

مقاله مروری استحصال لیتیم از شورابه‌ها

نگین شیخی^۱، سرور سرن

^۱ کارشناسی ارشد رشته شیمی تجزیه، دانشگاه آزاد اسلامی اهواز، اهواز، ایران

^۲ کارشناسی ارشد شیمی آلی، دانشگاه دولتی یاسوج، یاسوج، ایران

نام و نشانی ایمیل نویسنده مسئول:

نگین شیخی (Negin.sheikhi6@gmail.com)

تاریخ ارسال: ۹۹/۵/۴

چکیده

لیتیم فلزی با ارزش، با کاربردهای صنعتی بسیار فراوان می‌باشد. ذخایر این عنصر به دو صورت زیرزمینی و محلول در آب یافت می‌شود. هرچند که مطالعات زمین شناسی بر امکان تشکیل ذخایر و پتانسیل‌های غنی از لیتیم در داخل کشور تاکید داشته، لیکن به دلیل عدم درک صحیح از اهمیت این فلز استراتژیک و ضعف جدی در انجام مطالعات اکتشافی و بهره‌برداری، معادن فعال در زمینه استحصال لیتیم در سطح کشور وجود ندارد. با این حال حضور شورابه‌های وسیع و گسترده در سطح کشور و همجوار بودن ایران با آب‌های آزاد، دریای خزر و خلیج فارس، تمامی نگرانی‌ها بابت تامین مواد اولیه برای استحصال این ماده با ارزش مرتفع می‌گردد. در این زمینه می‌توان علاوه بر موارد یاد شده به برخی دیگر از منابع آبی شامل: دریاچه نمک طشک، هامون و تالاب‌های گاوخونی، تالاب آلاگل و ... با محتوای لیتیم اشاره نمود. بنابراین به نظر می‌رسد با توجه به برخورداری کشور از منابع اولیه تامین لیتیم از یک سو و نیاز روز افزون داخلی و خارجی به تامین این عنصر استراتژیک از سوی دیگر، شرایط برای یک سرمایه گذاری موفق و بلند مدت مهیا باشد. در حال حاضر با توجه به وجود شورابه‌های طبیعی حاوی لیتیم و آب‌های بی‌انتهای دریاها، جنوب و شمال کشور، انتظار می‌رود تا با عملیاتی کردن این منابع بتوان بخش عمده‌ای از نیاز داخلی کشور را تامین نمود.

واژگان کلیدی: لیتیم، شورابه‌ها، منابع آبی، نیاز روز افزون، نیاز داخلی

مقدمه

لیتیوم یکی از مهم‌ترین مواد اولیه برای تولید شیشه، سرامیک، مواد هسته‌ای، دارویی و باتری است. تقریباً ۸۰ درصد از کل ذخایر لیتیم مستقر در سطح جهان، آب نمک دریاچه‌ای است [۱]. در اواسط دهه ۱۹۹۰ چندین شرکت به استخراج لیتیم از شورابه روی آورده و نشان

داده‌اند که این روش در مقایسه با روش‌های استخراج فلز از معادن زیرزمینی و حتی معادن روباز کاملاً مقرون به صرفه می‌باشد. با کاربرد لیتیم در ساخت باتری‌های لیتیومی، تقاضا برای این فلز با ارزش به شدت افزایش یافته، به طوری که میزان تقاضا در سال ۲۰۰۷ کاملاً چشمگیر بوده است [۲]. طی دهه ۲۰۰۰ با افزایش تقاضای لیتیم جهت بهره‌گیری در ساخت باتری‌های لیتیومی شرکت‌های فراوانی به استخراج لیتیم از منابع آبی علی‌الخصوص شورابه‌ها روی آوردند [۳-۴].

طبق آخرین گزارشات منتشر شده از سوی سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا، کل ذخایر شناخته شده هشت کشور اصلی کننده لیتیم در سال ۲۰۱۲ حدود ۱۳ میلیون تن برآورد گردیده است. در حال حاضر کل منابع شناخته شده لیتیم در ایالات متحده آمریکا تقریباً ۵/۵ میلیون تن برآورد گردیده و این در حالی است که کل منابع لیتیم در سایر کشورهای جهان حدود ۳۴ میلیون تن لیتیم می‌باشد. در میان بولیوی و شیلی که به ترتیب ۹ میلیون تن و ۷/۵ میلیون تن لیتیم بیشترین سهم منابع شناخته شده لیتیم را دارا می‌باشند. این مقدار در کشورهای آرژانتین، چین، استرالیا، به ترتیب ۶/۵، ۴/۵ و ۱/۷ میلیون تن تخمین زده می‌شود. این در حالیست که منابع شناخته شده لیتیم در کشورهای کانادا، کنگو، روسیه، صربستان حدود ۱ میلیون تن تعیین گردیده است. همچنین کل منابع شناخته شده لیتیم در برزیل نیز حدود ۱۸۰۰۰۰ تن می‌باشد [۵].

