

بررسی عملکرد خودترمیمی ذاتی در بتن‌های با مقاومت بالا

حامد بذرگر^۱، حمید رحمانی^{۲*}

^۱ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

(دریافت: ۹۵/۱/۲۸، پذیرش: ۹۹/۹/۲۹، نشر آنلاین: ۹۹/۹/۲۹)

چکیده

در تحقیق حاضر با اضافه کردن سیمان‌های درشت‌دانه با قطر بزرگ‌تر از ۷۵ میکرون به بتن به‌عنوان عامل خودترمیمی سعی به بهبود ترک‌ها شده است. در این فرایند به‌علت کاهش سطح مخصوص سیمان‌های درشت‌دانه و همچنین پایین بودن نسبت آب به سیمان، ذرات سیمان به‌طور کامل هیدراته نشده و قسمت داخلی ذرات سیمان به‌صورت کپسول سیمان هیدراته نشده باقی می‌ماند. با شکست و ایجاد ترک در بتن، کپسول‌های سیمانی حاوی سیمان‌های هیدراته نشده، شکسته شده و با آب عمل‌آوری واکنش نشان داده و به‌علت افزایش حجم حاصل از تولید محصولات هیدراتاسیون (Hydration) مجدد ذرات سیمانی، باعث بسته شدن و ترمیم ترک می‌شوند. در این تحقیق ابتدا به‌کمک آزمایش مقاومت کششی به‌روش دو نیمه شدن در نمونه‌های استوانه‌ای ترک ایجاد شده و پس از ثابت نگه‌داشتن عرض ترک با استفاده از بست‌های فلزی به‌میزان ۲۰۰ میکرون و عمل‌آوری مجدد، خودترمیمی در خصوصیات مکانیکی با تعیین مقاومت کششی ثانویه و خودترمیمی در خصوصیات نفوذپذیری با آزمایش نفوذ آب بررسی شد. نتایج نشان داد که اولاً در بتن‌های ساخته‌شده قابلیت خودترمیمی وجود دارد و ثانیاً تأثیر سیمان درشت‌دانه در این عملکرد به‌مراتب بیشتر از تأثیر نسبت آب به سیمان می‌باشد. همچنین با استفاده از سیمان درشت‌دانه به‌عنوان عامل بهبودی، نمونه‌ها ۱۲ تا ۲۹ درصد بهبودی در مشخصات مکانیکی و ۴۱ تا ۱۰۰ درصد بهبودی در نفوذپذیری بتن ترک‌خورده از خود نشان دادند.

کلیدواژه‌ها: خودترمیمی ذاتی، بتن با مقاومت بالا، عرض ترک، سیمان درشت‌دانه، هیدراتاسیون مجدد.

۱- مقدمه

دوام سازه‌های بتنی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری این سازه‌ها را کاهش دهند. تجربه نشان داده است که بالا بردن کیفیت مصالح مصرفی باعث به تعویق افتادن تعمیر و در نتیجه کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌گردد. حالت ایده‌آل این است که هیچ هزینه‌ای برای تعمیر و نگهداری در نظر گرفته نشود. به‌عبارت‌دیگر مصالح توانایی تعمیر خود را داشته باشند و عمر سازه بدون هیچ هزینه‌ای افزایش یابد. افزایش عمر بهره‌برداری سازه‌های بتنی نیاز به سازه‌های جدید را کاهش می‌دهد و این موضوع باعث کاهش مصرف مواد خام اولیه شده و در نتیجه باعث کاهش آلودگی، مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ می‌شود (Kan و همکاران، ۲۰۱۰).

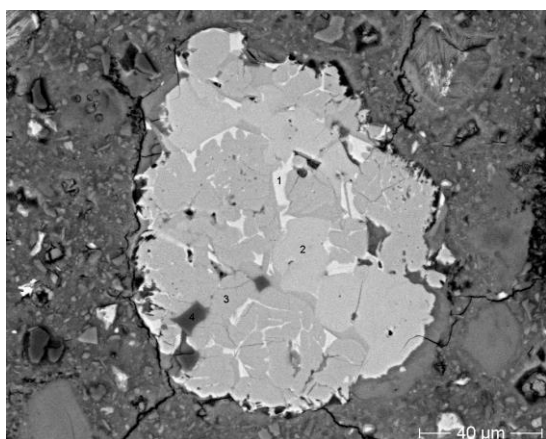
پدیده خودترمیمی در بتن سال‌هاست که شناخته شده است. در سال ۱۸۳۶ میلادی توانایی بتن برای ترمیم ترک‌های کوچک در حضور رطوبت توسط آکادمی علوم فرانسه مشاهده شد (Hearn و Morley، ۱۹۹۷). همچنین مشاهده شده است که برخی ترک‌ها

به‌دلیل ضعف کششی بتن، اعضاء بتنی را با فولاد مسلح می‌کنند. با ترک خوردن بتن، فولادها تنش‌های کششی را تحمل نموده و مانع از عریض‌تر شدن ترک‌ها می‌گردند. ترک‌ها و مخصوصاً ترک‌های عریض ممکن است باعث کاهش ظرفیت بتن جهت حفاظت از فولادهای تقویتی در مقابل خوردگی شوند. خوردگی آرماتور یکی از عوامل تخریب و شکست زودرس سازه‌های بتنی می‌باشد. علاوه بر این، ریزترک‌های ناشی از خزش و جمع‌شدگی نیز که تقریباً یکی از خصوصیات اجتناب‌ناپذیر بتن می‌باشند، در خمیر سیمان ایجاد می‌شوند. اگر این ریزترک‌ها یک شبکه پیوسته از ترک را تشکیل دهند نفوذپذیری به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و مقاومت بتن در برابر عامل‌های مهاجم کاهش می‌یابد. لذا حضور ترک‌ها می‌تواند دوام سازه‌های بتنی را کاهش دهد. در نتیجه محققان به فکر ساخت بتن با خصوصیات خودترمیمی افتادند تا با استفاده از این ویژگی علاوه بر افزایش

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۴-۳۳۰۵۴۰۵۷

کارخانه‌های تولید سیمان، به‌خوبی کلینکر^۱ سیمان را آسیاب نکرده و این امر موجب تولید سیمان با مقادیر زیاد درشت‌دانه می‌شود و درشت‌دانه بودن سیمان باعث کاهش درجه هیدراتاسیون در بتن می‌شود (Rahmani و Ramazanianpour، ۲۰۰۸).

در شکل (۱) تصویر دانه سیمان هیدراته نشده سیمان تیپ ۲ تهران در ملات نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود قطر دانه سیمان در حدود ۱۲۰ میکرون می‌باشد. در تحقیق حاضر نیز ۱۹ درصد سیمان مصرفی بزرگ‌تر از ۷۵ میکرون اندازه‌گیری گردید. این در صورتی است که برای هیدراتاسیون کامل توصیه شده است که قطر دانه‌های سیمان کم‌تر از ۴۵ میکرون باشد (Monteiro و Mehta، ۲۰۰۵). همچنین نسبت آب به سیمان نیز بر درجه هیدراتاسیون تأثیرگذار می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود که در صورت پایین بودن نسبت آب به سیمان درصدی از سیمان مصرفی به‌صورت هیدراته نشده در سیستم باقی بماند.



شکل ۱- دانه سیمان هیدراته نشده در ملات

این سیمان هیدراته نشده توانایی هیدراتاسیون مجدد را در بتن سخت‌شده دارا می‌باشد. در صورت ایجاد ترک در بتن سخت شده به هر دلیل و در صورت رسیدن رطوبت جهت انجام واکنش هیدراتاسیون به ذرات خشک سیمان موجود در بتن سخت شده، واکنش‌های سیمان با آب شروع شده و با توجه به این موضوع که حجم ذرات سیمان پس از هیدراتاسیون تا دو برابر افزایش می‌یابد ذرات هیدراته شده جدید با افزایش حجم، ترک‌های ایجادشده را پر کرده و پروسه خودترمیمی ذاتی صورت می‌گیرد. بدین منظور در تحقیق حاضر با استفاده از الک شماره ۲۰۰، سیمان به دو قسمت ریزدانه و درشت‌دانه تقسیم‌بندی شده و سیمان درشت‌دانه با نسبت‌های مختلف به نمونه‌ها اضافه شده است. همچنین نسبت آب به سیمان نیز در مقادیر نسبتاً پایین متغیر در نظر گرفته شده

در سازه‌های بتنی قدیمی با مواد بلورین سفید رنگی پوشانده شده- اند که اشاره به قابلیت ذاتی بتن در ترمیم ترک‌ها دارد (Kan و همکاران، ۲۰۱۰). به‌طورکلی خودترمیمی به توانایی یک ترک برای کاهش عرض خود در طول زمان اشاره دارد (Kenneth و Floyd، ۱۹۵۶). بررسی سیستماتیک پدیده خودترمیمی، به سال ۱۹۲۶ توسط Glanville برمی‌گردد (Glanville، ۱۹۳۱). وی مطالعات خود را بروی پل‌های شهر آمستردام در کشور هلند انجام داد. خودترمیمی ذاتی مصالح سیمانی در اواخر قرن نوزدهم موردبررسی قرار گرفت (Hyde و Smith، ۱۸۸۹؛ Hearn، ۱۹۹۸). بر اساس تحقیق صورت گرفته، Glanville به این موضوع اشاره دارد که خودترمیمی از طریق ادامه هیدراتاسیون اجزای سیمانی هیدراته نشده ایجاد می‌شود. هرچند وی بعداً فهمید که این مورد تنها برای بتن خیلی تازه کاربرد داد و به‌احتمال زیاد تشکیل کربنات کلسیم دلیل خودترمیمی در دوره‌های بعدی می‌باشد (Neville، ۲۰۰۲). در سال‌های اخیر نیز پژوهشگران تحقیقات زیادی را در این زمینه انجام داده‌اند. تحقیقات اخیر نه‌تنها بروی قابلیت کاهش نفوذپذیری در بتن‌های ترک‌خورده به‌دلیل پدیده خودترمیمی تمرکز کرده‌اند، بلکه بر روی به‌دست آوردن استحکام مکانیکی مجدد بتن نیز تحقیقاتی صورت گرفته است (Rahmani و Bazrgar، ۲۰۱۵).

