فصل اول
کلیات

۱-۱ - مقدمه

بتن به دلیل منابع فراوان یکی از پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی می‌باشد. در سال۱۹۹۲ میلادی تنها در آمریکا ۶۳ میلیون تن سیمان پرتلند به ۵۰۰ میلیون تن بتن تبدیل شده است که این خود پنج برابر مصرف فولاد، به صورت وزنی در مدت مشابه بوده است. در اغلب کشورهای جهان نسبت مصرفبتن به فولاد از ۱۰ به۱ نیز فراتر رفته است. کل بتنی کهدر سال ۱۹۹۱ میلادی در جهان مصرف شده است بالغ بر ۳ بیلیون تن یعنی یک تن به ازای هر نفر در جهان تخمین زده می شود. تنها ماده ای را که بشر به این میزان مصرف می کند، آب است. امروزه میزان مصرف بتن نسبت به ۳۰ سال قبل تفاوت عمده ای ندارد. میزان مصرف امروز بتن در جهان بالغ بر ۵/۵ بیلیون تن در سال می‌باشد[۱].

پس از کشف سیمان پرتلند در قرن نوزدهم میلادی سازه‌های بتنی در سراسر دنیا ساخته شدند. در نتیجه واکنش سیمان با آب محصولات هیدراتاسیون تشکیل می‌شوند. وقتی سیمان با آب و ماسه مخلوط گردد محصول ایجاد شده را ملات می‌نامند و اگر در این مخلوط از سنگدانه‌های درشت استفاده شود محصول حاصله بتن نامیده می‌شود. بتن یکی از مصالح نسبتا شکننده می‌باشد که در فشار مقاوم ولی در کشش ضعیف می‌باشد. اجزائ بتنی به راحتی در خمش و کشش ترک می‌خورند، به همین دلیل بتن را با فولاد مسلح می‌کنند و با ترک خوردن بتن تحت بارگذاری فولادها تنش‌های کششی را تحمل می‌کنند. به هر حال عرض ترک‌ها نباید از میزان عرض تعیین شده بیشتر شود. ترک‌ها بخصوص 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 براین ممکن است ریزترک‌های ناشی از خزش و جمع شدگی در خمیر سیمان اتفاق افتد که تقریبا یکی از خصوصیات اجتناب ناپذیر بتن می‌باشد. اگر ریزترک‌ها یک شبکه پیوسته از ترک را تشکیل دهند نفوذپذیری را افزایش داده و مقاومت بتن را در برابر عامل‌های مهاجم کاهش می‌دهند.

لذا حضور ترک‌ها می‌تواند دوام سازه‌های بتنی راکاهش دهد. در نتیجه محققان به فکر ساخت بتنی با خصوصیات خود ترمیمی افتادند تا با استفاده از این ویژگی علاوه بر افزایش دوام سازه-های بتنی هزینه‌های تعمیر و نگهداری این سازه ها را کاهش دهند[۲].در تحقیق صورت گرفته توسط محققان پیشین نشان داده شد که بلین سیمان که نماینده توزیع دانه‌های سیمان می-باشد، بر درجه هیدراتاسیون سیمان تاثیر دارد و این امر باعث تاثیر اندازه دانه‌های سیمان بر خصوصیات بتن از جمله مقاومت فشاری می‌شود. همچنین نسبت آب به سیمان می‌تواند بر میزان واکنش سیمان با آب تاثیرگذار باشد به عبارت دیگر در صورت فراهم بودن آب کافی در سیستم، دانه‌های سیمان به راحتی با آب واکنش می‌دهند و نتیجه واکنش کامل سیمان با آب تولید ژل بیشتر می‌باشد که این امر باعث بهبود خواص بتن می‌شود. اما در بتن‌های با مقاومت بالا جهت کاهش تخلخل خمیر سیمان می‌بایست نسبت آب به سیمان را تا حد امکان کم درنظر گرفت که این موضوع باعث کاهش میزان آب و در نتیجه کاهش امکان هیدراتاسیون کامل ذرات سیمان می‌شود. کاهش درجه هیدراتاسیون سیمان می‌تواند بر خواص بتن تاثیر منفی‌گذارد و باعث کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری بتن شود. اما از طرف دیگر دو عامل اندازه ذرات و نسبت آب به سیمان اگرچه باعث تاثیر منفی بر خواص بتن می‌شود اما کاهش هیدراتاسیون ذرات سیمان می‌تواند باعث شود که مقداری سیمان به صورت هیدراته شده در بتن باقی بماند و هنگام ترک خوردن بتن و رسیدن آب به این سیمان‌های هیدراته نشده، دوباره واکنش هیدراتاسیون رخ می‌دهد و ژل تولید می‌شود و ترک‌ها بهبود می‌یابد. در این تحقیق جهت بررسی عملکرد خودترمیمی ذاتی بتن با استفاده از سیمان درشت دانه و نسبت آب به سیمان کم، از روش آزمایشگاهی و تجربی پتانسیل خودترمیمی بتن مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۱-۲- اهمیت و ضرورت تحقیق

امروزه هزینه‌های زیادی صرف تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی می‌شود. در هلند یک سوم از کل بودجه سالیانه برای کارهای عمرانی در رابطه با بازرسی، نظارت، نگهداری و تعمیر صرف می‌شود[۲]. هزینه‌های بازسازی پل‌ها در آمریکا بین ۲۰ تا ۲۰۰ بیلیون دلار تخمین زده شده است و میانگین هزینه‌های سالیانه نگهداری برای پل‌ها در این کشور حدود ۵/۲ بیلیون دلارمی‌باشد[۳]. در انگلستان بیش از ۴۵%از هزینه سالیانه ساخت ساز صرف تعمیر و نگهداری می‌شود[۴]. تجربه نشان داده است که بالا بردن کیفیت مصالح مصرفی باعث به تعویق افتادن تعمیر و در نتیجه کاهش هزینه تعمیر و نگهداری می گردد. حالت ایده‌آل این است که هیچ هزینه ای برای تعمیر و نگهداری در نظر گرفته نشود به عبارت دیگر مصالح توانایی تعمیر خود را داشته باشند و عمر سازه بدون هیچ هزینه‌ای افزایش یابد. افزایش عمر بهره برداری سازه‌های بتنی نیاز به سازه‌های جدید را کاهش می‌دهد و این موضوع باعث کاهش مصرف مواد خام اولیه می‌شود و همچنین باعث کاهش آلودگی، مصرف انرژی و تولید CO_2 ناشی از پروسه تولید

سیمان، می‌شود[۲].با توجه به این موضوع که پروسه آسیاب کردن سیماندرکشور ما مناسب نیست، تولید سیمان با ذرات درشت دانه امری طبیعی می‌باشد. در بتن ساخته شده با سیمان-های درشت تر از ۳۰ میکرون و نسبت آب به سیمان پایین احتمال هیدراته نشدن کامل ذرات وجود دارد و این موضوع باعث وجود ذرات هیدراته نشده در بتن می‌شود[۵]. هرچه سیمان دارای دانه‌های درشت تر باشد و همچنین هرچه میزان آب اختلاط کمتر باشد، احتمال هیدراتاسیون کامل ذرات سیمان کمتر است و سیمان هیدراته نشده بیشتری در بتن باقی می-ماند. در صورت ایجاد ریزترک‌ها در بتن و نفوذ رطوبت به داخل بتن دراین ذرات هیدراته نشده دوباره هیدراتاسیون رخ می‌دهد. هیدراتاسیون مجدد ذرات درشت دانه هیدراته نشده باعث تولید مجدد خمیر سیمان شده و در نهایت موجب پر شدن ریز ترک‌های موجود در بتن سخت شده می‌شود. این موضوع علاوه بر کاهش در هزینه های مستقیم و غیر مستقیم تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی باعث افزایش دوام و عمر مفید سازه‌ها خواهد شد. بنابراین در این تحقیق خودترمیمی بتن به علت این پدیده یعنی درشت بودن دانه‌های سیمان و پایین بودن نسبت آب به سیمان، از طریق روش آزمایشگاهی و تجربی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۳- اهداف و فرضیه های تحقیق