در حال حاضر باتوجه به افزایش روز افزون مصرف لیتیم در جهان، منابع آبی شامل آب دریاها و شورابه‌ها به عنوان منابع غنی از لیتیم مورد توجه قرار گرفته‌اند. غلظت لیتیم در آب دریاها تقریباً کم، ثابت و برابر ۰/۱۷۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. لیکن باتوجه به حجم عظیم منابع آبی، میزان کل لیتیم موجود در آب دریاها بسیار زیاد و تا مقدار $10^{11} \times 2/4$ تن قابل برآورد می‌باشد [۶]. برای جداسازی مواد معدنی از آب دریا از روش‌های مختلفی شامل جذب سطحی^۱، تبادل یونی^۲، استخراج حلالی^۳، فلوتاسیون^۴، رسوب دهی^۵، تیخیر^۶، تقطیر^۷، الکترولیز^۸، الکترودیالیز^۹ استفاده می‌شود [۷-۸].

یافته‌ها

۱. سنتز جاذب یونی لیتیم

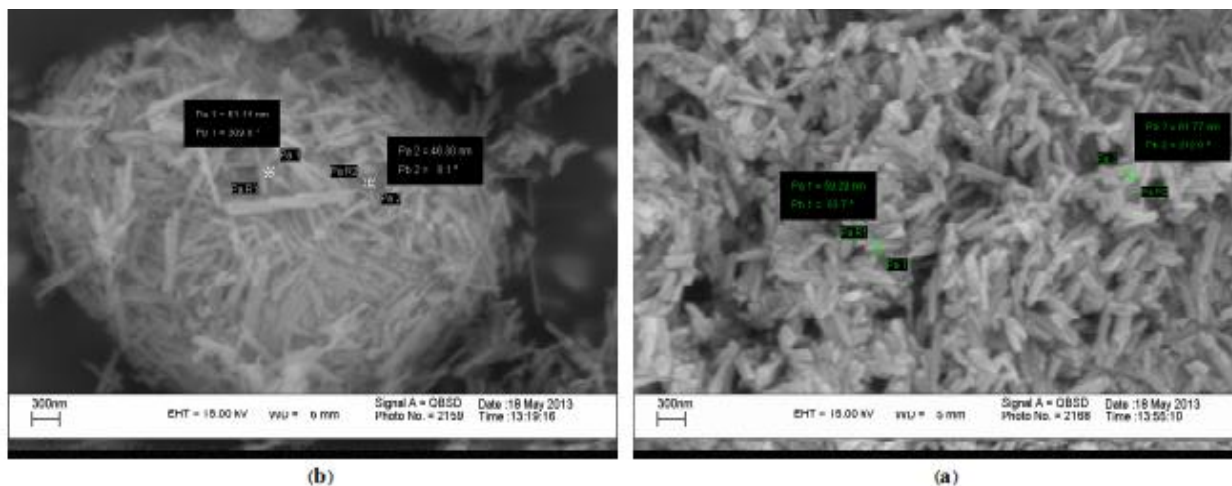
طی دو سال گذشته تحقیقات زیادی برای بازیابی لیتیم از آب دریا با استفاده از جاذب‌های غیر آلی صورت گرفته است. از میان این جاذب‌های غیر آلی، اکسیدهای اسپینلی منگنز به دلیل تمایل شدید به جذب یون‌های لیتیم بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این روش با فراهم نمودن بستری مناسب برای استخراج لیتیم از آب دریا و شورابه‌های کشور، سعی شده است تا با استفاده از روش هیدرو ترمال کنترل شده نسبت به سنتز جاذب یونی Li-MnO_2 اقدام گردد و خواص تبادل یونی این جاذب‌ها توسط آنالیزهای XRD و SEM بررسی شوند.

