

Investigation of the Self-Healing Performance and Microstructural Evolution of Concrete Made with Persian Gulf's Water and Dredged Sand Using *Bacillus Subtilis* Bacteria and Silica Fume

Seyed Mohammad Mehdi Asadzadeh¹, Mohammadreza Baradaran^{*2}, Gholamreza Atefatdoost¹

1. Introduction

The increasing demand for sustainable construction materials has encouraged the use of locally available marine resources in concrete production, particularly in coastal regions, islands, ports, and offshore infrastructure. In this context, seawater (SW) and dredged marine sand (SW) can be considered potential alternatives to freshwater and natural river sand. Their use may reduce freshwater consumption, limit the environmental impacts associated with excessive river sand extraction, and decrease the transportation cost of raw materials in coastal construction projects. However, the practical application of seawater sea-sand concrete (SWSSC) remains challenging because marine materials contain aggressive ions such as chloride, sulfate, magnesium, and calcium, which may alter cement hydration, increase permeability, promote expansive products, and reduce long-term durability. One of the main durability concerns in marine concrete is the development and propagation of microcracks. Cracks provide preferential paths for water, chloride, sulfate, and other aggressive ions, accelerating reinforcement corrosion and chemical deterioration. Conventional repair methods are often expensive, time-consuming, and difficult to implement in marine structures. Therefore, self-healing concrete has attracted considerable attention as an innovative solution for improving durability and extending the service life of concrete structures.

Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) is one of the most promising self-healing mechanisms. In this process, bacteria such as *Bacillus subtilis* can remain viable in the alkaline environment of cementitious materials and become active when water penetrates through cracks. The bacterial activity promotes carbonate production, which reacts with available calcium ions and forms calcium carbonate precipitates. These precipitates can partially or completely fill microcracks and pores, thereby improving impermeability and ion-transport resistance.

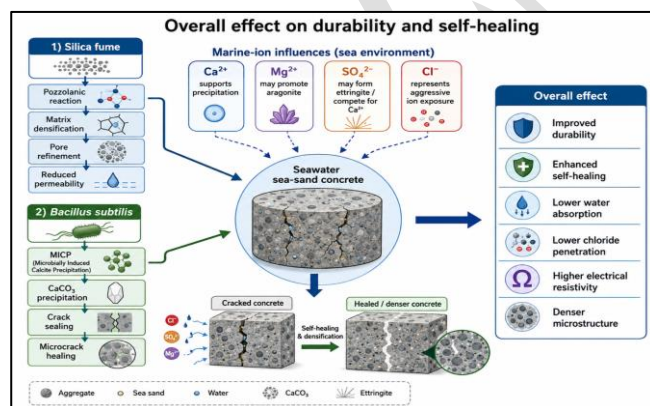


Fig. 1 Overall effect on durability and self-healing

Silica fume (SF) is widely used to improve concrete durability due to its filler effect and pozzolanic reaction. It refines the pore structure, increases matrix density, and contributes to the formation of secondary calcium silicate hydrate gel. However, SF consumes calcium hydroxide during pozzolanic reactions, which may reduce the availability of free calcium ions required for MICP. Therefore, the simultaneous use of SF and bacteria in SW and DMS concrete involves a complex interaction between pozzolanic densification and bio-mineralization. The main objective of this study is to investigate the self-healing performance, durability behavior, and

microstructural evolution of concrete produced with Persian Gulf SW and DMS incorporating *Bacillus subtilis* bacteria and SF.

2. Materials and method

In this experimental study, Portland cement Type II was used as the main binder. SF was used as a supplementary cementitious material at 10% cement replacement by mass. Persian Gulf's SW was used as mixing water in SW-based mixtures, while freshwater was used in control mixtures. DMS obtained from the Persian Gulf region was used as partial replacement of natural fine aggregate. The DMS was passed through sieve No. 4 to ensure particle-size uniformity. *Bacillus subtilis* bacteria were incorporated into selected mixtures as the self-healing agent. The bacterial suspension was prepared and added to the mixing water before being introduced into the concrete mixture. Calcium lactate was used during curing as a nutrient source to stimulate early bacterial activity and promote the MICP mechanism. This approach was adopted to activate the self-healing process under controlled laboratory conditions.

Six concrete mixtures were prepared: freshwater control concrete (FWC), freshwater concrete with bacteria [FWC(b)], (SWSSC, SWSSC with bacteria [SWC(b)], SWSSC containing SF (SWCS), and SWSSC containing both SF and bacteria [SWCS(b)]. All mixtures were designed with a water-to-cementitious-material ratio of 0.38. The cement content was 400 kg/m³ in mixtures without SF and 360 kg/m³ in mixtures containing 40 kg/m³ SF. The bacterial concentration was kept constant at 2.8×10^8 cells/ml in bacterial mixtures.

3. Experimental program

The mixing procedure consisted of dry mixing the aggregates and binder, followed by the addition of mixing water containing superplasticizer and bacterial suspension when applicable. Fresh concrete temperature was controlled in the range of 26-28 °C. The slump values ranged between 160 and 180 mm, indicating acceptable workability for all mixtures. Cubic specimens of 150 x 150 x 150 mm were prepared and cured in freshwater at 23 ± 2 °C and 100% relative humidity until the testing age. To evaluate the self-healing capacity, all bacterial and non-bacterial specimens were mechanically pre-cracked under controlled conditions. Pre-cracking was performed at the age of 3 days by applying approximately 30% of the ultimate compressive load. This procedure provided a comparable crack condition for evaluating the influence of bacteria and SF on crack healing, pore filling, and durability improvement.

The experimental program was designed to assess mechanical performance, transport properties, ion penetration resistance, and microstructural changes. Compressive strength tests were conducted at 3, 7, and 28 days. Water penetration under pressure was performed at 28 days to evaluate the continuity of the pore network and the ability of the mixtures to resist hydraulic penetration. Total water absorption was also measured to assess open porosity and the effectiveness of pore refinement. Ultrasonic pulse velocity (UPV) testing was used as a non-destructive method to monitor internal integrity and crack-healing progress. Electrical resistivity was measured using the Wenner four-probe method to evaluate the resistance of the concrete matrix against the movement of conductive ions. Rapid chloride penetration test (RCPT) was performed to assess chloride ion penetrability and the influence of bacteria and SF on ion-transport resistance. Microstructural and chemical analyses were performed using EDX, elemental mapping, and XRD to clarify the competing mechanisms between MICP, pozzolanic reactions, and sulfate-related products.

The results showed that SF significantly improved the mechanical and durability performance of SWSSC by increasing matrix density and reducing water absorption and permeability. The SWCS mixture achieved the highest compressive strength, mainly due to the filler effect and pozzolanic activity of SF. However, the addition of bacteria to the silica-fume mixture did not always enhance compressive strength, because SF consumed calcium hydroxide and reduced the availability of free calcium ions necessary for bacterial calcium carbonate precipitation.

² Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Fir.C., Islamic Azad University, Firoozabad, Iran. Email: mr.baradaran@iau.ac.ir

¹ Department of Civil Engineering, Es.C., Islamic Azad University, Estahban, Iran.

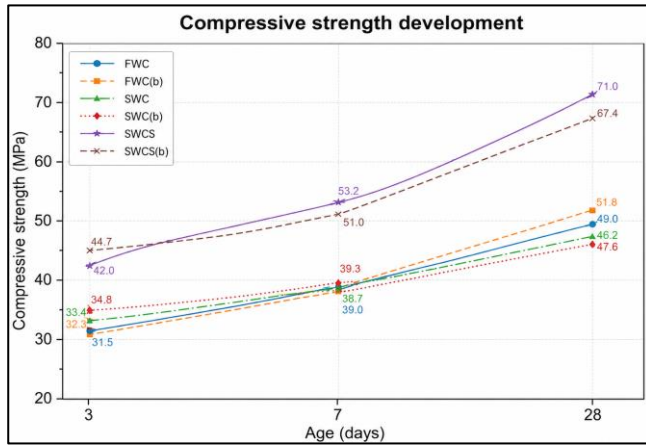


Fig. 2. Compressive strength development

In bacterial mixtures, MICP contributed to partial crack filling, reduction of ion-transport pathways, and improvement in durability indicators. The bacterial effect was more evident in mixtures where sufficient calcium was available. In freshwater concrete with bacteria, improved compressive strength, higher electrical resistivity, lower chloride penetration, and better UPV response were observed. In SWSSC, the marine ionic environment provided calcium and magnesium ions that influenced the precipitation process. However, sulfate ions promoted ettringite formation and competed with calcium carbonate precipitation, which partially limited the self-healing efficiency. The compressive strength results confirmed the combined influence of hydration, silica-fume densification, and bacterial precipitation. The control mixture reached 49 MPa at 28 days, while the bacterial control increased to 51.8 MPa. The SWC and SWC(b) mixtures reached 46.2 and 47.6 MPa, respectively, indicating that bacterial action partly compensated for the adverse influence of marine ions. The highest strength was obtained in the SWCS mixture, which reached 71 MPa at 28 days because of the strong filler and pozzolanic effects of SF. Nevertheless, the bacterial silica-fume mixture did not exceed the non-bacterial SWCS mixture at later ages, confirming that calcium availability is essential for effective bio-mineralization.

The durability tests followed the same trend. Water penetration decreased from 29 mm in FWC to 26.8 mm in FWC(b), and from 27.5 mm in SWC to 26.5 mm in SWC(b). The lowest values were recorded in silica-fume mixtures, 22 mm for SWCS and 22.5 mm for SWCS(b), showing that pore refinement by SF was the dominant factor in reducing permeability. Total water absorption varied from 2.8% to 1.8%, with the lowest value in SWCS(b). This result indicates that the simultaneous presence of SF and bacterial precipitation can effectively reduce open porosity, although the contribution of bacteria becomes more localized in a highly dense matrix.

The UPV results showed that bacterial mixtures recovered internal continuity after pre-cracking. At 28 days, the bacterial control exhibited about 13% lower wave travel time than its non-bacterial counterpart, while SWC(b) and SWCS(b) showed approximately 10% improvement compared with their corresponding controls. Electrical resistivity also increased with age in all mixtures because of progressive hydration and pore refinement. The bacterial mixtures showed higher resistivity than their controls, demonstrating that MICP reduced the connectivity of capillary pores and interrupted conductive ion pathways.

The RCPT results further confirmed the positive role of bacteria in limiting chloride penetration. At 28 days, the passed charge decreased from 2983 C in FWC to 2017 C in FWC(b), from 2911 C in SWC to 2667 C in SWC(b), and from 1835 C in SWCS to 1662 C in SWCS(b).

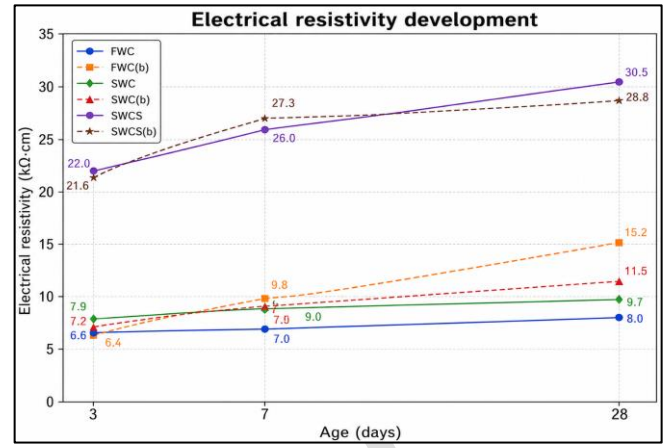


Fig. 3. Electrical resistivity development

These reductions indicate that bacterial calcium carbonate precipitation improved chloride resistance by sealing microcracks and reducing ionic transport paths. EDX, elemental mapping, and XRD analyses supported these observations. Bacterial mixtures showed stronger calcite-related evidence, while silica-fume mixtures contained a denser silicate-rich matrix and lower available portlandite. In SWSSC mixtures, magnesium promoted aragonite formation, and sulfate contributed to ettringite formation. Therefore, the self-healing response was controlled not only by bacterial activity but also by the chemical balance of the pore solution.

4. Conclusion

This study investigated the self-healing performance and microstructural evolution of concrete produced with Persian Gulf SW and DMS incorporating *Bacillus subtilis* bacteria and SF. The use of SF improved the durability of SWSSC by refining the pore structure, reducing permeability, decreasing water absorption, and increasing electrical resistivity. Its pozzolanic reaction produced a denser cementitious matrix and improved the resistance of concrete against water and ion penetration.

The incorporation of *Bacillus subtilis* enhanced the self-healing capacity of concrete through MICP. Calcium carbonate precipitation partially filled microcracks and pores, improving internal continuity and reducing chloride ion transport. The bacterial effect was particularly effective in mixtures with adequate calcium availability. In SWSSC, the complex ionic environment significantly affected the self-healing mechanism. Calcium ions supported calcite precipitation, while magnesium ions promoted the formation of aragonite. Sulfate ions contributed to ettringite formation and consumed part of the available calcium, thereby reducing the efficiency of MICP. The combined use of SF and bacteria can improve the durability of marine concrete, but the interaction between these two mechanisms must be carefully controlled. Although SF enhances matrix densification, it may limit bacterial activity by consuming calcium hydroxide and reducing free calcium ions. Therefore, the optimum performance of self-healing SWSSC requires a proper balance between pozzolanic densification, calcium availability, and pore solution chemistry.

بررسی عملکرد خودترمیمی و تحول ریزساختاری بتن ساخته شده از ماسه لایروبی شده و آب خلیج فارس با استفاده از باکتری باسیلوس سابیتیلیس و میکروسیلیس

سید محمد مهدی اسدزاده^۱، محمدرضا برادران^{۲*}، غلامرضا عاطفت دوست^۱

۱- گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد فیروز آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران

mr.baradaran@iau.ac.ir

چکیده

با وجود پتانسیل استفاده از آب و ماسه لایروبی شده دریا به عنوان جایگزین پایدار در بتن، حضور یون‌های مهاجم نظیر Cl^- ، SO_4^{2-} ، Mg^{2+} و Ca^{2+} می‌تواند موجب افزایش نفوذپذیری، تغییر ریزساختار و کاهش دوام بتن شود. در این پژوهش، عملکرد خودترمیمی و تحول ریزساختاری بتن ساخته شده با آب و ماسه خلیج فارس در حضور باکتری باسیلوس و میکروسیلیس بررسی شد. بدین منظور، شش طرح اختلاط شامل بتن شاهد، بتن ساخته شده با آب و ماسه دریا، و بتن دریایی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس، هرکدام در دو حالت بدون باکتری و حاوی باکتری، ساخته شد. برای ارزیابی عملکرد مکانیکی، دوام و ریزساختار، آزمون‌های مقاومت فشاری، جذب آب، نفوذپذیری تحت فشار آب، UPV، مقاومت الکتریکی، RCPT، XRD، EDX و Mapping انجام گرفت. نتایج نشان داد که میکروسیلیس با تراکم ماتریس و کاهش تخلخل، موجب کاهش جذب آب و نفوذپذیری شد؛ اما با مصرف $Ca(OH)_2$ ، دسترسی Ca^{2+} آزاد برای فرآیند MICP را محدود کرد. در نمونه‌های حاوی باکتری، رسوب‌گذاری میکروبی کربنات کلسیم موجب پرشدگی بخشی از ریزترک‌ها و بهبود شاخص‌های انتقال یون شد. با این حال، کارایی خودترمیمی در محیط دریایی به تعادل یونی محلول منفذی وابسته بود؛ به‌طوری‌که Mg^{2+} مسیر رسوب‌گذاری را به سمت آراگونیت تغییر داد و SO_4^{2-} با تشکیل اترینگایت بخشی از ظرفیت کلسیمی را مصرف کرد. در مجموع، استفاده همزمان از میکروسیلیس و MICP می‌تواند به بهبود دوام بتن دریایی کمک کند، اما عملکرد بهینه آن نیازمند کنترل دسترسی Ca^{2+} و شیمی محلول منفذی است.