اگر خواص ترمیمی یک ماده برای آن ماده عمومی و کلی باشد، آن ماده پتانسیل قرار گرفتن در دسته مواد هوشمند را دارد و فرایند ترمیم آن، خودترمیمی نامیده می‌شود. خودترمیمی ذاتی بر این موضوع اشاره دارد که ترمیم بدون کمک عوامل خارجی امکان‌پذیر باشد. مواد سیمانی این قابلیت ذاتی را برای ترمیم دارا می‌باشند، چراکه با مرطوب شدن یک نمونه سیمانی در آب می‌تواند هیدراتاسیون مجدداً شروع شده و واکنش‌ها ادامه یابد. بدیهی است این امر زمانی اتفاق خواهد افتاد که در ماتریس خمیر سیمان، سیمان هیدراته نشده وجود داشته باشد (Ghosh، ۲۰۰۹). عوامل مختلفی از جمله عرض ترک، فشار آب، pH آب، دما، سختی آب، غلظت یون کلرید موجود در آب و ترکیبات تشکیل‌دهنده بتن بر خودترمیمی ذاتی تأثیرگذارند که در تحقیقات پیشین موردبررسی قرار گرفته است (Edvardsen، ۱۹۹۹؛ Reinhardt و Jooss، ۲۰۰۳). مکانیسم‌های خودترمیمی ذاتی بتن به شرح زیر گزارش شده است:

- ۱- هیدراتاسیون مجدد ذرات هیدراته نشده سیمان در بتن سخت‌شده
- ۲- ته‌نشینی کربنات کلسیم
- ۳- مسدود شدن منافذ به‌وسیله ناخالصی‌های موجود در آب و یا سایر ذرات (Hua، ۲۰۱۰؛ Ramm و Biscoping، ۱۹۹۸).

کامل ظرف آب اضافه شد و حجم آب اضافه شده نیز اندازه گیری شد که نشان دهنده میزان تخلخل ترکیب تحت بررسی سنگدانه ها می باشد. لازم به ذکر است که اضافه کردن آب به مخلوط سنگدانه و توزین ظرف حاوی آب و سنگدانه باید سریع انجام شود تا سنگدانه فرصت جذب آب را نداشته باشد. نتایج این آزمایش در جدول (۲) نشان داده شده است.

با توجه به این نتایج، منحنی Funk و Dinger بیشترین تراکم و کمترین فضای خالی را دارد که احتمالاً نشان دهنده انطباق خوب این منحنی با سنگدانه های مصرفی می باشد. اما استفاده از این منحنی باعث می شود که ۵۸٪ کل سنگدانه ها را ماسه شسته تشکیل دهد که این موضوع می تواند باعث کاهش مقاومت بتن به علت افزایش سطح مخصوص سنگدانه ها شود. بنابراین به علت اختلاف کم نتایج با منحنی دانه بندی ایده آل Fuller اصلاح شده از این منحنی برای ترکیب سنگدانه ها استفاده گردید. گفتنی است در مقدار سیمان ثابت با افزایش سطح مخصوص سنگدانه ها مقدار سیمان بین سنگدانه ها کم تر شده و این امر با ایجاد یک پیوند ضعیف بین سنگدانه ها باعث کاهش مقاومت بتن می شود. در منحنی دانه بندی Fuller اصلاحی که به صورت رابطه (۲) قابل بیان می باشد، بر اساس تحقیقات انجام شده ضریب توزیع n برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است (Peronius و Sweeting، ۱۹۸۵ و Funk و Dinger، ۱۹۹۴). در این رابطه، Y_i درصد عبوری از الک با قطر D_i ، D_{min} و D_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر بعد سنگدانه ها، و n ضریب دانه بندی (یا ضریب توزیع) می باشد.

$$Y_i = 100 \times \left[\frac{D_i - D_{min}}{(D_{max} - D_{min})} \right]^n \quad (2)$$

برای استفاده از منحنی های دانه بندی ایده آل بایستی اندازه بزرگترین و کوچکترین بعد سنگدانه موجود باشد. بر اساس شکل (۲) که منحنی دانه بندی سه نوع سنگدانه بر اساس آزمایش دانه بندی نشان داده شده است، بزرگترین و کوچکترین بعد سنگدانه ها به ترتیب برابر ۲۵ میلی متر و ۷۵ میکرون می باشد. درصدهای اختلاط سنگدانه های موجود به نحوی انتخاب شد که منحنی دانه بندی حاصله از آن ترکیب، تا جای ممکن به منحنی دانه بندی های ایده آل نزدیک باشد.

است. پس از ساخت نمونه ها خصوصیات مکانیکی بتن با آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و جذب آب و پدیده خودترمیمی بتن با استفاده از آزمایش های تعیین مقاومت کششی مجدد، آزمایش نفوذ آب و مشاهدات عینی و میکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- دانه بندی سنگدانه

جهت ساخت بتن از ۳ نوع سنگدانه شکسته شامل دو نوع شن و یک نوع ماسه استفاده شده است. مشخصات سنگدانه های مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات سنگدانه های مورد استفاده در این تحقیق

نوع مصالح	شن بادی	شن نخودی	ماسه شسته
وزن مخصوص (kg/m^3)	۲/۶۱	۲/۵۸	۲/۶۵
درصد جذب آب	۱/۱	۱/۶	۲/۹

برای دستیابی به بیشترین تراکم و کمترین تخلخل باید درصد ترکیب بهینه این سه نوع سنگدانه مشخص شود. در این تحقیق سه منحنی دانه بندی ایده آل شامل منحنی دانه بندی ایده آل Fuller-Thompson (Fuller و Thompson، ۱۹۰۷)، Dinger و Funk (Dinger و Funk، ۱۹۸۹) اصلاح شده و این سه منحنی به عنوان منحنی دانه بندی مورد استفاده قرار گرفت. این سه منحنی بر اساس این سه منحنی و با استفاده از روش بهینه یابی که در ادامه بیان می شود، میزان مصرف هر سنگدانه محاسبه شد. سپس با درصدهای محاسبه شده برای هر یک از منحنی های دانه بندی ایده آل، ترکیبی از سه نوع سنگدانه طبق استاندارد ASTM C29M-90 در یک ظرف با حجم مشخص در سه لایه ریخته شده و هر لایه با ۲۵ ضربه توسط یک میله به طور یکنواخت کوبیده و متراکم گردید. در نهایت وزن مخصوص توده ای متراکم شده هر ترکیب طبق رابطه (۱) محاسبه شد:

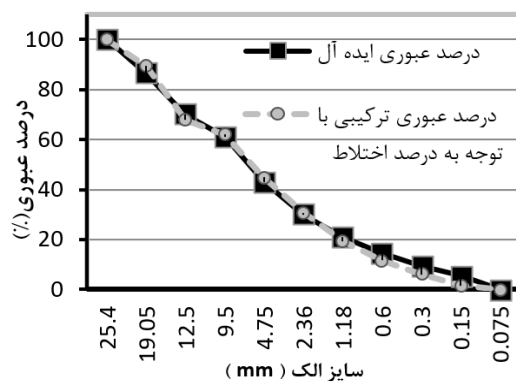
$$M = \frac{(G - T)V}{V} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، T وزن ظرف، G وزن ظرف و سنگدانه و V حجم ظرف می باشد. سپس به هر ترکیب از سنگدانه ها تا پر شدن

جدول ۲- وزن مخصوص توده ای متراکم شده و فضای خالی برای ترکیب های مختلف سنگدانه ها

شماره مخلوط	منحنی دانه بندی ایده آل	درصد شن بادی	درصد شن نخودی	درصد ماسه شسته	وزن مخصوص توده ای (kg/m^3)	حجم ظرف (cm^3)	حجم فضای خالی (cm^3)	درصد فضای خالی (%)
A1	Fuller-Thompson	۳۲	۱۴	۵۴	۲/۰۱۴	۵۷۳۷	۱۲۰۰	۲۰/۹
A2	Fuller اصلاحی	۳۲	۱۶	۵۲	۲/۰۷۹	۵۷۳۷	۱۱۶۲	۲۰/۳
A3	Funk-Dinger	۲۸	۱۵	۵۸	۲/۰۸۸	۵۷۳۷	۱۱۲۳	۱۹/۶

