Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT): Vol. 11, No. 1, (Spring 2022), 35-53

Journal of Advanced Materials and Technologies

Journal Homepage: www.jamt.ir

Materials and Energy Research Center

MERC

Research Review Article - Extended Abstract

An Overview of Different Types of Self-Healing Concrete Construction Methods

Setareh Mehravar [1], **Mojgan Heydari** [2]*, **Hossein Nouranian** [3]

[1] *M.Sc. Student, Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center (MERC), MeshkinDasht, Alborz, Iran*

[2] *Assistant Professor, Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center (MERC), MeshkinDasht, Alborz, Iran*

[3] *Associate Professor, Department of Ceramics, Materials and Energy Research Center (MERC), MeshkinDasht, Alborz, Iran*

*Corresponding Author's Email: m.heydari@merc.ac.ir (M. Heydari)

Paper History:
Received: 2021-05-23
Revised in revised form: 2021-06-20
Scientific Accepted: 2021-07-06

Keywords:
Self-Healing Concrete,
Microencapsulation,
Bacterial Concrete,
Mineral Admixtures,
Nanoparticles

Abstract Concrete is the most widely used construction material around the globe due to its high strength, durability, and relatively low cost. However, concrete cracks and their detrimental effects are inevitable even in the early life of structures, thus emphasizing the necessity of repair. Given that in most cases, concrete appears uncoated in the environment, and the environmental conditions significantly affect its longevity, application of some specific methods to increase the durability and longevity of concrete stuructures is highly recommended. According to the statistics, research findings, and objective observations, the cost of repairing a structure is sometimes higher than that of construction itself. Concrete cracks significantly reduce the life time of concrete structures. Therefore, it is more cost-effective to prevent the appearance and growth of small cracks from the very first moments rather than repairing the cracks after their formation. To this end, it is recommended to add repair materials to the concrete beforehand to improve premature cracking, a method called self-healing. For this reason, self-healing concrete has found a special place in the construction industry in the world, especially in recent years. The current study presented a review and made a comparison of some of these self-healing concrete methods to find the method with the highest capability of industrialization.

https://doi.org/10.30501/jamt.2022.287519.1177 URL: https://www.jamt.ir/article_150649.html

1. INTRODUCTION

Cementitious materials are widely used as the constituent elements of structures. These structures are always prone to the destruction and deterioration risks that decrese their serviceability. Therefore, maintenance of buildings, which is one of the most costly and difficult tasks, is of high significance. Most materials are destroyed by the development of structural microcracks. The tip of each crack cuts the material like a knife, and the formed crack moves through the piece, thus causing mechanical damages to the piece and reducing its strength over time. Self-healing is one of the most valuable phenomena that can help overcome the problem of reduced functional integrity caused by material damage. In this respect, the self-healing process should be automated immediately after the damage so that the affected area can regain the integrity it used to have before the damage [1]. In the last decade, a number of researchers have increasingly conducted studies on the self-healing process in concrete mainly due to the increasing need for new materials and structures characterized by the ability to self-repair, in addition to the previous properties and behavior. Concrete is one of the main materials in constructions due to its resistance against compressive and heavy pressures. However, its main drawback, i.e., low tensile strength, causes cracks in the concrete which in turn shortens its life and reduces its durability [2]. Given the key role of concrete cracks in reducing the servicability of structures, it is econimcally recommended to prevent or limit the growth of small cracks at the early ages of the construction so as not to spend the repair costs after their formation. In other words, the best way is to pre-apply the repair material to the concrete to heal the premature cracks when they appear, the process called the self-healing method [3].

2. MATERIALS AND METHODS

Cracking is a major danger to a majority of concrete structures caused by low tensile strength of concrete. In fact, internal and external changes, in the form of processes, trigger the formation of thousands of fine cracks in the inner areas of concrete. The movement of harmful substances through small concrete spaces gradually deteriorates the concrete structure and intenfies the corrosion of the reinforcements exposed to water and oxygen in the long run. The formed cracks also affect the durability of strucytures by creating a smooth path for the transfer of liquids and gases with harmful substances. Therefore, the need for repairing

Please cite this article as: Mehravar, S., Heydari, M., Nouranian, H., "An overview of different types of self-healing concrete construction methods", ***Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)***, Vol. 11, No. 1, (2022), 35-53. (https://doi.org/10.30501/jamt.2022.287519.1177).

2783-0829/© 2022 The Author(s). Published by MERC.
This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

cracks in the concrete structures is inevitable. In this regard, different methods can be employed to repair the concrete cracks including autogenous healing, hollow fibers, microcapsules and nanomaterials, mineral addmixtures such as aluminum sulfate, and bacteria, all symbolically shown in Figure 1. In the following, each of these methods will be reviewed shortly.

Figure 1. Schematic diagram of self-healing strategies in cementous materials

2.1. Autogenous healing

The first and most natural self-healing concrete method with no external interference is the inherent self-healing of concrete. As observed, some cracks in the old concrete structures are covered with white crystalline material, indicating the concrete ability to spontaneously repair itself by inherently producing chemicals. Once the cracks are repaired in cementitious materials, a gradual decrease is observed in the permeability under the hydraulic gradient (penetration of water and invading ions) over time. In addition, in some cases, complete crack closure is witnessed [4].

2.2. Hollow fibers

The current study highlights the idea of using hollow fibers to hold some elements inside the pipes that are held in place in a concrete structure. In the case of damages or cracks in any part of the concrete, the materials in the pipes, i.e., the restorative elements, are released, thus reparing the cracks [5-6].

2.3. Microcapsules and nanoparticles

Nowadays, the idea producing intelligent self-healing materials suggests the insertion of small capsules into the structure of the used material (in the form of particles, tubes, and sheets) to scratch or rupture the cell body in the case of crack formation. The capsules are released into the cracks and then hardened to close the crack and perform the self-healing process or at least stop the spread of cracks [7-8].

2.4. Mineral admixtures such as aluminum sulfate

Different forms of cementitious materials such as hexacalcium Aluminate Trisulfate Hydrate (AFt), Aluminate Monosulfate (AFm), and Calcium Carbonate ($CaCO_3$) can be found in the cracks and crystals of calcium hydroxide in voids made by air bubbles. It was assumed that these hydration products were washed in the crack and recrystallized in the presence of water flowing inside the crack. Based on this idea as well as consideration of the development of self-healing technology in the concrete, Kishi et al. conducted a study on the effect of different elements of self-healing on the self-healing behavior of concrete. The examined samples included the expanding materials, minerals, chemical additives, and several other combinations of these materials. The results from an experimental comparison between a reference sample and that containing 10 % of cement with an expandable compound composed of C_4A_3S, $CaSO_4$, and CaO ash revealed that the crack with a width of 0.22 mm was completely restored after one month. In this process, re-crystallization products are observed between the crack layers [9].

2.5. Bacteria

To date, in order to achieve the desired strength in a majority of studies, several items such as ash, blast furnace slag, silica fume, metakaolin, and other similar materials have been used as additives to the concrete. However, a new technology called bacterial mineral sediment has been developed recently, originating from the metabolic activities of specific microorganisms in the concrete that can improve its durability, stability, and properties in the long run. This process occurs inside or outside the microbial cell or even at a distance from it inside the concrete substrate. Most of the activities of this type of bacteria are based on changes in the soluble chemistry in the bacterial environment to facilitate supersaturation and mineral deposition. Application of

this technology (bio-mineral) to the concrete would lead to new innovative potentials in the production of new types of concrete such as bacterial concrete.

Bacterial concrete is designed based on the deposition of calcite by bacteria which is called Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP). Calcium carbonate deposits, as a microbial sealant, can fill cracks and crevices in granites, rocks, and sand [10].

3. COMPARING OF DIFFERENT SELF-HEALING STRATEGIES

Table 1 shows different self-healing strategies for comparison according to which, each of these self-healing methods has its own advantages and disadvantages.

Table 1. Comparison of different self-healing strategies [4, 11]

No.	Method	Advantages	Disadvantages
1	Autogenous healing	- Natural method - Natural precipiation of calcium carbonate	- Time-consuming and weak repair - Suitable for small cracks (10 to 100 micrometers) - Inability to control the repair process
2	Hollow fibers	- Release of the healing agent when necessary - Need for medium amount of healing agent - Possible effectiveness under multiple damage events	- Difficulty in casting or molding - Negative effect on the mechanical properties of the cementitious matrix in the case of using a large number of hollow fibers
3	Microcapsules and nanoparticles	- Release of the healing agent when necessary - Simultaneous response to many damaged locations - Possible effectiveness under multiple damage incidents	- Difficulty of preparing microcapsules and casting - Limited amount of healing agents - Concern about the connection between capsules and the cement matrix - Negative effect on the mechanical properties of the cementitious matrix if a large number of capsules are used
4	Expansive agents and mineral admixtures such as Aluminum sulfate	- Proper and good healing efficiency - Proper compatibility with the generated healing products with the cement matrix	- Unfavorable expansion in the case of improper repair - Not guaranteeing production of healing agents if necessary - Effectiveness under different damage incidents
5	Bacteria	- A natural and pollution-free method characterized by biological activities	- Need for many prerequisites to be met - Need for measurements to protect bacteria in concrete - Concern for the recovery of mechanical properties under multiple damage conditions

4. CONCLUSION

The present study presented a review of the previous researches and their results to provide more realistic information about the self-healing concrete as a basic factor and its structural durability. For many years, considerable amount of money has been spent for repairing the structures all around the world, which sometimes exceeds the cost of construction itself. In order to reduce these costs, a number of researchers have studied the durability and longevity of concrete and specifically focued on the self-healing propcess. However, the findings remained in the theoretical relam, hence not applied to the real-world cases. In addition, experimental experimnets were performed on the cement paste. Of the above methods, only the bacterial repair method was tested in concrete; however, it has not been industrialized yet due to its high costs. Instead, expandable and mineral additives were considered as industrial solutions to this problem due to their economic characteristics. Of note, these materials have revolutionized the concepts of Intrinsic Self-Sensing Concrete (ISSC), resources, energy, and conventional concrete materials and made influential changes in the economy, society, and environment.

5. ACKNOWLEDGEMENT

This project was financially supported by Materials and Energy Research Center (MERC) with the project number of 771397053.

