بتن ضد آب: نوآوری در ساخت و ساز

محمدرضا شاه حسینی [*۱]، محمدرضا مسعودی مقدم[۲]، مهدیه هداوند[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه سمنان، m.shahhoseini@semnan.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری منابع آب، دانشگاه شهید بهشتی تهران، m_masoudimoghaddam@sbu.ac.ir

۳- کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه گرمسار، mahdiehadavand79@gmail.com

خلاصه

در دنیای امروز، صنعت ساخت و ساز به سرعت در حال تحول و پیشرفت است. یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین مصالح ساختمانی در دنیا بتن است که همواره محققان به دنبال بهبود ویژگی‌های آن هستند. بتن ضد آب یکی از این نوآوری‌هاست که فضای جدیدی در زمینه ساخت و ساز فراهم کرده است. این نوع بتن نه تنها مقاومت بالایی دارد، بلکه از نفوذ آب نیز جلوگیری می‌کند و بنابراین برای استفاده در محیط‌های مرطوب و پروژه‌های دریایی بسیار مناسب است. بتن ضد آب به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، توجه بسیاری از مهندسان و معماران را به خود جلب کرده است. یکی از مهم‌ترین مزایای این نوع بتن، جلوگیری از نفوذ آب به داخل سازه‌هاست. این امر باعث افزایش دوام و طول عمر ساختمان‌ها می‌شود و هزینه‌های نگهداری و تعمیر را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. مخلوط‌های ضدآب یکپارچه مختلف و پوشش‌های سطحی به‌طور گسترده‌ای برای جلوگیری یا کاهش این مشکل استفاده شده است. ترکیب مواد افزودنی ضد آب (مانند متراکم کننده‌ها، دافع‌های آب و افزودنی‌های کریستالی) در بتن دارای مزایای متعددی مانند سهولت استفاده است. توانایی این مواد در ترکیب با بتن باعث مقاومت در برابر فشار هیدرواستاتیک شده، که باعث شده یک انتخاب مناسب برای سازه‌های واقع در مناطق سیل خیز باشد. مزایای کلی بتن ضد آب آن را به یک ماده ایده آل برای کاربردهای ساحلی و دریایی تبدیل کرده است. این پژوهش به بررسی در مورد بتن ضد آب یکپارچه حاوی افزودنی‌های ضد آب مختلف تجاری و آزمایشگاهی ساخته‌شده می‌پردازد. این بررسی جامع تأکید می‌کند که استفاده از افزودنی‌های یکپارچه ضدآب، افزایش عمر مفید سرویس دهی و بهبود دوام سازه‌های بتنی در شرایط نفوذ آب و حفظ سازه‌های دریایی در محیط خشن دریایی کاربرد دارد.

کلمات کلیدی: بتن ضد آب، خواص مکانیکی، تخریب، دوام بتن، تهاجم

۱. مقدمه

بتن پرکاربردترین ماده ساختمانی ساخت بشر است. این ماده بعد از آب، بیش‌ترین استفاده را روی کره زمین دارد. بتن به‌طور طبیعی متخلخل است و دارای خلل و فرج می‌باشد و در ماتریس آن ریزترک‌هایی وجود دارد که همین امر سبب بتن را در برابر آب و سایر مایعات تهاجمی آسیب پذیر می‌کند. کاهش طول عمر در طول زمان برای زیرساخت‌های بتنی در معرض یک محیط تهاجمی به دلیل تخریب فیزیکی و شیمیایی انتظار می‌رود. به همین ترتیب، زیرساخت‌های بتنی واقع در نزدیکی سفره‌های آب زیرزمینی یا در یک محیط بسیار مرطوب مانند اسکله‌ها و ... نیز به دلیل ورود و تماس بی وقفه آب با بتن مستعد خرابی است. برای مقابله با این اثرات مخراب در زیرساخت‌های بتنی نیازمند هزینه‌های زیادی برای تعمیر و بهسازی سازه می‌باشد، برای کاهش چنین هزینه‌های تعمیر و بهسازی باید جذب آب بتن را تا حد امکان کاهش داد. در حال حاضر هیچ تعریف و استاندارد خاصی برای بتن ضد آب یا بتن آب گریز وجود ندارد، اما کمیته آلمانی بتن مسلح بتن ضد آب را اینگونه تعریف می‌کند که میزان جذب آب در مقایسه با بتن مرجع عمل‌آوری نشده بیش از ۵۰٪ کاهش می‌یابد[۱]. طبق گزارش شرکت ملی برنامه تحقیقات بزرگراه در ایالات متحده آمریکا، میزان جذب آب بتن ضد آب باید کمتر از ۲/۵٪ باشد[۲]. با توجه به تعاریف بالا گویای این است که بتن ضد آب باید میزان جذب آب کمی داشته باشد تا بتوان آن را بتن ضدآب یا آب گریز نامید. برای این که جذب آب بتن کاهش یابد کارهای مختلفی را می‌توان انجام داد، روش‌های سنتی در کنترل جذب آب بتن شامل اضافه کردن مواد سیمانی مکمل (SCMs) مانند پوزولان‌ها به مخلوط بتن، کاهش نسبت آب به سیمان (w/c) بوده است. اخیرا محققان روش‌های جدیدتری با معرفی بتن ضد آب و توسعه آن معرفی کردند نظیر استفاده از از غشاهای خارجی، پوشش‌های سطحی و یا ضد آب یکپارچه، به‌طور کلی استفاده از افزودنی‌های ضد آب یکپارچه به عنوان یک جایگزین مناسب برای سایر روش‌های ضد آب متداول مورد استفاده قرار گرفته است[۳]. استفاده از مواد افزودنی ضد آب یکپارچه با هدف تبدیل بتن خود به یک مانع آب است. در مقابل، غشاهای خارجی یا پوشش‌های سطحی فقط یک مانع در سطح بالا یا پایین بتن تشکیل می‌دهند. بنابراین، بتن ضد آب یکپارچه نیاز به تعمیر و نگهداری منظم ندارد و می‌تواند در سازه‌ها، مانند پایه های عمیق استفاده شود[۴]. علاوه بر این، اثربخشی پوشش‌ها و غشاهای ضد آب مستعد آسیب سطحی یا ترک خوردگی بتن در طول عمر مفید است [۱]. پس از آسیب، میزان جذب آب و نفوذپذیری بتن به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد [۵، ۶]. بنابراین، بتن ضد آب یکپارچه به‌طور بالقوه می‌تواند عملکرد دوام بهبود یافته نسبت به بتن با یک لایه حفاظت سطح [۱]. اما باید اقدامات اضافی برای جلوگیری از نفوذ آب در اتصالات بتنی یا مکان‌هایی با پتانسیل ایجاد ترک‌های بزرگ اتخاذ شود.

۲- اهمیت تحقیق

تحقیقات قابل توجهی در دهه‌های گذشته در مورد استفاده از افزودنی‌های ضد آب مختلف و پوشش‌های سطحی/غشاء برای حفاظت از بتن انجام شده است. در ابتدا لازم است که افزودنی‌ها و مواد شیمیایی ضدآب مختلف را بر اساس ساز و کار ایجاد مقاومت در برابر نفوذ آب بررسی کرد. بر این اساس، افزودنی‌های ضدآب بر اساس ساز و کارهای ضدآب بودن آنها طبقه‌بندی می‌شوند و تأثیر این افزودنی‌ها بر خواص تازه، مکانیکی و دوام انواع مختلف بتن مورد بحث است.

۳- مواد افزودنی ضد آب

افزودنی‌های ضد آب مواد متخلخلی هستند که توانایی جذب آب و آلاینده‌های موجود در آب را دارند. ترکیبات ضد آب و مسدود کننده منافذ با محصولات فرآیند هیدراسیون سیمان واکنش داده و ماده ضد آب تولید می‌کنند که در برابر آب

خارجی مقاومت می‌کند و باعث کاهش جذب در بتن می‌شود. افزودنی‌های ضد آب از سازه‌ها در برابر تخریب محافظت می‌کنند. آن‌ها دوام را افزایش می‌دهند و هزینه های نگهداری را کاهش می‌دهند.

مواد افزودنی کاهنده نفوذپذیری بتن یا افزودنی های ضد آب به روش های زیر عمل می‌کنند:

- باعث کاهش اندازه منافذ مویرگی، تعداد و تداوم آنها در داخل سازه بتنی می‌شود.
- منافذ مویرگی بتن را مسدود می‌کند یا ممکن است منافذ مویرگی را با مواد ضد آب بپوشاند. این امر به دلیل جذب مویرگی مانع از جذب آب در منافذ می‌شود. (جذب مویرگی عبارت است از عبور آب از منافذ بتن به دلیل وجود هد هیدرولیک خارجی)
- این افزودنی‌های مقاوم در برابر آب نمی‌توانند به طور قابل توجهی از حرکت آب از طریق ترک‌های بتن یا از طریق بتن ضعیف فشرده جلوگیری کنند که شایع‌ترین دلایل نشت آب در بتن هستند.

