

# استفاده از خاصیت تبادل یونی زئولیت جهت حذف آمونیاک هوا



مقاله مروری



تصویری از بلورهای کانی کائولین

در این پژوهش اصلاح زئولیت‌های طبیعی ایران به روش تبادل یون و تأثیر آن بر روی جذب آمونیاک از هوا مورد بررسی قرار گرفته است. بر همین اساس فرم‌های کائولینی مختلف زئولیت‌های مورد آزمایش (اسمان، میانه، فیروزکوه) در اندازه ذرات ۱ تا ۲ میلی‌متر با استفاده از محلول نمک‌های نیترات و کلرید کاتیون‌های مختلف (سدیم، پتاسیم، کلسیم) با غلظت یک نرمال و نیز محلول اسیدهای مختلف (فسفریک،

نیتریک، کلریدریک و سولفوریک) با غلظت یک نرمال و با نسبت جامد به محلول ۱:۲۵ تهیه شد و از نقطه‌نظر جذب آمونیاک (NH<sub>3</sub>) در آزمایش‌های جذب دینامیک (ستونی) مورد استفاده قرار گرفت. نقاط شکست و اشباع نمونه‌ها و ظرفیت جذب آنها در شرایط مختلف از نظر دبی، غلظت و دما اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل نشان دهنده پیوسته قابل توجه کارایی جذب آمونیاک به وسیله زئولیت‌های طبیعی اصلاح شده با اسیدهای معدنی مختلف در مقایسه با نمونه‌های طبیعی و اصلاح شده کائولینی است ( $P < 0.0001$ ).

از زئولیت‌ها و فلئوسپاتوئیدها به دلیل داشتن ساختمان سه بعدی (برخلاف خاک‌های معدنی که ساختمان دو بعدی دارند) در اثر واکنش‌های تبادل یون هیچگونه تغییر قابل ملاحظه‌ای در ایجاد شبکه آنها ایجاد نشده و تورم نیز نشان نمی‌دهند [۳]. رفتار تبادل یونی زئولیت‌ها به عواملی چون ماهیت کاتیون‌های میابنده شوند. (اندازه کاتیون و بار کاتیون)، دمای محیط و واکنش، غلظت کاتیون‌های موجود در محلول و خصوصیات ساختمانی زئولیت مورد آزمایش و به میزان کمتری به نوع آنیون‌های همراه و نوع حلال بستگی دارد [۳]. گزینش‌پذیری کاتیون‌ها در میابنده‌کننده‌های زئولیتی از قوانین حاکم بر سایر میابنده‌کننده‌های معدنی و آلی تبعیت نمی‌کند [۴]. جنبه‌های منحصراً به فرد ساختمانی زئولیت‌ها باعث بروز پدیده‌های غیرمعمولی چون گزینش‌پذیری و لجرال کاتیونی می‌شود و بنابراین تغییر رفتارهای تبادل کاتیونی متغیر زئولیت‌ها به کمک تجزیه و تحلیل ساختمانی آنها ممکن خواهد شد.

انجام فرآیند تبادل یون در زئولیت‌ها با تغییرات عمده در پایداری، رفتارهای جذب و گزینش‌پذیری، خواص کاتالیتیکی و سایر خواص مهم فیزیکی آنها همراه است. از آنجایی که بسیاری از این خواص به انجام عمل تعویض یون کنترل شده با کاتیون‌های ویژه بستگی دارد داشتن اطلاعات کافی از فرآیند تبادل یون در زئولیت‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است [۳]. پدیده تبادل یون همانند فرآیندهای تقطیر، استخراج و جذب یکی از شاخه‌های مهم علم جداسازی است. این پدیده اگرچه جنبه‌های مشترک زیادی با سایر شاخه‌های علم جداسازی دارد ولی با بسیاری از آنها در یک وجه بسیار مهم متمایز است. وجه تمایز تبادل یون و سایر روش‌های جداسازی در این است که این پدیده همراه با تقسیم انواع مختلفی از گونه‌های باردار بین نواحی مختلف یک سیستم صورت می‌گیرد. این نواحی معمولاً فازهای جدا از هم هستند. سر و کار داشتن با گونه‌های باردار به این معنی است که فرآیند تبادل یون به طور ذاتی یک واکنش استوکیومتری است چرا که در طی هر واکنش تبادل یونی هر کدام از فازهای موجود در سیستم باید از نظر الکتریکی خنثی باقی بماند و لازمه

