

## بررسی دوام ملات‌های حاوی پوزولان طبیعی تحت تأثیر کربناسیون

علی اکبر رمضانپور<sup>۱</sup>، مازیار کاظمیان<sup>۲</sup>، سعید صدیقی<sup>۳</sup>، فرناز بهمن‌زاده<sup>۴</sup>، رادش امیری<sup>۵</sup>، امیرمحمد رمضانپور<sup>۶</sup>

۱- استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست

۲ و ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران و محیط‌زیست، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت

۴- دانشجوی دکترا مهندسی عمران و محیط‌زیست، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت

۵- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران و محیط‌زیست

۶- استادیار دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی عمران

kazemian.maziar@gmail.com

### چکیده

دوام مصالح پایه سیمانی به سبب موارد استفاده فراوان آن در صنعت ساختمان، همواره به عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای توسعه پایدار زیرساخت‌ها و ساختمان‌های شهری شناخته شده است. یکی از راه‌های بهبود دوام بتن، به‌خصوص در محیط‌های خورنده، استفاده از پوزولان‌های طبیعی می‌باشد. از طرفی امروزه با افزایش تولید گاز کربن‌دی‌اکسید در شهرها، بررسی آثار پدیده کربناسیون بر خواص دوامی بتن، ارزش روزافزونی یافته است. در این مقاله به بررسی تأثیر پدیده کربناسیون بر خواص ملات‌های حاوی پوزولان‌های طبیعی پرداخته شده است. در ساخت نمونه‌ها از دو پوزولان طبیعی پومیس خاش و تراس جاجرود به عنوان مواد جایگزین سیمان به میزان ۲۰ درصد وزن سیمان و همچنین از سه نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۴، ۰/۴۸۵ و ۰/۴ استفاده شده است. در این تحقیق، آزمایش مقاومت فشاری به عنوان شاخص خواص مکانیکی و همچنین نشانگر درجه پیشرفت هیدراسیون در نمونه‌ها به کار رفته است و به منظور مطالعه خواص دوامی ملات‌ها، عمق کربناسیون، جذب آب موئینه و مقاومت الکتریکی نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است.

باتوجه به نتایج، استفاده از پوزولان‌های طبیعی سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها و افزایش عمق کربناسیون در آن‌ها می‌شود درحالی‌که افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را در پی دارد. نتایج حاصله از آزمایش جذب آب موئینه حاکی آن است که پدیده کربناسیون باعث کاهش ضریب جذب موئینی شماری از نمونه‌ها شده اما در برخی دیگر این ضریب را افزایش می‌دهد. در نهایت می‌توان ادعان داشت که نمونه‌های حاوی تراس در سنین اولیه عملکرد بهتری نسبت به پومیس از خود نشان داده‌اند در صورتی که با افزایش سن نمونه‌ها، عملکرد پومیس بهبود یافته است و انتظار می‌رود که با گذر زمان، عملکرد بهتری نسبت به تراس از خود نشان دهد.

کلمات کلیدی: پوزولان طبیعی، دوام، کربناسیون، نفوذپذیری، ملات

## ۱. مقدمه

پدیده کربناسیون در بتن به نفوذ گاز کربن دی‌اکسید از طریق فضاهای مویینه و واکنش آن با محصولات سیمان و به ویژه هیدروکسید کلسیم اطلاق می‌شود. واکنش اصلی صورت گرفته در حضور رطوبت، با مصرف کلسیم هیدروکسید، منجر به کاهش قلیائیت بتن می‌گردد. این پدیده در بتن‌های غیرمسلح مخرب شناخته نشده و حتی می‌تواند به سخت‌تر شدن و کاهش فضاهای خالی بتن نیز منجر گردد. لیکن در خصوص بتن‌های مسلح با افت قلیائیت و کاهش pH آب حفره‌ای به مقادیر کم‌تر از ۹، لایه محافظ آرماتور دچار مخاطره شده و با از بین رفتن آن، خوردگی در آرماتور آغاز می‌گردد. در اغلب موارد این خوردگی توأم با نفوذ یون‌های کلراید بوده و کربناسیون به عنوان عامل کاتالیزوری در خوردگی شدیدتر یون کلراید عمل خواهد نمود [۱].

به منظور اندازه‌گیری میزان نفوذ کربن دی‌اکسید (عمق کربناسیون) در بتن و مقایسه عملکرد بتن‌های مختلف با یکدیگر، از آزمایش کربناسیون تسریع شده استفاده می‌گردد. مقایسه نتایج حاصل از کربناسیون طبیعی و کربناسیون تسریع شده حاکی از آن است که رابطه خطی بین ضریب کربناسیون طبیعی و تسریع شده وجود دارد و همچنین نسبت ضریب کربناسیون تسریع شده به ضریب کربناسیون طبیعی متأثر از نوع سیمان نمی‌باشد [۲].

طی تحقیقات انجام شده، ضریب کربناسیون در رطوبت نسبی ۶۰ درصد بیشترین مقدار را دارا می‌باشد و به هنگام افزایش آن از ۷۵ درصد به ۹۰ درصد، ضریب کربناسیون افت شدیدی را متحمل می‌شود [۳]. به این سبب که در رطوبت‌های نسبی بالا، مقدار کربن دی‌اکسید نفوذ کرده بسیار کاهش می‌یابد و همچنین در درصدهای پایین رطوبت نسبی، به دلیل کم بودن رطوبت، کربن دی‌اکسید کمتری می‌تواند در آن حل و یونیزه شود. در نتیجه در هر دو حالت، ضریب کربناسیون کاهش می‌یابد.

