

## بررسی رفتار مکانیکی بتن الیافی حاوی پومیس و متاکائولن و مقاومت شیمیایی آن در برابر حملات اسیدی

کیانوش صمیمی<sup>\*</sup>، مهیارپاکان<sup>۱</sup>، امیرحسین فیروزبخت<sup>۲</sup>

۱-دانشکده آب، عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
۲-بخش پژوهش و توسعه، شرکت مهندسان مشاور ایمن راه، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۳  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳

### کلمات کلیدی:

آنالیز سی‌تی‌اسکن  
پومیس  
حملات اسیدی  
ریزساختار  
متاکائولن

**خلاصه:** اخیراً، در روسازی‌های بتنی فرودگاه‌ها و آذراه‌ها، استفاده از الیاف در بتن برای کاهش ترک‌ها و افزایش فاصله درز اتصالات دال‌های بتنی رواج یافته است. اما، رفتار دوامی آن‌ها در برابر حملات باران‌های اسیدی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف این مقاله بررسی عملکرد مکانیکی و دوامی بتن تقویت شده با الیاف پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن حاوی ۱۵٪ مواد پوزولانی (پومیس یا متاکائولن) به جای سیمان پرتلند تیپ دو می‌باشد. در این راستا مقاومت فشاری و خمشی جهت بررسی رفتار مکانیکی طرح مخلوط‌های مورد مطالعه در سنین مختلف اندازه‌گیری شدند. از سوی دیگر، مقاومت شیمیایی در برابر حملات باران‌های اسیدی شبیه‌سازی شده از طریق بررسی عینی، اندازه‌گیری افت وزنی و مطالعات ریزساختاری از طریق آنالیز سی‌تی‌اسکن و آزمایش SEM صورت گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، افزودن هر دو الیاف مذکور در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری در مقایسه با مقدار متناظر در بتن شاهد شد. ولی برعکس افزایش مقاومت خمشی را در پی داشت، که این اثر با افزودن مواد پوزولانی به مراتب چشمگیرتر گردید. با این وجود، بتن معمولی و الیافی حاوی مواد پوزولانی عملکرد منفی‌ای در برابر حملات باران اسیدی از خود نشان دادند. بر اساس نتایج سی‌تی‌اسکن و آنالیز SEM، بتن‌های حاوی مواد پوزولانی دارای ساختار متخلخلی هستند. همچنین به دلیل واکنش‌های آهک‌زدایی ناشی از حملات اسیدی نسبت کلسیم به سیلیسیم در آن‌ها به مراتب کمتر از نمونه شاهد می‌باشد.

### ۱- مقدمه

استروئو و همکاران، وجود الیاف می‌تواند چقرمگی را بهبود و از سوی دیگر عملکرد کوتاه مدت در هنگام اثر پدیده‌های انتقال در عناصر کامپوزیت را تضمین نماید [۱]. وانگ و همکاران خواص مکانیکی بتن تقویت شده با الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن را مطالعه کردند، نتایج نشان داد که الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن می‌تواند مقاومت خمشی بتن را افزایش دهد [۲]. در واقع، مطالعات زیادی در مورد تأثیر الیاف و مواد افزودنی بر خصوصیات مکانیکی بتن وجود دارد [۳-۶]. با این وجود، اطلاعات کمی در پیشینه تحقیق راجع به مقاومت شیمیایی و همچنین بررسی وضعیت ریزساختار بتن الیافی بعد از حملات باران‌های اسیدی دیده می‌شود. حمله باران اسیدی به طور بالقوه می‌تواند عامل مخربی در کاهش طول عمر روسازی‌های بتنی باشد. باران اسیدی که حاوی یون‌های هیدروژن، آمونیم، منگنز و سولفات است، در شهرهای صنعتی در اثر واکنش آلاینده‌های هوا مانند  $NO_x$ ،  $SO_2$  و سایر ترکیبات ایجاد می‌شود. باران‌های اسیدی با pH تقریبی ۴/۳ با بتن دارای pH در محدوده ۱۳ تا ۱۴ واکنش نشان می‌دهند و محصولات نهایی هیدراتاسیون را مصرف می‌کنند. این اثر با گذشت زمان باعث بروز پدیده

استفاده از الیاف در بتن باعث بهبود رفتار شکنندگی و بسیاری از خصوصیات دیگر همچون مقاومت کششی، خمشی و مقاومت در برابر شوک حرارتی می‌گردد. مقاومت خمشی بتن عامل کلیدی در استفاده از بتن در روسازی راه‌ها می‌باشد. به نحوی که اگر مقاومت خمشی بتن افزایش یابد، می‌توان ضخامت روسازی بتن را کاهش و علاوه بر این، می‌توان با افزایش فواصل درز، ابعاد دال‌های بتنی را نیز افزایش داد که متعاقباً پیشرفت چشمگیری در اقتصاد، صرفه‌جویی در وقت و منابع انسانی را در پی خواهد داشت. در گذشته، بتن‌های تقویت شده با الیاف (FRC') عمدتاً در پیاده‌روها و کف‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گرفت. با این وجود، FRC اخیراً در موارد متعددی همچون پل‌ها، سازه‌های هیدرولیکی، تونل‌ها، لوله‌ها، پوشش کانال‌ها و اتاق‌های ایمنی استفاده می‌گردند. به طور کلی، استفاده از الیاف در بتن می‌تواند مقاومت خمشی را افزایش دهد. از نتیجه ارائه شده توسط

### 1 Fiber Reinforced Concrete

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: k\_samimi@sbu.ac.ir



آبستنگی در بتن می‌گردد که منجر به کاهش وزن و مقاومت، ایجاد ترک و در نهایت تخریب در بتن خواهد شد. شدت این نوع خرابی بتن با گذشت زمان بستگی به میزان اسیدیته‌ی محیط، مدت زمان قرار گرفتن در معرض حملات اسیدی، میزان هیدراتاسیون و مقاومت شیمیایی بتن دارد [۷].

قرار گرفتن در معرض محیط‌های اسیدی از نظر مقاومت و دوام سازه‌های بتنی مسئله مهمی است. زیرا هزینه نگهداری، چرخه عمر و عملکرد سازه‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرند. با گسترش صنعت در دهه‌های اخیر، اثر باران اسیدی به عنوان یک فاجعه طبیعی جهانی، به یک نگرانی جدی در صنعت ساخت و ساز تبدیل شده است. وقتی بتن در معرض محلول اسیدی قرار می‌گیرد، به مرور زمان تخریب در آن ظاهر می‌شود. زیرا اسید در بتن نفوذ کرده و پس از واکنش‌های شیمیایی با محصولات هیدراتاسیون، آن‌ها را تجزیه و سپس با تولید محصولات جدید مخرب باعث ظهور پدیده آبستنگی در بتن می‌گردد، که متعاقباً کاهش وزن و مقاومت در بتن را در پی خواهد داشت. حمله اسید سولفوریک یک واکنش بین اسید و سولفات یون هیدروژن می‌باشد که همراه با نقش خورنده یون سولفات و تشکیل سولفات کلسیم منجر به اثرات انحلال در بتن می‌گردد. در واقع در این تهاجم، اسید سولفوریک با هیدروکسید کلسیم (پرتلندیت) واکنش داده که منجر به ظهور ماده‌ای نامنسجم و سفید رنگ به نام گچ ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) بر روی سطوح بتن می‌گردد. سپس گچ با هیدرات آلومینات کلسیم ( $\text{C}_3\text{A}$ ) موجود در سیمان واکنش داده و محصول مخربی به نام اترینگایت با خاصیت انبساطی ۷ برابر بیشتر از گچ را تولید می‌نماید. رشد حجمی این ترکیبات باعث ایجاد فشار داخلی و انبساط در بتن شده که در نهایت منجر به ایجاد ترک در بتن می‌گردد. ادامه فرسایش منجر به خرد شدگی، نرم شدن و ایجاد ظاهری سفید رنگ در سطح بتن می‌شود که متعاقباً ضعف مقاومت مکانیکی، ترک‌خوردگی، پوسته پوسته شدن و در نهایت تخریب کامل بتن را به همراه خواهد داشت. بررسی‌های انجام شده در پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از متاکائولن و خاکستر پوسته برنج در بتن خودتراکم باعث بهبود مقاومت در برابر حمله سولفات می‌شود [۸]. همچنین، نتایج مشابهی در استفاده از دوده سیلیس و پوزولان‌های نانو سیلیس در بتن تقویت شده با الیاف فورتا-فرو در برابر حمله اسید سولفوریک مشاهده گردید [۹].

این مطالعه می‌تواند برای استفاده در کاربردهای مختلف مانند سنگفرش‌ها، روسازی‌ها و پل‌هایی که تحت تأثیر حملات باران اسیدی هستند مفید باشد. در پیشینه تحقیق به‌ندرت طول مدت زمان غوطه‌وری در محلول اسید تا درازمدت بررسی شده است. از سوی دیگر، رفتار بتن‌های

حاوی پوزولان در برابر حملات اسیدی در کوتاه‌مدت بعضاً یکسان و یا بهتر از نمونه شاهد می‌بود. بدین جهت همواره یکی از چالش‌های کارشناسان مهندسی بر این بود که آیا رفتار مثبت پوزولان‌ها در کوتاه‌مدت در برابر حملات باران اسیدی با رفتار آن‌ها در درازمدت یکسان هست. لذا در این تحقیق با افزایش مدت‌زمان آزمایش در معرض حملات باران اسیدی، رفتار واقعی بتن‌های حاوی پوزولان به روشنی بررسی خواهد شد که می‌تواند نوآوری جدیدی در پیشینه تحقیق به شمار آید. همچنین در این مطالعه برای اولین بار امکان‌سنجی تطابق نتایج مستخرج از آنالیز میکروسکوپی با آنالیز سی‌تی‌اسکن نمونه‌های نگهداری شده در آب و محیط اسیدی بررسی گردید. لذا در این راستا هدف این مطالعه بررسی عملکرد دوام بتن معمولی و الیافی حاوی مواد پوزولانی همچون پومیس یا متاکائولن در برابر تهاجم مخرب باران اسیدی است که در میزان طول عمر سازه‌های بتنی مؤثر است. بدین منظور، شش مخلوط بتنی شامل یک طرح از سری بتن معمولی بدون هیچ‌گونه افزودنی (بتن شاهد)، یک طرح بتن تقویت شده با الیاف پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن و چهار طرح دیگر از هر دو سری بتن معمولی و الیافی که در آن ۱۵٪ پومیس و متاکائولن جایگزین سیمان شده‌اند، تهیه گردیدند. بر این اساس، ابتدا آزمایش مقاومت فشاری و خمشی در حالت‌های سخت شده برای ارزیابی خواص مکانیکی مخلوط‌های مختلف تهیه شده از سنین اولیه تا سنین طولانی‌مدت انجام شد. سپس عملکرد دوامی نمونه‌ها در برابر حمله باران اسیدی شبیه سازی شده توسط اسیدسولفوریک و اسید نیتریک با بررسی میزان افت وزنی، بررسی عینی و ارزیابی مقدار تخریب به کمک آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM-EDX) و آنالیز سی‌تی‌اسکن مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ II مطابق با استاندارد ASTM C150، پوزولان مصنوعی متاکائولن شهر تهران و پودر پوزولان طبیعی پومیس شهر خاش (جنوب شرقی ایران) استفاده شد. خصوصیات فیزیکی و آنالیز شیمیایی ترکیبات فوق در جدول شماره ۱ ارائه شده است. برای همه طرح اختلاط‌ها، ماسه طبیعی با حداکثر اندازه ۶ میلی‌متر به عنوان سنگدانه ریز و شن با اندازه اسمی ۶-۱۹ میلی‌متر به عنوان سنگدانه درشت استفاده شد. در این مطالعه از الیاف پلی‌الفین (با نام تجاری ام باس) و پلی‌پروپیلن به ترتیب با طول ۵۰ و ۱۲ میلی‌متر استفاده شد. در این مطالعه از حباب هوازا با وزن مخصوص ۱/۰۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و  $\text{pH} = 8/5 \pm 1$  و

جدول ۱. خواص فیزیکی و آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II، متاکائولن و پومیس.