سیمان پرتلند تیپ یک استفاده شده و اسلامپ بتن‌ها 90 ± 10 میلی-متر می‌باشد. در این تحقیق ۲۰۰ کیلوگرم سیمان از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شده و به‌طور تصادفی ۱۰ بار میزان سیمان مانده روی الک ۲۰۰ اندازه‌گیری شد که میانگین درصد سیمان مانده روی الک شماره ۲۰۰، ۱۹ درصد به‌دست آمد. این سیمان درشت‌دانه به میزان ۰، ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب در طرح اختلاطها مورد استفاده قرار گرفت. گفتنی است مجموع سیمان درشت‌دانه (مانده روی الک شماره ۲۰۰) و ریزدانه (عبوری از الک نمره ۲۰۰) در کلیه طرح اختلاطها ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. جزئیات بیشتر ترکیب سیمان ریزدانه و درشت‌دانه و همچنین نتایج آزمایش بلین^۲ برای ۴ نوع ترکیب سیمان ریزدانه و درشت‌دانه در جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی ترکیبی در مقایسه با منحنی ایده‌آل

جدول ۳- نتایج آزمایش بلین با چهار ترکیب سیمان مورد استفاده

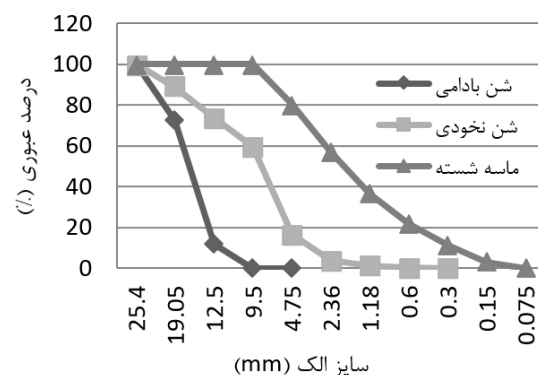
نام ترکیب	میزان سیمان معمولی ($\frac{Kg}{m^3}$)	میزان سیمان درشت‌دانه (روی الک ۲۰۰) ($\frac{Kg}{m^3}$)	بلین ($\frac{m^2}{Kg}$)
C1	۴۰۰	-	۳۲۱
C2	۳۲۵	۷۵	۲۸۹
C2	۲۵۰	۱۵۰	۲۷۱
C4	۱۷۵	۲۲۵	۲۶۵

۸ طرح اختلاط جهت انجام آزمایش‌ها پیش‌بینی گردید که جزئیات این طرح اختلاطها در جدول (۴) ارائه شده است (Rahmani و Bazrgar، ۲۰۱۵). جهت ساخت این مخلوط‌ها پس از ریختن کلیه مصالح بتن در مخلوط‌کن، به مدت دو دقیقه عمل اختلاط صورت گرفت. سپس بتن در قالب‌ها ریخته و متراکم گردید. بعد از ۲۴ ساعت عمل‌آوری مطلوب قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها جهت عمل‌آوری در حوضچه آب قرار داده شدند.

جهت محاسبه اختلاف بین نمودارهای منحنی ترکیب سه نوع سنگ‌دانه و منحنی‌های ایده‌آل از تابع خطای (۳) استفاده شده است. درصدهای اختلاط سنگ‌دانه‌های موجود به‌نحوی انتخاب شد که منحنی دانه‌بندی حاصله از آن ترکیب، تا جای ممکن به منحنی دانه‌بندی‌های ایده‌آل نزدیک باشد. جهت محاسبه اختلاف بین نمودارهای منحنی ترکیب سه نوع سنگ‌دانه و منحنی‌های ایده‌آل از تابع خطای (۳) استفاده شده است.

$$F = \sum_{i=1}^n (I_i - [X \times A_i + Y \times B_i + Z \times C_i])^2 \quad (3)$$

$i = 1 \text{ تا } 11$



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده

در رابطه (۳)، I_i درصد عبوری ایده‌آل برای هر الک، A_i درصد عبوری شن بادامی، B_i درصد عبوری شن نخودی، C_i درصد عبوری ماسه شسته، X ، Y و Z نیز به‌ترتیب درصد اختلاط پیشنهادی برای شن بادامی، شن نخودی و ماسه شسته می‌باشد. i نیز تعداد الک‌های استاندارد (الک ۱ اینچ تا الک نمره ۲۰۰) می‌باشد. بدیهی است که مجموع درصدهای اختلاط سه نوع سنگ‌دانه در هر مرحله باید برابر ۱ شود. پس از بهینه‌یابی، درصدهای اختلاط شن بادامی، شن نخودی، ماسه شسته برای هر سه منحنی ایده‌آل در جدول (۲) نشان داده شده است. در شکل (۳) منحنی دانه‌بندی ایده‌آل Fuller با ضریب توزیع ۰/۵ در کنار منحنی دانه‌بندی به‌دست‌آمده از بهینه‌یابی نشان داده شده است که نشان‌دهنده تطابق مناسبی بین منحنی دانه‌بندی ایده‌آل و منحنی دانه‌بندی ایجادشده می‌باشد.

۲-۲- طرح اختلاط‌های موردنظر

در تحقیق حاضر چهار طرح اختلاط با دو نسبت آب به سیمان ۰/۲۸ و ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. در تمام طرح اختلاطها از

جدول ۴- جزئیات طرح اختلاط ۸ مخلوط بتنی ساخته شده

طرح اختلاط	میزان سنگدانه (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان	میزان کل سیمان (kg/m ³)	میزان سیمان درشتدانه (kg/m ³)	میزان سیمان ریزدانه (kg/m ³)	درصد وزنی فوق روان کننده به سیمان
M1	۱۹۸۵	۰/۲۸	۴۰۰	-	۴۰۰	۰/۳۳
M2	۱۹۸۵	۰/۲۸	۴۰۰	۷۵	۳۲۵	۰/۳۳
M3	۱۹۸۵	۰/۲۸	۴۰۰	۱۵۰	۲۵۰	۰/۳۳
M4	۱۹۸۵	۰/۲۸	۴۰۰	۲۲۵	۱۷۵	۰/۳۵
M5	۱۹۶۸	۰/۳۳	۴۰۰	-	۴۰۰	۰/۲۹
M6	۱۹۶۸	۰/۳۳	۴۰۰	۷۵	۳۲۵	۰/۲۹
M7	۱۹۶۸	۰/۳۳	۴۰۰	۱۵۰	۲۵۰	۰/۲۹
M8	۱۹۶۸	۰/۳۳	۴۰۰	۲۲۵	۱۷۵	۰/۲۹

۲-۳- آزمایش های در نظر گرفته شده

در این تحقیق جهت بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب بر روی نمونه های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر انجام شد. همچنین جهت بررسی پدیده خودترمیمی پس از ایجاد ترک در نمونه ها و عمل آوری مجدد، آزمایش مقاومت کششی ثانویه و نفوذ آب انجام گردید. آزمایش مقاومت کششی ثانویه جهت بهبودی خصوصیات مکانیکی و آزمایش نفوذ آب جهت بهبودی نفوذپذیری موردبررسی قرار گرفت. دو نمونه برای انجام آزمایش های مذکور در نظر گرفته شده و میانگین نتایج گزارش شده است. جزئیات آزمایش های انجام شده به شرح زیر می باشد.

الف) مقاومت فشاری: این آزمایش بروی نمونه های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر با سرعت بارگذاری ۳۰۰±۵/۷ کیلوگرم بر ثانیه در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه جهت بررسی تأثیر سیمان درشت دانه بر مقاومت فشاری بتن انجام شده است.

ب) مقاومت کششی: این آزمایش بروی نمونه های استوانه ای ۱۵×۳۰ سانتی متر به روش برزلی با سرعت بارگذاری ۲۱۰±۵ کیلوگرم بر ثانیه در سنین ۷ و ۲۸ روزه جهت تعیین میزان تأثیر سیمان درشتدانه و نسبت آب به سیمان بر مقاومت کششی بتن انجام شده و تنش گسیختگی از رابطه (۴) محاسبه شده است.

$$T = \frac{2P}{\pi LD} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، T تنش گسیختگی کششی، P بار گسیختگی نمونه، L طول و D قطر نمونه می باشد.

ج) آزمایش جذب آب: این آزمایش بر روی نمونه های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متری در سن ۲۸ روزه انجام شد. در این آزمایش در سن موردنظر نمونه ها در دمای ۵۵±۵ درجه سانتی گراد در آون

قرار گرفته و پس از ثابت شدن وزن از آون خارج شده و توزین گردید. سپس نمونه ها به مدت ۰/۵ و ۲۴ ساعت در آب قرار داده شده و مجدداً در حالت اشباع با سطح خشک توزین شد. در نهایت از رابطه (۵) میزان جذب آب محاسبه گردید.

$$A = \frac{B - C}{C} \times 100 \quad (5)$$

در این رابطه، A درصد جذب آب، B وزن نمونه پس از ۰/۵ و ۲۴ ساعت قرارگیری در آب و C وزن نمونه کاملاً خشک می باشد. د) آزمایش مقاومت کششی ثانویه: در این آزمایش ابتدا با استفاده از آزمایش تعیین مقاومت کششی برزلی تشریح شده در بند (ب) در نمونه های استوانه ای ۲۸ روزه ۱۵×۳۰ سانتی متر ترک طولی مطابق شکل (۴) ایجاد گردید. سپس جهت محدود کردن عرض ترک ها به ۱۰±۲۰۰ میکرون، نمونه ها با دو بست فلزی مطابق شکل (۴-الف) بسته شد. جهت اندازه گیری عرض ترک ها از کولیس دیجیتال^۳ با دقت ۱۰ میکرون استفاده شد. استفاده از دو بست فلزی جهت اطمینان از ثابت ماندن عرض ترک در طول نمونه استوانه ای در نظر گرفته شد.

