

سنتر زئولیت LTA و جذب یون کلسیم از آب توسط آن

فرناز کبودوند، دکتر حمیدرضا رضایی، دکتر جعفر جوادیپور

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران

hrezaie@iust.ac.ir

چکیده:

نیاز به آب سالم، نیاز همیشگی تمام جوامع بوده و هست هرچند که دسترسی به آن همواره میسر نیست. یکی از عواملی که این دسترسی را با مشکل مواجه می‌کند وجود کاتیون‌های سنگین مانند Ca^{2+} در منابع آب است که خود از مشکلات مهم زیست‌محیطی به شمار می‌رود. این کاتیون‌های سنگین به روش‌های گوناگونی قابل جداسازی هستند که در این مقاله به بررسی نحوه‌ی استفاده از زئولیت‌ها به خصوص زئولیت سنتزی LTA جهت نیل به این هدف پرداخته شده است. دلیل انتخاب زئولیت LTA جهت جداسازی کاتیون‌های Ca^{2+} موجود در آب خاصیت تبادل یونی انتخابی بالای آن است. بدین منظور، سنتر هیدروترمالی زئولیت LTA در اتوکلاو تفلونی با توجه به فرمول ژل $3.5Na_2O:Al_2O_3:2SiO_2:200H_2O$ صورت پذیرفته است که در این پژوهش از لادوکس (Ludox) به عنوان منبع Si و آلومینیوم ایزوپروپوکساید ($Al.isopropoxide$) به عنوان منبع Al در کنار NaOH استفاده نموده‌ایم. با بررسی نتایج XRD و SEM نمونه‌ها در شرایط متفاوت دمایی و زمانی، دمای $65^\circ C$ درجه سانتی‌گراد و مدت‌زمان ۲۸ ساعت را برای فرمولاسیون ژل $3.5Na_2O:Al_2O_3:2SiO_2:200H_2O$ به عنوان شرایط بهینه‌ی سنتر LTA برگزیده شد. پس از اتمام عمل سنتر، میزان جذب کاتیون‌های Ca^{2+} را اندازه‌گیری نموده و سپس با انجام تبادل یونی و جانشین نمودن یون Na^+ با یون Ca^{2+} ، فرایند جداسازی و جذب یون Ca^{2+} بهبود بخشیده شده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی می‌تواند پس از فعال‌سازی، میزان جذب یون کلسیم را در بهترین حالت تا حدود ۲ برابر افزایش دهد. در انتها، با تکرار آزمایش در شرایط دمایی گوناگون، نتایج به دست آمده مورد مقایسه قرار گرفتند.

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲۳ فروردین ۱۳۹۴
پذیرش: ۷ تیر ۱۳۹۴

کلید واژه:

زئولیت LTA، تبادل یونی، کاتیون‌های کلسیم، جداسازی کاتیون‌های سنگین

۱- مقدمه

کلسیم، استرانسیم و بارییم هستند. کاربرد تجاری عمده آن‌ها در صنایع به عنوان جاذب سطحی است. از لحاظ ساختاری، زئولیت‌ها چارچوب‌های آلومینوسیلیکاتی هستند که بر اساس یک شبکه سه بعدی بی‌نهایت وسیع از چهاروجهی SiO_4 و AlO_4 که از طریق به اشتراک گذاری تمامی اتم‌های اکسیژن‌شان به هم متصل‌اند، ساخته شده‌اند. ابعاد حفره‌ها و

زئولیت‌ها^۱ بلوره‌های آلومینوسیلیکاته هیدراته از عناصر گروه اول و دوم جدول تناوبی بالأخص سدیم، پتاسیم، منیزیم،

^۱ Zeolite



pH بالا و در دمای خاص صورت می‌پذیرد [۴ و ۵]. آزمایش‌های صورت گرفته نشان می‌دهند که عواملی همچون دما و زمان سنتر بر روی ساختار زئولیت اثر می‌گذارد. از ویژگی‌های زئولیت‌ها می‌توان به سازگاری با محیط‌زیست و پایداری در دماهای بالا، محیط‌های اسیدی و خورنده اشاره نمود [۴].