انواع مختلف افزودنی‌های ضد آب یکپارچه با معرفی چند نمونه از این مواد در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- انواع افزودنی‌های ضد آب یکپارچه

نوع	مثال
متراکم کننده‌ها	انواع پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی شامل: سرباره، خاکستر بادی، متاکائولین، خاکستر پوسته برنج، میکروسیلیس، نانو سیلیسیم دی اکسید، نانو آلومینیوم اکسید، نانو آهن اکسید
ضد آب‌ها	ترکیبات مبتنی بر سیلیکون
اسیدهای چرب	اسید چرب جامد، به ویژه اسید استئاریک
استئارات‌های فلزی	کلسیم استئارات، آلومینیوم استئارات
افزودنی‌های کریستالی	سدیم استات

۱-۳ متراکم کننده‌ها

اکثر متراکم کننده‌ها می‌توانند با هیدروکسید کلسیم $[CaOH_2]$ تولید شده در فرآیند هیدراسیون سیمان واکنش نشان می‌دهند و محصول دیگری را ایجاد می‌کنند که تراکم بتن را افزایش می‌دهد و نفوذ آب را کاهش می‌دهد. از آنجا که متراکم کننده‌ها کمتر از دافعه‌های آب و افزودنی های کریستالی در کاهش جذب آب موثر هستند، برخی از محققان متراکم کننده‌ها را به عنوان افزودنی های ضد آب در نظر نمی‌گیرند[۷،۸]. با این وجود، متراکم‌کننده‌ها هنوز می‌توانند نفوذ آب را در ماتریس بتن کند کنند و اغلب در ترکیب با دافعه‌های آب یا افزودنی‌های کریستالی برای توسعه بتن ضد آب استفاده می‌شوند. پرکاربردترین متراکم کننده ها در بتن مواد سیمانی مکمل و برخی نانومواد (مانند نانو نانو سیلیسیم دی اکسید، نانو آلومینیوم اکسید، نانو آهن اکسید) هستند. به‌طور کلی موادی که در ترکیب خود دارای ترکیبات سیلیسیم دی اکسید، نانو آلومینیوم اکسید هستند در مخلوط بتن نقش متراکم کننده را به خوبی ایفا می‌کنند. اثرات این مواد بر خواص تازه، مکانیکی و دوام بتن به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است [۹،۱۰]. به‌طور کلی اعتقاد بر این است که واکنش های پوزولانی مواد سیمانی مکمل باعث تغییر ریزساختار بتن و شیمی محصولات هیدراسیون با مصرف هیدروکسید کلسیم $[CaOH_2]$ می‌تواند با سیلیس واکنش داده و تولید ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) همچنین با آلومینا واکنش نشان داده و تولید ژل هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) که همانند سیمان دارای خاصیت چسبندگی است. انجام این واکنش شیمیایی

منجر به افزایش مقاومت و کاهش تخلخل و در نتیجه بهبود دوام بتن موثر است. واکنش پوزولانی این مواد بصورت زیر است[۱۱]:

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 = C\text{-}S\text{-}H \quad (۱)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 = C\text{-}A\text{-}H \quad (۲)$$

تقسیم‌بندی مواد پوزولانی براساس استاندارد ASTM در جدول ۲ آمده است. کاربرد آنها نه تنها از منظر محیط زیستی و مصرف انرژی، بلکه از لحاظ فنی نیز مفید می‌باشند. این مواد می‌توانند بعنوان افزودنی و یا بجای بخشی از مواد سیمانی استفاده شوند[۱۲].

جدول۲- مشخصات و طبقه‌بندی مواد مکمل سیمانی [۱۲]

سرباره گرانوله شده از کوره ذوب آهن	ASTM C 989	
سرباره با فعالیت کم		درجه ۸۰
سرباره با فعالیت متوسط		درجه ۱۰۰
سرباره با فعالیت زیاد		درجه ۱۲۰
خاکستر بادی و پوزولان‌های طبیعی	ASTM C 618	
پوزولان‌های طبیعی خام یا کلسینه شده شامل: دیاتومیت‌ها خاکسترهای آتشفشانی رس‌های کلسینه شده، شامل متاکائولن و شیل‌ها		کلاس N
خاکستر بادی با خواص پوزولانی		کلاس F
خاکستر بادی با خواص سیمانی و پوزولانی		کلاس C
میکروسیلیس	ASTM C 1240	

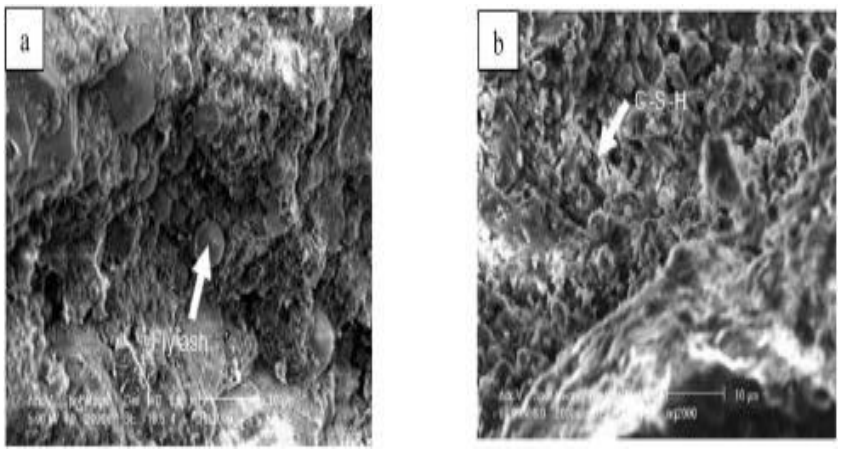
ترکیبات شیمیایی چند پوزولان در مقایسه با سیمان پرتلند در جدول ۳ نمایش داده شده است[۱۳].

جدول۳- ویژگی‌های فیزیکی چند نوع پوزولان انتخاب شده و سیمان پرتلند [۱۳]

Materials	Sio_2	Fe_2o_3	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	SO_3
Cement	20.33	2.70	0.16	0.75	65.03	1.03	5.09	3.13
Zeolite	76.88	1.40	1.68	2.20	1.34	0.08	11.15	-
Silica Fume	92	1.0	0.3	0.8	0.3	0.6	1.0	0.3

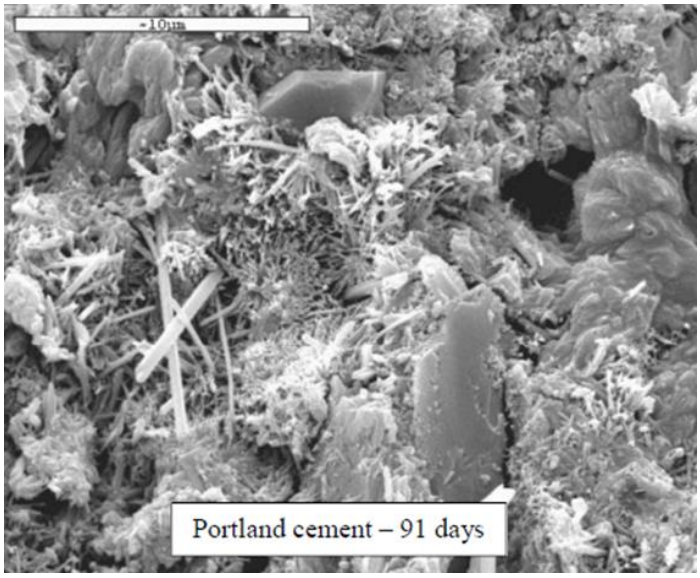
گزارش شده‌است که پس از ترکیب نانوسیلیسیم اکسید در بتن معمولی یک ریزساختار یکنواخت‌تر و فشرده‌تر پس از ترکیب ایجاد شده است(شکل۱) [۱۴]. از آنجا که نانوسیلیسیم اکسید به دلیل سطح ویژه بزرگ فعالیت بسیار بالایی دارد، می‌تواند با کریستال$(Ca(OH)_2)$ به سرعت واکنش نشان دهد تا ژل C–S–H تولید کند، که حفره‌ها را برای افزایش تراکم ناحیه‌ی انتقال بین سطحی (ITZ) و ماتریس خمیر اتصال پر می‌کند. همانطور که در شکل ۱ ب دیده می‌شود، مقدار زیادی از ژل C-S-H در بتن حاوی نانوسیلیسیم دی اکسید تشکیل شده است که در خمیر مرجع بدون نانوسیلیسیم دی اکسید

دیده نمی‌شود. بنابراین، پایداری و یکپارچگی ساختار محصول هیدراسیون سیمان افزایش می‌یابد و منجر به بهبود دوام و خواص مکانیکی طولانی مدت بتن می‌شود. انواع دیگر ذرات نانو مانند نانو آلومینیوم اکسید و نانو آهن اکسید نیز دارای اثرات پرکننده مشابه و/یا فعالیت پوزولانی بر روی ماتریس سیمانی هستند[۱۰].

