

Investigation of the Bionic Mechanism in Self-Healing Concrete

Amir Hesam Binesh¹

Received Date: 04 June, 2025

Accepted Date: 08 September, 2025

<https://doi.org/10.30480/ARCAND.2025.5900.1072>

Abstract

This review article examines the mechanisms of bionic concrete as a building material in contemporary architecture, construction, and its environmental impacts. To this end, following a systematic exploration of the concepts of bionics and biomimicry and the philosophy of nature-inspired design in architecture—and considering the significance of environmental and functional impacts in the selection of bionic materials within the framework of sustainable architecture—the study focuses on bionic concrete. Bionic concrete is an innovative construction material inspired by nature and biological systems, designed to introduce special features such as self-healing ability, enhanced durability, and greater environmental compatibility compared to conventional concrete.

This research defines the relevant concepts and introduces various types of bionic concrete through a review of scientific sources for each section, while also tracking and analyzing the latest developments in the field. Finally, examples of projects that have employed bionic concrete are presented. Overall, it is concluded that biometric materials—with their ability to regulate temperature, reduce energy consumption, provide high durability under diverse environmental conditions, and enable autonomous self-repair—offer significant practical advantages.

Keywords: Bionics, Bionic Concrete, Sustainable Architecture, Self-healing Concrete

1. MSc. student in architecture, Bionics major, Azad University, South Tehran Branch.
Email: st_ah_binesh@azad.ac.ir

بررسی ساختار بایونیک در بتن خود ترمیم شونده

امیرحسام بینش^۱

<https://doi.org/10.30480/ARCAND.2025.5900.1072>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴

چکیده

این مقاله مروری به چگونگی سازوکار بتن بایونیک به عنوان یک مصالح ساختمانی در معماری نوین، ساخت‌وساز و اثرات زیست محیطی آن می‌پردازد. بدین منظور پس از بررسی نظام‌مند مفاهیم بایونیک و بایومیمکری و فلسفه الهام از طبیعت در معماری، با توجه به اهمیت تأثیرات زیست محیطی و کارکردی در انتخاب مصالح بایونیک و توجه به اصول معماری پایدار به بررسی بتن بایونیک پرداخته شد. بتن بایونیک نوعی مصالح ساختمانی نوآورانه است که با الهام از طبیعت و سیستم‌های بیولوژیکی طراحی شده تا قابلیت‌های ویژه‌ای مانند خود ترمیمی، مقاومت بالاتر و سازگاری بیشتر با محیط زیست را به بتن معمولی اضافه کند. در این پژوهش به تعریف مفاهیم مرتبط و معرفی انواع بتن بایونیک به وسیله جستجو در منابع علمی برای هر بخش و پیگیری و بررسی آخرین پیشرفت‌ها در آن زمینه پرداخته شد. در انتها نمونه پروژه‌هایی که از بتن بایونیک استفاده نموده‌اند آورده شده است. در مجموع نتیجه گیری شد که مصالح بایومتریک با قابلیت تنظیم دما و کاهش مصرف انرژی، دوام و ماندگاری بالا در شرایط مختلف محیطی و ترمیم خود به خودی، دارای مزایای کاربردی مناسبی هستند.

واژگان کلیدی: بایونیک، بتن بایونیک، معماری پایدار، بتن خود ترمیم شونده

مقدمه

استفاده و تقلید از ساختارها و مفاهیمی که از طبیعت الهام گرفته شده است، با هدف طراحی و ساخت ابزار، مصالح ساختمانی و سازه‌ها، قدمتی طولانی دارد. چنین می‌توان گفت از زمان انسان‌های اولیه که از دندان حیوانات برای ساخت نیزه استفاده می‌کردند، تا عصر لئوناردو داوینچی که با مطالعه پرندگان به طراحی ماشین پرنده پرداخت، و حتی تا زمان حال، همواره انسان از طبیعت الهام گرفته و می‌گیرد.

اما با این وجود ایجاد چارچوبی روش‌شناختی برای تبدیل و ترجمه راهبردهای بیولوژیکی به نوآوری‌های طراحی، پدیده‌ای نسبتاً جدید است (A. Lebdioui, 2022 به نقل از، Kennedy & Marting, 2016). طبق نظریه بایومیمیکری^۱، ۸/۳ میلیارد سال تکامل^۲، منجر به تولید طرح‌ها و راه‌حل‌های بهینه، زیست‌سازگار و پایدار، در اکوسیستم طبیعی ما شده است که در بیشتر موارد می‌توانند جایگزین‌های مناسب‌تری برای فناوری‌های امروزی باشند.

تکامل یا (آزمون و خطای طبیعی) به عنوان نوعی تحقیق و توسعه در طبیعت عمل کرده است. طرح‌های کارآمدتر و بهینه‌تر باقی مانده و موارد غیرکاربردی و ناتوان از بقا، خود به خود حذف و منقرض شده‌اند (A. Lebdioui, 2022، به نقل از Pawlyn, 2019).

اهمیت کاربری مصالح بایونیک در سال‌های اخیر به طور روزافزونی افزایش یافته است. طبق بررسی‌های انجام شده، از سال ۲۰۱۰ تاکنون ۱۷۱ درصد افزایش در ثبت اختراعات مرتبط با بایومیمیکری؛ ۱۶۱ درصد افزایش در انتشارات علمی و ۲۰۰۰ درصد افزایش در تولید مقالات خبری در زمینه نوآوری‌های الهام گرفته از طبیعت ثبت شده است (MacCowan, 2023).

در این تحقیق مروری، به بررسی بتن بایونیک، مبانی علمی مرتبط، انواع و کاربردهای آن در معماری و ساخت و ساز پرداخته می‌شود. بتن بایونیک نوعی مصالح ساختمانی نوآورانه است که با الهام از طبیعت و سیستم‌های بیولوژیکی طراحی شده است تا قابلیت‌های ویژه‌های مانند خود ترمیمی، مقاومت بالاتر و سازگاری بیشتر با محیط زیست را به بتن معمولی اضافه کند.

۱. مبانی علمی و فلسفی طراحی بایونیک

طراحی بایونیک، به عنوان رویکردی علمی و فلسفی در معماری و مهندسی، بر پایه مشاهده، تحلیل و الهام از سیستم‌های طبیعی استوار است. این رویکرد تنها به دنبال تقلید ظاهری از طبیعت نیست، بلکه به دنبال درک عمیق اصول کاربردی، عملکردی، ساختاری و سازگاری موجودات زنده با محیط است.

