

Study on the Effect of Using a Hybrid Colloidal Silica–Calcium Aluminate Cement Bonding System on the Microstructure and Mechanical Properties of High-Alumina Castables

Souren Kashkooli^{1*}, Touraj Ebadzadeh², Masoud Alizadeh², Mahdi Ghasemi Kakroodi³

¹ PhD Student, Department of Ceramic, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

² Professor, Department of Ceramic, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

³ Professor, Department of Materials Science and Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

*Corresponding Author's Email: souren.t.kashkooli@gmail.com (Souren Kashkooli)

Paper History:

Received: 2025-07-15

Revised: 2025-08-01

Accepted: 2025-09-30

Keywords:

High-Alumina Castable,
Low-Cement Castable,
Colloidal Silica,
Sol-Gel

Abstract With the growing utilization of monolithic refractories, particularly castables, considerable research efforts have been devoted to enhancing their physical, mechanical, and thermomechanical properties. To address the limitations of calcium aluminate cement associated with the formation of low-melting phases, sol–gel bonding systems have been developed as an effective strategy to improve strength and high-temperature performance. In this study, the effect of partially substituting cement with different proportions of colloidal silica in castable formulations was examined. The castables were prepared using conventional processing techniques and sintered at 1500 °C to assess their mechanical performance and microstructural characteristics. Cold crushing strength (CCS) measurements indicated that the composition containing 75% cement and 25% colloidal silica exhibited the highest CCS value of 78 MPa. Phase identification was carried out by X-ray diffraction (XRD), while field-emission scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive spectroscopy (FESEM/EDS) revealed a notable reduction in porosity, primarily due to the lower water demand during casting. Additionally, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) demonstrated the gelation process and the formation of an extensive siloxane (Si–O–Si) network. The combined formation of the calcium aluminate phase and decreased porosity contributed to the improved CCS. However, further increases in colloidal silica content led to a decline in strength, attributed to the reduced contribution of hydraulic bonding from cement.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.530795.1333>

URL: https://www.jamt.ir/article_231431.html

1. INTRODUCTION

Refractories are materials capable of withstanding high temperatures, mechanical loads, and chemical reactions without undergoing significant physical or chemical changes. They play a critical role in high-temperature industries such as iron, steel, and petrochemicals, directly influencing product quality and production costs. Among different refractory types, castables have gained increasing attention due to their versatile applications and ease of installation. The binder phase in castables serves to unite the aggregates into a cohesive structure, providing sufficient green strength for shaping and handling. Upon firing, the binder either decomposes or participates in ceramic bonding, contributing to strength development through the sintering process (Banerjee, 1998a; Zhou, 2004). The most commonly used binders are calcium aluminate cements (CAC), valued for their favorable rheological behavior and ability to impart early mechanical strength. However, in the presence of impurities such as silica, CAC can form gehlenite (C₂AS)—a low-melting, non-hydratable phase—and may also produce phases with slow or no setting, such as C₄AF and C₂F, in the presence of ferrites (Banerjee, 1998b; Rangdal & Patil, 2023). These drawbacks have led to the development of

low-cement castables (LCCs) with 1–2.5 wt.% CaO, ultra-low cement castables (ULCCs) with 0.2–1 wt.% CaO, and no-cement castables (NCCs) containing less than 0.2 wt.% CaO. These systems aim to reduce CAC content by employing alternative binders such as resins, hydrated alumina, sodium silicate, aluminum phosphate, and others (Dos Anjos et al., 2008; Ismael et al., 2007).

The use of colloidal binders in refractory castables, first introduced in the 1980s, has gained substantial attention due to their numerous advantages. In the sol–gel method, colloidal particles form branched chains that create a three-dimensional gel network around the aggregates, holding them together. During firing, water evaporates from the gel, promoting the formation of ceramic bonds between particles (Singh & Sarkar, 2016). Recent studies have shown that partial replacement of calcium aluminate cement (CAC) with colloidal sols, particularly colloidal silica, can improve castable properties. For example, replacing CAC with 5 wt.% silica enhanced both flowability and mechanical strength (Yaghoubi et al., 2012). Hybrid systems with small amounts of CAC and colloidal silica increased cold crushing strength (CCS), while complete CAC removal reduced it (Milani & Kakroodi, 2025; Piippo et al., 2024). Smaller colloidal particle sizes accelerated

Please cite this article as: Kashkooli, S., Ebadzadeh, T., Alizadeh, M., & Ghasemi Kakroodi, M. (2025) Study on the Effect of Using a Hybrid Colloidal Silica–Calcium Aluminate Cement Bonding System on the Microstructure and Mechanical Properties of High-Alumina Castables. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 14, No. 2, 64-75. [in Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2025.530795.1333>

2783-0829/© 2025 The Author(s). Published by MERC.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)



setting but caused microcracks, lowering CCS (Zemánek & Nevřivová, 2021a). Castables bonded with silica sol generally showed higher density and CCS compared to those with alumina sol (Milani & Kakroudi, 2025). Additionally, colloidal silica improved hot strength due to enhanced sintering from its high surface area (Alireza et al., 2011).

Based on the aforementioned studies, the present work aims to investigate the effect of partially replacing calcium aluminate cement with colloidal silica to develop hybrid-bonded high-alumina refractory castables. The focus is on evaluating the cold crushing strength and microstructural evolution of the castables, providing insight into the performance of such hybrid systems.

2. MATERIALS AND METHODS

Five types of low-cement castables were prepared to investigate the effect of colloidal silica (nanosilica) as a bonding agent. In selected formulations, a portion of the calcium aluminate cement (CAC) was replaced with colloidal silica to form hybrid bonding systems. For each of the five compositions, the dry raw materials were first mixed in a planetary mixer (CE 230, Azmoon Co., Iran). Coarser aggregates were added and blended initially, followed by the incorporation of finer particles. Finally, the commercial colloidal silica sol was added to the mix, and the entire batch was mixed thoroughly for 5–6 minutes. No additional water was introduced in the sol-containing samples. In the reference sample containing only CAC, approximately 7 wt.% water was used, while in the hybrid formulations, water was added during mixing as required to achieve proper flowability.

The workability of the castable mixes was evaluated using the slump test according to ASTM C1446-07. Once the desired consistency was achieved, the mixtures were poured into lubricated steel molds (50 mm × 50 mm × 50 mm) using a vibration casting method. The cast specimens were initially dried in the molds for 24 hours, followed by demolding and subsequent drying in a high-humidity environment (relative humidity >90%) at room temperature for another 24 hours. The samples were then oven-dried at 110 °C for 24 hours in a laboratory oven (Sanat Saram, Iran). Sintering was carried out in an electric furnace (Sanat Saram, Iran) at 1500 °C with a 2-hour soaking time at the peak temperature. After firing, the samples were allowed to cool inside the switched-off furnace to room temperature.

3. RESULTS AND DISCUSSION

As evident in Figure 1, all samples contained corundum (α -Al₂O₃), identified using reference card No. 96-100-0018, and mullite (3Al₂O₃·2SiO₂), identified with card No. 96-901-0160. Notably, the intensity of the mullite peak increased with higher colloidal silica content in the castables, indicating an increased mullite phase fraction due to the enhanced availability of SiO₂. Additionally, with increasing colloidal silica content, the presence of free SiO₂ was detected (reference card No. 01-076-0933), which is considered one of the drawbacks of silica sol usage in refractory castables. In the sample bonded solely with CAC, only a weak mullite peak was observed, attributed to the low silica content in the raw materials. In contrast, hybrid-bonded samples containing colloidal silica exhibited greater mullite

formation and higher free silica content as the amount of silica sol increased. The calcium aluminate (CA) phase, identified by reference card No. 98-018-0997, appeared in the XRD patterns of cement-containing samples. This phase typically forms from solid-state reactions between cement particles and fine alumina at temperatures above 1350 °C and can contribute to improved mechanical properties (Zhu et al., 2011). The CA peak was most intense in the pure CAC sample (C) and absent in the pure silica sol sample (S), consistent with the lack of calcium in the latter formulation.

