



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2026.2073631.2020



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Recycling Waste Molecular Sieves as Sustainable Additives in Concrete: A Technical-Environmental Assessment

Sasan Mothaghd^{1*}, Ensie Bekhradinassab², Mohammad Hossein Shabaneh³, Abdollah Golami Mehr⁴

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

² Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

³ Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

⁴ Persian Gulf Bidboland Gas Refining Company, Behbahan, Iran

Received: 2 Feb 2026 Accepted: 10 Jul 2026

Abstract

The management of industrial waste poses a significant environmental challenge in the modern era. This study explores the potential of recycling waste molecular sieves as a sustainable additive in concrete production. Using a comprehensive range of advanced analytical techniques, including XRF, XRD, FESEM, TEM, EDAX, BET-BJH, FTIR, TGA, and TPD, the physicochemical properties of this industrial waste were thoroughly characterized. The results revealed that gray and white waste molecular sieves primarily consist of aluminosilicate compounds and are free from hazardous environmental elements. Grinding up to 30,000 rpm significantly increased the amorphous phase, enhancing pozzolanic reactivity. The high specific surface area (140.9 m²/g) and suitable porous structure indicate the high potential of this material for use in concrete. TPD analyses confirmed the presence of strong basic sites, ensuring compatibility with the alkaline environment of cement. These findings represent a significant step toward sustainable industrial waste management and the production of green construction materials.

Keyword: Waste Molecular Sieve, Industrial Recycling, Sustainable Concrete, Environmental Assessment, Pozzolan.

* sasanmotaghd1@yahoo.com

Please Cite This Article Using:

Mothaghd, S., Bekhradinassab, E., Shabaneh, M.H., Golami Mehr, A., "Recycling Waste Molecular Sieves as Sustainable Additives in Concrete: A Technical-Environmental Assessment", Journal of Farayandno – Vol. 21 – No. 94, pp. 5-22, In Persian, (2026).



DOI: 10.22034/farayandno.2026.2073631.2020



This journal is an open access journal licensed under an
Attribution-Non Commercial 4.0
International Licenses (CC BY-NC 4.0).

بازیافت مولکولارسیوهای پسماند به عنوان افزودنی پایدار در بتن: ارزیابی جامع فنی-محیط زیستی

ساسان معتقد^{1*}، انسیه بخردی نسب²، محمدحسین شبانه³، عبدالله غلامی مهر⁴

¹ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

² استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران

³ دانشجوی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران

⁴ کارمند، شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج فارس، بهبهان، ایران

دریافت: 1404/11/13 پذیرش: 1405/04/19

چکیده

مدیریت پسماندهای صنعتی یکی از چالش‌های مهم محیط‌زیستی عصر حاضر است. این مطالعه به بررسی پتانسیل بازیافت مولکولارسیوهای پسماند به عنوان ماده افزودنی در تولید بتن پایدار می‌پردازد. با استفاده از طیف گسترده‌ای از تکنیک‌های تحلیلی پیشرفته شامل XRF، XRD، FESEM، TEM، EDAX، BET-BJH، FTIR، TGA و TPD، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی این پسماند صنعتی به طور کامل شناسایی شد. نتایج نشان داد که مولکولارسیوهای خاکستری و سفید پسماند عمدتاً از ترکیبات آلومینوسیلیکاتی تشکیل شده و عاری از عناصر خطرناک محیط‌زیستی هستند. آسیاب کردن تا دور 30000 میزان فاز آمورف را به طور قابل توجهی افزایش داده و واکنش‌پذیری پوزولانی را بهبود می‌بخشد. سطح ویژه بالا ($140/9 \text{ m}^2/\text{g}$) و ساختار متخلخل مناسب، پتانسیل بالایی را برای کاربرد در بتن نشان می‌دهد. آنالیزهای TPD تأیید کرد که این ماده دارای سایت‌های بازی قوی است که با محیط قلیایی سیمان سازگاری دارد. این یافته‌ها گامی مهم در جهت مدیریت پایدار پسماندهای صنعتی و تولید مصالح ساختمانی سبز محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی: مولکولارسیو پسماند، بازیافت صنعتی، بتن پایدار، ارزیابی محیط‌زیستی، پوزولان.

* sasanmotaghedi1@yahoo.com

1- مقدمه

1-1- کلیات و اهمیت موضوع

استفاده از مواد پسماند صنعتی در ساخت مصالح ساختمانی به عنوان یک راه حل پایدار و اقتصادی، توجه بسیاری از محققان و مهندسان را در دهه های اخیر جلب کرده است. یکی از این مواد، مولکولارسیوهای مستعمل هستند که به دلیل ساختار خاص خود در جذب و جداسازی مولکول ها، کاربردهای متعددی در صنعت دارند. با این حال، پس از پایان عمر مفید این مواد، مدیریت صحیح آن ها و بازچرخانی به عنوان ماده ای مفید در دیگر صنایع از جمله صنعت ساخت و ساز، به یک چالش زیست محیطی و اقتصادی تبدیل شده است [1, 2]. بر خلاف مولکولارسیوهای بکر با ساختار کریستالی منظم، مولکولارسیوهای پسماند در اثر استفاده صنعتی دچار کاهش بلورینگی و حضور ناخالصی های کربنی می شوند، اما همچنان دارای سطح ویژه بالا و سایت های بازی فعال هستند [2]. لازم به ذکر است که مولکولارسیو پسماند مورد استفاده در این پژوهش از نوع 3A می باشد که در فرآیندهای نم زدایی گاز طبیعی در پالایشگاه به کار رفته است. اندازه حفرات این نوع مولکولارسیو حدود 3 آنگستروم (کمتر از 1 نانومتر) گزارش شده که آن را در دسته میکرو حفرات قرار می دهد.

1-2- پیشینه و ضرورت پژوهش

مطالعات اخیر نشان داده اند که مولکولارسیوهای پسماند می توانند به عنوان پودر افزودنی یا سنگدانه در بتن به کار گرفته شوند، و از این رو بررسی دقیق ویژگی های فیزیکوشیمیایی این مواد برای ارزیابی قابلیت استفاده آن ها در ساخت بتن های پایدار و مقاوم ضروری است. به ویژه، تعیین ساختار شیمیایی و فیزیکی این مواد، که در فرآیندهای مختلف صنعتی مورد استفاده قرار گرفته اند، می تواند به روشن شدن مکانیزم های مختلف واکنشی آن ها در ترکیب با مواد سیمانی کمک کند [3].

در مطالعات داخلی، احمدی و همکاران نشان دادند که جایگزینی 15% سیمان با زئولیت باعث افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری یون کلر می شود [4]. قیاسوند و همکاران گزارش کردند که استفاده همزمان از سنگدانه بازیافتی و زئولیت منجر به بهبود عملکرد بتن می گردد [5]. صرافی و همکاران نیز مشاهده نمودند که جایگزینی 15% سیمان با زئولیت، نفوذپذیری کلر را 29/4% کاهش می دهد [6].

1-3- اهداف و نوآوری های تحقیق

این پژوهش با هدف ارائه راهکاری پایدار برای مدیریت پسماندهای مولکولارسیو و همزمان بهبود ویژگی های بتن انجام شده است. نوآوری های این مطالعه شامل ارائه ارزیابی فنی-محیط زیستی پسماند مولکولارسیو با استفاده از 9 تکنیک تحلیلی پیشرفته (XRD, XRF, FESEM, TEM, EDAX, BET-BJH, FTIR, TGA و TPD)، بررسی سیستماتیک ویژگی های فیزیکوشیمیایی و تأثیر آسیاب مکانیکی بر فاز آمورف و واکنش پذیری پوزولانی و در نهایت تعیین پتانسیل کامل بازیافت این پسماند در صنعت ساخت و ساز به همراه ارزیابی مقدماتی عملکرد بتن حاوی این ماده می باشد.