با توجه به خواص تبادل یونی زئولیت‌ها، کاربردهای متعدد و گوناگونی را می‌توان برای آن‌ها برشمرد. یکی از اصلی‌ترین این کاربردها، نرم کردن آب است. در واقع ظرفیت تبادل یونی بالای زئولیت NaA باعث گردیده است که از آن به‌طور گسترده در تصفیه آب‌های سخت در مواد شوینده استفاده گردد [۶]. آب سخت دارای غلظت بالایی از یون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} است که می‌تواند مشکلات عدیده‌ای را چه برای تجهیزات صنعتی و چه برای سلامت فردی به علت مصارف خانگی ایجاد کند؛ لذا به‌منظور جلوگیری از ایجاد مشکلات دستگاه گوارشی به علت مصرف بیش‌ازحد آب سخت و همچنین جلوگیری از خرابی دیگ‌های بخار، خنک‌کننده برج‌ها و تجهیزات دیگری که با آب سنگین در ارتباط مستقیم هستند، معمولاً سختی آب به شدت تحت مراقبت و کنترل قرار می‌گیرد. در میان زئولیت‌هایی که بدین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند، زئولیت NaA به‌عنوان زئولیتی مؤثر جهت حذف Ca^{2+} از محلول شناخته می‌شود [۶ و ۷].

۲- بخش تجربی

۲-۱- سنتر زئولیت LTA

زئولیت LTA^1 متعلق به دسته زئولیت‌های نوع A است

¹ LIND TYPE A

کانال‌های هر زئولیت از مشخصه‌های اصلی آن است که باعث ایجاد پدیده جذب گزینشی، یعنی جذب یک یون یا مولکول خاص در حضور گونه‌های دیگر می‌شود [۱ و ۲].

زئولیت‌ها به دلیل جایگزینی Al^{3+} به جای Si^{4+} دارای بار منفی هستند و برای خنثی نمودن بار، برخی کاتیون‌ها مانند Na^+ ، Ca^{2+} ، Li^+ و K^+ ... به ساختار زئولیت اضافه می‌شوند. این کاتیون‌ها از آنجایی که جزء اصلی ساختار زئولیت نبوده و برخلاف اتم‌های Si و Al پیوند محکمی با ساختار ندارند، به‌سادگی می‌توانند با کاتیون‌های دیگر جایگزین شوند. لذا هر چه تعداد این کاتیون‌های قابل‌تبادل بیشتر باشد، زئولیت مربوطه تمایل و ظرفیت بیشتری برای تبادل یونی خواهد داشت که از این ویژگی معمولاً در فرایند تبادل یونی استفاده می‌گردد. از این رو می‌توان گفت هر چه نسبت Si/Al کمتر باشد و به سمت ۱ میل کند ظرفیت زئولیت برای انجام تبادل یونی افزایش می‌یابد، بدین دلیل که کاتیون‌های تعویض‌پذیر بیشتری در ساختار زئولیت جای می‌گیرند که از طریق جایگزینی آن‌ها می‌توان به خنثی نمودن بار پرداخت. به همین دلیل زئولیت‌های نوع A چون نسبت Si/Al کمی دارند برای تبادل یونی مناسب‌تر هستند [۳]. این زئولیت‌ها شامل حفرات تقریباً کروی هستند که حدود ۱۱ آنگستروم قطر و در حدود ۹۲۵ آنگستروم مکعب حجم دارند. این حفرات تقریباً نیمی از کل حجم بلوری در دسترس برای جذب را تشکیل می‌دهند [۴].

تاکنون روش‌های گوناگونی برای سنتر زئولیت‌ها ابداع گردیده است. یکی از این روش‌ها، بلوره‌ای نمودن ژل‌های آلومینوسیلیکاتی تشکیل‌شده از فلز قلیایی واکنش‌پذیر، به‌وسیله‌ی فرآیند هیدروترمال است. این فرآیند معمولاً در



پس از سرد شدن محلول A و رسیدن به دمای محیط، در حین هم‌زدن محلول B را به آرامی به آن اضافه کرده تا ژل تشکیل شود که این ژل به مدت ۴۵ دقیقه با سرعت بالا هم‌زده شد. محلول حاصل شده را درون اتوکلاو تفلون ریخته شد و درون خشک‌کن با دمای مورد نظر قرار گرفت.

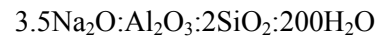
در انتها، پس از خروج اتوکلاو از خشک‌کن، ترکیب حاصله با آب مقطر و با کمک سانتریفیوژ چندین مرتبه شستشو داده شد تا به pH ۹ برسد [۴] و سپس در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت قرار گرفت تا آب موجود پس از شستشو خارج شده و پودر ژئولیت به دست آید.

