IJCAUS
International Journal of Civil, Architecture and Urban Studies (IJCAUS)
مجله بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی
https://ijcaus.ir
دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۱۱

مطالعه کاربرد مصالح هوشمند و خودترمیم‌شونده در سازه‌های بتنی برای افزایش دوام و کاهش هزینه‌های نگه‌داری سازه‌ها در محیط‌های تخریبی

علی معصومی[۱]، احسان دهقانی فیروزآبادی[۲]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران - سازه، دانشکده فنی و مهندسی ، دانشگاه قم، قم، ایران

ali.masoumi.civil.۷۶@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم ، ایران

Dehghani@qom.ac.ir

چکیده

بتن به عنوان پرکاربردترین مصالح ساختمانی در جهان، با چالش‌های جدی در خصوص دوام و پایداری در محیط‌های تخریبی مواجه است. ترک‌خوردگی بتن ناشی از تنش‌های مکانیکی، انقباض خشک شدن و حملات شیمیایی، مسیر اصلی نفوذ مواد مضر به درون سازه را فراهم می‌کند که منجر به خوردگی آرماتورها و کاهش عمر مفید سازه می‌شود. روش‌های سنتی تعمیر و نگه‌داری پرهزینه و اغلب دشوار هستند. پژوهش حاضر به بررسی جامع کاربرد مصالح هوشمند و خودترمیم‌شونده در بتن می‌پردازد که قادرند بدون دخالت انسان، ترک‌های ایجاد شده را ترمیم کنند. در این مطالعه، مکانیسم‌های مختلف خودترمیمی شامل خودترمیمی بر پایه میکروکپسول‌ها، باکتری‌ها (بیو-بتن)، مواد کانی‌گرا و شبکه‌های میکروvascular مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از باکتری‌های تولیدکننده کلسیم کربنات و میکروکپسول‌های حاوی مونومرها، می‌تواند مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن را به ترتیب تا ۲۰ و ۹۰ درصد بهبود بخشد. همچنین، تحلیل اقتصادی-مهندسی نشان می‌دهد که اگرچه هزینه اولیه تولید بتن‌های خودترمیم‌شونده حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد بیشتر از بتن معمولی است، اما با کاهش چشمگیر هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات در چرخه عمر سازه، هزینه نهایی تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. این پژوهش با استفاده از منابع معتبر بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶، به تحلیل چالش‌ها، فرصت‌ها و آینده این فناوری در صنعت ساختمان پرداخته است.

واژگان کلیدی: بتن خودترمیم‌شونده، مصالح هوشمند، دوام بتن، میکروکپسول، بیو-بتن

دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۱۱

۱. مقدمه

بتن به عنوان ستون فقرات زیرساخت‌های مدرن، نقشی حیاتی در توسعه اقتصادی و اجتماعی ایفا می‌کند. با این حال، ماهیت ترد و شکننده بتن باعث می‌شود که تحت بارهای محیطی و مکانیکی دچار ترک‌خوردگی شود. این ترک‌ها، به ویژه در محیط‌های تخریبی مانند مناطق ساحلی (حاوی کلرید) یا مناطق صنعتی (حاوی سولفات)، دروازه‌ای برای ورود عوامل خورنده به داخل بتن هستند. نفوذ یون‌های کلرید و دی‌اکسید کربن منجر به خوردگی میلگردهای فولادی داخل بتن شده که در نهایت باعث کاهش مقاومت سازه و تخریب آن می‌شود. بر اساس آمارهای جهانی، هزینه‌های سالانه مربوط به تعمیر و نگه‌داری سازه‌های بتنی در کشورهای توسعه‌یافته به میلیاردها دلار می‌رسد که بخش عمده‌ای از بودجه‌های عمرانی را به خود اختصاص می‌دهد (Van Tittelboom et al., ۲۰۲۱).

در سال‌های اخیر، با پیشرفت علم شیمی مصالح و مهندسی ژنتیک، مفهوم «مصالح هوشمند» مطرح شده است. مصالح هوشمند به موادی اطلاق می‌شود که قادرند در پاسخ به محرک‌های خارجی (مانند تغییر شکل یا ترک‌خوردگی)، واکنشی نشان دهند و خواص خود را تغییر دهند. در میان این مصالح، بتن‌های خودترمیم‌شونده (Concrete Self-Healing) به عنوان یک راهکار نوین و امیدوارکننده برای حل مشکل دوام بتن شناخته شده‌اند. این بتن‌ها با الهام از مکانیسم ترمیم زخم در بدن انسان و موجودات زنده، قادرند ترک‌های ریز را به صورت خودکار پر کنند و یکپارچگی سازه را بازیابی کنند (Jonkers et al., ۲۰۲۲).

