

## مشخصات فنی و کاربرد انواع بتن خود ترمیم شونده

یکی از پرکاربردترین مصالحی که سالیان سال است در انواع پروژه های عمرانی و ساخت و ساز استفاده می شود، بتن می باشد. بتن به دلیل سختی و استحکام مناسبی که دارد می تواند مانند فلزات مقاومت بالایی در برابر نیروهای وارد شده بر سازه از خود نشان دهد. از طرفی خود مهندسين محقق دائماً در تلاش هستند تا بتوانند ویژگی های این مصالح را بهبود بخشند. یکی از انواع بتن هایی که در حال حاضر مورد استفاده قرار می گیرد، بتن خود ترمیم شونده است که در ادامه بیشتر با آن آشنا می شویم.



بتن های خود ترمیم  
شونده چیست؟



www.markazeahan.com

### بتن های خود ترمیم شونده چیست؟

تفاوت بتن خود ترمیم شونده با بتن های معمولی در ترکیبات آن است. در این بتن ها نوعی ذرات نانو با ویژگی های منحصر به فرد به نام نانو تیوب کربن (Carbon Nano Tubes) وجود دارد. اضافه کردن حتی مقدار کمی از این ماده به بتن خواص مکانیکی بتن هایی را که از دو فاز اصلی سیمان پرتلند و آب تشکیل شده اند را بهبود داده و به بتن خاصیت خود ترمیمی نیز خواهد داد. با این که اکنون از بتن خود ترمیم شونده در برخی پروژه ها استفاده می شود، اما هنوز محققان در حال بررسی تأثیرات مثبت این ذرات در بتن ها هستند.

تاریخچه استفاده از ذرات نانو لوله های کربنی (CNT) که نوعی کربن محسوب می شود به سال ۱۹۵۲ در روسیه بر می گردد؛ اما در آن زمان به خوبی نتوانستند تأثیرات این مواد را کشف کنند و به همین دلیل هم خیلی زود فراموش شد. با این حال مجدداً در سال ۱۹۹۰ این ذرات وارد حلقه تکنولوژی نانو شدند. به طور کلی نانو تیوب ها در فرم های استوانه ای و به صورت تک جداره و چند جداره در طول های متغیر برحسب میلیمتر تولید می شوند. عیب بزرگ این

مواد خاصیت جاذبه مولکولی بین دسته های نانو و تنه اصلی مواد است. در واقع اتصال نانو تیوب ها به صورت رشته ای بوده و این موضوع باعث عدم چسبندگی کافی بین آنها و بتن می شود.

## **اهمیت استفاده از بتن خود ترمیم شونده در ساخت و ساز**

استفاده از بتن ها در انواع پروژه های ساختمانی و عمرانی به دلیل ویژگی های بسیار عالی این مواد می باشد. از جمله این ویژگی ها میتوان به مقاومت بالا، شکل پذیری بسیار عالی بتن، مواد سازنده بسیار ساده و قابل دسترس، مقاومت بالا در برابر افزایش دما و عمر مفید طولانی آن اشاره کرد؛ اما بتن ها در کنار این همه ویژگی های منحصر به فرد، یک عیب بزرگ هم دارند و این عیب نیاز آنها به نگهداری است.

در واقع با اینکه بتن مقاومت فشاری بالایی دارد، در برابر نیروهای کششی ضعیف است. در نتیجه زمانی که نیروهای کششی به آن وارد می شوند، دچار تغییر حالت شده و احتمال ترک خوردگی وجود دارد. ترک ها در ابتدا می توانند آنقدر ریز باشند که حتی نتوانیم با چشم غیرمسلح آنها را ببینیم، اما رفته رفته گسترش پیدا کرده و در نهایت منجر به از هم گسیختگی بتن می شود. در گذشته ترمیم بتن های ترک خورده از طریق نیروهای انسانی و به سختی انجام می شد که در کنار وقت و پول زیادی که برای آن می گذاشتند نمی توانستند ترک ها را به طور کامل از بین ببرند و تنها احتمال خطر گسیختگی را کاهش می دادند. به همین دلیل به دنبال ساخت بتن خود ترمیم شونده رفتند تا این مشکل حل شود. بتن خود ترمیم شونده به شکل امروزی برای اولین بار در سال ۲۰۱۵ توسط محققان هلندی تولید شد که به آن زیست بتن نیز می گویند. این محققان توانستند با تلفیق علوم مهندسی عمران و زیست شناسی دریایی این محصول را تولید نمایند.