۲-۳- بررسی اثر دما و زمان بر سنتز

ژئولیت LTA

به جهت بررسی اثر دما و زمان، همچنین برای به دست آوردن حالت بهینه در دماها و زمان‌های مختلف این روند سنتز ژئولیت برای شرایط متفاوت تکرار و با یکدیگر مقایسه گردید که نتایج آن در جدول ۱ قابل مشاهده است. در این مرحله جهت بررسی نوع فازهای تشکیل شده، از نمونه‌ها آنالیز تفرق اشعه ایکس^۶ (XRD) با دستگاه JEOL JDX-8030 با تیوب Cu-K α گرفته شده است. همچنین پس از بررسی و مقایسه‌ی نتایج الگوهای XRD در نمونه‌های مورد بررسی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۷ (SEM) با دستگاه VEGA TESCAN جهت سنجش اندازه و مورفولوژی ذرات متبلور شده استفاده نمودیم.

که از آن معمولاً برای جذب یون‌های کلسیم استفاده می‌شود. فرمول ژل ژئولیت LTA به صورت زیر قابل بیان است [۸]:



که با توجه به فرمول فوق، سنتز این ماده نیازمند آب و عناصر سدیم، آلومینیوم، سیلیسیم و اکسیژن خواهد بود. در این پژوهش از لادوکس^۱ ساخت شرکت «شیمیایی دوپونت»^۲ آمریکا که یک کلئید سیلیکا است، به عنوان منبع Si استفاده شده است. همچنین، Al مورد نیاز در سنتز ژئولیت، از آلومینیوم ایزوپروپوکساید^۳ با فرمول شیمیایی $\text{C}_9\text{H}_{21}\text{AlO}_3$ که متعلق به شرکت مرک^۴ آلمان است، تأمین گردیده است. نهایتاً، به جهت تأمین Na موجود در ساختار ژئولیت، از نمک NaOH متعلق به شرکت اسپانیایی «اسکرل»^۵ استفاده شده است.

۲-۲- روش تهیه

ابتدا آب ۲ بار تقطیر همراه با سود درون بشر پلاستیکی ریخته و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای محیط هم‌زده شد. سپس نیمی از محلول را درون بشر پلاستیکی دیگری که حاوی ژل لادوکس هست اضافه کرده و مجدداً به مدت ۳۰ دقیقه با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد هم‌زده شد. (محلول A)

پودر آلومینیوم ایزوپروپوکساید را به آرامی به نیمه دیگر محلول روی هم‌زن اضافه کرده و در دمای محیط روی هم‌زن به مدت ۳۰ دقیقه هم‌زده شد. (محلول B)

¹ LUDOXE

² DUPONT CHEMICALS

³ Aluminium isopropoxide

⁴ MERCK

⁵ SCHARLAB S.L.

⁶ X-Ray Diffraction

⁷ Scanning Electron Microscope



Ag> Ti> K> NH₄> Rb> Li> Cs> Zn> Sr> Ba>

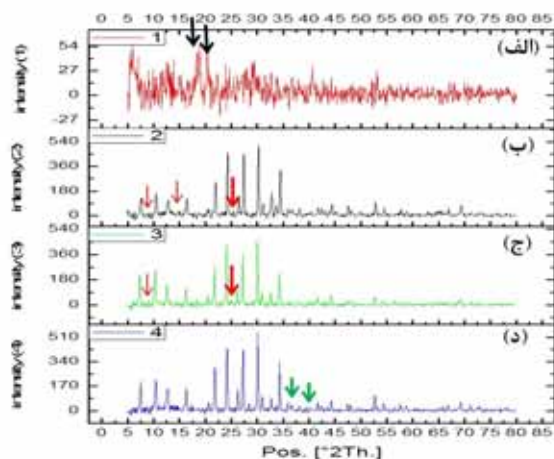
Ca> Ni> Cd> Hg> Mg

با توجه به نتایج حاصله و ترتیب انتخاب‌کنندگی کاتیون‌ها، با جایگزینی تعدادی از یون‌های سدیم درون ساختار با لیتیم از طریق تبادل یونی، میزان جذب افزایش یافته است. به این منظور، ابتدا ۰/۱ گرم از زئولیت را در ۱۰۰ سی‌سی محلول ۱ مولار کربنات لیتیم به مدت ۲۴ ساعت قرار داده تا با تبادل تعدادی از یون‌های سدیم با یون‌های لیتیم، فعال گردد. به دلیل شباهت بیشتر یون لیتیم با کلسیم به نسبت سدیم، امکان تبادل یونی بین آن‌ها افزایش یافته و میزان جذب بیش‌تر می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر دما

