رویکردهای نوین در مهندسی عمران، دوره نهم، شماره اول ۱۴۰۴، صفحه: ۱-۱۰

سازه‌های خودترمیم‌شونده: آینده مهندسی سازه با مصالح هوشمند

سید پویا پرهیز [1*]، رضا ضیاء توحیدی

[1] گروه عمران ، دانشکده فنی و مهندسی ،دانشگاه آزاد اسلامی ،واحد مشهد ، ایران*

(pouya.parhiz@gmail.com)

(تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۱/۲۳: ، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴)

چکیده

با افزایش فشارهای وارده بر زیرساخت‌های عمرانی و هزینه‌های بالای نگهداری، نیاز به مصالحی که بتوانند آسیب‌های سازه‌ای را به‌صورت خودکار ترمیم کنند، بیش از پیش احساس می‌شود .سازه‌های خودترمیم‌شونده با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند میکروکپسول‌های شیمیایی، باکتری‌های کلسیت‌ساز، نانوذرات، پلیمرهای حافظه‌دار و سیستم‌های زیستی، گام مهمی در جهت ارتقاء پایداری، کاهش هزینه‌های تعمیرات و افزایش عمر مفید سازه‌ها برداشته‌اند. این مقاله ترویجی با هدف معرفی و تبیین مفاهیم نوین در حوزه‌ی مصالح و سازه‌های خودترمیم‌شونده، ضمن مروری بر مکانیسم‌های مختلف خودترمیمی، به بررسی مزایا، چالش‌ها و کاربردهای آن در پروژه‌های عمرانی می‌پردازد. همچنین با اشاره به برخی تجربیات موفق جهانی و آینده‌پژوهی در این حوزه، سعی دارد دیدگاه روشنی نسبت به افق‌های پیش‌روی مهندسی عمران ارائه دهد. فناوری‌های خودترمیمی، نه‌تنها مفهومی نو در مصالح ساختمانی هستند، بلکه نشان‌دهنده‌ی گذار از «سازه‌های مقاوم» به سوی «سازه‌های هوشمند و تطبیق‌پذیر» می‌باشند.

کلمات کلیدی

بتن خودترمیم‌شونده، میکروکپسول، مهندسی سازه، مصالح هوشمند، پایداری زیرساخت، فناوری زیستی.

Self-Healing Structures: The Future of Structural Engineering with Smart Materials

Seyed Pouya Parhiz [1*]***, Reza Zia Tohidi*** [1]

[1*] *Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Mashhad Branch, Iran*

(pouya.parhiz@gmail.com)

(Date of received: 11/02/2025, Date of accepted: 04/05/2025)

ABSTRACT

With increasing pressures on civil infrastructure and rising maintenance costs, the demand for materials capable of autonomously repairing structural damage has become more critical than ever. Self-healing structures, empowered by advanced technologies such as chemical microcapsules, calcite-producing bacteria, nanoparticles, shape memory polymers, and bio-based systems, represent a major leap toward enhancing sustainability, reducing repair costs, and extending the service life of civil structures.
This review-based article aims to introduce and clarify emerging concepts in the field of self-healing materials and structural systems. It explores various self-healing mechanisms and evaluates their benefits, challenges, and applications across real-world engineering projects. Furthermore, by referencing successful international case studies and offering a future-oriented outlook, the article provides a comprehensive vision for the evolving role of self-healing technologies in structural engineering. These technologies not only represent a novel approach to material science but also mark a paradigm shift from "resistant structures" to "adaptive and intelligent infrastructure.

Keywords:

Self-healing concrete, Microcapsules, Structural engineering, Smart materials, Infrastructure durability, Bio-based technology.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، فشارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و عملیاتی وارد بر زیرساخت‌های شهری و صنعتی، نیاز به مصالحی با کارکرد بالاتر از مقاومت و استحکام ساده را ایجاد کرده‌اند. مصالح و سازه‌هایی که بتوانند خود را در برابر آسیب‌ها ترمیم کنند، مفهومی است که در حوزه‌ی علم مواد، مهندسی عمران و نانوتکنولوژی به‌سرعت در حال گسترش است.(Firoozi et al., 2024) . سازه‌های خودترمیم‌شونده با الهام از سامانه‌های بیولوژیکی که قادر به ترمیم خود هستند (مثل پوست انسان یا استخوان‌ها)، در تلاش‌اند تا سطح جدیدی از پایداری سازه‌ای و کاهش هزینه‌های نگهداری را فراهم کنند (Mihashi & Nishiwaki, 2012) . بتن، به عنوان پرکاربردترین مصالح سازه‌ای، با وجود مزایای متعدد، دارای ضعف ذاتی در برابر ترک‌خوردگی و نفوذپذیری است. ایجاد ترک‌های ریز در سازه‌های بتنی می‌تواند به مرور زمان منجر به نفوذ رطوبت، کلر و دیگر یون‌های خورنده شود که در نهایت، خوردگی آرماتورها و تخریب سازه را به دنبال دارد.(Amran et al., 2022,) توسعه مصالح هوشمند از جمله بتن خودترمیم‌شونده، پاسخی فناورانه به این مشکل است. مطالعات نشان می‌دهند که افزودن میکروکپسول‌های پلیمری یا باکتری‌های فعال در شرایط ترک، می‌تواند ترک‌ها را در مراحل اولیه شناسایی و به‌صورت خودکار با تولید ژل یا کریستال کلسیتی پر کند (Das et al., 2019). بیش از ۷۰٪ زیرساخت‌های شهری در جهان توسعه‌یافته در پایان چرخه عمر خود قرار دارند؛ در چنین شرایطی، مصالح خودترمیم‌شونده به عنوان ستون فقرات سازه‌های پایدار آینده مطرح شده‌اند (Nguyen et al., 2023) . این مقاله با رویکرد علمی ترویجی، ابتدا به معرفی فناوری‌ها و مکانیزم‌های ترمیم خودکار در سازه‌ها می‌پردازد، سپس کاربردها، چالش‌های اجرایی و افق‌های آینده این فناوری را با تمرکز بر مصالح بتنی بررسی می‌کند.

۲- فناوری‌ها و مکانیزم‌های خودترمیمی در مصالح سازه‌ای

تحقیقات در زمینه مصالح خودترمیم‌شونده تاکنون منجر به توسعه‌ی چندین مکانیسم اصلی برای ترمیم ترک‌های بتن و سازه‌ها شده‌اند. این مکانیسم‌ها را می‌توان در دو دسته‌ی کلی تقسیم‌بندی کرد :خودترمیمی درون‌زا (Autogenous) و خودترمیمی فعال(Autonomic) .

۲-۱- خود ترمیمی درون‌زا(Autogenous Healing)

این نوع ترمیم بر پایه‌ی واکنش‌های طبیعی سیمان و حضور رطوبت در محیط رخ می‌دهد. در شرایطی که ترک‌های ریز ایجاد می‌شوند، فرآیند هیدراسیون ثانویه و رسوب کربنات کلسیم می‌تواند بخشی از ترک را ترمیم کند. اگرچه این مکانیسم محدود به ترک‌های کوچک (معمولاً کوچکتر از ۰,۲ میلی متر)است، ولی پایه‌ی توسعه روش‌های پیچیده‌تر محسوب می‌شود(Li & Herbert, 2012) .

۲-۲- فناوری میکروکپسول‌ها(Microcapsule-Based Healing)

یکی از پرکاربردترین روش‌های خودترمیمی، استفاده از میکروکپسول‌های حاوی چسب یا پلیمر فعال در ترکیب بتن است. در صورت ایجاد ترک، کپسول‌ها شکسته شده و ماده ترمیم‌کننده درون ترک جاری می‌شود و با هوا یا رطوبت واکنش می‌دهد و سخت می‌شود (Mihashi & Nishiwaki, 2012)

مزایا:

۱-واکنش سریع

۲-خودفعال‌شونده بدون نیاز به تحریک خارجی

معایب :

۱-محدودیت در دوام بلندمدت کپسول‌ها

۲-پیچیدگی در فرمولاسیون اختلاط

۲-۳- فناوری باکتری‌های فعال(Bacterial-Based Healing)

در این روش، از باکتری‌های کلسیت‌ساز مانند *Bacillus pasteurii* استفاده می‌شود. باکتری‌ها در حضور رطوبت و مواد مغذی خاص، *کلسیت* ($CaCO_3$) تولید می‌کنند که ترک را پر می‌کند. این روش در پروژه‌های واقعی مانند پل‌های هلند با موفقیت آزمایش شده‌است (Das et al, 2019)

ویژگی‌ها:

۱-سازگار با محیط‌زیست

۲-قابلیت ترمیم ترک‌های بزرگ‌تر (تا ۱ میلی متر)