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تاثیر ذرات درشت دانه سیمان و نسبت آب به سیمان پایین در خصوصیات مکانیکی و عملکرد خودترمیمی ذاتی ناشی از هیدراتاسیون مجدد ذرات درشت دانه در بتن متراکم می‌باشد. در این تحقیق ذرات سیمان مانده روی الک شماره ۲۰۰ (بزرگتر از ۷۵ میکرون) به عنوان سیمان درشت دانه درنظر گرفته شده و به عنوان عاملی که باعث خودترمیمی بتن می‌شود با درصدهای مختلف در بتن های ساخته شده مورد استفاده قرار گرفته شده است. انتظار می‌رود که ذرات درشت سیمان به علت میزان کم نسبت آب به سیمان و همچنین سطح مخصوص کوچکتر از درجه هیدراتاسیون کمی برخوردار شوند و این موضوع باعث افزایش پتانسیل خودترمیمی بتن شود.

فرضیه‌های در نظرگرفته شده در این تحقیق به شرح زیر می باشد:

۱- ذرات سیمان درشت تر از ۷۵ میکرون می‌توانند باعث خودترمیمی بتن شود.
۲- نسبت آب به سیمان کم برروی خودترمیمی ذاتی بتن تاثیرگذار است.
۳- خودترمیمی تاثیر قابل توجه‌ای بر مقاومت کششی و نفوذپذیری بتن دارد.

اهداف تحقیق نیز به شرح زیر می‌باشد:

۱- ساخت بتن متراکم با مقاومت فشاری بالا
۲- بررسی تاثیر دانه‌بندی سیمان بر خصوصیات مکانیکی بتن متراکم
۳- بررسی تاثیر نسبت آب به سیمان بر خصوصیات مکانیکی بتن متراکم

۴- ارائه طرح اختلاط مناسب که علاوه بر تعمین مقاومت بالا، توانایی خودترمیم را داشته باشد

۵- بررسی میزان بهبود خصوصیات مکانیکی و نفوذپذیری بتن با استفاده از سیمان درشت-دانه

۱-۴- روش تحقیق

در تحقیقات پیشین در زمینه خودترمیمی، محققین توانسته‌اند بهبودی مکانیکی و نفوذپذیری ترک‌های کمتر از ۵۰ میکرون را با سیمان معمولی ایجاد نمایند و در ترک‌های تا ۱۵۰ میکرون فقط بهبودی در خصوصیات نفوذپذیری رخ داده و بهبودی مکانیکی گزارش نشده است[۶]. این محقق برای بستن ترک‌ها با عرض بیشتر به استفاده از افزودنی‌ها روی آورده‌اند که این موضوع باعث افزایش هزینه ساخت بتن شد.

در تحقیق حاضر با استفاده از سیمان معمولی و بدون استفاده از هیچ نوع افزودنی، بهبودی خودبه خود ترک‌ها با عرض ۲۰۰ میکرون مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارتی با استفاده از ضعف سیمان‌های تولیدی در کشور (سیمان‌های با دانه های درشت) خودترمیمی بتن حاصل می‌شود و به یک ویزگی مثبت تبدیل می‌شود. دانه بندی سنگدانه بر اساس ایجاد حداکثر تراکم در سنگدانه‌ها بنا شده است. آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و درصد جذب آب جهت بررسی خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های درنظر گرفته شده در سنین مختلف انجام شد. همچنین جهت بررسی پدیده خودترمیمی آزمایش مقاومت کششی ثانویه و آزمایش نفوذ آب انجام شد. جهت بررسی میزان بهبودی مکانیکی آزمایش کشش ثانویه و جهت بهبودی خصوصیات نفوذپذیری آزمایش نفوذ آب انجام شد. در این تحقیق نسبت آب به سیمان و میزان سیمان درشت دانه به عنوان دو متغیر تاثیرگذار بر خودترمیمی ذاتی بتن در نظر گرفته شده‌اند.

در این تحقیق ۲ نسبت آب به سیمان و ۴ مقدار برای میزان سیمان درشت دانه در نظر گرفته شد که در مجموع ۸ طرح اختلاط جهت بررسی خودترمیمی معرفی شد. نمونه‌های بتنی در قالب این ۸ طرح اختلاط به صورت استوانه‌ای و مکعبی طبق استاندارد ساخته شده و پس از عمل‌آوری در سنین پیش بینی شده تحت آزمایش‌های مذکور قرار گرفته‌اند و نتایج حاصله مورد بحث و بررسی قرار گرفته شد.

۱-۵- مروری بر پایان نامه

در ادامه، در این پایان نامه به مباحث و موضوعات به تفکیک فصل به شرح زیر پرداخته می‌شود :

در فصل دوم به مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه خودترمیمی که شامل معرفی بتن خودترمیم، انواع خودترمیمی، عوامل خودترمیمی، مدل‌های ارائه شده جهت خودترمیمی و آزمایش‌های انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود.

در فصل سوم به تشریح طرح اختلاط‌ها شامل خصوصیات مصالح مصرفی (سیمان، مصالح سنگی و فوق روان کننده)، چگونگی دست یابی به دانه بندی ایده‌آل سنگدانه‌ها، ساخت بتن متراکمو برنامه‌ریزی آزمایش‌های مورد نظر (نوع و سن آزمایش، نوع و تعداد نمونه) پرداخته می‌شود.

در فصل چهارم نتایج آزمایش‌های ذکر شده در فصل سوم برای هر طرح اختلاط آورده شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.همچنین آنالیزهای صورت گرفته بروی عامل خودترمیمی تفسیر و بررسی می‌شود.

در فصل آخرنیز، باتوجه به نتایج حاصله نتیجه‌گیری کلی انجام شده و جهت مطالعات و تحقیقات آینده پیشنهاداتی ارائه شده است.

فصل دوم
بتن خودترمیم

۲ ۱-مقدمه

اعضای سازه‌های بتنی تحت بارهای خمشی و کششی به راحتی ترک می‌خورند. برای مقابله با این موضوع از میلگردهای تقویتی فولادی استفاده می‌شود و به محض ترک خوردن بتن مصالح مسلح کننده وارد عمل می‌شوند (تحت بار قرار می‌گیرند). آرایش ترک‌ها به عنوان یک خصوصیت ذاتی بتن مسلح شناخته می‌شود البته باید تاکید کرد که در سازه‌های بتنی مسلح شده، ترک به عنوان یک آسیب یا شکست در نظر گرفته نمی‌شود و پیدایش ترک مشکلی در ایمنی ایجاد نمی‌کند اما به هر حال عرض ترک‌ها نباید از محدوده تعیین شده تجاوز کند. این ریز ترک‌ها به عنوان خصوصیات اجتناب ناپذیر بتن مطرح می‌شوند. اگر ریزترک‌های تشکیل شده به هم پیوسته و یک شبکه گسترده و یک پارچه از ترک را ایجاد کنند نفوذپذیری بتن افزایش می‌یابد و باعث کاهش مقاومت بتن در مقابل تهاجم عامل‌های مهاجم می‌گردد و همچنین شکاف‌های بزرگ مقاومت بتن جهت جلوگیری از خوردگی فولادهای تقویتی را کاهش می‌دهند. ترک‌ها می‌توانند به علت بارگذاری بیش از حد، روش ساخت و ساز نامناسب، طراحی نادرست و یا مکانیزم‌های زوال مانند واکنش قلیایی-سیلیسی و دوره های یخ زدن و آب شدن ایجاد شوند. ترک‌ها دوام سازه‌های بتنی را با ایجاد مسیر ترجیحی برای نفوذ عوامل مزاحم که ممکن است خود بتن یا میلگردهای موجود در بتن را مورد حمله قرار دهد، کاهش می‌دهند. همچنین وقوع ترک‌ها ممکن است سازه را از لحاظ مکانیکی تضعیف کند و سختی را کاهش دهند یا سبب از دست رفتن آب بندی سازه شود. وقوع ترک‌ها در طول عمر سازه‌های بتنی امری اجتناب ناپذیر است[۲].