REFERENCES

1. Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Verstraete, W., "Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete", ***Construction and Building Materials***, Vol. 26, No. (1), (2012), 532-540. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054
2. Van Tittelboom, K., De Belie, N., "Self-healing in cementitious materials-A review", ***Materials***, Vol. 6, No. 6, (2013), 2182-2217. https://doi.org/10.3390/ma6062182
3. Stuckrath, C., Serpell, R., Valenzuela, L. M., Lopez, M., "Quantification of chemical and biological calcium carbonate precipitation: Performance of self-healing in reinforced mortar containing chemical admixtures", ***Cement and Concrete Composites***, Vol. 50, (2014), 10-15. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.005
4. Wu, M., Johannesson, B., Geiker, M., "A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material", ***Construction and Building Materials***, Vol. 28, No. 1, (2012), 571-583. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086M
5. Dry, C., "Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials", ***Composite Structures***, Vol. 35, No. 3,

(1996), 263-269. https://doi.org/10.1016/0263-8223(96)00033-5C

6. Emami, S., Nouranian, H., Kamallo, A., "Flexural strength and microstructure of alkali resistant glass fiber reinforced calcium aluminates phenolic resin composite", ***Advances in Cement Research***, Vol. 23, No. 1, (2011), 11-15. https://doi.org/10.1680/adcr.9.00002
7. Souradeep, G., Kua, H. W., "Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete", ***Journal of Materials in Civil Engineering***, Vol. 28, No. 12, (2016), 4016165. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001
8. Huseien, G. F., Shah, K. W., Sam, A. R. M., "Sustainability of nanomaterials based self-healing concrete: An all-inclusive insight", ***Journal of Building Engineering***, Vol. 23, No. 1, (2019), 155-171. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.032C.M
9. Kan, C. Y., Lan, M. Z., Kong, L. M., Yang, J. B., "Effect of aluminium sulfate on cement properties", ***Materials Science Forum***, Vol. 743-744, Switzerland, (2013), 285-291. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.743-744.285
10. De Muynck, W., De Belie, N., Verstraete, W., "Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review", ***Ecological Engineering***, Vol. 36, No. 2, (2010), 118-136. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006W
11. De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, T., Litina, C., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, J. M., Vucetic, S., Wang, J., Jonkers, H. M., "A review of self-healing concrete for damage management of structures", ***Advanced Matererials Interfaces***, Vol. 5, No. 17, (2018), 1-28. https://doi.org/10.1002/admi.201800074

فصلنامه مواد و فناوریهای پیشرفته

Journal Homepage: www.jamt.ir

MERC

مقاله مروری پژوهشی

مروری بر انواع روش‌های ساخت بتن خودترمیم

ستاره مهرآور [۱]، مژگان حیدری [۲]*، حسین نورانیان [۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

[۲] استادیار، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

[۳] دانشیار، پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۰/۰۳/۰۲

دریافت نسخهٔ اصلاح‌شده: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰

پذیرش علمی: ۱۴۰۰/۰۴/۱۵

کلیدواژه‌ها:

بتن خودترمیم،

میکروکپسوله کردن،

بتن باکتریایی،

افزودنی‌های معدنی،

نانوذرات

چکیده بتن به‌دلیل استحکام، دوام و هزینه نسبتاً پایین، ماده‌ای است که در سراسر جهان، کاربرد بسیاری در ساخت‌وساز دارد. بااین‌حال، ترک برداشتن و تخریب بتن، حتی در ابتدای عمر آن، اجتناب‌ناپذیر است. ازاین‌رو، قطعاً به تعمیر و ترمیم نیاز دارد. با توجه به این‌که بتن، در بیشتر موارد، بدون پوشش در محیط استفاده می‌شود و شرایط محیطی در طول عمر آن بسیار مؤثر است، استفاده از روش‌هایی برای افزایش دوام و طول عمر آن الزامی به نظر می‌رسد. براساس آمار به‌دست‌آمده از مقاله‌ها، پژوهش‌ها، آزمایش‌ها و مشاهدات عینی، گاهی هزینه تعمیر و ترمیم سازه، از هزینه ساخت آن هم بیشتر است. ترک‌های بتنی، دلیل اصلی کاهش عمر سازه‌های بتنی‌اند. بنابراین، از نظر اقتصادی، مقرون‌به‌صرفه‌تر است که به‌جای این‌که ترک‌های کوچک را پس از ایجاد ترک‌های بزرگ ترمیم کنیم، از رشد ترک‌های کوچک در لحظه ظهورشان جلوگیری کنیم. بدین‌منظور، بهترین راهکار این است که مواد ترمیم‌کننده، از قبل، برای بهبود ترک‌های زودرس، به بتن اضافه شوند که اصطلاحاً به این روش «خودترمیمی» گفته می‌شود. ازاین‌رو، بتن خودترمیم در جهان، به‌ویژه در سال‌های اخیر، جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساخت‌وساز یافته است. در مقاله حاضر، تعدادی از این روش‌ها بررسی و با هم مقایسه می‌شوند تا مشخص شود که کدام روش قابلیت صنعتی‌شدن بیشتری دارد.

https://doi.org/10.30501/jamt.2022.287519.1177 URL: https://www.jamt.ir/article_150649.html

۱- مقدمه

بتن، به‌دلیل مقاومت زیاد در برابر تنش های فشاری، جزء مصالح اصلی در ساخت‌وساز است، اما درعین‌حال استحکام کششی پایینی دارد که این امر باعث ایجاد ترک در آن، کوتاه‌شدن عمر و کاهش دوام آن می‌شود [۳-۱].

موادی که خاصیت سیمانی‌شدن دارند به‌عنوان اجزای تشکیل‌دهنده سازه‌ها به‌کار می‌روند [٤ و ٥]. در این میان، پدیده تخریب و زوال در این سازه‌ها، به‌منزله عاملی اجتناب‌ناپذیر، باعث کاهش کاربردپذیری این سازه‌ها می‌شود. بنابراین، نگهداری و تعمیر ساختمان‌ها که یکی از پرهزینه‌ترین و سخت‌ترین کارهاست، همیشه باید مدنظر قرار گیرد [٦ و ٧]. اغلب مواد، با پیشرفت ریزترک‌های[1] ساختاری، دچار شکست می‌شوند. نوک هر ترک، مانند چاقو، مواد را برش می‌دهد و در قطعه پیش می‌رود که با گذشت زمان، باعث کاهش استحکام و تخریب مکانیکی قطعه می‌شود [۱۱-۸].

همچنین، ترک در بتن باعث نفوذ آب‌های اسیدی و خورنده و درنتیجه، زنگ‌زدگی میل‌گردها شده و به‌دلیل این‌که حجم اکسید آهن از آهن بیشتر می‌شود، باعث تخریب بتن می‌شود. به همین منظور، مواد سیمانی خودترمیم، اهمیت ویژه‌ای دارند و از سال‌ها پیش، به پدیده خودترمیمی توجه و درباره آن

[1] Microcracks

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، البرز، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، **تلفن:** ۰۲۶-۳۶۲۸۰۰۴۰، **دورنگار:** ۰۲۶-۳۶۲۰۱۸۸۸

پیام‌نگار: m.heydari@merc.ac.ir

پژوهش شده است [۱۲ و ۱۳]. به‌منظور بهبود عملکرد مواد خودترمیم، در دهه اخیر، راهکارهای مختلف و الگوهای جدیدی به‌کار رفته‌اند [۱۴ و ۱۵]. خودترمیم‌شوندگی یکی از ارزشمندترین پدیده‌هایی است که برای غلبه بر مشکل کاهش یکپارچگی عملکردی که بر اثر آسیب‌دیدن مواد رخ می‌دهد، به‌کار می‌آید. بدین‌سان، فرایند خودترمیم‌کنندگی، باید بلافاصله پس از وقوع آسیب، به‌طور خودکار اجرا شود تا محدوده آسیب‌دیده، دوباره به یکپارچگی پیش از آسیب‌دیدن بازگردد.

بتن خودمتراکم[1] (SCC) یکی از دستاوردهای نوین فناوری بتن است که سال‌هاست در اروپا، امریکا و ژاپن استفاده می‌شود و روزبه‌روز بر اهمیت آن نزد مهندسان این حوزه افزوده می‌شود [۱۸-۱۶]. مزایای این بتن بیشتر از بتن معمولی است که شامل سیالیت بالا، جدانشدن سنگدانه‌ها از هم و پدیده آب‌انداختگی است. بتن خودمتراکم، افزون بر این‌که توانایی لازم برای عبور از فضای میان میل‌گردهای فلزی را دارد، می‌تواند بدون عمل ویبره زیر وزن خود متراکم شود [۱۶، ۱۹ و ۲۰]. بتن خودمتراکم، بازه گسترده‌ای از طرح‌های اختلاط را که خواص بتن تازه و سخت‌شده برای کاربری‌های خاص را دارا باشد در بر می‌گیرد [۲۱ و ۲۲]. اگرچه مقاومت، همچنان، معیار اصلی موفقیت این بتن است، اما ویژگی‌های بتن تازه آن، بسیار گسترده‌تر از بتن معمولی و متراکم‌شده توسط لرزاننده‌هاست. این خواص مطلوب باید در زمان و محل بتن‌ریزی حفظ شوند.

بعضی از بتن‌ها دارای نفوذپذیری بالایی هستند و یون‌های نفوذی در بتن اساساً در آرماتور تأثیر می‌گذارند و ازاین‌رو، دوام سازه بتنی را کاهش می‌دهند. بارگذاری بیش از حد، سازوکارهای زوال، تغییرات حجمی ناشی از دمای بالا، خزش، جمع‌شوندگی، طراحی نادرست، روش‌های ساخت‌وساز نامناسب از جمله عوامل ایجاد ترک و کاهش عمر و استحکام بتن هستند. امروزه، برای رفع مجموعه مشکلات فوق، بتن‌های خودترمیم[2] (SHC) مطرح شده‌اند. «خودترمیم‌شوندگی»، در علم مواد، به معنای توانایی ترک برای جلوگیری از رشد خود در طول زمان و تولید بتنی هوشمند با قابلیت ترمیم ترک، به‌وسیله برهم‌کنش شیمیایی و فیزیکی، بدون دخالت نیروی انسانی است [۲۳ و ۲۴].

بیات و مهرآور و همکاران [۲۵ و ۲۶]، در پژوهشی با استفاده از فناوری نانو، نانوسولفات آلومینیم را توسط گوگرد به‌صورت میکروکپسول سنتز کردند و در ادامه، بتن خودمتراکم با طرح اختلاط مشخص تهیه و درنهایت ویژگی خودترمیمی و مکانیکی نانوچندسازه میکروکپسول سولفات آلومینیم در بتن خودمتراکم ارزیابی شد. فعل و انفعالات شیمیایی[3] شامل واکنش ترکیباتی است که در معرض سطوح ترک قرار دارند و در صورت وجود آب و رطوبت لازم، رخ می‌دهند و مواد بلورین تولید می‌کنند که رشد پیوسته آن‌ها باعث کاهش طول و عمق ترک و برقراری دوباره پیوستگی بتن می‌شود.

در مقاله حاضر، سعی بر این است، با مروری بر پژوهش‌های گذشته، شناخت واقعی‌تری از انواع روش‌های ساخت بتن خودترمیم و همچنین نحوه ترمیم آن‌ها ارائه شود. همچنین، ازآنجایی که تاکنون کمتر در خصوص قابلیت صنعتی‌شدن آن‌ها بحث شده است، در این مقاله، با نگاهی علمی و صنعتی، امکان صنعتی‌شدن روش موردنظر بیشتر بررسی می‌شود.

۲- بتن خودترمیم و انواع روش‌های ترمیم بتن

همان‌طور که در قسمت مقدمه اشاره شد، ترک‌خوردگی مشکلی بزرگ برای بسیاری از سازه‌های بتنی است که به‌علت استحکام کششی کم در بتن‌ها ایجاد می‌شود. درواقع، تغییرات داخلی و خارجی، به شکل فرایندهایی، باعث شکل‌گیری هزاران ترک ریز در نواحی داخلی بتن می‌شوند. جابه‌جایی مواد مضر، از بین فضاهای کوچک بتن، باعث زوال سازه بتنی و خوردگی آرماتور[4]هایی می‌شود که در جریان آب و اکسیژن قرار می‌گیرند. دوام بتن نیز با این ترک‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ زیرا این ترک‌ها، برای انتقال مایعات و گازهایی که خود شامل مواد مضرند، مسیر همواری ایجاد می‌کنند [۲۷ و ۲۸]. ازاین‌رو، نیاز به ترمیم ترک‌ها، در سازه‌های بتنی، اجتناب‌ناپذیر است. برای ترمیم ترک‌های بتن، روش‌های مختلفی شامل خودترمیمی ذاتی، الیاف توخالی، میکروکپسول و نانوذرات، مواد افزودنی

[1] Self-Compacting Concrete
[2] Self-Healing Concrete
[3] Chemical Reactions
[4] Reinforcement

منبسط‌شونده و افزودنی‌های معدنی نظیر سولفات آلومینیم و باکتری‌ها نیز وجود دارد که به‌صورت نمادین در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در ادامه، به معرفی و بررسی هریک از این روش‌ها می‌پردازیم.