4-1- روش‌شناسی تحقیق

آنالیز XRD با استفاده از دستگاه EQUINOX3000 (ساخت شرکت Inel، فرانسه) با تابش پرتو $\text{Cu-K}\alpha$ در محدوده 5-90 درجه انجام شد. برای بررسی مورفولوژی سطحی از میکروسکوپ FESEM مدل TESCAN BRNO Mira 3-XMU استفاده گردید. آنالیز EDAX با استفاده از آشکارساز BSE مدل VEGA II (ساخت TESCAN) انجام شد. تصاویر TEM با دستگاه Philips مدل EM208S (هلند) تهیه گردید. آنالیز BET-BJH با استفاده از گاز نیتروژن و دستگاه ChemBET 3000 برای تعیین سطح ویژه و توزیع اندازه منافذ انجام شد. آنالیزهای TPD-NH₃ و TPD-CO₂ به ترتیب برای تعیین تعداد و قدرت سایت‌های اسیدی و بازی با استفاده از دستگاه Micrometrics 2910 صورت پذیرفت. آنالیز FTIR با دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز (تبدیل فوریه) انجام شد و آنالیز TGA برای بررسی پایداری حرارتی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

5-1- پیامدهای زیست‌محیطی

نتایج این تحقیق دارای پیامدهای مهم زیست‌محیطی زیر است:

- کاهش حجم پسماند صنعتی با استفاده از مولکول‌های پسماند در بتن
- حفظ منابع طبیعی از طریق جایگزینی بخشی از سیمان
- ایمنی زیست‌محیطی با توجه به عاری بودن این ماده از عناصر خطرناک مانند کلر و گوگرد

2- روش شناسی

بخش روش‌شناسی (Methodology) شامل روش‌ها و فرآیندهایی است که برای تحلیل و شناسایی ویژگی‌ها و ترکیبات مولکول‌های پسماند استفاده شده است. در این بخش، تکنیک‌ها و تجهیزات مورد استفاده به صورت مختصر توضیح داده می‌شوند. آسیاب در دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای انجام شد و تعداد دور کل 30000 دور به عنوان معیار خروجی دستگاه ثبت گردید. از تمام گلوله‌های داخل دستگاه در شرایط استاندارد استفاده شد. مطالعه بهینه‌سازی پارامترهای آسیاب (قطر گلوله‌ها، نسبت گلوله به پودر، زمان و سرعت) در دستور کار پژوهش‌های آتی قرار دارد.

1-2 آنالیز XRF

آنالیز XRF (فلورسانس پرتو ایکس) برای شناسایی و تعیین غلظت عناصر معدنی و فلزی در نمونه‌ها استفاده شد. در این فرآیند، پرتوی ایکس به نمونه تابیده شده و پس از برانگیختگی اتم‌ها، پرتو ایکس ثانویه تولید می‌شود که با اندازه‌گیری آن، عناصر موجود در نمونه شناسایی می‌شوند. این آنالیز برای بررسی ترکیب شیمیایی مولکول‌های سفید و خاکستری پسماند به کار گرفته شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، آن‌ها در کوره‌ای با دمای 1100 °C حرارت داده و درصد کاهش وزن (LOI) تعیین گردید.

2-2 آنالیز XRD

پراش پرتو ایکس (XRD) برای تعیین ساختار بلوری و فازی مولکول‌های پسماند به کار رفت. در این تکنیک، پرتوهای ایکس به نمونه تابیده و الگوهای پراش تولید می‌شود که برای شناسایی ساختارهای اتمی و بلوری مواد استفاده می‌شود. نمونه‌ها آسیاب و پودر شده و آنالیز XRD برای شناسایی ترکیبات کریستالی و آمورف انجام شد.

3-2- آنالیز FESEM

میکروسکوپ الکترونی روبشی با انتشار میدانی (FESEM) برای بررسی مورفولوژی سطحی و ساختار نانوذرات مولکولارسیوها به کار رفت. این تکنیک تصاویر با وضوح بالا از سطح نمونه‌ها تهیه کرده و اطلاعاتی دقیق در مورد اندازه و شکل ذرات فراهم کرد.

4-2- آنالیز EDAX

آنالیز EDAX (طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس) که در دستگاه FESEM برای شناسایی ترکیب عناصر استفاده شد، درصد وزنی و اتمی عناصر موجود در مولکولارسیوها را اندازه‌گیری کرد. این آنالیز اطلاعات دقیقی در مورد ترکیبات شیمیایی مواد و عناصری چون آلومینیوم و سیلیسیوم ارائه داد.

5-2- آنالیز TEM

میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) برای بررسی ساختار داخلی نانوذرات مولکولارسیوها به کار رفت. این دستگاه تصاویر دقیق از ساختارهای اتمی و نانوذرات با وضوح بسیار بالا ارائه داد و به بررسی میزان کریستالی و آمورف بودن ذرات کمک کرد.

6-2- آنالیز BET-BJH

برای بررسی ویژگی‌های سطحی و ساختار منافذ مولکولارسیوها از آنالیز BET-BJH استفاده شد. این روش‌ها به تعیین مساحت سطح مخصوص و توزیع اندازه منافذ مولکولارسیوها کمک کردند. نتایج نشان‌دهنده حضور منافذ میکرو، مزو و ماکرو در ساختار مولکولارسیو بود. پیش از آنالیز، نمونه‌ها به مدت 2 ساعت در دمای 100 درجه سانتی‌گراد گاززدایی (degas) شدند.

7-2- آنالیز FTIR

طیف‌سنجی مادون قرمز با تبدیل فوریه (FTIR) برای شناسایی گروه‌های عملکردی و پیوندهای شیمیایی موجود در مولکولارسیوها استفاده شد. این روش قادر به شناسایی پیوندهای مختلف مانند C-H، C=O و O-H در ساختارهای آلی و معدنی مولکولارسیوها بود.

8-2- آنالیز TGA

آنالیز وزنی حرارتی (TGA) برای بررسی پایداری حرارتی و میزان کاهش وزن مولکولارسیوها تحت دماهای مختلف انجام شد. این آنالیز به شناسایی ترکیبات فرار و تخریب‌های حرارتی در مواد کمک کرد.

9-2- آنالیز TPD-NH₃ و TPD-CO₂

آنالیز TPD-NH₃ برای شناسایی سایت‌های اسیدی و آنالیز TPD-CO₂ برای شناسایی سایت‌های بازی در سطح مولکولارسیوها استفاده شد. این آنالیزها به شناسایی ویژگی‌های سطحی و فعالیت‌های شیمیایی مولکولارسیوها در واکنش‌های شیمیایی کمک کردند.

این روش‌ها به صورت مکمل در کنار یکدیگر، به شناسایی و تحلیل دقیق ویژگی‌های مولکولارسیوها پسماند و فرآیندهای مرتبط با آن‌ها پرداختند. کلیه مقالات کامل توسط داوران کنفرانس مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. پیش از

آنالیز، نمونه‌ها به مدت 2 ساعت در دمای 550 درجه سانتی‌گراد تحت جریان هلیوم فعال‌سازی شدند.

