

Journal of Water and Wastewater, Vol. 32, No. 6, pp: 58-66

# Investigating the Effect of Using Iranian Zeolite and Bentonite in Desalination

M. Sahraei<sup>1</sup>, A. M. Liaghat<sup>2</sup>, A. Nazi Ghameshlou<sup>3</sup>

1. Former Graduate Student, Dept. of Irrigation and Reclamation, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Prof., Dept. of Irrigation and Reclamation, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran  
(Corresponding Author) aliaghat@ut.ac.ir
3. Assist. prof., Dept. of Irrigation and Reclamation, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received Feb. 16, 2021 Accepted Aug. 25, 2021)

#### To cite this article:

Sahraei, M., Liaghat, A. M., Nazi Ghameshlou, A. 2022. "Investigating the effect of using Iranian zeolite and bentonite in desalination" Journal of Water and Wastewater, 32(6), 58-66.  
Doi: 10.22093/wwj.2021.273711.3117. (In Persian)

## Abstract

Global water demand is constantly increasing, while freshwater resources are limited due to increased demand and the effects of climate change, especially in arid and semi-arid regions such as Iran. The cost of water production is one of the most important factors in choosing a desalination method. In the adsorption method using natural materials, the cost of desalination can be reduced. In this study, Iranian zeolite and bentonite were used to reduce salinity by batch test. The adsorbents were identified by EDX, XRD, and BET. Clays were also modified with 1 M hydrochloric acid. The results showed that Iranian zeolite and bentonite used in this study as mineral adsorbents do not have the efficiency to reduce salinity and increase the electrical conductivity and sodium content of water. The highest increase in sodium concentration in samples was related to natural bentonite (102.5 mg/g) at the highest salinity concentration (64000 mg/L) and the lowest increase in sodium concentration was related to natural zeolite at 0.066 mg/g in the lowest salinity concentration (640 mg/L). Also, the highest increase in electrical conductivity was related to natural bentonite with an increase of 4.3 dS/m. It is noteworthy that after acid correction, the amount of electrical conductivity increased significantly in both clays. Therefore, due to the differences between the clays, it is better to first examine them in terms of construction and then use them in the field of desalination.

**Keywords:** Zeolite, Bentonite, Desalination, Adsorption.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۶، صفحه: ۶۶-۵۸

## بررسی اثر استفاده از زئولیت و بنتونیت ایرانی در نمک‌زدایی

مریم صحرانی<sup>۱</sup>، عبدالمجید لیاقت<sup>۲</sup>، آرزو نازی قمشلو<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی،

دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- استاد، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی،

دانشگاه تهران، کرج، ایران (نویسنده مسئول) aliaghat@ut.ac.ir

۳- استادیار، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی،

دانشگاه تهران، کرج، ایران

(دریافت ۹۹/۱۱/۲۸ پذیرش ۱۴۰۰/۶/۳)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

صحرانی، م.، لیاقت، ع. م.، نازی قمشلو، آ.، ۱۴۰۰، "بررسی اثر استفاده از زئولیت و بنتونیت ایرانی در نمک‌زدایی"

مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۶)، ۵۸-۶۶. Doi: 10.22093/wwj.2021.273711.3117

### چکیده

تقاضای جهانی آب پیوسته در حال افزایش است، این در حالی است که منابع آب شیرین به دلیل افزایش تقاضا و اثرات تغییر اقلیم به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند کشور ایران با محدودیت مواجه هستند. هزینه آب تولید شده، یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در انتخاب روش نمک‌زدایی است. در روش جذب با استفاده از مواد طبیعی می‌توان هزینه نمک‌زدایی را کاهش داد. در این پژوهش با استفاده از دو ماده زئولیت، بنتونیت ایرانی برای کاهش شوری به روش آزمایش پیمانه‌ای استفاده شد. جاذب‌ها به وسیله BET، XRD، EDX شناسایی شدند. همچنین رس‌ها به وسیله اسید هیدروکلریک یک مولار اصلاح شدند. نتایج نشان داد که زئولیت و بنتونیت ایرانی استفاده شده در این پژوهش به عنوان جاذب‌های معدنی کارایی لازم برای کاهش شوری را نداشته و سبب افزایش هدایت الکتریکی و مقدار سدیم آب می‌شوند. بیشترین افزایش غلظت سدیم در نمونه‌ها مربوط به بنتونیت طبیعی به مقدار ۱۰۲/۵ میلی‌گرم در گرم در بیشترین غلظت شوری معادل ۶۴۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و کمترین افزایش غلظت سدیم مربوط به زئولیت طبیعی به مقدار ۰/۰۶۶ میلی‌گرم در گرم در کمترین غلظت شوری معادل ۶۴۰ میلی‌گرم در لیتر بود. همچنین بیشترین افزایش هدایت الکتریکی مربوط به بنتونیت طبیعی با افزایش ۴/۳ دسی‌سیمنز بر متر بود. قابل ذکر است که پس از اصلاح با اسید، مقدار هدایت الکتریکی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در هر دو رس افزایش یافت. بنابراین با توجه به تفاوت‌های موجود بین رس‌ها، بهتر است ابتدا از نظر ساختمانی بررسی و سپس در زمینه نمک‌زدایی استفاده شوند.

