخصات شیمیایی دو نمونه کائولین دیگر ارائه شده است که در استفاده ۱۰ درصد توانسته اند واکنش پذیری سیمانی داشته باشند و خواص مکانیکی بتن را بهبود بخشند ریزی ودانه بندی آنها نیز پس از کلسینه شدن، آسیاب شده و از الک مش شماره ۱۰۰ و بالاتر گذرانده شده اند.

در نمودار حاصل از آزمایش XRD هرچه شدت امواج بازتابی یا همان قله‌ها بلند تر و نوک تیزتر باشند ترکیبات شناسایی شده منظم و کریستالی می‌باشند و برعکس پس با توجه به شکل فوق و وجود نوسانات ریز و پایین در آن می‌توان گفت که ترکیبات شناسایی شده آمورف می‌باشند و در نتیجه برای واکنش‌های سیمانی مناسب هستند. در جدول (۲) برای

جدول ۲. مشخصات ترکیبات شیمیایی دو نمونه کائولین دیگر

| %Weight        | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | LOI  |
|----------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|
| Minodasht Clay | 57.6             | 17.7                           | 5.6                            | 6.3  | 3.3  | 9.68 |
| Zanvar Clay    | 74.3             | 17.8                           | 0.82                           | 3.38 | 0.22 | 2.56 |
| Marand Clay    | 64.51            | 22.87                          | 2.56                           | 0.66 | 0.67 | 1.28 |

Table 2. Characteristics of chemical compounds of 2 other kaolinit

رس دیرتر از واکنش‌های سیمان پرتلند انجام می‌شوند استفاده از آهک باعث در اختیار گذاشتن مقدار بیشتری آب آهک برای واکنش پزولانی خاک رس و در نتیجه افزایش سرعت واکنش‌های پزولانی شود به این علت که آلومینات

### ۲-۱-۳- پودر سنگ آهک

مشخصات شیمیایی پودر سنگ آهک مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است. واکنش‌های پزولانی خاک

سیمان، آب محبوس در لخته‌های سیمانی را نیز آزاد و صرف بهبود روانی مخلوط می‌کند [19].

## ۲-۲- مشخصات طرح مخلوط بتن

در تحقیق پیش‌رو از ۱۰ طرح مخلوط در دو نسبت آب به مواد سیمانی (سیمان، خاک رس کلسینه، آهک و میکروسیلیس) ۰/۳۵ و ۰/۴ برای بررسی تاثیر خاک رس کلسینه بر میزان نفوذپذیری، دوام و مقاومت بتن در برابر شرایط خوردنده و بهبود ریزساختار بتن در نظر گرفته شد، در هر نسبت آب به مواد سیمانی ۵ طرح مخلوط داریم و برای هر نسبت آب به مواد سیمانی یک طرح به عنوان طرح شاهد (بدون جایگزینی پوزولان به جای سیمان) ساخته شد. در جدول (۲) مشخصات هر طرح مخلوط، چگونگی نمایش هر یک از آن‌ها، نسبت آب به مواد سیمانی برای هر طرح و درصد جایگزینی هر ماده نسبت به کل مواد سیمانی برای خاک رس کلسینه، آهک، میکروسیلیس و سیمان آورده شده است، استفاده از واژه آب‌آزاد در این جدول‌ها یعنی این که آب لازم برای رسیدن سنگدانه‌ها به حالت اشباع با سطح خشک (SSD) جداگانه محاسبه شده و به مخلوط اضافه شده است. در این طرح مخلوط‌ها خاک رس کلسینه با جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد، آهک با جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد و میکروسیلیس نیز در ۷ درصد از سیمان پرتلند جایگزین سیمان شدند همچنین سنگدانه‌های مصرفی به نسبت ۴۰ و ۶۰ درصد در بتن مورد استفاده قرار گرفتند (۴۰ درصد شن و ۶۰ درصد ماسه). این تحقیق برای بررسی میزان تاثیر و واکنش پذیری رس کلسینه با هدف کاهش ۴۰ درصد استفاده از سیمان در بتن بوده و به همین علت از جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد رس کلسینه برای بررسی میزان واکنش پذیری و جبران تاثیر مقدار سیمان حذف شده در بتن استفاده شد. استفاده از درصد‌های ۳۰ و ۲۰ برای پودر سنگ آهک برای تامین جایگزینی ۴۰ درصد سیمان و همچنین در اختیار گذاشتن آب آهک اضافی برای انجام واکنش‌های پوزولانی رس کلسینه که کمی دیرتر از واکنش‌های سیمان پرتلند انجام می‌شوند بوده است. برای یکسان بودن شرایط تمام طرح

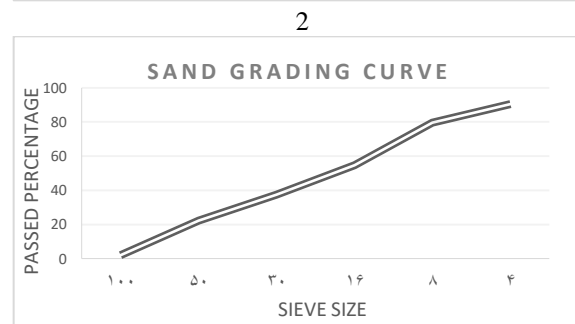
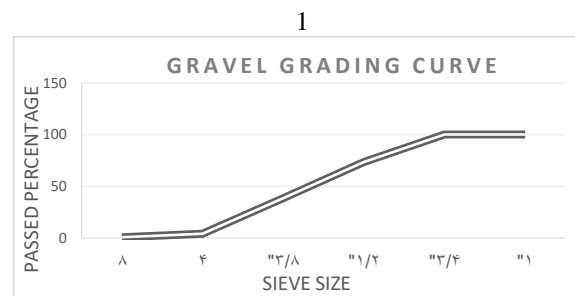
موجود در رس کلسینه می‌تواند با کلسیم کربنات (آهک) و کلسیم هیدراکساید واکنش دهد و کربو آلومینیم هیدرات تولید کند [14].

## ۲-۱-۴- سنگدانه

سنگدانه‌های مصرفی در این تحقیق، شن و ماسه دوبار شسته شده با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متری بوده و مشخصات کامل آن‌ها در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات سنگدانه مصرفی شامل ۱: مشخصات فیزیکی، ۲: منحنی دانه‌بندی شن و ۳: منحنی دانه‌بندی ماسه

| درصد جذب آب | حد اکثر اندازه | مدول نرمی |        |
|-------------|----------------|-----------|--------|
| 1.8         | 19 mm          | -         | gravel |
| 3.7         | -              | 3.13      | sand   |



**Table 3.** Characteristics of aggregate used including 1: physical specifications, 2: gravel grading curve and 3: sand grading curve

## ۲-۱-۵- آب و فوق روان کننده

آب استفاده شده در این تحقیق آب شرب شهر تهران و فوق روان‌کننده نیز بر مبنای پلی‌کربوکسیلات است و میزان استفاده از آن حدود ۰/۲ تا ۱/۵ درصد وزن مواد سیمانی است. عملکرد فوق روان‌کننده پخش‌کنندگی الکترواستاتیکی با اعمال نیروی دافعه بین ذرات و پراکندن دانه‌های سیمان از یکدیگر است که علاوه بر پخش دانه‌های