پوست‌ها و بافت های آسیب دیده موجودات زنده می‌توانند به خودی خود بهبود یابند زیرا میزبان می‌تواند مواد مغذی را برای تولید جایگزین های جدید برای بهبود قسمت‌های آسیب دیده تولید کند. ساختارهای هوشمند ترکیب مهندسی از چند ماده معمولی است که خواص سنجیده و عملکرد مناسب را با توجه به خواص تک تک اجزای تشکیل دهنده از خود نشان

می‌دهند. بسیاری از مواد خود ترمیم در دسته‌ی ساختارهای هوشمند قرار می‌گیرند زیرا دارای عوامل ترمیم کننده‌ی محصور شده هستند که هنگامی که آسیبی رخ می‌دهد آزاد می‌شوند و بدان وسیله آسیب به وجود آمده را ترمیم کرده و عمر مفید مواد را افزایش می‌دهند[۲].

جهت خود بهبودی مصالح سیمانی، هنگام آسیب دیدگی تولید و حصول مواد جدید ضروری می‌باشد، تا ترک‌ها را پر کند. با توجه به این موضوع که چگونه به مواد سیمانی ویژگی-های خود بهبودی داده شده و یا بهره‌وری خودترمیمی این مصالح افزایش یابد، تحقیقات آزمایشگاهی و تجربی زیادی صورت گرفته است و راهکارهای خلاقانه‌ی زیادی طی چند دهه‌ی گذشته ارائه شده است[۷].تحقیقات اخیراً نه تنها بروی کاهش قابلیت نفوذپذیری در بتن ترک خورده با توجه به پدیده خودترمیمی تمرکز کرده‌اند بلکه بروی بدست آوردن استحکام مکانیکی مجدد بتن نیز تحقیقاتی صورت گرفته است[۵]. مشاهده شده است که برخی ترک‌ها در سازه-های بتنی قدیمی با مواد بلورین سفید رنگی پوشانده شده اند که اشاره به قابلیت بتن در ترمیم خود به خود ترک‌ها با تولید مواد شیمیای توسط خودش می‌باشد[۳].در بخش‌های بعدی به عوامل ایجاد ترک در بتن، مکانیزم‌های خودترمیمی و سایر موارد مهم از جمله مروری بر تحقیقات انجام شده، پرداخته می‌شود.

۲ ۲-عوامل ایجاد ترک در بتن

ترک در اعضاء بتنی به دلایل مختلفی ایجاد می‌شود که برخی از آنها به دلیل تغییرات حجمی بتن و به ویژه خمیر سیمان حاصل می‌گردد. البته ترک‌های ناشی از خمش و برش دراعضاء سازه‌ای از این امر مستثنی است. سایر ترک‌هایی که در بتن مشاهده می‌شود به دلایل اجرائی و یا شرایط محیطی حاکم بر سازه در حین بهره برداری از قطعه بتنی بوجود می‌آید. در حین اجرا و در چند روز اول ترک‌های ایجاد شده در بتن قبل از سخت شدن و همچنین در بتن سخت شده به ترتیب به دلیل جمع شدگی خمیری و جمع شدگی ناشی از خشک شدن مشاهده می‌شود. در مرحله بهره برداری از بتن به دلایلی مانند تر و خشک شدن متوالی، یخ زدن و آبشدن پی در پی، حمله سولفات‌ها، خوردگی میلگردها و انبساط ناشی از واکنش سنگدانه‌ها با قلیائی‌ها و عوامل دیگر در طی زمان ممکن است عضو بتنی ترک بخورد.

۲ ۳-تاثیر نرمی سیمان بر واکنش هیدراتاسیون

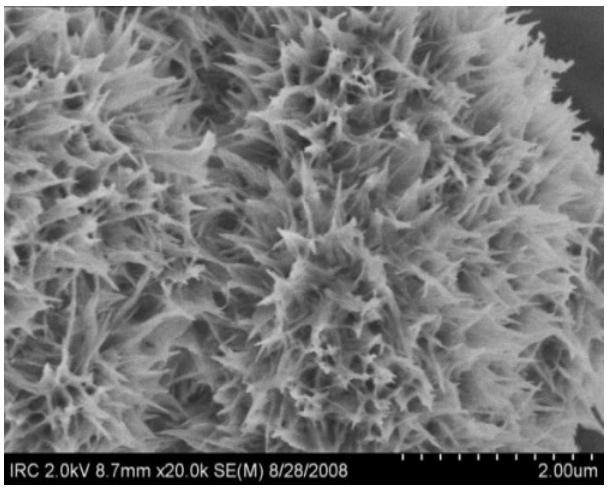
سیمان به تنهایی شن و ماسه را به هم نمی‌چسباند، بلکه خاصیت چسبندگی را فقط وقتی با آب مخلوط می‌شود، بدست می‌آورد. واکنش شیمیایی سیمان با آب، که معمولا به آن هیدراتاسیون سیمان گفته می‌شود، محصولاتی را تولید می‌کند که دارای مشخصات گیرش و

سخت شدگی هستند.واکنش‌های سیمان با آب براساس معادلات ۲-۱ و ۲-۲ انجام می‌شود. در شکل ۲-۱ نیز تصویر از ژل C-S-Hنشان داده شده است.

$$C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2 \qquad ۲-۱$$

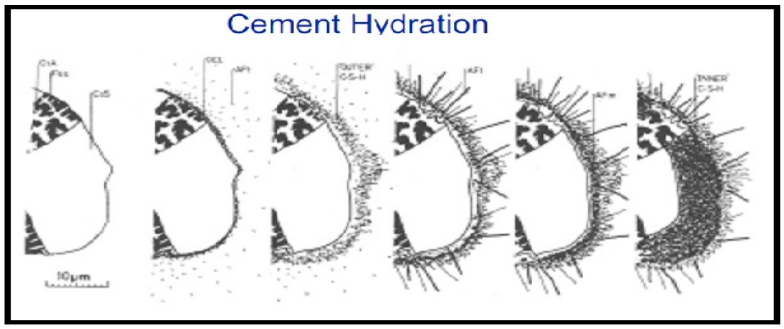
$$C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2 \qquad ۲-۲$$

در این معادله C، S وHبه ترتیب بیانگرCaO، SiO_2 و H_2Oمی‌باشند.



