



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Page Journal: civil-ferdowsi.um.ac.ir



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of Iran

The Impact of Tidal Conditions, Supplementary Cementitious Material and Marine's Material on Some of Concrete's Durability Parameters

Research Article

Mohammad Jahani^{*1}, Shore Shahnoori², Saeed Moradi³, Mohammad Yazdani⁴, Cyrus Ershadi⁵

DOI: [10.22067/jfcej.2023.83067.1239](https://doi.org/10.22067/jfcej.2023.83067.1239)

1. Introduction

Although sea water (SW) and dredged marine sand (DMS) due to their vast scale resources, addressing numerous environmental concerns, and considering fresh water (FW) shortage crisis, have potential benefits to be widely used in marine concrete structures, the durability and service life of seawater-seasand concrete (SWSSC/SwC) structures exposed to marine environment strongly demand long-term field exposure research. Due to the presence of $MgCl_2$, $NaCl$, $CaCl_2$ salts in SW and DMS, slump is reduced, brittleness, and accordingly, compressive strength (CS) of concrete at early ages increase. While, in the long run, due to the chemical reaction between hydration products and sulfates, more ettringite are formed; so, considerable decrease in the mechanical properties and durability parameters of concrete happens.

Chemical impacts of SW as mixing water or curing water on hydration products of cement mainly attributes to micro-cracks formation due to crystallization pressure of existing salt, and could be intensified if concrete is affected by consecutive wet/dry cycles. In tidal conditions, consecutive dry/wet cycles, temperature and humidity gradients intensify over time the carbonation and diffusion of chlorides as well as sulfates ingress. By contrast, degradation mechanisms of tidal exposed concrete could be significantly suppressed by the addition of high reactive supplementary cementitious materials (SCMs) such as metakaolin (MK) and silica fume (SF), and industrial wastes like ground granulated blast furnace slag (GGBS), which can curb carbonation, chloride binding capacity, and sulfate resistance in cement matrix. Meanwhile, the effect of chloride attacks combined with carbonation leads to a higher corrosion rate. This combination causes the instability and the decomposition of Friedel's salt, and the decrease in chloride binding capacity in cement matrix. However, the desired physical properties of C-S-H also contributes to suppress chloride diffusion, and to physically increase chloride binding capacity. In the carbonation reaction, CO_2 reacts with calcium hydroxide and C-S-H, and forms $CaCO_3$, which is physically weaker than gel phases. The high concentration of CO_2 affects the pH or alkalinity of the cement paste which may be decreased from 12 to about 9 to 8, resulting in the dissolution of phases that

basically increase the chloride binding capacity. Moreover, the carbonation reaction in concrete composites exposed to unsaturated environments strongly depends on relative humidity (RH). Therefore, due to consecutive wet/dry cycles, tidal zone (RH: $80\pm 20\%$) has ideal conditions for severe carbonation reaction compared to other zones (submerged or atmospheric).

Furthermore, in sulfate-rich conditions, destructive sulfate attacks are associated with the expansive products such as ettringite (AFt) or gypsum. The pressure imposed by the growth of expansive crystals causes pore formation and micro-crack propagation, which can be diminished through applying fundamental alterations in mechanical and chemical properties of concrete by adding SCMs. This research focuses on suppressing the degradation mechanism of SwC exposed to a tidal zone of the Persian Gulf for 180 days.

2. Materials and method

The main materials used in this study were DMS, mineral aggregates, FW, SW, cement, MK, SF and GGBS which were used after determination of their main properties. A brief description is as follows:

Optimum percentage of DMS (25%) was replaced with mineral fine aggregates (#4>). SW was replaced with FW at w/c: 0.4 ratio. MK, SF and GGBS were replaced optimally with cement at 5%, 10%, and 15%, respectively. Two reference mixtures were designed for comparison: The First made with FW and mineral sand, and the Second made with SW and DMS, without any pozzolan. Samples were cured until 28-days of age in FW, then, transported to tidal zone and preserved for 180 days, as seen in Figure 1.

2. Experimental program

In order to evaluate some of durability parameters of tidal exposed samples, following tests were conducted: CS, Electrical Resistance (ER), Carbonation depth, permeability under pressured water, and SEM.

*Manuscript received June 25, 2023, Revised, July 15, 2023, Accepted September 17, 2023 .

1. Corresponding author. MSc in Marine Structures, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran. Email: Jahani.m.edu@gmail.com

2. Department of the Built Environment, Eindhoven University of Technology (TU Eindhoven), Eindhoven, Netherlands

3. The Persian Golf Branch, Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), Bandar Abbas, Iran

4. MSc in Marine Structures, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

5. Department of Civil Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Hormozgan, Iran



Figure 1. Tidal exposed samples

3. Results and discussion

Using SW and 25% DMS in the concrete mixture increased the 7-day CS of concrete by 6.8%, compared to the reference sample. The reason is the presence of chloride salts (Figure 2). Moreover, $MgSO_4$ in SW, formed expansive products in the cement paste, which in the early ages reduced the porosity, and resulted in the improvement of mechanical properties. The changes in the CS of the reference sample after 28 days of exposure to tidal conditions were more significant, indicating less porosity owing to the lesser formation of ettringite or gypsum. Morphologically, the cement paste made with SW formed a needle-shape texture, which reduced the effective contact surface with the aggregate in ITZ, and weak bonding with the aggregate in this section, which eventually led to the separation of the aggregate from the cement paste in the environmental pressures. $MgSO_4$ contributed to the formation of ettringite, which caused microcracks propagation and porous cement paste. Therefore, through these microcracks, capillary pores caused by the expansion of ettringite crystals, CO_2 penetrated into the concrete texture, causing carbonation to be progressed within concrete, and therefore, decrease in chloride binding capacity.

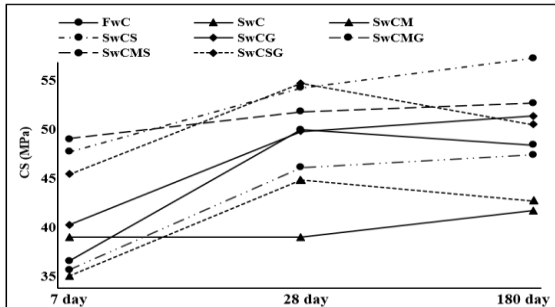


Figure 2. Compressive strength of samples

Having more than 90% SiO_2 in its chemical composition, SF dramatically improved mechanical and chemical properties of gel phases in cement matrix of SwC, and through filling the capillary pores, prevented the sulfate ingress and chloride diffusion and the formation of ettringite and microcracks propagation. Moreover, by forming a dense C-S-H with large specific area, SF suppressed the transfer of conductive ions, and (mainly) physically increased chloride binding capacity of SwC. SF contains small amounts of alumina (Al_2O_3 : 0.9) in its chemical compounds, therefore, SF could not chemically increase chloride binding capacity and mainly increased through gel phases. SF accelerated $Ca(OH)_2$ consumption and therefore, decreased alkalinity (pH) at the beginning of hydration. By preventing the formation of $Ca(OH)_2$, SF eventually caused less $CaCO_3$ formation at the presence of natural CO_2 in tidal conditions. Adding 10% SF to SwC caused reduction in the number and depth of pores as well as $Ca(OH)_2$ crystals and their rough edges in the concrete transition area. This indicates that

process of consumption (decomposition) of $Ca(OH)_2$ has been accelerated. Moreover, ITZ in the SF-mixed sample showed a coherent and dense texture of C-S-H, which can be due to the property of fineness, high source of SiO_2 , and reactivity of SF. The addition of 5% MK to SwC (SwCM) increased the CS by 14.8% at 28-days period, then experienced a 5% decrease at 180-days age. In this regard, the impact of MK on the SwC's CS is different and does not always have a stable or positive effect on concrete's physical properties in long-term exposure to harsh conditions. MK improved the chloride resistance of SwC at all measured ages (Figure 3). This is due to the filling properties of MK, as well as the presence of high amounts of alumina in its chemical composition ($Al_2O_3 > 40\%$), which has the ability to absorb and trap chloride ions. Therefore, MK has increased the chloride binding capacity of SwC primarily through chemical compounds, and then by increasing the specific surface area and density of the C-S-H.

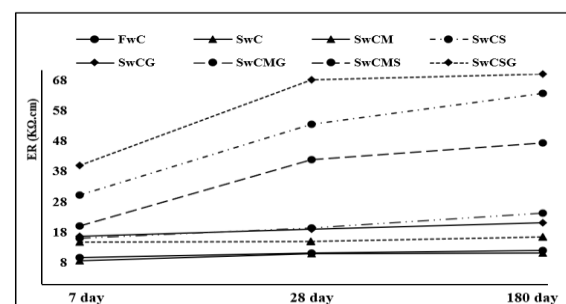


Figure 3. Electrical resistance of samples

GGBS had not significant impact on the CS of SwC at 7-day age. Generally, GGBS does not have a strong pozzolanic property and rapid reactivity, and therefore, should be "activated" with other pozzolans or additives. This issue is well displayed in the combination of SF and GGBS, and due to the addition of SF, GGBS was effectively activated and the CS of this combination increased. Moreover, the chemical compounds of GGBS cannot absorb chloride; therefore, GGBS primarily through physical properties of cement matrix curbed chloride diffusion. However, the high amount of lime in GGBS led to the formation of more calcium hydroxide and more reaction with sulfates, which eventually formed more cracks and capillary pores, by which the mobility of conductive ions was accelerated.


3. Conclusion

Using DMS and SW, due to chloride salts, improved mechanical properties (CS) of concrete about 6% at early ages, while, due to porosity caused by ettringite and gypsum, CS gradually decreased. MK formed C-S-H with relatively large specific area, and due to its high source of alumina increased the resistance of SwC in chloride-rich conditions, but in sulfate conditions mainly caused ettringite formation. Having high source of SiO_2 and reactivity, SF accelerated $Ca(OH)_2$ consumption, curbed carbonation and sulfate attacks, and through forming high dense C-S-H, physically increased chloride binding capacity and mechanical properties of SwC. Using 15% GGBS, despite the slight improvement of mechanical properties, due to the high source of CaO in, leads to the severe carbonation and expansive products formation caused by $MgSO_4$ attacks in marine environments. Thus, GGBS-mixed concrete in tidal conditions will not improve durability parameters.



اثر ناحیه جزرومدی، مکمل‌های سیمانی و مصالح دریایی بر برخی از پارامترهای دوام بتن*

مقاله پژوهشی

محمد جهانی^(۱)  شهره شاهنوری^(۲) سعید مرادی^(۳) محمد یزدانی^(۴) سیروس ارشادی^(۵)

DOI: 10.22067/jfeci.2023.83067.1239

چکیده استفاده از ماسه لایروبی شده و آب دریا در تولید بتن با توجه به منابع اولیه این مواد، عملاً در محیط‌های دریایی، جزایر و بنادر توجیه پذیرتر است. از طرفی، بررسی پارامترهای دوام سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی خصوصاً در شرایط جزرومدی بسیار حساس می‌باشد. بدلیل آنکه در این مناطق چرخه‌های متوالی خشک/مرطوب، گرادیان دما و رطوبت در طول زمان، روند کربناسیون و انتشار یون‌های رسانی را تشدید، و نهایتاً زوال فیزیکی و شیمیایی بتن را تسریع می‌کند. هدف این تحقیق بررسی تاثیر پوزولان‌های متاکائولن، دوده سیلیس و سرباره کوره ذوب آهن بر خواص مکانیکی و ریز ساختار بتن ساخته شده از ماسه و آب دریا در شرایط جزرومدی می‌باشد. نتایج نشان داد که استفاده از آب و ماسه دریا در بتن، به دلیل حضور نمک‌های کلرید و همچنین پرشدن خلل و فرج توسط اترینگایت ناشی از حمله سولفات‌ها، بهبود ۶/۸٪ خواص مکانیکی در سنین اولیه را به دنبال داشت، ولی پس از آن افت چشمگیری را تجربه کرد. دوده سیلیس به دلیل منبع بالای SiO_2 و همینطور واکنش پذیری بالا، با تسریع روند مصرف کلسیم هیدروکسید، ضمن جلوگیری از پیشروی کربناسیون، باعث تشکیل ژل کلسیم-سیلیکات-هیدرات متراکم با سطح مخصوص بالا در ریز ساختار ناحیه انتقال بتن ساخته شده از آب و ماسه دریا شد. همچنین در حضور سولفات منیزیم، دوده سیلیس بهتر از سرباره و متاکائولن، از تشکیل اترینگایت و نهایتاً گسترش حفرات و ریز ترک‌ها جلوگیری کرد.