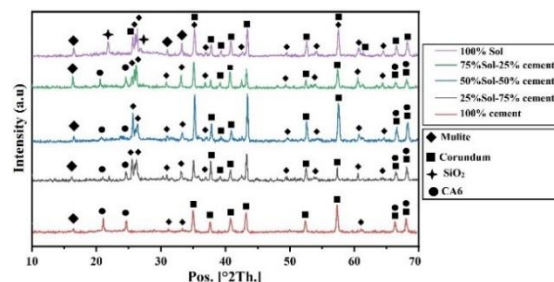


Figure 1. XRD patterns of sintered castables including various binders.

Figure 2 illustrates the cold crushing strength (CCS) values of the various alumina castables. Alumina castables bonded with colloidal silica exhibited lower CCS compared to those bonded with calcium aluminate cement (CAC), which is attributed to the sol–gel bonding mechanism’s dependence on particle aggregation and solid content. While CAC-bonded samples benefit from hydraulic bonding and higher early strength, the volumetric expansion during CA phase formation can induce microcracking. Hybrid systems, combining CAC and colloidal silica, balance these effects by enhancing green strength through calcium aluminate hydrate formation and reducing porosity due to lower water demand. The synergistic effect of strong hydraulic bonds and improved sintering, particularly in the 75C25S formulation, resulted in enhanced mechanical integrity, suggesting the dominance of hydraulic bonding in the hybrid samples. The addition of colloidal silica also promoted mullite formation and produced dense, crack-free structures. As discussed earlier, this improvement stems from the reduced water content in sol-containing samples, which minimizes porosity and enhances structural cohesion.

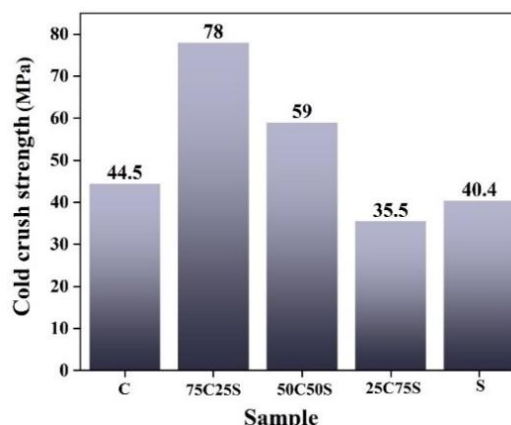


Figure 2. Cold crush strength of Castables including various binders.

4. CONCLUSION

This study demonstrated that partial replacement of calcium aluminate cement with colloidal silica in high-alumina castables improves sintering, reduces porosity, and enhances mullite formation due to the high surface area of nanosilica and the development of a siloxane network. The optimal performance was observed in the hybrid sample with 25% colloidal silica (75C25S), which exhibited the highest cold crushing strength. However, replacing more than 25% of the cement reduced mechanical strength as a result of weakened hydraulic bonding.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge the Materials and Energy Research Center (MERC) and the ceramic department for their supports.

REFERENCES

- Alireza, S., Fatemeh, K. N., & Hossein, S. (2011). *Improving thermo-mechanical properties of tabular alumina castables via using nano structured colloidal silica* (Doctoral dissertation, Sumy State University). <https://www.researchgate.net/publication/302996166>
- Banerjee, S. (1998a). *Monolithic refractories: a comprehensive handbook*. John Wiley & Sons. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=BLgMEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq2>
- Banerjee, S. (1998b). Recent developments in monolithic refractories. *American Ceramic Society Bulletin*, 77(10), 59-63. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=2408440>
- Dos Anjos, R., Ismael, M., De Oliveira, I., & Pandolfelli, V. (2008). Workability and setting parameters evaluation of colloidal silica bonded refractory suspensions. *Ceramics International*, 34(1), 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.09.004>
- Ismael, M., Salomão, R., & Pandolfelli, V. (2007). Refractory castables based on colloidal silica and hydratable alumina. *American Ceramic Society Bulletin*, 86(9), 58. <https://www.researchgate.net/publication/285899882>
- Milani, S. S., & Kakroudi, M. G. (2025). Effect of different binders on microstructural evolution and strength of sol-gel bonded Al₂O₃-spinel castables. *Synthesis and Sintering*, 5(1), 73-81. <https://doi.org/10.53063/synsint.2025.51264>
- Piippo, A., Ruotanen, K., Visuri, V. V., Poutiainen, N., & Heikkinen, E. P. (2024). Experimental Study on the Effect of Calcium Aluminate Cement Addition on the Drying and Physical Properties of Refractory Castables Containing Colloidal Silica. *Materials*, 17(21), 5308. <https://doi.org/10.3390/ma17215308>
- Rangdal, P., & Patil, S. B. (2023). Synthesis of Alumina Sol Binder for Pure Alumina Refractory Castable and its Comparison with Other Commercially Available Binders. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 104(2), 805-809. <https://doi.org/10.1007/s40033-022-00420-3>
- Singh, A. K., & Sarkar, R. (2016). Nano mullite bonded refractory castable composition for high temperature applications. *Ceramics International*, 42(11), 12937-12945. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.066>
- Yaghoubi, H., Sarpoolaky, H., Golestanifard, F., & Souri, A. (2012). Influence of nano silica on properties and microstructure of high alumina ultra-low cement refractory castables. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 9(2), 50-58. <http://ijmse.iust.ac.ir/article-1-440-en.html>
- Zemánek, D., & Nevřivová, L. (2021a). Influence of Colloidal Silica on Final Properties of no Cement Castables. *Solid State Phenomena*, 321, 125-130. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.321.125>
- Zhou, N. (2004). Advances in modern refractory castables. *China's Refractories*, 13(2), 3-12. <http://www.cnref.cn/EN/abstract/abstract2672.shtml>
- Zhu, Z., Jiang, T., Li, G., Guo, Y., & Yang, Y. (2011). Thermodynamics of reactions among Al₂O₃, CaO, SiO₂ and Fe₂O₃ during roasting processes. In *Thermodynamics-Interaction Studies-Solids, Liquids and Gases*. IntechOpen. <http://doi.org/10.5772/21545>



مقاله‌ی کامل پژوهشی

مطالعه‌ی تأثیر استفاده از سیستم چسب هیبریدی سیلیکای کلئیدی-سیمان کلسیم آلومیناتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی جرم‌های ریختنی آلومینا بالا