آماده سازی پیش ماده جاذب یونی Li-MnO_2 با سنتز هیدرو ترمال کنترل شده از طریق اکسیداسیون Mn^{+2} توسط $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ انجام شد. برای این منظور ابتدا ۰/۲۵ مول از کلریدهای آزمایشگاهی $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ و $(\text{NH}_4)_2 \text{S}_2\text{O}_8$ به ۷۵۰ میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه اضافه گردید و برای تشکیل یک محلول همگن در دمای محیط مخلوط شد و در ادامه به مدت ۱۲ ساعت به درون یک اتوکلاو فولادی ضد زنگ با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد منتقل گردید. سپس محصول جامد سیاه رنگ تولید شده فیلتر به منظور حذف یون‌های احتمالی باقیمانده با عنوان (MO) به مدت ۸ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در هوای ثابت خشک شد.

پیش ماده‌های اولیه متناظر Li / MnO_2 با عناوین LMO_1 و LMO_2 به ترتیب با اشباع مرطوب محلول آبی (یک مولار با نسبت $\text{Li/Mn} = 65 / (\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O})$ و LiNO_3 به پودر MO تهیه شده‌اند.

در ادامه سوسپانسیون‌های مذکور به طور جداگانه جهت حذف آب، در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. هریک از پودر های خشک شده به ترتیب به مدت ۶ و ۱۲۰ ساعت در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد اکسید شده تا پیش ماده نهایی LMO_1 و LMO_2 تولید شوند. استخراج لیتیم از هریک از پیش‌ماده‌های تولید شده با هم زدن ۴ گرم از نمونه‌ها در ۵۰۰ میلی‌لیتر محلول اسید هیدروکلریک ۰/۵ مولار طی ۱۲۰ ساعت تا استخراج کامل یون لیتیم ادامه یافت.

سپس مواد اسید شویی شده، فیلتر شده و با آب دیونیزه شسته شدند و در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۸ ساعت برای تهیه جاذب‌های یونی نهایی MnO_2 با عناوین HMO_1 و HMO_2 خشک شدند. تصاویر SEM جاذب‌های یونی HMO_1 و HMO_2 به ترتیب در شکل‌های a و b نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویر SEM جاذب یونی : a: (HMO_1) و b: (HMO_2)

نتایج موجود بر تشکیل مورفولوژی مشابه برای دو نمونه با اندکی تفاوت در اندازه ذرات، در نتیجه تغییر شرایط سنتز حکایت دارد. این تصاویر حضور مقدار زیادی ذرات کروی شکل با مورفولوژی خاریستی حاصل از تجمع نانولوله‌ها را نشان می‌دهد. در تصاویر مشخص است که جاذب HMO_2 در مقایسه با جاذب HMO_1 از محدوده‌ی ابعاد کوچکتری برخوردار می‌باشد. هرچه اندازه ذرات کوچکتر باشد سطح موثر ذرات افزایش یافته و در نتیجه جذب سطحی لیتیم افزایش می‌یابد [9]. اما افزایش ظرفیت جذب در واقع به ساختار ویژه ذرات جاذب خصوصاً ساختار متخلخل داخلی آن‌ها مربوط می‌گردد. لذا کاهش اندازه ذرات علی‌الخصوص کاهش اندازه ذرات طولی ذرات جاذب موجب شده تا یون لیتیم موجود در محلول به واسطه کوتاه شده مسیر تبادل بین پروتون و یون لیتیم، ساده‌تر و سریع‌تر جذب گردد.

۲. ترسیب

فرآیند ترسیب افزودن مواد شیمیایی برای تغییر حالت مواد جامد محلول در آب از حالت محلول به جامد برای تسهیل جداسازی می‌باشد. از میان چندین عامل ایجاد رسوب گوناگون، نمک آلومینوم بهترین عملکرد برای بازیابی لیتیم از آب ژئوترمال را از خود نشان داده است. pH مناسب برای بازیابی لیتیم در این روش در محدوده ۱۳-۱۰ است و استفاده از $NaAlO_2$ بهتر از $AlCl_3$ بوده است. با خلوص بالای محلول $NaAlO_3$ به عنوان عامل ایجاد رسوب، ۹۹-۹۸٪ بازیابی برای لیتیم در محدوده‌ی pH ۱۱/۵ از آب ژئوترمال عاری از Ca و SiO_2 حاصل شده است. با وجود منابع غنی از لیتیم منابع آب نمک شامل غلظت بالایی از منیزیم است که منجر به دشواری تولید لیتیم می‌شود. بنابراین کلسیم و منیزیم قبل از تولید لیتیم باید از شورابه‌ها توسط اکسالیک اسید حذف گردد. برخی از فرآیندهای ترسیب از دریا و شورابه‌ها به طور خلاصه در جدول ۱ گزارش شده است [10].