یکی از روش‌های معمول برای اصلاح ویژگی‌های مختلف زئولیت‌ها مانند خاصیت جذب، خواص کاتالیز و ... استفاده از تکنیک تبادل یون است. پدیده تبادل یون اولین بار در سال ۱۸۵۰ و به دنبال مشاهده توانایی خاک‌های رزایی در تعویض برخی از یون‌ها مثل آمونیوم با یون‌های کلسیم و منیزیم موجود در ساختمان آنها گزارش شد [۱]. در سال ۱۸۷۰ با انجام آزمایش‌های متعددی ثابت شد که بعضی از کانی‌های طبیعی، به خصوص زئولیت‌ها واجد توانایی انجام تبادل یون هستند [۲]. تبادل آسان کاتیون‌های موجود در شبکه ساختمانی زئولیت‌ها با سایر کاتیون‌های موجود در محیط اطراف آنها باعث ظهور نظریه استفاده از آنها در حذف و کاهش سختی آب‌ها گردید. بسیاری

۷۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت (ستگاه تکان دهنده به طور اتوماتیک هر دو ساعت، ۱۵ دقیقه نمونه‌ها را به طور یکپارچه مخلوط می‌کند).

پس از آن فاز جامد به وسیله کاغذ صافی (واگن شماره ۵۴) صاف شده و با مقدار اضافی آب مقطر داغ و سپس مقادیر متناهی آب مقطر سرد، شستشو داده می‌شد تا از خارج شدن کاتیون‌ها و نیز محلول اسید اضافی اطمینان حاصل شود (با کاغذ pH متر از خروج  $H^+$  اضافی اطمینان حاصل می‌شد و غاری شدن از اسید به عنوان معیاری از خروج کامل کاتیون‌های قابل تمویض نیز در نظر گرفته شد).

زئولیت اصلاح شده در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد خشک شده و سپس در داخل دسیکاتور روی محلول کلرید سدیم اشباع، برای ثابت ماندن فشار بخار آن در طول مدت آزمایشات نگهداری شد.

ترکیب شیمیایی نمونه‌های زئولیت اصلاح شده به روش بالا، به کمک تکنیک فلورسانس اشعه ایکس (XRF) تعیین شد (جداول ۲)، سپس برای انجام آزمایش جذب در سیستم دینامیک (استونی) که برای همین منظور طراحی و ساخته شده بود [۵] در معرض غلظت معینی از آمونیاک (۱۹۵ ppm) با دبی معین ( $3 \text{ lit/min}$ ) و دما و فشار معین (دما ۲۵ درجه سانتی گراد و فشار ۶۶۱ میلی‌متر جیوه) قرار داده شده و نظام شکست، اشباع و ظرفیت جذب هر کدام با استفاده از تجزیه‌گر قابل حمل آمونیاک مدل مولتی وارن II ساخت شرکت دراکر آلمان مجهز به سنسور الکتروشیمیایی آمونیاک اندازه‌گیری و محاسبه شد (جداول ۳) [۴].

### نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی فرمهای کاتیونی و اسیدی تهیه شده از نمونه‌های زئولیت طبیعی به روش بحث شده در بخش آزمایشات که با استفاده از تکنیک XRF انجام شده است در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

این نتایج با نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه‌های طبیعی مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده از آزمایشات جذب آمونیاک به روش ستونی شامل منحنی‌های شکست، ظرفیت جذب تا نقطه شکست، ظرفیت جذب تا نقطه اشباع، زمان رسیدن به نقطه شکست و اشباع برای فرمهای گوناگون کاتیونی و اسیدی زئولیت‌های مختلف در جدول ۳ و ۴ و شکل‌های ۱ تا ۳ آورده شده است. شکل ۱ نشان دهنده منحنی‌های شکست بوده و زمان رسیدن به نقطه شکست و نقطه اشباع را در مورد زئولیت‌های