۱-۱. تاریخچه

واژه «بایونیک» از ترکیب کلمه یونانی «بیوس» (زندگی) و واژه انگلیسی «تکنیکس» (فن‌ها و فن‌آوری‌ها) مشتق شده است. این اصطلاح در ابتدا برای توصیف روند علمی «انتقال فناوری‌ها به اشکال زندگی» استفاده می‌شد. واژه بایومیتیکس اولین بار در سال ۱۹۵۰ توسط اتو اشmitt^۳ بیان شد و کلمه بایونیک اولین بار در سال ۱۹۵۸ توسط سرهنگ نیروی هوایی ارتش آمریکا، جک ای. استیل که در پروژه‌های که به تحقیقات در زمینه رباتیک مشغول بود، استفاده شد. در ابتدا مفهوم بایونیک به عنوان «علم سیستم‌های مبتنی بر موجودات زنده» شناخته شد. این ایده بعدها در سال ۱۹۹۷ توسط جنین بنیوس گسترش یافت که اصطلاح «بیومیمیکری» را ابداع کرد که به «تقلید آگاهانه از نبوغ طبیعت» اشاره داشت. در سال ۱۹۷۴، ویکتور گلوشکوف دانشمند اتحاد جماهیر شوروی سابق، کتاب «دایرةالمعارف سایبرنتیک» را منتشر کرد که در آن مطالعه بایونیک به تفکر معماری اطلاق شد و ادعا کرد: «در سال‌های اخیر، جهت علمی جدید دیگری ظهور کرده است که در آن بایونیک با معماری و تکنیک‌های ساختمانی همکاری می‌کند، یعنی بایونیک معماری. با استفاده از مدل‌های طبیعت به عنوان نمونه، ساقه‌های گیاهان، شبکه برگ، پوسته تخم مرغ و ...؛ مهندسان ساختارهای معماری و سازه‌های بادوام و زیبا ایجاد می‌کنند.

1 Biomimicry

2 Evolution

3 Otto Herbert Schmitt (April 6, 1913 – January 6, 1998)

بعدها، لبدف کتاب «معماری و بایونیک» را در سال ۱۹۸۳ منتشر کرد و بر نظریه کلاسیک معماری تمرکز کرد. این کتاب امکان مطالعه رفتارهای اشکال مختلف زندگی بیولوژیکی و ادغام و بهره‌برداری از این مشاهدات در ساختمان و طراحی بررسی کرد. او همچنین به این نظریه پرداخت که معماری بایونیک می‌تواند بسیاری از مشکلات مرتبط با طراحی و ساخت را حل کند زیرا اجازه می‌دهد که «محافظت کامل» از طریق تقلید از همان مکانیسم‌های بقا مورد استفاده توسط ارگانیسم‌ها انجام شود.

۱-۲. رویکرد علمی طراحی بایونیک

طراحی بایونیک یک رویکرد علمی ساختار یافته است که چیزی فراتر از الهام سطحی از طبیعت بشمار می‌رود. این فرآیند شامل تحلیل دقیق سیستم‌های بیولوژیکی، استخراج مبانی اصلی و کلیدی و انتقال و بهره‌برداری این اصول به راه‌حل‌های فنی است. به گفته (Ismail Hmidet) «برای دستیابی به پایداری و کارایی ساختاری بیشتر، مهندسان از طبیعت الهام گرفته و برای طراحی خود استفاده می‌کنند. با توجه به سطح پایداری در سیستم‌های بیولوژیکی، آنها رفتار ساختاری این سیستم‌ها را تحلیل کرده و به دنبال نمونه‌های سازگار با سیستم‌های فنی - مهندسی می‌گردند، اصول فیزیکی و مکانیکی مشاهده شده را بررسی و تحلیل کرده و این اصول را در محصول نهایی پیاده‌سازی می‌کنند» (Hmidet, 2020)

این فرآیند رویکرد طراحی بایونیک را تعریف می‌کند. اصطلاح «بایونیک» به رشته علمی اشاره دارد که به انتقال ویژگی‌ها از بیولوژی به فناوری می‌پردازد. این رویکرد بر استخراج و انتزاع ویژگی‌های مفید عملکردی یافت شده در طبیعت تمرکز دارد که می‌تواند به توسعه طراحی کارآمدتر یک ساختار ویژه کمک کند (Hmidet, 2020).

۱-۳. مراحل فرآیند طراحی بایونیک

فرآیند طراحی بایونیک به طراحان اجازه می‌دهد که به‌طور سیستماتیک از طبیعت الهام گرفته و این امر شامل چند مرحله کلیدی است:

۱. مشاهده و تحلیل: بررسی دقیق سیستم‌های بیولوژیکی و شناسایی ویژگی‌های کلیدی که می‌تواند برای کاربردهای فنی مفید باشد.
۲. استخراج اصول: تعیین اصول اساسی که باعث کارایی سیستم بیولوژیکی می‌شود، فراتر از ظاهر سطحی.
۳. انتزاع: تبدیل اصول بیولوژیکی به مفاهیم انتزاعی که می‌تواند در زمینه‌های مختلف اعمال شود.
۴. پیاده‌سازی: اعمال این اصول انتزاعی در طراحی و ساخت ساختارها (سازه‌ها) و سیستم‌های مهندسی.

۲-۲. تأثیرات زیست‌محیطی و کارکردی در انتخاب مصالح بایونیک

انتخاب مصالح بایونیک در معماری و ساخت و ساز تأثیرات گسترده‌ای بر محیط زیست و کارکرد ساختمان‌ها دارد. این مصالح که با الهام از طبیعت طراحی و تولید می‌شوند، می‌توانند به کاهش اثرات منفی و مخرب زیست‌محیطی صنعت ساختمان کمک کنند و همزمان، کارایی و عملکرد ساختمان‌ها را بهبود بخشند. در این قسمت، تأثیرات زیست‌محیطی و کارکردی مصالح بایونیک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱. تأثیرات زیست‌محیطی مصالح بایونیک

