



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Assessment of the effect of aggregates on the mechanical properties of concrete and the interface between aggregates and cement

Mehdi Talkhablou^{1*}, Mohsen Zarenia², Arash Hashemnejad³

1. Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

2. Master of Science, Sahel Omid Iranian Consulting Engineers. Tehran, Iran

3. Ph.D, Sahel Omid Iranian Consulting Engineers. Tehran, Iran

Article info

Article history

Received: 17 May 2023

Accepted: 30 April 2024

Keywords:

Interfacial transition zone,
Cement hydration, aggregates.



Abstract

The objective of this research is to investigate the influence of aggregate properties (material, shape, and surface texture) on the mechanical properties of concrete (compressive strength) and the interfaces between cement and aggregates. Different types of aggregates were used in concrete production, sourced from various geological regions within the province of Tehran. Selected samples include marl limestone, dolomite, tuff, and quartzite. The initial properties of the selected aggregates were studied, followed by crushing the rock specimens using the Los Angeles apparatus. The characteristics of aggregates, such as surface texture, shape, petrography, and particle size distribution, were determined. Concrete mixtures were prepared with a constant ratio of water to cement (0.55) for each type of angular and rounded aggregates to study the microscopic and compressive strength properties of concrete samples at ages of 28, 14, 7, and 90 days. Microscopic examinations revealed the presence of a transition zone in the matrix, demonstrating a uniform thickness in concrete samples with limestone aggregates compared to variable thickness in the case of tuff aggregates. The results also indicate that limestone aggregates, with suitable porosity and establishing a reaction with cement, create a stronger bond compared to other aggregates. The comparison of compressive strength results shows that concrete made with angular aggregates generally exhibits higher resistance compared to crushed aggregates of the same type. In general, aggregates suitable for use in concrete, including lightweight aggregates with low water absorption capabilities and angular shapes, tend to have higher short-term strength.

Introduction

This section discusses the effective thickness of the Interfacial Transition Zone (ITZ), approximately 10 to 50 microns, which depends on the fine structures and the hydration reaction (Lyu et al., 2019). Two crucial characteristics of ITZ are thickness and porosity. The thickness of ITZ is comparable to the size of cement particles. The presence of large void spaces and hydroxyapatite crystals influences the resistance in this zone, attributed to the fine cracks (Mehta and Monteiro, 1986). The microscopic structures of ITZ can be described based on its porosity and the hydration front, indicating a somewhat interconnected

relationship. The hydration reaction in the vicinity of aggregates differs from that in the cement matrix due to the locally higher water-to-cement ratio. The nature of hydrated molecules is influenced by the surface and chemical nature of the aggregate, affecting the chemical reactions. Studies suggest that the chemical interaction between aggregates and cement contributes quantitatively to the nature of the ITZ but may be considered a secondary effect. Researchers have observed that the bonding in the ITZ hardens, and aggregates must have both chemical and mechanical bonds to resist the reaction between cement and aggregates. Additionally, the mechanical bond is

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.103892>

*Corresponding author: Mehdi Talkhablou; E-mail: talkhablou@live.com

How to cite this article: Talkhablou, M., 2024. Assessment of the effect of aggregates on the mechanical properties of concrete and the interfaces between aggregates and cement. Kharazmi Journal of Earth Sciences 10(1), 53- 72.

<http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.103892>



dependent on the surface roughness of the aggregate. Studies indicate that an increase in the surface area, such as an increase in roughness, contributes to increased resistance in the ITZ. The chemical breakdown of feldspar in basalt aggregates leads to the production of hydrated cement caps, reducing the surface roughness and mechanical interlocking effect. In contrast, in limestone aggregates, the resistance in the ITZ does not increase with an increase in surface roughness. The increase in resistance in the ITZ of limestone aggregates is attributed to the chemical reaction between the aggregates and the cement. In summary, the ITZ's mechanical and chemical properties are influenced by factors such as surface roughness, chemical composition, and the nature of the aggregates. These interactions play a crucial role in determining the strength and durability of the concrete structure.

The text discusses various studies on the thickness of the Interfacial Transition Zone (ITZ) and the characteristics of cement sections in the context of aggregate properties. It explores how the ITZ thickness and cement surface density are influenced by factors such as the water-to-cement ratio, cement particle diameter, and distance from the aggregate surface.

Ollivier et al. (1995) highlighted that the shape and surface roughness of aggregates significantly affect mortar strength, with the addition of crushed aggregates with high surface roughness enhancing concrete resistance. Al-Oraimi et al. (2006) conducted a study on the capillary properties of aggregates in concrete, emphasizing the mechanical bond formed by the rough surface of aggregates with cement. The capillary properties play a significant role in chemical bonding during cement hydration, impacting compressive and tensile strength. A study by Lo et al. (2007) focused on water absorption by aggregates, revealing that high-absorption aggregates increase pore area in the ITZ, leading to decreased concrete strength due to the weakened area in the ITZ. Hussin and Poole (2011) studies on petrography (mineral composition) indicated that different types of aggregates significantly affect the microstructure in terms of porosity, cement hydration,

and ITZ thickness. Gao et al. (2014) studied the impact of age on water-cement ratio and aggregate content on ITZ thickness and microstructure. Increasing age led to a continuous reduction in ITZ thickness, while an increase in water-cement ratio resulted in thicker ITZ with reduced concrete strength. Carrara and De Lorenzis (2017) conducted continuous petrographic analyses, revealing that water-to-cement ratio changes in the ITZ are primarily a consequence of future hydration. The effective initial ITZ water-to-cement ratio is higher than the theoretical value before hydration. The study emphasized the influence of distance from the aggregate surface on the non-constant nature of water-to-cement ratio in the ITZ. Adams and Ideker (2017) studied calcium aluminate cement, concluding that aluminat-rich cement at the interface with aluminum-containing aggregates weakened the ITZ boundaries, while this weakness was not observed with limestone aggregates. These findings collectively emphasize the intricate relationship between aggregate properties, water-cement ratio, and the resulting characteristics of the ITZ, impacting the overall performance and durability of concrete structures.

This research aims to understand how the properties of new aggregates impact the mechanical properties and bonding characteristics of concrete.

Materials and Methods

The materials used include limestone, dolomite, tuff, and quartzite, with specific particle sizes and moduli presented in Table 1. The study explores the influence of particle type, shape, and surface texture on concrete mechanical resistance and bond strength between cement and aggregates.

The rounded aggregates are obtained, and the angular aggregates are processed using the Los Angeles Abrasion machine. The abrasion process was performed at 3000 revolutions. Table 2 presents the results of roundness and abrasion of aggregates with an increase in the volumetric percentage, analyzed through image analysis (j image), and the surface texture of aggregates is visually observed. Based on the presented data, the initial shape, particle type, transport distance, and source

of the aggregates (Table 2) affect the roundness and abrasion of the aggregates. Tables 3 and 4 provide information on some properties and chemical composition of the cement used.

In this study, the concrete mixing design was prepared by ACI 211 regulation. The ratio of the material mixture for the construction of concrete was based on volumetric method. All concrete mixtures with fixed amount of water were made with cement materials

of 0.55 and compressive strength of design was determined to be 25 MPa. Concrete samples were prepared from 7, 14, 28 and 90-day samples made with angular aggregate and thin section pollen in order to investigate the connection of different aggregates with cement paste. The efficiency of the mixture was also performed using slump test according to ASTM C143 standard.

Table 1. The Physical properties measured in aggregates

Physical Properties		Standard	Limestone	Quartzite	Dolomite	Tuff
Porosity (%)		ASTM C97	2.4	1.1	1.6	8
Water Absorption (%)	Coarse Aggregate	ASTM C127	1.05	0.55	0.75	3.8
	Fine Aggregates	ASTM C128	1.15	0.48	0.7	3.5
Unit Weight (KN/m ³)	Coarse Aggregate	ASTM C29	24.5	24.9	25.4	22.7
	Fine Aggregates	ASTM C29	24.9	25.3	25.8	23.2

Table 2. The results of roundness and abrasion of aggregates

Aggregates	Shape of Aggregate				Surface Texture
	Crusher (With Angular)		Los Angeles Machine (Rounded)		
Tuff	Roundness 0.605	Sphericity 0.505	Roundness 0.756	Sphericity 0.573	Roughness and Porous
Limestone	Roundness 0.690	Sphericity 0.382	Roundness 0.797	Sphericity 0.478	Roughness
Quartzite	Roundness 0.682	Sphericity 0.526	Roundness 0.841	Sphericity 0.579	Smooth
Dolomite	Roundness 0.710	Sphericity 0.550	Roundness 0.820	Sphericity 0.600	Smooth

Table 3. The Physical Properties of Cement in accordance with National Standard

ISIRI 389	Specific surface (cm ² /gr)	Initial setting time in Minutes (min)	Final setting time in Minutes (max)	Unconfined Compressive Strength 3 days (MPa)	Compressive Strength 7 days (MPa)	Compressive Strength 28 days (MPa)
	Min 2800	Min 45	Max 360	Min 100	Min 175	Min 315
Tehran Cement	3596	50	271	180	246.5	339

Table 4- The Chemical Properties of Cement in accordance with National Standard

ISIRI 386	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO
	-	Minimum 20%	Maximum 6%	Maximum 6%	Maximum 5%	Maximum 3%
Tehran Cement	61.08	20.26	5.15	5.6	1.6	1.70

Discussion

The compressive strength status at 28 days is typically determined since the sample's strength is expected to show an increasing trend after 7, 14, 28, 90,

and cylinder break tests on concrete specimens are conducted. The results are presented in Table 7, as well as illustrated in Figure 2. Based on the obtained results, the compressive strength of concrete increases with an

extended curing duration. This increase is gradual in concrete with limestone aggregates. However, in concrete with dolomite, quartzite, and tuff aggregates, there is a sudden increase from 14 to 28 days compared to the previous 7-day period. The initial compressive strength (14 and 28 days) is higher in concrete made with limestone aggregates (tuff, quartzite, dolomite) due to chemical reactions with the cement paste. Given the uniform water-to-cement ratio, the mix design of the specimens reveals that concrete with angular aggregates has higher compressive strength compared to rounded aggregates of the same type, attributed to increased contact surface for better mechanical bonding. The presence of porosity (creating more contact surface) and the reactivity of limestone aggregates result in a better connection with the cement paste. Higher porosity and water absorption in tuff aggregates lead to a weaker connection with the cement paste compared to other aggregates. Finally, the percentage reduction in compressive strength of concrete with angular aggregates (quartzite, dolomite, limestone, and tuff) compared to 28-day rounded aggregates is provided in the results.