شکل۲-۱ - تصویر میکروسکوپ الکترونیکی ژل سیمان[۱]

علاوه بر ترکیب شیمیایی اجزای سیمان، نرمی سیمان نیز بر واکنش زایی آن با آب تاثیر گذار است. همان طور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، هیدراتاسیون سیمان از سطح ذرات سیمان شروع می‌گردد و سپس به عمق ذرات نفوذ می‌کند. بنابراین روند هیدراتاسیون سیمان به نرمی ذرات بستگی دارد و برای یک توسعه سریع مقاومت،نرمی زیاد ذرات ضروری است. لذا کل سطح سیمان معرف مواد قابل دسترس برای هیدراتاسیون می‌باشد.به طور کلی هرچه سیمان نرم تر باشد، سریعتر با آب واکنش می‌دهد. برای یک ترکیب مشخص سیمان، میزان واکنش زایی و در نتیجه کسب مقاومت سیمان، با ریزتر آسیاب کردن سیمان زیادتر می‌شود. هیدراتاسیون ذرات سیمان بزرگتر از ۴۵ میکرون مشکل است و ذرات بزرگتر از ۷۵ میکرون نیز ممکن است هرگز به طور کامل هیدراته نشوند. در صنعت معمولا جهت اندازه‌گیری نرمی سیمان از آزمایش بلین استفاده می‌شود[۱].



شکل۲-۲- فرآیند هیدراتاسیون سیمان در سطح[۱]

۲ ۴- انواع خودترمیمی بتن

الف - خودترمیمی ذاتی :

به طور کلی خودترمیمی به توانایی یک ترک برای کاهش عرض خود در طول زمان اشاره دارد. به عبارت دیگر اگر خواص خودترمیمی یک ماده برای آن ماده عمومی وکلی باشد، آن ماده پتانسیل قرار گرفتن در دسته مواد هوشمند را دارد و پروسه ترمیم آن، ترمیم خود به خود نامیده می‌شود. خودترمیمی ذاتی یا خود به خودی بر این موضوع اشاره دارد که ترمیم بدون کمک عوامل خارجی امکان پذیر می‌باشد. مواد سیمانی این قابلیت ذاتی و خود به خود ی برای ترمیم را دارا می‌باشند، چرا که با مرطوب شدن یک نمونه‌ی سیمانی در آب هیدراتاسیون مجدداً شروع شده و واکنش‌ها ادامه یابد. بدیهی است این امر زمانی اتفاق خواهد افتاد که در نمونه، سیمان هیدراته نشده، در ماتریس خمیر سیمان وجود داشته باشد[۲].

ب- خودترمیمی غیرذاتی:

زمانی که پیش از ساخت بتن تمهیدات خاصی جهت انجام پروسه خودترمیمی در نظر گرفته شود و یا به عبارتی ازعامل‌های به غیر از سیمان جهت خودترمیمی استفاده شود خودترمیمی غیرذاتی رخ می‌دهد. به عبارت دیگر در صورتی که جهت انجام خودترمیمی در بتن، از افزودنی‌های شیمیای یا معدنی و همچنین از عوامل خارجی مثل فیبرهای شیشه‌ای حاوی مواد خودترمیمی استفاده شود، در صورت بهبود بتن به آن خودترمیمی غیرذاتی گفته می‌شود.

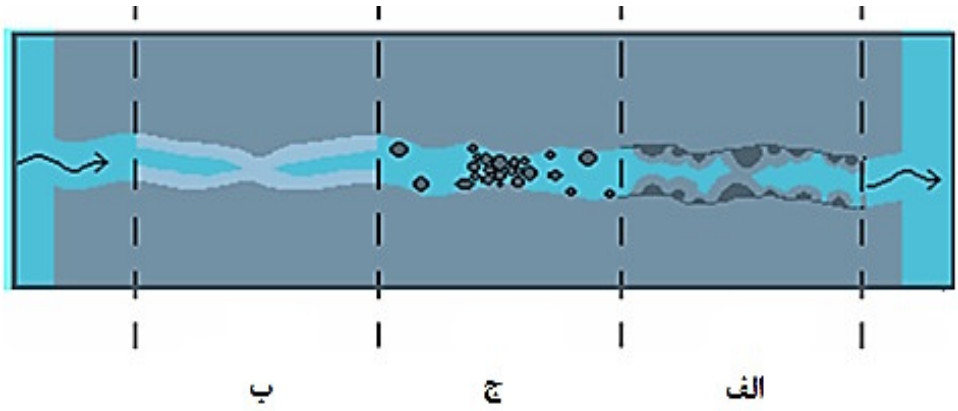
۲ ۵ - مکانیزمهای خودترمیمی

- الف- مکانیزم‌های خودترمیمی ذاتی: براساس گزارشات منتشر شده به مکانیزم‌های زیر می توان اشاره کرد[۶].

۱- متورم شدن و هیدراتاسیون مجدد ذرات سیمان. که این امر در ناحیه الف در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

۲- ته نشینی کریستال‌های کلسیم کربنات. این فرآیند در ناحیه ب در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

۳- مسدود شدن مسیرهای جریان به خاطر ته نشینی ناخالصی‌های آب یا حرکت ذرات بتن که در زمان ایجاد ترک در بتن، به وجود آمده‌اند که این مهم در ناحیه ج در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل۲-۳ - مکانیزم‌های خودترمیمی ذاتی[۶]

ب- مکانیزم‌های خودترمیمی غیرذاتی بتن :

۱- قرار دادن فیبرهای شیشه ای و میکروکپسول‌های حاوی مواد خودترمیم مانند چسب‌های اپوکسی در بتن.

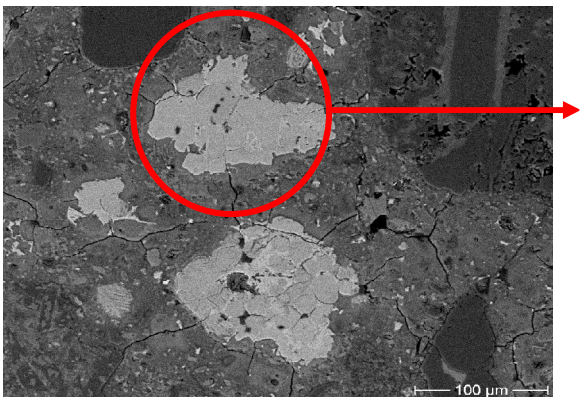
۲- استفاده از افزودنی‌های معدنی و شیمیایی نظیر خاکستر بادی، میکرو سیلیس، افزودنی-های منبسط شونده و ... می‌تواند باعث ترمیمیم و بهبودی ترک‌های بتن شود.

در ادامه به شرح مختصری از این مکانیزم‌ها پرداخته می شود.

۲ ۶-مکانیزم‌های خودترمیمی ذاتی بتن

الف -هیدراتاسیون مجدد خمیر سیمان:به طور کلی این پدیده شامل دو مکانیزم اصلی می-باشد. در ترمیم ترک داخلی، این پروسه در حال حاضر بر پایه ی هیدراتاسیون بیشتر ذرات هیدراته نشده می‌باشد. این ذره ها می‌تواند سیمان پرتلند ساده (معمولی) و همچنین دیگر انواع بیندرها باشند. همانطور که قبلا ذکر شد روند هیدراتاسیون از سطح ذرات سیمان شروع شده و در عمق ذرات ادامه می‌یابد. همچنین پس از مراحل اولیه هیدراتاسیون ممکن استدانه-های سیمان به طور کامل هیدراته نشده باشند. در شکل ۲-۴ دانه‌های سیمان هیدراته نشده را

پس از ۹۰ روز هیدراتاسیون نشان می‌دهد[۸]. این امر به خصوص در ترکیبات دارای مقدارکم نسبت آب به سیمان بیشتر اتفاق می‌افتد. اما چنین مکانیزمی به طور کامل در ترمیم شکاف-های معمولی در بتن قابل اطمینان نیست. به طور کلی حجم محصولات هیدراتاسیون شده سیمان برای بستن شکاف‌های بزرگ کافی نمی‌باشد و این امر برای ترمیم شکاف‌هایی که عرض آنها کمتراز ۵۰ میکرون می‌باشد محدود می‌شود. در محدوده‌ی عرض ترک۵۰ تا۱۵۰میکرون بهبود جزئی می‌تواندانجام شود.