واژه‌های کلیدی دوام بتن، خواص مکانیکی، ریز ساختار بتن، ماسه لایروبی شده، شرایط جزرومدی.

Effect of Tidal conditions, Supplementary Cementitious Material and Marine's Material on Some of Concrete Durability Parameters

Mohammad Jahani Shore Shahnoori Saeed Moradi, Mohammad Yazdani Cyrus Ershadi

Abstract The use of dredged-marine-sand and seawater for concrete production is practically more justified in marine environments due to the primary sources of these materials. Also, it is very crucial to examine the durability parameters of concrete structures in marine environments, especially in tidal conditions, because in these area, consecutive dry/wet cycles, temperature and humidity gradients over time, intensify carbonation and diffusion of conductive ions, therefore physical and chemical deterioration accelerated accordingly. The aim of this research is to investigate the effect of metakaolin, silica fume, and slag on the mechanical properties and microstructure Seawater-seasand concrete in tidal conditions. The results showed that the use of seawater and sand in concrete, due to the presence of chloride ions as well as the filling of voids by ettringite caused by the sulfates attacks, led to the improvement of mechanical properties in the early ages, but after that, a significant drop was occurred. Due to the high source of SiO_2 and its high reactivity, silica fume accelerated the consumption of calcium hydroxide, prevented carbonation progress, and formed a dense calcium-silicate-hydrate gel in the microstructure of Seawater-seasand-concrete, and in the presence of magnesium sulfate, better than slag and metakaolin, prevented the formation of ettringite and therefore, propagation of pores and microcracks.

Key Words Durability of concrete, Mechanical properties, Concrete microstructure, Dredged marine sand, Tidal conditions.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۴/۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۵/۱۴ می‌باشد.

Email: Jahani.m.edu@gmail.com

(۱) نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان

(۲) مدرس و محقق دانشکده ساختمان، دانشگاه صنعتی آینده‌ون - هلند

(۳) کارشناس راه و ساختمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی واحد بندرعباس

(۴) کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان

(۵) هیئت علمی گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان

مقدمه

در مناطق جزر و مدی، عمر مفید سازه‌های بتنی شدیداً به پارامترهای دوام و تعامل مکانیسم‌های شیمیایی و خواص فیزیکی آنها وابسته است. در این مناطق، انتقال یون‌های کلرید تحت تأثیر گرادیان دما و رطوبت، زوال فیزیکی و شیمیایی سازه‌های بتنی را در طول زمان تسریع می‌کند. همچنین، بتن در این مناطق، خواص مکانیکی بیشتری را نسبت به شرایطی که در مدت مشابه در معرض شرایط اتمسفری، غوطه‌وری (غرقابی) یا عمل‌آوری مرطوب قرار می‌گیرد، از دست می‌دهد [1]. به طور کلی، بتن غوطه‌ور در آب دریا عمدتاً به واسطه‌ی واکنش‌های شیمیایی ناشی از حملات یون‌های موجود، صدف‌ها و میکروارگانیزم‌ها آسیب می‌بیند، اما اثرات مخرب شرایط جزر و مدی بر بتن شامل حمله یون‌های رسانی (کلریدها و سولفات‌ها)، کربناسیون، میکروارگانیزم‌ها و آسیب فیزیکی ناشی از گرادیان دما و رطوبت و همچنین فشار اعمال شده توسط امواج نیز می‌باشند. [2], [3].

استفاده از منابع دریایی مانند ماسه لایروبی شده و آب دریا در صنایع ساخت و ساز مخصوصاً بتن، با توجه به منابع اولیه مواد خام آن، عملاً در جزایر و بنادر توجیه پذیرتر است. از این رو، پارامترهای دوام (خواص مکانیکی و شیمیایی) بتن ساخته شده از ماسه لایروبی شده و آب خلیج فارس در مناطق دریایی باید از طریق آزمایش‌های میدانی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. ماسه لایروبی شده دریا از جمله منابع فراوانی است که به کارگیری آن نه تنها موجب مدیریت حجم وسیعی از سنگدانه‌های لایروبی و دپو شده در ساحل، و احیای زمین‌های با ارزش ساحلی می‌گردد، بلکه منجر به لایروبی مداوم کریدورهای دریایی و تسهیل در شرایط عبور و مرور کشتی‌های تجاری و ماهی‌گیری شده و همچنین از تشکیل ریزگردهای حاصله از وزش باد نیز جلوگیری می‌کند [4]. منشأ زیست‌شناسی ماسه دریا شبیه منشأ ترکیباتی است که به عنوان سنگدانه رودخانه‌ای (معدنی) در بتن استفاده می‌شوند، و تفاوت اصلی بین ماسه معدنی با ماسه دریا، علاوه بر ابعاد، وجود مواد ارگانیک، نمک‌ها و صدف‌ها هستند [3].

یکی از نگرانی‌های مهم در حال حاضر در رابطه با مصرف ماسه دریا، وجود نمک‌های کلرید در آن است که میبایست به عنوان یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر دوام و عمر مفید و بلندمدت سازه‌های بتنی مدنظر قرار گیرد. از طرفی، دانه‌بندی

یکنواخت ماسه دریا در صورت استفاده بیش از مقدار بهینه، ممکن است ساختار، یکپارچگی و اسکلت‌بندی بتن را تحت تأثیر قرار دهد [5]. در مناطق ساحلی و بنادر، استفاده از آب و ماسه لایروبی شده، با توجه به دسترسی آسان و عدم صرف هزینه‌های اضافی، اقتصادی، و در آینده‌ای نه چندان دور با وجود بحران کمبود آب شیرین اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد [4], [3]. از طرفی، استفاده از آب دریا در مخلوط بتن نیازمند اقداماتی به منظور کنترل رفتار مخرب آب دریا بر فاز عمل‌آوری و نفوذپذیری بتن بوده که نیازمند انجام آزمایشات گسترده در زمینه دوام و پایایی آن می‌باشد. مهم‌ترین تفاوت آب دریا با آب شرب، وجود نمک و سایر املاح است که عموماً میزان نمک آن $3/5\%$ و ترکیبات اصلی آن نیز شامل کلریدهای سدیم و پتاسیم، سولفاتهای سدیم، کلسیم و منیزیم و آهن است [6]. این املاح می‌توانند ضمن افزایش خلل و فرج در بلندمدت در بافت بتن، فاز عمل‌آوری شدن و میزان نفوذ کلرید را تحت تأثیر قرار دهند [7]. بررسی تحقیقات انجام شده در رابطه با تأثیر آب دریا بر خصوصیات مکانیکی بتن غیرمسلح نشان می‌دهد که آب دریا به دلیل دارا بودن نمک‌های $MgCl_2$, $NaCl$, $CaCl_2$ ، باعث کاهش اسلامپ، گیرش سریع‌تر، ترد شدگی بیشتر (در حالت بتن سخت شده) و نهایتاً افزایش مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه می‌شود، اما در بلندمدت به دلیل اثر یون‌های خورنده مانند سولفات‌ها و ایجاد تخلخل بیشتر، شاهد افت پارامترهای دوام و خواص مکانیکی این نوع بتن خواهیم بود [9], [8], [3]. استینور نیز نشان داد که در ابتدا مقاومت فشاری نمونه‌های بتن معمولی (بتن ساخته شده با ماسه معدن)، کمتر از مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با آب دریا بودند، ولی پس از گذشت زمان، مقاومت فشاری بتن ساخته شده با آب دریا حدود $8-15\%$ کمتر از مقاومت فشاری بتن معمولی بود [7]، که این موضوع به دلیل کاهش نسبی تخلخل در کوتاه مدت می‌باشد [8]. از طرفی، تأثیر یون‌های کلرید در ترکیب با کربناسیون، منجر به نرخ خوردگی بالاتری می‌شود، از این رو، بررسی تأثیر یون‌های کلرید علاوه بر بتن‌های مسلح به میلگردهای فولادی، در موارد حضور CO_2 نیز ضروری به نظر می‌رسد. این ترکیب در درجه اول باعث ناپایداری نمک فرایدل (Friedel's salt) می‌شود که با انتشار بعدی کلریدها در بافت بتن، منجر به تجزیه آن می‌شود و در نهایت ظرفیت اتصال کلرید (Chloride binding capacity)

به عنوان یکی از مخرب‌ترین سولفات‌ها در محیط‌های دریایی در نظر گرفته می‌شود.

تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن مقادیری از پوزولان‌های سیمانی (درصد بهینه)، منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی بتن در بلندمدت و کوتاه‌مدت شده و به میزان چشمگیری باعث تثبیت و یا حتی بهبود پارامترهای دوام (خواص فیزیکی و شیمیایی) در شرایط سولفاتی و کلریدی می‌گردد [18]-[13], [4], [3]. به عنوان مثال، متاکائولن یک پوزولان طبیعی مبتنی بر سیلیس و از کلاس N است که به دلیل حضور منبع غنی SiO_2 و Al_2O_3 در ترکیبات شیمیایی خود می‌تواند خواص فیزیکی و شیمیایی ماتریس سیمان را بهبود بخشد. دوده سیلیس به عنوان یک پوزولان ریزدانه با واکنش پذیری بالا و تصفیه‌کننده ساختار منافذ، ضمن داشتن ۹۰٪ SiO_2 ، خواص فیزیکی بتن را بهبود می‌بخشد [19]. سرباره کوره ذوب آهن (GGBS) (Ground granulated blast furnace slag)، به عنوان یک محصول جانبی و ضایعاتی، به دلیل حضور منابع بیشتر آهک (CaO) در ترکیبات شیمیایی خود در مقایسه با متاکائولن و دوده سیلیس، قلیابیت بالاتری دارد که باعث واکنش پذیری کم با رطوبت، به ویژه در کوتاه مدت می‌شود. بنابراین، خواص مکانیکی بتن حاوی سرباره در سنین اولیه باید توسط یک فعال‌کننده مانند اکسید منیزیم یا دوده سیلیس بهبود یابد [20] و [21].