واژه‌های کلیدی: زئولیت، بنتونیت، نمک‌زدایی، جذب

### ۱- مقدمه

در سطح کره زمین حدود ۱/۴ میلیارد مترمکعب آب وجود دارد که تنها ۲/۵ درصد این مقدار آب قابل‌آشامیدن است و مقدار عمده آن به صورت کوه یخ و یخچال‌ها غیرقابل دسترس هستند. تنها ۰/۷۷

طی ۲۵ سال آینده تعداد افرادی که دچار کمبود منابع آب خواهند شد تا ۴ برابر افزایش می‌یابد. این افزایش با رشد جمعیت و تقاضای صنعت ارتباط مستقیم دارد (Engelman, 2000, Leitner, 1998).



۳- روش‌های شیمیایی مانند رزین تبادل یون<sup>۸</sup>، روش جذب<sup>۹</sup>، استخراج مایع-مایع<sup>۱۰</sup>.

جذب یک فناوری قابل قبول برای جداسازی و از بین بردن نمک‌ها و دیگر یون‌ها از آب است. این پدیده علاوه بر فراهم کردن انعطاف پذیری و سادگی در طراحی فرایند، بهره‌برداری و نگهداری، همچنین در دسترس بودن طیف گسترده‌ای از مواد جاذب می‌تواند با هزینه‌های کم نیز اجرایی شود (Kumar et al., 2010, Gunay et al., 2007, Velazquez-Jimenez et al., 2015, Shahmirzadi et al., 2016, Naidu et al., 2017)

فناوری و فرایند جذب تا حد زیادی توسط نوع و ماهیت مواد به کار رفته به عنوان جاذب کنترل می‌شود. تاکنون انواع مواد جاذب برای نمک‌زدایی، نرم شدن آب و کاهش آلاینده‌ها بررسی شده است (Aghakhani et al., 2013).

در زمینه استفاده از زئولیت در تصفیه آب و بهبود کیفیت آب پژوهش‌های بسیار زیادی در ایران و جهان انجام شده است. بیشتر پژوهش‌ها در رابطه با حذف عناصر سنگین و عناصر فلزی از آب بوده است. تعداد محدودی پژوهش بر روی نمک‌زدایی به وسیله زئولیت انجام شده و متأسفانه تا به این لحظه هیچ گزارشی از تأثیر زئولیت ایرانی بر نمک‌زدایی ارائه نشده است. از جمله پژوهش‌هایی که انجام شده است می‌توان به پژوهش گیب و همکاران در سال ۲۰۱۷ برای حل مشکل آب‌های زیرزمینی شور پتاسیم‌دار<sup>۱۱</sup> با استفاده از دو جاذب مختلف در دو مرحله اشاره کرد. به این معنی که آنها ابتدا برای حذف کلر در محلول از جاذب  $MgAl-Co_3$  LDH و سپس برای حذف سدیم از زئولیت استفاده کردند. زئولیت استفاده شده از نوع کلینوپتیلولیت و غنی از کلسیم و پتاسیم بود. ظرفیت تبادل کاتیونی آن  $1/67$  میلی‌اکی‌والانت در لیتر و نسبت  $Si:Al$  آن  $5/95$  بود. نتایج نشان داد زمانی که ابتدا کلر از محلول حذف و سپس به وسیله زئولیت اصلاح شده با اسید، تصفیه شده و غلظت سدیم تا  $87$  درصد کاهش می‌یابد (Gibb et al., 2017)

درصد از کل آب موجود به صورت آب زیرزمینی، آبهای سطحی، آب موجود در گیاهان و اتمسفر موجود است.

بنابراین روش‌های نمک‌زدایی کم‌هزینه آب‌های لب‌شور و آب دریا بسیار مورد توجه خواهد بود. این در حالی است که در طول ۶۰ سال اخیر توجه بسیار زیادی به مبحث نمک‌زدایی شده است. به‌طور کلی نمک‌زدایی یک ابزار فنی برای افزایش منابع آب شیرین است، چه در مناطقی که منابع آب آنها محدود است و چه در مناطقی که منابع آب آنها شور یا لب شور است مانند آبهای شور زیرزمینی، آبهای زهکش‌ها و پساب‌های شور. با توجه به آمار موجود، در سراسر جهان حدود  $7500$  میلیون مترمکعب آب شور توسط روش‌های مختلف نمک‌زدایی، شیرین می‌شود که حدود  $0/2$  درصد از کل آب مصرفی دنیا است (Leitner, 1998).