امروزه به سبب اهمیت یافتن مسائل زیست‌محیطی، در تمامی صنایع، کاهش تولید گاز کربن دی‌اکسید در دستور کار قرار گرفته است و از آن جایی که تولید هر تن سیمان منجر به تولید یک تن گاز کربن دی‌اکسید می‌شود [۴]، کاهش تولید سیمان امری الزامی شمرده می‌شود. یکی از راه‌های کاهش تولید سیمان، استفاده از پوزولان‌ها به عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن می‌باشد. براساس استاندارد ASTM C618، پوزولان ماده سیلیسی آلومیناتی است که به‌خودی‌خود، ارزش چسبندگی ندارد، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت و در درجه حرارت معمولی با کلسیم هیدروکسید واکنش شیمیایی داده و ترکیباتی را به وجود می‌آورد که این ترکیبات، خاصیت سیمانی و چسبندگی دارند [۵].

پوزولان‌ها به لحاظ منشأ شکل‌گیری به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. مقصود از طبیعی بودن آن است که به انجام عملیاتی جهت اصلاح خصوصیات شیمیایی و کانی‌های آن‌ها نیاز نیست و مستقیماً می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. همچنین تنها به منظور تولید پوزولان، فرآوری شده‌اند. این فرآوری معمولاً شامل خرد کردن، آسیاب کردن، و جداسازی اندازه‌ها می‌باشد. در بعضی از موارد، فرآوری ممکن است شامل فعال‌سازی حرارتی نیز بشود [۶].

باتوجه به خواص مواد پوزولانی و واکنش‌های آن‌ها در بتن، تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌ها کاهش می‌یابد در نتیجه گاز کربن دی‌اکسید کم‌تری به داخل بتن نفوذ می‌کند. از طرفی با مصرف کلسیم هیدروکسید توسط پوزولان‌ها، از خاصیت قلیایی بتن کاسته می‌شود که این عامل مقاومت بتن در برابر کربناسیون را کاهش می‌دهد [۷]. باتوجه به دو اثر متضاد فوق، برای هر پوزولان باید بررسی کرد که کدام یک از عوامل حاکم می‌باشد.

پومیس خاش و تراس جاجرود دو منبع پوزولان طبیعی شناخته شده در ایران می‌باشند که هر دو از خود ویژگی‌های پوزولانی مناسبی را جهت استفاده در صنعت سیمان نشان داده‌اند. استفاده از پومیس به عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن می‌تواند منجر به کاهش قابل قبول در مقدار یون‌های کلراید نفوذ کرده به بتن شود [۸]. همچنین طبق مشاهدات قیاسوند و همکاران افزودن تراس جاجرود نیز می‌تواند باعث بهبود مقاومت نمونه‌های بتنی در برابر نفوذ یون‌های کلراید شود [۹].

آزمایش‌های صورت پذیرفته در زمینه کربناسیون بر روی نمونه‌های حاوی پومیس راوی این نکته بوده است که استفاده از پومیس در بتن باعث افزایش عمق کربناسیون شده است [۱۰]. همچنین طبق نتایج گزارش شده توسط رضائی، نمونه‌های حاوی تراس نیز مقاومت کمتری در برابر کربناسیون، از خود نشان داده‌اند [۱۱]. در این مقاله به بررسی و مقایسه خواص دوامی ملات‌های پایه سیمانی حاوی پوزولان‌های طبیعی پومیس خاش و تراس جاجرود که در مجاورت کربناسیون تسریع شده قرار داشته‌اند، پرداخته شده است.

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

### ۱.۲. مصالح مصرفی

#### • سیمان و مواد پوزولانی

سیمان مورد استفاده از نوع ۴۲۵-۱ می‌باشد. از پوزولان‌های پومیس و تراس جاجرود به عنوان پوزولان طبیعی استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات فیزیکی و در جدول ۲ آنالیز شیمیایی مصالح سیمانی مورد استفاده ذکر شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی مصالح سیمانی

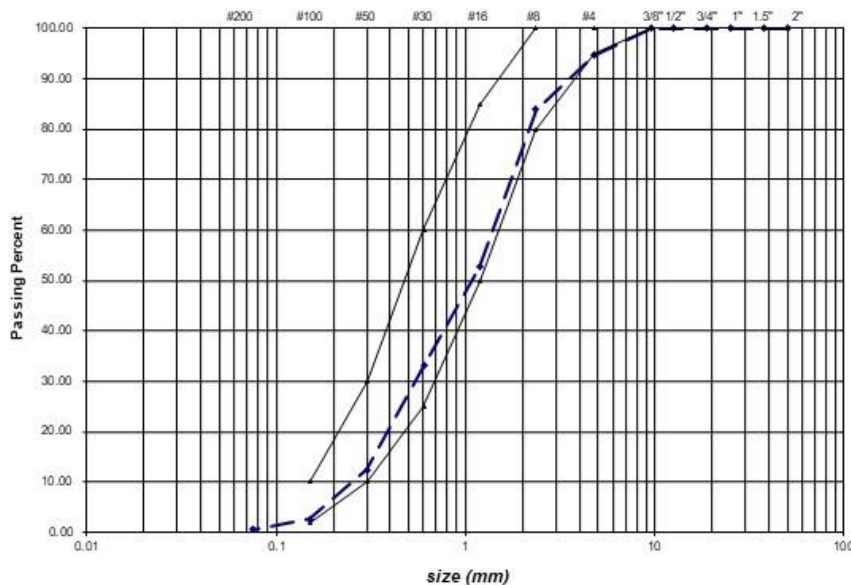
مصالح مصرفی	ریزی در مقیاس بلین (cm <sup>2</sup> /gr)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	باقیمانده روی الک ۴۵ μ (%)	باقیمانده روی الک ۹۰ μ (%)
سیمان	۳۲۹۹	۳/۰۹	۱۱/۴۸	۰/۴۳
پومیس	۵۲۲۳	۲/۶۱	۱۱/۱۶	۰/۶۳
تراس	۳۱۹۹	۳/۲۷	۳۷/۸۱	۲۱/۱۸