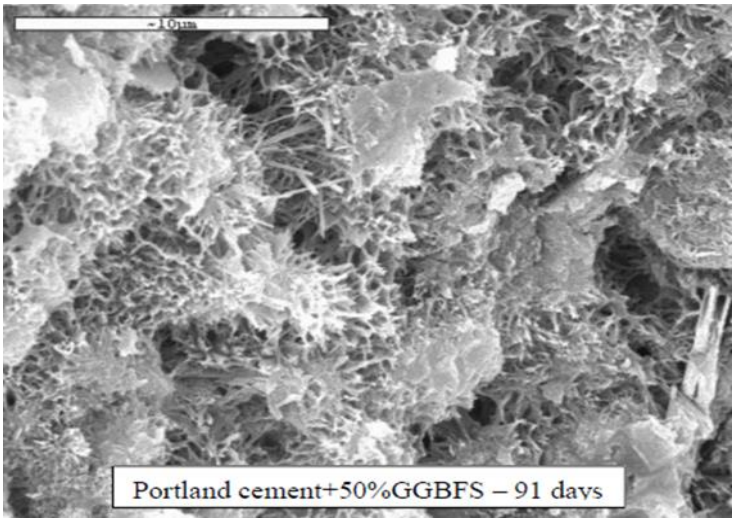


شکل۱- ریزساختار بتن معمولی که شامل خاکستر بادی است الف) بدون نانو سیلیسیم دی اکسید؛ و ب) با نانو سیلیسیم دی اکسید [۱۴]

تحقیقات مشابه‌ای نیز انجام شده است شکل (۲) یک ریزساختار نمونه بتن را با استفاده از ۱۰۰٪سیمان پرتلند نشان می‌دهد که حاوی ریزترک‌ها و منافذ با اندازه بزرگ است. در مقابل، در شکل ۳ ریزساختار یک نمونه بتن ۵۰٪ شامل سرباره کوره آهن‌گدازی است که یک ترکیب پوزولانی شامل یک شبکه پیوسته از منافذ کوچک و تعداد زیادی از کریستال‌های کلسیم سیلیکات هیدراته کوچک است که با استفاده از هیدراسیون سیمان و واکنش‌های پوزولانی ایجاد شده است[۱۵].



شکل۲- ساختار نمونه ساخته شده از سیمان پرتلند ۱۰۰٪ [۱۵]



شکل۳- ساختار نمونه ساخته شده از مخلوط ۵۰٪ سیمان پرتلند و ۵۰٪سرباره کوره آهن‌گدازی [۱۵]

۲-۳ پس زننده آب

دافعه‌های آب، که به عنوان افزودنی‌های ضد آب نیز شناخته می‌شوند، کشش سطحی بتن را تغییر می‌دهند و آن را ذاتاً غیر جاذب و ضد آب می‌کنند. بنابراین، زاویه تماس برای دیواره منافذ را می توان به ۹۰ درجه یا بالاتر افزایش داد و از نفوذ آب به داخل منافذ جلوگیری کرد. بر اساس گزارش ACI، اگر در ترکیب با سایر مواد افزودنی استفاده نشود، ممکن است افزودنی‌های ضد آب در برابر نفوذ آب تحت فشار هیدرواستاتیک مقاومت نکنند[۱۶].

۲-۳-۱ ترکیبات بر پایه سیلیکون

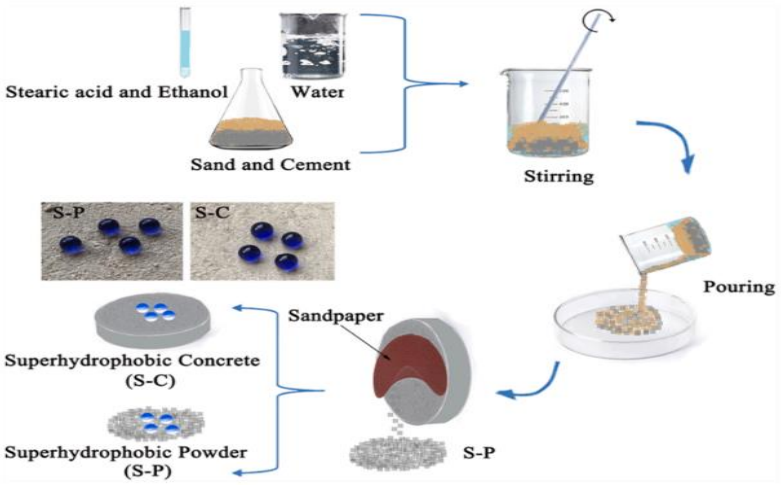
عوامل ضد آب مبتنی بر سیلیکون به‌طور گسترده‌ای برای محافظت از سطوح بتنی از آسیب آب استفاده شده است. این عوامل یک مانع ضد آب روی سطح تشکیل می‌دهند و از نفوذ آب به بستر جلوگیری می‌کنند. این به کاهش جذب آب و به حداقل رساندن آسیب ناشی از رطوبت کمک می‌کند. مشخص شده است که این عوامل با ارائه یک لایه اضافی از سطح محافظت کرده و به‌طور مؤثر طول عمر سطوح را طولانی‌تر می‌کنند. علاوه بر این، عوامل ضد آب مبتنی بر سیلیکون نیز می‌توانند مقاومت حرارتی سطوح را بهبود بخشند و منجر به صرفه جویی در مصرف انرژی در ساختمان‌ها شوند. خواص مقاومت در برابر اشعه ماوراء بنفش آنها را برای سطوح در فضای باز مناسب می‌کند و آنها را از آسیب نور خورشید و تغییر رنگ محافظت می‌کند[۱۷].

ترکیبات بر پایه سیلیکون را می‌توان به عنوان امولسیون مایع فرموله شده به در ملات و بتن و یا به عنوان افزودنی‌های پودری به‌طور مستقیم به مخلوط خشک اضافه کرد [۱۸]. یون و لی [۱۹] ملات های سیمانی را با مخلوط کردن ۱٪ ، ۳٪ و ۵٪ ZWR (زئولیت + آغشته به سیلان-سیلوکسان) در پودر سیمان تهیه کردند. ZWR تولید شده ضد آب بودن عالی را نشان داد، همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است. نمونه‌های بتن تحت عمل‌آوری با ZWR همچنین در مقایسه با بتن اصلاح نشده، خواص دوام مناسب مانند نفوذ آب، کربناته شدن و مقاومت کلرید را نشان دادند.

شکل۴- زئولیت طبیعی آغشته به ضد آب[۱۹]

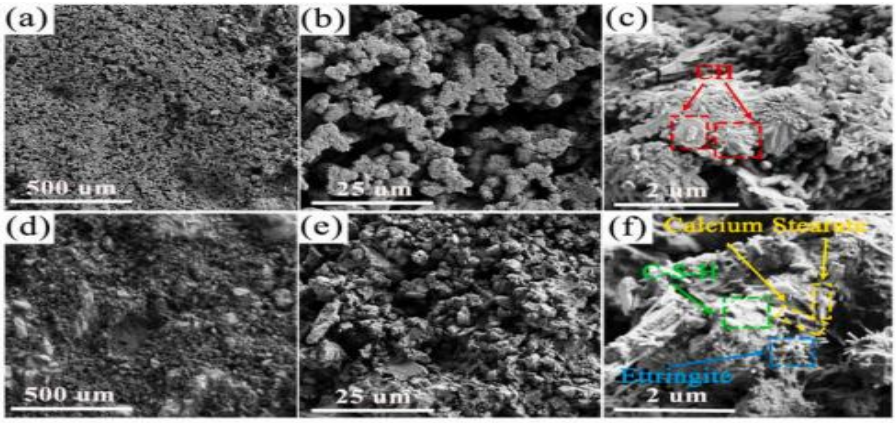
۲-۳-۲- اسیدهای چرب

اسیدهای چرب مایع رقیق یا رقیق نشده، از جمله اسیدهای کاپریلیک، اولئیک و کاپریک، می‌توانند به عنوان افزودنی‌های ضد آب در یک مخلوط بتن استفاده شوند. به‌طور خاص، اسید چرب جامد یعنی اسید استئاریک به‌طور گسترده‌ای به عنوان یک ترکیب ضد آب مورد استفاده قرار گرفته است و می‌تواند به‌طور مستقیم به بتن به شکل پودر اضافه شود. در شکل ۵ شماتیک فرآیند ساخت بتن فوق ضد آب نمایش داده شده است[۲۰].



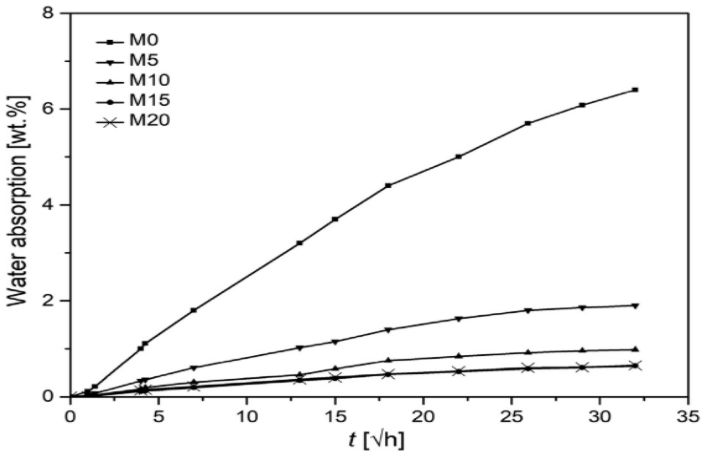
شکل۵- نمودار شماتیک فرآیند ساخت بتن فوق ضد آب [۲۰]

شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از بتن اصلاح شده با و بدون اسید استئاریک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندازه منافذ بتن اصلاح نشده بزرگتر از بتن اصلاح شده است. اسید استئاریک همچنین می‌تواند با پرکننده های بی اثر مانند سیلیس یا پودر تالک یا امولسیون در آب به انتشار در سراسر مخلوط کمک کند[۲۱]. علاوه بر این، می‌توان آن را نیز به عنوان یک عامل اصلاح کننده برای تولید شن و ماسه مبتنی بر زباله‌های ضد آب برای جایگزینی شن و ماسه طبیعی در ملات یا بتن استفاده کرد [۲۲].در مطالعه‌ای گزارش شده است که ۱/۵٪ اسید استئاریک مقدار بهینه برای اصلاح باطله سنگ آهن و ۳۰٪ پودر باطله‌ی سنگ آهن آبگریز برای دستیابی به حالت ضد آب به ملات اضافه شد. با این حال، اگرچه چنین عوامل دافع آب اقتصادی در نظر گرفته می‌شوند، اما اغلب تأثیر منفی بر خواص مکانیکی بتن دارند و کاربرد گسترده آن‌ها را در عمل محدود می‌کنند[۲۳].