Cement Paste Reactivity: Microscopic examination of thin sections of cured concrete reveals its constituent elements, providing information about the type of aggregates, matrix type, cement paste-aggregate relationship, detrimental reactions (alkali-silica, alkali-carbonate reactions), porosity, cracks, and any alterations throughout the concrete's lifespan. To investigate changes in the external surfaces of aggregates within the cement paste, resin-embedded sections of remaining aggregates on Alkali-Silica Reaction (ASR) gel were prepared (no reaction with the aggregates). In Figure 3, micrographs of cured cement paste are shown, depicting the clear boundary between hydrated and unhydrated cement paste, and visible microcracks resulting from cement paste drying. In Figure 4 (A - 7 days), the transition zone with varying thickness in the policy section is observable for coarse-grained aggregates. The thickness of the transition zone is distinctly visible in sections 14, 28, 90, and 4 days, as

depicted. Examination of microscopic sections at 7, 14, 28, 90 days for concrete with tuff aggregate and comparison of the aggregate margin inside the cement paste with a resin-surrounded aggregate show no specific changes (Fig. 5). Images of tuff aggregates inside the resin at 7, 14, 28, and 90 days, and comparison show no specific changes in the margin of the aggregate surrounded by cement paste (Fig.5). Images of alkali-silica reaction (ASR) in the cement paste and within the crack of the aggregate are observable, indicating ASR in the cement paste and the aggregate crack (Fig.6). Images of alkali-silica reaction (ASR) inside the crack of the aggregate show observable ASR phenomena in both the cement paste and the aggregate crack (Fig.7). Sections of concrete with quartzite aggregate do not clearly reveal the common transition zone thickness, which could be attributed to the lack of reaction between the aggregate and cement paste (Fig.8). Examination of microscopic sections at 7, 14, 28, 90 days for concrete with quartzite aggregate and comparison of the aggregate margin inside the cement paste with a resin-surrounded aggregate show no specific change (Fig.9). In the 7-day section, the common transition zone is clearly visible but diminishes with increasing hydration time, disappearing in sections 28, 90, and 4 days (Fig. 10 and 11). Please note that detailed descriptions of the images were provided, and the figures were referenced accordingly.

Results

- The shape of the aggregate directly influences the compressive strength of concrete. Angular and rough-surfaced aggregates enhance concrete strength.
- The thickness of the transition zone varies based on the chemical and physical properties of different aggregates.
- The compressive strength of samples increases with the duration of concrete curing. This increase is particularly notable in lime aggregate concrete compared to other aggregates (tuff, quartzite, dolomite), with a sudden rise between 14 and 28 days.
- The initial compressive strength increases significantly in lime aggregate concrete at 7, 14, and 28




days compared to other aggregates, owing to the chemical reaction with cement paste.

- The lifespan of concrete is affected by the reactive interaction of aggregates, such as chert and dolomite, resulting in a reaction halo around the aggregates.
- Considering the water-to-cement ratio uniformity in concrete mixtures, concrete with angular aggregates shows higher compressive strength than rounded aggregates of the same type due to increased surface contact providing better mechanical connection.
- The densification and reactivity of lime aggregates contribute to improved bonding with cement paste. Tuff aggregates, due to their high porosity and water absorption, result in weaker mechanical connections.
- The thickness of the transition zone is consistent in lime aggregates (fixed) and variable in tuff aggregates. However, in quartzite aggregates, due to their non-reactivity, the transition zone thickness is not observable.
- With an increase in the curing duration, the thickness of the transition zone decreases for certain materials. These findings demonstrate the significant impact of aggregate characteristics on the mechanical properties and durability of concrete.

References

- Adams, M. P., Ideker, J. H. 2017. Influence of aggregate type on conversion and strength in calcium aluminate cement concrete. *Cement and Concrete Research* 100, 284-296.
- Al-Oraimi, S. K., Taha, R., Hassan, H. F. 2006. The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical

CRediT authorship contribution statement

	Conceptualization, Methodology, Validation Formal analysis, Writing - Review & Editing Supervision, Project administration
	Software, Formal analysis, Investigation Resources, Writing - Original Draft
	Conceptualization, Methodology, Validation Formal analysis, Investigation Writing - Original Draft, Funding acquisition

- properties of high-strength concrete. *Construction and Building materials* 20(7), 499- 503.
- ASTM C 127 – 07. 2009. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate
- ASTM C97-02. 2008. Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone. Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific
- ASTM C128-22. 2007. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.
- ASTM C143-78. 2007. Standard Test Method for Slump Of Portland Cement Concrete
- ASTM C29/C29M-97.1997. Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate.
- Carrara, P., De Lorenzis, L. 2017. Consistent identification of the interfacial transition zone in simulated cement microstructures. *Cement and Concrete Composites* 80, 224-234.
- Gao, Y., De Schutter, G., Ye, G., Tan, Z., Wu, K. 2014. The ITZ microstructure, thickness and porosity in blended cementitious composite: Effects of curing age, water to binder ratio and aggregate content. *Composites part b: engineering* 60, 1-13.
- Hussin, A., Poole, C. 2011. Petrography evidence of the interfacial transition zone (ITZ) in the normal strength concrete containing granitic and limestone aggregates. *Construction and Building Materials* 25(5), 2298-2303.
- Lo, T. Y., Tang, W. C., Cui, H. Z. 2007. The effects of aggregate properties on lightweight concrete. *Building and Environment* 42(8), 3025-3029.
- Lyu, K., Garboczi, E. J., She, W., Miao, C. 2019. The effect of rough vs. smooth aggregate surfaces on the characteristics of the interfacial transition zone. *Cement and Concrete Composites* 99, 49-61.
- Mehta, P. K., Monteiro, P.J.M. 1986. *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Ollivier, J.P., Maso, J.C., Bourdette, B. 1995. Interfacial Transition Zone in Concrete. *Advanced cement based materials* 2(1), 30-38.
- Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91).2002



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

ارزیابی تاثیر نوع سنگدانه‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی بتن و سطوح اتصال سنگدانه و سیمان

مهدی تلخابلو^{۱*}، محسن زارعی نیا^۲، آرش هاشم نژاد^۳

۱. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲. کارشناس ارشد، مهندسین مشاور ساحل امید ایرانیان، تهران، ایران

۳. دکتری، مهندسین مشاور ساحل امید ایرانیان، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر نوع سنگدانه (جنس، شکل و بافت سطحی) بر ویژگی‌های مکانیکی بتن (مقاومت فشاری) و سطوح اتصال بین خمیره سیمان و سنگدانه (بررسی مقاطع میکروسکوپی) در بتن می‌باشد. مصالح سنگدانه‌ای استفاده شده برای ساخت بتن از انواع مختلف سنگ‌ها بر اساس نحوه تشکیل آن‌ها (رسوبی، آذرآوری و دگرگونی) از مناطق مختلف جغرافیایی استان تهران تهیه شده است. نمونه‌های انتخاب شده شامل آهک مارنی (سازند الیکا)، دولومیت (سازند سلطانیه)، توف (سازند کرج) و کوارتزیت (تاپ کوارتزیت) می‌باشد. در ابتدا ویژگی‌های فیزیکی (وزن واحد حجم اشباع، تخلخل و جذب آب) سنگ‌های منتخب تعیین شده است. در مرحله بعد، بلوک‌های سنگی موجود به ذراتی به اندازه شن و ماسه خرد شده که از بخشی از آن با استفاده از دستگاه لس آنجلس، سنگدانه گرد تهیه شده است. برخی از ویژگی‌های سنگدانه مثل بافت سطحی، شکل، کانی‌شناسی و دانه بندی تعیین شد. سپس با استفاده از طرح اختلاط ثابت با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵، برای هر نوع سنگدانه، دو نمونه در دو شکل گرد شده و زاویه‌دار، یک نمونه برای مطالعه میکروسکوپی و یک نمونه برای بررسی مقاومت فشاری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه و یک نمونه نیز برای هر یک به عنوان نمونه شاهد تهیه گردید. از این‌رو در این مطالعه در مجموع ۱۶ نمونه مختلف تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. بررسی مقاطع میکروسکوپی نشان دهنده وجود ناحیه انتقالی فصل مشترک با ضخامت ثابت در نمونه‌های بتن با سنگدانه آهکی و ضخامت متغیر در اطراف سنگدانه توفی است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که سنگدانه آهکی با تخلخل مناسب و با برقراری واکنش با خمیر سیمان اتصال بهتری نسبت به سایر سنگدانه‌ها ایجاد می‌کند. مقایسه نتایج مقاومت فشاری نیز نشان می‌دهد بتن ساخته شده با سنگدانه زاویه‌دار نسبت به سنگدانه گرد شده در همان جنس، مقاومت به مراتب بیشتری دارد. به طور کلی بهترین سنگدانه‌ها برای استفاده در بتن، شامل سنگدانه‌هایی هستند که قابلیت جذب آب پایینی داشته و تیز گوشه باشند و حاشیه واکنشی آن‌ها در کوتاه مدت سرعت رشد بالاتری داشته باشد. سنگدانه‌های آهکی در این گروه قرار می‌گیرند.

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

واژه‌های کلیدی

بتن، ناحیه انتقالی فصل مشترک، خمیر سیمان، سنگدانه، مقاومت فشاری تک محوری.



مقدمه

انتقالی فصل مشترک در نتیجه اتصال سنگدانه با خمیر سیمان بر اثر رشد همبافتی (interweaving) فرایند هیدراسیون سیمان روی سطح سنگدانه و واکنش شیمیایی بین آنها تشکیل می‌شود (Jebli et al., 2018). منشأ ITZ به طور گسترده‌ای به عنوان "اثر دیواری (wall effect)" شناخته شده است (Neville, 2003; Scrivener et al., 2004) اما عوامل دیگری نیز از جمله اثر فیلتراسیون دانه‌های سیمان، غشای نازک آب (thin

بتن یکی از مواد پرمصرف در ساخت و ساز و پروژه‌های عمرانی است. ساختار بتن در حالت سخت شده شامل سه فاز، حجم خمیر سیمان، سنگدانه و ناحیه انتقالی فصل مشترک (Interfacial Transition Zone) (ITZ) بین دو فاز دیگر است. ویژگی‌های مکانیکی بتن بستگی به ویژگی‌های خمیرسیمان، سنگدانه و ITZ دارد (Deiaf, 2016). ناحیه

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.103892>*نویسنده مسئول: مهدی تلخابلو talkhablou@khu.ac.ir

استناد به این مقاله: تلخابلو، م.، زارعی نیا، م.، هاشم نژاد، آ. (۱۴۰۳) ارزیابی تاثیر نوع سنگدانه‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی بتن و سطوح اتصال سنگدانه و سیمان. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۰، شماره ۱، صفحه ۵۳ تا ۷۲. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.103892>



که وقتی هیچ تعامل شیمیایی با سنگدانه صورت نمی‌گیرد، پیوند ضعیف سطح مشترک واقعی است. وقتی این فصل مشترک با تعامل شیمیایی تا حدودی تقویت شود، پیوند ضعیف به ناحیه متخلخل‌تر در ناحیه فصل مشترک تبدیل می‌شود. مقدار اتصال مکانیکی بستگی به زبری سطح سنگدانه دارد.