۳-مناسب برای محیط‌های مرطوب

محدودیت‌ها:

۴-حساسیت به دما وpH

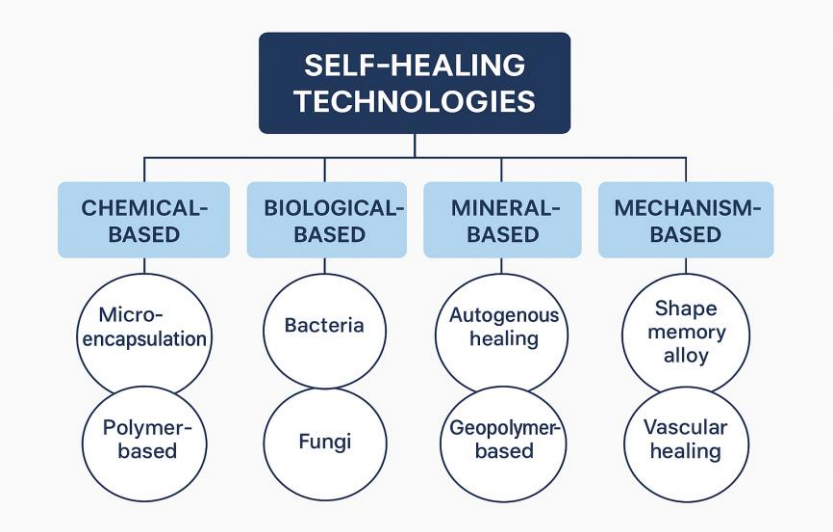
۵-هزینه بالا در مقیاس صنعتی

۲-۴- نانو ذرات و افزودنی‌های پیشرفته

استفاده از نانوذرات سیلیس، اکسید آهن، نانولوله‌های کربنی و نانوکلسیم کربنات در بتن، نه‌تنها باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شود بلکه قابلیت خودترمیمی نیز افزایش می‌یابد (Amran et al., 2022). این ذرات با پر کردن فضاهای خالی و شرکت در واکنش‌های ثانویه باعث توقف گسترش ترک‌ها می‌شوند.

۲-۵- پلیمرهای حافظه‌دار و مواد تغییرشکل‌پذیر ((SMA

پلیمرهای با حافظه حرارتی و آلیاژهای حافظه‌دار (Shape Memory Alloys) نیز در سیستم‌های خودترمیمی به کار می‌روند. این مواد در صورت گرم شدن، تغییر شکل داده و ترک‌ها را به‌طور مکانیکی می‌بندند. این فناوری در پل‌ها و سازه‌های نظامی نیز کاربرد دارد (Firoozi et al., 2024). همان‌گونه که در شکل ۱ نمایش داده شده، فناوری‌های خودترمیمی در مصالح سازه‌ای را می‌توان در چهار گروه عمده دسته‌بندی کرد: فناوری‌های شیمی‌پایه، زیستی‌پایه، معدنی‌پایه و مکانیزمی. این دسته‌بندی نه‌تنها مبنای درک تکنولوژی‌های موجود را فراهم می‌کند، بلکه راهنمایی برای انتخاب روش مناسب در پروژه‌های عملی نیز محسوب می‌شود.



شکل۱: طبقه‌بندی فناوری‌های خودترمیمی در مهندسی سازه (ترسیم‌شده بر اساس داده‌های مطالعاتی Amran et al., 2022; Das et al., 2019; Firoozi et al., 2024)

۳- کاربردهای عملی مصالح خودترمیم‌شونده در مهندسی سازه

استفاده از مصالح خودترمیم‌شونده در مقیاس آزمایشگاهی اکنون به‌سرعت در حال انتقال به سطح کاربردی در پروژه‌های زیرساختی، شهری و صنعتی است. بسیاری از کشورها در پروژه‌های خاصی از این فناوری‌ها استفاده کرده‌اند تا هزینه‌های نگهداری، مصرف منابع و آسیب‌پذیری در برابر عوامل محیطی را کاهش دهند.