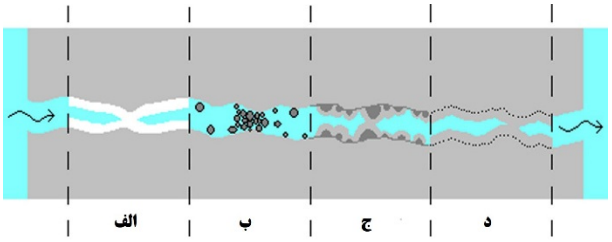
شکل ۱. دیاگرام انواع روش‌های خودترمیمی بتن

۲-۱- خودترمیمی ذاتی

اولین و طبیعی‌ترین روش خودترمیمی بتن که بدون هیچ‌گونه دخالت خارجی انجام می‌شود، خودترمیمی ذاتی[1] (AH) بتن است که براساس وقوع واکنش شیمیایی طبیعی و حضور آب رخ می‌دهد. در سال ۱۸۳۶، آکادمی علوم فرانسه اولین‌بار خودترمیمی ذاتی بتن را براساس ساختارهای نگهدارنده آب بررسی کرد، زیرا مشاهده شد، به‌دلیل کربناسیون[2] بین هیدروکسید کلسیم از بتن و قرارگرفتن در معرض جو یا واکنش بین کلسیم، لایه‌های بلوری سفیدی روی ترک‌ها پدید آمده است و برخی ترک‌ها، در سازه‌های بتنی قدیمی، با مواد بلورین سفیدرنگی پوشانده شده‌اند که نشان می‌دهد بتن، به‌تنهایی و خودبه‌خود، قابلیت ترمیم ترک‌ها با تولید مواد شیمیایی را دارد. ترمیم ترک‌ها در مواد سیمانی به کاهش تدریجی نفوذپذیری، تحت گرادیان هیدرولیکی (جریان آب از میان یک محیط متخلخل)، در طول زمان منجر می‌شود و در بعضی موارد، ترک‌ها می‌توانند کاملاً بسته شوند [۲۹ و ۳۰]. سازوکارهای زیر در خصوص ترمیم خودبه‌خود بتن در حالت خودترمیمی ذاتی رخ می‌دهد:

الف) تشکیل کلسیم کربنات یا هیدروکسید کلسیم
ب) بسته‌شدن ترک با ناخالصی موجود در آب
ج) بسته‌شدن ترک با هیدراته‌شدن سیمان هیدراته‌نشده
د) بسته‌شدن ترک با افزایش حجم مواد سیمانی در کنار ترک‌ها

این سازوکارها در شکل ۲ به ترتیب نشان داده شده‌اند [۳۱].



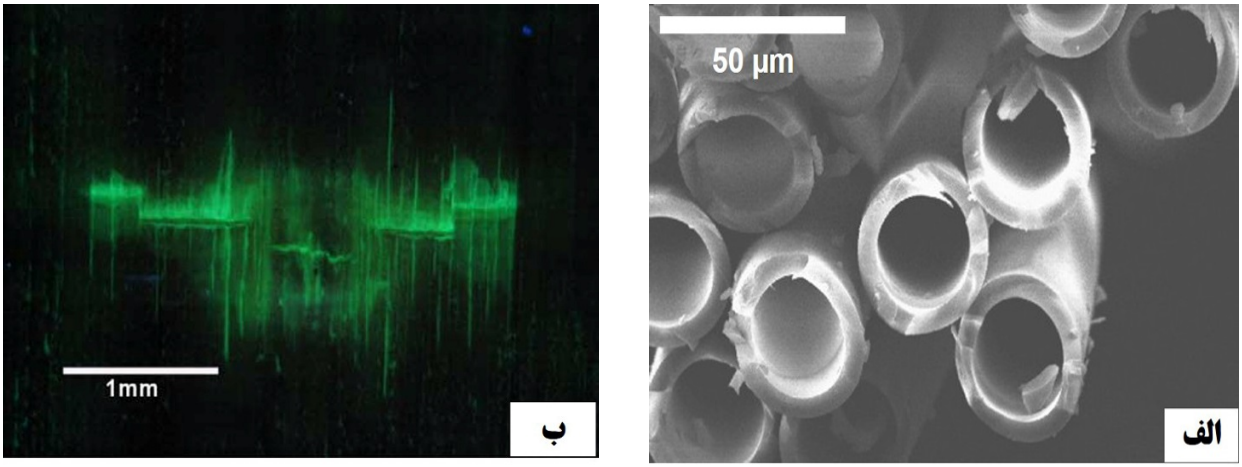
شکل ۲. سازوکارهای ممکن برای خودترمیمی ذاتی مواد سیمانی: (الف) تشکیل کلسیم کربنات یا کلسیم هیدروکسید؛ (ب) بسته‌شدن ترک با ناخالصی موجود در آب؛ (ج) بسته‌شدن ترک با هیدراته‌شدن سیمان هیدراته‌نشده و (د) بسته‌شدن ترک با افزایش حجم مواد سیمانی در کنار ترک‌ها [۳۱]

۲-۲- الیاف توخالی

[1] Autogenous Healing

[2] Carbonation

این روش بر کاربرد الیاف توخالی، به‌منظور نگهداری بعضی از مواد افزودنی در داخل لوله‌هایی که در ساختار بتن به‌صورت مرکب نگهداری می‌شوند، مبتنی است. در صورت وقوع خسارت یا ترک در هر بخش از بتن، مواد موجود در لوله‌ها که مواد افزودنی ترمیم‌گرند، آزاد می‌شوند و ترک را ترمیم می‌کنند. خودترمیمی با استفاده از الیاف توخالی در سازه‌های مهندسی، مانند مویرگ‌ها در بدن انسان، در شرایط و مواد متفاوت و توسط افراد مختلف مطالعه و بررسی شده است [۳۲]. به‌منظور مشاهده سریع و آسان صدمات داخلی در مواد چندسازه، روشی ارتقایافته برای مشاهده خرابی توسط پنگو باند[1] طراحی شد [۳۳ و ۳۴]. در این روش، الیاف با مواد ترمیم‌کننده دارای ترکیب فلوئورسنت ترکیب شدند تا فرایند ترمیم رصد شود. در شکل ۳، استفاده از فلوئورسنت و میکروالیاف نشان داده شده است [۳۳].



شکل ۳. (الف) الیاف توخالی و (ب) نمایش الیاف‌های مویرگی آسیب‌دیده بتن با استفاده از ویژگی فلوئورسنت [۳۳]

درای[2] [۳۵]، دیدگاه استفاده از الگوی خودترمیمی زیستی برای استفاده در بتن را ارتقا داد. این دیدگاه مبتنی بر کاربرد مواد ترمیم‌گر در مویرگ‌هایی است که در قطعات بتنی قرار گرفته‌اند. این قطعات، در اثر صدمه مویرگ‌ها، پاره و باعث آزادشدن مواد ترمیم‌گر می‌شوند. برای مثال، هنگامی‌که متیل متاکریلات[3] مایع در الیاف پلی‌پروپیلن[4] لوله‌ای در بتن استفاده شود، در اثر پاره شدن، در ترک منتشر و موجب نفوذناپذیری بتن می‌شود.

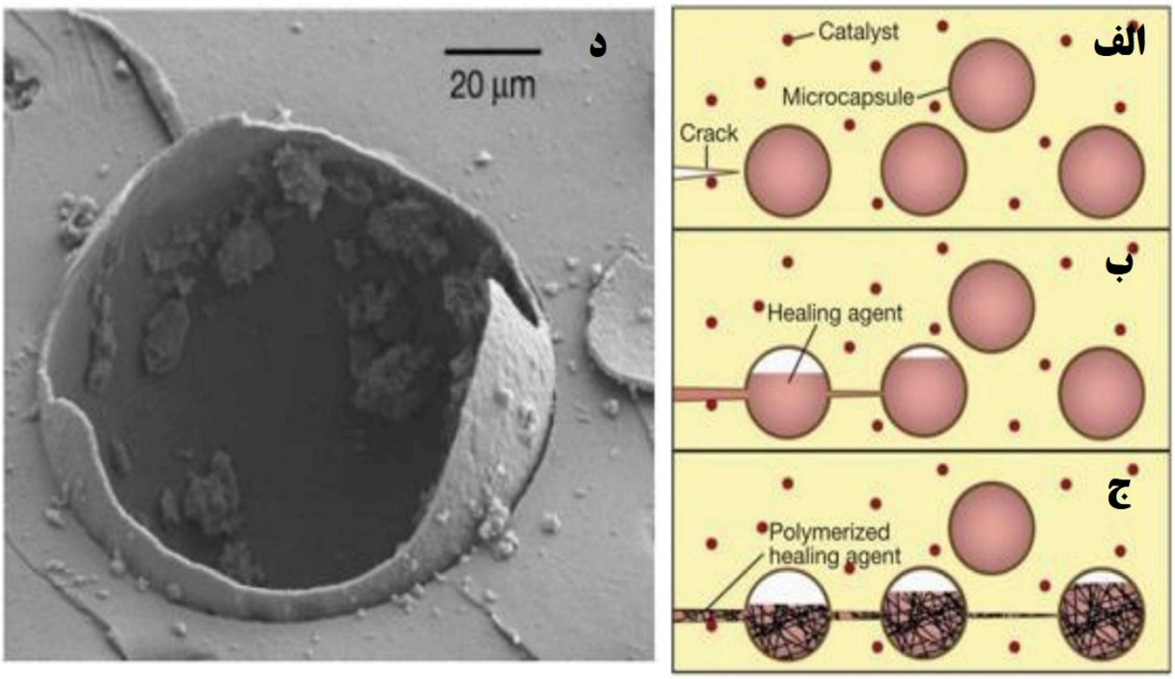
۲-۳- میکروکپسول و نانوذرات

از رویکردهای نوین تولید مواد و مصالح هوشمند خودترمیم‌کننده، قراردادن کپسول‌های کوچک در ساختار مواد (به شکل ذره، لوله و ورقه) است که هنگام بروز ترک در ماده، بدنه سلول خراش برداشته یا گسیخته می‌شود و به این ترتیب، محتویات درون کپسول‌ها آزاد و سخت می‌شوند تا ترک را ببندند و فرایند خودترمیم‌کنندگی را القا کنند یا دست‌کم از گسترش ترک در ساختار بتن جلوگیری کنند [۱۴، ۲۵ و ۳۶]. این نگرش مبتنی بر روش خودترمیم مستقل[5] (ASH) است که شامل افزودن مواد افزودنی طراحی‌شده به مخلوط زمینه[6] سیمانی برای اهداف ترمیم و تکنیک‌هایی خاص برای انتقال این مواد افزودنی است [۳۷ و ۳۸]. درای [۳۵ و ۳۹]، این پژوهش‌ها را در اوایل دهۀ ۱۹۹۰، گسترش داد. وی، در روش خود، از رزین برای بستن ترک‌های ایجادشده در درون بتن غیرمسلح بهره برد. امروزه، از این راهکار در مواد چندسازه بسپارپایه[7] استفاده می‌شود که البته بیشتر در مقیاس میکرون‌اند تا نانو، اما دانشمندان تلاش می‌کنند از عامل‌های هوشمند نانومقیاس استفاده کنند [۴۰ و ۴۱].