مخلوطها و برای امکان مقایسه صحیح بین آنها، اسلامپ تمامی طرح مخلوطها در بازه ۸ تا ۱۲ سانتی متر قرار گرفت که برای رسیدن اسلامپ طرحها به این بازه در طرحهایی که حاوی پوزولان بودند از فوق روانکننده بیشتری استفاده شد. عیار مواد سیمانی مورد استفاده در این تحقیق برابر با  $400 \text{ kg/m}^3$  می باشد و همچنین منظور از درصد جایگزینی این است که برای مثال در طرح C10L30 خاک رس کلسینه ۱۰ درصد و آهک ۳۰ درصد و در مجموع ۴۰ درصد جایگزین سیمان شده اند و برای تهیه یک متر مکعب از این طرح مخلوط، ۲۴۰ کیلوگرم سیمان، ۴۰ کیلوگرم خاک رس کلسینه و ۱۲۰ کیلوگرم آهک استفاده شده است.

۳-۲- چگونگی انجام آزمایشها

۳-۲-۱- آزمایش جذب مویبگی بتن

آزمایش جذب مویبگی بتن به روشهای متفاوتی انجام می گیرد، در این تحقیق آزمایش جذب مویبگی طبق استاندارد ASTM C1585-04 انجام شده است. این آزمایش این گونه انجام شد که پس از رسیدن سن نمونه ها به سن های آزمایش (۲۸ روزه و ۹۰ روزه) نمونه ها از

جدول ۴. مشخصات و مقدار مصالح مصرفی در طرح مخلوطها

| Mix Design | Cement % | Clay % | Lime stone % | Silica Fume % | Coarse Agg (kg/m3) | Fine Agg (kg/m3) | Free Water (kg/m3) | Cement (kg/m3) | Clay (kg/m3) | Limestoe (kg/m3) | Silica Fume (kg/m3) | w/c  |
|------------|----------|--------|--------------|---------------|--------------------|------------------|--------------------|----------------|--------------|------------------|---------------------|------|
| COLO       | 100      | 0      | 0            | 0             | 744                | 1116             | 140                | 400            | 0            | 0                | 0                   | 0.35 |
| C10L30     | 60       | 10     | 30           | 0             | 744                | 1116             | 140                | 240            | 40           | 120              | 0                   | 0.35 |
| C20L20     | 60       | 20     | 20           | 0             | 744                | 1116             | 140                | 240            | 80           | 80               | 0                   | 0.35 |
| C10L30SF7  | 55.8     | 10     | 30           | 4.2           | 744                | 1116             | 140                | 223.2          | 40           | 120              | 16.8                | 0.35 |
| C20L20SF7  | 55.8     | 20     | 20           | 4.2           | 744                | 1116             | 140                | 223.2          | 80           | 80               | 16.8                | 0.35 |
| COLO       | 100      | 0      | 0            | 0             | 736                | 1104             | 160                | 400            | 0            | 0                | 0                   | 0.4  |
| C10L30     | 60       | 10     | 30           | 0             | 736                | 1104             | 160                | 240            | 40           | 120              | 0                   | 0.4  |
| C20L20     | 60       | 20     | 20           | 0             | 736                | 1104             | 160                | 240            | 80           | 80               | 0                   | 0.4  |
| C10L30SF7  | 55.8     | 10     | 30           | 4.2           | 736                | 1104             | 160                | 223.2          | 40           | 120              | 16.8                | 0.4  |
| C20L20SF7  | 55.8     | 20     | 20           | 4.2           | 736                | 1104             | 160                | 223.2          | 80           | 80               | 16.8                | 0.4  |

Table 4. Specifications of the concrete mix design made in the research

$$I = s(t)^{1/2} + b \quad (1)$$

$$I = \frac{m}{cp} \quad (2)$$

که در آن I میزان ارتفاع آب جذب شده در هر مرحله در بتن برحسب میلی متر، M وزن آب جذب شده در هر

در نهایت ضریب جذب مویبگی از نمودارهای رسم شده استخراج شد. نمودار جذب مویبگی یک نمودار دو بعدی می باشد که یک بعد آن میزان آب جذب شده (I) که طبق رابطه ۱ محاسبه می شود و بعد دیگر آن مجذور زمان جمعی است [20].

و بالای نمونه) با استفاده از ملات سیمان برای اتصال بهتر به مکعب بتنی چسبانده می‌شوند. پس از روشن کردن دستگاه اهم متر، هر یک از الکترودهای آن را به یک صفحه اتصال می‌دهیم و سپس مقاومت الکتریکی نمایش داده شده ثبت شده و عدد نهایی میانگین مقاومت الکتریکی سه نمونه در نظر گرفته شد. و با قرار دادن آن در رابطه ۲ مقاومت ویژه الکتریکی به دست می‌آید.

$$\rho_s = \frac{R \cdot A}{L} \quad (3)$$

که در آن  $\rho_s$  مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب اهم متر،  $R$  مقاومت الکتریکی ثبت شده توسط دستگاه اهم متر بر حسب اهم،  $A$  سطح مقطع نمونه مکعبی بر حسب متر مربع و  $L$  طول نمونه مکعبی یا همان فاصله بین دو صفحه بر حسب متر است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- جذب مویینگی نمونه‌ها

همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود ضریب جذب مویینه برای نمونه‌های حاوی خاک رس کلسینه از نمونه‌های شاهد بیشتر است دلیل این موضوع تکمیل نشدن واکنش‌های پوزولانی است اما با گذشت زمان و رسیدن نمونه‌ها به سنین بالاتر و کامل تر شدن واکنش‌های پوزولانی این تفاوت بسیار کمتر شده است. مقدار ضریب جذب مویینگی نمونه‌ها به طور کلی با افزایش سن کاهش پیدا کرده است زیرا با گذشت زمان ذرات بیشتری از سیمان هیدراته شده و از طرفی برای نمونه‌های پوزولانی هم واکنش‌های پوزولانی کامل تر می‌شود که با گذشت زمان آب آهک به دست آمده از فرآیند هیدراتاسیون را مصرف کرده و آن را به ژل سیلیکاتی تبدیل می‌کنند، ژل سیلیکاتی تولید شده توسط پوزولان‌ها حفره‌ها و فضاهای خالی را پر می‌کند و در نتیجه آب کمتری به درون بتن راه پیدا خواهد کرد. با افزایش درصد پوزولان مصرفی، مقدار ضریب جذب مویینگی کاهش بیشتری پیدا می‌کند که این اتفاق نتیجه‌ی پر شدن حفرات بیشتر و ترمیم ساختار بتن است که باعث متراکم‌تر شدن بتن می‌شود. در این آزمایش طرح‌های حاوی

مرحله بر حسب گرم،  $C$  سطح مقطع نمونه بر حسب میلی‌متر مربع،  $P$  چگالی آب بر حسب گرم بر میلی‌متر مکعب،  $S$  ضریب جذب مویینه،  $t$  زمان تجمعی بر حسب ثانیه و  $b$  عرض از مبدا می‌باشد.