۲-۱-۱. کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن

مصالح بایونیک با الهام از سیستم‌های طبیعی، که میلیون‌ها سال تکامل یافته‌اند تا با محیط خود سازگار شوند، طراحی می‌شوند این مصالح می‌توانند به کاهش قابل توجه مصرف انرژی در ساختمان‌ها کمک کنند. به عنوان مثال، مصالح عایق حرارتی با الهام از خز حیوانات قطبی یا ساختار لانه موریه‌ها می‌توانند عملکرد عایق‌بندی بهتری نسبت به مصالح سنتی داشته باشند و در نتیجه، نیاز به گرمایش و سرمایش مکانیکی را کاهش دهند (Mei et al., 2024). معماری بایونیک با الهام از گیاهان، به عنوان یک زیرمجموعه از بیومیمیکری گیاهی، اصول رشد، ویژگی‌های

ساختاری و عملکردهای اکولوژیکی گیاهان را در مفهوم طراحی معماری ادغام می‌کند. این فرم معماری با هدف تقلید از الگوهای رشد و سازگاری محیطی گیاهان در دنیای طبیعی، در حوزه معماری سبز قرار می‌گیرد. با تقلید از اصل فتوسنتز گیاهان و ادغام فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر مانند پنل‌های فتوولتائیک، ساختمان‌ها می‌توانند عایق حرارتی، حفظ گرما، تهویه و قابلیت‌های روشنایی خود را بهبود بخشند. این امر منجر به کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن می‌شود. (Mei et al., 2024)

۲-۱-۲. حفاظت از منابع طبیعی

مصالح بایونیک اغلب با هدف بهینه‌سازی استفاده از منابع طراحی می‌شوند. طبیعت به طور ذاتی کارآمد است و از منابع به صورت بهینه استفاده می‌کند. با الهام از این اصل، مصالح بایونیک می‌توانند با استفاده کمتر از مواد خام، عملکرد بهتری داشته باشند. به عنوان مثال، ساختارهای سبک وزن با الهام از استخوان‌های پرندگان یا پوسته تخم مرغ می‌توانند استحکام بالایی داشته باشند و همزمان مواد کمتری مصرف کنند (Bhushan, B. 2024). معماری بایونیک به اهداف حفظ انرژی، حفظ زمین، حفظ آب، حفظ مواد و کاهش آلودگی دست می‌یابد. این رویکرد با استفاده از مواد تجدیدپذیر و قابل بازیافت و سیستم‌های ساختاری، ساختمان‌هایی را طراحی می‌کند که با محیط طبیعی هماهنگ باشند. این رویکرد برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار بسیار مهم است (Mei et al., 2024)

۲-۱-۳. کاهش ضایعات و آلودگی

مصالح بایونیک می‌توانند به کاهش ضایعات و آلودگی در صنعت ساختمان کمک کنند. بسیاری از این مصالح قابل بازیافت یا تجزیه‌پذیر هستند و در پایان عمر مفید خود، اثرات منفی کمتری بر محیط زیست دارند. همچنین، برخی از مصالح بایونیک مانند بتن خود ترمیم‌شونده می‌توانند عمر ساختمان را افزایش دهند و نیاز به تعمیرات و جایگزینی را کاهش دهند، که این امر منجر به کاهش ضایعات ساختمانی می‌شود (Esfahanian & Yeganeh, 2019). سازه‌های زیست پایدار، به کاهش تولید ضایعات، مصرف انرژی و انتشار سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند. بنابراین، علاوه بر الزامات قانونی، مسئولیت مدنی و اخلاقی برای توسعه طراحی ساخت و ساز کارآمدتر و دوستدار محیط زیست وجود دارد. در عمل این امر از طریق استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، انرژی باد، انرژی آبی و منابع طبیعی مانند چوب، خاک و مواد معدنی انجام پذیر است.

۲-۲. تأثیرات کارکردی مصالح بایونیک

۲-۲-۱. بهبود عملکرد و کارایی

مصالح بایونیک می‌توانند عملکرد و کارایی ساختمان‌ها را به طرق مختلف بهبود بخشند. به عنوان مثال، سطوح خود تمیزشونده با الهام از برگ نیلوفر آبی می‌توانند نیاز به نگهداری و تمیز کردن را کاهش دهند. همچنین، مصالح با قابلیت تغییر فاز (PCM) با الهام از طبیعت قادر هستند انرژی حرارتی را در خود ذخیره کنند. به عنوان مثال دیواره‌های پیش ساخته ارزان قیمت که کاربرد زیادی در ساختمان‌سازی دارند و به راحتی می‌توان از مصالح با قابلیت تغییر فاز (PCM) در آن استفاده نمود که این امر باعث می‌شود که دور تا دور فضای داخلی ساختمان با مخازن ذخیره‌کننده انرژی حرارتی پوشیده شود. کارایی دیوارهای با قابلیت تغییر فاز (PCM) به چند عامل بستگی دارد که عبارتند از دمای ذوب مصالح با قابلیت تغییر فاز (PCM)، محدوده تغییرات دمای دیوار، ظرفیت گرمایی به ازای واحد سطح دیوار، نحوه اعمال مصالح با قابلیت تغییر فاز (PCM) به داخل دیوار و شرایط آب و هوایی. استفاده از این دیواره‌ها مانع افزایش دمای محیط داخل ساختمان می‌شود و دما را متعادل نگه می‌دارد. بتن معمولی به دلیل ظرفیت گرمایی نسبتاً بالا، در طول روز مقدار زیادی گرما از خورشید جذب می‌کند و در هنگام شب این گرما را به ساختمان می‌دهد. برای افزایش ظرفیت گرمایی بتن می‌توان مصالح با قابلیت تغییر فاز (PCM) ها را داخل آن تعبیه نمود.

۳. معماری پایدار و بایونیک

معماری پایدار و بایونیک دو رویکرد مرتبط در طراحی و ساخت سازه‌ها هستند که به دنبال ایجاد محیط‌های ساخته شده سازگار با طبیعت و پایدار از نظر زیست‌محیطی هستند. در این بخش، ارتباط بین معماری پایدار و بایونیک، اصول و روش‌های طراحی، و نمونه‌های موفق در این زمینه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱. ارتباط بین معماری پایدار و بایونیک

معماری پایدار به دنبال طراحی و ساخت ساختمان‌هایی است که تأثیرات منفی و مخرب بر محیط زیست را به حداقل برسانند و در عین حال، کیفیت زندگی ساکنان را بهبود بخشند. این رویکرد به استفاده کارآمد از منابع، کاهش مصرف انرژی، و هماهنگی با محیط طبیعی تأکید دارد. از سوی دیگر، معماری بایونیک به دنبال الهام از طبیعت و سیستم‌های طبیعی برای طراحی و ساخت ساختمان‌هایی است که نه تنها از نظر زیبایی‌شناسی جذاب باشند، بلکه از نظر عملکردی نیز کارآمد و پایدار باشند (Sun, 2024).