استحصال آب شیرین از آب دریا توسط بسیاری از کشورهای حوضه مدیترانه و تمدن‌های خاورمیانه بررسی شده است، اما رشد نمک‌زدایی مدرن از سال ۱۹۶۰ توسط برخی کشورهای حاشیه خلیج فارس آغاز شده است. همچنین، پژوهش‌های گسترده برای تجاری‌سازی روش‌های نمک‌زدایی از سال ۱۹۶۰ در امریکا شروع شده است (Buros, 2000).

در ایران نیز از آنجایی که در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک با بارندگی متوسط سالیانه  $250$  میلی‌متر که یک سوم مقدار جهانی است واقع شده، شوری یک مسئله فراگیر و محدودکننده تولید پایدار کشاورزی است، به‌طوری که قسمت‌های زیادی از مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، به‌ویژه فلات مرکزی، دشت‌های ساحلی جنوب و دشت خوزستان، مبتلا به سطوح مختلف شوری هستند.

نمک‌زدایی به سه روش کلی تقسیم می‌شود:

۱- روش‌های گرمایی مانند روش فلش چند مرحله‌ای<sup>۱</sup>، روش تبخیر چند مرحله‌ای<sup>۲</sup> (Ahmed et al., 1998)، روش تراکم بخار<sup>۳</sup>، روش انجماد<sup>۴</sup> و تبخیر.

۲- روش‌های غشایی مانند اسمز معکوس<sup>۵</sup>، الکترودیالیز<sup>۶</sup>، اسمز پیش‌رونده<sup>۷</sup> (Alfonso et al., 2009).

<sup>8</sup> Ion-Exchange Resin (IE)

<sup>9</sup> Adsorption

<sup>10</sup> Liquid-Liquid Extraction

<sup>11</sup> Potash Brine-Impacted Groundwater

<sup>1</sup> Multi-Stage Flash Distillation (MSF)

<sup>2</sup> Multiple-Effect Distillation

<sup>3</sup> Vapor-Compression Desalination (VD)

<sup>4</sup> Freezing Desalination

<sup>5</sup> Reverse Osmosis (RO)

<sup>6</sup> Electro Dialysis (ED)

<sup>7</sup> Forward Osmosis



بنتونیت و آتاپولگیت، مدل سینتیک شبه مرتبه دوم و مدل ایزوترم لانگمیر را دنبال می‌کند. همچنین با افزایش pH ظرفیت جذب بیشتر به دست آمد. تجزیه و تحلیل طیف سنجی FTIR نشان می‌دهد که گروه عملکردی OH مسئول جذب فلز است (Nel et al., 2014). با استناد به پژوهش‌های ذکر شده و ضرورت انجام چنین پژوهشی در کشوری مانند ایران که شاهد مشکل شوری و کمبود منابع آب است، این پژوهش با هدف استفاده از مواد طبیعی مانند زئولیت، بنتونیت، به عنوان موادی ارزان که در اکثر مناطق ایران قابل دسترس است و از طریق روش جذب به عنوان روشی کم‌هزینه، در کاهش/حذف شوری و یون سدیم از آب انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه کیفیت آب دانشکده مهندسی کشاورزی و فناوری پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در شهر کرج انجام شد. زئولیت و بنتونیت استفاده شده در این آزمایش به ترتیب از معادن سمنان و زنجان تهیه شد. اندازه ذرات زئولیت ۳۷ میکرومتر و بنتونیت ۲۹۷ میکرومتر بود. قبل از انجام آزمایش‌ها برای جداسازی املاح اضافی، زئولیت و بنتونیت را به وسیله آب مقطر شستشو داده شدند. برای این منظور هر ۱۵ تا ۲۰ گرم رس را با ۱ لیتر آب مقطر مخلوط کرده و پس از هم زدن به مدت ۲ ساعت اجازه داده شد که ته‌نشین شود. پس از ۲ ساعت آب رویی سیفون شده و این عمل تا رسیدن به هدایت الکتریکی ۱۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر ادامه یافت. سپس رس باقیمانده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس در آون خشک شد.