## تفاوت بتن خود ترمیم شونده با بتن معمولی

مهمترین تفاوت بین بتن معمولی و بتن خود ترمیم شونده همان قابلیت خود ترمیمی می باشد که در بتن معمولی وجود ندارد. با این حال این دو نوع بتن تفاوت های دیگری هم دارند؛ به عنوان مثال استفاده از تکنولوژی های خاص در بتن های خود ترمیم شونده باعث افزایش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن می شود. همچنین این دو نوع بتن از نظر قیمت بسیار با هم متفاوت هستند.

## انواع نانو تیوب های کربنی مورد استفاده در بتن خود ترمیم شونده

خود ذراتی که باعث ایجاد ویژگی خود ترمیم شوندگی در بتن می شوند، متفاوت هستند. نانو تیوب های کربنی که برای این نوع بتن ها مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از:

- **فیبر توخالی Hollow Fiber**

فیبرهای تو خالی برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ توسط دانشمندانی به نام درای و سوتوس کشف شدند. آنها متوجه شدند که این ماده می تواند یک سری مواد شیمیایی ذخیره شده را در بین فیبرهای توخالی آزاد کند. در نتیجه با اضافه کردن آن به سیمان می توان میزان نفوذپذیری، انعطاف پذیری، جلوگیری از خوردگی و از همه مهمتر خاصیت ترمیم شوندگی سیمان و بتن را به طور قابل توجهی بهبود داد. در این نوع بتن ها پدیده کبود شدگی در موجودات زنده در بتن

شبهه سازی می شود. این کار را با استفاده از یک سری رنگ های فلورسنت و جاری کردن آنها در میان الیاف بتن انجام می دهند. در نتیجه خود این رنگ وظیفه تشخیص محل آسیب دیده را دارد. به این شکل که بعد از تشخیص محل آسیب عامل ترمیم از فیبر نازک توخالی آزاد شده و با پر کردن ترک های ایجاد شده، آنها را ترمیم می کند. بنابراین مکانیزم ترمیم ترک های بتن از طریق فیبرهای توخالی در مراحل زیر انجام خواهد شد:

۱. شروع ترک خوردگی مقطع

۲. آزاد شدن مواد ترمیم کننده از فیبرهای توخالی

۳. پرشدن ترک ها از طریق عامل های ترمیمی

#### • کامپوزیت سیمانی مهندسی (Engineered Cementitious Composite ECC)

کامپوزیت سیمانی مهندسی که به آنها بتن سیمانی مهندسی یا به اختصار بتن ECC نیز گفته می شود از انعقاد خون و ترمیم جراحات توسط خود بدن در موجودات زنده الگو برداری کرده است. به این شکل که بتن به صورت دائمی ترک های ریزی که ایجاد می شود را ترمیم کرده و اجازه گسترش ترک یا ایجاد شکاف عمیق را به آن ها نمی دهند. این حالت حتی در صورت آسیب قطعه بتنی ناشی از بارهای زیاد نیز صورت می گیرد. مهمترین مزیت سیمان مهندسی که با نانو تیوب ها ساخته می شود این است که ترک های عمیق در آنها ایجاد نشده و ترک ها به شکل مویی هستند که حداکثر عرض آن ها ۶۰ میکرومتر می باشد. در نتیجه ویژگی انعطاف پذیری آن ها نیز بسیار بالاتر از بتن های معمولی است.