واژگان کلیدی: بتن خودترمیم شونده، رسوبگذاری کربنات، میکروسیلیس، دوام، آب و ماسه خلیج فارس

Investigation of the Self-Healing Performance and Microstructural Evolution of Concrete Produced with Dredged Sand and Persian Gulf Water Using *Bacillus subtilis* Bacteria and Silica Fume

Seyed Mohammad Mehdi Asadzadeh¹, Mohammadreza Baradaran², Gholamreza Atefatdoost¹

¹ Department of Civil Engineering, Es.C., Islamic Azad University, Estahban, Iran.

² Department of Civil Engineering, Fir.C., Islamic Azad University, Firoozabad, Iran.

Email: mr.baradaran@iau.ac.ir

Abstract

Despite the potential of using seawater and dredged sea sand as sustainable alternatives in concrete, aggressive ions such as Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , and Ca^{2+} may increase permeability and reduce durability. This study investigates the self-healing performance and microstructural evolution of Persian Gulf seawater sea-sand concrete incorporating *Bacillus subtilis* and silica fume. Six mixtures were prepared, including freshwater control concrete, seawater sea-sand concrete, and seawater sea-sand concrete with 10% SF, each with and without bacteria. Compressive strength, water absorption, water penetration, UPV, electrical resistivity, RCPT, XRD, EDX, and elemental mapping tests were conducted. The results showed that SF improved matrix densification and reduced water absorption and permeability; however, by consuming $\text{Ca}(\text{OH})_2$, it reduced the availability of free Ca^{2+} required for MICP. In bacterial mixtures, calcium carbonate precipitation partially filled microcracks and improved ion-transport resistance. Nevertheless, the self-healing efficiency depended on pore solution chemistry: Mg^{2+} promoted aragonite formation, while SO_4^{2-} reduced part of the available calcium through ettringite formation. Overall, the combined use of SF and MICP can improve the durability of marine concrete, provided that Ca^{2+} availability and ionic balance are properly controlled.

Keywords: Self-healing concrete; Calcium carbonate precipitation; Silica fume; Durability; Persian Gulf seawater and sand

امروزه صنعت ساخت و ساز با فشار فزاینده‌ای مواجه است تا نیازهای روزافزون زیرساختی را تأمین و همزمان الزامات حفاظت از محیط زیست را نیز رعایت کند. در این زمینه، دو مسئله کلیدی عبارت‌اند از مصرف بیش از حد آب شیرین و استفاده گسترده از ماسه معدنی یا رودخانه‌ای که در تولید بتن‌های سنتی کاربرد دارند [۱]، [۲]. برآوردها نشان می‌دهند که سالانه تقریباً ۲ میلیارد تن آب شیرین صرف تولید بتن می‌شود و برداشت غیرمستمر و بیش از حد ماسه رودخانه‌ای پیامدهایی نظیر فرسایش خاک، تخریب زیستگاه‌های طبیعی و اختلال در اکوسیستم‌های آبی به دنبال دارد [۳] و [۴]. به منظور کاهش این اثرات، مناطق ساحلی، جزایر و اسکله‌ها می‌توانند از منابع موجود محلی نظیر آب دریا و ماسه لایروبی شده دریا بهره‌برداری کنند. این اقدام در صنعت بتن که منجر به تولید بتن ساخته شده از آب و ماسه لایروبی شده دریا (SWC¹) می‌شود، نه تنها می‌تواند اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهد، بلکه هزینه‌های حمل و نقل را نیز به طور چشمگیری محدود می‌کند، هرچند نگرانی‌های مربوط به دوام این نوع بتن همچنان پابرجا است [۵-۷]. یون‌های خورنده نظیر کلرید و سولفات موجود در این مواد ممکن است با ترکیبات سیمانی واکنش داده و ایجاد ترکیبات منبسط‌شونده‌ای مانند اترینگایت^۲ و گچ نمایند، که تنش‌های داخلی ایجاد کرده و در گذر زمان به ترک‌خوردگی و تخریب ساختاری بتن منجر می‌شوند [۸] و [۹]. تشکیل و گسترش ترک‌ها از عوامل اصلی تخریب بتن محسوب می‌شوند، زیرا علاوه بر کاهش یکپارچگی سازه، مسیر نفوذ عوامل مخرب محیطی را به داخل بتن فراهم می‌آورند که به تدریج موجب خوردگی میلگردها و فرسایش سازه می‌گردد. از آنجا که نگهداری و تعمیر مستمر سازه‌های بتنی اغلب هزینه‌بر، نیازمند نیروی انسانی متبحر و حتی در برخی شرایط غیرقابل انجام است، ادغام قابلیت‌های خودترمیمی در بتن به عنوان رویکردی نویدبخش برای کاهش نیاز به تعمیرات، افزایش طول عمر سرویس و کاهش اثرات زیست‌محیطی مطرح شده است.

اگرچه در راستای کاهش میکروترک‌ها و بهبود پارامترهای دوام بتن، پژوهش‌های متعددی بر استفاده از افزودنی‌های پوزولانی تمرکز داشته‌اند اما یکی از روش‌های نوین و بسیار قابل بحث، استفاده از باکتری‌ها برای رسوب‌گذاری کربنات کلسیم (MICP³) در ترک‌های ایجاد شده در بتن است. بتن خودترمیم‌شونده عموماً به گونه‌ای طراحی می‌شود که توانایی ترمیم خودکار ترک‌ها را داشته باشد، که این مکانیسم اغلب از طریق فعال‌سازی باکتری‌ها در هنگام شکل‌گیری ترک ناشی از تنش‌های محیطی یا مکانیکی است [۱۰-۱۲]. باسیلوس ساب‌تیلیس^۴ یک باکتری اسپورزاست که قادر است حتی در محیط بسیار قلیایی بتن زنده بماند، برای دوره‌های طولانی غیر فعال بماند و پس از فعال شدن، با تولید کربنات کلسیم ترک‌ها را ترمیم کند. هنگام نفوذ رطوبت به ترک‌های کوچک، اسپورها فعال شده و آنزیم یوراز^۵ را آزاد می‌کنند که اوره را به آمونیاک و دی‌اکسید کربن تجزیه می‌کند [۱۳]. یون‌های کربنات حاصل با Ca^{2+} موجود در آب دریا و ماسه دریا ترکیب شده و کربنات کلسیم (عمدتاً کلسیت) را تشکیل می‌دهند که ترک‌ها را پر و مهر و موم می‌کند [۱۳ و ۱۴]. علاوه بر این، غلظت بالای Mg^{2+} و Ca^{2+} در آب و ماسه دریا می‌تواند منجر به تشکیل سایر مواد معدنی نظیر آراگونیت^۶ و نسکهونیت^۷ شود، که این خود ممکن است بر کارایی فرایند ترمیم تأثیرگذار باشد [۱۵] و [۱۶].

مطالعات نشان داده‌اند که باکتری باسیلوس قادر است ترک‌هایی با عرض حداکثر ۰/۲۵ میلی‌متر را در مدت زمان کوتاه ۲۴ ساعت در محیط مرطوب ترمیم کند، که سرعت آن به‌طور قابل توجهی از روش‌های سنتی تعمیر بتن بیشتر است [۱۲]، [۱۷]. یکی از روش‌های مستقیم شامل افزودن باکتریایی به آب اختلاط است که در این فرایند، باکتری‌ها لاکتات کلسیم را به کربنات کلسیم ($CaCO_3$) تبدیل می‌کنند (رابطه ۱):



این روند سریع خودترمیمی نه تنها ناشی از فعالیت آنزیم یوراز باکتریایی است، بلکه حضور یون‌های بالای آب دریا نیز جهت‌گیری هسته‌زایی^۸ فازهای معدنی را تسریع می‌کند [۱۸]، [۱۹]. علاوه بر این، عناصر کلیدی موجود در آب و ماسه دریا مانند Mg^{2+} می‌توانند مسیرهای

¹ Seawater sea-sand concrete

² Ettringite

³ Microbial Induced Calcite precipitation

⁴ Bacillus Subtilis

⁵ Urease

⁶ Aragonite

⁷ Nesquehonite

⁸ Nucleation

متنوع‌تری از بیومینرالیزاسیون^۹ (فرآیند زیستی باکتری‌ها که منجر به تولید مواد معدنی مانند کلسیت می‌شوند) را تقویت کنند [۱۹]. همان‌طور که در تحقیقی نشان داده شده، غلظت بالای منیزیم می‌تواند تشکیل فازهای معدنی جایگزین مانند نسکهونیت و آراگونیت را در کنار کلسیت تسریع کند [۲۰، ۲۱]. این نوع پلی‌مورف‌ها به دلیل شکل بلوری کشیده و قفل‌پذیری مکانیکی بهتر، به بهبود پرشدن ترک‌ها کمک کرده و همچنین فرایند جذب CO₂ را (در صورت وجود) را تسهیل می‌کنند. اگرچه MICP هسته اصلی مکانیزم خودترمیمی را تشکیل می‌دهد، اثرات آن بر ریزساختار و خواص مکانیکی بتن همچنان قابل بحث است. تحلیل‌های ریزساختاری بتن ترمیم‌شده با باکتری باسیلوس به‌طور مداوم کاهش تخلخل مویرگی و محدود شدن نفوذ کلرید را نشان داده‌اند [۲۲] و [۲۳]. به طور کلی پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که ایجاد یک محیط باکتریایی در بتن معمولی می‌تواند مقاومت فشاری را ۳۵-۱۳ درصد، مقاومت خمشی را تا ۳۶ درصد افزایش دهد و همچنین به طور قابل توجهی جذب آب و نفوذپذیری مواد سیمانی را کاهش دهد [۱۰] و [۲۴]. با این حال، فعالیت میکروبی به تنهایی برای تضمین دوام بلندمدت کافی نیست و تعامل با مواد مکمل سیمانی مکمل (SCMs^{۱۰}) برای بهبود مقاومت مکانیکی، کاهش نفوذپذیری و دستیابی به پارامترهای پایداری مورد نیاز، ضروری است [۲۵]. در این راستا، میکروسیلیس (SF) به طور گسترده‌ای برای افزایش ثبات مکانیکی و شیمیایی SWC در محیط‌های دریایی به کار گرفته شده است [۵، ۶، ۲۶].

با وجود اینکه باکتری باسیلوس به‌عنوان یک عامل خودترمیمی مؤثر شناخته شده است، درک تعامل همزمان فعالیت میکروبی با مواد پوزولانی، به‌ویژه میکروسیلیس، در بتن ساخته‌شده با آب و ماسه دریا هنوز محدود است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی عملکرد خودترمیمی و تحول ریزساختاری بتن ساخته‌شده با آب و ماسه خلیج فارس در حضور همزمان باکتری باسیلوس و میکروسیلیس است. در این مطالعه تلاش شده است مشخص شود که فرآیند MICP در محیط یونی پیچیده حاوی یون‌های کلرید، سولفات، منیزیم و کلسیم چگونه عمل می‌کند و حضور میکروسیلیس چه تأثیری بر دسترسی یون کلسیم، تشکیل رسوبات کربناتی، کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام بتن دارد. اهمیت این موضوع از آن جهت است که استفاده از آب دریا و ماسه الیروبی‌شده می‌تواند به کاهش مصرف آب شیرین و مصالح طبیعی کمک کند، اما حضور یون‌های مهاجم در این منابع، دوام بتن را با چالش مواجه می‌سازد. بنابراین، این پژوهش با بررسی همزمان خواص مکانیکی، رفتار انتقال یون‌ها، پارامترهای دوام و شواهد ریزساختاری، به دنبال ارائه پایه‌ای علمی برای طراحی مخلوط‌های SWC پایدار، مقاوم و دارای قابلیت خودترمیمی در شرایط محیط دریایی است. انتخاب همزمان باکتری باسیلوس و میکروسیلیس با هدف بررسی تعادل میان دو مکانیسم مکمل انجام شد: رسوب‌گذاری زیستی کربنات کلسیم برای ترمیم ریزترک‌ها و تراکم پوزولانی ماتریس برای کاهش نفوذپذیری. از سوی دیگر، مصرف پرتلندیت توسط میکروسیلیس می‌تواند دسترسی یون Ca^{2+} مورد نیاز برای MICP را محدود کند. بنابراین، این پژوهش نقش متقابل میکروسیلیس و باسیلوس را در کارایی خودترمیمی بتن دریایی ارزیابی می‌کند.

۲. مواد مصرفی و برنامه آزمایشگاهی

۲-۱. مواد مصرفی

روش کشت و استفاده گام به گام باکتری‌ها در این مطالعه مشابه آنچه توسط صادقپور و همکاران [۱۰] گزارش شده، اجرا گردید. برای کشت اولیه، باکتری در آزمایشگاه با استفاده از عصاره برگ یونجه بازتولید شد و در شرایط هوازی و دمای ۳۰ °C نگهداری و در غلظت مورد نظر این تحقیق تولید شد [۲۷، ۲۸]. پس از پایان فاز رشد اولیه، ۱۰۰ میلی‌لیتر از تعلیق باکتریایی بالغ به ۱/۵ لیتر محیط کشت تازه منتقل شد و تحت همان شرایط رشد قرار گرفت تا رشد کامل و کدورت مناسب حاصل شود. تراکم جمعیت باکتریایی با استفاده از اندازه‌گیری دانسیته نوری در ۶۰۰ نانومتر (OD₆₀₀) پایش شد. در این مطالعه، باکتری باسیلوس با غلظت ثابت $2/8 \times 10^8$ سلول/میلی‌لیتر در تمامی طرح‌های اختلاط به کار گرفته شد [۱۰]، که معادل دانسیته نوری $0/3 - 0/4$ OD₆₀₀ است. این دوز خاص بر اساس کارایی اثبات‌شده در بهبود عملکرد خودترمیمی بتن و همچنین حفظ زنده‌ماندن باکتری در ماتریس با توجه به پژوهش صادقپور و همکاران انتخاب گردید [۱۰]. شکل ۱ آماده سازی و افزودن باکتری باسیلوس به بتن را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر از سیمان پرتلند تیپ ۲، مطابق با استاندارد [۲۹] ASTM C150 استفاده شد. به عنوان جایگزین جزئی سیمان، SF مطابق با الزامات و حدود درصد شیمیایی ارائه شده در استاندارد [۳۰] ASTM C1240 به نمونه‌ها افزوده شد. آب خلیج‌فارس مورد استفاده حاوی منیزیم: ۱۶۰۰، کلسیم: ۴۸۰، سدیم: ۱۲۶۰۰، پتاسیم: ۴۸۰، سولفات ۳۳۰، و کلرید: ۲۳۴۰۰ (ppm)، از بندر شهید رجایی واقع در شهر بندرعباس، جنوب ایران تهیه شد [۳۱]. آب شرب

⁹ Biom Mineralization

¹⁰ Supplementary cementitious materials

نیز برای طرح‌های شاهد از منابع شهری شیراز جمع‌آوری گردید. ماسه دریا نیز از بندر رجایی تأمین و سپس از الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) عبور داده شد تا یکنواختی اندازه ذرات ریز تضمین گردد. ترکیبات شیمیایی سیمان و SF و مصالح سنگی در جدول ۱ خلاصه شده است، خواص مکانیکی سیمان در جدول ۲، و همچنین منحنی رطوبت بهینه ماسه لایروبی شده خلیج فارس نیز در شکل شماره ۲ ارائه شده است. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. مقادیر فلزات سنگین موجود در ماسه لایروبی شده خلیج فارس بر حسب (ppm) نیز در جدول ۳ نشان داده شده است. برای بهبود کارایی مخلوط‌های بتنی، از فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلاتی نوع F مطابق ASTM C494 [32] استفاده شد. این فوق روان‌کننده (RB-NP, PC-5000) دارای چگالی 1.1 g/cm^3 بود.



