

Amirkabir Journal of Civil Engineering

Effect of Interfacial Transition Zone on Properties and Microstructure of Concrete

Seyed Fathollah Sajedi*^(D), Seyed Qasem Mirahmadi

Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

ABSTRACT: The interfacial transition zone (ITZ) is a relatively heterogeneous region with a thickness of 50 micrometers, whose physical and mechanical properties are determined descriptively due to the fine length scale and heterogeneous characteristics. In this research, by focusing on the ratio of different elements forming the ITZ and simultaneous examination of microscopic images, it was possible to numerically investigate the effect of changes in the ratio of elements on the properties and microstructure of concrete. In order to investigate the effect of the ITZ on concrete properties by examining the rheology of fresh concrete, 30 standard cubic samples were examined in the form of 10 mixing plans, and then the selected mixing plan was determined by trial and error. Then, 54 cubic and cylindrical samples of aggregates with high silica and w/c as 0.45 were made, and tests were conducted to determine the mechanical properties and durability of concrete in the age range of 7 to 180 days; finally, the microstructure of the mixtures was investigated. With increasing age, hydrated calcium silicate and calcium carbonate increased by 24% and 21.5%, respectively, and accordingly, the compressive strength (CS) and specific electrical resistances also increased by 10.3% and 48.6%, respectively, and the accelerated penetration of chloride ions decreased by 5.2%. In the limit of 30 micrometers from the aggregate boundary, due to the disturbance in the boundary region, no acceptable correlation relations between the ratio of different constituent elements and concrete properties were obtained. From the limit of 30 to 50 micrometers, linear relationships with coefficients of determination of 0.85 were established between the weight ratio of calcium to silicon with CS and the accelerated penetration of chloride ions, so that by reducing the said weight ratio by 82%, the CS increased by 10.3% and penetration decreased by 5.2%.

1-Introduction

The transition zone in concrete acts as a bridge between the cement paste and aggregates, and the presence of weak bonds in this zone can reduce the overall stiffness of the composite material [1, 2]. The atomic ratio of elements in the transition zone can affect the strength of the microstructure and, consequently, the compressive strength and durability of concrete. Extensive research and experiments have been conducted to understand the effect of these ratios on concrete [3-5]. The transition zone in concrete causes many negative effects due to the high concentration of ettringite and calcium hydroxide crystals and the lack of hydrated calcium silicate adhesive gel [6]. The factor that causes the cohesion between aggregates and cement paste is not fully understood, but part of it may be due to the mechanical entanglement between them due to the roughness of the aggregate surface and the cohesion under the influence of the physical and chemical properties of the aggregates, mineralogy and electrostatic conditions of the aggregate surface [7, 8]. Understanding the correlation between microstructural features and physical

Review History:

Received: Jul. 15, 2024 Revised: Nov. 03, 2024 Accepted: Dec. 07, 2024 Available Online: Jan. 14, 2025

Keywords:

Interfacial Transition Zone (ITZ) Microstructure X-ray Spectroscopy Atomic Tatio of Elements Scanning Electron Micrograph (SEM)

and mechanical properties of the transition zone is important for evaluating deformation and cracking. Researchers have focused on determining and quantifying these properties to better identify damage mechanisms in concrete [9]. Various identification methods, such as physical signal processing, have helped to evaluate the pore structures and microscopic features of the transition zone. However, the limited resolution and accuracy of these techniques may prevent the accurate detection of mineral phases and various elements [10]. This study investigates the effect of the transition zone on the mechanical properties and durability of conventional concrete. By preparing a laboratory mix design with native materials and performing standard tests, the relationship between the strength of this zone and the laboratory results was measured. Also, the internal structure of the concrete and the elements of the transition zone were analyzed using electron micrographs and non-destructive tests.

2- Laboratory Program

In this study, ten mix designs were made with a water-

*Corresponding author's email: sajedi.ac@gmail.com



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. Concrete Mixing Plan Details

| Concrete components |
|------------------------|
| 350 |
| 157 |
| 1.8 |
| 971 |
| 305 |
| 567 |
| |

Table 2. Related tests and standards

| Test name | Standards and methods |
|-------------------|------------------------------|
| Compressive | BS1881:Part 116 |
| strength | |
| Static elasticity | ASTM C469 |
| coefficient | |
| Water absorption | BS1881:Part122 |
| for half an hour | |
| Long-term water | ASTM C642 |
| absorption | |
| pressured Water | EN BS12930-8 |
| penetration | |
| Rapid Chloride | ASTM C1202 |
| Penetration Test | |
| Electrical | AASHTO T398 |
| resistance | |
| | X-ray diffraction |
| | method(XRD) |
| Microstructure | Scanning electron micrograph |
| study of the | images (SEM) |
| transition zone | Energy dispersive X-ray |
| (ITZ) | spectroscopy (EDS) |

to-cement ratio of 0.45. The used sand was of the broken type and was obtained from the mines of Andimeshk city in Khuzestan province. The maximum nominal size of coarse aggregates was 19 mm. The specific gravity and water absorption of coarse aggregates in the saturated state with a dry surface were determined according to ASTM C127 to be 2.36 g/cm and 1.1%, respectively. Details of the reference mixing plan are given in Table 1 and descriptions of 54 samples according to the laboratory program for determining the mechanical properties, durability, and microstructure of concrete are given in Table 2.

To investigate the effect of the transition zone on the properties of concrete, tests were conducted on standard samples aged 7 to 180 days. X-ray diffraction (XRD) was used to analyze the crystalline phases at a distance of 0 to 50



Fig. 1. changes in Compressive strength of concrete in terms of accelerated chloride ion penetration

µm from the interface of aggregates and cement paste. After storage at 105 °C, the samples were analyzed in a vacuum chamber, and the crystalline phases including CH, CSH, CaO, SiO2, and CaCO3 were identified. Also, the samples were coated with a layer of gold to increase the surface conductivity and microstructural images were obtained with a TESCAN Vega II electron micrograph. Finally, linear spectroscopic analysis was performed for different elements to investigate the quality of the transition zone and the relationship between the element ratios and the properties of concrete.

3- Analysis of Results

The test to determine the compressive strength of concrete was carried out at the ages of 7, 28, 90, and 180 days according to BS1881:Part116. The results show that with increasing sample age, the strength increases and at 180 days it increases by about 13% compared to 28 days. Mineralogical compositions with silicon oxide above 50% and the reaction of free silica with calcium hydroxide help to improve the transition zone. The elastic modulus increases faster than the strength at ages 28 to 90 days, which is related to the density of the transition zone. There is a linear relationship between strength and long-term water absorption with a correlation coefficient of 0.78, and at ages 28 to 180 days, with a decrease in water absorption of 31.4%, the strength increased by 18.3%. According to Figure 1, an inverse relationship was observed between chloride ion penetration and concrete strength with a correlation coefficient of 0.94; in the time interval from 28 to 90 days, with a decrease in chloride ion penetration of 5.2%, the concrete strength increased by 10.3%.

Changes in the intensity of the peaks of hydration products at the ages of 28 and 90 days indicate a significant increase in the intensity of the CH and ettringite peaks by 2/15 and 2/49 times, respectively, due to the lack of use of microsilica. In Figure 2, the correlation of the intensity of the CSH and CaCO3 peaks with the compressive strength indicates a direct relationship between these phases and the strength of concrete. An increase of 24% of hydrated calcium silicate and 21/5% of calcium carbonate led to an increase of 10/3% in the strength of concrete. The durability properties of concrete improved, and the electrical resistivity increased by



Fig. 2. Phase diagram of concrete hydration products at 28 and 90 days

48.6% and the chloride ion penetration decreased by 5/2%. The atomic ratios of the transition zone elements affect the mechanical properties and durability of concrete. The weight ratio of Ca/Si increases with distance from the aggregate boundary up to a distance of 30 µm and then decreases up to a distance of 50 µm. The results obtained from the weight ratio of Ca/Si and changes in strength are presented in Figure 3.

4- Conclusions

The characteristic strength of concrete is limited to 35 MPa due to the strength of natural stone (more than 40) and failure occurs in the transition zone. With increasing sample age from 28 to 180 days, the immersion water absorption decreased by 31.4% and the compressive strength increased by 18.3%. An inverse relationship between chloride ion penetration and strength was observed at ages of 28 to 90 days with a correlation coefficient of 0.94; with a 5.2% decrease in chloride ion penetration, the strength increased by 10.3%. Examination of the intensity of CSH and CaCO3 peaks showed that these phases have a direct relationship with the strength. An increase of 24% CSH and 21.5% CaCO3 led to a 10.3% increase in strength; the static elastic modulus increased by 14.3% and the electrical resistivity increased by 48.6%, and the chloride ion penetration decreased by 5.2%. At 90 days of age, the Ca/Si ratio at the aggregate boundary is 5.6 times higher than that at the 10 μ m distance, indicating more CH deposition at the aggregate boundary. At the (30-50) µm distance from the aggregate boundary, there is an inverse relationship between the weight ratio of Ca/Si and the strength, which decreases by 9.3% with an increase of 5.7 times the weight ratio; the accelerated infiltration rate increases by 5.5%; in addition, the weight ratio of Ca/(Al+Fe) fluctuates at the aggregate boundary up to the 30 µm distance and increases regularly from 0.2 to 0.37 at the (30-50) µm distance.

References

 K. Y. Liao, P. K. Chang, Y.-N. Peng, C.-C. Yang, A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete, Cement and Concrete research, 34(6) (2004) 977-989.



Fig. 3. Changes in concrete strength depending on the Ca/Si weight ratio in the transition zone

- [2] K.L. Scrivener, A.K. Crumbie, P. Laugesen, The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete, Interface science, 12 (2004) 411-421.
- [3] J.L. Costafreda, D.A. Martín, L. Presa, J.L. Parra, Effects of a Natural Mordenite as Pozzolan Material in the Evolution of Mortar Settings, Materials, 14(18) (2021) 5343.
- [4] J.A. Rossignolo, Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex, Construction and Building Materials, 23(2) (2009) 817-821.
- [5] B. Pang, Z. Zhou, X. Cheng, P. Du, H. Xu, ITZ properties of concrete with carbonated steel slag aggregate in salty freeze-thaw environment, Construction and Building Materials, 114 (2016) 162-171.
- [6] D.P. Bentz, D.P. Bentz, A three-dimensional cement hydration and microstructure program. I. hydration rate, heat of hydration, and chemical shrinkage, National Institute of Standards and Technology, 1995.
- [7] K.M. El-Dash, M.O. Ramadan, Effect of aggregate on the performance of confined concrete, Cement and concrete research, 36(3) (2006) 599-605.
- [8] J. J. Zheng, X.-Z. Zhou, Effective medium method for predicting the chloride diffusivity in concrete with ITZ percolation effect, Construction and Building Materials, 47 (2013) 1093-1098.
- [9] Y. Shi, X. Lv, S. Zhou, Z.a. Liu, M. Yang, C. Liu, C. Lu, Mechanical properties, durability, and ITZ characteristics of full-grade dam concrete prepared by aggregates with surface rust stains, Construction and Building Materials, 305 (2021) 124798.
- [10] Q. Chen, J. Zhang, Z. Wang, T. Zhao, Z. Wang, A review of the interfacial transition zones in concrete: Identification, physical characteristics, and mechanical properties, Engineering Fracture Mechanics, (2024) 109979.