Table 1. Chemical analysis and physical properties of Portland cement type II and Pumice and Metakaolin.

پومیس	متاکائولن	سیمان تیپ II	درصد وزنی اکسیدها (%)
2.26	0.76	1.3	Loss on ignition
56.04	80.76	21.74	SiO <sub>2</sub>
27.61	15.69	5.0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0.25	0.23	4.0	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
8.76	1.46	63.04	CaO
4.52	0.05	2	MgO
-	0.12	2.3	SO <sub>3</sub>
-	0.38	-	CO <sub>2</sub>
-	0.01	-	CaSO <sub>4</sub>
-	0.04	-	Cl
-	-	0.60	Insoluble residue
-	-	1	(Na <sub>2</sub> O%+0.658K <sub>2</sub> O %)
0.41	-	-	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O
-	-	1.4	Free Cao
0.15	-	-	Humidity
-	-	45.5	C <sub>3</sub> S
-	-	28.0	C <sub>2</sub> S
-	-	6.5	C <sub>3</sub> A
-	-	12.2	C <sub>4</sub> AF
2.58	2.49	3.15	Density: g/cm <sup>3</sup>
4500	3920	2900	Specific surface area: cm <sup>2</sup> /g
450	350	-	Ca (OH) <sub>2</sub> fixed: mg

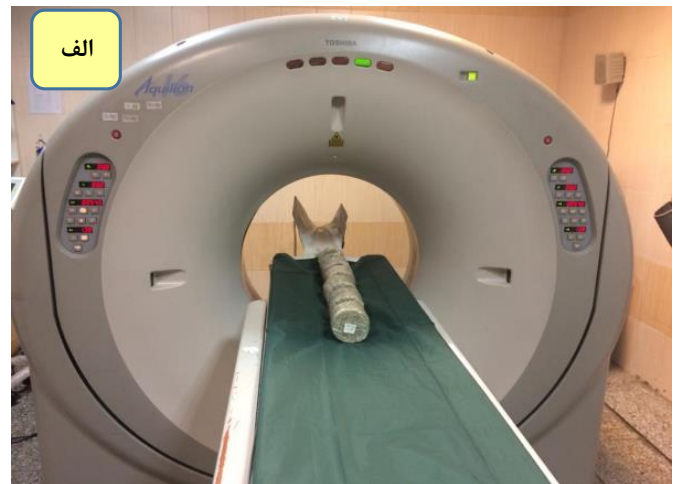
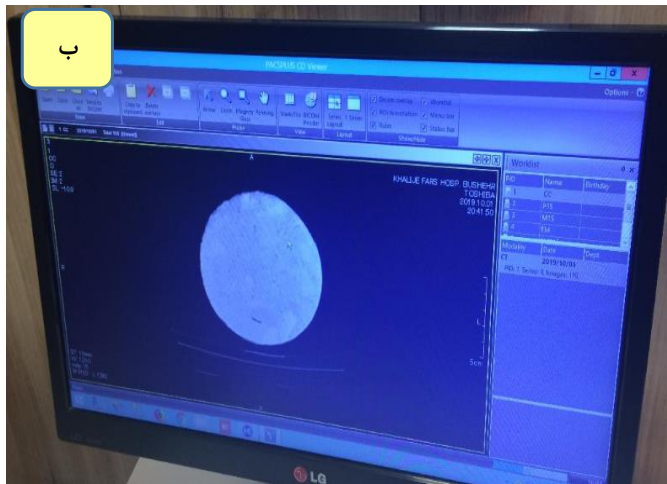
جدول ۲. نسبت مواد تشکیل دهنده بتن در طرح مخلوط‌های مورد مطالعه (kg/m<sup>3</sup>)

Table 2. Concrete components ratio in the design of the studied mixtures (kg/m<sup>3</sup>).

کد طرح	آب	سیمان	متاکائولن	پومیس	نسبت آب			فوق روان کننده	الیاف پلی پروپیلن	الیاف پلی الفین
					به مواد سیمانی	شن	ماسه			
CC	133.2	370	-	-	0.36	716	1030	0.37	2.02	-
P15	133.2	314.5	-	55.5	0.36	716	1030	0.37	2.25	-
M15	133.2	314.5	55.5	-	0.36	716	1030	0.37	2.38	-
EM	133.2	370	-	-	0.36	716	1030	0.37	3.41	0.8
EM+P15	133.2	314.5	-	55.5	0.36	716	1030	0.37	3.9	0.8
EM+M15	133.2	314.5	55.5	-	0.36	716	1030	0.37	4.44	0.8

۵۰ میلی‌متر برای همه طرح اختلاطها استفاده شد. تهیه و عمل‌آوری کلیه نمونه‌های بتنی با استفاده از آب شهری انجام گردید. نسبت اختلاط شش مخلوط بتنی تهیه شده در این تحقیق در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

همچنین از یک فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اثر با نام تجاری P10-3R طبق استاندارد ASTM- C494 با وزن مخصوص ۱/۱۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و  $pH = 7 \pm 1$  برای رسیدن به اسلامپ  $10 \pm$



شکل ۱. تصویر روند آنالیز سی تی اسکن: الف) دستگاه سی تی اسکن، ب) نتایج خروجی از آنالیز سی تی اسکن.

Fig.1. Image of CT scan analysis process: a) CT scan machine, b) Output results of CT scan analysis.

### ۲-۲-۲- آزمون اسکن توموگرافی رایانه‌ای (CT scan)

آنالیز سی تی اسکن یک روش ارزشمند برای دریافتن حفره‌های موجود در نمونه بتنی است. در این پژوهش، از دستگاه اسکنر Toshiba Aquion-16 CT استفاده شد. این آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۸۰ میلی‌متر که در دو حالت مختلف شاهد (آب شهری) و مخرب (باران اسیدی) نگهداری شده‌اند، انجام شد. هر نمونه بتنی به ضخامت ۱ میلی‌متر با منبع ثابت اشعه X در حالت ۱۲۰ کیلوولت و ۷۵ میلی‌آمپر اسکن شد. در نهایت، تصاویر به دست آمده از سی تی اسکن توسط نرم‌افزار ImageJ (v1.52) برای بررسی ساختار بتن مورد پردازش قرار گرفت (شکل شماره ۱).

### ۲-۲-۳- مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری بر روی ۷۲ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر مکعب در سنین مختلف ۷، ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روز مطابق با استاندارد ASTM C39 / C39M-12 انجام شد. برای هر طرح اختلاط، آزمایش بر روی سه نمونه انجام شد و مقدار متوسط به‌عنوان مقاومت فشاری ارائه گردید.

### ۲-۲-۴- مقاومت خمشی

این آزمون، با بارگذاری در نقطه مرکزی یک تیر خمشی منشوری به

### ۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

در تهیه نمونه‌های بتنی، ابتدا سنگدانه‌ها با  $\frac{2}{3}$  آب مورد نیاز طرح در مخلوط‌کن ریخته و اختلاط شروع گردید. در مرحله بعد، مواد سیمانی، فوق روان کننده، حباب هوازا و آب باقی‌مانده طرح اضافه شده و اختلاط تا زمان حصول ترکیب همگن ادامه یافت. پس از تهیه مخلوط بتنی، قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای جهت نمونه‌گیری پر و برای جلوگیری از دست رفتن رطوبت نمونه‌ها، به مدت ۲۴ ساعت در اتاق مرطوب با دمای  $22 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. بر اساس استاندارد ASTM C192، بعد از ۲۴ ساعت برداری صورت گرفت و نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌های متعدد در سنین مختلف، در آب نگهداری شدند.

### ۲-۲- روش آزمایش‌ها

#### ۲-۲-۱- آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

جهت بررسی ساختار و مورفولوژی نمونه‌های بتن غوطه‌ور شده در دو شرایط مختلف آب شهری و باران اسیدی از دستگاه FEI ESEM Quanta ۲۰۰ به همراه طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) استفاده شد. برای این منظور نمونه‌ها بتنی به قطعات ۱۰×۱۰ میلی‌متر مربع برش داده شده و با یک لایه نازک از طلا پوشانده شدند و سپس سطح آن‌ها توسط دستگاه مورد ارزیابی قرار گرفت.

1 Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

افزودنی (طرح EM) در تمام سنین نگهداری بود. بنابراین، به نظر می‌رسد استفاده از الیاف پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن اثر عکس بر مقاومت فشاری به دلیل توزیع غیریکنواختشان در ماتریس سیمانی دارند. زیرا فضاهای متخلخل ناشی از توزیع غیریکنواخت و تراکم کم الیاف در بعضی از نقاط بتن ایجاد می‌شود. در واقع، افزودن الیاف به بتن باعث نقصان در ساختار فشاری بتن به دلیل افزایش ضخامت ناحیه انتقال (ITZ) می‌گردد [۱۲]. علاوه بر این، فضاهای پر شده توسط این الیاف می‌تواند منجر به تجمع تنش و ایجاد ترک در چنین فضاهایی گردد [۲]. این نتایج با نتایج تجربی مطالعات قبلی انجام شده بر روی بتن تقویت شده با الیاف مطابقت خوبی دارد [۱۴] و [۱۳]. بر اساس نتایج به دست آمده، رفتار متاکائولن و پومیس در افزایش مقاومت فشاری بتن الیافی مشابه آن در بتن معمولی بود. اثر مثبت هر دو پوزولان در افزایش مقاومت فشاری به دلیل واکنش‌پذیری بالا بر مبنای میزان مصرف  $\text{Ca(OH)}_2$  همان‌طور که در جدول شماره ۱ ارائه شده است، می‌باشد. مقدار بالای مصرف  $\text{Ca(OH)}_2$  در پوزولان پومیس در مقایسه با متاکائولن منجر به افزایش واکنش‌های پوزولانی در نمونه‌های حاوی پومیس در مقایسه با نمونه‌های حاوی متاکائولن می‌گردد [۱۶ و ۱۵]. بنابراین به دنبال واکنش‌های پوزولانی ژل سیلیکات کلسیم بیشتری تولید می‌گردد که در متراکم نمودن ساختار ماتریس سیمانی نقش بسزایی دارد. شایان ذکر است که مقاومت فشاری بالا بیانگر مقدار کم آب قابل تبخیر و همچنین رفتار دوامی بالا ناشی از مقدار بالای آب غیر قابل تبخیر می‌باشد [۱۵]. این اثر توسط مخلوط حاوی ۱۵٪ پومیس در مخلوط‌های P15 و EM + P15 از نتایج ارائه شده در شکل شماره ۲ به خوبی مشهود است. نتیجه تأثیر مثبت متاکائولن و پومیس در مقاومت فشاری بتن با نتایج آزمایشگاهی تحقیقات قبلی انجام شده بر روی انواع مختلف بتن با متاکائولن و پومیس رابطه نزدیکی دارد [۱۷، ۱۵، ۱۴ و ۷].

### ۳-۲- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی مخلوط‌ها بر اساس متوسط مقاومت سه نمونه آزمایش شده پس از سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روز در شکل شماره ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل شماره ۳، بیشترین مقاومت خمشی مربوط به مخلوط EM+P15 در سن ۳۶۵ روز و کمترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه شاهد (CC) در سن ۷ روزه می‌باشد. مقاومت خمشی مخلوط EM + P15، ۳۷/۳۶٪، ۴۱/۶۷٪، ۳۸/۴۶٪، ۲۹/۷۳٪

ابعاد  $15 \times 15 \times 60$  سانتی‌متر مکعب در سنین مختلف ۷، ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۵ روز برای همه طرح اختلاط‌های مورد مطالعه مطابق بر استاندارد ASTM C293 صورت گرفت. مقاومت خمشی هر طرح مخلوط بر مبنای مقدار متوسط آزمون بر روی سه نمونه در نظر گرفته شد.