با بررسی منابع گذشته مشاهده شد که استفاده از این مصالح دریایی (ماسه لایروبی شده و آب دریا) به دلیل وجود منابع یون-های کلرید و سولفات، دوام بتن را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. به علاوه، محققان نشان دادند ترکیبات شیمیایی سیمان که حاوی میزان زیادی آهک است، مکانیزم‌های فرسایش این نوع بتن را تشدید می‌کند که در این خصوص افزودن پوزولان‌هایی به منظور کاهش سیمان مصرفی و تغییر خواص شیمیایی و فازهای هیدراسیون و عمل‌آوری بتن را پیشنهاد دادند. بنابراین، توسعه‌ی دامنه‌ی تحقیقات در رابطه با بهبود دوام این نوع بتن، مخصوصاً در محیط‌های دریایی، با در نظر داشتن مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی اشاره شده، و همچنین محدودیت‌های تامین مصالح در جزایر و مناطق دریایی برای تولید بتن، راه حل کاربردی به نظر می‌رسد که نیازمند تحقیقات گسترده و آزمایش-های میدانی می‌باشد. لذا ضروری است با جایگزینی مقادیر بهینه مصالح پوزولانی با ترکیبات شیمیایی مختلف با هدف تغییر

ماتریس خمیر سیمان کاهش پیدا می‌کند [10]. با کاهش ظرفیت اتصال کلرید خمیر سیمان، کلریدهای آزاد در خمیر سیمان پخش شده و به سمت میلگردها حرکت می‌کنند که منجر به خوردگی آنها و نهایتاً کاهش عمر مفید سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی می‌شوند. البته، خواص فیزیکی مطلوب فازهای ژلی مانند C-S-H نیز بر نرخ انتشار این یون‌ها موثر است. در واکنش کربناسیون، CO_2 با برخی از قسمت‌های جامد محصولات هیدراتاسیون مواد سیمانی به عنوان مثال هیدروکسید کلسیم و C-S-H واکنش می‌دهد و باعث تشکیل کلسیت و نهایتاً پیشروی کربناسیون در بافت می‌شود [11]. غلظت بالای CO_2 بر pH یا قلیابیت خمیر سیمان تأثیر می‌گذارد و ممکن است از ۱۲ به حدود ۹ الی ۸ کاهش یابد که حل شدن فازهای افزایش دهنده‌ی ظرفیت اتصال کلرید (مانند نمک فریدل و نمک کوزل (Kuzel's salt)) را به دنبال خواهد داشت [10]. همچنین، واکنش کربناسیون در کامپوزیت‌های سیمانی و بتنی در معرض محیط‌های غیر اشیاع، شدیداً به رطوبت نسبی بستگی دارد و رطوبت نسبی کم یا زیاد به شکلی موثر از آزاد شدن کلریدهای متصل شده جلوگیری می‌کند [11]. لازم به ذکر است که کلریدهای متصل شده (Bound chlorides) (به دام انداخته شده) توسط فازهای ژلی یا فازهای آلومینا، توانایی جدا شدن از این فازها و پیشروی به عمیق بتن (میلگردهای فولادی) را ندارند. بنابراین، شرایط جزر و مدی، و رطوبت نسبی ۸۰±۲۰٪، و با توجه به چرخه‌های تر/خشک متوالی، رطوبت نسبی ایده آل‌تری برای وقوع کربناسیون شدید و خوردگی بیشتر ناشی از حملات یون کلرید در مقایسه با سایر مناطق (غوطه‌ور یا اتمسفری) را دارد [3].

به طور کلی، در محیط‌های دریایی، نرخ زوال بتن‌هایی که تماماً از سیمان ساخته شده‌اند، می‌تواند به میزان پرتلندپته یا هیدروکسید کلسیم مرتبط باشد که آسیب پذیرترین محصول هیدراسیون سیمان در برابر حملات سولفات است [12]. در محیط‌های دریایی، حملات مخرب سولفات عمدتاً به محصولات هیدراسیون منبسط شونده مانند اترینگایت و Ca(OH)_2 و یا بعضاً دولومیت (Dolomite) یا فازهای آلومینا (Alumina) (Al_2O_3) نسبت داده می‌شود. در موارد حضور سولفات‌ها، فشار ناشی از رشد کریستال‌های منبسط شونده باعث تشکیل منافذ و گسترش ریزترک‌ها شده، و نهایتاً منجر به جذب آب در محیط‌های قلیایی می‌شود [3]، که معمولاً در این بین، اثر سولفات منیزیم (MgSO_4)

خواص بنیادی بتن (مکانیکی و شیمیایی)، و کنترل مکانیزم‌های فرسایشی بتن در محیط‌های دریایی، دوام و عمر مفید سازه‌های بتنی در این مناطق را بهبود بخشید.

هدف انجام این پژوهش به طور خلاصه شامل موارد زیر می‌شود:

۱. ارزیابی اثربخشی پوزولان‌های متاکائولن، دوده سیلیس و سرباره کوره‌ذوب آهن در بهبود مقاومت فشاری، ریز ساختار و تخلخل بتن ساخته شده از آب و ماسه خلیج فارس در شرایط جزرومدی.

۲. ارزیابی تاثیر پوزولان‌های متاکائولن، دوده سیلیس و سرباره کوره‌ذوب آهن بر پی‌شروی واکنش کربنات سیون و نرخ حرکت یون‌های رسانی (مانند کلرید و سولفات) در بافت بتن، و تشکیل فازهای حجیم شونده (مانند اترینگایت و گچ) ناشی از حمله سولفات منیزیم.

۳. توسعه رویکرد علمی و کاربردی به منظور استفاده از آب و ماسه لایروبی شده خلیج فارس در تولید بتن غیر مسلح با دوام و سازگار در محیط‌های دریایی.

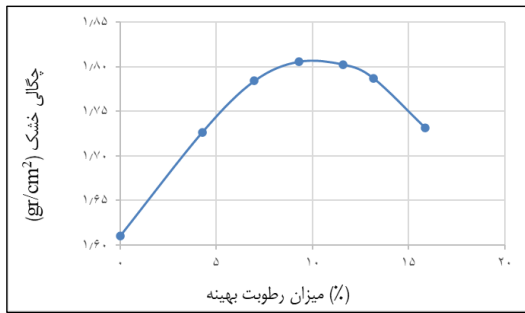
۴. جایگزینی آب دریا با آب شرب در تولید بتن غیر مسلح، و مقابله با بحران کمبود آب آشامیدنی
 ۵. کاهش آلودگی زیست‌محیطی ناشی از ریزگردهای حاصله از دپوهای گسترده ماسه لایروبی شده در حاشیه‌ی سواحل

مصالح مصرفی و برنامه آزمایشگاهی

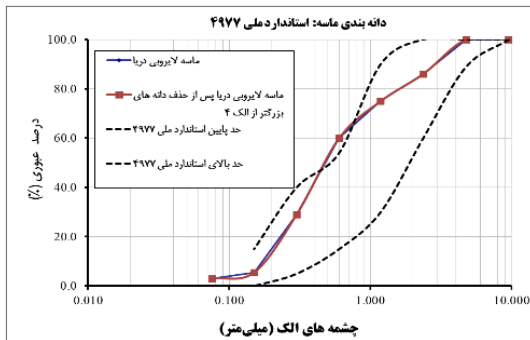
مصالح مصرفی

سنگدانه

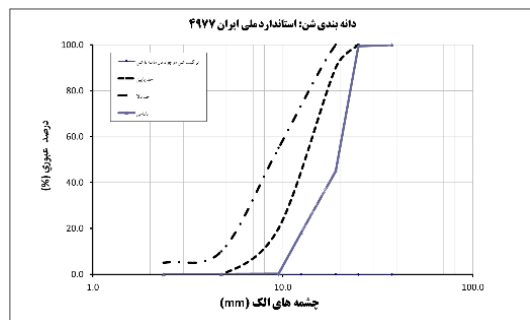
سنگدانه‌های استفاده شده در این تحقیق شامل درشت‌دانه معدنی مستخرج از معدن میناب (۷۶-۴/۱۹ میلیمتر)، ریزدانه معدنی (۴/۷۶ میلیمتر)، ماسه لایروبی شده دریا (۴/۷۶ میلیمتر)، حاصل از عملیات لایروبی فاز سوم بندر شهید رجایی در استان هرمزگان می‌باشند. منحنی رطوبت بهینه ماسه دریا در شکل (۱)، و منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۲) نشان داده شده است. مقادیر فلزات سنگین موجود در ماسه دریا در جدول (۱)، مشخصات و ترکیبات شیمیایی مصالح سیمانی و سنگدانه‌های مصرفی نیز در جدول (۲) ارائه شده است.



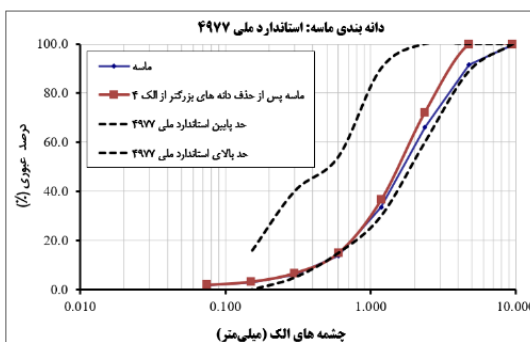
شکل ۱ منحنی رطوبت بهینه ماسه خلیج فارس



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی؛ (الف) ماسه خلیج فارس، (ب) شن معدنی، (ج) ماسه معدنی

جدول ۱. 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 | | |

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سنگدانه‌ها و مصالح پوزولانی

| سرباره | دوده سیلیس | متاکائولن | سیمان | شن معدن | ماسه معدن | ماسه دریا | اکسید (%) |
|--------|------------|-----------|-------|---------|-----------|-----------|--------------------------------|
| ۳۶/۵ | ۹۲ | ۵۱ | ۲۱ | ۱۲/۰۵ | ۳/۸ | ۱۳/۵ | SiO ₂ |
| ۱۲/۵ | ۰/۹ | ۴۱/۱ | ۵ | ۲/۰۵ | ۱/۲ | ۲/۵۵ | Al ₂ O ₃ |
| ۳۸/۱ | ۱ | ۱/۴۶ | ۶۴ | ۳۹/۰۵ | ۴۵/۱ | ۳۹/۸ | CaO |
| ۹/۶ | ۱/۲۵ | ۰/۰۵ | ۲ | ۵/۳۱ | ۱۰/۲ | ۲/۹۵ | MgO |
| ۰/۴۵ | ۰/۴ | ۰/۰۱ | ۰/۴ | ۰/۳۷ | ۰/۲۵ | ۰/۷۵ | Na ₂ O |
| ۰/۷۵ | ۰/۳ | ۰/۰۴ | ۰/۶ | ۰/۳ | ۰/۱۶ | ۰/۵۳ | K ₂ O |
| ۰/۶۵ | - | ۰/۱۲ | ۲ | ۰/۲۷ | ۲/۳۵ | ۰/۶۱ | SO ₃ |
| ۰/۳۵ | ۰/۸ | - | ۰/۷۵ | ۱/۹ | ۰/۹۲ | ۲/۶۲ | Fe ₂ O ₃ |
| - | - | - | - | ۰/۰۳ | ۰/۰۷ | ۰/۸ | Cl |

این مواد در جدول (۳)، و مشخصات شیمیایی آنها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی پوزولانها

| پوزولان | LOI (%) | وزن مخصوص (gr/cm ³) | سایز دانه (μm) | سطح مخصوص (m ² /gr) |
|-----------|---------|---------------------------------|----------------|--------------------------------|
| | | | | |
| سرباره | ۰/۱۹ | ۲/۷۴۵ | ۵۰-۱۰ | ۰/۲۲ |
| متاکائولن | ۱ | ۲/۶ | ۲-۱ | ۲/۲ |

ساخت نمونه‌ها و برنامه‌ی آزمایشگاهی ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

در این تحقیق تمامی نمونه‌های مکعبی بتن، به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلیمتر ساخته شده و در شرایط ایده‌آل آزمایشگاهی در دمای ۲۶°C و میانگین رطوبت محیطی ۶۸٪ به دو صورت: ۱- مرطوب: با استفاده از پوشش کتانی خیس بر روی آزمون‌های قالب‌گیری شده به مدت ۲۴ ساعت و ۲- غرقاب، در سنین ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند (شکل ۳). سپس آزمون‌ها به شرایط جزرومدی در خلیج فارس (خط ساحل)

آب مصرفی و فوق روانکننده

در این تحقیق آب شرب شهر بندرعباس به عنوان آب طرح اختلاط آزمون شاهد FwC (آب شرب + ماسه معدن) مورد استفاده قرار گرفته است. آب خلیج فارس نیز به عنوان آب طرح اختلاط آزمون شاهد SwC (آب دریا + ۲۵٪ ماسه ماسه لایروبی شده) در نظر گرفته شد که حاوی منیزیم: ۱۶۰۰، کلسیم: ۴۸۰، سدیم: ۱۲۶۰۰، پتاسیم: ۴۸۰، سولفات: ۳۳۰ و کلرید: ۲۳۴۰۰ (ppm) می‌باشد. فوق روان‌کننده مورد استفاده در این تحقیق PC-۵۰۰۰، بصورت مایع و قهوه‌ای رنگ، با دانسیته ۱/۲ کیلوگرم بر لیتر و تهیه شده از شرکت رزین سازان فارس می‌باشد که بر پایه پلیمرهای نفتالین‌های سولفات تولید شده است.