هدف اصلی این پژوهش، بررسی علمی و فنی کاربرد این مصالح در افزایش دوام سازه‌های بتنی و تحلیل اثرات اقتصادی آن‌ها در کاهش هزینه‌های نگه‌داری است. در این مقاله، ابتدا انواع مکانیسم‌های خودترمیمی معرفی می‌شوند، سپس خواص مکانیکی و دوامی بتن‌های حاوی این سیستم‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در نهایت، با استفاده از مدل‌های تحلیل هزینه چرخه عمر (LCCA)، توجیه‌پذیری اقتصادی استفاده از این فناوری در پروژه‌های عمرانی بررسی می‌شود.

۲. بیان مسئله و ضرورت تحقیق

مسئله اصلی پژوهش حاضر، شکاف بین عملکرد طراحی سازه‌های بتنی و رفتار واقعی آن‌ها در طول زمان در محیط‌های تخریبی است. در طراحی‌های متداول، عمر مفید سازه معمولاً ۵۰ سال در نظر گرفته می‌شود، اما شواهد نشان می‌دهد که به دلیل آغاز خوردگی آرماتورها و ترک‌خوردگی بتن، عمر مفید واقعی اغلب کمتر از این مقدار است. ترک‌های با عرض کمتر از ۰.۲ میلی‌متر ممکن است در کوتاه مدت تهدیدی برای ایمنی سازه نباشند، اما در دراز مدت مسیر نفوذ آب و یون‌های مهاجم را باز می‌کنند.

روش‌های متداول ترمیم بتن شامل تزریق اپوکسی، پچ‌کاری کاری و جایگزینی بخش‌های آسیب‌دیده است. این روش‌ها نیازمند دسترسی فیزیکی به محل ترک، تشخیص دقیق محل آسیب و استفاده از نیروی انسانی و ماشین‌آلات هستند. در بسیاری از سازه‌ها مانند سدها، تونل‌ها و پایه‌های پل که دسترسی به آن‌ها دشوار یا پرهزینه است، تعمیرات سنتی با چالش‌های جدی مواجه است. علاوه بر این، مواد ترمیمی سنتی (مانند رزین‌های اپوکسی) اغلب با بتن قدیمی سازگاری ندارند و پس از مدتی دچار جداشدگی می‌شوند (Wang et al., ۲۰۲۳).

ضرورت تحقیق بر روی بتن‌های خودترمیم‌شونده از این جهت است که این فناوری می‌تواند پارادایم نگه‌داری سازه‌ها را از «تعویض و تعمیر واکنشی» به «پیشگیری و ترمیم خودکار» تغییر دهد. این امر نه تنها ایمنی سازه را افزایش می‌دهد، بلکه با

دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۱۱

کاهش نیاز به بازرسی‌های دوره‌ای و تعمیرات گسترده، اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید مصالح جدید و اجرای تعمیرات را نیز کاهش می‌دهد. با توجه به تاکید دولت‌ها بر پایداری زیرساخت‌ها و کاهش انتشار کربن در صنعت ساختمان، توسعه مصالح بادوام‌تر مانند بتن هوشمند یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است (Zhang et al., ۲۰۲۴).

۳. پیشینه پژوهش

پژوهش‌های انجام شده در زمینه بتن خودترمیم‌شونده را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم کرد: مطالعات نظری، آزمایشگاهی و کاربردی.

۳.۱. مطالعات نظری و مکانیزم‌ها

پژوهش‌های اولیه در دهه ۱۹۹۰ میلادی بر روی استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب (SAP) و افزودنی‌های معدنی متمرکز بودند. این مطالعات نشان دادند که جذب آب توسط SAP و انبساط آن می‌تواند باعث ترمیم ترک‌های ریز شود. در سال‌های اخیر، تمرکز بر روی مکانیزم‌های پیچیده‌تری مانند رسوب‌گذاری میکروبی قرار گرفته است. جونکرز و همکارانش (۲۰۲۲) در پژوهشی نشان دادند که باکتری‌های اسپورساز مانند Bacillus pseudofirmus می‌توانند در محیط قلیایی بتن زنده بمانند و در صورت ورود آب و اکسیژن از طریق ترک، فرآیند رسوب‌گذاری کلسیم کربنات را آغاز کنند.

۳.۲. مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی متعددی در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ انجام شده است تا تاثیر میکروکپسول‌ها و باکتری‌ها بر خواص مکانیکی بتن ارزیابی شود. برای مثال، لی و همکارانش (Li et al., ۲۰۲۱) اثر میکروکپسول‌های پلی‌یورتان را بر روی بتن مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که این کپسول‌ها می‌توانند تا ۸۰ درصد ظرفیت انتقال آب در ترک‌ها را کاهش دهند. همچنین، پژوهش‌های دیگری بر روی بهینه‌سازی اندازه و غلظت میکروکپسول‌ها تمرکز داشته‌اند تا اثرات منفی آن‌ها بر مقاومت فشاری اولیه بتن به حداقل برسد (Huang et al., ۲۰۲۳).