بن عثمان و همکاران (Ben-Othman et al., 1988) با بررسی نفوذپذیری و ریزساختار سنگدانه سبک در بتن از مقایسه سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های صیقلی، نشان دادند که ناحیه انتقالی فصل مشترک پیرامون سنگدانه زبرتر کمی باریک‌تر است. زیرا ذرات زبر تمایل بیشتری برای به دست آوردن پوشش دانه‌های کوچک سیمان در حین مخلوط کردن دارند.

اولیویر و همکاران (Ollivier et al., 1995) با بررسی تأثیر سطوح زبر و صاف سنگدانه بر ویژگی‌های ناحیه انتقالی دریافتند که متوسط تخلخل ITZ در قسمت صاف سطح سنگدانه که در قسمت ناهموار سطح سنگدانه یافت می‌شد از زیر سنگدانه به سمت بالای سنگدانه کاهش می‌یابد.

مازو (Maso, 1996) با انجام مطالعه بر روی ناحیه انتقالی فصل مشترک بیان کرد که پیوند بین خمیر سیمان سخت شده و سنگدانه باید به ترکیبی از پیوندهای شیمیایی و فیزیکی ناشی از نیروهای واندروالسی و اتصال مکانیکی بستگی داشته باشد.

تاسونگ و همکاران (Tasong et al., 1998; 1999) تاثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سنگدانه در ارتباط پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه را در دو پژوهش ارائه کردند. سنگدانه‌ها دارای زبری متفاوتی هستند که از دلایل اصلی تفاوت در زبری آنها بافت بلورین سنگ، سختی و پیوند بین بلورهای کانی (صفحات رخ) است. مقاومت پیوندی سطح مشترک را نمی‌توان به تنهایی از زبری سطح سنگدانه پیش بینی کرد. به طور کلی مقاومت اتصال در ناحیه انتقال با افزایش سطح موجود برای اتصال (افزایش زبری) افزایش می‌یابد. آنها همچنین بیان کردند که در محل اتصال سنگدانه‌های بازالتی با خمیر سیمان، تجزیه شیمیایی کانی‌های بازالت مثل فلدسپارها به دلیل تعامل آنها با سیمان هیدراته شده باعث تولید کانی‌های رسی می‌شود، که بر اثر جذب آب، باعث کاهش زبری سطح سنگدانه و

ریز تراوش (micro seepage)، ریز تراوش (membrane of water)، ریز تراوش (Syneresis gel) و رشد یک طرفه وجود دارد (Odler and Zürz, 1988). ساختار ناحیه انتقالی فصل مشترک نسبت به خمیر سیمان ناهمگن‌تر، متخلخل‌تر و محتوای ذرات سیمان هیدراته نشده پایین‌تر است. پایین‌تر بودن محتوای ذرات سیمان غیرهیدراته در ناحیه انتقال نسبت به خمیرسیمان نشانه هیدراسیون کامل در این ناحیه است. ضخامت مؤثر آن در حدود ۱۰ تا ۵۰ میکرون است که مقدار آن به ویژگی ریزساختارها و درجه واکنش هیدراسیون بستگی دارد (Lyu et al., 2019).

دو پارامتر، ضخامت و تخلخل از مهم‌ترین مشخصات ITZ هستند. ضخامت ITZ قابل مقایسه با اندازه متوسط دانه‌های سیمان است (Garboezi and Bentz, 1991). علاوه بر وجود فضاهای مویینه بزرگ و بلورهای هیدروکسید کلسیم جهت‌دار در ناحیه انتقال، عامل اصلی مقاومت کم این ناحیه، وجود ریز ترک‌ها است (Mehta and Monteiro, 1986). میکروساختارهای ITZ را می‌توان بر حسب تخلخل آن و پیشرفت هیدراسیون که ارتباط نزدیکی با هم دارند توصیف کرد. واکنش هیدراسیون در مجاورت سنگدانه، متفاوت از واکنش در خمیره سیمان است که علت آن نسبت محلی بالاتر آب به سیمان است. رشد و ماهیت مولکول‌های هیدراته می‌تواند تحت تاثیر زبری سطح و ماهیت شیمیایی سنگدانه قرار گیرد (Ollivier et al., 1995).

چن و وانگ (Chen and Wang, 1987) با مطالعه‌ای که بر روی پیوند بین مرم و خمیر سیمان انجام دادند به این نتیجه رسیدند که ترکیب شیمیایی سنگدانه و وزن طبیعی، تأثیر کمی در ماهیت ناحیه انتقالی فصل مشترک دارد و ممکن است این یک اثر ثانویه محسوب شود. ترکیب ناحیه فصل مشترک تا حدودی می‌تواند در صورت واکنش سنگدانه با خمیر سیمان تغییر یابد.

ادلر و زرز (Odler and Zürz, 1988) در بررسی مقاومت پیوند و ماهیت ریزساختار ناحیه فصل مشترک بین سیمان و سنگدانه دریافتند که پیوند ضعیف در ناحیه انتقالی به نوع سنگدانه و خمیر سیمان بستگی دارد و حاکی از وجود دو پیوند ضعیف است: یکی در فصل مشترک واقعی و دوم در منافذ موجود در ناحیه فصل مشترک. این مشاهدات حاکی از آن است

هیدراته/هیدراته نشده، میکرو سختی، شاخص جهت‌گیری هیدروکسید کلسیم و ضخامت ناحیه انتقالی فصل مشترک را تحت تأثیر می‌دهد.

گائو و همکاران (Gao et al., 2014) با بررسی تاثیر زمان عمل‌آوری، نسبت آب به سیمان و محتوای سنگدانه بر روی ضخامت، تخلخل و میکرو ساختار ناحیه انتقالی کامپوزیت‌های سیمانی به این نتیجه رسیدند که با افزایش سن عمل‌آوری بتن، به طور پیوسته ضخامت ناحیه انتقالی کاهش می‌یابد. افزایش نسبت آب به سیمان باعث افزایش ضخامت ITZ و کاهش مقاومت بتن می‌شود. تخلخل ناحیه انتقال با افزایش فاصله از سطح سنگدانه، افزایش زمان عمل‌آوری بتن، کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش درصد ماسه کاهش می‌یابد.

کارارا و لورنزیس (Carrara and Lorenzis, 2017) با بررسی شناسایی مداوم ریزساختارهای سیمان در ناحیه انتقالی دریافتند که تغییر در توزیع نسبت آب به سیمان در ITZ به طور عمده نتیجه فرآیند هیدراسیون است. مقدار موثر اولیه نسبت آب به سیمان (قبل از هیدراسیون) در زون ITZ در مقایسه با مقدار نظری فرض شده در طول طرح اختلاط بتن بالاتر است. نسبت آب به سیمان در پهنای ITZ ثابت نیست و با فاصله گرفتن از سطح سنگدانه کاهش می‌یابد و در یک فاصله مشخصی مقدار آن ثابت است که ضخامت ITZ فرض شده است.

آدامز و ادیکر (Adams and Ideker, 2017) با بررسی تاثیر نوع سنگدانه بر تغییر و مقاومت سیمان آلومینات کلسیم بتن به این نتیجه رسیدند که در مرز بین سنگدانه‌های سیلیسی حاوی آلومینیوم برخلاف سنگدانه‌های سیلیسی خالص با خمیر سیمان تخلخل‌هایی که تضعیف کننده ناحیه انتقالی هستند مشاهده نمی‌شوند. این مرزهای ضعیف در بین سنگدانه‌های آهکی و خمیر نیز دیده نمی‌شوند. شکل دانه و زبری سطح دانه در مقاومت ملات بتن موثرند. یعنی افزودن سنگدانه‌های خرد شده، زاویه‌دار و دارای زبری سطح بالا، در افزایش مقاومت بتن موثر است.

با توجه به مطالب گفته شده، چگونگی اتصال سنگدانه به خمیر سیمان از پارامترهای مهمی است که بر مقاومت بتن تأثیر می‌گذارد و ویژگی‌های ناحیه انتقالی متأثر از نوع سنگدانه است. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر نوع سنگدانه (جنس، شکل و بافت سطحی) بر ویژگی‌های مکانیکی بتن

کاهش اثر قفل‌شدگی مکانیکی بین سطح سنگدانه و خمیرسیمان می‌شود. در سنگدانه‌های آهکی، مقاومت اتصال در ناحیه انتقال با افزایش زبری سطح سنگدانه افزایش نمی‌یابد. عامل افزایش مقاومت اتصال در ناحیه انتقال واکنش شیمیایی بین سنگدانه‌های آهکی و خمیر سیمان است. واکنش پوزولانیک بین Si^{4+} در سطح سنگدانه کوارتزیت و خمیره سیمان هیدراته‌شده باعث افزایش مقاومت اتصال بالاتری نسبت به آهک و بازالت می‌شود.

ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2005) در بررسی ضخامت ناحیه انتقال فصل مشترک و مقاطع عرضی سیمان در اطراف سنگدانه‌ها دریافتند که ضخامت ناحیه انتقالی فصل مشترک و چگالی سطح سیمان بین سنگدانه‌ها تابعی از نسبت آب به سیمان، حداکثر قطر دانه سیمان و فاصله از سطح سنگدانه است.

ال اوریمی و همکاران (Al-Oraimi et al., 2006) در مطالعه‌ای تأثیر کانی شناسی سنگدانه درشت بر ویژگی‌های مکانیکی بتن با مقاومت بالا را مورد بررسی قرار دادند که نتایج به دست آمده نشان دهنده این است که بافت سطحی خشن سنگدانه اتصال مکانیکی بیشتری با خمیر سیمان ایجاد می‌کند و کانی شناسی سنگدانه می‌تواند در پیوند شیمیایی در طول هیدراسیون سیمان تأثیر گذارد. کانی شناسی سنگدانه‌ها نقش مهمی در مقاومت فشاری و کششی غیر مستقیم ایفا می‌کند.