مصالح سیمانی

در این تحقیق سیمان پرتلند تپ ۲، متاکائولن، دوده سیلیس و سرباره کوره ذوب آهن به عنوان مواد سیمانی مورد استفاده قرار گرفته است که به ترتیب از کارخانه سیمان هرمزگان (بندر خمیر)، شرکت جهان پودر دلجان، کارخانه فروآلیاژ ایران و کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه گردیده‌اند. مشخصات فیزیکی

رطوبت نسبی سنگدانه‌ها، مطابق ASTM C56 [22] و همچنین چگالی مصالح و میزان جذب آب آنها بر اساس ASTM C128-15 [23] تعیین و پس از اصلاح طرح اختلاط، مصالح مجدداً توزین و مخلوط شدند. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های فوق در جدول (۴) نمایش داده شده است. آزمایش اسلامپ بر روی تمامی طرح اختلاط‌های بتن تازه، طبق استاندارد ASTM C143 [24] انجام و در حدود ۱۰۰-۱۵۰ mm اندازه‌گیری شدند.

منتقل، و به مدت ۶ ماه نگهداری و پایش شدند (شکل ۴). الگوریتم روش تحقیق حاضر نیز در شکل (۵) ارائه شده است. در این تحقیق کلیه طرح اختلاط‌ها با نسبت آب به سیمان ۰/۴ ساخته شدند که مجموعاً شامل ۸ طرح اختلاط می‌باشند. دو نمونه طرح اختلاط شاهد، ۱: آب شرب و ماسه معدن، ۲: شامل آب دریا و ماسه لایروبی شده، فاقد هرگونه افزودنی پوزولانی در نظر گرفته و ساخته شدند. همچنین دمای بتن تازه حدود $^{\circ}\text{C}$ ۳۲-۲۷ اندازه‌گیری شد. در هر مرحله از ساخت نیز ابتدا درصد



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۳ نمونه‌های بتنی ساخته شده با آب دریا؛ (الف) قالب‌گیری آزمونه‌ها، (ب) اثرات چشمی استفاده از آب دریا به عنوان آب اختلاط بر بتن تازه، (ج) عمل‌آوری آزمونه‌ها در حوضچه آب شرب تا سن ۲۸ روز

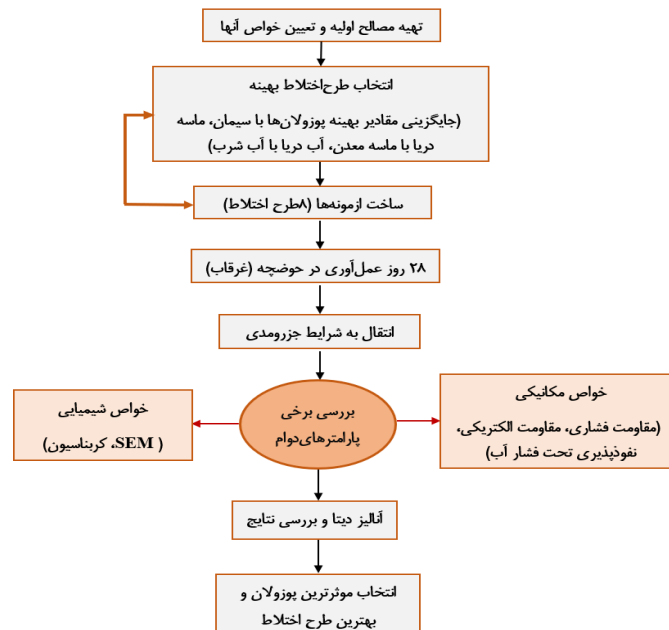


(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۴ نمونه‌ها در شرایط جزرومدی خلیج فارس هنگام جزر، (ب) نمونه‌های بتنی در سواحل خلیج فارس هنگام مد، (ج) پوسته‌ها، صدف‌ها و میکروارگانیسم‌ها رشد کرده بر سطوح نمونه‌های بتن پس از ۶ ماه



شکل ۵ الگوریتم روش انجام تحقیق

جدول ۵ معرفی ترکیب‌های مورد بررسی

| کد نمونه | w/cm | آب شرب (kg/m ³) | آب دریا (kg/m ³) | شن معدنی (%) | ماسه معدنی (%) | ماسه دریا (%) | سیمان (kg/m ³) | متاکائولن (kg/m ³) | دوده سیلیس (kg/m ³) | سرباره (kg/m ³) | اسلامپ (mm) |
|----------|------|-----------------------------|------------------------------|--------------|----------------|---------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------|
| FwC | ۰/۴ | ۱۶۰ | - | ۴۵ | ۵۵ | ۰ | ۴۰۰ | - | - | - | ۱۲۰ |
| SwC | ۰/۴ | - | ۱۶۰ | ۴۵ | ۴۱/۲۵ | ۱۳/۷۵ | ۴۰۰ | - | - | - | ۱۲۰ |
| SwCM | ۰/۴ | - | ۱۶۰ | ۴۵ | ۴۱/۲۵ | ۱۳/۷۵ | ۳۸۰ | ۲۰ | - | - | ۱۲۰ |
| SwCS | ۰/۴ | - | ۱۶۰ | ۴۵ | ۴۱/۲۵ | ۱۳/۷۵ | ۳۶۰ | - | ۴۰ | - | ۱۲۰ |
| SwCG | ۰/۴ | - | ۱۶۰ | ۴۵ | ۴۱/۲۵ | ۱۳/۷۵ | ۳۴۰ | - | - | ۶۰ | ۱۲۰ |
| SwCMS | ۰/۴ | - | ۱۶۰ | ۴۵ | ۴۱/۲۵ | ۱۳/۷۵ | ۳۴۰ | ۲۰ | ۴۰ | - | ۱۰۰ |
| SwCMG | ۰/۴ | - | ۱۶۰ | ۴۵ | ۴۱/۲۵ | ۱۳/۷۵ | ۳۲۰ | ۲۰ | - | ۶۰ | ۱۲۰ |
| SwCSG | ۰/۴ | - | ۱۶۰ | ۴۵ | ۴۱/۲۵ | ۱۳/۷۵ | ۳۰۰ | - | ۴۰ | ۶۰ | ۱۱۰ |

گردد. در مطالعات صورت گرفته بر روی سازه‌های در معرض خوردگی مشخص شده که رابطه‌ی نزدیکی بین سرعت خوردگی و مقاومت الکتریکی بتن وجود دارد، در همین راستا ACI 222 استاندارد جهت تفسیر نتایج مقاومت الکتریکی و تخمین کیفیت بافت بتن ارائه کرده است که در جدول (۶) نشان شده است و همچنین به عنوان معیار بررسی نتایج آزمایش در این تحقیق در نظر گرفته شده است. به طور کلی این آزمایش، مقاومت بافت بتن در برابر حرکت، نفوذ و پخش یون‌های رسانا مانند کلرید و سولفات را مورد بررسی قرار می‌دهد. لازم به ذکر است که نفوذ و پخش این یون‌ها درون بافت بتن از دو طریق کنترل می‌گردد: (۱) فیزیکی: خواص فیزیکی مطلوب فازهای ژلی مانند C-S-H که یونها را به دام می‌اندازند و از حرکت و انتشار آنها جلوگیری می‌کنند، (۲) شیمیایی: وجود فازهای آلومینا و به طور کلی ترکیبات حاوی آلومینیوم که حرکت یون‌های کلرید را مختل می‌کنند و اصطلاحاً به صورت شیمیایی باعث افزایش ظرفیت اتصال کلرید خمیر سیمان می‌گردند.

جدول ۶ ارتباط بین نرخ خوردگی و نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

| نرخ خوردگی | قاومت الکتریکی kΩ/cm |
|------------|-------------------------|
| کم | >۲۰ |
| متوسط | ۲۰-۱۰ |
| زیاد | ۱۰-۵ |
| خیلی زیاد | <۵ |

در این تحقیق از مقادیر بهینه پوزولان‌ها شامل: دوده سیلیس ۱۰٪ [3]، سرباره ۱۵٪ [5]، و متاکائولن ۵٪ وزنی سیمان با عیار (۴۰۰ kg/m³) [25]، جایگزین سیمان شدند تا تاثیر هر یک به صورت دقیق بر خواص مکانیکی و ریزساختار بتن ساخته شده از ماسه لایروبی شده و آب دریا ارزیابی گردد. درصد بهینه ماسه لایروبی شده به میزان ۲۵٪ وزن مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) می‌باشد [3-5]. ترکیب‌های مورد بررسی و کد آنها، به همراه نسبت‌های اختلاط مصالح و افزودنی‌ها و نسبت آب به مواد سیمانی (w/cm)، و میزان اسلامپ آنها در جدول (۵) ارائه شده است.

برنامه‌ی آزمایشگاهی

مقاومت فشاری بتن. آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد BS 1881 [26] بر روی آزمون‌هایی ۷ و ۲۸ روز بصورت غرقاب عمل‌آوری شده، و آزمون‌هایی ۱۸۰ روز قرار گرفته در شرایط جزرومدی، انجام شد.

مقاومت الکتریکی ویژه بتن. آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی آزمون‌های ۷ و ۲۸ روز بصورت غرقاب عمل‌آوری شده، و آزمون‌های ۱۸۰ روزه جزرومدی مطابق با استاندارد ACI 222 [27] به روش ۴ نقطه‌ای Wenner انجام شد. در این روش از چهار نقطه استفاده می‌شود که با سطوح نمونه در تماس هستند، سپس یک جریان برق متناوب بین الکترودها برقرار می‌شود، و اختلاف پتانسیل (V) بین الکترودها اندازه‌گیری می‌شود.

یکدیگر، در ساختار بتن و حتی بررسی محصولات نهایی فرآیند هیدراسیون در بتن استفاده می‌شود. میکروسکوپ اسکنر الکترونی استفاده شده در این تحقیق مدل Tescan vega ساخت کشور جمهوری چک بوده و تصاویر با دقت ۱۰ هزار برابری اندازه‌گیری شدند.