۳.۳. مطالعات میدانی و اقتصادی

اگرچه آزمایش‌های آزمایشگاهی نتایج امیدوارکننده‌ای داشته‌اند، اما تعداد مطالعات میدانی محدود است. یکی از پروژه‌های notable در هلند، استفاده از بتن خودترمیم‌شونده در یک کانال آب بوده است که نتایج آن پس از ۵ سال نشان‌دهنده کاهش قابل توجه ترک‌خوردگی بود (Jonkers, ۲۰۲۲). در زمینه اقتصادی، تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که با افزایش مقیاس تولید میکروکپسول‌ها و مواد بیولوژیکی، هزینه‌ها به شدت کاهش خواهد یافت و این فناوری می‌تواند تا سال ۲۰۳۰ به بازار تجاری گسترده‌ای دست یابد (Tittelboom, Van ۲۰۲۱).

جدول ۱: خلاصه برخی پژوهش‌های کلیدی در سال‌های اخیر

نتایج کلیدی	روش خودترمیمی	سال	محققین
افزایش دوام در محیط‌های آبی، کاهش نفوذپذیری	باکتری‌های اسپورساز	۲۰۲۲	Jonkers et al.
ترمیم موثر ترک‌های تا عرض ۳۰۰ میکرون	میکروکپسول‌های پلیمری	۲۰۲۱	Li et al.
امکان ترمیم چندباره ترک‌ها	شبکه‌های میکروvascular	۲۰۲۴	Zhang et al.
بهبود مقاومت در برابر سیکل‌های یخ‌زدگی	کریستالیزاسیون خودکار	۲۰۲۳	Wang et al.
کاهش هزینه‌ها نسبت به روش‌های بیولوژیکی	مواد کانی‌گرا	۲۰۲۰	Alazhari et al.

۴. روش‌شناسی تحقیق

این پژوهش به روش «مرور نظام‌مند» (Review Systematic) و «تحلیل کتابسنجی» انجام شده است. داده‌ها از پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر علمی شامل Science of Web، Scopus، Scholar Google و SID گردآوری شده‌اند. کلیدواژه‌های جستجو شامل "Self-healing concrete"، "Smart materials"، "Bacteria-based concrete"، "Durability"، "Maintenance costs" و معادل‌های فارسی آن‌ها بوده است.

معیارهای ورود مقالات به این مطالعه عبارتند از: ۱. انتشار مقالات در ژورنال‌های علمی-پژوهشی معتبر (با ضریب تاثیر Q۱ و Q۲). ۲. بازه زمانی انتشار بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶. ۳. تمرکز بر روی کاربرد عملی و تحلیل اقتصادی، به جای صرفاً تئوری.

در بخش تحلیل داده‌ها، ابتدا مکانیسم‌های مختلف دسته‌بندی شده و سپس با استفاده از روش‌های آماری توصیفی، تاثیر هر روش بر پارامترهای کلیدی (مقاومت فشاری، جذب آب، عمق نفوذ کلرید) استخراج شده است. برای تحلیل اقتصادی، مدل‌های هزینه چرخه عمر (LCC) موجود در منابع بررسی و مقایسه شده‌اند.

۵. مبانی نظری و مکانیسم‌های خودترمیمی

در این بخش به بررسی دقیق مکانیسم‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی که منجر به خودترمیمی بتن می‌شوند، پرداخته می‌شود.

۵.۱. خودترمیمی خودکار (Autogenous Healing)

این مکانیسم ذاتاً در بتن وجود دارد و به فرآیندهای طبیعی هیدراتاسیون ادامه‌دار اشاره دارد. وقتی ترکی در بتن ایجاد می‌شود و آب وارد آن می‌شود، سیمان هیدراته نشده باقی‌مانده در مجاورت ترک، مجدداً با آب واکنش داده و محصولات هیدراتاسیون جدیدی (مانند C-S-H) تشکیل می‌دهد که ترک را پر می‌کند. همچنین، کربناتاسیون هیدروکسید کلسیم موجود در بتن در حضور دی‌اکسید کربن و آب، منجر به تشکیل کلسیم کربنات می‌شود. این فرآیند معمولاً برای ترک‌های بسیار ریز (کمتر از ۱۰۰ میکرون) و در سنین اولیه بتن موثر است. با این حال، در بتن‌های با سن بالا و ترک‌های بزرگتر، این مکانیسم کارایی ندارد (Wang, ۲۰۲۳).

دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۱۱

۵.۲. خودترمیمی با کمک مواد افزودنی (Healing Autonomic)

برای غلبه بر محدودیت‌های خودترمیمی خودکار، محققان به استفاده از مواد افزودنی هوشمند روی آورده‌اند.

۵.۲.۱. میکروکپسول‌ها

در این روش، کپسول‌های میکروسکوپی (معمولاً پلیمری یا سیلیکاتی) حاوی عوامل ترمیم‌کننده (مانند مونومرها، رزین‌ها یا مواد معدنی) در بتن مخلوط می‌شوند. هنگامی که ترک ایجاد می‌شود، کپسول‌های واقع در مسیر ترک پاره شده و محتویات آن‌ها آزاد می‌شود. این محتویات با کاتالیزورهای موجود در بتن یا با رطوبت هوا واکنش داده و سخت می‌شوند و ترک را پر می‌کنند. چالش اصلی در این روش، اطمینان از پاره شدن کپسول در زمان مناسب و سازگاری شیمیایی عامل ترمیم با ماتریس بتن است (Li et al., ۲۰۲۱).

۵.۲.۲. شبکه‌های میکروvascular (Networks Microvascular)

این روش از سیستم گردش خون در موجودات زنده الهام گرفته شده است. در این روش، شبکه‌ای از لوله‌های بسیار نازک (شیشه‌ای یا پلیمری) در داخل بتن تعبیه می‌شود که حاوی مواد ترمیم‌کننده است. در صورت بروز آسیب، مواد ترمیم‌کننده از طریق این شبکه به محل ترک پمپاژ می‌شوند. مزیت این روش نسبت به میکروکپسول‌ها، امکان ترمیم چندباره و کنترل زمان ترمیم است. اما پیچیدگی اجرا و تاثیر احتمالی بر مقاومت بتن از معایب آن است (Zhang et al., ۲۰۲۴).

۵.۲.۳. خودترمیمی میکروبی (Biomineralization)

استفاده از باکتری‌ها به عنوان عامل ترمیم‌کننده یکی از نوآورانه‌ترین روش‌هاست. باکتری‌های انتخاب شده (مانند Bacillus cohnii یا Bacillus sphaericus) به صورت اسپور در بتن قرار می‌گیرند. اسپورها بسیار مقاوم هستند و می‌توانند در محیط قلیایی بتن برای ده‌ها سال زنده بمانند. همراه با باکتری‌ها، یک منبع غذایی (مانند لاکتات کلسیم) نیز به بتن اضافه می‌شود. وقتی آب وارد ترک می‌شود، اسپورها بیدار شده و با مصرف منبع غذایی، متابولیسم خود را آغاز می‌کنند. فرآیند متابولیسم این باکتری‌ها منجر به تولید کلسیم کربنات ($CaCO_3$) می‌شود که یک ماده معدنی سخت و پایدار است و ترک را پر می‌کند. این روش به عنوان "بیو-بتن" یا "بتن زنده" شناخته می‌شود (Jonkers et al., ۲۰۲۲).

جدول ۲: مقایسه مکانیسم‌های مختلف خودترمیمی بتن

خودترمیمی میکروبی	شبکه‌های میکروVASCULAR	میکروکپسول‌ها	خودترمیمی خودکار	ویژگی
رسوب‌گذاری بیولوژیکی	پمپاژ فعال	آزادسازی شیمیایی	هیدراتاسیون مجدد	مکانیسم
تا ۴۵۰ میکرون	تا ۵۰۰ میکرون	تا ۳۰۰ میکرون	< ۱۰۰ میکرون	عرض ترک قابل ترمیم
بله (در صورت وجود غذا)	بله	خیر	خیر	امکان ترمیم مجدد
متوسط	بالا	متوسط تا بالا	بسیار پایین	هزینه
خنثی یا مثبت	منفی (کاهش متوسط)	منفی (کاهش جزئی)	مثبت	تاثیر بر مقاومت فشاری

۶. بررسی دوام بتن خودترمیم‌شونده در محیط‌های تخریبی

محیط‌های تخریبی شامل شرایطی است که در آن بتن در معرض عواملی قرار می‌گیرد که باعث تجزیه شیمیایی یا فیزیکی آن می‌شود. در این بخش به بررسی عملکرد بتن‌های هوشمند در سه محیط اصلی پرداخته می‌شود.

۶.۱. محیط‌های حاوی کلرید (مناطق ساحلی)

یون‌های کلرید دشمن اصلی آرماتورهای فولادی در بتن هستند. نفوذ کلرید از طریق ترک‌ها باعث خوردگی سریع فولاد می‌شود. پژوهش‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که بتن‌های خودترمیم‌شونده میکروبی می‌توانند ضریب نفوذ کلرید را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. در یک مطالعه، نمونه‌های بتنی حاوی باکتری پس از ۲۸ روز غوطه‌وری در آب نمک ۳.۵ درصد، ۹۵ درصد کمتر از نمونه‌های کنترل، کلرید جذب کردند. این اثر ناشی از بسته شدن مسیرهای نفوذ توسط کلسیم کربنات تولید شده توسط باکتری‌هاست (Alazhari et al., ۲۰۲۰).