جدول ۲- آنالیز شیمیایی مصالح سیمانی

ترکیب شیمیایی	سیمان نوع ۴۲۵-۱ (%)	پومیس خاش (%)	تراس جاجرود (%)
SiO <sub>2</sub>	۲۰/۸	۵۶/۴	۷۴/۵
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۰۹	۱۲/۳	۱۰/۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵/۶	۴/۷	۲/۷
CaO	۶۳	۱۰/۴	۲/۹۵
Na <sub>2</sub> O	۰/۲۰	۲/۳۶	۱/۶
Cl	۰/۰۲۰	۰/۰۴۴	۰/۰۰۶
K <sub>2</sub> O	۰/۸۰	۱/۴۸	۲/۲۵
MgO	۱/۴۶	۱/۹	۱/۴۵
SO <sub>3</sub>	-	۰/۱۹	۰/۱۳
L.O.I	۲/۱۹	۹/۱۲	۳/۱۸

• سنگدانه

ماسه مورد استفاده از حدود دانه‌بندی مطرح شده در استاندارد ASTM C33 پیروی کرده و دانه بندی آن مطابق شکل ۱ در ساخت نمونه‌های ملاتی استفاده شده است.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی ماسه مصرفی

جدول ۳ نیز مشخصات فیزیکی ماسه مصرفی نشان می‌دهد.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سنگدانه

سنگدانه	چگالی ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	درصد جذب آب اشباع
ماسه	۲/۵۶	۲/۹

• آب و مواد افزودنی

جهت ساخت نمونه‌ها از آب شرب شهر تهران استفاده شده است. باتوجه به استفاده از پوزولان‌ها، مخصوصاً پوزولان‌های طبیعی که به سبب ساختار فیزیکی خشن جذب آب بالایی دارند، فوق روان‌کننده پایه پلی‌کربوکسیلات اثر با وزن مخصوص ۱/۱  $\text{kg}/\text{lit}$  مورد استفاده قرار گرفته است.

۲.۲. طرح اختلاط نمونه‌های ملات

به منظور بررسی تاثیر جایگزینی سیمان با پوزولان‌های مختلف بر مشخصات مکانیکی و دوامی ملات، دو پوزولان طبیعی پومیس خاش و تراس جاجرود به میزان جایگزینی ۲۰ درصد وزنی سیمان به کار رفته است. برای ساخت این نمونه‌ها از سه نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۸۵، ۰/۴۴ و ۰/۴ استفاده شده و

مجموع تعداد طرح‌های اختلاط، ۹ مخلوط می‌باشد. همچنین به منظور ثابت نگهداشتن میزان روانی مخلوط در بازه ۱۸-۲۰ سانتی‌متر از مقدار لازم فوق روان‌کننده استفاده شده است. در جدول ۴ طرح اختلاط نمونه‌های ملاتی آورده شده است که در آن حروف P، C و T به ترتیب نمایانگر ملات حاوی سیمان پرتلند، پومیس و تراس می‌باشد. همچنین SP به معنای فوق روان‌کننده است. استفاده از علامت \* در قسمت روانی برخی طرح اختلاط‌ها به معنای بالاتر بودن روانی مخلوط نسبت به حدود مورد نظر بدون استفاده از فوق‌روان‌کننده می‌باشد.

جدول ۴- طرح اختلاط نمونه‌های ملات‌ها

شماره طرح	نام طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	مقدار پوزولان (%)	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	پوزولان (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت SP به مواد سیمانی	روانی (mm)
۱	C-0.485	۰/۴۸۵	۰	۵۲۰	۰	۲۵۲/۲	۱۴۳۱	۰	۲۲*
۲	C-0.44	۰/۴۴	۰	۵۲۰	۰	۲۲۸/۸	۱۴۹۱	۰	۱۸/۸۸
۳	C-0.4	۰/۴	۰	۵۲۰	۰	۲۰۸	۱۵۴۴	۰/۲۴	۱۸/۴
۴	P-0.485	۰/۴۸۵	۲۰	۴۱۶	۱۰۴	۲۵۲/۲	۱۴۱۶	۰/۰۸	۲۰
۵	P-0.44	۰/۴۴	۲۰	۴۱۶	۱۰۴	۲۲۸/۸	۱۴۷۵	۰/۱۵۷	۱۸/۷۵
۶	P-0.4	۰/۴	۲۰	۴۱۶	۱۰۴	۲۰۸	۱۵۲۴	۰/۴۲۷	۱۹/۴
۷	T-0.485	۰/۴۸۵	۲۰	۴۱۶	۱۰۴	۲۵۲/۲	۱۳۷۰	۱/۹۱	۱۹/۲
۸	T-0.44	۰/۴۴	۲۰	۴۱۶	۱۰۴	۲۲۸/۸	۱۴۲۹	۱/۹۵	۱۸/۲
۹	T-0.4	۰/۴	۲۰	۴۱۶	۱۰۴	۲۰۸	۱۴۷۸	۲/۳۲	۱۸/۸۵

