Journal of Structural and Construction Engineering, 12(08), 2025, pp. 52-75

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Encapsulation of bacterial cells in self-healing concrete: Approaches, challenges and innovations

Setayesh Shokraneh[1], Paria Nabavi[2], Kianoosh Samimi[3] * Mohammad Reza Hafezi[4]

1- Masters student, Faculty of Architecture and Urban planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2- Masters student, Faculty of Architecture and Urban planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
3- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.*
4- Associate Professor, Faculty of Architecture and Urban planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Concrete, as one of the most widely used construction materials, plays a significant role in both the economy and the environment. However, cracking and the subsequent ingress of chemical agents are among the main causes of concrete degradation, potentially leading to reduced strength and shorter service life of concrete structures. Detecting and repairing cracks is also a challenging and time-consuming process, especially when effective repair is needed. In the development of sustainable solutions to enhance concrete performance, bacteria-based self-healing concrete technology has emerged as an innovative approach. This technology repairs concrete cracks through calcium carbonate ($CaCO_3$) production without external intervention, thereby improving the environmental sustainability of structures by increasing their strength and durability. This review paper examines various methods and materials for encapsulating bacterial cells in self-healing concrete. The study aims to evaluate the effectiveness of diverse materials such as natural and synthetic polymers, hydrogels, nanomaterials, and hybrid materials for enhancing concrete durability and performance. It also addresses the challenges and innovations associated with these techniques, as well as the need to develop optimized methods to improve bacterial cell stability within concrete's alkaline environment. In this regard, over 80 papers published in reputable scientific journals have been reviewed. The findings of this research indicate that employing advanced encapsulation techniques can effectively enhance the durability and performance of self-healing systems in concrete. Furthermore, based on the consensus among researchers, encapsulation materials such as hydrogels and alginates play a significant role in improving mechanical strength and reducing water permeability. Additionally, the use of microorganisms for repairing larger cracks demonstrates high potential; however, fully harnessing these capabilities requires sufficient time for the healing process to take place.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 November 2024
Revise Date: 28 December 2024
Accept Date: 12 January 2025

Keywords:
Bacteria,
Calcium carbonate deposition,
Capsule,
Crack repair,
Self-healing concrete

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.486695.3557

*Corresponding author: Kianoosh Samimi
Email address: k_samimi@sbu.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

مروری بر کپسوله‌سازی سلول‌های باکتری در بتن خودترمیم شونده: رویکردها، چالش‌ها و نوآوری‌ها

ستایش شکرانه[۱]، پریا نبوی[۲]، کیانوش صمیمی[۳*]، محمدرضا حافظی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۴-دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران.

چکیده

بتن به عنوان یکی از پراستفاده‌ترین مصالح ساختمانی، نقشی اثرگذار در اقتصاد و محیط‌زیست دارد. با این حال ترک‌خوردگی و در پی آن ورود عوامل شیمیایی به داخل آن یکی از علل اصلی تخریب بتن می‌باشد که می‌تواند منجر به کاهش مقاومت و طول عمر مفید سازه‌های بتنی شود. شناسایی و ترمیم ترک‌ها نیز فرآیندی چالش‌برانگیز و زمان‌بر است، به‌ویژه در شرایطی که نیاز به ترمیم مؤثر احساس می‌گردد. در زمینه توسعه راهکارهای پایدار برای افزایش کارایی بتن، فناوری بتن خودترمیم‌شونده مبتنی بر باکتری به عنوان یک رویکرد نوآورانه مطرح شده است که با تولید کلسیم کربنات ($CaCO_3$)، ترک‌های ایجاد شده در بتن را بدون نیاز به مداخلات خارجی ترمیم و با افزایش مقاومت و دوام سازه‌ها، به بهبود پایداری محیط زیستی کمک می‌کند. این مقاله مروری به بررسی روش‌ها و مواد مختلف کپسوله‌سازی سلول‌های باکتریایی در بتن خودترمیم‌شونده می‌پردازد. هدف مطالعه، ارزیابی کارایی مواد متنوعی مانند پلیمرهای طبیعی و مصنوعی، هیدروژل‌ها، نانومواد و مواد هیبریدی برای افزایش دوام و عملکرد بتن است. همچنین، به چالش‌ها و نوآوری‌های مربوط به استفاده از این تکنیک‌ها و نیاز به توسعه روش‌های بهینه برای بهبود پایداری سلول‌های باکتریایی در محیط قلیایی بتن پرداخته شده است. در این راستا بیش از ۸۰ مقاله چاپ شده در مجلات علمی معتبر بررسی شده‌اند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از روش‌های کپسوله‌سازی نوین می‌تواند به‌طور مؤثری دوام و کارایی سیستم‌های خودترمیمی در بتن را افزایش دهد. همچنین بر اساس اجماع نظر محققین، مواد کپسوله‌سازی مانند هیدروژل‌ها و آلژینات‌ها نقش مؤثری در افزایش مقاومت مکانیکی و کاهش نفوذپذیری آب دارند. علاوه بر این، استفاده از میکروارگانیسم‌ها برای ترمیم ترک‌های بزرگ‌تر پتانسیل بالایی دارد، اما بهره‌گیری کامل از این قابلیت‌ها مستلزم فراهم کردن زمان کافی است.

کلمات کلیدی: باکتری؛ بتن خودترمیم شونده؛ ترمیم ترک؛ رسوب کلسیم کربنات؛ کپسول.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/jsce.2025.486695.3557
۱۴۰۳/۰۸/۲۱	۱۴۰۳/۱۰/۰۸	۱۴۰۳/۱۰/۲۳	۱۴۰۳/۱۰/۲۳	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2025.486695.3557

*نویسنده مسئول: کیانوش صمیمی

پست الکترونیکی: k_samimi@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

بتن دومین ماده پرمصرف بعد از آب در جهان و پرکاربردترین ماده در صنعت ساخت‌وساز می‌باشد [۱]. با این حال، استفاده گسترده از بتن چالش‌های زیست‌محیطی قابل توجهی را به همراه داشته است [۲, ۳]. تولید سیمان، که جزء اصلی بتن است، مسئول انتشار ۷ درصد از دی‌اکسید کربن (CO_2) سالانه در جهان است [۴, ۸]. این آمار نگران‌کننده، اهمیت افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی را بیش از پیش آشکار می‌سازد، چرا که با طولانی‌تر شدن عمر این سازه‌ها، نیاز به ساخت و ساز جدید و به تبع آن، تولید سیمان بیشتر، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، زیرساخت‌های موجود در بسیاری از کشورها رو به فرسودگی هستند و نیاز به سرمایه‌گذاری گسترده در بخش تعمیرات و بازسازی دارند. به عنوان مثال، در ایالات متحده آمریکا، حدود ۴۲ درصد از تمامی پل‌ها بیش از ۵۰ سال قدمت دارند و برای اقدامات تعمیر و بازسازی فوری، به سرمایه‌گذاری بیش از ۱۲۵ میلیارد دلار نیاز است [۹]. این وضعیت تنها محدود به آمریکا نیست؛ مطالعه‌ای که ده سال پیش انجام شد، نشان داد که اروپا حدود نیمی از بودجه ساخت و ساز خود را صرف تعمیر سازه‌های موجود کرده است [۱۰]. در ایران نیز، وضعیت مشابهی حاکم است. منابع مالی مورد نیاز برای تعمیر و نگهداری حدود ۱۸/۵۰۰ کیلومتر شبکه بزرگراهی، ۲۶/۳۰۰ کیلومتر راه اصلی و حدود ۱۵۰ کیلومتر سایر انواع راه‌ها، سالانه به بیش از ۲۰ هزار میلیارد تومان می‌رسد [۱۱]. این هزینه‌های هنگفت، در کنار این واقعیت که اکثر تعمیرات معمولی تنها می‌توانند ده تا پانزده سال به طول عمر سازه بیفزایند، اهمیت یافتن راه‌حل‌های پایدارتر و کارآمدتر را برجسته می‌سازد [۱۲]. یکی از عوامل اصلی تخریب سازه‌های بتنی، نفوذ عوامل شیمیایی مخرب مانند یون‌های کلرید و سولفات از طریق ترک‌ها و آسیب‌های موجود در بتن است. این فرآیند می‌تواند منجر به خوردگی میلگردهای فولادی تقویت‌کننده شود و در نتیجه، تخریب سازه را تسریع کند [۱۳]. به همین دلیل، نظارت مستمر، نگهداری به موقع و تعمیر سریع ترک‌های بتن از اهمیت بسزایی برخوردار است. با این حال، بازرسی و تعمیر مداوم ترک‌ها، به ویژه در زیرساخت‌هایی مانند پل‌ها یا تونل‌ها، کاری دشوار و پرهزینه است. در چنین شرایطی، ایده بتن خودترمیم‌شونده به عنوان یک راه‌حل نوآورانه مطرح شده است. این نوع بتن قادر است بدون دخالت انسان و به صورت خودکار، ترک‌های ایجاد شده را ترمیم و عملکرد سازه را بازیابی نماید [۱۲]. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای دستیابی به این هدف مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب [۱۴]، پلیمرهای حافظه شکل [۱۵]، رزین‌های اپوکسی [۱۶] از جمله این روش‌ها هستند. اما هر یک از آن‌ها، علی‌رغم مزایای خود، با معایبی نیز همراه هستند. به عنوان مثال، پلیمرهای سوپرجاذب می‌توانند با ایجاد فضاهای خالی در ساختار بتن، تخلخل آن را افزایش دهند که این امر می‌تواند منجر به کاهش مقاومت بتن و افزایش نفوذپذیری آب شود [۱۷]. از سوی دیگر، ترمیم با استفاده از پلیمرهای حافظه شکل، فرآیندی نسبتاً پیچیده و پرهزینه است [۱۸]. رزین‌های اپوکسی نیز، اگرچه برای ترک‌های کوچک مؤثر هستند، اما برای ترک‌های بزرگ و گسترده مناسب نیستند و ممکن است نتوانند به طور کامل آن‌ها را ترمیم کنند [۱۹]. علاوه بر این، رزین‌ها در برابر تغییرات دمایی و رطوبتی ممکن است دچار ترک‌خوردگی مجدد شوند [۲۰]. در این میان، استفاده از باکتری‌ها برای ترمیم خودکار ترک‌ها در بتن، به عنوان یک رویکرد نوآورانه و امیدوارکننده در طول ده تا پانزده سال گذشته مورد توجه قرار گرفته است [۲۱]. باکتری‌ها قادرند دی‌اکسید کربن را از هوا، یون‌های کلسیم را از ماتریس بتن و مواد پلیمری خارج سلولی را به عنوان الگوهایی برای هسته‌گیری جذب کنند. این میکروارگانیسم‌ها می‌توانند فرآیند معدنی شدن دی‌اکسید کربن و یون‌های کلسیم را تسریع کرده و کلسیم کربنات را برای پر کردن شکاف‌ها تشکیل دهند [۱۸]. با این حال، افزودن مستقیم باکتری‌ها به بتن با چالش‌هایی همراه است. شرایط سخت داخل بتن، مانند قلیائیت بالا و اندازه کم منافذ، می‌تواند باعث کاهش فعالیت و بقای باکتری‌ها شود [۲۲]. برای غلبه بر این مشکل، روش کپسوله‌سازی باکتری‌ها مطرح شده است. این روش می‌تواند باکتری‌ها را از شرایط نامساعد محیط بتن محافظت کند و در عین حال، امکان فعال شدن آن‌ها را در زمان نیاز فراهم آورد. یکی از اولین کاربردهای به کارگیری عوامل خودترمیمی با استفاده از روش کپسوله‌کردن در مقیاس میکرو با مواد پلیمری توسط وایت و همکاران [۲۳] انجام شد. از آن زمان، کپسوله‌کردن به عنوان یک استراتژی و راه‌حل کارآمد برای فرآیند خودترمیمی در نظر گرفته شده است [۲۴-۲۸]. باکتری‌های کپسوله‌شده در ماتریس بتن به دلیل محافظت در