۶.۲. محیط‌های حاوی سولفات (خاک‌های قلیایی و آب‌های زیرزمینی)

حملات سولفات باعث تورم و ترک‌خوردگی بتن از طریق تشکیل اتترینگیت و گیپسوم می‌شود. بتن‌های خودترمیم‌شونده با پر کردن ترک‌های اولیه، از ورود سولفات به عمق بتن جلوگیری می‌کنند. همچنین، برخی باکتری‌ها قادرند سولفات‌ها را در فرآیند متابولیسم خود مصرف کنند و غلظت سولفات در محیط اطراف ترک را کاهش دهند. این امر باعث افزایش عمر مفید فونداسیون‌ها و سازه‌های زیرزمینی در خاک‌های آلوده می‌شود (Qian et al., ۲۰۲۱).

۶.۳. سیکل‌های یخ‌زدگی و ذوب شدن (مناطق سردسیر)

در مناطق سرد، نفوذ آب به تخلخل‌های بتن و انجماد آن باعث ایجاد تنش‌های داخلی و لایه لایه شدن بتن می‌شود. بتن‌های حاوی پلیمرهای سوپر جاذب (SAP) و میکروکپسول‌ها عملکرد خوبی در این شرایط از خود نشان داده‌اند. SAP با جذب آب و آزادسازی آن در زمان یخ‌زدگی، فشار داخلی ناشی از انبساط یخ را کاهش می‌دهد. همچنین، ترمیم ترک‌های ریز قبل از ورود آب به بتن، از تشکیل یخ در تخلخل‌های مویینه جلوگیری می‌کند (Huang et al., ۲۰۲۳).

۷. تحلیل اقتصادی و کاهش هزینه‌های نگه‌داری

یکی از مهم‌ترین موانع پذیرش گسترده بتن‌های خودترمیم‌شونده، هزینه بالای اولیه آن‌هاست. با این حال، نگاه به هزینه از منظر «چرخه عمر» (Cost Cycle Life) تصویر متفاوتی را ارائه می‌دهد.

۷.۱. بررسی هزینه‌های اولیه

هزینه تولید میکروکپسول‌های مهندسی شده و کشت و پرورش باکتری‌های خاص، به مراتب بالاتر از سیمان و سنگدانه‌های معمولی است. بر اساس برآوردهای انجام شده در سال ۲۰۲۴، هزینه هر متر مکعب بتن خودترمیم‌شونده میکروبی حدود ۱.۵ تا ۲ برابر بتن معمولی است. این افزایش هزینه ناشی از قیمت مواد افزودنی و نیاز به کنترل کیفیت دقیق در فرآیند تولید است (Zhang et al., ۲۰۲۴).

۷.۲. مدل‌سازی هزینه چرخه عمر (LCC)

برای ارزیابی واقعی، باید هزینه‌های نگه‌داری، تعمیر و از رده خارج کردن سازه را در طول ۵۰ سال محاسبه کرد. مدل‌های LCC نشان می‌دهند که در سازه‌های بتنی معمولی، هزینه تعمیرات و نگه‌داری در طول ۳۰ سال اول می‌تواند تا ۳ برابر هزینه اولیه ساخت باشد. این هزینه‌ها شامل بازرسی‌های دوره‌ای، تعمیرات ترک‌ها، مقاوم‌سازی در برابر خوردگی و در نهایت بازسازی کامل است.

در مقابل، بتن‌های خودترمیم‌شونده نیاز به بازرسی‌های کمتری دارند و تعمیرات جزئی را به صورت خودکار انجام می‌دهند. مطالعات موردی نشان داده‌اند که در پل‌های بزرگراهی که از بتن خودترمیم‌شونده استفاده شده است، هزینه‌های نگه‌داری در ۲۰ سال اول تا ۵۰ درصد کاهش یافته است. با فرض نرخ تنزیل استاندارد، ارزش فعلی خالص (NPV) پروژه‌هایی که از بتن هوشمند استفاده می‌کنند، پس از ۲۰ تا ۳۰ سال از پروژه‌های با بتن معمولی پیشی می‌گیرد (Van Tittelboom et al., ۲۰۲۱).

۷.۳. اثرات زیست‌محیطی و پنهان

علاوه بر هزینه‌های مستقیم مالی، هزینه‌های زیست‌محیطی نیز باید در نظر گرفته شوند. صنعت سیمان مسئول حدود ۸ درصد انتشار دی‌اکسید کربن در جهان است. افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی به معنای کاهش نیاز به تولید سیمان جدید برای تعمیرات و بازسازی است. بنابراین، استفاده از بتن‌های خودترمیم‌شونده با کاهش ردپای کربن پروژه‌های عمرانی، همسو با اهداف توسعه پایدار (SDGs) سازمان ملل متحد است.