3- نتایج

3-1- آنالیز XRF

آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) برای شناسایی عناصر موجود در مولکولارسیو پسماند استفاده شد. نتایج این آنالیز در جدول 1 ارائه شده است. مولکولارسیو خاکستری عمدتاً شامل آلومینیوم و سیلیسیم بود و میزان L.O.I آن حدود 15/92% گزارش شد که نشان‌دهنده حضور ترکیبات کربنی احتمالی است. مولکولارسیو سفید عمدتاً شامل Al_2O_3 با L.O.I حدود 16/7% بود. مخلوط این دو نمونه ترکیب مشابه نمونه خاکستری داشت. مجموع درصد‌های گزارش شده به دلیل عدم اندازه‌گیری عناصر سبک (اکسیژن، کربن، هیدروژن) در آنالیز XRF به 100% نمی‌رسد. حدود 5% باقیمانده مربوط به اکسیژن پیوندی و ترکیبات کربنی است که در آنالیز TGA و LOI تأیید شده است.

جدول 1- نمونه یک جدول

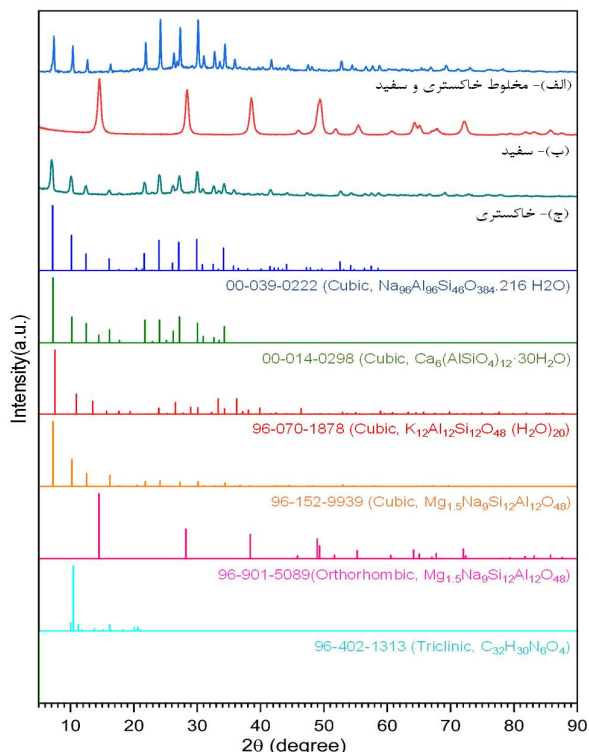
عناصر موجود	مخلوط خاکستری و سفید	خاکستری	سفید
L.O.I	15.64	15.92	16.7
Na ₂ O	6.047	5.872	0.253
MgO	2.545	2.45	0.136
Al ₂ O ₃	24.67	24.27	81.822
SiO ₂	38.39	39.134	0.571
P ₂ O ₅	0.06	0.077	0.041
SO ₃	0.2	0.189	0.072
Cl	0.101	0.041	0.025
K ₂ O	10.57	10.197	0.276
CaO	0.588	0.595	0.073
TiO ₂	0.153	0.145	-
Fe ₂ O ₃	1.036	0.016	0.018
Ni	-	0.005	0.005
Zn	-	0.004	0.004
Rb	-	0.003	-
Sr	-	0.004	-
Zr	-	0.004	-
Ga	-	-	0.001

3-2- آنالیز XRD

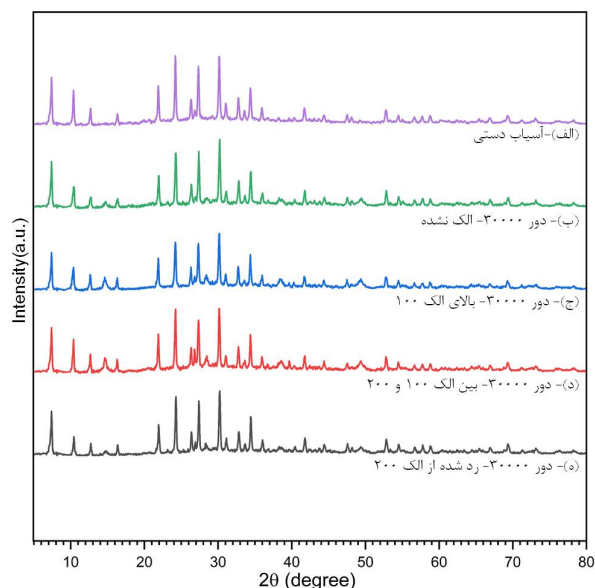
آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برای بررسی ساختار بلوری مولکولارسیو انجام شد (شکل 1 و 2). مولکولارسیو سفید عمدتاً AlO_2 با یک ساختار هیدروکربنی ($C_{32}H_{30}N_6O_4$) بود، در حالی که مولکولارسیو خاکستری شامل ترکیبات آلومینوسیلیکاتی مانند سدیم، کلسیم و پتاسیم آلومینوسیلیکات هیدرات بود [7]. تمامی فازهای مذکور در مخلوط نیز مشاهده شدند.

پس از آسیاب گلوله‌ای تا دور 30000 و تفکیک با الک‌های مختلف، درصد کریستالی و آمورف نمونه‌ها با نرم‌افزار OriginPro محاسبه شد (جدول 2). نتایج نشان داد که بیشترین سهم آمورف مربوط به نمونه آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100 بود. آسیاب کردن تا دور 30000 rpm منجر به افزایش جزئی فاز آمورف (از 3% به حدود 5/17-4/5% بسته به دانه‌بندی) گردید که این افزایش از نظر شیمیایی می‌تواند در واکنش‌پذیری پوزولانی مؤثر باشد، هرچند از نظر عددی محدود است. افزایش دور آسیاب تا 56000 تغییر قابل توجهی در میزان ماده آمورف

ایجاد نکرد، بنابراین دور 30000 برای استفاده اقتصادی و عملیاتی مناسب است.



شکل 1- آنالیز XRD نمونه‌های (الف) مخلوط مولکولارسیو مستعمل سفید و خاکستری، (ب) مولکولارسیو مستعمل سفید و (ج) مولکولارسیو مستعمل خاکستری



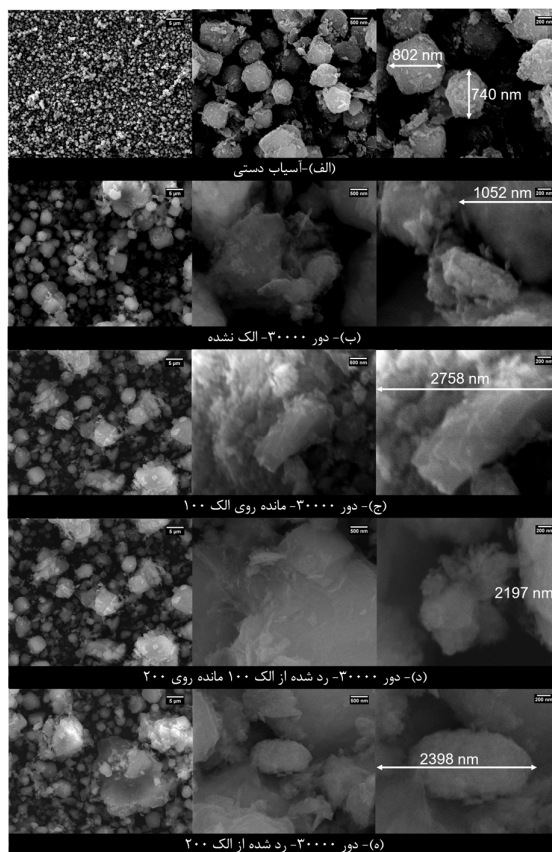
شکل 2- آنالیز XRD نمونه‌های (الف) آسیاب شده به روش دستی، (ب) آسیاب شده تا دور 30000 و الک نشده، (ج) آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100، (د) آسیاب شده تا دور 30000 و رد شده از الک 100 و مانده روی الک 200 و (ه) آسیاب شده با دور 3000 و رد شده از الک 2000