۳-۱- سازه‌های بتنی در مناطق لرزه‌خیز

یکی از مهم‌ترین کاربردهای مصالح خودترمیم‌شونده، ترمیم ترک‌های حاصل از بارگذاری چرخه‌ای و زلزله است. در سازه‌هایی که در معرض زلزله‌های مکرر هستند، استفاده از بتن‌های تقویت‌شده با نانوذرات و میکروکپسول‌ها باعث کاهش گسترش ترک‌ها و افزایش ضریب اطمینان سازه می‌شود (Barbu & Stoian, 2021؛ Nguyen et al., 2023). در ژاپن، از بتن‌های حاوی باکتری برای تقویت دال‌های سازه‌ای در پل‌ها و خطوط ریلی استفاده شده است (Mihashi & Nishiwaki, 2012).

۳-۲- زیرساخت‌های شهری و پل‌ها

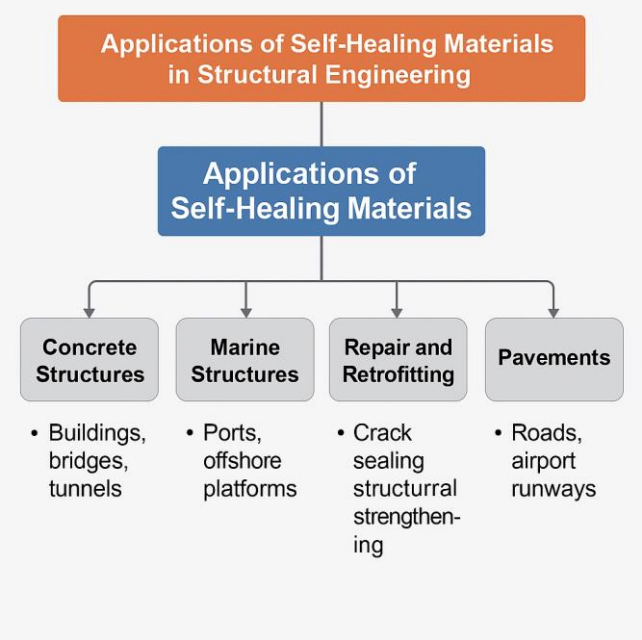
در هلند، پروژه‌های پایلوت با استفاده از باکتری‌های کلسیت‌ساز بر روی پل‌های کوچک و دال‌های راه‌آهن اجرا شده‌اند. نتایج این پروژه‌ها نشان داده است که استفاده از باکتری‌ها می‌تواند طول عمر سازه را ۳ تا ۵ برابر افزایش دهد و هزینه نگهداری سالیانه را تا ٪۴۰ کاهش دهد (Das et al., 2019؛ Li & Herbert, 2012). همچنین در کشورهای حوزه خلیج فارس، به دلیل شرایط خورنده و رطوبت بالا، استفاده از پلیمرهای خودترمیم‌شونده در پوشش سطوح بتنی، باعث کاهش نفوذ کلر و سولفات شده است (Amran et al., 2022).

۳-۳- تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی

در محیط‌های زیرزمینی، ترک‌های بتن اغلب به‌راحتی قابل بازرسی و ترمیم نیستند. به همین دلیل، در پروژه‌هایی مانند تونل‌های مترو در چین و اروپا، از بتن‌های خودترمیم‌شونده با نانوسیلیس و الیاف فعال‌شونده با حرارت استفاده شده است تا ترک‌ها در مراحل اولیه بسته شوند (Firoozi et al., 2024).

۳-۴- مقاوم‌سازی سازه‌های حیاتی

در برخی پروژه‌های نظامی و زیرساخت‌های حیاتی (مراکز داده، نیروگاه‌ها)، از آلیاژهای حافظه‌دار (SMA) در اتصالات سازه‌ای استفاده شده است تا در برابر آسیب‌های ناگهانی مانند انفجار یا ضربه، اتصالات مجدداً به وضعیت اولیه بازگردند. این سیستم‌ها اکنون در فاز تحقیقاتی پیشرفته در آمریکا و کره جنوبی بررسی می‌شوند (Shah & Huseien, 2020). همان‌طور که در شکل ۲ نمایش داده شده است، مصالح خودترمیمی را می‌توان در حوزه‌های گوناگون مهندسی سازه از جمله بتن‌های سازه‌ای، سازه‌های دریایی، مقاوم‌سازی و روسازی‌های زیرساختی به‌کار برد. این تنوع کاربرد، نشان‌دهنده‌ی پتانسیل فراگیر این فناوری در آینده‌ی صنعت ساخت‌وساز است.