#### ۲-۳-۲- آزمایش مقاومت در برابر حملات سولفاتی

در این تحقیق برای بررسی مقاومت سولفاتی در همه طرح مخلوط‌ها ابتدا نمونه‌ها به منظور عمل‌آوری مرطوب به مدت ۷ روز در حوضچه آب قرار داده گرفتند سپس برای ارزیابی مقاومت سولفاتی به محلول سولفات سدیم ( $Na_2SO_4$ ) با غلظت ۵ درصد منتقل شدند و بعد از ۲۱ روز و ۸۳ روز از محلول خارج شده و مقاومت سولفاتی آن‌ها با بررسی شکل ظاهری نمونه‌ها، اندازه‌گیری مقاومت فشاری و محاسبه جذب مویینگی نمونه‌ها و مقایسه نتایج با نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط مناسب سنجیده شد. دلیل ۷ روز عمل‌آوری مرطوب نمونه‌ها در آب قبل از قرارگرفتن در محلول سولفات نیاز میکروسلیس به حداقل ۷ روز عمل‌آوری مرطوب می‌باشد و برای یکسان بودن شرایط آزمایش برای همه طرح مخلوط‌ها، سایر نمونه‌ها نیز ۷ روز تحت عمل‌آوری مرطوب در آب قرار گرفتند.

#### ۲-۳-۳- آزمایش مقاومت الکتریکی بتن

آزمایش مقاومت الکتریکی می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی بتن و دوام آن در مقابل نفوذ یون کلراید و مقاومت در برابر خوردگی باشد. هر چه مقاومت الکتریکی بتن بیشتر باشد، در برابر نفوذ یون کلراید نیز مقاوم‌تر خواهد بود. بنابراین، در محیط‌های آبی و خاکی خورنده که بتن در معرض حمله یون‌ها قرار دارد، بالا بودن مقاومت الکتریکی بتن می‌تواند نقش موثری در افزایش دوام آن داشته باشد. این آزمایش برای نمونه‌های مکعبی به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر و در سن ۲۸ روزه و ۹۰ روزه انجام شده است. برای انجام آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی از دستگاهی با نام ونر استفاده می‌شود. در روش مورد استفاده در این تحقیق، از دو صفحه مسی و یک دستگاه اهم‌متر دیجیتالی استفاده شده، این دستگاه دارای دو الکتروود است و دو صفحه مسی در دو وجه (پایین

بر دارد. با گذشت زمان مقادیر ضرایب جذب مویینگی بتن کاهش پیدا کرده‌اند که این اتفاق در پی متراکم‌تر شدن ساختار بتن و پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون سیمان رخ می‌دهد. به مانند نتایج بررسی شده در قسمت قبل در این قسمت نیز جایگزینی پوزولان میکروسیلیس سبب کاهش یافتن مقادیر ضریب جذب مویینگی بتن شده است این پوزولان توانسته است با خاصیت پرکنندگی خود حفرات موجود در بتن را کاهش داده و یا در شکل و ساختار آن‌ها تغییراتی را ایجاد کند (منقطع کردن حفرات از یکدیگر). جذب آب کمتر می‌تواند نشان دهد که بتن‌های ساخته شده با پوزولان در برخورد با مایعاتی که حاوی یون‌های مخرب هستند می‌توانند عملکرد بهتری داشته و دوام بیشتری داشته باشند.

### ۲-۳- مقاومت سولفاتی نمونه‌ها

#### ۲-۳-۱- تاثیر محلول سولفاتی بر شکل ظاهری نمونه‌ها

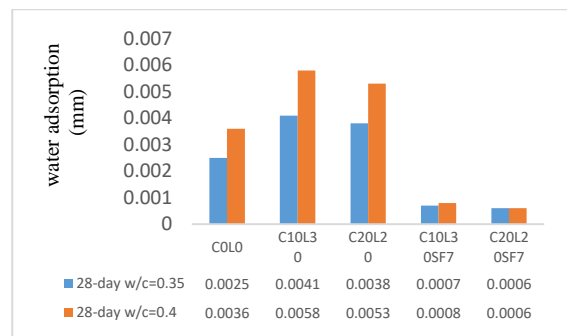
حمله سولفاتی با واکنش سولفات سدیم با آب آهک آغاز می‌شود که طی این واکنش سدیم هیدروکسید و گچ تشکیل می‌شود. سدیم هیدروکسید مقدار pH خمیر سیمان هیدراته شده را افزایش می‌دهد. افزایش pH تأثیر تثبیت‌کننده در اترینگایت و ژل سیلیکاتی دارد، به همین دلیل است که مقدار قابل توجهی اترینگایت در مقایسه با گچ در خمیر سیمان تحت حمله سولفات سدیم تشکیل می‌شود و تجزیه ژل سیلیکاتی نیز به تعویق می‌افتد. گچ تولید شده با برخی از محصولات هیدراتاسیون مانند کلسیم آلومینات‌هیدرات، منوسولفات و یا سه کلسیم آلومینات هیدراته نشده واکنش می‌دهد و اترینگایت ثانویه تشکیل می‌شود. منظور از اترینگایت ثانویه، اترینگایت تشکیل شده در حمله سولفاتی است و با اترینگایت اولیه که در طول تنظیم سیمان پرتلند تشکیل شده، فرق دارد [21].

در این مرحله به منظور ارزیابی مقاومت سولفاتی طرح‌ها، پس از خارج کردن نمونه‌ها از محلول سولفات سدیم از سطح آنها عکس‌برداری صورت گرفت. با توجه به این که در این بخش نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز و ۹۰ روز

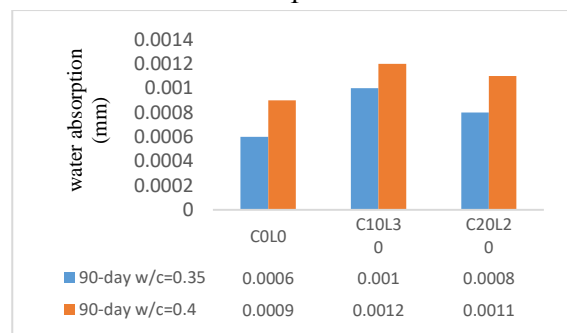
میکروسیلیس عملکرد بهتری را نسبت به طرح‌های بدون میکروسیلیس از خود به نمایش گذاشته‌اند، دلیل این موضوع آن است که ذرات میکروسیلیس ریزتر از ذرات پوزولان خاک رس می‌باشند و از طرفی سرعت واکنش میکروسیلیس بسیار سریع است و در نتیجه می‌تواند در یک مدت زمان معین ژل سیلیکاتی بیشتری را نسبت به پوزولان خاک رس تولید کند بنابراین نمونه‌های بتنی حاوی این پوزولان سریع‌تر به تراکم مطلوب می‌رسند.