جدول 2- سهم کریستال و آمورف در مخلوط مولکولارسیو خاکستری و سفید مستعمل آسیاب شده تا دور 30000 و الک شده

دور آسیاب	نوع الک	درصد کریستالی	درصد آمورف
به روش دستی	الک نشده	97	3
30000	الک نشده	95/5	4/5
30000	بالای الک 100	94/83	5/17
30000	بین الک 100 و 200	95/55	4/55
30000	رد شده از الک 200	96	4

3-3- آنالیز FESEM

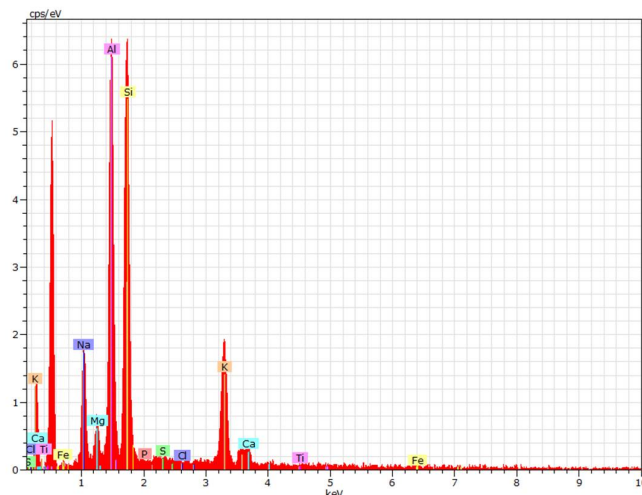
تصاویر FESEM نشان دادند که آسیاب تا دور 30000 باعث افزایش میزان کلوخگی ذرات شده است، که نشانه تبدیل بخشی از ساختار کریستالی به آمورف است (شکل 3). بیشترین کلوخگی در نمونه مانده روی الک 100 مشاهده شد که با نتایج XRD همخوانی دارد. بیشترین میزان کلوخگی در تصاویر FESEM مربوط به نمونه مانده روی الک 100 مشاهده شد. این نمونه در آنالیز XRD شدت پیک‌های کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان داد که بیانگر کاهش بلورینگی و افزایش نسبی فاز آمورف در این نمونه است. از آنجا که تشکیل فاز آمورف معمولاً با کلوخگی ذرات همراه است، بین این دو پدیده همبستگی وجود دارد.



شکل 3- آنالیز FESEM در بزرگنمایی‌های 5 میکرو، پانصد و دویست نانومتر برای نمونه‌های (الف) آسیاب شده به روش دستی، (ب) آسیاب شده تا دور 30000 و الک نشده، (ج) آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100، (د) آسیاب شده تا دور 30000 و رد شده از الک 100 و مانده روی الک 200 و (ه) آسیاب شده با دور 3000 و رد شده از الک 200

3-4- آنالیز EDAX

تحلیل EDAX نمونه‌ها (شکل 4 و جدول 3) تأیید کرد که مولکولارسیو عمدتاً از آلومینیوم و سیلیسیم تشکیل شده و عاری از کلر و گوگرد است. این نتایج با داده‌های XRF مطابقت داشت.



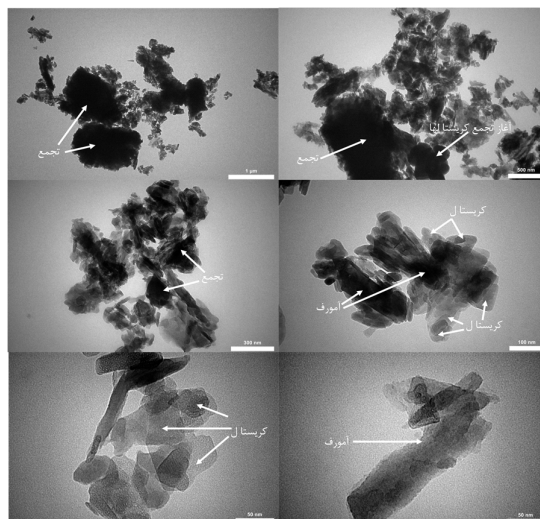
شکل 4- آنالیز EDAX مولکولارسیو آسیاب شده به روش دستی

جدول 3- آنالیز EDAX نمونه‌های مولکولارسیو آسیاب شده به روش دستی

عنصر	درصد وزنی (%)	درصد اتمی (%)
Na	10/38	12/91
Mg	2/59	3/05
Al	31/98	33/88
Si	35/25	35/87
P	0/25	0/23
S	0,00	0,00
Cl	0,00	0,00
K	16/28	11/90
Ca	2/23	1/59
Ti	0/31	0/19
Fe	0/72	0/37

3-5- آنالیز TEM

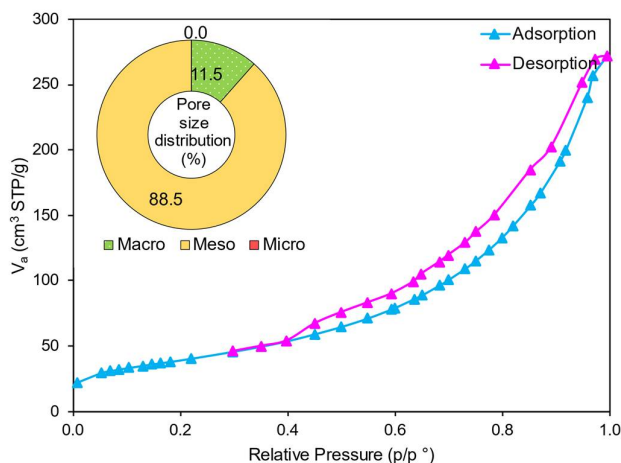
تصاویر TEM از نمونه آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100 نشان داد که ذرات هم شامل بخش کریستالی و هم بخش آمورف هستند و بخش آمورف به صورت تجمع ذرات دیده می‌شود (شکل 5). این ساختار می‌تواند واکنش‌پذیری ماده در تولید بتن را افزایش دهد.



شکل 5- آنالیز TEM نمونه‌های مولکولارسیو مخلوط خاکستری و سفید مستعمل و آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100

6-3- آنالیز BET-BJH

آنالیز BET-BJH نشان داد که نمونه آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100 دارای سطح ویژه بالا (140.9 m^2/g) و ترکیبی از مزو و ماکرو حفرات است (شکل 6). حدود 88/5% از حجم حفرات در محدوده مزو قرار داشت، که برای واکنش‌های شیمیایی در حوزه بتن مطلوب است.