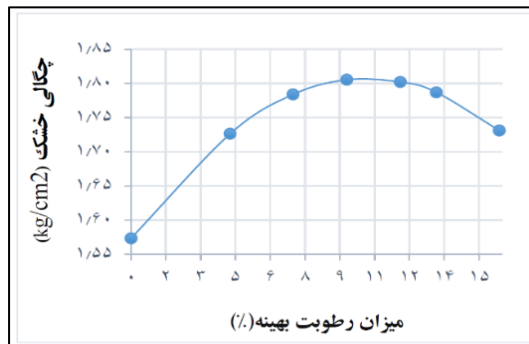
شکل ۱. مراحل آماده‌سازی و افزودن باکتری باسیلوس در حالت پودری؛ حل‌سازی دقیق آن در حجم مشخصی از آب اختلاط؛ و افزودن سوسپانسیون باکتریایی حاصل به مخلوط بتن.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی و سنگدانه‌ها

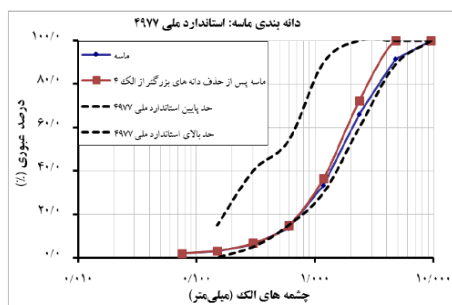
اکسید (%)	ماسه دریا	ماسه معدن	شن معدن	سیمان	میکروسیلیس (SF)
SiO ₂	۱۳/۵	۳/۸	۱۲/۰۵	۲۱	۹۲
Al ₂ O ₃	۲/۵۵	۱/۲	۲/۰۵	۵	۰/۹
CaO	۳۹/۸	۴۵/۱	۳۹/۰۵	۶۴	۱
MgO	۲/۹۵	۱۰/۲	۵/۳۱	۲	۱/۲۵
Na ₂ O	۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۳۷	۰/۴	۰/۴
K ₂ O	۰/۵۳	۰/۱۶	۰/۳	۰/۶	۰/۳
SO ₃	۰/۶۱	۲/۳۵	۰/۲۷	۲	-
Fe ₂ O ₃	۲/۶۲	۰/۹۲	۱/۹	۰/۷۵	۰/۸
Cl	۰/۸	۰/۰۷	۰/۰۳	-	-

جدول ۲. خواص مکانیکی سیمان پرتلند

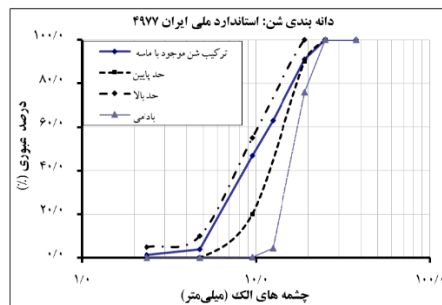
ویژگی	آزمون / شرایط	حداکثر	حداقل
نفوذپذیری (cm^2/g)	آزمون بلین	۳۱۰۰	۲۹۰۰
انبساط (%)	آزمون اوتوکلاف	۰/۲۳	۰/۰۹
زمان جوش (دقیقه)	اولیه	۱۳۵	۱۱۵
زمان جوش (دقیقه)	نهایی	۱۸۵	۱۵۵
مقاومت فشاری (MPa)	پس از ۷ روز	۳۴	۳۰
مقاومت فشاری (MPa)	پس از ۲۸ روز	۴۲	۳۸



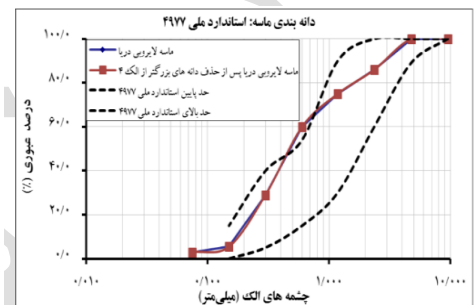
شکل ۲. منحنی رطوبت بهینه ماسه خلیج فارس



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی؛ (الف): ماسه معدنی، (ب): شن معدنی، (ج): ماسه خلیج فارس

جدول ۳. مقادیر فلزات سنگین موجود در ماسه لایروبی شده خلیج فارس (ppm)

Ag	As	Ca	Cd	Ce	La	Li	Mn	Y
<۰/۱	۱۰	<۳	<۰/۵	۹	۵	۴	۵۷۱	۵
Mo	Ni	Co	Cr	Cu	Fe	P	Pb	V
۲	۲۱	۶	۲۶	۱۰	>۳	۴۶۹	۷	۲۴
S	Sb	Yb	Zn	Sc	Sn	Th		
۱۴۲۸	۴	۱	۱۷	۲	<۱	۲		

۲-۲. آماده‌سازی نمونه‌ها و عمل‌آوری

در این مطالعه، آب خلیج فارس به عنوان آب اختلاط برای تمام مخلوط‌ها استفاده شد به جز نمونه شاهد (که یک سری با باکتری و یک سری بدون باکتری – FWC, FWC(b) که با آب شرب ساخته شدند. در این تحقیق، طرح اختلاط‌ها علاوه بر بتن شاهد ساخته شده از آب و ماسه معدنی، یک طرح اختلاط نیز با ۲۵ درصد ماسه دریا به عنوان ریزدانه و آب دریا نیز ساخته شد، که این طرح یک بار هم با ۱۰ درصد جایگزینی پودر SF با سیمان ساخته شد. همچنین، هر گروه شامل یک سری نمونه حاوی باکتری باسیلوس بود که با پسوند “(b)” مشخص شدند. شایان ذکر است که هیچ گونه مواد مکمل سیمانی یا عامل باکتریایی در مخلوط‌های شاهد و شاهد ساخته شده از آب و ماسه دریا استفاده نشد. باکتری باسیلوس نیز ابتدا به شکل پودر در آب اختلاط حاوی فوق روان کننده حل شد و سپس به اجزای خشک بتن در میکسر اضافه گردید. جزئیات دقیق نسبت‌های اختلاط در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که درصد‌های ارائه شده برای ماسه شسته، ماسه دریا، شن بادی و شن نخودی در جدول طرح اختلاط، بر اساس سهم جرمی هر جزء از کل سنگدانه‌های مصرفی در مخلوط بیان شده‌اند. بنابراین، این مقادیر نشان‌دهنده نسبت جرمی اجزای سنگدانه نسبت به مجموع سنگدانه‌های ریز و درشت بوده و بر مبنای حجم کل مصالح یا صرفاً بخش ریزدانه محاسبه نشده‌اند.

جدول ۴. نسبت‌های اختلاط و اسلامپ بتن تازه نمونه‌ها

اسلامپ	فوق روانکننده	باکتری	SF	سیمان	ماسه دریا	ماسه شسته	بادامی	نخودی	آب دریا	آب شرب	w/cm	طرح اختلاط
(mm)	(kg/m ³)	Cell/ml	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)		
۱۸۰	۲/۵	-	-	۴۰۰	-	۶۰	۲۰	۲۰	-	۱۵۲	۰/۳۸	FWC
۱۶۰	۲/۵	۲/۸×۱۰ ^۸	-	۴۰۰	-	۶۰	۲۰	۲۰	-	۱۵۲	۰/۳۸	FWC(b)
۱۸۰	۲/۵	-	-	۴۰۰	۱۵	۴۱/۲۵	۲۰	۲۰	۱۵۲	-	۰/۳۸	SWC
۱۷۰	۲/۵	۲/۸×۱۰ ^۸	-	۴۰۰	۱۵	۴۱/۲۵	۲۰	۲۰	۱۵۲	-	۰/۳۸	SWC(b)
۱۷۰	۲/۵	-	۴۰	۳۶۰	۱۵	۴۱/۲۵	۲۰	۲۰	۱۵۲	۰/۳۸	SWCS	
۱۸۰	۲/۵	۲/۸×۱۰ ^۸	۴۰	۳۶۰	۱۵	۴۱/۲۵	۲۰	۲۰	۱۵۲	۰/۳۸	SWCS(b)	

۲-۳. فرآیند اختلاط، قالب‌گیری و ایجاد ترک مکانیکی

در مرحله اختلاط، مواد خشک (به ترتیب بیشترین تا کمترین قطر ذرات) طبق نسبت‌های ارائه‌شده در جدول ۲ به مدت ۳ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. سپس آب اختلاط، شامل تعلیق باکتریایی (در صورت استفاده)، اضافه و به مدت ۵ دقیقه دیگر هم زده شد. دمای بتن تازه با رعایت استاندارد [۳۳] ASTM C1064 کنترل و در محدوده ۲۸-۲۶°C اندازه‌گیری شد. کارایی مخلوط‌ها نیز با استفاده از آزمایش اسلامپ (مطابق با استاندارد ASTM C143) [۳۴] ارزیابی شد که مقادیر آن بین ۱۸۰-۱۶۰ میلی‌متر ثبت گردید (جدول ۳). مخلوط‌های تازه سپس در قالب‌های ۱۵۰ × ۱۵۰ × ۱۵۰ میلی‌متر ریخته شدند و عمل‌آوری آن‌ها از طریق غوطه‌وری در آب شیرین با دمای ۲۰°C ± ۲۳ و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد تا ۲۸ روز انجام شد. در طول فرآیند عمل‌آوری، لاکتات کلسیم (C₆H₁₀CaO₆.0.5H₂O) به میزان مشخصی به حوضچه عمل‌آوری حاوی نمونه‌های باکتری‌دار اضافه شد تا به عنوان منبع غذایی باکتری‌ها عمل کرده و متابولیسم میکروبی را فعال کند [۱۰]. لازم به ذکر است که افزودن لاکتات کلسیم بیانگر یک استراتژی آزمایشگاهی برای تسریع مکانیسم خودترمیمی است و هدف آن تحریک فعالیت MICP اولیه است، نه شبیه‌سازی طولانی مدت شرایط میدانی.

برای ارزیابی تاثیر خودترمیمی باکتری باسیلوس، کلیه نمونه‌های با و بدون باکتری در شرایط کنترل‌شده ترک‌دار شدند. این کار با اعمال حدود ۳۰ درصد از بار نهایی نمونه‌ها در روز سوم توسط جک مقاومت فشاری مطابق با شیوه تحقیقات گذشته [۱۰] انجام گرفت و از یک پروتکل پیش‌ترک استاندارد پیروی شد تا امکان مقایسه معتبر و یکنواخت عملکرد ترمیمی فراهم گردد.

۲-۴. تست‌های آزمایشگاهی

۲-۴-۱. مقاومت فشاری

آزمایش‌های مقاومت فشاری مطابق با استاندارد BS 1881 [۳۵] بر روی نمونه‌ها در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز انجام شد. برای هر مخلوط، سه نمونه انتخاب شد و ابعاد آن‌ها با دقت ثبت گردید تا محاسبه دقیق مساحت مقطع عرضی ممکن شود. در حین آزمایش، نرخ بارگذاری در ۰/۲۵ MPa/s ثابت نگه داشته شد.

۲-۴-۲. نفوذپذیری تحت فشار آب

آزمون نفوذپذیری بتن تحت فشار آب به‌منظور ارزیابی میزان عبور آب از ماتریس سیمانی و بررسی پیوستگی شبکه تخلخل و ریزترک‌ها انجام شد. این آزمون مطابق با الزامات استاندارد EN 12390-8 [۳۶] بر روی نمونه‌های مکعبی عمل‌آوری‌شده در سن ۲۸ روز صورت گرفت. در این روش، فشار هیدرواستاتیکی ثابت به سطح تحتانی نمونه اعمال شده و حداکثر عمق نفوذ آب پس از زمان مشخص اندازه‌گیری شد. هدف از انجام این آزمون، بررسی اثر فعالیت خودترمیمی باکتری‌ها به‌همراه مواد سیمانی مکمل بر کاهش نفوذپذیری، انسداد ریزحفره‌ها و بهبود یکپارچگی ریزساختار بتن دریایی در شرایط بارگذاری هیدرولیکی بود. آزمون‌ها پس از انجام آزمایش، از مرکز آن به دو نیم تقسیم شدند تا حداکثر میزان عمق نفوذ آب در بتن اندازه‌گیری گردد.

۲-۴-۳. جذب آب کل

آزمون جذب آب کل به منظور ارزیابی میزان تخلخل باز و قابلیت نفوذپذیری ماتریس سیمانی انجام شد، چراکه این پارامتر به طور مستقیم با پیوستگی شبکه منافذ، کیفیت ریزساختار و دوام بتن در محیط‌های خورنده مرتبط است. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C642 بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده در سنین مشخص انجام گرفت. در این روش، نمونه‌ها ابتدا تا رسیدن به جرم ثابت خشک شده، سپس در آب غوطه‌ور گردیدند و میزان افزایش جرم آن‌ها به عنوان شاخص جذب آب محاسبه شد. هدف از انجام این آزمون، بررسی اثر فعالیت خودترمیمی باکتری‌ها و نقش مواد سیمانی مکمل در کاهش حجم منافذ موئینه، انسداد ریزترک‌ها و بهبود یکپارچگی ریزساختار بتن دریایی بود. کاهش جذب آب کل به عنوان نشانه‌ای از متراکم‌سازی ماتریس و محدود شدن مسیرهای نفوذ سیالات، می‌تواند بیانگر عملکرد مؤثر مکانیسم‌های زیستی در بهبود دوام بتن باشد.

۲-۴-۴. سرعت موج اولتراسونیک (UPV)

این تست، یک روش غیرمخرب برای ارزیابی یکپارچگی بتن است که با اندازه‌گیری زمان عبور امواج صوتی با فرکانس بالا از نمونه‌ها انجام می‌شود. مطابق با استاندارد ASTM C597 [۳۸] زمان عبور موج اولتراسونیک در سنین ۱، ۳ و ۲۸ روز ثبت شد. هر اندازه‌گیری سه بار تکرار شد و کوتاه‌ترین زمان عبور برای محاسبه سرعت موج مورد استفاده قرار گرفت [۳۱، ۱۰]. اندازه‌گیری‌ها، بر روی نمونه‌های ترک‌دار و غیرترک‌دار امکان پایش تغییرات سرعت موج را فراهم می‌کند؛ که این شاخصی برای کاهش حجم ترک، ترمیم حفره‌ها و یکنواختی ماتریس در طول دوره خودترمیمی است [۳۱]. همچنین، این روش یک شاخص غیرمخرب و قابل اعتماد برای ارزیابی کارایی ترمیم توسط باسیلوس در مخلوط‌های حاوی این باکتری فراهم می‌آورد.