### ۳.۲. ساخت و عمل‌آوری

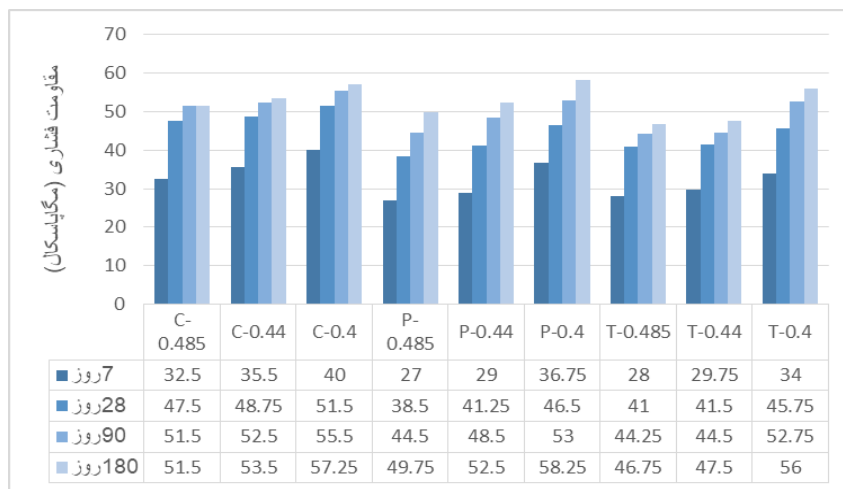
ساخت ملات با پن میکسر انجام گرفته است. برای اختلاط، ابتدا ماسه و سیمان به صورت خشک به مدت ۱ دقیقه مخلوط شده و در ادامه به آن دو سوم آب اختلاط اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه اختلاط صورت گرفته است. نهایتاً آب باقیمانده به همراه پوزولان و فوق روان‌کننده به مخلوط اضافه شده و مواد و مصالح به مدت ۶ دقیقه به صورت کامل با یکدیگر ترکیب شده‌اند. پس از اطمینان از نتایج مناسب بتن تازه و همچنین عدم مشاهده آب‌انداختگی و جداسدگی، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر به همراه نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر از ملات ساخته شده، تهیه شده است. پس از ساخت ملات‌ها، قالب‌ها بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در محیط مرطوب باز شده و نمونه‌ها به مدت ۵۶ روز در محلول آب و آهک نگهداری شده‌اند.

همانگونه که پیش‌تر ذکر شد، پوزولان‌ها به صورت مخلوط در آب و فوق روان‌کننده استفاده شده‌اند و این عمل می‌تواند پخش‌شدگی بهتر پوزولان‌ها در ملات را نسبت به اختلاط خشک آن‌ها نتیجه دهد. ساخت تمامی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه بتن و مرکز تحقیقات و دوام دانشگاه صنعتی امیرکبیر صورت پذیرفته است.

### ۳. نتایج آزمایش‌ها و تفسیر

#### ۱.۳. مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری به عنوان شاخص خواص مکانیکی ملات‌ها بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰\*۱۰\*۱۰ در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز انجام گرفته است که نتایج آن در شکل ۲ ذکر شده است.



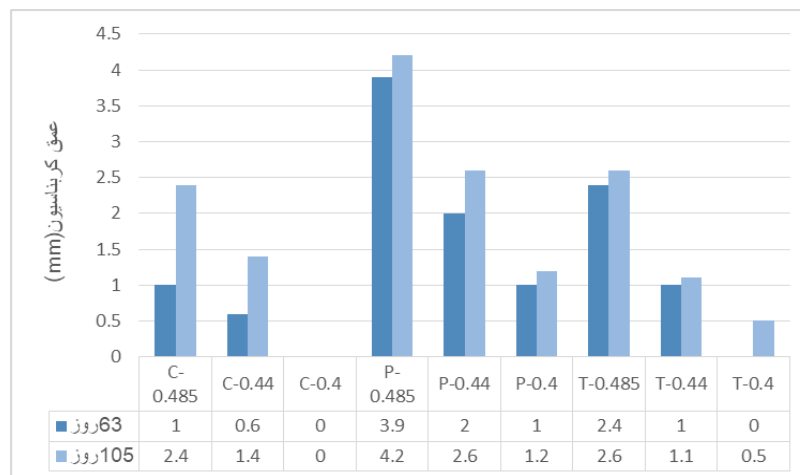
شکل ۲- مقاومت فشاری ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه ملات‌ها

باتوجه به شکل ۲ و مقایسه نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری می‌توان به نکات زیر پی برد:

- با افزایش سن نمونه‌ها مقاومت فشاری آن‌ها افزایش می‌یابد که علت آن پیشرفت بیش‌تر واکنش‌های هیدراسیون سیمان و واکنش پوزولانی در طول زمان می‌باشد.
- نتایج راوی این مهم است که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پومیس در سن ۱۸۰ روز بسیار نزدیک به مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد می‌باشد و هر چه نسبت آب به مواد سیمانی کاهش یابد، این فاصله کمتر می‌شود. به‌گونه‌ای که در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ نمونه‌های حاوی پومیس مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان داده‌اند. در نتیجه می‌توان بیان نمود که تاثیر پومیس در افزایش مقاومت فشاری با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، افزایش می‌یابد.
- با مقایسه نتایج مقاومت ۱۸۰ روزه نمونه‌های پومیس با مقاومت‌های پیش از آن و همچنین مقایسه آن با نتایج نمونه شاهد، می‌توان نتیجه گرفت که همچنان واکنش‌های پوزولانی در حال انجام می‌باشند و انتظار می‌رود که با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت آنها نیز به مراتب بیشتر از نمونه‌های شاهد شود.
- با مقایسه عملکرد پوزولان‌ها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نمونه‌های حاوی پومیس عملکرد بهتری از نمونه‌های حاوی تراس، مخصوصا در سنین بالاتر، از خود نشان داده‌اند. که علت آن را می‌توان ریزی بسیار بیشتر ذرات پومیس نسبت به تراس دانست که باعث افزایش واکنش پذیری آن و همچنین هسته‌زایی شده است.