ارتباط بین این دو رویکرد در این است که هر دو به دنبال ایجاد محیط‌های ساخته شده‌ای هستند که با طبیعت هماهنگ باشند و تأثیرات منفی و مخرب بر محیط زیست را کاهش دهند. معماری بایونیک می‌تواند به عنوان ابزاری برای دستیابی به اهداف معماری پایدار استفاده شود، زیرا طبیعت در طول میلیون‌ها سال تکامل، راه‌حل‌های بهینه برای مشکلات مختلف پیدا کرده است (Bhushan, B. 2024).

بر اساس گزارش برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد در سال ۲۰۲۲، بخش ساختمان و ساخت و ساز مسئول بیش از ۳۴ درصد از تقاضای انرژی و حدود ۳۷ درصد از انتشار CO_2 در سال ۲۰۲۱ است. تهدیدات فزاینده تغییرات زیست‌محیطی نیاز به اقدام در این مورد را ضروری می‌کند، و معماری می‌تواند نقش مهمی در راه‌حل این مسائل را داشته باشد. بیومیمیکری برای حل بسیاری از مسائل، از جمله کارایی انرژی، انتشار CO_2 و مواد، قابل استفاده است (Sun, 2024).

تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت‌های انسانی آشکارا به عنوان تهدیدی جدی برای مردم و اکوسیستم‌ها در سطح جهانی شناخته شده است و کاهش سهم فعالیت‌های انسانی در این تغییرات، تقریباً بدون هیچ استثنایی، از نظر سیاسی در مقیاس جهانی پذیرفته شده است (Schnellenbach-Held, M., & Habersaat, J. E. 2014).

۳-۲. اصول طراحی پایدار و بایونیک

اصول طراحی پایدار و بایونیک شامل موارد زیر است:

۱. تقلید از فرم‌ها و ساختارهای طبیعی
طبیعت فرم‌ها و ساختارهایی را ایجاد کرده است که برای عملکردهای خاص بهینه شده‌اند. معماران می‌توانند از این فرم‌ها و ساختارها الهام گرفته تا ساختمان‌هایی را طراحی کنند که نه تنها از نظر زیبایی‌شناسی جذاب بوده، بلکه از نظر عملکردی نیز کارآمد باشند. به عنوان مثال، ساختمان‌هایی با الهام از لانه موریا‌نه‌ها می‌توانند سیستم‌های تهویه طبیعی کارآمدی داشته باشند معماری بایونیک را می‌توان بر اساس سطح بیومیمیکری به سه دسته تقسیم کرد: بیومیمیکری لفظی، بیومیمیکری انتزاعی و معماری بیومورفیک. بیومیمیکری لفظی شامل کپی مستقیم فرم‌ها، ساختارها و عملکردهای طبیعی در طراحی ساختمان‌ها است. بیومیمیکری انتزاعی از سیستم‌های طبیعی به عنوان منبع الهام استفاده می‌کند اما آنها را به فرم‌های انتزاعی‌تر یا نمادین ترجمه می‌کند. معماری بیومورفیک ساختمان‌هایی را ایجاد می‌کند که شبیه به موجودات زنده هستند و اغلب از اشکال و الگوهای بیومورفیک در طراحی استفاده می‌کنند (Claggett, N et al. 2016).

۲. تقلید از فرآیندها و عملکردهای طبیعی
طبیعت فرآیندها و عملکردهایی را توسعه داده است که کارآمد و پایدار هستند. معماران می‌توانند از این فرآیندها و عملکردها الهام بگیرند تا سیستم‌های ساختمانی کارآمدتری طراحی کنند. به عنوان مثال، سیستم‌های جمع‌آوری

آب باران با الهام از نحوه جمع‌آوری آب توسط گیاهان می‌توانند به کاهش مصرف آب کمک کنند (Sun, 2024). معماری بایونیک را می‌توان بر اساس رویکرد طراحی به سه دسته تقسیم کرد: مبتنی بر فرم، مبتنی بر فرآیند، و مبتنی بر سیستم. معماری بایونیک مبتنی بر فرم به تقلید از فرم‌ها و ساختارهای طبیعی تمرکز دارد. معماری بایونیک مبتنی بر فرآیند به تکرار فرآیندها و عملکردهای طبیعی، مانند سیستم‌های گردش و فیلتراسیون تأکید دارد. معماری بایونیک مبتنی بر سیستم چندین سیستم طبیعی را برای ایجاد یک ساختمان پایدار و سازگار ادغام می‌کند.

۴. مفهوم بتن بایونیک

۴-۱. تعریف

بتن بایونیک به بتنی اطلاق می‌شود که با الهام از سیستم‌های طبیعی و بیولوژیکی طراحی و تولید می‌شود. این نوع بتن می‌تواند شامل میکروارگانیسم‌ها، الیاف طبیعی و یا ساختارهایی الهام گرفته از طبیعت باشد که به آن قابلیت‌های ویژه‌ای مانند خود ترمیمی، مقاومت بالاتر، یا سازگاری بیشتر با محیط زیست می‌دهند (Schnellenbach, 2014).

۴-۲. اصول اساسی بتن بایونیک

۱. تقلید از طبیعت: بتن بایونیک از سیستم‌ها و فرآیندهای طبیعی الهام می‌گیرد که طی میلیون‌ها سال تکامل یافته و بهینه شده‌اند.
۲. خود ترمیمی: یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بتن بایونیک، توانایی آن در ترمیم خودکار آسیب‌ها و ترک‌ها است، مشابه آنچه در بافت‌های زنده رخ می‌دهد.
۳. پایداری: بتن بایونیک با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش طول عمر ساختمان‌ها طراحی می‌شود.
۴. سازگاری با محیط: این نوع بتن می‌تواند با شرایط محیطی مختلف سازگار شود و عملکرد خود را متناسب با تغییرات محیطی تنظیم کند.