پس از سنتر زئولیت‌ها در شرایط متفاوت، به جهت تشخیص فازهای موجود در ماده از تمام نمونه‌ها آنالیز تفرق اشعه X گرفته شده است که الگوی XRD نمونه‌های ۱ تا ۴ در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱- الگوی XRD نمونه‌های ۱ تا ۴؛ الف: (نمونه

۱: ۵۰°C- ۲۴ hr)، ب: (نمونه ۲: ۶۰°C- ۲۴ hr)، ج:

(نمونه ۳: ۶۵°C- ۲۴ hr) و د: (نمونه ۴: ۷۰°C- ۲۴ hr)

جدول ۱- شرایط دمایی و زمانی مورد بررسی

شماره نمونه	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (ساعت)
1	50	24
2	60	24
3	65	24
4	70	24
5	50	48
6	65	20
7	65	28

۲-۴- محاسبه میزان جذب

برای بررسی میزان جذب، محلول‌های ۰/۱ مولار CaCl₂ تهیه شد و به هر ۱۰۰ سی‌سی از این محلول‌ها ۰/۱ گرم زئولیت اضافه شد. برای بررسی تأثیر دما و زمان بر روی فرایند جذب، ترکیب زئولیت و این محلول‌ها در دماهای ۰°C، ۲۵°C و ۵۰°C قرار گرفت و در بازه‌های زمانی ۲، ۴، ۶ و ۲۴ ساعته، میزان تبادل یونی بررسی گردید. میزان جذب و تبادل یونی انجام‌شده در زئولیت، با داده‌های به‌دست آمده از غلظت سنجی^۱ ICPS مدل 7000ver2 بررسی شده است. جهت اطمینان از نتایج حاصله، تمام این فرایند ۲ مرتبه دیگر هم تکرار گردید و نتایج به‌صورت میانگینی از این ۳ جواب به‌دست‌آمده گزارش گردیده است.

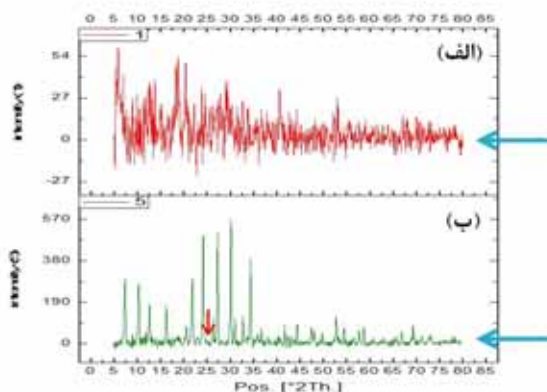
۲-۵- فعال‌سازی زئولیت و بهبود میزان جذب

زئولیت سنتزی A با نسبت مساوی Si به Al، برای کاتیون‌های تک‌ظرفیتی و دو ظرفیتی دارای خاصیت انتخاب‌کنندگی به‌صورت زیر است [۹]:

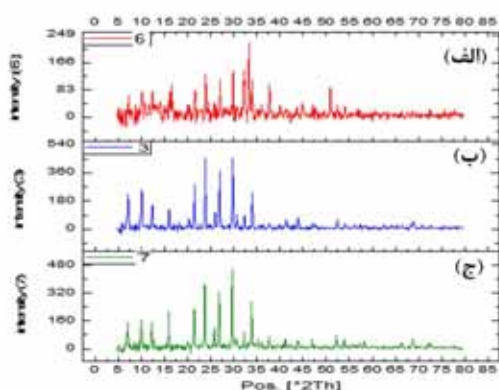
^۱ Inductively coupled plasma spectrometry



نداشته و شرایط مناسب و مطلوبی از نظر تطابق و بلورینگی نسبت به سایر نمونه‌ها دارد.



