بررسی پتانسیل‌های کشور جهت اکتشاف، استحصال و بازیافت فلز لیتیم به‌عنوان مهم‌ترین ذخیره‌ساز انرژی در دنیا

کد موضوعی: ۳۱۰
شماره مسلسل: ۱۶۱۴۵
آبان‌ماه ۱۳۹۷

معاونت پژوهش‌های زیربنایی و امور تولیدی
دفتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن

به‌نام خدا

فهرست مطالب

چکیده ۱
مقدمه ۲
۱. لیتیم به‌عنوان مهم‌ترین عنصر قرن ۲۱ و کاربردهای آن ۳
۱-۱. معرفی لیتیم ۳
۱-۲. کاربردهای لیتیم ۳
۱-۲-۱. صنایع شیشه و سرامیک ۴
۱-۲-۲. باتری ۵
۱-۲-۳. روان‌کارها ۸
۱-۲-۴. پودر قالب در صنایع ریخته‌گری پیوسته فولاد ۸
۱-۲-۵. تصفیه و فراوری هوا ۸
۱-۲-۶. محصولات دارویی و پلیمری ۹
۱-۲-۷. تولید آلومینیم ۹
۱-۲-۸. صنایع هسته‌ای ۱۰
۱-۲-۹. سایر مصارف ۱۰
۲. بررسی منابع لیتیم، عرضه و تقاضای آن در جهان ۱۱
۲-۱. بازار مصرف لیتیم ۱۱
۲-۲. منابع لیتیم ۲۰
۲-۲-۱. منابع شورابه‌ای ۲۴
۲-۲-۲. منابع سنگ معدن ۳۰
۳. بررسی منابع لیتیم، عرضه و تقاضای آن در ایران ۳۴
۳-۱. بازار مصرف لیتیم در داخل کشور ۳۴
۳-۲. منابع لیتیم ۳۵
۳-۲-۱. منابع شورابه‌ای ۳۵
۳-۲-۲. سنگ‌های معدنی ۳۶
۴. ارزیابی اقتصادی و امکانسنجی تولید لیتیم در داخل کشور ۳۸
۵. آثار استحصال و تولید لیتیم بر محیط زیست و سلامت ۴۲
۶. بازیافت لیتیم ۴۳
جمع‌بندی ۴۴
پیشنهادها و راهکارهای سیاستی ۴۵
منابع و مآخذ ۴۷

بررسی پتانسیل‌های کشور جهت اکتشاف، استحصال و بازیافت فلز لیتیم به‌عنوان مهم‌ترین ذخیره‌ساز انرژی در دنیا

چکیده

عنصر لیتیم، به‌عنوان یک فلز استراتژیک در دنیا شناخته شده است و در صنایع با تکنولوژی بالا نظیر صنایع هسته‌ای، هوافضا، خودروسازی، باتری‌سازی، نظامی، شیشه و سرامیک، روان‌کارها و بسیاری صنایع دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارزش اقتصادی قابل توجه این فلز به‌گونه‌ای است که بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته و صنعتی با استفاده از ذخایر این ماده معدنی و انجام عملیات استحصال و فراوری، نه تنها نیاز صنایع داخلی خود به این فلز ارزشمند را مرتفع کرده‌اند، بلکه از آن به‌عنوان یک محصول صادراتی و با ارزآوری بالا نیز استفاده می‌کنند. بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در دنیا، لیتیم را به‌عنوان عنصر قرن ۲۱ معرفی کرده و از آن به‌عنوان منبع اصلی ذخیره انرژی در آینده یاد می‌کنند.

وجود منابع شورابه‌ای بسیار غنی در داخل کشور به‌عنوان ذخایر اصلی تولید لیتیم در دنیا، دانش فنی بومی، امکان استفاده از انرژی پاک و ارزان‌قیمت گاز، نیروی انسانی متخصص، موقعیت جغرافیایی، منطقه‌ای و دسترسی به بازارهای جهانی از عواملی است که می‌تواند کشور را به‌عنوان قطب اصلی تولید لیتیم در منطقه و دنیا تبدیل کند. در ایران بیش از ۶۰ پلایا در دریاچه‌های نمک خشک یا فصلی وجود دارد که پلایای خور و بیابانک، کویر بزرگ نمک، باتلاق گاوخونی و دریاچه نمک قم از مهم‌ترین آنها هستند. علاوه‌بر لیتیم، این پلایا حاوی مواد باارزشی همچون سولفات سدیم، منیزیم، بور و پتاسیم می‌باشند. در حال حاضر نیاز صنایع داخلی به لیتیم به‌طور کامل توسط واردات از کشورهای دیگر به‌ویژه چین انجام می‌شود، این درحالی است که علاوه‌بر ذخایر بالقوه لیتیم، دانش فنی لازم برای استخراج این ماده معدنی در داخل کشور وجود دارد که نیازمند برنامه‌ریزی و تزریق سرمایه برای فعالیت‌های اکتشافی در این حوزه است. درحال حاضر در پلایاهای قم، محیط‌های تبخیری استان خراسان و کرمان و گرانیت‌های استان سیستان و بلوچستان نیز آثاری از وجود اندیس‌های لیتیمی دیده شده است. هرچند در سالیان اخیر فعالیت‌هایی جهت اکتشاف و استحصال این فلز باارزش صورت گرفته است، اما هیچ‌کدام از آنها جهت رفع نیازهای امروز و به‌ویژه آینده کافی نبوده است.

ارزش اقتصادی و کاربردهای فراوان لیتیم، نگاه جدی به سرمایه‌گذاری و تدوین برنامه‌ها و قوانین حمایتی جهت برآوردن نیازهای داخلی و توسعه صنعتی و اقتصادی کشور را بیش از پیش آشکار می‌سازد. با تکیه بر دانش فنی تولید لیتیم در داخل کشور نه تنها نیاز بسیاری از صنایع داخلی به این فلز باارزش مرتفع شده، بلکه افزایش صادرات، اشتغال‌زایی و توسعه صنایع مرتبط با این حوزه به‌ویژه صنایع دفاعی، هسته‌ای و ذخیره‌سازهای انرژی را امکان‌پذیر می‌سازد.