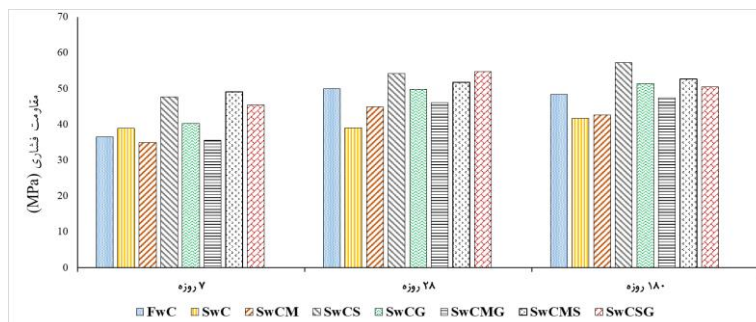
نتایج و بحث مقاومت فشاری بتن

استفاده از آب دریا و ۲۵٪ ماسه لایروبی شده خلیج فارس در مخلوط بتن (جایگزین ماسه معدن)، مقاومت فشاری ۷ روزه بتن را در مقایسه با نمونه شاهد به میزان ۶/۸٪ افزایش داده است، که این افزایش مقاومت به دلیل حضور نمک‌های کلرید ($MgCl_2$, $NaCl$, $CaCl_2$) است که فاز عمل‌آوری و گیرش بتن را تسریع می‌کنند (شکل ۶) [30]. همچنین وجود سولفات منیزیم در آب دریا باعث تشکیل گسترده‌تر محصولات منبسط شونده (مانند اترینگایت) در خمیر سیمان شده که در سنین اولیه تخلخل را کاهش می‌دهند و به همین دلیل باعث بهبود نسبی خواص مکانیکی شده‌اند [30]. بررسی نتایج نشان می‌دهد مقاومت فشاری بتن SwC، پس از سن ۷ روزگی، افزایش قابل توجهی را تا سن ۱۸۰ روز تجربه نکرده است، که این تثبیت ناشی از افزایش حجم محصولات منبسط شونده در خمیر سیمان (افزایش ریزترک‌ها و حفرات) در سنین اولیه، و در طرف مقابل، هیدراسیون کامل مصالح سیمانی در محیط مرطوب و گیرش نهایی بتن بوده است. تغییرات مقاومت فشاری در نمونه شاهد پس از ۲۸ روز قرارگیری در شرایط جزرومدی چشمگیرتر بوده است که نشان‌دهنده تخلخل کمتر، به واسطه عدم تشکیل بیش از حد اترینگایت و گچ ناشی از حضور سولفات‌ها بوده است [3].

نفوذپذیری بتن تحت فشار آب. این آزمایش، عمق نفوذ آب در نمونه‌ها تحت فشار آب را اندازه‌گیری می‌کند که شدیداً وابسته به توزیع خلل و فرج، ریزترک‌ها و حفرات مویینه انتقال رطوبت و میزان پیچیدگی اتصالات آنها با یکدیگر می‌باشد. این آزمایش بر روی نمونه‌های بتنی با سن ۲۸ روز بر اساس استاندارد BS EN 12390-8 [28] انجام شد. نمونه‌ها پس از انجام آزمایش، از مرکز آن به دو نیم تقسیم شدند تا حداکثر میزان عمق نفوذ آب در بتن اندازه‌گیری گردد.

عمق کربناسیون بتن. فنل فتالین (تولید شرکت مرک، آلمان) با غلظت ۱٪ (محلول در الکل) بر روی سطح داخلی آزمونه‌ی دو نیم شده اسپری گردید تا عمق کربناسیون آزمونه‌ها پس از خشک شدن سطوح، مشاهده و اندازه‌گیری شود [29]. نتایج این آزمایش به طور کلی به سه ناحیه: ۱- کربناته نشده (رنگ قرمز-صورتی)، ۲- نیمه کربناته یا نسبتاً کربناته شده (صورتی روشن)، ۳- کربناته شدید (بدون رنگ) تقسیم می‌شود. pH این نواحی از ۱۲ (در مناطق قرمز رنگ) تا حدود ۸ (کربناته شدید) متغیر است که عمدتاً به علت میزان هیدروکسید کلسیم موجود در ماتریس خمیر سیمان بوده است. حداکثر فاصله از لبه در هر طرف نمونه‌ها تا منطقه کربناته شدید با استفاده از کولیس (با دقت ۱ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد و میانگین چهار فاصله اندازه‌گیری شده، به عنوان عمق کربناسیون آزمونه در نظر گرفته شد.

بررسی ریزساختار بتن (SEM). ریزساختار بتن سخت شده توسط دستگاه عکسبرداری الکترونی روبشی (SEM) (Scanning electron microscope) بررسی شد تا به عنوان مبنایی به منظور بررسی ریزساختار بتن در نظر گرفته شود. از این آزمایش برای بررسی ویژگی‌ها و توزیع منافذ، تغییرات مورفولوژیکی و روابط شکل گرفته شده بین اجزای در تماس با



شکل ۶ نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز بصورت غرقاب عمل‌آوری شده، و ۱۸۰ روز نگهداری شده در شرایط جزر و مدی

خلیج فارس

دوده سیلیس به بتن منجر به نرخ جذب رطوبت بیشتر در مقایسه با سرباره و متاکائولن شد و هنگامی که با آب دریا ترکیب می-شود، خمیر سیمان سریعتر از افزودن متاکائولن و سرباره سخت می‌گردد (گیرش سریعتر) [32]. دوده سیلیس به دلیل دارا بودن بیش از ۹۰٪ SiO_2 در ترکیبات شیمیایی خود، منجر به بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی فازهای زلی (مانند C-S-H) شده، و همچنین با پر کردن حفرات مویینه باعث جلوگیری از نفوذ یون سولفات و تشکیل اترینگایت و گسترش ریزترک‌ها شده، و در نهایت نیز تراکم و مقاومت فشاری بتن را افزایش داده است.

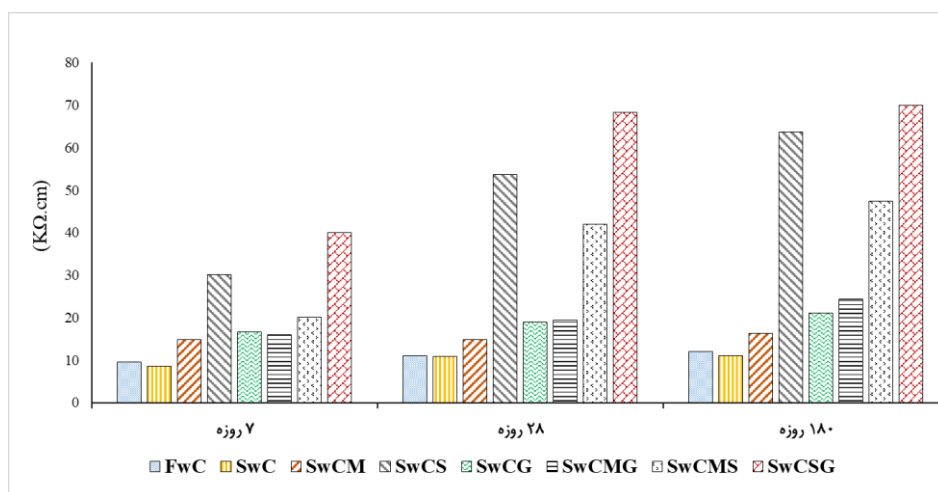
استفاده از ترکیب پوزولان‌های متاکائولن، دوده سیلیس و سرباره در بتن ساخته شده از آب و ماسه خلیج فارس (SwC) عمدتاً باعث افزایش مقاومت فشاری در تمام سنین شد، که حضور دوده سیلیس (۱۰٪) در افزایش مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های ترکیبی موثرتر به نظر می‌رسد.

مقاومت الکتریکی ویژه بتن

دو نوع بتن شاهد FwC (آب شرب و ماسه معدن) و SwC (آب دریا و ماسه لایروبی شده) تقریباً به نتایج مشابهی دست یافتند (شکل شماره ۷)، که نشان می‌دهد نوع آب اختلاط تفاوت چشمگیری در نتایج آزمون مقاومت الکتریکی نمونه‌ها نداشته و تغییرات اساسی در نتایج به واسطه حضور پوزولان‌ها بوده است [3].

افزودن متاکائولن به طرح اختلاط SwC، باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان ۱۴/۸٪ در سن ۲۸ روزگی بتن شد و پس از آن کاهش ۵٪ مقاومت فشاری را در سن ۱۸۰ روزگی تجربه کرد. در این خصوص مطالعات قبلی گزارش کرده‌اند که اثر متاکائولن بر مقاومت فشاری SwC متفاوت بوده و تاثیر یکنواخت و ثابتی ندارد و عمدتاً باعث افزایش قابل ملاحظه‌ی مقاومت فشاری بتن نخواهد شد [25].

افزودن ۱۵٪ سرباره، زمان گیرش اولیه بتن SwC را کاهش داده و باعث افزایش مقاومت فشاری آن در سنین ۲۸ و ۱۸۰ روزگی به میزان حدود ۲۰٪ شده است، با این حال افزودن سرباره تاثیر چشمگیری در مقاومت فشاری ۷ روزه بتن SwC نداشته است. در این خصوص تحقیقات گذشته بیان کردند که سرباره خاصیت شدید پوزولانی و سرعت واکنش پذیری مناسبی ندارد و در صورت استفاده از آن می‌بایست با پوزولان‌های دیگر (مانند اکسید منیزیم و یا دوده سیلیس)، اصطلاحاً "فعال" (Active) گردد که این موضوع در ترکیب دوده سیلیس و سرباره به خوبی قابل مشاهده است و به دلیل حضور دوده سیلیس، سرباره فعال شده و مقاومت فشاری این ترکیب افزایش یافته است. از طرفی، استفاده از ۱۰٪ دوده سیلیس در بتن SwC منجر به کاهش چشمگیر زمان گیرش و افزایش قابل توجه مقاومت فشاری آن در تمام سنین شده است [31]. لازم به ذکر است مشاهدات تجربی حین ساخت نمونه‌های بتنی آزمایشگاهی نیز نشان داد که افزودن



شکل ۷ نتایج آزمون مقاومت الکتریکی آزمون‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز بصورت غرقاب عمل‌آوری شده، و ۱۸۰ روز نگهداری شده در شرایط جزر و مدی

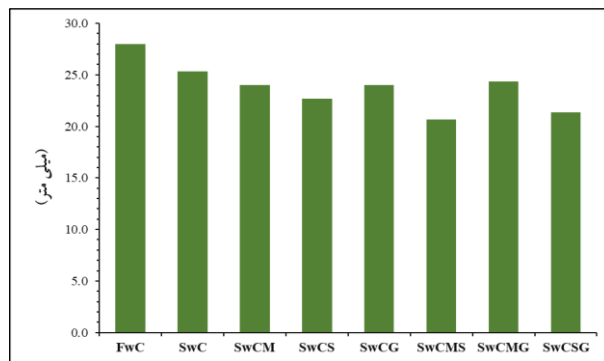
خلیج فارس مطابق با [27] ACI 222

سرباره کوره ذوب آهن، توانایی جذب و مختل کردن حرکت یون‌های رسانا را ندارند، بنابراین، این پوزولان عمدتاً به لحاظ فیزیکی قادر به کند کردن حرکت و انتشار این یون‌هاست. اما مقادیر بالای آهک در سرباره نسبت به دوده سیلیس و متاکائولن، منجر به تشکیل بیشتر هیدروکسید کلسیم و واکنش‌پذیری بیشتر با سولفات‌های موجود شده که در نهایت ترک و حفرات موینه بیشتری را ایجاد کرده است که حرکت این یون‌های رسانا از طریق آنها تسریع گردیده است. از طرفی، به نظر می‌رسد ترکیب سرباره و دوده سیلیس (SwCSG) و ترکیب دوده سیلیس و متاکائولن (SwCMS) به دلیل حضور دوده سیلیس در این نمونه‌ها منجر به افزایش مقاومت الکتریکی بیشتری شد. بررسی نتایج به طور کلی نشان داد که استفاده از آب دریا و ۲۵٪ ماسه لایروبی شده در مخلوط بتن باعث تغییر چشمگیری در نتایج این آزمون نشده و تغییرات در نتایج سایر مخلوط‌های ساخته شده با آب و ماسه دریا، عمدتاً به دلیل حضور مکمل‌های سیمانی (پوزولان‌ها) بوده است که هر یک با توجه به خواص خود به لحاظ شیمیایی و فیزیکی، حرکت (انتشار) یون‌های رسانا را در بافت بتن مختل کردند. این آزمایش نشان داد که خواص مکانیکی بتن (شامل: تخلخل، حفرات و نوع اتصالات آنها با یکدیگر، ...) در حرکت و انتشار یون‌های رسانا نسبت به خواص شیمیایی (شامل: نمک-های کوزل و فرایدل، ترکیبات حاوی عنصر آلومینیوم و ترجیحاً آلومینا) موثر تر بوده است.