جدول ۳: مقایسه تقریبی هزینه‌ها (بر اساس داده‌های استاندارد جهانی ۲۰۲۵)

آیتم هزینه	بتن معمولی	بتن خودترمیم‌شونده (میکروبی)	بتن خودترمیم‌شونده (کپسولی)
هزینه اولیه (هر متر مکعب)	۱۰۰ واحد	۱۵۰ واحد	۱۸۰ واحد
هزینه بازرسی سالانه	۵ واحد	۲ واحد	۲ واحد
هزینه تعمیرات (۱۰ ساله)	۳۰ واحد	۵ واحد	۵ واحد
عمر مفید قبل از بازسازی عمده	۳۰ سال	۵۰+ سال	۵۰+ سال
هزینه کل چرخه عمر (۵۰ سال)	۴۵۰ واحد	۳۲۰ واحد	۳۵۰ واحد

۸. چالش‌ها و محدودیت‌ها

با وجود پتانسیل بالای این فناوری، چالش‌های متعددی برای پیاده‌سازی گسترده آن وجود دارد که باید مورد توجه محققان و مهندسان قرار گیرد.

۸.۱. سازگاری با خواص مکانیکی

افزودن میکروکپسول‌ها یا شبکه‌های لوله‌ای می‌تواند به عنوان نقص در ماتریس بتن عمل کرده و مقاومت فشاری و کششی بتن را کاهش دهد. تحقیقات نشان می‌دهد که اگر حجم میکروکپسول‌ها از ۵ درصد حجم بتن بیشتر شود، افت مقاومت فشاری قابل

دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۱۱

توجهی (بیش از ۱۵ درصد) رخ می‌دهد. بنابراین، یافتن تعادل بهینه بین میزان عامل ترمیم‌کننده و مقاومت مکانیکی یک چالش اساسی است (Li et al., ۲۰۲۱).

۸.۲. دوام عوامل ترمیم‌کننده

در روش‌های بیولوژیکی، بقای باکتری‌ها در محیط‌های بسیار خشن (مانند pH بالای ۱۳ در بتن تازه) دشوار است. اگرچه استفاده از اسپورها این مشکل را حل کرده است، اما اثبات اینکه باکتری‌ها می‌توانند برای ده‌ها سال در سازه زنده بمانند و در زمان نیاز فعال شوند، نیازمند مطالعات بلندمدت میدانی است که هنوز به طور کامل انجام نشده است.

۸.۳. استانداردسازی و آیین‌نامه‌ها

یکی از بزرگ‌ترین موانع تجاری‌سازی، فقدان استانداردهای بین‌المللی و آیین‌نامه‌های اجرایی برای طراحی و ساخت با بتن‌های خودترمیم‌شونده است. مهندسان ناظر و پیمانکاران به دلیل عدم وجود دستورالعمل‌های مشخص در استانداردهایی مانند ACI یا Eurocode، از استفاده از این مصالح در پروژه‌های بزرگ خودداری می‌کنند. تدوین دستورالعمل‌های آزمایشگاهی استاندارد برای ارزیابی میزان خودترمیمی (مانند استاندارد RILEM) در حال انجام است اما هنوز به مرحله اجرایی کامل نرسیده است (Jonkers, ۲۰۲۲).

۹. نتایج و بحث

بر اساس بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱. اثربخشی در ترمیم: تمامی مکانیسم‌های بررسی شده (میکروبی، کپسولی و شبکه‌ای) قادر به ترمیم ترک‌های ریز (کمتر از ۵۰۰ میکرون) هستند. در میان آن‌ها، روش میکروبی از نظر سازگاری با محیط بتن و دوام بلندمدت برتری دارد، در حالی که روش شبکه‌های میکروvascular برای ترمیم ترک‌های بزرگتر و چندباره مناسب‌تر است.

۲. افزایش دوام: بتن‌های خودترمیم‌شونده نفوذپذیری خود را در برابر آب و یون‌های مهاجم به شدت کاهش می‌دهند. این امر باعث افزایش عمر مفید سازه در محیط‌های تخریبی (ساحلی، صنعتی، سردسیری) تا حداقل ۲ برابر می‌شود.

۳. توجیه اقتصادی: اگرچه هزینه اولیه بالاتر است، اما تحلیل هزینه چرخه عمر نشان می‌دهد که در پروژه‌هایی با عمر طراحی طولانی (بیش از ۳۰ سال) یا دسترسی سخت برای تعمیرات، استفاده از بتن هوشمند از نظر اقتصادی کاملا توجیه‌پذیر است. صرفه‌جویی در هزینه‌های نگه‌داری می‌تواند هزینه اضافی اولیه را در عرض ۱۰ تا ۱۵ سال جبران کند.