مقدمه

کربن عنصر گذشته – لیتیم عنصر آینده

در گذشته به‌ندرت عنصری با پتانسیل‌های آینده لیتیم یافت شده است. این عنصر و اهمیت آینده آن را می‌توان تنها با کربن قابل قیاس دانست که منبع اصلی تولید انرژی در دنیاست. در حالی که کربن تأمین‌کننده و منبع انرژی است، از لیتیم به‌عنوان منبع اصلی ذخیره انرژی در آینده یاد می‌شود. لیتیم با وجود خواصی همچون سبک‌ترین فلز موجود در میان تمامی فلزات، قابلیت واکنش‌دهی الکتروشیمیایی، ضریب انبساط حرارتی پایین و دارا بودن بالاترین ظرفیت گرمایی ویژه در میان جامدات، کاربردهای بسیار زیادی در صنایع مختلف به‌ویژه صنایع هوافضا، نظامی، هسته‌ای، خودروسازی، فولادسازی، داروسازی و بسیاری صنایع دیگر را داراست.

علاوه‌بر این، کاربرد لیتیم در باتری‌های لیتیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارها در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی نگاه به این فلز استراتژیک را در سالیان اخیر به‌ویژه در کشورهای توسعه‌یافته، دوچندان کرده است، به‌طوری که روند استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ افزایش بیش از ۲۰ برابری استفاده از تکنولوژی‌های مختلف در توسعه سیستم‌های مذکور را نشان می‌دهد. در این میان سهم باتری‌های لیتیم ـ یون بسیار قابل توجه است، به‌طوری که نه تنها بر بازار ذخیره انرژی الکتریکی در ابزارهای قابل حمل مسلط شده است، بلکه گزینه اول برای ذخیره انرژی در وسایل نقلیه الکتریکی و انرژی تجدیدپذیر پراکنده[1] محسوب می‌شود. در صورتی که اغلب فناوری‌های دیگر تحت توسعه و در فاز قبل از تجاری‌سازی هستند.

در صنایع نظامی نیز به‌عنوان پیشرو تمامی صنایع دیگر، لیتیم به‌عنوان یک فلز کاملاً راهبردی و استراتژیک مطرح است. ابزار الکترونیکی قابل حمل، رادارها، انواع و اقسام سیستم‌های حمل تجهیزات و قطعات انواع هواپیماها و جنگنده‌ها به‌عنوان بخش کوچکی از کاربرد لیتیم در صنایع نظامی است.

در صنعت هسته‌ای نیز لیتیم به‌دلیل نقش آن جهت محافظت در برابر تابش‌های هسته‌ای و استفاده از آن در کلاهک‌های هسته‌ای نیروگاه‌ها، سوخت هسته‌ای و مصارف بسیاری از این قبیل اهمیت دوچندان یافته است.

نقش این فلز استراتژیک در صنایع پزشکی نیز غیرقابل انکار است. به‌طوری که تقریباً در همه اندام‌های زنده می‌توان نقش بسیار کمرنگ آن را مشاهده کرد. یون ـ لیتیم که به‌صورت نمک یافت می‌شود، بر اعصاب انسان اثر داشته و می‌تواند به‌عنوان دارو در درمان بیماری‌های اختلال دوقطبی به‌کار رود.

---

1. Distributed Renewable Power

۱. لیتیم به‌عنوان مهم‌ترین عنصر قرن ۲۱ و کاربردهای آن

۱-۱. معرفی لیتیم

لیتیم سبک‌ترین عنصر موجود در میان تمامی جامدات با عدد اتمی ۳ و دارای چگالی بسیار پایین (نصف چگالی آب) است که در مقادیر بسیار کم در سنگ‌ها، خاک‌ها و آب‌های طبیعی یافت می‌شود. واکنش‌پذیری این فلز به‌شدت بالا بوده، به‌طوری که در مجاورت با آب و هوا به‌سرعت واکنش می‌دهد. درنتیجه هیچ‌گاه در طبیعت به‌صورت خالص یافت نخواهد شد. لیتیم به‌دلیل دارا بودن ضریب انبساط حرارتی پایین و همچنین بیشترین ظرفیت گرمایی ویژه در میان عناصر جامد، پتانسیل فوق‌العاده‌ای جهت کاربرد در صنایع مختلف دارد. معمولاً برای تولید لیتیم خالص از فرایندهای چند مرحله‌ای استفاده می‌شود. استخراج لیتیم در سطح جهان به شاخه‌های مختلفی تقسیم می‌شود که محصول این فرایندها، ترکیبات مختلفی از لیتیم اعم از لیتیم کربنات، لیتیم کلراید، لیتیم هیدروکساید، بوتیل لیتیم و فلز خالص لیتیم است.

معمولاً در صنعت، ترکیبات فلز لیتیم بسته به خلوص آنها به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند که در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱. دسته‌بندی ترکیبات لیتیم براساس درصد خلوص

گرید	کاربرد	درصد خلوص
صنعتی	روغن لحیم، تولید شیشه و روان‌ساز	>۹۶
تکنیکال	سرامیک‌ها، روان‌سازها و باتری‌ها	~۹۹/۵
باتری	کاتد در باتری‌های پیشرفته	>۹۹/۵

۲-۱. کاربردهای لیتیم

به‌دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربه فرد، لیتیم و ترکیبات آن با کاربردهای صنعتی گوناگون به چند گروه قابل تقسیم هستند که در این بخش به تفصیل به آنها پرداخته خواهد شد. جهت ارزیابی رشد استفاده از لیتیم در حوزه‌های مختلف از شاخص نرخ رشد مرکب سالیانه[1] استفاده می‌شود که شاخص مناسبی جهت بیان میزان رشد هر حوزه در یک بازه زمانی معین است. لیتیم به‌عنوان یک فلز استراتژیک و حیاتی در بسیاری از صنایع کاربرد دارد که اصلی‌ترین آنها به‌همراه مقادیر شاخص نرخ

1. Compound Annual Growth Rate (CAGR)
شاخص نرخ رشد مرکب سالیانه درواقع متوسط نرخ رشد یک متغیر در یک بازه زمانی معین بیش از یک سال است. برای محاسبه این شاخص، مقدار نهایی متغیر (به‌عنوان مثال نرخ رشد یک پارامتر اقتصادی، تعداد محصول تولیدی و ...) تقسیم بر مقدار اولیه آن به توان معکوس بازه زمانی مورد نظر می‌شود و عدد یک از مجموع حاصل کسر می‌شود. این شاخص اثر نوسانات دوره‌ای (مثلاً افت یا افزایش‌های شدید مقطعی متغیر در یکی از سال‌های مورد مطالعه) را تعدیل کرده و برایند عملکرد نهایی شاخص را در کل دوره زمانی مشخص می‌کند.