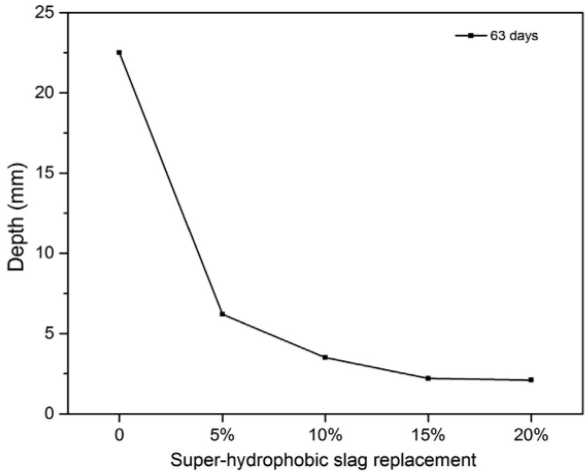


شکل۶- شکل سطح: (a-c) بتن اصلاح نشده؛ و (d-f) بتن اصلاح شده[۲۳]

افزودنی‌های آبگریز از پیش اصلاح شده را می‌توان با اسیدهای چرب نیز ساخت و برای بهبود خاصیت دافعه آب بتن استفاده کرد. خاکستر لجن کاغذ آبگریز (PSA) با آسیاب کردن اسید استئاریک به پودرهای آبگریز تبدیل شده اند. خاکستر لجن کاغذ (PSA) یک محصول جانبی از تولید کاغذ بازیافت شده است. اثر خاکستر لجن کاغذ آبگریز بر روی کارایی، مقاومت، جذب، جذب آب، انتشار، نفوذپذیری و هدایت الکتریکی گزارش شده است. مشخص شد که جایگزین کردن سیمان پرتلند با ۱۲٪، خاکستر لجن کاغذ آبگریز باعث کاهش جذب آب، جذب و هدایت به ترتیب ۸۴٪، ۸۶٪ و ۸۵٪ می‌شود و هیچ اثر مخربی بر هیدراسیون، مقاومت و چگالی ندارد[۲۴]. تحقیق مشابه‌ای با ترکیب پودر سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBS) نیز با اسید استئاریک در بتن با سنگدانه سبک به پودرهای آبگریز تبدیل شده اند. در این تحقیق نتایج نشان می‌دهد که ترکیب بهینه شامل اسید استئاریک آسیاب شده خشک به مدت ۳۰ دقیقه به مقدار ۱٪ وزنی سیمان، تولید یک سرباره کوره آهن‌گدازی فوق آبگریز است که زاویه تماس آب ۱۵۵/۷ را نشان می‌دهد. با افزودن سرباره کوره آهن‌گدازی فوق آبگریز، جذب آب موئینه و عمق نفوذ کلرید طولانی مدت در بتن با سنگدانه سبک تا حدود ۹۰٪ کاهش می یابد. نتایج حاصل از جذب آب موئینه و عمق نفوذ کلرید در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است[۲۵].



شکل۷- جذب آب موئینه بتن سبک[۲۵]



شکل۸- عمق نفوذ کلرید[۲۵]

بنابراین، کنترل کیفیت مواد افزودنی آبگریز در تولید انبوه می‌تواند چالش برانگیز باشد. در تحقیقات اخیر انجام شده توسط نویسندگان، پودرهای مختلف آبگریز (به عنوان مثال، سرباره کوره آهن گدازی، خاکستر بادی و شیشه) که با ۲٪ اسید استئاریک اصلاح شده بودند، تهیه شده و برای توسعه بتن آبگریز مورد استفاده قرار گرفتند[۷].

۲-۳-۳- استئارات‌های فلزی

استئارات‌ها، مانند استئارات کلسیم، استئارات آلومینیوم و استئارات روی، از اسیدهای چرب مشتق می‌شوند و به راحتی برای استفاده در بتن در دسترس هستند. آنها می‌توانند یک پوشش آبگریز را به منافذ موئینه ارائه دهند و در نتیجه انتقال آب در بتن را در شرایط غیر هیدرواستاتیک محدود کنند [۲۶]. با توجه به تحقیقات اخیر، استئارات کلسیم ممکن است یک ماده امیدوار کننده برای توسعه بتن ضد آب یکپارچه باشد[۷]. این ماده با آب و سیمان واکنش می‌دهد تا محصولی شبیه موم آبگریز تولید کند که پس از تبخیر آب سطوح منافذ را می‌پوشاند. علاوه بر این، استئارات کلسیم اغلب دارای اندازه ذرات از نانومتر تا چند میکرون است که همچنین می‌تواند منافذ ریز را در بتن آب بند کند [۲۶]. از تاثیرات مثبت استئارات کلسیم در سازه‌ها و کمک به حفظ دوام آن‌ها این است که منافذ را مسدود می‌کند و در نتیجه نرخ خوردگی فولاد را کاهش می‌دهد، اما اکثر استئارات‌ها مانند استئارات کلسیم تأثیر منفی بر کارایی و خواص مکانیکی بتن دارند. با این حال، این اثرات منفی را می توان با اضافه کردن سایر افزودنی ها، مانند فوق روان کننده‌ها و مواد سیمانی مکمل کاهش داد.

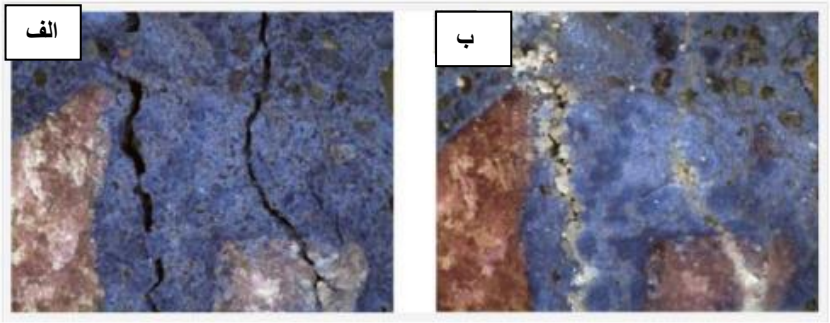
۲-۳-٤- چربی‌ها و روغن‌ها

چربی‌ها و روغن‌ها همچنین می‌توانند به عنوان افزودنی‌های آبگریز در بتن استفاده شوند. چربی‌های طبیعی و روغن‌های گیاهی در درجه اول از گلیسیریدها (به عنوان مثال استرهای گلیسرول و اسیدهای چرب) همراه با مقادیر جزئی از چربی‌های دیگر تشکیل شده است [۲۷]. گلیسرید (مانند سایر استرها) از نظر شیمیایی در محیط بسیار قلیایی بتن/ ملات ناپایدار است. این ماده با مصرف سه یون هیدروکسیل در فرآیند، به آنیون‌های گلیسرول و اسید چرب هیدرولیز می‌شود. گروه کربوکسیل -COO از آنیون اسید چرب به‌طور محکم با کلسیم مرتبط می‌شود. بدین ترتیب آنیون اسید چرب در داخل بتن/ ملات نگهداری می‌شود و دفع آب به دلیل بخش آبگریز مولکول شکل می‌گیرد. با این وجود، چربی‌ها و روغن‌ها اثرات مضری بر خواص مکانیکی بتن دارند و کاربرد گسترده آن‌ها را در عمل محدود می‌کنند [۲۸,۲۹].

۳-۳- افزودنی‌های کریستالی

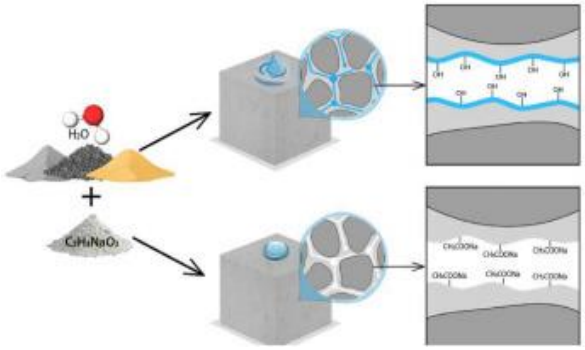
بسیاری از محصولات ضد آب تجاری بر اساس افزودنی‌های کریستالی هستند. در مطالعات دانشگاهی، سدیم استات معمولاً به عنوان یک ترکیب کریستالی استفاده می‌شود. سیستم‌های مبتنی بر کریستال به‌طور معمول به صورت پودر خشک وجود دارند و از نظر طبیعت آب‌دوست هستند، به این معنی که آب را جذب می‌کنند. بر خلاف همتایان آبگریز خود، سیستم‌های کریستالی از آب موجود برای رشد کریستال‌ها در داخل بتن استفاده می‌کنند و مسیرهای نفوذ رطوبت به داخل بتن را می‌بندند. بر خلاف مواد دافع آب، گزارش شده است که فناوری‌های کریستالی پس از ایجاد ترک، خود آب بندی را فعال می‌کنند، زیرا آب نفوذ می‌تواند رشد کریستال جدید را برای آب بند کردن ترک ایجاد کند [۳۰]. بنابراین، بتن با توانایی خود آب‌بندی دوباره به یک مانع آب تبدیل می‌شود، همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است. [۳۱]. هنگامی که رطوبت در بتن کم است، حفره ها را می توان به وضوح در بتن شکل ۹الف مشاهده کرد. پس از جذب آب، کریستال ها در حفره ها شروع به رشد می کنند، همانطور که در شکل ۹ب دیده می‌شود. پس از یک دوره خاص، حفره ها عمدتا توسط کریستال های تشکیل شده آب بند می شوند، همانطور که در شکل ۹پ نشان داده شده است. گزارش شده است که افزودنی‌های کریستالی می‌توانند ترک‌های بسیار باریک را با عرض تا ۰/۵۱ میلی متر آب بند کنند، که می‌تواند در شکل ۱۰ دیده شود[۳۲].