در آزمایش‌های پیمانه‌ای، محلول‌هایی با غلظت شوری ۶۴، ۳۲، ۲۵/۶، ۱۹/۲، ۱۲/۸، ۶/۴، ۳/۲ و ۰/۶۴ میلی‌گرم در لیتر به وسیله نمک NaCl تهیه شد. در هر محلول ۱۵۰ میلی‌لیتری از هر غلظت شوری، ۵ گرم زئولیت و بنتونیت به صورت جداگانه ریخته و بر روی شیکر مکانیکی به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط شدند. برای هر غلظت سه تکرار در نظر گرفته شد. سپس به منظور جداسازی ذرات بنتونیت، زئولیت، محلول‌ها در لوله فالکون ریخته و با قدرت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. نمونه‌های صاف شده در ظرف‌های نگهداری آب برای انجام تحلیل‌های بعدی نگهداری شد. (آزمایش‌های پیمانه‌ای با مدت زمان ۲۴ ساعت نیز

پائول و همکاران در سال ۲۰۱۷ نیز با اصلاح کلینوپتیلولیت، آن را به یک جاذب با عملکرد دوگانه<sup>۱</sup> برای نمک‌زدایی و خنثی‌سازی pH تبدیل کردند. آنان ابتدا کلینوپتیلولیت را به وسیله سولفوریک اسید اصلاح کرده، سپس در معرض  $\text{Ca(OH)}_2$  قرار دادند. نتایج نشان داد که زئولیت اصلاح شده با اسید چه با کلسیم هیدروکسید و چه بدون آن، به طور قابل ملاحظه‌ای حذف سدیم را بهبود می‌بخشد. حذف سدیم با زئولیت اصلاح شده بین ۴۵ تا ۸۸ درصد متغیر بود. در حالی که زئولیت طبیعی حذفی حدود ۲۵ درصد از خود نشان داد. اصلاح با اسید سبب شد که زئولیت متخلخل تر شود و این دلیلی بر حذف قابل قبول سدیم بود. همچنین، استفاده از زئولیت اصلاح شده با اسید و کلسیم هیدروکسید باعث ایجاد pH خنثی در محلول شد (Paul et al., 2017).

ویوو و همکاران در سال ۲۰۱۷ در پژوهشی ایزوترم‌های جذب، ترمودینامیک و سینتیک جذب نمک توسط زئولیت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ضریب جداسازی  $R_L=0/588$  نشانگر ماهیت روند جذب مطلوب است. همان طور که شدت جذب زیاد و میانگین انرژی آزاد کم نشان می‌دهد، جذب از نوع فیزیکی است. مدل جنبشی شبه مرتبه دوم به خوبی با داده‌های آزمایش متناسب است، بنابراین بر اساس خصوصیات ایزوترم‌های جذب، ترمودینامیک و سینتیک جذب، زئولیت پتانسیل مناسبی برای فرایند نمک‌زدایی از آب دریا را دارد (Wibowo et al., 2017).

برخلاف زئولیت پژوهش‌هایی در زمینه استفاده از بنتونیت در نمک‌زدایی، کمتر انجام شده است و بیشتر پژوهش‌ها مانند زئولیت به جذب فلزات سنگین اشاره دارند. از جمله پژوهش‌هایی که از بنتونیت برای حذف نمک از آب استفاده شده است می‌توان به پژوهش نل و همکاران در سال ۲۰۱۴ اشاره کرد که از بنتونیت و آتاپولگیت برای پیش تصفیه آب دریا در فرایند نمک‌زدایی استفاده کردند. در این پژوهش مشخصات رس که از منطقه آفریقای جنوبی تهیه شده بود با استفاده از XRD، XRF و SEM مشخص شد. برای اطمینان از جذب حداکثر کلیه عناصر ممکن بر روی خاک رس، دولومیت سوخته (CaO، MgO) برای افزایش pH به محلول اضافه شد. نتایج نشان داد که جذب کلسیم، منیزیم و سدیم بر خاک

<sup>1</sup> Dual Functions



جدول ۱- درصد وزنی عناصر در زئولیت و بنتونیت طبیعی

Table 1. Chemical composition [wt. %] of the zeolite and bentonite

Element	Bentonite	Zeolite
Sodium	1.16	2.36
Magnesium	2.92	3.92
Aluminium	13.76	8.65
Silicon	68.33	55.06
Potassium	1.56	3.02
Calcium	11.18	23.68
Titanium	0.1	0.68
Ferrum	0.94	2.62
Manganese	0.049	-

موریلونیت بیشترین مقدار را دارد، بنابراین زئولیت استفاده شده از نوع کلینوپتیلولیت کلسیمی است و نسبت Si/Al برابر ۶/۶۳ است. همچنین عکس‌های SEM برای نمونه زئولیت و بنتونیت نشان می‌دهد که هر دو ساختاری لایه‌ای دارند (شکل ۳ و ۴). بزرگ‌نمایی در تصاویر نشان می‌دهد که صفحات یا میله‌های جداگانه بر روی زئولیت، ترکیبات ظریف از مواد معدنی هستند (Mansouri et al., 2013).

نتایج به دست آمده با نتایجی که ویوو و همکاران در سال ۲۰۱۷ در پژوهش خود به دست آوردند، مغایرت داشت. زئولیت استفاده شده در پژوهش آنها از نوع کلینوپتیلولیت با نسبت Si/Al برابر ۴/۱۶ بود (Wibowo et al., 2017).