۲-۴-۵. بررسی تحرکات یونی

۲-۴-۵-۱. مقاومت الکتریکی^{۱۱}

مقاومت الکتریکی در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز با استفاده از روش چهار نقطه‌ای ونر و فاصله پراب ۴۰ میلی‌متر مطابق با دستورالعمل‌های ACI222 [۳۹] اندازه‌گیری شد. دستگاه جریان را بین پراب‌های داخلی اعمال و ولتاژ را ثبت کرد تا مقاومت الکتریکی محاسبه شود، که به واحد (kΩ.cm) گزارش شد. بر اساس ACI 222، ریسک خوردگی آرماتور به صورت: بسیار کم: < ۲۰، کم تا متوسط: ۲۰-۱۰، بالا: ۱۰-۵ و بسیار بالا: > ۵ (kΩ.cm) طبقه‌بندی می‌شود.

هدف از این آزمایش ارزیابی توانایی انتشار یون‌های رسانا، به ویژه یون کلرید، از طریق ماتریس سیمانی ساخته شده با آب و ماسه دریا بود. مقاومت الکتریکی نشان‌دهنده ریزساختار ماده و توانایی آن در مقاومت در برابر مهاجرت یون‌ها است.

۲-۴-۵-۲. آزمون نفوذ کلرید تسریع شده (RCPT^{۱۲})

RCPT میزان جریان الکتریکی را که عمدتاً تحت تأثیر یون‌های رسانا مانند کلرید (Cl^-) و هیدروکسید (OH^-) است، اندازه‌گیری می‌کند. مطابق با الزامات ارائه شده در ASTM C1202 [۴۰]، این آزمایش برای ارزیابی مقاومت نمونه‌ها در برابر نفوذ کلرید پس از ۳ و ۲۸ روز عمل‌آوری انجام شد، با هدف تعیین تأثیر فعالیت باکتری، همراه با SF، بر تحرک یونی در ماتریس سیمانی و نقش آن در ترمیم ریزحفره‌ها و ترک‌ها. برای این منظور، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر کرگیری و آماده شدند و سپس مقدار کل شارژ عبوری از نمونه‌ها طی ۶ ساعت اندازه‌گیری شد تا انتقال یون‌ها و قابلیت نفوذ کلرید ارزیابی گردد.

۲-۴-۶. آنالیز میکروساختاری و شیمیایی

در این تحقیق مجموعه‌ای از تست‌های تحلیلی برای ارزیابی ترکیب شیمیایی و میکروساختار نمونه‌های بتنی به کار گرفته شد. تکنیک EDX-Mapping برای بررسی فراوانی بصری و کمی عناصر پیش‌نیاز برای تشکیل ترکیبات شیمیایی ناشی از حضور مواد سیمانی و باکتری و همچنین محیط یونی پیچیده در ماتریس سیمانی استفاده شد. آزمایش XRD بر روی لایه‌های خارجی نمونه‌ها با تابش $Cu K\alpha$ ($\lambda = 1.540 \text{ \AA}$) در سن ۲۸ روزگی انجام شد تا ترکیب شیمیایی نمونه‌ها تحت تأثیر متغیرهای مختلف پوزولانی و باکتریایی شناسایی گردد.

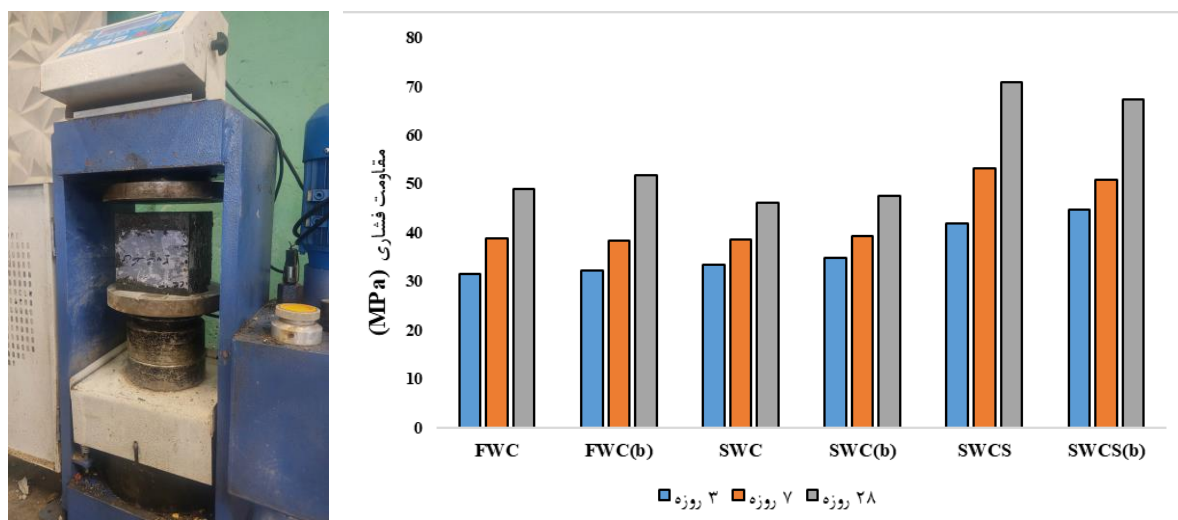
¹¹ Electrical resistivity

¹² Rapid chloride penetration test

۳. ارائه نتایج آزمایشگاهی

۳-۱. مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۴ نشان داده شده است.

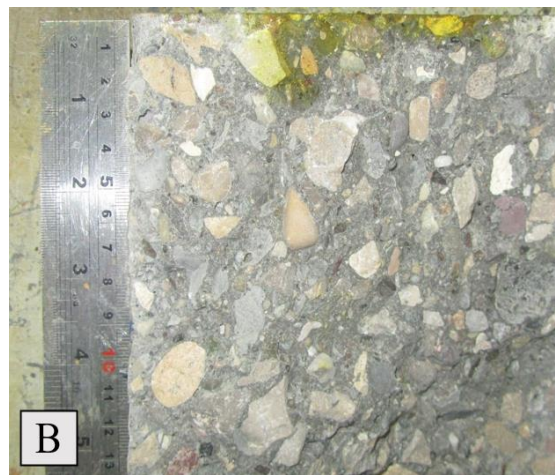
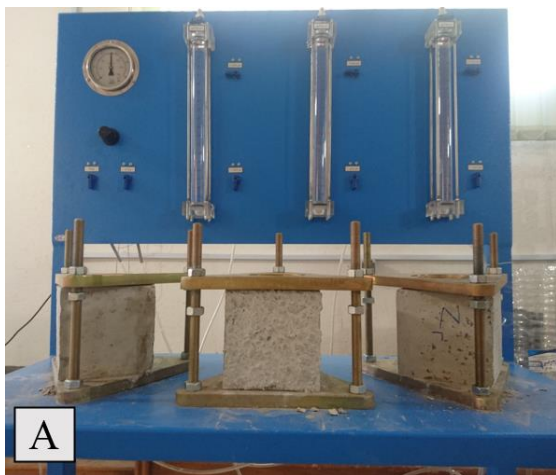


شکل ۴. نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین ۳، ۷، ۲۸ روزگی.

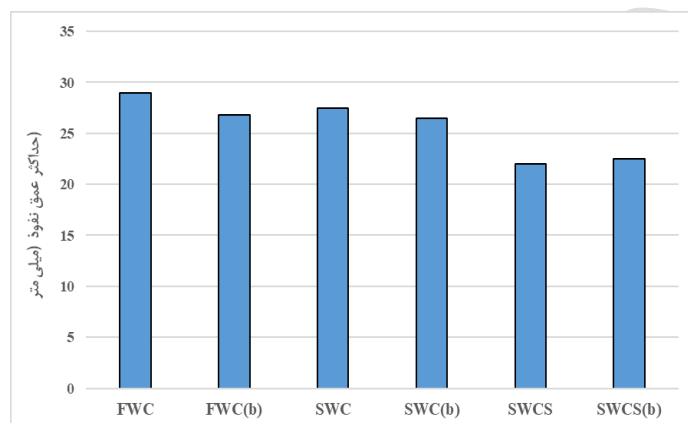
نمونه شاهد (FWC) در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب مقاومت فشاری ۳۱/۵، ۳۹ و ۴۹ مگاپاسکال را نشان داد. نمونه شاهد حاوی باکتری این طرح (FWC(b))، در سنین اولیه افزایش جزئی داشت (۳۲/۳ مگاپاسکال، معادل ۲/۵ درصد)، در روز هفتم کاهش اندکی تجربه کرد (۳۸/۴ مگاپاسکال، ۱/۵ درصد)، و در نهایت در روز ۲۸ بهبود قابل توجهی یافت و به ۵۱/۸ مگاپاسکال رسید. نمون SWC عملکرد نسبتاً پایداری داشت و مقاومت‌های فشاری ۳۳/۴، ۳۸/۷ و ۴۶/۲ مگاپاسکال در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز از خود نشان داد. نمونه مشابه حاوی باکتری، SWC(b)، افزایش پایدار در تمام سنین نشان داد: ۳۴/۸ مگاپاسکال در روز ۳ (رشد ۴/۲ درصد)، ۳۹/۳ مگاپاسکال در روز هفتم (۱/۶ درصد رشد) و ۴۷/۶ مگاپاسکال در ۲۸ روزگی (۳ درصد رشد). تفاوت مقاومت روز سوم بین FWC(b) و SWC(b) معادل ۷/۷ درصد بود که نشان‌دهنده تأثیر اولیه یونهای کلرید بر تراکم میکروساختار و گیرش سریعتر این نوع بتن است. نمونه حاوی SF بالاترین مقاومت فشاری را در تمام سنین نشان داد؛ ۴۲ مگاپاسکال در روز سوم، ۵۳/۲ مگاپاسکال در روز هفتم و ۷۱ مگاپاسکال در سن ۲۸ روزگی. افزودن باکتری نیز به این نمونه (SWCS(b)) اگرچه باعث افزایش اندک مقاومت اولیه شد (۴۴/۷ مگاپاسکال) اما در سنین بالاتر کاهش نسبی در مقایسه با نمونه مشابه حاوی باکتری مشاهده شد.

۳-۲. نفوذپذیری تحت فشار آب

مراحل انجام این آزمایش در شکل ۵، و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری بتن تحت فشار آب برای شش طرح اختلاط مختلف در شکل ارائه شده قابل مشاهده است. بر اساس داده‌ها، مقدار عمق نفوذ آب (بر حسب میلی‌متر) برای طرح شاهد با آب و ماسه معمولی (FWC) برابر با ۲۹ میلی‌متر به دست آمد. با افزودن باکتری باسیلوس به این طرح (FWC(b))، مقدار نفوذپذیری به ۲۶٫۸ میلی‌متر کاهش یافت که نشان‌دهنده بهبود نسبی در مقاومت در برابر نفوذ آب است. در طرح‌های حاوی آب و ماسه دریا، مقدار نفوذ برای نمونه SWC برابر با ۲۷/۵ میلی‌متر و برای نمونه دارای باکتری (SWC(b)) برابر با ۲۶/۵ میلی‌متر ثبت شد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آب و ماسه دریا به تنهایی تأثیر منفی قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد ندارد، اما حضور باکتری باسیلوس باعث کاهش نسبی نفوذپذیری می‌شود. کمترین مقدار نفوذ آب مربوط به طرح‌های حاوی SF است؛ به‌طوری‌که در نمونه SWCS مقدار نفوذ به ۲۲ میلی‌متر کاهش یافته و در نمونه SWCS(b) به ۲۲/۵ میلی‌متر رسیده است. این کاهش چشمگیر بیانگر نقش مؤثر SF در بهبود ساختار ریزدانه‌ای بتن و کاهش تخلخل می‌باشد.



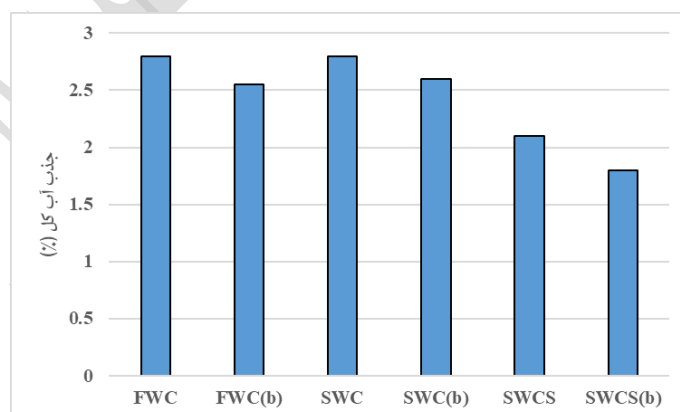
شکل ۵. آزمایش تعیین عمق نمونه های بتنی در سن ۲۸ روزگی تحت نفوذ فشار آب؛ (A): قرارگیری نمونه ها در دستگاه (B): تعیین ماکزیمم عمق نفوذ تحت فشار آب با استفاده از خطکش



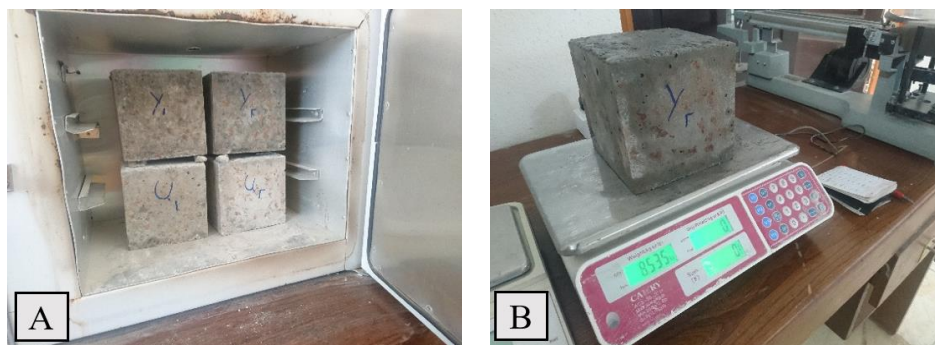
شکل ۶. نتایج آزمایش نفوذپذیری تحت فشار آب در سن ۲۸ روزگی

۳-۳. جذب آب کل

نتایج آزمایش جذب آب کل بتن در سن ۲۸ روزه در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل شماره ۸ نیز مراحل تعیین درصد جذب آب کل بتن را نشان می دهد.



شکل ۷. نتایج آزمایش جذب آب کل



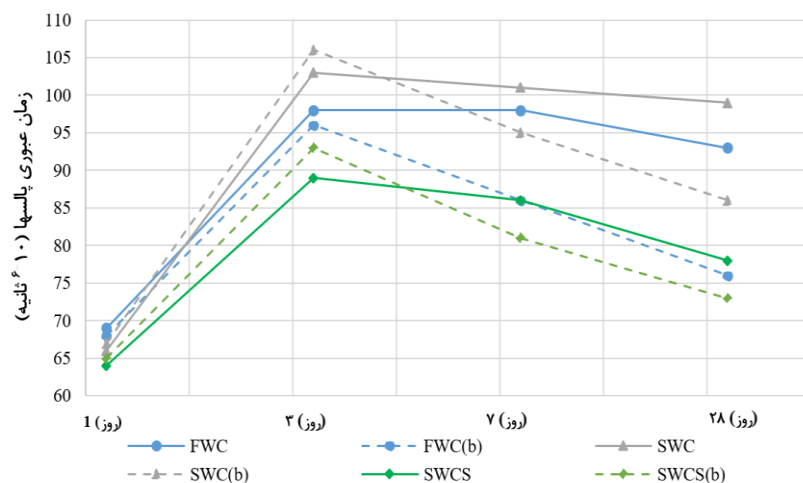
شکل ۸. برخی مراحل آزمایش تعیین درصد جذب آب کل؛ (A): قرار دادن نمونه‌ها برای تعیین وزن خشک، (B): تعیین وزن نمونه‌ی بتنی در حالت خشک.