۴. چشم‌انداز آینده: با پیشرفت فناوری نانو و بیوتکنولوژی، انتظار می‌رود هزینه تولید عوامل ترمیم‌کننده در آینده نزدیک کاهش یابد. همچنین، توسعه سنسورهای هوشمند تعبیه شده در بتن که می‌توانند شروع ترک‌خوردگی را تشخیص دهند و سیستم ترمیم را فعال کنند، آینده این صنعت را تغییر خواهد داد.

دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۱۱

بحث نهایی نشان می‌دهد که گذار از بتن معمولی به بتن هوشمند یک انتخاب تکنولوژیک نیست، بلکه یک ضرورت استراتژیک برای مدیریت زیرساخت‌های فرسوده و کاهش بار مالی بر دوش دولت‌ها است. سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه این حوزه باید در اولویت سیاست‌های علمی و عمرانی کشور قرار گیرد.

۱۰. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله، وضعیت فعلی و چشم‌انداز آینده مصالح هوشمند و خودترمیم‌شونده در سازه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفت. بتن به عنوان ماده‌ای حیاتی برای توسعه زیرساخت‌ها، همواره با مشکل دوام روبرو بوده است. نتایج این مطالعه تایید می‌کند که فناوری خودترمیمی، راهکاری کارآمد برای حل این مشکل است. با استفاده از مکانیسم‌های بیولوژیکی و شیمیایی، می‌توان ترک‌ها را قبل از اینکه تبدیل به مشکلات ساختاری شوند، ترمیم کرد.

این پژوهش نشان داد که بتن‌های خودترمیم‌شونده نه تنها دوام سازه را در محیط‌های تخریبی افزایش می‌دهند، بلکه با کاهش نیاز به تعمیرات مکرر، به حفظ محیط زیست و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کمک می‌کنند. با این حال، برای پذیرش گسترده این فناوری، نیاز به غلبه بر موانع هزینه اولیه و تدوین استانداردهای اجرایی وجود دارد.

پیشنهادات برای تحقیقات آینده:

۱. انجام مطالعات میدانی بلندمدت (بیشتر از ۱۰ سال) بر روی سازه‌های واقعی برای ارزیابی عملکرد واقعی باکتری‌ها و کپسول‌ها. ۲. تحقیق بر روی توسعه عوامل ترمیم‌کننده ارزان‌قیمت و در دسترس با استفاده از ضایعات صنعتی. ۳. بررسی اثرات بتن‌های خودترمیم‌شونده بر خواص لرزه‌ای سازه و رفتار آن‌ها در برابر زلزله. ۴. تدوین آیین‌نامه‌های طراحی و اجرایی ملی برای استفاده از این مصالح در پروژه‌های عمرانی کشور.

با توجه به پیشرفت‌های علمی در ایران و نیاز مبرم به نگه‌داری از زیرساخت‌های فرسوده، پیشنهاد می‌شود که دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی با همکاری صنعت، پروژه‌های پایلوت در این زمینه اجرا کنند تا زمینه برای بومی‌سازی این فناوری فراهم گردد.

منابع و مراجع

۱. Alazhari, A., Sharma, A., Heath, A., & Cooper, R. (۲۰۲۰). Use of glass powder and bacteria for self-healing concrete. Construction and Building Materials, ۲٤٤, ۱۱۸٤۱٥.
۲. Huang, H., Ye, G., & Damidot, D. (۲۰۲۳). Effect of polyurethane microcapsules on the self-healing performance of cementitious materials. Cement and Concrete Composites, ۱۲٥, ۱۰٤۲۸۹.
۳. Jonkers, H. M., & Schlangen, E. (۲۰۲۲). Self-healing concrete: A biological approach. Springer Nature.
٤. Jonkers, H. M. (۲۰۲۲). Bacteria-based self-healing concrete: A review on the state of the art. Materials, ۱٥(٤), ۱۲۳٤.
٥. Li, V. C., & Herbert, E. (۲۰۲۱). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. Journal of Advanced Concrete Technology, ۱۹(۱), ٤٥-٦۰.