رشد مرکب سالیانه به تفکیک در هر حوزه در بازه زمانی ۱۰ ساله بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ در ذیل آورده شده است:

ـ صنایع شیشه و سرامیک (۲ درصد)

ـ صنایع هسته‌ای و نظامی (عدم وجود اطلاعات کافی)

ـ باتری‌های لیتیم (۲۲/۸ درصد)

ـ روان‌کار (۳/۳ درصد)

ـ تصفیه‌کننده‌های هوا (۲/۵- درصد)

ـ صنایع فولادسازی (عدم وجود اطلاعات کافی)

ـ تولید محصولات دارویی و پلیمری (۲/۵ درصد)

ـ تولید آلومینیم (۳/۴- درصد)

ـ کاربردهای دیگر (۵/۸ درصد)

در ادامه به تفکیک هریک از کاربردهای لیتیم در صنایع مذکور پرداخته خواهد شد:

۱-۲-۱. صنایع شیشه و سرامیک

طبق اعلام شرکت SQM[1] (شرکت شیلیایی و بزرگ‌ترین تولیدکننده لیتیم در دنیا) تا سال ۲۰۰۵، مصرف‌کننده اصلی لیتیم در دنیا صنایع شیشه و سرامیک بوده‌اند. پس از این سال، این صنعت در رتبه دوم پس از حوزه باتری‌های لیتیم قرار گرفته است. افزودن مواد معدن حاوی لیتیم مانند اسپادومین،[2] پتالایت[3] و یا لیتیم اکساید به مذاب شیشه مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی مختلفی به‌همراه دارد، ازجمله:

ـ کاهش دمای ذوب و گرانروی مذاب. دمای ذوب می‌تواند تا ۲۵ درجه سانتیگراد کاهش یابد که درنتیجه آن بین ۵ تا ۱۰ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی خواهد شد و همچنین انتشار گازهای مضر NOx کاهش خواهد یافت.

ـ تولید شیشه‌ها و سرامیک‌های با ضریب انبساط حرارتی پایین و چقرمگی بالا. این شیشه‌ها به‌صورت گسترده در لوازم آشپزخانه و پخت‌وپز مورد استفاده قرار می‌گیرند، چراکه می‌توانند تغییرات سریع دمایی (شوک حرارتی) را تحمل کنند. از دیگر کاربردهای این شیشه‌ها می‌توان به ساخت شیشه‌های تمپر شده مورد استفاده در خودروها اشاره کرد.

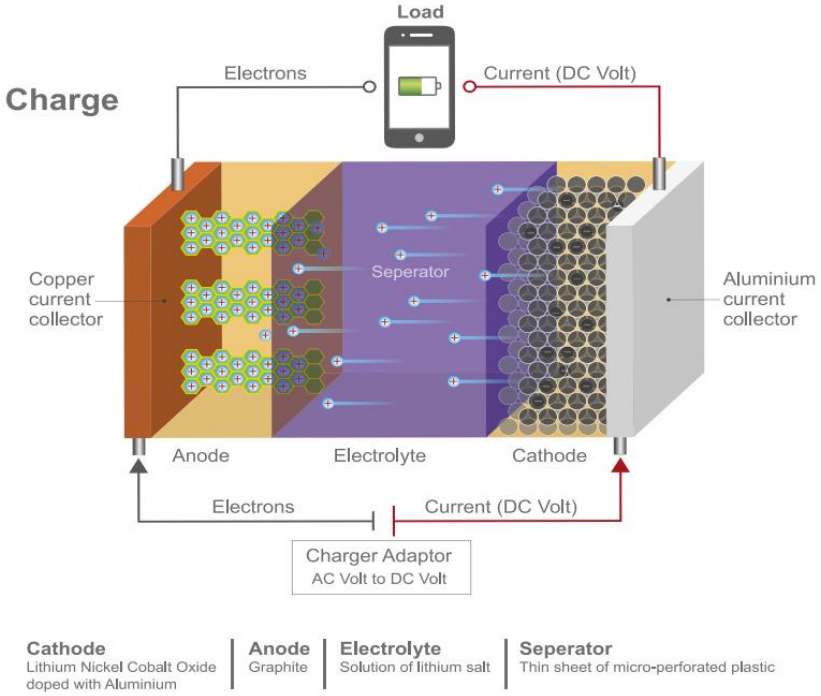
---

1. Sociedad Química y Minera
2. Spodumene
3. Petalite

۲-۲-۱. باتری

از سال ۲۰۰۵ باتری‌های لیتیمی به‌عنوان مصرف‌کننده اصلی لیتیم در دنیا مطرح هستند. این باتری‌های سبک‌وزن بخش مهمی از تجهیزات الکترونیکی قابل حمل مانند تلفن‌های هوشمند، تبلت‌ها و رایانه‌های همراه به‌شمار می‌آیند. همچنین این باتری‌ها نقش کلیدی در توسعه خودروهای تمام‌برقی ایفا می‌کنند، به‌طوری که بسیاری معتقدند این خودروها آینده صنعت حمل‌ونقل و خودروسازی خواهند بود. در سال ۲۰۱۳ مصرف لیتیم در باتری‌ها برابر ۱۵ هزار تن و شاخص نرخ رشد مرکب سالیانه ۲۲/۸ درصد در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ بوده است که دوسوم آن مربوط به لوازم الکترونیکی است. طبق پیش‌بینی‌های انجام شده شاخص نرخ رشد مرکب سالیانه صرفاً برای باتری‌های مورد استفاده در صنایع حمل‌ونقل و خودروسازی برابر ۲۰ درصد است. به‌عبارت دیگر، به‌طور متوسط در این بازه میزان تقاضای لیتیم برای کاربرد در این صنعت سالیانه ۲۰ درصد نسبت به سال گذشته آن رشد خواهد داشت که این امر بر میزان تقاضای لیتیم در سالیان آینده به‌طور قابل توجهی تأثیر می‌گذارد.