### ۲-۲-۵- آزمایش حمله باران اسیدی شبیه‌سازی شده

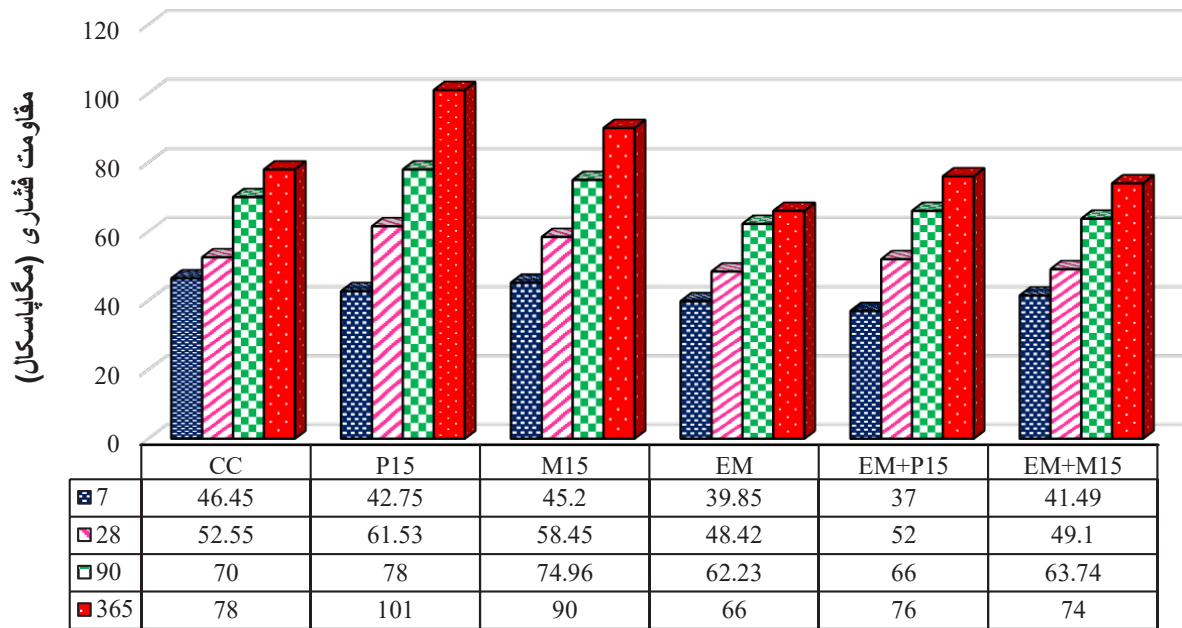
در این مطالعه، آزمون خوردگی تسریع شده از طریق غوطه‌وری نمونه‌ها جهت ارزیابی میزان مقاومت شیمیایی نمونه‌های بتنی در برابر حمله باران‌های اسیدی شبیه‌سازی شده بر مبنای پیشینه تحقیق مورد استفاده قرار گرفت [۱۱ و ۱۰]. در این راستا، جهت شبیه‌سازی باران اسیدی از مواد شیمیایی  $\text{HNO}_3$  و  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (خلوص آزمایشگاهی) با نسبت مولی ۹ به ۱ به ترتیب با هم مخلوط شدند. برای مقایسه میزان تخریب، نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد  $10 \Phi \times 8$  سانتی‌متر مربع در سن ۵۶ روز در دو محیط مختلف شاهد (آب شهری) و محیط مخرب (محلول اسیدی) به مدت ۳۶ هفته با pH ۱٫۵ = غوطه‌ور شدند. نسبت حجمی محلول اسیدی به نمونه ۴ به ۱ در نظر گرفته شد. محلول اسید شبیه‌سازی شده هر ۲۸ روز تعویض و هر ۳ روز یک بار جهت همگن‌سازی، محلول هم زده می‌شد. همچنین از رزین اپوکسی برای محافظت از سطح جانبی نمونه‌ها استفاده گردید به طوری که فقط دو سطح با محلول اسیدی جهت تخریب یک طرفه در تماس باشند. در این آزمون، مقاومت نمونه‌های غوطه‌ور در محلول مخرب اسیدی از نظر فیزیکی (تغییرات وزن) و بررسی عینی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، ریزساختار نمونه‌ها در هر دو محیط شاهد و اسیدی با استفاده از آنالیز SEM-EDX و سی‌تی‌اسکن شناسایی گردیدند.

### ۳- تحلیل نتایج

#### ۳-۱- مقاومت فشاری

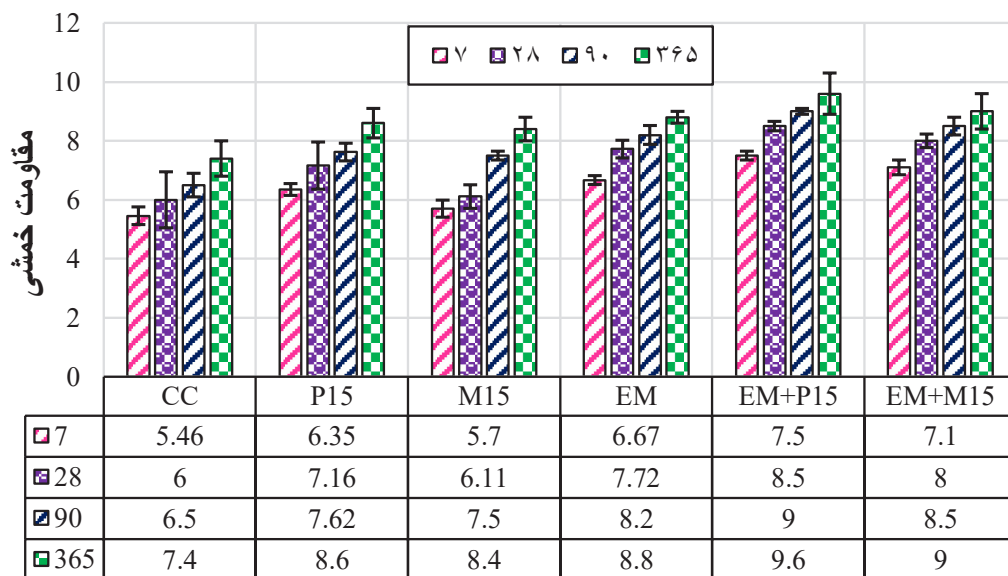
روند افزایش مقاومت فشاری تمامی طرح اختلاط‌ها در سنین مختلف ۷، ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روز در شکل شماره ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل شماره ۲، مقاومت فشاری مخلوط‌های M15 و P15 از سن ۲۸ تا ۳۶۵ روز در مقایسه با بتن کنترل بیشتر می‌باشد. ولی، این افزایش در مخلوط P15 به مراتب چشمگیرتر از مخلوط M15 است. به نحوی که مقاومت فشاری مخلوط P15 ۱۷/۱٪ و ۱۱/۴۳٪ و ۲۹/۹۴٪ بیشتر از مقدار مقاومت فشاری متناظر در نمونه شاهد به ترتیب در سنین ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روز می‌باشد. برعکس، کمترین مقاومت مربوط به مخلوط حاوی الیاف بدون





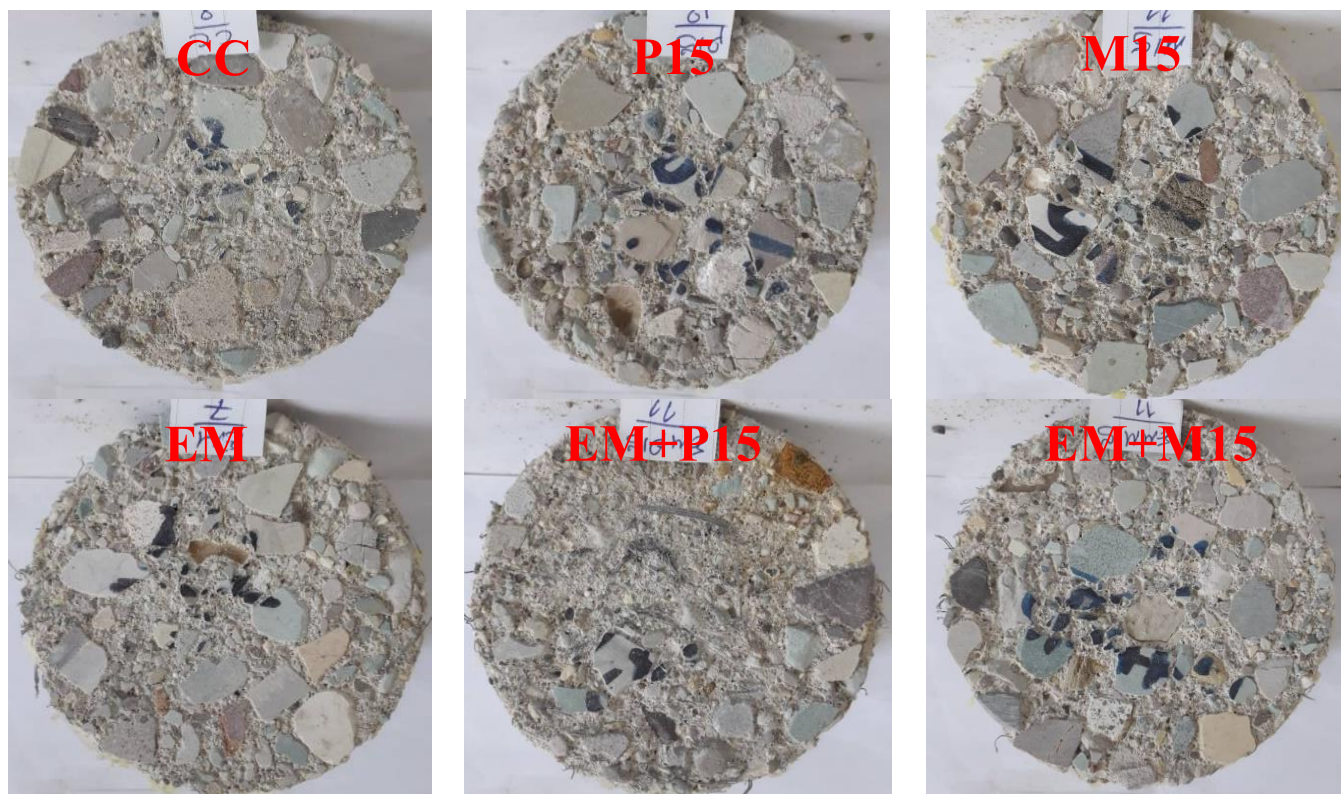
شکل ۲. مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های مورد مطالعه در سنین مختلف نگهداری

Fig. 2. Compressive strength of the studied mixture designs at different curing ages.



شکل ۳. مقاومت خمشی طرح اختلاط‌های مورد مطالعه در سنین مختلف نگهداری

Fig. 3. Flexural strength of the studied mixture designs at different maintenance ages.



شکل ۵. تخریب نمونه‌های بتنی بعد از ۳۶ هفته غوطه‌وری در محلول باران اسیدی شبیه‌سازی شده.

Fig. 5. Degradation of concrete specimens after 36 weeks of immersion in simulated acid rain solution.

آزمایش به عنوان تابعی از زمان غوطه‌وری در شکل شماره ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل شماره ۴، بتن شاهد (CC) افت وزنی کمتری نسبت به دیگر طرح اختلاطها از هفته دهم غوطه‌وری در برابر حمله باران اسیدی از خود نشان داد. در پایان دوره آزمون به ترتیب کاهش وزن ۲/۲۴٪ برای مخلوط CC در مقابل ۲/۵۱٪، ۲/۳۲٪، ۲/۶۷٪، ۳/۰۵٪ و ۳/۳٪ برای P15، EM، EM+P15، M15 و EM+M15 مشاهده شد. از سوی دیگر مخلوط EM+M15 پس از ۱۰ هفته غوطه‌وری بیشترین افت وزنی را در مقایسه با دیگر طرح اختلاطها از خود نشان داد. بر اساس نتایج کاهش وزن ارائه شده در شکل شماره ۴، مخلوط‌های حاوی پوزولان، با وجود داشتن مقاومت فشاری بالا در مقایسه با مخلوط‌های بدون پوزولان، عملکرد ضعیفی در برابر حمله باران اسیدی از خود نشان دادند. این رفتار منفی می‌تواند به دلیل فراوانی پرتلندیت در این مخلوط‌ها باشد. همچنین، مقدار زیاد ژل CSH حاصل از واکنش‌های پوزولانی متاکائولن و پومیس منجر به تشدید واکنش‌های آهک‌زدایی در ژل CSH می‌گردد.