### ۲.۳. عمق کربناسیون

به منظور بررسی مقاومت ملات‌های پوزولانی در برابر کربناسیون، نمونه‌ها پس از طی دوره عمل‌آوری، به مدت ۶۳ و ۱۰۵ روز در مجاورت گاز کربن‌دی‌اکسید با غلظت ۵٪ و رطوبت ۶۰٪ قرار گرفتند. پس از اتمام دوره مجاورت، بر روی سطح مقطع برش خورده نمونه‌ها محلول ۱٪ فنل فتالین پاشیده شد و عمق تغییر رنگ نداده اندازه‌گیری گردید و نتایج آن در شکل ۳ به صورت خلاصه آورده شده است.

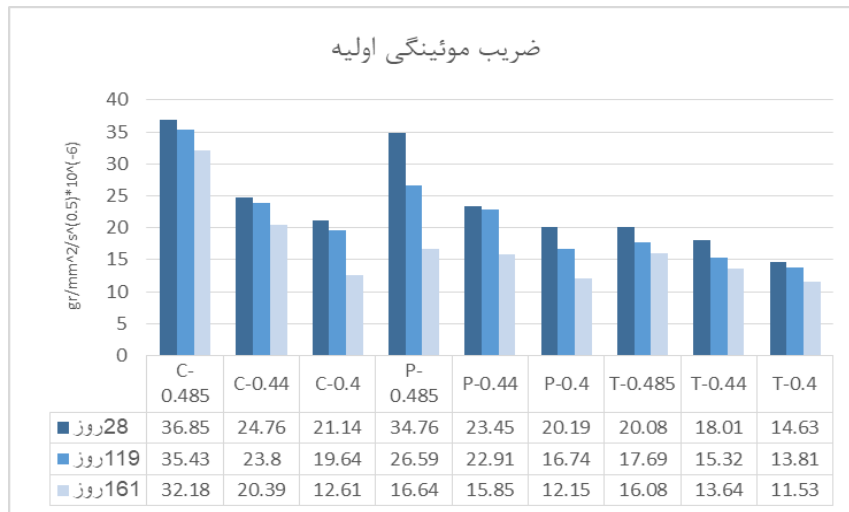


شکل ۳- عمق کربناسیون ملات‌ها پس از ۶۳ و ۱۰۵ روز مجاورت با گاز کربن‌دی‌اکسید

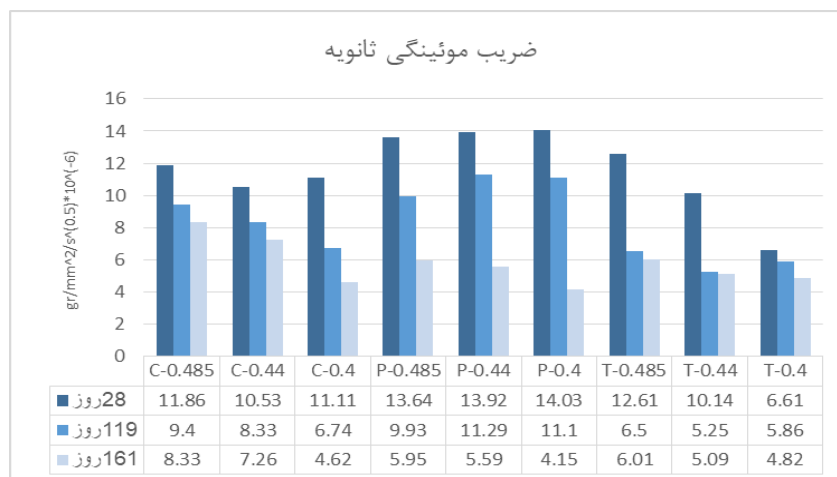
- با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، عمق کربناسیون کاهش یافته است. که علت آن کاهش حفرات موئینه و در نتیجه نفوذ کمتر گاز کربن‌دی‌اکسید به داخل ماتریس سیمان می‌باشد.
- استفاده از مواد پوزولانی به سبب وقوع واکنش‌های پوزولانی، کاهش نفوذپذیری خمیر سیمان را در پی دارد از طرفی این واکنش‌های پوزولانی، آهک موجود در خمیر سیمان را مصرف می‌کنند و باعث کاهش خاصیت قلیائیت ملات می‌شوند که خود باعث کاهش مقاومت ماتریس سیمان در برابر نفوذ کربناسیون می‌گردد. با توجه به شکل ۳ می‌توان بدین گونه نتیجه گرفت که در ملات‌های حاوی مواد پوزولانی، کاهش قلیائیت حاکم بوده و عمق کربناسیون افزایش می‌یابد.
- بدترین عملکرد در برابر کربناسیون را ملات‌های حاوی پومیس از خود نشان داده‌اند.