نتایج نشان داد که مقدار جذب آب در طرح‌های مختلف بین $1/8$ تا $2/8$ درصد متغیر است. بیشترین مقدار جذب آب مربوط به دو طرح FWC و SWC برابر با $2/8$ درصد بود که بیانگر جذب آب بیشتر در نمونه‌های فاقد باکتری و مواد پوزولانی (SF) است. با افزودن باکتری باسیلوس، مقدار جذب آب در طرح FWC(b) به $2/55$ درصد و در طرح SWC(b) به $2/6$ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده تأثیر مثبت باکتری باسیلوس در کاهش میزان جذب آب بتن است. کمترین مقادیر جذب آب در طرح‌های حاوی SF مشاهده شد؛ به‌طوری‌که مقدار جذب آب در طرح SWCS برابر با $2/1$ درصد و در طرح SWCS(b) برابر با $1/8$ درصد به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از SF، به‌ویژه در حضور باکتری باسیلوس، بیشترین تأثیر را در کاهش جذب آب داشته است. به‌طور کلی، ترتیب عملکرد طرح‌ها از نظر کاهش جذب آب به صورت $SWCS(b) < SWCS < FWC(b) < SWC(b) < FWC = SWC$ به دست آمد.

۳-۴. سرعت انتشار موج اولتراسونیک (UPV^{13})

در این پژوهش، نتایج آزمون اولتراسونیک بر اساس زمان عبور موج از نمونه‌ها گزارش شده است؛ بنابراین، کاهش زمان عبور موج به‌عنوان نشانه‌ای از افزایش پیوستگی داخلی، کاهش اثر ترک‌ها و بهبود یکپارچگی ریزساختاری بتن تفسیر می‌شود. آزمایش UPV در سنین ۱، ۳، ۷ و ۲۸ روز انجام شد تا یکپارچگی و همگنی داخلی و عملکرد خودترمیمی مخلوط‌های بتنی ارزیابی شود (شکل ۸). در روز اول، تمام نمونه‌ها زمان عبور موج تقریباً یکسانی داشتند که نشان‌دهنده یکنواختی و شباهت میکروساختار در مراحل اولیه هیدراسیون است. در مرحله پس از ایجاد ترک (روز سوم)، افزایش قابل توجهی در زمان عبور موج مشاهده شد که ناشی از حضور ترک ایجاد شده بود و به‌عنوان یک نقص عمده، مسیر انتشار موج را تحت تأثیر قرار می‌داد. در این سن، تفاوت بین نمونه‌های حاوی باکتری و نمونه‌های کنترل کم بود، که نشان‌دهنده آغاز اولیه فرآیند پرمیتر شدن ترک‌ها است. با گذشت زمان، در ۷ روزگی، تمام نمونه‌های حاوی باکتری کاهش زمان عبور موج را نسبت به نمونه‌های کنترل نشان دادند، که بیانگر شروع فرآیند بسته شدن نسبی میکروترک‌ها و بهبود پیوستگی ماتریس است. بیشترین اثر در روز ۲۸ مشاهده شد؛ در نمونه شاهد، زمان عبور موج در نمونه حاوی باکتری حدود ۱۳ درصد کمتر از نمونه کنترل آن بود که نشان‌دهنده پیشرفت هیدراسیون، توسعه میکروساختار و تراکم ایجاد شده توسط رسوب کلسیت می‌باشد. نمونه SWC(b) و SWCS(b) حدود ۱۰ درصد بهبود در زمان عبور موج نسبت به نمونه‌های کنترل خود نشان دادند، که این نتایج تأکید بر نقش مؤثر فعالیت باکتریایی در ترمیم میکروترک‌ها و تقویت ساختار داخلی بتن دارد.

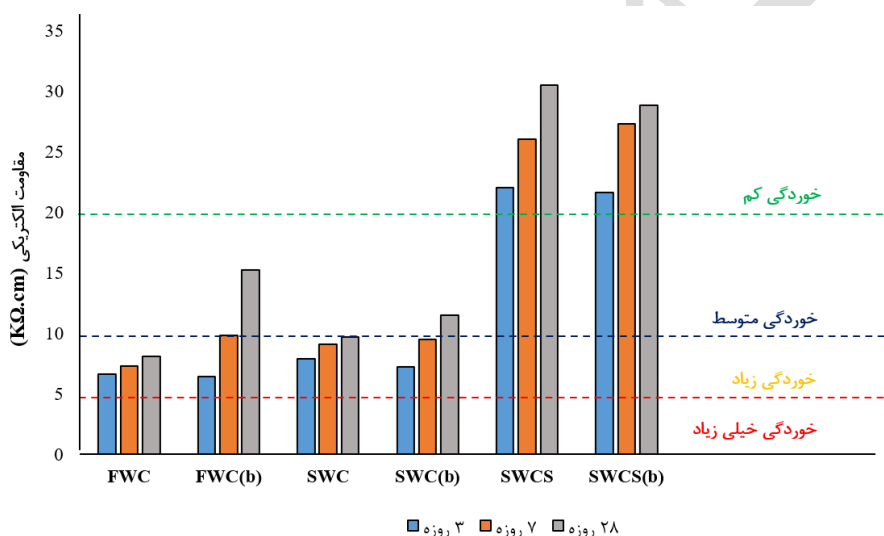
¹³ Ultrasonic pulse velocity



شکل ۹. نتایج آزمایش زمان عبور موج اولتراسونیک نمونه‌های بتنی

۳-۵. مقاومت الکتریکی

نتایج مقاومت الکتریکی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



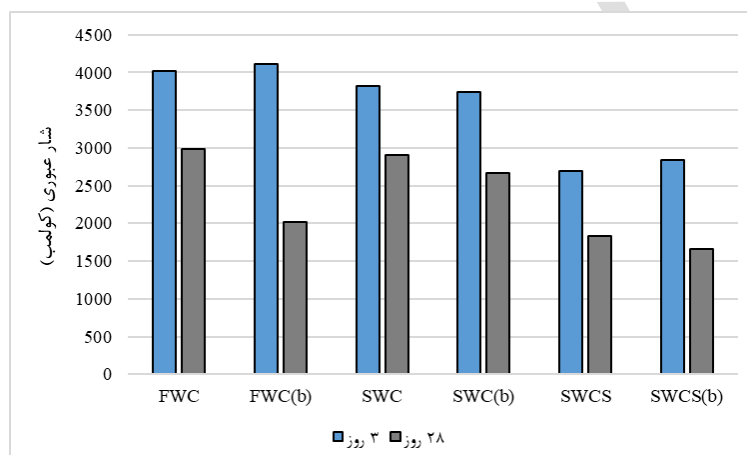
شکل ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی بر اساس دسته‌بندی استاندارد ACI 222

مقادیر مقاومت الکتریکی ($k\Omega.cm$) در تمامی ترکیب‌ها با افزایش سن هیدراسیون افزایش یافت، که بیانگر تراکم تدریجی ماتریس بتنی و کاهش نفوذپذیری و خلل و فرج آن است. در سن ۳ روزگی (بلافاصله پس از ایجاد ترک)، مقاومت الکتریکی از ۶/۴ در FWC(b) تا ماکزیمم ۲۲ در طرح اختلاط SWCS متغیر بود، در حالی که نمونه مشابه حاوی باکتری SWCS(b) عدد ۲۱/۶ را در این سن نشان داد. در ۷ روزگی، روند افزایشی ادامه یافت و کمترین مقدار در FWC و بیشترین مقدار مجدداً در SWCS(b) با ۲۷/۳ مشاهده شد. در سن ۲۸ روزگی، نمونه SWCS بیشترین مقاومت الکتریکی را با مقدار ۳۰/۵ ثبت کرد، در حالی که نمونه حاوی باکتری آن کمی کمتر و برابر با ۲۸/۸ بود. FWC کمترین مقاومت الکتریکی را در تمام سنین نشان داد، به‌طوری که از ۶/۴ در ۳ روز به مقدار ۸ در ۲۸ روزگی رسید. مقاومت الکتریکی نمونه شاهد حاوی باکتری FWC(b) به‌طور چشمگیری با گذر زمان افزایش یافت و در روز ۲۸ به ۱۵/۲ رسید. نمونه‌های SWC و SWC(b) مقادیر متوسطی داشتند، که از ۷/۹ و ۷/۲ در روز ۳ به ۹/۷ و ۱۱/۵ در سن ۲۸ روزگی رسیدند. این نتایج تایید می‌کنند که فعالیت باکتریایی موجب پر شدن میکروتُرک‌ها و بهبود یکپارچگی شبکه‌های موئین بتن شده، حرکت یونهای رسانا مختل می‌کند و در

نتیجه مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد، در حالی که تفاوت‌ها در نمونه‌های کنترل بیشتر تحت تأثیر ترکیب اولیه مواد و سرعت هیدراسیون قرار دارد.

۳-۶. آزمون نفوذ تسریع شده یون کلرید (RCPT)

نتایج آزمون RCPT در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در سن ۳ روز، تمامی ترکیب‌ها مقادیر بالای جریان الکتریکی عبوری را نشان دادند که بیانگر حضور شبکه‌های موئین و ساختار میکروسکوپی ناپایدار، هیدراسیون ناقص و متفاوت‌اند که بین نمونه‌های حاوی باکتری و بدون باکتری قابل رویت بود.



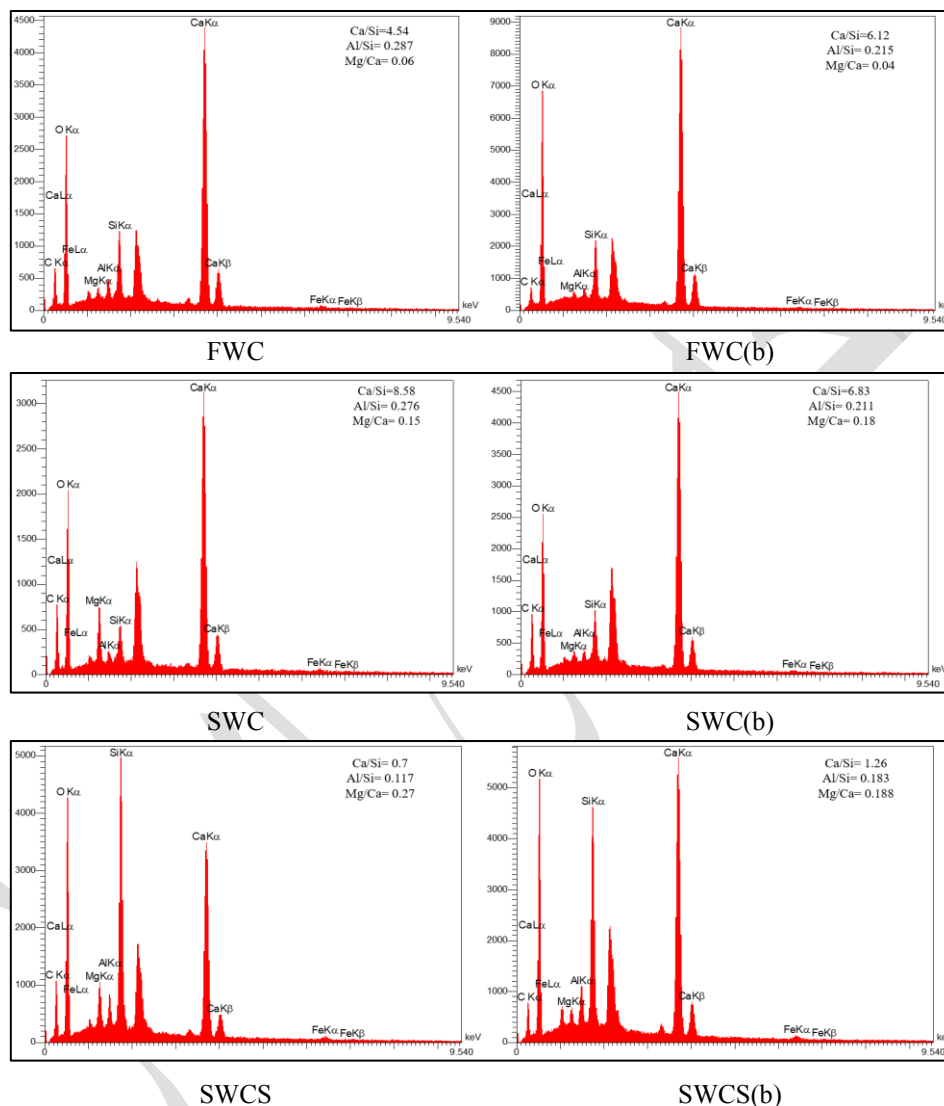
شکل ۱۱. (سمت راست): نتایج آزمایش نفوذ کلرید تسریع شده (RCPT) نمونه‌های بتنی در سن ۳ و ۲۸ روزگی (سمت چپ): انجام تست.

با این حال، در سن ۲۸ روزگی، کاهش قابل توجهی در نفوذ یون کلرید در تمامی نمونه‌های حاوی باکتری مشاهده شد. در نمونه FWC(b)، شار عبوری کل به ۲۰۱۷ کولمب کاهش یافت، در حالی که در FWC مقدار ۲۹۸۳ کولمب ثبت شد، که حاکی از کاهش ۳۵/۴ درصدی نفوذ کلرید است. نمونه SWC(b) نیز بار عبوری ۲۶۶۷ کولمب را نشان داد، در حالی که ۲۹۱۱ کولمب در نمونه کنترل SWC اندازه‌گیری شد، که این موضوع بیانگر افزایش ۸/۴ درصد مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید بود. در نمونه SWCS(b)، عبور بار ۱۶۶۲ کولمب ثبت شد، در حالی که نمونه کنترل آن ۱۸۳۵ کولمب داشت، که نشان‌دهنده کاهش ۹/۴ درصد در نفوذپذیری یون کلرید است. نتایج RCPT به وضوح نقش مفید فعالیت باکتری باسیلوس در کاهش نفوذ یون کلرید را نشان می‌دهد، که ناشی از مکانیسم MICP است که باعث تراکم ساختار میکروسکوپی و پر شدن میکروتراک‌ها می‌شود. تجزیه و تحلیل داده‌های این آزمایش نشان می‌دهد که اثر باکتری بیشترین تأثیر را در ترکیب‌هایی داشت که امکان تشکیل ساختار کربناته و پر شدن منافذ فراهم بود، زیرا باکتری‌ها به صورت موضعی کلسیت رسوب می‌دهند و مسیرهای نفوذ یون‌ها را محدود می‌کنند [۱۸].

۳-۷. آنالیز شیمیایی و ریزساختار

تحلیل EDX (شکل ۱۲) در سن ۲۸ روز، ترکیب عنصری مخلوط‌های بتنی را نشان داد. حضور کلسیم (Ca) و اکسیژن (O) در همه نمونه‌ها، وجود محصولات هیدراسیون به‌ویژه ژل سیلیکات کلسیم هیدرات (C-S-H) را تأیید کرد. نمونه‌های کنترل دارای نسبت بالای Ca/Si و ساختار C-S-H ضعیف‌تر بودند، در حالی که افزودن SF در طرح SWCS باعث افزایش Si، کاهش نسبت Ca/Si و تشکیل ژل C-S-H متراکم‌تر و پایدارتر شد. وجود Mg در همه نمونه‌ها نیز نشانگر تماس با منابع سولفاتی بود و بیشترین مقدار آن در SWC مشاهده شد که به تشکیل اترینگایت و ایجاد ریزتراک‌ها انجامید. در طرح اختلاط SWC(b)، حضور $MgSO_4$ و $CaCl_2$ ، یون‌های Mg^{2+} و Ca^{2+} لازم برای انجام و تسریع فرآیند MICP را تأمین کرد. افزایش نسبت Mg/Ca موجب تغییر پلی‌مورف‌های کربنات کلسیم از کلسیت به آراگونیت و در نسبت‌های بالا به تشکیل آراگونیت کم‌بلور شکل و $MgCO_3 \cdot 3H_2O$ انجامید [۲۰، ۲۱]. در مقابل، Ca^{2+} حاصل از $CaCl_2$ تشکیل پایدار کلسیت را تقویت کرده و اثربخشی خودترمیمی ماتریس بایو-سیمانی را افزایش داد. هرچند NaCl فاز کربناتی جدیدی ایجاد نکرد، اما با تغییر محیط یونی، سرعت رسوب را اندکی تعدیل نمود.