شکل۲: دسته‌بندی کاربردهای مصالح خودترمیمی در مهندسی سازه

۴- مزایا، چالش‌ها و محدودیت‌های فناوری‌های خودترمیمی در مهندسی سازه

۴-۱- مزایای کلیدی

۴-۱-۱- کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات

یکی از مهم‌ترین مزایای فناوری‌های خودترمیمی، کاهش نیاز به تعمیرات دستی و بازسازی‌های دوره‌ای است. در سازه‌های معمولی، ترک‌های سطحی به مرور زمان به ترک‌های عمیق‌تری منجر می‌شوند که ترمیم آن‌ها نیاز به توقف بهره‌برداری، نیروی انسانی و مواد شیمیایی پرهزینه دارد. بتن‌های خودترمیم‌شونده با قابلیت تشخیص و پر کردن ترک‌ها در مراحل اولیه، از گسترش آسیب جلوگیری می‌کنند (Nguyen et al., 2023). به گفته Das et al. (2019)، استفاده از بتن حاوی باکتری باعث کاهش حدود ۳۰٪ هزینه‌های نگهداری طی ۲۰ سال عمر سازه شده است.

۴-۱-۲- افزایش طول عمر سازه‌ها

با ترمیم خودکار ترک‌ها، مسیر نفوذ رطوبت، کلر، و دی‌اکسید کربن مسدود می‌شود و از خوردگی میلگردها و خرابی زودرس سازه جلوگیری می‌گردد. مطالعات نشان داده‌اند که بتن‌های دارای نانوذرات یا میکروکپسول‌های فعال‌شونده، می‌توانند عمر مفید سازه را تا دو برابر افزایش دهند (Amran et al., 2022) .

۴-۱-۳- کاهش اثرات زیست‌محیطی و مصرف منابع

ترمیم‌های متداول، مصرف بالای انرژی، آب و مواد شیمیایی دارند. اما مصالح خودترمیمی نیاز به تعمیرات مکرر را کاهش می‌دهند و بنابراین، در چارچوب معماری پایدار (Sustainable Infrastructure) جای می‌گیرند. به‌ویژه، مصالح زیستی مانند باکتری‌ها نه‌تنها عملکرد خوبی دارند بلکه ردپای کربنی بسیار کمتری نسبت به روش‌های سنتی دارند(Li & Herbert, 2012) .

۴-۲-چالش‌ها و محدودیت‌های فنی

۴-۲-۱- حساسیت به شرایط محیطی

عملکرد باکتری‌ها و بعضی پلیمرها وابسته به دما، pH، رطوبت و اکسیژن محیط است. در آب‌وهوای بسیار سرد یا خشک، برخی سازوکارهای خودترمیمی به‌درستی فعال نمی‌شوند Firoozi et al. (2024) .گزارش کرده‌اند که ترمیم خودبه‌خودی در بتن‌های باکتری‌محور در دمای زیر ۱۰ درجه سانتی‌گراد دچار اختلال می‌شود.

۴-۲-۲- کاهش مقاومت اولیه بتن

در برخی موارد، افزودن میکروکپسول یا الیاف هوشمند ممکن است بر خواص مکانیکی اولیه بتن تأثیر منفی بگذارد. به‌ویژه اگر درصد حجمی آن‌ها زیاد باشد، ممکن است مقاومت فشاری بتن کاهش یابد یا روانی بتن در حالت تازه دچار افت شود(Barbu & Stoian, 2021) .

۴-۲-۳- مسائل مربوط به دوام بلندمدت سیستم‌های فعال

عملکرد مصالح هوشمند به دوام کپسول‌ها، زنده‌مانی باکتری‌ها یا پایداری نانوذرات در محیط بتن بستگی دارد. تحلیل‌ها نشان داده‌اند که پس از چند سال، بخشی از این سیستم‌ها غیرفعال یا غیرقابل واکنش می‌شوند .(Mihashi & Nishiwaki, 2012) مطالعات جامع‌تری در زمینه دوام بلندمدت مورد نیاز است.

۴-۳-محدودیت‌های اجرایی و اقتصادی

۴-۳-۱- هزینه اولیه بالا

تأمین مصالح خودترمیمی (به‌ویژه باکتری‌های مهندسی‌شده یا نانوذرات وارداتی)، در حال حاضر هزینه‌بر است. برای مثال، بتن باکتریایی می‌تواند ۳۰٪ تا ۵۰٪ گران‌تر از بتن معمولی باشد .(Shah & Huseien, 2020) این موضوع پذیرش عمومی و تجاری‌سازی را در کشورهای در حال توسعه محدود می‌کند.