نشريه مهندسي عمران اميركبير

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۷، شماره ۲، سال ۱۴۰۴، صفحات ۲۹۱ تا ۳۱۶ DOI: 10.22060/ceej.2025.23347.8147

تأثير ناحيه انتقال بر خواص و ريزساختار بتن

سیدفتح اله ساجدی^{* 🧠}، سیدقاسم میراحمدی

گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۵ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷ ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵

کلمات کلیدی: ناحیه انتقال ریزساختار طیف سنجی اشعهٔ ایکس نسبت اتمی عناصر ریزنگار الکترونی روبشی خلاصه: در این پژوهش سنگدانههای طبیعی با سیلیس بالا و نسبت آب به مواد سیمانی به میزان ۲۰۴۵ استفاده شدند. به منظور بررسی تأثیر ناحیه انتقال بر خواص بتن با بررسی رئولوژی بتن تازه، ۳۰ نمونه در قالب ۱۰ طرح اختلاط در محدوهٔ سنی۷ تا ۱۸۰ روزه بررسی گردید و از روش تاگوچی طرح اختلاط منتخب مشخص شد. آزمایشهای تعیین خواص مکانیکی بهبود یافته و به بتن انجام شدند و درنهایت ریزساختار مخلوطها بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش سن نمونهها، خواص مکانیکی بهبود یافته و به بتع آن کاهش در جذب آب حجمی، نفوذ آب تحت فشار و نفوذ تسریع شده یون کلراید و افزایش قابل توجه در مقاومت الکتریکی نمونهها رخ داده است. همچنین در میزان فاز بلوری اکسید کلسیم و تعداد منافذ بزرگ کاهش و در فاز سیلیکات کلسیم هیدراته ناحیه انتقال افزایش حاصل شد که این منجر به بهبود کیفیت ریزساختار گردید. با افزایش سن، سیلیکات کلسیم هیدراته و کربنات کلسیم به تر تیب ٪۲۴ و کامل شد که این منجر به بهبود کیفیت ریزساختار گردید. با افزایش سن، سیلیکات کلسیم هیدراته و کلسیم به ترتیب ٪۲۴ و یون کلراید ٪۵/۲ زیاد شدند و به تبع آن مقاومتهای فشاری و ویژه الکتریکی نیز بهترتیب ٪۲۰/۱ و ٪۶/۸۹ افزایش یافتند و نفوذ تسریع شده بین نسبت عناصر سازنده و خواص بتن بهدست زیاد. در محدودهٔ ۳۰ تا ۵۰ میکرومتری روابط خطی با ضرائب تعیین ۵۸/۰ بین نسبت وزنی کلراید ٪۱۰/۲ کاهش یافت. در محدودهٔ ۳۰ میکرومتری، بهدلیل اغتشاش موجود در منطقه مرزی، روابط همبستگی قابل قبولی مین نسبت عناصر سازنده و خواص بتن بهدست نیامد. در محدودهٔ ۳۰ تا ۵۰ میکرومتری روابط خطی با ضرائب تعیین ۵۸/۰ بین نسبت وزنی کلسیم به سیلیسیم با مقاومت فشاری و نفوذ تسریع شده یون کلراید برقرار شد، به طوری که با کاهش ٪۲۸ نسبت وزنی مذکور،

۱ – مقدمه

بتن یک مصالح ساختمانی چندمنظوره و پرکاربرد است و خواص آن تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله ترکیب مخلوط، شرایط اختلاط، عمل آوری و ریزساختار قرار میگیرد. ناحیه انتقال^۱ که همان ناحیه سطحی بین خمیر سیمان و سنگدانه است، نقش مهمی در تعیین خواص مکانیکی و دوام بتن دارد. فاران مشاهده کرد که در طول گیرش مواد مبتنی بر سیمان در اطراف سنگدانهها، برخی از محصولات هیدراتاسیون به شیوهای متفاوت سازماندهی شدند. این آرایش متفاوت بهعنوان اختلال در بستهبندی دانههای سیمان و ریزترین ذرات سنگدانه توصیف میشود، که در نتیجه چینشی از ذرات ایجاد میشود که با دور شدن از سطح سنگدانه تغییر میکند. این منطقه توسط فاران به عنوان ناحیه انتقال نامیده شد [۱]. دو جنبه از ناحیه انتقال شامل فاران به عنوان ناحیه انتقال نامیده شد [۱]. دو جنبه از ناحیه انتقال شامل

1. Interfacial transition zone (ITZ)

(Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) هر در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

اسکرینونر و همکاران^۲ توضیح داده شده است [۳–۲] که آن را بهعنوان اختلال در بستهبندی کوچکترین ذرات در حین نزدیک شدن به سطح سنگدانه بزرگ توصیف میکنند که میتواند به اصطلاح به اثر دیوار^۳ نسبت داده شود. عرض یا ضخامت ناحیه انتقال در چندین مطالعه تحقیقاتی با استفاده از روشهای آزمایشگاهی مانند ریزنگار الکترونی روبشی^۴، پراش اشعه ایکس^۵ ، تخلخل سنجی نفوذ جیوه^۶ و بسیاری دیگر مورد بررسی قرار گرفته است [۴–۳]. مشاهده شده است که ضخامت ناحیه انتقال متفاوت است و به اندازه کوچکترین دانههای سیمان و همچنین اندازه و نوع سنگدانهها بستگی دارد. علاوه بر این، اشاره شده که با کاهش اندازه سنگدانه، ضخامت این ناحیه کاهش مییابد. در نتیجه، طیف وسیعی از میزان ضخامت، از ۱۵ تا

- 4. Scanning Electron Microscopy (SEM)
- 5. X-ray Diffraction (XRD)
- 6. Mercury intrusion porosimetry (MIP)

^{*} نویسنده عهدهدار مکاتبات: sajedi.ac@gmail.com

^{2.} Scrivener et al.

^{3.} Wall effect

ایکس ٔ تأیید کردند که کانی شناسی بر میزان جهت گیری هیدروکسیدکلسیم در ناحیه انتقال تأثیر گذار است. همچنین مشاهده شده که کلیه سنگدانهها به گروه معدنی فلدسپات با عنصر غالب Si و سایر عناصر Na ،Ca ،Al و Fe تعلق دارند [۱۸]. ناحیه انتقال در بتن همانند پلی بین دو بخش اصلی Fe خمیرسیمان و سنگدانهها عمل میکند، حتی اگر هر بخش دارای سختی بالایی باشد، سختی ماده مرکب ممکن است به علت وجود پیوندهای ضعیف (حفرات و ترکهای ریز در ناحیه انتقال) که تنش را انتقال نمیدهند، پایین باشد [۳, ۱۹]. در رابطه با توسعه ساختار ناحیه انتقال با افزایش سن بتن، با توجه به تحقيقات كومار مهتا (٢٠]، لي [٢١] و تحقيقات ماسو ([۵]، خواص ساختاری ناحیه انتقال را میتوان با رصد توسعه آن از زمان بتنریزی بهدست آورد، به این صورت که در نسبت آب به سیمان بالا در بتن تازه متراکم شده، تجمع لایههای نازک آب در اطراف سنگدانههای بزرگ بیشتر است. در خميرسيمان، يونهاي كلسيم، سولفات، هيدروكسيد و ألومينات وجود دارد كه از انحلال تركيبات سولفات كلسيم و آلومينات كلسيم توليدشده و سپس براى تشکیل بلورهای بزرگ اترینگایت و هیدروکسید کلسیم ترکیب می شوند. با ییشرفت هیدراتاسیون، بلورهای ضعیف سیلیکات کلسیم هیدراته و نسل دوم بلورهای کوچکتر اترینگایت و هیدروکسید کلسیم شروع به پر کردن فضای خالی بین بلورهای بزرگ موجود اترینگایت و هیدروکسیدکلسیم میکنند. این امر به بهبود تراکم و به تبع آن بهبود مقاومت ناحیه انتقال کمک می کند. نوع و چگالی سنگدانه ها بر خواص ناحیه انتقال موثر هستند [۲۲]. به دلیل اهمیت ناحیه انتقال در بهبود مقاومت مکانیکی و دوام بتن معمولی و ضرورت یافتن رامحل هایی برای سنجش استحکام این ناحیه و بهدست آوردن رابطه آن با نتایج آزمایشگاهی متعارف؛ در این تحقیق تلاش شده است که با تهیه طرح اختلاط آزمایشگاهی با مصالح بومی، تأثیر ناحیه انتقال بر خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی بررسی شود. به همین منظور آزمایشهای مربوط به خواص بتن در حالات تازه و سختشده با استفاده از طرح اختلاط منتخب در چارچوب استانداردها و آیین نامههای معتبر انجام گرفت. همچنین با استفاده از تصاویر ریزنگار الکترونی روبشی و آزمون های غیرمخرب شامل پراش اشعه ایکس و طیف سنجی پراش انرژی اشعه ایکس، ساختار داخلی بتن و عناصر سازنده ناحیه انتقال و اثر نسبت أنها بر خواص مکانیکی و دوام بتن بررسی شد.

7. Maso

۱۰۰ میکرومتر گزارش شده است، اما ضخامت پذیرفته شده به طور گسترده در محدوده ۳۰ تا ۵۰ میکرومتر قرار دارد. ماسو [۵] اذعان دارد در حالی که تعيين خواص ناحيه انتقال با روشهاي مدرن ريزنگارالكتروني روبشي و پراش اشعه ایکس به اندازه کافی آسان است ولی تعیین خواص مکانیکی این ناحیه مشکل است و هیچ راه حل واضحی برای آن وجود ندارد. عناصر مشاهده شده در ناحیه انتقال و نسبت اتمی این عناصر میتوانند منجر به تغییر در استحکام ریزساختار ناحیه انتقال و به تبع آن تأثیر بر مقاومت فشاری و دوام بتن در برابر شرایط محیطی و حملات شیمیایی در طول زمان شود. برای درک کامل تأثیر نسبتهای اتمی عناصر ناحیه انتقال بر بتن، تحقیقات و آزمایشات گستردهای انجام شده است [۸–۶]. خواص میکرومکانیکی و ريزساختاري ناحيه انتقال به نسبت اختلاط و محصولات هيدراتاسيون وابسته بوده و همچنین ویژگی سنگدانهها از نظر اندازه، شکل و بافت سطح بر خواص میکرومکانیکی این ناحیه تأثیر گذار است [۹]. ناحیه انتقال سبب بروز آثار منفی زیادی در بتن میشود، ازجمله اینکه غلظت بلورهای اترینگایت¹ و هیدروکسید کلسیم^۲ که خاصیت چسبانندگی ندارند در این ناحیه بیشتر از دیگر نواحی بتن است و در مقابل، ژل سیلیکات کلسیم هیدراته که اصلی ترین ترکیب سیمانی دارای خاصیت چسبانندگی در بتن است، در این ناحیه کمترین مقدار را دارد [۱۰]. این ادعا که ناحیه انتقال اسرارآمیزترین منطقه برای دانشمندان فن آوری بتن است، اغراق آمیز نخواهد بود [۱۱]. هیدراتاسیون در مجاورت سنگدانهها در مقایسه با خمیرسیمان بهدلیل بالاتر بودن موضعی نسبت آب به سیمان در ناحیه انتقال متفاوت است. میزان رشد و ماهیت هیدراتها ممکن است تحت تأثیر سطح و ماهیت شیمیایی سنگدانهها، منجر به تخلخل شود. علاوه بر تخلخل، حضور ریزترکها، بلورهای چندلایه جهتدار در اطراف سنگدانهها و اندازه بلورها، می توانند بر ريزساختار ناحيه انتقال مؤثر باشند [١٣-١٢]. عامل ايجادكننده پيوستگى بین سنگدانهها و خمیرسیمان کاملاً روشن نشده، ولی بخشی از آن ناشی از درهمتنیدگی مکانیکی بین آنها در اثر زبری سطح سنگدانهها و پیوستگی تحت تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی سنگدانهها، کانی شناسی و شرایط الكترواستاتيكي سطح سنگدانهها، باشد [10-١٢]. بررسي پژوهشگران نشان میدهد که خواص ژئوشیمیایی سنگدانهها روی تولید و افزایش ریزترکها و افزایش قدرت پیوندی در ناحیه انتقال مؤثر است [۱۶, ۱۷]. گرادت و اولیویه" با تجزیه و تحلیل سنگدانهها به روش طیفسنجی پراش انرژی اشعه

^{4.} X-ray energy diffraction spectroscopy (EDX)

^{5.} Kumar Mehta

^{6.} Lea

^{1.} Ettringite (CASH)