سپس نمونه ها مجدداً در حوضچه های عمل آوری قرار داده شده و پس از ۲۸ و ۵۶ روز، پس از باز نمودن بست های فولادی، تحت آزمایش مجدد مقاومت کششی قرار گرفتند. بدیهی است در این آزمایش نحوه قرار دادن نمونه در دستگاه آزمایش به نحوی در نظر گرفته شد که شکست نمونه از محل ترک ترمیم یافته رخ دهد. سپس نسبت مقاومت کششی ثانویه به مقاومت کششی ۲۸ روزه اولیه محاسبه و میزان بهبود مکانیکی نمونه ها موردبررسی قرار گرفت.

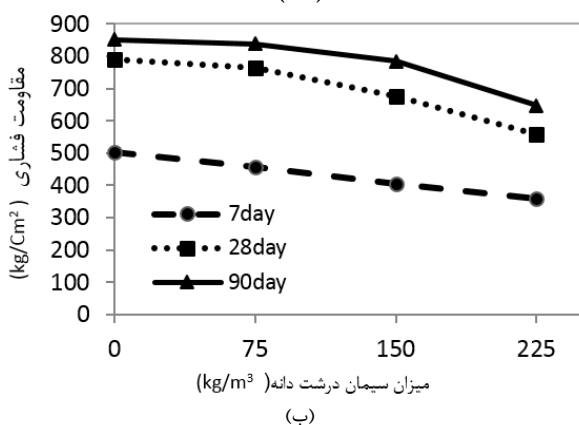
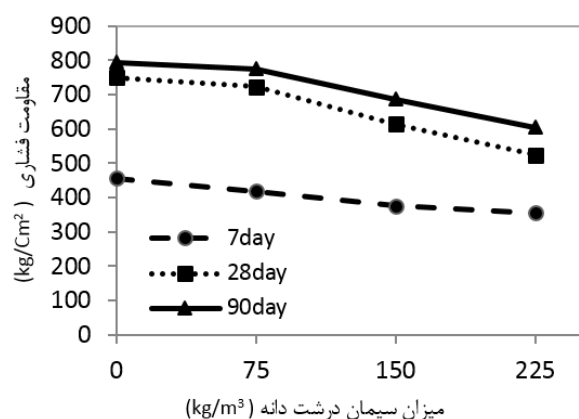
مدت زمان این آزمایش تا یکنواخت شدن جریان آب عبوری از میان نمونه ادامه یافت. به عبارت دیگر زمانی این آزمایش به پایان می-رسید که نرخ عبور آب از میان ترک‌ها ثابت شود. جهت این کار زمان عبور اولین قطره آب و سپس زمان و میزان آب عبوری در هر یک ساعت یادداشت شده و نرخ عبور آب محاسبه می‌گردید. جهت اطمینان از صحت آزمایش حداقل زمان آزمایش ۸ ساعت از زمان عبور اولین قطره آب در نظر گرفته شد که جریان یکنواخت در کلیه مخلوط‌ها در کم‌تر از این زمان ایجاد گردید.

۳- بحث و بررسی نتایج

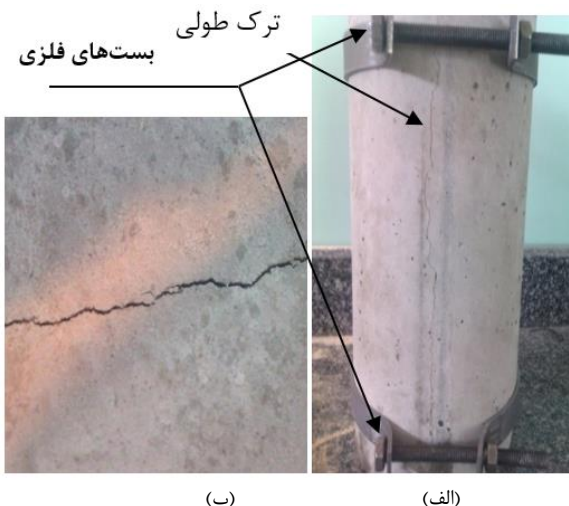
۳-۱- خصوصیات مکانیکی

۳-۱-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری در شکل (۶) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش سیمان درشت‌دانه مقاومت فشاری کاهش یافته که این موضوع می‌تواند به دلیل کاهش درجه هیدراتاسیون ناشی از کاهش سطح مخصوص ذرات سیمان باشد.

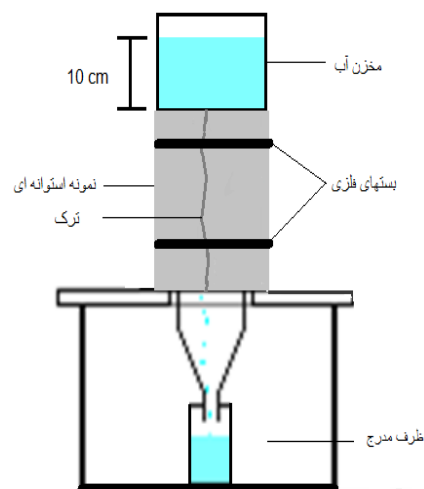


شکل ۶- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها با تغییرات میزان سیمان درشت‌دانه، (الف) $W/C=0/33$ (ب) $W/C=0/28$



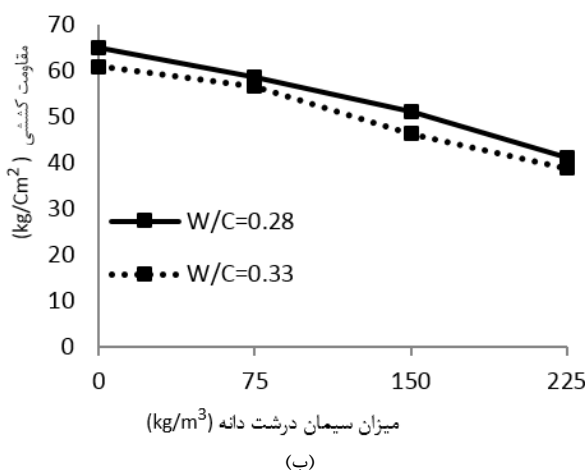
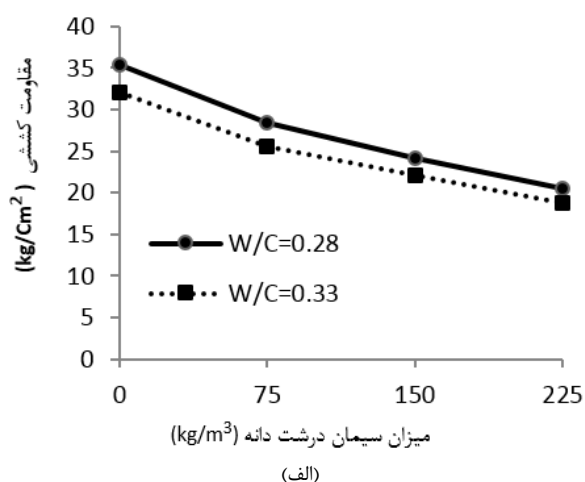
شکل ۴- (الف) نمونه‌های بسته‌شده با بست فلزی، (ب) ترک ایجادشده با عرض ۲۰۰ میکرون

ه) آزمایش نفوذ آب: این آزمایش به صورت شماتیک در شکل (۵) نشان داده شده است (Bazrgar و Rahmani, ۲۰۱۵). در این آزمایش میزان جریان آب عبوری از میان نمونه استوانه‌ای ترک خورده که مطابق بند قبل توسط بست‌های فلزی بسته شده بودند در هفته‌های اول، دوم، چهارم، ششم، هشتم و دهم پس از عمل‌آوری مجدد مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش ارتفاع آب در روی نمونه ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با انجام این آزمایش می‌توان نرخ خودترمیمی طرح اختلاط‌ها را مورد بررسی قرار داد. جهت جلوگیری از نشت آب از ترک‌های موجود در ارتفاع نمونه، با استفاده از چسب درزگیر این ترک‌ها مسدود شدند.



شکل ۵- شکل شماتیک آزمایش نفوذ آب از نمونه ترک‌خورده (Bazrgar و Rahmani, ۲۰۱۵)

میزان درشت‌دانه‌ها وابسته می‌باشد. چراکه میزان افت مقاومت کششی نسبت به طرح اختلاط شاهد در سن ۲۸ روزه، در مقایسه با افت مقاومت فشاری نسبت به طرح اختلاط شاهد چنانچه در شکل (۹) مشاهده می‌شود بیشتر است. به عبارت دیگر در مخلوط‌های M2، M3 و M4 نسبت به مخلوط شاهد M1 در سن ۲۸ روزه به ترتیب ۱۰٪، ۲۱٪ و ۳۷٪ کاهش مقاومت کششی رخ داده است و در صورتی که در مقاومت فشاری این نسبت به ترتیب ۳٪، ۱۴٪ و ۲۹٪ می‌باشد که حاکی از تأثیر منفی بیشتر سیمان درشت‌دانه بر مقاومت کششی نسبت به مقاومت فشاری می‌باشد. این روند در مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ نیز رخ داده است.