در این روش، میکروکپسول، غنی‌سازی می‌شود که هدف از آن، قراردادن اجزایی در حد میکرون از جنس جامد یا قطرات کوچک مایع یا گاز، درون غلافی است که از این مواد در برابر

[1] Pengo Bond
[2] Dry
[3] Methyl Methacrylate
[4] Polypropylene
[5] Autonomous Self Healing
[6] Matrix
[7] Polymer-Matrix Composite

شرایط نامناسب یا واکنش‌های نامطلوب محیط‌های خارجی محافظت و آن‌ها را ایزوله کند [٤۲]. وایت[1] و همکاران [٤۳]، کاربرد روش میکروکپسول در فرایند خودترمیمی را شرح داده‌اند. در شکل ٤، چگونگی عملکرد روش میکروکپسول نشان داده شده است. ابتدا، ترک در ساختار بتن گسترش می‌یابد. سپس، این ترک‌ها باعث تخریب میکروکپسول شده و مواد ترمیم‌گر به داخل ترک آزاد می‌شوند و درنهایت، مواد ترمیم‌گر با کاتالیزور تماس می‌یابند، بسپارش[2] آغاز و ترک بسته می‌شود [٤۳].



شکل ٤. اساس کاربرد روش میکروکپسول در فرایند ترمیم بتن: (الف) گسترش ترک در ساختار بتن؛ (ب) ترک باعث تخریب میکروکپسول شده و مواد ترمیم‌گر به داخل ترک آزاد می‌شوند؛ (ج) مواد ترمیم‌گر با کاتالیزور تماس می‌یابد، بسپارش آغاز و ترک بسته می‌شود و (د) تصویر میکروسکوپ الکترونی از یک میکروکپسول تخریب‌شده [٤۳]

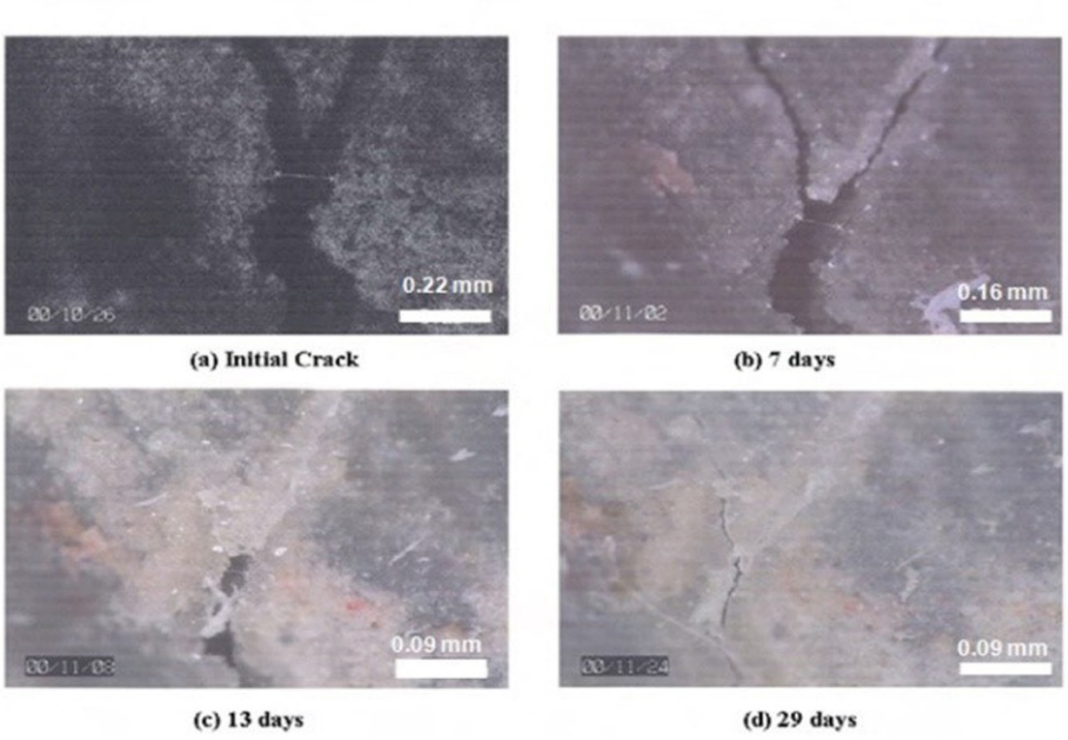
در پژوهش وی جی[3] و همکاران [٤٤]، مشخص شد که نتایج روش کپسوله‌سازی بهتر از روش کاربرد مستقیم است. همچنین، نشان داده شد که استفاده از باکتری می‌تواند باعث افزایش مقاومت و دوام بتن شود. در این روش، از ایزوله‌های باکتری تولید آنزیم اوره‌آز[4] مانند باسیلوس سوبتیلیس[5] و باسیلوس پاستوری[6] در ترمیم ترک‌های بتن استفاده شد. در این مطالعه، انواع مختلف باکتری‌هایی که می‌توانند برای بهبود ترک‌ها به‌کار روند بررسی شدند. این مطالعه همچنین مشخص کرده است که باکتری‌ها تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری مکعب‌ها و بتن ملات سیمان پرتلند دارند. از مزایای کاربرد باکتری‌ها، کاهش نفوذ آب و نفوذپذیری یون کلرید است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که با کاربرد بتن باکتریایی می‌توان به پرکننده‌ای بتنی با کیفیت بالا و اثربخشی بی‌نظیر و سازگار با محیط زیست و درنهایت، به بهبود دوام مصالح ساختمانی دست یافت [٤٤].

۲-٤- مواد افزودنی منبسط‌شونده و افزودنی‌های معدنی نظیر سولفات آلومینیم

انواع مختلفی از مواد سیمانی، مانند هگزاکلسیم آلومینات تری‌سولفات آبدار[7] (AFt)، کلسیم مونوسولفات آلومینات[8]

[1] White
[2] Polymerization
[3] Vijay
[4] Urease
[5] Bacillus Subtilis
[6] Bacillus Pasteurii
[7] Hexacalcium Aluminate Trisulfate Hydrate (Ettringite) or $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}\cdot 26H_2O$
[8] Calcium Aluminate Monosulphate or $3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaSO_4\cdot 12H_2O$

(AFm) و کربنات کلسیم ($CaCO_3$)، در ترک‌ها و بلورهای هیدروکسید کلسیم و در فضاهای خالی ناشی از حباب‌های هوا مشاهده شده است [۱۰، ۳۱ و ٤۳]. فرض می‌شود که این محصولات آبدارشده[1]، در ترک، شسته شده و در مجاورت آبی که در ترک جریان یافته، مجدداً تبلور یابند. این نگرش مبتنی بر روش ASH شامل افزودن مواد افزودنی طراحی‌شده به مخلوط زمینه سیمانی برای اهداف ترمیم و همچنین شامل روش‌هایی خاص برای انتقال این مواد افزودنی است [۲۹ و ۳۰]. با توجه به گسترش فناوری خودترمیمی در بتن، کیشی[2] و همکاران [٤۵ و ٤٦]، پژوهش‌هایی را در خصوص تأثیر مواد افزودنی مختلف خودترمیم بر رفتار خودترمیمی بتن انجام دادند. نمونه‌هایی که بررسی شد، شامل مواد منبسط‌شونده، کانی‌ها و افزودنی‌های شیمیایی و همچنین چندین ترکیب مختلف از این مواد بود. نتایج مقایسه تجربی بین نمونه مرجع و نمونه‌هایی که ۱۰ درصد از سیمان آن‌ها با ترکیب منبسط‌شونده مرکب از مواد افزودنی C_4A_3S، $CaSO_4$ و خاکستر CaO ساخته شده بود، نشان داد که ترکی که دارای عرض ۰/۲۲ میلی‌متر بود، بعد از یک ماه کاملاً ترمیم شده است. در این فرایند، محصولات تبلور مجدد، در بین لایه‌های ترک، مشاهده شدند. باید توجه داشت که در زمان مشابه، در نمونه‌های بتنی معمولی، مقدار اندکی از ترک ترمیم می‌شود و شکاف باقی می‌ماند. به‌طور کلی، تبلور مجدد مواد افزودنی منبسط‌شونده در حفره‌های هوا، برای خودترمیمی، بسیار مناسب‌تر از شرایطی است که در بتن‌های معمولی اتفاق می‌افتد [۱۱ و ٤۷]. در شکل ۵ ، فرایند خودترمیم به‌وسیله مواد منبسط‌شونده نشان داده شده است [٤۸].



شکل ۵. فرایند خودترمیم به‌وسیله مواد منبسط‌شونده [٤۸]

در زیر، سازوکار عمل سولفات آلومینیم در سیمان براساس نتایج حاصل از مقالات مرجع ارائه شده است [۳۹]. در خمیر سیمان، واکنش شیمیایی مربوط به تشکیل اترینگایت[3] رخ می‌دهد:

$$Al_2(SO_4)_3 + 3Ca(OH)_2 + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$$

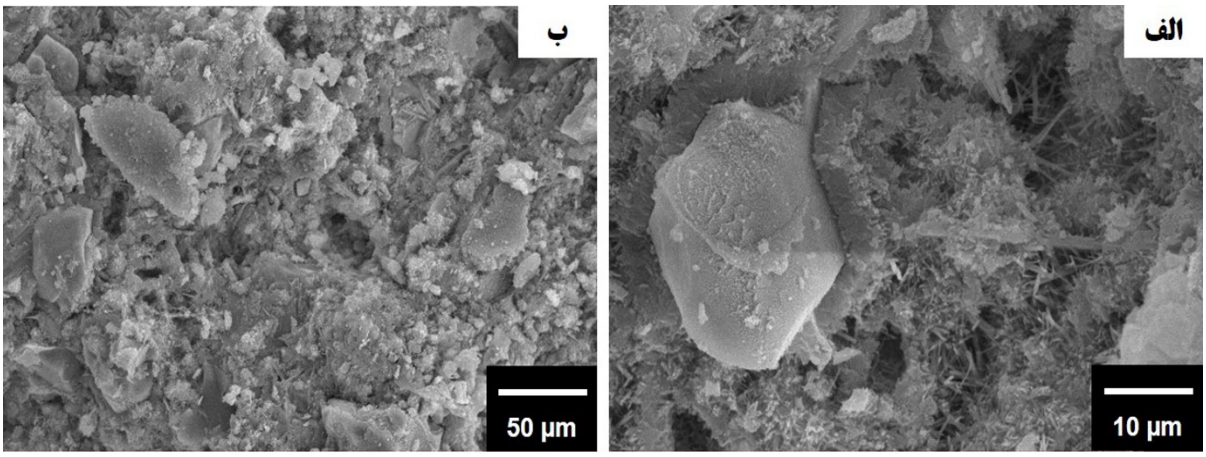
$$C_3A + 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 26H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$$

$$Al_2(SO_4)_3 + 6Ca(OH)_2 + 26H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$$

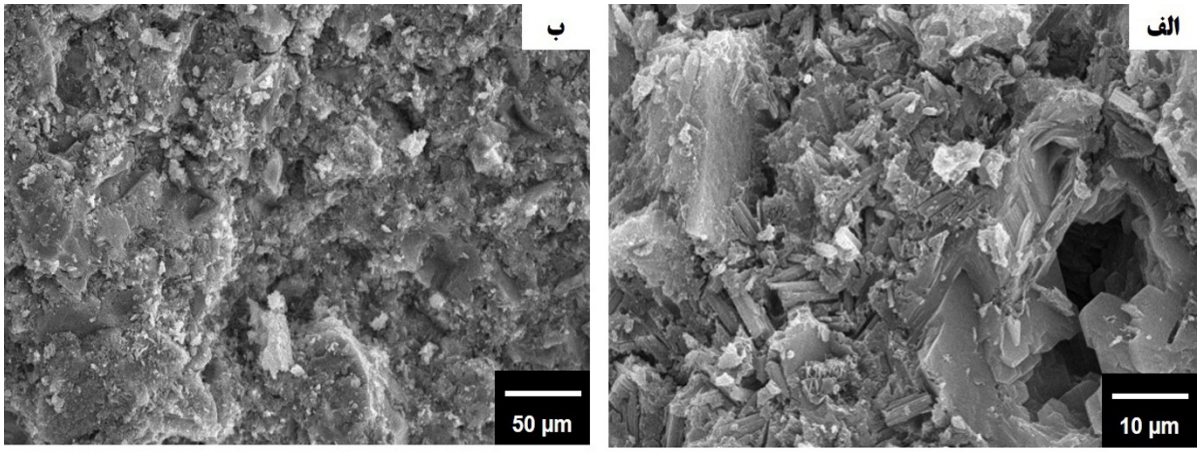
$$2Al(OH)_3 + 3Ca(OH)_2 + 3CaSO_4 + 26H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$$

[1] Hydration
[2] Kishi
[3] Ettringite

دو نوع اترینگایت وجود دارد که کاملاً از نظر ریخت‌شناختی و موقعیت با هم متفاوت‌اند. نوع اول، اترینگایت سوزنی‌شکل باریک است که به‌شکل غیریکنواخت کنارهم در شکاف‌ها تجمع می‌کند (شکل ٦). اما دومین نوع، اترینگایت سوزنی‌شکل کوتاه است که به‌طور گسترده و یکنواخت در خمیر سیمان توزیع می‌شود (شکل ۷).