۵. تاریخچه

بتن بایونیک با بکارگیری توأم از دانش‌های مختلف، مانند زیست‌شناسی، مهندسی مواد و معماری به وجود آمده است. اولین تلاش‌ها برای توسعه بتن با قابلیت خود ترمیمی در اوایل قرن ۲۱ آغاز شد، اما پیشرفت‌های اخیر در زمینه بیوتکنولوژی و علم مواد، امکان توسعه بتن بایونیک با قابلیت‌های پیشرفته‌تر را فراهم کرده است (Jonkers, H. 2011).

در سال ۲۰۱۱، هنک جونکرز از دانشگاه دلفت هلند، اولین نمونه موفق بتن خود ترمیم‌شونده با استفاده از باکتری‌ها را معرفی کرد. از آن زمان، تحقیقات در زمینه بتن بایونیک گسترش یافته و انواع مختلفی از بتن بایونیک با قابلیت‌های متنوع به وجود آمده‌اند (Jonkers, H. 2011).

۶. مزایای بتن بایونیک

همانطور که گفته شد بتن بایونیک یک نوآوری پیشرفته در صنعت ساختمان است که با الهام از طبیعت و سیستم‌های بیولوژیکی طراحی شده است. این نوع بتن با بکارگیری اصول زیستی و مهندسی مواد، قابلیت‌های جدیدی را به بتن معمولی اضافه می‌کند که می‌تواند به حل بسیاری از چالش‌های موجود در صنعت ساختمان و ساخت‌وساز کمک کند. در این بخش، به بررسی مفهوم بتن بایونیک و مزایای آن می‌پردازیم.

بتن بایونیک می‌تواند باعث کاهش انتشار گاز کربن شود. بکارگیری بتن بایونیک باعث افزایش طول عمر ساختمان‌ها و کاهش نیاز به تعمیرات و بازسازی شده و می‌تواند به کاهش انتشار گاز کربن مرتبط با تولید بتن جدید کمک کند. صنعت بتن باعث حدود ۸ درصد از انتشار جهانی CO₂ است و برای همسویی با توافقنامه پاریس، باید تا سال ۲۰۳۰ حداقل ۱۶ درصد کاهش یابد (Schnellenbach-Held, M., & Habersaat, J. E. 2014).

۷. بتن بایونیک: ترکیبی طبیعی و صنعتی

بتن بایونیک نوعی از مصالح ساختمانی نوآورانه محسوب می‌گردد که با الهام از سیستم‌های طبیعی و با هدف بهبود عملکرد و پایداری بتن معمولی طراحی شده است. این نوع بتن، با استفاده از دانش مواد، زیست‌شناسی و مهندسی توسعه یافته که به دنبال ایجاد مصالح ساختمانی با قابلیت‌های ویژه مانند خود ترمیمی، مقاومت بالاتر و سازگاری بیشتر با محیط زیست است.

۷-۱. ترکیب طبیعی بتن بایونیک

الف. میکروارگانیسم‌ها در بتن بایونیک

یکی از مهم‌ترین اجزای طبیعی در بتن بایونیک، میکروارگانیسم‌ها هستند. باکتری‌ها و قارچ‌ها می‌توانند به عنوان عوامل فعال در بتن استفاده شوند تا قابلیت‌های ویژه‌ای مانند خود ترمیمی را به آن اضافه کنند. میکروارگانیسم‌هایی با ظرفیت خود ترمیمی است. این فناوری از قابلیت‌های بیولوژیکی میکروارگانیسم‌های ویژه مانند باکتری‌ها و قارچ‌ها بهره می‌برد که برای توانایی ماده در ترمیم خودکار ترک‌ها و حفظ یکپارچگی ساختاری ضروری هستند (Joachim et al., 2024).

ب. الیاف طبیعی در بتن بایونیک

الیاف طبیعی مانند الیاف کنف، جوت (کنف هندی)، نارگیل، بامبو و سیسال^۱ نیز می‌توانند در بتن بایونیک استفاده شوند. این الیاف به بهبود خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت کششی، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ضربه کمک می‌کنند. همچنین، استفاده از الیاف طبیعی به جای الیاف مصنوعی می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی بتن کمک کند (Chen et al., 2023).

یافته‌های (Joachim) و همکاران نشان می‌دهد که الیاف گیاهی طبیعی جایگزینی پایدار برای الیاف فولادی، است. الیاف گیاهی طبیعی خواص مکانیکی بسیار خوبی دارند، مقرون به صرفه هستند و در اصل از نظر انتشار CO₂ خنثی هستند. مزایای استفاده از الیاف گیاهی طبیعی در بتن فوق توانمند این است که نسبت آب به سیمان (w/c) پایین، تورم احتمالی الیاف را محدود می‌کند، ساختار متراکم، پیوند کافی را تضمین می‌کند و محیط قلبایی بسیار کم، دوام الیاف گیاهی طبیعی را تضمین می‌کند. با این حال، تقریباً هیچ دانشی در مورد رفتار تحمل بار بتن فوق توانمند UHPC^۲ تقویت شده با الیاف گیاهی طبیعی وجود نداشت. به منظور بررسی پتانسیل الیاف گیاهی طبیعی در UHPC، محققین الیاف گیاهی طبیعی ممکن برای استفاده در UHPC را تجزیه و تحلیل نمودند و بر این اساس، استفاده از سه نوع الیاف طبیعی انتخاب شده، یعنی الیاف بامبو، الیاف نارگیل و کتان را در UHPC تحت بارهای خمشی فشاری و کششی آزمایش نمودند و دو سری مرجع (بدون الیاف و با الیاف فولادی) را با هم مقایسه کردند. علاوه بر این، ارزیابی چرخه عمر UHPC آزمایش شده با انواع مختلف الیاف انجام شد. در مجموع محققین نتیجه‌گیری نمودند:

- الیاف گیاهی طبیعی از نظر پراکندگی در نقاط مختلف، امکان کشت، رشد سریع، برداشت و فراوری آسان و خواص مکانیکی عالی، جایگزینی پایدار برای الیاف فولادی مرسوم هستند.
- از نظر کشسانی (الاستیسیته) بتن UHPC تنها اندکی تحت تأثیر افزودن الیاف گیاهی طبیعی قرار می‌گیرد.
- مشابه افزودن الیاف فولادی؛ در مجموع الیاف طبیعی میزان ترک‌خوردگی بتن را کاهش می‌دهد و مقاومت کششی را افزایش می‌دهد.
- تحت بارگذاری فشار محوری، افزودن الیاف گیاهی طبیعی در ناحیه پس از ترک خوردگی می‌تواند با پل زدن لبه‌های ترک، از شکست ترد بتن فوق توانمند (UHPC) جلوگیری کند. با این حال، حداکثر تنش‌های فشاری و کرنش‌های مرتبط با آن در نمونه‌های آزمایشی تقویت‌شده با الیاف گیاهی طبیعی در مقایسه با نمونه‌های آزمایشی مرجع تقویت‌شده با الیاف فولادی، بین ۱۴ تا ۲۱ درصد کاهش می‌یابد.