نفوذپذیری بتن تحت فشار آب

نمودار ارائه شده در شکل (۸) میزان عمق نفوذ نمونه‌ها تحت فشار آب را نشان می‌دهد.

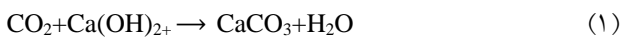
نتایج نشان می‌دهد متاکائولن مقاومت SwC در برابر انتشار یون کلرید و سولفات را در تمام سنین بهبود بخشیده است. این موضوع به دلیل خاصیت پرکنندگی موثر این پوزولان، و همچنین حضور مقادیر بالای Al_2O_3 در ترکیبات شیمیایی آن بوده (جدول ۲)، که توانایی جذب و به دام انداختن یون‌های رسانا مانند کلرید را دارد و از حرکت آنها بدین وسیله جلوگیری کرده است. لذا متاکائولن در وهله اول به واسطه ترکیبات شیمیایی و سپس با افزایش سطح مخصوص و سپس با بهبود تراکم ریزساختار ژل C-S-H باعث افزایش ظرفیت اتصال کلرید شده است. حضور دوده سیلیس تأثیر قابل توجهی بر مقاومت الکتریکی SwC داشته است [8]. دوده سیلیس، با توجه به ذرات بسیار ریز خود، حفرات موینه بتن را پر کرده و با تشکیل ژل C-S-H متراکم، مانع عبور یون‌های رسانا مانند کلرید و سولفات در محیط دریا شده است و به این دلیل که ترکیبات آن حاوی مقادیر اندکی آلومینا است، به لحاظ شیمیایی تأثیری در جذب یون کلرید نداشته و عمدتاً به لحاظ فیزیکی ظرفیت اتصال کلرید بتن SwC را به میزان چشمگیر ۴۷٪ افزایش داده است. به علاوه، این پوزولان، مقاومت الکتریکی SwC را تا $60\text{ k}\Omega/\text{cm}$ افزایش داده، که نشان می‌دهد از لحاظ تئوری، این نوع بتن در محیط‌های خورنده بسیار مقاوم است [27]. ویلیام و همکاران، نتایج مشابهی را در مورد افزایش مقاومت الکتریکی بتن با استفاده از دوده سیلیس در بتن گزارش کردند [33]. علاوه بر این، ارتباط معناداری بین نتایج این آزمایش و مقاومت فشاری، مخصوصاً برای نمونه SwCS وجود دارد؛ این موضوع به این دلیل است که هر دو آزمایش تابع ماتریس تخلخل بتن هستند. مشاهدات نشان داد که سرباره، تأثیر مثبت و قابل توجهی در طول زمان در نتایج این آزمایش نداشته است. این موضوع احتمالاً به این دلیل است که ترکیبات شیمیایی



شکل ۸ نتایج آزمون تعیین عمق نفوذ نمونه‌ها تحت فشار آب در سن ۲۸ روز (عمل‌آوری بصورت غرقاب)

عمق کربناسیون بتن

این آزمایش بر روی نمونه‌ها پس از قرارگیری به مدت ۱۸۰ روز در شرایط جزرومدی انجام شد. واکنش کربناسیون در سازه‌های بتنی در معرض رطوبت، شامل تشکیل کربنات کلسیم یا کلسیت (CaCO_3) با مصرف (تجزیه) Ca(OH)_2 بوده (رابطه (۱))، و در این واکنش ژل C-S-H به دلیل کاهش قلیائیت خمیر سیمان به سیلیس آمورف یا کلسیت تبدیل می‌شود که به مراتب دارای تخلخل بیشتری از ژل C-S-H می‌باشد.



میزان عمق کربناسیون آزمون‌های بتنی در شکل (۹) نشان داده شده است. عمق کربناسیون در بتن شاهد (FwC) کمتر از بتن SwC بوده است که نشان می‌دهد آب شرب نسبت به آب دریا در برابر پیشروی کربناسیون مقاومتر است. این موضوع به دلیل وجود یون سولفات منیزیم در آب دریا است که باعث تسریع در تشکیل هیدروکسید کلسیم به عنوان یکی از محصولات هیدراسیون سیمان می‌شود، و ترکیب شیمیایی کلسیم هیدراته شده با CO_2 منجر به تشکیل CaCO_3 و یا واکنش کربناسیون می‌گردد. از طرفی نتایج این آزمایش رابطه مستقیمی با تخلخل و ترک‌های مویرگی در ریزساختار بتن دارد [36]. زیرا حضور توام سولفات منیزیم در آب و ماسه لایروبی شده دریا نیز باعث تشکیل حجم زیادی اترینگایت شده که نهایتاً با گذر زمان منجر به گسترش ریزترک‌ها و متخلخل شدن ریزساختار بتن گردیده است. بنابراین، از طریق این ریزترک‌ها، حفرات موئینه ناشی از منبسط شدن کریستال‌های اترینگایت، CO_2 نیز به درون بافت بتن نفوذ کرده و باعث پیشروی کربناسیون در اعماق بتن، و نهایتاً کاهش ظرفیت اتصال کلرید خمیر سیمان شده است [37]. این موضوع به این دلیل است، که در نواحی کربناته شده، انحلال-پذیری نمک‌های فرایدل و کوزل افزایش می‌یابد که در صورت تداوم کربناسیون نهایتاً تجزیه خواهند شد. این مکانیسم در نمونه‌های بتن شاهد (FwC)، بتن ساخته شده از آب و ماسه لایروبی شده (SwC) و نمونه حاوی سرباره (SwCG) بیشتر رخ داده است، زیرا در این نمونه‌ها، نواحی نیمه کربناته شده (به رنگ صورتی روشن) بعضاً تا مرکز بتن نیز پیشروی داشته است.

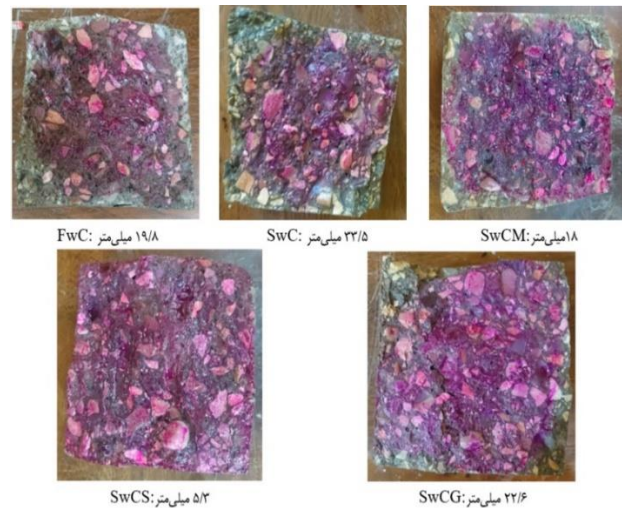
همانطور که مشاهده می‌شود، بتن شاهد SwC از نظر عمق نفوذ، تفاوتی چشمگیری با بتن شاهد (FwC) نداشته است، در همین راستا، یونس و همکاران بیان کردند که استفاده از آب دریا به عنوان آب اختلاط در بتن بر نفوذپذیری و مقاومت در برابر نفوذ کلرید بتن سخت شده تاثیر چشمگیری نمی‌گذارد [30]. در این آزمایش، نتایج شدیداً به پیوستگی، اتصال، ارتباط حفرات و عمل‌آوری صحیح (فرآیند هیدراسیون کامل) وابسته بوده که نشان می‌دهد ارتباط حفرات با یکدیگر در بتن ساخته شده از آب و ماسه دریا پیچیده‌تر بوده که باعث اختلاف ۱۰/۶٪ حداکثر عمق نفوذ آب با بتن شاهد شده است.

اتریشی مقادیر بهینه‌ی پوزولان‌های متاکائولن و دوده-سیلیس در بهبود تراکم و ریزساختار ماتریس سیمان در این آزمایش قابل ملاحظه بوده است. عملکرد این پوزولان‌ها عمدتاً بر اساس پر کردن ترک‌ها و حفرات موئینه انتقال رطوبت در ماتریس خمیر سیمان می‌باشد که به این شکل در تعیین نتایج این آزمایش موثر بوده‌اند. افزودن متاکائولن ضمن داشتن خاصیت پوزولانی و پرکنندگی نسبی، حداکثر میزان عمق نفوذپذیری بتن SwC را ۲ میلی‌متر کاهش داد که مشابه با عملکرد سرباره بوده است. دوده‌سیلیس نیز باعث کاهش نفوذپذیری بتن SwC در سن ۲۸ روزگی به میزان ۱۱/۴٪ شده است که همانند متاکائولن، باعث کاهش میزان نفوذپذیری بتن SwC نسبت به بتن شاهد شده است. دوده سیلیس علاوه بر پر کردن خلل و فرج و حفرات موئینه انتقال رطوبت، باعث پیچیدگی (غیر یکنواختی) اتصالات و ارتباط آنها نیز با یکدیگر شده است. سونگ و همکاران نیز نشان دادند که دوده‌سیلیس نفوذپذیری بتن را در صورتی که نسبت جایگزینی آن بیش از ۸٪ باشد، شدیداً کاهش می‌دهد [34]. اکرم نیز نشان داد که دوده‌سیلیس و سرباره، با اصلاح خلل و فرج و ریزساختار بتن، نفوذپذیری آن را در سن ۲۸ روزگی کاهش می‌دهند [35]. استفاده از ترکیب ۱۰٪ دوده‌سیلیس و ۵٪ متاکائولن، منجر به کاهش حداکثر میزان عمق نفوذ در خمیر سیمان بتن SwC به میزان ۲۲٪ شده است. از طرفی افزودن ۱۵٪ سرباره به خمیر سیمان، تاثیر قابل توجهی بر بتن ساخته شده از آب و ماسه لایروبی شده دریا نداشته است. همانطور که اشاره شد، دلیل این موضوع، میزان ترک‌های موئینه بیشتر به واسطه‌ی انبساط ترکیبات شیمیایی مانند اترینگایت ناشی از حملات سولفات‌ها بوده است که از طریق آنها رطوبت و یون‌های رسانا در بافت بتن منتقل می‌شوند.

داشت. زیرا در نواحی کربناته شده، ظرفیت اتصال کلرید عملاً ناچیز است، این موضوع به این دلیل است که کربناسیون در ابتدا با کاهش pH و قلیائیت، باعث تجزیه نمک‌های فرایدل و کوزل می‌گردد که به این صورت ظرفیت اتصال شیمیایی کلرید در خمیر سیمان را کاهش می‌دهد. از طرفی با تبدیل ژل C-S-H به سیلیس آمورف و کلسیت، تراکم و وزن مخصوص ماتریس خمیر سیمان را کاهش داده و به لحاظ فیزیکی نیز ظرفیت اتصال کلرید خمیر سیمان را کاهش می‌دهد. بنابراین، کلریدهای آزاد به سهولت و آزادانه در بافت بتن پخش (منتشر) می‌شوند و در صورت وجود میلگرد فولادی منجر به خوردگی آن خواهند شد. در سایر نمونه‌ها به علت جایگزین شدن سیمان با متاکائولن و دوده سیلیس، از آهک موجود در خمیر سیمان کاسته شده و CaCO_3 کمتری در نتیجه‌ی واکنش شیمیایی بین آهک و CO_2 تشکیل شده است [12].