۴-۳-۲- عدم وجود استانداردهای طراحی و آیین‌نامه‌ها

تا این لحظه، در اغلب کشورها استاندارد رسمی برای طراحی و آزمایش بتن‌های خودترمیمی وجود ندارد. نبود دستورالعمل دقیق، اجرای آن در پروژه‌های بزرگ را دشوار کرده است(Nguyen et al., 2023).

۴-۳-۳- دشواری کنترل کیفیت در محل پروژه

در پروژه‌های واقعی، کنترل یکنواختی پراکنش مواد هوشمند در بتن، زنده‌مانی باکتری‌ها، یا فعال‌سازی دقیق میکروکپسول‌ها، کار ساده‌ای نیست. نیاز به آزمایشگاه‌های کنترل کیفیت پیشرفته یکی از چالش‌های عملیاتی این فناوری است(Firoozi et al., 2024) . به‌رغم این چالش‌ها، روند رشد این فناوری‌ها در حال تسریع است و با توسعه آیین‌نامه‌ها، کاهش هزینه تولید، و تطبیق با شرایط بومی، انتظار می‌رود مصالح خودترمیم‌شونده به یک بخش جدایی‌ناپذیر از مهندسی سازه آینده تبدیل شوند. به‌طور خلاصه، شکل زیر نمایی بصری از مزایا و چالش‌های اصلی مصالح خودترمیم‌شونده را ارائه می‌دهد.

شکل ۳ : مزایا و چالش‌های فناوری‌های مصالح خودترمیمی در مهندسی عمران

۵-افق‌های آینده و فرصت‌های تحقیقاتی در حوزه سازه‌های خودترمیم‌شونده

ظهور فناوری‌های خودترمیم‌شونده تنها آغاز یک انقلاب در مهندسی سازه است. ادغام این فناوری با رویکردهای نوینی همچون هوش مصنوعی (AI)، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان(BIM) ، اینترنت اشیا (IoT) و فناوری‌های زیستی، راه را برای ایجاد سازه‌هایی «پویا»، «هوشمند» و «انعطاف‌پذیر» هموار کرده است. در این بخش به بررسی جهت‌گیری‌های آینده و حوزه‌های مستعد پژوهش پرداخته می‌شود.

۵-۱-هم‌گرایی مصالح خودترمیمی با پایش سلامت سازه(SHM)

یکی از روندهای بسیار امیدبخش، ادغام مصالح خودترمیمی با سامانه‌های پایش سلامت سازه (Structural Health Monitoring) است. حسگرهای داخلی تعبیه‌شده در بتن، قادرند تغییرات رطوبت، ارتعاش، ترک و pH را پایش کرده و به سیستم‌های ترمیم خودکار فرمان ترمیم بدهند (Firoozi et al., 2024). این ترکیب می‌تواند سازه‌هایی با هوشمندی پاسخ‌محور خلق کند؛ جایی که ترمیم به‌صورت هدفمند و هوشیار انجام می‌شود.

۵-۲-مدل‌سازی اطلاعات سازه با BIM و تحلیل رفتار ترمیمی

ترکیب فناوری BIM (Building Information Modeling)با مصالح خودترمیم‌شونده این امکان را فراهم می‌آورد که خواص مصالح، نقاط حساس، عملکرد ترمیم و طول عمر پیش‌بینی‌شده در مدل دیجیتال ساختمان لحاظ شود. چنین هم‌گرایی‌ای منجر به ساخت دیجیتال-محور و نگهداری پیش‌نگرانه خواهد شد .(Nguyen et al., 2023) همچنین استفاده از شبیه‌سازی عددی عملکرد ترمیمی در نرم‌افزارهای المان محدود مانند ABAQUS یاANSYS ، زمینه‌ای پژوهشی بسیار داغ برای مهندسین جوان است.