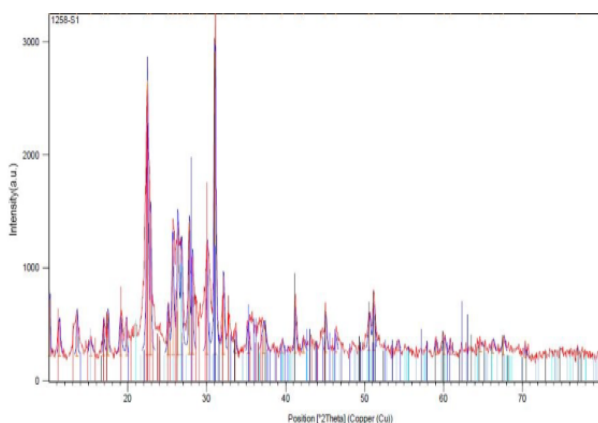


Fig. 1. Natural zeolite X-ray diffraction

شکل ۱- XRD زئولیت طبیعی

انجام شد که به خاطر نبود تفاوت در نتایج، داده‌های آن ارائه نشده است).

همچنین در این پژوهش به اصلاح زئولیت و بنتونیت نیز پرداخته شد. برای اصلاح زئولیت و بنتونیت از اسید کلریدریک ۱ مولار استفاده شد. ابتدا ۴۰۰ گرم زئولیت و بنتونیت به صورت جداگانه در ۱ لیتر محلول ۱ مولار اسید کلریدریک ریخته و اجازه داده شد به مدت ۲۴ ساعت بر روی شیکر مغناطیسی مخلوط شود. سپس محلول با قدرت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ و سپس محلول رویی دور ریخته شد و فالكون با آب مقطر، پر و تکان داده شد تا کامل حل شود و دوباره سانتریفیوژ شد. این عمل تا زمانی ادامه یافت که pH محلول رویی بین ۶/۵ تا ۷ قرار گرفت. سپس زئولیت و بنتونیت شسته شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس در آون خشک شد. همچنین آنالیزهای SEM<sup>۱</sup>، EDx<sup>۲</sup>، XRD<sup>۳</sup>، BET<sup>۴</sup> و ظرفیت تبادل کاتیونی<sup>۵</sup> نیز بر روی زئولیت و بنتونیت برای بررسی‌های بیشتر انجام شد.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج آنالیزهای فیزیکوشیمیایی رس‌ها نشان داد که ظرفیت تبادل کاتیونی برای زئولیت و بنتونیت به ترتیب ۶۷ و ۴۳ میلی‌اکیوالانت بر ۱۰۰ گرم خاک خشک است که ظرفیت کاتیونی به دست آمده برای زئولیت به نسبت مقدار مطرح شده در پژوهش ژائو و همکاران در سال ۲۰۰۸ کمتر است. مقداری که توسط آنها برای زئولیت کلینوپتیلولیت در دو منطقه غرب آمریکا گزارش شده ۱۱۲ و ۱۳۶ میلی‌اکیوالانت بر ۱۰۰ گرم خاک خشک است (Zhao et al., 2008).

همچنین نتایج آنالیز EDx یا طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نشان می‌دهد که در زئولیت و بنتونیت، مقدار کلسیم نسبت به سدیم بیشتر است (جدول ۱). بنابراین می‌توان آنها را بنتونیت و زئولیت کلسیمی خواند. همچنین XRD (شکل ۱ و ۲) نشان می‌دهد که در نمونه زئولیت، کلینوپتیلولیت و بنتونیت، مونت

<sup>1</sup> Scanning Electron Microscopy (SEM)

<sup>2</sup> Energy Dispersive X-Ray (EDx)

<sup>3</sup> X-Ray Diffraction (XRD)

<sup>4</sup> Brunauer-Emmett-Teller (BET)

<sup>5</sup> Cation Exchange Capacity





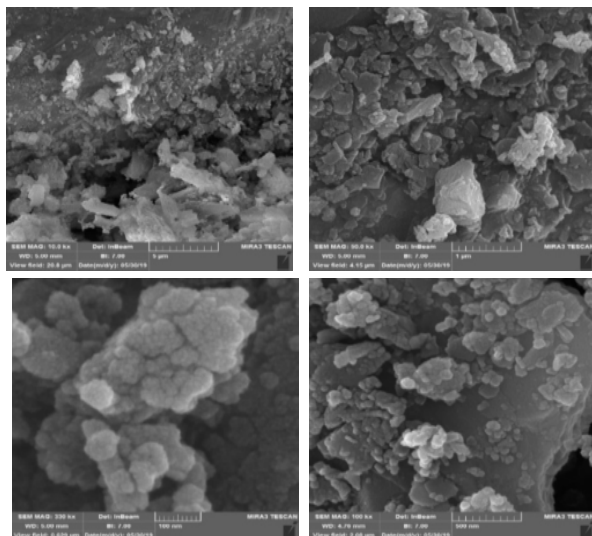


Fig. 4. SEM of natural zeolite

شکل ۴- عکس میکروسکوپ الکترونی زئولیت طبیعی

بسیار کمتر از زئولیت‌های استفاده شده در پژوهش‌های (Santiago et al., 2016, Zhoo et al., 2008, Wibowo et al., 2017, Paul et al., 2017) برای نمک زدایی بود.