شکل ۱. شماتیکی از اجزای تشکیل‌دهنده باتری لیتیمی



از سال ۲۰۱۶ انقلاب ایجاد شده در خودروهای الکتریکی سبب شده است که قیمت مواد خام به‌کار رفته در باتری‌ها رشد قابل توجهی را تجربه کند. همچنین افزایش نیاز به ذخیره انرژی، موتورهای برقی، ابزارآلات الکتریکی و سایر کاربردهایی که در آن از باتری استفاده می‌شود، سبب افزایش تمایل به استفاده

از مواد خام باتری‌ها ازجمله لیتیم شده است.

لیتیم کربنات، لیتیم هیدروکساید و لیتیم کلراید به‌عنوان مواد خام اولیه در تولید باتری‌های لیتیمی استفاده می‌شوند. فلز لیتیم خالص برای تولید باتری‌های غیرقابل شارژ استفاده می‌شود که تنها بخش کوچکی از باتری‌های لیتیمی را در بر می‌گیرد و با توجه به روند محبوبیت باتری‌های قابل شارژ سهم آنها به‌صورت مستمر درحال افزایش است. ترکیبات اصلی لیتیم که به‌عنوان کاتد در باتری‌های قابل شارژ استفاده می‌شود، عبارتند از:

ـ اکسید لیتیم ـ کبالت (LCO): این ماده با ترکیب $LiCoO_2$ به‌عنوان اولین کاتد مورد استفاده در باتری‌های لیتیمی برای نخستین بار در سال ۱۹۹۱ مطرح شد و تا به امروز نیز پُرکاربردترین کاتد در این باتری‌ها است. چگالی انرژی این نوع کاتد (حدود ۲۰۰ وات ساعت بر کیلوگرم) در مقایسه با سایر مواد بیشترین میزان می‌باشد، هرچند از نظر ایمنی نگرانی‌هایی در مورد استفاده از این کاتد وجود دارد. با توجه به اینکه در باتری‌های دارای این کاتد احتمال داغ شدن وجود دارد و همچنین با توجه به وقوع حوادثی چون داغ شدن یا انفجار وسیله‌های الکترونیکی، به نظر می‌رسد استفاده از این نوع کاتد در خودروهای الکتریکی محدود شود. همچنین حضور کبالت در این کاتدها در صورتی که فرایند بازیافت این باتری‌ها درست صورت نگیرد، می‌تواند از نظر زیست‌محیطی مخاطراتی ایجاد کند. خود کبالت هم عنصری به نسبت گرانقیمت است (۸۴ هزار دلار به‌ازای هر تن در ماه ژوئن سال ۲۰۱۸) که باعث می‌شود استفاده از این نوع کاتد به مرور زمان کمتر شود به‌طوری که شاخص نرخ رشد مرکب سالیانه برای این نوع کاتد تا سال ۲۰۲۵ تنها ۷/۶ درصد پیش‌بینی می‌شود که کمتر از کاتدهای دیگر مانند لیتیم آهن فسفات (LFP) یا لیتیم نیکل منگنز کبالت اکساید (NMC) است.

ـ لیتیم نیکل منگنز کبالت اکساید (NMC): این کاتد با ترکیب $Li(Ni_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33})O_2$ یکی از انواع کاتدهایی است که برای باتری‌های مورد استفاده در حمل‌ونقل الکتریکی ازجمله خودروهای برقی، دوچرخه‌ها و اسکوترها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال ۲۰۱۳ این کاتد سهم ۳۳ درصدی از کل کاتدهای مورد استفاده در باتری‌ها را به‌خود اختصاص داده است. چگالی انرژی این کاتد بین ۹۵ تا ۱۳۰ وات‌ساعت بر کیلوگرم است که کمتر از کاتدهای لیتیم کبالت اکساید می‌باشد. مقدار شاخص نرخ رشد مرکب سالیانه تا سال ۲۰۲۵ برای این کاتد ۱۲/۶ درصد پیش‌بینی می‌شود.

ـ لیتیم منگنز اسپینل (LMO) : این کاتدها با ترکیب $LiMn_2O_4$ بیشتر در ساخت باتری‌های مورد استفاده در خودروهای پلاگین ـ هیبرید به‌کار می‌رود. در سال ۲۰۱۳ این کاتدها سهم ۲۰ درصدی از کل کاتدهای پایه لیتیم تولید شده را به‌خود اختصاص داده‌اند. چگالی انرژی آنها ۱۱۰ تا ۱۲۰ وات‌ساعت بر کیلوگرم است که باز هم کمتر از باتری‌های اکسید لیتیم ـ کبالت می‌باشد. اما از نظر ایمنی شرایط بسیار بهتری داشته و هزینه تولید پایین‌تری دارند. چراکه کبالت در تولید آنها به‌کار گرفته

نمی‌شود. عدم وجود کبالت نکته مثبت زیست‌محیطی این نوع کاتدها نیز است. مقدار شاخص نرخ رشد مرکب سالیانه ۶/۹ درصد پیش‌بینی می‌شود.

ـ لیتیم آهن فسفات (LFP): این کاتد با ترکیب $LiFePO_4$ یکی از انواع کاتدها در تولید باتری‌های مورد استفاده در خودروهای الکتریکی است. در سال ۲۰۱۳ این نوع کاتد بالغ بر ۹ درصد یا ۸۰۰۰ تن از تولید کاتدهای پایه لیتیم در دنیا را به‌خود اختصاص داده است. با چگالی انرژی ۹۵ تا ۱۴۰ وات‌ساعت بر کیلوگرم، هرچند این کاتد کمترین مقدار را در میان انواع کاتدها داراست، ولی از نظر ایمنی در بالاترین جایگاه قرار دارد و به‌دلیل عدم وجود کبالت در آن، از هزینه‌های تولید به نسبت کمتری برخوردار بوده و آثار آن بر محیط زیست به حداقل می‌رسد. این برتری‌ها باعث می‌شوند که این نوع کاتد با شاخص نرخ رشد مرکب سالیانه ۲۰ درصد تا سال ۲۰۲۵، سریع‌ترین رشد را در میان انواع کاتدهای پایه لیتیم داشته باشد.