جدول ۱- گزارش‌های فرآیند ترسیب برای بازیابی لیتیم از دریا و شورابه‌ها

محقق	منبع / مواد خام	فرآیند	شرایط	درصد بازیابی / ملاحظات
Yoshinaga et al. (1986)	محلول سنتزی، آب زمین گرمایی (Li 10 mg/L)	ترسیب	pH ۱۲/۵ برای Al mg/L ۱۰۰۰-۵۰	٪۷۰ Li

بازیابی لیتیم کربنات خالص	pH مرحله اول: ۱۱/۵-۱۲/۵: مرحله دوم: Na_2CO_3 در دمای 100°C	ترسیب دو مرحله ای	آب دریا ($\text{Li} \cdot 0.18 - 0.2 \text{ mg/L}$)	Um and Hirato (2012)
Li_2CO_3 ترسیب به صورت	pH مرحله اول: ۱۱/۳: مرحله دوم: اگزالات سدیم ، $80-90^\circ\text{C}$	دو مرحله ترسیب با آهک و اگزالات سدیم	دریاچه نمکی Uyuni بولیوی ($\text{Mg} 18 - 15 \text{ g/L}$) ($\text{Li} \cdot 0.9 - 0.7 \text{ g/L}$)	An et al.(2012)
نمک LiCl برای استخراج Li در یک واحد شیمیایی به عنوان خوراک وارد می شود	جداسازی Mg به صورت هیدروکسید و Ca به صورت سولفات	ترسیب ($2/5\text{L}$) از حوضچه خورشیدی) با آهک و Na_2SO_4	آب شور دریاچه آرژانتین	Clarke(2013)
Li_2CO_3 بازیابی	$25-90^\circ\text{C}$ دما pH: ۷-۱۴	ترسیب دو مرحله ای با کربنات سدیم توسط Na_2CO_3	آب دریا ژاپن	Um and Hirato (2014)

۳. جذب سطحی

جذب سطحی یک فرآیند جداسازی است که در آن برخی از اجزاء فاز سیال به سطح یک جاذب سطحی جامد منتقل می شود. معمولاً ذرات ریز جاذب در بستر ثابتی نگه داشته می شوند و سیال به صورت پیوسته از میان بستر عبور داده می شود تا جامد تقریباً سیر شود و دیگر نتوان به جداسازی مورد نظر دست یافت. جذب سطحی را می توان تمایل مولکول های فاز سیال برای چسبیدن به سطح جامد تعریف کرد. در جذب سطحی از جامد متخلخل استفاده می شود که این منافذ سطح بسیار زیادی را ایجاد می کنند. یعنی فقط سطح خارجی نداریم و تخلخل نیز داریم و هر چقدر سطح جاذب افزایش یابد، مقدار ظرفیت جذب نیز افزایش می یابد.

عامل اساسی در سیستم جذب، جاذب است. برخی جاذب ها و مواد تبادل کننده یون، گزینش پذیری زیادی برای یون های لیتیم از خود نشان دادند. کنکو و همکارانش ویژگی های جذب سطحی لیتیم از ژل آلومینیم - منیزیم را بررسی نمودند و سایت ها و منافذ اسیدی ضعیف سطح با قطر ۲۰-۳۰ آنگستروم را به عنوان عوامل اصلی جذب سطحی لیتیم گزارش دادند. بنابراین، عواملی چون سطح تماس و پایداری جاذب مهم ترین عوامل در فرآیند جذب سطحی محسوب می شوند. این عوامل به فاز و مورفولوژی جاذب ها بستگی دارند. افزایش سطح تماس میان جاذب و محلول، یکی از مواردی است که می تواند ظرفیت جذب سطحی مواد جاذب را بهبود بخشد. راهی موثر برای انجام این امر، ایجاد سطح زیاد با درج سایت های بیشتری از مواد جاذب لیتیم می باشد (Zhou,ZH. Uang,SH ,Qin,W. and Fei,W,2013).

جاذب های مختلفی برای بازیابی گزینشی لیتیم از آب دریا و شورآب ها مورد استفاده قرار گرفته اند. در روش جذب سطحی تبادل گرهای یونی معدنی خاصی همچون منگنز اکسید نوع اسپینل گزینش پذیری بسیار بالایی برای لیتیم از آب دریا نشان دادند [10].