شکل ٦. تصویر SEM سیمان بدون سولفات آلومینیم، پس از یک روز، در مقیاس (الف) ۱۰ میکرومتر و (ب) ۵۰ میکرومتر [۳۹]



شکل ۷. تصویر SEM سیمان با ۱۰ درصد سولفات آلومینیم، پس از یک روز، در مقیاس (الف) ۱۰ میکرومتر و (ب) ۵۰ میکرومتر [۳۹]

این شکل‌گیری در محل‌هایی رخ می‌دهد که برای شروع آبدارشدن، از آب پر شده‌اند. شکل‌گیری اترینگایت عمدتاً تابعی از غلظت هیدروکسید کلسیم است؛ یعنی غلظت کلسیم در مایع و pH از عوامل اصلی‌اند. هنگامی‌که کمی سولفات آلومینیم به سیمان اضافه می‌شود، غلظت کلسیم در جامد و pH نیز کمی تغییر می‌کند. در این مورد، سرعت بلورینگی اترینگایت نسبتاً کم است. اترینگایت عمدتاً در خوشه‌ها و اندازه‌های کوچک تشکیل می‌شود. هنگامی‌که میزان سولفات آلومینیم زیاد است، کلسیم کمی مصرف می‌شود و کاهش اندکی در pH محلول رخ می‌دهد. سپس اترینگایت در اندازه بزرگ رشد می‌کند و به‌طور گسترده پراکنده می‌شود. در مجموع، از یک‌سو، اضافه‌کردن سولفات آلومینیم، یون کلسیم را در محلول مصرف می‌کند و از سوی دیگر، یون آلومینیم و یون سولفات را فراهم می‌کند که اترینگایت را تشکیل دهند. این دو جنبه برای تشکیل اترینگایت مفید است. به این معنا است که افزودن سولفات آلومینیم در غلظت آبدارشدن کلسیم تأثیر می‌گذارد و سپس، شکل‌گیری اترینگایت را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۲-۵- باکتری

خودترمیمی با استفاده از باکتری، ترک‌ها را در زمان‌های عمل‌آوری اولیه پوشش می‌دهد و با ساختار داخلی بتن سازگاری دارد. تاکنون در بیشتر پژوهش‌ها، برای دستیابی به استحکام، از

موادی نظیر خاکستر، سرباره کوره بلند، دوده سیلیس، متاکائولین[1] و مواد مشابه به‌عنوان افزودنی به بتن استفاده شده است. این مواد از ویژگی‌های مناسبی مانند استحکام فشاری بالا، میزان انقباض کم، زمان گیرش مناسب، مقاومت در برابر اسید، آتش و حرارت مناسب و هدایت حرارتی کم سیمان برخوردارند [۱۵ و ٤۹]. در پژوهشی که اخیراً توسط شربت‌دار و همکاران [۵۰] انجام شده است، به نقش گران‌رَوی[2] با استفاده از مواد پوزولان[3]، مانند متاکائولین و بخار سیلیکا، در خاصیت اصلی بتن خودمتراکم پرداخته شده است. در این مقاله، اثر جایگزینی هم‌زمان سیمان با متاکائولین و بخار سیلیکا بر خواص رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودمتراکم با درصدهای وزنی مختلف بررسی شد. تمام مخلوط‌ها، از نظر استحکام فشاری، کششی و آزمون جذب آب با سیالیت مناسب، بدون داشتن علائم تفکیک یا بی‌ثباتی بررسی شدند و نتایج آزمون نشان داد که مخلوط‌های بتن خودمتراکم حاویِ متاکائولین و بخار سیلیکا، استحکام فشاری و کششی بیشتری از بتن بدون پوزولان دارند.

اخیراً فناوری جدیدی با عنوان «زیست‌کانی‌سازی» ابداع شده است که این رسوب از فعالیت‌های دگرگشتی[4] ریزجانداران[5] خاص در بتن به‌دست می‌آید و در بلندمدت، باعث بهبود دوام و پایداری و خواص بتن می‌شود.

این فرایند می‌تواند در داخل یا خارج سلول میکروبی، یا حتی با فاصله از آن، در داخل زمینه بتنی اتفاق افتد. اغلب فعالیت این نوع باکتری‌ها مبتنی بر تغییر شیمی محلول موجود در محیط فعالیت باکتری برای ایجاد فوق‌اشباع و کانی‌سازی است. استفاده از این فناوری (زیست‌کانی‌سازی) در بتن، پتانسیل جدیدی برای ابداعاتی در زمینه تولید نوع جدیدی از بتن به نام «بتن باکتریایی» ایجاد می‌کند.

بتن باکتریایی، براساس قابلیت رسوب‌دهی کلسیت، به‌وسیله باکتری‌ها طراحی و ساخته می‌شود. این پدیده، «رسوب کلسیت تحریک‌شده با باکتری»[6] (MICP) نامیده می‌شود. رسوبات کربنات کلسیم، به‌عنوان درزگیر میکروبی، توانمندی بالای خود را در پرکردن ترک‌ها و شکاف‌های ریز انواع گرانیت، سنگ و ماسه اثبات کرده‌اند [۵۱ و ۵۲]. فناوری رسوب کلسیت با استفاده از باکتری، فرایندی جذاب و ارزشمند به‌شمار می‌رود؛ زیرا فرایندی طبیعی است و آلودگی زیست‌محیطی ایجاد نمی‌کند. این فناوری می‌تواند برای بهبود استحکام فشاری و سختی نمونه‌های بتنی ترک‌دار یا سازه‌های بتنی تحت تنش استفاده شود. نخستین پژوهش در زمینه تعمیر بتن با MICP را گروه راماکریشنان[7] انجام دادند [۵۳ و ٥٤]. روش MICP، روشی است که از شاخه علمی بزرگ‌تری به نام «زیست‌کانی‌سازی»[8] نشأت گرفته است [۵۷-۵۵].

روش MICP شامل مجموعه واکنش‌های پیچیده بیوشیمیایی است و کارایی آن می‌تواند شدیداً تحت تأثیر عواملی نظیر تخلخل محیط، تعداد سلول‌های موجود و حجم مواد مغذی اضافه‌شده قرار گیرد. بافر فسفات یا اوره و ماده حاوی کلسیم مانند کلرید کلسیم می‌توانند به‌عنوان مواد مغذی بسیار مناسب استفاده شوند. باکتری در حضور این مواد مغذی موجب رسوب کلسیت می‌شود. اسیدیته یا pH، عامل مهمی در فعالیت یا عدم‌فعالیت باکتری‌ها در محیط بتن است. به‌عنوان مثال، مقدار بهینه pH یا اسیدیته محیط، برای رشد باسیلوس پاستوری، حدود ۹ است که کاملاً قلیایی است. اسیدیته بالای محیط بتن با pH حدود ۲ تا ۵، مهم‌ترین عامل تأخیر در رشد باکتری است. بااین‌حال، باکتری باسیلوس پاستوری می‌تواند درون‌هاگ[9] ایجاد کند که در مقابل شرایط سخت مقاومت کند [۵۳، ۵۸ و ۵۹].

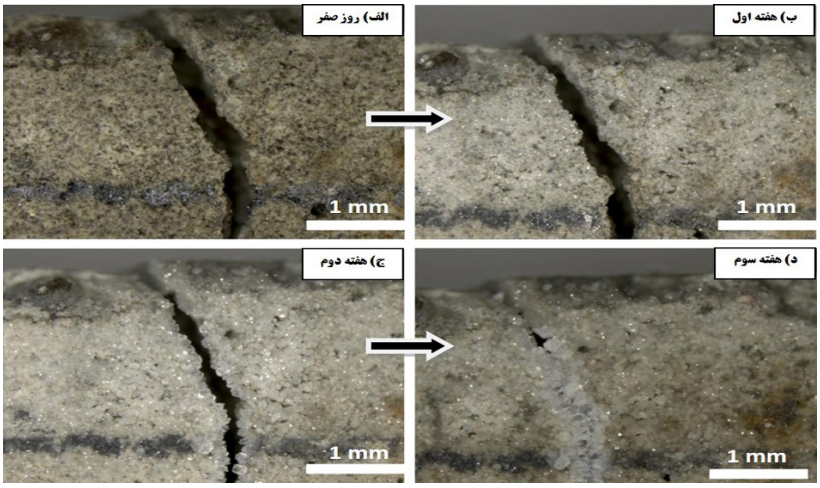
در پاره‌ای از پژوهش‌ها، از باکتری‌ها به‌صورت افزودنی به بتن استفاده شده است. یکی از روش‌های افزایش دوام بتن و ترمیم ترک‌های موجود در آن، استفاده از روش‌های زیستی اضافه‌کردن باکتری به آب اختلاط بتن است. در پژوهشی که اخیراً توسط پرستگاری و همکاران [٦۰] انجام شده است، نشان داده شد که بتن‌های حاوی باکتری با pH بالا، منافذی با اندازه نسبتاً کوچک (کمتر از ۰/۱ میکرومتر) و محیطی تقریباً خشک دارند. بنابراین، اگر محیط کشت حفاظت‌نشده باشد، در بلندمدت، باکتری در بتن دوام نمی‌آورد و ازبین می‌رود. یکی از راهکارهای محافظت از باکتری در بتن، ایجاد حباب‌های هواست

[1] Metakaolin
[2] Viscosity
[3] Pozzolan
[4] Metabolic
[5] Microorganisms
[6] Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation
[7] Ramakrishnan
[8] Biomineralization
[9] Endospore

که این پژوهش را اولین‌بار پرستگاری و همکاران انجام دادند. در این روش، باکتری‌ها وارد منافذ هوا می‌شوند و در آنجا به فعالیت خود ادامه می‌دهند. در این پژوهش، با در نظر گرفتن درصدهای متفاوت هوا، میزان تأثیر هواداربودن بتن در فعالیت باکتری‌ها، ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که حباب‌های هوای ایجادشده در بتن، کارایی باکتری را افزایش می‌دهند و با کاربرد باکتری در بتن هوادار و قراردادن آن در کنار منبع کلسیم، عمق کربناسیون کاهش می‌یابد.