شکل ۲- الگو XRD نمونه‌های ۱ و ۵،
(۱: ۵۰ °C- ۲۴ hr) و (۵: ۵۰ °C- ۴۸hr)



شکل ۳- مقایسه الگوی XRD نمونه‌های ۳، ۶ و ۷ و بررسی اثر زمان، (۳: ۶۵°C- ۲۴hr) و (۶: ۶۵°C- ۲۰ hr) و (۷: ۶۵°C- ۲۸hr)

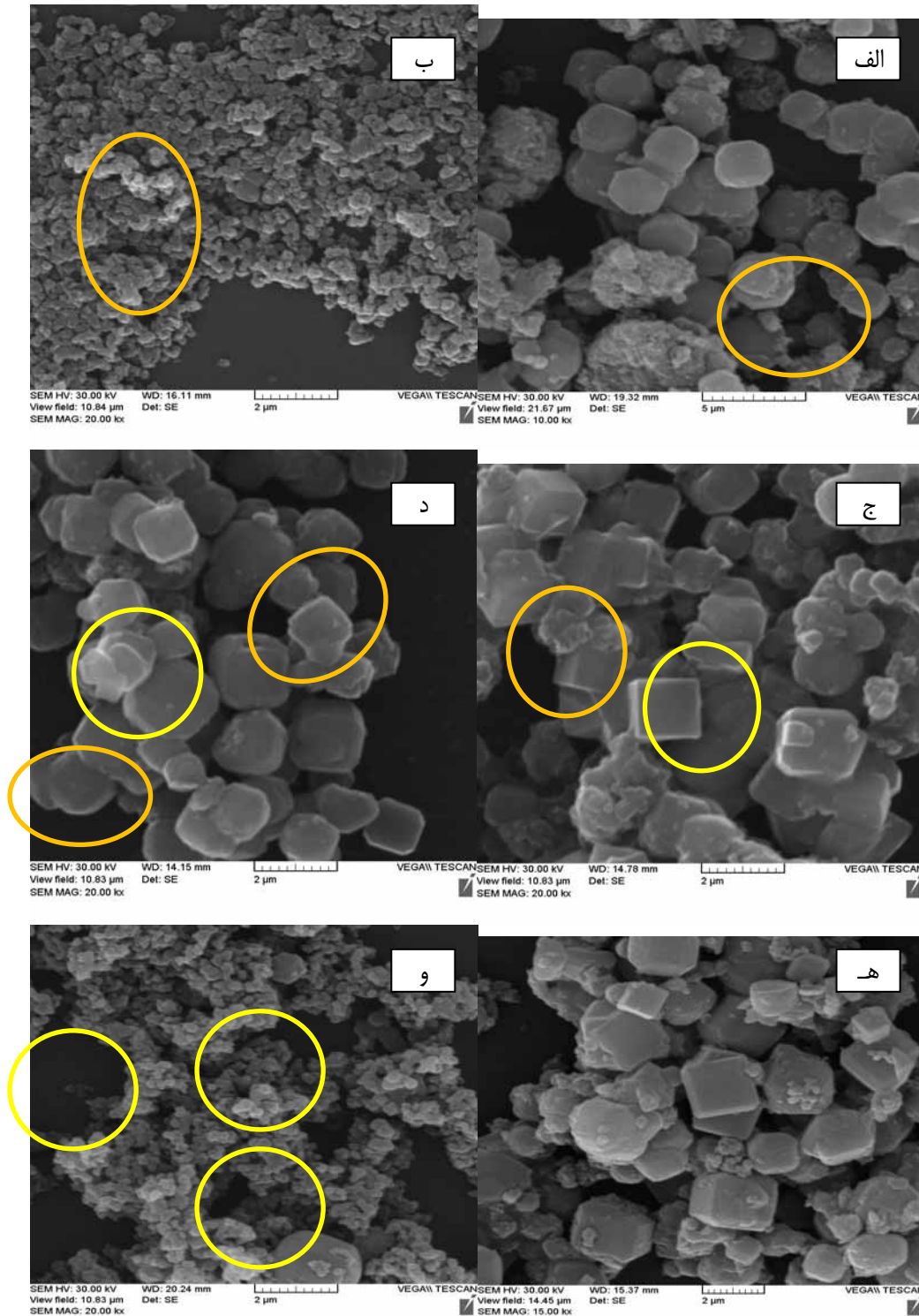
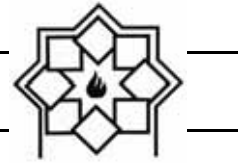
به منظور مشاهده ریز ساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید. در شکل (۴-الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۱ با بزرگنمایی 20.00 kx آورده شده است. با توجه به این شکل و شکل (۱-الف) که الگوی پراش این نمونه را نشان می‌دهد، می‌توان گفت همان‌طور که انتظار می‌رفت در نمونه ۱ فازهایی بی‌شکل و پراکنده وجود دارد.