روش جذب برای بازیابی لیتیم از آب دریا روش نسبتاً جذابی است زیرا مواد خاصی مانند اکسید منگنز از نوع اسپینل، تمایل بسیار زیادی به سمت تنها، لیتیم نشان می دهند. با این حال، این روش زمان بسیار طولانی را برای جداسازی لیتیم از آب دریا لازم دارد و بازده استخراج کم است. علاوه بر این یک مرحله تصفیه نیز لازم دارد که مقرون به صرفه نمی باشد. در جدول ۲ نمونه هایی از جداسازی لیتیم از

شورابه‌ها توسط جاذب‌های مختلف آورده شده است (Meshram P, Pandey B.D and , Mankhand ,T.R.,2014 ;Swain,B,2017).

محقق (سال)	منبع/مواد خام	جاذب به کار رفته	شرایط	حداکثر بازیابی جذب
Chitikar et al (2001)	آب دریا	$H_{1.6}Mn_{1.6}O_4$	جاذب: ۲۰۰ میلی گرم، آب دریا: ۵۰ لیتر ۴۰ هفته: دفع به وسیله HCl ۰/۵ مولار، ۱ روز، $30.15^{\circ}C$ روز	جاذب ۴۰ mg Li/g
Umeno et al.(2002)	آب دریا (Li 10 mg/L)	اکسید منگنز نوع اسپینل	$30.15^{\circ}C$ روز	جذب لیتیم: جاذب ۱۰/۶ mg Li/g
Yoshizuka et al. (2006)	آب دریا (Li ۰/۱۵ mg/L)	MnO_2 -λ(دانه ای)	۱۵۰ روز	بازیابی ۲۴۶ گرم LiCl در ۷۹۱ گرم نمک ته نشین شده
Chung et al (2004,2008)	آب دریا مصنوعی pH ۸/۰۱ و Li ۰/۲ mg/L	غریبال یونی نوع اکسید منگنز اسپینل‌های : $HMg_{0.5}Mn_{1.5}O_4(I)$ $HZn_{0.5}Mn_{1.5}O_4(II)$	جذب سطحی در HCl ۰/۴ مولار، ۵ روز	جذب سطحی: ۸۸٪ Li، جذب I و ۸۹٪ Li با جاذب II. ظرفیت جذب تعادلی: و ۳۰/۳ mg/g(I) ۳۳/۱ mg/g(II)
Wajima et al(2012)	آب دریا (Li 1 mmol/L)	HMn_2O_4	$24.60^{\circ}C$ ساعت	جاذب ۱/۵۳ mmol/g
Chitikar et al (2013)	آب شور(دریاچه ، Uyuni ، بولیوی)	$Li_mMg_xMn^yMn_zO_4$ $0 < X \leq 0.5$	۲۴ ساعت ، pH ۶/۵	جاذب ۲۳-۲۵ mg/g
Takeuchi(1980)	آب دریا (Li ۰/۱۹۲ mg/L)	رسوب سطحی حاصل از خوردگی Al	$30.30^{\circ}C$ ، ۱۰ روز	Li ۰/۳۴
Dong et al(2007)	آب تلخ دریاچه نمک	هیدرات آلومینیوم LiOH نسبت ۲ مولار	pH ۵/۸	جذب سطحی : ۰/۶ - ۰/۹ mg/g
Hawash et al(2010)	آب تلخ مصر (۵/۵ ، ۱۹/۵ mg/L) ۸/۸	$Al(OH)_3$	$30.30^{\circ}C$ ، pH ۹	جاذب ۱۲۳ mg/g
Clarke(2013)	آب شور (دریاچه Hombre Muerto آرژانتین)	هیدرات آلومینیوم	محلول LiCl - ۱٪ Li (۲۰ مرتبه تغلیظ شده) با تبخیر خورشیدی	Li رقیق توسط اسید جذب شده و به وسیله سدیم کربنات رسوب داده می شود
Moazeni et al (2015)	آب دریا و دریاچه‌های نمک	نانو لوله تیتانیوم	جاذب: قطر لوله ۵۰ nm- طول ۷۰-۲ میکرومتر:	سنتری ۳۹/۴۳ mg/g:TiO ₂

	دفع توسط HCl ۰/۵ مولار، ۲۴ ساعت، و خشک شدن در دمای ۱۲۰°C به مدت ۸ ساعت		رقیق	
--	---	--	------	--