در پژوهشی دیگر، دهقانی و حمزه [۶۱]، خواص مکانیکی بتن خودترمیم‌شونده حاوی میکروارگانیسم را ارزیابی کردند. بتن حاوی میکروارگانیسم در دو غلظت مختلف باکتری باسیلوس پاستوری و ماده مغذی کلسیم لاکتات ساخته و با بتن حاوی میکروسیلیس، بتن حاوی لاتکس و بتن کنترل مقایسه شد. در هر چهار دسته از طرح مخلوط مشابه با نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ و حاوی میکروسیلیس، پلیمر لاتکس و کلسیم لاکتات که در درصدهای مختلف جایگزین سیمان شده‌اند، استفاده شد. نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه از عمل‌آوری، از نظر استحکام فشاری، خمشی و کششی بررسی شدند و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد در میان نمونه‌ها، مربوط به بتن حاوی میکروسیلیس است و عامل خودترمیمی (باکتری و ماده مغذی)، در مقایسه با نمونه کنترل، موجب افزایش مقاومت فشاری و کاهش مقاومت‌های کششی و خمشی می‌شود [۶۱].

در پژوهشی، باکتری مقاوم به محیط قلیایی، از گونه باسیلوس، به مخلوط بتن، به‌عنوان عامل خودترمیمی، اضافه شد (شکل ۸) [۶۲]. سازوکار اساسی ترمیم ترک به‌وسیله باکتری بر این پایه است که باکتری‌ها مانند کاتالیزور عمل کرده و مواد آغازگر را به پرکننده‌ای مناسب تبدیل می‌کنند. سپس، مواد تولیدشده جدید، نظیر مواد معدنی را برپایه کربنات کلسیم رسوب می‌دهند. این مواد باید مانند نوعی سیمان زیستی عمل کنند و ترک‌های ایجادشده را به‌خوبی ببندند [۶۳]. بنابراین، برای دستیابی به قابلیت مناسبی از خودترمیم‌کنندگی، باید هم باکتری‌ها و هم ماده آغازگر در زمینه بتن وجود داشته باشند. این مواد اضافه‌شده به بتن نباید ویژگی‌های موردنظر بتن را تغییر دهند. باکتری‌هایی که بتوانند شرایط محیط بتن را تحمل کنند، در طبیعت وجود دارند و نوع خاصی از باکتری‌های تشکیل‌دهنده هاگ[1] مقاوم به قلیا هستند. ویژگی جالب این نوع باکتری‌ها، تولید سلول‌هایی با دیواره‌های ضخیم کروی، مشابه بذر گیاهان است. این هاگ‌ها می‌توانند به‌صورت سلول‌های نهفته، در بتن زندگی کرده و تنش‌های شیمیایی و مکانیکی محیط بتن را تحمل کنند. در محیط خشک، این باکتری‌ها می‌توانند بیش از ۱۰ سال، زنده بمانند [۶۴].



شکل ۸. افزودن باکتری به مخلوط بتن به‌عنوان عامل خودترمیمی ترک (اندازه ترک اولیه ۱-۰/۰۵ میلی‌متر): الف) قبل از ترمیم؛ ب) هفته اول؛ ج) هفته دوم و د) بعد از ۲۸ روز ترمیم‌شده [۶۲]

متأسفانه زمانی‌که این باکتری‌ها مستقیماً به بتن اضافه می‌شوند، عمر آن‌ها فقط یک یا دو ماه است. کاهش عمر هاگ‌های باکتری‌ها، از چند دهه (محیط خشک) به چند ماه (در بتن)، می‌تواند ناشی از آبدارشدن مداوم سیمان بتن باشد که

[1] Spore

نتیجه این آبدارشدن، تشکیل حفره‌هایی کوچک‌تر از یک میکرومتر در زمینه بتن و کوچک‌تر از اندازه هاگ باکتری‌هاست. نکته مهم دیگر این است که افزودن مواد آغازگر زیست‌آلی-معدنی به بتن موجب کاهش خواص بتن نشود. در پژوهش‌های پیشین مشخص شد که موادی نظیر عصاره مخمرها، پپتون[1] و استات کلسیم موجب کاهش شدید استحکام فشاری بتن می‌شوند. فقط لاکتات کلسیم از این قاعده مستثناست که در مقایسه با نمونه اولیه، افزایش استحکامی ۵۰ درصدی را نشان داد [۵۸، ۶۵ و ۶۶].

۲-۵-۱- انواع باکتری‌های استفاده‌شده در بتن

انواع باکتری‌هایی که تاکنون در خصوص کاربردشان در بتن باکتریایی پژوهش شده است عبارت‌اند از:

- باسیلوس پاستوری
- باسیلوس اسفریکوس[2]
- اشریشیا کلی[3]
- باسیلوس سوبتیلیس

از باکتری‌های قیدشده در بالا، در ساخت بتن باکتریایی استفاده شده است و بیشتر آن‌ها در فرایندی که رسوبات کلسیتی را تولید می‌کند، شرکت می‌کنند و باعث بهبود خواص بتن می‌شوند [۵۸، ۶۲ و ۶۷]، هرچند در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص اثر خودترمیمی، از خانواده‌های باکتری باسیلوس برای تولید کلسیم کربنات استفاده شده است، این خانواده از باکتری‌ها با اوره، آمونیوم و دی‌اکسید کربن تغذیه می‌شود و کلسیم کربنات تولید می‌کند [۷۰-۶۸].

۲-۵-۲- سازوکار عمل باکتری‌ها

ظرفیت زیست‌کانی‌سازی پروکاریوت‌ها[4] و یوکاریوت‌ها[5] متفاوت است و زیست‌کانی‌سازی کلسیم کربنات، مانند سایر فرایندهای زیست‌کانی‌سازی، می‌تواند با دو سازوکار متفاوت انجام پذیرد:

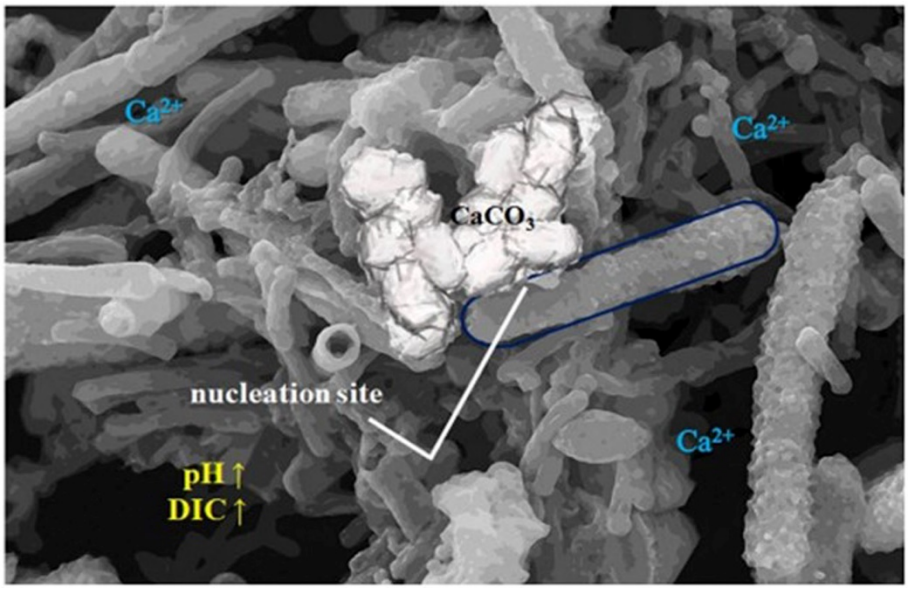
- ✓ زیست‌کانی‌سازی کنترل‌شده
- ✓ زیست‌کانی‌سازی القاشده

در زیست‌کانی‌سازی کنترل‌شده، موجود زنده، فرایند هسته‌زایی[6] و رشد ذرات کانی را تا مراحل آخر کنترل می‌کند.

ذرات کانی تشکیل‌شده ترکیب، داخل زمینه آلی یا در مکان‌های مشخص وابسته به سلول و معمولاً به‌صورت درون‌سلولی رسوب می‌کنند [۷۱]. براساس پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه، می‌توان گفت که این فعالیت باکتری‌ها می‌تواند تحت تأثیر پارامترهای شیمیایی ـ فیزیکی محیطی قرار گیرد و وابسته به فعالیت دگرگشتی و ساختار سطحی سلول باشد. فعالیت‌های دگرگشتی باکتری‌های هتروتروفیک[7] توسط بعضی از پژوهشگران به‌عنوان سازوکار غالب در ایجاد رسوب کربنات کلسیم مطرح شده است [۷۲ و ۷۳]. سطوح باکتریایی نیز نقش مهمی در ایجاد رسوب کلسیم دارند. به‌علت حضور چندین گروه باردار با بار منفی در سطح باکتری، در محیطی با pH خنثی، یون‌های فلزی با بار مثبت می‌توانند به سطوح باکتری متصل شوند. این امر می‌تواند شرایط جوانه‌زنی ناهمگن[8] را تشدید کند (شکل ۹). عمدتاً رسوب کربنات روی سطح خارجی سلول باکتری با لایه‌بندی پی‌درپی توسعه می‌یابد و درنهایت، باکتری در بلورهای کربناتِ در حال رشد گیر می‌افتد. به‌هرحال، تأثیر یا کارکرد واقعی باکتری‌ها در فرایند کانی‌سازی کلسیم هنوز قابل‌بحث است [۷۴].

کاربردهای مطرح‌شده رسوب کربنات کلسیم به‌وسیله باکتری شامل زمینه‌های مواد، تصفیه خاک، حذف آلودگی‌های جامد معدنی خاک، درزبندی و حذف ترک‌ها در سنگ‌ها و سایر مواد متخلخل سنگی است. همچنین، تولید کانی کربنات کلسیم به‌وسیله باکتری، به‌عنوان ابزاری جدید در حفاظت ستون‌های آهکی مطرح شده است [۵۵، ۷۵ و ۷۶]. در برخی پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص افزایش طول عمر باکتری در محیط بتن، اثر هاگ باکتری و ترکیب ماده اولیه معدنی زیست‌آلی[9] در این افزایش عمر بررسی شده است (شکل ۱۰) [۷۷].

[1] Peptone
[2] Bacillus Sphaericus
[3] Escherichia Coli
[4] Prokaryotes
[5] Eukaryotes
[6] Nucleation
[7] Heterotrophic Bacteria
[8] Heterogeneous Nucleation
[9] Bioorganic



شکل ۹. رسوب کربنات کلسیم روی سطح خارجی سلول باکتری [٧٤]

شکل ۱۰. ریزساختار بتن پس از ٦٣ روز ترمیم توسط باکتری با راندمان حدود ٤٠ درصد [٧٧]

۳- مقایسه راهبردهای مختلف خودترمیمی

برای مقایسه، راهبردهای مختلف خودترمیمی در جدول (۱) (که پیش‌تر نیز به‌صورت نمادین در شکل (۱) ترسیم شده بود) ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، هریک از این روش‌های خودترمیمی بتن، مزایا و معایبی دارند. برای مثال، روش طبیعی خودترمیمی ذاتی، فرایندبسیار زمان‌بری بوده و فقط برای ترک‌های کوچک قابل‌استفاده است همچنین، کنترل پارامترهای فرایند در این روش دشوار است. در مقابل، در روش الیاف توخالی، عامل ترمیم‌کننده، هنگام ضرورت و در مقدار متوسط، آزاد می‌شود. به‌علاوه، اثربخشی، در شرایط مختلف، آسیب‌هایی را به‌همراه دارد. در روش میکروکپسول و نانوذرات، امکان پاسخ هم‌زمان به بسیاری از مکان‌های آسیب‌دیده وجود دارد. در روش مواد افزودنی منبسط‌شونده و افزودنی‌های معدنی، راندمان نسبتاً مناسب و سازگاری مناسبی بین محصولات ترمیمی تولیدشده با زمینه سیمانی وجود دارد. سرانجام، روش طبیعی ترمیم باکتریایی است که روشی طبیعی و عاری از آلودگی‌های زیست محیطی است، هرچند نیاز به تجهیزات خاص و همچنین محافظت از باکتری دارد.