بیشتر از مقاومت خمشی نمونه‌ی شاهد به ترتیب در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روز می‌باشد. جایگزینی سیمان با ۱۵٪ متاکائولین یا پومیس در بتن معمولی باعث افزایش مقاومت خمشی در تمام سنین نگهداری شد. علاوه بر این، با استفاده از الیاف پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن در تمام سنین نگهداری، افزایش قابل ملاحظه‌ای در روند رو به رشد مقاومت خمشی نسبت به بتن شاهد مشاهده گردید. این رفتار مثبت وقتی که پوزولان‌ها به خصوص در حالتی که ۱۵٪ پومیس به جای سیمان در بتن الیافی استفاده شد، به مراتب قابل ملاحظه‌تر بود. حسب این مطالعه، استفاده از مواد پوزولانی به ویژه پودر پومیس در بتن معمولی و الیافی برای افزایش مقاومت خمشی مؤثر می‌باشد.

۳-۳- مقاومت شیمیایی در برابر حمله باران اسیدی شبیه‌سازی شده

۳-۳-۱- اثر تخریب بر روی افت وزنی

نتایج مربوط به افت وزنی نمونه‌های بتنی غوطه‌ور در محلول باران اسیدی شبیه‌سازی (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> و HNO<sub>3</sub>) با pH=۱/۵ در طول ۳۶ هفته

### ۳-۳-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی در حالت غوطه‌وری در آب

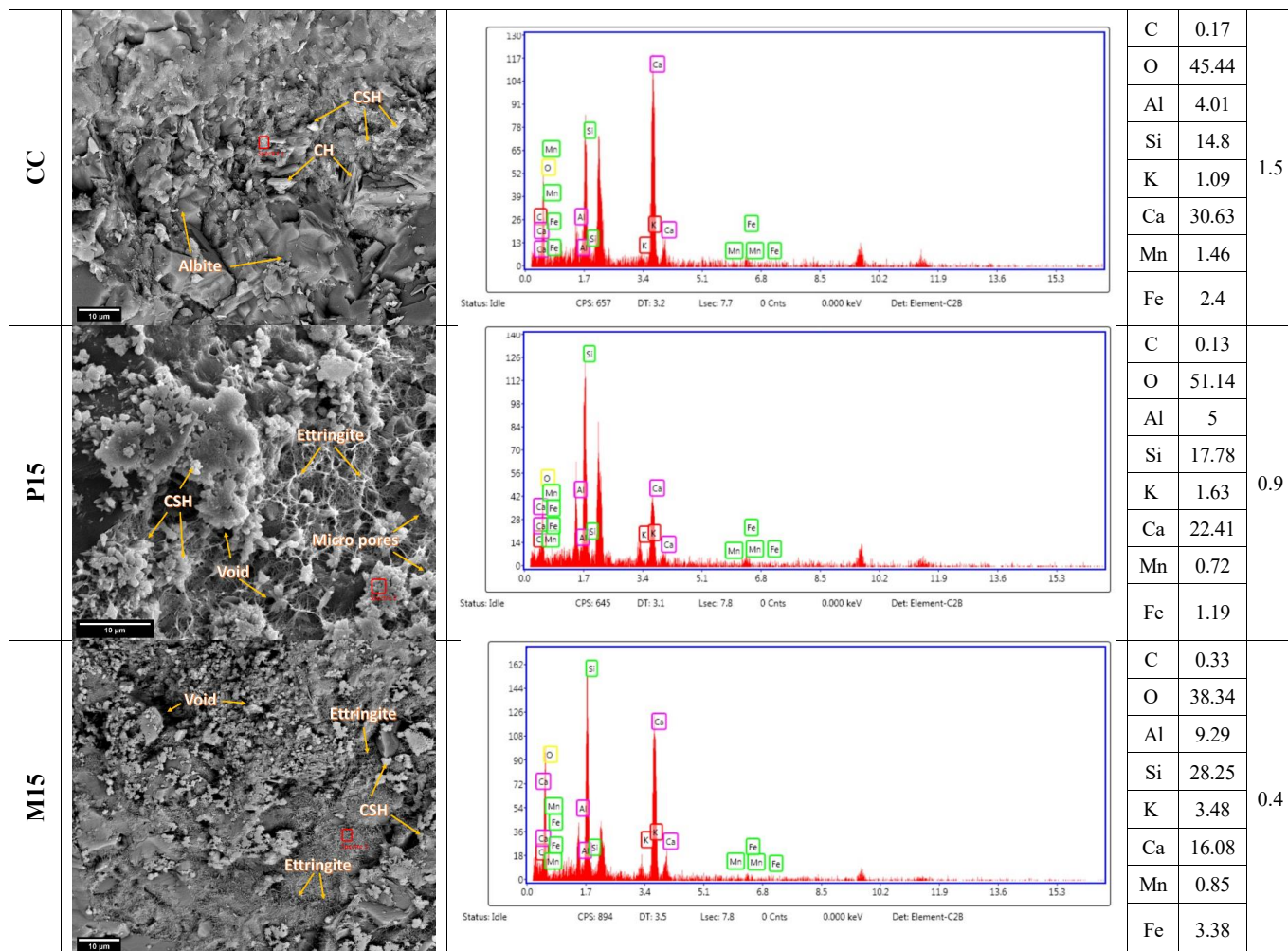
در این پژوهش، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای ارزیابی خصوصیات ریزساختار و ترکیب فازی ساختار بتن استفاده شد. برای بررسی تأثیر محلول‌های اسیدی بر ساختار بتن، دو سری از نمونه‌های مشابه بتنی باسن ۵۶ روز در شرایط غوطه‌وری محلول اسیدی و آب پس از ۳۶ هفته مقایسه شدند. شکل شماره ۶ تصاویر SEM و طیف EDX از نمونه‌های سری شاهد را نشان می‌دهد. ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) و پرتلندیت (CH)، دو محصول اصلی واکنش‌های هیدراتاسیون در این شرایط مشاهده شدند. بر اساس پیشینه تحقیق، CSH دارای مورفولوژی روشن و گچی است [۱۹]. همچنین، بر اساس تصاویر شکل شماره ۶ فاز CSH می‌تواند با نسبت مولی Ca / Si شناخته شود. حداقل و حداکثر نسبت مولی Ca / Si در فاز CSH به ترتیب ۰/۷ و ۲/۱ است [۲۰]. با این حال، استفاده از ترکیبات پوزولانی نسبت Ca / Si را در نمونه‌ها کاهش داده و نسبت Al / Si را در مقایسه با نمونه‌های بدون پوزولان افزایش می‌دهد، این اثر می‌تواند به دلیل وجود بیشتر Al و Si و میزان کم Ca کمتر در مخلوط‌های پوزولانی باشد [۲۱]. در شکل شماره ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه CC نشان می‌دهد که فازهای آمورف CSH و کریستالی CH به خوبی در سرتاسر سنگدانه‌ها پخش شده‌اند. همچنین مورفولوژی دیگری در نمونه CC مشاهده شد که نمایانگر سیلیس آمورف (آلبیت یا کوارتز) می‌باشد. برعکس، فازهای CH نیز به ندرت در ساختار مخلوط‌های P15 و M15 مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل حضور مواد پوزولانی در ماتریس سیمانی و متعاقباً مصرف فاز CH در واکنش‌های پوزولانی جهت تولید ژل CSH در طی ۳۶ هفته نگهداری در آب باشد. تصویر میکروسکوپ الکترونی از مخلوط‌های P15 و M15 نشان می‌دهد که اختلاط پودر پوزولان منجر به ایجاد فاز اترینگایت (Ettringite) در بتن می‌گردد که متعاقباً موجب افزایش تخلخل در ساختار نمونه می‌گردد [۱۱]. این مشاهده با نتایج ارائه شده مربوط به حفره‌های موجود در بتن سخت شده بر اساس آنالیز سی‌تی‌اسکن در بخش بعدی مطابقت دارد. شکل‌گیری فاز اترینگایت در ساختار نمونه‌های حاوی پومیس و متاکولین می‌تواند به دلیل وجود ترکیب آلومینیوم اکسید در مواد اولیه پوزولان‌ها باشد. با افزایش تخلخل در ساختار بتن، آهک‌زدایی و آب‌شستگی یون‌های کلسیم می‌تواند به سادگی در نمونه بتنی رخ دهد که به دنبال آن مقاومت بتن کاهش خواهد یافت.

طبق تحقیقات صمیمی و همکاران در سال ۲۰۱۸، چهار عامل اساسی همچون انتشار، مقدار پرتلندیت و ژل سیلیکات کلسیم، میزان پر شدن و ریزساختار متراکم ماتریس سیمانی می‌تواند میزان تخریب بتن در برابر حملات اسیدی را تعیین کند. شایان ذکر است که میزان پرتلندیت و ژل سیلیکات کلسیم به مراتب نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش میزان آسیب‌پذیری در برابر حمله اسیدی را ایفا می‌کنند [۱۸]. اهمیت نقش پرتلندیت در افزایش میزان تخریب ناشی از حملات اسیدی در طرح مخلوط M15 در مقایسه با نمونه P15 به وضوح در نتایج ارائه شده در شکل شماره ۴ دیده می‌شود. از آنجائی که مقدار مقاومت فشاری نمونه M15 در مقایسه با نمونه P15 کمتر می‌باشد بیانگر این است که مقدار پرتلندیت زیادی از واکنش‌های هیدراتاسیون به ژل CSH تبدیل نشده و لذا مقدار پرتلندیت در دسترس حملات اسیدی بیشتر خواهد بود که در نهایت باعث تشدید میزان تخریب در برابر حمله اسیدی خواهد شد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل شماره ۴، کاهش وزن در مخلوط EM به دلیل توزیع غیریکنواخت الیاف در بتن و ایجاد تخلخل، همواره بیشتر از بتن شاهد می‌باشد. بنابراین، با شکل‌گیری فضاهای آزاد در ماتریس متعاقباً نفوذ محلول‌های مخرب در بتن به سهولت صورت می‌پذیرد. با توجه به این نتایج، کاهش وزن در مخلوط EM+P15 در مقایسه با مخلوط EM کمی بیشتر بود. این تفاوت در مخلوط EM+M15 در مقایسه با مخلوط EM بسیار چشمگیرتر می‌باشد.

### ۳-۳-۲- بررسی عینی

در شکل شماره ۵ وضعیت ظاهری نمونه‌های بتنی مورد مطالعه تحت تأثیر حمله اسید سولفوریک و اسید نیتریک پس از ۳۶ هفته غوطه‌وری ارائه شده است. تصاویر، وضعیت پس از شستشو و تمیز کردن لایه سفید تولید شده در سطح خارجی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. این لایه بسیار شکننده و ضعیف است و به راحتی شسته می‌شود. بر اساس تصاویر نشان داده شده، تخریب قابل مشاهده‌ای در همه نمونه‌ها به ویژه برای مخلوط‌های M15 و EM + M15 دیده می‌شود. تخریب و تغییر شکل ظاهری نمونه‌ها با بیرون زدگی سنگدانه‌ها از دو سطحی که در معرض حمله محلول مخرب اسیدی بوده بعد از ۳۶ هفته غوطه‌وری دیده می‌شود. نمونه‌های بتنی بدون پوزولان، خمیر سیمان خود را در سطوح خارجی حفظ می‌کنند. در حالی که مخلوط‌های حاوی پوزولان (P15, EM+P15, M15, EM+M15) خمیرشان از نمونه‌ها حل و از بتن خارج شده است.