سورن کشکولی^{۱*}، تورج عبادزاده^۲، مسعود علیزاده^۳، مهدی قاسمی کاکرودی^۳

^۱دانشجوی دکتری، پژوهشکده‌ی سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۲استاد، پژوهشکده‌ی سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۳استاد، دپارتمان علم و مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده با افزایش کاربرد دیرگدازهای بی‌شکل، به‌ویژه جرم‌های ریختنی، تحقیقات بسیاری بر بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و ترمومکانیکی این مواد متمرکز شده است. به‌منظور رفع محدودیت‌های سیمان آلومینات کلسیم ناشی از تشکیل فازهای کم‌ذوب، سیستم‌های پیوندی سل-ژل به‌عنوان رویکردی مؤثر در بهبود استحکام و خواص دمای بالا توسعه یافته‌اند. در این مطالعه، تأثیر جایگزین کردن بخشی از سیمان مورد استفاده در جرم با مقادیر مختلف سیلیکای کلئیدی بررسی شد. این جرم‌های ریختنی به روش‌های معمول فراوری و در دمای ۱۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس تف‌جوشی شدند تا خواص مکانیکی و ریزساختار آن‌ها بررسی شود. برای این منظور، استحکام فشاری سرد جرم‌های تهیه‌شده اندازه‌گیری شد که جرم حاوی ۷۵ درصد سیمان + ۲۵ درصد سیلیکای کلئیدی (به‌عنوان عامل اتصال) بیشترین استحکام فشاری ۷۸ MPa را نشان داد. آنالیزهای فازی با پراش پرتو ایکس (XRD) و بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM/EDS) نیز برای درک علل توسعه‌ی این خواص انجام شده است که نشان دادند در این نمونه تخلخل به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است که علت آن کاهش مصرف آب برای تولید جرم است. همچنین، آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) تشکیل شبکه‌ی گسترده‌ی سیلوکسان (Si-O-Si) در جرم را تأیید کرد. تشکیل فاز کلسیم آلومیناتی به همراه کاهش تخلخل ساختار از عواملی بودند که بر افزایش استحکام فشاری سرد نمونه تأثیر داشته‌اند. با این حال، در مقادیر بالاتر سیلیکای کلئیدی، کاهش سهم پیوندهای هیدرولیسی سیمان باعث افت استحکام نمونه شده است.

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰

پذیرش قطعی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

کلیدواژه‌ها:

جرم ریختنی آلومینا بالا،

جرم کم‌سیمان،

سیلیکای کلئیدی،

سل-ژل



<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.530795.1333>

URL: https://www.jamt.ir/article_231431.html

۱-مقدمه

کرد. نقش فاز چسب در جرم‌های ریختنی اتصال تمام ذرات دانه‌ای برای تشکیل ماتریس و فراهم کردن استحکام اولیه (سبز) برای قطعه‌ی ریخته‌گری شده است. در هنگام حرارت‌دهی، فاز چسب یا تبخیر می‌شود یا با ذرات دانه‌ای پیوند سرامیکی ایجاد می‌کند که این امر به توسعه‌ی استحکام از طریق پدیده‌ی زینترینگ (تف‌جوشی) منجر می‌شود (Banerjee, 1998b; Zhou, 2004).

رایج‌ترین چسب مورد استفاده برای جرم‌های نسوز سیمان‌های آلومینات کلسیم (CAC) هستند، زیرا خواص

نسوزها می‌توانند دماهای بالا، فشار و واکنش‌های شیمیایی را بدون تغییرات شیمیایی یا فیزیکی قابل‌توجهی تحمل کنند. این مواد عمدتاً در صنایع آهن، فولاد و پتروشیمی به کار می‌روند و نقش کلیدی در کیفیت محصول و هزینه‌های تولید دارند. جرم‌های ریختنی با مخلوط کردن دانه‌ها (ذرات نسوز درشت و ریز) و چسب‌ها در نسبت معینی ساخته می‌شوند.

این جرم‌ها را می‌توان براساس سیستم‌های اتصال مختلف مانند اتصال شیمیایی، اتصال انعقادی و اتصال سیمانی دسته‌بندی

عهده‌دار مکاتبات: سورن کشکولی

نشانی: ایران، کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده‌ی سرامیک

پیام‌نگار: souren.t.kashkooli@gmail.com

فاز استراتلینگیت بهبود خواص مکانیکی را در پی خواهد داشت. پیپو و همکاران (Piippo et al., 2024) نیز در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که افزودن ۱/۵ درصد CAC به همراه ۲ درصد سیلیکای کلئیدی به افزایش مقدار CCS منجر می‌شود و حذف آن تضعیف خواص جرم‌ها را به دنبال دارد.

زمانیک و نوریووا (Zemánek & Nevřivová, 2021a) گزارش کردند که کاهش ابعاد ذرات در کلئید باعث تسریع زمان ست شدن و در نتیجه ایجاد میکروتکرک در جرم می‌شود که استحکام فشاری سرد را کاهش می‌دهد. همچنین، وجود سیمان (نمونه‌های ULCC) باعث بهبود استحکام فشاری سرد در مقایسه با نمونه‌های بدون سیمان شده است.

میلانی و کاکرودی (Milani & Kakroudi, 2025) تأثیر سل‌های آلومینا و سیلیکا بر جرم آلومینا- اسپینل را بررسی و گزارش کردند که مقدار فاز جامد موجود در سل و تمایل آن به ژل شدن بر استحکام و چگالی جرم‌های حاصل تأثیر می‌گذارد. همچنین، مشاهده کردند که جرم‌های پیوندیافته با سل سیلیکا چگالی و استحکام فشاری سرد بیشتری از جرم‌های پیوندیافته با سل آلومینا ارائه دادند.

علیرضا و همکاران (Alireza et al., 2011) نیز نشان دادند که جایگزین کردن سیمان آلومینات کلسیم با سیلیکای کلئیدی می‌تواند استحکام گرم جرم‌ها را نیز بهبود بخشد که ناشی از بهبود سینترینگ جرم‌ها در حضور سیلیکای کلئیدی با مساحت سطح ویژه بالاتر است.

با توجه به مطالب بیان‌شده، هدف از این پژوهش مطالعه‌ی تأثیر جایگزین کردن مقادیر مختلف سیمان آلومینات کلسیم با سیلیکای کلئیدی و ایجاد سیستم‌های چسب هیبریدی برای ساخت جرم‌های ریختنی آلومینا بالا است. استحکام فشاری سرد و تحولات ریزساختاری این جرم‌ها نیز بررسی خواهد شد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

در این پژوهش، جرم‌های ریختنی دیرگداز با استفاده از مواد اولیه‌ی ارائه‌شده در جدول ۱ تهیه شدند. ترکیب شیمیایی هریک از مواد اولیه‌ی به‌کاررفته در این پژوهش توسط آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) به دست آمد که در جدول ۲ ارائه شده است.

رئولوژیکی خوب و توانایی ایجاد استحکام اولیه (خام) را دارند. مقدار Al_2O_3 موجود در CAC بین ۴۰ تا ۸۰ درصد متغیر است. هرچه درصد Al_2O_3 بیشتر باشد، عملکرد جرم نسوز در دماهای بالا بهتر خواهد بود.

با این حال، CAC در حضور ناخالصی‌هایی مانند سیلیس، فازی با نقطه‌ی ذوب پایین و بدون قابلیت هیدراته شدن به نام گلنیت (C_2AS) ایجاد می‌کند و، در حضور فریت‌ها، فازهایی با زمان گیرش کند یا بدون گیرش مانند C_4AF و C_2F تشکیل می‌دهد (Rangdal & Patil, 2023).

این مشکلات به توسعه‌ی جرم‌های نسوز کم‌سیمان (LCC) با محتوای CaO بین ۱ تا ۲/۵ درصد، جرم‌های فوق کم‌سیمان (ULCC) با محتوای CaO بین ۰/۲ تا ۱ درصد و جرم‌های بدون سیمان با محتوای CaO کمتر از ۰/۲ درصد شده است. جرم‌های نسوز بدون سیمان و کم‌سیمان (ULCC و NCC)، به دلیل داشتن مقدار کم CaO و در نتیجه خواص دمایی بالا، به‌طور فزاینده‌ای در صنایع با دمای بالا استفاده شده‌اند (Banerjee, 1998a).

این کار از طریق کاهش مقدار سیمان آلومینات کلسیم (CAC) به‌عنوان چسب اصلی در جرم‌های نسوز است (Dos, Anjos et al., 2008). چسب‌هایی مانند رزین‌ها، آلومینای هیدراته، سیلیکات سدیم، فسفات آلومینیم و غیره نیز به‌عنوان چسب در جرم‌های بدون سیمان استفاده می‌شوند (Ismael et al., 2007). اما همه‌ی این چسب‌ها مشکلات خاص خود را دارند مانند ترک خوردگی در حین پخت، تشکیل فازهای با نقطه‌ی ذوب پایین و آزادسازی گازهای سمی.