بررسی ریزساختار بتن

نتایج این آزمایش در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در ریزساختار نمونه‌های شاهد (FwC و SwC)، بافت پیوندهای بین ذرات سیمان و آب شرب از اشکال متبلور هیدروکسید کلسیم منظم همراه با حفره‌های سطحی تشکیل شده است. بررسی آنالیز ریزساختار نشان می‌دهد که ماتریس خمیر سیمان به دلیل عدم وجود پوزولان‌ها کاملاً متراکم نشده است. به طور کلی، خمیر سیمان نمونه‌های حاوی آب دریا، دارای ریزساختاری متراکم‌تر، با مقادیر کمتر منافذ و حفرات با ابعاد بزرگ، اما عمیق‌تر نسبت به خمیر بتن شاهد FwC مشاهده شد. این موضوع را می‌توان به واکنش هیدراسیون سریع‌تر در سنین پایین خمیر آب دریا نسبت به خمیر سیمان آب شرب نسبت داد که منجر به تشکیل یک ریزساختار متخلخل با اتصالات پیچیده بین حفرات شده است [39]، [40]. همانطور که در نمونه شاهد FwC مشاهده می‌شود، ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) توزیع پراکنده‌ای در خمیر آب شرب دارد. از طرفی، خمیر سیمان ساخته شده با آب دریا بافتی سوزنی شکل تشکیل داده است که موجب کاهش سطح تماس مفید با سنگدانه در ناحیه انتقال (مرز مشترک بین سنگدانه و خمیر سیمان)، و اتصال ضعیف با سنگدانه در این ناحیه شده است. این موضوع در نهایت جدا شدن سنگدانه از خمیر سیمان در فشارهای محیطی را در پی خواهد داشت. اترینگایت نیز در



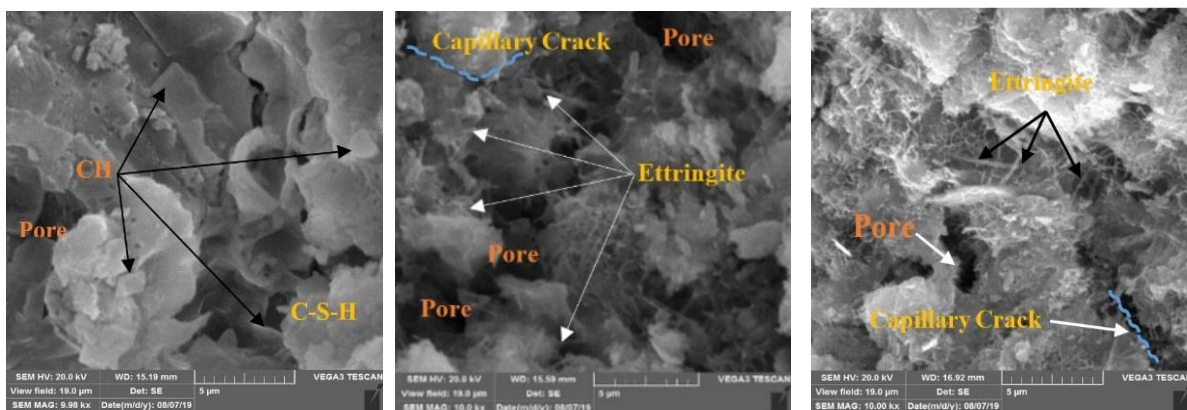
شکل ۹ نتایج آزمایش تعیین عمق کربناسیون نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری به مدت ۱۸۰ روز در شرایط جزرومدی خلیج فارس

همانطور که گفته شد، به دلیل CO_2 موجود در اتمسفر، واکنش کربناسیون از سطوح خارجی بتن آغاز شده و پیشروی آن بسته به پارامترهای ریزساختاری مانند تخلخل، میزان هیدروکسید کلسیم، قلیائیت (مناثر از افزودنی‌ها و مکمل‌های سیمانی نظیر پوزولانها)، ممکن است تحت تاثیر قرار گیرد. مشاهده می‌شود که افزودن پوزولان‌ها، با تغییر ریزساختار فیزیکی و تراکم خمیر سیمان، باعث کنترل پیشروی و کاهش شدت کربناسیون شده‌اند. در نمونه‌های حاوی دوده سیلیس، عمق کربناسیون کمتر از مخلوط‌های دیگر بود، که نشان می‌دهد بتن حاوی دوده سیلیس در برابر کربناسیون مقاوم‌تر است. این موضوع به این دلیل است که دوده سیلیس با تسریع مصرف کلسیم هیدراته شده $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ ، باعث تجزیه‌ی آن شده و میزان آن را شدیداً کاهش می‌دهد و در ابتدای هیدراسیون باعث کاهش قلیائیت بتن می‌شود، و با جلوگیری از تشکیل هیدروکسید کلسیم، در نهایت CaCO_3 کمتری در حضور CO_2 تشکیل خواهد شد. [38]. از طرفی، سرباره با توجه به میزان بالای کلسیم در ترکیبات شیمیایی خود، منجر به تشکیل بیشتر هیدروکسید کلسیم و ترکیب با CO_2 شده و در نهایت پتانسیل خوردگی بیشتری در رابطه با تشکیل CaCO_3 یا کربناسیون به نسبت متاکائولن و دوده سیلیس از خود نشان داده است. به علاوه، سرباره باعث افزایش سطح ناحیه‌ی "نیمه کربناته" شده است که نشان می‌دهد قلیائیت بتن کاهش یافته است. لذا استفاده از سرباره در مناطق دریایی، خطر افزایش کربناسیون شدید و حملات بعدی کلریدها را به دنبال خواهد

شود، و از لحاظ مورفولوژیکی اندکی بزرگ‌تر از کریستال‌های اترینگایت است، اما در این تحقیق، با توجه به پایداری بیشتر اترینگایت در محیط‌های غنی از سولفات‌ها این فاز مشاهده نشد [30].

افزودن مکمل سیمانی متاکائولن به میزان ۵٪ تا حدودی موجب کاهش تخلخل، اندازه و مقدار کریستال‌های هیدروکسید کلسیم در ناحیه انتقال SwC شده است. در طرح اختلاط مذکور (SwCM)، بافت ناحیه انتقال، سوزنی شکل تا حدودی ثابت باقی مانده است، اما متاکائولن پس از پر کردن نسبی فضاهای خالی، موجب تراکم بیشتر نسبت به SwC شده است [25].

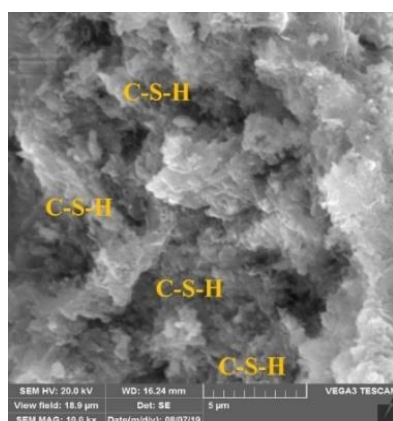
طول فرآیند هیدراسیون خمیر سیمان تشکیل شده است که از لحاظ مورفولوژیکی باعث سوزنی‌تر شدن ریزساختار در ناحیه انتقال خمیر سیمان و سنگدانه شده که عمدتاً به واسطه واکنش شیمیایی بین هیدروکسید کلسیم و سولفات‌های موجود بوده است. به طور کلی، اترینگایت بیشتر در طرح اختلاط‌هایی مشاهده می‌شود که هیدروکسید کلسیم بیشتری در ترکیب شیمیایی مصالح سیمانی خود داشته‌اند، که شامل سرباره می‌شود. لازم به ذکر است خود سیمان نیز به دلیل وجود مقادیر بالای آهک، در معرض با محیط‌های سولفاتی، پتانسیل زیادی برای تشکیل اترینگایت یا گچ دارد. گچ ممکن است از تجزیه دکامپوزیت شدن اترینگایت در محیط‌های سولفاتی شدید تولید



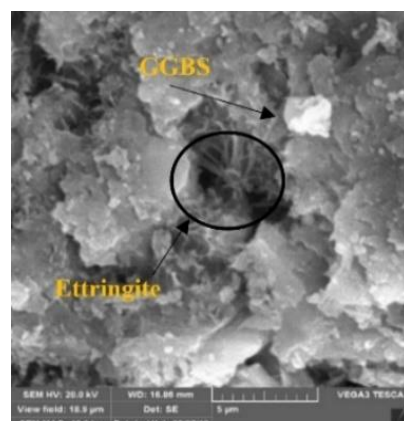
FwC

SwC

SwCM



SwCS



SwCG

شکل ۱۰ ریزساختار و مورفولوژی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز با بزرگنمایی ۱۰ هزار برابری. هیدروکسید کلسیم (CH)، کلسیم-سیلیکات-هیدرات (C-S-H)، اترینگایت (Ettringite)، سرباره (GGBS)، حفرات و ترک‌های مویینه: Pore & Capillary crack

۱. استفاده از ۲۵٪ ماسه لایروبی شده و آب خلیج فارس، به دلیل حضور نمک‌های کلرید، خواص مکانیکی بتن را حدود ۶٪ در سنین اولیه (۷روزه) بهبود بخشید، اما تا سن ۲۸ روزگی به دلیل افزایش تدریجی تخلخل ناشی از تورم اترینگایت و گچ در نتیجه‌ی حملات سولفات‌ها، کاهش تدریجی مقاومت فشاری را به دنبال داشت.

۲. دوده‌سیلیس (۱۰٪) به علت مقادیر بالای SiO_2 و واکنش پذیری شدید با کلریدهای آب دریا، ضمن افزایش چشمگیر سرعت گیرش اولیه و کاهش اسلامپ، باعث تشکیل ریزساختار متراکم C-S-H شد. از طرفی ترکیبات شیمیایی دوده‌سیلیس باعث جلوگیری از تشکیل بیش از حد هیدروکسید کلسیم شد، که در نهایت با توجه به تراکم قابل قبول و کمبود هیدروکسید کلسیم برای تشکیل کلسیت، باعث جلوگیری از پیشروی کرناسیون و تشکیل اترینگایت و گچ در بافت بتن شد.

۳. نتایج نشان داد افزودن متاکائولن (۵٪)، خواص مکانیکی ریزساختار بتن ساخته شده از آب و ماسه دریا را به میزان ناچیزی ارتقا می‌دهد، ولیکن استفاده از این پوزولان به علت حضور منبع بالای آلومینا در مواردی که حضور کلریدها بحرانی است موثرتر خواهد بود و در مواردی که علاوه بر کلریدها، سولفات‌ها نیز حضور داشته باشند، تاثیر چشمگیری ندارد و عمدتاً باعث تشکیل محصولات منبسط شونده مانند اترینگایت می‌گردد.

۴. استفاده از ۱۵٪ سرباره، علیرغم بهبود جزئی خواص مکانیکی، به دلیل منبع بالای CaO در ترکیبات شیمیایی خود، در محیط‌های دریایی، منجر به تشدید (پیشروی) کرناسیون، و همچنین افزایش محصولات حجیم شونده ناشی از حملات منیزیم سولفات (MgSO_4) می‌شود. بنابراین، استفاده از سرباره با این شرایط، در بتن‌های مورد استفاده در شرایط دریایی (جزرومدی خلیج فارس) منجر به بهبود پارامترهای مقاومت و دوام نخواهد شد.