با توجه به شکل ۱-الف این‌گونه به نظر می‌رسد که در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد فاز زئولیت به‌طور کامل شکل نگرفته است و فازهای بلوره نشده بسیاری در ماده باقی‌مانده است. با توجه به شکل ۱-الف و ب می‌توان گفت افزایش دما از ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، منجر به جوانه‌زنی و رشد فاز زئولیت LTA شده است. درحالی‌که همچنین مقایسه نتایج نمونه‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که الگوی پراش نمونه ۳ مشابهت زیادی با نمونه ۲ دارد با این تفاوت که با افزایش دما شدت پیک‌های فازهای اولیه کاهش یافته و پس‌زمینه یکنواخت‌تر گردیده و از میزان فازهای اولیه باقی‌مانده کاسته شده است. بعلاوه با ادامه روند افزایش دما و رسیدن به دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، همان‌طور که در شکل (۱-د) با پیکان مشخص شده است، جوانه‌های فاز زئولیت X در ساختار پدید آمده است.

۳-۲- بررسی اثر زمان

در ادامه، در شکل ۲ به مقایسه الگوی پراش نمونه‌های کد ۱ با کد ۵ و بررسی اثر زمان بر فازهای موجود در ماده پرداخته شده است. نتایج ارائه‌شده در این شکل نشان می‌دهند که مطابق انتظار، با افزایش زمان امکان جوانه‌زنی و رشد فاز زئولیت LTA در ماده به وجود آمده است.

نتایج مقایسه نمونه‌های ۳، ۶ و ۷ که به مدت زمان‌های ۲۰، ۲۴ و ۲۸ ساعت سنتز شده‌اند در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که قبلاً هم بیان شده و با توجه به شکل، می‌توان گفت که نمونه کد ۷ با پس‌زمینه هموار، نشان از بلوره شدن فازهای درونی می‌دهد و با توجه به الگوی پراش آن و مقایسه آن با الگوی پراش زئولیت LTA، این‌گونه به نظر می‌رسد که فاز بلوره‌ای غیر از فاز زئولیت LTA



شکل ۴- الف) نمونه ۱، ب) نمونه ۲، ج) نمونه ۳، د) نمونه ۵، ه) نمونه ۶ و و) نمونه ۷.



داده شده است. با کمک این تصویر و با توجه به الگوی XRD این نمونه در شکل (۳-ج)، واضح است که بلوره‌های زئولیت رشد خوبی داشته و به نسبت سایر نمونه‌ها ساختار یکنواخت‌تری دارند.

توجه به نتایج الگوهای پراش XRD نمونه‌ها و تصاویر SEM آن‌ها، نمونه کد ۷ که به مدت ۲۸ ساعت در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد سنتز شده، به‌عنوان نمونه با شرایط بهینه انتخاب شد و با آن به بررسی میزان جذب کاتیون کلسیم پرداخته شد.

۴- جذب یون کلسیم با زئولیت LTA

نمودار درصد میزان جذب برحسب زمان برای دماهای ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای یون کلسیم در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این نمودار، درصد میزان جذب میانگین از رابطه ۱ به‌دست آمده است:

$$\%B = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

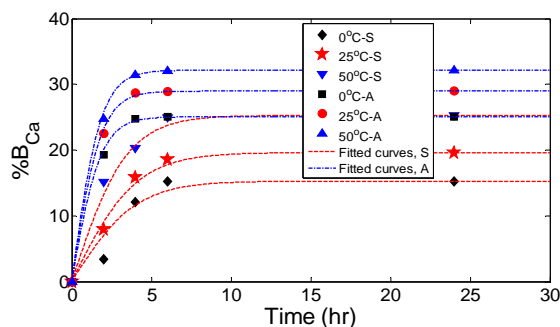
در رابطه بالا C_0 غلظت یون کلسیم موجود در محلول اولیه است. از آنجایی که محلول ۰/۱ مولار مورد استفاده CaCl_2 بوده، غلظت یون کلسیم آن حدود ۴۰۰۰ ppm محاسبه گردید که با مقدار به‌دست آمده از آزمون ICP اولیه مطابقت خوبی دارد.