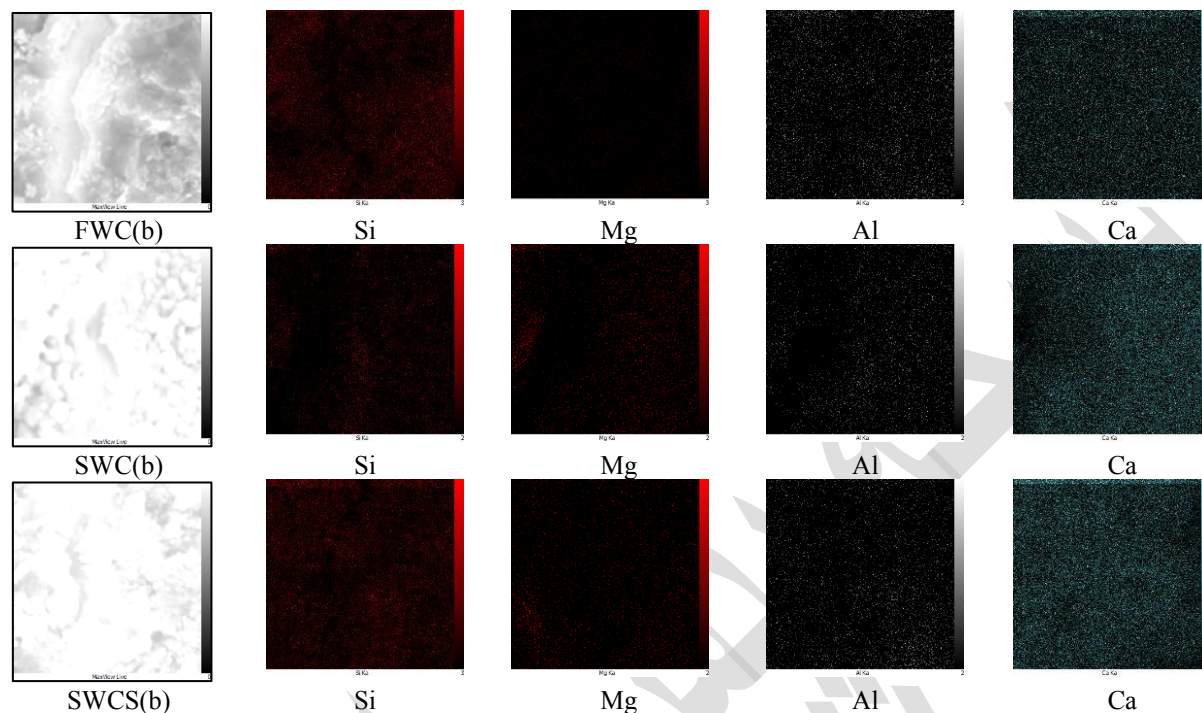
از دیدگاه نسبت‌های مولی، به طور کلی نسبت بالاتر Al/Si موجب افزایش فازهای AFm و جذب شیمیایی یون کلرید می‌گردد، در حالی که نسبت پایین‌تر آن در SWCS دلالت بر تشکیل ژل C-S-H متراکم با توان بالای جذب فیزیکی کلرید دارد [۱۸]. یون‌های Mg^{2+} و Ca^{2+} حاصل از سولفات‌های موجود در آب و ماسه دریا این فرآیند را تشدید کرده و تشکیل آراگونیت در مراحل اولیه، به‌ویژه در SWCS(b)، را به دنبال داشت [۱۲]. افزایش Mg^{2+} و SO_4^{2-} از $MgSO_4$ شدت پیک Fe را کاهش داده که تسریع فرآیند تبدیل AFm به Aft و افزایش تخلخل نسبی را در نهایت سبب شد [۱۸]. به‌ویژه از $FeSO_4$ موجود در آب و ماسه دریا، تشکیل اترینگایت را محدود کرده و نشان داد که در این تحقیق $MgSO_4$ عامل اصلی فرسایش ناشی از حملات سولفاتی خارجی است [۶۵].



شکل ۱۲. نتایج آزمایش بررسی فراوانی عناصر با استفاده از تکنیک EDX

نتایج آزمایش Mapping در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این آنالیز برای عناصر Si، Mg، Al و Ca در سه طرح اختلاط FWC(b)، SWC(b) و SWCS(b) نشان‌دهنده توزیع نسبتاً یکنواخت این عناصر در ماتریس سیمانی است. با این حال، تفاوت‌هایی در شدت سیگنال و الگوی پراکندگی برخی عناصر قابل مشاهده است که می‌تواند به نوع محیط اختلاط و حضور مواد مکمل سیمانی مرتبط باشد. عنصر Ca به‌عنوان مؤلفه اصلی فازهای هیدراسیونی، در تمامی نمونه‌ها به‌صورت گسترده توزیع شده است. این یکنواختی، علاوه بر حضور محصولات هیدراسیون سیمان، می‌تواند بیانگر فراهم بودن یون کلسیم برای تشکیل رسوبات کلسیم در فرآیند MICP باشد. تمرکز نسبی Ca در برخی نواحی، می‌تواند به تشکیل موضعی رسوبات کلسیتی مرتبط باشد، هرچند تأیید قطعی آن نیازمند هم‌زمانی با نتایج XRD و SEM است. عنصر Si که نقش کلیدی در تشکیل ژل C-S-H دارد، در هر سه نمونه به‌صورت نسبتاً همگن مشاهده می‌شود. در نمونه SWCS(b)، حضور SF به‌عنوان منبع سیلیس فعال، احتمالاً منجر به افزایش سهم فازهای سیلیکاتی و بهبود پیوستگی ریزساختار شده

است، که این موضوع با کاهش تخلخل و بهبود خواص انتقالی قابل تفسیر است. در نمونه‌های حاوی آب و ماسه دریا، یعنی SWC(b) و SWCS(b)، حضور عنصر Mg نسبت به نمونه FWC(b) مشهودتر است. این امر ناشی از یون‌های منیزیم موجود در محیط دریایی بوده و می‌تواند به واکنش‌های ثانویه و تشکیل فازهای M-S-H یا دگرگونی جزئی در ساختار C-S-H منجر شود [۱۸ و ۳۱]. عنصر Al نیز با توزیع نسبتاً یکنواخت در تمامی نمونه‌ها مشاهده می‌شود که به حضور فازهای آلومیناتی نظیر C_3A و محصولات ثانویه آن مرتبط است. این فازها نقش مهمی در ظرفیت اتصال یون‌های کلرید ایفا می‌کنند، که در بتن‌های در معرض محیط‌های دریایی اهمیت ویژه‌ای دارد.

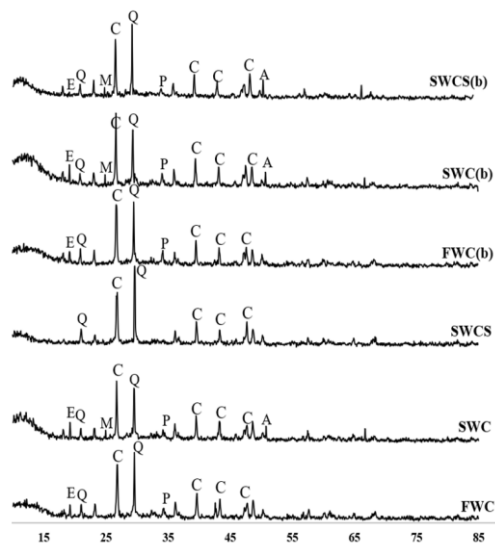


شکل ۱۳. بررسی فراوانی برخی از مهمترین عناصر در طرح‌اختلاط‌های حاوی باکتری

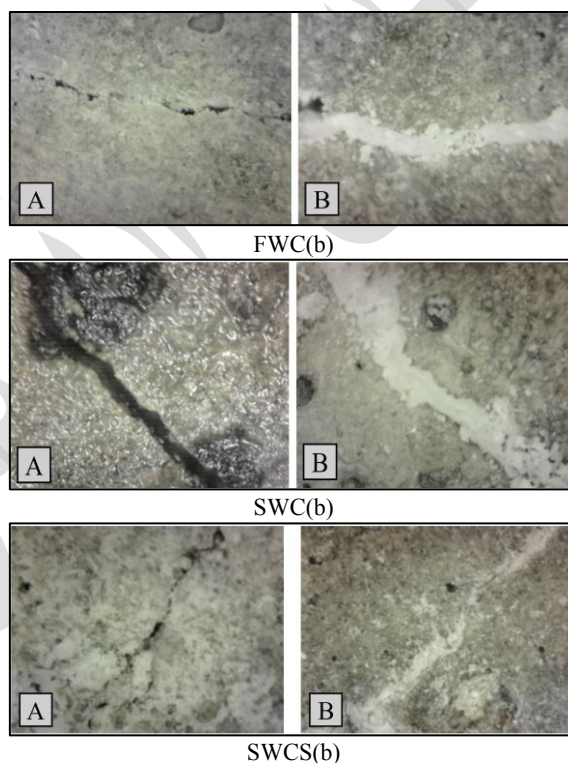
نتایج آزمایش XRD در شکل شماره ۱۴ ارائه شده است. در این تحقیق الگوهای آنالیز XRD تفاوت‌های آشکار در ترکیب فازهای بلوری را نشان دادند. شدت پیک کلسیت در نمونه‌های حاوی باکتری افزایش قابل توجهی داشت، به ویژه در ترکیب‌های تحت تأثیر یون‌های دریایی به واسطه‌ی حضور آب و ماسه دریا این افزایش ناشی از فرآیند MICP است که در حضور منابع کافی پورتلندیت/کلسیم هیدروکسید $[Ca(OH)_2]$ ، به شکل موثرتری انجام شده است. کمترین میزان کلسیت در نمونه‌های حاوی SF مشاهده شد که به دلیل مصرف شدید $Ca(OH)_2$ در واکنش‌های پوزولانی و محدود کردن فعالیت باکتریایی است. کوارتز (Q) در همه نمونه‌ها شناسایی شد، با بیشترین شدت در نمونه‌های حاوی SF و کمترین میزان در ترکیب SWC که بدون افزودنی پوزولانی ساخته شد. پیک اترینگایت نیز در ترکیب‌های با محتوای Al_2O_3 چشمگیرتر بود، که نقش مهمی در تشکیل فازهای AFt و AFm و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت بتن در سنین اولیه دارند. همچنین، آراگونیت در ترکیب‌های SWC، SWCS(b) و SWC(b) شناسایی شد. سولفات منیزیم ($MgSO_4$) نیز عمدتاً در ترکیب‌های SWC و نمونه‌های باکتری‌دار مشاهده شد. به طور کلی، حضور یون‌های سولفات می‌تواند با تحریک تشکیل اترینگایت، بخشی از یون‌های کلسیم قابل دسترس را از مسیر تشکیل $CaCO_3$ خارج کند. بنابراین، در محیط‌های غنی از سولفات، فرآیند MICP با واکنش‌های سولفاتی رقابت داشته و ظرفیت ترمیمی بتن تا حدی محدود می‌شود.

تصاویر میکروسکوپ چشمی ترک‌ها در شکل ۱۵ عملکرد ترمیمی باکتری را در ۳ طرح‌اختلاط مختلف نشان می‌دهند؛ طی این بررسی، عرض ترک‌ها در سن ۳ روزگی (بلافاصله پس از ایجاد ترک) و در ۲۸ روز اندازه‌گیری و پایش شد. در نمونه FWC(b)، ترک‌ها تقریباً به‌طور کامل توسط لایه‌ای پیوسته از رسوبات معدنی کلسیم‌محور، به‌ویژه کلسیت، پر شده‌اند؛ امری که بیانگر کارایی قابل توجه فرآیند MICP حتی در ماتریس سیمان پرتلند است. در نمونه SWCS(b)، پر شدن ترک‌ها با الگوی ناهمگنی صورت گرفت؛ تصاویر همچنین نشان

می‌دهند که بخش‌های بسیاری از حفرات و ریزترک‌ها کاملاً پر و متراکم شده‌اند، اما برخی مناطق هنوز تخلخل و بافت نامنظم داشتند، که نشان‌دهنده فعالیت ترمیم‌کنندگی باکتری است که تا حدی توسط واکنش‌های پوزولانی و مصرف Ca(OH)_2 توسط SF مختل شده است.



شکل ۱۴. آنالیز XRD؛ (Q): کوارتز، (C): کلسیت/کلسیم کربنات، (M): سولفات منیزیم، (E): اترینگایت، (A): آراگونیت، (P): پرتلندیت/هیدروکسید کلسیم



شکل ۱۵. بررسی ترمیم ترک‌ها توسط باکتری با استفاده از میکروسکوپ اپتیک چشمی؛ (A): در سن ۳ روزگی پس از اعمال ترک، (B): در سن ۲۸ روزگی

۴. بحث و نتیجه گیری

۴-۱. مقاومت فشاری

در مقایسه با نمونه شاهد، مقاومت فشاری نمونه حاوی باکتری FWC(b) در سن ۲۸ روز از ۴۹ به ۵۱.۸ مگاپاسکال (حدود ۶ درصد افزایش) رسید. این بهبود علاوه بر ادامه هیدراسیون، به MICP در میکروترک‌ها و ITZ نسبت داده می‌شود که موجب بهبود ریزساختار می‌گردد [۴۱، ۴۲]. با این حال، در سنین اولیه اختلاف محسوسی مشاهده نشد که نشان‌دهنده تأخیر در فعال‌سازی باکتری تا فراهم شدن شرایط مناسب (رطوبت و قلیائیت) است. نمونه SWC(b) نیز افزایش حدود ۴ درصد مقاومت نسبت به SWC نشان داد. اگرچه یون‌های Mg^{2+} و SO_4^{2-} می‌توانند فعالیت MICP را تقویت کنند [۴۲]، اما تشکیل اترینگایت ناشی از سولفات‌ها ممکن است بخشی از این اثر مثبت را خنثی نماید. در مقابل، در بتن حاوی SF، با وجود مقاومت پایه بالاتر (۷۱ مگاپاسکال) در SWCS، افزودن باکتری منجر به کاهش مقاومت در SWC(b) شد. این موضوع به مصرف $Ca(OH)_2$ توسط SF و کاهش Ca^{2+} آزاد مورد نیاز برای MICP، و همچنین محدود شدن تحرک باکتری در ماتریس متراکم نسبت داده می‌شود [۱۸]. علاوه بر این، حضور آراگونیت در نمونه SWC(b) (بر اساس XRD) که نسبت به کلسیت ساختار کمتر متراکمی دارد، می‌تواند دلیل دیگری برای کاهش نسبی مقاومت باشد. همچنین، فرآیندهای بیومینرالیزاسیون در مراحل اولیه ممکن است باعث ناهمگنی موضعی در ریزساختار شده و موقتاً مقاومت را کاهش دهند [۱۰، ۱۷]، هرچند در بلندمدت با تثبیت ساختار، بهبود عملکرد محتمل است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که تأثیر مثبت MICP بر مقاومت فشاری به‌شدت وابسته به دسترسی یون‌های کلسیم و عدم مصرف بیش‌ازحد آن در واکنش‌های پوزولانی است.