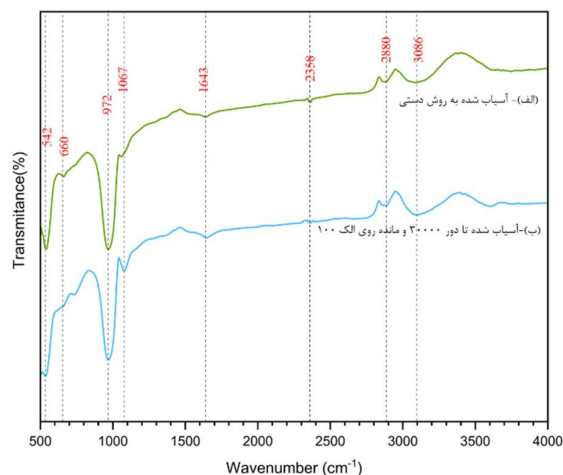


شکل 6- آنالیز BET-BJH نمونه‌های مولکولارسیو مخلوط خاکستری و سفید مستعمل و آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100

7-3- آنالیز FTIR

نتایج آنالیز FTIR نشان می‌دهد که آسیاب کردن تغییری در پیوندها و گروه‌های عاملی بوجود نیاورده است (شکل 7). پیک در 400 تا 1200 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی و خمشی پیوندهای (T=Si, Al) در ساختار آلومینوسیلیکاتی می‌باشند. پیک در 2363 cm^{-1} مربوط به جذب CO_2 اتمسفری است و بعنوان نویز در نظر گرفته می‌شود. پیک در 3000 و 3600 cm^{-1} نشان‌دهنده پیوند O-H کششی ناشی از آب جذب شده سطحی و گروه‌های

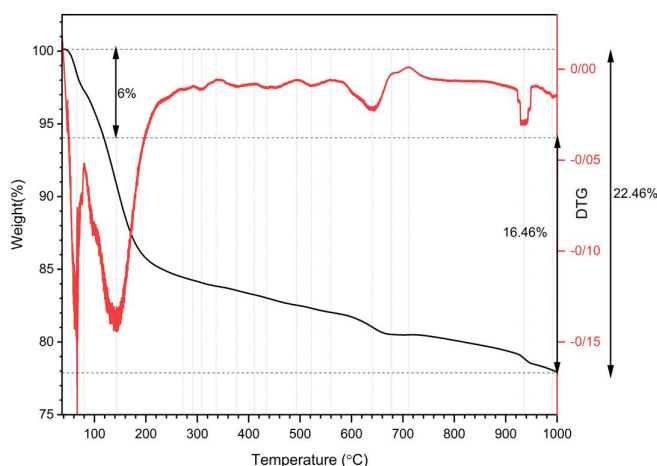
هیدروکسیل هستند، می‌باشد. نتایج آنالیز FTIR نشان دهنده حضور ترکیبات کربنی در مخلوط مولکولارسیو سفید و خاکستری است. حضور ترکیبات کربنی در ماده توسط آنالیزهای LOI و TGA تأیید شده است.



شکل 7- آنالیز FTIR نمونه‌های مولکولارسیو مخلوط خاکستری و سفید مستعمل (الف) آسیاب شده به روش دستی و (ب) آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100

8-3- آنالیز TGA

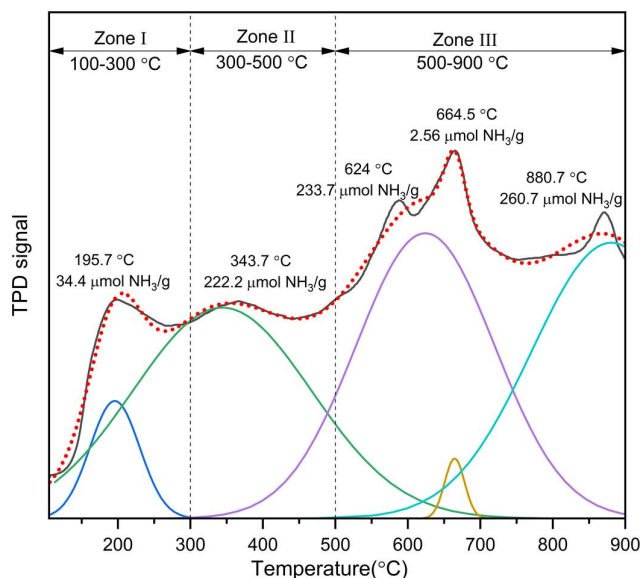
طبق شکل 8 نمونه مولکولارسیو آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100 در اثر حرارت دیدن تا دمای °C 1000، میزان کاهش وزن تا 22/46% را نشان داده است. طبق مراجع [8]، کاهش وزن هر ماده‌ای تا دمای °C 150 مربوط به مولکول‌های آبی است که با پیوند ضعیفی به سطح چسبیده‌اند. در این ماده حدود 6% کاهش وزن بخاطر رطوبت جذب شده از هوا می‌باشد. از دمای °C 140 تا °C 1000 کاهش وزن این ماده به میزان 16/46% بوده است. این میزان کاهش وزن تقریباً برابر با مقدار L.O.I. گزارش شده توسط آنالیز XRF است. می‌توان نتیجه گرفت که ماده مولکولارسیو که فرمول کلی آن بصورت $Mx/m [(AlO_2)_x \cdot (SiO_2)_y] \cdot zH_2O$ و AlO_2 است تا دمای °C 1000 ماده پایدار بوده، زیرا ترکیباتی که ضمن دریافت حرارت از بین رفته‌اند یا ناخالصی‌ها موجود در این ماده بوده و یا هیدروکربن‌های جذب شده ضمن فرایند نمگیری در برج بوده است.



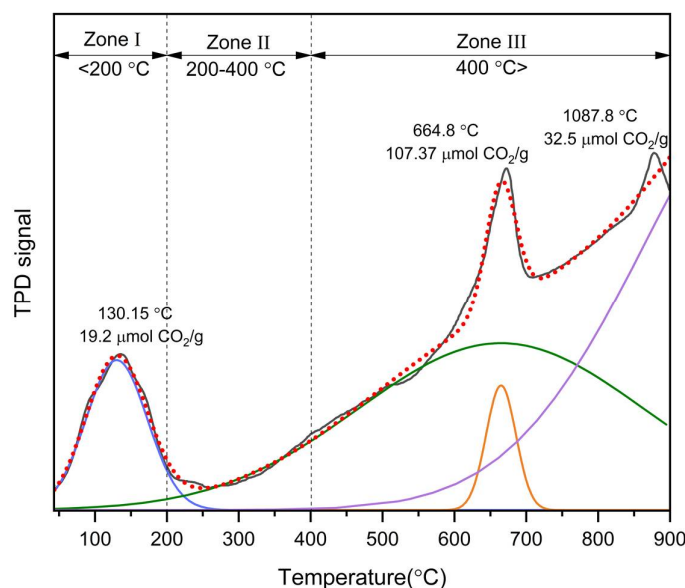
شکل 8- نمودار TGA و DTG نمونه مولکولارسیو آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100

3-9- آنالیز تعیین تعداد سایت‌های اسیدی (TPD-NH₃) و تعیین تعداد سایت‌های بازی (TPD-CO₂)