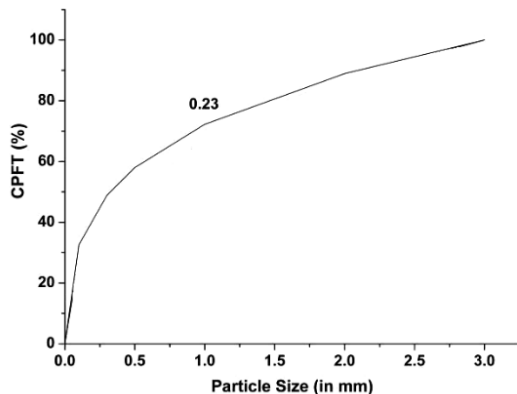
استفاده از مواد کلئیدی به‌عنوان چسب برای جرم‌های نسوز از دهه‌ی ۱۹۸۰ آغاز شد و به دلیل مزایای متعدد به‌طور گسترده پذیرفته شد. در تکنیک سل-ژل، ذرات به‌صورت زنجیره‌های شاخه‌دار به هم متصل می‌شوند که شبکه‌ای سه‌بعدی در اطراف ذرات دانه‌ای ایجاد می‌کند و آن‌ها را با تشکیل ژل به یکدیگر متصل نگه می‌دارد (Singh & Sarkar, 2016).

در حین پخت، آب از ژل تبخیر می‌شود و ایجاد پیوند سرامیکی بین ذرات را تسهیل می‌کند. اخیراً پژوهشگران متعددی به مطالعه‌ی جایگزینی سیمان کلسیم آلومیناتی با سل‌ها پرداختند. یعقوبی و همکاران (Yaghoubi et al., 2012) به این نتیجه رسیدند که حذف سیمان و جایگزینی آن با ۵ درصد سیلیکای کلئیدی به افزایش جریان‌پذیری جرم منجر می‌شود و تشکیل

فونک (Yaghoubi et al., 2012) (رابطه ی ۱) و در نظر گرفتن ضریب توزیع $q=0/23$ در این پژوهش (شکل ۱) انتخاب شد.

$$CPFT = [(d^q - d_m^q) / (D^q - d_m^q)] * 100 \quad (1)$$

که در این رابطه CPFT درصد تجمعی ذرات ریزتر از، d اندازه‌ی ذره، d_m حداقل اندازه‌ی ذره، D بیشترین اندازه‌ی ذره و q ضریب توزیع هستند.



شکل ۱. مقدار CPFT در مقابل اندازه‌ی ذره براساس مدل دینگر-فونک ($q=0.23$)

پنج نوع جرم ریختنی کم‌سیمان تهیه شد که، برای بررسی تأثیر عامل اتصال‌دهنده‌ی نانوسیلیکا، بخشی از سیمان در نمونه‌ها با نانوسیلیکا (سیلیکای کلئیدی) جایگزین شد. ترکیب نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. ترکیب عامل اتصال‌دهنده‌ی مورد استفاده در ساخت جرم‌ها

کد نمونه	ترکیب چسب مورد استفاده
C	۱۰۰٪ سیمان
75C25S	۷۵٪ سیمان - ۲۵٪ سل سیلیکا
50C50S	۵۰٪ سیمان - ۵۰٪ سل سیلیکا
25C75S	۲۵٪ سیمان - ۷۵٪ سل سیلیکا
S	۱۰۰٪ سل سیلیکا

سیلیکای کلئیدی مورد استفاده در این پژوهش، سوسپانسیون حاوی ۲۵ درصد وزنی ذرات SiO_2 (با توزیع ذرات ۳۵-۵ nm) در آب با $pH=7/5-9$ است که تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. ترکیب مواد مورد استفاده برای ساخت جرم‌های ریختنی (برحسب درصد وزنی ماده‌ی خشک)

ماده‌ی اولیه	مقدار (درصد وزنی)
آلومینای تبولار ۰-۰/۵ mm (خلوص ۹۸٪، شرکت آلمانیس)	۱۶
آلومینای تبولار ۰/۵-۱ mm (خلوص ۹۸٪، شرکت آلمانیس)	۹/۲
آلومینای تبولار ۱-۳ mm (خلوص ۹۸٪، شرکت آلمانیس)	۱۶
آلومینای تبولار ۳-۵ mm (خلوص ۹۸٪، شرکت آلمانیس)	۱۱
آلومینای ذوبی ۰/۵-۱ mm	۱۴/۲
آلومینای راکتیو (فاین) (خلوص ۹۸٪، شرکت آلمانیس)	۲۳/۵
آلومینای کلسینه ۳۵ میکرون (خلوص ۹۸٪، شرکت NFC چین)	۵
سیمان (۷۰٪ آلومینا) (secar 71 شرکت لافارج)	مجموعاً ۵
سیلیکای کلئیدی (شرکت فاین‌نانو)	
اسید سیتریک (افزودنی)	۰/۰۲
HMP (سدیم هگزامتافسفات)	۰/۱

جدول ۲. ترکیب شیمیایی مواد اولیه‌ی مورد استفاده در پژوهش

ماده	مقدار ترکیبات (درصد وزنی)					
	CaO	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Si ₂ O	Al ₂ O ₃
آلومینای تبولار	-	۰/۱۵	-	۰/۰۳۵	۰/۰۳	۹۹/۳۴
سیمان	۲۷/۳	-	-	۰/۶	۲/۴	۶۹/۷
آلومینای راکتیو	۰/۰۲	۰/۱	جزئی	۰/۰۳	۰/۰۳	۹۹/۵
آلومینای ذوبی	۰/۱	۰/۴	جزئی	۰/۰۶	۰/۱	۹۸/۹۳
آلومینای کلسینه	-	۰/۳۵	جزئی	۰/۰۲	۰/۰۲	۹۹/۵

ترکیب مواد خشک (اگرگیت و ذرات ریز) با توجه به توزیع اندازه‌ی ذرات ذکر شده در جدول ۱ و استفاده از مدل دینگر-

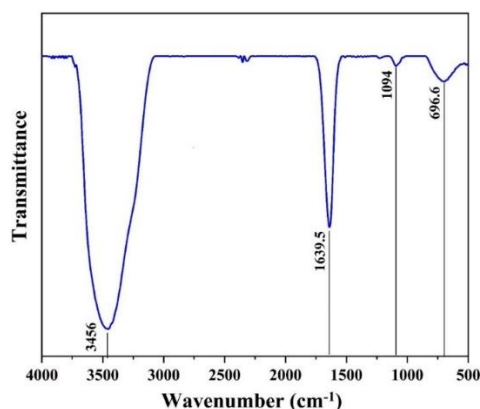
۲-۳- مشخصه‌یابی

برای شناسایی ماهیت پیوندهای موجود در سیلیکای کلوئیدی، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) از مایع سیلیکای کلوئیدی توسط طیف‌سنج (FTIR, Tensor 27, Bruker) تهیه شد. محدوده‌ی عدد موج مورد استفاده برای اندازه‌گیری طیف جذب از 4000 تا 500 cm^{-1} است. از این آنالیز همچنین برای شناسایی پیوندهای تشکیل‌شده و بررسی فرایند ژل شدن در نمونه‌های حاوی سیلیکای کلوئیدی با ترکیب بهینه استفاده شد. به‌منظور ارزیابی خواص مکانیکی جرم‌های تهیه‌شده، آزمون استحکام فشاری سرد (CCS, BR120, آزمون) نمونه‌های خشک و تف‌جوشی‌شده مطابق با استاندارد ASTM C 133 اندازه‌گیری شد. همچنین، به‌منظور شناسایی فازهای تشکیل‌شده و تعیین ریخت‌شناسی پس از تف‌جوشی، به‌ترتیب آنالیزهای پراش پرتو ایکس (XRD, Bruker Advance D8) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM, MIRA3 Tescan) از نمونه‌ها انجام شدند. همچنین، آنالیز عنصری نمونه‌ها با استفاده از طیف‌سنجی پخش انرژی پرتو ایکس (-EDS, SAMx, DXP, X10P) تعیین شد.