شکل۲-۴- وجود سیمان هیدراته نشده در خمیر سیمان[۸]

ب-ته نشینی کلسیم کربنات:در کنار هیدراتاسیون بیشتر مکانیزم دیگر شامل ته نشینی کلسیم کربنات میباشد که پروسه ی دیگر خود ترمیمی شکافهای سطحی روی بتن سخت شده می‌باشد. دلیل اصلی خود ترمیمی به تشکیل کلسیم کربنات نسبت داده شده است. یکی از محصولات اصلی واکنش هیدراتاسیون سیمان هیدروکسید کلسیم می‌باشد. درصورتیکه به بتن ترک خورده یا ترک نخورده آب حاوی CO_2برسد، واکنش بین یون های کلسیم موجود درخمیر سیمان و دی اکسیدکربن اتمسفر که محلول در آب است، مطابق معادلات ۲-۳ تا ۲-۵ رخ خواهد داد و کربنات کلسیم ته نشین خواهد شد این پدیده در صورت وقوع در بتن معمولی به پدیده کربناتاسیون نیز مشهور می‌باشد. این نوع از خود ترمیمی به طور عمده نفوذ پذیری آب را کاهش می‌دهد و بنابراین مهمترین عامل مانع نفوذ آب در سازه‌های بتنی مانند سازه-های دریایی، منبع‌ها و سدها می‌باشد. از نظر دوام این نوع از خود ترمیمی مقاومت بتن شکاف دار را در برابر نفوذ مواد غیر مطلوب بهبود می‌بخشد. مطالعات آزمایشگاهی وتجربیات عملی متنوعی وجود داردکه نشان دهنده آن است که ترمیم شکاف در مواد سیمانی می‌تواند منجر به کاهش نفوذ آب درطول زمان شود[۹].

$$Ca(OH)_2 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2(OH)^- \qquad ۲-۳$$

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow CO_3^{2-} + 2H^+ \qquad ۲-۴$$

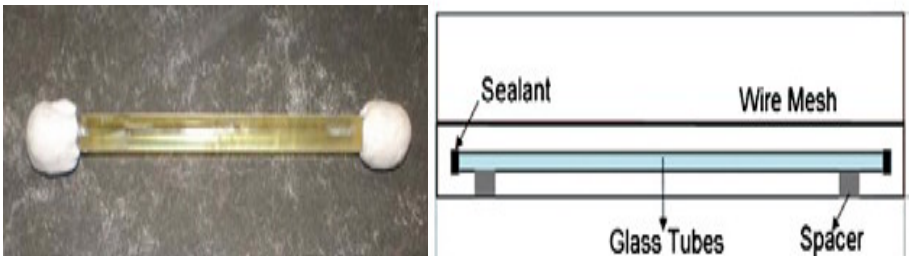
$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \leftrightarrow CaCO_3 \qquad ۵-۲$$

از آنجایی که سیمان‌های پرتلند هیدراته شده دارای قلیائی‌هایی در مایع منفذی و حدود ۲۰ درصد وزنی هیدروکسید کلسیم جامد می‌باشد، لذا معمولا مقادیر قلیای کافی برای نگاهداشتنpHبتن در بالای۱۲ موجود است. در شرایطی که قلیائی‌ها و هیدروکسید کلسیم یا کربناته شده و یا با محلول اسیدی خنثی شده باشند، pHبتن در نزدیکی فولاد ممکن است به کمتر از ۱۱/۵ کاهش یابد. در نتیجه، لایه محافظ فولاد از بین رفته و زمینه برای فرآیند خوردگی میلگردهای مدفون در بتن آماده می‌شود[۱].

به جز دو مکانیزمی که بیان شد مسدود کردن منافذ بوسیله‌ی ناخالصی‌های موجود در آب و ذرات آزاد ناشی ازخرد شدن و ایجاد شکاف نیزبه عنوان پروسه‌های ممکن درخود ترمیمی بتن درنظر گرفته می‌شود.

۲ ۷ - مکانیزم‌های خودترمیمی غیرذاتی بتن :

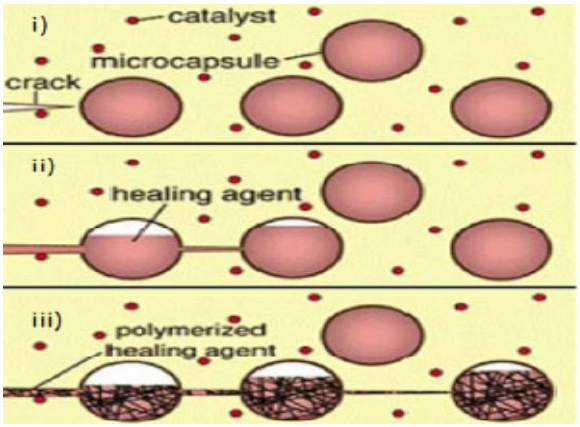
الف -استفاده از فیبرهای شیشه‌ای و میکروکپسول‌های حاوی چسب:لی[۱] و همکارانش[۱۰] یک ترکیب سیمانی خودترمیمی باهوش را مورد بحث قرار دادند. هدف بازیافتن خصوصیات مکانیکی وسختی مصالح بعد از اعمال بارهای اضافی مانند زلزله بود. در این روش فیبرهای نازک شیشه ای با بتن ترکیب می‌شوند. این فیبرهای شیشه‌ای کهحاوی مواد شیمیایی (چسب قوی) می‌باشند،در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. هنگامی که بتن ترک می‌خورد فیبرهای شیشه‌ای شکسته شده و مواد شیمیای موجود در این فیبرها آزاد می-گردد و سپس این مواد ترک‌ها را درز گیری کرده و بعد توسط عمل آوری با هوا خصوصیات مکانیکی بتن را بازیابی می‌کند. این موضوع باید ذکر شود که ترک‌های که به این روش ترمیم می‌شوند وابسته به عرض ترک‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر ترکهای بسیار بزرگ نیاز به فیبرهای شیشه‌ای بزرگ دارند که این موضوع تاثیر منفی بر روی خصوصیات بتن دارد و مواد شیمیایی زیادی موردنیاز می‌باشد.



شکل۲ -۵ - فیبرهای شیشه‌ای حاوی مواد شیمیایی جهت خودترمیمی بتن[۱۰]

[۱] *V.C.Li*

رویکرد دیگر استفاده از میکرو کپسول جهت خود بهبودی توسط وایت[۲] و همکارانش[۱۱]شرح داده شده است. هنگامی که بتن ترک می‌خورد میکرو کپسول‌های قرار داده شده در بتن را دچار گسیختگی می‌کند و عامل خودترمیمی از کپسول‌ها خارج می‌شود تصویر میکروکپسول شکسته شده در شکل۲-۶-الف نشان داده شده است. همچنین جهت انجام واکنش عامل خودترمیمی و افزایش حجم این عامل پس از خارج شدن از میکرو کپسول-های، یک کاتالیزور در هنگام اختلاط به بتن اضافه می‌شود و بلافاصله بعد ازشکسته شدن کپسول‌ها و آزاد شدن عامل خودترمیمی این کاتالیزور با عامل خودترمیمی واکنش می‌دهد و عمل پولیمریزاسیون (افزایش حجم ناشی از واکنش کاتالیزور با عامل خودترمیمی) صورت می-گیرد و باعث بسته شدن ترک‌ها می‌شود. شکل ۲-۶- ب روند این نوع خود بهبودی را نشان می‌دهد.