این امر این است که فرآیند تبادل بر اساس هم آزری بارها صورت پذیرد، واکنش تبادل یون را می‌توان به عنوان تمویض داخلی یون‌های موجود در یک سیستم هسروژن شامل یون‌های موجود در فاز جامد میانه کننده یون و یون‌های موجود در فاز محلول تعریف کرد. در شرایطی که میانه کننده یون در محیطی که واکنش تبادل در آن مسرور می‌گردد، محلول است. هنگامی که یک میانه کننده یون در تماس با محلول یکی حاوی یون‌های غیر از کاتیون موجود در میانه کننده قرار گیرد، پدیده تمویض یون‌ها تا زمان رسیدن به تعادل ادامه می‌یابد. در این تحقیق که در ادامه مطالعه انجام شده روی زئولیت‌های طبیعی در مناطق مختلف ایران از نقطه نظر رفتار جذب آمونیاک انجام گرفته است، نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده روی رفتارهای جذب نمونه‌های زئولیت طبیعی اصلاح شده با کاتیون‌ها و اسیدهای معدنی مختلف نسبت به گاز آمونیاک که به روش دینامیک (ستونی) انجام شده است ارائه و بحث می‌شود.

### بخش تجربی

#### مواد و روش‌ها

نتایج اولیه تحقیق روی زئولیت‌های طبیعی ایران از نقطه نظر ویژگی جذب گاز آمونیاک به عنوان آلاینده، بسیار امیدوار کننده بود [۵]. براساس نتایج گزارش شده یکی از عوامل اصلی بر کارایی جذب، ساختار شیمیایی نمونه‌ها بود لذا به نظر می‌رسد که اصلاح آنها به وسیله برخی کاتیون‌ها به دلیل تاثیر بر اندازه خورده‌ها و کانال‌ها و نیز میزان آب موجود در ساختار زئولیت‌ها می‌تواند سبب افزایش بازده جذب آمونیاک شود. بر همین اساس نمونه‌های کلینوپتیلولیت تهیه شده از سه منطقه جغرافیایی (استان، میانه، فیروزکوه) پس از آسیاب شدن و دانه بندی (غربال‌های استاندارد ASTM) در اندازه ۱ تا ۲ میلی‌متر به روش تبادل یون اصلاح شد و فرم‌های مختلف کاتیونی و اسیدی آنها تهیه گردید. به این منظور مقدار مشخصی از زئولیت به سه طرف پلی اتیلن ۲۰۰ میلی‌لیتری حاوی محلول هر یک از نمک‌های نیترات و یا کلرید یک نرمال از کاتیون‌های سدیم، کلسیم و پتاسیم و یا محلول یک نرمال هر یک از اسیدهای فسفریک، نیتریک، کلریدریک و سولفوریک منتقل شد، که نسبت فاز جامد به محلول در تماس موارد ۱:۲۵ تنظیم شده بود [۶ و ۳]. سپس ظروف پلی اتیلنی در داخل آون مجهز به دستگاه تکان دهنده که برای همین منظور طراحی و ساخته شده بود به مدت ۲۴ ساعت در دمای

نوع زئولیت		سمنان				میانه			
فرم یون شیمیایی		Z-Na	Z-K	Z-Ca	ZN	Z-Na	Z-K	Z-Ca	ZN
SiO <sub>2</sub>		۷۱.۰	۷۱.۰	۷۰.۷	۷۰.۳	۷۱.۰	۷۱.۰	۷۱.۰	۷۱.۰
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		۱۷.۰	۱۷.۰	۱۷.۰	۱۷.۰	۱۷.۰	۱۷.۰	۱۷.۰	۱۷.۰
CaO		۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
MgO		۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
Na <sub>2</sub> O		۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
K <sub>2</sub> O		۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
TiO <sub>2</sub>		۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
Loss On Ignition		۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰
Total		۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰

جدول ۱ - تجزیه شیمیایی فرم‌های کاتیونی تهیه شده از نمونه‌های کلینوپتیلولیت سمنان و میانه و مقایسه آن با نمونه‌های طبیعی  
 زئولیت طبیعی - ZN - Not detectable  
 Loss On Ignition

در نمونه‌ها به واسطه تغییر نوع و میزان کاتیون‌های قابل تمییز در شبکه زئولیت نسبت داد. میزان آب موجود در ساختار زئولیت‌ها به عواملی چون ساختمان نوع زئولیت، نوع و میزان کاتیون‌های موجود در فاز زئولیتی بستگی دارد که با توجه به نگاه‌داری همه نمونه‌ها اهم از زئولیت‌های طبیعی و فرم‌های تمییز شده آنها روی محلول آب نمک اشباع در طول مدت آزمایشات، فشار بخار محیط آنها یکسان بوده است و تاثیر در میزان آنها نخواهد داشت. بنابراین میزان آب موجود در هر یک از نمونه‌ها فقط به نوع و میزان کاتیون‌های موجود در آنها بستگی خواهد داشت. تغییر مقدار آب نمونه‌ها در اثر تغییر نوع کاتیون‌های موجود به دلیل تفاوت کاتیون‌ها در شعاع هیدراته آنها می‌باشد.

در نمونه Z6 با افزایش شعاع کاتیون‌های وارد شونده ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  و  $\text{K}^+$  به ترتیب ۰/۸۹، ۰/۷۳ و ۱/۲۳ آنگستروم) میزان آب نمونه‌ها به ترتیب برابر ۱۱/۱۵، ۱۱/۶۰ و ۱۱/۸۵ درصد (جدول ۱) بوده است. که نسبت به مقدار اولیه (۱۲/۴۴ درصد) کاهش نشان می‌دهد. ورود کاتیون بزرگی چون  $\text{K}^+$  که دانسیته بار کوچکی داشته و عدد هیدراسیون آن برابر ۱۶- است، باعث کاهش شدید میزان آب موجود در نمونه شده و مقدار آن را از ۱۲/۴۴ به ۱۰/۸۵ درصد تقلیل داده است. این میزان کاهش در نمونه‌های Z6 و Z11 نیز مشهود است (جدول ۱).

علت دیگر کاهش بازده را باید به تفاوت در شعاع کاتیون‌های وارد شونده نسبت داد. ورود کاتیونی با شعاع خاص به شبکه زئولیتی باعث ایجاد تغییراتی در فاصله‌های شبکه‌ای می‌شود. این تغییرات اگرچه ساختمان کلی زئولیت را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد، ولی جایگزین یون‌های کوچک با کاتیون‌هایی با شعاع بزرگتر موجود در فاز زئولیت، باعث بزرگتر شدن اندازه حفره‌ها و کانال‌ها می‌شود که نتیجه آن در الگوی پراش اشعه ایکس جایه‌جایی جزئی فاصله‌های شبکه‌ای خواهد بود [۳]. این تغییرات در اندازه کانال‌ها و خواص ساختار زئولیت‌ها سبب تغییر در گزینش پذیری گونه‌های مونوکولی واردشونده می‌شود.

آزمایش‌های جذب انجام شده روی فرم‌های اصلاح شده اسیدی زئولیت‌های طبیعی مناطق مورد بررسی که به وسیله محلول یک نرمال اسیدهای مختلف (اسید فسفریک، اسید نیتریک، اسید کربنیک و اسید سولفوریک) اصلاح شده‌اند، بیانگر افزایش محسوس ظرفیت جذب آمونیاک نمونه‌های اصلاح شده در

نوع زئولیت	فرم‌های اسیدی			
	Z-HNO <sub>3</sub>	Z-HCL	Z-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Z-H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
SiO <sub>2</sub>	۷۷/۱	۷۷/۱	۷۷/۱	۷۷/۱
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
CaO	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳
MgO	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Na <sub>2</sub> O	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
K <sub>2</sub> O	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
TiO <sub>2</sub>	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
SO <sub>2</sub>	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
BrO	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
ZrO <sub>2</sub>	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
BaO	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Li <sup>+</sup>	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Total	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰

N.d. = Not detectable

جدول ۳ - آنالیزه کمی‌های (درصد وزنی) فرم‌های اسیدی تهیه شده از نمونه‌های کئولیت‌زئولیت فیروزکوه

مشخصه طبیعی	سنتال		میانه		فیروزکوه	
	Z-Ca	Z-N	Z-Ca	Z-N	Z-Ca	Z-N
پراش رسیمن به نقطه شکست (D <sub>90</sub> )	۲	۲	۲	۲	۱۵	۱۷
پراش رسیمن به نقطه اشباع (D <sub>95</sub> )	۱۶۹	۱۰	۲۰	۱۰	۱۶۳	۱۶۷
ظرفیت جذب تا نقطه شکست (D <sub>90</sub> )	۱۱۹	۱۰۸	۱۱۹	۱۰۸	۱۲۰	۱۲۲
ظرفیت جذب تا نقطه اشباع (D <sub>95</sub> )	۱۲۷	۱۲۷	۱۲۷	۱۲۷	۱۲۷	۱۲۸

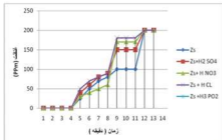
جدول ۳ - ظرفیت جذب و نقاط شکست فرم‌های کاتیونی کئولیت‌زئولیت مناطق مختلف ایران نسبت به گاز آمونیاک (متوسط دما ۲۰ درجه سانتی گراد، مقدار زئولیت در هر ستون ۱۰ گرم، اندازه ذرات ۳۰۱ میکرون، متوسط دبی ۳ Lit/min و متوسط غلظت ورودی به ستون ۱۹۵ ppm)

مشخصه آزمایشی	سنتال			میانه			فیروزکوه		
	Z-HNO <sub>3</sub>	Z-HCL	Z-H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Z-HNO <sub>3</sub>	Z-HCL	Z-H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Z-HNO <sub>3</sub>	Z-HCL	Z-H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
پراش رسیمن به نقطه شکست (D <sub>90</sub> )	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
پراش رسیمن به نقطه اشباع (D <sub>95</sub> )	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
ظرفیت جذب تا نقطه شکست (D <sub>90</sub> )	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
ظرفیت جذب تا نقطه اشباع (D <sub>95</sub> )	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰

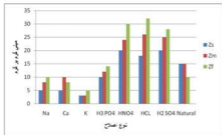
جدول ۳ - ظرفیت جذب و نقاط شکست فرم‌های اسیدی کئولیت‌زئولیت مناطق مختلف ایران نسبت به گاز آمونیاک (متوسط دما ۲۰ درجه سانتی گراد، مقدار زئولیت در هر ستون ۱۰ گرم، اندازه ذرات ۳۰۱ میکرون، متوسط دبی ۳ Lit/min و متوسط غلظت ورودی به ستون ۱۹۵ ppm)

اصلاح شده مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج استخراج شده از آزمایشات جذب دینامیک آمونیاک (جدول ۱ تا ۳ و شکل‌های ۱ تا ۳) نشان می‌دهند که زمان رسیمن به نقطه شکست ( $< ۰/۰۰۲$ ) و نیز ظرفیت جذب تا نقطه شکست و ظرفیت جذب تا نقطه اشباع ( $> ۰/۰۰۱$ ) برای فرم‌های کاتیونی (سدیم، پتاسیم، کلسیم) زئولیت‌های هر سه نقطه مورد مطالعه، در مقایسه با انواع طبیعی آنها به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. به عنوان مثال در حالی که زمان رسیمن به نقطه شکست برای زئولیت طبیعی متعلقه نسبتاً برابر ۱۲۰ دقیقه بود در شرایط اصلاح یکسان فرم اسیدی آن در مدت زمان شدیدی به نقطه شکست رسیده است.