سپاسگزاری

افزودن ۱۰٪ دوده‌سیلیس به SwC باعث کاهش تعداد و عمق منافذ و مقدار کریستال‌های هیدروکسید کلسیم و لبه‌های ناهموار آنها در ناحیه انتقال بتن شده است. این موضوع نشان می‌دهد که روند مصرف (تجزیه) هیدروکسید کلسیم با افزودن دوده‌سیلیس سرعت یافته است و همچنان ادامه دارد و این ناحیه از لحاظ مکانیکی تقویت شده است. از طرفی، ناحیه انتقال در مخلوط SwCS یک بافت منسجم و متراکم از C-S-H نشان می‌دهد که می‌تواند به دلیل خاصیت ریزدانگی، منبع بالای SiO_2 و واکنش-پذیری دوده‌سیلیس باشد. آنالیز SEM نشان می‌دهد که افزودن دوده‌سیلیس به بتن SwC ، منجر به تراکم بیشتر خمیر سیمان در ناحیه‌ی انتقال، به نسبت دو پوزولان دیگر شده است؛ این موضوع باعث اتصال و سطح تماس بیشتر سنگدانه و شیریه‌ی سیمان شده که دلیل دیگری بر مقاومت فشاری مطلوب این طرح اختلاط می‌باشد. افزودن ۱۵٪ سرباره به خمیر سیمان ساخته شده از آب دریا منجر به تشکیل یک بافت لایه‌ای زیر در ناحیه‌ی انتقال بتن شده است. این ترکیب باعث ایجاد یک سطح ناهموار با تخلخل سطحی کم، ولی گسترش ریزترک‌ها و منافذ عمیق در میان این بافت لایه‌ای گردیده است [5]. همانطور که پیشتر بیان شد، در این آنالیز می‌توان مشاهده نمود که حضور آهک (CaO) بیش از حد در این پوزولان، منجر به تشکیل هیدروکسید کلسیم حین فرآیند هیدراسیون و واکنش شیمیایی آن با سولفات منیزیم شده که نهایتاً باعث تشکیل محصولات منبسط شونده مانند کریستال‌های اترینگایت شده است. در خمیر سیمان این طرح اختلاط (SwCG)، کریستال‌های اترینگایت به وضوح قابل مشاهده هستند که در نهایت منجر به تشکیل حفره و تشدید تخلخل در اطراف خود و افت خواص مکانیکی بتن شده‌اند.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی میدانی تاثیر پوزولان‌های متاکائولن (۵٪)، سرباره (۱۵٪)، دوده‌سیلیس (۱۰٪) بر پارامترهای دوام بتن ساخته شده از ماسه لایروبی شده و آب خلیج فارس (مستخرج از بندر شهید رجایی بندرعباس) در شرایط جزرومدی صورت گرفت که نتایج زیر حاصل شدند:

مراجع

[1] M. Khatibmasjedi, S. Ramanathan, P. Suraneni, and A. Nanni, "Compressive strength development of

- seawater-mixed concrete subject to different curing regimes,” *ACI Mater. J.*, vol. 117, no. 5, 2020. doi: 10.14359/51725973.
- [2] U. Ebead, D. Lau, F. Lollini, A. Nanni, P. Suraneni, and T. Yu, “A review of recent advances in the science and technology of seawater-mixed concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 152, p. 106666, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106666>
- [3] M. Jahani, S. Shahnoori, S. Moradi, and C. Ershadi, “Cleaner Production Towards a Green Concrete ; Multi-scale Experimental Study on Long-Term Performance of a Sustainable Modified-SWSSC,” vol. 6, no. 6, pp. 43–59, 2022. <https://doi.org/10.11648/j.ajcbm.20220601.14>
- [4] S. Moradi, S. Shahnoori, S. T. Tabatabaei Aghda, and C. Ershadi, “Study of resistance and durability parameters of Roller Compacted Concrete Pavement made of Dredged Marine Sand extracted from the coastal areas of Persian Gulf (Shahid Rajaei port),” *Concr. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 41–53, 2018. (In Persian). <https://doi.org/10.22124/jcr.2018.7437.1239>
- [5] S. Moradi, and S. Shahnoori, “Eco-friendly mix for Roller-Compacted Concrete: Effects of Persian-Gulf-Dredged marine sand on durability and resistance parameters of concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 281, pp. 122555, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122555>.
- [6] A. Shayan, A. Xu, G. Chirgwin, and H. Morris, “Effects of seawater on AAR expansion of concrete,” *Cement Concrete Research*, vol. 40, no. 4, pp. 563-568, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.008>
- [7] H. H. Steinour, “Concrete Mix Water--How Impure Can It Be?,” 1960.
- [8] M. Jahani, S. Shahnoori, and S. Moradi, “Long Term observations in an Experimental study on durability of a Sustainable Concrete Made with Sea-water and Sea-sand in Tidal Conditions,” 2022.
- [9] M. Khatibmasjedi, S. Ramanathan, P. Suraneni, and A. Nanni, “Shrinkage behavior of cementitious mortars mixed with seawater,” *Adv. Civ. Eng. Mater.*, vol. 8, no. 2, pp. 64–78, 2019. <https://doi.org/10.1520/ACEM20180110>
- [10] A. M. Rashad, and A. S. Ouda, “Effect of tidal zone and seawater attack on high-volume fly ash pastes enhanced with metakaolin and quartz powder in the marine environment,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 324, pp. 111261, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111261>
- [11] X. Shen, Q. F. Liu, Z. Hu, W. Q. Jiang, X. Lin, D. Hou, and P. Hao, “Combine ingress of chloride and carbonation in marine-exposed concrete under unsaturated environment: A numerical study,” *Ocean Engineering*, vol. 189, pp. 106350, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106350>
- [12] Y. Yi, D. Zhu, S. Guo, Z. Zhang, and C. Shi, “A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment,” *Cement Concrete Composites*, vol. 113, pp. 103695, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103695>
- [13] X. Jiang, S. Mu, Z. Yang, J. Tang, and T. Li, “Effect of temperature on durability of cement-based material to physical sulfate attack,” *Construction and Building Materials*, vol. 266, pp. 120936, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120936>

- [14] J. Liu, G. Ou, Q. Qiu, X. Chen, J. Hong, and F. Xing, "Chloride transport and microstructure of concrete with/without fly ash under atmospheric chloride condition," *Construction and Building Materials*, vol. 146, pp. 493–501, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.018>
- [15] R. M. De Gutiérrez, L. N. Diaz, and S. Delvasto, "Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars," *Cement Concrete Composites*, vol. 27, no. 5, pp. 593–598, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.010>
- [16] S. Cheng, Z. Shui, T. Sun, Y. Huang, and K. Liu, "Effects of seawater and supplementary cementitious materials on the durability and microstructure of lightweight aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 190, pp. 1081–1090, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.178>
- [17] D. L. Pillay, O. B. Olalusi, M. W. Kiliswa, P. O. Awoyera, J. T. Kolawole, and A. J. Babafemi, "Engineering performance of metakaolin based concrete," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 6, p. 100383, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100383>
- [18] M. Valipour, F. Pargar, M. Shekarchi, and S. Khani, "Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study," *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 879–888, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.054>
- [19] W. A. Al-Kutti and N. M. Al-Akhras, "The durability of partially-damaged concrete with the addition of silica fume and ground granulated blast furnace slag," *Key Engineering Materials*, vol. 711, pp. 277–284, 2016. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.711.277>
- [20] Jahani, A., Estabragh, A. R., Khajepour, H., & 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*, vol.35, no.3. doi:10.22067/jfcei.2022.74908.1115
- [21] A. R. Estabragh, A. Jahani, A. A. Javadi, and M. Babalar, "Assessment of different agents for stabilisation of a clay soil," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 23, no. 2, 2022. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1736293>
- [22] ASTM Committee, "Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying, ASTM C566-97," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 97, no. Reapproved 2004, pp. 5–7, 1997.
- [23] C128/C128M, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption," *ASTM International*, pp. 1–6, 2001.
- [24] ASTM C143/C143M, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete," *Astm C143*, no. 1, pp. 1–4, 2015.
- [25] Z. Shi, Z. Shui, Q. Li, and H. Geng, "Combined effect of metakaolin and sea water on performance and microstructures of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 74, pp. 57-64, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.023>
- [26] "Bs 1881 Part 124 Pdf 141 1 / 3," pp. 3–5, 1881.
- [27] ACI Committee 222, "Protection of Metals in Concrete Against Corrosion," *Aci 222R-01*, pp. 1–41, 2001.

- [28] Limeira, J., Etxeberria, M., Agulló, L., & Molina, D. (2011). Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand. *Construction and building materials*, 25(11), 4165-4174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.053>
- [29] O. Cascudo, P. Pires, H. Carasek, A. De Castro, and A. Lopes, "Evaluation of the pore solution of concretes with mineral additions subjected to 14 years of natural carbonation," *Cement Concrete Composites*, vol. 115, pp. 103858, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103858>
- [30] A. Younis, U. Ebead, P. Suraneni, and A. Nanni, "Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete," *Construction and building Materials*, vol. 190, pp. 276–286, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.126>
- [31] P. Sikora, K. Cendrowski, M. Abd Elrahman, S. Y. Chung, E. Mijowska, and D. Stephan, "The effects of seawater on the hydration, microstructure and strength development of Portland cement pastes incorporating colloidal silica," *Applied Nanoscience*, vol. 10, no. 8, pp. 2627-2638, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13204-019-00993-8>
- [32] Y. Demir, H. Yaprak, and O. ŞİMŞEK, "The effect of sea water on the properties of concrete with silica fume admixture," *Cem. Wapno Bet.*, vol. 15, no. 1, 2010.
- [33] M. Williams, J. M. Ortega, I. Sánchez, M. Cabeza, and M. Á. Climent, "Non-destructive study of the microstructural effects of sodium and magnesium sulphate attack on mortars containing silica fume using impedance spectroscopy," *Applied Science*, vol. 7, no. 7, p. 648, 2017. <https://doi.org/10.3390/app7070648>
- [34] H. W. Song, S. W. Pack, S. H. Nam, J. C. Jang, and V. Saraswathy, "Estimation of the permeability of silica fume cement concrete," *Construction and building Materials*, vol. 24, no. 3, pp. 315–321, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.033>
- [35] 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.
- [36] S. A. Barbhuiya, P. A. M. Basheer, M. W. Clark, and G. I. B. Rankin, "Effects of seawater-neutralised bauxite refinery residue on properties of concrete," *Cement Concrete Composites*, vol. 33, no. 6, pp. 668–679, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.010>
- [37] S. Sadati, M. K. Moradillo, and M. Shekarchi, "Long-term durability of onshore coated concrete—chloride ion and carbonation effects," *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 150–161, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11709-016-0341-2>
- [38] H. Li, N. Farzadnia, and C. Shi, "The role of seawater in interaction of slag and silica fume with cement in low water-to-binder ratio pastes at the early age of hydration," *Construction and building Materials*, vol. 185, pp. 508-518, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.091>
- [39] M. Guo, B. Hu, F. Xing, X. Zhou, M. Sun, L. Sui, and Y. Zhou, "Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis," *Construction and building Materials*, vol. 234, pp. 117339, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117339>

- [40] M. Jahani, S. Moradi, S. Shahnoori, "4-year monitoring of degradation mechanisms of seawater sea-sand concrete exposed to tidal conditions: development of chemical composition and micro-performance," *Constr. Build. Mater.*, vol. 409, pp. 133475, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133475>