با توجه به این شکل می‌توان گفت دما بر مقدار جذب تأثیر مثبتی دارد. به عبارت دیگر می‌توان مشاهده نمود که میزان جذب با افزایش زمان در ابتدا به‌شدت افزایش یافته است ولی پس از مدتی به مقدار حداکثری خود رسیده و پس از آن افزایش زمان اثر محسوسی بر روی میزان جذب نداشته

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۲ با بزرگنمایی 10.00kx در شکل (۴-ب) نمایش داده شده است. با کمک تصویر (۴-ب) و الگوی پراش نمونه ۲ که در شکل (۱-ب) قابل رؤیت است، می‌توان گفت بلوره‌های زئولیت در حال شکل گرفتن هستند اما در کنار آن فازهای بی‌شکل مواد اولیه باقی‌مانده است. در شکل (۴-ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۳ با بزرگنمایی 20.00kx نمایش داده شده است. با کمک این تصویر و با توجه به شکل (۱-ج) این‌گونه به نظر می‌رسد که بلوره‌های زئولیت LTA با اندازه حدودی ۱ میکرومتر در ساختار تشکیل شده است که در مقایسه با شکل (۴-ب) فازهای بی‌شکل کمتری درون تصاویر دیده می‌شود. لذا می‌توان چنین برداشت نمود که بر اثر افزایش دما در بخشی از فازهای اولیه باقیمانده بی‌شکل، جوانه‌های زئولیت تشکیل شده و بلورک‌هایی ایجاد گردیده‌اند اما به رشد کامل نرسیده‌اند. در شکل (۴-د) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۵ با بزرگنمایی 20.00kx آورده شده است. با توجه به این شکل و شکل (۲-ب) می‌توان چنین نتیجه گرفت که در نمونه ۵ تعدادی از بلوره‌های زئولیت رشد مناسبی داشته‌اند اما همان‌طور که در شکل نیز مشخص شده، به نظر می‌رسد در کنار این بلورها فازهایی بی‌شکل و پراکنده وجود دارند که احتمالاً فازهای اولیه باقیمانده است. در شکل (۴-ه) می‌توان تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۶ با بزرگنمایی 20.00kx را مشاهده نمود. این شکل گویای این حقیقت است که در این نمونه فازهای بی‌شکل و پراکنده بسیاری وجود دارد. نهایتاً، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۷ با بزرگنمایی 15.00kx در شکل (۴-و) نمایش



می‌رسد در زئولیت فعال، میزان جذب با افزایش زمان در ابتدا به شدت افزایش یافته، اما پس از مدتی به مقدار اشباع خود رسیده است. به منظور بررسی دقیق‌تر اثر فعال‌سازی زئولیت بر روی جذب و مقایسه آن با حالت عادی، در شکل ۷ درصد میزان جذب برحسب زمان بیان شده است.



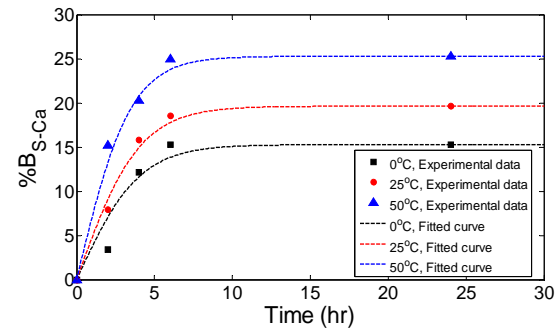
شکل ۷- درصد میزان جذب یون کلسیم در حالت زئولیت عادی و فعال‌شده برحسب زمان

با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت، با فعال‌سازی زئولیت میزان جذب برای یون کلسیم حدوداً ۲ برابر شده است. همچنین میزان جذب در هر دما حدوداً ۱۱٪ افزایش یافته و در مدت زمان کمتری به مقدار جذب تعادلی خود رسیده است.