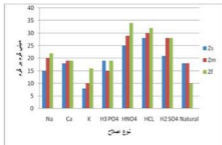
یکی از دلایل عمده کاهش بازده جذب را می‌توانیم به کاهش میزان آب موجود



شکل ۱- محتسب زمان رسیدن به نقطه شکست و انبساط آزمایش جذب آمونیاک روی زئولیت‌های اصلاح شده سماتان با اسیدهای مختلف در مقایسه با نمونه طبیعی



شکل ۲- ظرفیت جذب آمونیاک (نقطه شکست) زئولیت‌های اصلاح شده با کاتیون‌ها و اسیدهای مختلف در مقایسه با نمونه‌های طبیعی



شکل ۳- ظرفیت جذب آمونیاک (نقطه اشباع) از زئولیت‌های اصلاح شده به وسیله کاتیون‌ها و اسیدهای مختلف در مقایسه با نمونه طبیعی

نمونه‌ها بازده جذب بالاتری را نشان می‌دهند، اما اختلاف آنها با همدیگر از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد ( $P < 0.001$ ).

مقایسه با نمونه‌های طبیعی و فرم‌های کاتیونی است (۳ تا ۵ برابر،  $P < 0.001$ ) (جدول ۴ و شکل‌های ۳ و ۴).

زئولیت‌های اصلاح شده با اسیدهای نیتریک، کلریدریک و سولفوریک در مقایسه با اسید فسفریک در هر سه نمونه زئولیت بازده بالاتری از خود نشان دادند ( $P < 0.001$ ) اگرچه تاثیر هر یک از اسیدها بر زئولیت متعلقه خاص بسته به نوع ناخالصی‌های موجود در نمونه زئولیت با یکدیگر متفاوت است.

یکی از فاکتورهای موثر در ظرفیت جذب زئولیت، نسبت سیلیس به آلومینوم (Si/Al) در ساختار شبکه زئولیت است [۷]. این نسبت در کلتونیت‌های طبیعی بررسی شده در حدود ۸/۵ تا ۹/۵ است که پس از اصلاح آنها با اسیدهای معدنی به حدود ۹/۷ تا ۱۱/۵ رسیده است [۸]. لذا افزایش این نسبت در فرم‌های اصلاح شده اسیدی، سبب افزایش قابل توجه زمان رسیدن به نقطه شکست و در نتیجه افزایش ظرفیت جذب تا نقطه شکست و نقطه اشباع شده است.

نکته قابل توجه دیگر اینست که اسیدهای معدنی با حذف ناخالصی‌های موجود در ساختار زئولیت، باعث افزایش قابل توجه سطح مخصوص نمونه‌ها شده که می‌تواند باعث افزایش بازده جذب سطحی مولکول‌ها روی زئولیت شود. به عنوان مثال اصلاح نمونه طبیعی با سطح ۲۶/۸۱ مترمربع بر گرم به وسیله اسید کلریدریک با غلظت‌های ۰.۳ و ۰.۷ درصد باعث افزایش سطح به ترتیب معادل ۸۰/۶ و ۱۰۳/۴ مترمربع بر گرم شده است [۹].

در تصاویر ۴ و ۵ از دو نوع زئولیت که در جذب آمونیاک کاربرد بیشتری دارند آورده شده است.

### نتیجه گیری

۱- نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهند که اصلاح زئولیت‌های طبیعی (کلتونیت‌های طبیعی) با اسیدهای معدنی (اسیدنیتریک، کلریدریک و سولفوریک) به دلیل افزایش میزان آب موجود در نمونه‌ها، تغییر نسبت Si/Al در ساختار شبکه زئولیت و نیز افزایش سطح مخصوص نمونه‌ها می‌تواند بازده جذب آمونیاک به روش دینامیک (استونی) را به میزان ۳ تا ۵ برابر (بسته به نوع زئولیت) افزایش دهد.

۲- فرم اصلاح شده کلتونیت‌های طبیعی سماتان با اسید نیتریک کلتونیت‌های طبیعی میانه اصلاح شده با اسید کلریدریک و کلتونیت‌های طبیعی فیروزکوه اصلاح شده با اسید سولفوریک در مقایسه با سایر