داده‌های آنالیز BET در جدول ۲ نشان می‌دهد که سطح ویژه زئولیت ۱۶/۵۶۹ مترمربع بر گرم و بنتونیت ۸۳ مترمربع بر گرم است. همچنین حجم مزوپورها برای زئولیت و بنتونیت به ترتیب ۰/۰۶۹ و ۰/۱۹ سانتی‌مترمکعب بر گرم است. مقدار به‌دست‌آمده از آنالیز زئولیت نسبت به مقداری که منصور و همکاران در سال ۲۰۱۳ از زئولیت کلینوپتیلولیت منطقه سمنان در پژوهش خود ارائه دادند، کمتر است. در پژوهش آنها، سطح ویژه و حجم مزوپورها به ترتیب ۸۴/۴۵ مترمربع بر گرم و ۰/۰۵۳ سانتی‌مترمکعب بر گرم گزارش شده بود (Mansouri et al., 2013).

همان‌طور که از جدول ۲ مشاهده می‌شود سطح ویژه زئولیت استفاده شده در این پژوهش با پژوهش‌های قبلی اختلاف قابل‌تاملی دارد و بسیار کمتر بود. مقدار به‌دست‌آمده برای بنتونیت با مقدار حاصل شده در پژوهش مزینانی و همکاران در سال ۲۰۱۵ که از بنتونیت زنجان برای حذف متیلن‌بلو استفاده کرده‌اند، بسیار نزدیک بود (Mazinani et al., 2015).

با انجام آزمایش‌های پیمانه‌ای مشخص شد که میزان افزایش مقدار سدیم در بنتونیت و زئولیت اصلاح شده با اسید نسبت به میزان افزایش در بنتونیت و زئولیت طبیعی کمتر است که می‌تواند

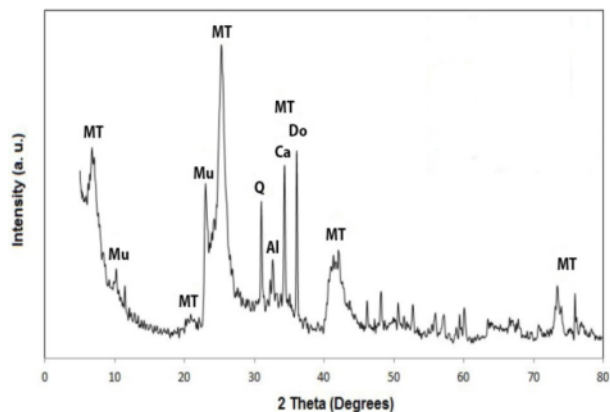


Fig. 2. Natural bentonite X-ray diffraction

شکل ۲- XRD بنتونیت طبیعی

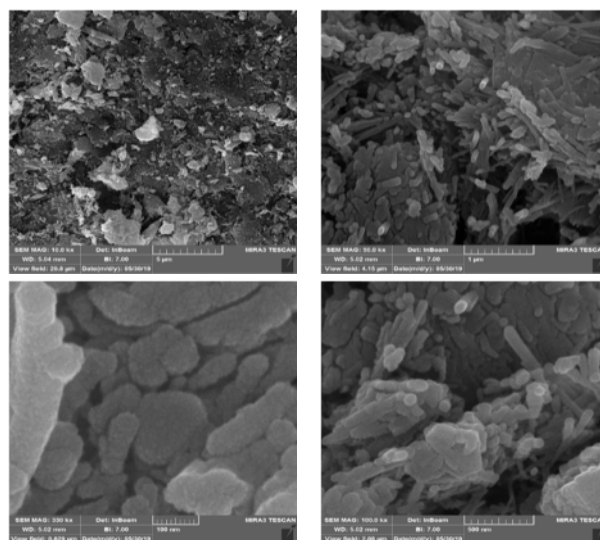


Fig. 3. SEM of natural bentonite

شکل ۳- عکس میکروسکوپ الکترونی بنتونیت طبیعی

طبق گفته شری در سال ۲۰۰۳ در زئولیت‌های با نسبت Si:Al بالا، تبادل کامل یون‌های یک ظرفیتی با یون‌های دوظرفیتی بسیار دشوار می‌شود (Sherry, 2003).