(الف) **(ب)**

شکل۲ -۶ -الف)کپسول‌های حاوی مواد ترمیم کننده، ب)روند شماتیک ترمیم ترک توسط میکروکپسول[۱۱]

در تحقیق انجام شده توسط نیشی‌واکی[۳][۱۲]، میکرو کپسول‌های پر شده حاوی رزین اپوکسی (با قطر ۲۰ تا ۷۰ میکرون) و میکرو کپسول‌هایی حاوی رزین اکریلیک (با قطر ۱۲۵-۲۹۷ میکرون) به عنوان یک سخت کننده مورد استفاده قرار گرفته است.

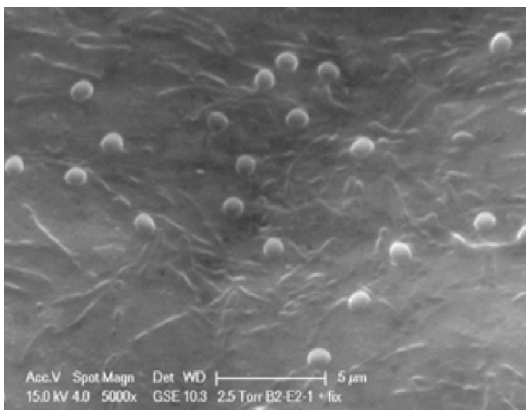
ب -استفاده از باکتری‌ها: چندین تحقیق می‌توان یافت که ترمیم ترک‌ها توسط میکروارگانیزم‌ها صورت گرفته است. در بسیاری از پژوهش‌ها از یک افزودنی بیوشیمیایی حاوی یک باکتری کارا و غیرفعال استفاده شده است. این رویکرد به نیمه‌ی سال ۱۹۹۰ در تحقیقات

[۲] *White SR*
[۳] *Nishiwaki*

گولاپودی[۴] و همکارانش[۱۳]بر می‌گردد. ایده‌ی آنها این بود که باکتری به تسریع ته نشین شدن کربنات کلسیم ($CaCO_3$) در ناحیه ی دارای ترک‌های ریز کمک می کند. با اینکه در نگاه اول ممکن است به دلیل خاصیت قلیایی بالای ماتریس بتنی ناشی از واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان، تولید هیدروکسیدکلسیم و خشکی محیط، بتن زیستگاه مناسبی برای باکتری‌ها به نظر نرسد، اما با نگاهی دقیق‌تر به وجود باکتری‌های مقاوم در برابر محیط قلیایی بالا که به دلیل خشکی محیط به صورت پیش فعال یا به اصطلاح خواب در بتن می‌توان پی برد. تشکیل رسوب کلسیم کربنات با استفاده از فرآیندهای میکروبیولوژیکی ناشی از یک سری واکنش بیوشیمیایی است. این واکنش‌ها در معادلات ۲-۶ و ۲-۷ نشان داده شده است. چنین انتظار می‌رود که این نوع خودترمیمی بتن، یک دوام طولانی مدت را نتیجه دهد ضمنا این بتن برای شرایط محیطی مرطوب بسیار مناسب می‌باشد. تصویر میکروسکوپ الکترونیکی گرفته شده از باکتری‌ها در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.

$$Ca^{2+} + Cell \rightarrow Cell - Ca^{2+} \qquad ۶\text{-}۲$$

$$Cell - Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow Cell - CaCO_3 \qquad ۷\text{-}۲$$



شکل۲-۷ باکتری‌های ترمیم کننده بتن[۱۴]

خصوصیت باکتری جهت ساخت بتن خودترمیم را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود.

۱- قابلیت زنده ماندن در مدت زمان طولانی در محیط قلیایی بتن با pHدر حدود ۱۱ تا ۱۳.
۲- برخورداری از مقاومت مکانیکی کافی برای زنده ماندن در زمان اختلاط.
۳- عدم تاثیر در کاهش مقاومت اولیه و ثانویه بتن.

علاقه مندان می‌توانند جهت اطلاعات بیشتر به مراجع [۱۴-۱۵]مراجعه نمایند.

ج -استفاده از افزودنی‌ها:محققان جهت دستیابی به بهبود کامل مکانیکی و نفوذپذیری

[۴] *Gollapudi*

ترک‌های با عرض ۱۰۰ تا ۴۰۰ میکرون به فکر استفاده از افزودنی‌های مختلف افتادند تا با شناخت رفتار افزودنی‌های مختلف با سازه‌های بتنی قادر به تولید و ساخت بتنی توانمند با هزینه های تعمیر و نگهداری پایین باشند. همچنین باتوجه به این موضوع که در نسبت‌های معمولی و بالای آب به سیمان میزان آب موجود بیشتر بوده و باعث افزایش درجه هیدراتاسیون و درنتیجه کاهش قابلیت خودترمیمی ذاتی بتن می‌شود. بنابراین اگر بخواهیم یک بتن خودترمیم با نسبت آب به سیمان معمولی داشته باشیم لازم است مواد افزودنی دیگری به منظور کریستاله شدن مجدد در ترک، به بتن اضافه شود. همچنین بعضی از محققین معتقد هستند که مکانیزم‌های خودترمیمی ذاتی بتن به تنها ترک‌های ۵۰ تا ۱۵۰ میکرون را بهبود می‌بخشند. در تحقیقات اخیر از مواد معدنی مانند خاکستر بادی، پودر سنگ آهک، میکروسلیس،مواد پلیمری، کریستال‌های منبسط شونده جهت خودترمیمی استفاده شده است[۱۶-۱۷].

۲ ۸ - شرایط وقوع خودترمیمی

شرایط وقوع خودترمیمی را می‌توان در پنج شرط زیر بیان کرد:

- ۱- حضور آب: وجود آب برای انجام واکنش‌ها بر اساس مکانیزم‌های ذکر شده ضروری می باشد. لایر[۵] گزارش نموده است که وقتی رطوبت نسبی از ۹۵% کمتر باشد میزان خودترمیمی بسیار پایین می‌باشد[۱۸]. بدیهی است برای انجام هیدراتاسیون مجدد و همچنین تبدیل هیدروکسید کلسیم به کربنات کلسیم نیاز به آب می‌باشد.

۲- عرض ترک: خودترمیمی فقط می‌تواند ترک‌های کوچک را ببندد. بیشترین عرض ترک ۰/۲میلیمتر می‌باشد که احتمالا در محدوده بیشتر از آن خودترمیمی اتفاق نمی‌افتد و به شرایط محیطی وابسته نمی‌باشد، ولی برای ترکهای بین ۰/۲ تا ۰/۰۵ میلیمتر نتایج ضد نقیضی گزارش شده است[۶].

۳- فشار آب: هنگامی که جریان آب از میان شکاف‌ها به صورت سریع و با فشار جریان پیدا می‌کند، خودترمیمی به وقوع نمی‌پیوندد. به عبارتی اگر فشار آب عبوری از میان ترک زیاد باشد، آب پرفشار با شستن عامل‌های خودترمیمی ذاتی اجازه بسته شدن کامل ترک را نمی-دهد. این موضوع به طور روشن دارای یک حداکثر نسبت بین ارتفاع آب و سختی ساختار برای یک عرض ترک معین می‌باشد[۶].

۴-محیط عمل آوری: مایع عمل آوری ممکن است اجازه ته نشینی و انجام واکنش را ندهد. مایعی که می تواند باعث ته نشینی و واکنش شود می‌تواند بروی بهبود ترک‌ها تاثیر بگذارد و باعث کاهش یا افزایش سرعت خودترمیمی شود[۶].