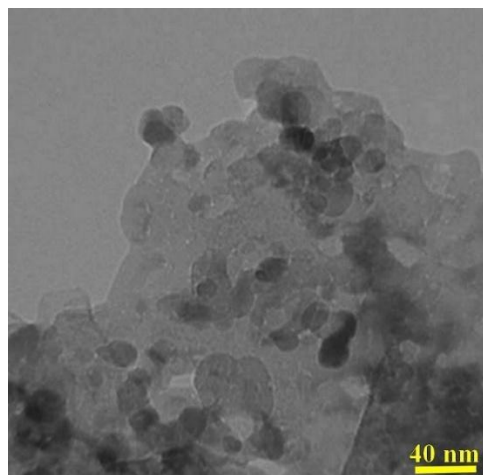
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصه‌یابی سیلیکای کلوئیدی

طیف FTIR سیلیکای کلوئیدی در شکل ۳ ارائه شده است. مطابق با این شکل، پیک‌های ایجادشده در 3456 و 3500 cm^{-1} و حدود 1650 cm^{-1} به‌ترتیب به کشش پیوند O-H و خمش گروه H-O-H مربوط هستند. پیک ایجادشده در 1094 cm^{-1} به کشش نامتقارن پیوند Si-O-Si و پیک واقع در حدود 700 cm^{-1} به کشش پیوند Si-OH مربوط است (Yaghoubi et al., 2012).



شکل ۳. طیف FTIR سیلیکای کلوئیدی



شکل ۲. تصویر TEM از سیلیکای کلوئیدی مورد استفاده در پژوهش

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

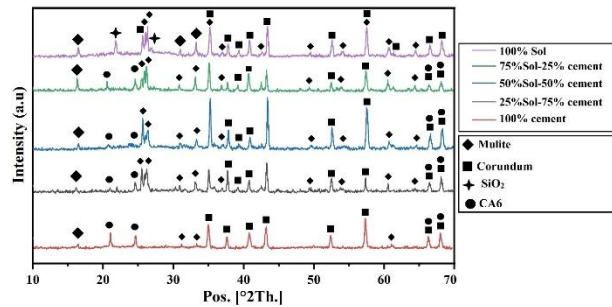
برای آماده‌سازی جرم‌های کم‌سیمان با پنج ترکیب متفاوت ابتدا تمامی مواد به‌صورت خشک در میکسر (CE 230, آزمون، ایران) مخلوط شدند. در ابتدا، اجزای درشت‌تر افزوده و مخلوط شدند و سپس اجزای ریزتر اضافه شدند. در نهایت، سل خریداری‌شده افزوده شد و کل محتویات به مدت ۵ تا ۶ دقیقه کاملاً با هم مخلوط شدند. در نمونه‌های حاوی سل، آب به مخلوط افزوده نشد. در نمونه‌ی حاوی سیمان خالص، حدود ۷ درصد وزنی آب و، در نمونه‌های هیبریدی بسته به روانی مخلوط، آب در حین اختلاط اضافه شد. روانی مخلوط‌ها با استفاده از آزمون اسلامپ و مطابق با استاندارد C1446-07 بررسی شد. پس از رسیدن به جریان مناسب، مخلوط کردن متوقف شد و مخلوط در قالب‌های آهنی روان‌کاری‌شده با ابعاد مکعبی $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ با استفاده از روش ضربه‌ای، قالب‌گیری شد.

نمونه‌های قالب‌گیری‌شده به مدت یک روز در داخل قالب خشک شدند. سپس، از قالب خارج و به مدت یک روز در هوای آزاد با رطوبت بالای ۹۰ درصد خشک شدند. پس‌از آن، نمونه‌ها در آون (صنعت سرام، ایران) در دمای 110 درجه‌ی سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. نمونه‌های خشک‌شده تحت دمای 1500 درجه‌ی سلسیوس با زمان ماندگاری ۲ ساعت در دمای بیشینه پخته شدند. فرایند سرمایش نمونه‌ها نیز در داخل کوره‌ی خاموش تا رسیدن به دمای اتاق انجام شد. تمام فرایندهای پخت در یک کوره‌ی الکتریکی (صنعت سرام، ایران) انجام شد.

۲-۳- مشخصه‌یابی جرم‌های ریختنی

۱-۲-۳- شناسایی فازی

با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری استحکام فشاری نمونه‌ها، آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برای شناسایی فازی برخی از نمونه‌ها استفاده شد که نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است.



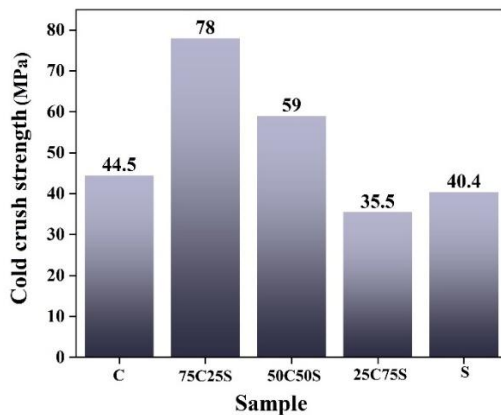
شکل ۴. الگوی پراش پرتو ایکس جرم‌های تف‌جوشی شده در دمای ۱۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس با ترکیبات مختلف

همان‌طور که مشخص است، در تمامی نمونه‌ها، فاز آلومینا (کوراندوم) مطابق با کارت مرجع ۰۰۱۸-۱۰۰-۹۶ و مولایت مطابق با کارت مرجع ۰۱۶۰-۹۰۱-۹۶ شناسایی شده است. با افزایش درصد سیلیکای کلوئیدی در نمونه‌های تف‌جوشی شده، پیک پراش مربوط به فاز مولایت تشدید شده است که نشان می‌دهد افزایش کسر حجمی مولایت با افزایش مقدار سیلیکای کلوئیدی در نمونه‌ها همراه است. علاوه‌براین، با افزایش مقدار سیلیکای کلوئیدی در جرم‌ها، مطابق با کارت مرجع ۰۹۳۳-۰۱-۰۷۶، SiO_2 آزاد در نمونه‌ها شناسایی شد که از عیوب استفاده از سل سیلیکا در جرم ریختنی به شمار می‌رود. در نمونه‌ی حاوی پیونددهنده‌ی سیمان خالص، شدت پیک مربوط به مولایت تشکیل‌شده بسیار جزئی است که علت آن مقادیر ناچیز سیلیکا در مواد اولیه و تشکیل مقادیر جزئی مولایت است. در مقابل، در نمونه‌های حاوی سیلیکای کلوئیدی، با افزایش مقدار سیلیکا، کسر مولایت تشکیل شده و سیلیس آزاد در نمونه‌ها افزایش یافته است. علاوه‌براین، فاز کلسیم آلومینات (CA) طبق کارت مرجع شماره‌ی ۰۹۹۷-۰۱۸-۹۸ در طیف XRD نمونه‌های حاوی سیمان قابل‌شناسایی است که از واکنش بین ذرات جامد موجود در عامل چسب و ذرات ریز زمینه در دماهای بالاتر از ۱۳۵۰ درجه‌ی سلسیوس به وجود می‌آید. تشکیل این فاز می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی کمک کند (Zhu et al., 2011). شدت پیک این فاز در نمونه‌ی حاوی

سیمان خالص (C) بیشتر بود و در نمونه‌ی حاوی سل خالص (S) شناسایی نشد که علت آن فقدان Ca در مواد سازنده‌ی این نمونه است.