شکل ۶. تصاویر SEM و طیف EDX نمونه‌های بتنی سری شاهد در سن ۵۶ روز بعد از ۳۶ هفته غوطه‌وری در آب.

Fig. 6. SEM images and EDX spectra of control concrete sample series at 56 days of age after 36 weeks of immersion in water.

موضوع به دلیل میزان کم ترکیبات کلسیم در ساختار اولیه طرح با توجه به میزان درصد کمتر عنصر یون کلسیم در پوزولان‌ها می‌باشد.

۳-۳-۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی در حالت غوطه‌وری در باران اسیدی شبیه‌سازی شده

شکل شماره ۷ تصاویر SEM و طیف EDX از نمونه‌های سری غوطه‌ور در محلول باران اسیدی شبیه‌سازی شده به مدت ۳۶ هفته را نشان می‌دهد. در این شرایط، با مصرف محصولات هیدراتاسیون مانند CH و CSH محیط اسیدی تشدید می‌گردد. بنابراین، انحلال محصولات هیدراتاسیون در اثر حملات اسیدی رخ داده و سپس منجر به تجزیه ساختار بتن می‌گردد [۲۲]. تصاویر SEM از نمونه‌های مورد مطالعه هیچ فاز CH

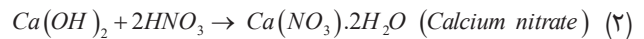
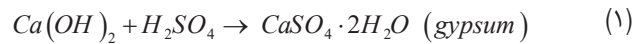
تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه EM فضای خالی در ساختار به دلیل توزیع غیریکنواخت الیاف در بتن را نشان می‌دهد. با این حال، در مخلوط‌های EM + P15 و EM + M15، حفره‌های بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر مشاهده گردید. بر اساس این نتایج، تشکیل اترینگایت مشابه در مخلوط‌های P15 و M15 به ترتیب در ساختار نمونه‌های EM + P15 و EM + M15 مشاهده شد. این مسئله نشان می‌دهد که جایگزینی سیمان با پوزولان و استفاده از الیاف، اثر هم‌افزایی در ایجاد یک ساختار متخلخل دارند. طیف EDX نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که نسبت Ca / Si در دو طرح CC و EM بیشتر از سایر طرح‌ها است که این به ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند مربوط می‌باشد. شایان ذکر است که در اکثر نمونه‌های حاوی پوزولان، نسبت Ca / Si کمتر از ۱ بوده که این

نشان می‌دهد که مربوط به تغییر فاز از گچ به اترینگایت می‌باشد. سطح سایر نمونه‌ها که حاوی ترکیبات پوزلانی می‌باشند در اثر قرارگیری در محیط اسیدی شسته شده‌اند و ساختار متخلخل تری دارند. تخلخل بالا سرعت نفوذ اسید در بتن را افزایش می‌دهد که متعاقباً افزایش سرعت آبستتگی CSH و CH را در پی خواهد داشت. به این ترتیب در این نمونه، حجم بالایی از خمیر سیمان در طی فرآیند آبستتگی از بتن خارج می‌شوند که منجر به کاهش وزن و کاهش مقاومت در مقایسه با نمونه شاهد می‌گردد. بر اساس تصاویر ارائه شده در شکل شماره ۷، وجود ساختار گچ در طرح P15 بیشتر از M15 بود که می‌تواند به دلیل وجود بیشتر یون کلسیم در مواد اولیه پومیس باشد. همچنین، نسبت Ca / Si در مخلوط P15 نسبت به مخلوط M15 به دلیل مقدار زیاد کلسیم در مقایسه با سیلیس موجود در پومیس بیشتر بود. بر اساس نتایج، نسبت Ca/Si در نمونه‌های EM+P15، EM+M15 و M15 بسیار کم بود (<0/1)، که نشان دهنده این است که این نمونه‌ها فاقد کلسیم بوده و متعاقباً مشاهده فاز CSH در آن‌ها دشوار است. این پدیده آهک‌زدایی یون‌های کلسیم از ساختار بتن را تأیید می‌کند. همچنین، تصویر SEM از EM+M15 یک لایه تجزیه شده را نشان می‌دهد که احتمالاً از ژل‌های  $nH_4O \cdot Al_2O_3$  و  $nH_4O \cdot SiO_2$  به همراه مقدار اندکی از فاز CSH ( $>0/1$ ) تشکیل شده است [۱۱]. نتایج میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که جایگزینی پوزلان با سیمان در مقایسه با نمونه شاهد CC و EM در شرایط اسیدی در طولانی مدت عملکرد ضعیفی دارد.

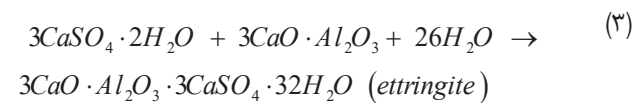
### ۳-۳-۵- نتایج آنالیز سی‌تی‌اسکن

در این مطالعه، طرح‌های مختلف با آنالیز سی‌تی‌اسکن در هر دو شرایط غوطه‌وری در آب و اسید ارزیابی گردیدند. همان‌طور که قبلاً بحث شد، ایجاد فضاهای خالی و ساختار متخلخل از تأثیرات طولانی مدت آهک‌زدایی بر روی ساختار بتن هستند. برای بررسی دقیق‌تر، ارزیابی‌های مکملی در این پژوهش از طریق تصاویر سی‌تی‌اسکن در حوزه مزوسکوپی انجام شد. به این ترتیب، اندازه منافذ متوسط و توزیع آن‌ها در ساختار بتن، پارامترهایی هستند که با نرم‌افزار Image J ارزیابی گردیدند. به نحوی که، لکه‌های تاریک به عنوان حفرات در ساختار بتن فرض شد، سپس محدوده آستانه بین ۷۰ تا ۸۵ جهت آنالیز اندازه ذرات با متوسط حداقل بیش از  $5 \text{ mm}^2$  در نظر گرفته شد [۲۴]. شکل شماره ۸ مراحل فرآیند ارزیابی تصویر سی‌تی‌اسکن را نشان می‌دهد که می‌تواند منجر به شناسایی فضاهای خالی در ساختار بتن گردد. در نهایت، فضاهای خالی برای درک بهتری از رفتار ملموس در این شرایط محاسبه و اندازه‌گیری گردیدند.

را نشان نمی‌دهد، که می‌تواند مربوط به واکنش هیدروکسید کلسیم با محلول اسید باشد. وقتی که اسیدسولفوریک و اسید نیتریک با هیدروکسید کلسیم واکنش می‌دهند به ترتیب گچ و نترات کلسیم تولید می‌شوند (به معادله ۱ و ۲ رجوع کنید).



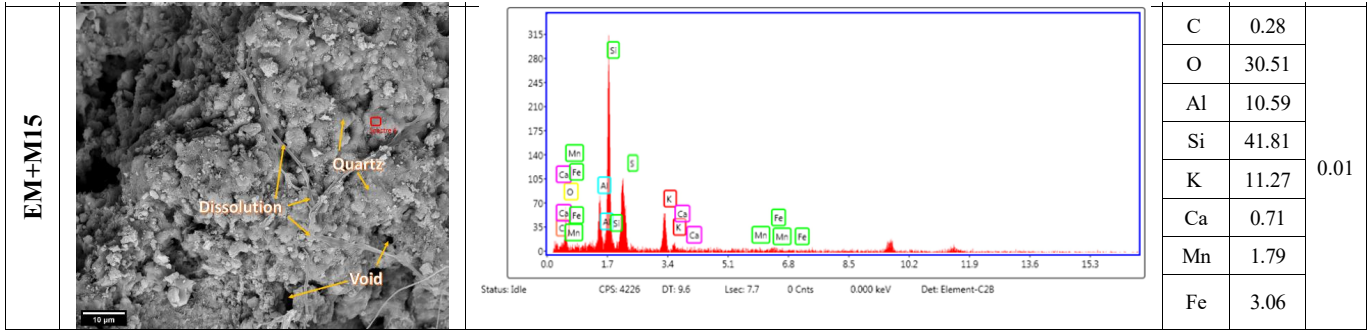
بر اساس تصاویر شکل شماره ۷، اشکالی به صورت صفحات تخت و مکعب گونه‌ای در تمام نمونه‌ها دیده شد که نشانگر ظهور گچ ناشی از حمله اسید سولفوریک به بتن می‌باشد. علاوه بر این، طیف EDX در همه نمونه‌ها وجود قله‌های گوگرد (S) را نشان می‌دهد که نشانگر تشکیل گچ پس از حمله اسیدی می‌باشد. با توجه به اینکه ساختار کلسیم در نمونه‌های حاوی پوزلان کمتر است، بنابراین ساختار ژپیس کمتر در این نمونه‌ها شکل می‌گیرد. شایان ذکر است این فاز شرایط غوطه‌وری در آب مشاهده نشد. از سوی دیگر، اترینگایت با واکنش بین گچ و هیدرات آلومینات کلسیم تشکیل می‌گردد که در مقایسه با گچ تا ۷ برابر بیشتر می‌تواند منجر به انبساط گردد (به معادله ۳ رجوع کنید). با افزایش انبساط داخل بتن تنش داخلی نیز افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به ایجاد ترک در ساختار بتن می‌گردد [۲۳].



نترات کلسیم محصول دیگری از باران اسیدی شبیه‌سازی شده در این مطالعه است که ناشی از اثر حمله اسید نیتریک به بتن می‌باشد و نقش اساسی در فرسایش بتن به دلیل حلالیت زیاد در آب دارد (معادله ۲). این محصول می‌تواند از ماتریس به راحتی خارج شده و باعث ایجاد ساختار متخلخل در بتن گردد. تکرار این روند باعث ایجاد ساختاری متخلخل در بتن می‌گردد که مقاومت و دوام بتن را تحت تأثیر قرار خواهد داد. مناطق تاریک در تصاویر SEM، منافذ و حفره‌های سطح بتن را نشان می‌دهد (شکل شماره ۷). تصاویر SEM از نمونه‌های EM و CC ترک‌های متعددی را