اگر بخواهیم به صورت دقیق تر عملکرد این سیمان های مهندسی را بررسی کنیم به این شکل است که کامپوزیت ها به عنوان حسگر عمل می کنند و در صورت کرنش جزئی در محل ترک آن ها را شناسایی کرده و به بخش ترمیم پیام ارسال می کنند. این شرایط دقیقاً مانند عملکرد نرون ها در بدن جانداران در هنگام زخم و جراحات است. بعد از فرستادن پیام ایجاد ترک، مقاومت الکتریکی و درنتیجه دما افزایش پیدا کرده و با ذوب پوسته محتوی عامل ترمیم، ترک ها از بین میروند. از آنجایی که طراحی این سیستم بر اساس آزاد شدن انرژی گرمایی محبوس شده در هنگام ایجاد ترک است، بسیار حساس می باشد. باید شرایطی را فراهم کرد که این افزایش دما در بتن خود ترمیم شونده منجر به تبخیر آب درونی و در نهایت پاشیدن ساختمان از هم نشود. در تحقیقاتی که برای بهبود این عامل ترمیم کننده انجام شده

است، به این نتیجه رسیده اند که اضافه کردن مقدار مشخصی از پوزولان خاکستر بادی به سیمان مهندسی می تواند تا حد زیادی این مشکل را رفع کند.

خاکستر بادی با هیدروکسید کلسیم  $\text{Ca(OH)}_2$  که فرایند واکنش هیدراتاسیون سیمان تولید می شود واکنش می دهد که نتیجه آن تولید یک ماده ژل مانند و سفید رنگ است که می تواند به راحتی ترک های مویی را به هم وصل کرده و عامل ترمیم کننده باشد. به همین دلیل از این نوع بتن برای حفاظت از بتن های مسلح به خصوص در محیط هایی مانند محیط های کلریده که احتمال خوردگی مواد بتن بیشتر است و امکان نفوذ مواد مضر به داخل بتن از طریق ترک های ریز و در نهایت خوردگی آرماتورهای موجود در آن وجود دارد، استفاده می شود. این بتن ها حتی بعد از ترک خوردن مانند بتن های معمولی مقاومت خود را از دست نداده و می توانند تغییر شکل و کرنش های کششی را به خوبی تحمل کنند.



#### • میکرو کپسول های پر شده Microencapsulated Healing Agent

الگوی اصلی استفاده از میکرو کپسول های پر شده برای بتن خود ترمیم شونده نقش گلبول های قرمز در لخته شدن خون و ترمیم زخم و جراحات است. در این روش کپسول هایی که حاوی مواد نانو تیوب ترمیم کننده هستند به بتن تزریق خواهد شد. این کپسول ها دارای شکل های کروی و نازک هستند که با مایع ترمیم کننده Agent Healing پر شده اند و اصولاً از نوع Dicyclopentadiene می باشند. زمانی که کپسول ها با ترک های ایجاد شده در بتن برخورد می کنند

می‌شکنند و عامل ترمیم به داخل ترک رها می‌شود و با کاتالیزور برخورد خواهد کرد. به این شکل عمل پلیمریزاسیون انجام شده و با تشکیل ماده ای بسیار سخت ترک ترمیم خواهد شد. در واقع واکنش بیت عامل ترمیمی و کاتالیزور بتن را ترمیم و از عمیق شدن ترک جلوگیری می‌کند.

- **مکانیزم ترمیم ترک های بتن در سیستم میکرو کپسول**

همیشه خرابی یک سازه بتنی از ایجاد ترک های ریز، گسترش آنها و عریض شدنشان شروع می‌شود. اگر بخواهیم از میکرو کپسول ها برای ترمیم خود به خودی بتن استفاده کنیم باید از کپسول های کوچک با ابعاد ۱۰۰ میکرومتر استفاده نماییم. این کپسول ها در همان زمان شروع ایجاد ترک، ترک های ریز را ترمیم کرده و از عمیق شدن و خرابی بتن جلوگیری می‌کنند. جداره این میکرو کپسول ها بسیار نازک در نظر گرفته می‌شود تا به محض ایجاد ترک کپسول ها به راحتی شکسته شده و عامل ترمیم را آزاد نماید. مزایای استفاده از این روش عمر مفید طولانی، تکمیل پلیمریزاسیون تنها در چند دقیقه و پر شدن سریع ترک های عرضی می‌باشد.