جدول ۱. مقایسه راهبردهای مختلف خودترمیمی[۳۱ و ۷۸]

ردیف	راهبرد	مزایا	معایب
۱	خودترمیمی ذاتی	- روش طبیعی - رسوب طبیعی کربنات کلسیم	- ترمیم زمان‌بر و ضعیف - مناسب برای ترک‌های کوچک (۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر) - عدم‌امکان کنترل فرایند ترمیم
۲	الیاف توخالی	- آزادشدن عامل ترمیم‌کننده هنگام ضرورت - نیاز به مقدار متوسطی از ماده ترمیم‌کننده - اثربخشی احتمالی تحت حوادث متعدد آسیب	- مشکل در ریخته‌گری و یا قالب‌گیری - اثر منفی بر ویژگی‌های مکانیکی زمینه سیمانی اگر تعداد زیادی از الیاف توخالی به‌کار گرفته شوند.
۳	میکروکپسول و نانوذرات	- آزادشدن عامل ترمیم‌کننده هنگام ضرورت - پاسخ هم‌زمان به بسیاری از نقاط آسیب‌دیده - اثربخشی احتمالی تحت حوادث متعدد آسیب	- مشکل‌بودن تهیه میکروکپسول - مقدار محدود عامل ترمیم‌کننده - نگرانی از پیوند بین کپسول و زمینه سیمانی - اثر منفی بر ویژگی‌های مکانیکی زمینه سیمانی اگر تعداد زیادی کپسول به‌کار گرفته شود.
٤	مواد افزودنی منبسط‌شونده و افزودنی‌های معدنی نظیر سولفات آلومینیم	- بازدهی مناسب و خوب ترمیم - سازگاری مناسب بین محصولات ترمیمی تولیدشده با زمینه سیمانی	- گسترش و انبساط نامطلوب در صورت انجام ترمیم نامناسب - تضمین‌نشدن تولید محصولات لازم و مناسب برای ترمیم - اثربخشی و کارایی تحت حوادث مختلف آسیب می‌تواند نوعی مشکل باشد.
۵	باکتری‌ها	- روش طبیعی عاری از آلودگی و فعالیت‌های زیستی	- نیاز به تجهیزات خاص - نیاز به اقدامات خاص برای محافظت از باکتری ها در بتن - نگرانی برای بازیابی خواص مکانیکی تحت شرایط مختلف

٤- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، با مروری بر پژوهش‌های پیشین و نتایج آن‌ها، شناخت واقعی‌تری از بتن‌های خودترمیم، به‌منزله عامل اساسی و دوام سازه، حاصل شد. سالیان بسیاری است که در جهان، هزینه بسیار زیادی برای ترمیم سازه‌ها صرف می‌شود که گاهی از هزینه ساخت آن سازه هم فراتر می‌رود. به همین دلیل، برای کاهش این هزینه‌ها، تاکنون، پژوهش‌های بسیاری در زمینه دوام و طول عمر بتن انجام شده که بیشتر آن‌ها در زمینه خودترمیمی بوده و صرفاً جنبه مطالعاتی داشته است. همچنین، آزمون‌های تجربی روی خمیر سیمان انجام شده است. از روش‌های فوق، فقط روش ترمیم توسط باکتری در بتن آزمایش شده که به‌دلیل اقتصادی نبودن، صنعتی نشده است. اما مواد

افزودنی منبسط‌شونده و افزودنی‌های معدنی، به‌دلیل اقتصادی‌بودن، از راهکارهای صنعتی به‌شمار می‌رود. این مواد، انقلابی مهم در حوزهٔ بتن خودحسگر ذاتی[1] (ISSC)، منابع، انرژی و مصالح بتن معمولی ایجاد می‌کند و در اقتصاد، جامعه و محیط بسیار تأثیرگذار است.

۵- سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت مالی پژوهشگاه مواد و انرژی در انجام این پروژه پژوهشی دانشجویی، مصوب معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی، با کد ۷۷۱۳۹۷۰۵۳ تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Song, H. W., Saraswathy, V., "Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-A", ***International Journal of Electrochemical Science***, Vol. 2, No. 1, (2007), 1-28. http://www.electrochemsci.org/papers/vol2/2010001
2. Berrocal, C. G., Fernandez, I., Rempling, R., "Crack monitoring in reinforced concrete beams by distributed optical fiber sensors", ***Structure and Infrastructure Engineering***, Vol. 17, No. 1, (2020), 1-16. https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1731558
3. Guo, Sh., Chidiac, S., "Self-healing concrete: A critical review", In ***Proceedings of the 2019 CSCE Annual Conference***, Laval, QC, Canada, (2019), 12-15. https://csce.ca/elf/apps/CONFERENCEVIEWER/conferences/2019/pdfs/PaperPDFVersion_152_0423094222.pdf
4. Da Costa, V. C., Aboelkheir, M. G., Pal, K., Toledo Filho, R. D., Gomes F., "Smart polymer systems as concrete self-healing agents", In ***Nanofabrication for Smart Nanosensor Applications***, Elsevier, (2020), 399-413. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820702-4.00016-7
5. Esmaily, H., Nouranian, H., "Production of non-autoclaved pre-fabricated sponge concrete using alkali-activated slag cements", In In ***The 2nd International Conference on Seismic Resilience***, ICSR02-090, Tabriz,-Iran, (1388), (11 January 2010). (In Persian). https://civilica.com/doc/844737/
6. Esmaily, H., Nouranian, H., "The effect of setting temperature on the properties of slag-Activated slag cements", In ***The 7th Iranian Ceramic Congress: ICC07***, Shiraz, Iran, (1388), (28-29 April 2009), 1-6. (In Persian). https://civilica.com/doc/69887/
7. Shams, A., ***The effects of nanoparticles on the healing properties of engineered cement matrix composites***, Master Thesis, Materials and Energy Research Center (MERC), (2012). (In Persian). http://lib.merc.ac.ir/main, (Accessed: 02 May 2019).
8. Esmaily, H., Nouranian, H., "Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali activated slag", ***Construction and Building Materials***, Vol. 26, No. 1, (2012), 200-206. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.010
9. Ahmadi, S., Nouranian, H., "Alkali activated slag cement", ***Journal of Iranian Ceramic Society***, Vol. 19, No. 20, (1388), (2009), 29-60. (In Persian). https://www.magiran.com/paper/710669
10. Ghaleh Barkhordari, M., Nouranian, H., "Preparation of super sulfate green cement using iron slag and phosphate residue", In ***The 1st International Conference and Exhibition of Cement Industry, Energy and Environment***, CIEE01-015, Tehran, Iran, (1391), (20 January 2013). (In Persian). https://civilica.com/doc/211434/
11. Ghaleh Barkhordari, M., Nouranian, H., "Improving the hardening behavior of super sulfate cement containing slag with low reactivity by phosphate residue", In ***The 9th Iranian Ceramic Congress***, ICC09-005, Tehran, Iran, (1392), (16 September 2013). (In Persian). https://civilica.com/doc/222089/
12. Khattab, I. M., Shekha, H., Abdi, M. A., "Study on self-healing concrete types–A review", ***Sustainable Structures and Materials***, Vol. 2, No. 1, (2019), 76-87. https://doi.org/10.26392/SSM.2019.02.01.076
13. Ghaleh Barkhordari, M., ***Synthesis of lightweight composite based on super sulfate and perlite sand cement***, Master Thesis, Materials and Energy Research Center (MERC), (2013). (In Persian). http://lib.merc.ac.ir/main (Accessed 05 May 2019)
14. Emami, S., ***Development and investigation of the aluminate cement and nanostructured phenolic resin composite properties***, Master Thesis, Materials and Energy Research Center (MERC), (2007). (In Persian). http://lib.merc.ac.ir/main (Accessed 07 May 2019)
15. Kamalloo, A., ***Characteristics and analysis the specificity of nanocomposite based on the geopolymeric cement***, Master Thesis, Materials and Energy Research Center (MERC), (2007). (In Persian). http://lib.merc.ac.ir/main (Accessed 27 May 2019)
16. Okamura, H., Ouchi, M., "Self-compacting concrete", ***Journal of Advanced Concrete Technology***, Vol. 1, No. 1, (2003), 5-15. https://doi.org/10.3151/jact.1.5
17. Aydın, A. C., Nasl, V. J., Kotan, T., "The synergic influence of nano-silica and carbon nano tube on self-compacting concrete", ***Journal of Building Engineering***, Vol. 20, (2018), 467-475. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.08.013
18. Ouchi, M., Nakamura, S. A., Osterberg, T., Hallberg, S., Myint Lwin, M., "Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States", ***Kochi University of Technology***, Kochi, Japan, (2003) ISHPC. https://trid.trb.org/view/698204
19. Domone, P. L., "A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete", ***Cement and Concrete Composites***, Vol. 29, No. 1, (2007), 1-12. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.010
20. Najim, K. B., Hall, M. R., "A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberized concrete (SCRC)", ***Construction and Building Materials***, Vol. 24, No. 11, (2010), 2043-2051. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.056
21. Banea, M. D., da Silva, L. F., Campilho, R. D., Sato, C., "Smart adhesive joints: An overview of recent developments", ***The Journal of Adhesion***, Vol. 90, No. 1, (2014), 16-40. http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2013.785916
22. Han, B., Zhang, L., Ou, J., '[Self-healing concrete", In ***Smart and Multifunctional Concrete toward Sustainable Infrastructures***, Springer, Singapore, (2017), 117-155. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4349-9_7
23. Shah, K. W., Huseien, G. F., "Biomimetic self-healing cementitious construction materials for smart buildings", ***Biomimetics***, Vol. 5, No. 4, (2020), 47. https://doi.org/10.3390/biomimetics504004
24. Aïssa, B., Therriault, D., Haddad, E., Jamroz, W., "Self-healing materials systems: Overview of major approaches and recent developed technologies", ***Advances in Materials Science and Engineering***, Vol. 2012, No. 854203, (2012), Article ID 854203. https://doi.org/10.1155/2012/854203
25. Bayat, B., ***Investigation of self-healing properties of portland cement mortar containing aluminum sulfate sealed by encapsulation***, Master Thesis, Materials and Energy Research Center (MERC), (2018). (In Persian). http://lib.merc.ac.ir/main (Accessed 21 May 2019)
26. Mehravar, S., ***Investigation of self-healing properties by sulfur-encapsulated aluminum sulfate nanocomposite in self-compacting concrete***, Master Thesis, Materials and Energy Research Center (MERC), (2020). (In Persian). http://lib.merc.ac.ir/main (Accessed 17 May 2020).
27. Zhang, W., Zheng, Q., Ashour, A., Han, B., "Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review", ***Composites Part B: Engineering***, Vol. 189, No. 1, (2020), 107892-107920.