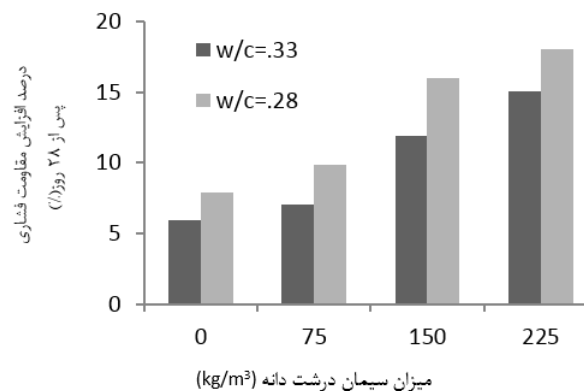


شکل ۸- تغییرات مقاومت کششی با تغییرات میزان درشت‌دانه‌ها:

(الف) ۷ روزه، (ب) ۲۸ روزه

شاید دلیل این امر این باشد که اگرچه سیمان درشت‌دانه باعث کاهش مقاومت فشاری و کششی می‌شود اما دانه‌بندی متراکم سنگ-دانه‌ها از کاهش بیش از حد مقاومت فشاری جلوگیری می‌کند، اما عاملی برای جلوگیری از کاهش مقاومت کششی در بتن وجود ندارد.

همچنین نسبت آب به سیمان با مقاومت فشاری رابطه عکس دارد. قابل ذکر است که به علت استفاده از دانه‌بندی بهینه سنگ‌دانه‌ها، نسبت آب به سیمان کم و همچنین استفاده از فوق روان‌کننده، مقاومت‌های ۲۸ روزه در تمام مخلوط‌ها بیشتر از ۵۰ MPa می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه سیمان درشت‌دانه باعث کاهش مقاومت می‌شود ولی با انتخاب دانه‌بندی مناسب سنگ‌دانه و کاهش نسبت آب به سیمان و میزان سیمان مناسب می‌توان این ضعف را تا حد قابل قبولی بهبود بخشید. در شکل (۷) نیز درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۹۰ روز نسبت به مقاومت ۲۸ روزه نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش میزان سیمان درشت‌دانه و کاهش نسبت آب به سیمان درصد افزایش مقاومت فشاری افزایش یافته است که نشان‌دهنده وجود ذرات هیدراته نشده کافی در سن ۲۸ روزه در این نمونه‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر هرچه سیمان درشت‌دانه بیشتر و هرچه نسبت آب به سیمان کمتر می‌شود، ژل بیشتری بعد از ۲۸ روز تشکیل شده و در نتیجه افزایش مقاومت بیشتری رخ خواهد داد. همچنین با افزایش میزان سیمان درشت‌دانه اثر آب بر مقاومت فشاری کمتر شده است که نشان‌دهنده اثر بیشتر اندازه ذرات سیمان بر مقاومت فشاری می‌باشد.



شکل ۷- درصد افزایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه نسبت به ۲۸ روزه

۳-۱-۲- آزمایش مقاومت کششی

نتایج این آزمایش در شکل (۸) نشان داده شده است که بیانگر این است که مقاومت کششی نیز تأثیرپذیر از میزان سیمان درشت‌دانه می‌باشد و با افزایش میزان درشت‌دانه مقاومت کششی کاهش می‌یابد. علت کاهش مقاومت کششی همان علت ذکر شده برای کاهش مقاومت فشاری است که با افزایش سیمان درشت‌دانه، سطح مخصوص سیمان کم شده و در نتیجه نرخ رشد و تولید محصولات هیدراتاسیون کند شده و بر مقاومت کششی تأثیر منفی گذاشته است. گفتنی است که مقاومت کششی بیشتر از مقاومت فشاری به

چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش میزان سیمان درشت‌دانه و افزایش نسبت آب به سیمان درصد جذب آب افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده عملکرد مشابه هر دو پارامتر بر افزایش نفوذپذیری است. علت این امر می‌تواند به کاهش سطح مخصوص دانه‌های سیمان که موجب کاهش محصولات هیدراتاسیون می‌گردد نسبت داده شود. همچنین افزایش نسبت آب به سیمان باعث افزایش تخلخل شده و در نتیجه درصد جذب آب افزایش می‌یابد.

۳-۲- بررسی پدیده خودترمیمی

۳-۲-۱- آزمایش مقاومت کششی ثانویه

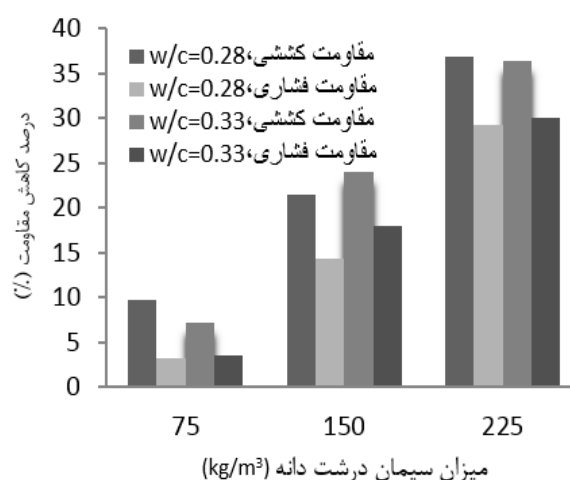
نتایج آزمایش تعیین مقاومت کششی ثانویه پس از ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری مجدد در شکل (۱۱) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود تمامی مخلوط‌ها توانسته‌اند مقاومت کششی کسب کنند که نشان‌دهنده بهبودی مکانیکی در بتن ترک خورده می‌باشد. مطابق شکل (۱۱-الف) پس از ۲۸ روز خودترمیمی، روند کسب مقاومت کششی ثانویه در هر دو نسبت آب به سیمان با افزایش سیمان درشت‌دانه افزایش ناچیزی داشته است. اما با افزایش سن عمل‌آوری (سن ۵۶ روزه) روند کسب مقاومت کششی ثانویه با افزایش میزان سیمان درشت‌دانه افزایش قابل‌توجهی داشته است (شکل ۱۱-ب)).

مقاومت کششی ثانویه کسب‌شده پس از ۲۸ روز خودترمیمی در مخلوط فاقد سیمان درشت‌دانه در هر دو نسبت آب به سیمان تقریباً برابر مقاومت کششی ثانویه کسب‌شده پس از ۵۶ روز خودترمیمی است، اما در مخلوط حاوی ۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب مقاومت کششی ثانویه کسب‌شده پس از ۵۶ روز خودترمیمی ۵۰٪ بیشتر از مقاومت ثانویه کسب‌شده پس از ۲۸ روز خودترمیمی می‌باشد. به عبارت دیگر در مخلوط‌های فاقد سیمان درشت‌دانه در سن ۲۸ روزه روند خودترمیمی متوقف شده است، اما در مخلوط‌های دارای سیمان درشت‌دانه، روند بهبودی ترک‌ها پس از ۲۸ روز همچنان ادامه دارد و یک سیر صعودی را طی می‌کند. با مقایسه مخلوط M5 و M1 که نسبت آب به سیمان در آن‌ها متفاوت است و فاقد سیمان درشت‌دانه می‌باشند، در می‌یابیم که مقاومت کششی کسب‌شده توسط مخلوط M1 پس از ۵۶ روز خودترمیمی تقریباً ۶٪ نسبت به مخلوط M5 بهبود یافته است. این در صورتی است که مخلوط M4 در مقایسه با مخلوط M8 که نسبت آب به سیمان در آن‌ها متفاوت و به ترتیب برابر ۰/۲۸ و ۰/۳۳ بوده و دارای بیشترین میزان سیمان درشت‌دانه هستند، در همین سن تقریباً ۱۵ درصد در کسب مقاومت کششی ثانویه بهبود حاصل شده است که نشان‌دهنده اثر بیشتر سیمان درشت‌دانه بر بهبودی مکانیکی ترک‌ها، نسبت به میزان آب می‌باشد.

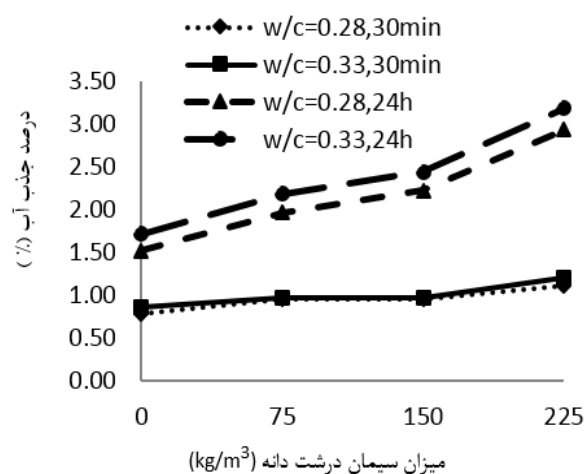
علت این امر را می‌توان به وابستگی مقاومت فشاری به تخلخل و مقاومت کششی به تخلخل ناحیه انتقال ارتباط داد.