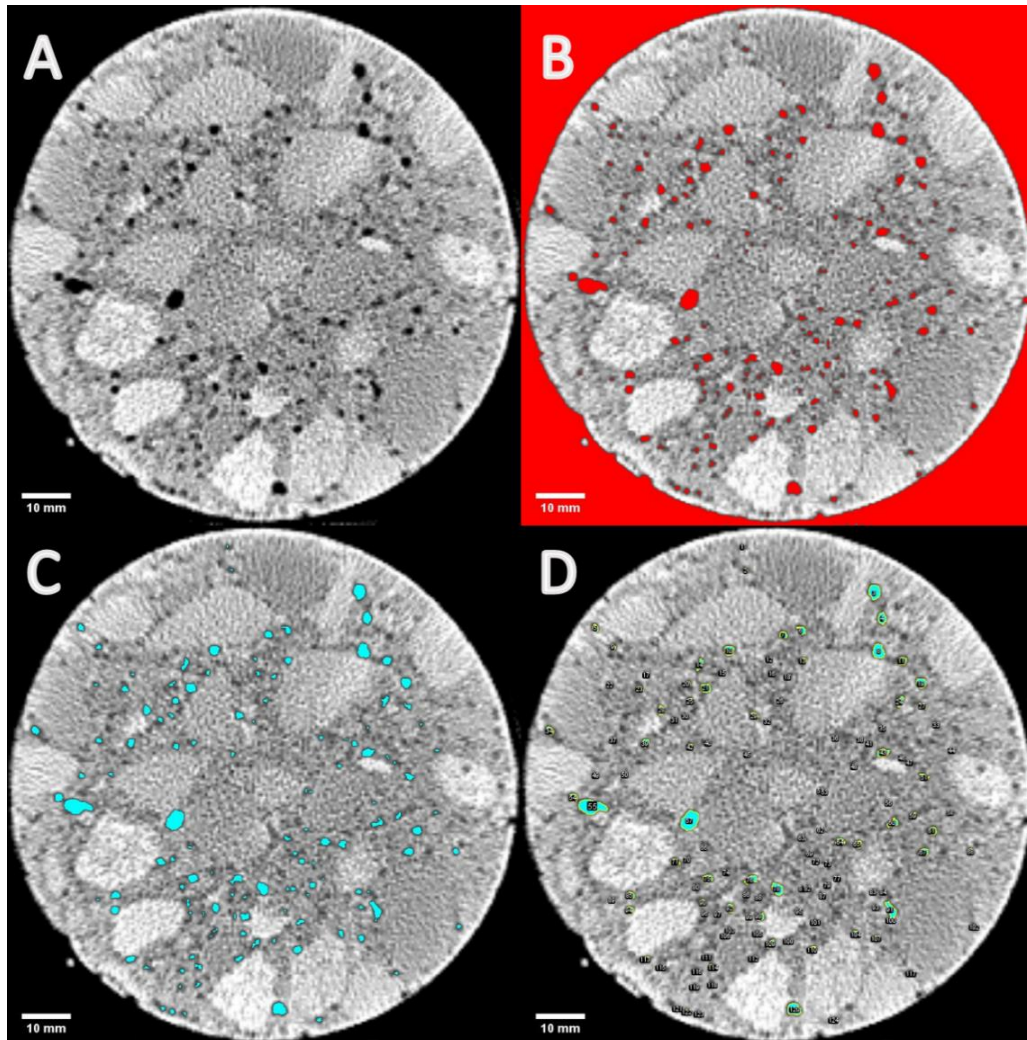






شکل ۷. تصاویر SEM و طیف EDX نمونه‌های بتنی در سن ۵۶ روز بعد از ۳۶ هفته غوطه‌وری در باران اسیدی.

Fig. 7. SEM images and EDX spectra of concrete samples at 56 days of age after 36 weeks of immersion in acid rain.



شکل ۸. نمونه‌ای از فرآیند ارزیابی تصویری سی‌تی‌اسکن از طرح مخلوط EM.

Fig. 8. Example of CT scan image evaluation process of EM mix design.



جدول ۳. اندازه متوسط، تعداد و مساحت کل حفرات طرح مخلوط‌های مورد مطالعه در شرایط نگهداری در آب و حمله باران اسیدی شبیه‌سازی شده.

**Table 3. Mean size, number and total area of the pores of the studied mixtures under simulated water curing and acid rain attack conditions.**

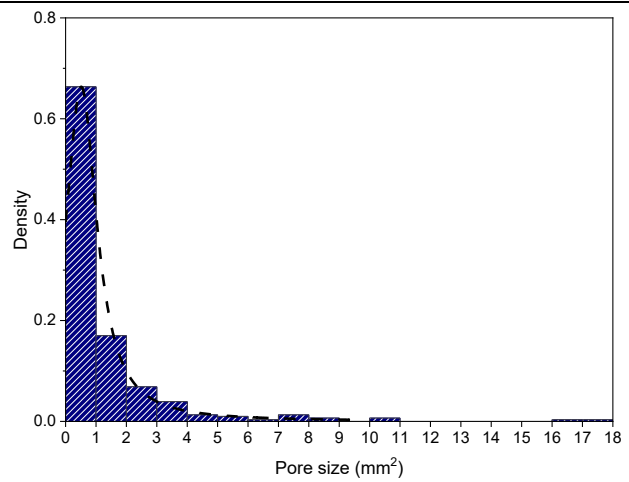
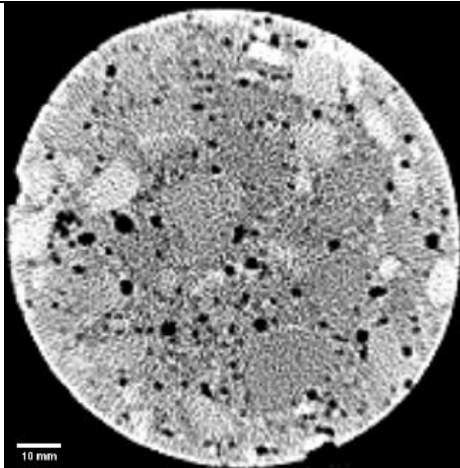
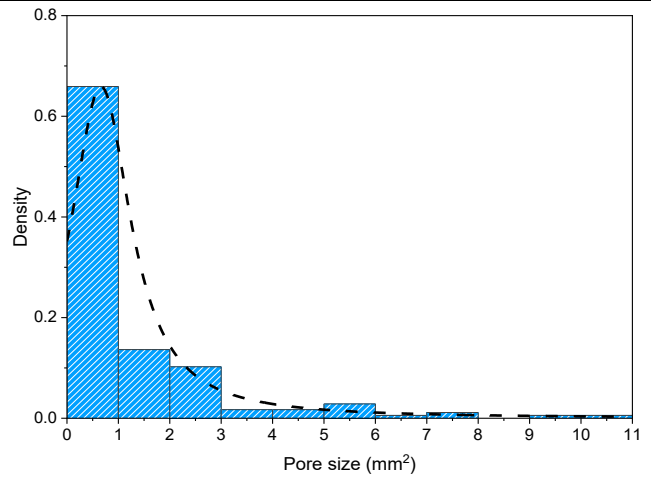
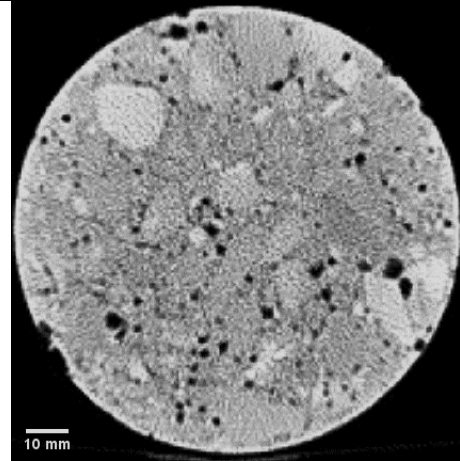
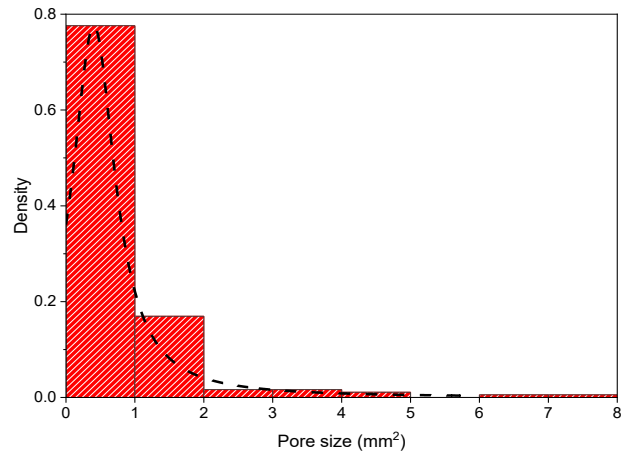
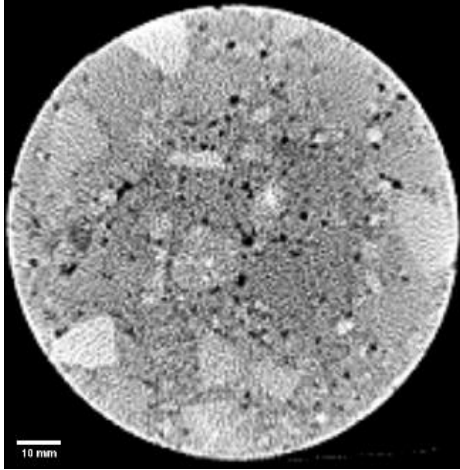
نام نمونه	شرایط محیطی	اندازه متوسط حفرات (mm)	تعداد حفرات	مساحت کل حفرات (mm <sup>2</sup> )
CC	آب	۱/۰۲۷	۹۷	۹۹/۷۱
	اسید	۰/۷۵	۱۸۳	۱۳۷/۲
P15	آب	۱/۲	۱۲۵	۱۵۵/۲
	اسید	۱/۳	۲۰۷	۲۶۹
M15	آب	۱/۲۵	۱۵۱	۱۸۹
	اسید	۱/۲۴	۳۰۶	۳۸۰
EM	آب	۱/۱۲	۱۲۴	۱۳۹/۰۱
	اسید	۰/۹۶	۲۱۰	۲۰۱/۷
EM+P15	آب	۱/۳۱	۱۳۲	۱۷۳/۱
	اسید	۱/۴	۱۷۶	۲۵۰
EM+M15	آب	۱/۱	۲۴۰	۳۴۱/۲
	اسید	۱/۸۱	۳۲۰	۴۲۵/۲۴

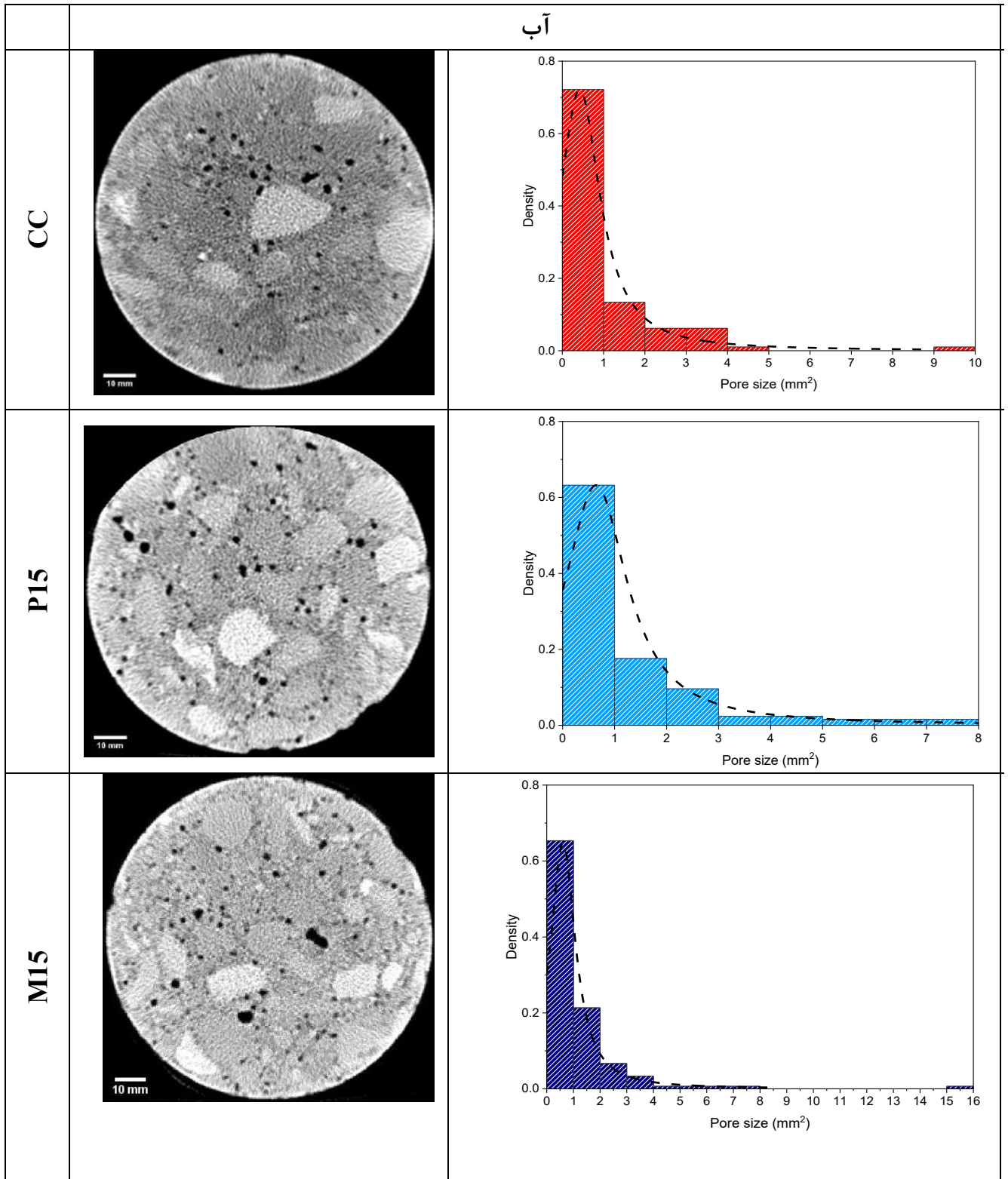
بر اساس شکل شماره ۹، در ابتدا منحنی توزیع نرمال متمرکز شده و سپس روند کاهشی پیدا می‌کند. برای همه نمونه‌ها منافذ عمدتاً در محدوده کمتر از می‌باشد و بنابراین پیک توزیع حفرات در محدود زیر ۱ میلی‌متر مربع است. توزیع اندازه منافذ برای نمونه CC با توجه به عملکرد مناسب محدود می‌باشد، در حالی که در طرح‌های M15 و EM + M15 بسیار گسترده‌تر است. این نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی متاکائولن دارای حفرات بیشتری نسبت به نمونه شاهد هستند که نشان دهنده عملکرد ضعیف آن‌ها هست. از سوی دیگر بر اساس این نتایج، عملکرد مخلوط‌های P15 و EM + P15 به مراتب بهتر از M15 و EM + M15 می‌باشد. جدول شماره ۳ پارامترهایی را نشان می‌دهد که از نرم‌افزار Image J استخراج شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی سیمان با پوزولان منجر به افزایش تعداد فضاهای خالی در ساختار بتن می‌گردد. همان‌طور که نشان داده شده، مخلوط EM + M15 حاوی فیبر و متاکائولن دارای تخلخل بیشتری نسبت به سایر مخلوط‌ها است و نمونه CC دارای تعداد منافذ کمتری با اندازه منافذ متوسط کمتر می‌باشد. این وضعیت در محیط‌های اسیدی بسیار چشمگیر است به نحوی که تمام نمونه‌های بتنی با رشد تعداد حفرات روبرو هستند.