همچنین از منابع ذخیره انرژی لیتیمی می‌توان برای ذخیره الکتریسیته تولیدی در نیروگاه‌های خورشیدی یا بادی استفاده کرد که این امر نیازمند استفاده از حجم قابل توجهی از سیستم‌های ذخیره انرژی لیتیمی است که هرچند در مقیاس کوچک و برای نیروگاه‌های نه‌چندان بزرگ می‌تواند بسیار مفید باشد، ولی جهت پیاده‌سازی در مقیاس بزرگ، علاوه‌بر نیازمندی به حجم بسیار زیادی از باتری‌های لیتیم، به هزینه زیادی نیز جهت سرمایه‌گذاری و پیاده‌سازی احتیاج دارد. برای مثال، یک واحد ذخیره انرژی با ظرفیت ۶۵۰ مگاوات ساعت حاوی ۱/۵ تن معادل لیتیم کربنات است. مطالعات نشان می‌دهد در صورتی که کشور آمریکا بخواهد ۸۰ درصد نیاز خود را از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین کند، یا نیازمند یک سیستم برق‌رسانی سریع در کل کشور است که انتقال الکتریسیته را در فواصل زیاد به تعادل برساند، یا به یک مجموعه ذخیره انرژی که بتواند به مدت ۱۲ ساعت برق را در کل شبکه تأمین کند، نیاز دارد. هزینه باتری‌های مورد استفاده برای چنین سیستم ذخیره انرژی برابر با رقم بسیار زیاد ۲/۵ تریلیون دلار خواهد بود. با توجه به اینکه امکان تولید انرژی‌های تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) در فصول مختلف سال به مقدار بسیار زیادی متفاوت است (پیک تولید ماه‌های بهار و تابستان و کمینه تولید ماه‌های زمستان)، بنابراین برای بالا بردن سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور به بالای ۸۰ درصد، سیستم برق‌رسانی نیازمند مجموعه عظیمی از سیستم‌های ذخیره انرژی خواهد بود که هزینه گزافی را با توجه به قیمت کنونی باتری‌های لیتیمی به‌همراه خواهد داشت. لذا تا پیدا شدن منبعی بسیار ارزان‌تر برای ذخیره انرژی، سیستم‌های ذخیره انرژی برپایه لیتیم صرفاً مناسب برای نیروگاه‌ها و واحدهای کوچک محلی و به‌صورت پراکنده خواهد بود. بنابراین، یکی از پتانسیل‌های بالقوه ذخیره‌سازهای برپایه لیتیم، استفاده در سیستم‌های ذخیره انرژی غیرمتمرکز خواهد بود که در مناطق مختلف پراکنده شده‌اند. در هنگام تولید برق مازاد از منابع تجدیدپذیر، این سیستم‌ها می‌توانند انرژی را در خود ذخیره کنند و

هنگامی که تقاضای زیادی بر شبکه برق تحمیل می‌شود، آن را در شبکه تزریق کنند.

۳-۲-۱. روان‌کارها

در سال ۲۰۱۳، روان‌کارها به‌عنوان سومین منبع مصرف لیتیم در دنیا با سهم حدود ۱۱ درصد، معادل ۳۸۸۵ تن بوده‌اند. حدود ۶۵ درصد تمامی روان‌کارهای تولیدی حاوی لیتیم هستند. روان‌کارهای لیتیمی بسیار پایدارند و در دماهای بالا خواص خود را حفظ کرده و همچنین در دماهای پایین منجمد نمی‌شوند و خاصیت روان‌سازی بسیار خوبی دارند. گریس‌های روان‌کار معمولاً حاوی ۷۰ تا ۹۵ درصد روغن روان‌ساز، ۳ تا ۲۰ درصد غلیظ‌کننده[1] و صفر تا ۲۰ درصد افزودنی هستند. غلیظ‌کننده درواقع یک «صابون لیتیمی» است که از اضافه کردن لیتیم هیدروکساید به یک یا چند اسید چرب مانند اسید استاریک یا اولییک به‌دست می‌آید. یک روان‌کار بسته به ترکیب آن حاوی ۰/۲ تا ۰/۳ درصد لیتیم است. شاخص نرخ مرکب رشد سالیانه برای این بخش تا سال ۲۰۲۵ بین ۱ تا ۲ درصد پیش‌بینی می‌شود.

۴-۲-۱. پودر قالب در صنایع ریخته‌گری پیوسته فولاد

در سال ۲۰۱۳، این بخش، چهارمین کاربرد اصلی لیتیم در دنیا بوده است. ریخته‌گری پیوسته متداول‌ترین روش تولید بیلت‌های فولادی در دنیاست، به‌طوری که هم‌اکنون حدود ۹۰ درصد تولید فولاد در دنیا به‌صورت پیوسته می‌باشد. پودرهای روان‌ساز قالب حاوی لیتیم، نقش مهمی در پایدارسازی فرایند ریخته‌گری فولاد، کاهش ویسکوزیته و روان‌سازی بین پوسته منجمد شده و دیواره قالب دارند. اضافه کردن معادل ۵ درصد لیتیم اکساید در پودر قالب باعث کاهش دمای شروع کریستالیزاسیون و منجمد شدن مذاب فلزی می‌شود و همچنین نیاز به استفاده از کلسیم فلوراید در فرایند تولید فولاد که آثار مخرب بر سلامتی و محیط زیست دارد را از بین می‌برد. انتظار می‌رود که استفاده از لیتیم در ریخته‌گری پیوسته تولید فولاد با شیب ملایمی طی سالیان آینده افزایش یابد.

۵-۲-۱. تصفیه و فراوری هوا

این فرایندها به‌عنوان پنجمین کاربرد لیتیم در دنیا مطرح هستند که میزان مصرف آنها در سال ۲۰۱۳ برابر با ۱۴۱۳ تن لیتیم بوده است. لیتیم در فرایندهای مختلفی از تصفیه و فراوری هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد، ازجمله:

- سرمایش،
- جذب رطوبت،
- جذب CO_2.