۱ الیاف سیسال (Sisal) یکی از مهم‌ترین الیاف گیاهی طبیعی است که از برگ‌های گیاه آگاو (Agave Sisalana) بدست می‌آید.

2 Ultra-High-Performance Concrete

- تحت تنش کششی خمشی، به دلیل اثر پل زدن ترک، می‌توان از ظرفیت تحمل بار باقیمانده مشخصی را برای نمونه‌های آزمایشی تقویت‌شده با الیاف گیاهی طبیعی اطمینان حاصل کرد، اما پس از ترک خوردن و از دست دادن سختی مرتبط - برخلاف تیرهای خمشی تقویت‌شده با الیاف فولادی - هیچ افزایش مجددی در بار آزمایش قابل ثبت نیست. علاوه بر این، بارهای اولیه ترک به طور قابل توجهی کمتر از بارهای تیرهای خمشی تقویت‌شده با الیاف فولادی هستند. مقاومت کششی خمشی پس از ترک خوردن برای حداکثر مقدار $F_{max,m}$ به طور متوسط در مقایسه با الیاف فولادی میکرو فقط حدود ۳۵ تا ۴۹ درصد است.
- استفاده از الیاف گیاهی طبیعی به جای الیاف فولادی منجر به کاهش قابل توجه پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) می‌شود، زیرا سهم GWP می‌تواند از حدود ۲۲٪ به حدود ۱٪ کاهش یابد (Joachim et al., 2024).

ج. مواد معدنی طبیعی در بتن بایونیک

مواد معدنی طبیعی مانند پوزولان‌های طبیعی، خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی نیز می‌توانند در بتن بایونیک استفاده شوند. این مواد می‌توانند جایگزین بخشی از سیمان شوند و به کاهش انتشار کربن در تولید بتن کمک کنند. همچنین، این مواد می‌توانند خواص بتن مانند دوام و مقاومت در برابر حمله‌های شیمیایی را بهبود بخشند (Golewski, 2023).

اخیراً، تحقیقات توسط گولوسکی و تیم او استفاده از افزودنی‌های معدنی مانند خاکستر بادی (FA)، دوده سیلیس (SF) و نانو سیلیس (NS) را برای کاهش وابستگی به سیمان سنتی بررسی کرده‌اند. این افزودنی‌ها نشان داده‌اند که در جلوگیری از افزایش ترک‌ها موثر می‌باشند و هنگامی که با هم ترکیب می‌شوند، ریزساختار و استحکام بتن را بهبود می‌بخشند (Wong et al., 2024).

۷-۲. ترکیب صنعتی بتن بایونیک

کپسوله کردن میکروارگانیسم‌ها

برای محافظت از میکروارگانیسم‌ها در محیط قلیایی بتن، روش‌های مختلف کپسوله کردن ابداع شده‌اند. این روش‌ها شامل استفاده از میکروکپسول‌های پلیمری، ژل‌های سیلیکا، پرلیت منبسط شده و رس منبسط شده است. کپسوله کردن میکروارگانیسم‌ها به آن‌ها اجازه می‌دهد تا در محیط سخت بتن زنده بمانند و در صورت نیاز فعال شوند. خود ترمیمی اتوژنیک، که به عنوان خود ترمیمی ذاتی نیز شناخته می‌شود، از طریق هیدراتاسیون سیمان هیدراته نشده در ماتریس بتن رخ می‌دهد. هنگامی که ترک‌ها در بتن ایجاد می‌شوند، آب وارد شده و یک واکنش شیمیایی را فعال می‌کند که به طور موثر میکروتُرک‌ها را در بتن پر می‌کند (Wong et al., 2024).

۸. انواع بتن بایونیک (بتن خود ترمیم‌شونده، بتن با فیبر طبیعی)

بتن بایونیک شامل انواع مختلفی است که هر کدام با الهام از سیستم‌های طبیعی و بیولوژیکی طراحی شده‌اند تا قابلیت‌های ویژه‌ای را به بتن اضافه کنند.

۸-۱. بتن خود ترمیم‌شونده

الف. مکانیسم عملکرد

بتن خود ترمیم‌شونده یا بیوکاکریت، نوعی بتن است که توانایی ترمیم خودکار ترک‌ها را دارد. این نوع بتن معمولاً با استفاده از میکروارگانیسم‌ها، به ویژه باکتری‌ها، عمل می‌کند. مکانیسم عملکرد بتن خود ترمیم‌شونده به این صورت است که باکتری‌ها (معمولاً از جنس باسیلوس) به همراه منبع غذایی (معمولاً لاکتات کلسیم) در بتن قرار داده می‌شوند. این باکتری‌ها در حالت غیرفعال یا اسپور باقی می‌مانند تا زمانی که ترک‌ها در بتن ایجاد شوند و آب به داخل آنها نفوذ کند. در این زمان، باکتری‌ها فعال می‌شوند و با مصرف منبع غذایی، کربنات کلسیم (سنگ آهک) تولید می‌کنند که ترک‌ها را پر می‌کند (Joachim et al., 2024).

خود ترمیمی اتوژنیک، که به عنوان خود ترمیمی ذاتی نیز شناخته می‌شود، از طریق هیدراتاسیون سیمان هیدراته

نشده در ماتریس بتن رخ می‌دهد. هنگامی که ترک‌ها در بتن تشکیل می‌شوند، آب وارد می‌شود و یک واکنش شیمیایی را فعال می‌کند که کربنات کلسیم (CaCO_3) تولید می‌کند. این CaCO_3 به طور موثر میکروترک‌ها را در بتن پر می‌کند که معمولاً اندازه آنها بین ۰/۱ میلی‌متر تا ۰/۳ میلی‌متر است (Wong et al., 2024).