### شکل ۲. مقایسه ضرایب جذب مویینه

نمونه‌های ۱: ۲۸ روزه و ۲: ۹۰ روزه



1



2

Fig. 2. Comparison of capillary absorption coefficients of a: 28-day, d b: 90-day concrete samples

از بررسی شکل (۲) می‌توان دریافت که مقادیر ضریب جذب مویینگی بتن با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۳۵ به ۰/۴، افزایش پیدا کرده‌اند افزایش ضریب جذب مویینگی به منزله ورود آب بیشتر به درون بتن از طریق لوله‌های مویینه می‌باشد و این یعنی با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی میزان حفرات و منافذ موجود در ساختار نمونه‌ها بیشتر شده و در نتیجه مقدار آب بیشتری توانسته است به درون بتن راه پیدا کند که این موضوع باعث کاهش یافتن دوام بتن و در نتیجه به خطر افتادن سلامت آن را در



اترینگایت، در ابتدا منافذ بتن بسته شده و در نتیجه تراکم بتن بالا می‌رود که این موضوع باعث افزایش یافتن مقاومت فشاری بتن می‌شود اما با گذشت زمان و افزایش حجم اترینگایت و در نتیجه متورم شدن و ترک برداشتن بتن، شاهد یک کاهش مقاومت چشمگیر خواهیم بود. در ادامه نتایج به دست آمده از این تحقیق به صورت نمودار ارائه خواهند شد و بعد از آن این نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت. در شکل (۴) نمودار میله‌ای مقاومت فشاری نمونه‌ها برای طرح‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۳۵ و در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه آورده شده است، با توجه به نمودارهای فوق می‌توان دریافت که مقاومت فشاری نمونه‌ها در هر سن و در هر نسبت آب به سیمان بعد از عمل‌آوری در محلول سولفاتی کاهش یافته است دلیل آن هم همان‌گونه که گفته شد افزایش حجم اترینگایت و در نتیجه متورم شدن و ترک برداشتن بتن می‌باشد. در سنین بالاتر (۹۰ روزه) این کاهش مقاومت کمی شدیدتر از نمونه‌های ۲۸ روزه مشاهده شد به این خاطر که در سنین بالاتر محلول سولفاتی تاثیر مخرب بیشتری روی بتن گذاشته است، در نمونه‌هایی که علاوه بر خاک رس کلسینه از میکروسیلیس نیز به عنوان پوزولان استفاده شده تاثیر محلول سولفاتی به مراتب کمتر بوده است که دلیل آن متراکم‌تر بودن و نفوذپذیری ناچیز این نمونه‌ها می‌باشد که در نتیجه محلول سولفاتی کمتری به درون آن وارد شده و آثار مخرب کمتری بر آن گذاشته است.

### ۳-۲-۳- تغییرات جذب مویینه نمونه‌ها

در شکل (۹ تا ۱۲) نمودار میله‌ای ضرایب جذب مویینه نمونه‌ها برای طرح‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۳۵ و در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه آورده شده است، که در ادامه به بررسی جزئیات آن پرداخته می‌شود و عملکرد خاک رس کلسینه، پودرآهک و میکروسیلیس بر اساس سن نمونه‌ها و نسبت آب به سیمان در این آزمایش و ارتباط میان جذب مویینه و تاثیر محلول سولفاتی در نمونه‌های بتنی به صورت دقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

کاملاً در محلول یون سولفات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) با غلظت ۵ درصد استفاده شد عمل‌آوری شده‌اند در این شرایط منشا خارجی یون سولفات را داریم که تشکیل بلورها روی سطح نمونه‌ها کاملاً مشهود بوده و برای اثبات آن تصویر شکل (۳) که نشان دهنده تشکیل گچ و اترینگایت روی نمونه‌ها قرار گرفته در محلول سولفات سدیم است در شکل (۳) مشاهده می‌شود، روی نمونه خارج شده از محلول سولفات سدیم بلورهای سوزنی (خیلی ریز) اترینگایت تشکیل شده است که این موضوع در نمونه‌هایی که ۹۰ روز در محلول سولفات سدیم قرار گرفته بودند بیشتر بود. در دراز مدت، اترینگایت ثانویه‌ای که در پی قرار گیری نمونه‌ها در محلول سولفات تشکیل می‌شود افزایش حجم می‌دهد و این انبساط باعث ترک خوردگی بتن می‌شود البته همانطور که گفته شد این موضوع در دراز مدت برای بتن اتفاق می‌افتد و در این تحقیق ترک خوردگی در نمونه‌های بتنی مشاهده نشد.

شکل ۳. نمونه خارج شده از محلول سولفات سدیم



Fig. 3. Sample taken out of sodium sulfate solution

تشکیل گچ و اترینگایت در نمونه‌های پوزولانی نسبت به نمونه شاهد کمتر بود زیرا پوزولان‌ها به دلیل عملکرد فیلر مانند خود و همچنین مصرف آب آهک و تبدیل آن به ژل سیلیکاتی باعث بسته شدن منافذ بتن می‌شوند و در نتیجه یون سولفات کمتری وارد بتن شده و گچ و اترینگایت کمتری تشکیل می‌شود.

### ۳-۲-۳- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها

با ورود یون‌های سولفات به درون بتن و تشکیل گچ و

شکل ۴. نمودار میله‌ای مقاومت فشاری نمونه‌های ۱: ۲۸ روزه، ۲: ۹۰ روزه با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، ۳: ۲۸ روزه و ۴: ۹۰ روزه با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴

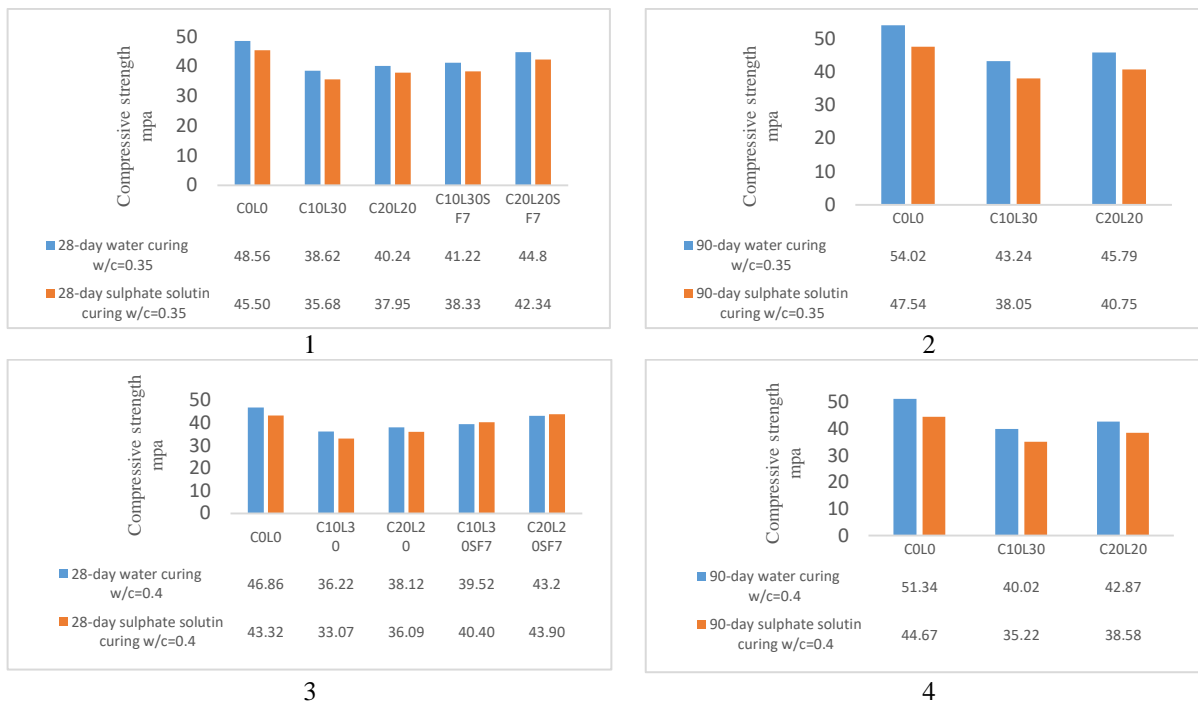


Fig. 4. Compressive strength bar chart of samples 1: 28 days, 2: 90 days with a ratio of water to cement materials of 0.35, 3: 28 days and 4: 90 days with a ratio of water to cement materials of 0.4

شکل ۵. نمودار میله‌ای ضرایب جذب مویینه نمونه‌های ۱: ۲۸ روزه، ۲: ۹۰ روزه با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، ۳: ۲۸ روزه و ۴: ۹۰ روزه با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴

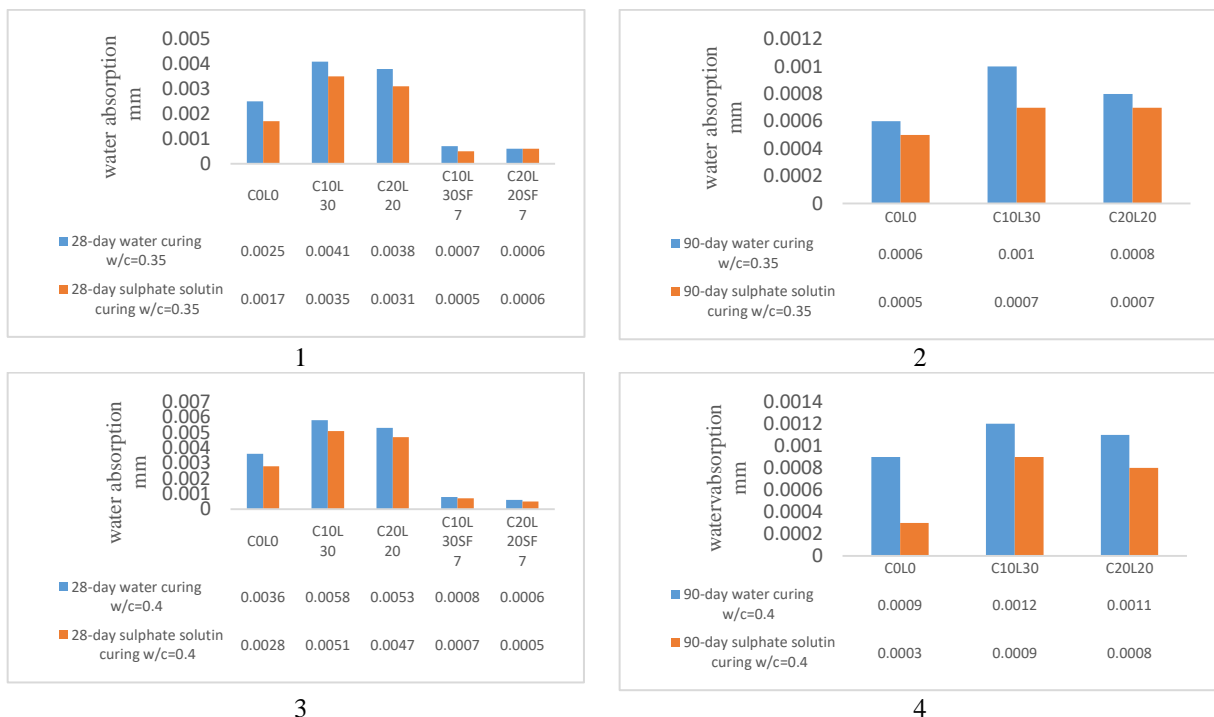


Fig. 5. Bar chart of capillary absorption coefficients of samples 1: 28 days, 2: 90 days with a ratio of water to cement materials of 0.35, 3: 28 days and 4: 90 days with a ratio of water to cement materials of 0.4

شکل ۶. آزمایش مقاومت الکتریکی برای نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه ۱: با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و ۲: با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴

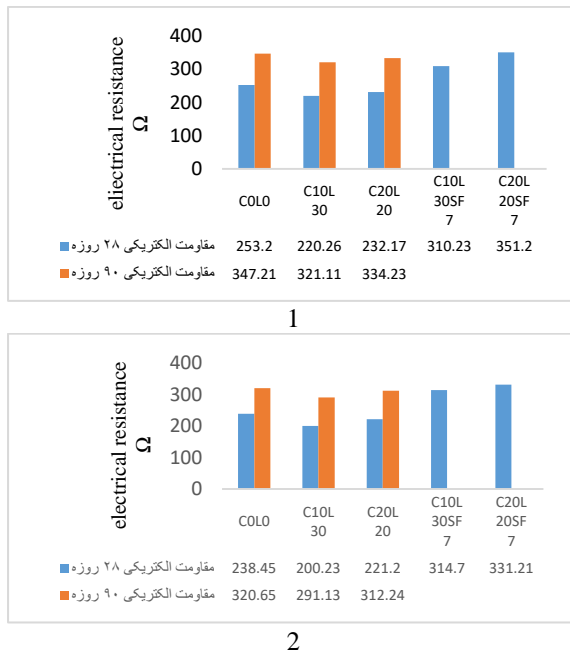


Fig. 6. electrical resistance test for 28 and 90 day samples 1: with a ratio of water to cement materials of 0.35 and 2: with a ratio of water to cement materials of 0.4

در سن ۲۸ روز کمترین مقاومت الکتریکی به دست آمده مربوط به طرح با خاک ۱۰٪ است بنابراین طبق انتظار این طرح دارای بیشترین تخلخل است و در برابر نفوذپذیری یون کلراید ضعیف‌ترین عملکرد را خواهد داشت. با جایگزینی میکروسیلیس مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است و بیشترین مقاومت الکتریکی بدست آمده در این سن مربوط به نمونه‌ای است که بیشترین درصد جایگزینی پوزولان را داشته است (نمونه حاوی ۲۰ درصد خاک و ۷ درصد میکروسیلیس) چراکه در این طرح مقدار تخلخل بتن به کمترین میزان خود می‌رسد و در نتیجه نفوذپذیری این طرح ناچیز خواهد بود. همچنین ملاحظه می‌شود که مقاومت الکتریکی ۹۰ روزه رشد چشمگیری را نسبت به مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه خود داشته‌اند که دلیل آن به تولید ژل سیلیکاتی در پی واکنش پوزولان میکروسیلیس با آب آهک و در نتیجه کاهش یون‌های آزاد و تخلخل بتن مربوط می‌شود. رشد مقاومت الکتریکی طرح‌های حاوی خاک در این