### ۳.۳. جذب آب موئینه

از آزمایش جذب آب موئینه به عنوان شاخصی جهت مقایسه نفوذپذیری ملات‌های حاوی پوزولان‌های مختلف استفاده شده است. بر اساس نتایج این آزمایش می‌توان اظهار نظرهایی در مورد دوام ملات‌ها داشت بدین صورت که هر چه مقدار آب جذب شده کم‌تر باشد، خطر انتقال یون‌های مخرب نیز به داخل ملات کم‌تر بوده که نشانگر دوام بالاتر ملات در برابر یون‌های مخرب می‌باشد. در شکل ۴ و ۵ به ترتیب ضرائب جذب موئینی اولیه و ثانویه ملات‌های ۲۸، ۱۱۹ و ۱۶۱ روزه حاصل از نتایج آزمایش جذب آب موئینه به نمایش درآمده است. در ادامه و در شکل ۶ به مقایسه ضرائب جذب موئینی ملات‌های شاهد و ملات‌هایی که در مجاورت ۶۳ روزه با کربن‌دی‌اکسید بوده‌اند، پرداخته شده است.



شکل ۴- ضریب موئینگی اولیه ۵۶، ۱۱۹ و ۱۶۱ روزه ملات‌ها



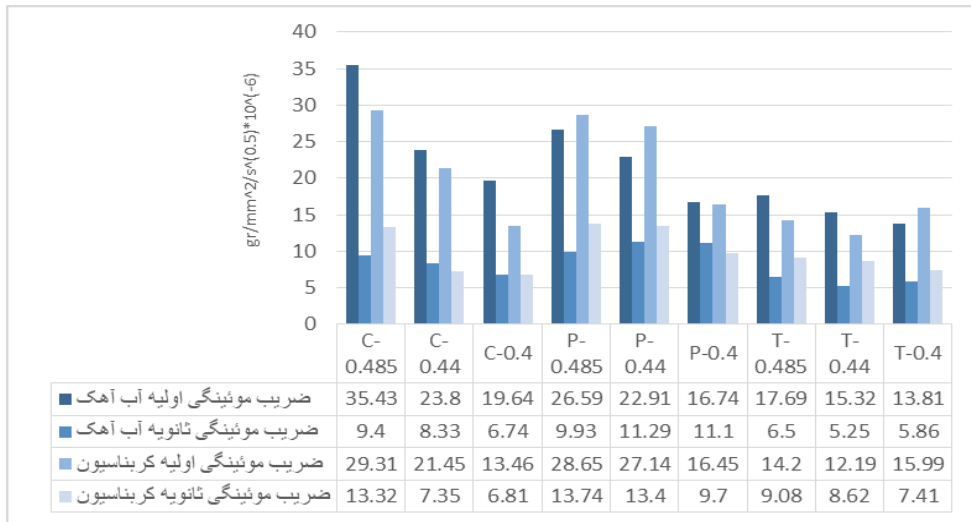
شکل ۵- ضریب موئینگی ثانویه ۵۶، ۱۱۹ و ۱۶۱ روزه ملات‌ها

باتوجه به نتایج آزمایش جذب آب موئینه می‌توان به نتایج زیر رسید:

- با افزایش سن نمونه‌ها، ضریب موئینگی اولیه و ثانویه تمامی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. علت این امر پیشرفت واکنش‌های سیمانی و پوزولانی در ملات‌ها و نتیجتاً کاهش فضای موئینه نمونه‌ها می‌باشد.
- کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، کاهش ضریب جذب موئینگی را در پی دارد. زیرا با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، تخلخل کل و تخلخل موئینه نمونه‌ها کاهش می‌یابد همچنین شکل لوله‌های موئینه دارای پیچ و خم بیشتری می‌گردد.
- کاهش ضریب موئینگی در نمونه‌های حاوی پومیس بین سن ۲۸ روز تا ۱۶۱ روز نسبت به دیگر نمونه‌ها بسیار بیش‌تر می‌باشد که می‌توان دلیل آن را پایین بودن فعالیت پوزولانی پومیس در سنین اولیه دانست.
- نمونه‌های حاوی تراس از همان سن ۲۸ روز ضریب موئینگی مناسبی را از خود نشان می‌دهند که راوی این نکته است که تراس به سبب دارا بودن مقادیر زیاد سیلیس، فعالیت پوزولانی مناسبی را دارا است.



- علی‌رغم زیاد بودن مقادیر ضریب موئینگی نمونه‌های حاوی پومیس در سنین اولیه، مشاهده می‌شود که در سن ۱۶۱ روز عملکرد آن نمونه‌ها بهتر از ملات شاهد و ملات‌های حاوی تراس می‌باشد که می‌توان این امر را به فعالیت پوزولانی آهسته‌تر پومیس نسبت داد.
- در شکل ۶ به مقایسه ضرایب موئینگی اولیه و ثانویه ملات‌های شاهد و ملات‌هایی که در مجاورت ۶۳ روزه با گاز کربن‌دی‌اکسید بوده‌اند، پرداخته شده است.

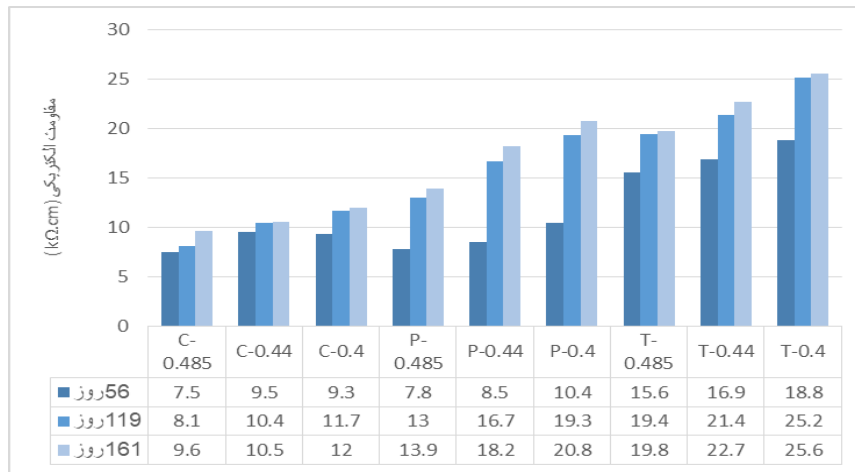


شکل ۶- مقایسه ضریب موئینگی اولیه و ثانویه ۱۱۹ روزه ملات‌های نگهداری شده در آب آهک و محیط کربناسیون