مقدار آمونیاک آزاد شده در دماهای مختلف نشان‌دهنده تعداد و قدرت سایت‌های اسیدی است. نواحی مختلف در نمودار TPD نشان‌دهنده نوع و قدرت سایت‌های اسیدی هستند؛ آمونیاک آزاد شده در دمای 300-100 درجه سانتی‌گراد نشادهنده سایت‌های اسیدی ضعیف، دمای 500-300 درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده سایت‌های اسیدی متوسط و آزاد شده در دمای بالای 500 درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده سایت‌های اسیدی قوی می‌باشد [9]. TPD-CO₂ تکنیکی مشابه TPD-NH₃ است که برای تعیین تعداد و قدرت سایت‌های بازی روی سطح مواد بکار می‌رود. در این روش از دی‌اکسید کربن (CO₂) بعنوان پروب بازی استفاده می‌شود. در این آنالیز، نمونه در دمای مشخصی تحت جریان گاز دی‌اکسید کربن قرار می‌گیرد. CO₂ به سایت‌های بازی جذب می‌شود. سپس، نمونه به تدریج گرم می‌شود و دی‌اکسید کربن جذب شده از سطح نمونه آزاد می‌شود. نواحی مختلف در نمودار TPD-CO₂ نشان‌دهنده نوع و قدرت سایت‌های بازی هستند؛ سایت‌های قوی‌تر معمولاً در دماهای بالاتر آزاد می‌شوند. سایت‌های آزاد شده در دمای کمتر از 200 درجه سانتی‌گراد سایت‌های بازی ضعیف، سایت‌های آزاد شده در دمای 400-200 درجه سانتی‌گراد سایت‌های بازی متوسط و سایت‌های بازی آزاد شده در دماهای بالاتر از 400 درجه سانتی‌گراد سایت‌های بازی قوی می‌باشند [10]. از نمونه مولکولارسیو مخلوط خاکستری و سفید مستعمل و آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100، آنالیزهای TPD-NH₃ و TPD-CO₂ گرفته شد که نتایج آن به ترتیب در شکل 9 و شکل 10 آمده است. طبق نمودار ارائه شده در شکل 9 مخلوط مولکولارسیو دارای سایت‌های اسیدی ضعیف، متوسط و قوی می‌باشد. سایت‌های اسیدی ضعیف در دمای 195/7 °C ظاهر شده‌اند که تعداد آن‌ها 34/4 μmol NH₃/g می‌باشد. سایت‌های اسیدی متوسط در دمای 343/7 °C پدیدار شده‌اند که تعداد آن‌ها 222/2 μmol NH₃/g می‌باشد. در منطقه مربوط به سایت‌های اسیدی قوی به ترتیب سه پیک در دماهای 624، 664/5 و 880/7 °C ظاهر شده است که تعداد آن‌ها به ترتیب 233/7، 2/56 و 260/7 μmol NH₃/g می‌باشد. در شکل 10، آنالیز TPD-CO₂ ارائه شده است. نتایج این آنالیز نشان می‌دهد که مخلوط مولکولارسیو دارای سایت‌های بازی در مناطق ضعیف، متوسط و قوی است. این ماده دارای سایت‌های بازی ضعیف در دمای 130.15 °C به میزان 19/2 μmol CO₂/g می‌باشد. همچنین ماده دارای سایت‌های اسیدی قوی در دمای 664/8 °C به میزان 107/37 μmol CO₂/g و سایت‌های بازی فوق‌العاده قوی در دمای 1087/8 °C به میزان 32/5 μmol CO₂/g می‌باشد. قدرت سایت‌های بازی از سایت‌های اسیدی بیشتر است و مخلوط مولکولارسیو مستعمل احتمالاً مانند یک ماده بازی عمل خواهد کرد. لازم به ذکر است که پیک‌های مشاهده شده در دماهای بالاتر از 700 درجه سانتی‌گراد (به ویژه پیک 880/7 درجه سانتی‌گراد در TPD-NH₃ و پیک 1078/8 درجه سانتی‌گراد در TPD-CO₂) ممکن است حداقل تا حدودی ناشی از تخریب ساختار مولکولارسیو باشد، نه صرفاً دفع پروب از سایت‌های فعال. بنابراین، در محاسبه مجموع سایت‌های اسیدی و بازی، این پیک‌ها با احتیاط در نظر گرفته شده‌اند و مطالعات تکمیلی برای تفکیک دقیق این اثرات توصیه می‌گردد.



شکل 9- آنالیز TPD-NH₃ از نمونه مولکولارسیو مخلوط خاکستری و سفید مستعمل و آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100



شکل 10- آنالیز TPD-CO₂ از نمونه مولکولارسیو مخلوط خاکستری و سفید مستعمل و آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100

3-10- بررسی مقدماتی عملکرد بتن حاوی مولکولارسیو

به منظور ارزیابی اولیه قابلیت کاربرد مولکولارسیو پسماند در بتن، نمونه‌های بتنی حاوی این ماده در سه حالت مختلف (جایگزینی سنگدانه، پودر به جای ماسه و جایگزینی سیمان) ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج خلاصه شده در جدول 4 نشان می‌دهد که استفاده محدود از این ماده می‌تواند ضمن حفظ مقاومت قابل قبول، بهبودهایی در نفوذپذیری و دوام بتن ایجاد نماید.

جدول 4- نتایج عملکرد بتن حاوی مولکولارسیو پسماند

نوع کاربرد	شاخص	مقدار نمونه در شاهد	مقدار در نمونه بهینه	تغییر	محدوده مجاز
جایگزینی سنگدانه	مقاومت فشاری 28 روزه MPa - (C 390)	36/64	30	کاهش 0/7% به ازای هر 1%	15 تا 20 %
	نفوذ پذیری کلر C-(C390)	67	(در 25% 224/7 (در 100% 795/7)	افزایش 3/5 برابری در 100%	تا 25%
پودر به جای ماسه	مقاومت فشاری 28 روزه MPa-(C 390+50)	36/64	36	تأثیر خنثی	kg/m ³ تا 150
	عمق نفوذ آب (C390) - mm	28	(در 15(+50 (در 0 (+150)	46 تا 100% کاهش	25 تا 50 kg/m ³
	نفوذ پذیری کلر C-(C390)	67	(در 25% 269/6 (در 50% 128/2)	کاهش 52% در 50%	kg/m ³ تا 50
جایگزینی سیمان	مقاومت فشاری 28 روزه MPa - (C 390)	36/64	35	کاهش محسوس در بیش از 10%	تا 5%
	عمق نفوذ آب (C390) - mm	28	(در 20(5% (در 40 (5%)	افزایش 43% در 20%	تا 5%
	نفوذ پذیری کلر C-(C390)	67	(در 5% 93/9 (در 30% 887)	افزایش 13 برابری تا 30%	تا 5%

بر این اساس، مولکولارسیو پسماند می‌تواند به عنوان یک افزودنی بالقوه در بتن با رعایت درصدهای مجاز فوق مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات تکمیلی در حال انجام است.

۳-۱۱- آزمایش‌های محیط زیستی

3-۱۱-۱- آزمایش تعیین مقدار فلزات سنگین

بمنظور تعیین میزان فلزات سنگین آنالیز ICP-MS در مرکز نانو مواد صبا در حال انجام است. این آنالیز قادر به تشخیص میزان حضور 56 عنصر زیر می‌باشد:

Ag-Al-As-Ba-Be-Bi-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cs-Cu-Dy-Er-Eu-Fe-Gd-Hf-In-K-La-Li-Lu-Mg-Mn-Mo-Na-Nb-Nd-Ni-P-Pb-Pr-Rb-S-Sb-Sc-Se-Sm-Sn-Sr-Ta-Tb-Te-Th-Ti-Tl-Tm-U-V-W-Y

نتایج این آنالیز در فلزاتی که با رنگ مشخص نشده اند یعنی برای آن‌ها حدی در نظر گرفته نشده است. طبق نتایج این آنالیز مولکولارسیو ماده مضر برای ساخت مصالح خانگی و یا محیط زیست نمی‌باشد.