با توجه به نمودارهای فوق می‌توان دریافت که جذب مویینه نمونه‌ها در هر سن و در هر نسبت آب به سیمان بعد از عمل‌آوری در محلول سولفاتی کاهش یافته است دلیل آن هم همان‌گونه که گفته شد افزایش حجم اترینگایت و در نتیجه متورم شدن کمی از فضا‌های مویینه در بتن را مسدود کرده و مانع نفوذ آب به درون بتن می‌شود اما این کاهش جذب از این طریق را نباید امری مفید تلقی کرد زیرا موادی حفرات را پر کرده‌اند که به مرور باعث آسیب جدی و ساختاری به بتن شده و باعث ترک برداشتن بتن و کاهش شدید مقاومت آن می‌شوند. به این خاطر که در سنین بالاتر محلول سولفاتی تاثیر مخرب بیشتری روی بتن می‌گذارد، در نمونه‌هایی که علاوه بر خاک‌رس کلسینه از میکروسیلیس نیز به عنوان پوزولان استفاده شده تاثیر محلول سولفاتی به مراتب کمتر بوده است که دلیل آن متراکم‌تر بودن و در نتیجه نفوذپذیری ناچیز این نمونه‌ها می‌باشد که در نتیجه محلول سولفاتی کمتری به درون آن وارد شده و اثر مخرب کمتری بر آن گذاشته است.

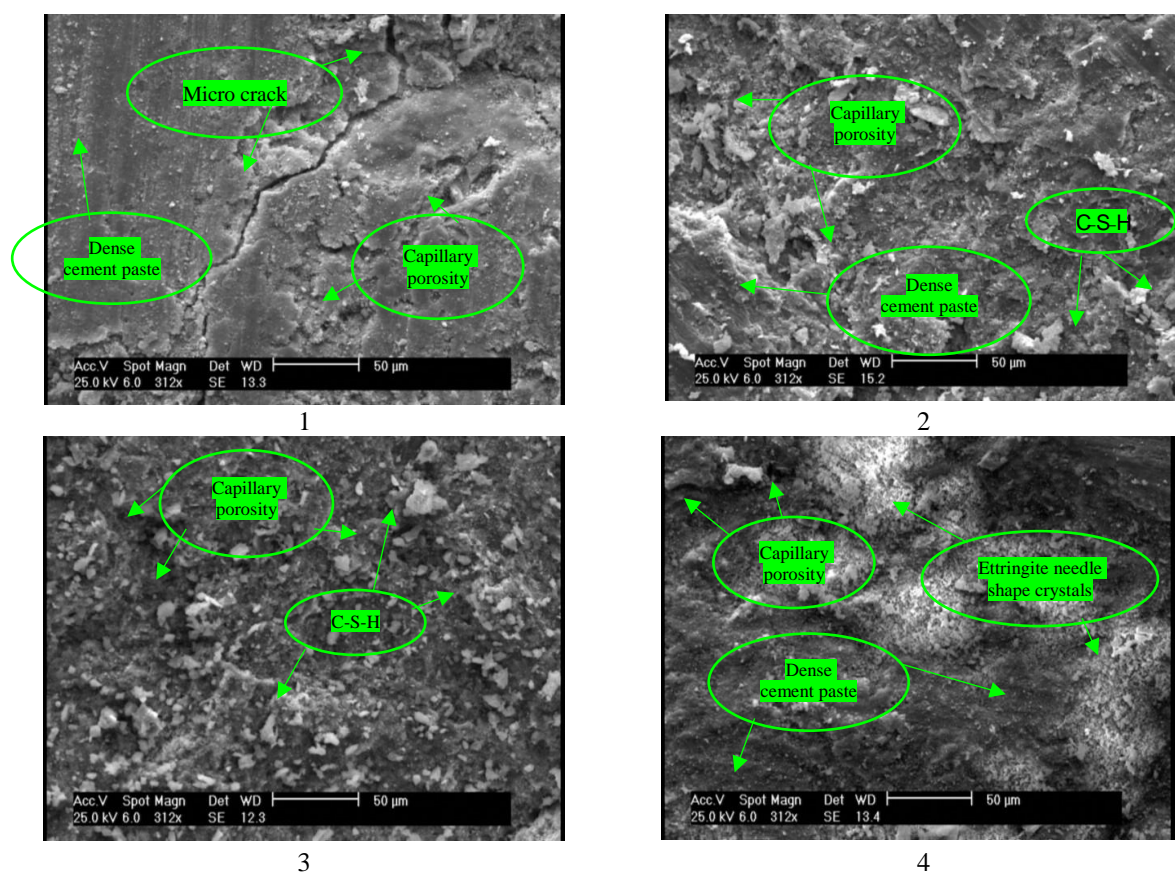
### ۳-۳- مقاومت الکتریکی

نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت الکتریکی برای طرح‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و ۰/۴ در شکل (۶) مشاهده می‌شود. با مشاهده این شکل می‌فهمیم که مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی با گذشت زمان افزایش پیدا می‌کنند و بیشترین مقدار به دست آمده از مقاومت الکتریکی طرح‌ها مربوط به سن ۹۰ روزه آن‌ها می‌باشد زیرا با گذشت زمان ذرات بیشتری از سیمان پرتلند هیدراته شده و پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون موجب کاهش تخلخل موجود در بتن می‌شود، در طرح‌های پوزولانی (بدون میکروسیلیس) در ابتدا مقاومت الکتریکی آنها از شاهد کمتر است که با گذشت زمان باعث پیشرفت واکنش‌های پوزولانی، مصرف آب آهک بیشتر و در پی آن کاهش غلظت کاتیون‌ها و تولید ژل سیلیکاتی بیشتر می‌شود که در نتیجه حفرات موجود در بتن کمتر و کمتر، و مقاومت الکتریکی آنها به مقاومت شاهد نزدیکتر می‌شود.

مقدار مقاومت الکتریکی را به این اندازه افزایش دهد. به هر حال باید توجه داشت که سرعت واکنش پوزولان‌های طبیعی از جمله رس کلسینه بسیار پایین‌تر از پوزولان مصنوعی میکروسیلیس است (که حدود ۹۵ درصد سیلیس فعال دارد) و شاید در دراز مدت این پوزولان‌ها بتوانند عملکردی به مانند میکروسیلیس از خود بروز دهند.