همچنین، ونک و همکاران در سال ۲۰۱۶ دریافتند که هر چه نسبت Si به Al کمتر باشد، تبادل کاتیونی بیشتری حاصل می‌شود. این عامل به این دلیل است که هر جایگزینی Si به وسیله Al منجر به عدم تعادل بار بیشتر می‌شود (Wenk and Bulakh, 2016).

همچنین ژائو و همکاران دریافتند که میزان زیاد کلسیم زئولیت همیشه به تبادل و جذب زیاد سدیم منجر نمی‌شود (Zhao et al., 2008).

ظرفیت تبادل کاتیونی زئولیت استفاده شده در این پژوهش نیز



جدول ۲- پارامترهای ساختار متخلخل زئولیت و بنتونیت به روش BET

Table 2. Parameters of the zeolite and bentonite porous structures by BET method

	Bentonite	Zeolite
Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	79	16.569
Pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	0.21	0.069
Pore diameter (nm)	8.3	1.64

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود مقدار افزایش هدایت الکتریکی در زئولیت و بنتونیت اصلاح شده، کمی بیشتر از افزایش هدایت الکتریکی در زئولیت و بنتونیت طبیعی است. دلیل این امر می‌تواند آزاد شدن یون H<sup>+</sup> باشد که هنگام اسیدشویی وارد ساختار بنتونیت و زئولیت شده است. همچنین اسیدشویی و وجود یون H<sup>+</sup>، سبب ناپایداری ساختار رس و در نتیجه دلیل آزادسازی بیشتر یون‌های موجود در زئولیت و بنتونیت شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های پیمان‌های انجام شده به وسیله زئولیت و بنتونیت طبیعی اصلاح شده با اسید نشان داد که این دو ماده تهیه شده از معادن ایران برای فرایند نمک‌زدایی مناسب نبوده و سبب افزایش مقدار سدیم و هدایت الکتریکی محلول می‌شوند. آنالیزهای BET و EDx انجام شده بر زئولیت و بنتونیت نشان داد که برای استفاده از این مواد در نمک‌زدایی نمی‌توان به قطعیت کلی رسید و لازم است مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها بررسی شود. هرچه سطح ویژه زئولیت کمتر و نسبت Si:Al آن بیشتر باشد، تبادل کاتیونی به ندرت اتفاق می‌افتد. برای بنتونیت به دلیل نبود پژوهش‌های کافی نمی‌توان نتیجه مشخصی بیان کرد.

#### ۵- قدردانی

از اساتید گرامی دکتر حسن توفیقی، دکتر محسن فرحبخش و دکتر مهدی جنوبی که ما را در انجام این پژوهش مورد لطف و عنایت خود قرار دادند بسیار سپاسگزاریم.

به دلیل شستشوی سدیم در حین اسیدشویی باشد، اما از آنجایی که مقدار افزایش سدیم قابل توجه است، اسیدشویی زئولیت و بنتونیت آن‌چنان مؤثر نبوده است (شکل ۵).

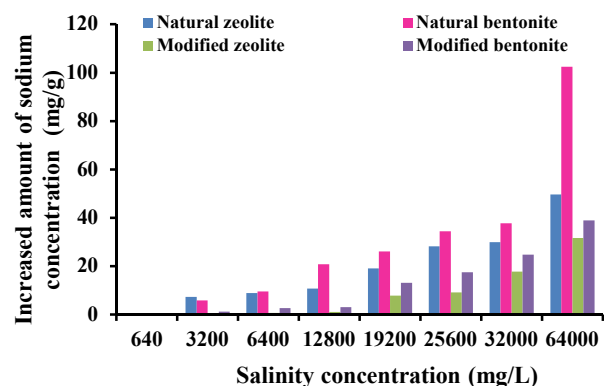


Fig. 5. Increased amount of sodium in solution by natural and modified zeolite and bentonite

شکل ۵- افزایش مقدار سدیم در محلول به وسیله زئولیت و بنتونیت طبیعی و اصلاح شده

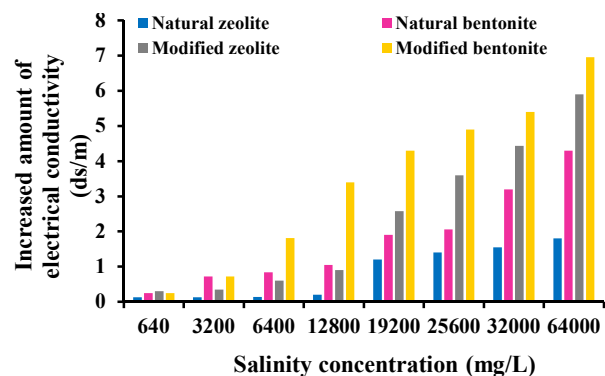


Fig. 6. Increased amount of electrical conductivity in solution by natural and modified zeolite and bentonite

شکل ۶- افزایش مقدار هدایت الکتریکی در محلول به وسیله زئولیت و بنتونیت طبیعی و اصلاح شده