^{2.} Ca(OH)2

^{3.} Gradet and Ollivier

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

Table 1. Chemical characteristics of cement used in accordance with the national standard (ISIRI 389)

| LOI | TiO ₂ | SO_3 | Na ₂ O | K ₂ O | MgO | CaO | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | تركيب |
|------|------------------|--------|-------------------|------------------|-----|------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|
| ٠/۴۵ | ۰/۴ | ٠/٩ | ۰/٣ | • /Y | ٣/٩ | 8418 | ۴ | ۴/۹ | ۲ ۱/۹ | درصد |

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

Table 2. Physical characteristics of cement used in accordance with the national standard (ISIRI 389)

| انبساط | گیرش نهایی | گيرش اوليه | سطح مخصوص | وزن مخصوص | نوع |
|-----------------------------|------------|------------|----------------------|----------------------|-------|
| آزمايش اتوكلاو | (ساعت) | (دقيقه) | (cm ² /g) | (g/cm ³) | سيمان |
| $\leq \cdot / \lambda' / .$ | ۶ | ٣٠ | ۳۰۰ | ٣/ ١ | ٢ |

جدول ۳. تجزیه شیمیایی سنگدانههای درشت معدن

Table 3. Chemical analysis of coarse quarry aggregates by standard method (ASTM E1621)

| اکسید | SiO2 | Al2O3 | Fe2O3 | CaO | Na2O | MgO | K2O | TiO2 | MnO | P2O5 | LOI |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|----------------|-------|----------------|-------|
| P1 | ۵۷/۲۳ | ۲/۰۷ | ۲/۲۶ | 19/47 | •/۲٨ | ٠/٧٢ | ۰/۴۱ | •/٣٣ | •/•97 | •/• ۵ ۷ | ۱۷/۱ |
| P2 | ۵۵/۰۱ | ١/٨٢ | ۲/۴۷ | ۱۸/۹۰ | ٠/١٩ | 1/88 | •/47 | •/779 | •/•٣٩ | •/174 | 19/55 |
| P3 | ۵۸/۱۴ | ۲/•۴ | ۲/۳۶ | ۱۷/۹۳ | ۰/۳۵ | ۱/۵۴ | •/٣٩ | •/ ٢ •٨ | •/•۴۵ | •/•۶٧ | ۱۷/۰۳ |

۱ X-Ray Fluorescence (XRF)

جدول ۴. سلامت سنگدانههای درشت طبیعی مصرفی برمبنای استاندارد ASTM C88-13 [۳۸] Table 4. Health of natural coarse aggregates used based on ASTM C88-13[38]

| حداکثر مجاز(٪) | ۶ | ۵ | ۴ | ٣ | ۲ | ١ | شماره نمونه |
|----------------|------|-----|-------|------|------|------|--|
| ١٢ | ٠/۴ | ٠/٢ | • / ١ | ۰/۲۱ | ٠/۴٧ | •/٣۴ | افت وزني آزمايش سلامت با سولفات سديم (٪) |
| ١٨ | • /Y | ٠/۴ | ٠/٢ | ٠/۴ | ٠/٨۴ | •/91 | افت وزني أزمايش سلامت با سولفات منيزيم (٪) |

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲- ۱- مواد و مصالح مصرفی
 ۲- ۱- ۱- سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق سیمان پرتلند نوع ۲ کارون در استان خوزستان میباشد. مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن بهترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شدهاست.

۲- ۱- ۲- سنگدانهها ۲-۱-۲- سنگدانههای درشت مصرفی در این تحقیق شن مصرفی از نوع شکسته بوده که از معادن

شهرستان اندیمشک در استان خوزستان تهیه گردیده و حداکثر اندازه اسمی سنگدانههای درشت ۱۹ mm بودهاست. وزن مخصوص و جذب آب سنگدانههای درشت در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب^۳ ۲/۶ و ٪۱/۱ تعیین گردید. نتایج تجزیه شیمیایی سنگدانههای درشت طبیعی به روش فلورسانس اشعه ایکس^{۱۴} با نمونهبرداری از سهنقطه معدن (RF, 2,P3) مطابق جدول ۳ بهدست آمدهاست. علاوه بر تحلیل XRF نتایج درصد افت وزنی سنگدانهها در برابر سولفاتهای سدیم و منیزیم نیز بهدستآمده و در جدول ۴ ارائه شدهاند که بر همین اساس سلامت سنگدانههای درشت طبیعی تأیید شد.



نمودار ۱. منحنی دانهبندی سنگدانههای ریز و درشت مصرفی

Graph. 1. Graph of the grading curve of fine and coarse aggregates used based on the ASTM C33

جدول ۵. مشخصات فوق روان كننده مصرفي Table 5. Specifications of the superplasticizer used

| کلراید (ppm) | وزن مخصوص (kg/lit) | حالت فيزيكى | pН | رنگ | طبيعت يونى | ترکیب شیمیایی |
|--------------|--------------------|-------------|-----|--------|------------|--------------------------------|
| فاقد يون كلر | ١/•٧ | مايع | ۶-۸ | قهوهای | آنيونى | پلی کربوکسیلات و لیگنوسولفونات |

جدول ۶. مشخصات شیمیایی آب شرب اهواز مصرفی در تحقیق

Table 6. Chemical characteristics of Ahvaz drinking water used in the study

| pН | Mg | Ca ²⁺ | \mathbf{K}^+ | Na ⁺ | Cr^+ | So4 | CaCO3 | عنصر |
|------|----|------------------|----------------|-----------------|--------|-----|-------|--------|
| ۷/۱۳ | 79 | ٨٠٠٠ | <1 | ٢٢ | 418 | ۳۸۴ | ۳۶۰۰۰ | mg/lit |

۲-۱-۲ سنگدانههای ریز مصرفی

خشک به ترتیب ^۳ ۲/۵۶ g/cm و ۱/۲۷٪ تعیین گردید. منحنی دانهبندی شن و ماسه مصرفی در نمودار ۱ ارائه شده است. همارز ماسهای ریزدانه مصرفی معادل ٪۹۱ تعیین گردید.

۲- ۱- ۳- فوق روان کننده

برای کسب کارایی در بتن، از فوقروان کننده بر پایه ترکیبی پلی کربوکسیلات و لیگنوسولفونات استفاده و مطابق استاندارد ASTM استاندارد ACI 211.1 [۲۵] جزئیات طرح اختلاط مرجع مطابق جدول ۲ C494 عمل شده است. مشخصات فوق روان كننده استراپلاستN410 ۱۵ مصرفی در جدول ۵ ارائه شدهاست.

۲- ۱- ۴- آب مصرفی

وزن مخصوص و جذب آب سنگدانههای ریز در حالت اشباع با سطح در این تحقیق آب مصرفی برای ساخت و عمل آوری نمونهها، آب شرب شهر اهواز است که معیارهای توصیه شده توسط استاندارد ASTM C1602 [۲۴] در آن رعایت شده است. مشخصات شیمیایی آب مصرفی در جدول ۶ داده شدهاست.

۲-۲- طرح اختلاطهای تحقیق

در این تحقیق، پس از ساخت و ارزیابی طرحهای اختلاط متنوع براساس مشخص شد و سپس با ساخت ۸۴ نمونه، بر مبنای برنامه آزمایشگاهی ارائه شده در جدول ۸ نتایج خواص مکانیکی، دوام و ریزساختار بتن بهدست آمد.

| | Table 7. Details | in the mang p | | | lerete | |
|------------------------------|----------------------------|------------------------|----------------|-----|--------|--------------------------|
| شن شکسته درشت mm (۹/۵–۱۹) | شن شکسته ریز mm (۵/۹–۵) | ماسه طبیعی mm (۵-۰) | فوق روان کننده | آب | سيمان | اجزای بتن |
| ۵۶۷ | ٣٠۵ | ٩٧١ | ۱/۸ | ۱۷۹ | ۳۵۰ | وزن (kg/m ³) |

جدول ۷. جزئيات طرح اختلاط بتن معمولی Table 7. Details of the mixing plan for conventional concrete

جدول ۸. آزمایش ها و مشخصات نمونه ها

Table 8. Tests and sample specifications

| تعداد | شكل و ابعاد نمونه | نام استاندارد | نام آزمایش | |
|-------|-----------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 17 | مكعبي استاندارد | BS1881:Part 116 | مقاومت فشارى | خواص |
| ۶ | استوانهای استاندار د | ASTM C469 | ضريب ارتجاعي استاتيكي | مکانیکی |
| ٩ | مغزه۳ اینچی استاندارد | BS1881:Part122 | جذب آب غوطەورى نيم ساعتە | |
| ٩ | مكعبي استاندارد | ASTM C642 | جذب آب غوطەورى بلندمدت | |
| ٣ | مكعبي استاندارد | EN BS12930-8 | نفوذ آب تحت فشار | دوام |
| ٩ | مكعبي استاندارد | ASTM C1202 | نفوذ تسريع شده يون كلرايد | |
| ۶ | مكعبي استاندارد | AASHTO T398 | مقاومت الكتريكي | |
| ۶ | مکعب به ابعاد۱۰mm | ه ایکس (XRD) | روش پراش اشع | |
| ۶ | مکعب به ابعاد۱۰mm | رونی روبشی (SEM) | مار در TTT تصاویر ریزنگار الکتر | بررسی ریزساح نامه انتقال (7 |
| ۶ | مکعب به ابعاد۱۰mm | ی اشعه ایکس (EDS) | 112) طيفسنجي پراش انرژ | ناحية التقال <i>(</i> 2 |

۳- آزمایشها

۳– ۱ – آزمایش های بتن تازه ۳– ۱ – ۱ – آزمایش اسلامپ بتن

برای سنجش روانی بتنهای تازه از آزمایش اسلامپ بر اساس برای سنجش روانی بتنهای تازه از آزمایش اسلامپ بر اساس اندازه گیری اسلامپ، بتن تازه در سه لایه با میله مخصوص متراکم شد و با بلند کردن مخروط ناقص و اندازه گیری میزان نشست بتن تازه، اسلامپ در نمونه مرجع بر اساس مشخصات فیزیکی و میزان مواد و مصالح مصرفی به میزان ۱۰۰ میلی متر به دست آمد. ابزار لازم برای آزمایش اسلامپ بتن تازه و روش انجام آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳- ۱- ۲- آزمایش وزن مخصوص بتن تازه

در این تحقیق اندازه گیری وزن مخصوص بتن تازه بر مبنای استاندارد ASTM C138]انجام شد.

۳ – ۲ – آزمایش های بتن سخت شده ۳ – ۲ – ۱ – آزمایش وزن مخصوص بتن سخت شده

پس از عمل آوری نمونهها در آب به مدت ۲ تا ۱۸۰ روزه، آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن سختشده منطبق بر استاندارد 7-EN 12390، در سنین مختلف بهدست آمد.

۳- ۲- ۲- آزمایش مقاومت فشاری بتن

در این تحقیق آزمایش تعیین مقاومت فشاری مطابق با استاندارد EN در این تحقیق آزمایش تعیین مقاومت فشاری مطابق با استاندارد BS 12390-3 بر روی نمونههای مکعبی بتن معمولی در محدودهٔ سنی ۲ تا ۱۸۰ روزه انجام گرفت.

۳- ۲- ۳- آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی

آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن مطابق استانداردهای ASTM C469 و BS 1881-121 و همچنین همزمان با آزمایش نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۷، شماره ۲، سال ۱۴۰۴، صفحه ۲۹۱ تا ۳۱۶



شكل ١. روش انجام أزمايش تعيين اسلامپ بتن

Fig. 1. The method of concrete slump determination test





مقاومت فشاری انجام شد. در این تحقیق برای ترسیم نمودار تنش–کرنش، از نمونههای استوانهای در سنین ۲۸و۹۰ روزه استفاده شد. روش انجام آزمایش مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی استاتیکی در شکل ۲ ارائه شدهاست.