لو و همکاران (Lo et al., 2007) به بررسی تأثیر میزان جذب آب سنگدانه‌ها بر روی مساحت حفرات موجود در ناحیه انتقالی پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است، زمانی که از سنگدانه‌های با میزان جذب بالا استفاده می‌شود درصد حفرات موجود در ناحیه انتقالی نیز افزایش پیدا کرده است و افزایش این مقدار تأثیر مستقیمی بر روی مقاومت بتن دارد به این دلیل که این ناحیه ضعیف‌ترین قسمت در بتن بوده و با افزایش میزان حفرات مقاومت این ناحیه کاهش و در نتیجه مقاومت بتن نیز کاهش می‌یابد.

حوسین و پول (Hussin and Poole, 2011) با بررسی تأثیر سنگ شناسی (سنگدانه گرانیتی و سنگ آهک) بر ناحیه انتقالی فصل مشترک در بتن با مقاومت عادی به این نتیجه رسیدند که انواع مختلف سنگدانه به طور قابل توجهی، ناهمگونی ریزساختار درصد تخلخل، دانه‌های سیمانی

(توف) سازند کرج و سنگ دگرگونی (کوارتزیت) سازند تاپ کوارتزیت است. در این مرحله از نمونه‌های سنگی مختلف با استفاده از دستگاه سنگ شکن فکی و دستگاه لس آنجلس بدون گوی با ذرات سنگی دانه بندی یکسان در دو شکل زاویه دار و گرد شده تهیه شده است. حداکثر اندازه سنگدانه‌ها ۱۹ میلیمتر می‌باشد. مدول نرمی محاسبه شده برای سنگدانه‌های ریز دانه با استفاده از نمودار دانه بندی ۲/۴۷ است. ویژگی‌های فیزیکی سنگدانه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

(مقاومت فشاری) و سطوح اتصال بین خمیره سیمان و سنگدانه در بتن می‌باشد. برای این منظور، ۱۶ نمونه بتن با سنگدانه‌های مختلف و شرایط دانه‌بندی، شکل و بافت سطحی مختلف تهیه و مورد آزمایش قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

مصالح سنگی استفاده شده بر اساس نحوه تشکیل آن‌ها شامل سنگ-های رسوبی (آهک و دولومیت سازند های الیکا و سلطانیه)، سنگ آذرآواری

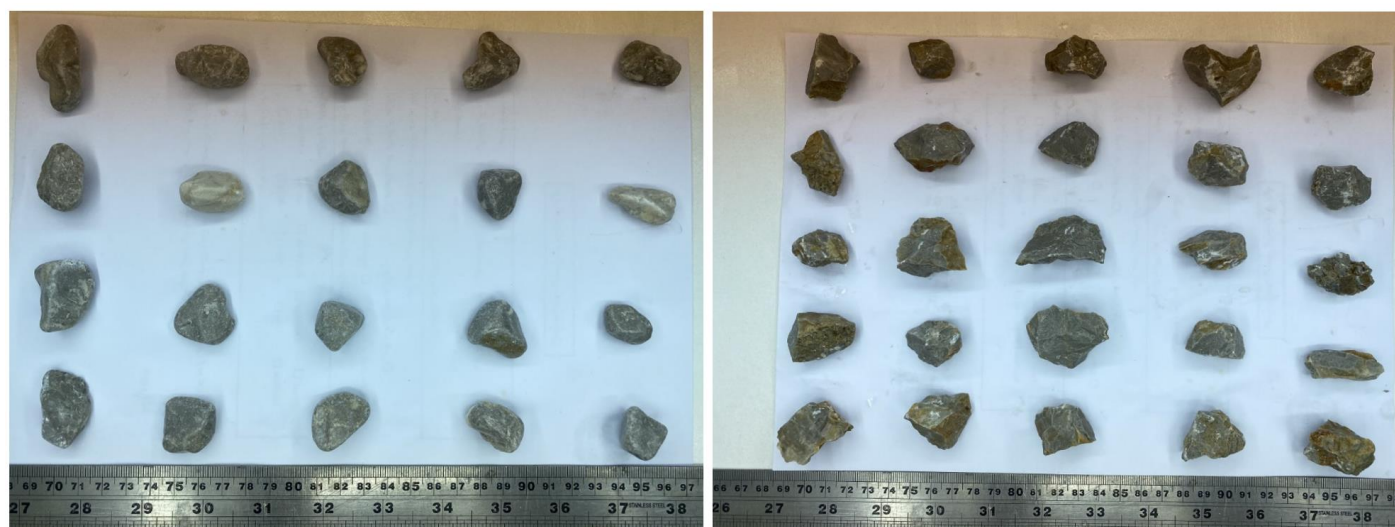
Table 1- The Physical properties measured in aggregates

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی اندازه گیری شده در سنگدانه‌ها

Physical Properties	Standard	Limestone	Quartzite	Dolomite	Tuff	
Porosity (%)	ASTM C97	2.4	1.1	1.6	8	
Water Absorption (%)	Coarse Aggregate	ASTM C127	1.05	0.55	0.75	3.8
	Fine Aggregates	ASTM C128	1.15	0.48	0.7	3.5
Unit Weight (KN/m ³)	Coarse Aggregate	ASTM C29	24.5	24.9	25.4	22.7
	Fine Aggregates	ASTM C29	24.9	25.3	25.8	23.2

سنگدانه به صورت مشاهده چشمی آمده است. با توجه به صفحات رخ، شکل اولیه، جنس ذرات، مسافت حمل شده و سختی، کرویت و گرد شدگی سنگدانه‌ها متفاوت است (جدول ۲). در جدول‌های ۳ و ۴ نیز ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی ارائه شده است.

سنگدانه‌های زاویه دار از خرد شدن سنگ با سنگ شکن فکی تهیه شده‌اند و سنگدانه‌های گرد شده حاصل گرد کردن سنگدانه‌های زاویه دار با دستگاه لس آنجلس بدون گوی هستند. برای گرد کردن انواع سنگدانه ۳۰۰۰ دور چرخش انجام شده است. در جدول ۲ نتایج بررسی کرویت و گرد شدگی سنگدانه با نرم افزار آنالیز تصویری image ج و بافت سطحی



شکل ۱- تصویری از سنگدانه‌های زاویه‌دار (سمت راست) و گردگوشه (سمت چپ) جهت استفاده در بتن
Fig. 1. An image of angular (right) and rounded (left) aggregates for use in concrete

جدول ۲- نتایج بررسی شکل و بافت سطحی سنگدانه‌های مصرفی
Table 2. The results of roundness and abrasion of aggregates

Aggregates	Shape of Aggregate				Surface Texture
	Crusher (With Angular)		Los Angeles Machine (Rounded)		
Tuff	Roundness 0.605	Sphericity 0.505	Roundness 0.756	Sphericity 0.573	Roughness and Porous
Limestone	Roundness 0.690	Sphericity 0.382	Roundness 0.797	Sphericity 0.478	Roughness
Quartzite	Roundness 0.682	Sphericity 0.526	Roundness 0.841	Sphericity 0.579	Smooth
Dolomite	Roundness 0.710	Sphericity 0.550	Roundness 0.820	Sphericity 0.600	Smooth

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی سیمان مصرفی منطبق بر استاندارد ملی (ISIRI 389)

Table 3. The physical properties of cement in accordance with National Standard (ISIRI 389)

ISIRI 389	Specific surface (gr/cm ²)	Initial setting time in Minutes (min)	Final setting time in Minutes (max)	Unconfined Compressive Strength 3 days (MPa)	Compressive Strength 7 days (MPa)	Compressive Strength 28 days (MPa)
	Min 2800	Min 45	Max 360	Min 100	Min 175	Min 315
Tehran Cement	3596	50	271	180	246.5	339

جدول ۴- ویژگی‌های شیمیایی سیمان مصرفی منطبق بر استاندارد ملی (ISIRI 389)

Table 4. The chemical properties of cement in accordance with National Standard (ISIRI 389)

ISIRI 386	CaO	SiO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO
	-	Minimum 20%	Maximum 6%	Maximum 6%	Maximum 5%	Maximum 3%
Tehran Cement	61.08	20.26	5.15	5.6	1.6	1.70

نمونه‌های بتن به منظور بررسی اتصال سنگدانه‌های مختلف با خمیر سیمان از نمونه‌های ۱۴، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته شده با سنگدانه زاویه دار و گرده شده مقطع نازک تهیه شده است. همچنین کارایی مخلوط با استفاده از آزمایش اسلمپ مطابق استاندارد ASTM C143 انجام شد. نتایج در جدول ۶ آورده شده است.

طرح اختلاط بتن

در این پژوهش طرح اختلاط بتن به روش آیین‌نامه ACI 211 تهیه شده است. نسبت مخلوط مصالح جهت ساخت بتن بر اساس روش حجمی بوده است. همه مخلوط‌های بتنی با مقدار ثابت آب به مواد سیمانی ۰/۵۵ ساخته شدند و مقاومت فشاری طراحی برابر با ۲۵ مگا پاسکال تعیین شده است. مشخصات مخلوط مورد مطالعه در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- طرح اختلاط بتن به روش حجمی برای سنگدانه‌های مختلف
Table 5. Volumetric mixing method for different aggregates

Type of Aggregate	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Filler (kg/m ³)	Air (%)	Aggregate
Concrete Mix	185	336	845	950	81	2	Limestone, Quartzite, Dolomite, Tuff

Table 6. Concrete slump test results

جدول ۶- نتایج آزمایش اسلامپ بتن

Type of Aggregate	Slump No. (mm)
Tuff	15
Limestone	15
Quartzite	10
Dolomite	15

تحلیل و نتایج

وضعیت مقاومت تراکمی تک محوری

کوارتزیت، دولومیت) به دلیل واکنش شیمیایی با خمیر سیمان است. با توجه به یکسانی نسبت آب به سیمان، طرح مخلوط نمونه‌های ساخته شده، بتن با سنگدانه زاویه‌دار نسبت به سنگدانه گرد شده در همان جنس، مقاومت فشاری بیشتری دارد که علت آن سطح تماس بیشتر سنگدانه برای اتصال مکانیکی بهتر است. همراه شدن تخلخل (ایجاد سطح تماس بیشتر) و واکنش پذیری سنگدانه آهکی باعث ایجاد اتصال بهتر با خمیر سیمان می‌شود. تخلخل و جذب آب بالاتر در سنگدانه توفی باعث اتصال ضعیف‌تر با خمیر سیمان نسبت به سایر سنگدانه می‌شود. در انتها نیز درصد افت مقاومت فشاری بتن با سنگدانه (کوارتزیت، دولومیت، آهک و توف) گرد شده نسبت به سنگدانه زاویه‌دار و با افزایش زمان به عمل‌آوری بتن تا ۲۸ روز، افزایشی و بعد از آن تا ۹۰ روز، کاهشی است (جدول ۷).