محلول‌های لیتیم بروماید به‌عنوان عامل خنک‌ساز در سیستم‌های خنک‌کننده صنعتی به روش

---

1. Thickener

جذبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین لیتیم هیدروکساید به‌عنوان عامل جذب و برداشت کربن دی‌اکسید در سفینه‌های فضایی و زیردریایی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۶-۲-۱. محصولات دارویی و پلیمری

در سال ۲۰۱۳ مجموعاً ۲۱۰۰ تن لیتیم برای تولید محصولات دارویی و پلیمری مصرف شده است که سهم هر کدام از این مقدار تقریباً یکسان می‌باشد. در زمینه دارویی، لیتیم، غالباً به‌صورت لیتیم کربنات با خلوص بالا، برای آرام‌بخش‌ها و درمان اختلال دوقطبی، افسردگی و سایر مشکلات عصبی و روانی به‌کار می‌رود. بوتیل‌لیتیم به‌عنوان کاتالیست برای تولید انواع مختلفی از لاستیک استفاده می‌شود، ازجمله استایرن ـ بوتادین و پلی‌بوتادین که هر دو به‌صورت گسترده در تولید تایرهای خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین علاوه‌بر موارد یاد شده، ترکیب بوتیل‌لیتیم برای تولید کوپلیمرهای استایرنی مورد استفاده در لوله‌ها، تجهیزات آشپزخانه و رنگ آکریلیک استفاده می‌شود.

۷-۲-۱. تولید آلومینیم

از نظر تناژ، این بخش یکی از کوچک‌ترین صنایع استفاده‌کننده از لیتیم به‌حساب می‌آید که حدود ۲ درصد یا ۷۰۰ تن از مصرف جهانی لیتیم را به‌خود اختصاص می‌دهد. آلومینیم به روش الکترولیز مذاب آلومینا استحصال می‌شود. این پروسه مصرف انرژی بسیار بالایی دارد، چراکه دمای ذوب آلومینا ۲۰۷۲ درجه سیلسیوس است. بنابراین آلومینا در یک حمام سدیم فلوراید قرار می‌گیرد که افزودنی‌های مختلفی هم به آن اضافه می‌شود. لیتیم کربنات یا لیتیم کلراید هم به مذاب افزوده می‌شود که در واکنش با آلومینیم فلوراید، ترکیب لیتیم فلوراید (LiF) را تشکیل می‌دهد. وجود ۲ تا ۳ درصد (LiF) در مذاب آلومینا فواید مختلفی را به‌همراه دارد، ازجمله:

- کاهش ۱۲ تا ۱۸ درجه‌ای دمای فرایند و درنتیجه کاهش مصرف انرژی،
- افزایش رسانایی مذاب و درنتیجه کاهش ۲ تا ۴ درصدی مصرف برق در فرایند الکترولیز،
- کاهش ۱ تا ۲ درصدی مصرف کربن کاتد،
- کاهش ۴۰ تا ۵۰ درصدی نشر ترکیبات مضر برای محیط زیست فلوئور.

میزان مصرف لیتیم به‌ازای تولید هر تن آلومینیم در کارخانه‌هایی که از لیتیم در تولید آلومینیم استفاده می‌کنند (عموماً در آمریکا و اروپا) برابر با ۳۲۰ گرم است که به مقدار ۲ درصد به ۶۰ کیلوگرم سدیم فلوراید اضافه می‌شود. یکی دیگر از پتانسیل‌های بالقوه مصرف لیتیم در تولید آلیاژهای سبک‌وزن Al-Cu-Li است که در صنایع هوایی می‌توانند به‌عنوان یکی از جایگزین‌های قطعات کامپوزیتی مطرح شوند. به‌طور مثال، در تولید هواپیمای ایرباس A-350، از حدود ۴۰ تن آلیاژ Al-Cu-Li استفاده شده که دارای حدوداً ۴۰۰ کیلوگرم لیتیم است. مدل‌های دیگری مانند ایرباس A-380، بمباردیر سری C و جنگنده‌های اف-۱۶و یوروفایتر تایفون نیز ازجمله کاربردهای این آلیاژ هستند. در صورتی که استفاده

از این آلیاژ در آینده در صنایع هوایی گسترش یابد، این صنعت می‌تواند به یکی از بازارهای مهم مصرف لیتیم در دنیا تبدیل شود.

۸-۲-۱. صنایع هسته‌ای

در صنعت هسته‌ای، ایزوتوپ لیتیم-۶ برای تولید تریتیم طبق واکنش زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$^{6}Li + {}^{1}n \rightarrow {}^{4}He + {}^{3}H + 4786\ Mev$$

این واکنش منجر به تولید تریتیم می‌شود که در بمب‌های حرارتی ـ هسته‌ای و همچنین در راکتورهای آزمایشی همجوشی هسته‌ای که در سال‌های آینده می‌توانند یک منبع اصلی انرژی باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. لیتیم موجود در طبیعت دارای تقریباً ۷/۵ درصد ایزوتوپ لیتیم-۶ است. گسترده شدن راکتورهای همجوشی هسته‌ای، می‌تواند به رشد قابل توجه استفاده از لیتیم در این راکتورها برای تولید انرژی منجر شود، به‌طوری که برای تولید ۲۷۰ گیگاوات برق از این روش در سال، درنهایت ۲۰ هزار تن لیتیم در سال مورد نیاز خواهد بود که این مقدار برابر با ۶۰ درصد میزان مصرف لیتیم در دنیا در سال ۲۰۱۳ است.

۹-۲-۱. سایر مصارف

سایر موارد مصرف لیتیم که زمینه‌های مختلفی را شامل می‌شود در سال ۲۰۱۳ حدود ۶۷۰۰ تن از مصرف لیتیم را در دنیا به‌خود اختصاص داده است. شاخص نرخ رشد مرکب سالیانه در این حوزه‌ها به‌صورت متوسط برابر با ۵/۸ درصد می‌باشد. ازجمله موارد مصرف لیتیم عبارتند از:

ـ در صنایع الکترونیک، لیتیم نایوبات و تانتالات با توجه به خواص الکترواپتیکال، آکوستیک، پیزوالکتریک و پیروالکتریک در ساخت فیلترکننده‌های امواج در صنایع مخابراتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ـ تولید برخی از سیمان‌ها که در آنها از لیتیم به‌عنوان عاملی برای تسریع فرایند سخت شدن سیمان استفاده می‌شود.

ـ لیتیم هیپوکلراید ($LiClO$) برای تصفیه آب استخرها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ـ از لیتیم استات ($LiC_2H_3O_2$) و لیتیم هیدروکساید ($LiOH$) به‌عنوان افزودنی در صنایع پلیمر و نساجی استفاده می‌شود.