۲-۲-۳- اندازه‌گیری استحکام فشاری سرد (CCS)

شکل ۵ تغییرات مقادیر استحکام فشاری سرد (CCS) در جرم‌های ریختنی آلومینایی مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۵. مقادیر استحکام فشاری سرد جرم‌های آلومینا بالای حاوی مقادیر مختلف عامل اتصال‌دهنده‌ی هیبریدی تهیه‌شده

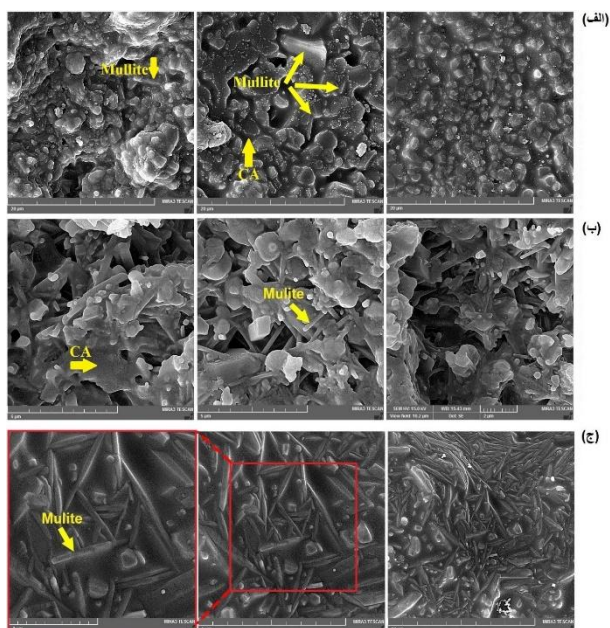
نکته‌ی قابل‌توجه این است که جرم پیوندیافته با سیلیکای کلوئیدی از جرم پیوندیافته با سیمان استحکام فشاری کمتری دارد. علت این امر این است که استحکام در پیوندهای سل-ژل به تمایل به لخته شدن ذرات کلوئیدی و تعداد ذرات فاز جامد در سل بستگی دارد، درحالی‌که نوع پیوند تشکیل شده در نمونه‌ی حاوی سیمان از نوع هیدرولیکی است و ذرات جامد بیشتری دارد (Milani & Kakroudi, 2025; Zemánek & Nevřivová, 2021b). به همین دلیل، استحکام نمونه‌های S و 25C75S کمتر است. علاوه‌براین، با تشکیل فاز کلسیم آلومینات در نمونه‌ی حاوی سیمان خالص، انبساط حجمی حدود ۳ درصد رخ می‌دهد که استحکام نمونه را با ایجاد ترک کاهش می‌دهد (Milani & Kakroudi, 2025). لذا به نظر می‌رسد که نمونه‌های حاوی عامل چسب هیبریدی استحکام بالاتری داشته باشند.

در نمونه‌هایی که پیوند هیبریدی دارند، وقوع واکنش‌های هیدراته شدن برای تشکیل فازهای هیدراته کلسیم آلومینات تشدید می‌شود و این امر باعث افزایش استحکام خام جرم می‌شود (Rangdal & Patil, 2023). علاوه‌براین، در نمونه‌های حاوی سیمان، آب بیشتری برای تهیه‌ی نمونه‌ها لازم است که با افزایش خلل‌و‌فرج پس از تف‌جوشی در آن همراه است. با

پیک‌های ایجاد شده در محدوده $500-700 \text{ cm}^{-1}$ به ارتعاش کششی پیوند Al-O ناشی از وجود آلومینا در نمونه‌ها مربوط است. همچنین، پیک‌های ظاهر شده در حدود $900-1100 \text{ cm}^{-1}$ به کشش نامتقارن پیوندهای موجود در فاز CA و فاز مولایت مربوط است (Yaghoubi et al., 2012).

۳-۲-۴- بررسی ریزساختار و ترکیب عنصری

برای مطالعه ریزساختار نمونه‌های تف‌جوشی شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FESEM) استفاده شد که نتایج آن در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷. تصاویر FESEM از سطح نمونه‌ی تف‌جوشی شده در دمای

۱۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس با سه ترکیب مختلف: الف) C، ب)

75C25S، ج) S

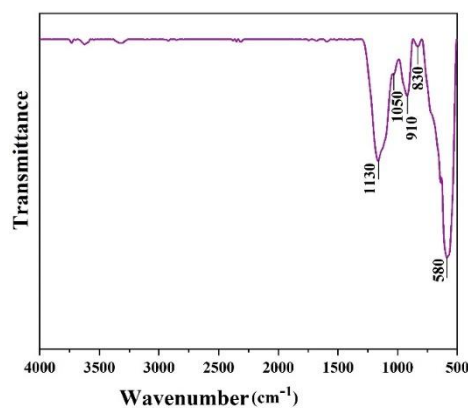
مطابق با شکل ۷-ب، نمونه‌ی 75C25S در دمای ۱۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس به‌خوبی تف‌جوشی شده است و هیچ اثری از ترک یا تخلخل در آن مشاهده نمی‌شود. تمامی دانه‌های آلومینا به‌خوبی به همدیگر متصل شده و زمینه‌ی نمونه را تشکیل داده‌اند که علت این بهبود اتصال، ژل شدن و تشکیل شبکه‌های سیلوکسانی و ایجاد فاز CA در نمونه است که با استفاده از آنالیزهای FTIR (شکل ۶) و XRD (شکل ۴) اثبات شد. به نظر می‌رسد که تشکیل این فاز توانسته است تمامی ترک‌ها و تخلخل‌ها را پر کند که امری مطلوب در بهبود خواص جرم خواهد بود. علاوه بر آن، سوزن‌های مولایت نیز به‌وضوح در تصاویر SEM قابل رؤیت هستند. با توجه به شکل ۷ و مقایسه‌ی نمونه‌ی حاوی عامل اتصال‌دهنده‌ی سیمان (شکل ۷-الف) و

جایگزین کردن بخشی از سیمان نمونه‌ها با سیلیکای کلئیدی آب کمتری برای تهیه‌ی نمونه‌ها لازم می‌شود و لذا تخلخل‌ها نیز کاهش می‌یابند (Alireza et al., 2011; ShafieRad et al., 2013). در نتیجه، فاصله‌ی بین ذرات کمتر خواهد بود و تشکیل پیوندهای سیلوکسان (Si-O-Si) افزایش خواهد یافت. در نمونه‌های هیبریدی، انحلال یون‌های Ca^{2+} و Al^{3+} از سیمان می‌تواند، با کاهش دافعه‌ی بین نانوذرات سیلیکای کلئیدی، ژل شدن را تقویت کند (Madej et al., 2025). ژل شدن، که با به دام انداختن اگرگیت‌های آلومینا در شبکه‌ی سه‌بعدی سیلوکسانی همراه است، باعث می‌شود که استحکام نمونه بهبود یابد. در بین نمونه‌های هیبریدی، جرم حاوی ۲۵ درصد سیلیکای کلئیدی بالاترین استحکام فشاری سرد را نشان داد. این امر نشان می‌دهد که دو عامل ایجاد اتصالات هیدرولیکی قوی ناشی از سیمان (تشکیل فاز CA) و کاهش تخلخل و بهبود تف‌جوشی ناشی از واکنش ذرات ریز موجود در سیلیکای کلئیدی با ذرات ریز آلومینا هم‌زمان رخ می‌دهند که در این میان تأثیر برقراری اتصالات هیدرولیکی غالب است.