برابر شرایط محیطی قلیایی و فشار بالا، زنده می‌مانند و قابلیت خود را برای ترمیم ترک‌ها حفظ می‌کنند [۲۹]. در طراحی کپسول‌ها، توجه به دو ویژگی مهم ضروری است: از یک سو، کپسول‌ها باید استحکام کافی برای مقاومت در برابر فرآیند اختلاط بتن را داشته باشند. از سوی دیگر، دیواره‌های آن‌ها باید به اندازه‌ای نازک و شکننده باشند که در صورت ایجاد ترک در بتن، به راحتی شکسته شوند و عوامل خودترمیمی را آزاد کنند [۳۰]. این طراحی دقیق تضمین می‌کند که عوامل ترمیم‌کننده در زمان مناسب و در محل ترک رها شده و فرآیند خودترمیمی را آغاز کنند. در سال‌های اخیر، پژوهشگران نوآوری‌های قابل توجهی در زمینه مواد مورد استفاده برای کپسوله‌سازی باکتری‌ها داشته‌اند. مواد آلی متنوعی مانند ملامین [۳۱]، هیدروژل [۳۲-۳۴]، آلژینات [۳۵-۳۸] و پلی‌اوره [۳۹] گزینه‌های مناسبی برای مواد کپسوله‌سازی هستند. هر یک از این مواد، ویژگی‌های منحصر به فردی دارند که می‌تواند در شرایط مختلف مفید واقع شود، به عنوان مثال شیائو و همکاران [۲۱] کپسولی جدید حاوی اسپورهای باکتری را از طریق خودآرایی لایه به لایه از پلی (دی متیل دی آلیل آمونیوم کلرید) و نانوذرات سیلیکا برای افزایش ترمیم و کاهش اثر منفی آن‌ها بر خواص مکانیکی بتن پیشنهاد کردند. خمیر سیمان حاوی این کپسول‌ها توانست ترک‌های با عرض کمتر از ۳۵۰ میکرومتر به‌طور کامل پر کند. همچنین ترک‌هایی با عرض ۳۵۰ تا ۴۵۰ میکرومتر نیز ۹۵ درصد بسته شدند و کاهش ۱۰۰ درصدی نرخ عبور آب را پس از ۵۰ چرخه خشک و تر در نمونه‌های دیسکی ترک‌دار نشان دادند. در تحقیق دیگری جیانگ و همکاران [۴۰] اثر پرلیت منبسط شده به عنوان حامل باکتری بر ظرفیت ترمیم ترک بتن بررسی کردند و حداکثر عرض ترک کاملا ترمیم شده را پس از ۲۸ روز را ۱/۲۴ میلی‌متر گزارش دادند. آن‌ها این حامل را به عنوان یک حامل باکتریایی عالی توصیف کردند. شیائو و همکاران [۴۱] در پژوهشی دیگر، کپسول جدیدی بر پایه سیمان منیزیم برای اسپورهای باکتری طراحی کردند که مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات سخت‌شده را تا ۱۸ درصد افزایش می دهد. علاوه بر این، پس از تنها پنج چرخه خشک/ مرطوب، نرخ بسته شدن ترک‌ها به ۹۳ درصد و کاهش ۸۰ درصدی در عبور آب برای ترک‌های عریض چند صد میکرونی مشاهده شد. لیانگ و همکاران [۴۲] در مطالعه خود به نوع جدیدی از مکانیسم خودترمیمی بتن رسیدند که شامل کپسول‌های سیمانی ضدآب که با چسب حساس به اشعه فرابنفش (چسبUV)[1] پر شده‌اند، است. آن‌ها ذکر کردند که کپسول‌های سیمانی پرشده با چسب UV که شامل زیرساخت سلولزی[2] یا زیرساخت ژلاتینی[3] بودند، به ترتیب به کاهش حدود ۸۳/۳۳ درصد و ۶۸/۳۸ درصد در نفوذپذیری آب کمک کرد. آن‌ها این مکانیسم را به عنوان یک گزینه ایده‌آل در احیای عملکرد بتن ترک خورده معرفی کردند.

این مطالعه مروری به بررسی جامع و دقیقی از انواع کپسول‌های مورد استفاده در بتن خودترمیم شونده می‌پردازد. در بخش اول، تجزیه و تحلیل مفصلی از مواد مختلف استفاده شده برای کپسوله‌سازی ارائه می‌شود، که به درک بهتر از نقش آن‌ها در فرآیند ترمیم کمک می‌کند. سپس، تأثیر روش مختلف کپسوله‌سازی بر روی سلول‌های باکتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تحلیل‌ها در نهایت به ما این امکان را می‌دهد که انواع هر یک از کپسول‌ها را شناسایی کنیم و به ارزیابی بهتر عملکرد آن‌ها در بهبود کیفیت بتن خودترمیم شونده بپردازیم.

۲- مواد و روش‌های کپسوله‌سازی

۲-۱- اهمیت و ضرورت کپسوله کردن

برای داشتن یک خود ترمیمی کارآمد، ترمیم ترک باید پایدار و ماندگار باشد تا بتواند در طول عمر مفید سازه به صورت پایدار عمل کرده و از وقوع خرابی‌های احتمالی جلوگیری نماید. بنابراین، بقای باکتری‌ها ضروری است. باکتری‌هایی که در بتن برای رسوب‌دهی

[1] Ultraviolet (UV) curable adhesive
[2] Cel UV
[3] Gel UV

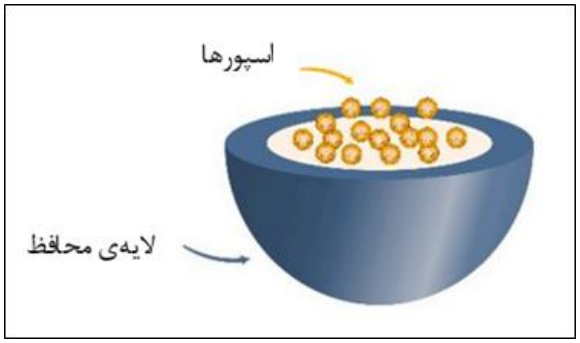
کلسیم کربنات به کار می‌روند، می‌توانند هوازی (باکتری‌هایی هستند که برای رشد و تکثیر به اکسیژن نیاز دارند) یا بی‌هوازی (باکتری‌هایی هستند که توانایی زندگی و رشد بدون اکسیژن را دارند) باشند. شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی باکتری‌های هوازی را نشان می‌دهد که به طور معمول در بتن خودترمیم شونده بکار برده شدند و نتایج مطلوبی به همراه داشته‌اند، مانند باسیلوس سوبتیلیس[۴]، باسیلوس اسفاریکوس[۵] و باسیلوس مگاتریوم[۶]. Bacillus subtilis یک باکتری میله‌ای شکل و گرم‌مثبت است که می‌تواند در شرایط اقلیمی سخت زنده بماند. Bacillus sphaericus یک باکتری گرم‌مثبت و میله‌ای شکل است و تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از این باکتری در غلظت‌های مناسب می‌تواند موجب بهبود مقاومت فشاری و دوام بتن شود [۴]. Bacillus megaterium، یک باکتری هوازی، اسپورساز و گرم‌مثبت است و تحقیقات نشان داده‌اند که با سیستم‌های سیمانی سازگار است و خواص مقاومت و دوام ترکیبات را بهبود می‌بخشد.

اما اگر عوامل زیستی (باکتری‌ها) مستقیماً به بتن اضافه شوند، ممکن است برای بقای آن‌ها چالش‌هایی وجود داشته باشد. در مقالات گزارش شده است که افزودن مستقیم سلول‌های باکتریایی (سلول‌های رویشی یا هاگ) و مواد مغذی بر مقاومت فشاری بتن تأثیر منفی می‌گذارند و علاوه بر این، این افزودنی‌ها اثربخشی سیستم خودترمیمی را محدود می‌کنند، به طوری که عملکرد مطلوب آن تنها برای مدت چند ماه حفظ می‌شود [۴۳, ۴۴]. همچنین به دلیل متراکم شدن ساختار منافذ در طول هیدراتاسیون، باکتری‌ها نمی‌توانند زنده بمانند [۱۸].

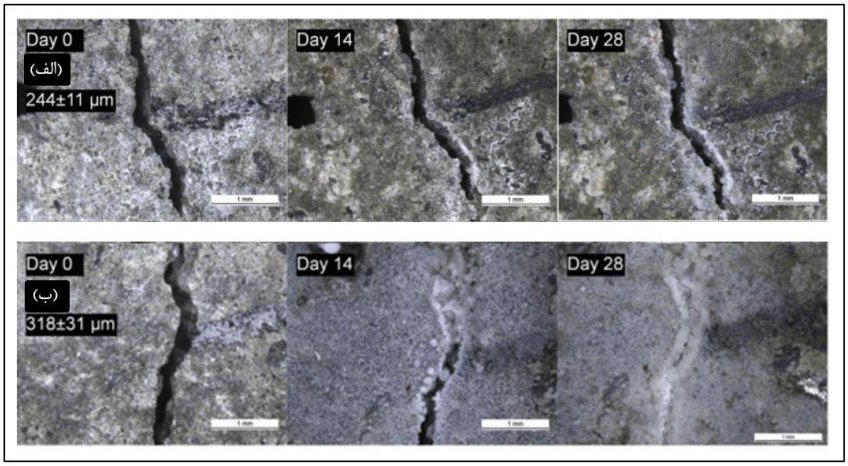
شکل ۱: تصاویری از میکروسکوپ الکترونی رویشی از انواع مختلف باکتری‌ها. (الف) باسیلوس سوبتیلیس، (ب) باسیلوس اسفاریکوس، (ج) باسیلوس مگاتریوم [۴].

لذا افزودن مستقیم باکتری‌ها به دلیل محیط بسیار قلیایی بتن توصیه نمی‌شود. شو و همکاران [۲۲] گزارش دادند که فعالیت باکتری‌ها در محیط با pH بالا (بیشتر از ۱۲) به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و سلول‌های باکتری (با اندازه ۱ تا ۳ میکرومتر) به دلیل کاهش اندازه منافذ (کمتر از ۰/۵ میکرومتر) در طول فرآیند هیدراسیون بتن ممکن است فشرده یا خرد شوند. به همین دلیل کپسوله یا تثبیت کردن سلول‌های باکتری راه‌حل بسیار مناسبی برای رفع این مشکلات است. شکل ۲ ساختار شماتیک یه کپسول حاوی اسپورهای باکتری و چگونگی محصور شدن آن‌ها را نشان می‌هد. شکل ۳ روند ترمیم ترک‌ها در بتن خودترمیم شونده را نشان می‌دهد. در این شکل، فرآیند پر شدن ترک‌ها با رسوب‌دهی کلسیم کربنات که توسط باکتری پسودوموناس آئروژینوزا[۷] تولید شده، به نمایش درآمده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ترک‌های اولیه در ملات حاوی آن در مقایسه با ملات مرجع (ملاتی که حاوی سلول‌های باکتری نیست) به تدریج کاهش یافته و با محصولات ترمیمی پر می‌شوند، که این امر بهبود دوام و مقاومت بتن را به همراه دارد.

[4] Bacillus subtilis
[5] Bacillus sphaericus
[6] Bacillus megaterium
[7] Pseudomonas aeruginosa



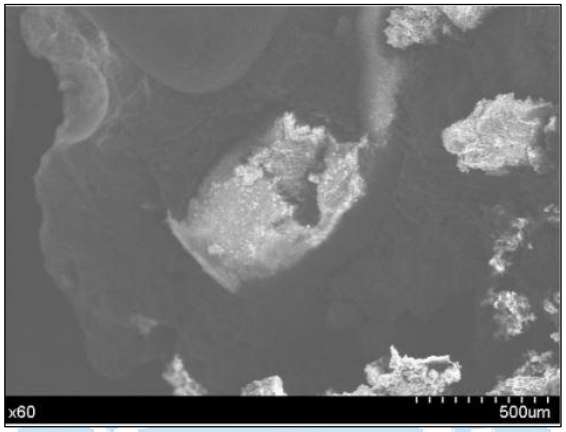
شکل ۲: نمودار شماتیک ساختار کپسول [۴۸]



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپ عکس که تکامل دو هفته‌ای ترک‌ها را در طول ۲۸ روز غوطه‌وری در آب نشان می‌دهد: الف) ملات مرجع. ب) ملات حاوی ذرات رس منبسط شده با پسودوموناس آئروژینوزا. (مقادیر داده شده نشان دهنده عرض متوسط ترک نشان داده شده

۲- ۲- بررسی مواد مختلف استفاده شده برای کپسوله‌سازی اسپورهای باکتری

کپسوله‌سازی باکتری‌ها به‌عنوان یک تکنیک مؤثر برای افزایش دوام بتن خودترمیم شونده مطرح شده است. شکل ۴ مورفولوژی یک میکروکپسول بعد از پاره و آزاد شدن عامل ترمیم‌کننده را نشان می‌دهد. نحوه‌ی عملکرد کپسول‌ها را می‌توانید در شکل ۵ مشاهده نمایید. در شکل ۵ (الف) کپسول‌ها که شامل مواد مغذی و اسپورهای باکتری هستند مشخص شده است. هنگامی که بتن سالم و یکپارچه‌است، (شکل ۵ ب) این اسپورها غیرفعال باقی می‌مانند، اما با ایجاد ترک در بتن و نفوذ آب، کپسول‌ها شکسته شده و رشد



شکل ۴: مورفولوژی میکروکپسول های آسیب دیده در بتن

باکتری‌ها آغاز می‌شود (شکل ۵ ج). باکتری‌ها از مواد مغذی مانند کلسیم لاکتات[8] برای رشد استفاده می‌کنند. اوره‌آز میکروبی[9] (آنزیمی که توسط برخی باکتری‌ها تولید می‌شود و وظیفه‌ی تجزیه اوره به آمونیاک و دی‌اکسید کربن را بر عهده دارد) می‌تواند اوره را هیدرولیز[10] (به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن اوره با حضور آب تجزیه می‌شود) کرده و آمونیاک و کربن دی‌اکسید تولید کند. آمونیاک آزاد شده، pH محیط را افزایش می‌دهد که به رسوب کلسیم کربنات نامحلول کمک می‌کند. به این ترتیب ترک‌ها ترمیم و پر می‌شوند (شکل ۵ د) [۴۸].