شکل شماره ۹ تصاویر سی‌تی‌اسکن از نمونه‌های غوطه‌ور در آب و باران اسیدی شبیه‌سازی شده به مدت ۳۶ هفته را نشان می‌دهد. در شرایط اسیدی، عملکرد نمونه‌های حاوی پوزولان ضعیف است که با کاهش وزن، نمایانگر یک ساختار متخلخل است. در طرح‌های M15 و EM + M15، سطح تجمع حفره‌ها در سطح مقطع بسیار بیشتر از مخلوط‌های دیگر است (جدول شماره ۳). مقدار بالای اندازه متوسط منافذ و تعداد حفرات در ساختار طرح EM + M15 نشان از افت وزنی به وسیله آهک‌زدایی در ساختار بتن را دارد. همچنین شکل شماره ۹ به ترتیب تراکم توزیع حفرات در نمونه‌های بتنی در شرایط نگهداری در آب و محلول باران اسیدی را نشان می‌دهد. در این مطالعه، منحنی توزیع فضاهای خالی بر اساس تابع لورنتس می‌باشد که کاملاً با توزیع حفرات در ساختار بتن سازگار است. همچنین، رفتار توزیع اندازه حفرات مطابق با پیک‌های تابع لورنتزین<sup>۱</sup> بوده است که به نسبت مطالعات گذشته که بر پایه تابع گاوسی<sup>۲</sup> بوده، همگرایی مناسب‌تری داشته است [۲۵].

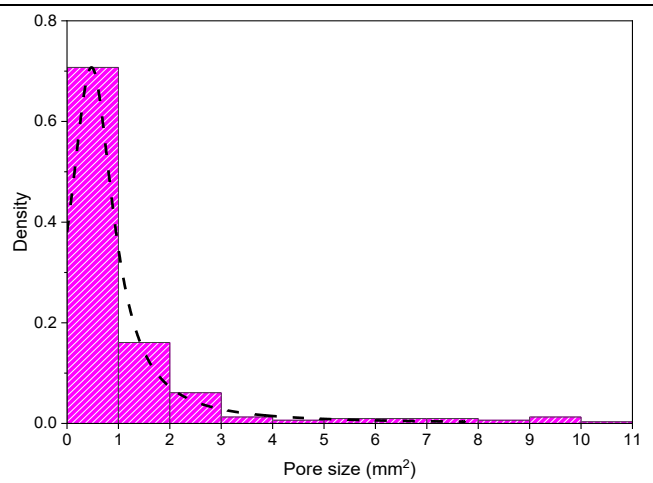
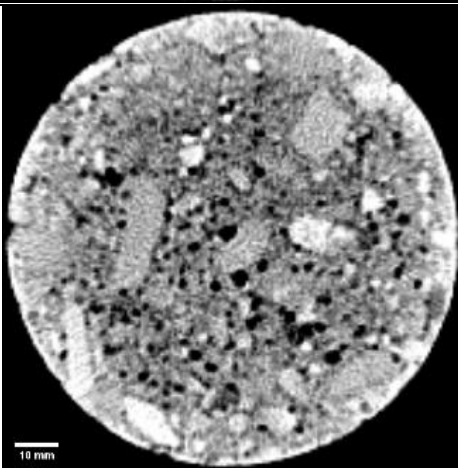
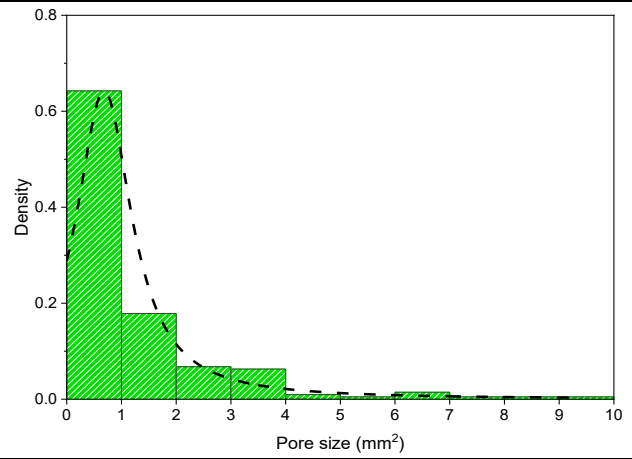
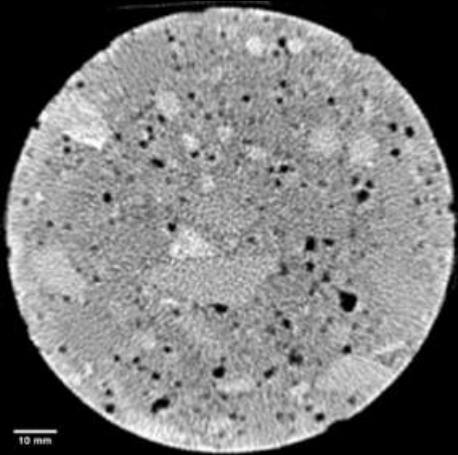
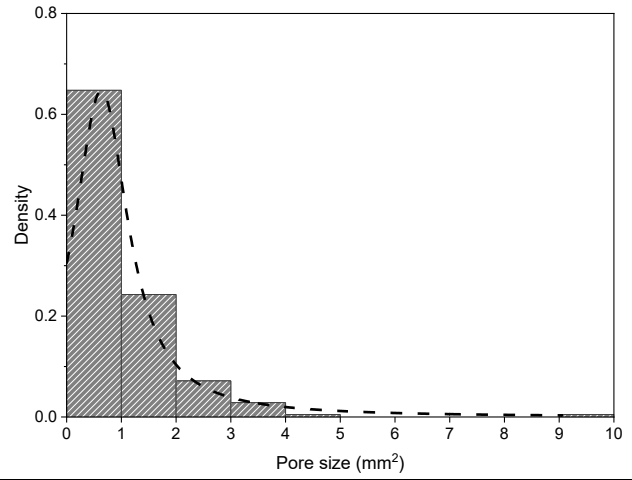
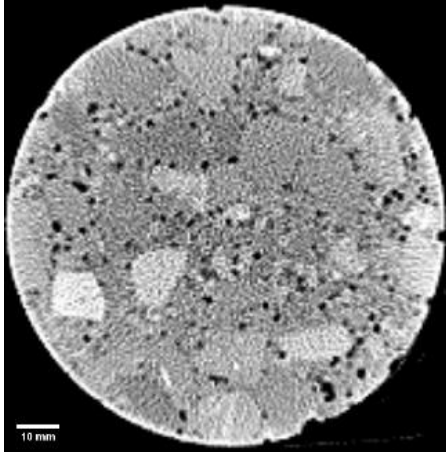
- 1 Lorentzian
- 2 Gaussian

### اسید

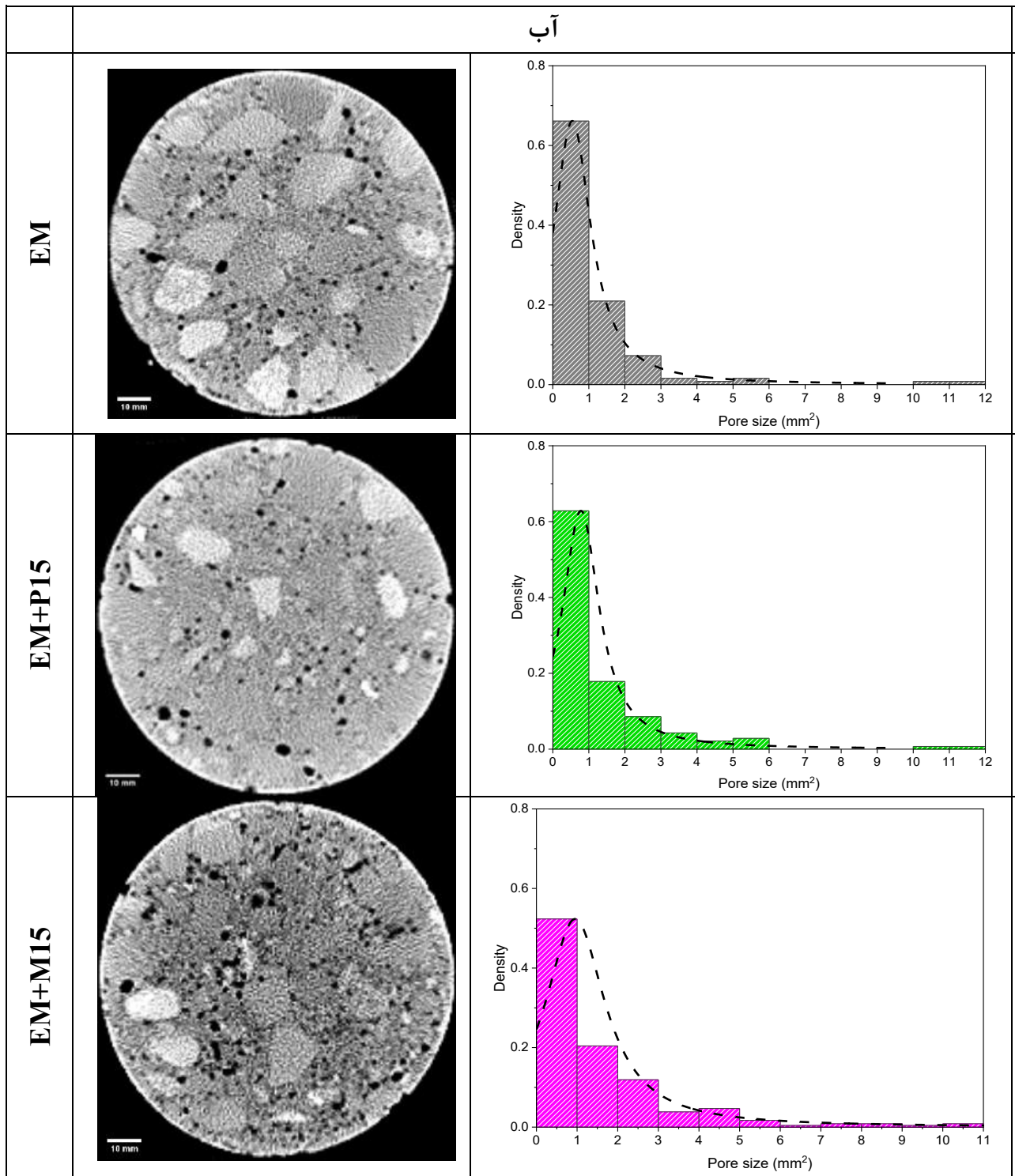




### اسید







شکل ۹. تصویر سی تی اسکن از سطح مقطع نمونه‌ها در شرایط نگهداری در آب و حمله باران اسیدی شبیه‌سازی شده.