۴-۲. نفوذپذیری تحت فشار آب

نتایج نشان می‌دهد که نفوذپذیری بتن به‌طور مستقیم تابع ریزساختار خمیر سیمان و میزان تخلخل مؤثر آن است. نقش SF در کاهش چشمگیر نفوذپذیری، عمدتاً ناشی از واکنش پوزولانی و اثر فیلر است. SF با مصرف $Ca(OH)_2$ و تولید ژل ثانویه C-S-H، موجب افزایش تراکم ماتریس سیمان و کاهش اندازه و پیوستگی منافذ موئینه می‌شود [۳۱]. همچنین، ذرات بسیار ریز آن فضای خالی بین ذرات سیمان را پر کرده و ساختار بتن را متراکم‌تر می‌کند. این موضوع باعث کاهش قابل توجه مسیرهای انتقال رطوبت در نمونه‌های حاوی SF شده است [۴۳ و ۴۴]. عدم تفاوت محسوس بین SWCS و SWC(b) نشان می‌دهد که در حضور ساختار بسیار متراکم ناشی از SF، فضای کافی برای فعالیت مؤثر باکتری‌ها محدود شده و در نتیجه تأثیر آن‌ها بر نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

۴-۳. جذب آب کل

جذب آب کل، شاخصی از حجم منافذ باز و میزان پیوستگی شبکه موئینه در بتن است؛ بنابراین کاهش آن را می‌توان به بهبود ریزساختار و کاهش تخلخل قابل دسترس برای آب نسبت داد. کاهش جذب آب در نمونه‌های حاوی باکتری را می‌توان ناشی از تشکیل رسوبات کربنات کلسیم در بخشی از منافذ و فضاهای خالی دانست. این رسوبات باعث کاهش مسیرهای ورود و حرکت آب در بافت بتن شده و در نتیجه جذب آب را کاهش داده‌اند. کاهش محسوس‌تر جذب آب در نمونه‌های حاوی SF به دلیل اثر شناخته‌شده این ماده بر تراکم ماتریس سیمانی است. SF با ایفای نقش فیلر و نیز از طریق واکنش پوزولانی و تولید ژل C-S-H بیشتر، سبب ریزتر شدن ساختار منافذ و کاهش پیوستگی موئینه می‌شود [۳۱]. در نتیجه، ظرفیت جذب آب و همچنین قابلیت نفوذ آب تحت فشار به‌طور همزمان کاهش می‌یابد. به همین دلیل، طرح‌های SWCS و به‌ویژه SWC(b) بهترین عملکرد را در هر دو آزمون نشان داده‌اند [۴۴ و ۴۵].

۴-۴. سرعت انتشار موج اولتراسونیک (UPV)

در سن یک روزگی، همه نمونه‌ها زمان عبور موج مشابهی نشان دادند که حاکی از یکنواختی اولیه و تقریباً مشابه ماتریس قبل از ایجاد ترک بود. افزایش قابل توجه زمان عبور موج در سن ۳ روز، تأثیر فوری ترک‌های القا شده را منعکس می‌کند. افزایش زمان عبور موج به دلیل ناهمگنی‌ها و بنابراین به‌عنوان مبنای مشترک پس از ترک برای ارزیابی بهبود بعدی عمل می‌کند. تکامل بعدی UPV از ۳ تا ۲۸ روز تفاوت نمونه‌ها را در توانایی بازسازی مسیر موج، یعنی پر کردن یا پل زدن ترک‌ها و اصلاح شبکه منافذ، آشکار می‌سازد. به‌طور کلی، نمونه‌های حاوی باکتری کاهش زمان عبور موج بیشتری بین اندازه‌گیری‌های ۳ و ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های بدون باکتری نشان دادند که با مکانیسم MICP و پر کردن میکروترک‌ها همسو است [۱۰]. بیشترین بهبود نسبی در نمونه باکتری‌دار FWC مشاهده شد، جایی که MICP موجب بسته شدن مؤثر ترک‌ها شد. نمونه‌های مرجع حاوی باکتری نیز بهبود قابل توجهی نشان دادند، که نشان می‌دهد در حضور کلسیم آزاد باقی‌مانده، MICP نقش مؤثری در ترمیم ترک‌ها ایفا می‌کند. در مقابل، SWC(b) کمترین اثر باکتریایی را نشان داد. ژل متراکم و کم Ca/Si تولید شده توسط SF نه تنها Ca^{2+} آزاد مورد نیاز برای MICP را کاهش می‌دهد، بلکه دسترسی باکتری به منافذ عمیق‌تر را

محدود کرده و موجب رسوب ناهمگن کلسیت می‌شود؛ بنابراین، اثر باکتری محدود و موضعی بود. نمونه SWC(b) سطح متوسطی از بهبود را نشان داد؛ علاوه بر MICP، حضور یون‌های Mg^{2+} و Ca^{2+} موجب تشکیل آراگونیت شد که در سنین اولیه به مهر و موم منافذ کمک کرد، اما واکنش‌های سولفات ادامه‌دار مانع بهبود طولانی‌مدت سختی ماتریس شد [۳۱].

۴-۵. مقاومت الکتریکی

در همه نمونه‌های کنترل (بدون باکتری)، مقاومت الکتریکی در سن سه روز پایین بود، که نشان‌دهنده شبکه‌های مویرگی باز و ماتریس سیمانی ناکامل ناشی از حضور یون‌های مهاجم موجود در آب و ماسه لایروبی شده دریا است. با افزایش سن، واکنش‌های شیمیایی به همراه فعالیت باکتری موجب متراکم‌تر شدن تدریجی ماتریس و کاهش نفوذپذیری شده است. افزودن باکتری منجر به فعال شدن آنزیم اوره‌آز شد که اوره را به طور طبیعی کربنات تبدیل می‌کند و رسوب کلسیت را در ترک‌ها و منافذ ایجاد می‌نماید؛ این فرآیند موجب افزایش قابل توجه مقاومت الکتریکی می‌شود [۱۰]. به‌طور مثال، نمونه FWC(b) تا سن ۲۸ روز، مقاومت الکتریکی حدود ۹۰ درصد بالاتر از نمونه کنترل FWC داشت، که تأثیر قابل توجه MICP در بهبود اتصال داخلی ماتریس را آشکار می‌سازد. در نمونه SWCS(b)، افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه کنترل تنها حدود ۱۳٪ بود؛ این محدودیت به دلیل تراکم بالای ژل سیلیکایی و کاهش Ca^{2+} آزاد رخ داده است، که رشد کلسیت میکروبی و دسترسی باکتری به منافذ عمیق‌تر را محدود می‌کند. در نمونه SWC(b)، مقاومت الکتریکی با ۱۸ درصد افزایش نسبت به کنترل همراه بود. یون‌های موجود، به ویژه Mg^{2+} ، می‌توانند رسوب کلسیت را تسهیل کرده و منافذ را پر کنند، هرچند حضور سولفات منجر به تشکیل اترینگایت و انبساط موضعی می‌شود که ممکن است اثر مهر و موم کلسیتی را تا حدی کاهش دهد. با این حال، فعالیت MICP در SWC(b) توانست با وجود رقابت کریستالیزاسیون، بهبود قابل توجه و قابل اندازه‌گیری در مقاومت الکتریکی ایجاد نماید.

۴-۶. آزمون نفوذ تسریع‌شده یون کلرید (RCPT)

در تمامی نمونه‌های شاهد، بیشترین نفوذ یون کلرید در سنین اولیه مشاهده شد که به وجود شبکه مویرگی باز، هیدراسیون ناکامل و حضور یون‌های مهاجم شامل Cl^- ، SO_4^{2-} و Mg^{2+} نسبت داده می‌شود. با افزایش سن، تکامل ژل‌های C-S-H و C-A-S-H موجب کاهش نفوذپذیری و در نتیجه کاهش عبور یون کلرید شد [۱۸ و ۳۱]. در مقابل، در نمونه‌های حاوی باکتری، فرآیند MICP از طریق تولید یون کربنات و رسوب کلسیت در منافذ و ریزترک‌ها، مسیرهای انتقال یونی را مسدود کرده و ظرفیت اتصال کلرید را افزایش داد [۱۰ و ۱۸]. به‌عنوان نمونه، در FWC(b)، بار الکتریکی عبوری در ۲۸ روز حدود ۱۹ درصد کمتر از نمونه شاهد بود که بیانگر بهبود مقاومت کلریدی است. در بتن‌های حاوی SF، اثر باکتری محدودتر بود؛ به‌طوری‌که SWCS(b) کاهش کمتری در بار عبوری نسبت به SWCS نشان داد. این رفتار $Ca(OH)_2$ توسط SF و کاهش دسترسی Ca^{2+} برای MICP، و همچنین محدود شدن نفوذ و فعالیت باکتری در ماتریس متراکم نسبت داده می‌شود [۴۶]. علاوه بر این، به دلیل محتوای پایین Al_2O_3 در SF، تشکیل فازهای AFm مانند نمک فرایدل و در نتیجه اتصال شیمیایی کلرید محدود بوده و بهبود مقاومت کلریدی عمدتاً ناشی از تراکم فیزیکی ژل C-S-H است [۴۷ و ۴۸]. در نمونه‌های ساخته‌شده با آب و ماسه دریا، حضور یون‌های Mg^{2+} و SO_4^{2-} منجر به رقابت در فرآیندهای تبلور، تشکیل اترینگایت و انبساط موضعی در ITZ شد که می‌تواند بخشی از اثر مسدودکنندگی کلسیت را کاهش دهد. با این وجود، رسوب زیستی کلسیت همچنان به‌طور مؤثری موجب بهبود مقاومت در برابر نفوذ کلرید شد. در مجموع، نتایج RCPT نشان می‌دهد که کارایی MICP در کاهش نفوذ کلرید به اصلاح ساختار منافذ وابسته بوده و تحت تأثیر ترکیب شیمیایی ماتریس، به‌ویژه حضور SF، قرار دارد.

۴-۷. آنالیز شیمیایی

در مخلوط SWC حاوی باکتری، حضور نمک‌های دریایی و افزودنی‌های یونی مانند $MgSO_4$ و $CaCl_2$ منبع غنی از یون‌های Mg^{2+} و Ca^{2+} را فراهم می‌آورد که محرک اصلی فرایند MICP و تعیین‌کننده مسیرهای تشکیل فازهای معدنی هستند. افزایش نسبی غلظت Mg^{2+} تمایل به تغییر انتخاب پلی‌مورف‌های کربنات کلسیم را نشان می‌دهد؛ با افزایش نسبت مولی Mg/Ca ، گرایش رسوب از کلسیت تریگونال به آراگونیت ارتورومبیک تقویت می‌شود و در نسبت‌های بسیار بالا احتمال یافتن آراگونیت با بلوریتۀ ناقص یا حتی فازهای هیدراته منیزیمی مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، تأمین فراوان Ca^{2+} از منابع کلریدی مثل $CaCl_2$ تشویق‌کننده تشکیل کلسیت پایدارتر است که به‌وضوح در الگوهای پراش اشعه XRD به‌صورت افزایش شدت پیک‌های کلسیت قابل شناسایی است؛ این پدیده کارایی پرشدن ترک‌ها را

در ماتریس زیست‌سیمانی افزایش می‌دهد [۱۰]. نمک NaCl خود فاز جدیدی از کربنات‌ها تولید نمی‌کند، اما با تغییر میدان یونی، سینتیک رسوب‌گذاری را تحت تأثیر قرار داده و رفتار تبلور را به‌طور ظریف تغییر می‌دهد [۴۹-۵۳]. در این تحقیق، نتایج XRD تفاوت‌های مشخصی در شدت پیک فازهای بلوری بین مخلوط‌ها نشان داد. نمونه‌های حاوی باکتری پیک‌های کلسیت را تقویت کردند که نشانه مکانیسم MICP است. در مقابل، نمونه‌های حاوی مقادیر بالای پیک‌های کلسیت کمتری نشان دادند که با مصرف سریع Ca(OH)_2 در واکنش‌های پوزولانی و کاهش دسترسی Ca^{2+} برای MICP همخوانی دارد. کوارتز (Q) در تمامی نمونه‌ها حضور داشت و بیشترین شدت در نمونه‌هایی بود که محتوای سیلیسی بالاتری داشتند. پیک‌های مربوط به فازهای سولفات‌ی در نمونه‌هایی که محتوای سولفات بالاتری داشتند برجسته‌تر بود؛ حضور این فازهای انبساطی می‌تواند منجر به ایجاد ریزترک و تضعیف محلی ITZ شود [۵۴-۵۷]. در برخی نمونه‌ها، آراگونیت نیز همراه کلسیت مشاهده شد که نشان‌دهنده تنوع پلی‌مورفی در شرایط چندیونی محیط دریایی است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که عملکرد خودترمیمی در بتن ساخته‌شده با آب و ماسه دریا، به‌شدت تابع شیمی محلول منفذی است. مهم‌ترین پارامترهای مؤثر شامل غلظت Ca^{2+} قابل دسترسی، نسبت Ca/Si در محصولات هیدراسیون، مقدار Mg^{2+} ، حضور SO_4^{2-} و Cl^- ، pH قلیایی محیط، رطوبت و منبع غذایی باکتری است. در این میان، حفظ غلظت کافی Ca^{2+} برای تشکیل رسوبات CaCO_3 ضروری است؛ در حالی که مصرف بیش از حد Ca(OH)_2 توسط میکروسیلیس می‌تواند ظرفیت MICP را محدود کند. بنابراین، برای دستیابی به خودترمیمی بهینه، باید میان تراکم پوزولانی ناشی از میکروسیلیس و دسترسی یونی لازم برای رسوب‌گذاری زیستی کربنات کلسیم تعادل برقرار شود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی تأثیر فرآیند MICP در کنار SF بر دوام، ریزساختار و قابلیت خودترمیمی بتن ساخته‌شده با آب و مصالح دریایی پرداخت که نتایج زیر قابل استنباط هستند:

۱. کارایی فرآیند MICP در بتن‌های حاوی املاح دریایی به‌شدت به دسترسی یون‌های Ca^{2+} وابسته است. حضور میکروسیلیس با مصرف پرتلندیت و کاهش Ca^{2+} آزاد، اگرچه موجب تراکم ماتریس و کاهش نفوذپذیری می‌شود، اما می‌تواند رسوب‌گذاری یکنواخت کلسیت را محدود کند. بنابراین، عملکرد خودترمیمی زیستی در این نوع بتن تابع تعادل میان واکنش پوزولانی، نسبت Ca/Si و شیمی یونی محلول منفذی است.

۲. در نمونه‌های حاوی SF، نقش تراکم فیزیکی و اصلاح ریزساختار بر اثر واکنش‌های پوزولانی غالب بوده و سهم فعالیت زیستی در بهبود ماتریس کاهش می‌یابد. مشاهدات ریزساختاری حاکی از محدود بودن تشکیل کلسیت و افزایش حضور آراگونیت به‌عنوان پلی‌مورف غالب CaCO_3 است. این تغییر فازی، اگرچه می‌تواند در انسداد ترک‌ها مؤثر باشد، اما نقش کمتری در افزایش تراکم و وزن مخصوص به نسبت فازهای ژلی در ماتریس دارد؛ در نتیجه بهبود مکانیکی را به نحوی محدود می‌سازد. به این ترتیب، رقابت بین پلی‌مورف‌های کربنات کلسیم به‌عنوان عاملی مؤثر در کارایی خودترمیمی مطرح می‌شود.