مواد مختلفی برای کپسوله‌کردن سلول‌های باکتری به کار گرفته شده‌اند که می‌توان آن‌ها را به چند دسته اصلی تقسیم کرد: پلیمرها (طبیعی و مصنوعی)، هیدروژل‌ها، مواد معدنی، نانو مواد و مواد هیبریدی. در ادامه، هر یک از این دسته‌ها به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار خواهند گرفت:

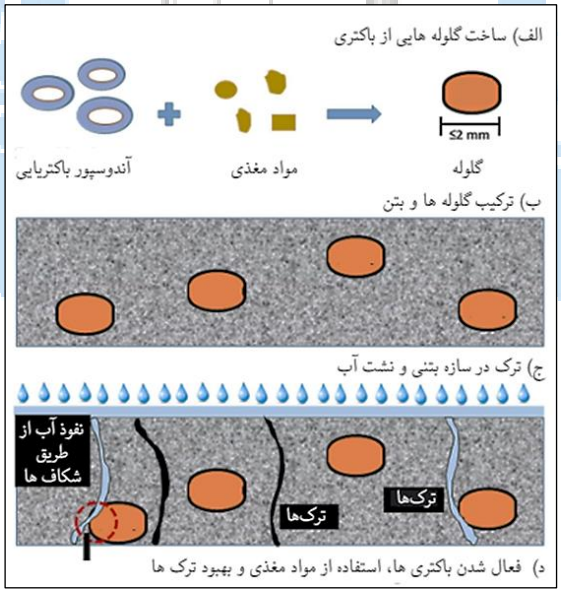
۲-۲-۱- پلیمرهای طبیعی

پلیمرهای طبیعی مانند سدیم آلژینات،کلسیم آلژینات و کیتوزان به عنوان مواد کپسوله‌ساز سلول‌های باکتریایی در بتن خودترمیم‌شونده به کار می‌روند. این پلیمرها به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، سازگاری با محیط‌زیست و مقاومت در برابر محیط قلیایی بتن، گزینه‌های مناسبی برای این فناوری هستند. به‌ویژه، سدیم آلژینات و کلسیم آلژینات به دلیل تشکیل ژل‌های پایدار و محافظت از سلول‌های باکتریایی در شرایط نامطلوب، کاربرد گسترده‌ای دارند. شاهید و همکاران [۳۵] دریافتند که کپسوله‌سازی سویه‌های مختلف باکتری‌ها (باسیلوس سوبتیلیس و باسیلوس پاستوری[11]) در دانه‌های سدیم آلژینات (با ۲–۳٪ حجم کل بتن) باعث ترمیم مؤثر میکروترک‌ها بدون کاهش مقاومت فشاری می‌شود، همچنین پوشش سدیم آلژینات از نشت

[8] Calcium Lactate
[9] Microbial Urease
[10] Hydrolysis
[11] Bacillus Pasteurii

باکتری‌ها جلوگیری نمود و فعالیت اوره‌آزی[12] آن‌ها منجر به رسوب کلسیم کربنات ($CaCO_3$) شد. فعالیت اوره‌آزی به فرآیند بیوشیمیایی اطلاق می‌شود که در آن آنزیم اوره‌آز، اوره را هیدرولیز کرده و به آمونیاک و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌کند. در نتیجه استفاده از کپسول‌های سدیم آلژینات نه تنها سازگاری خوبی با بتن داشت، بلکه شرایط مناسبی برای خودترمیمی و افزایش مقاومت فشاری بتن فراهم کرد. به طور مشابه شی و همکاران [۴۹]، در مطالعه‌ای با استفاده از کپسول‌های کلسیم آلژینات با نسبت بهینه ۳۰ به ۷۰ (کلسیم آلژینات به مخلوط آسفالت) به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های آسفالت حاوی کپسول‌های کلسیم آلژینات دارای شاخص ترمیمی[13] ۴۰ درصد هستند، به این معنا که ۴۰ درصد استحکام بیشتری نسبت به استحکام اولیه دارند، در حالی که نمونه‌های بدون کپسول تنها ۴ درصد شاخص ترمیمی داشتند. این نتایج تأکیدی بر کارایی بالای کپسول‌های کلسیم آلژینات در آزادسازی ترمیم‌کننده‌ها پس از ترک خوردن کپسول‌ها و بهبود قابلیت ترمیم ترک‌ها را داشت. پالین و همکاران [۳۷] در تحقیق دیگری میزان تولید کلسیت (کلسیم کربنات) در بتن را با استفاده از دانه‌های کلسیم آلژینات بررسی کردند. آن‌ها اسپورهای باکتری و مواد معدنی لازم برای تولید کلسیت را درون این دانه‌ها (کپسول‌هایی از جنس کلسیم آلژینات) قرار دادند و پس از غوطه‌وری ۱۴ روزه در آب، حدود ۱ میلی‌متر مکعب کلسیت تولید شد.

از سوی دیگر کیتوزان نیز به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود از جمله توانایی تشکیل فیلم‌های محافظ، قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری و فعالیت ضدمیکروبی، به یکی از گزینه‌های اصلی در کپسوله‌سازی باکتری‌ها تبدیل شده است. در مطالعه‌ای توسط گائو و همکاران [۵۰]، افزودن ۱/۰ درصد کیتوزان[14] به هیدروژل[15] باعث بهبود خاصیت تورمی کلسیم آلژینات و منجر به افزایش ۱۰/۲۸ درصدی مقاومت فشاری و ۱۳/۷۹ درصدی مقاومت خمشی نسبت به نمونه کنترل شد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر توسط وانگ و همکاران



شکل ۵: عملکرد کپسول‌ها در بتن خود ترمیم شونده (پراستفاده‌ترین مسیر MICP) (رسوب کلسیت القا شده توسط میکروارگانیسم‌ها) در بتن میکروبی خود ترمیم شونده

[12] Urease

[13] Healing Index (شاخص ترمیمی) معمولاً نشان‌دهنده درصد بازیابی خواص مکانیکی نسبت به حالت اولیه است.

[14] کیتوزان (Chitosan) مشتق می‌شود. کیتین یکی از فراوان‌ترین پلی‌ساکاریدهای طبیعی در طبیعت است و عمدتاً در (Chitin) یک پلیمر طبیعی زیست‌تخریب‌پذیر و زیست‌سازگار است که از کیتین اسکلت خارجی سخت‌پوستان (مانند میگو، خرچنگ و خرچنگ دریایی)، دیواره سلولی قارچ‌ها و برخی حشرات یافت می‌شود.

[15] هیدروژل (Hydrogel) یک ماده پلیمری سه‌بعدی است که قابلیت جذب و نگهداری مقادیر زیادی آب یا مایعات در ساختار خود را دارد، بدون این‌که در آب حل شود. این ویژگی به دلیل ساختار شبکه‌ای و متقاطع آن است که باعث ایجاد فضاهایی برای ذخیره آب در بین زنجیره‌های پلیمری می‌شود.

[۳۴]، هیدروژل مبتنی بر کیتوزان واکنش مطلوبی به تغییرات pH نشان داد. این هیدروژل در pH خنثی و کمی قلیایی دارای خاصیت تورمی بالایی بود، اما در محلول‌های بسیار قلیایی سیمان، کاهش قابل‌توجهی در میزان تورم از خود نشان داد. افزودن ۱/۰۰ درصد وزنی هیدروژل به نمونه‌ها باعث کاهش تنها ۵ درصدی مقاومت فشاری شد. علاوه بر این، نمونه‌های حاوی باکتری‌های کپسوله‌شده با هیدروژل و کیتوزان توانستند نفوذ آب را ۸۱ تا ۹۰ درصد کاهش دهند و حدود ۳۲ درصد از ترک‌های موجود را به طور کامل بپوشانند. این نتایج نشان می‌دهد که کیتوزان به‌عنوان ماده پوشش‌دهنده، نه تنها سازگاری زیستی خوبی دارد بلکه به بهبود کارایی خودترمیمی بتن نیز کمک می‌کند. با این حال، یکی از چالش‌های کیتوزان، حساسیت آن به دما و pH بالای محیط است که امکان دارد عملکرد آن را در شرایط مختلف در بتن محدود کند. بنابراین، بهبود خواص کیتوزان و بهینه‌سازی شرایط استفاده از آن می‌تواند مسیرهای جدیدی برای بهره‌گیری از این پلیمر در فناوری‌های نوین خودترمیمی باز کند.

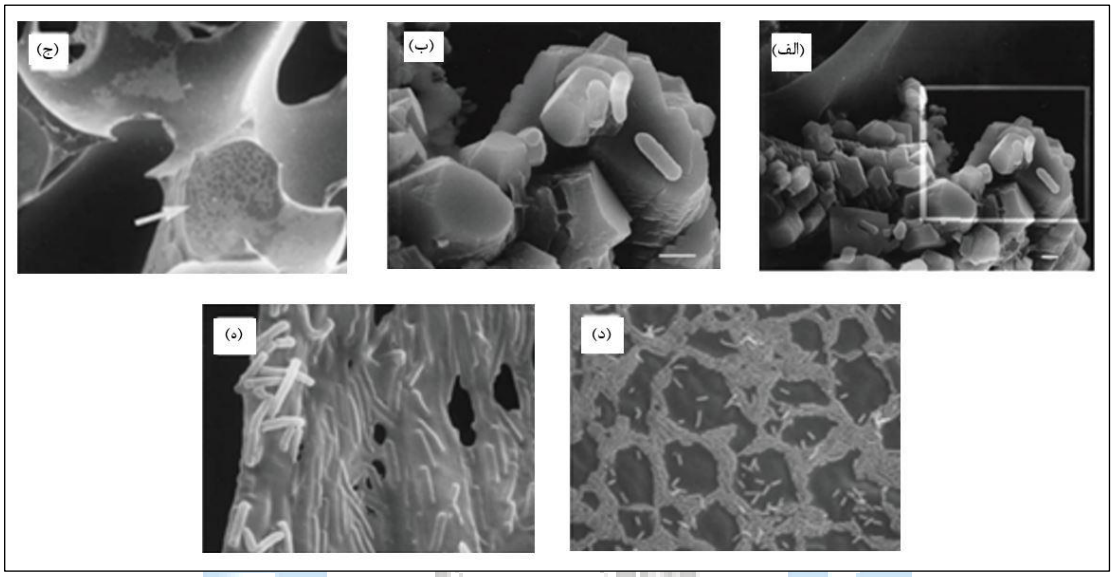
۲-۲-۲- پلیمرهای مصنوعی

پلیمرهای مصنوعی مانند میکروکپسول‌های ملامین، پلی‌اوره، پلی‌یورتان و سیلیکاژل، به دلیل پایداری بالا و مقاومت در برابر تجزیه، به عنوان گزینه‌های ایده‌آل برای کپسوله‌سازی باکتری‌ها در بتن محسوب می‌شوند. این مواد به طور ویژه در مواردی که نیاز به محافظت طولانی مدت از سلول‌های باکتری در برابر شرایط قلیایی بتن وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در یکی از مطالعات وانگ و همکاران [۵۱] از میکروکپسول‌های بر پایه ملامین برای کپسوله‌سازی اسپورهای باسیلوس اسفاریکوس استفاده کردند. آن‌ها موفق شدند غلظتی معادل $۱۰^{۹}$ اسپور باسیلوس اسفاریکوس در هر گرم میکروکپسول به صورت وزن خشک به دست بیاورند. اگرچه میکروکپسول‌ها تا حدی می‌توانند موجب کاهش مقاومت بتن شوند (بین ۱۵ تا ۳۴ درصد کاهش در مقاومت فشاری به ترتیب با استفاده از ۱ تا ۵ درصد میکروکپسول)، اما اسپورهای جا داده شده در میکروکپسول‌ها از قابلیت زیستی مطلوبی برخوردار بودند. این تحقیق نشان داد که میکروکپسول‌های ملامین می‌توانند به خوبی نقش حفاظتی را ایفا کرده و در عین حال، شرایط مناسب برای فعالیت باکتری‌ها را فراهم آورند. در تحقیق دیگری زمانی و همکاران [۳۹] سعی در سنتز پلی‌اوره برای محصور کردن باکتری‌ها داشتند. کپسوله‌سازی باکتری باسیلوس سودوفیرموس در پلی‌اوره با استفاده از پلیمریزاسیون درجا[16] انجام شد و نتایج نشان داد که این پوشش به‌طور مؤثری از باکتری‌ها در محیط قلیایی بتن محافظت می‌کند. پس از ۲۲ روز عمل‌آوری، رسوبات کلسیم کربنات در سطح ترک‌ها مشاهده شد. کپسول‌های پلی‌اوره با کاهش نفوذپذیری آب و ایجاد شرایط مناسب برای رشد باکتری‌ها در ترک‌ها، نقش مهمی در ترمیم ترک‌ها ایفا کردند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که استفاده از پلی‌یورتان (PU) به عنوان کپسول، می‌تواند به‌طور مؤثر از بقای باکتری‌ها در شرایط بسیار قلیایی بتن محافظت کند. ساختار متخلخل PU نه تنها به رسوب کلسیت کمک می‌کند، بلکه از طریق تعاملات پیوندی و شیمیایی چندگانه موجب افزایش ۲۶ درصدی مدول الاستیسیته و ۴۲ درصدی مقاومت کششی در بتن می‌شود. علت بهبود خواص مکانیکی وجود گروه‌های عاملی ایزوسیانات (گروه‌های ایزوسیانات (-N=C=O)) است که به‌عنوان گروه‌های واکنش‌پذیر عمل می‌کنند و می‌توانند به آسانی با سایر گروه‌های شیمیایی، از جمله گروه‌های هیدروکسیل (-OH) در ترکیبات بتن مانند سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) واکنش و پیوندهای اورتانی جدید تشکیل دهند. این پیوندهای شیمیایی قوی، باعث اتصال محکم بین فاز پلیمری و ماتریس سیمانی می‌شوند. شکل ۶ نشان می‌دهد که باکتری‌ها در منافذ فوم پلی‌یورتان توزیع شده‌اند و رسوبات کلسیم کربنات در داخل منافذ دیده می‌شوند. با این حال، استفاده از PU به دلیل اثرات زیست‌محیطی منفی با چالش‌هایی همراه است. در این راستا، سیلیکاژل[17] به عنوان

[16] پلیمریزاسیون درجا فرآیندی است که در آن پلیمر در محل یا همان محیط مورد نظر سنتز می‌شود، بدون اینکه نیاز به انتقال مواد به مکان دیگری برای انجام واکنش‌های پلیمری وجود داشته باشد. این روش معمولاً برای تولید پلیمرهایی که ویژگی‌های خاصی برای کاربردهای خاص نیاز دارند، استفاده می‌شود. این روش در زمینه‌های مختلفی مانند تولید کامپوزیت‌ها، مواد خودترمیم‌کننده، و برخی پلیمرهای خاص کاربرد دارد.