شکل۹- افزودنی ضد آب کریستالی در بتن: الف) حفره؛ ب) رشد کریستال در حفره؛ وپ) حفره‌های آب بند شده [۳۱].



شکل۱۰- خود ترمیمی ترک‌های انقباضی: الف) تشکیل ترک‌های انقباض؛ و ب) ترک‌های بهبود یافته توسط نانوکریستال‌ها [۳۲].

به عنوان یک ترکیب کریستالی معمولی، سدیم استات توصیه شده که عمر مفید بتن را افزایش می‌دهد و دوام آن را بدون تاثیر بر مقاومت آن بهبود بخشد [۳۳،۳۴]. شکل ۱۱ واکنش بین بتن و سدیم استات را برای تشکیل بتن ضد آب نشان می‌دهد. با این حال، با توجه به تحقیقات و نتایج گزارش شده توسط دیگر محققان، میزان جذب آب بتن با سدیم استات تا حد زیادی تحت تاثیر نسبت w/c آن است[۷،۳۵،۳۶]. از این رو، برای توسعه بتن ضد آب در عمل با استفاده از سدیم استات، باید آزمایشی برای انتخاب مقدار مناسب سدیم استات برای بتن با نسبت w/c خاص انجام شود. در غیر این صورت، سدیم استات حتی ممکن است جذب آب بتن را در صورتی که مقدار سدیم استات بهینه نباشد، افزایش منفی دهد. علاوه بر این، سدیم استات برای تشکیل کریستال‌ها زمان می‌برد. بنابراین، ممکن است برای بتن در سنین اولیه مؤثر نباشد



شکل۱۱- چسبندگی و واکنش بین بتن و سدیم استات [۳۴].

٤- عملکرد بتن ضد آب یکپارچه

اگرچه هدف اصلی از افزودن افزودنی‌های ضدآب در بتن، کاهش میزان جذب آب آن است، این افزودنی‌ها ممکن است بر خواص مختلف تازه، مکانیکی و دوام بتن نیز تأثیر بگذارند.

۴-۱- اثرات مواد افزودنی ضد آب بر خواص بتن تازه

کارایی یکی از خواص تازه اغلب مورد مطالعه بتن ضد آب یکپارچه است که برای قرارگیری و تراکم مناسب بتن تازه مهم است.

محققان زیادی گزارش کردند که کارایی بتن با اضافه کردن ترکیبات کریستالی افزایش پیدا کرده است. اضافه کردن درصد بالایی (۸٪) ترکیبات کریستالی در بتن، جداشدگی و ترک خوردگی حرارتی هیچ گاه اتفاق نیفتاده است. نتایج حاصل از آزمایش کارایی این محققان در جدول ۴ آورده شده است[۳۷].

جدول۴- مقادیر اسلامپ برای بتن اصلاح شده و کنترل[۳۷]

Mixture type	Slump (mm)	Comments
C40: 0% admixture	40	No cracks appeared
C40: 1% admixture	60	No cracks appeared
C40: 2% admixture	190	No cracks appeared
C40: 8% admixture	210	No cracks appeared

برای بتن معمولی با گنجاندن ۲٪ یا ۴٪ استات سدیم با وجود نسبت های نسبتا بالا (w/c)یعنی ۰/۴۶ و ۰/۵۳، گزارش شده است که زمانی که یک بهسازی کننده چند کریستاله (MCE) برای بتن آماده استفاده شود، کارایی بتن تازه تقریبا ۳۳٪ افزایش می‌یابد، [۳۸].

این امر به توانایی MCE در پراکندگی ذرات سیمان نسبت داده می‌شود. گنجاندن یک ترکیب ضد آب از پیش اصلاح شده ممکن است بسته به نوع و مقدار مواد افزودنی، کارایی بتن را افزایش یا کاهش دهد. به عنوان مثال، کارایی بتن با افزایش سرباره کوره آهن گدازی آبگریز افزایش یافت [۲۵]. با این حال، این امر برای بتن با خاکستر لجن کاغذ آبگریز (PSA) صادق نبود و کارایی بتن با افزایش مقدار PSA آبگریز به دلیل ماهیت متخلخل PSA کاهش می‌یابد[۲۴]. می‌توان نتیجه گرفت که کارایی بتن احتمالاً بسته به نوع و مقدار آن، به‌طور مثبت یا منفی تحت تأثیر افزودنی ضدآب انتخاب شده قرار می گیرد.

۴-۲- اثرات مواد افزودنی ضد آب بر خواص مکانیکی

۴-۲- ۱ مقاومت فشاری

از آنجایی که مقاومت فشاری بتن یکی از خواص مهم مکانیکی بتن محسوب می‌شود، اطلاع از این پارامتر نقش مهمی در کنترل کیفی بتن و اصلاح روش‌های تهیه و طرح مخلوط بتن دارد. تحقیقات گسترده محققان برای درک تاثیر مواد افزودنی مختلف بر خواص مقاومتی بتن انجام شده است. محققان بسیاری برای بررسی تاثیر موادافزودنی ضد آب انجام داده‌اند، زیرا اگر یک ماده افزودنی تاثیر مثبتی بر مقاومت فشاری بتن داشته و قابل توجیه فنی و اقتصادی باشد، بسیار مطلوب خواهد بود.

استفاده از مواد مبتنی بر سیلوکسان و سیلان به عنوان عامل آبگریز به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است، که نشان داد که گنجاندن این افزودنی‌ها بر مقاومت فشاری بتن اصلاح شده بدون در نظر گرفتن ضد آب بودن آنها تأثیر منفی می گذارد [۱۸,۶۶].

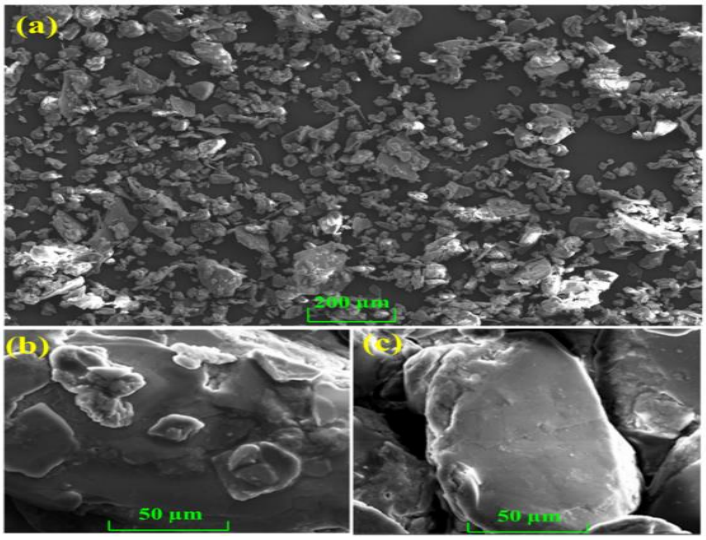
همچنین گزارش شده است که مقدار بالای استئارات کلسیم می‌تواند مقاومت فشاری را در سن بیشتر بهبود بخشد [۷]. مقاومت فشاری بتن در حضور ۳٪ استئارات کلسیم از ۲۲/۳ به ۳۷/۱ مگاپاسکال افزایش یافته است، زمانی که سن عمل‌آوری از ۲۸ به ۶۰ روز افزایش یافته است [۲۶].

افزودنی‌های ضد آب اغلب تأثیر منفی بر مقاومت فشاری بتن دارند و باعث کاهش مقاومت حدود ۱۰٪ یا بیشتر می‌شوند. این کاهش در سنین اولیه (تا ۲۸ روز) بیشتر قابل توجه است. استفاده ترکیبی از این مواد افزودنی با مواد دیگر، مانند متراکم‌کننده‌ها (به عنوان مثال، مواد سیمانی مکمل) ممکن است گزینه خوبی برای غلبه بر مسئله کاهش مقاومت باشد؛ از آنجا که مقاومت فشاری بتن اغلب به عنوان مهمترین عامل در تعیین کیفیت ساخت بتن در نظر گرفته می‌شود، آزمایش‌های آزمایشی در مخلوط بتن با یک ترکیب ضد آب جدید قبل از کاربردهای عملی آن توصیه می‌شود[۷].