- در نمونه‌های شاهد به سبب واکنش کلسیم هیدروکسید با گاز کربن‌دی‌اکسید و رسوب کلسیم کربنات شاهد کاهش حفرات موئینه و نتیجتاً کاهش ضریب موئینگی نمونه‌ها هستیم. تحقیقات دیاس نتایج این آزمایش را تأیید می‌کند [۱۲].
- در نمونه‌های حاوی پوزولان، گاهی صورت پذیرفتن پدیده کربناسیون سبب افزایش ضریب موئینگی و گاهی باعث کاهش آن شده‌است. این نبود روند معین در تغییرات ضریب جذب موئینه را می‌توان به عدم مشاهده روند ثابت در تغییرات تخلخل بتن تحت کربناسیون نسبت داد به گونه‌ای که باتوجه به تحقیقات وو و یه، پدیده کربناسیون در بتن‌های پوزولانی به سبب کم بودن مقدار کلسیم هیدروکسید و همچنین کم کلسیم بودن ژل کلسیم سیلیکاتی، باعث افزایش تخلخل کل و تخلخل موئینه موثر می‌گردد که این عامل افزایش ضریب موئینگی را در پی دارد [۱۳]. از طرفی دیگر، حسین و همکاران گزارش کردند که تخلخل بتن‌هایی که در مجاورت کربناسیون تسریع شده هستند، با گذر زمان کاهش یافته است [۱۴].

#### ۴.۳. مقاومت الکتریکی

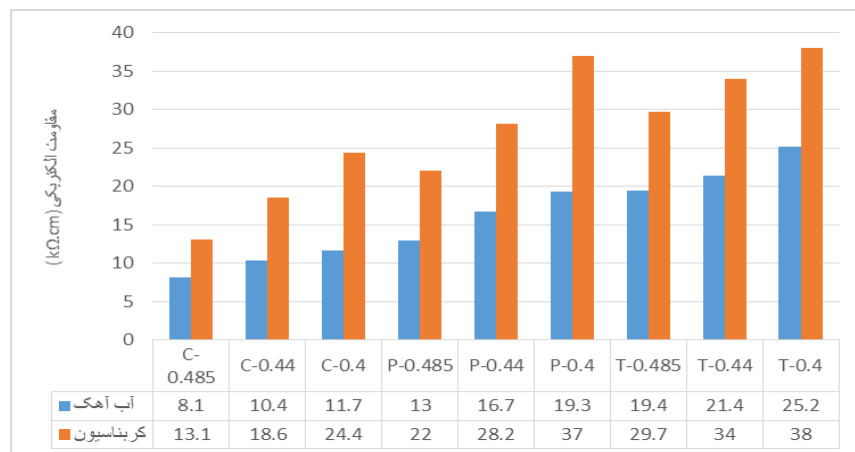
مقاومت الکتریکی بتن معیاری جهت ارزیابی میزان مقاومت نمونه بتنی مسلح در برابر حمله یون‌های کلراید می‌باشد. هر چه مقدار مقاومت الکتریکی نمونه‌ای بیشتر باشد، مقاومت آن نمونه در برابر حمله کلراید بیشتر می‌باشد. در این تحقیق، در ابتدا مقاومت الکتریکی نمونه‌های ملاتی در سن ۵۶ روز، ۱۱۹ روز و ۱۶۱ روز توسط دستگاه مقاومت الکتریکی و نر اندازه‌گیری و نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- مقاومت الکتریکی ۵۶، ۱۱۹ و ۱۶۱ روزه ملات‌ها

با مشاهده شکل ۷ نتایج زیر حاصل می‌شود:

- با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت الکتریکی آن‌ها افزایش می‌یابد.
  - استفاده از پوزولان‌ها در تمامی نسبت‌های آب به مواد سیمانی باعث افزایش مقاومت الکتریکی ملات‌ها شده است که این امر نشان‌دهنده یکی از مزایای استفاده از پوزولان‌ها می‌باشد.
  - اختلاف زیاد مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی پوزولان بین سنین ۵۶ تا ۱۱۹ روز نسبت به نمونه کنترل حاکی از صورت پذیرفتن واکنش‌های پوزولانی و تولید ژل ثانویه کلسیم سیلیکاتی می‌باشد که باعث کاهش تخلخل ملات و همچنین کاهش خاصیت قلیایی آب بین حفره‌ای ملات‌ها شده و افزایش مقاومت الکتریکی را در پی دارد.
  - باتوجه به شکل فوق می‌توان بیان نمود که نمونه‌های حاوی تراس از همان سنین اولیه مقاومت الکتریکی بالایی از خود نشان می‌دهند و در ادامه آن نمونه‌های حاوی پومیس قرار گرفته‌اند که در ابتدا و در سن ۵۶ روز تفاوت خاصی با نمونه‌های شاهد ندارد اما در ادامه مقاومت الکتریکی آن به شدت افزایش می‌یابد.
- در شکل ۸ به مقایسه مقاومت الکتریکی ملات‌های شاهد و ملات‌هایی که در مجاورت ۶۳ روزه با کربن‌دی‌اکسید بوده‌اند، پرداخته شده است.