۳- ۲- ۴- آزمایش جذب آب غوطه وری نیم ساعته

آزمایش جذب آب غوطهوری نیم ساعته برای سن ۲۸ روزه انجام گرفت. در توصیههای انجمن تحقیقات و اطلاع رسانی صنعت ساختمان^۱ برای مناطق عربی در حاشیه خلیجفارس و دریای سرخ، حداکثر جذب آب کوتاهمدت طبق BS1881 part122 را ۲٪ تعیین کردهاند [۲۸]. جذب آب نیمساعته مجاز مطابق آیین نامه و طبقهبندی شرایط محیطی قرارگیری سازه

در معرض ([۲۹]) در جدول ۹ ارائه شدهاست.

به نظر می رسد با تجدیدنظر در شرایط ${\rm E}$ و ${\rm F}$ مقدار حداکثر جذب آب نیم ساعته را به 1/3 محدود کرد.

۳- ۲- ۵- آزمایش جذب آب غوطه وری بلندمدت

علاوه بر جذب آب نیم ساعته، جذب آب بلندمدت نیز بر نمونه های مکعبی در سنین ۸۲ تا ۱۸۰ روزه بر اساس استاندارد ASTM C642 [۳۰] انجام گرفت. درصد مجاز جذب آب بلندمدت در جدول ۱۰ آورده شده است. بر اساس دسته بندی کیفی CEB-FIP² [۳۱]کیفیت بتن بر مبنای درصد جذب آب به سه گروه خوب (۳٪>)، متوسط ٪(۵–۳) و ضعیف (۶٪/

^{1.} Construction Industry Research and Information Association

^{2.} Euro International Committee of concrete- International Prestressing Federation (CEB-FIP)



شکل ۳. آزمایش تعیین عمق نفوذ آب در نمونههای بتنی Fig. 3. Test to determine the depth of water penetration in concrete samples

۳- ۲- ۸- آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

مبنای اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی در این پژوهش استاندارد ASTM C470 [۳۵] است که در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه با روش الکترود چهارگانه انجام شد . ابزار تعیین مقاومت ویژه الکتریکی در شکل ۵ ارائه شده است.

در جدول ۱۳ و ۱۴ به ترتیب احتمال خوردگی میلگرد بر اساس نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی و تقسیم بندی کیفیت بتن بر اساس نتایج مقاومت ویژه الکتریکی ارائه شدهاند. با پیشنهاد طبقه بندی زیر، به نظر میرسد برای شرایط D، E و F از کیفیت عالی، برای شرایط B و C از کیفیت خوب و یا خیلی خوب و برای شرایط A کیفیت متوسط بکار گرفته شود.

۳- ۲- ۹- مطالعات ریزساختاری مخلوطهای بتنی ۳-۳- تحلیل فازها و بلورها

دستگاه پراش اشعه ایکس^۲ یکی از تجهیزات منحصربه فرد برای تجزیه و تحلیل مشخصات بلورها در آزمایشگاه است. اصول طراحی دستگاه XRD بر پایه تابش اشعه X به نمونه در زوایای مختلف و تحلیل الگوی پراش یا بازتابش آن است. در این تحقیق تلاش گردید فازهای بلوری مهم در محدودهٔ ۲ تا ۵۰ میکرومتر از سطح مشترک سنگدانه ها با خمیر سیمان به دست آید. برای انجام تحلیل قطعاتی به ابعاد حدود ۱×۱×۱ سانتی متر از مرکز نمونه ها استخراج شده و پس از نگهداری قطعات به مدت ۲۴ ساعت

2. X-ray Diffraction (XRD)

| مختلف محيطي | ر شرایط ه | نیمساعته د | جذب أب | درصد | مجاز | ۹. مقادیر | جدول |
|-------------|-----------|-------------|------------------|------|------|-----------|------|
| | | بایایی [۲۹] | ییننامه <u>ب</u> | در آ | | | |

Table 9. Classification of environmental conditions towhich the structure is exposed [45]

| D، E و F | B و C | А | شرايط محيطى |
|----------|------------|------------|-------------|
| ≤۲ | <u>≤</u> ۳ | <u>≤</u> ۴ | جذب آب (٪) |

جدول ۱۰. درصد مجاز جذب آب بلندمدت در شرایط محیطی

Table 10. Permissible values of half-hour water absorptiontion percentage in different environmental conditionsin the Reliability Regulation [46]

| E و F | D | СэВ | А | شرايط محيطى |
|-------|---|-----|---|---------------------------|
| ٣/۵ | ۴ | ۵ | ۶ | حداکثر جذب آب بلندمدت (٪) |

۳– ۲– ۶– آزمایش تعیین نفوذ آب تحت فشار

EN آزمایش تعیین نفوذ آب در بتن سختشده مطابق استاندارد EN آزمایش تعیین نفوذ آب در بتن سختشده مطابق استاندارد X من BS12930-8 [۳۲] انجام گرفت. در این تحقیق نمونههای بتنی در سن ۲۸ روزه تحت فشار آب ۵۰۰ KPa در مدت ۲۲ ساعت قرار گرفته و سپس نمونهها به دو قسمت تقسیم و بیشینه عمق نفوذ آب در آنها اندازه گیری شد. روش آزمایش نفوذ آب در شکل ۳ ارائه شده است.

۳- ۲- ۷- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید

در این تحقیق آزمایش نفوذ تسریعشده یون کلراید' بر اساس استاندارد ASTM C1202 [۳۳] انجام گرفت. در شکل۴ ابزار آزمایش تعیین نفوذ تسریع شده یون کلراید در بتن ارائه شده است.

بر مبنای طبقه بندی شرایط محیطی منطقه در آیین نامه مدنظر مطابق استاندارد نفوذ تسریع شده یون کلراید در جدول ۱۱ ارائه شده است. بهتر است در طبقه بندی موجود برای برخی رده های مدنظر مانند E یا F شرط سخت گیرانه تری مانند ۱۲۰۰ یا ۱۰۰۰ کولمب منظور شود. در عوض برای شرایط محیطی A حداکثر ۴۰۰۰ کولمب نیز پذیرفته گردد. در جدول ۱۲ نفوذ پذیری در برابریون کلراید بر اساس میزان جریان عبوری ارائه شده است.

1. Rapid Chloride Permeability Test (RCPT)



شکل ۴. آزمایش تعیین نفوذ تسریع شده یون کلراید Fig. 4. Accelerated chloride ion diffusion test

جدول ۱۱. مقادیر مجاز آزمایش های نفوذپذیری بتن مسلح برای اعمال دوام در شرایط محیطی منطقه[۳۳] Table 11. Permissible percentage of long-term water absorption under ambient conditions [33]

| | محدوده مجاز | | أنباء [:] |
|------------------|--|--|----------------------------|
| شرايط E،DوF | شرايط BوC | | |
| \leq Y · · · C | $\leq \mathbf{r} \cdot \cdot \cdot \mathbf{C}$ | $\leq \mathbf{\tilde{r}} \cdot \cdot \cdot \mathbf{C}$ | نفوذ کلرید (در سن ۲۸ روزه) |

جدول ۱۲. نفوذپذیری در برابر یون کلراید بر اساس میزان جریان عبوری[۳٤]

 Table 12. Permissible values of reinforced concrete permeability tests for durability in the environmental conditions of the region[34]

| ناچيز | خیلی کم | کم | متوسط | زياد | نفوذپذیری در برابر یون کلر |
|-------|------------|--------------|--------------|------|----------------------------|
| <1 | ۱۰۰ تا ۱۰۰ | ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ | ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰ | >* | ميزان جريان عبوري (كولمب) |



شكل ۵. تعيين مقاومت ويژه الكتريكي

Fig. 5. Determination of electrical resistivity

جدول ١٣. احتمال خوردگی میلگرد بر اساس أزمایش مقاومت الکتریکی[٣٦]

Table 13. Permeability to chloride ions based on the flow rate[36]

| ناچيز | کم | زياد | خیلی زیاد | احتمال خوردگی میلگرد |
|------------|------------|-----------|------------|------------------------------------|
| بیش از ۲۰۰ | ۱۰۰ تا ۲۰۰ | ۵۰ تا ۱۰۰ | کمتر از ۵۰ | مقاومت ويژه الكتريكي بتن (اهم-متر) |

جدول ۱۴. تقسیم بندی پیشنهادی کیفیت بتن بر اساس مقاومت ویژه الکتریکی[۳۷]

Table 14. Corrosion probability of rebar based on electrical resistance testing[37]

| خیلی ضعیف | ضعيف | متوسط | خوب | خيلى خوب | عالى | كيفيت بتن |
|-----------|----------|-----------|------------|------------|------|--------------------------------|
| <۵. | ۵۰ تا ۲۵ | ۷۵ تا ۱۰۰ | ۱۰۰ تا ۱۵۰ | ۱۵۰ تا ۲۰۰ | >7 | مقاومت ويژه الكتريكي (اهم-متر) |



شکل ۶. فازیابی بلورهای ریزساختار بتن به روش XRD Fig. 6. Phase determination of concrete microstructure crystals using XRD method

در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد در محفظه خلاء بررسی شدند. تحلیل ها در آزمایشگاه مرکز پژوهش متالورژی دانشگاه صنعتی اصفهان بر نمونه های سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام گرفت. در شکل ۶ نمایی از دستگاه تحلیل به روش XRD برای ارزیابی وضعیت فازهای بلوری ریز ساختار بتن ارائه شده است.

X'Pert high score plus در نرمافزار XRD در نرمافزار فازهای بلوری تشکیل شده مربوط به هر فاصله صفحات اتمی برای نمونهها، شناسایی شدند. فازهای بلوری شناسایی شده در این تحقیق شامل CH و CSH ناشی از هیدراتاسیون سیمان و فاز مهم بلوری سیمان CaO و فازهای مهم بلوری سنگدانهها SiO2 و CaCO3 می باشند.

۳-۲-۹-۲- تحلیل تصاویر ریزنگار الکترونی روبشی و طیفسنجی پراش انرژی اشعه ایکس

نمونههای آزمایش شده در بخش تحلیل XRD توسط لایهای از طلا به ضخامت چند آنگستروم، پوشش شدند تا سطح نمونهها به علت عدم رسانایی مناسب و بهمنظور حرکت آزادانه الکترونها در ریزنگار الکترونی روبشی رسانا شوند. سپس از سطح قطعه با ریزنگار الکترونی روبشی از نوع روبشی رسانا شوند. سپس از سطح قطعه با ریزنگار الکترونی روبشی از نوع روبشی رسانا شوند. سپس از مطح قطعه با ریزنگار الکترونی روبشی از نوع روبشی رسانا شوند. سپس از مطح قطعه با ریزنگار الکترونی روبشی از نوع روبشی رسانا شوند. سپس از مطح قطعه با ریزنگار الکترونی روبشی از نوع روبشی رسانا شوند. سپس از مطح قطعه با ریزنگار الکترونی روبشی از نوع منین ۲۸ و ۹۰ روزه هر کدام ۳ نمونه به ابعاد استاندارد آمادهسازی، خشک و تحت خلاً قرار گرفته و در معرض عکس برداری به روش SEM قرار گرفتهاند. همچنین برای بررسی کیفیت ناحیه انتقال علاوه بر تهیه تصاویر SEM



شکل ۷. طیفسنجی پراش انرژی اشعه ایکس Fig. 7. X-ray energy dispersive spectroscopy

جدول ۱۵. فازیابی و تشخیص هیدراتهای بتن به روش طبقهبندی تراگارده[۳۸]

 Table 15. Proposed classification of concrete quality based on electrical resistivity[38]

| S/Ca | (Al+Fe)/Ca | Ca/Si | نوع فاز شناساییشدہ |
|-------------|---------------|------------|-----------------------|
| _ | ≤٠ /۲ | ۸/۰ تا ۲/۵ | CSH |
| ≤٠/۰۴ | <u>≤</u> • /۴ | \geq 1 · | СН |
| $>/1\Delta$ | >•/۴ | \geq F | AFm |

تحلیل طیفسنجی به روش خطی برای عنصرهای Fe ،Ca ،Si ، عام، Fe ،Ca ،Si و O انجام گرفت. در شکل ۷ دستگاه ریزنگار الکترونی روبشی و طیفسنجی EDS ارائه شدهاست.