۴-۲- ۲ مقاومت کششی

تحقیقات بسیار محدودی برای بررسی تأثیر مواد افزودنی ضدآب بر مقاومت کششی بتن انجام شده است. اضافه کردن استئارات کلسیم به کاهش رشد مقاومت کششی در سنین اولیه منجر شد اما در سنین بعدی تأثیر جزئی داشت [۴۰]. گزارش شده است که مقاومت کششی SCC با موم پارافین مایع در مقایسه با بتن مرجع ۴۰-۲۵٪ افزایش می‌یابد[۴۱]. درمطالعه دیگری، استفاده از یک ترکیب ضد آب به نام (YREC) مقاومت کششی بتن را ۳۰٪ بهبود بخشید. افزودن

YREC در درصد بهینه ۴٪ واکنش هیدراتاسیون سیمان را ارتقا داد و اثر پر شدن روی منافذ را نشان داد. ریزساختار ترکیب YREC با استفاده از SEM در شکل ۱۲ نشان داده شده است[۴۲].



شکل۱۲- (a) ساختار کلی؛ (b) ساختار چند لایه؛ (c)ساختار مسطح.

با توجه به تعداد زیاد افزودنی‌های ضدآب تجاری و غیرتجاری، تحقیقات بیشتری لازم است تا اثرات افزودنی‌های مختلف بر مقاومت کششی بتن کاملاً استخراج شود.

۴-۳ اثرات مواد افزودنی ضد آب بر دوام

هدف اصلی از استفاده از یکپارچه ضد آب افزودنی مواد افزودنی است برای افزایش دوام بتن. این بخش به بررسی اثرات یکپارچه افزودنی‌های ضدآب بر خواص مختلف دوام ملات و بتن میپردازد.

۴-۳-۱ جذب و نفوذپذیری آب

اثرات مخلوط‌های مختلف ضدآب یکپارچه بر جذب آب، نفوذپذیری بتن معمولی با سیمان به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. افزودن امولسیون سیلان به ملات و بتن به‌طور قابل توجهی نفوذ آب آن‌ها را کاهش می‌دهد و این اثر با افزایش مقدار امولسیون سیلان آشکارتر می‌شود[۴۳].

ژو و همکاران گزارش دادند که ترکیب ضد آب مبتنی بر سیلان جذب آب منافذ بتن بازیافتی را در مقایسه با بتن مرجع ۸۱٪ کاهش می‌دهد. با این حال، مقاومت فشاری بتن بازیافتی اصلاح شده بهطور قابل توجهی کاهش یافت. استئارات کلسیم باعث کاهش سرعت جذب آب و نفوذپذیری بتن معمولی می‌شود[۴۴].

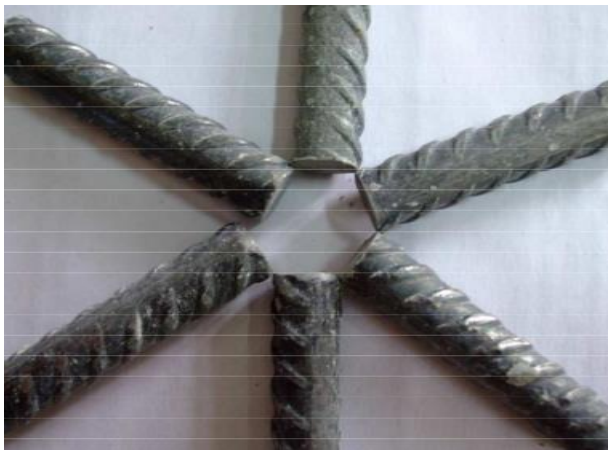
۴-۳- ۲ خوردگی میلگرد

بتن به دلیل خواص مکانیکی و دوام آن، پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی‌ای است که در اکثر کشورها در زیرساخت‌های عمرانی کاربرد دارد. با این حال، با توجه به خواص متخلخل و آب دوستی بتن، آب به راحتی می‌تواند به داخل بتن نفوذ کرده و یون‌های خورنده را به بتن انتقال دهد، که این امر سبب خوردگی میلگرد داخل بتن شده و منجر به کاهش شدید عمر سازه‌های بتن مسلح می‌شود. بنابراین، مهم است که بتن مقاوم در برابر خوردگی در ساخت سازه‌ها کاربرد پیدا کند.

یکی از راه‌حل‌های حل این معضل استفاده از بتن ضد آب می‌باشد. ضد آب بودن بتن می‌تواند به طور موثر منطقه تماس بین بتن و آب خورنده که حاوی یون کلر است را کاهش دهد. مطالعات محققان اثر مواد افزودنی ضد آب را بر خوردگی میلگرد در بتن را گزارش کرده‌اند. در تحقیقی به بررسی استئارات کلسیم بر روی مقاومت در برابر خوردگی بتن پرداخته شده است. در این تحقیق استئارات کلسیم با غلظت ۳٪ و ۵٪ استفاده شد. پس از ۶۰ روز مقاومت به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. بررسی پتروگرافی نشان می‌دهد که استئارات کلسیم منافذ را مسدود می‌کند و در نتیجه نرخ خوردگی فولاد را کاهش می‌دهد. بررسی نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های میلگرد حاوی استئارات کلسیم نسبت به نمونه کنترل صاف‌تر بوده است(شکل۱۳)[۲۶].

الف) میلگرد خورده شده در نمونه کنترل

ب) میلگرد مدفون شده در بتن با ۳٪ استئارات کلسیم



ج) میلگرد مدفون شده در بتن با ۵٪ استئارات کلسیم

شکل ۱۳ – وضعیت میلگردهای در شرایط خوردگی متفاوت

۴-۳- ۳ حمله سولفات

بتن به عنوان یکی از مصالح اصلی در مهندسی و ساخت و ساز، به دلیل مقاومت مناسب و سازگاری با محیط اطراف و همچنین دسترسی آسان به اجزای تشکیل‌دهنده‌اش، بیشترین کاربرد را دارد. با این حال، در سال‌های اخیر، حملات اسیدها

به یکی از عوامل عمده آسیب‌دیدگی بتن تبدیل شده است که منجر به هزینه‌های بالای تعمیر و تقویت سازه‌های بتنی می‌شود. مکانیزم حمله اسیدی به نوع و مقدار اسید بستگی دارد و با کاهش نفوذپذیری، می‌توان دوام و مقاومت بتن در برابر خوردگی را افزایش داد. خرابی ناشی از سولفات‌ها یکی از چالش‌های اساسی در بتن است که می‌تواند عمر مفید سازه‌های بتنی مسلح را تحت تأثیر قرار دهد و آن را به شرایط محیطی وابسته کند. از جمله روش‌های موثر برای محدود کردن آثار مخرب حملات سولفاتی، می‌توان به استفاده از مواد ضدآب در تولید بتن‌های ضدآب اشاره کرد.

مرادیان و همکاران در مطالعه‌ای با عنوان تأثیر افزودنی‌های پوزولانی مختلف بر مقاومت بتن در برابر اسید سولفوریک، از سه نوع پوزولان زئولیت، متاکائولن و میکروسیلیس به عنوان جایگزین درصدی از سیمان در ترکیب بتن استفاده کردند. نمونه‌های بتن در محلول اسید با pH=1 غوطه‌ور شدند. پس از ۱۲۰ روز غوطه‌وری، مشخص شد که تمامی نمونه‌های بتنی دچار شورزدگی شده‌اند که نشان‌دهنده وقوع حملات سولفاتی در بتن است. نمونه‌های حاوی زئولیت بیشترین مقدار سولفات سطحی را داشتند، در حالی که میزان سولفات در عمق نمونه‌های زئولیتی به حداقل رسیده بود[۴۶].

مطالعات صمیمی و همکاران نیز تحت عنوان تأثیر پومیس و زئولیت بر دوام بتن خودتراکم در برابر حملات اسیدی، کربناته شدن و محیط‌های دریایی نشان می‌دهد که بتن‌های خودتراکم حاوی زئولیت در مواجهه با حملات اسید سولفوریک رفتار پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند. این رفتار، ناشی از ترکیب دو عامل تخلخل و ترکیبات شیمیایی و معدنی ماتریس سیمانی است. بر اساس نتایج این تحقیق، نمونه‌های حاوی ۱۵٪ زئولیت در برابر حملات اسیدی عملکرد بسیار خوبی دارند، در حالی که مقاومت بتن‌های حاوی ۱۰٪ زئولیت تقریباً مشابه بتن شاهد است[۴۶].

۴-۳- ۴ واکنش سیلیسی-قلیایی

وجود ساختارهای آمورف واکنشی یا بلورهای ضعیف در برخی از سنگدانه‌های طبیعی و یون‌های هیدروکسید در سیمان پرتلند، منجر به ایجاد یک واکنش شیمیایی مخرب در بتن می‌شود که به عنوان واکنش قلیایی سنگدانه‌ها (AAR) شناخته می‌شود. این واکنش یکی از چالش‌های عمده در دوام و پایداری بتن است و خسارات قابل توجهی را به زیرساخت‌های عمرانی نظیر ساختمان‌ها، پیاده‌روها و پل‌ها وارد می‌کند.

AAR به دو نوع واکنش تقسیم می‌شود:

۱. واکنش قلیایی – سیلیسی (ASR) که ناشی از کانی‌های سیلیسی واکنش‌پذیر در سنگدانه‌ها است.

۲. واکنش قلیایی – کربناتی (ACR) که از ذرات سنگدانه حاوی کربنات یا دولومیت ناشی می‌شود.