جدول 5، فلزاتی که با علامت سبز مشخص شده‌اند یعنی پایین‌تر از حد مجاز هستند، فلزاتی که با رنگ زرد مشخص شده‌اند یعنی برابر حد مجاز هستند و فلزاتی که بالاتر از حد مجاز هستند با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. با توجه با اینکه pH مولکولارسیو پسماند 11/41 بود، حد مجاز برای خاک‌های با pH>7 و برای حفاظت محیط زیست در نظر گرفته شد. فلزاتی که با رنگ مشخص نشده اند یعنی برای آن‌ها حدی در نظر گرفته نشده است. طبق نتایج این آنالیز مولکولارسیو ماده مضر برای ساخت مصالح خانگی و یا محیط زیست نمی‌باشد.

جدول 5- نتایج آنالیز ICP-MS برای مخلوط مولکولارسیو سفید و خاکستری آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100

Element	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Molecular Sieve	0.3	>10%	8.7	99	<0.2	0.1	13677	<0.1	2	1.6	23	1.4
مسکونی	10		40	800	5			2		50		
محیط زیست	20		17	500	5			3.9		20	100	
Element	Cu	Dy	Er	Eu	Fe	Gd	Hf	In	K	La	Li	Lu
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Molecular Sieve	8	0.6	0.4	<0.1	6985	0.73	1	<0.5	55720	3	13	<0.1
مسکونی	400											
محیط زیست	63											
Element	Mg	Mn	Mo	Na	Nb	Nd	Ni	P	Pb	Pr	Rb	S
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Molecular Sieve	8057	15	<0.5	41001	4	2.6	6	411	2	1.12	11	1455
مسکونی			40				155		80			
محیط زیست			4				50		300			
Element	Sb	Sc	Se	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Te	Th	Ti	Tl
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Molecular Sieve	<0.5	1.8	<0.5	<0.1	0.8	127.7	0.5	0.2	<0.5	1.4	339	0.3
مسکونی	10		6		-							5
محیط زیست	20		1		0							0.9
Element	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr	Hg			
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm			
Molecular Sieve	0.2	1	41	<1	3	<0.05	49	24	5			
مسکونی			200				500		5			
محیط زیست			120				200		0.1			

3-11-2- آزمایش تعیین سیانیدهای معدنی

غلظت سیاند 4/8 ppm است که مقدار آن از حد مجاز آن که 5 ppm می‌باشد کمتر است.

3-11-3- آزمایش هیدروکربن‌های نفتی TPHs

هیدروکربن‌های نفتی (TPH) به عنوان آلاینده‌های خطرناک برای منابع آبی و محیط زیست شناخته می‌شوند. این مواد می‌توانند به راحتی از طریق تخلیه فاضلاب، خطوط انتقال نفت و نفتکش‌ها به آب‌های طبیعی راه یابند. ترکیبات موجود در این گروه به دلیل خاصیت سمی و احتمال ایجاد سرطان، تهدیدی جدی به شمار می‌آیند. بنابراین، نظارت

و کنترل غلظت آن‌ها در آب‌ها ضروری است. این ترکیبات می‌توانند با مواد جامد ترکیب شده و برای سال‌ها در محیط آبی باقی بمانند. برای شناسایی و اندازه‌گیری این آلاینده‌ها، روش‌های مختلفی وجود دارد که از میان آن‌ها، کروماتوگرافی گازی با طیف‌سنجی جرمی (GC/MS) به عنوان یکی از دقیق‌ترین و کارآمدترین تکنیک‌ها شناخته می‌شود. برای مخلوط مولکولارسیو سفید و خاکستری آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی الک 100 این آنالیز انجام شد. که نتایج آن در جدول ارائه شده است.

طبق استانداردهای محیط زیست در صورتیکه مواد پرکننده دارای C6-C9 با غلظت کمتر از 325 ppm و C10-C36 کمتر از 1000 ppm باشد ایجاد خطر نمی‌کند که نتایج آنالیز هیدروکربن‌های نفتی نشان می‌دهد که غلظت C6-C9 حدود صفر و غلظت C10-C36 حدود 646/6 ppm است.

جدول 6- آنالیز تعیین ترکیبات TPH برای مخلوط مولکولارسیو سفید و خاکستری آسیاب شده تا دور 30000 و مانده روی

الک 100

Element	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C19-1	C18
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Molecular Sieve	0.0	0.0	0.0	0.0	15.2	51.6	28.9	14.1	38.6	13.7	16.2	28.6
Element	C20-1	C19-2	C20-2	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Molecular Sieve	26.1	13.8	9.2	18.6	19.7	0.0	48.9	55.0	73.2	44.8	22.2	0.0
Element	C30	C31	C32	C33	C34	C35	Total					
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm					
Molecular Sieve	33.6	0.0	0.0	35.0	39.6	0.0	646.6					

4- بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد که مولکولارسیو پسماند یک منبع ارزشمند و مؤثر برای استفاده به عنوان ماده افزودنی در مصالح ساختمانی است. تحلیل‌های فیزیکی و شیمیایی انجام‌شده، پتانسیل بالای این ماده را برای افزایش عملکرد بتن آشکار می‌کند.

نتایج آنالیز XRD نشان داد که آسیاب مکانیکی تا دور 30000 rpm منجر به افزایش فاز آمورف از 3% در نمونه آسیاب شده دستی به حدود 5/17% در نمونه مانده روی الک 100 گردید. اگرچه این افزایش از نظر عددی محدود به نظر می‌رسد، اما از نظر شیمیایی حائز اهمیت است، زیرا فاز آمورف در آلومینوسیلیکات‌ها واکنش‌پذیری پوزولانی بالاتری نسبت به فاز کریستالی دارد. تصاویر FESEM نیز کلوخگی بیشتر ذرات را در نمونه‌های آسیاب شده تأیید کردند که نشانه‌ای از تبدیل ساختار کریستالی به آمورف است.

سطح ویژه اندازه‌گیری شده برای نمونه آسیاب شده ($140/9 \text{ m}^2/\text{g}$) در مقایسه با پوزولان‌های متداول قابل توجه است. برای نمونه، متاکائولن معمولاً دارای سطح ویژه در محدوده $15\text{--}30 \text{ m}^2/\text{g}$ و خاکستر بادی در محدوده $5\text{--}20 \text{ m}^2/\text{g}$ است. سطح ویژه بالای مولکولارسیو پسماند نشان‌دهنده قابلیت بالای آن در جذب سطحی یون‌ها و واکنش با هیدروکسید کلسیم در محیط سیمانی است. همچنین وجود 88/5% مزوحفره در کنار میکروحفرات، دسترسی به

سایت‌های فعال را تسهیل کرده و می‌تواند به تشکیل ژل‌های C-S-H ثانویه کمک نماید. این ویژگی‌ها مولکولارسیو را به یک ماده پوزولانی بالقوه تبدیل می‌کند.

آنالیز FTIR نشان داد که آسیاب کردن تغییری در گروه‌های عاملی ایجاد نمی‌کند و ساختار شیمیایی ماده حفظ می‌شود. پیک‌های مشاهده شده در محدوده $1200-400\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات پیوندهای T-O (T=Si, Al) در ساختار آلومینوسیلیکاتی است.