ب. انواع بتن خود ترمیم شونده

- بتن‌های خود ترمیم شونده را می‌توان بر اساس مکانیسم ترمیم به چند دسته تقسیم کرد:
۱. بتن خود ترمیم شونده باکتریایی: این نوع بتن از باکتری‌ها برای تولید کربنات کلسیم و پر کردن ترک‌ها استفاده می‌کند. باکتری‌های مورد استفاده معمولاً از جنس باسیلوس هستند که می‌توانند در محیط قلیایی بتن زنده بمانند و اسپور تشکیل دهند.
 ۲. بتن خود ترمیم شونده قارچی: این نوع بتن از قارچ‌ها برای ترمیم ترک‌ها استفاده می‌کند. قارچ‌ها نسبت به باکتری‌ها مقاومت بیشتری در برابر شرایط سخت دارند و می‌توانند در محیط‌های با (pH) بالا زنده بمانند. آنها همچنین می‌توانند از طریق طیف‌های خود، فواصل بیشتری را پوشش دهند.
 ۳. بتن خود ترمیم شونده با کپسول‌های پلیمری: این نوع بتن از کپسول‌های پلیمری حاوی عوامل ترمیم‌کننده استفاده می‌کند. هنگامی که ترک‌ها ایجاد می‌شوند، کپسول‌ها شکسته شده و عوامل ترمیم‌کننده آزاد می‌شوند و ترک‌ها را پر می‌کنند.
 ۴. بتن خود ترمیم شونده با سیستم عروقی: این نوع بتن یک شبکه از کانال‌ها یا لوله‌ها را برای توزیع عوامل ترمیم‌کننده در سراسر بتن استفاده می‌کند. هنگامی که ترک‌ها ایجاد می‌شوند، عوامل ترمیم‌کننده از طریق این شبکه به محل ترک‌ها دسترسی یافته و آنها را ترمیم می‌کنند (Wong et al., 2024).

۸-۲. مزایا و محدودیت‌های بتن خود ترمیم شونده

- مزایای بتن خود ترمیم شونده شامل موارد زیر است:
۱. افزایش دوام: با ترمیم خودکار ترک‌ها، بتن خود ترمیم شونده می‌تواند دوام بیشتری نسبت به بتن معمولی داشته باشد.
 ۲. کاهش هزینه‌های نگهداری: با کاهش نیاز به تعمیرات، بتن خود ترمیم شونده می‌تواند هزینه‌های نگهداری را کاهش دهد.
 ۳. افزایش ایمنی: با جلوگیری از گسترش ترک‌ها، بتن خود ترمیم شونده می‌تواند ایمنی ساختمان‌ها را افزایش دهد.

۹. معرفی نمونه پروژه‌های استفاده شده از بتن بایونیک

امروزه بتن بایونیک از مرحله تحقیقات آزمایشگاهی فراتر رفته و در پروژه‌های واقعی در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است. در این قسمت، به بررسی نمونه‌های موفق استفاده از بتن بایونیک در پروژه‌های مختلف که به طور عملی به حل چالش‌های صنعت ساختمان کمک کرده، می‌پردازیم.

۹-۱. پروژه‌های بتن خود ترمیم شونده

یکی از نمونه‌های قابل توجه استفاده از بتن بایونیک، طرح ساخت یک نمونه اولیه پل عابر پیاده با استفاده از بتن خود ترمیم شونده زیستی^۱ (BSHC) است. این پروژه که در یک منطقه با آب و هوای قاره‌ای مرطوب انجام شده، یکی از اولین کاربردهای بتن خود ترمیم شونده در سازه‌های پل است (Jakubovskis et al., 2022). در این پروژه، تیرهای بتنی خود ترمیم شونده زیستی به عنوان بخشی از سازه‌ی پل طراحی و تولید شده‌اند. برای انتخاب ترکیب بهینه بتن خود ترمیم شونده، مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نسبت ترمیم در المان‌های بتنی خود ترمیم شونده تحت شرایط ترمیم شبیه‌سازی باران، چندین برابر بیشتر از نمونه‌های کنترل بود.

این پروژه دارای اهمیت ویژه‌ای است زیرا اکثر مطالعات قبلی در شرایط آزمایشگاهی انجام شده بودند و داده‌های میدانی محدودی در مورد عملکرد بتن خود ترمیم‌شونده در شرایط واقعی وجود داشت. داده‌های بلند مدت جمع‌آوری شده در مورد فرآیند ترمیم در یک منطقه آب و هوایی قاره‌ای مرطوب، امکان ارزیابی کمی مزایای خود ترمیمی زیستی را فراهم می‌کند و راه را برای بهینه‌سازی بیشتر این ماده هموار می‌کند (Jakubovskis et al., 2022).

آکواریوم آرتیس با بتن خود ترمیم‌شونده

یک نمونه جالب دیگر از استفاده بتن خود ترمیم‌شونده، در پروژه بازسازی آکواریوم آرتیس^۱ است. در این پروژه، به جای استفاده از بتن خود ترمیم‌شونده در کاربردهای سنتی مانند زیرزمین یا سازه‌های زیرساختی، شرکت سالوردا بوو (Salverda Bouw) از این فناوری برای ساخت آکواریوم استفاده کرد. این پروژه بخشی از یک طرح بازسازی بزرگ برای Natura Artis Magistra بود (Basilisk, 2025). استفاده از بتن خود ترمیم‌شونده در آکواریوم بسیار هوشمندانه است، زیرا آکواریوم‌ها نیاز به آب‌بندی کامل دارند و هرگونه ترک می‌تواند منجر به نشت آب شود. با استفاده از بتن خود ترمیم‌شونده، ترک‌های احتمالی به طور خودکار ترمیم می‌شوند و از نشت آب جلوگیری می‌شود. این کاربرد نشان می‌دهد که بتن خود ترمیم‌شونده می‌تواند در طیف گسترده‌ای از کاربردها، فراتر از سازه‌های معمول، استفاده شود. (Basilisk, 2025)

دیوارهای نگهدارنده راه آهن هلند

شرکت راه آهن هلند (ProRail) از دیوارهای نگهدارنده ساخته شده از بتن خود ترمیم‌شونده برای افزایش پایداری زیرساخت‌های خود استفاده کرده است. این شرکت به دنبال ساخت زیرساخت‌ها به روشی پایدار و حفظ دوام آنها است. پایداری یک جنبه مهم در انجام وظایف اجتماعی برای شرکت راه آهن هلند (ProRail) است و این به معنای تشویق توسعه پایدار در زنجیره تأمین است (Basilisk, 2025). استفاده از بتن خود ترمیم‌شونده در دیوارهای نگهدارنده راه آهن می‌تواند به کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش طول عمر سازه کمک کند. این پروژه نشان می‌دهد که بتن خود ترمیم‌شونده می‌تواند در سازه‌های زیرساختی بزرگ مقیاس استفاده شود و مزایای قابل توجهی را از نظر پایداری و هزینه‌های چرخه عمر فراهم کند (Basilisk, 2025).