[1] Intrinsic Self-Sensing Concrete

45. Ahn, T. H., Kishi, T., "Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures", ***Journal of Advanced Concrete Technology***, Vol. 8, No. 2, (2010), 171-186. https://doi.org/10.3151/JACT.8.171
46. Wang, X., Xing, F., Zhang, M., Han, N., Qian, Z., "Experimental study on cementitious composites embedded with organic microcapsules", ***Materials***, ***(Basel)***, Vol. 6, No. 9, (2013), 4064-4081. https://doi.org/10.3390/ma6094064
47. Nouranian, H., ***Pre-curing of autoclaved aerated concrete (AAC)***, Master Thesis, Materials and Energy Research Center (MERC), (1997). (In Persian). http://lib.merc.ac.ir/main (Accessed 5 April 2019)
48. Kishi, T., Ahn, T. H., Hosoda, A., Suzuki, S., Takaoka, H., "Self-healing behavior by cementitious recrystallization of cracked concrete incorporating expansive agent", In ***Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials***, The Netherlands, (18-20 April 2007).
49. Kamalloo, A., Ganjkhanlou, Y., Aboutalebi, S. H., Nouranian, H., "Modeling of compressive strength of metakaolin based geopolymers by the use of artificial neural network", ***IJE Transactions A: Basics***, Vol. 23, No. 2, (April 2010), 145-152. http://www.ije.ir/article_71847.html
50. Sharbatdar, M. K., Abbasi, M., Fakharian, P., "Improving the properties of self-compacted concrete with using combined silica fume and metakaolin", ***Periodica Polytechnica Civil Engineering***, Vol. 64, No. 2, (2020), 535-544. https://doi.org/10.3311/PPci.11463
51. De Muynck, W., De Belie, N., Verstraete, W., "Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review", ***Ecological Engineering***, Vol. 36, No. 2, (2010), 118-136. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006
52. Chuo, S. C., Mohamed, S. F., Setapar, S. H. M., Ahmad, A., Jawaid, M., Wani, W. A., Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M., "Insights into the current trends in the utilization of bacteria for microbially induced calcium carbonate precipitation", ***Materials***, Vol. 13, No. 4993, (2020), 1-28. http://dx.doi.org/10.3390/ma13214993
53. Bang, S. S., Galinat, J. K., Ramakrishnan, V., "Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*", ***Enzyme and Microbial Technology***, Vol. 28, No. 4-5, (2001), 404-409. https://doi.org/10.1016/S0141-0229(00)00348-3
54. Santosh, K., Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V., Bang, S. S., "Remediation of concrete using microorganisms", ***American Concrete Institute Journal***, Vol. 98, No. 1, (2001), 3-9. http://dx.doi.org/10.14359/10154
55. Chen, H. J., Peng, C. F., Tang, C. W., Chen, Y. T., "Self-healing concrete by biological substrate", ***Materials*** (Basel, Switzerland), Vol. 12, No. 24, 4099, (2019). https://doi.org/10.3390/ma12244099
56. Nayanthara, P. G. N., Dassanayake, A. B. N., Nakashima, K., Kawasaki, S., "Microbial induced carbonate precipitation using a native inland bacterium for beach sand stabilization in nearshore areas", ***Applied Sciences***, Vol. 9, No. 3201, (2019), 1-24. https://doi.org/10.3390/app9153201
57. Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., Verstraete, W., "Use of bacteria to repair cracks in concrete", ***Cement and Concrete Research***, Vol. 40, No. 1, (2010) 157-166. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.025
58. Stanaszek-Tomal, E., "Bacterial concrete as a sustainable building material? A review", ***Sustainability***, Vol. 12, No. 696, (2020), 1-13. https://doi.org/10.3390/su12020696
59. Rahman, M. M., Hora, R. N., Ahenkorah, I., Beecham S., Karim, M. R., Iqba, I., "State-of-the-art review of microbial-induced calcite precipitation and its sustainability in engineering applications", ***Sustainability***, Vol. 12, No. 6281, (2020), 1-41. https://doi.org/10.3390/su12156281
60. Parastegari, N., Mostofinejad, D., "Influence of bacteria on performance of air entrained concrete", ***Amirkabir Journal Civil Engineering***, Vol. 50, No. 6, (2019), 1103-1112. https://doi.org/10.22060/ceej.2018.12371.5188
61. Dehghani, H., Hamzeh, R., "Mechanical properties evaluation of self-healing concrete containing microorganisms", ***Modares Civil Engineering Journal***, Vol. 21, No. 1, (1400), (2021), 13-29. (In Persian). https://mcej.modares.ac.ir/article-16-44218-en.html
62. Wang, J. Y., Soens, H., Verstraete, W., De Belie, N., "Self-healing https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107892
28. Seifan, M., Samani, A. K., Berenjian, A., "Bioconcrete: Next generation of self-healing concrete", ***Applied Microbiology and Biotechnology***, Vol. 100, No. 6, (2016), 2591-2602. https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z
29. Hearn, N., "Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference?", ***Materials and Structures***, Vol. 31, No. 8, (1998), 563-567. https://doi.org/10.1007/BF02481539
30. Rajczakowska, M., Habermehl-Cwirzen, K., Hedlund, H., Cwirzen, A., "Autogenous self-healing: A better solution for concrete", ***Journal of Materials in Civil Engineering***, Vol. 31, No. 9, (2019), 03119001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002764
31. Wu, M., Johannesson, B., Geiker, M., "A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material", ***Construction and Building Materials***, Vol. 28, No. 1, (2012), 571-583. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086
32. Emami, S., Nouranian, H., Kamallo, A., "Flexural strength and microstructure of alkali resistant glass fiber reinforced calcium aluminates phenolic resin composite", ***Advances in Cement Research***, Vol. 23, No. 1, (2011), 11-15. https://doi.org/10.1680/adcr.9.00002
33. Pang, J. W. C., Bond, I. P., "A hollow fiber reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility", ***Composites Science and Technology***, Vol. 65, No. 11-12, (2005), 1791-1799. http://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.03.0
34. Trask, R. S., Williams, G. J., Bond, I. P., "Bioinspired self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres", ***Journal of the Royal Society Interface***, Vol. 4, No. 13, (2007), 363-371. https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0194
35. Dry, C., "Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials", ***Composite Structures***, Vol. 35, No. 3, (1996), 263-269. https://doi.org/10.1016/0263-8223(96)00033-5
36. Khorasani, A. S., Nouranian, H., Yuzbashi, A. A., Moghaddas, S., Raz, M., Tahriri, M., "The effects of nanoparticles of silica and alumina on flow ability and compressive strength of cementitious composites", ***Key Engineering Materials***, Vol. 631, Trans. Tech. Publications Ltd., (2015) 119-127. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.631.119
37. Guo, S., Chidiac, S., "Self-healing concrete: A critical review", In ***Proceedings of the 2019 CSCE Annual Conference***, Laval, QC, Canada, (2019), 12-15.
38. Sidiq, A., Gravina, R., Giustozzi, F., "Is concrete healing really efficient? A review", ***Construction and Building Materials***, Vol. 205, No. 1, (2019), 257-273. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.002
39. Kan, C. Y., Lan, M. Z., Kong, L. M., Yang, J. B., "Effect of aluminium sulfate on cement properties", ***Materials Science Forum***, Trans. Tech. Publications, Switzerland, (2013), 285-291. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.743-744.285
40. Souradeep, G., Kua, H. W., "Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete", ***Journal of Materials in Civil Engineering***, Vol. 28, No. 12, (2016), 4016165. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001
41. Huseien, G. F., Shah, K. W., Sam, A. R. M., "sustainability of nanomaterials based self-healing concrete: An all-inclusive insight", ***Journal of Building Engineering***, Vol. 23, No. 1, (2019), 155-171. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.032
42. Lucas, S. S., Von Tapavicza, M., Schmidt, A. M., Bertling, J., Nellesen, A., "Study of quantification methods in self-healing ceramics, polymers and concrete: A route towards standardization", ***Journal of Intelligent Material Systems and Structures***, Vol. 27, No. 19, (2016), 2577-2598. https://doi.org/10.1177/1045389X16641205
43. White, S., Sottos, N., Geubelle, P., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S. R., Brown, E. N., Viswanathan, S., "Autonomic healing of polymer composites", ***Nature***, Vol. 409, (2001), 794-797. https://doi.org/10.1038/35057232
44. Vijay, K., Murmu, M., Deo, S. V., "Bacteria based self-healing concrete–A review", ***Construction and Building Materials***, Vol. 152, No. 1, (2017), 1008-1014. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040

71. Bleszynski, R. F., Thomas, M. D. A., "Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions", ***Advanced Cement Based Materials***, Vol. 7, No. 2, (1998), 66-78. https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00030-8
72. Zhu, T., Dittrich, M., "Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: A review", ***Frontiers in Bioengineering and Biotechnology***, Vol. 4, No. 4, (2016), 1-21. https://doi.org/10.3389/fbioe.2016.00004
73. López-Moreno, A., Sepúlveda-Sánchez, J. D., Mercedes, E., Guzmán, M. A., Le Borgne, S., "Calcium carbonate precipitation by heterotrophic bacteria isolated from biofilms formed on deteriorated ignimbrite stones: influence of calcium on eps production and biofilm formation by these isolates", ***Biofouling***, Vol. 30, No. 5, (2014), 547-560. https://doi.org/10.1080/08927014.2014.888715
74. Lee, Y. S., Park, W., "Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete", ***Applied Microbiology and Biotechnology***, Vol. 102, No. 1, (2018), 3059-3070. https://doi.org/10.1007/s00253-018-8830-y
75. Schaub, S. A., Sorber, C. A., "Virus and bacteria removal from wastewater by rapid infiltration through soil", ***Applied and Environmental Microbiology***, Vol. 33, No. 3, (1977), 609-619. https://doi.org/10.1128/aem.33.3.609-619
76. Ortega-Villamagua, E., Gudiño-Gomezjurado, M., Palma-Cando, A., "Review microbiologically induced carbonate precipitation in the restoration and conservation of cultural heritage materials", ***Molecules***, Vol. 25, No. 5499, (2020), 1-23, https://doi.org.10.3390/molecules25235499
77. Lucas, S. S., Moxham, C., Tziviloglou, E., Jonkers, H., "Study of self-healing properties in concrete with bacteria encapsulated in expanded clay", ***Science and Technology of Materials***, Vol. 30, No. 1, (2018), 93-98. https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.11.006
78. De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, T., Litina, C., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, J. M., Vucetic, S., Wang, J., Jonkers, H. M., "A review of self-healing concrete for damage management of structures", ***Advanced Matererials Interfaces***, Vol. 5, No. 17, (2018), 1-28. https://doi.org/10.1002/admi.201800074

concrete by use of microencapsulated bacterial spores", ***Cement and Concrete Research***, Vol. 56, No. 1, (2014), 139-152. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.009

63. Dhami, N. K., Reddy, M. S., Mukherjee, A., "Improvement in strength properties of ash bricks by bacterial calcite", ***Ecological Engineering***, Vol. 39, No. 1, (2012), 31-35. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.11.011
64. Song, X. F., Wei, J. F., He, T. S., "A method to repair concrete leakage through cracks by synthesizing super-absorbent resin in situ", ***Construction and Building Materials***, Vol. 23, No. 1, (2009), 386-391. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.009
65. Nguyen, H. T.; Ghorbel, E., Fares, H., Cousture, A. "Bacterial self-healing of concrete and durability assessment", ***Cement and Concrete Composites***, Vol. 104, No. 1, (2019), 103-340. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103340
66. Fahimizadeh, M., Abeyratne, A. D., Mae, L. S., Singh, R., K., Pasbakhsh, P., "Biological self-healing of cement paste and mortar by non-ureolytic bacteria encapsulated in alginate hydrogel capsules", ***Materials***, Vol. 13, No. 17, (2020), 3711. https://doi.org/10.3390/ma13173711
67. Wang, J. Y, Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W. H., De Belie, N., "Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete", ***Construction and Building Materials***, Vol. 68, No. 1, (2014), 110-119. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018
68. Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., Schlangen, E., "Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete", ***Ecological Engineering***, Vol. 36, No. 2, (2010), 230-235. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036
69. Sierra-Beltran, M. G., Jonkers, H., Schlangen, E., "Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair", ***Construction and Building Materials***, Vol. 67, No. C, (2014), 344-352. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.012
70. Xu, J., Yao, W., "Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent", ***Cement and Concrete Research***, Vol. 64, No. 1, (2014), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.003