تراگارده [۳۸] از طبقهبندی داده شده در جدول ۱۵ برای تشخیص هیدراتهای غنی از CH، CSH و AFm استفاده کرد. در این تحقیق نیز از طبقهبندی مشابهی برای مطالعه و شناسایی فازهای بلوری استفاده گردیده است.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

```
۴- ۱- ارائه و تفسیر نتایج رئولوژی بتن
۴- ۱- ۱- اسلامپ بتن معمولی تازه
```

در این پژوهش برای تعیین اسلامپ بتن تازه، از روش ارائهشده در استاندارد [ASTM-C143] استفادهشده است. میانگین اسلامپ در

نمونههای بتن بر اساس مشخصات فیزیکی و مقادیر مواد و مصالح مصرفی و مقدار ۱/۸ کیلوگرم بر مترمکعب فوقروان کننده بهمیزان ۱۰۰ میلی متر بهدست آمد.

۴– ۱– ۲– چگالی بتن معمولی تازه

در این تحقیق بر مبنای استاندارد ASTM C138 وزن مخصوص بتن تازه معادل ۲/۳۷ g/cm^۳ بهدست آمد.

۴- ۲- مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سختشده

آزمایش تعیین مقاومت فشاری در سنین ۲، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه بر اساس استاندارد BS1881:Part116 انجام شده است. هر عدد بیانگر متوسط ۳ نمونه مکعبی ۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰ سانتیمتر مکعبی میباشد. نتایج مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سختشده در جدول ۱۶ آورده شده است. همانگونه که نتایج مقاومت فشاری در سن ۲ تا۱۸۰ روزه نشان میدهد، با افزایش سن نمونه بتنی، مقاومت فشاری افزایش داشته است؛ به گونهای که مقاومت فشاری بتن در سن ۱۸۰ روزه نسبت به ۲۸ روزه به میزان حدود ٪۱۳ رشد نشان میدهد. وزن مخصوص بتن سختشده در سن ۱۸۰ روزه به میزان حدود ز به ۲۸ روزه ٪۳ کاهش پیدا کرده است. نتایج ترکیبی مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سختشده در نمودار ۲ ارائه شده است.

علت رشد مقاومت فشاری را میتوان این گونه بیان کرد که مقاومت سنگ مادر سنگدانههای طبیعی مصرف شده و ترکیبات کانی شناسی آنها در نتایج مقاومت فشاری تأثیر مستقیم داشته و عامل دیگر واکنش شیمیایی محتمل سیلیس آزاد در سطح سنگدانههای مصرفی با هیدروکسیدکلسیم و

^{1.} Trägárdh

Table 17. Static modulus of elasticity and compressivestrength of conventional concrete at ages of 28 and 90days

| سن نمونه | (N | مقاومت اری(IPa | فش | ضریب ارتجاعی استاتیکی(GPa) | | |
|----------|------|-------------------|------|-------------------------------|------|----|
| ۲۸ روزه | ۳۵ | 36/6 | ۳۳/۴ | ۲۲/۳ | ۲۳/۶ | ۲۱ |
| ۹۰ روزه | ۳۸/۶ | 41 | 36/2 | ۲۵/۵ | ۲۷ | 74 |

پارامترهای مهمی است که همیشه به عنوان اولین پارامتر در طراحی مطرح است. ضریب ارتجاعی همانند مقاومت با توجه به نرخ بار وارده می تواند از نوع استاتیکی یا دینامیکی باشد. ضریب ارتجاعی دینامیکی بزرگتر از نوع استاتیکی است ولی هرچه مقاومت بیشتر باشد، آن دو مقدار به هم نزدیکتر میباشند. لازم به ذکر است مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن از مهمترین ویژگیهای بتن برای طبقهبندی در آیین نامههای داخلی و بینالمللی هستند، لذا بررسی پارامترهای تاثیر گذار در آن ویژگیها حائز اهمیت است [۳۹]. در طراحی سازههای بتنی، ضریب ارتجاعی و شکل پذیری نقش مهمی را دارا میباشند، بهویژه در اکثر پروژههای بزرگ از جمله سدسازی، احداث نیروگاه هستهای، مخازن نفت و دیگر موارد از پارامترهای اولیه و مهم که همیشه به عنوان اولین پارامترها در طراحی محسوب می شوند، ضریب ارتجاعی و شکلپذیری بتن هستند. همچنین در سازههای بتنی، اغلب در شرایط بهرهبرداری و یا بعضاً در بررسی حالت نهایی از ضریب ارتجاعی استفاده می شود. رفتار بتن به دلیل استفاده از مصالح با ویژگیهای متفاوت و ناهمگن آن، نسبت به دیگر مواد همگن تابع عوامل بسیار زیادی است و رفتار ییچیده و بعضاً ناشناختهای را دارد [۴۰]. تغییر شکل حاصل در بتن تا اندازهای به تغییرشکل ارتجاعی سنگدانهها ارتباط دارد. نوع سنگدانههای مصرفی بر روی ضریب ارتجاعی تأثیرگذار است [۴۱]. نتایج مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن سختشده در جدول ۱۷ آورده شده است.

همبستگی خطی ضریب ارتجاعی استاتیکی با مقاومت فشاری بتن معمولی در نمودار ۳ نشان داده شده است؛ به گونهای که ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن معمولی در فاصله زمانی ۲۸ تا ۹۰ روزه ٪۱۴/۳ افزایش داشته و در این محدودهٔ زمانی میانگین مقاومت فشاری ٪۱۰/۳ افزایش پیدا کرده است. جدول ۱۶. مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتنهای معمولی در سنین ۷ تا ۱۸۰ روزه

 Table 16. Compressive strength and specific gravity of conventional concrete at ages of 7 to 180 days

| سن نمونه (روز) | مقاومت فشاری (MPa) | وزن مخصوص بتن سختشده((g/cm ³) |
|-------------------|-----------------------|--|
| ٧ | ۲۷/۹ | ۲/۳۳ |
| 77 | ۳۵ | ۲/۳۳ |
| ٩٠ | ۳۸/۶ | χ/χ |
| ۱۲۰ | ٣٩/۵ | ۲/۲۶ |



نمودار ۲. مقاومت فشاری و وزن مخصوص برحسب سن نمونهها

Graph 2. Graph of changes in compressive strength according to the age of the samples

بهبود ناحیه انتقال با تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته باشد که در بخش ریزساختار بتن بحث شده است. لازم به ذکر است که مطابق نتایج تجزیه شیمیایی به روش XRF درصد سیلیس سنگدانههای مصرفی بالای ٪۵۰ بوده است. علاوه بر آن در این تحقیق یکی از جنبههای پیوستگی در ناحیه انتقال بتن از نوع فیزیکی بوده و وابسته به تخلخل و زبری بافت، شکل و گوشهداری سنگدانه بوده و سبب قفلوبست اجزای بتن شده است. سنگدانههای مصرفی از نوع رسوبی بوده و علاوه بر داشتن زبری سطح و گوشهدار بودن شکل سنگدانهها، مقداری پیوند شیمیایی بین هیدروکسیدهای سیمان با سطح سنگدانههای مصرفی وجود داشته است.

۴- ۳- ضریب ارتجاعی استاتیکی

ضریب ارتجاعی بتن، در تحلیل و طراحی سازههای بتنی دارای اهمیت ویژهای است. در اکثر پروژههای بزرگ و مهم، ضریب ارتجاعی از جمله



نمودار ٤. تغییرات جذب آب نیمساعته و بلندمدت بتن در سنین ۲۸ تا ۱۸۰ روزه

Graph 4. Diagram of changes in half-hour and longterm water absorption of concrete at ages of 28 to 180 days

حجمی، نمودار همبستگی بین تمامی سنین مقاومت فشاری و جذب آب طرح مخلوطهای بتن معمولی، ترسیم و ضرایب همبستگی مورد بررسی قرار گرفت. در خصوص نتایج جذب آب بلندمدت به غالب بودن تخلخل ساختار ملات بر ضعف سنگدانهها ارتباط دارد با این توضیح که افزایش زمان غوطهوری نمونهها به منظور اندازهگیری جذب آب بلندمدت فرصت نفوذ آب به عمق نمونهها و رسیدن آب به سنگدانههای مخلوط بتنی در اختیار می گذارد. میزان کاهش جذب آب حجمی را می توان به علت پدیده کاهش منافذ و همچنین مسیرهای منتهی به آنها و یا طولانی شدن مسیرهای عبور جریان آب در ریزساختار بتن دانست. به نظر میرسد مشارکت سیلیس آزاد سطوح سنگدانهها در بهبود ریزساختار ناحیه انتقال و کاهش منافذ بتن بەدلىل تشكيل ژل سىلىكات كلسىم ھىدراتە ثانويە موجب كاھش ابعاد اين بلورها و كاهش ضخامت ناحیه انتقال شده و از این طریق موجب كاهش نفوذپذیری و کاهش میزان جذب آب حجمی در بتن شده است. همچنین بر اساس مشاهدات می توان چنین استنباط کرد که نتایج این آزمایش تحت تاثیر تغییرات جریان منفذی درونی و تغییرات شیمیایی در ساختار این بتنها قرار گرفته است. لازم به ذکر است که ناحیه انتقال به دلیل حضور بلورهای شش ضلعی بزرگ هیدروکسید کلسیم در این ناحیه دارای تخلخل قابل توجهی می باشد؛ در حالی که این ناحیه در خمیر سیمان وجود ندارد. نتایج جذب آب نیم ساعته آمده مطابق استاندارد BS 1881 کمتر از ۲٪ بوده و بتنی با دوام را نشان داده و نتایج جذب آب بلندمدت نشان میدهد که درصد جذب آب کمتر از ^۳٪ داشته و طبق دستهبندی کیفی CEB-FIP در رده کیفی خوب قرار می گیرد. نتایج بهدست آمده جذب آب و همبستگی با مقاومت فشاری بتن معمولی در نمودارهای ۴ و ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد





Graph 3. Graph of changes in concrete compressive strength according to static elasticity coefficient

شایان ذکر است که مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی بتن، به یک میزان تحت تأثیر سن عمل آوری قرار ندارند. در مخلوطهای بتنی با مقاومتهای مختلف، در سنین ۲۸ تا۹۰ روزه، ضریب ارتجاعی با سرعت بیشتری در مقایسه با مقاومت افزایش یافته است و این پدیده ممکن است ناشی از تأثیرات مثبت افزایش چگالی ناحیه انتقال، براثر واکنشهای آهسته بین قلیائیهای خمیرسیمان و سنگدانه باشد و تأثیر بیشتری بر روی منحنی تنش – کرنش و ضریب ارتجاعی، در مقایسه با مقاومت فشاری بتن، بگذارد. از دیگر عوامل مؤثر بر ضریب ارتجاعی نیز میتوان به طراحی مخلوط (میکس)، نرخ بارگذاری، شرایط عمل آوری، مواد افزودنی معدنی و شیمیایی اشاره کرد.