تعمیر ترک انقباضی در تونل بویتنولدردت شیپول^۲

یک نمونه موفق دیگر از استفاده بتن خود ترمیم‌شونده، تعمیر ۱۰۰۰ ترک انقباضی در تونل بویتنولدردت شیپول است. در این پروژه، از مایع تعمیر باسیلیسک ER7 (Basilisk Liquid Repair) استفاده شد.

نتیجه‌گیری

دانش بایونیک، به عنوان رویکردی علمی و فلسفی در معماری و مهندسی، بر پایه مشاهده، تحلیل و الهام از سیستم‌های طبیعی استوار است. این رویکرد تنها به دنبال تقلید ظاهری از طبیعت نیست، بلکه به دنبال درک عمیق اصول کاربردی، عملکردی، ساختاری و سازگاری موجودات زنده با محیط است به طور خلاصه، مصالح بایومتریکی با الهام از طبیعت جهت طراحی مصالحی با قابلیت تنظیم دما و کاهش مصرف انرژی، دوام و ماندگاری بالا در شرایط مختلف محیطی و ترمیم خود به خودی، دارای مزایای کاربردی مناسبی هستند.

فهرست منابع

Ahmad, J., Majdi, A., Ahmadi, M., & Makaremi, M. (2022). Performance of concrete reinforced with jute fibers (natural fibers). *Advances in Civil Engineering*, 2022, 1-10.

Basilisk. (2025). Projects – Basilisk Self-Healing Concrete. Retrieved from <https://basiliskconcrete.com/en/projects/>

Bhushan, B. (2024). Introduction to Biomimetics and Bioinspiration:

1 ARTIS Aquarium

2 Buitenveldert tunnel Schiphol

Materials and Surfaces for Green Science and Technology. Springer Nature

Chen, L., Kidalova, L., Sobhan, K., Narayanasamy, R., Medvecká, V., & Stevulova, N. (2023). Recent developments on natural fiber concrete: A review of properties, sustainability, applications, barriers, and opportunities. *Journal of Building Engineering*, 75, 107041.

Claggett, N & Surovek, Andrea & Streeter, B & Nam, Soonkie & Bardunias, Paul & Cetin, Bora. (2016). Biomimicry and locally responsive construction: Lessons from termite mounds for structural sustainability. 10.1201/9781315641645-136.

Esfahanian, Y., & Yeganeh, M(2019). APPLICATION OF BIONIC ARCHITECTURE IN BUILDINGFACADES OF MODERNMATERIALS. ISO 690. American Journal of Research

Golewski, G. L. (2023). Improving the fracture toughness of concrete with fly ash, and its relationship with the microstructure. *Materials Science and Engineering: A*, 859, 144274.

Harris, J. (2023). Self Healing Bio-Concrete: Building Materials of the Future. skEYewatch. Retrieved from <https://www.skeyewatch.com/self-healing-bio-concrete-future-building-materials/>

Hmidet, Ismail. (2020). Bionic Design Architectural Innovations Inspired by Nature with a Focus on Concrete Shell Structures. 10.13140/RG.2.2.25490.48329.

Jakubovskis, R., Boris, R., Antonovič, V., & Mačiulaitis, R. (2022). The Construction of a Footbridge Prototype with Biological Self-Healing Concrete: A Field Study in a Humid Continental Climate Region. *Materials*, 15(23), 8585.

Joachim, L., Schwabe, K., Fechner, T., & Dehn, F. (2024). Experimental Investigations on the Application of Natural Plant Fibers in High-Strength Concrete. *Materials*, 17(3), 743.

Jonkers, H. M. (2011). Bacteria-based self-healing concrete. *HERON*, 56(½), 1-12.

Lebdoui, Amir. (2022). Nature-inspired innovation policy: Biomimicry as a pathway to leverage biodiversity for economic development. *Ecological Economics*. 202. 107585. 10.1016/j.ecolecon.2022.107585.

Luhar, S., Suntharalingam, T., Navaratnam, S., Luhar, I., Thamboo, J., Poologanathan, K., & Gatheeshgar, P. (2020). Sustainable and Renewable Bio-Based Natural Fibres and Its Application for 3D Printed Concrete: A Review. *Sustainability*, 12(24), 10485.

MacCowan, R. J. (2023). 2023 in Review: Pioneering Biomimicry and Nature-inspired .Innovation in Global Research. Biomimicry Innovation Lab

Mei, X., Liu, C., & Li, Z. (2024). Research progress on functional, structural and material design of plant-inspired green bionic buildings. *Energy and Buildings*, 316, 114357.

Pan, H., Xie, Y., Chen, Z., & Feng, P. (2023). A bionic solution to make cement matrix tough. *Construction and Building Materials*, 371, 130627.

Schnellenbach-Held, M., & Habersaat, J. E. (2014). Bionic optimization of concrete structures by evolutionary algorithms. *Structural Engineering International*, 24(2), 229-235.

Van Tittelboom, K., Wang, J., Araújo, M., Snoeck, D., Gruyaert, E., Debbaut, B., ... & De Belie, N. (2020). First Large Scale Application with Self-Healing Concrete in Belgium: Analysis of the Laboratory Control Tests. *Materials*, 13(4), 997.

Wong, P. Y., Mal, J., Sandak, A., Luo, L., Jian, J., Pradhan, N., ... & Yu, L. (2024). Advances in microbial self-healing concrete: A critical review of mechanisms, developments, and future directions. *Science of The Total Environment*, 947, 174553.

Zhao, K., Li, W., Xie, Y., Lu, Z., & Zhang, M. (2019). Application of Natural Plant Fibers in Cement-Based Composites: A Review of Reinforcing Mechanisms. *Materials*, 12(23), 3892.