- **بتن خود ترمیم شونده با باکتری Bacteria**

روش دیگری که در آن از ترکیب مواد طبیعی و نانو برای خود ترمیمی بتن استفاده می‌شود، استفاده از باکتری است. در واقع در این روش با کمک نوع خاصی از باکتری ها که در طبیعت زندگی می‌کنند و قادر به زندگی در محیط بسیار قلیایی بتن نیز هستند، خاصیت ترمیم شونده را به بتن القا می‌کنند. این باکتری ها شامل دسته هایی از هاگ های پر تحمل باکتری متعلق به گروه باسیل ها می‌باشند. نوعی از این باکتری ها باسیلوس نام دارند که بیشتر در دریاچه های قلیایی در کشورهای روسیه و مصر به مدت طولانی زیسته اند.

این باکتری ها به همراه یک منبع تغذیه ای در گلوله های کوچک سرامیکی قرار گرفته و به شکل سوسپانسیون در آب بتن ریخته می‌شوند تا به صوت ناگهانی در مخلوط بتن خیس فعال نشوند. عملکرد این گوی های سرامیکی برای ترمیم بتن مانند میکرو کپسول ها می‌باشد و در صورت تزریق آب به بتن قابلیت خود ترمیمی بتن فعال می‌شود. در نتیجه باکتری ها تا زمانی که ترکی در بتن ایجاد شود، به شکل پیش فعال یا اصطلاحاً در حالت خواب در بین بتن باقی خواهند

ماند. در صورت ایجاد ترک و گسترش آن و نفوذ آب به مقطع، این باکتری ها فعال شده و با ترکیبات بتن واکنش می دهند. نتیجه این واکنش ها تولید رسوب سخت کربنات کلسیم است که از طریق آن منافذ ترک بسته می شوند.

لازم به ذکر است که تا قبل از کشف این نوع باکتری ها برای ترمیم بتن از محصولات باکتری معدنی برای ترمیم ترک در بتن استفاده می شد. عیب این مواد این بود که برای فعال سازی در محل آسیب دیده نیاز به تهویه دستی توسط نیروی انسانی داشتند. همچنین در اثر واکنش با بتن ماده بسیار سمی آمونیاک تولید می کردند که به همین دلیل استفاده از آنها ادامه پیدا نکرد.



## مزایای بتن خود ترمیم شونده

این بتن علاوه بر ترمیم خود به خودی بتن مزایای دیگری دارد که عبارتند از:

- افزایش طول عمر بتن
- بهبود خواص مکانیکی در بتن مثل افزایش مقاومت فشاری و خمشی
- افزایش پایداری و دوام سازه و جلوگیری از تخریب آن
- کاهش هزینه تعمیر و نگهداری سازه های بتنی
- جلوگیری از زنگ زدگی آرماتورهای داخل بتن

## معایب بتن خود ترمیم شونده

این نوع بتن در مقایسه با بتن معمولی عیب خاصی ندارد و میتوان گفت تنها عیب آن هزینه بالاتر بتن خود ترمیم شونده نسبت به بتن معمولی است. با این حال با توجه به اینکه در طولانی مدت هزینه تعمیر و نگهداری را کاهش می دهد و عمر سازه نیز طولانی تر خواهد شد، باز هم توجیه اقتصادی دارد.

### جمع بندی

همان طور که ملاحظه کردید استفاده از بتن خود ترمیم شونده می تواند بسیاری از نگرانی های کارفرمایان و مهندسين اجرایی در مورد ایجاد ترک ها و آسیب رسیدن به سازه های بتنی را از بین ببرد. به علاوه حالت هوشمند این بتن ها خطاهای انسانی را کاهش داده و به ما اطمینان می دهد که همه ترک ها تشخیص داده شده و ترمیم می شوند. از طرفی در کنار خود ترمیمی خواص ویژه ای به بتن داده می شود که از نظر سازه ای اهمیت بالایی دارد. امروزه بتن های خود ترمیم شونده جایگاه ویژه ای در میان مهندسين سازه برای افزایش مقاومت و پایداری سازه پیدا کرده اند. به خصوص در برخی پروژه های بزرگ که هزینه زیادی برای آن در نظر گرفته می شود استفاده از این بتن اجتناب ناپذیر است.