۴-۴- جذب آب غوطهوری

نظر به اینکه با افزایش سن بتن، ناحیه انتقال به تراکم و بلوغ مطلوبی می سد، لذا استحکام و چسبندگی این ناحیه از ایجاد ترک و شکست بتن تا زمانی که میزان بار فشاری وارده به مقدار مقاومت سنگدانه نرسیده باشد، جلوگیری می کند؛ چون که مقاومت سنگدانههای مصرفی معمولاً نسبت به ناحیه انتقال از مقاومت بالاتری برخوردار هستند. بدین ترتیب بار فشاری بر بتن سختشده به سنگدانههای مخلوط بتنی و ناحیه انتقال وارد شده و عامل تعیین کننده مقاومت نمونهها در این حالت، میزان مقاومت سنگ مادر که سنگدانه از آن مشتق شده و همچنین میزان بلوغ ناحیه انتقال، خواهد بود. مخلوطهای ساختهشده این پژوهش در ارزیابی نتایج بهدستآمده از مقاومت فشاری در وضعیت مطلوبی قرار داشتند. با نگاهی کلی به نتایج و بهمنظور یافتن رابطهای ساده بین مقاومت فشاری و میزان جذب آب



نمودار ۵. تغییرات مقاومت فشاری بتن بر حسب جذب آب بلندمدت

Graph 5. Graph of changes in concrete compressive strength depending on long-term water absorption

که بین مقاومت فشاری و جذب آب بلندمدت بتن در سنین ۲۸ تا ۱۸۰ روزه یک رابطه خطی با ضریب همبستگی ۰/۷۸ وجود دارد و با کاهش ٪۳۱/۴ جذب آب بلندمدت، میزان مقاومت فشاری معادل ٪۱۸/۳ افزایش یافت.

۴- ۵- نفوذ آب تحت فشار

نتایج مربوط به آزمایش میزان نفوذ آب انجامشده بر روی نمونههای بتنى ٢٨ روزه براى طرح اختلاط منتخب پژوهش معادل ١٢ ميلىمتر بهدست آمده و با مطابقت میزان عمق نفوذ با آییننامه پیشنهادی پایایی بتن در حاشیه خلیجفارس و دریای عمان، طرح اختلاط بتن تحقیق در دسته بندی شرایط محیطی شدید قرار گرفته است. علیرغم اینکه دستیابی به حداکثر عمق نفوذ آب ۱۰ میلیمتر عملاً بسیار مشکل است و در حالت طبیعی و شرايط واقعى فشار ۵ بار وجود ندارد بههرحال الزاماً اين آزمايش بهنوعى تعیین کننده کیفیت بتن است و در این پژوهش بتن معمولی در شرایط محيطي فوق العاده شديد قابليت استفاده را ندارد. معمولاً راهكارهاي متعددي مانند انتخاب مناسب مصالح و تعيين دقيق نسبتهاى اختلاط، عمل أورى مناسب، کاهش انواع درزها، روش صحیح قالب برداری، انواع روشهای حفاظت از آرماتورها، استفاده از الیاف و یا پوششهای پلیمری، استفاده از پوششهای صنعتی، استفاده از ژئوسنتتیکها برای کاهش عمق نفوذ آب پیشنهاد شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که بایستی دقت کافی در میزان مصرف افزودنی فوق روان کننده برای افزایش دوام بتن نیز صورت پذیرد. قابلذکر است که مصرف فوق روان کننده برای رسیدن به الزامات حالت خميري غيرقابل اجتناب بوده و مصرف اين ماده سبب افزايش هوازايي در بتن نیز می گردد که درنتیجه موجب افزایش خلل و فرج در نمونهها شده و



نمودار۶. تغییرات مقاومت فشاری بتن برحسب نفوذ تسریعشده یون کلراید

Graph 6. Graph of changes in concrete compressive strength depending on accelerated chloride ion penetration

به نظر میرسد در این پژوهش بخشی از افزایش عمق نفوذ ناشی از مصرف اجباری فوق روان کننده برای بهبود رئولوژی بتن بوده است.

۴- ۶- نفوذ تسریع شده یون کلراید

نتایج میزان شار عبوری از نمونههای بتنی بر اساس استاندارد ASTM C1202 نشان می دهد که میزان نفوذ یون کلراید در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب معادل ۷۷۰ و ۷۳۰ کولمب بوده و در طیف نفوذ خیلی کم قرار می گیرد. برای ارتقای کیفیت بتن و قرار گرفتن در بازه خطر نفوذ قابل چشمیوشی میتوان با جایگزینی مواد یوزولانی به جای سیمان و اصلاح ريزساختار ناحيه انتقال به اين هدف دسترسى پيدا كرد. درحال حاضر به استناد آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیجفارس و دریای عمان روش RCPT بهعنوان یکی از روشهای کنترل کیفی بتن در شرایط محیطی خلیجفارس و دریای عمان در مدارک فنی کشور مطرح است. در برنامههای آزمایشگاهی با توجه به اینکه شرایط آمادهسازی نمونهها یکسان است و درصد پوزولان جایگزین شده در عمده نمونه ها به میزان برابر استفاده شده؛ لذا دخالت یون OH⁻ علاوه بر یون کلر در انتقال جریان عبوری از نمونه، یکسان است. بنابراین باور موجود در این خصوص که کاربرد برخی مواد مکمل سیمانی از راه کاهش یون OH⁻ در آب منفذی منجر به کاهش جریان عبوری می گردند و این کاهش الزاماً نشانگر مقاومت بالاتر در برابر نفوذ یون کلر نیست تا حدودی برطرف می شود. در این پژوهش بهدلیل عدم استفاده ار مواد پوزولانی در طرح اختلاط بتن معمولی دخالت یونهای متفرقه علاوه بر یون کلر منتفی بوده و خطای آزمایش پایین می آید. مطابق نمودار ۶ رابطه خطی معکوس با ضریب همبستگی ۰/۹۴ بین میانگین نفوذ تسریع



نمودار ٧. تغييرات مقاومت فشارى برحسب مقاومت الكتريكي

Graph 7. Graph of changes in compressive strength in terms of electrical resistance

شده یون کلراید و میانگین مقامت فشاری بتن معمولی بهدست آمد؛ به گونهای که در فاصله زمانی ۲۸ تا ۹۰ روزه با کاهش ٪۵/۲ نفوذ یون کلراید، مقاومت فشاری بتن معمولی ٪۱۰/۳ افزایش پیدا کرده است.

۴– ۷– مقاومت ویژه الکتریکی

طبق مشاهدات و مقايسه نتايج مشخص گرديد كه مقاومت ويژه الكتريكي بتن وابستكي مستقيم به ريزساختار ماتريس سيمان، خلل و فرج آن، تخلخل و اندازه حفرات در مخلوط بتنی دارد. همچنین تابعی از غلظت و تحرک یونها در منافذ است. شیمی سیمان، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان و استفاده مواد افزودنی و مکملهای سیمانی، فاکتورهایی هستند که بر ریزساختار ماتریس سیمانی بتن و منافذ آن اثر گذارند؛ بنابراین بر مقاومت الكتريكي بتن نيز تأثير گذارند كه نتايج حاصله از اين پژوهش اين عوامل مؤثر را تائید مینماید. با توجه به نتایج حاصله مقدار میانگین مقاومت الکتریکی ۲۸ و ۹۰ روزه برای بتن معمولی به ترتیب معادل ۳۶۰ و ۵۳۵ اهم متر است که در تقسیم بندی پیشنهادی در استاندارد ACI 222R-01 احتمال خوردگی آرماتور بر مبنای نتایج در آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی، بسیار ناچیز بهدست آمده است. همچنین بر اساس طبقهبندی کیفیت بتن بر مبنای آزمایش مقاومت الکتریکی مالهوترا و همکاران [۴۲]، بتن مورد استفاده در پژوهش دارای کیفیت عالی است. روابط همبستگی مقاومت ویژه الکتریکی با مقامت فشاری بتن معمولی و نفوذ تسریعشده یون کلراید در نمودارهای ۷ و ۸ آمده است؛ به گونهای که در فاصله زمانی ۲۸ تا ۹۰ روزه با افزایش ٪۴۸/۶ مقاومت ویژه الکتریکی، مقاومت فشاری بتن معمولی ٪۱۰/۳ افزایش داشته و نفوذ تسریع شده یون کلراید بتن معمولی ٪۵/۲ کاهش پیدا کرده است.



نمودار ۸. تغییرات نفوذ تسریع شده یون کلراید بتن برحسب مقاومت ویژه الکتریکی

Graph 8. Graph of changes in accelerated chloride ion penetration of concrete in terms of electrical resistivity

۴- ۸- تحلیل ریزساختار ۴- ۸- ۱- تحلیل ریزساختار با استفاده از طیف سنجی XRD

با به کارگیری نرمافزار Xpert High Score Plus و بررسی نتایج آزمایش پراش سنجی اشعه ایکس در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه، شدت پیک فازهای محصولات هیدراتاسیون تشکیل شده در زاویههای مختلف دو تتا تعیین شد. فازیابی بر مبنای بانک دادههای نرمافزار انجام گرفته و فاصله صفحات اتمی، شدت پراش نسبی، زاویه پراش و شدت نقطه بیشینه و همچنین فازهای بلوری مربوط به هر فاصله صفحات اتمی برای نمونههای بتنی بهدست آمد. فازهای بلوری موردمطالعه در این تحقیق شامل فاز مهم بلوری سيمان هيدراته نشده بهصورت آهک آزاد، فازهای بلوری مهم سنگدانهها شامل کوارتز و کربنات کلسیم و همچنین فازهای مهم هیدراتاسیون سیمان شامل هیدروکسید کلسیم و سیلیکات کلسیم هیدراته و اترینگایت بوده است. با استفاده از کارتهای شناسایی شده مربوط به فازهای بلوری انتخابی و مقایسه شدت قله موجود در کارت و مقایسه با اطلاعات بهدستآمده از آزمایش پراشسنجی مخلوطها، رتبهبندی کمی شدت قلههای طیف پراش پرتوایکس برای فازهای بلوری بهدستآمد. ازآنجاییکه شدت قلهها در الگوی پراش پرتوایکس، متناسب با مقدار فازهای موجود در نمونه است؛ با رتبهبندی کمی شدت قلهها میتوان به میزان تقریبی و یا شدت نسبی میزان حضور فاز مورد نظر (آنالیز کمی به صورت تقریبی) در مخلوطهای بتنی دسترسی پیدا نمود. نتایج بهدست آمده از فازیابی به روش XRD در نمودار ۹ مشاهده می شود. نتایج نشان داد که با افزایش سن نمونه بتنی، برخلاف انتظار شدت پیک CH بیشتر شده و در مقابل شدت قله CSH نیز افزایش یافت؛ که علت آن مصرف CH اضافی به واسطه سیلیس آزاد در سطوح



نمودار ۹. پراش اشعه ایکس نمونه بتن در سن ۲۸ و ۹۰روزه

Graph 9. X-ray diffraction diagram of concrete sample at 28 and 90 days of age

| و ۹۰روزه | ۶۲۸ و | , معمولی | ص بتن | ا خواد | مقایسه ب | اسيون در | ت هيدراتا | محصولا | ت قلەھاي | مجموع شد | جدول ۱۸. |
|----------|-------|----------|-------|--------|----------|----------|-----------|--------|----------|----------|----------|
|----------|-------|----------|-------|--------|----------|----------|-----------|--------|----------|----------|----------|

 Table 18. Total peak intensity of hydration products compared to properties of conventional 28 and 90day concrete

| نفوذ تسريع شده يون كلرايد(C) | مقاومت الكتريكي (M Ω) | مقاومت فشاری (MPa) | هيدر وكسيد و اكسيدكلسيم و اترينگايت (CH+CaO+Ettri) | اترینگایت (Ettringite) | كربنات كلسيم (CaCO3) | (SiO2) اکسید سیلیسیم | (CaO) اکسید کلسیم | سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) | هیدورکسید کلسیم (CH) | سن نمونه بتن معمولی |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------|---|------------------------|------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|
| ٧٧٠ | 360 | ۳۵ | ۱۳۵۸ | 180 | ١١٨٨ | 1808 | ۷۲۳ | ۳۶۹ | 410 | ۲۸ روزه |
| ۷۳۰ | ۵۳۵ | ۳۸,۶ | 7114 | ۳۹۸ | 1448 | 1017 | ۶۹۵ | 401 | 1.41 | ۹۰ روزه |
| -Δ/۲ ⁻ /. | + ۴ ۸/۶'/. | +۱۰/۳٪. | +Δ Υ '/. | +۲۴۹% | +Υ 1/Δ ⁻ /. | -۵/۶ ⁻ /. | -٣/٩٪ | +74% | +۲۱۵٪ | تغييرات |

سنگدانه سیلیسی و تشکیل CSH ثانویه با گذشت زمان و پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون است. لازم به ذکر است که با بررسی نتایج، یافتههای آنالیز XRD با مقاومت فشاری و تصاویر SEM مطابقت داشته است. نتایج شدت قلههای محصولات هیدراتاسیون با خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی در جدول ۱۸ ارائه شده است.