۳-۱-۳- جذب آب

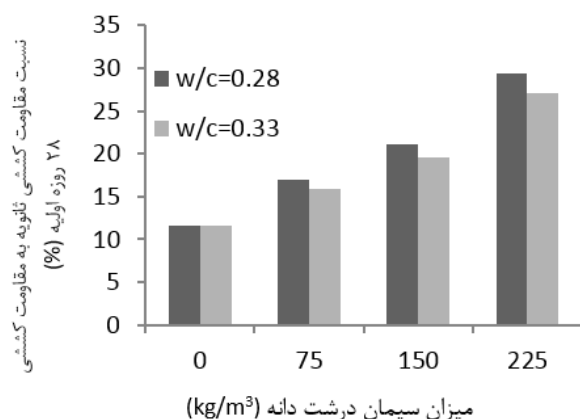
جهت بررسی تخلخل و میزان جذب آب نمونه‌ها که نشان‌دهنده میزان نفوذپذیری بتن نیز می‌باشد این آزمایش در نظر گرفته شد. در شکل (۱۰) نتایج آزمایش جذب آب در سن ۲۸ روزه نشان داده شده است. برای مخلوط‌های بدون سیمان درشت‌دانه درصد جذب آب در هر دو نمودار کم‌ترین مقدار را به خود اختصاص داده است.



شکل ۹- درصد کاهش مقاومت فشاری و کششی نسبت به مقاومت فشاری و کششی مخلوط‌های شاهد در سن ۲۸ روزه



شکل ۱۰- تغییرات درصد جذب آب ۲۸ روزه پس از ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت قرارگیری نمونه‌ها در آب

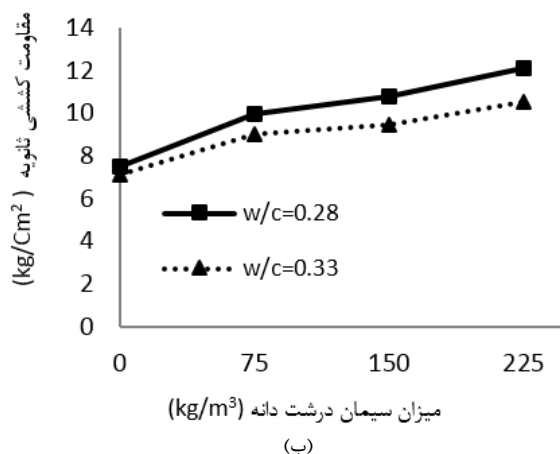
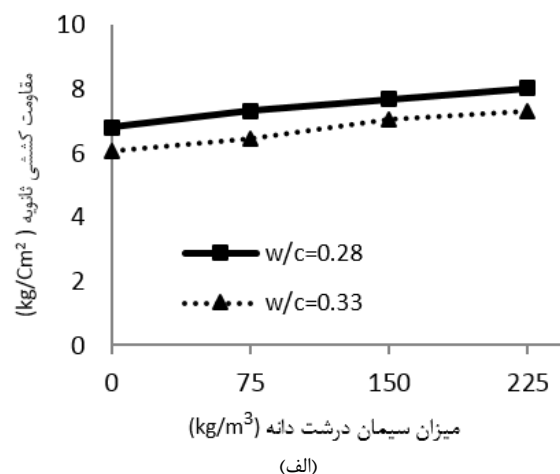


شکل ۱۲- نسبت مقاومت کششی ثانویه پس از ۵۶ روز عمل آوری مجدد به مقاومت کششی ۲۸ روزه اولیه

این در حالی است که در مخلوط M1 و M5 با وجود این که فاقد سیمان درشت دانه می باشند و فقط نسبت آب به سیمان متغیر است یک بهبودی ۱۲ درصدی در کسب مقاومت مشاهده می شود که این بهبودی نیز ناشی از هیدراتاسیون مجدد ذرات سیمان می باشد.

۳-۲-۲- آزمایش نفوذ آب

در این آزمایش پس از یک، دو، چهار، شش، هشت و ده هفته پس از عمل آوری مجدد میزان عبور آب از میان نمونه ترک خورده اندازه گیری شد. در شکل (۱۳) نتایج این آزمایش نشان داده شده است. با توجه به این شکل با افزایش سن عمل آوری مجدد، میزان آب عبوری از میان ترک ها کاهش یافته و پدیده خودترمیمی ترک ها و بسته شدن ترک ها با کاهش این میزان خود را نشان می دهد. مشاهده می شود که مخلوط M2 با میزان آب عبوری ۸۶ میلی لیتر بیشترین نفوذپذیری را در ۷ روز اول داشته و مخلوط M7 نیز کمترین میزان آب عبوری را داشته است که این روند در تمام سنین ادامه دارد. به عبارت دیگر با افزایش میزان سیمان درشت دانه نفوذپذیری آب از میان ترک ها کاهش می یابد. همچنین با افزایش نسبت آب به سیمان نفوذپذیری نیز افزایش می یابد. در مخلوط های M1، M2، M5 و M6 پس از ۵۶ روز عمل آوری مجدد، میزان آب عبوری تقریباً ثابت می ماند.

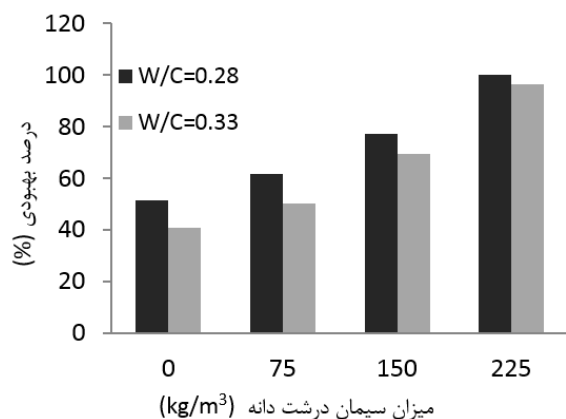


شکل ۱۱- مقاومت کششی ثانویه: الف) پس از ۲۸ روز خودترمیمی، ب) پس از ۵۶ روز خودترمیمی

همچنین با مقایسه نتایج می توان گفت در یک میزان ثابت سیمان درشت دانه، با افزایش نسبت آب به سیمان پتانسیل بهبودی مکانیکی ترک ها کاهش می یابد.

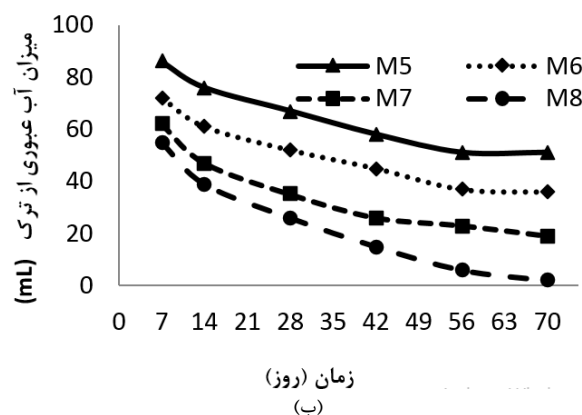
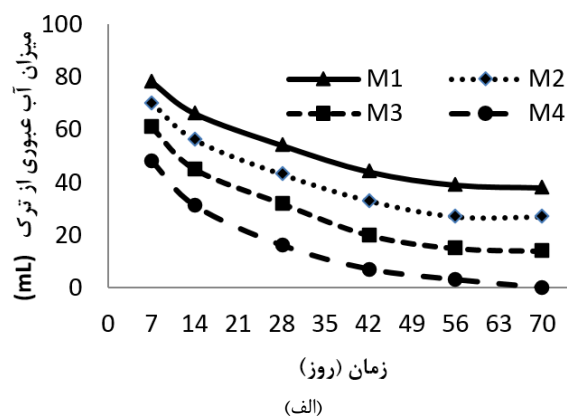
در شکل (۱۲) درصد مقاومت کششی کسب شده پس از ۵۶ روز عمل آوری مجدد در نمونه های ترک خورده نسبت به مقاومت کششی ۲۸ روزه اولیه بتن نشان داده شده است که حاکی از ۲۹٪ خودترمیمی در مخلوط M4 و بهبودی ۲۷٪ در مخلوط M8 می باشد. همچنین شکل (۱۲) بیانگر این است که میزان خودترمیمی بیشتر از نسبت آب به سیمان به میزان سیمان درشت دانه ها وابسته می باشد، چراکه با افزایش میزان سیمان درشت دانه میزان خودترمیمی به صورت قابل توجهی افزایش می یابد.

در شکل (۱۴) درصد بهبودی مخلوط‌های موردنظر پس از ۱۰ هفته عمل‌آوری مجدد که براساس رابطه (۶) محاسبه شده، نشان داده شده است. باتوجه این شکل ضریب بهبودی برای مخلوط M4 ۱۰۰٪ می‌باشد. این بدان معنی است که ترک به‌طور کامل بسته شده و بهبودی کامل از دیدگاه نفوذپذیری رخ داده است. همچنین در مخلوط با همین میزان سیمان درشت‌دانه و با نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ درصد بهبودی ۹۶٪ می‌باشد. کم‌ترین بهبودی مربوط به مخلوط M2 با درصد بهبودی ۴۱٪ و M1 با درصد بهبودی ۵۱٪ می‌باشد که این امر بیانگر این است که علی‌رغم عدم وجود سیمان درشت‌دانه در این طرح اختلاط‌ها، بهبودی قابل‌توجهی در نفوذپذیری رخ داده است.