شکل ۸- مقایسه مقاومت الکتریکی ۱۱۹ روزه ملات‌های نگهداری شده در آب آهک و محیط کربن‌دی‌اکسید

- مجاورت با گاز کربن دی اکسید باعث افزایش زیاد مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌ها شده است به گونه‌ای که در نمونه‌هایی که در آن‌ها کربناسیون به صورت سطحی گزارش شده است نیز این افزایش مقاومت الکتریکی را شاهد هستیم.
- میزان افزایش مقدار مقاومت الکتریکی با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی نمونه‌ها، بیش‌تر شده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

- در این مقاله به بررسی تأثیر کربناسیون بر خواص دوامی ملات‌های حاوی پوزولان‌های طبیعی پومیس خاش و تراس جاجرود پرداخته شده است. براساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره داشت.
- با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، خواص دوامی و مکانیکی ملات‌ها بهبود می‌یابد. که علت آن کاهش تخلخل کل و کاهش تخلخل موئینه خمیر سیمان می‌باشد.
  - ملات‌های حاوی پوزولان پومیس به سبب میزان نسبتاً کم سیلیس، در سنین اولیه واکنش پوزولانی قابل توجهی از خود نشان نمی‌دهند اما با افزایش سن نمونه‌ها، خواص مکانیکی و دوامی این نمونه‌ها بسیار بهبود می‌یابد.
  - ملات‌های حاوی پوزولان تراس از همان سنین اولیه خواص دوامی ملات را به مقدار زیادی بهبود می‌بخشند که نشانگر فعالیت پوزولانی زیاد پوزولان تراس می‌باشد که علت آن، میزان زیاد سیلیس موجود در ساختار آن می‌باشد.
  - استفاده از پوزولان‌های طبیعی به سبب مصرف کلسیم هیدروکسید، باعث کاهش مقاومت ملات‌ها در برابر کربناسیون می‌شود.
  - وقوع کربناسیون باعث کاهش ضریب جذب موئینگی نمونه‌های شاهد می‌شود. علت آن نیز کاهش حفرات موئینه خمیر سیمان به سبب رسوب کلسیم کربنات تولید شده می‌باشد.
  - نمونه‌های پوزولانی که در مجاورت گاز کربن دی اکسید قرار گرفته بوده‌اند، رفتار متناقضی در آزمایش جذب آب موئینه از خود نشان دادند که علت آن را می‌توان در تأثیر متفاوت پدیده کربناسیون بر تخلخل کل و موئینه ملات‌های پوزولانی دانست که در برخی موارد باعث افزایش تخلخل و در دیگر موارد باعث کاهش تخلخل ملات شده است.
  - پدیده کربناسیون باعث افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها می‌شود که علت این امر را می‌توان کاهش قلیائیت آب منفذی ملات دانست.

#### ۵. مراجع

- [۱] رضانیانپور، ع.ا. و همکاران. (۱۳۹۴). "ریزساختار، خواص و اجزای بتن". ویرایش اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [2] Navas, R., Branco, F., de Brito, J. (2013). "Field assessment of the relationship between natural and accelerated concrete carbonation resistance". Cement & Concrete Composites, Vol. 41, pp 9-15.
- [۳] پوربیک، پ. (۱۳۸۸). "دوام بتن‌های ساخته شده از خاکستر پوسته برنج در برابر حمله سولفاتی و کربناتاسیون". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- [4] Malhotra, V.M., Mehta, P.K., (2002). "High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practices and case histories".
- [5] Corinaldesi, V., Gnappi, G., Mriconi, G., Montenero, G. (2005). "Reuse of ground waste glass". Waste Management, Vol. 25(2), pp 197-201.
- [۶] رضانیانپور، ع.ا.، پیدایش، م. (۱۳۸۹). " شناخت بتن؛ (مصالح، خواص، تکنولوژی)". ویرایش اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.
- [7] Shi, z., Lothenbach, B., Geikar, M.R., Kaufmann, J., Leemann, A., Ferreiro, S., Skibsted, J. (2016). "Experimental studies and thermodynamic modeling of the carbonation of Portland cement, metakaolin and limestone mortars". Cement and Concrete Research, Vol. 88, pp 60-72.
- [۸] رضانیانپور، ع.ا.، پیدایش، م.، میرولد، س.س.، آرامون، ا. (۱۳۸۸). "نقش پوزولان‌های طبیعی در افزایش دوام بتن‌ها در مقابل خوردگی ناشی از یونهای کلراید". هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز، ۱۳۸۸.
- [9] Ghiasvand, E., Ramezaniapour, A.A., (2014) "Effect of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-pozzolan cement". Construction and Building Materials, Vol. 53, pp 547-554.
- [۱۰] محمدی‌منش، م. (۱۳۸۳). "بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن‌های ساخته‌شده با پوزولان طبیعی پومیس". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۱۱] رضایی، ح.ر. (۱۳۹۴). "اثر توام کربناسیون و نفوذ یون‌های گلراید در بتن‌های دارای پوزولان". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [12] Dias, W.P.S. (2000). "Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation". Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp 1255-1261.
- [13] Wu, B., Ye, G. (2017). "Development of porosity of cement paste blended with supplementary cementitious materials after carbonation". Construction and Building Materials, Vol. 145, pp 52-61.
- [14] Hussain, S., Bhunia, D., Singh, S.B. (2017). "Comparative study of accelerated carbonation of plain cement and fly-ash concrete". Journal of Building Engineering, Vol. 10, pp 26-31.