تغییرات شدت قلههای محصولات هیدراتاسیون در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در نمودار ۱۰ ارائه شدهاست. بهدلیل عدم استفاده از میکروسیلیس شدت

قلههای CH و اترینگایت بهترتیب ۲/۱۵ و ۲/۴۹ برابر افزایش یافتهاست. با بررسی همبستگی نتایج شدت قلههای CSH و CaCO3 با مقاومت فشاری، مشخص شد که رابطه مستقیمی بین فازهای مذکور و مقاومت فشاری برقرار است که علت آن خاصیت چسبندگی سیلیکات کلسیم هیدراته، تراکم ریزساختار ناحیه انتقال و همچنین خاصیت پرکنندگی کربنات کلسیم است. به گونهای که با افزایش ۲۹۲ فاز سیلیکات کلسیم هیدراته و ۲۱/۵ فاز کربنات کلسیم، میزان مقاومت فشاری بتن معمولی ۲۰/۳ افزایش پیدا







کردهاست. به طور مشابه خواص دوام بتن معمولی نیز بهبود پیدا کرده؛ بهطوری که مقاومت ویژه الکتریکی ^۲/۸۸ افزایش و نفوذ تسریعشده یون کلراید ^۲/۸۲ کاهش یافته است. لازم به ذکر است که در صورت استفاده از مواد پوزولانی جایگزین سیمان، امکان بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی وجود خواهد داشت.

۴- ۸- ۲- تحلیل ریزساختار بتن معمولی با طیف سنجی EDS وتصاویر SEM

نسبتهای اتمی عناصر ناحیه انتقال بر خواص مکانیکی و دوام بتن تأثیر می گذارد. پس از فازیابی بلورهای تشکیل شده در ناحیه انتقال، عناصر سازنده این فازها در مرز سنگدانه و به صورت خطی تا فاصله ۵۰ میکرومتر شناسایی





شد. تصویر SEM از ناحیه انتقال در شکل ۸ ارائه شده است.

عناصر مهم موجود در ناحیه انتقال شامل کلسیم،سیلیسیم، اکسیژن، آلومینیم وآهن هستند که نسبتهای این عناصر نقش تعیین کنندهای بر خواص مکانیکی و دوام بتن دارند. در تحقیقات تراگارده و اردیم و همکاران [۳۸, ۳۴, ۴۴] از طبقهبندی مشابهی برای مطالعه و شناسایی فازهای بلوری و نسبتهای عناصر تشکیل دهنده فازها استفاده گردیده؛ ولی فرمول ریاضی مشخصی برای ارتباط این نسبتها با خواص مکانیکی و دوام بتن ارائه نشده است. در این تحقیق به بررسی روابط مختلف (خطی، نمایی، چند جملهای و توانی) بین نتایج مکانیکی، دوام و ریزساختار بتن معمولی پرداخته شد. نمودار ۱۱ عناصر را در ناحیه انتقال در فاصله ۱۰ میکرومتری از مرز سنگدانه نشان میدهد. نمودارهای ۱۲ و ۱۳ نسبت وزن کلسیم به سیلیسم در ناحیه



نمودار ۱۱. نمایی از عناصر شناسایی شده در فاصله ۱۰میکرومتری از مرز سنگدانه





نمودار ۱۲. نسبت اتمی کلسیم به سیلیسیم در ناحیه انتقال بتن در سنین ۲۸ و ۹۰روزه

Graph 12. Graph of the atomic ratio of calcium to silicon in the transition zone of concrete at ages 28 and 90 days

انتقال بتن معمولی در سنین ۲۸ و ۹۰روزه نشان میدهند. علاوه بر این نسبت مجموع عناصر آلومینیم و آهن به عنصر کلسیم در فاصله مرز تا ۳۰ میکرومتری از سنگدانه معادل ۲۰/۱۵ تا ۰/۲ ثبت گردیده و در فاصله بیشتر از ۳۰ میکرومتر افزایش یافته و تا فاصله ۵۰ میکرومتر به ۰/۳۷ رسیده است. در مرز اتصال ناحیه انتقال با سنگدانه بیشترین نسبت وزنی Ca/Si معادل ۱۷/۵۹ بهدست آمده که بیانگر نسبت بالای CH در تماس با سنگدانه است

تشخیص هیدراتهای غنی از CH ، CSH و دارای منوسولفات(AFm) در ناحیه انتقال، مطابق جدول ۱۹ و ۲۰ نسبتهای وزنی و اتمی Ca، Ca/Si/ (Al+Fe) و S/Ca بتن معمولی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بررسی شده است. نتایج نشان داد که تا سن ۹۰ روزه نسبت Ca/Si در مرز با سنگدانه ۵/۶ برابر مقدار این نسبت در فاصله ۱۰ میکرومتری از سنگدانه بوده که این پدیده نشان دهنده رسوب گذاری بیشتر بلورهای هیدروکسیدکلیسم در مجاور سنگدانه است که رسوبگذاری CH و اترینگایت در تصویر SEM مشاهده و مطابق شکل ۹ ارائه شده است. یافته ها با تحقیق وارگاس و همکاران[۴۵] در مورد نقش ناحیه انتقال در توسعه مقاومت فشاری همسو هستند. نسبت وزنی Ca/Si با فاصله گرفتن از مرز سنگدانه تا فاصله ۳۰ میکرومتری رشد داشته و سیس تا فاصله ۵۰ میکرومتر روند کاهشی دارد. نتایج بهدست آمده از نسبت وزنی Ca/Si در نمودار ۱۴ ارائه شده است. نتایج بهدست آمده مطابق نمودار ۱۵ نشان می دهد که نسبت وزنی Ca/Si در فاصله مرز سنگدانه تا فاصله ۳۰ میکرومتری، همبستگی پایینی با مقاومت فشاری بتن داشته؛ ولی در فاصله ۳۰ تا ۵۰ میکرومتری رابطه خطی مستقیم با ضریب همبستگی قابل قبول ۰/۸۶ بین نسبت وزنی Ca/Si و مقاومت فشاری بهدست آمد. بطور مشابه برای همبستگی نسبت وزنی Ca/Si با نفوذ تسریع شده یون کلراید در محدودهٔ mµ (۵۰–۳۰) ، رابطه خطی مستقیم ۲۹۱ Y=۶/۳۴ ۲ ضریب همبستگی قابل قبول ۲۸۶ - R^۲ برقرار میباشد. نتایج نشان، داد که نسبت وزنی Al+Fe)/Ca) در محدودهٔ mµ (۰–۳۰) از مرز سنگدانه، ۱/۱۵ تا ۰/۲ متغیر بوده و با عبور از فاصله ۳۰ میکرومتری نسبت مذکور تا فاصله ۵۰ mµ، رشد ۲/۲ تا ۰/۳۷ داشته است.

و این پدیده در طیف سنجی XRD به اثبات رسید. در این تحقیق برای



نمودار ۱۳. نسبت وزنی انباشته کلسیم به سیلیسیم در ناحیه انتقال بتن در سنین ۲۸ و ۹۰روزه

Graph 13. Graph of the weight ratio of accumulated calcium to silicon in the concrete transition zone at ages 28 and 90 days

جدول ۱۹. نسبت عناصر سازنده ناحیه انتقال بتن در سن ۹۰ روزه

| _ | نسبت عناصر | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------|--|--|--|--|
| S/Ca (Atomic) | S/Ca (Weight) | (Al+Fe)/Ca (Atomic) | (Al+Fe)/Ca (Weight) | Ca/Si (Atomic) | Ca/Si (Weight) | سنگدانه(µm) | | | | |
| •/• A | • • ۶ | ٠/١۴ | ٠/١٩ | 17/37 | ۱۷/۵۹ | • | | | | |
| •/48 | • /٣٢ | ٠/١۵ | ۰/۱۶ | ۲/۱۸ | ٣/١١ | ١. | | | | |
| ٠/۴٧ | • /٣٣ | •/18 | ٠/١۵ | ۲/۱۳ | ٣/•۴ | ۲. | | | | |
| • /٣ ١ | ۰/۲۱ | •/٢٢ | ٠/١٩ | $r/r \lambda$ | ۴/۶۸ | ٣. | | | | |
| • /۶٨ | ٠/۴٧ | •/7۴ | •/٣٣ | ۱/۴۸ | ۲/۱۱ | ۴. | | | | |
| •/9۲ | •/84 | •/۴۴ | • /٣٧ | ١/• ٩ | ۱/۵۵ | ۵۰ | | | | |

Table 19. Proportion of elements constituting the concrete transition zone at 90 days of age

جدول ۲۰. تغییرات نسبت کلسیم به سیلیسم ناحیه انتقال بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه

Table 20. Changes in the ratio of calcium to silica in the concrete transition zone at ages 28 and 90 days

| تغيير نسبت | | نسبت کلسیم به سیلیسیم | | | | | | | |
|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|--|--|--|
| وزنی و اتمی ۹۰به۲۸ روزه | Ca/Si (Atomic) ۹۰ روزه | Ca/Si (Weight) ۹۰ روزه | Ca/Si (Atomic) ۲۸ روزه | Ca/Si (Weight) ۲۸ روزه | فاصله از مرز سنگدانه(μm) | | | | |
| * | 17/87 | ۱۷/۵۹ | * | * | • | | | | |
| 1/58 | ۲/۱۸ | ٣/١١ | 1/44 | ۲/۰۵ | ١٠ | | | | |
| ۱/•۵ | ۲/۱۳ | ٣/• ۴ | ۲/•٣ | ۴۸/۲ | ۲۰ | | | | |
| ١/٢١ | $r/r \lambda$ | ۴/۶۸ | ۲/۷۱ | ٣/٨٦ | ٣٠ | | | | |
| •/٢۴ | ١/۴٨ | ۲/۱۱ | 8/18 | $\lambda/Y\lambda$ | ۴. | | | | |
| •/۲٧ | ١/• ٩ | ۱/۵۵ | ۴/•۶ | ۵/۷۹ | ۵۰ | | | | |



شکل ۹. رسوبگذاری CH ششوجهی و اترینگایت سوزنی در مجاورت سنگدانه بتن معمولی ۹۰ روزه

Fig. 9. Precipitation of hexagonal CH and acicular ettringite in the vicinity of 90-day-old conventional concrete aggregate



نمودار ۱۴. تغییرات نسبت وزنی Ca/Si با افزایش فاصله از مرز سنگدانه در بتن معمولی





نمودار ۱۵. تغییرات مقاومت فشاری بتن برحسب نسبت وزنی Ca/Si در ناحیه انتقال

Graph 15. Graph of Changes in concrete compressive strength depending on the Ca/Si weight ratio in the transition zone

۵- نتایج

نتایج حاصل از این تحقیق در خصوص تاثیر ناحیه انتقال بر خواص و ریزساختار بتن معمولی بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی به شرح ذیل ارائه می گردد:

۱- با توجه به مقاومت سنگ مادر بهمیزان بیش از MPa، مقاومت مشخصه نهایی بتن معادل ۳۵ MPa تحت تأثیر مقاومت پیوستگی ناحیه انتقال قرارگرفته و سبب شده که مقاومت بتن از مقاومت پیوستگی بیشتر نشود و سطح شکست بتن در ناحیه انتقال خمیرسیمان و سنگدانه اتفاق بیفتد.

 ۲- مقاومت فشاری بتن در سن ۱۸۰ روزه نسبت به سن۲۸ روزه به میزان ۱۳٪ افزایش نشان داد.