۳-۲-۳- آنالیز پیوندهای تشکیل شده در جرم حاوی عامل

اتصال هیبریدی

شکل ۶ طیف FTIR جرم 75C25S تف‌جوشی شده در دمای ۱۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس را نشان می‌دهد. همان‌طور که در طیف FTIR نشان داده شده است، پیک‌های واقع در $1100-1200 \text{ cm}^{-1}$ به ارتعاش کششی نامتقارن و پیک واقع در حدود 830 cm^{-1} به کشش متقارن پیوند Si-O-Si در جرم تهیه‌شده مربوط است که فرایند ژل شدن و تشکیل شبکه‌های سه‌بعدی سیلوکسان را تأیید می‌کند (Yaghoubi et al., 2012).



شکل ۶. طیف FTIR جرم 75C25S تف‌جوشی شده در ۱۵۰۰

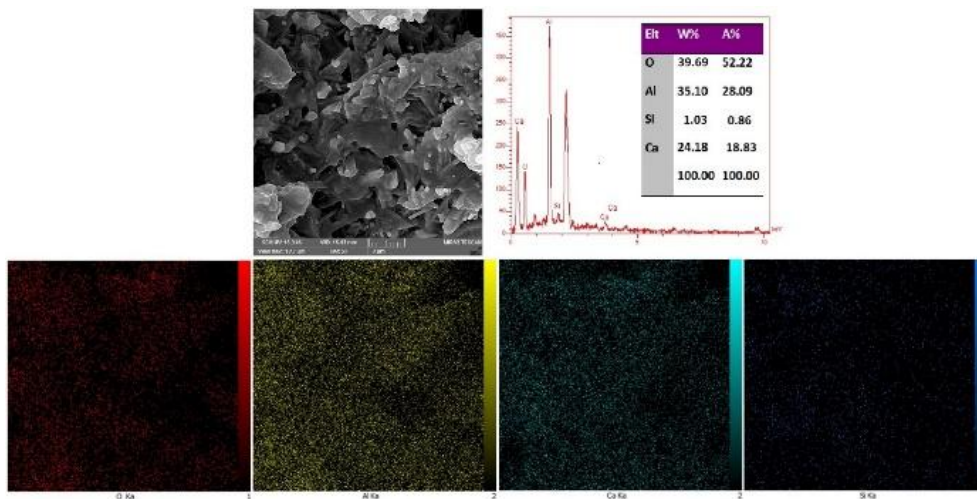
درجه‌ی سلسیوس

به هم پیوسته رشد کرده‌اند. در دمای ۱۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس و در حضور سل سیلیکا، مولایت‌سازی با مصرف اگرگیت آلومینا انجام شده است که در تصویر SEM و نقشه‌ی توزیع عنصری دیده می‌شود. با توجه به ترکیب شیمیایی ارائه‌شده در شکل ۸، تشکیل فاز مولایت تأیید شد.

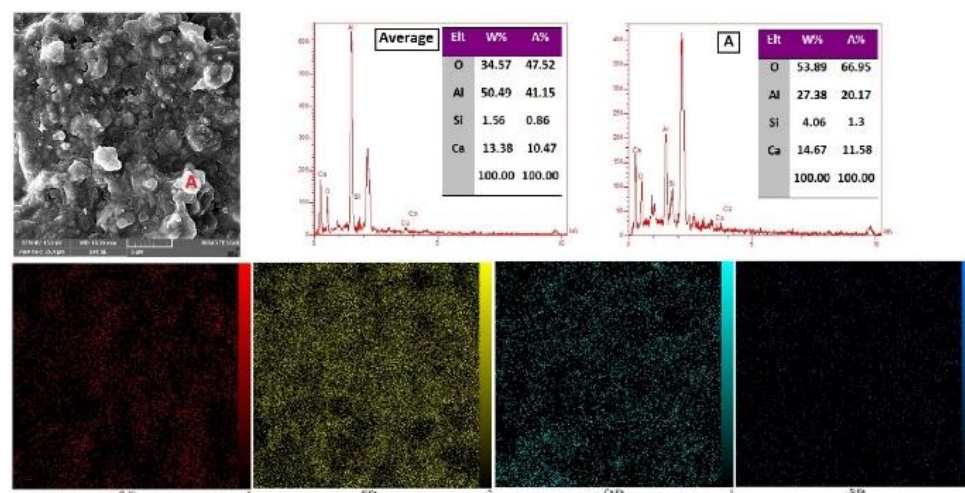
با توجه به نتایج آنالیز EDS ارائه‌شده در شکل ۹، برای نمونه‌ی حاوی عامل اتصال‌دهنده‌ی سیمان خالص، تشکیل فاز CA در این نمونه با انجام آنالیز عنصری در نقطه‌ی A تأیید شد که در تطابق با نتایج قبلی است.

در نمونه‌ی حاوی عامل اتصال‌دهنده‌ی سیلیکای کلئیدی خالص، همان‌طور که در شکل ۷-ج نشان داده شد، تشکیل مولایت به شدت ترغیب شده است. برای حصول اطمینان از تشکیل فاز مولایت، آنالیز عنصری از نقطه‌ی B تصویر SEM در شکل ۱۰ انجام شد که حاکی از تشکیل فاز مولایت در این نمونه است.

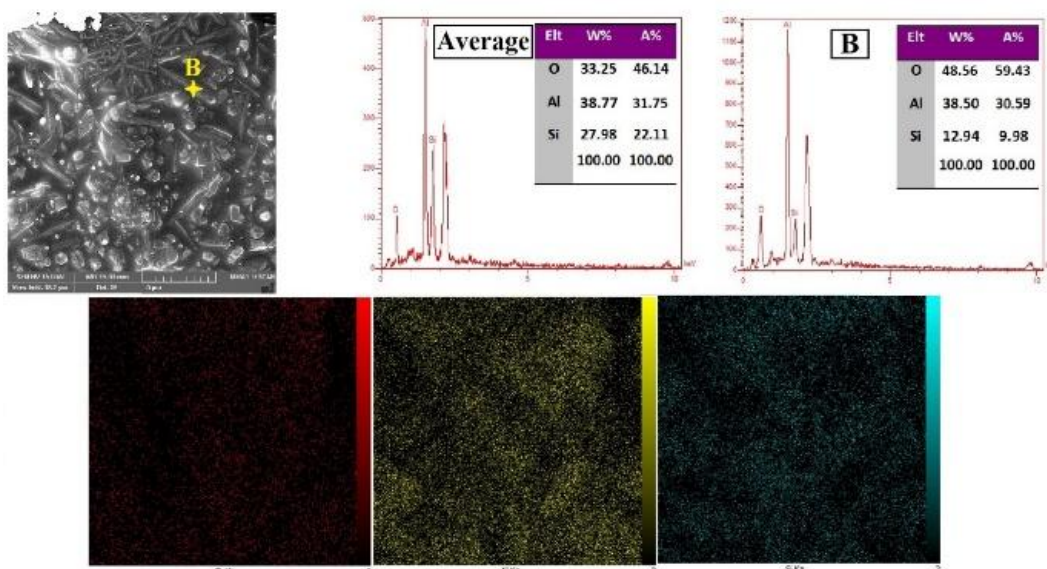
نمونه‌ی حاوی اتصال‌دهنده‌ی سیلیکای کلئیدی (شکل ۷-ج) مشخص می‌شود که استفاده از سیلیکای کلئیدی باعث تشدید تشکیل مولایت در ساختار و ایجاد جرمی بدون تخلخل و ترک شده است و، همان‌طور که پیش‌تر شرح داده شد، به کاهش مصرف آب برای ساخت نمونه و لذا کاهش درصد تخلخل مربوط می‌شود. تصاویر SEM نتایج طیف XRD مبنی بر تشکیل مقادیر بسیار جزئی مولایت در نمونه‌ی حاوی سیمان خالص را تأیید می‌کند (شکل ۷-الف). علاوه بر این، وجود مقدار مناسبی از ذرات سیلیکا، که توسط سل تأمین شده است، باعث تشکیل مولایت بیشتر در نمونه‌ی حاوی سیلیکای کلئیدی شده است. برای آنالیز ترکیب عنصری و نقشه‌ی توزیع عناصر از طیف‌سنجی پخش انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد که نتایج آن در شکل‌های ۸-۱۰ ارائه شده است. در برخی نواحی، دانه‌های درشت‌تری مشاهده می‌شوند که از جنس زمینه‌ی آلومینا هستند، اما تفجوشی کامل اتفاق افتاده است و دانه‌های آلومینای