از آنجا که تعیین مقاومت نمونه‌های استاندارد معمولاً در سن ۲۸ روزه انجام می‌شود، برای نشان دادن روند افزایش مقاومت پس از گذشت ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتن آزمایش شکست انجام شد و نتایج در جدول ۷ و شکل ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ساخته شده با افزایش مدت عمل‌آوری افزایش می‌یابد. این افزایش در بتن با سنگدانه آهکی تدریجی است. اما در بتن با سنگدانه دولومیتی، کوارتزیتی و توفی از ۱۴ تا ۲۸ روزه یک افزایش ناگهانی نسبت به دوره‌های قبلی دارد. مقاومت فشاری اولیه (۷ و ۱۴ روزه) بیشتر بتن ساخته شده با سنگدانه آهکی نسبت به دیگر سنگدانه‌ها (توف،

جدول ۷- نتایج مقاومت فشاری آزمونه بتن با سنگدانه زاویه‌دار و گرد شده

Table 7. Compressive strength of concrete with angular and rounded aggregate

شکل سنگدانه	Compressive strength of concrete with angular aggregate	Compressive strength 7 days (MPa)	Compressive strength 14 days (MPa)	Compressive strength 28 days (MPa)	Compressive strength 90 days (MPa)
زاویه دار	Limestone (8 Spec.)	23	26	29	33
	Dolomite (8 Spec.)	20	23	29	33
	Quartzite (8 Spec.)	17.5	22	30	32
	Tuff (8 Spec.)	15	17	22.5	31
گرد شده	Limestone (8 Spec.)	18	20	22.5	29
	Dolomite (8 Spec.)	28	20	22	29
	Quartzite (8 Spec.)	15	18.5	20	28.5
	Tuff (8 Spec.)	14	15	18	26
درصد تغییرات مقاومت در نمونه های با سنگدانه های گرد شده نسبت به نمونه های با سنگدانه های زاویه دار	Limestone	21.7	23	22.4	12
	Dolomite	10	13	24	12
	Quartzite	14.3	16	33.33	11
	Tuff	6.6	11.8	20	16

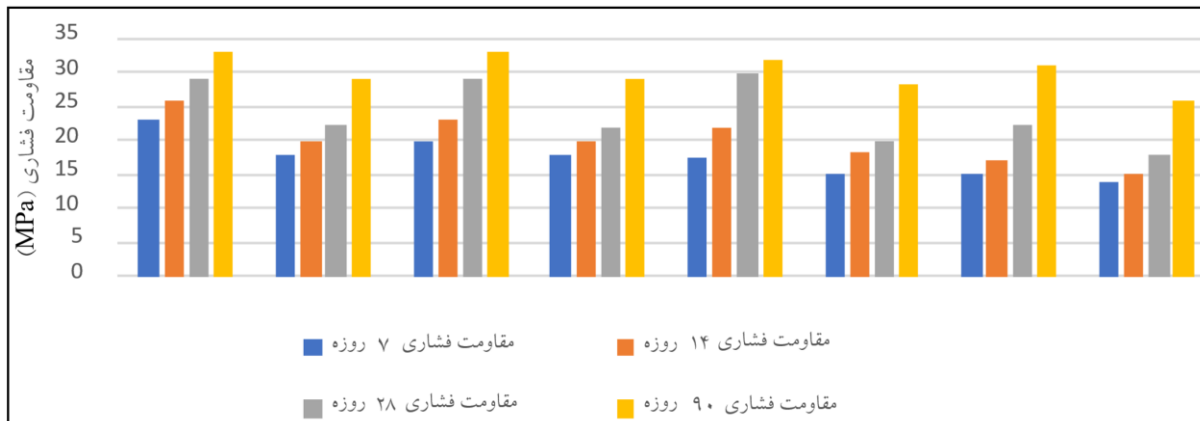


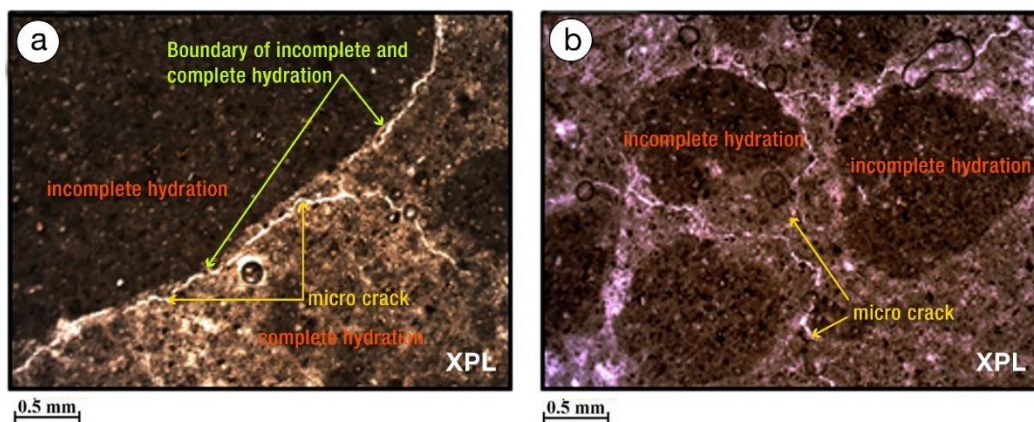
Fig. 2. Compressive strength of concrete test with tuff aggregate

شکل ۲- نمودار مقاومت فشاری آزمون بتن با سنگدانه توفی

در شکل ۳، تصاویر مقطع نازک خمیر سیمان سخت شده نشان داده شده است. بررسی‌ها حاکی از آن است که همواره مرز بین بخش‌هایی از خمیر سیمان که به طور کامل هیدراته شده با بخش‌هایی که فاقد هیدراسیون محسوسی است، ترک‌های مویرگی بر اثر خشک شدن خمیر سیمان ایجاد می‌شود. از این رو هر چقدر فرآیند هیدراسیون خمیر سیمان به ازای مقادیر مناسب‌تر آبدهی به آن ایجاد شود، احتمال ترک خوردگی‌های مویرگی در سیمان کمتر بوده و از این رو بتن تولیدی مقاومت بالاتری خواهد داشت.

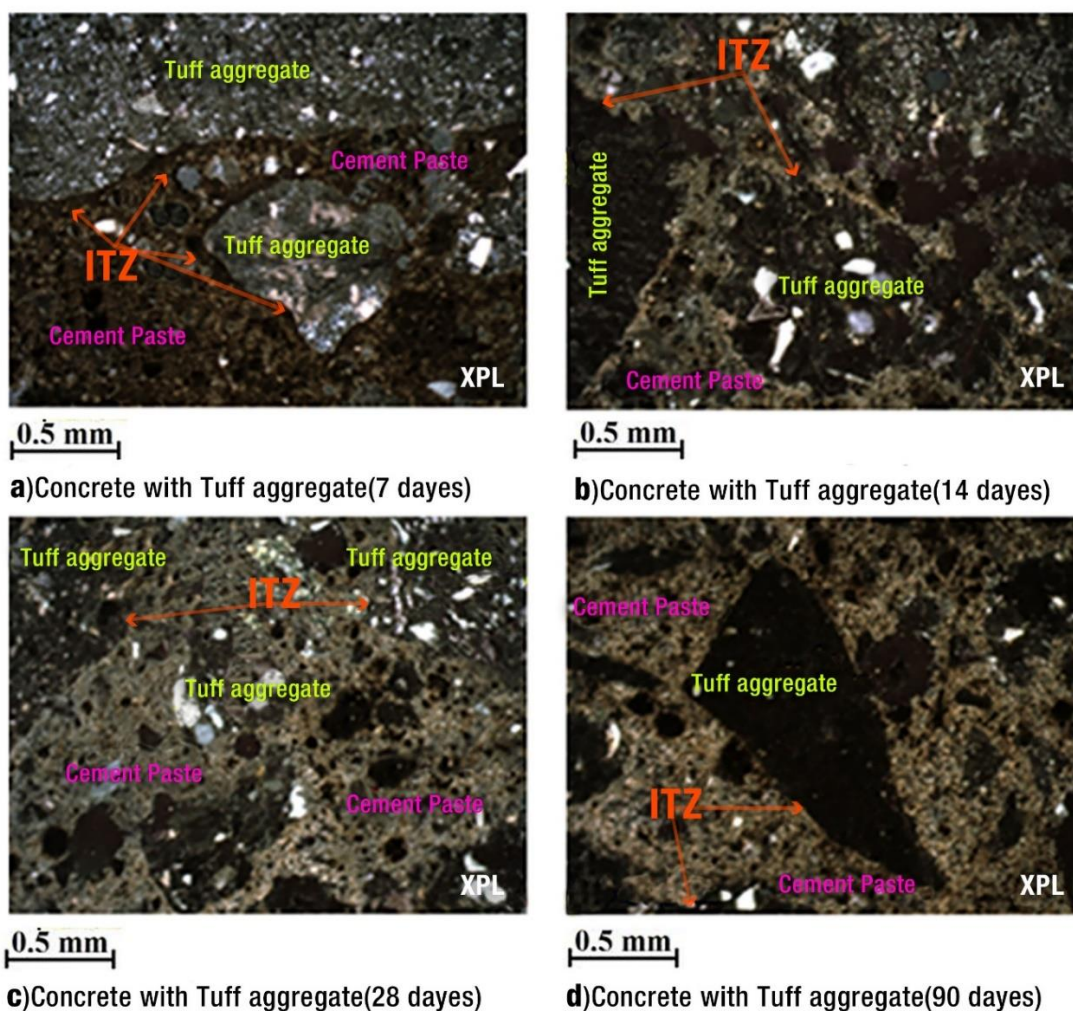
وضعیت واکنشی خمیره سیمان

با مطالعه مقطع نازک میکروسکوپی بتن سخت شده می‌توان اجزای تشکیل‌دهنده آن را مشاهده کرد و اطلاعاتی در مورد نوع سنگدانه، نوع ماتریکس، ارتباط بین خمیر سیمان با سنگدانه، واکنش‌های مخرب (واکنش قلیایی-سیلیسی، قلیایی-کربناته)، تخلخل و ترک‌های موجود در خمیر و هر گونه تغییر آن‌ها را در طول عمر بتن به دست آورد. برای بررسی تغییرات سطوح خارجی سنگدانه‌ها در داخل خمیر سیمان، مقاطعی از سنگدانه‌های مانده روی الک ۴ در داخل رزین (عدم واکنش با سنگدانه) تهیه شده است.