۳– بر اساس رابطه خطی با ضریب همبستگی ۰/۹۸ بین ضریب
 ارتجاعی استاتیکی و مقاومت فشاری بتن در محدودهٔ سنی ۲۸ تا ۹۰ روزه،
 با افزایش ٪۱۴/۳ در ضریب ارتجاعی استاتیکی، مقاومت فشاری ٪۱۰/۳ (شد داشته است.

۴– با افزایش سن نمونه از ۲۸ تا ۱۸۰ روزه، جذب آب غوطهوری بلندمدت ٪۳۱/۴ کاهش یافته و مقاومت فشاری ٪۳۸/۳ افزایش نشان داد. رابطه خطی معکوسی با ضریب همبستگی ۰/۷۸ بین جذب آب بلندمدت و مقاومت فشاری بهدست آمد.

۵- رابطه خطی معکوس با ضریب همبستگی ۰/۹۴ بین نفوذ تسریع شده یون کلراید و مقامت فشاری بتن حاصل شد، به گونهای که در محدودهٔ

سنی ۲۸ تا ۹۰ روزه با کاهش ٪۲/۲ در نفوذ یون کلراید، مقاومت فشاری ٪۱۰/۳ افزایش نشان داد.

۶- بر اساس رابطهٔ خطی با ضریب همبستگی ۰/۹۷ بین مقاومت ویژه الکتریکی و مقامت فشاری بتن در محدودهٔ سنی ۲۸ تا ۹۰ روزه ، با افزایش ۴۸/۶٪ مقاومت ویژه الکتریکی، مقاومت فشاری ٪۲۰/۳ رشد داشته است.

۷- با افزایش سن نمونه از ۲۸ تا ۱۸۰ روزه، نفوذ تسریع شده یون کلراید ۸/۲٪ کاهش یافته و مقاومت فشاری ۱۰/۳٪ افزایش نشان داد. رابطه خطی معکوس با ضریب همبستگی ۰/۸۷ بین نفوذ تسریع شده یون کلراید و مقاومت فشاری بهدست آمد.

۸- شدت قلههای CSH و CaCO3 و همسویی با مقاومت فشاری در محدودهٔ سنی ۲۵۲۱۰۹ روزه، مشخص شد که رابطه مستقیمی بین این فازها و مقاومت فشاری وجود دارد که علت آن خاصیت چسبندگی CSH و همچنین خاصیت پرکنندگی CaCO3 است که باعث تراکم ریزساختار ناحیه انتقال و بهبود خواص بتن شده است. به گونهای که با افزایش ۲۴۴ فاز CSH و ۲۱/۵۲ فاز CaCO3، میزان مقاومت فشاری بتن ۲۰/۳۲ رشد داشتهاست.

۹– با افزایش ۲۴٪ فاز CSH و ۲۱/۵٪ فاز CaCO3، مقاومت ویژه الکتریکی بهمیزان ۲۸/۶٪ افزایش و نفوذ تسریع شده یون کلراید ۲۲/۵ کاهش داشتهاست.

۱۰ – در سن ۹۰ روزه نسبت Ca/Si در مرز با سنگدانه ۵/۶ برابر مقدار نسبت در فاصله ۱۰ میکرومتری از سنگدانه بوده و این پدیده نشانگر رسوبگذاری بیشتر CH در مرز سنگدانه که نقطه بیشینه نمودار نسبتهای کلسیم به سیلیس به مرز سنگدانه نزدیکتر شده است. تصاویر SEM تجمع CH و اترینگایت در منافذ مرزی سنگدانه با ناحیه انتقال را نشان داد.

Ca/Si با فاصله گرفتن از مرز سنگدانه تا ۱۰ میکرومتر، نسبت Ca/Si در این فاصله ٪۸۲ افت پیدا کرد و مجدداً رشد تدریجی ۱/۷ برابری تا فاصله ۲۰ میکرومتری داشته و با عبور از این نقطه کاهش پیدا میکند.

۱۲ – در فاصله ۳۰ تا ۵۰ میکرومتری رابطه خطی معکوس با ضریب همبستگی ۸۸۶۰ بین نسبت وزنی Ca/Si و مقاومت فشاری بتن بهدست آمد، به گونهای که با افزایش ۵/۷ برابری نسبت وزنی Ca/Si میزان مقاومت فشاری ٪۹/۳ کاهش پیدا کرد.

۱۳ – در فاصله ۲۳تا۵۰ میکرومتری بین نسبت وزنی Ca/Si و نفوذ تسریع شده یون کلراید رابطه خطی مستقیم برقرار است، بهطوری که با افزایش ۵/۷ برابری نسبت وزنی Ca/Si مقدار نفوذ تسریع شده یون کلراید ۵/۸ افزایش یافت.

۱۴− نسبت وزنی Al+Fe)/Ca) تا فاصله ۳۰ میکرومتر از مرز سنگدانه، بهمیزان ۱/۱۵ تا ۱۲/۲ تغییر کرده و در محدودهٔ ۳۰تا۵۰ میکرومتری، از ۱/۲ تا ۱/۳۷ افزایش یافتهاست.

منابع

- J. Farran, Introduction: The transition zone-discovery and development, in Interfacial Transition Zone in Concrete, (1996).
- [2] K.L. Scrivener, A. Bentur, P. Pratt, Quantitative characterization of the transition zone in high strength concretes, Advances in Cement Research, 1(4) (1988) 230-237.
- [3] K.L. Scrivener, A.K. Crumbie, P. Laugesen, The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete, Interface science, 12 (2004) 411-421.
- [4] L.E. Dalton, J.M. LaManna, S. Jones, M. Pour-Ghaz, Does ITZ Influence Moisture Transport in Concrete?, Transport in Porous Media, 144(3) (2022) 623-639.
- [5] J. Maso, Interfacial transition zone in concrete, CRC Press, 1996.
- [6] J.L. Costafreda, D.A. Martín, L. Presa, J.L. Parra, Effects of a Natural Mordenite as Pozzolan Material in the Evolution of Mortar Settings, Materials, 14(18) (2021) 5343.
- [7] J.A. Rossignolo, Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex, Construction and Building Materials, 23(2) (2009) 817-821.
- [8] B. Pang, Z. Zhou, X. Cheng, P. Du, H. Xu, ITZ properties of concrete with carbonated steel slag aggregate in salty freeze-thaw environment, Construction and Building Materials, 114 (2016) 162-171.
- [9] G. Fang, Q. Wang, M. Zhang, Micromechanical analysis of interfacial transition zone in alkali-activated fly ashslag concrete, Cement and Concrete Composites, 119 (2021) 103990.
- [10] D.P. Bentz, D.P. Bentz, A three-dimensional cement hydration and microstructure program. I. hydration rate, heat of hydration, and chemical shrinkage, National

- [23] C. Committee, Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, in, ASTM International, 2013.
- [24] C. Astm, 12.(2012). Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete, ASTM International, i.
- [25] A. Standard, Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, ACI Man. Concr. Pract, (1996) 1-38.
- [26] A. C143, Standard test method for slump of hydrauliccement concrete, Book of ASTM Standards, (2015).
- [27] A. Standard, C138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air-Content (Gravimetric) of Concrete, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013).
- [28] M. Walker, Guide to the construction of reinforced concrete in the Arabian Peninsula, (No Title), (2002).
- [29] B.S. Institution, BS 1881 122: 2011+ A1: 2020. Testing Concrete: Part 122. Method for Determination of Water Absorption, British Standards Institution, 2020.
- [30] C. Astm, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, C642-13, (2013).
- [31] C.E.-I.d. Béton, CEB-FIP model code 1990: Design code, Thomas Telford Publishing, 1993.
- [32] B. En, 12390-8," Depth of penetration of water under pressure, British Standards Institution, (2000).
- [33] C. ASTM, 1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, Annual book of ASTM standards, 4(2) (1997) 639-644.
- [34] A.S.f. Testing, M.C.C.-o. Concrete, C. Aggregates, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, 2012.
- [35] C. Astm, Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete, West Conshohocken (PA): ASTM, (2012).
- [36] V.M. Malhotra, N.J. Carino, Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC press, 2003.

Institute of Standards and Technology, 1995.

- [11] T. Akçaoğlu, M. Tokyay, T. Çelik, Assessing the ITZ microcracking via scanning electron microscope and its effect on the failure behavior of concrete, Cement and Concrete Research, 35(2) (2005) 358-363.
- [12] J. Maso, "7th International Congress on the Chemistry of Cement", Paris, in, Editions septima Paris, 1980.
- [13] K. Scrivener, P. Pratt, RILEM TC 108 State of the Art Report, New York, (1994).
- [14] K.M. El-Dash, M.O. Ramadan, Effect of aggregate on the performance of confined concrete, Cement and concrete research, 36(3) (2006) 599-605.
- [15] J.-J. Zheng, X.-Z. Zhou, Effective medium method for predicting the chloride diffusivity in concrete with ITZ percolation effect, Construction and Building Materials, 47 (2013) 1093-1098.
- [16] Y. Xie, D.J. Corr, F. Jin, H. Zhou, S.P. Shah, Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC), Cement and Concrete Composites, 55 (2015) 223-231.
- [17] W.A. Tasong, C.J. Lynsdale, J.C. Cripps, Aggregatecement paste interface: Part I. Influence of aggregate geochemistry, Cement and concrete research, 29(7) (1999) 1019-1025.
- [18] K.L. Scrivener, P.L. Pratt, Characterization of interfacial microstructure, Interfacial transition zone in concrete, 2 (1996) 3-18.
- [19] K.-Y. Liao, P.-K. Chang, Y.-N. Peng, C.-C. Yang, A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete, Cement and Concrete research, 34(6) (2004) 977-989.
- [20] P.K. Mehta, Concrete. Structure, properties and materials, (1986).
- [21] F.M. Lea, The chemistry of cement and concrete, (1935).
- [22] M. Zhou, X. He, H. Wang, W. Wu, J. He, C. Wu, Experimental study of mechanism properties of interfacial transition zones in steel fiber reinforced concrete, Case Studies in Construction Materials, 20 (2024) e02954.

Press, Florida.

- [43] H.K.A. Al-Bayati, S.L. Tighe, H. Baaj, H.K.A. Al-Bayati, Effect of different treatment methods on the interfacial transition zone microstructure to coarse recycled concrete aggregate, in: Green Technol. Geotechical Mater. Eng. Session, 2016 Conference of the Transportation Association of Canada Toronto. Retreived from https://www. tac-atc. ca/sites/default/files/conf_ papers/al-bayati_. pdf, 2016.
- [44] S. Erdem, A.R. Dawson, N.H. Thom, Influence of the micro-and nanoscale local mechanical properties of the interfacial transition zone on impact behavior of concrete made with different aggregates, Cement and Concrete Research, 42(2) (2012) 447-458.
- [45] P. Vargas, O. Restrepo-Baena, J.I. Tobón, Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes, Construction and Building Materials, 137 (2017) 381-389.

- [37] A.C.I.C. 222, Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222R-01), in, ACI Farmington Hills, MI, 2001.
- [38] J. Tragardh, Microstructural features and related properties of self-compacting concrete, in: Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium held in Stockholm, 1999, pp. 175-186.
- [39] K. Janamian, J.B. Aguiar, Concrete Materials and Technology: A Practical Guide, CRC Press, 2023.
- [40] A. Standard, C128-12, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- [41] K. Kishore, R. Tomar, Understanding the role of interfacial transition zone in cement paste and concrete, Materials Today: Proceedings, 80 (2023) 877-881.
- [42] V. Malhotra, N. Carino, CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete,(1991), in, CRC

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم S. F. Sajedi, S. Q. Mirahmadi, Effect of Interfacial Transition Zone on Properties and Microstructure of Concrete, Amirkabir J. Civil Eng., 57(2) (2025) 291-316.



DOI: 10.22060/ceej.2025.23347.8147

بی موجعه محمد ا