## References

- Ahmed, S., Chughtai, S. & Keane, M. A. 1998. The removal of cadmium and lead from aqueous solution by ion exchange with Na.Y zeolite. *Separation and Purification Technology*, 13, 57-64.
- Alfonso, L., Jonoski, A. & Solomatine, D. 2009. Multiobjective optimization of operational responses for contaminant flushing in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136, 48-58.
- Aghakhani, A., Mousavi, S. F. & Mostafazadeh-Fard, B. 2013. Desalination of saline water with single and combined adsorbents. *Desalination and Water Treatment*. 51(7-9), 1928-1935.
- Buros, O. K. 2000. *The ABCs of Desalting*, International Desalination Association, Topsfield, Massachusetts, USA.
- Engelman, R. 2000. *People in the balance. Population and natural resources at the turn of the millennium*, Population Action International, Washington, USA.
- Gibb, N. P., Dynes, J. J. & Chang, W. 2017. Synergistic desalination of potash brine-impacted groundwater using a dual adsorbent. *Science of the Total Environment*. 593, 99-108.
- Günay, A., Arslankaya, E. & Tosun, I. 2007. Lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: adsorption equilibrium and kinetics waste paper recycling inventory view project lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: adsorption equilibrium and kinetics. *Journal of Hazardous Materials*, 146, 362-371.
- Kumar, P. S., Ramalingam, S., Sentamarai, C., Niranjanaa, M., Vijayalakshmi, P. & Sivanesan, S. 2010. Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell: studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions, *Desalination*, 261(1-2), 52-60.
- Leitner, G. F. 1998. Is there a water crisis?, *International Desalination and Water Reuse Quarterly*, 7(4), 10-21.
- Mansouri, N. Rikhtegar, N., Panahi, H. A., Atabi, F. & Shahraki, B. K. 2013. Porosity, characterization and structural properties of natural zeolite - clinoptilolite - as a sorbent'. *Environment Protection Engineering*, 39(1), 139-152.
- Mazinani, B., Divandari, M., Bakhtiari, L. & Haghighatzadeh, A. 2015. Investigation of physical properties and water pollution of Iranian bentonite in Zanjan black house. *Water Engineering Conference*, Tehran, Iran. (In Persian)
- Naidu, G., Jeong, S., Johir, M. A. H., Fane, A. G., Kandasamy, J. & Vigneswaran, S. 2017. Rubidium extraction from seawater brine by an integrated membrane distillation-selective sorption system. *Water Research*, 123, 321-331.
- Nel, M., Frans, B. W. & Fosso-Kankeu, E. 2014. *Adsorption Potential of Bentonite and Attapulgite Clays Applied for the Desalination of Sea Water*, in 6<sup>th</sup> International Conference on Green Technology, Renewable Energy and Environmental Engineering, 171-175. Cape Town, South Africa.
- Paul, B., Dynes, J. J. & Chang, W. 2017. Modified zeolite adsorbents for the remediation of potash brine-impacted groundwater: built-in dual functions for desalination and pH neutralization. *Desalination*, 419, 141-151.
- Santiago, O., Walsh, K., Kele, B., Gardner, E. & Chapman, J. 2016. Novel pre-treatment of zeolite materials for the removal of sodium ions: potential materials for coal seam gas co-produced wastewater. *SpringerPlus*, 5(1), 1-16.
- Shahmirzadi, M. A. A., Hosseini, S. S. & Tan, N. R. 2016. Enhancing removal and recovery of magnesium from aqueous solutions by using modified zeolite and bentonite and process optimization. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(12), 3529-3540.





- Sherry, H. S. 2003. *Ion Exchange*. In Auerbach, S. M., Carrado, K. A. & Dutta, P. K. *Handbook of Zeolite Science and Technology*. 1<sup>st</sup> Ed. Boca Raton Pub. Florida, USA.
- Velazquez-Jimenez, L. H., Vences-Alvarez, E., Flores-Arciniega, J. L., Flores-Zuñiga, H. & Rangel-Mendez, J. R. 2015. Water defluoridation with special emphasis on adsorbents-containing metal oxides and/or hydroxides: a review. *Separation and Purification Technology*, 150, 292-307.
- Wenk, H. and Bulakh, A. 2016. *Minerals: Their Constitution and Origin*. 2<sup>nd</sup> Ed. Cambridge University Press Publisher.
- Wibowo, E., Rokhmat, M. & Abdullah, M. 2017. Reduction of seawater salinity by natural zeolite (clinoptilolite): adsorption isotherms, thermodynamics and kinetics. *Desalination*, 409, 146-156.
- Zhao, H., Vance, G. F., Ganjegunte, G. K. & Urynowicz, M. A. 2008. Use of zeolites for treating natural gas co-produced waters in wyoming, USA. *Desalination*, 228(1-3), 263-276.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