[17]) ساخته می‌شود. این ماده به‌طور معمول در قالب دانه‌های کوچک یا گرانول‌ها تولید می‌شود و قادر است رطوبت را از محیط (SiO_2) یک ماده جاذب رطوبت است که از سیلیس (Silica gel) سیلیکاژل (
جذب کرده و از آسیب دیدن محصولات حساس به رطوبت جلوگیری کند.

حامل دیگری مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که سیلیکاژل در تثبیت باکتری‌ها عملکرد بهتری دارد و ۱۴ درصد کلسیم کربنات بیشتری نسبت به پلی‌یورتان (PU) تولید می‌کند. با این حال، زمانی که این مواد به عنوان حامل در ترمیم ترک‌های بتن استفاده می‌شوند، نرخ بازیابی مقاومت در نمونه‌های باکتری تثبیت‌شده در PU به ۶۰ درصد می‌رسد (سیلیکاژل به دلیل شکنندگی و پایداری مکانیکی کمتر، عملکرد ضعیف‌تری در این زمینه دارد) و ضریب نفوذپذیری آب در این نمونه‌ها به محدوده 10^{-10} تا 10^{-11} متر بر ثانیه کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده برتری PU در کاهش نفوذپذیری آب است [۵۲].



شکل ۶: ریزنگاره‌های الکترونی از کلسیت. سلول‌های مرتبط با بلورهای کلسیت در ماتریس‌های پلی‌یورتان (الف- ب). بخشی بزرگ‌نمایی شده در (الف) مشخص شده و باسیلوس پاستوری که در پلی‌یورتان تثبیت شده است (ج). ناحیه بزرگی از ماتریس‌های PU که با میکروارگانیسم‌ها توزیع شده‌اند (د- ه) [۵۲].

۲-۲-۳- مواد معدنی

مواد معدنی مانند پرلیت منبسط شده و زئولیت به‌عنوان حامل‌های مؤثر برای کپسوله‌سازی باکتری‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مواد می‌توانند با جذب مواد مغذی و ایجاد یک محیط محافظ، به فعالیت طولانی‌مدت سلول‌های باکتری کمک کنند. به‌عنوان مثال محمد و همکاران [۵۳] از دانه‌های پرلیت منبسط شده (EP) پوشش‌دار برای کپسوله‌سازی اسپورهای باکتری و مواد مغذی به عنوان یک سیستم دو جزئی در بتن خودترمیم‌شونده استفاده کردند. برای کپسوله‌سازی، ابتدا ذرات EP در یک سوسپانسیون حاوی هاگ‌های باکتری قرار داده شدند. سپس لایه اولیه سیلیکات سدیم با خیساندن ذرات EP در محلول سیلیکات سدیم ایجاد شد تا سطح آن‌ها کاملاً مرطوب شود. پس از آن، ذرات در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. در مرحله بعد، یک لایه دوم از سیلیکات سدیم روی EP اعمال و در نهایت پودر سیمان خشک روی سطح مرطوب سیلیکات سدیم پاشیده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از پرلیت منبسط شده پوشش‌دار به عنوان جایگزین ۲۰ درصدی ماسه ریزدانه و با نسبت مناسب اسپور به کلسیم استات (حدود 8×10^9 اسپور به ازای هر گرم کلسیم استات) می‌تواند منجر به ترمیم ترک‌ها شود. در مطالعه دیگری سینی بهاسکار و همکاران [۵۴] از زئولیت به عنوان حامل برای حفاظت از باکتری‌ها در محیط قلیایی بتن بهره بردند. این ماده توانست شرایط مناسب برای اسپورزایی و فعالیت اورئولیتیکی[18] بالای باکتری‌ها را فراهم کند، که این ویژگی‌ها نقش مهمی در بقا و تولید ترکیبات ترمیم‌کننده در محیط با pH بالا داشت. با این حال،

[18] Ureolytic

پایداری و دوام مواد معدنی در برابر شرایط قلیایی بتن همچنان به‌عنوان یک چالش مطرح است. منظور از پایداری مواد معدنی، توانایی آن‌ها برای حفظ ساختار شیمیایی و فیزیکی خود ناشی از حضور هیدروکسیدهای کلسیم و سدیم/ پتاسیم در خمیر سیمان است که pH محیط را به حدود ۱۲ تا ۱۳ می‌رساند. این شرایط می‌تواند موجب واکنش‌های شیمیایی مانند انحلال یا تغییر فاز در مواد معدنی شود، که منجر به کاهش عملکرد، تخریب یا ناپایداری این مواد در بتن می‌گردد. چالش اصلی این است که بسیاری از مواد معدنی مورد استفاده در بتن به‌عنوان کپسول، در محیط قلیایی مقاومت کافی ندارند و ممکن است با گذر زمان آسیب ببینند یا تخریب شوند، که این امر بر دوام و عملکرد بتن اثر منفی می‌گذارد.

۲-۲-۴- هیدروژل‌ها

هیدروژل‌ها به‌عنوان یکی از حامل‌های مؤثر در محافظت از سلول‌های باکتری در بتن خودترمیم‌شونده مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵۵]. این مواد به دلیل تنوع و کارآیی بالا، به‌عنوان بسترهای کپسوله‌سازی برای اسپورهای باکتری[19] به کار گرفته می‌شوند و نقشی کلیدی در حفظ فعالیت آن‌ها دارند [۳۲]. به‌طور کلی، هیدروژل‌ها در فرآیند کپسوله‌سازی از دو جهت به بهبود خواص بتن کمک می‌کنند:

۱. هیدروژل‌ها به عنوان حامل‌هایی برای محافظت از باکتری‌ها در طی مراحل اختلاط و گیرش بتن عمل می‌کنند.

۲. از آنجا که هیدروژل‌ها دارای پایه آبی هستند، به‌عنوان منبع ذخیره آب نیز عمل کرده و به تأمین آب مورد نیاز در فرآیند هیدراتاسیون سیمان کمک می‌کنند [۵۶].

در مطالعه‌ای که توسط ژو و همکاران [۵۷] انجام شد، از هیدروژل به عنوان پوشش برای کپسوله‌سازی اسپورهای باسیلوس اسفاریکوس استفاده کردند. نتایج نشان داد که پس از ۲۴ ساعت انکوباسیون، ۹۰ درصد اسپورزایی حاصل شده است. همچنین اندازه‌گیری‌های میکروکالری‌متر[20] پس از تعلیق خالص اسپور در محیط کشت نشان داد که فعالیت میکروبی از روز سوم انکوباسیون آغاز شده و حاکی از فعال شدن باکتری‌ها پس از کپسوله‌سازی در هیدروژل است. استفاده از فیلم سنجش اکسیژن در ملات ترک‌خورده نیز کاهش ۶۶ درصدی غلظت اکسیژن را در نزدیکی ترک‌ها نشان داد، که این کاهش بیانگر فعالیت باکتری‌ها بود. مطالعه‌ی دیگری توسط هونگاریا و همکاران [۵۸] انجام گرفت که در آن از هیدروژل به عنوان پوشش کپسوله‌سازی باکتری‌ها استفاده گردید. نتایج نشان داد که استفاده از هیدروژل همراه با کلسیم لاکتات و مخمر، موجب بهبود ۲۰/۴ درصدی کارایی خودترمیمی بتن در مقایسه با نمونه‌های شاهد شده است. علاوه بر این، این ترکیب باعث افزایش ۱۷ درصدی مقاومت فشاری بتن گردید. اگرچه نتایج نشان داد که در شرایط آزمایش بازیابی مقاومت خمشی[21]، نمونه‌های شاهد عملکرد بهتری در بازیابی داشتند، اما نمونه‌های حاوی هیدروژل و باکتری‌ها در ترک‌های بزرگ‌تر از ۴۵۰ میکرومتر، عملکرد مشابهی با نمونه‌های شاهد داشته و موفق به دستیابی به ۵۸ درصد خودترمیمی در مدت ۲۸ روز شدند که نشان می‌دهد ترک‌های بزرگ‌تر زمان بیشتری برای ترمیم نیاز دارند و این باعث کاهش کارایی نسبی خودترمیمی در مدت ۲۸ روز شده است. همچنین باکتری‌ها از طریق رسوب‌گذاری کلسیم کربنات (کلسیت) به ترمیم ترک‌ها کمک می‌کنند. این فرآیند برای ترک‌های بزرگ‌تر نیازمند زمان بیشتری می‌باشد.

۲-۲-۵- نانومواد

[19] اسپور باکتری به ساختاری مقاوم، غیرفعال و غیرتکثیرکننده گفته می‌شود که برخی از گونه‌های باکتری در شرایط نامساعد محیطی (مانند کمبود مواد مغذی، دماهای شدید یا خشکی) تولید می‌کنند. این اسپورها حاوی مواد ژنتیکی و برخی اجزای اساسی سلول هستند که در لایه‌ای بسیار مقاوم محافظت می‌شوند.

[20] Microcalorimeter

[21] Flexural strength recovery

نانومواد نظیر نانوپلاکت‌های گرافن و نانوذرات اکسید آهن به دلیل خواص منحصر به فردشان در تقویت ساختار کپسول‌ها و افزایش مقاومت مکانیکی بتن خودترمیم‌شونده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مواد می‌توانند به بهبود پایداری کپسول‌ها و کاهش نشت مواد درون آن‌ها کمک کنند، اما هزینه بالای تولید نانومواد یکی از محدودیت‌های کاربردی آن‌ها است.

مطالعه‌ی سیفان و همکاران [۵۹, ۶۰] به بررسی استفاده از نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی (IONs) به عنوان پوشش برای کپسولاسیون باکتری‌ها پرداخت. نتایج نشان داد که نانوذرات اکسید آهن به‌طور مؤثری به سطح سلول‌های باکتریایی متصل و باعث بهبود فرآیند خودترمیمی در بتن شدند. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که حضور باکتری‌های کپسوله‌شده با نانوذرات اکسید آهن در ماتریس بتن، به ترمیم قابل‌توجه ترک‌ها منجر شد، در حالی که نمونه‌های شاهد (نمونه‌های بتنی فاقد باکتری تثبیت‌شده با نانوذرات اکسید آهن) فاقد این خاصیت بودند. همچنین، استفاده از سلول‌های باکتریایی کپسوله‌شده با IONs موجب کاهش جذب آب در نمونه‌های بتن شده و نرخ جذب اولیه و ثانویه آب را به ترتیب ۲۶ و ۲۲ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش داد. این نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات اکسید آهن به دلیل سازگاری با ترکیبات بتن، می‌توانند به‌عنوان یک پوشش محافظ مؤثر در تولید بتن خودترمیم‌شونده‌ی زیستی استفاده شوند. در مطالعه دیگری توسط خلیق و همکاران [۶۱] از دو نوع پوشش برای کپسولاسیون باکتری استفاده شده است: صفحات نانوگرافیت (GNP) و سنگ‌دانه‌های سبک. استفاده از صفحات نانوگرافیت، نتایج بهتری در بهبود ترک‌ها در نمونه‌های ترک‌خورده در روزهای ۳ و ۷ نشان دادند. نمونه‌های حاوی GNP توزیع یکنواخت‌تری از باکتری‌ها (منظور از توزیع یکنواخت‌تر این است که باکتری‌ها به‌صورت همگن و بدون تجمع در یک ناحیه خاص در سراسر ساختار بتن پراکنده شده‌اند) داشتند که باعث افزایش کارایی در فرآیند بهبود ترک‌ها شد. این پوشش توانست تا به صورت مؤثرتری از باکتری‌ها محافظت کند و بهبود قابل توجهی در پر کردن ترک‌ها در مراحل اولیه ایجاد ترک‌ها ارائه دهد. اما در نمونه‌های ترک‌خورده در مراحل بعدی (۱۴ و ۲۸ روز)، عملکرد GNP کاهش یافت و کارایی بهبود کمتری را نسبت به سنگ‌دانه‌های سبک نشان داد.

۲-۲-۶- مواد هیبریدی

بیوچار[22] به‌عنوان یک ماده هیبریدی مشتق‌شده از زیست‌توده، به دلیل ساختار متخلخل خود پتانسیل بالایی در کپسوله‌سازی دارد. این ماده می‌تواند آب و مواد مغذی را حفظ کند و به‌طور مؤثری در ترمیم ترک‌های بتن نقش ایفا کند. در مطالعه‌ای توسط ون و همکاران [۶۲] بر روی کپسول‌های کامپوزیتی کلسیم آلژینات/ دیاتومه[23] مشخص شد که این کپسول‌ها با ساختار چندحفره‌ای و ترکیب دیاتومه، به دلیل ساختار متخلخل خود، توانایی ذخیره و آزادسازی همزمان دو نوع عامل ترمیم‌کننده را دارند. همچنین، استفاده از دیاتومه باعث بهبود مقاومت فشاری و پایداری حرارتی کپسول‌ها شد و سرعت رهاسازی عامل ترمیم‌کننده را کاهش داد. این کپسول‌های اصلاح‌شده در مقایسه با کپسول‌های ساده کلسیم آلژینات ، در طول دوره‌های بارگذاری فشاری، پتانسیل رهاسازی تدریجی و بلندمدت را نشان دادند و سطح بهبودی قابل قبولی را در آسفالت (از این کپسول‌ها در نمونه‌های آسفالت استفاده شده است) پس از بارگذاری طولانی‌مدت فراهم کردند. کوآ و همکاران [۶۳] برای کپسوله‌سازی اسپورها از بیوچار به عنوان پوشش استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که استفاده از اسپورهای باکتریایی کپسوله‌شده در بیوچار به همراه پلیمر سوپر جاذب (SAP[24]) و الیاف، موجب بهبود قابل توجهی در بسته شدن ترک‌ها و بازیابی خواص مکانیکی و نفوذپذیری در بتن می‌شود. پر شدن ترک‌ها و ترمیم ویژگی‌های مکانیکی و نفوذپذیری در بتن با اسپورهای کپسوله‌شده در بیوچار به طور مداوم بیشتر از بتن‌های حاوی اسپورهای اضافه شده به طور مستقیم و SAP در طول سه دوره آسیب و ترمیم بود. در نتیجه، ترکیب سیستم‌های سیمانی با اسپورهای کپسوله‌شده در بیوچار، SAP و الیاف می‌تواند بهبود خودترمیمی و دوام بتن را افزایش دهد. در جدول ۱، انواع مختلفی از عوامل ترمیم‌کننده به همراه کپسول‌های مربوطه نمایش داده شده است.