۶- نتیجه‌گیری

در سنتر زئولیت با کاهش میزان دما و همچنین زمان سنتز، در حقیقت نرخ رشد بلوره‌ها و تشکیل شبکه زئولیتی نیز کاهش می‌یابد. از طرفی افزایش دمای سنتزی منجر به رشد بیش از حد شبکه زئولیتی و تشکیل فاز زئولیتی فوجاسیت به عنوان فاز رقیب برای زئولیت LTA می‌شود. با توجه به فرمول ژل سنتر زئولیت LTA، $3.5\text{Na}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3 : 200\text{H}_2\text{O} : 2\text{SiO}_2$ و مواد اولیه مصرفی، بهترین نتیجه از نظر بلورینگی و مورفولوژی ذرات متبلور، از سنتر زئولیت در

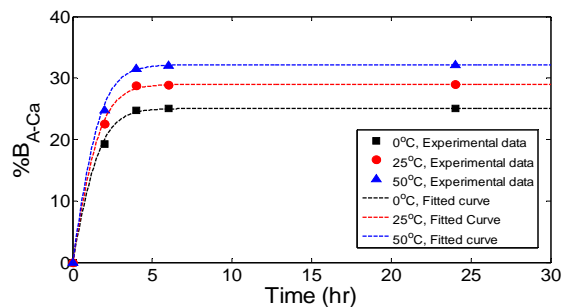
است. این حالت را می‌توان نقطه تعادل در جذب یون‌ها دانست.



شکل ۵- نمودار درصد جذب یون کلسیم

۵- جذب یون کلسیم با زئولیت فعال‌شده

به منظور تحلیل بهتر نتایج، نمودار درصد میزان جذب برحسب زمان برای زئولیت فعال‌شده در دمای 50°C ، 25°C و 0°C برای یون کلسیم در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶- نمودار درصد جذب یون کلسیم با زئولیت فعال‌شده.

با توجه به شکل ۶ می‌توان چنین نتیجه گرفت که با فعال‌سازی زئولیت می‌توان میزان جذب را افزایش داد. همانند حالت قبل، می‌توان مشاهده نمود که در جذب یون، دما تأثیر بسیار مثبتی دارد. همچنین با توجه به شکل به نظر



Seoud, W. Cotton, J. Easdon, Hard water and soft soap: dependence of soap performance on water hardness. A classroom demonstration, *J. Chem. Educ.* 82 (2005) 257–25

[۸] سعید شیرازیان، رطوبت‌زدایی از متان با استفاده از غشای زئولیتی، پایان‌نامه دکتری، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۳.

[9] E. C. Thomas, A. C. William, C. S. Anthony, H. W. Brandon, Zeolite A hydrolysis and degradation, *Environ. Sci. Technol.* 16 (1982) 344–350

دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۸ ساعت به دست آمده است. همچنین نشان داده شد که افزایش دما و زمان روی افزایش درصد جذب یون کلسیم اثر مستقیم دارد. نهایتاً با فعال سازی زئولیت از طریق تعویض یونی لیتیم با قسمتی از سدیم درون ساختار، قابلیت جذب یونی کلسیم افزایش داده شد.

مراجع

- [1] S. M. Auerbach, K. A. Carrado and P. K. Dutta, "Handbook of Zeolites Science and Technology", Marcel Dekker, 2003.
- [۲] ع. حسینی ابری، م. الف. کاوه، م. ر. صالح پرهیزگار، "بررسی ساختار شیمیایی زئولیت‌های طبیعی و مزایای استفاده از آن‌ها به عنوان اصلاح‌کننده‌های خاک‌های کشاورزی"، مجله‌ی علوم پایه‌ی دانشگاه آزاد اسلامی، شماره‌ی ۶۴، تابستان ۱۳۸۶.
- [3] W. Flank, "Adsorption and Ion Exchange with Synthetic Zeolites", ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC, 1980.
- [4] Robson, Harry E. ed. *Verified Syntheses of Zeolitic Materials*. Gulf Professional Publishing, 2001
- [۵] الف. پاک، "ساخت آزمایشگاهی غشاهای زئولیتی"، رساله‌ی دکتری، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۲.
- [6] R. Le VanMao, N.T. Vu, S. Xiao, A. Ramsaran, Modified zeolites for the removal of calcium and magnesium from hard water, *J. Mater. Chem.* 4 (1994) 1143–1147.
- [7] K. L. V. Osorio, W. de Oliveira, O. A. El