ASR باعث تورم و انبساط مضاعف در بتن می‌شود که می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی و تخریب بتن گردد و به این دلیل به آن "سرطان بتن" نیز گفته می‌شود. خطر این نوع واکنش در محیط‌های مرطوب، به ویژه در سازه‌های هیدرولیکی نظیر اسکله‌ها، سدها و کانال‌های آب، بیشتر است و می‌تواند به نابودی زودرس بتن منجر شود.

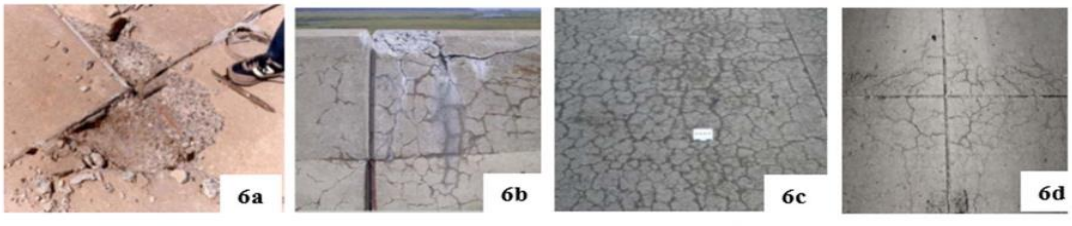
با توجه به درصد بالای سیلیس در اکثر سنگدانه‌ها، ASR به عنوان شایع‌ترین نوع AAR شناخته می‌شود که نخستین بار توسط توماس استانتون شناسایی شد. سه عامل اصلی که به طور عمده در ایجاد ASR در بتن نقش دارند عبارتند از:

۱. وجود اجزای سیلیسی فعال در سنگدانه‌ها (در هر دو بخش شن و ماسه)

۲. میزان قلیایی در مواد سیمانی

۳. حضور رطوبت و عواملی دیگر نظیر دما و مواد افزودنی.

اثرات ASR به طور فوری نمایان نمی‌شود، اما به مرور زمان پایدار است، چرا که واکنش بین سیلیس و قلیا در یک محیط مرطوب ادامه می‌یابد. این واکنش مضر به تدریج گسترش می‌یابد و می‌تواند منجر به خرابی‌های جدی و تخریب زیرساخت‌های عمرانی شود. در نهایت، ASR بر ویژگی‌های مهندسی بتن، از جمله مقاومت فشاری، کششی، خمشی و مدول الاستیسیته در طول زمان تأثیر منفی می‌گذارد و می‌تواند منجر به تغییر شکل، حرکت نسبی، تغییر شکل دائمی، ترک خوردن، تغییر رنگ و دیگر مشکلات شود.



شکل۱۴ - اثرات مختلف ASR بر زیر ساخت‌های عمرانی[۴۷]

وایز و همکاران یک عامل ضد آب مبتنی بر سیلان/سیلوکسان را با مقدار ۲٪ جایگزین وزن سیمان به بتن اضافه کردند. این امر منجر به کاهش قابل توجه ۲۴٪ در مقاومت فشاری در ۲۸ روز شد. با این حال، مشخص شد که بتن ضد آب کاهش قابل توجهی در رطوبت و نفوذ نمک نیز داشته‌است[۴۸]. بیشتر تحقیقات در رابطه با کاهش واکنش سیلیسی-قلیایی با متراکم کننده‌ها گزارش شده‌اند.

الچار و همکاران تأثیر پوزولان‌های طبیعی با فعالیت‌های پوزولانی متفاوت را بر انبساط ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی (ASR) در بتن‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که میزان هر پوزولان طبیعی لازم برای کنترل خطر ASR به طور مستقیم به واکنش‌پذیری آن وابسته است.

نایکیان و همکاران نیز به این نتیجه رسیدند که تأثیر زئولیت در کنترل انبساط ناشی از واکنش سیلیسی-قلیایی سنگدانه‌ها در بتن، با عملکرد خاکستر بادی قابل مقایسه است. به علاوه، عملکرد زئولیت با درصد جایگزینی یکسان از سرباره بهتر و از میکروسیلیس ضعیف‌تر است. آنها دریافتند که زمانی که ۳۰ درصد پودر زئولیت طبیعی به عنوان جایگزین سیمان استفاده می‌شود (با مقدار قلیایی برابر با ۱/۸۲ درصد)، واکنش ASR در بتن اتفاق نمی‌افتد، حتی اگر از سنگدانه‌های واکنش‌پذیر استفاده شود[۴۹].

در تحقیقی که توسط دیزیجیتا ناگروکین و همکاران درباره تأثیر زئولیت طبیعی بر خواص و مقاومت ملات در برابر واکنش سیلیسی-قلیایی انجام شد، این محققان به این نتیجه رسیدند که استفاده از ۱۵ درصد زئولیت طبیعی در ملات، مقاومت فشاری را به ۵۲/۵۶ مگاپاسکال پس از ۷ روز و به ۵۵/۵۹ مگاپاسکال پس از ۲۸ روز افزایش می‌دهد. بیشترین مقاومت فشاری با جایگزینی ۱۲/۵ درصد سیمان با زئولیت طبیعی به دست آمد، که نشان می‌دهد خواص مکانیکی و فیزیکی ملات با افزایش مقدار زئولیت طبیعی (۱۲/۵ درصد) بهبود می‌یابد. با این حال، انتخاب مناسب مقدار زئولیت ضروری است، زیرا اضافه‌کردن بیش از حد آن می‌تواند منجر به کاهش خواص ملات شود[۵۰].

۵. نتیجه‌گیری

بتن ضد آب به عنوان یک راه‌حل مؤثر برای مقابله با چالش‌های ناشی از نفوذ آب در سازه‌های بتنی، اثرات مثبت زیادی را به همراه دارد. این نوع بتن نه تنها عمر مفید سازه‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه‌های نگهداری را کاهش داده و به حفظ محیط زیست کمک می‌کند. با توجه به این مزایا، استفاده از بتن ضد آب در پروژه‌های ساختمانی به یک ضرورت تبدیل شده است و می‌تواند به عنوان یک گام مثبت در بهبود کیفیت ساخت و ساز و حفاظت از محیط زیست محسوب شود. این مقاله به بررسی مروری جامع از بتن ضد آب یکپارچه پرداخته است. ساز و کار و انواع مواد افزودنی ضد آب و محدودیت‌های این نوع بتن مورد بررسی قرار گرفت. سپس اثر این مواد افزودانی بر خواص بتن تازه، خواص مکانیکی و دوام بتن پرداخته شد. نتیجهگیری این تحقیق را به‌طور خلاصه در ذیل آورده شده است:

۱- افزودنی‌های ضدآب را میتوان تقریباً به سه گروه اصلی و کاربردی طبقه‌بندی کرد: متراکم کننده‌ها، ضد آب‌ها و افزودنی‌های کریستالی.
به دلیل کارایی محدود متراکم کننده‌ها و نیز کمبود برخی از منابع مواد پوزولانی در برخی کشورها استفاده از این نوع افزودنی کاربرد کمی در توسعه و تحقیقات بتن ضد آب داشته است. افزودنی‌های کریستالی در مخلوط بتن باعث مسدود شدن منافذ بتن می‌شود و از این رو برای سازه‌هایی مانند سدها و آبگیرها و مخازن آب مناسب هستند.

۲- محققان به طور پیوسته کاهش جذب آب بتن را تا از ۳۰٪ تا ۸۰٪ پس از استفاده از افزودنی‌های ضد آب گزارش کرده اند.
در رابطه خوردگی میلگرد نتایج قطعی از تاثیر مثبت وجود ندارد و در رابطه با استفاده از این مواد در کاهش خوردگی در بتن با ترک و بدون ترک نیازمند تحقیقات بیشتری در آینده می‌باشد.

۳- مواد ضد آب در مخلوط بتن، مقاومت بتن را کاهش می‌دهد، برای حل این مشکل می‌توان مقدار مناسبی مواد مکمل سیمان را به مخلوط بتن حاوی ترکیبات سیلان و سیلوکسان اضافه کرد.

ذکر این نکته ضروری است تحقیقات بیشتر و گسترده‌تری برای توسعه بتن ضد آب و اثربخشی و صرفه اقتصادی این نوع بتن در ساخت سازه‌ها مورد نیاز است تا صنعت ساخت و ساز به استفاده از این نوع بتن تمایل پیدا کند.

۶. مراجع

1. German Committee on Reinforced Concrete Guidelines for the Protection and Repair of Concrete Components, Part 3: Quality Assurance in Execution of the Works DAfStb, Berlin, Germany (1991)

2.Pfeiffer, D. W., & Scali, M. J. (1981). Concrete sealing for protection of bridge structures. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP 244). *Transportation Research Board, Washington DC*.

3. Wong, H. S., Barakat, R., Alhilali, A., Saleh, M., & Cheeseman, C. R. (2015). Hydrophobic concrete using waste paper sludge ash. *Cement and Concrete Research*, *70*, 9-20.

4. Tittarelli, F., & Moriconi, G. (2010). The effect of silane-based hydrophobic admixture on corrosion of galvanized reinforcing steel in concrete. *Corrosion Science*, *52*(9), 2958-2963.

5. Zhou, Q., & Xu, Q. (2009). Experimental study of waterproof membranes on concrete deck: Interface adhesion under influences of critical factors. *Materials & Design*, *30*(4), 1161-1168.

6. Dong, W., Li, W., Sun, Z., Ibrahim, I., & Sheng, D. (2022). Intrinsic graphene/cement-based sensors with piezoresistivity and superhydrophobicity capacities for smart concrete infrastructure. *Automation in Construction*, *133*, 103983.