[22] Biochar
[23] Diatomite
[24] Super Absorbent Polymer

جدول ۱: عوامل ترمیم‌کننده استفاده‌شده در بتن خودترمیم شونده به همراه جنس کپسول‌های آن‌ها.

عامل ترمیم کننده	جنس کپسول	نتیجه	منابع
باکتری (به نوع باکتری اشاره نشده است.)	کلسیم آلژینات	کپسول‌های مبتنی بر آلژینات پتانسیل زیادی را در توسعه بتن خودترمیم‌شونده مبتنی بر باکتری در محیط‌های دریایی با دمای پایین (در دمای ۸ درجه سانتیگراد) نشان دادند.	[۳۷]
سیلیکات سدیم	اتیل سلولز	میکروکپسول‌ها و عامل عمل‌آوری با مقادیر بهینه ۱ تا ۳ درصد موجب افزایش مقاومت‌های خمشی و فشاری نمونه‌های ملات شدند، اما با افزایش میزان میکروکپسول تا ۷ درصد، مقاومت نمونه حدود ۳۰ درصد کاهش یافت.	[۶۴]
پلی‌یورتان	اتیل سلولز	کپسول‌های سلولز اتیل حاوی عوامل نرم‌کننده (۲۵ درصد وزنی) توانستند در برابر مخلوط کردن بتن مقاومت کنند، اما به دلیل مشکلات ناسازگاری (عمدتاً سفت شدن زودهنگام پیش‌ماده) و این واقعیت که کپسول‌ها هنگام ظاهر شدن ترک نمی‌شکنند، این کپسول‌ها برای بتن خودترمیم‌شونده مناسب نیستند.	[۶۵]
سیلیکات سدیم	ژلاتین و صمغ آکاسیا	میکروکپسول‌ها با موفقیت در محیط‌های مبتنی بر سیمان عملکرد خود را حفظ می‌کنند، و تحلیل حرارتی نیز نشان داد که این میکروکپسول‌های تولیدشده تا دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس از پایداری بالایی برخوردار هستند.	[۶۶]
اپوکسی	اوره فرمالدهید	با افزایش مقدار میکروکپسول‌ها، مقاومت فشاری و مدول دینامیکی نمونه‌های ملات ماسه سیمان کاهش می‌یابد که این افت ناشی از افزایش تخلخل و حجم تجمعی منافذ است؛ اما در مقابل، نرخ‌های خودترمیمی و بازیابی عملکرد نمونه‌ها بهبود می‌یابند.	[۶۷]

۲-۳- تکنیک‌های کپسوله‌سازی

روش‌های گوناگونی برای کپسوله‌کردن سلول‌های باکتری وجود دارد که مورد استفاده‌ترین روش‌ها شامل فریز درایینگ[۲۵]، خشک‌کردن پاششی[۲۶] و پلیمریزاسیون[۲۷] می‌شود.

۲-۳-۱- تکنیک فریز درایینگ

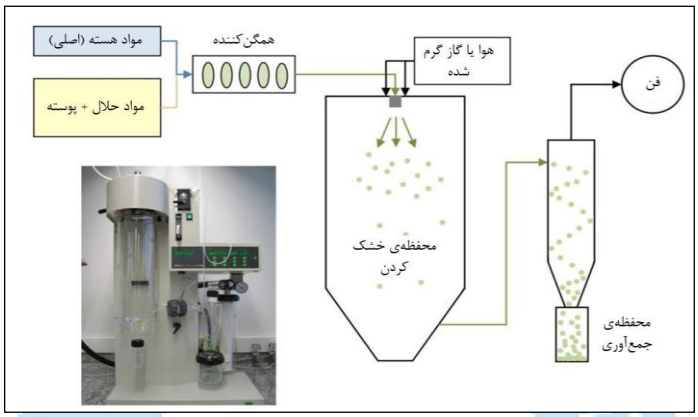
فریز درایینگ که به آن لیوفیلیزاسیون[۲۸] نیز گفته می‌شود، تکنیکی است که در آن ابتدا با کاهش دما، آب منجمد شده، سپس با افزایش تدریجی دما و کاهش فشار، تصعید صورت گرفته و در نهایت محصول نهایی خشک به‌دست می‌آید [۶۸]. این تکنیک علاوه بر میکروارگانیسم‌های کشت شده، در صنایع غذایی و دارویی، تجهیزات پزشکی و لوازم آرایشی نیز کاربرد دارد [۶۹]. قبل از آغاز فرآیند فریز درایینگ، سوسپانسیون‌های باکتریایی باید ابتدا منجمد شده و سپس در شرایط خلاء خشک شوند. در صورتی که از محیط محافظ مناسب استفاده نشود، فرآیند فریز درایینگ می‌تواند به غشاهای سلولی و پروتئین‌ها آسیب قابل توجهی وارد کند که در نتیجه منجربه کاهش زنده‌مانی باکتری‌ها می‌شود [۷۰]. مقالات متعددی از این روش جهت کپسوله‌سازی سلول‌های باکتری برای استفاده در بتن

[25] Freeze-drying
[26] Spray-drying
[27] Polymerization
[28] Lyophilization

خودترمیم‌شونده استفاده کرده‌اند. برای مثال ژو و همکاران [۵۷] از فریز درایینگ به عنوان بخشی از فرآیند کپسوله‌سازی اسپورهای باکتری باسیلوس اسفاریکوس در یک شبکه هیدروژلی[۲۹] استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند که این تکنیک نه تنها به حفظ باکتری‌ها کمک می‌کند، بلکه به تولید یک محصول پایدار و قابل استفاده در سیستم‌های خودترمیمی بتن نیز منجر می‌شود.

۲-۳-۲- تکنیک خشک‌کردن پاششی

خشک‌کردن پاششی به عنوان یک فرآیند مستقل، مایع را به ذرات خشک با اندازه‌ای کمتر از ۴۰ میکرومتر تبدیل می‌کند و به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین تکنیک‌های کپسوله‌سازی شناخته می‌شود. این روش به دلیل سادگی، سهولت در استفاده، سرعت



شکل ۷: . نمودار شماتیک فرآیند کپسولاسیون با اسپری درایینگ و تصویر یک

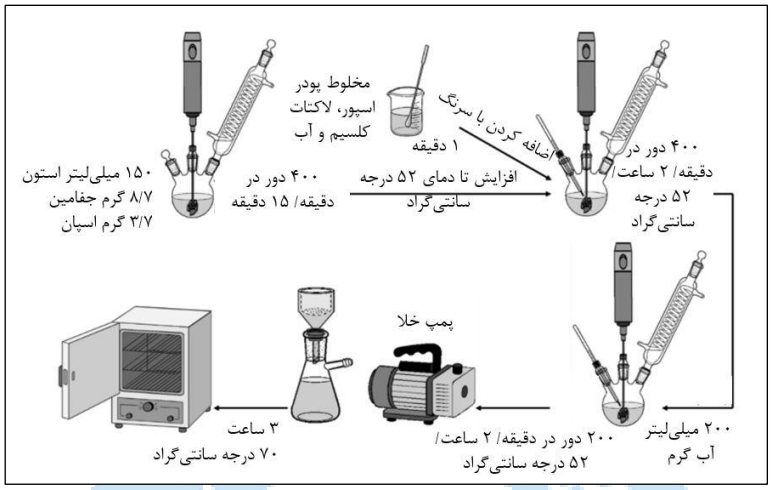
بالای فرآیند، قابلیت عملکرد مداوم و هزینه‌های کم بسیار محبوب است [۷۱]. شکل ۷ فرآیند خشک‌کردن پاششی را نشان می‌دهد [۷۲]. این تکنیک در کپسوله‌سازی داروها و روغن‌های ضروری در ماتریس‌های حامل، و خشک‌کردن داروهای بیولوژیک (مانند پروتئین‌ها و واکسن‌ها) نیز بکار برده می‌شود [۷۳].

۲-۳-۳- تکنیک پلیمریزاسیون

تکنیک پلیمریزاسیون برای کپسوله کردن سلول‌های باکتری فرآیندی است که در آن سلول‌های باکتریایی درون یک لایه پلیمری قرار می‌گیرند تا در برابر شرایط محیطی نامطلوب محافظت شوند. این روش با افزایش پایداری و زنده‌مانی سلول‌ها، آزادسازی کنترل‌شده آن‌ها را در محیط‌هایی مانند بتن خودترمیم‌شونده ممکن می‌سازد و به بهبود عملکرد ترمیمی کمک می‌کند. برای مثال زمانی و همکاران [۳۹] اسپورهای باکتری باسیلوس سودوفیرموس را به روش پلیمریزاسیون درجا در پلی‌اوره میکروکپسوله کردند و آن را موفقیت‌آمیز دانستند. شکل ۸ نحوه‌ی کپسوله کردن اسپورهای باکتری باسیلوس سودوفیرموس در پلی‌اوره را به این روش را نشان می‌دهد.

[29] شبکه هیدروژلی به ساختاری سه‌بعدی گفته می‌شود که از پلیمرهای هیدروفیلی (آب‌دوست) تشکیل شده و می‌تواند مقدار زیادی آب یا محلول‌های آبی را درون خود نگه دارد، در حالی که ساختار خود را حفظ می‌کند. این شبکه‌ها به دلیل داشتن منافذ کوچک و قابلیت تورم، محیطی مناسب برای محافظت و نگهداری مواد زیستی مانند باکتری‌ها فراهم می‌کنند.

در مقایسه بین روش‌های فریز درایینگ و اسپری درایینگ، پونگگراسمی و همکاران [۷۴] اسپورهای باکتری باسیلوس اسفاریکوس را با تکنیک‌های اسپری درایینگ و فریز درایینگ با سدیم آلژینات کپسوله کردند. آن‌ها دریافتند که فرآیند اسپری درایینگ و فریز درایینگ به ترتیب نرخ بقای اسپورهای باکتریایی ۱۰۰ و ۷۹/۹ درصد داشتند.



شکل ۸: نحوه‌ی کپسوله کردن اسپورهای باکتری باسیلوس سودوفیرموس در پلی‌اوره به روش پلیمریزاسیون درجا [۳۹].

۳- آزمایشات انجام شده برای نشان دادن تاثیر کپسول‌ها

این بخش به بررسی آزمایش‌های انجام‌شده بر روی کپسول‌های باکتریایی می‌پردازد که هدف آن ارزیابی عملکرد و اثربخشی این کپسول‌ها در بهبود ویژگی‌های بتن خودترمیم‌شونده است. از جمله آزمایش‌های مرتبط می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۳-۱- قابلیت زنده‌مانی اسپورها پس از کپسولاسیون

از جمله آزمایش‌های قابلیت زنده‌مانی که به ارزیابی قابلیت زندگی سلول‌های باکتریایی پس از کپسوله‌سازی می‌پردازند عبارتند از روش‌های رنگ‌سنجی و اندازه‌گیری تجزیه اوره. درمطالعه‌ی ونگ و همکاران [۷۵]، آزمایشات قابلیت زنده‌مانی اسپورهای باکتری اسپوروسارسینا پاستوری[30] پس از کپسوله‌سازی در ذرات سنگدانه‌های بتن بازیافتی انجام شد. این آزمایشات شامل اندازه‌گیری تجزیه اوره با استفاده از روش رنگ‌سنجی و ارزیابی نشت اسپورها از ذرات سنگدانه‌های بتن بازیافتی(RCA) در شرایط مختلف (شامل محیط قلیایی) بود. نتایج نشان داد که اسپورهای کپسوله‌شده در سنگدانه‌های بتن بازیافتی به طور مؤثری توانایی تجزیه اوره را حفظ کرده‌اند. نرخ نشت حدود ۱۲/۳ درصد زمانی مشاهده شد که اسپورهای باکتری پس از فرآیند کپسوله‌سازی، به مدت ۳ دقیقه تحت تکان‌دهی قرار گرفتند. این نشان می‌دهد که ذرات سنگدانه‌های بتن بازیافتی تأثیر منفی بر فعالیت اورئولیتیک باکتری‌ها نداشته‌اند. ونگ و همکاران [۳۱]، زنده‌مانی اسپورهای باکتری باسیلوس اسفاریکوس پس از کپسوله‌سازی را بررسی کردند. آزمایش‌ها نشان دادند که اسپورها پس از کپسوله‌سازی همچنان زنده هستند، اما تنها زمانی قادر به جوانه‌زنی و تجزیه اوره می‌شوند که کپسول‌ها شکسته شوند و اسپورها به مواد مغذی دسترسی پیدا کنند. در کپسول‌های سالم، تجزیه محدودی از اوره در روز اول (حدود ۳ گرم در لیتر) مشاهده شد و سپس تغییری رخ نداد. این تجزیه محدود به دو عامل جانبی بازمی‌گردد: ۱. بخشی از این تجزیه ناشی از تأثیر گرمایش در فرآیند استریل‌کردن محیط کشت بوده که باعث

[30] Sporosarcina pasteurii

تجزیه‌ی جزئی اوره شده است. ۲. تعدادی اسپور آزاد که در فرآیند کپسوله‌سازی وارد کپسول‌ها نشده بودند، به مواد مغذی محیط دسترسی پیدا کرده و فعالیت کرده‌اند. بنابراین، این تجزیه‌ی محدود ناشی از فعالیت مستقیم اسپورهای داخل کپسول‌های سالم نبوده و ناشی از عوامل خارجی بوده است. اما پس از شکستن کپسول‌ها، تجزیه اوره به‌طور کامل پس از ۳ روز انجام شد. بنابراین، کپسوله‌سازی از فعال شدن زودهنگام اسپورها جلوگیری کرده و آن‌ها را تا زمان شکسته شدن کپسول‌ها محافظت می‌کند.