شکل ۳- تصویر میکروسکوپی خمیر سیمان. (a) نمای نزدیکی از شکل‌گیری ترک‌های مویرگی در مرز مشترک بخش‌هایی از خمیر سیمان که هیدراسیون کامل در آن‌ها رخ داده با بخش‌هایی که هیدراته نشده‌اند. (b) شکل‌گیری گسترده ترک‌های مویرگی در محل بخش‌های هیدراته شده و هیدراته نشده خمیره سیمان از نمای دورتر.

Fig. 3. Microscopic image of cement paste. a) A close-up view of the formation of capillary cracks at the common border of the parts of cement paste where full hydration occurred with parts that are not hydrated. b) Extensive formation of capillary cracks in parts of hydrated and unhydrated parts of cement paste from a far view.

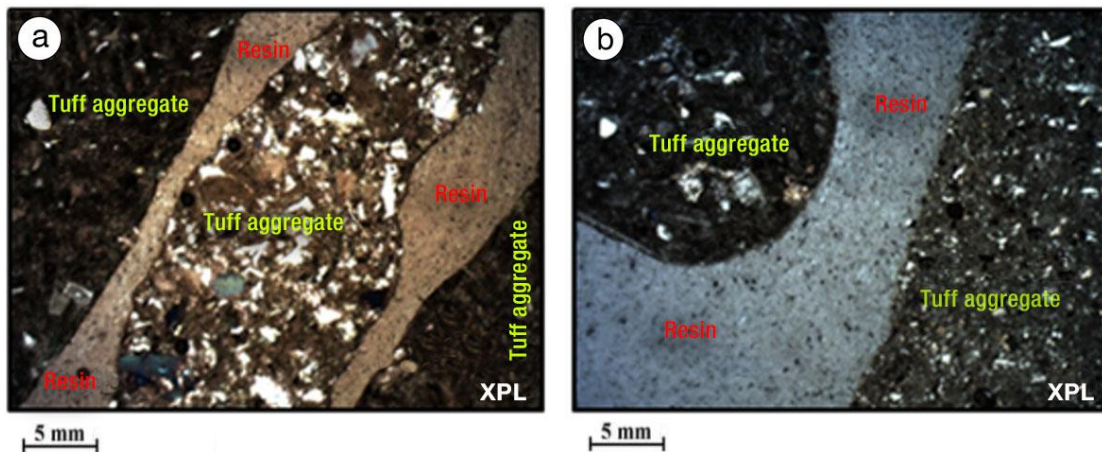


شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی بتن با سنگدانه توفی. در نمونه a مرز حاشیه واکنشی ژل مانند میان سنگدانه و سیمان به وضوح قابل مشاهده است در حالی که در نمونه‌های b تا d با افزایش عمر بتن تولیدی، این مرز شروع به ممزوج شدن و ناپدید شدن می‌کند.

Fig. 4. Microscopic images of concrete with tuff aggregate. In sample A, the gel-like reactive margin boundary between aggregate and cement is clearly visible whereas in samples b through d as the age of the produced concrete increases, this boundary begins to merge and disappear.

واکنشی میان اجزای مختلف بتن از قبلی سنگدانه و خمیر سیمان گردد. در بررسی مقاطع میکروسکوپی ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه بتن با سنگدانه توفی و مقایسه حاشیه سنگدانه داخل خمیر سیمان با حالتی که سنگدانه توسط رزین احاطه شده تغییر خاصی مشاهده نمی‌شود (شکل ۵).

برای بررسی هر چه بیشتر حاشیه واکنشی میان سنگدانه و سیمان، چنانچه سنگدانه آغشته به رزین گردد و سپس نمونه بتن از آن‌ها تهیه شود، حاشیه واکنشی به طور کامل حذف می‌شود. به عبارت دیگر ایجاد یک غلاف رزینی در اطراف سنگدانه‌ها می‌تواند سبب حذف کامل حاشیه

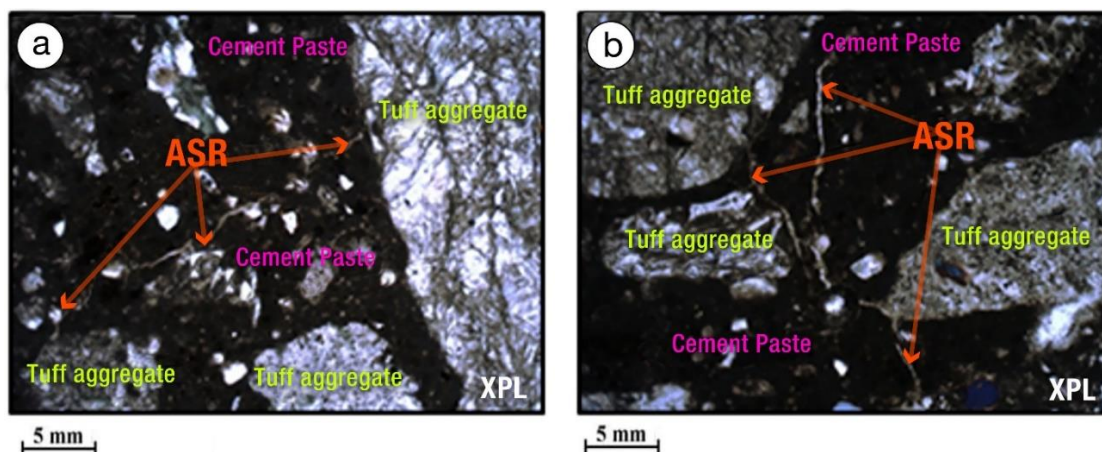


شکل ۵- تصاویر سنگدانه توفی داخل رزین. در شکل‌های a و b غلاف رزینی دور سنگدانه به طور کامل حاشیه واکنشی میان اجزای مختلف بتن را از بین برده است.

Fig. 5. Microscopic images of tuff aggregate inside the resin. In a and b, the resin pods around the aggregate have completely eliminated the reactive margin between different components of concrete.

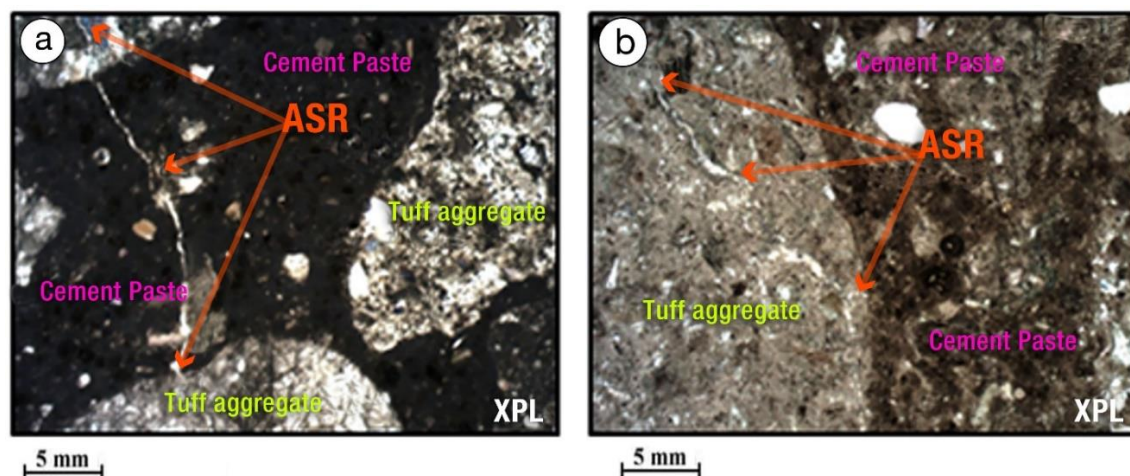
نسبت به سنگدانه و خمیر سیمانی دارد، سبب رخداد ترک‌هایی در بتن می‌گردد. در مقطع ۹۰ روزه واکنش قلیایی-سیلیسی بین خمیر سیمان و سنگدانه دیده می‌شود که ژل قلیایی-سیلیسی (ASR) در داخل خمیر سیمان (شکل ۶) و داخل ترک سنگدانه (شکل ۷) قابل مشاهده است.

از دیگر موارد مضر برای سیمان و سنگدانه شکل‌گیری ژل سیلیسی قلیایی است. در حالتی که سنگدانه‌ها پتانسیل قلیایی سیلیسی داشته باشند (به عبارتی چنانچه دارای سیلیس آزاد واکنش پذیر باشند)، آنگاه پس از تولید بتن و استفاده از یک سیمان واکنش‌زا، سیلیس وارد فاز واکنشی شده و خمیره ژلی ایجاد می‌کند. این خمیره به دلیل حجم بیشتری که



شکل ۶- (a) تصاویر میکروسکوپی واکنش قلیایی-سیلیسی (ASR) داخل خمیر سیمان از نمای نزدیک. (b) همان تصویر از نمای دورتر.

Fig. 6. a) microscopic images of alkaline-silica reaction (ASR) inside cement paste from close up. b) the same image from the distant view.