Fig. 9. CT scan image of the cross-section of the specimens simulated under water curing and acid rain attack conditions.

۳- علیرغم رفتار مکانیکی مناسب هر دو پوزولان پومیس و متاکائولن در بتن معمولی و بتن تقویت شده با الیاف، با این حال مقاومت ضعیفی در برابر حمله باران اسیدی (محلول اسید سولفوریک و اسید نیتریک) از خود نشان دادند. این رفتار ضعیف در بتن‌های حاوی متاکائولن به مراتب چشمگیر بود. علت آن آهک‌زدایی بالا به دلیل وجود مقدار فراوان CSH پوزولانیک در ساختار آن‌هاست.

۴- طرح مخلوط EM + M15 ساختار متخلخل‌تری نسبت به سایر طرح اختلاطها در شرایط نگهداری در آب از خود نشان داد. علاوه بر این، فاز CSH به دلیل واکنش پوزولانی به‌طور گسترده‌ای در دو طرح M15 و EM + M15 مشاهده شد. از سوی دیگر در شرایط محیط اسیدی، نسبت Ca / Si به دلیل افزایش آهک‌زدایی که منجر به افزایش تخریب در ساختار بتن می‌گردد، به‌طور قابل‌توجهی در دو طرح مذکور کاهش یافت. طیف EDX از طرح مخلوط EM + M15 نشان می‌دهد که نسبت Ca / Si بسیار کم (< ۰/۱) و لذا مشاهده فاز CSH توسط تصاویر SEM در طرح مذکور دشوار خواهد بود.

۵- در این تحقیق ساختار داخلی بتن‌های مورد مطالعه توسط آنالیز سی‌تی‌اسکن بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که تخلخل نمونه‌های حاوی ترکیبات پوزولانی بیشتر از نمونه‌های بدون افزودنی است. همچنین، طرح EM + M15 در شرایط محیطی اسیدی بسیار ضعیف عمل می‌کند و طیف وسیعی از رشد حفرات در ساختار آن با افزایش اندازه متوسط منافذ شکل می‌گیرد که با نتیجه SEM مطابقت کامل دارد.

۶- از آنجائی که مقاومت خمشی یکی از چالش‌های اصلی در روسازی‌های بتنی است، در این مطالعه از پومیس و متاکائولن به منظور افزایش مقاومت خمشی در بتن معمولی و بتن تقویت شده با الیاف پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن استفاده شد. در این راستا با بهبود مقاومت خمشی می‌توان ضخامت روسازی را کاهش داد. این دستاورد در صنعت روسازی بتنی بسیار اقتصادی خواهد بود. از سوی دیگر، حملات باران اسیدی یکی از شاخص‌های اساسی برای ارزیابی دوام سازه‌های بتنی است. بر اساس نتایج مستخرج از این مطالعه، استفاده از دو پوزولان پومیس و متاکائولن در بتن‌های معمولی و الیافی در شرایط محیطی معمولی به منظور افزایش مقاومت خمشی در روسازی‌های بتنی توصیه می‌گردد. برعکس، کاربرد این دو پوزولان در محیط‌های در معرض باران‌های اسیدی به دلیل عملکرد ضعیفشان توصیه نمی‌گردد.

جدول شماره ۳ نشان می‌دهد که تعداد حفرات به‌طور قابل‌توجهی برای نمونه‌های EM + M15 و M15 در شرایط محلول اسیدی افزایش می‌یابد. همچنین توزیع تراکم تخلخل در محدوده کمتر از ۱ میلی‌متر مربع نسبت به شرایط نگهداری در آب شدیدتر است که علت آن تشکیل منافذ در ساختار نمونه‌های بتنی مذکور می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که هم الیاف و هم پوزولان، پدیده آهک‌زدایی در ساختار بتن را افزایش می‌دهند. بنابراین، میزان تخلخل در بتن (CC < EM < P15 < EM + P15 < M15 < EM + M15) با نتایج کاهش وزن مخلوط مطابقت کامل دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه بر روی تأثیر استفاده دو پوزولان مختلف همچون پومیس و متاکائولن در بتن معمولی و بتن تقویت شده با الیاف پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن تمرکز یافته است. در این راستا، خواص مکانیکی و دوام در برابر حملات باران اسیدی برای شش طرح مخلوط تهیه شده بررسی گردیده است که عمده نتایج آن به شرح ذیل می‌باشد:

۱- به دلیل واکنش‌پذیری بالای پومیس و متاکائولن، جایگزینی ۱۵٪ سیمان پرتلند تیپ II با این دو پوزولان در بتن معمولی و بتن تقویت شده با الیاف باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب از ۷ و ۲۸ روز در مقایسه با مقدار متناظر آن‌ها در بتن بدون افزودنی می‌گردد. این تأثیر توسط پومیس به مراتب فراوان‌تر در مقایسه با اثر متاکائولن می‌باشد. از سوی دیگر، در مخلوط‌های مبتنی بر الیاف، به دلیل توزیع غیریکنواخت الیاف در ماتریس، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و پلی‌الفین تأثیر منفی در افزایش مقاومت فشاری دارد. با این حال، افزایش مقاومت خمشی بالا با استفاده از هر دو الیاف مورد مطالعه در مقایسه با بتن شاهد تحقق می‌یابد. که این افزایش با جایگزینی سیمان توسط دو پوزولان به‌خصوص پومیس چشمگیرتر بود.

۲- مخلوط‌های حاوی پوزولان با وجود داشتن مقاومت فشاری بالا در مقایسه با مخلوط‌های بدون پوزولان، عملکرد ضعیفی در برابر حملات باران اسیدی به دلیل فراوانی پرتلندیت از خود نشان دادند. همچنین، مقدار زیاد ژل CSH حاصل از واکنش‌های پوزولانی متاکائولن و پومیس منجر به تشدید واکنش‌های آهک‌زدایی گردید.

- [10] R. Chen, K. Yang, X. Qiu, X. Zeng, P. Wang, J. Xu, J. Chen, Degradation mechanism of CA mortar in CRTS I slab ballastless railway track in the Southwest acid rain region of China—Materials analysis, *Construction and Building Materials*, 149 (2017) 921-933.
- [11] M.C. Chen, K. Wang, L. Xie, Deterioration mechanism of cementitious materials under acid rain attack, *Engineering Failure Analysis*, 27 (2013) 272-285.
- [12] X. Hu, Y. Guo, J. Lv, J. Mao, The Mechanical Properties and Chloride Resistance of Concrete Reinforced with Hybrid Polypropylene and Basalt Fibres, *Materials*, 12(15) (2019) 2371-2371.
- [13] R. San Nicolas, M. Cyr, G. Escadeillas, Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement, *Construction and Building Materials*, 55 (2014) 313-322.
- [14] P. Dinakar, P.K. Sahoo, G. Sriram, Effect of Metakaolin Content on the Properties of High Strength Concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(3) (2013) 215-223.
- [15] K. Samimi, S. Kamali-Bernard, A.A. Maghsoudi, M. Maghsoudi, H. Siad, Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes, *Construction and building materials*, 151 (2017) 292-311.
- [16] K. Samimi, Contribution à l'étude de la durabilité des BAP dans les milieux agressifs: effets des pouzzolanes naturelles, (2016).
- [17] A. Ramezani-pour, M. Samadian, M. Mahdikhani, Engineering properties and durability of selfconsolidating concretes (SCC) containing volcanic pumice ASH, (2012).
- [18] H.A. Khan, A. Castel, M.S.H. Khan, A.H. Mahmood, Durability of calcium aluminate and sulphate resistant Portland cement based mortars in aggressive sewer environment and sulphuric acid, *Cement and Concrete Research*, 124 (2019) 105852-105852.
- [19] I.G. Richardson, G.W. Groves, Microstructure and microanalysis of hardened ordinary Portland cement
- [1] C.X. Qian, P. Stroeven, Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 30(1) (2000) 63-69.
- [2] J. Wang, Q. Dai, R. Si, S. Guo, Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic polypropylene (PP) fiber-reinforced rubber concrete, *Journal of Cleaner Production*, 234 (2019) 1351-1364.
- [3] A.M. Zeyad, A.H. Khan, B.A. Tayeh, Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder and polypropylene fibers, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1) (2020) 806-818.
- [4] S.E. Vakili, P. Homami, M.R. Esfahani, Effect of fibers and hybrid fibers on the shear strength of lightweight concrete beams reinforced with GFRP bars, in, Elsevier, pp. 290-297.
- [5] S. Ullah Khan, T. Ayub, Flexure and shear behaviour of self-compacting reinforced concrete beams with polyethylene terephthalate fibres and strips, in, Elsevier, pp. 200-211.
- [6] S.M.S. Kazmi, M.J. Munir, Y.-F. Wu, I. Patnaikuni, Y. Zhou, F. Xing, Axial stress-strain behavior of macro-synthetic fiber reinforced recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 97 (2019) 341-356.
- [7] K. Samimi, S. Kamali-Bernard, A.A. Maghsoudi, Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment, *Construction and Building Materials*, 165 (2018) 247-263.
- [8] A.S. Gill, R. Siddique, Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash, *Construction and Building Materials*, 176 (2018) 323-332.
- [9] M. Nematzadeh, S. Fallah-Valukolaei, Erosion resistance of high-strength concrete containing forta-ferro fibers against sulfuric acid attack with an optimum design, *Construction and Building Materials*, 154 (2017) 675-686.

- Engineering Failure Analysis, 27 (2013) 272-285.
- [23] J. Monteny, E. Vincke, A. Beeldens, N. De Belie, L. Taerwe, D. Van Gemert, W. Verstraete, Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete, *Cement and Concrete Research*, 30(4) (2000) 623-634.
- [24] Y.-f. FAN, H.-y. LUAN, Pore structure in concrete exposed to acid deposit, *Construction and Building Materials*, 49 (2013) 407-416.
- [25] Ł. Skarżyński, J. Tejchman, Experimental investigations of fracture process in concrete by means of X-ray micro-computed tomography, *Strain*, 52(1) (2016) 26-45.
- pastes, *Journal of Materials Science*, 28(1) (1993) 265-277.
- [20] M. Koushkbaghi, M.J. Kazemi, H. Mosavi, E. Mohseni, Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate, *Construction and Building Materials*, 202 (2019) 266-275.
- [21] H. Cardenas, K. Kupwade-Patil, S. Eklund, Recovery from Sulfate Attack in Concrete via Electrokinetic Nanoparticle Treatment, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7) (2011) 1103-1112.
- [22] M.-C. Chen, K. Wang, L. Xie, Deterioration mechanism of cementitious materials under acid rain attack,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*K. Samimi , M. Pakan, A. H. Firoozbakht , Investigation of mechanical behavior of fibrous concrete containing pumice and metakaolin and chemical resistance to acid attack, Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 2395-2414.*

DOI: 10.22060/ceej.2021.20026.7319