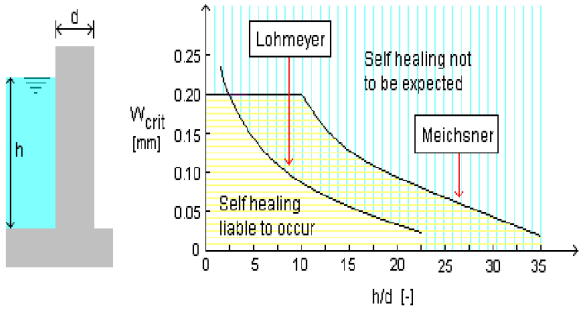
۵-پایداری ترک: هنگام انجام پروسه خودترمیمی ترک باید ثابت باشد (عرض و طول ترک

---

[۵] *K.R. Lauer*

تغییر نکند). هنگامی که ترک‌ها پویا و پرتحرک باشند بدین معنی است که پهنای ترک‌ها در طول زمان دست خوش تغییر شده و احتمالاً ترک‌های که پروسه خودترمیمی در آنها صورت گرفته است و یا در حال انجام است دوباره تخریب شده اند.

- مطابق تحقیقات لامیر[۶] و میچسنر[۷] محدوده عرض ترک‌ها که وابسته به فشار آب و... می باشد به صورت شکل۲-۸ بیان شده است[۱۹].هنوز بحث‌های زیادی درمورد شرایط مناسب جهت خودترمیمی و محدوده استفاده از خودترمیمی وجود دارد. در تحقیقات متفاوت بیشترین عرض ترک متغیر است که این موضوع حاکی از شرایط آزمایش‌های انجام شده در هر تحقیق می‌باشد. محدوده خودترمیمی ذاتی در شکل۲-۸ نشان داده شده است.



شکل ۲-۸ - تاثیر نسبت h/d بروی عملکرد خودترمیمی بتن[۱۸]

در این شکل h: ارتفاع آب بالای ترک،d: عمق ترک و w: عرض ترک می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در محدوده زیر منحنی ترسیم شده توسط لامیر ترک‌ها می‌توانند بهبود و در بالای منحنی ترسیم شده توسط میچسنر خودترمیمی نمی‌تواند رخ دهد وی بیشترین عرض ترک را که می‌تواند خودترمیمی در آن رخ دهد۲۰۰ میکرون معرفی کرده است در حالی که در تحقیقات مختلف بیشترین عرض ترک متغیر بوده است. نسبت h/d نشانگر موقعیت و عرض ترک است و با افزایش این نسبت عرض ترک کم می‌شود به عبارت دیگر در صورتی که فشار آب زیاد باشد ترک‌های کوچک بهبود می‌یابند و بعکس.

۲ ۹- مشخصه‌های مکانیکی ترک‌های ترمیم شده

در بیشتر تحقیقات عرض ترک‌های ترمیم شده مورد بررسی قرار گرفته و تقریبا هیچ توجه‌ای به بهبود مشخصه‌های مکانیکی نشده است. جکبسون[۸] و همکارانش[۲۰] بازیافت تنش فشاری بعد از بهبود ترکها در نمونه‌های که با یخ زدن وآب شدن دچار خرابی شده بودند را مورد بررسی قرار داده‌اند.افزایش در تنش فشاری بسیار کم بود ۰ تا ۰%، ولی نفوذپذیری نمونه‌های

---

[۶] *Lohmeyer*

[۷] *Meichsner*

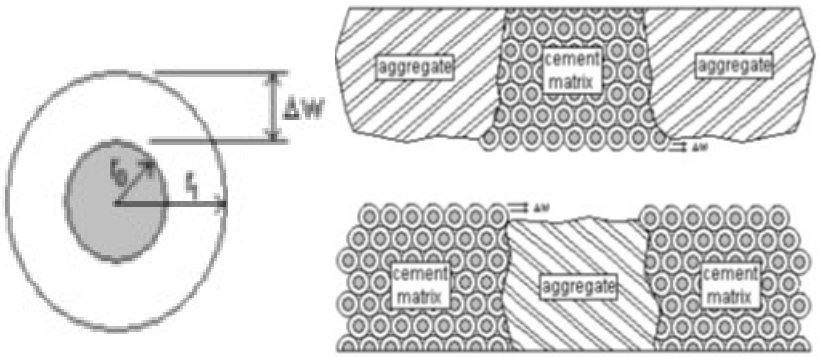
[۸] *S,Jacobsen*

ترمیم شده بهبود بیشتری را نشان می‌داد.

- عبدالجواد[۹] و همکارانش[۲۱] تاثیر بارگذاری بیش از اندازه در سنین اولیه بتن را در سال های اخیر مورد بررسی قرار دادند. وی به این نتیجه رسید که بارگذاری بتن تا ۹۰ درصد مقاومت نهایی جهت ایجاد ترک در بتن، پس از ۸ ساعت از ساخت نمونه‌ها، برروی مقاومت تاثیر نمی‌گذارد. به عبارت دیگر ریز ترک‌های ایجاد شده در بتن در سنین اولیه به طور کامل بهبود یافته‌اند. وی همچنان بیان کرد خودترمیمی کامل ترک‌ها (پرشدن ترک‌ها) به معنی بازیابی استقامت کامل نیست.

۲ ۰ - مدل های خود ترمیمی:

الف -مدل پیشنهادی ادوارسن جهت محاسبه پتانسیل خودترمیمی بتن بر اساسهیدراتاسیون مجدد: ادوارسن[۱۰][۲۲] با استنتاج از یک تئوری بیان کرد که هیدراتاسیون مجدد فقط می توانند ترک‌های بسیار کوچک را بهبود دهد. او محاسبه کرد که هیدراتاسیون مجدد فقط می تواند ترک‌هایی تا ۶ میکرون را ترمیم کند. مدلی که وی برای محاسبات خود مورد استفاده قرار داده به شکل ۲-۹ می باشد**[۲۲]**.



(ب) **(الف)**

شکل۲ -۹ -(الف) مدل پیشنهادی ادوارسون جهت خودترمیمی، (ب) دانه سیمان [۲۲]

ادوارسون جهت محاسبات خود فرضیات زیر را در نظر گرفت:

۱- تمام ذرات سیمان دارای قطر برابر و مساوی ۵۰ میکرون می باشند(r_0=۲۵μm).

۲- شکافها در زمانی رخ می‌دهد که درجه هیدراتاسیون فقط **%** است، یا به عبارت دیگر ترک در سنین اولیه رخ میدهد.

---

[۹] *Y. Abdel-Jawad*

[۱۰] *C.K. Edvardsen*

۳- بعداز هیدراتاسیون کامل حجم ذرات سیمان هیدراته شده دو برابر حجم سیمان هیدراته نشده اولیه می باشد.

۴- ترکها در امتداد ذرات سنگ دانه و به صورت پیوسته ادامه می یابند. فرض شده است که همیشه یک طرف ترک سنگدانه و در طرف دیگر سیمان وجود دارد. این امر به صورت شماتیک در شکل ۲-۹ نشان داده شده است.