۳- ۲- تأثیر کپسول‌های باکتریایی بر فرآیند هیدراتاسیون

آزمایش‌های هیدراتاسیون به منظور بررسی تأثیر کپسول‌های باکتریایی بر فرآیند هیدراتاسیون بتن و ارزیابی محصولات هیدراتاسیونی تولیدشده در حضور اسپورهای باکتریایی انجام می‌شود. این آزمایش‌ها نقش کپسول‌ها در اصلاح و بهبود واکنش‌های هیدراتاسیون را تحلیل می‌کنند. در مطالعه‌ی انجام شده توسط فنگ و همکاران [۷۶] تأثیر کپسول‌های حاوی سیمان بر فرآیند هیدراتاسیون با استفاده از کالیبراتور ایزوترمال[۳۱] بررسی شد. در این مطالعه از دو نوع کپسول استفاده شد: کپسول‌های SC[۳۲] (کپسول‌های شامل پلیمر سوپر جاذب (SAP)) شامل هسته‌ای از سیمان، SAP و پلی اتیلن گلیکول (PEG) هستند، در حالی که کپسول‌های WSC[۳۳] (کپسول‌های فاقد SAP) از سیمان و پلی اتیلن گلیکول تشکیل شده‌اند. فرآیند کپسوله‌سازی به این ترتیب انجام شد: ابتدا سیمان، SAP و PEG تا دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند. سپس سیمان و SAP به‌صورت خشک در یک مخلوط‌کن ملات در دمای بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، با سرعت کم به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند. پس از آن، PEG به مخلوط اضافه شد و خمیر حاصل به مدت ۶۰ ثانیه با سرعت کم و سپس ۱۲۰ ثانیه با سرعت بالا مخلوط گردید. نمونه‌های تازه قالب‌گیری شده و به مدت ۶ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۴۰ درصد نگهداری شدند تا جامد شوند. مواد جامدشده با یک سنگ‌شکن فکی خرد شدند و دانه‌هایی با اندازه ذرات ۲/۳۶– ۴/۷۵ میلی‌متر برای مراحل بعدی غربال شدند. در مرحله بعد، دانه‌ها به مدت ۵ دقیقه با رزین اپوکسی مخلوط شده و سپس حدود ۳۰ دقیقه تا ۱ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند تا ویسکوزیته اپوکسی بهبود یابد. دانه‌های پوشیده‌شده با اپوکسی در یک گلوله‌ساز، همراه با شن ریز بارگذاری شده و به مدت ۱۰ تا ۱۵ ثانیه با سرعت ۴۵ دور در دقیقه مخلوط شدند. این فرآیند پوشش‌دهی برای بهبود عملکرد ضدآب کپسول‌ها، ۲ تا ۳ بار تکرار شد. در نهایت، کپسول‌های با اندازه ذرات ۲/۳۶–۴/۷۵ میلی‌متر با غربال‌گری به‌دست آمدند. نتایج نشان داد که بعد از شکست کپسول ها و شروع فعالیت هیدراتاسیون، میزان کل گرمای آزاد شده از گرانول‌های بدون پوشش اپوکسی تنها حدود ۳۰ درصد از گرمای تولید شده توسط سیمان خالص با وزن مشابه بود. گرانول‌های حاوی پلیمر سوپر جاذب گرمای بیشتری نسبت به گرانول‌های بدون آن آزاد کردند و هیدراتاسیون در گرانول‌های حاوی SAP به‌طور قابل توجهی تسریع شد. همچنین، کپسول‌های SC با SAP نسبت به کپسول‌های WSC بدون SAP دارای نرخ آزادسازی گرما و درجه هیدراتاسیون بالاتری بودند، به‌طوری‌که حداکثر جریان گرما برای کپسول‌های SC در حدود ۱۸ ساعت و برای کپسول‌های WSC در حدود ۳۰ ساعت رخ داد. این نشان‌دهنده تسهیل فرآیند هیدراتاسیون و افزایش کارایی در کپسول‌های حاوی SAP بود (شکل۹). در نتیجه، حضور کپسول‌ها به بهبود هیدراتاسیون و کارایی سیمان کمک می‌کند. در مطالعه‌ی دیگری که توسط ونگ و همکاران [۳۱] انجام شد، تاثیر میکروکپسول‌های حاوی اسپور و مواد مغذی بر فرآیند هیدراتاسیون سیمان بررسی شده است. برای این منظور، میزان تولید گرمای هیدراتاسیون به عنوان شاخصی برای درجه هیدراتاسیون اندازه‌گیری شد. هفت مخلوط مختلف سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۵ تهیه شد که شامل نمونه مرجع (R[۳۴]) و مخلوط‌هایی با افزودن اوره (۴ درصد)، عصاره مخمر (YE[۳۵]) با دوزهای ۰/۳۵ و ۰/۸۵ درصد، نیترات کلسیم (۸ درصد)، و میکروکپسول‌ها با دوزهای ۳ و ۵ درصد بود. نتایج نشان داد که نیترات کلسیم باعث تسریع هیدراتاسیون شد، در حالی که YE (۰/۳۵ درصد)، اوره و

[31] Isothermal calibrator
[32] Superabsorbent Capsule
[33] Without Superabsorbent Capsule
[34] Reference
[35] Yeast Extract

میکروکپسول‌ها (۳ درصد) باعث تاخیر در ظهور پیک دوم هیدراتاسیون[۳۶] شدند. با افزایش دوز YE به ۰/۸۵ درصد و میکروکپسول‌ها به ۵ درصد، این تاخیر بیشتر شد. با این حال، تولید گرمای تجمعی پس از ۷ روز برای اکثر مخلوط‌ها مشابه بود (در محدوده ۳۵۵ تا ۳۶۴ ژول بر گرم). نیترات کلسیم با تولید ۳۹۷ ژول بر گرم، حدود ۹ درصد بالاتر از نمونه مرجع بود و باعث افزایش درجه هیدراتاسیون شد.

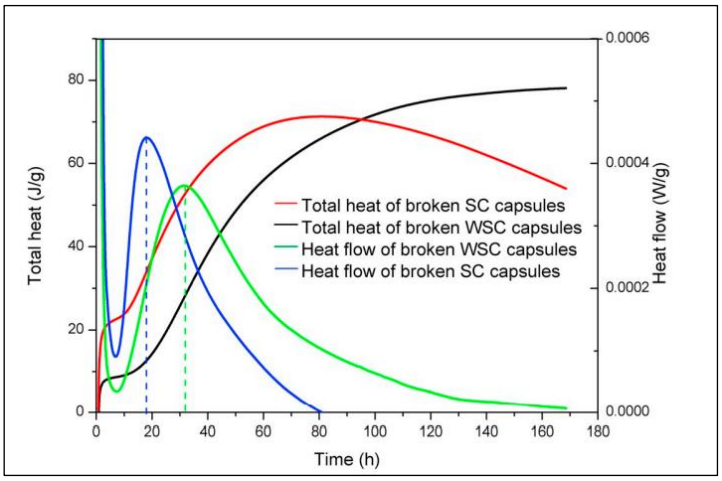
۳-۳- آزمایش‌های جذب و نفوذپذیری آب

آزمایش‌های جذب و نفوذپذیری آب از شاخص‌های اصلی برای ارزیابی دوام بتن پس از ترمیم هستند. زو و همکاران [۷۷, ۷۸] جذب آب نمونه‌های میکروبی را قبل از ترک خوردن، پس از ترک خوردن و پس از ترمیم با استفاده از ذرات سرامزیت[۳۷] (سنگدانه سبک مصنوعی) یا مواد قلیایی پایین به عنوان حامل برای بتن خودترمیم بررسی کردند. در مقایسه با سری شاهد، کاهش حدود ۳۰ درصدی در جذب آب به دست آمد. بیشترین نسبت بازیابی آب‌بندی به ۹۵ درصد رسید که تقریباً ۱/۵ برابر بیشتر از گروه شاهد بود. کاهش نسبت جذب آب با درصدهای مختلف در چندین تحقیق دیگر نیز مشاهده شد. [۳۵, ۷۹]. وانگ و همکاران [۳۲] دریافتند که نمونه‌های بتنی با هیدروژل زیستی بیشترین کاهش ضریب نفوذپذیری آب را پس از بهبود ترک‌ها در مقایسه با نمونه‌های بدون خودترمیمی میکروبی نشان دادند. جوشی و همکاران [۸۰] گزارش کردند که عمق نفوذ آب در بتن خودترمیم‌شونده باکتریایی، هنگامی که از شربت ذرت به عنوان محلول مغذی استفاده شد، ۲۸/۲ میلی‌متر بود؛ در حالی که با استفاده از براث (محیط کشت مایع) به عنوان محلول غذایی، این مقدار به ۳۱/۲ میلی‌متر افزایش یافت. باسکار و همکاران [۵۴] از زئولیت به عنوان ماده محافظ برای اسپورها در کامپوزیت سیمانی ترک خورده استفاده کردند و کاهش متوسط ضریب نفوذپذیری آب را نسبت به نمونه مرجع (فاقد باکتری) به ترتیب ۳۰ درصد در ۱۲۰ روز، ۴۴ درصد در ۱۸۰ روز و ۵۴ درصد در ۲۴۰ روز به دست آوردند.

۴-۳- نفوذپذیری کلرید

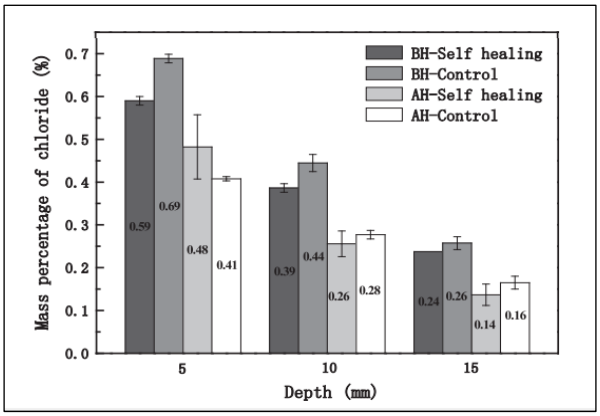
[36]) شروع به تشکیل می‌کنند.$Ca(OH)_2$ و C-S-H پیک دوم هیدراتاسیون به مرحله‌ای اشاره دارد که در آن سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون افزایش می‌یابد و محصولات اصلی هیدراتاسیون (مانند

[37] Ceramsite



شکل ۹: گرمای کل هیدراتاسیون و تکامل حرارتی وابسته به زمان کپسول های پاره شده با یا بدون SAP [۷۶].

نفوذپذیری کلرید یک پارامتر معمولی مرتبط با انتقال یون است. لینگ و همکاران [۸۱] از نزدیک اثرات ترک خوردگی و خود ترمیمی میکروبی را بر نفوذ کلریدها با آزمایش مهاجرت یون کلر[38] بررسی کردند. شکل ۱۰ میانگین محتوای کلرید در اعماق مختلف را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج محتوای کلرید تعیین‌شده از آزمایش‌های مهاجرت الکتریکی ۱۸ ساعته و شبیه‌سازی اجزای محدود، به این نتیجه رسیدند که بهبود ترک‌های بتن، نرخ نفوذ کلریدها را به ترک‌های بتن کاهش می‌دهد. علاوه بر این، بهبود منطقه انتقال بین سطحی (ITZ[39]) بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان توسط رسوب باکتریایی برای کاهش نفوذپذیری کلرید مفید است [۸۲]. پیشگیری از خوردگی آرماتور توسط خودترمیمی میکروبی همواره مسئله نگران‌کننده‌ای بوده است. زو و همکاران [۸۳] نشان دادند که نرخ خوردگی آرماتورها تا ۱۲۰ روز توسط باکتری‌های تثبیت‌شده با سرامزیت در ۰/۵ میکروآمپر بر سانتیمتر مربع در مقایسه با ۲/۵ میکروآمپر بر سانتیمتر مربع گروه مرجع باقی می‌ماند. ارسان و همکاران [۸۴] هسته فشرده فعال شده کاهنده نیترات (ACDC) که به‌صورت غیر استریل (غیر اکسنیک) پرورش داده شده و حاوی باکتری‌های کاهش‌دهنده نیترات است را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که این باکتری‌ها می‌توانند به‌طور مؤثری از خوردگی میلگردهای بتن جلوگیری کنند. این عملکرد از طریق تولید کلسیم کربنات، که ترک‌های بتن را پر می‌کند، و همچنین با ترشح ماده‌ای به نام نیتریت که به‌عنوان بازدارنده خوردگی عمل می‌کند، صورت می‌گیرد.



شکل ۱۰: میانگین محتوای کلرید در اعماق مختلف [۸۰].