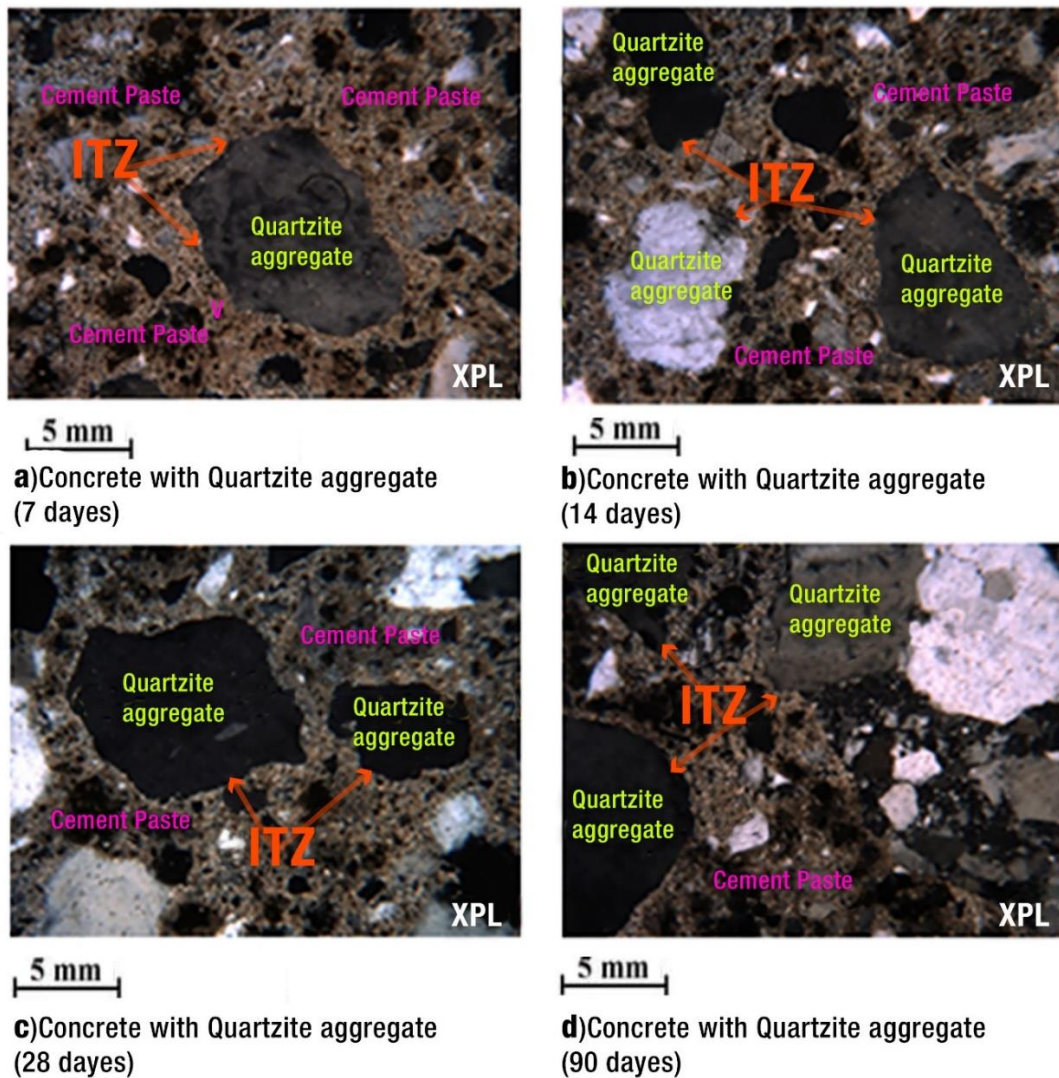
شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی واکنش قلیایی - سیلیسی (ASR) داخل ترک سنگدانه. (a) نمونه حاوی سنگدانه های زاویه‌دار. (b) نمونه تهیه شده با سنگدانه‌های گرد شده

Fig. 7. Microscopic images of alkali-silica reaction (ASR) inside the aggregate crack. a) the sample contains angular aggregates. b) the sample prepared with rounded aggregates.

بوده و اختلاف مقاومت کمتری باهم خواهند داشت. این موضوع سبب کاهش در میکروتترک‌ها در این مرز شده و مقاومت بتن بیشتر خواهد شد. برای بررسی اثر نوع سنگدانه بر میزان زون انتقالی، بتن تهیه شده با سنگدانه‌های کوارتزی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها حاکی از آن است که، ضخامت ناحیه انتقالی فصل مشترک در نمونه‌های بتن تهیه شده با سنگدانه‌های کوارتزی به صورت واضح مشخص نیست که علت آن می‌تواند عدم واکنش سنگدانه با خمیر سیمان باشد (شکل ۸). از این رو بتن تهیه شده با این مصالح دارای مرزهای مقاومتری شاریبی بوده که در این مرزها میکروتترک‌ها به سرعت رشد می‌کنند و مقاومت‌های پائینی را برای بتن ایجاد می‌کنند.

مقاطع بتن همراه با سنگدانه کوارتزی

یکی از عوامل مهم بر روی مقاومت بتن نوع سنگدانه‌های مورد استفاده در آن می‌باشد. سنگدانه‌ها به واسطه عوامل مختلفی می‌توانند بر روی مقاومت بتن تاثیر بگذارند. یکی از این اثرات، تفاوت ضخامت ناحیه انتقالی میان سنگدانه و خمیر سیمان در سنگدانه‌های مختلف می‌باشد. به طور کلی هر چقدر ضخامت این زون بیشتر باشد، واکنش میان سیمان و سنگدانه شدیدتر بوده و اصطلاحاً سیمان سنگدانه را در خود حل می‌کند از این رو بافت یکدست‌تری در بتن ایجاد شده و ترکیب هموزن‌تری در آن شکل می‌گیرد (مشروط بر آنکه زمان کافی برای انجام این سلسله واکنش‌ها به بتن داده شود). از این رو مرز مشترک میان سیمان و سنگدانه تدریجی‌تر



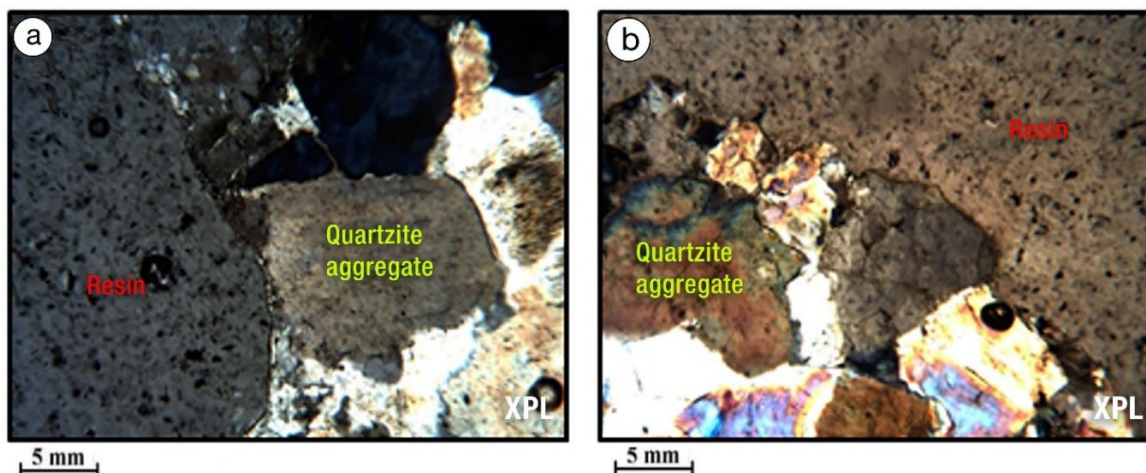
شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی بتن با سنگدانه کوارتزیتی. در هیچ‌یک از نمونه بتن‌های با عمرهای مختلف ناحیه انتقال مشخصی میان سنگدانه‌ها با خمیر سیمان مشخص نیست. به عبارت دیگر همواره مرز میان سنگدانه و خمیره سیمان یک مرز شارپ می‌باشد که در آن احتمال رشد و گسترش میکرو ترک‌ها به ازای وارد آمدن فشار، بسیار زیاد است.

Fig. 8. Microscopic images of concrete with quartzite aggregate. There is no clear specific transition zone between the aggregates and the cement paste in any of the concrete samples of different ages. In other words, the boundary between aggregate and cement paste is always a sharp boundary in which the possibility of growth and expansion of microcracks in exchange for pressure is very high.

خمیر سیمان با حالتی که سنگدانه توسط رزین احاطه شده تغییر خاصی مشاهده نمی‌شود (شکل ۹). در این نمونه‌ها همچنین به دلیل عدم حضور

همچنین در نمونه‌های کوارتزیتی آغشته شده به رزین نیز ناحیه انتقالی فصل مشترک مشاهده نمی‌شود. در بررسی مقاطع میکروسکوپی ۰.۷، ۱.۴، ۲.۸ و ۹.۰ روزه بتن با سنگدانه کوارتزیتی و مقایسه حاشیه سنگدانه داخل

سیلیس آزاد در سنگدانه‌ها، ژل‌های سیلیسی-قلیایی نیز شکل نگرفته و بتن حائز شرایط مطلوب‌تری بوده است.

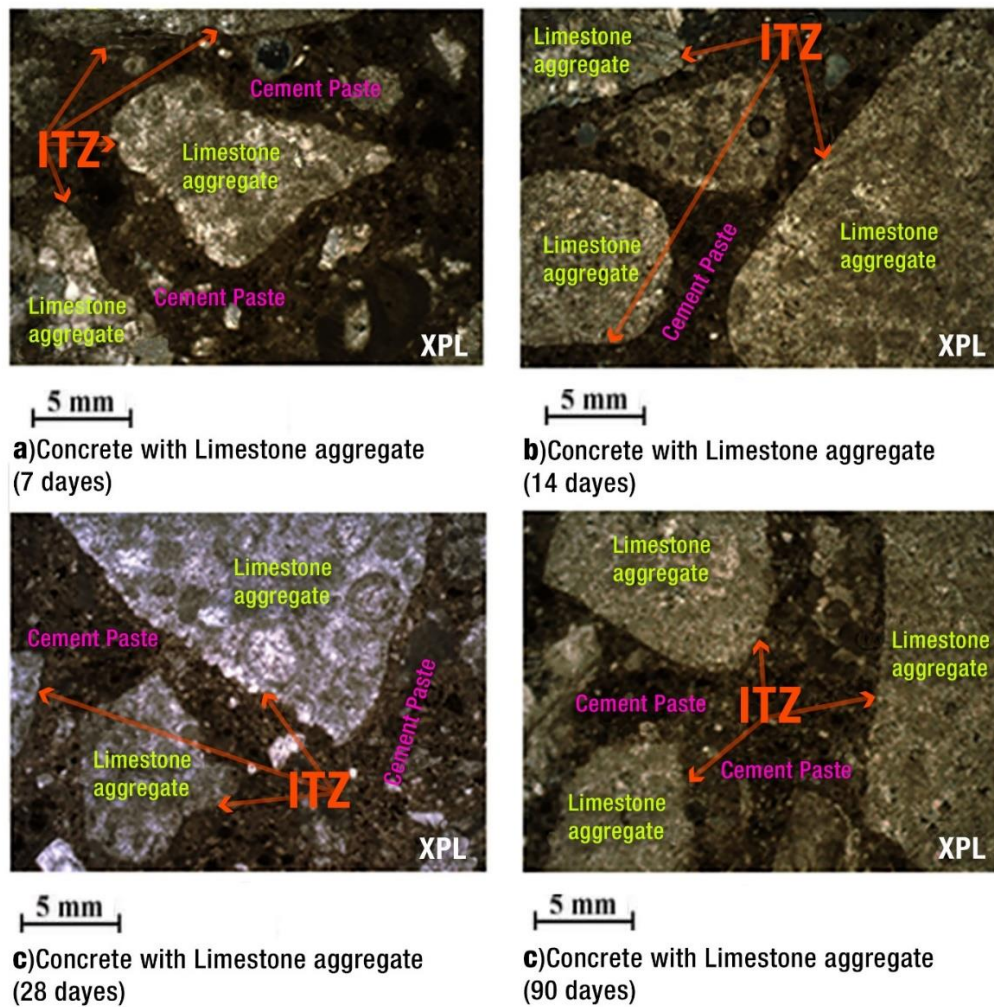


شکل ۹- a و b) تصاویر میکروسکوپی سنگدانه کوارتزیته داخل رزین. غلاف رزینی ایجاد شده دور سنگدانه‌ها حاشیه واکنشی را به طور کامل از بین برده است.
Fig. 9. a and b) microscopic images of quartzite aggregate inside resin. Resin pods created around the aggregates have completely removed the reactive margin.