آنالیز TPD-NH₃ وجود سایت‌های اسیدی ضعیف ($34/4\text{ }\mu\text{mol/g}$)، متوسط ($222/2\text{ }\mu\text{mol/g}$) و قوی ($233/7$)، $2/56$ ($260/7\text{ }\mu\text{mol/g}$) را نشان داد. از سوی دیگر، آنالیز TPD-CO₂ وجود سایت‌های بازی قوی را تأیید کرد (با پیک در دماهای $664/5$ و $1078/8$ درجه سانتی‌گراد). حضور سایت‌های بازی قوی برای سازگاری ماده با محیط قلیایی سیمان ($\text{pH} \approx 12-13$) ضروری است و می‌تواند به مشارکت مؤثر ماده در واکنش‌های هیدراسیون کمک کند. شایان ذکر است که پیک با دمای بسیار بالای $1078/8$ درجه سانتی‌گراد ممکن است بیشتر ناشی از تخریب ساختار ماده باشد تا دفع CO₂ از سایت‌های بازی. بطور کلی:

به لحاظ ساختار و ترکیب مولکولارسیوهای پسماند عمدتاً از ترکیبات آلومینوسیلیکاتی تشکیل شده‌اند که برای واکنش‌های پوزولانی در بتن ضروری هستند.

از نظر واکنش‌پذیری، آسیاب کردن این مواد باعث افزایش قابل توجه فاز آمورف می‌شود. این فاز، که از نظر شیمیایی فعال‌تر است، به بهبود خواص مکانیکی و مقاومت بتن کمک می‌کند.

از لحاظ ویژگی‌های سطحی و تخلخل، این ماده دارای سطح ویژه بالا و ترکیبی از منافذ مناسب برای فرآیند هیدراتاسیون است که باعث تعامل بهتر با سیمان می‌شود.

در ارتباط با ماهیت شیمیایی، وجود سایت‌های بازی قوی روی سطح مولکولارسیو، به آن امکان می‌دهد در محیط قلیایی سیمان به خوبی عمل کند.

در مجموع، استفاده از مولکولارسیو پسماند نه تنها یک راه‌حل پایدار و اقتصادی برای مدیریت ضایعات صنعتی است، بلکه به بهبود خواص فنی بتن نیز منجر می‌شود. این یافته‌ها مبنای محکمی برای کاربرد گسترده این ماده در صنعت ساخت‌وساز فراهم می‌کنند.

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین در زمینه استفاده از زئولیت‌ها و پسماندهای صنعتی در بتن قابل مقایسه است. Shi و همکاران [1] نشان دادند که استفاده از مولکولارسیوهای صنعتی در بتن‌های عمل‌آوری شده داخلی می‌تواند تأثیر مثبت بر خواص مکانیکی و جمع‌شدگی خشک داشته باشد. همچنین، در مطالعات داخلی، Ahmadi و همکاران (1393) گزارش کردند که جایگزینی 15% سیمان با زئولیت طبیعی منجر به افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری یون کلراید می‌شود [4]. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که اگرچه مولکولارسیو پسماند از نظر ترکیب شیمیایی مشابه زئولیت‌های طبیعی است، اما به دلیل سطح ویژه بالاتر $140/9\text{ m}^2/\text{g}$ در مقابل معمولاً کمتر از $50\text{ m}^2/\text{g}$ برای زئولیت‌های طبیعی، پتانسیل واکنش‌پذیری بالاتری دارد. با این حال، همانند سایر پوزولان‌ها، استفاده بهینه از آن نیازمند کنترل دقیق درصد جایگزینی و شرایط عمل‌آوری است.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، مطالعات آتی می‌توانند بر موارد زیر متمرکز شوند: (1) بهینه‌سازی فرآیند آسیاب

برای دستیابی به نسبت بهینه فاز آمورف و سطح ویژه، (2) بررسی عملکرد مولکولارسیو پسماند در بتن‌های خودتراکم و بتن‌های با مقاومت بالا، (3) ارزیابی اقتصادی استفاده از این ماده در مقیاس صنعتی، و (4) مطالعه همزمان اثرات زیست‌محیطی و چرخه حیات بتن‌های حاوی این ماده.

در پایان بیان این نکته لازم است که عدم انجام آزمایشات آبشویی پویا و سمیت یکی از محدودیت‌های این پژوهش است و لازم است در مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد.

5- قدردانی

نویسندگان این مقاله صمیمانه از شرکت پالایش گاز بید بلند خلیج فارس برای حمایت مالی و پشتیبانی فنی که به انجام این تحقیق ارزشمند کمک کرد، تشکر و قدردانی می‌کنند. کمک‌های این شرکت، در تحقق اهداف پژوهشی و پیشبرد این پروژه نقش بسزایی داشته است.

6- منابع

- [1] P. Shi, Z. Li, X. Chen, L. Zeng, R. Hu, Effect of industrial waste molecular sieves on internally cured cement-based materials, *Frontiers in Materials*, Volume 9, 2022.
- [2] L. Wang, P. Zhang, G. Golewski, J. Guan, Editorial: Fabrication and properties of concrete containing industrial waste, *Frontiers in Materials*, Volume 10, 2023.
- [3] R. Peralta Ring, C. Priano, V. Rahhal, Final Disposal of Molecular Sieves in Cement Mortars, in: N. Banthia, S. Soleimani-Dashtaki, S. Mindess (Eds.) *Smart & Sustainable Infrastructure: Building a Greener Tomorrow*, Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 137-151, 2024.
- [4] ج. احمدی، ح. عزیزی، م. کوهی، بررسی تاثیر ژئولیت در عیارهای مختلف سیمان بر روی مقاومت و نفوذ پذیری بتن، (1394).
- [5] ا. قیاسوند، پ. اغلاییان، ا. رجبی، ی. جلیلیان، بررسی برخی خصوصیات مکانیکی بتن‌های بازیافتی حاوی زیولیت، هشتمین کنفرانس ملی بتن ایران، 1395.
- [6] س. جمالی، ح. طاهرخانی، ح. بیات، بررسی تاثیر استفاده از ژئولیت بر خواص بتن غلتکی روسازی، نخستین همایش ملی بتن‌های سبز، 1404.
- [7] S. Da-Ming, An analysis of the structure of the 13X molecular sieve in ion exchange, *Vacuum*, 44, pp: 75-78, 1993.
- [8] E. Gabruś, J. Nastaj, P. Tabero, T. Aleksandrak, Experimental studies on 3A and 4A zeolite molecular sieves regeneration in TSA process: Aliphatic alcohols dewatering–water desorption, *Chemical Engineering Journal*, 259, pp: 232-242, 2015.
- [9] E. Bekhradinassab, A. Tavakoli, M. Haghighi, M. Shabani, 2-hydroxyethylammoniumsulfate ionic liquid performance as simultaneous fuel and sulfating agent in tablet-like manganese and iron incorporated titania synthesis: Biodiesel production from waste oil, *Fuel*, 340, pp: 127402.
- [10] I. Ghasemi, M. Haghighi, E. Bekhradinassab, A. Ebrahimi, Ultrasound-assisted dispersion of bifunctional CaO-ZrO₂ nanocatalyst over acidified kaolin for production of biodiesel from waste cooking oil, *Renewable Energy*, 225, pp: 120287.