[38] Electro migration
[39] Interfacial Transition Zone

۴- چالش‌ها و راهکارهای آینده

۴-۱- چالش‌های موجود در تولید، پایدارسازی، و استفاده از کپسول‌های باکتریایی در بتن

ترکیب اسپورهای باکتریایی کپسوله‌شده در بتن خودترمیم‌شونده با چندین چالش روبه‌رو است. یکی از مشکلات اصلی، دستیابی به توزیع یکنواخت کپسول‌ها در ماتریس بتن بدون آسیب به خواص مکانیکی آن است. pH بالا و محیط قلیایی بتن می‌تواند تأثیر منفی بر زنده ماندن اسپورهای باکتریایی داشته باشد و این امر نیازمند توسعه مواد کپسوله‌سازی مقاوم در برابر این شرایط است. همچنین، حفظ پایداری کپسول‌ها در طول فرآیند مخلوط‌سازی و اطمینان از شکستن به‌موقع آن‌ها و رهایی باکتری‌ها در هنگام بروز ترک‌ها از چالش‌های کلیدی به شمار می‌آید. علاوه بر این، مشکلاتی مانند احتمال تجمع کپسول‌ها و اطمینان از تأمین کافی مواد مغذی برای رشد باکتری‌ها، استفاده از باکتری‌های کپسوله‌شده در بتن را پیچیده‌تر می‌کند.

۴-۲- پیشنهادات برای بهبود مواد کپسوله‌سازی و تکنیک‌های جدید

برای مقابله با این چالش‌ها، نیاز به شناسایی مواد و روش‌های کپسوله‌سازی نوآورانه وجود دارد. بهبود سازگاری زیستی و دوام مواد کپسوله‌سازی، مانند استفاده از پلیمرهای پیشرفته، هیدروژل‌های طبیعی یا مواد هیبریدی، می‌تواند طول عمر سلول‌های باکتریایی در محیط بتن را افزایش دهد. بهینه‌سازی ابعاد و ضخامت پوشش کپسول‌ها می‌تواند تضمین کند که آن‌ها به شکلی مؤثرتر در مخلوط بتن ادغام شوند، بدون اینکه تأثیر منفی بر استحکام آن داشته باشند. علاوه بر این، توسعه مکانیزم‌های رهاسازی هوشمند، مانند پوشش‌های حساس به pH یا کپسول‌هایی که به تنش ناشی از ترک پاسخ می‌دهند، می‌تواند کارایی فعال‌سازی باکتری‌ها در زمان نیاز به ترمیم را افزایش دهد. استفاده از تکنیک‌های پیشرفته میکروکپسوله‌سازی مانند اسپری دراینگ، الکترواسپری[40] و نانوکپسوله‌سازی نیز ممکن است فرآیند تولید و عملکرد حامل‌های باکتریایی را بهبود بخشد.

۴-۳- بررسی پتانسیل‌های تحقیقاتی آینده در حوزه بتن خودترمیم شونده

حوزه بتن خودترمیم شونده با سلول‌های باکتریایی کپسوله‌شده پتانسیل قابل توجهی برای تحقیقات آینده دارد. حوزه‌هایی مانند توسعه مواد کپسوله‌سازی زیستی و پایدار، مانند پلیمرهای قابل تجزیه‌زیستی یا ترکیبات مشتق‌شده از منابع تجدیدپذیر، امیدوارکننده هستند. مطالعات بیشتری می‌توانند بر عملکرد و دوام بلندمدت ملات های زیستی در شرایط واقعی، از جمله چرخه‌های انجماد-ذوب، قرارگیری در معرض نمک و سطوح رطوبت متغیر، تمرکز کنند. بررسی اثرات استفاده از سویه‌های باکتریایی مهندسی ژنتیکی‌شده که تولید کلسیم کربنات بیشتری دارند، می‌تواند ظرفیت ترمیم را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد. علاوه بر این، ادغام مدل‌سازی محاسباتی و شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رفتار ترمیم ترک و بهینه‌سازی طراحی کپسول‌های باکتریایی می‌تواند فرآیند توسعه را تسهیل کند. با پرداختن به این جنبه‌ها، محققان می‌توانند اثربخشی کپسوله‌سازی باکتریایی در بتن خودترمیم شونده را پیشرفته‌تر و به شیوه‌های ساخت و ساز پایدارتر کمک کنند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روش‌های مختلف کپسوله‌سازی باکتری‌ها جهت بهبود فرآیند خودترمیمی بتن و نتایج حاصل از آزمایش‌ها به‌طور جامع بررسی شد. استفاده از این روش‌ها نشان داد که کپسوله‌سازی می‌تواند به بهبود بقای سلول باکتری‌ها در شرایط نامساعد بتن از جمله

[40] Electrospray

pH بالا کمک کند. همچنین، بهره‌گیری از مواد مختلف برای کپسوله‌سازی موجب افزایش مقاومت مکانیکی بتن، کاهش نفوذپذیری آب و بهبود قابلیت ترمیم ترک‌ها شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که انتخاب مناسب روش و ماده کپسوله‌سازی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر کیفیت نهایی بتن خودترمیم‌شونده داشته باشد. سایر نتایج این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

۱. در مقایسه تکنیک‌های کپسوله‌سازی، روش فریز دراییِنگ به دلیل توانایی بالاتر در حفظ زنده‌مانی باکتری‌ها نسبت به سایر روش‌ها مؤثرتر به نظر می‌رسد. اگرچه تکنیک‌هایی مانند اسپری دراییِنگ به دلیل سرعت بالای فرآیند مزیت دارند، اما معمولاً زنده‌مانی باکتری‌ها در این روش‌ها کاهش می‌یابد. این مقایسه نشان می‌دهد که انتخاب روش کپسوله‌سازی باید با توجه به تعادل میان سرعت و کارایی در حفظ زنده‌مانی میکروارگانیسم‌ها انجام شود.

۲. استفاده از مواد طبیعی و مصنوعی در بهبود خواص بتن تأثیر چشمگیری دارد. به‌طور کلی، استفاده از موادی مانند هیدروژل‌ها و آلژینات‌ها در فرآیند کپسوله‌سازی، می‌تواند به افزایش مقاومت مکانیکی و کاهش نفوذپذیری آب کمک کند. این نتایج بیانگر نقش کلیدی مواد کپسوله‌سازی در بهبود دوام و عملکرد بتن در بلندمدت است.

۳. آزمایش‌های نفوذپذیری نشان می‌دهد که استفاده از کپسول‌های حاوی سلول‌های باکتریایی می‌تواند به کاهش قابل توجه نفوذ آب در بتن منجر شود. به‌طور کلی، این کاهش به دلیل تشکیل رسوبات معدنی مانند کلسیم کربنات توسط باکتری‌ها و مسدود کردن منافذ موجود در بتن است. این یافته‌ها نشان‌دهنده نقش مؤثر باکتری‌های کپسوله‌شده در بهبود مقاومت بتن در برابر نفوذ آب است.

۴. هیدروژل‌ها به‌عنوان بسترهایی مؤثر در ذخیره آب و تسریع هیدراتاسیون سیمان، نقش کلیدی در بهبود خواص بتن دارند. به‌طور کلی، استفاده از هیدروژل‌های حاوی باکتری می‌تواند به افزایش مدول الاستیسیته و بهبود خودترمیمی ترک‌ها در مدت زمان کوتاه کمک کند. این یافته‌ها نشان‌دهنده کارایی بالای هیدروژل‌ها در سیستم‌های خودترمیمی و پتانسیل آن‌ها به‌عنوان ماده‌ای مناسب برای کپسوله‌سازی سلول‌های باکتریایی است.

۵. با وجود نتایج مثبت، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های بالا و محدودیت پایداری مواد کپسوله‌شده همچنان پابرجاست. به‌طور کلی، موادی مانند نانوذرات اکسید آهن می‌توانند جذب آب بتن را کاهش دهند، اما هزینه‌های بالای تولید، کاربرد آن‌ها را محدود کرده است. بهبود فرآیندهای تولید و شناسایی جایگزین‌های اقتصادی‌تر می‌تواند نقش مهمی در توسعه و گسترش این فناوری در صنعت ساخت‌وساز داشته باشد.

۶. اگرچه استفاده از میکروارگانیسم‌ها در ترمیم ترک‌های بزرگ‌تر پتانسیل بالایی دارد، اما برای بهره‌برداری کامل از این مزایا، نیاز به زمان کافی وجود دارد. بهبود فناوری‌های کپسوله‌سازی و تسریع فرآیندهای رسوب مواد معدنی می‌تواند کارایی سیستم‌های خودترمیمی را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

مراجع:

[1] Samimi, K., Pakan, M., Eslami, J. and Asgharnejad, L., 2022. Investigation of two different water-dispersed graphene on the performance of graphene/cement paste: Surfactant and superplasticizer effect. Construction and Building Materials, 349, p.128756.

[2] Samimi, K., Pakan, M. and Eslami, J., 2023. Investigating the compressive strength and microstructural analysis of mortar containing synthesized graphene and natural pozzolan in the face of alkali-silica reactions. Journal of Building Engineering, 68, p.106126.

[3] Samimi, K. and Zareechian, M., 2022. Chemical resistance of synthesized graphene-modified cement paste containing natural pozzolans to acid attack. Journal of Building Engineering, 60, p.105174.

[4] Aytekin, B., Mardani, A. and Yazici, Ş., 2023. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties. Construction and Building Materials, Vol. 378, p.131198.

[5] Samimi, K., Farahani, M., Pakan, M. and Shirzadi Javid, A.A., 2022. Influence of pumice and metakaolin on compressive strength and durability of concrete in acidic media and on chloride resistance under immersion and tidal conditions. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 46(2), pp.1153-1175.

[6] Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Maghsoudi, A.A., Lgcgm, S.K.B. and Civil, E.A.A.M., 2018. Resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes: pumice and zeolite effect. Int J Civ Environ Eng, 12(3), pp.250-259.

[7] Samimi, K., Dehghan Kamaragi, G.R. and Le Roy, R., 2019. Microstructure, thermal analysis and chloride penetration of self-compacting concrete under different conditions. Magazine of Concrete Research, 71(3), pp.126143.

[8] Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Maghsoudi, A.A., Maghsoudi, M. and Siad, H., 2017. Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. Construction and building materials, 151, pp.292-311.

[9] Nodehi, M., Ozbakkaloglu, T. and, Gholampour, A., 2022. A systematic review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization, mechanical, and durability properties. Journal of Building Engineering, Vol. 49.

[10] Van Mullem, T., Gruyaert, E., Caspeele, R., De Belie, N., 2020. First Large Scale Application with Self-Healing Concrete in Belgium: Analysis of the Laboratory Control Tests. Materials, Vol. 13, No. 4, p.997.

[11] The Ministry of Roads and Urban Development news site, 2020. http://news.mrud.ir/.

[12] Mahmoodi, S. and Sadeghian, P., 2019. Self-Healing Concrete: A Review of Recent Research Developments and Existing Research Gaps. 7th International Conference on Engineering Mechanics and Materials, CSCE Annual Conference.

[13] Danner, T., Hjorth Jakobsen, U., Geiker, M.R., 2019. Mineralogical sequence of self-healing products in cracked marine concrete. Minerals, 9(5), p. 284

[14] Lee, H., Wong, H. and Buenfeld, N., 2016. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. Cement and concrete Research, Vol. 79, p. 194-208.

[15] Abavisani, I., Rezaifar, O. and Kheyroddin, A., 2021. Multifunctional properties of shape memory materials in civil engineering applications: A state-of-the-art review. Journal of Building Engineering, Vol. 44, p.102657.

[16] Yuan, L., Chen, S., Wang, S., Huang, Y., Yang, Q., Liu, S., Wang, J., Du, P., Cheng, X. and Zhou, Z., 2019. Research on the improvement of concrete autogenous self-healing based on the regulation of cement particle size distribution (PSD). Materials, 12(17), p. 2818.

[17] Sung-Hoon Kang, S.-G.H. and Juhyuk Moon, 2018. The effect of superabsorbent polymer on various scale of pore structure in ultra-high performance concrete. Construction and Building Materials, Vol. 172, p. 29-40.

[18] Jianhang Feng, H.D., Ruixing Wang and Yilin Su, 2020. A novel capsule by poly (ethylene glycol) granulation for self-healing. Cement and Concrete Research, Vol. 133.

[19] Govender, D., 2018. Structural Restoration of Fractured Concrete Specimens Using Pressured Crack Injection Technology and Micro-silica Epoxy Resin Compounds. Materials, pp. 273–283.

[20] Tae-Kyun Kim, and Jong-Sup Park, 2021. Performance Evaluation of Concrete Structures Using Crack Repair Methods. Sustainability, 13(6), 3217.

[21] Xi Xiao, Cise Unluer, Shaohua Chu, En-Hua Yang, 2023. Single bacteria spore encapsulation through layer-by-layer self-assembly of poly(dimethyldiallyl ammonium chloride) and silica nanoparticles for self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 140.

[22] Jing Xu and Xianzhi Wang, 2018. Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material. Construction and Building Materials, Vol. 167, p.1-14.

[23] White, S.R., Sottos, N.R., Geubelle, P.H., Moore, J.S, Kessler, M.R., Sriram, S.R., Brown, E.N. and Viswanathan, S., 2001. Autonomic healing of polymer composites. Nature, 409(6822), p. 794-797.

[24] Dong, B., Ding, W., Qin, S., Han, N., Fang, G., Liu, Y., Xing, F., Hong, S., 2018. Chemical self-healing system with novel microcapsules for corrosion inhibition of rebar in concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 85, p.83-91.

[25] Niu, Y., Huang, H., Zhang, J., Jin, W., Wei, J. and Yu, Q., 2019. Development of the strain field along the crack in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) under bending by digital image correlation technique. Cement and Concrete Research, Vol. 125, p.105821.

[26] Liu, H., Huang, H., Wu, X., Wang, X., Hu, J., Wei, J. and Yu, Q., 2020. Promotion on self-healing of cracked cement paste by triethanolamine in a marine environment. Construction and Building Materials, Vol. 242, p. 118148.