۴. استخراج به وسیله حلال آلی

برای استخراج یون لیتیم از دریاچه نمکی که نسبت مولار آن بالا می‌باشد از ترکیب ماده تری بوتیل فسفات (TBP) به‌همراه مایع یونی ۱- بوتیل ۳- متیل ایمیدازولیوم هگزا فلوروفسفات استفاده می‌گردد که نسبت ترکیبی فاز آلی به آبی در شرایط بهینه ۲ به ۱ می‌باشد. و pH مناسب برای این واکنش ۵ در نظر گرفته شده است که راندمان استخراج لیتیم را به ۹۳-۹۰٪ رسانیده است. همزمان با این بازده برای لیتیم، بازده استخراج یون منیزیم نیز برابر با ۶/۵۵٪ بوده است. سپس از متمرکز کردن فاز آبی، منیزیم درون محلول‌ها، محلول قلیایی به منیزیم هیدروکسید تبدیل و به شکل رسوب از محلول جدا شده و در انتها با اضافه کردن سدیم کربنات به محلول آبی لیتیم کربنات استخراج می‌گردد [11].

۵. تبادیل یونی

تبادیل یون یک واکنش برگشت پذیر است که در آن یون‌های یک محلول با یون‌های دارای بار الکتریکی مشابه موجود روی رزین عویض می‌گردند. وقتی که رزین یون‌های قابل تبادل خود را از دست داد نیاز به احیاء دارد. تبادیل یونی برای حذف تمام کاتیون‌ها و آنیون‌ها از آب استفاده می‌شود. در حذف کل مواد معدنی، رزین‌های کاتیونی یون‌های هیدروژن را با کاتیون‌ها مبادله می‌نماید و رزین‌های آنیونی یون‌های هیدروکسید را با آنیون‌ها مبادله می‌نمایند. روش تبادل یون برای آب‌های شور یا تلخ که شامل مقادیر زیاد کلسیم و منیزیم می‌باشند، می‌تواند استفاده شود مطالعات اولیه نشان دادند که رزین‌های تبادل یونی آلی گزینش پذیری پایین‌تری برای یون‌های لیتیم نمایش می‌دهند. با این وجود، ثابت شده است که ته نشین سازی به دنبال تبادل یونی می‌تواند برای جداسازی و بازیابی لیتیم از یک محلول ترکیبی کلرید های کلسیم و منیزیم موثر واقع شود. تا به حال رزین دووکس برای تبادل گزینشی H^+ با کاتیون‌های موجود در آب دریا K^+ ، Na^+ ، Li^+ و Mg^{+2} مورد استفاده قرار گرفته و پژوهش‌هایی با استفاده از رزین‌های تبادل کاتیونی سولفانان و رزین‌های آغشته به حلال مناسب برای استخراج یون لیتیم انجام شده است.

مراجع

1. Shaofang Hu, Ying Sun, Min Pu, Rongping Yun, Xu Xiang, T. (2019), "Determination of boundary conditions for highly efficient separation of magnesium and lithium from salt lake brine by reaction-coupled separation technology, Separation and Purification Technology. journal homepage: www.elsevier.com/locate/seppur
2. Ober, S.A., minerals Yearbook. (2007).Lithium.2007 U.S.A Geological survey
3. Kogel J.E " Industried minerals & rocks :commodities markets, and uses".(2006).Littleton, cdo: Society for mining, metallogy, Exploration .p 599
4. Mcketta J.J " Encyclo pedia of chemical processing and design"(2007) 28 ,Lactic acid to magnesium supply _demand Relations hips
5. Brian W.J .Lithium (2013): Available from: [http:// minerals usgs .gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs.lithi.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs.lithi.pdf)
6. Schwochau K., (1984) . "Extraction of Metals from Sea Water"., Institute of Chemistry, Nuclear Research Centre (KFA) D-5170 Jillich, FRG, Springer.pp 93-97.
7. Tallmadge J.A , Sdornon H.J "Minerals from sea salt Industrial and Engineering Chemistry "(1964) 56 (7)
8. Christensen J.J , Smith H.G , " Office of saline water research and Development, progress Report", (1967).supt. of Documents, Washington , D.C.

9. Ahmadzadeh Tofighy M., and Mohammadi T., "Application of Taguchi experimental design in optimization of desalination using purified carbon nanotubes as adsorbent" (2012) Materials Research Bulletin, 47, 2389- 2395.
10. Meshram P, Pandey B.D and , Mankhand ,T.R "Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation :A comprehensive review" (2014) . pp192-208
11. Chenglong Shi, Dongping Duan , Yongzhong Jia, Yan Jing. "A highly efficient solvent system containing ionic liquid in tributyl phosphate for lithium ion extraction" (2014)