فاصله (از سن ۲۸ روز تا سن ۹۰ روز) به مراتب بهتر از طرح شاهد بوده است که تازه به اندازه طرح‌های حاوی میکروسیلیس رسیده است زیرا سرعت واکنش پوزولان خاک به مراتب پایین‌تر از سرعت واکنش پوزولان میکروسیلیس است و نتوانسته است تا در این مدت نسبتاً کوتاه به اندازه میکروسیلیس در واکنش‌ها شرکت کرده و

شکل ۷. تصاویر میکروسکپ الکترونی: ۱: طرح شاهد با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، ۲: طرح شاهد با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴، ۳: طرح پوزولانی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، ۴: طرح پوزولانی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴



**Fig. 7.** SEM images 1: control design with a water-to-cement ratio of 0.35, 2: control design with a water to cement ratio of 0.4, 3: pozzolanic design with a water to cement ratio of 0.35, and 4: Pozzolanic design with water to cement ratio of 0.4

همین علت می‌تواند میزان جذب مویینه کمتر، مقاومت سولفاتی و الکتریکی بیشتر نسبت به تصویر (۲) داشته باشد. در تصویر (۱) ریز ترک مشاهده شد اما ساختار سیمانی متراکم‌تری در سایر بخش‌ها نسبت به تصویر (۲) دارد. تصاویر (۳ و ۴) نمونه‌های پوزولانی با نسبت آب به مواد سیمانی به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۴ را نشان می‌دهند، با مقایسه ریز ساختار نمونه‌های پوزولانی و طرح‌های شاهد از طریق این تصاویر مشاهده می‌شود که نمونه‌های

۳-۴- بررسی ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از تصاویر میکروسکپ الکترونی

با توجه به تصاویری که از طریق میکروسکپ الکترونی ثبت شده‌اند می‌توان این تفاوت نتایج در بخش‌های قبل را در ریز ساختار بتنی این نمونه‌ها نیز مشاهده نمود. تصاویر (۱ و ۲) که طرح‌های شاهد با نسبت‌های آب به مواد سیمانی به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۴ هستند، تصویر ۱ متراکم‌تر و با خلل و فرج کمتر نسبت به تصویر (۲) می‌باشد و به

وزنی انجام شد که نفوذ در هر سه طرح بتن‌های ( $Lc^3$ ) کمتر از طرح شاهد می‌باشد و در طرح‌های ( $Lc^3$ ) نیز طرحی که رس کلسینه در آن بیشتر بوده نفوذ کمتری داشته است.

۴- مقاومت فشاری نمونه‌ها در هر سن و در هر نسبت آب به سیمان بعد از عمل‌آوری در محلول سولفاتی کاهش یافت و در سنین بالاتر (۹۰ روزه) این کاهش مقاومت کمی شدیدتر از نمونه‌های ۲۸ روزه است. در تحقیقات مشابه نیز حمله سولفاتی در دراز مدت باعث کاهش چسبندگی و مقاومت در بتن و همچنین افزایش حجم آن و ایجاد ترک در آن شده است.

۵- جذب مویینه نمونه‌ها در هر سن و در هر نسبت آب به سیمان بعد از عمل‌آوری در محلول سولفاتی کاهش یافته است که نشان دهنده این است که نفوذ یون سولفات باعث افزایش حجم اترینگایت و در نتیجه آن متورم شدن کمی از فضا‌های مویینه در بتن را مسدود کرده و مانع نفوذ آب به درون بتن شده است.

۶- مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌ها نیز با گذشت زمان و افزایش درصد جایگزینی پوزولان افزایش پیدا کرد. کمترین مقاومت الکتریکی به دست آمده مربوط به طرح با خاک ۱۰٪ می‌باشد و بیشترین مقاومت الکتریکی بدست آمده در این سن مربوط به نمونه‌ای است که بیشترین درصد جایگزینی پوزولان را داشته است (نمونه حاوی ۲۰ درصد خاک و ۷ درصد میکروسیلیس) که دلیل آن به تولید ژل سیلیکاتی در پی واکنش پوزولان میکروسیلیس با آب آهک و در نتیجه کاهش یون‌های آزاد و تخلخل بتن مربوط می‌شود. رشد مقاومت الکتریکی طرح‌های حاوی خاک در این فاصله (از سن ۲۸ روز تا سن ۹۰ روزه) به مراتب بهتر از طرح شاهد بوده است

۷- با مقایسه ریز ساختار نمونه‌های پوزولانی و طرح‌های شاهد از طریق تصاویر میکروسکوپی مشاهده می‌شود که نمونه‌های پوزولانی در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی ساختار متراکم‌تری دارند و دارای خلل و فرج کمتری هستند.

پوزولانی در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی دارای توده خمیری یکنواخت‌تر هستند، ریز ترک در آن‌ها مشاهده نمی‌شود و حفرات کم‌تری دارند بنابراین ساختار متراکم‌تری دارند و دارای خلل و فرج کمتری هستند. در نمونه‌های پوزولانی، پوزولان‌ها با گذشت زمان آب آهک حاصله از فرآیند هیدراتاسیون را مصرف کرده و آن را به ژل سیلیکاتی تبدیل می‌کنند، ژل سیلیکاتی تولید شده توسط پوزولان‌ها حفره‌ها و فضا‌های خالی را پر می‌کند و در نتیجه ریز ساختار متراکم‌تری دارند. همچنین مشاهده می‌شود که تصویر (۳) نسبت به تصویر (۴) دارای ریز ساختار متراکم‌تری است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- در آزمایش جذب مویینی طرح‌های شامل رس کلسینه میزان جذب بیشتری از نمونه‌های شاهد در سن ۲۸ روز داشتند که این اختلاف در سن ۹۰ روزه نمونه‌ها تحت تاثیر عمل کرد دوگانه فیلری و واکنش دهندگی پوزولان‌ها در سنین بالاتر دارد تا حد خوبی جبران شد.

۲- در طرح‌هایی که پوزولان بیشتری استفاده شده جذب مویینه آب کمتر بوده و با افزایش درصد پوزولان مصرفی مقدار جذب مویینی بتن کاهش پیدا می‌کند در نتیجه طرح حاوی ۲۰ درصد رس کلسینه و ۷ درصد میکروسیلیس کمترین ضریب جذب مویینی را در هر دو سن ۲۸ روز و ۹۰ روز به خود اختصاص داد. در مطالعاتی که انجام شده، ذرات متاکائولین آنالیز شده به علت ریزتر بودن از اندازه ذرات سیمان می‌توانند فضای خالی بین ذرات سیمان و سایر دانه‌های موجود در محیط بتن (سنگدانه) را پر کنند و باعث قطع حفرات مویینه و چگالتر شدن خمیر سیمان شوند.

۳- در آزمایش مقاومت در برابر حمله سولفاتی طرح حاوی ۲۰ درصد رس کلسینه و ۷ درصد میکروسیلیس، کمترین آثار تخریب در ظاهر را داشته و بیشترین مقاومت را نسبت به سایر طرح‌های پوزولانی پس از خارج شدن از محلول سولفات سدیم به خود اختصاص داد. در تحقیقی مشابه عمل‌آوری بتن به مدت دو سال در محلول  $NaCl$  ۳٪