[27] Zhu, Y., Ma, Y., Hu, J., Zhang, Z., Huang, J., Wang, Y., Wang, H., Cai, W., Huang, H., Yu, Q. and Wei, J., 2020. Adsorption of organic core-shell corrosion inhibitors on cement particles and their influence on early age properties of fresh cement paste. Cement and Concrete Research, Vol. 130, p. 106000.

[28] Wu, X., Huang, H., Liu, H., Hu, J., Wei, J., Jiang,Z., Ye, G., Yu, Q. and Lothenbach, B., 2021. Reactions of self-healing agents and the chemical binding of aggressive ions in sea water: thermodynamics and kinetics. Cement and Concrete Research, Vol. 145, p. 106450.

[29] Xuejiao Zhu, Arn Mignon, Soren Dollerup Nielsen, Silvia Elisabeth Zieger, Klaus Koren, Nico Boon and Nele De Belie, 2021. Viability determination of Bacillus sphaericus after encapsulation in hydrogel for self-healing concrete via microcalorimetry and in situ oxygen concentration measurements. Cement and Concrete Composites, Vol. 119.

[30] Bagga, M., Hamley-Bennett, C., Alex, A., Freeman, B.L., Justo-Reinoso, I., Mihai, I.C., Gebhard, S., Paine, K., Jefferson, A.D., Masoero, E. and Ofiţeru, I.D., 2022. Advancements in bacteria based self-healing concrete and the promise of modelling. Construction and Building Materials, Vol. 358, p.129412.

[31] Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W. and De Belie, N., 2014. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. Cement and concrete research, Vol. 56, p.139-152.

[32] Wang, J.Y., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W. and De Belie, N., 2014. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. Construction and building materials, Vol. 68, p.110-119.

[33] Trenson, G., 2017. Application of pH responsive hydrogel encapsulated bacteria for selfhealing concrete. Doctoral Thesis, Ghent Univ., Ghent, Belgium.

[34] Wang, J., Mignon, A., Trenson, G., Van Vlierberghe, S., Boon, N. and De Belie. N., 2018. A chitosan based pH-responsive hydrogel for encapsulation of bacteria for self-sealing concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 93, p. 309-322.

[35] Shahid, S., Aslam, M.A., Ali, S., Zameer, M., Faisal, M., 2020. Self-healing of cracks in concrete using Bacillus strains encapsulated in sodium alginate beads. ChemistrySelect, 5(1), p.312-323.

[36] [37] Palin, D., Wiktor, V. and Jonkers, H., 2017. A bacteria-based self-healing cementitious composite for application in low-temperature marine environments. Biomimetics, 2(3), p. 13.

[37] Palin, D., Wiktor, V. and Jonkers, H., 2016. A bacteria-based bead for possible self-healing marine concrete applications. Smart Materials and structures, 25(8), p. 084008.

[38] Wang, J., Mignon, A., Snoeck, D., Wiktor, V. and Van Vliergerghe, S., 2015. Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: A promising strategy for crack self-healing. Frontiers in microbiology, 6, p. 1088.

[39] Zamani, M., Nikafshar, S., Mousa, A. and Behnia, A., 2020. Bacteria encapsulation using synthesized polyurea for self-healing of cement paste. Construction and Building Materials, Vol. 249, p. 118556.

[40] Lu Jiang, Jia, G., Jiang, C. and Li, Z., 2020. Sugar-coated expanded perlite as a bacterial carrier for crack-healing concrete applications. Construction and Building Materials, Vol. 232.

[41] Xiao, X., Tan, A.C.Y., Unluer, C. and Yang, E., 2023. Development of a functionally graded bacteria capsule for self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 136, p. 104863.

[42] Lv, L., Guo, P., Liu, G., Han, N. and Xing, F., 2020. Light induced self-healing in concrete using novel cementitious capsules containing UV curable adhesive. Cement and Concrete Composites, Vol. 105.

[43] Fahimizadeh, M., Abeyratne, ADA., Mae, LS., Singh, RKR., Pasbakhsh, P., 2020. Biological Self-Healing of Cement Paste and Mortar, Materials, Vol. 13(17), p. 3711.
[44] Raza, A., El Ouni, MH., Azab, M., Khan, D., Elhadi, KM., Elhadi, KM., Zaman Khan, QU and Alashker, Y., 2023. Sustainability assessment, structural performance and challenges of self-healing bio-mineralized concrete: A systematic review for built environment applications, Journal of Building Engineering. doi: [10.1016/j.jobe.2023.105839]
[45] Zhang, X., Jin, Z., Li, M and Qian, C., 2021. Effects of carrier on the performance of bacteria-based self-healing concrete. Construction and Building Materials,Vol. **305**: p. 124771.
[46] De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Baera, C., Antonaci, P., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferara, L., Jeferson, T., Litina, CH., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, JM., Viocetic, S., Wang, J and Jonkers, HM., 2018. A review of self-healing concrete for damage management of structures, Advanced Materials Interfaces, Vol. 5(17), p. 1800074.
[47] Wang, Y., Lin, Z., Tang, C., Hao, W., 2021. Influencing factors on the healing performance of microcapsule self-healing concrete, Materials, Vol. 14(15), p. 4139.
[48] Bandyopadhyay, A., Saha, A., Ghosh, D., Dam, B., Samanta, AK and Dutta, S., 2023. Microbial repairing of concrete & its role in CO2 sequestration: a critical review, Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 12(1), p. 7.
[49] Xu, S., Liu, X., Tabaković, A., Schlangen, E., 2019. Optimization of the calcium alginate capsules for self-healing asphalt, Applied Sciences, Vol. 9(3), p. 468.
[50] Gao, M., Guo, J., Cao, H., Wang, H., Xiong, X., Krastev, R., Nie, K., Xu, H and Liu, L., 2020. Immobilized bacteria with pH-response hydrogel for self-healing of concrete, Journal of Environmental Management, Vol. 261, p. 110225.
[51] Wang, J., Mignon, A., Snoeck, D., Wiktor, V., Van Vlierberghe, S., Boon, N., De Belie, N., 2015. Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: A promising strategy for crack self-healing, Frontiers in Microbiology, Vol. 6, p. 1088.
[52] Tan, K., Wu, S., Ding, S., 2023. Carriers of Healing Agents in Biological Self-Healing Concrete, Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2023(1), p. 7179162.
[53] Alazhari, M., Sharma, T., Heath, A., Cooper, R., Paine, K., 2018. Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete, Construction and Building Materials, Vol. 160, p. 610–619.
[54] Bhaskar, S., Hossain, KMA., Lachemi, M., Wolfaardt, G and Kroukamp, MO., 2017. Effect of self-healing on strength and durability of zeolite-immobilized bacterial cementitious mortar composites, Cement and Concrete Composites, Vol. 82, p. 23–33.
[55] Ivaškė, A., Gribniak, V., Jakubovskis, R., Urbonavičius, J., 2023. Bacterial viability in self-healing concrete: A case study of non-ureolytic bacillus species, Microorganisms, Vol. 11(10), p. 2402.
[56] Soysal, A., Milla, J., King, GM., Hassan, M and Rupnow, T., 2020. Evaluating the self-healing efficiency of hydrogel-encapsulated bacteria in concrete, Transportation Research Record, Vol. 2674(6), p. 113-123.
[57] Zhu, X., Mignon, A., Nielsen, SD., Zieger, SE., Koren, K., Boon, N and De Belie, N., 2021. Viability determination of Bacillus sphaericus after encapsulation in hydrogel for self-healing concrete via microcalorimetry and in situ oxygen concentration measurements, Cement and Concrete Composites, Vol. 119, p. 104006.
[58] Hungria, R., Hassan, MM., Arce, G., Mousa, M., 2023. Effects of hydrogel-encapsulated bacteria on the healing efficiency and compressive strength of concrete, Journal of Road Engineering, Vol. 3(2), p. 156-170.
[59] Seifan, M., Sarmah, AK., Ebrahiminezhad, A., Ghasemi, Y., Samani, AK and Berenjian, A., 2018. Bio-reinforced self-healing concrete using magnetic iron oxide nanoparticles, Applied Microbiology and Biotechnology, Vol. 102, p. 2167–2178.
[60] Seifan, M., Ebrahiminezhad, A., Ghasemi, Y and Berenjian, A., 2019. Microbial calcium carbonate precipitation with high affinity to fill the concrete pore space: nanobiotechnological approach, Bioprocess and Biosystems Engineering, Vol. 42, p. 37–46.
[61] Khaliq, W., Ehsan, MB., 2016. Crack healing in concrete using various bio-influenced self-healing techniques, Construction and Building Materials, Vol. 102, p. 349–357.
[62] Wan, P., Wu, S., Liu, Q., Wang, H., Zhao, F., Wu, J., Niu, Y and Ye, Q., 2022. Sustained-release calcium alginate/diatomite capsules for sustainable self-healing asphalt concrete, Journal of Cleaner Production, Vol. 372, p. 133639.
[63] Kua, HW., Gupta, S., Aday, AN., and Surbar, WV., 2019. Biochar-immobilized bacteria and superabsorbent polymers enable self-healing of fiber-reinforced concrete after multiple damage cycles. Cement and Concrete Composites, Vol. 100, p. 35-52.

[64] Jiang, S., Lin, Z., Tang, C., and Hao, W., 2021. Preparation and mechanical properties of microcapsule-based self-healing cementitious composites. Materials, Vol. 14(17), p. 4866.
[65] Gruyaert, E., Van Tittelboom, K., Sucaet, J., Anrijs, J., Van Vlierberghe, S., Dubruel, P., De Geest, BJ., Remon, JP and De Belie, N., 2016. Capsules with evolving brittleness to resist the preparation of self-healing concrete. Materiales de Construcción, Vol. 66(323), p. e092-e092.
[66] Kanellopoulos, A., Giannaros, P., Palmer, D., Kerr, A and Al-Tabbaa, A., 2017. Polymeric microcapsules with switchable mechanical properties for self-healing concrete: synthesis, characterisation and proof of concept. Smart Materials and Structures, Vol. 26(4), p. 045025.
[67] Wang, X., Sun, P., Han, N., and Xing, F., 2017. Experimental study on mechanical properties and porosity of organic microcapsules based self-healing cementitious composite. Materials, Vol. 10(1), p. 20.
[68] Yao, J., Chen, W., and Fan, K., 2023. Novel efficient physical technologies for enhancing freeze drying of fruits and vegetables: A review. Foods, Vol. 12(23), p. 4321.
[69] Nwankwo, CS., Okpomor, EO., Dibagar, N., Wodecki, M., Zwierz, W and Figiel, A., 2023. Recent developments in the hybridization of the freeze-drying technique in food dehydration: A review on chemical and sensory qualities. Foods, Vol. 12(18), p. 3437.
[70] Bellali, S., Khalil, JB., Fontanini, A., Raoult, D and Lagier, JC., 2020. A new protectant medium preserving bacterial viability after freeze drying. Microbiological Research, Vol. 236, p. 126454.
[71] Díaz-Montes, E., 2023. Wall Materials for Encapsulating Bioactive Compounds via Spray-Drying: A Review. Polymers, Vol. 15(12), p. 2659.
[72] Chávarri, M., Marañón, I., Villarán, MC., 2012. Encapsulation Technology to Protect Probiotic Bacteria. IntechOpen. doi: http://dx.doi.org/10.5772/50046
[73] Malamatari, M., Charisi, A., Malamataris, S., Kachrimanis, K and Nikolakakis, I., 2020. Spray drying for the preparation of nanoparticle-based drug formulations as dry powders for inhalation. Processes, Vol. 8(7), p. 788.
[74] Pungrasmi, W., Intarasoontron, J., Jongvivatsakul, P and Likitlersuang, S., 2019. Evaluation of microencapsulation techniques for MICP bacterial spores applied in self-healing concrete. Scientific Reports, Vol. 9(1), p. 12484.
[75] Wang, X., Wang, Z., Xu, J., Wang, Z., 2022. Use of recycled concrete aggregates as carriers for self-healing of concrete cracks by bacteria with high urease activity. Construction and Building Materials, Vol. 337, p. 127581.
[76] Feng, J., Dong, H., Wang, R., and Su, Y., 2020. A novel capsule by poly (ethylene glycol) granulation for self-healing concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 133, p. 106053.
[77] Xu, J., Wang, X., Zuo, J., and Liu, X., 2018. Self-healing of concrete cracks by ceramsite-loaded microorganisms. Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2018, Article ID 4029387.
[78] Xu, J., and Wang, X., 2018. Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material. Construction and Building Materials, Vol. 167, p. 1-14.
[79] Erşan, YÇ., Hernandez-Sanabria, E., Boon, N., and De Belie, N., 2016. Enhanced crack closure performance of microbial mortar through nitrate reduction. Cement and Concrete Composites, Vol. 70, p. 159-170.
[80] Joshi, SS., Goyal, SS., and Reddy, M. S., 2018. Corn steep liquor as a nutritional source for biocementation and its impact on concrete structural properties. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, Vol. 45(8), p. 657-667.
[81] Ling, H., and Qian, C., 2017. Effects of self-healing cracks in bacterial concrete on the transmission of chloride during electromigration. Construction and Building Materials, Vol. 144, p. 406-411.
[82] Achal, V., Mukerjee, A., and Reddy, M. S., 2013. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. Construction and Building Materials, Vol. 48, p. 1-5.
[83] Xu, J., Tang, Y., Wang, X., Wang, Z., and Yao, W., 2020. Application of ureolysis-based microbial CaCO3 precipitation in self-healing of concrete and inhibition of reinforcement corrosion. Construction and Building Materials, Vol. 265, p. 120364.
[84] Tang, Y., and Xu, J., 2021. Application of microbial precipitation in self-healing concrete: A review on the protection strategies for bacteria. Construction and Building Materials, Vol. 306, p. 124950.