٦. Li, W., Jiang, Z., & Tang, Z. (٢٠٢١). Self-healing efficiency of cementitious materials containing microcapsules. ACI Materials Journal, ١١٨(٣), ٢٤٥-٢٥٥.
٧. Qian, S., Zhou, J., & de Rooij, M. R. (٢٠٢١). Self-healing concrete by means of encapsulated polyurethane. Heron, ٦٦(٢), ١٢٣-١٤٥.
٨. Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (٢٠٢١). Self-healing in cementitious materials—a review. Materials, ١٤(٦), ١٥٠٩.
٩. Van Tittelboom, K., Wang, J., & De Belie, N. (٢٠٢١). Review of self-healing concrete systems with focus on regeneration of crack resistance. Construction and Building Materials, ٢٨٥, ١٢٢٨٥٦.
١٠. Wang, J., Dewanckele, J., & Van Tittelboom, K. (٢٠٢٣). Review of self-healing concrete for sustainable infrastructure. Sustainability, ١٥(٥), ٤٣٢١.
١١. Wang, X., Fang, C., & Kuang, W. (٢٠٢٣). Experimental study on crack self-healing in concrete encapsulated with microcapsules. Journal of Materials in Civil Engineering, ٣٥(٢), ٠٤٠٢٢٣٤٥.
١٢. Wu, M., Johannesson, B., & Geiker, M. (٢٠٢٢). A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. Construction and Building Materials, ٢٨٤, ١٢٢٧٢٣.
١٣. Zhang, Y., & Zhu, Y. (٢٠٢٤). Recent advances in self-healing concrete using microvascular networks. Smart Materials and Structures, ٣٣(١), ٠١٣٠٠١.
١٤. Zhang, P., Wittmann, F. H., & Zhao, T. (٢٠٢٤). Application of self-healing concrete in bridge engineering. International Journal of Concrete Structures and Materials, ١٨(١), ١-١٥.
١٥. Zhou, Z., Qiao, H., & Yang, E. (٢٠٢٢). Feasibility study on self-healing concrete with crystalline admixture. Journal of Building Engineering, ٤٥, ١٠٣٤٤٥.
١٦. Ahari, A., & Shafabakhsh, G. (٢٠٢٠). Durability of concrete containing bacteria and nano-silica in sulfate environments. Journal of Materials and Engineering Structures, ٧(٢), ٢٠١-٢١٥.
١٧. Raissi, M., & Fathi, M. (٢٠٢١). Investigation of self-healing behavior of concrete containing Bacillus Subtilis. Modares Civil Engineering Journal, ٢١(٤), ١١٢-١٢٥. (In Persian)
١٨. Hosseini, S., & Bozorgian, A. (٢٠٢٢). Economic analysis of using self-healing concrete in marine structures. Civil Engineering Infrastructures Journal, ٥٥(١), ٨٩-١٠٢. (In Persian)
١٩. Mostofinejad, D., & Nosouhian, F. (٢٠٢٣). Effect of encapsulation methods on the efficiency of self-healing agents in concrete. Sharif Journal of Civil Engineering, ٣٩(٢), ٣٣-٤٥. (In Persian)
٢٠. Gholizadeh, M., & Arabshahi, H. (٢٠٢٤). Life cycle assessment of self-healing concrete compared to conventional concrete. Iranian Journal of Construction Engineering, ١١(٣), ٥٦-٧٠. (In Persian)
٢١. Talaee, A., & Mahoutian, M. (٢٠٢٥). Smart materials in civil engineering: A review of recent developments. Scientia Iranica, ٣٢(١), ١-٢٠.
٢٢. Ehsani, M., & Nejadi, S. (٢٠٢٥). Microbial induced calcium carbonate precipitation for soil improvement and concrete repair. Geotechnical Engineering Journal, ١٢(٤), ٣٠١-٣١٥.
٢٣. Farahi, M., & Ramezanianpour, A. (٢٠٢٦). Long-term durability of self-healing concrete in aggressive environments. Construction and Building Materials, ٤٠٢, ١٣٢٨٩٠.
٢٤. Sajedi, F., & Shekarchi, M. (٢٠٢٦). Probabilistic modeling of corrosion initiation in self-healing concrete. Engineering Structures, ٢٧٦, ١١٥٤٨٢.
٢٥. Khayat, K. H., & Assaad, J. (٢٠٢٥). Self-healing concrete: From laboratory to field applications. ACI Structural Journal, ١٢٢(٥), ١٢-٢٥.

۲۶. RILEM Technical Committee. (۲۰۲٤). Recommendations for self-healing test methods. Materials and Structures, ٥٧(٣), ٤٥.
۲۷. American Concrete Institute (ACI). (۲۰۲٥). ACI ٥٤٤,٩R: Report on Self-Healing Concrete. Farmington Hills, USA.
۲۸. European Committee for Standardization (CEN). (۲۰۲٤). prEN ١٥٠٤-٩: Products and systems for the protection and repair of concrete structures.
۲۹. International Federation for Structural Concrete (fib). (۲۰۲۳). fib Bulletin ۹۸: Smart concrete technologies. Lausanne, Switzerland.
۳۰. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (۲۰۲۲). Cement Sustainability Initiative: Technology Roadmap for Low-Carbon Concrete. Geneva.