این فعل و انفعالات سبب می‌شود بتن تهیه شده با سنگدانه آهکی نسبت به سنگدانه‌های توفی و کوارتزیته از مقاومت بیشتری برخوردار باشد. در مقطع ۷ روزه ناحیه انتقالی فصل مشترک به صورت واضح دیده می‌شود با افزایش زمان هیدراسیون تا ۱۴ روز ضخامت کاهش پیدا کرده و در مقاطع ۲۸ و ۹۰ روزه ناحیه انتقالی دیده نمی‌شود (شکل ۱۰ و شکل ۱۱). واکنش قلیایی-کربناته در مقاطع دیده نمی‌شود.

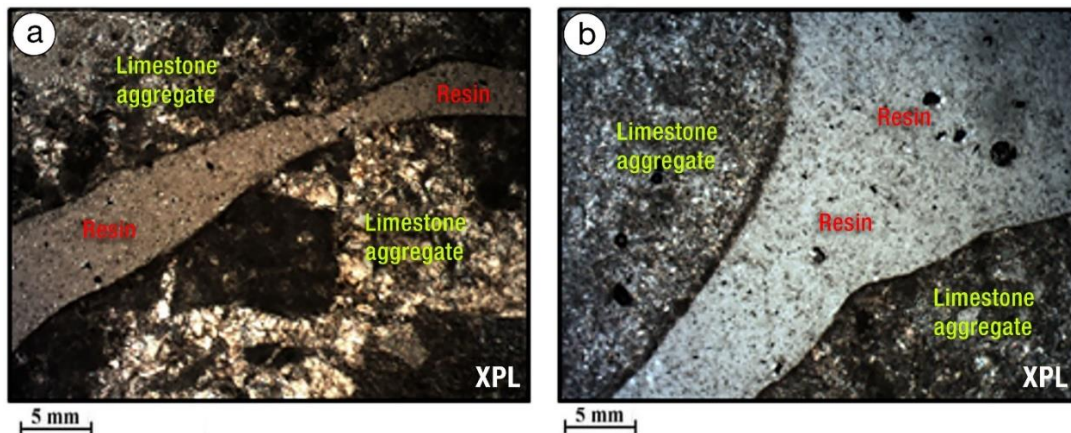
مقاطع بتن همراه با سنگدانه آهکی

بررسی وضعیت حاشیه واکنشی در نمونه های بتن تهیه شده با سنگدانه‌های آهکی حاکی از آن است که محو شدن این حاشیه واکنشی به مدت زمان بیشتری نسبت به نمونه‌های بتنی تهیه شده از سنگدانه‌های توفی و کوارتزیته دارد. از این رو واکنشی که میان سیمان با سنگدانه آهکی شکل می‌گیرد شدیدتر بوده و ممزوج شدن آن به زمان بیشتری نیاز دارد.



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی بتن با سنگدانه آهکی. در نمونه‌های a و b حاشیه واکنشی محسوس بوده ولی در نمونه‌های c و d با عمر بیشتر، حاشیه واکنشی محو گردیده است.

Fig. 10. Microscopic images of concrete with limestone aggregate. In the samples a and b, the reaction margin was noticeable, but in the c and d samples with older age, the reaction margin was obliterated.



شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپی سنگدانه آهکی داخل رزین. در a و b مرز حاشیه واکنشی از بین رفته است.

Fig. 11. Microscopic images of limestone aggregate inside resin. In a and b, the reactive margin has been removed.

نتیجه‌گیری

- با افزایش طول عمر بتن در صورت واکنش‌زایی سنگدانه (چرت و دولومیت) با خمیر سیمان باعث ایجاد یک هاله واکنشی اطراف سنگدانه می‌شود.
- با توجه به یکسانی نسبت آب به سیمان طرح مخلوط بتن‌های ساخته شده، بتن با سنگدانه زاویه‌دار نسبت به سنگدانه گرد شده در همان جنس مقاومت فشاری بیشتری دارد که علت آن سطح تماس بیشتر سنگدانه برای اتصال مکانیکی بهتر است.
- همراه شدن تخلخل و واکنش‌پذیری سنگدانه آهکی باعث ایجاد اتصال بهتر با خمیر سیمان می‌شود. در سنگدانه توفی به علت تخلخل و جذب آب بالاتر اتصال ضعیف‌تری با خمیر سیمان نسبت به سایر سنگدانه‌ها ایجاد می‌کند.
- ضخامت ناحیه انتقالی در اطراف سنگدانه آهکی (ثابت) و در سنگدانه توفی (متغیر) است. اما در سنگدانه کوارتزیتی به دلیل عدم واکنش‌پذیری، ضخامت ناحیه انتقالی دیده نمی‌شود. با افزایش زمان عمل‌آوری بتن ضخامت ناحیه انتقالی در بعضی از مصالح کاهش می‌یابد. این موضوع در سنگدانه‌هایی که حاشیه هیدراسیونی ناقصی را با سیمان شکل می‌دهند، مشاهده می‌گردد.

مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق در ادامه ذکر شده است:

- شکل سنگدانه ارتباط مستقیمی با مقاومت فشاری بتن دارد، سنگدانه‌های زاویه‌دار و زبر باعث افزایش مقاومت بتن می‌شوند.
- ضخامت ناحیه انتقالی با توجه به ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی سنگدانه متفاوت می‌باشد.
- مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش مدت عمل‌آوری بتن افزایش می‌یابد که این افزایش در بتن با سنگدانه آهکی تدریجی است. اما در بتن با سنگدانه دولومیتی، کوارتزیتی و توفی از ۱۴ تا ۲۸ روزه یک افزایش ناگهانی نسبت به دوره‌های قبلی دارد. این موضوع به دلیل آن است سنگدانه‌های آهکی از همان ابتدای اختلاط با آب و سیمان، حاشیه واکنشی را ایجاد می‌کنند در حالی که شکل‌گیری حاشیه واکنشی برای سایر سنگدانه‌ها با سیمان از یک الگوی خطی تبعیت نکرده و از این‌رو مقادیر افزایش مقاومت بتن تهیه شده نیز به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد.
- افزایش مقاومت فشاری اولیه (۷ و ۱۴ روزه) بیشتر بتن ساخته شده با سنگدانه آهکی نسبت به دیگر سنگدانه‌ها (توف، کوارتزیت، دولومیت) به دلیل واکنش شیمیایی با خمیر سیمان است.

References

- Adams, M. P., Ideker, J. H. 2017. Influence of aggregate type on conversion and strength in calcium aluminate cement concrete. *Cement and Concrete Research* 100, 284-296.
- Al-Oraimi, S. K., Taha, R., Hassan, H. F. 2006. The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building materials* 20(7), 499- 503.
- ASTM C 127 – 07. 2009. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate
- ASTM C97-02. 2008. Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone. Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific
- ASTM C128-22. 2007. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.
- ASTM C143-78. 2007. Standard Test Method for Slump of Portland Cement Concrete
- ASTM C29/C29M-97.1997. Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate
- Ben-Othman, B., Scrivener, K. L., Buenfeld, N.R. 1988. Permeability and microstructure of lightweight aggregate concrete, presented at Institute of Ceramics, Annual Convention, Durham, April.
- Carrara, P., De Lorenzis, L. 2017. Consistent identification of the interfacial transition zone in simulated cement microstructures. *Cement and Concrete Composites* 80, 224-234.
- Chen, Z.Y., Wang, J.G. 1987. Bond between marble and cement paste, *Cement and Concrete Research* 17, 544–552.
- Deiaf, A. B. A. 2016. Bonding between Aggregates and Cement Pastes in Concrete. *Strain*, 10, 6.
- Gao, Y., De Schutter, G., Ye, G., Tan, Z., Wu, K. 2014. The ITZ microstructure, thickness and porosity in blended cementitious composite: Effects of curing age, water to binder ratio and aggregate content. *Composite's part b: engineering* 60, 1-13.
- Garboczi, E. J., Bentz, D. P. 1991. Digital simulation of the aggregate–cement paste interfacial zone in concrete. *Journal of materials Research* 6(1), 196-201.
- Hussin, A., Poole, C. 2011. Petrography evidence of the interfacial transition zone (ITZ) in the normal strength concrete containing granitic and limestone aggregates. *Construction and Building Materials* 25(5), 2298-2303.
- Jebli, M., Jamin, F., Malachanne, E., Garcia-Diaz, E., El Yousoufi, M. S. 2018. Experimental characterization of mechanical properties of the cement-aggregate interface in concrete. *Construction and Building Materials* 161, 16-25
- Lo, T. Y., Tang, W. C., Cui, H. Z. 2007. The effects of aggregate properties on lightweight concrete. *Building and Environment* 42(8), 3025-3029.
- Lyu, K., Garboczi, E. J., She, W., Miao, C. 2019. The effect of rough vs. smooth aggregate surfaces on the characteristics of the interfacial transition zone. *Cement and Concrete Composites* 99, 49-61.
- Maso, J. C. 1996. Interfacial transition zone in concrete. CRC Press.
- Mehta, P. K., Monteiro, P.J.M. 1986. *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Neville, A. 2003. *Neville on concrete: an examination of issues in concrete practice*, American Concrete Institute.
- Odler, I., Zürz, A. 1988. Structure and bond strength of cement-aggregate interfaces, *Bonding in Cementitious Composites*, (eds S. Mindes and S. P. Shah), Materials Research Society, Proceedings 114, 21–27.
- Ollivier, J.P., Maso, J.C., Bourdette, B. 1995. Interfacial Transition Zone in Concrete. *Advanced cement based materials* 2(1), 30-38
- Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., Laugesen, P. 2004. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface science* 12(4), 411-421
- Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91). 2002
- Tasong, W. A., Lynsdale, C. J., Cripps, J. C. 1998. Aggregate-cement paste interface. II: Influence of aggregate physical properties. *Cement and Concrete Research* 28(10), 1453-1465.
- Tasong, W. A., Lynsdale, C. J., Cripps, J. C. 1999. Aggregate-cement paste interface: Part I. Influence of aggregate geochemistry. *Cement and Concrete Research*, 29(7), 1019-1025.
- Zheng, J. J., Li, C. Q., Zhou, X. Z. 2005. Thickness of interfacial transition zone and cement content profiles around aggregates. *Magazine of Concrete Research*, 57(7), 397-406.