7. Jahandari, S., Tao, Z., & Alim, M. A. (2021, September). Effects of different integral hydrophobic admixtures on the properties of concrete. In *Proceedings of the 30th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia, Perth, Australia* (pp. 5-8).

8. Mehdizadeh, B., Jahandari, S., Vessalas, K., Miraki, H., Rasekh, H., & Samali, B. (2021). Fresh, mechanical, and durability properties of self-compacting mortar incorporating alumina nanoparticles and rice husk ash. *Materials*, *14*(22), 6778.

9. Hossain, M. M., Karim, M. R., Hasan, M., Hossain, M. K., & Zain, M. F. M. (2016). Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review. *Construction and building materials*, *116*, 128-140.

[10. Oltulu, M., & Şahin, R. (2011). Single and combined effects of nano-SiO2, nano-Al2O3 and nano-Fe2O3 powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume. *Materials Science and Engineering: A*, *528*(22-23), 7012-7019.

11. Muhunthan, B., and Sariosseiri, F. (2008).“Interpretation of geotechnical properties of cement treated soils,” Research Report FHWA Contract DTFH61- 05-C-00008, Washington (State), Department of Transportation.

۱۲. سوری، ع، "مقدمه‌ای بر مواد مکمل سیمانی – بخش ۱، فصل‌نامه سرامیک ایران، دوره ۸، شماره ۴۶، ، ۱۳۹۵.

13. C. Gervais, S.K. Ouki, 2002. Performance study of cementitious systems containing zeolite and silica fume: effects of four metal nitrates on the setting time, strength and leaching characteristics, Journal of Hazardous Materials. B93:187-200.

14. Tao ,Ji. (2005). “ Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO_2 , ” Cement and Concrete Research: v35(Pages 1943-1947)

15. Yen Thi Tran, Jechan Lee, Pawan Kumar, Ki-Hyun Kim, Sang Soo Lee, 2018. Natural zeolite and its application in concrete composite production, Composites Part B, December .

16. Mailvaganam, N. P., Rixom, M. R., Manson, D. P., & Gonzales, C. (1999). *Chemical admixtures for concrete*. Crc Press.

17. A resin adhesive mortar preparation and phenol, 代丽珍, 常路生, 王勤, (2013). Materials Science.

18. Spaeth, V., Lecomte, J., & Delplancke-Ogletree, M. (2014). Integral water repellent based materials: Impact of aging on cement microstructure and performances. In *Proc., Hydrophobe 7th*

Int. Conf. on Water Repellent Treatment and Protective Surface Technology for Building Materials (pp. 57-66).

19. Yoon, C. B., & Lee, H. S. (2020). Experimental study on the evaluation of physical performance and durability of cement mortar mixed with water repellent impregnated natural zeolite. *Materials*, *13*(15), 3288.
20. Zhao, Y., Lei, L., Wang, Q., & Li, X. (2023). Study of superhydrophobic concrete with integral superhydrophobicity and anti-corrosion property. *Case Studies in Construction Materials*, *18*, e01899.

21. Justnes, H. (2008). Low water permeability through hydrophobicity. *COIN Project report*, *1*.

22. Song, Q., Wang, Q., Xu, S., Mao, J., Li, X., & Zhao, Y. (2022). Properties of water-repellent concrete mortar containing superhydrophobic oyster shell powder. *Construction and Building Materials*, *337*, 127423.

23. Wang, M., Wang, Q., Mao, J., Xu, S., & Shi, Z. (2022). Study on water-repellent and corrosion-resistant properties of cement mortar using superhydrophobic iron ore tailings. *Journal of Building Engineering*, *62*, 105360.

24. Wong, H. S., Barakat, R., Alhilali, A., Saleh, M., & Cheeseman, C. R. (2015). Hydrophobic concrete using waste paper sludge ash. *Cement and Concrete Research*, *70*, 9-20.

25. Qu, Z. Y., & Yu, Q. L. (2018). Synthesizing super-hydrophobic ground granulated blast furnace slag to enhance the transport property of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, *191*, 176-186.

26. Quraishi, M. A., Kumar, V., Abhilash, P. P., & Singh, B. N. (2011). Calcium stearate: A green corrosion inhibitor for steel in concrete environment. *J. Mater. Environ. Sci*, *2*(4), 365-372.

27. Phuah, E. T., Yap, J. W. L., Lau, C. W., Lee, Y. Y., & Tang, T. K. (2022). Vegetable oils and animal fats: sources, properties and recovery. *Recent Advances in Edible Fats and Oils Technology: Processing, Health Implications, Economic and Environmental Impact*, 1-26.

28. Luan, Y., & Asamoto, S. (2023). Experimental study on mortar with the addition of hydrophobic silicone oil for water absorption, strength, and shrinkage. *Construction and Building Materials*, *367*, 130323.

29. Justnes, H., Østnor, T. A., & Barnils Vila, N. (2004, October). Vegetable oils as water repellents for mortars. In *Proceedings of the 1st international conference of asian concrete federation, Chiang Mai* (pp. 28-29).

30. Teng, L. W., Huang, R., Chen, J., Cheng, A., & Hsu, H. M. (2014). A study of crystalline mechanism of penetration sealer materials. *Materials*, *7*(1), 399-412.

31. https://www.waterproofmag.com/2010/04/understanding-integral-waterproofing, Accessed 18th Jul 2022

32. Borle, S., & Ghadge, A. N. (2016). Comparative study of conventional and modern waterproofing techniques. *International Journal of Engineering Research*, *5*(1), 32-36.

33. Al-Kheetan, M. J., & Rahman, M. M. (2019). Integration of anhydrous sodium acetate (ASAc) into concrete pavement for protection against harmful impact of deicing salt. *JOM*, *71*(12), 4899-4909.

34. Al-Kheetan, M. J., Rahman, M. M., & Chamberlain, D. A. (2018). Development of hydrophobic concrete by adding dual-crystalline admixture at mixing stage. Structural Concrete, 19(5), 1504-1511.

35. Franzoni, E., Pigino, B., & Pistolesi, C. (2013). Ethyl silicate for surface protection of concrete: Performance in comparison with other inorganic surface treatments. *Cement and Concrete Composites*, *44*, 69-76.

36. Al-Kheetan, M. J., Rahman, M. M., & Chamberlain, D. A. (2020). Moisture evaluation of concrete pavement treated with hydrophobic surface impregnants. *International Journal of Pavement Engineering*, *21*(14), 1746-1754.

37. Development of hydrophobic concrete by adding dual-crystalline admixture at mixing stage.

38. Al-Rashed, R., & Al-Jabari, M. (2021). Multi-crystallization enhancer for concrete waterproofing by pore blocking. *Construction and Building Materials*, *272*, 121668.

39. Zhang, P., Wittmann, F. H., & Zhao, T. J. (2009). Capillary Suction of and Chloride Penetration into Integral Water Repellent Concrete/Kapillare Saugfähigkeit und Eindringen von Chloriden in integral hydrophobierten Beton. *Restoration of buildings and monuments*, *15*(3), 187-194.

40. Leong, K. S. (2019). *Mechanical Properties of 1200 Kg/m3 Lightweight Foamed Concrete Incorporate With Calcium Stearate* (Doctoral dissertation, UTAR).

41. Vijay, K., & Murmu, M. (2020). Experimental study on bacterial concrete using Bacillus subtilis micro-organism. In *Emerging Trends in Civil Engineering: Select Proceedings of ICETCE 2018* (pp. 245-252). Springer Singapore.

42. Zhang, B., Li, Q., Ma, R., Niu, X., Yang, L., Hu, Y., & Zhang, J. (2021). The influence of a novel hydrophobic agent on the internal defect and multi-scale pore structure of concrete. *Materials*, *14*(3), 609.

43. Zhang, Chaoyang, et al. "Water absorption behavior of hydrophobized concrete using silane emulsion as admixture." *Cement and Concrete Research* 154 (2022): 106738.

44. Zhu, Y. G., Kou, S. C., Poon, C. S., Dai, J. G., & Li, Q. Y. (2013). Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, *35*(1), 32-38.

۴۵. مرادیان،م ، اصلانیان، ز ، نوری، و، ۱۳۸۹" عملکرد بتن حاوی زئولیت و دوده سیلیس در معرض اسید سولفوریک" دومین کنفرانس بتن.

۴۶. صمیمی، ک، لیریایی، ج ، کمالی، س۱۳۹۷،" تاثیر پومیس و زئولیت بر دوام بتن خودتراکم در برابر حملات اسیدی،کربناته شدن و محیط های دریایی" ، اولین کنفرانس ملی دوام بتن.

47. Fanijo, E.O., Kolawole, J.T., & Almakrab, A. (2021). "Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures": Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States Case Studies in Construction Materials.

48. Weise, F., von Werder, J., Manninger, T., Maier, B., Fladt, M., Simon, S., ... & Meng, B. (2022). A multiscale and multimethod approach to assess and mitigate concrete damage due to alkali–silica reaction. *Advanced engineering materials*, *24*(6), 2101346.

49. G.K. Al-Chaar, M. Alkadi, P.G. Asteris, (2013). "Natural pozzolan as a partial substitute for cement in concrete", The Open Construction and Building Technology Journal, 7, 33-42.

50. Naiqian, F., Hongwei, J., & Enyi, C. (1998). "Study on the suppression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction". Magazine of Concrete Research, 50(1), 17-24.