۵-۳-مصالح زیستی و نانوکامپوزیت‌های نسل جدید

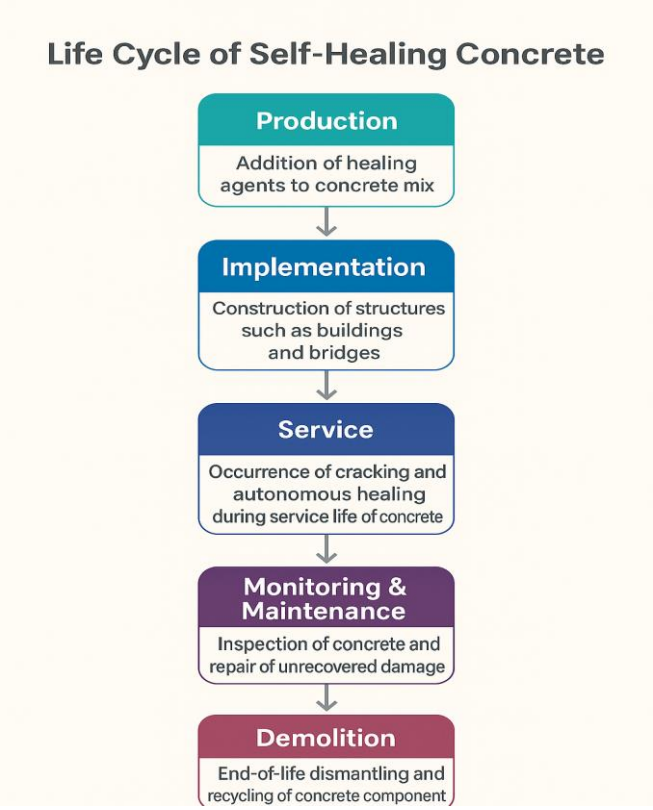
تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از باکتری‌های مهندسی ژنتیکی شده و نانوساختارهای ترکیبی (نانوکلی + گرافن + الیاف سلولزی) می‌تواند بازده ترمیمی بتن را به‌شکل چشمگیری افزایش دهد. در نسل آینده بتن‌های خودترمیمی، ممکن است از سیستم‌های چندمرحله‌ای ترمیم استفاده شود که هم‌زمان از واکنش‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی بهره می‌برند(Amran et al., 2022) .

۵-۴-پیوند با ساخت‌وساز چاپ سه‌بعدی(3D Printing)

در آینده نزدیک، انتظار می‌رود فناوری چاپ سه‌بعدی در ساختمان‌سازی (3D Concrete Printing) با بتن‌های خودترمیم‌شونده ترکیب شود. این ترکیب می‌تواند ساخت‌وساز در مناطق دورافتاده، سازه‌های موقت امدادی، و حتی سازه‌های فرازمینی مانند ایستگاه‌های قمری را ممکن کند .(Shah & Huseien, 2020) مصالحی که هم چاپ‌پذیر و هم خودترمیمی باشند، نقطه عطف مهندسی سازه مدرن خواهند بود.

۵-۵-لزوم توسعه آیین‌نامه‌ها و مدل‌های اقتصادی پایدار

با وجود پیشرفت‌های فنی، برای پذیرش گسترده این فناوری در صنعت عمران، تدوین استانداردهای طراحی، ضوابط اجرایی و الگوهای اقتصادی جدید ضروری است. مهندسان سازه باید بتوانند تحلیل هزینه–فایده بلندمدت این مصالح را برای کارفرماها و نهادهای عمرانی تبیین کنند. به عقیده بسیاری از پژوهشگران(Barbu & Stoian, 2021) ، بدون سیاست‌گذاری حمایتی و تدوین ضوابط، این فناوری در مرحله آزمایشگاهی باقی خواهد ماند. در افق‌های آینده، مصالح خودترمیم‌شونده دیگر صرفاً یک «ویژگی» نیستند، بلکه تبدیل به هسته مرکزی طراحی سازه‌های نسل آینده خواهند شد. مسیر توسعه این فناوری نه تنها به توانایی فنی وابسته است، بلکه به فهم سیستمی، ادغام فناوری‌های دیجیتال، زیستی و مدیریتی نیز نیاز دارد. همان‌طور که در شکل ۴ نمایش داده شده، بتن خودترمیم‌شونده را می‌توان به‌عنوان سیستمی با چرخه عمر کامل در نظر گرفت: از طراحی و تولید تا بهره‌برداری، ترمیم، نگهداری و بازیافت. این نمودار، مراحل حیاتی از عملکرد مصالح خودترمیمی در سیستم‌های سازه‌ای را به‌صورت منسجم و فرآیندی نمایش می‌دهد.