شکل ۸. نتایج آنالیز عنصری و نقشه‌ی توزیع عناصر در سطح نمونه‌ی C75S25 تفجوشی شده در دمای ۱۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس



شکل ۹. نتایج آنالیز عنصری و نقشه‌ی توزیع عناصر در سطح نمونه‌ی C تفجوشی شده در دمای ۱۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس



شکل ۱۰. نتایج آنالیز عنصری و نقشه‌ی توزیع عناصر در سطح نمونه‌ی S تف‌جوشی شده در دمای ۱۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر جایگزین کردن سیمان کلسیم آلومیناتی با سیلیکای کلونیدی بر ریزساختار و خواص مکانیکی جرم‌های آلومینا بالا بررسی شد. با توجه به مطالعات انجام‌شده، نتایج زیر به دست آمد:

- جایگزین کردن بخشی از سیمان مورد استفاده در ساخت جرم‌ها با سیلیکای کلونیدی باعث تف‌جوشی بهتر ناشی از سطح ویژه‌ی بالاتر نانوذرات سیلیکا، تشدید مولایت‌سازی و ایجاد اتصالاتی از طریق تشکیل شبکه‌های سه‌بعدی سیلوکسان در نمونه می‌شود.

- با توجه به لزوم افزودن آب بیشتر به نمونه‌های حاوی سیمان و تبخیر آب بر اثر تف‌جوشی در دمای بالا، افزودن سیلیکای کلونیدی، با کاهش این اثر، تخلخل در نمونه‌ها را کاهش داده و در برخی موارد حذف کرده است.

- تف‌جوشی در دمای ۱۵۰۰ درجه‌ی سلسیوس باعث تشکیل فازهای CA در نمونه‌های حاوی سیمان شده است که این فاز تمامی ترک‌ها و تخلخل‌ها را پر کرده است و خواص مکانیکی را ارتقا می‌دهد.

- بیشترین استحکام فشاری در نمونه‌ی 75C25S به دست آمد. مطابق با بررسی‌های انجام‌شده توسط آنالیزهای XRD، FTIR و FESEM مشاهده شد که نبود تخلخل و ترک در این نمونه، تشکیل شبکه‌های سه‌بعدی سیلوکسان وسیع و تشکیل فاز CA عامل این رفتار بوده است.

- با توجه به اینکه تشکیل اتصالات هیدرولیک ناشی از سیمان قوی‌تر از اتصالات سل-ژل ناشی از سیلیکای کلونیدی است، با جایگزین کردن بیش از ۲۵ درصد عامل اتصال‌دهنده با سیلیکای کلونیدی، اثر منفی اتصالات هیدرولیک غالب می‌شود و به افت استحکام فشاری سرد جرم می‌انجامد.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های مالی و تجهیزاتی پژوهشکده‌ی سرامیک پژوهشگاه مواد و انرژی در انجام این پژوهش قدردانی می‌کنند.

مراجع

1. Alireza, S., Fatemeh, K. N., & Hossein, S. (2011). *Improving thermo-mechanical properties of tabular alumina castables via using nano structured colloidal silica* (Doctoral dissertation, Sumy State University). <https://www.researchgate.net/publication/302996166>
2. Banerjee, S. (1998a). *Monolithic refractories: a comprehensive handbook*. John Wiley & Sons. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=BLgMEQAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq2>
3. Banerjee, S. (1998b). Recent developments in monolithic refractories. *American Ceramic Society Bulletin*, 77(10), 59-63. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=2408440>
4. Dos Anjos, R., Ismael, M., De Oliveira, I., & Pandolfelli, V. (2008). Workability and setting parameters evaluation of colloidal silica bonded refractory suspensions. *Ceramics International*, 34(1), 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.09.004>
5. Ismael, M., Salomão, R., & Pandolfelli, V. (2007). Refractory castables based on colloidal silica and hydratable alumina. *American Ceramic Society Bulletin*, 86(9), 58. <https://www.researchgate.net/publication/285899882>

6. Madej, D., Boris, R., Stonys, R., Antonovič, V., & Kruk, A. (2025). Effects of silica sol on hydration properties, impedance response, microstructure and strength of calcium aluminate cement. *Ceramics International*, 51(20), 31176-31191. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.04.305>
7. Milani, S. S., & Kakroudi, M. G. (2025). Effect of different binders on microstructural evolution and strength of sol-gel bonded Al₂O₃-spinel castables. *Synthesis and Sintering*, 5(1), 73-81. <https://doi.org/10.53063/synsint.2025.51264>
8. Piippo, A., Ruotanen, K., Visuri, V. V., Poutiainen, N., & Heikkinen, E. P. (2024). Experimental Study on the Effect of Calcium Aluminate Cement Addition on the Drying and Physical Properties of Refractory Castables Containing Colloidal Silica. *Materials*, 17(21), 5308. <https://doi.org/10.3390/ma17215308>
9. Rangdal, P., & Patil, S. B. (2023). Synthesis of Alumina Sol Binder for Pure Alumina Refractory Castable and its Comparison with Other Commercially Available Binders. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 104(2), 805-809. <https://doi.org/10.1007/s40033-022-00420-3>
10. ShafieiRad, S., Monshi, A., & SafarTelori, A. (2013). Synthesis and Investigation of Composite of Magnesium OxyChloride and Tri hydrate Magnesium Hydrogen Phosphate with Nano Silica. *Advanced Materials and Technologies*, 2(1), 81-89. [In Persian] <https://doi.org/10.30501/jamt.2634.70186>
11. Singh, A. K., & Sarkar, R. (2016). Nano mullite bonded refractory castable composition for high temperature applications. *Ceramics International*, 42(11), 12937-12945. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.066>
12. Yaghoubi, H., Sarpoolaky, H., Golestanifard, F., & Souri, A. (2012). Influence of nano silica on properties and microstructure of high alumina ultra-low cement refractory castables. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 9(2), 50-58. <http://ijmse.iust.ac.ir/article-1-440-en.html>
13. Zemánek, D., & Nevřivová, L. (2021a). Influence of Colloidal Silica on Final Properties of no Cement Castables. *Solid State Phenomena*, 321, 125-130. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.321.125>
14. Zemánek, D., & Nevřivová, L. (2021b). Use of the sol-gel method for the production of no cement castables. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2322, No. 1, p. 020004). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0041627>
15. Zhou, N. (2004). Advances in modern refractory castables. *China's Refractories*, 13(2), 3-12. <http://www.cnref.cn/EN/abstract/abstract2672.shtml>
16. Zhu, Z., Jiang, T., Li, G., Guo, Y., & Yang, Y. (2011). Thermodynamics of reactions among Al₂O₃, CaO, SiO₂ and Fe₂O₃ during roasting processes. In *Thermodynamics-Interaction Studies-Solids, Liquids and Gases*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/21545>