شکل ۱۴- درصد بهبودی طرح اختلاط‌ها پس از ۱۰ هفته عمل‌آوری مجدد

علاوه بر این مطالب چنانچه در شکل (۱۴) دیده می‌شود با افزایش میزان سیمان درشت‌دانه تأثیر نسبت آب به سیمان نیز کم‌رنگ‌تر می‌شود به‌نحوی که اختلاف ۱۰ درصدی در مخلوط M1 و M5 به ۴ درصد در مخلوط M4 و M8 تقلیل می‌یابد. به عبارت دیگر چون هر دو نسبت آب به سیمان جهت هیدراتاسیون کامل کافی بوده، علت اصلی خودترمیمی، کاهش درجه هیدراتاسیون به علت تغییرات نسبت آب به سیمان نمی‌باشد. در صورتی که در صورت استفاده از سیمان‌های درشت‌دانه به علت دارا بودن سطح مخصوص کم‌تر واکنش کم‌تری در سطح این دانه‌ها در ۲۸ روز اولیه رخ می‌دهد و این در حالی است که هسته این ذرات به صورت هیدراته نشده در بتن باقی می‌ماند. بنابراین می‌توان سیمان درشت‌دانه را به عنوان یک کپسول حاوی سیمان هیدراته نشده تلقی کرد که بلافاصله بعد از ایجاد ترک در بتن، این کپسول‌های موجود در سطح ترک شکسته شده و سیمان هیدراته نشده در معرض آب قرار می‌گیرد و واکنش



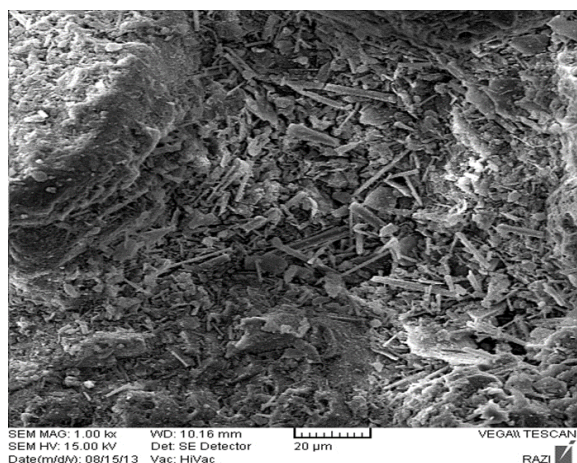
شکل ۱۳- میزان آب عبوری از میان نمونه‌های ترک‌خورده: (الف) W/C=۰/۲۸، (ب) W/C=۰/۳۳

به عبارت دیگر میزان بهبودی و بسته شدن ترک‌ها در این سن در مخلوط‌های ذکرشده متوقف می‌شود، اما در مخلوط M3، M4، M7 و M8 میزان عبور آب همچنان روند کاهشی داشته، به طوری که در سن ۷۰ روزه در مخلوط M8 میزان آب عبوری به ۲ میلی‌لیتر و در مخلوط M4 ترک به‌طور کامل بسته شده و این میزان به صفر رسید که نشان‌دهنده ترمیم کامل ترک می‌باشد.

جهت بررسی بهتر پدیده خودترمیمی پارامتر α به عنوان درصد بهبودی تعریف گردید که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (6)$$

در این رابطه، A میزان آب عبوری پس از ۷ روز عمل‌آوری مجدد و B میزان آب عبوری پس از هر زمان دلخواه می‌باشد. لازم به ذکر است که جهت تعریف دقیق‌تر پارامتر α یا درصد بهبودی بهتر بود به جای اندازه‌گیری آب عبوری پس از ۷ روز عمل‌آوری مجدد، در همان روز نخست بلافاصله پس از ایجاد ترک اقدام به اندازه‌گیری آب عبوری می‌گردید و این مهم جایگزین پارامتر A می‌شد.



شکل ۱۵- تصویر میکروسکوپی از عامل خودترمیمی

هیدراتاسیون مجدداً رخ داده و ژل تولیدشده از این واکنش به علت افزایش حجم باعث بسته شدن ترک‌ها می‌شود. در شکل (۱۵) تصویر میکروسکوپی از عامل خودترمیمی نشان داده شده است که این تصویر بیانگر وجود ساختار سیمان هیدراته‌شده در عامل خودترمیمی می‌باشد.

همچنین در شکل (۱۶) روند خودترمیمی مخلوط M4 که بهترین عملکرد را چه از نظر کسب مقاومت کششی مجدد (نماینده بهبودی مکانیکی) و چه از نظر کاهش نفوذ آب و بسته شدن ترک‌ها (نماینده بهبودی در خصوصیات نفوذپذیری) به خود اختصاص داده است، نشان داده شده است. در این تصویرها به‌وضوح ترمیم کامل ترک دیده می‌شود.



شکل ۱۶- روند ترمیم ترک در مخلوط M4 در سنین مختلف

قرار گرفته و جهت بررسی میزان بهبودی در خصوصیات نفوذپذیری، آزمایش نفوذ آب انجام شد. جهت بررسی خودترمیمی بتن‌های متراکم، سیمان درشت‌دانه به‌عنوان عامل خودترمیمی به‌میزان ۰، ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر در نظر گرفته شد و

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با روش آزمایشگاهی علاوه بر بررسی خصوصیات مکانیکی بتن متراکم، پدیده خودترمیمی در این بتن نیز مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی میزان بهبودی مکانیکی، نمونه‌های ترک-خورده با عرض ۲۰۰ میکرون تحت آزمایش مقاومت کششی مجدد

توانایی ذاتی بتن در بهبود ترک‌های خود با گذشت زمان می‌باشد.

۴- بهبودی خصوصیات نفوذ آب از بتن ترک‌خورده بیشتر از بهبودی مکانیکی آن می‌باشد، به‌طوری‌که میزان آب عبوری دو مخلوط M4 و M8 به‌ترتیب پس از ۷۰ روز عمل‌آوری مجدد در آب به صفر و ۲ میلی‌لیتر رسیده است که به‌ترتیب میزان بهبودی ۱۰۰ و ۹۶ درصدی را از خود نشان می‌دهند. این در صورتی است که بهبودی مکانیکی آن‌ها به‌ترتیب تقریباً ۲۹ و ۲۷ درصد می‌باشد.

۵- با افزایش نسبت آب به سیمان سرعت ترمیم و بهبودی در آزمایش نفوذ آب از بتن ترک‌خورده کاهش می‌یابد به‌طوری‌که میزان عبور آب در ۸ ساعت در مخلوط‌های M1 و M5 که فاقد سیمان درشت‌دانه می‌باشند به‌ترتیب پس از ۷۰ روز عمل‌آوری مجدد در آب به ۳۸ و ۵۱ میلی‌لیتر رسید. این مخلوط‌ها به‌ترتیب توانسته‌اند ۵۱٪ و ۴۱٪ بهبودی پس از ۱۲ هفته عمل‌آوری مجدد را به‌دست آورند که حاکی از توانایی ذاتی بتن در بهبودی خصوصیات نفوذپذیری ترک‌ها با گذشت زمان است.

۶- با توجه به نتایج می‌توان گفت با افزایش سیمان درشت‌دانه خودترمیمی افزایش و با افزایش نسبت آب به سیمان خودترمیمی کاهش می‌یابد. همچنین تأثیر میزان سیمان درشت‌دانه در خودترمیمی ذاتی به‌مراتب بیشتر از تأثیر نسبت آب به سیمان می‌باشد.

۷- با افزایش سن عمل‌آوری میزان خودترمیمی افزایش می‌یابد.

۸- مخلوط M4 در بین مخلوط‌های تحت بررسی دارای بیش‌ترین پتانسیل خودترمیمی بود.

۵- مراجع

- Dinger DR, Funk JE, "Particle-size analysis routines available on Cerabull", American Ceramic Society Bulletin, 1989, 68 (8), 1406-1408.
- Edwardsen C, "Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete", ACI Materials Journal, 1999, 96 (4), 448-454.
- Funk JE, Dinger DR, "Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions Applied to Ceramic Manufacturing", Kluwer Academic Press, Boston, 1994.
- Fuller WB, Thomson SE, "The laws of proportioning concrete", Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1907, 59 (2), 67-143.
- Ghosh SK, "Self-Healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, Weinheim, 2009.
- Glanville WH, "The permeability of portland cement concrete", Building Research, 1931, 1-61.

مخلوط‌ها نیز با دو نسبت آب به سیمان ۰/۲۸ و ۰/۳۳ ساخته شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در دو بخش زیر آمده است:

الف) بررسی خصوصیات مکانیکی:

۱- با کاهش قطر ذرات سیمان در یک میزان سیمان ثابت نرخ کسب مقاومت فشاری بتن به‌علت تسریع در هیدراتاسیون ذرات سیمان بیشتر می‌شود.

۲- دانه‌بندی سیمان بر مقاومت فشاری بتن تأثیر زیادی دارد، به صورتی که با افزایش سیمان درشت‌دانه (مانده روی الک ۲۰۰) مقاومت بتن به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد.

۳- با افزایش سیمان درشت‌دانه میزان کسب مقاومت فشاری بعد از ۲۸ روز بیشتر شده است.

۴- سیمان درشت‌دانه و نسبت آب به سیمان بر مقاومت کششی نیز تأثیرگذارند، به‌طوری‌که با افزایش سیمان درشت‌دانه و نسبت آب به سیمان مقاومت کششی بتن کاهش می‌یابد.

۵- با به‌کارگیری سیمان ریزدانه می‌توان به نفوذپذیری و جذب آب پایین در بتن دست یافت. به‌عبارت‌دیگر با افزایش سیمان درشت‌دانه و افزایش نسبت آب به سیمان نفوذپذیری بتن افزایش می‌یابد.