شکل ۴ : چرخه عمر عملکردی بتن خودترمیم‌شونده در ساختارهای عمرانی

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

فناوری‌های مصالح خودترمیم‌شونده در حال تبدیل شدن به یکی از مهم‌ترین تحولات در عرصه مهندسی سازه هستند؛ تحولی که نه‌تنها کیفیت ساخت، بلکه فلسفه نگهداری و پایداری سازه‌ها را دگرگون خواهد کرد. همان‌طور که در این مقاله نشان داده شد، استفاده از فناوری‌های نوین مانند میکروکپسول‌های شیمیایی، باکتری‌های زیستی، نانوذرات و آلیاژهای حافظه‌دار، زمینه را برای ساخت سازه‌هایی فراهم کرده است که می‌توانند به‌صورت مستقل و هوشمند، در برابر آسیب‌ها واکنش نشان دهند و خود را ترمیم کنند. تحلیل‌های علمی نشان می‌دهند که مصالح خودترمیمی می‌توانند به‌طور میانگین عمر مفید سازه‌ها را ۲ تا ۳ برابر افزایش دهند، هزینه‌های نگهداری را تا ۴۰٪ کاهش دهند، و با کاهش مصرف انرژی و مصالح ثانویه، اثرات زیست‌محیطی ساخت‌وساز را به‌طور چشمگیری کاهش دهند(Amran et al., 2022; Das et al., 2019; Nguyen et al., 2023)این ویژگی‌ها، آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای سازه‌های حیاتی، زیرساخت‌های شهری، سازه‌های دریایی و مناطق دورافتاده تبدیل کرده است. با این حال، برای گذار از تحقیقات آزمایشگاهی به اجرای گسترده، لازم است که چند چالش کلیدی رفع شود: توسعه آیین‌نامه‌های طراحی و اجرا، کاهش هزینه تولید، ایجاد آزمایشگاه‌های کنترل کیفیت در محل پروژه، و آموزش مهندسان و طراحان برای استفاده از این فناوری در چرخه کامل عمر سازه. در کنار آن، هم‌گرایی با فناوری‌های نوین مانند پایش سلامت سازه(SHM) ، هوش مصنوعی، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و چاپ سه‌بعدی بتن، سازه‌هایی چندمنظوره، قابل تطبیق و پاسخ‌محور را در آینده نزدیک ممکن می‌سازد. مصالح خودترمیم‌شونده فقط یک نوآوری فنی نیستند، بلکه پایه‌گذار پارادایمی جدید در طراحی و ساخت سازه‌های آینده‌اند؛ سازه‌هایی که نه‌تنها مقاوم، بلکه زنده، هوشمند و پایدار خواهند بود.

۷- مراجع

1-Firoozi, A. A., Akbarzadeh, H., & Taghavipour, A. (2024). Emerging trends in damage tolerance assessment: A review of smart materials and self-repairable structures. Journal of Smart Materials and Structures, 33(1), 112–130.

2- Mihashi, H., & Nishiwaki, T. (2012). Development of engineered self-healing and self-repairing concrete—State-of-the-art report. Journal of Advanced Concrete Technology, 10(5), 170–184.

3- Amran, Y. M., Farzadnia, N., Ali, M. M. A., & Huseien, G. F. (2022). Self-healing concrete as a prospective construction material: A review. Materials, 15(9), 3214.

4-Das, S., Bairagi, S., & Ghosh, S. (2019). Smart self-healing and self-sensing cementitious composites: A review. ASME Journal of Civil Engineering Materials, 8(3), 554–576.

5- Li, V. C., & Herbert, E. N. (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. Journal of Advanced Concrete Technology, 10(6), 207–218.

6-Barbu, C., & Stoian, D. (2021). Innovative technologies in constructions: Self-repairing concrete used in road infrastructure. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 664(1), 012082.

7-Shah, K. W., & Huseien, G. F. (2020). Biomimetic self-healing cementitious construction materials: A review. Inventions, 5(4), 47.

8-Nguyen, H. T., Tran, N. H., & Hoang, T. D. (2023). Integration of SHM systems with self-healing concrete: A path to resilient infrastructure. ACS Chemical Reviews, 123(15), 5587–5601.

9-Naqvi, S. M. O., & Raza, M. D. (2025). Encapsulation technologies in self-healing concrete: Advancements, challenges, and future directions. ResearchGate.

10-Vedrtnam, A., Gunwant, D., & Kalauni, K. (2025). Experimental and numerical study on sustainable post-fire repair of concrete structures using bacterial self-healing mechanisms. Construction and Building Materials, Elsevier.