۳. همچنین، ترکیب یونی پیچیده محیط، به‌ویژه حضور Mg^{2+} و SO_4^{2-} ، نقش تعیین‌کننده‌ای در نوع و پایداری محصولات معدنی دارد. افزایش Mg^{2+} موجب تمایل به تشکیل آراگونیت شده، در حالی که یون‌های سولفات با تسهیل تشکیل اترینگایت می‌توانند با ایجاد انبساط موضعی، بخشی از مزایای MICP را کاهش دهند. در مجموع، دستیابی به خودترمیمی مؤثر در این نوع بتن‌های دریایی مستلزم مدیریت هم‌زمان «فراوانی کلسیم» و شرایط یونی محیط است تا امکان ترمیم ترک و دوام بلندمدت در شرایط غنی از کلرید، منیزیم و سولفات فراهم گردد.

AFm	فاز مونوسولفات آلومینات-فریت کلسیم هیدراته	SF	میکروسیلیس
AFt	فاز تری سولفات آلومینات-فریت کلسیم هیدراته	UPV	آزمون سرعت عبور موج اولتراسونیک
B.S	باکتری باسیلوس سابیتیلیس	XRD	پراش پرتو ایکس
DMS	ماسه لایروبی شده دریا		طرح اختلاط
EDX	طیفسنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس	1. SWC	بتن ساخته شده از آب و ماسه لایروبی شده دریا
ITZ	ناحیه انتقال	2. SWC (b)	بتن ساخته شده از آب و ماسه لایروبی شده دریا + باکتری
MICP	رسوب گذاری کلسیت القاشده توسط میکروارگانیزمها	3. FWC	بتن شاهد
RCPT	آزمون نفوذ یون کلرید تسریع شده	4. FWC (b)	بتن شاهد + باکتری
SCMs	مصلح مکمل سیمانی	5. SWCS	بتن ساخته شده از آب و ماسه دریا + میکروسیلیس
SW	آب دریا	6. SWCS(b)	بتن ساخته شده از آب و ماسه دریا + باکتری+میکروسیلیس

مراجع

- [1] Ge, L., Feng, Z., Sayed, U., & Li, H. (2023). Research on the performance of seawater sea-sand concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 409, 133921.
- [2] Xiao, J., Qiang, C., Nanni, A., & Zhang, K. (2017). Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities. *Construction and Building Materials*, 155, 1101-1111.
- [3] Psyrris, G., Keiding, J. K., Kunther, W., Torres, A., Hauschild, M. Z., Ambaye, T. G., & Lima, A. T. M. (2026). Abundant resources in an era of scarcity: Systemic aspects of the Global sand and gravel crisis. *Resources, Conservation and Recycling*, 225, 108631.
- [4] Saka, L. (2025). The sand curse: sand mining, environmental degradation and social conflicts in The Gambia. *World Development*, 195, 107125.
- [5] Dhondy, T., Remennikov, A., & Shiekh, M. N. (2019). Benefits of using sea sand and seawater in concrete: a comprehensive review. *Australian Journal of Structural Engineering*, 20(4), 280-289.
- [6] Zhao, Y., Hu, X., Shi, C., Zhang, Z., & Zhu, D. (2021). A review on seawater sea-sand concrete: Mixture proportion, hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, 295, 123602.
- [7] Wang, Q. Z., Li, L. J., Zhao, Y. X., Song, Y., & Zhang, C. L. (2024). Feasibility assessment and application of sea sand in concrete production: A review. In *Structures* (Vol. 60, p. 105891). Elsevier.
- [8] Yu, X., Al-Saadi, S., Zhao, X. L., & Raman, R. S. (2021). Electrochemical investigations of steels in seawater sea sand concrete environments. *Materials*, 14(19), 5713.
- [9] Zhang, D., Jiang, J., Zhang, Z., Fang, L., Weng, Y., Chen, L., & Wang, D. (2024). Comparative analysis of sulfate resistance between seawater sea sand concrete and freshwater desalted sea sand concrete under different exposure environments. *Construction and Building Materials*, 416, 135146.
- [10] Sadeghpour, M., & Baradaran, M. (2023). Effect of bacteria on the self-healing ability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 364, 129956.
- [11] Bandlamudi, R. K., Kar, A., & Ray Dutta, J. (2023). A review of durability improvement in concrete due to bacterial inclusions. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1095949.
- [12] Fu, Q., Liu, M., Zhang, S., Lu, L., Fang, N., Chen, J., ... & Wang, J. (2023). Growth and mineralization characteristics of *Bacillus subtilis* isolated from marine aquaculture wastewater and its application in coastal self-healing concrete. *Materials Today Communications*, 35, 105654.
- [13] Lou, Y., Zhang, H., Chang, W., Yang, J., Chen, X., Hao, X., ... & Zhang, D. (2025). Influence of calcium sources on the bio-mineralization behavior of *Shewanella putrefaciens* and induced microbiologically influenced corrosion inhibition. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1532151.
- [14] Wong, P. Y., Mal, J., Sandak, A., Luo, L., Jian, J., & Pradhan, N. (2024). Advances in microbial self-healing concrete: A critical review of mechanisms, developments, and future directions. *Science of The Total Environment*, 947, 174553.
- [15] Zhang, J., Liu, Y., Feng, T., Zhou, M., Zhao, L., Zhou, A., & Li, Z. (2017). Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 148, 610-617.
- [16] Zhao, Y., Yan, H., Zhou, J., Tucker, M. E., Han, M., Zhao, H., ... & Han, Z. (2019). Bio-precipitation of calcium and magnesium ions through extracellular and intracellular process induced by *bacillus licheniformis* SRB2. *Minerals*, 9(9), 526.
- [17] Islam, S. U., & Waseem, S. A. (2023). Strength retrieval and microstructural characterization of *Bacillus subtilis* and *Bacillus megaterium* incorporated plain and reinforced concrete. *Construction and Building*

- Materials, 404, 133331.
- [18] Jahani, M., Moradi, S., & Shahnoori, S. (2023). 4-year monitoring of degradation mechanisms of seawater sea-sand concrete exposed to tidal conditions: development of chemical composition and micro-performance. *Construction and Building Materials*, 409, 133475.
 - [19] Cappellesso, V. G., Van Mullem, T., Gruyaert, E., Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2024). Self-healing concrete with a bacteria-based or crystalline admixture as healing agent to prevent chloride ingress and corrosion in a marine environment. *Developments in the Built Environment*, 19, 100486.
 - [20] Pan, Y., Li, Y., Ma, Q., He, H., Wang, S., Sun, Z., ... & Chen, C. T. A. (2021). The role of Mg^{2+} in inhibiting $CaCO_3$ precipitation from seawater. *Marine Chemistry*, 237, 104036.
 - [21] F. Zha, S. Chen, B. Kang, L. Xu, Y. Shen, and R. Wang, "Synergistic solidification of lead-contaminated soil by magnesium oxide and microorganisms," *Chemosphere*, vol. 308, p. 136422, 2022.
 - [22] Wong, P. Y., Mal, J., Sandak, A., Luo, L., Jian, J., & Pradhan, N. (2024). Advances in microbial self-healing concrete: A critical review of mechanisms, developments, and future directions. *Science of The Total Environment*, 947, 174553.
 - [23] Feng, J., Chen, B., Sun, W., & Wang, Y. (2021). Microbial induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 280, 122460.
 - [24] Nasser, A. A., Sorour, N. M., Saafan, M. A., & Abbas, R. N. (2022). Microbially-Induced-Calcite-Precipitation (MICP): A biotechnological approach to enhance the durability of concrete using *Bacillus pasteurii* and *Bacillus sphaericus*. *Heliyon*, 8(7).
 - [25] Althaqafi, E., Ali, T., Qureshi, M. Z., Islam, S., Ahmed, H., Ajwad, A., ... & Khan, M. A. (2024). Evaluating the combined effect of sugarcane bagasse ash, metakaolin, and polypropylene fibers in sustainable construction. *Scientific Reports*, 14(1), 26109.
 - [26] Iqbal, M., Zhang, D., Khan, K., Amin, M. N., Ibrahim, M., & Salami, B. A. (2023). Evaluating mechanical, microstructural and durability performance of seawater sea sand concrete modified with silica fume. *Journal of Building Engineering*, 72, 106583.
 - [27] Champidou, C., Ellouze, M., Haddad, N., & Membré, J.-M. (2024). Modeling inactivation of non-proteolytic *Clostridium botulinum* type B spores in a plant-based fish alternative. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1509681. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1509681>
 - [28] Durga Prasad, D. P., & Singh, R. N. (2017). Climatic, pathogenic and host conditions for successful induction of *Ustilagoidea virens* causing false smut of rice.
 - [29] ASTM C150, "Astm C150/C150M-22," *Stand. Specif. Portl. Cem.*, pp. 1–8, 2017.
 - [30] ASTM C1240, "Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures," *ASTM Int.*, pp. 1–7, 2015.
 - [31] Jahani, M., Shahnoori, S., Moradi, S., & Ershadi, C. (2022). Cleaner Production Towards a Green Concrete: Multi-scale Experimental Study on Long-term Performance of a Sustainable Modified-SWSSC. *American Journal of Construction and Building Materials*, 6(1), 43-59.
 - [32] ASTM C494/C494M-13, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete," *Annu. B. ASTM Stand.*, p. 10, 2013.
 - [33] American Society of Testing Materials, "C1064/C1064M-08 Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete," *ASTM Int.*, pp. 8–10, 2009.
 - [34] ASTM C 143/C 143M – 08, "Designation: C 143/C 143M – 08: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete 1," *ASTM Stand.*, vol. 04.02, pp. 6–9, 2008, [Online]. Available: www.astm.org
 - [35] British Standards, "BS 1881-Part 124-88," *Br. Stand. Inst.*, 1988.
 - [36] B. S. EN, "12390-8," depth of penetration of water under pressure," *Br. Stand. Inst.*, 2000.
 - [37] ASTM C642, "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete," C642-13, 2013.
 - [38] American Society for Testing & Mater, "ASTM C 597 - Pulse Velocity Through Concrete," *United States Am. Soc. Test. Mater.*, vol. 04, no. 02, pp. 3–6, 2003.
 - [39] B. B. Hope, "Corrosion of Prestressing Steels Reported by ACI Committee 222," pp. 1–43.
 - [40] T. Drilled, C. Concrete, and B. Statements, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete 's Ability to Resist Chloride," pp. 1–6, 2009.
 - [41] Mohammed, T. A., Kasie, Y. M., Assefa, E., Getu, Y. M., & Tufa, D. H. (2024). Enhancing structural resilience: Microbial-based self-healing in high-strength concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 18(1), 22.
 - [42] Yamasamit, N., Sangkeaw, P., Jitchaijaroen, W., Thongchom, C., Keawsawasvong, S., & Kamchoom, V. (2023). Effect of *Bacillus subtilis* on mechanical and self-healing properties in mortar with different crack widths and curing conditions. *Scientific Reports*, 13(1), 7844.
 - [43] A. Younis, U. Ebead, P. Suraneni, and A. Nanni, "Fresh and hardened properties of seawater-mixed

- concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 190, pp. 276–286, 2018.
- [44] H.-W. Song, S.-W. Pack, S.-H. Nam, J.-C. Jang, and V. Saraswathy, “Estimation of the permeability of silica fume cement concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 3, pp. 315–321, 2010.
 - [45] M. R. Akram and S. Raza, “Effect of micro silica and ggbs on compressive strength and permeability of impervious concrete as a cement replacement,” *Eur. Acad. Res.*, vol. 3, no. 7, pp., 7456–7468, 2015.
 - [46] Radhakumar, L., Murugan, S., & Sankaralingam, J. (2023). Comparative Study on the Strength Behavior of Self-Healing Concrete Using Silica Gel and Bacteria as Healing Agents. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(12), 04023483.
 - [47] Jahani, M. , Shahnoori, S. , Moradi, S. , Yazdani, M. and Ershadi, C. (2023). The Impact of Tidal Conditions, Supplementary Cementitious Material and Marine's Material on Some of Concrete's Durability Parameters. *Ferdowsi Civil Engineering*, 36(3), 63-82. doi: 10.22067/jfcei.2023.83067.1239
 - [48] Moharrer, A. , Peiravian, F. and Jahani, M. (2025). Experimental Investigation of the Thermo-Mechanical and Chemical Behavior of Mixed Portland Cement-Calcium Sulfoaluminate Mortar under Thermal Cycles. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 55(119), 87-96. doi: 10.22034/ceej.2025.67180.2435
 - [49] Asadzadeh, S. M. M., Baradaran, M., & Atefatdoost, G. R. (2026). Self-Healing Performance of Seawater Sea-Sand Concrete Incorporating Bacteria and Supplementary Cementitious Materials: Mechanistic Insights and Durability Enhancement. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-23.
 - [50] jahani, A. , raeesi estabragh, A. , jahani, M. and Vakili, G. (2024). Assessment of the effect of Ground Granulated Blast-furnace Slag (GGBS) and activated GGBS on stabilization of a clay soil contaminated with glycerol. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(11), 1647-1665. doi: 10.22059/ijswr.2023.365905.669583
 - [51] Baradaran, M., & Sadeghpour, M. (2023). Effect of bacteria on the self-healing ability of concrete containing zeolite. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(10), 256.
 - [52] Sadeghpour, M., & Baradaran, M. (2022). Effect of Sporosarcina bacteria and fly ash on concrete self-healing ability. *Concrete Research*, 15(3), 69-80.
 - [53] Jahani, M., Moradi, S., & Shahnoori, S. (2022, March). Long Term observations in an Experimental study on durability of a Sustainable Concrete Made with Sea-water and Sea-sand in Tidal Conditions. In *2nd International Conference of Circular Systems for the Built Environment (ICSBE): Advanced Technological and Social solutions for Transitions* (pp. 182-196). Technische Universiteit Eindhoven.
 - [54] Pilvar, A. , Ramezaniapour, A. A. and rajaie, H. (2017). Modified Electrical Conductivity Test Method for Evaluation Concrete Chloride Ion Permeability. *Ferdowsi Civil Engineering*, 30(2), 77-91. doi: 10.22067/civil.v29i2.48944
 - [55] Saadatkhosh, M. , Arezoumandi, M. and Afshar, S. (2020). An Experimental Study on Mechanical properties and Durability of Concrete with Recycled Aggregate Concrete and Zeolite. *Ferdowsi Civil Engineering*, 33(4), 15-32. doi: 10.22067/jfcei.2021.61272.0
 - [56] naderi, M. and Ghoddoosian, O. (2012). Assessing the Adhesion of Self-Compacting Concrete and Mortar Applied to Different Concrete surfaces, using twist-off and Friction-Transfer Methods, and its Estimation By Fuzzy Logic. *Ferdowsi Civil Engineering*, 23(1), 97-110. doi: 10.22067/civil.v23i1.12789
 - [57] jahani, A. , Raeesi Estabragh, A. , khajepour, H. and Amini, M. (2022). Comparison of the effect of Cement, Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS), and activated GGBS on stabilization of a clay soil. *Ferdowsi Civil Engineering*, 35(3), 89-106. doi: 10.22067/jfcei.2022.74908.1115