درصورتیکه قطر ذرات سیمان r_0باشد بر اساس فرض شماره ۳ حجم یک دانه سیمان از رابطه ۲-۸ قابل محاسبه می باشد. V_1 حجم دانه سیمان کاملاهیدراته شده می‌باشد که دو برابر V_0فرض شده است. باتوجه به رابطه $V_1=2\ V_0$ قطر ذرات هیدراته شده در رابطه ۲-۱۰ محاسبه شدکه برابر ۳۱/۵ میکرون می‌باشد و همچنین از رابطه ۲-۱۱ عرض قابل ترمیم ترک وقتی که درجه هیدراتاسیون ۵% باشد، ۶ میکرون محاسبه شده است.

$$V_0=\frac{3}{4}\pi r_0^3 \qquad ۸\text{-}۲$$

$$V_1=\frac{3}{4}\pi r_1^3 = 2\ V_0 \qquad ۹\text{-}۲$$

$$r_1=\sqrt[3]{2}\ .\ r_0=31.5\ \mu m \qquad ۱۰\text{-}۲$$

$$\Delta w= (r_1- r_0)\ .\ (1-\alpha) = (31.5 -25)\times 0.95 = 6\ \mu m \qquad ۱۱\text{-}۲$$

به علت این که فرض شده است که فقط در یک طرف ترک سیمان وجود دارد، فقط ترک-های ۶ میکرون یا کوچکتر می‌توانند با هیدراتاسیون مجدد بهبود یابند. بررسی‌های ادوارسن نشان داد که با هیدراتاسیون مجدد ترک‌های با عرض ۰/۱ میلیمتر ترمیم می‌یابند و ادامه هیدراتاسیون نمی‌تواند دلیل اصلی خودترمیمی بتن باشد. وی در محاسباتش درجه هیدراتاسیون را فقط ۵% در نظر گرفته بود و این بدان معنی بود بتن مورد بررسی بسیار جوان بوده است[۲۲].

ب - مدل ارائه شده جهت تحلیل جریان عبوری آب از میان ترک: مطالعات و تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده‌اندکه ترمیم ترک‌ها در مواد سیمانی منجر به کاهش تدریجی نفوذپذیری تحت گرادیان هیدرولیکی در طول زمان می‌شود و در بعضی موارد، ترک‌ها می-توانند به طور کامل بسته شوند و بهبودی کامل حاصل شود. مدلی که برای تحلیل جریان عبوری اولیه آب از میان شکاف‌های موجود در بتن (قبل از خودترمیمی) استفاده شده است، تئوری صفحه‌های موازی منشعب شده می‌باشد که در متون اصلی مکانیک سیالات توضیح داده شده است[۲۳]. این مدل جریان را حرکت سیال تراکم ناپذیری فرض کرده است که بین صحفه‌های موازی به صورت جریان آرام حرکت می‌کند. معادله‌ای که از این مدل برای تخمین

جریان آب از میان یک شکاف با صفحات مشابه و موازی جاری بدست می‌آید را می‌توان به شکل رابطه شماره ۲-۱۲ بیان کرد.

$$q = \Delta p.b.w^3/12.\eta.d \qquad ۱۲-۲$$

در این رابطه q:جریان آب از میان شکاف‌های مشابه و ایده‌آل شده (m/sec)، Δp:اختلاف فشار آبدر ورودی و خروجی ترک(N/m^2)،b:طول ترک(طول قابل مشاهده ترک در سطح ساختار(m)،W:عرض ترک(m)، d:طول مستقیم مسیر جریان در یک ترک و یا ضخامت نمونه(m) و η:لزجت مطلق(Ns/m^2) می‌باشد.

معادله ۲-۱۲ اغلب به قانون پوسلی[۱۱] معروف است و برای توصیف جریان آب در ترک های بتن استفاده می‌شود. این معادله نشان می‌دهد که عرض ترک عامل برجسته‌ای در نفوذ آب می‌باشد. در این مدل تغییرات عرض، طول و عمق ترک در طول مسیر پیوسته خطی در نظر گرفته شده است. به علت ناهموار بودن سطوح داخلی ترک، جریان آب از آنچه به طور تئوری از معادله ۲-۱۲ تخمین زده می‌شود بسیار کمتر است. بنابراین رابطه بالا توسط ضریب کاهنده ε اصلاح شده است و رابطه ۲-۱۳ ارائه شد[۹].

$$q_r = \varepsilon.\Delta p.b.w^3/12.\eta.d \qquad ۱۳-۲$$

در این رابطه q_r: جریان عبوری آب از میان ترکهای طبیعی(m/sec)، ε:ضریب کاهش برای ترکهای ناهموار می‌باشد.

مطالعات تجربی که قبلا صورت گرفته است ضریب εرا متغییر نشان داده‌اند. این ضریب کاهنده بین ۰/۰۲ تا ۰/۱۷ درآزمایش نفوذپذیری آب در قطعات سیمانی تقویت شده متغیر بوده است[۹].

۲ ۱۰ - آزمایش‌های مربوط به بررسی پدیده خودترمیمی

الف - آزمایش سرعت گذر امواج مافوق صوت[۱۲](UPV): روش اندازه گیری سرعت عبور امواج مافوق صوت به عنوان ابزاری برای آزمایش مصالح و به منظور تعیین کیفیت و مقاومت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش بوسیله یک فرستنده که در شکل ۲-۱۰-الف نشان داده شده است، امواج مافوق صوت تولید شده و مدت زمان عبور امواج از مصالح اندازه

[۱۱] *poiseulle*

[۱۲] *Ultrasonic pulse velocity*

گیری می‌شود و همچنین مسافت عبور امواج از نقطه ورود تا نقطه دریافت امواج همانطور که در شکل ۲-۱۰-ب نشان داده شده است، باید اندازه گیری شود تا بتوان سرعت را محاسبه کرد. این روش می‌توان به صورت غیرمخرب، محل و آرایش آرماتورهای مدفون در بتن را با ارسال امواج مافوق صوت تعیین نماید. همچنین یکی از روش‌های غیرمستقیم در برآورد مقاومت فشاری بتن استفاده از این آزمایش می‌باشد. نمودارهای کالیبره برای تعیین مقاومت فشاری بتن بدلیل حساسیت امواج مافوق صوت به پارامترهای مختلف بتن از جمله شرایط نگهداری و ... از عدم دقت کافی برخوردار است. برای رفع مشکل موجود و رسیدن به نتایج قابل قبول و با در نظر گرفتن سرعت عمل، فواید اقتصادی و کاربردی آن، از سیستم منطق فازی در تحقیقات اخیر استفاده شده است. ولی با این وجود مقاومت فشاری بدست آمده اعتبار زیادی ندارد. در بررسی پدیده خودترمیمی با این روش میزان آسیب و میزان بهبودی به ترتیب طبق روابط ۲-۱۴ و ۲-۱۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در رابطه ۲-۱۴ با افزایش بهبودی سرعت امواج عبوری با افزایش میزان بهبودی بیشتر شده و باعث کاهش درجه آسیب شده که نشان دهنده ترمیم بتن می‌باشد. همچنین در رابطه ۲-۱۵ با افزایش زمان بهبودی سرعت عبور امواج بیشتر شده و در نتیجه درجه بهبودی افزایش می‌یابد.

$$\text{میزان آسیب}(\%) = \left[1 - \left(\frac{UPV_t}{UPV_{initial}}\right)\right] \times 100 \qquad ۲\text{-}۱۴$$

$$\text{درجه بهبودی}\ (\%) = \left[\frac{UPV_t - UPV_{initial}}{UPV_{initial}} \times 100\right] \qquad ۲\text{-}۱۵$$

در این روابط UPV_t سرعت عبور امواج در زمان t پس از ایجاد ترک (km/sec) و $UPV_{initial}$ سرعت عبور امواج قبل ایجاد ترک در بتن می‌باشد.

همچنین می‌توان با استفاده از این روش موارد زیر را امورد بررسی قرار داد:

- تعیین محل و عمق ترک
- محاسبه مدول الاستسیته دینامیکی
- تعیین موقعیت میلگرد و مشخص نمودن ضخامت پوشش بتن
- محاسبه سایز آرماتور
- قابلیت اندازه‌گیری میزان خوردگی آرماتور و بتن
- اندازه گیری زمان و سرعت گذر امواج
- تعیین مقاوت فشاری بتن