- fire". *Ceramics – silikaty*51(1):40-44
- [10] Zoltan, A., and J. Fodor. 2005. "Bentonite, Kaolin and selected clay minerals". Word health organization. Geneva.
- [11] Potgieter- Vermaak, S. S., and J. H. Potgieter. 2006. "Metakaolin as extender in south African cement", *Journal of materials in civil engineering*: 619-623.
- [12] Abdul Razak, H., and H. S. Wong. 2004. "Efficiency of calcined kaolin and silicafume as cement replacement material for strength performance". *Cement and Concrete Research* 35:96- 702.
- [13] Rodrigo Fernandez ,Fernando Martirena, kern I scrivener "The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals A comparison between kaolinite illite and montmorillonite" *cement and concrete research* 41 (2011) 113-122
- [14] Karen I. scrivener "options for the future of cement" *the indian concrete journal* july 2014 vol 88 issue 7
- [15] Scrivener K, Avet F, Maraghechi H (2019) "impacting factors and properties of limestone calcined clay cement" *Green materials* 7(1):3\_14
- [16] Wild, S., J. M. Khatibe., and A. Jones. 1996. "Relative Strength, Pozalanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete", *cement and concrete research*26:1537-1544
- [17] Siddique, R. 2008. *Waste materials and by – product in concrete*. patiala india: springer.
- [18] Ramlochan, T., M. Tomas., and K. A. Gruber. 2000. "The effect of metakaolin on the alkali-silica reaction in the concrete". *Cement and concrete research*30:339-344.
- [19] kostuch, J. A., V. Walters., and T. R. Jones. 2000. "High performance concrete incorporating metakaolin": A review, *concrete* 2000, economic and durable concrete through excellent, R. K. Dhir and M. R. Jones, eds., E and FN spon, London, 1799-1811.
- [20] k. Gopishankar Dr.G.V.Rama Rao "variation of sorptivity in diverse grades of concrete proportioned with fly ash , woodhuskashand rice husk ash". *International research journal of engineering and technology (IRJET)* volume:04 issue:12 dec-2017
- [21] Modarres, Yaqut. 2016. *Thermodynamic simulation of sulfate attack of hardened cement paste*. Master's thesis. teacher training University of Shahid Rajaei (in persian)
- در نمونه‌های پوزولانی، پوزولان‌ها با گذشت زمان آب آهک به دست آمده از فرآیند هیدراتاسیون را مصرف کرده و آن را به ژل سیلیکاتی تبدیل می‌کنند، ژل سیلیکاتی تولید شده توسط پوزولان‌ها حفره‌ها و فضاها را پر می‌کند و در نتیجه ریز ساختار متراکم‌تری دارند.

## ۵- مراجع

- [1] Mangat, E. S., J. M. Khatib., B.T. Molloy. 1994. "Microstructure, chloride diffusion and reinforcement corrosion in blended cement paste and concrete". *Cem Concr Compos* ;6:73–81.
- [2] Habert, G., N. Choupay., J. M. Montel., D. Guillaume., G. Escadeillas. 2008. "Effects of the secondary minerals of the natural pozzolans on their pozzolanic activity". *Cem Concr Res* ;38:963–75.
- [3] Neville, A.; 1999 "concrete science (properties of concrete)"; translation by Famili. Abu Rihan Biruni Publications, 1999 (in persian)
- [4] Tian, B. and M.D. Cohen. 2000. "Does Gypsum Formaton during Sulfate Attack on Concrete Lead to Expantion". *Cement and Concrete Research*, Vol. 30:117-123.
- [5] Mehta, P.K. 1980. "Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement Concrete"-Another Look. *Cement and Concrete Research*, Vol. 13:401-406.
- [6] Collepardi, M. 2001. "Ettringite Formation and Sulfate Attack on Concrete". *Proceeding of Fifth CANMET/ACI International Symposium on Recent Advances in Concrete Technology*, Singapore, SP 200. 21-38.
- [7] Justice, J. M., L. H. Kennison., B. J. Mohr., S. L. Beckwith., J. E. McCormick., B. Wigginz., Z. Z. Zhang., K. E. Kurtis. 2005. "Comparision of two metakaolins and a silica fume used as supplementary cementitious materials". *international symposion on utizilation of high-strength/ high performance concrete*. Washington D.C. June. 20-24.
- [8] Badogiannis, E., Kakali. G., and S. Tsvivilis. 2005. "Metakaolin and supplementary cementitious material optimization of kaolin to metakaolin conversion". *Journal of thermal analysis and calorimetry*81:457-462.
- [9] Morsy, M. S., and S. S. Shebl. 2007. "Effect of silica fume and metakaolin pozzolana on the performance of belend cement paste analys

# The effect of Minoodasht calcined clay of Golestan province on the permeability, durability and improving the microstructure of concrete

Hassan Ghezelsofla<sup>\*1</sup>, Amir Tarighat<sup>2</sup>

1. Master of structural engineering, faculty of Civil Engineering, shahid rajaee teacher training university.  
hassan.ghezel@sru.ac.ir
2. Associate Professor, faculty of Civil Engineering, shahid rajaee teacher training university.  
tarighat@sru.ac.ir

\* Corresponding Author

Received: 2023/11/07

Accepted: 2024/07/10

## Abstract

One of the common ways to increase the life of concrete is the use of pozzolans, some pozzolans that have higher reactivity than ordinary cement lead to greater resistance and less permeability of concrete by reducing concrete pores. Structures made with ordinary Portland concrete generally do not have proper performance in harsh environmental conditions and destructive aggressive factors. Sulfate attack is the process of concrete destruction due to the expansion caused by sulfate reactions inside the concrete, and in the long term, it causes a decrease in cohesion, occurrence of cracks and collapse in the concrete structure, one of the effects of which is the reduction of concrete strength. The addition of metakaolin reduces the porosity in concrete, as a result, concretes containing metakaolin have lower permeability compared to normal concrete. In this research, calcined clay was used as pozzolan, first the soil was heated to a temperature of 700 degrees Celsius for 3 hours so that the calcination process takes place, then calcined clay along with a percentage of limestone powder and microsilica was replaced by cement. The purpose of this combination for cement materials is to achieve a mixture design that the concretes made by it have better resistance than normal concretes against aggressive and corrosive environmental conditions. In this study, ettringite crystals were formed on the samples processed in sodium sulfate solution, which were less in the pozzolanic samples than in the control sample. At early ages, the capillary absorption coefficient for samples containing calcined clay is higher than the control samples, but this difference is greatly reduced as the samples age and the pozzolanic reactions become more complete. The electrical resistance values of the samples also increased with the passage of time and the increase in pozzolan replacement percentage. Also, in all the experiments, the addition of microsilica fills the empty spaces in the concrete, because the microsilica particles, being smaller than the pozzolan particles of the clay used and the faster reactivity of microsilica produces more silicate gel in a shorter period of time than clay pozzolan and makes the concrete denser. In this research, 10 mixed designs were used in 2 ratios of water to cement materials: 0.35 and 0.4. In each proportion of clay in percentages of 10 and 20%, limestone powder in percentages of 30 and 20%, respectively, and microsilica along with the combination of soil and lime in 7% by weight as powder materials were replaced by cement. In order to check the properties of the prepared soil, XRD test was performed to ensure the amorphousness of the soil particles and the presence of pozzolanic compounds on it. Also, to check and analyze the durability of concrete, sulfate resistance, capillary absorption and electrical resistance tests were used on 10 cm cube samples at the age of 28 and 90 days. In this research, designs containing 20% calcined clay, 20% lime, and 7% microsilica have the best performance in pozzolanic designs and are introduced as optimal pozzolanic designs in the conducted experiments.

**Keywords:** pozzolan, sulfate attack, ettringite, capillary absorption, electrical resistance of concrete.