۶- مقاومت کششی بیشتر از مقاومت فشاری به‌میزان دانه‌های درشت سیمان وابسته می‌باشد. چراکه میزان افت مقاومت کششی نسبت به طرح اختلاط شاهد در سن ۲۸ روزه، در مقایسه با افت مقاومت فشاری در سن مشابه بیشتر است.

ب) نتایج حاصل از خودترمیمی ذاتی:

۱- بیشترین بهبودی مکانیکی در مخلوط M4 که دارای نسبت آب به سیمان ۰/۲۸ و ۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان درشت‌دانه می‌باشد، اتفاق افتاد. این مخلوط در سن ۵۶ روزه تقریباً توانست ۲۹٪ مقاومت کششی ۲۸ روزه خود را کسب کند.

۲- کم‌ترین میزان بهبودی مکانیکی در مخلوط M5 که فاقد سیمان درشت‌دانه بوده و دارای نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ می‌باشد اتفاق افتاد. مقاومت کششی کسب‌شده پس از ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری مجدد پس از ایجاد ترک به‌ترتیب ۶/۰۷ و ۷/۱۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد که نشان‌دهنده این موضوع است که روند خودترمیمی در این طرح اختلاط در سن پایین رخ می‌دهد و پس از ۲۸ روز تقریباً بهبودی متوقف می‌شود.

۳- مخلوط‌های شاهد M1 و M5 که فاقد سیمان درشت‌دانه می‌باشند، توانسته‌اند تقریباً ۱۲ درصد مقاومت کششی اولیه را پس از ۵۶ روز عمل‌آوری مجدد کسب کنند. این امر حاکی از

- Hearn N, "Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference?", *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 1998, 31 (8), 563-567.
- Hua X, "Self-healing of Engineered Cementitious Composites (ECC) in Concrete Repair System", Master thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 2010.
- Hyde GW, Smith WJ, "Results of experiments made to determine the permeability of cements and cement mortars", *Journal of the Franklin Institute*, 1889, 128 (3), 199-207.
- Kan LL, Shi HS, Sakulic AR, Li VC, "Self-healing characterization of engineered cementitious composite materials", *ACI Materials Journal*, 2010, 107 (6), 617-624.
- Kenneth RL, Floyd OS, "Autogenous Healing of Cement Paste", *ACI Journal Proceedings*, 1956, 52 (6), 1083-1089.
- Mehta PK, Monteiro PJM, "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials", 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2005.
- Hearn N, Morley CT, "Self-sealing property of concrete-Experimental evidence", *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 1997, 30, 404-411.
- Neville A, "Autogenous healing: a concrete miracle?", *Concrete International*, 2002, 76-82.
- Peronius N, Sweeting TJ, "On the correlation of minimum porosity with particle size distribution", *Powder Technology*, 1985, 42 (2), 113-121.
- Rahmani H, Bazrgar H, "Effect of coarse cement particles on the self-healing of dense concretes", *Magazine of Concrete Research*, 2015, 67 (9), 476-486.
- Rahmani H, Ramazanianpour AA, "Effect of binary cement replacement materials on sulfuric acid resistance of dense concretes", *Magazine of Concrete Research*, 2008, 60 (2), 145-155.
- Ramm W, Biscopig M, "Autogenous healing and reinforcement corrosion of water-penetrated separation cracks in reinforced concrete", *Nuclear Engineering and Design*, 1998, 179 (2), 191-200.
- Reinhardt HW, Jooss M, "Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width", *Cement and Concrete Research*, 2003, 33 (7), 981-985.

EXTENDED ABSTRACT

Autogenous Self- Healing of High Strength Concretes

Hamed Bazrgar^a, Hamid Rahmani^{b,*}

^a Civil Engineering Department, Yasouj University, Yasouj, Iran

^b Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan 2433054057, Iran

Received: 16 April 2016; **Accepted:** 19 December 2020

Keywords:

Autogenous self-healing, High strength concrete, Crack width, Coarse cement particles, Rehydration.

1. Introduction

Concrete elements can be easily cracked due to several reasons, such as tensile stresses. When these cracks are connected to each other, permeability will increase and bearing capacity will decrease. Therefore, cracks may decrease the durability of concrete structures. Repair of cracked concrete structures is often expensive and sometimes impossible. Therefore, researchers by inspiration from autogenous recovery of small scratches in the body of live creatures, have presented self-healing concrete based on concrete characteristics. Utilization of such concretes may increase the durability of concrete structures and minimize repair and rehabilitation costs. Self-healing phenomenon is not new; Academy of science in France has observed the healing of micro cracks in 1836 (Hearn, N, Morley, 1997). The self-healing refers to the reduction of crack width itself. Systematic investigation of self-healing was started by Glanville in 1926. Autogenous self-healing is a case of healing that happens without using external agents (Glanville, 1931). Cementitious materials have such ability, because rehydration of cement particles may be continued and reaction products such as C-S-H and Portlandite will fill the cracks. Of course, when the unhydrated cement particles and water are available in the cement paste, this type of self-healing will occur. Parameters such as crack width, pH of curing water, temperature, the chemical composition of cement and etc. may influence on the self-healing process. The mechanism of autogenous self-healing is described as follows:

- 1- Rehydration of unhydrated cement particles.
- 2- precipitation of CaCO_3
- 3- Filling of cracks by microscopic particles available in the water or separated from the paste owing to cracks formation.

Coarse cement particles with diameters larger than 75 microns often are available in the cement particles because of their unsuitable grinding. These particles are not completely hydrated during the initial curing time and could be effective in the self-healing process. In the present study, cracks of concrete samples were healed by substitution of cement particles by coarse cement particles as a self-healing agent. In addition, the effect of two different water-cement ratios on the self-healing process of high strength concretes was investigated. The low specific surface of coarse cement particles and low water-cement ratios lead to a decrease in hydration degree of cement paste which consequently results in incomplete hydration of the cement particles, which leads to suitable healing performance. Therefore, the inner part of cement particles will be unhydrated until the cracks are happened and moisture is reached to the cement particles. In this case, unhydrated parts of cement particles will react with water and hydration products will fill the cracks and consequently healing process will be occurred.

* Corresponding Author

E-mail addresses: hrahmani@znu.ac.ir (Hamid Rahmani), hamed.bazregar67@gmail.com (Hamed Bazrgar).

2. Methodology

In the present study, first, High Strength Concretes (HSCs) were made by using an ideal grading curve of aggregates and superplasticizer, where coarse cement content was considered 0, 75, 150, and 225 kg/m³ and the water-cement ratio was considered 0.28 and 0.33. Next, a longitudinal crack in the moist cured cylindrical specimens was developed by using the splitting test method. Then, the specimens were tightly fastened to keep the crack width constant and equal to 200 micron. After all, the specimens were re-cured in water and then the mechanical properties and water passing content through the cracked concretes were measured as self-healing criteria. A schematic illustration of water passing through the cracked specimen is shown in Fig. 1. (Rahmani and Bazrgar, 2015). Also, self-healing material was separately investigated by SEM.

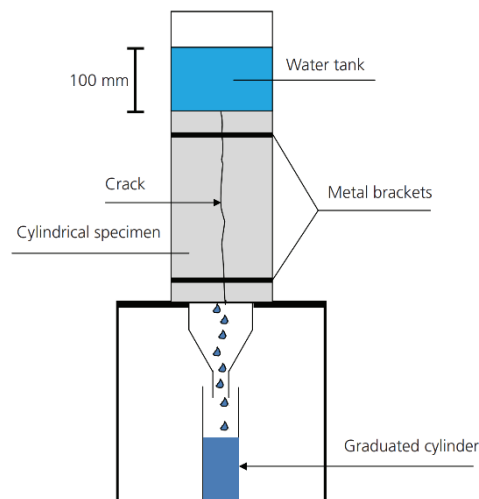


Fig. 1. Test setup for determination of water passing through the cracked concrete (Rahmani and Bazrgar, 2015)

3. Results and discussion

Results showed that the self-healing capacity is available for all considered mixtures and the effect of coarse cement particles on the self-healing process is greater than that of the water-cement ratio has. In addition, 12-29 percent healing in the mechanical properties and 41-100 percent healing in the water passing through the cracked concrete were seen. Also, coarse cement replacement up to 225 kg/m³ decreased compressive and tensile strength up to 29 and 37 percent, respectively.

4. Conclusions

In the present study, an experimental program was conducted to investigate the self-healing of high-strength concretes. The mechanical healing of cracks was evaluated by the tensile strength recovery and the permeability healing was investigated by water passing content through the cracks. Coarse cement contents and water-cement ratio were considered as variables. The results of the conducted experiments are explained in the following:

Compressive and tensile strength of high strength concretes were reduced by increasing coarse cement particles and water-cement ratio, where the decrease in tensile strength was more obvious, while self-healing capacity was increased with increasing coarse cement particles and decreasing water-cement ratio, where increasing self-healing ability is more dependent to coarse cement particles rather than a water-cement ratio. Also, self-healing progress was certainly governed by the re-curing time where the permeability healing is considerably more than mechanical healing.

5. References

- Glanville WH, "The permeability of portland cement concrete", Building Research, 1931, 1-61.
- Hearn N, Morley CT, "Self-sealing property of concrete-Experimental evidence", Materials and Structures/ Materiaux et Constructions, 1997, 30, 404-411.
- Rahmani H, Bazrgar H, "Effect of coarse cement particles on the self-healing of dense concretes", Magazine of Concrete Research, 2015, 67 (9), 476-486.