ـ لیتیم نیترات ($LiNO_3$) به‌عنوان عامل تولید نور قرمز در مواد محترقه و آتش‌زا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

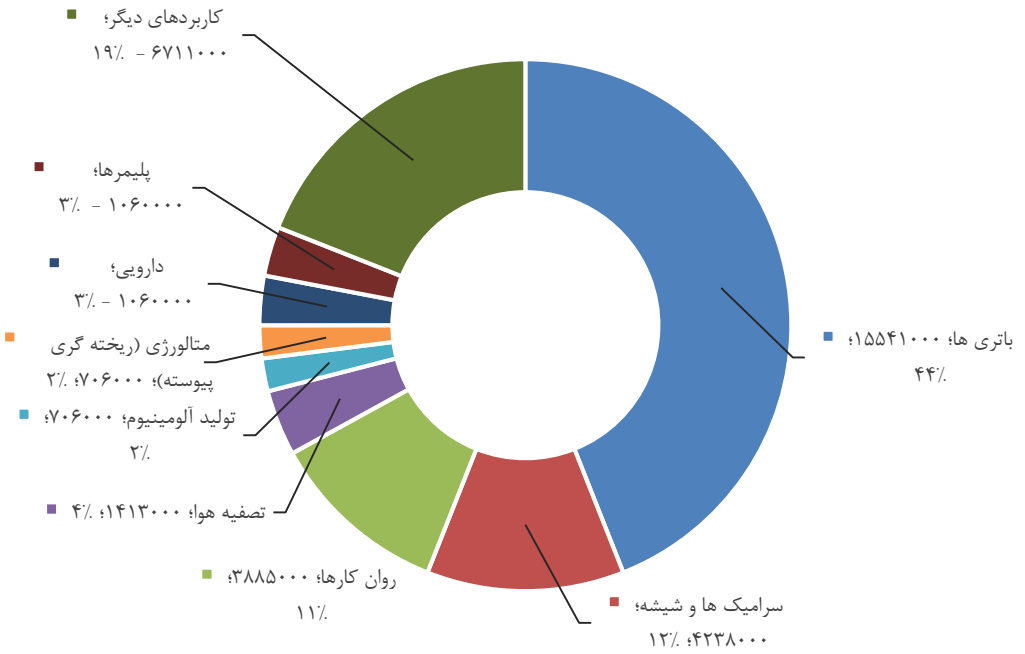
۲. بررسی منابع لیتیم، عرضه و تقاضای آن در جهان

۲-۱. بازار مصرف لیتیم

یکی از فناوری‌های ذخیره انرژی الکتریکی، باتری‌های قابل شارژ ازجمله باتری‌های یون لیتیم است. این نوع از باتری‌ها انتخاب اول در ابزارهای قابل حمل، وسایل نقلیه الکتریکی و انرژی تجدیدپذیر پراکنده[1] می‌باشد. درحال حاضر صنعت باتری بزرگ‌ترین مصرف‌کننده لیتیم در دنیاست و پس از آن نیز صنایع تولید شیشه و سرامیک در مرتبه بعدی قرار می‌گیرند.

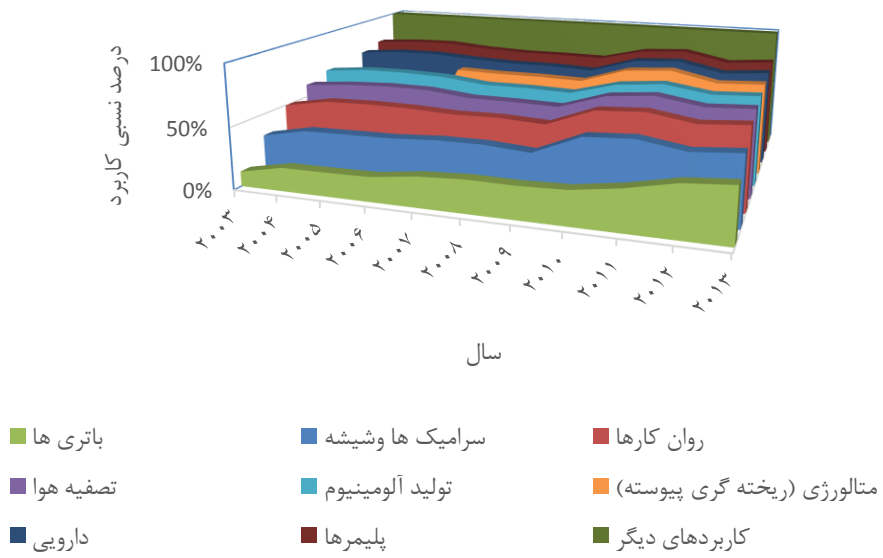
نمودار ۱. کاربردهای اصلی لیتیم در سال ۲۰۱۳ برحسب درصد نسبی و تناژ معادل لیتیم مورد استفاده

(تن)



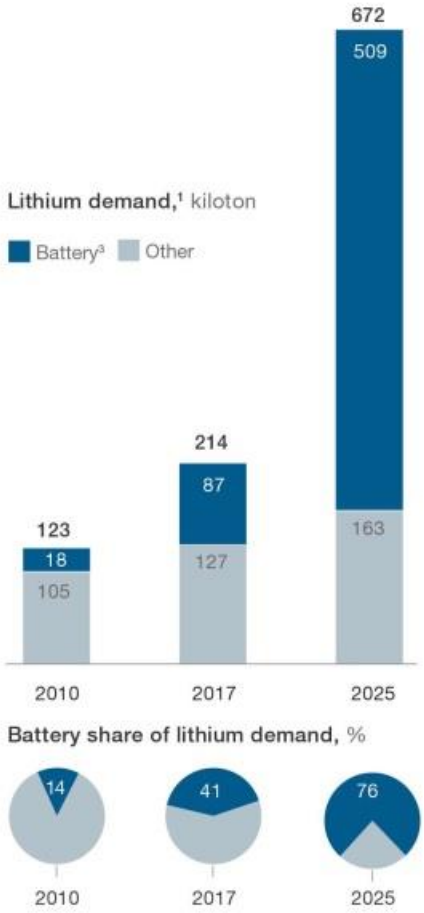
1. Distributed Renewable Power

نمودار ۲. درصد نسبی کاربرد لیتیم در هر حوزه بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳



هرچند نیاز به لیتیم در صنایعی همچون شیشه و سرامیک، روان‌کارها، ریخته‌گری، صنایع دارویی، صنایع نظامی و هسته‌ای غیرقابل انکار است، اما اساساً بازار مصرف لیتیم با نیاز به باتری قوت گرفته است. به‌دلیل پذیرش و محبوبیت خودروهای الکتریکی، باتری‌هایی با چگالی انرژی بالاتر مورد توجه قرار گرفته که سبب افزایش سه برابری نیاز لیتیم بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ شده است. به‌طوری که پیش‌بینی شده، میزان تقاضا از ۲۱۴ کیلوتن کربنات لیتیم در سال ۲۰۱۷ به ۶۶۹ کیلوتن در سال ۲۰۲۵ خواهد رسید. در این پیش‌بینی فرض شده است که تکنولوژی باتری‌های لیتیم - یون، تکنولوژی رایج باتری در آینده باشد. نمودار ۳ بیانگر میزان تقاضای لیتیم و روند رو به رشد آن در سالیان اخیر و همچنین سالیان پیش رو است.

نمودار ۳. میزان تقاضای لیتیم در حوزه باتری بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵



[1]Lithium carbonate equivalent.
[2]Refined metal equivalent.
[3]Includes automotive (hybrid-, plug-in hybrid-, and battery-electric vehicles), trucks and buses (light, medium, and heavy), two and three wheelers, machinery (forklifts and others), grid storage, and consumer electronics.
Note: Figures may not sum to listed totals, because of rounding.

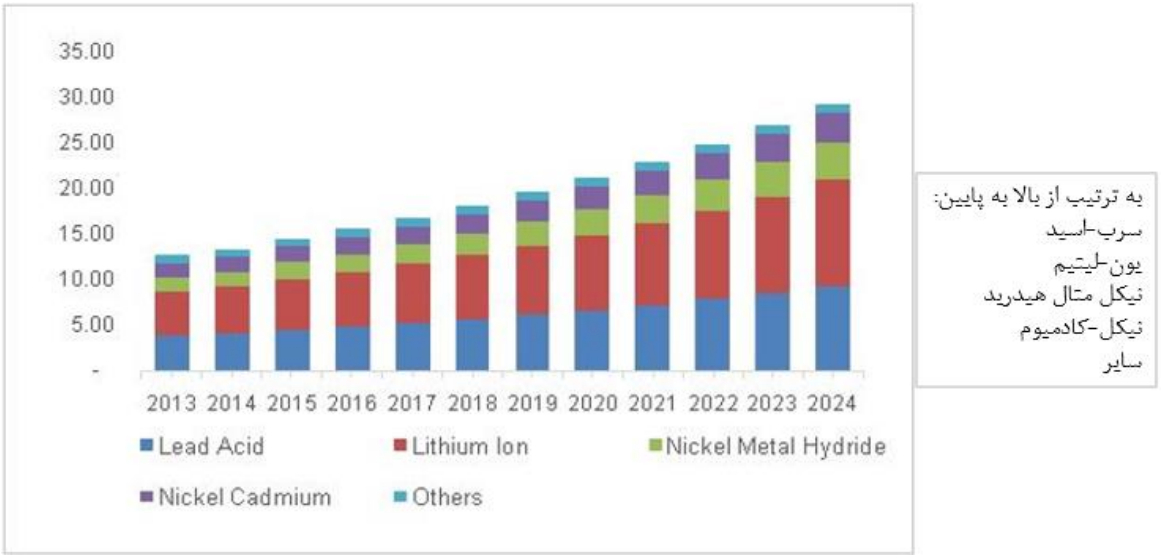
بیش از ۹۵ درصد لیتیم دنیا از منابع شورابه‌ای و سنگ معدن تأمین می‌شود. از آنجا که لیتیم منابع گسترده‌تری نسبت به سایر عناصر مورد استفاده در باتری‌ها دارد، لذا به نظر می‌رسد که در چند سال آینده توجه به مصرف لیتیم افزایش یافته و به میزان پیش‌بینی شده ۶۶۹ کیلوتن لیتیم کربنات معادل تا سال ۲۰۲۵ خواهد رسید. براساس گزارش Pike Research در سال ۲۰۱۲ بیشترین ظرفیت باتری‌های یون ـ لیتیم استفاده شده در قاره‌های مختلف برحسب مگاوات به‌ترتیب به آمریکای شمالی، آمریکای لاتین، اروپای غربی و آسیا مربوط است. اروپای شرقی، خاورمیانه و آفریقا کمترین میزان استفاده از باتری‌های یون- لیتیم را دارند و ذخیره‌سازی انرژی به روش‌های دیگر صورت می‌گیرد.

از حدود ۴۴۶ مگاوات ذخیره‌سازی در باتری‌های الکتروشیمیایی، باتری‌های یون - لیتیم ۱۶۹ مگاوات را به‌خود اختصاص داده‌اند. براساس گزارش BCC Research، باتری‌های الکتروشیمیایی دارای نرخ رشد سالیانه

مرکب ۴/۶ درصد بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ بوده که آن را به یکی از بزرگ‌ترین ذخیره‌سازهای الکتریکی با بالاترین نرخ رشد تبدیل کرده است. براساس گزارش انجمن ذخیره‌سازی انرژی اروپا، منطقه آسیا پیشرو در تولید باتری‌های سرب ـ اسید، NiMH، NiCd و یون ـ لیتیم است که علت این میزان تولید حضور شرکت‌هایی مانند Panasonic Co.، BYD Motor Co.، Sanyo Electric Co.، Hitachi Ltd.، GS Yuasa Co. و Furukawa Electric Co. Ltd. در منطقه است. نمودار ۴ میزان درآمد (برحسب میلیارد دلار) حاصل از تولید باتری‌های الکتروشیمیایی را به تفکیک نوع باتری بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ در آمریکای شمالی براساس گزارش منتشر شده توسط مؤسسه Grand View Research در مورد بازار باتری‌ها در سال ۲۰۱۶ نشان می‌دهد. بزرگ‌ترین شرکت‌های تولیدکننده باتری‌های لیتیمی در دنیا عبارتند از:

Samsung SDI, Panasonic, Toshiba, LG Chem, Tesla, A123 Systems, eCobalt Solutions, BYD.

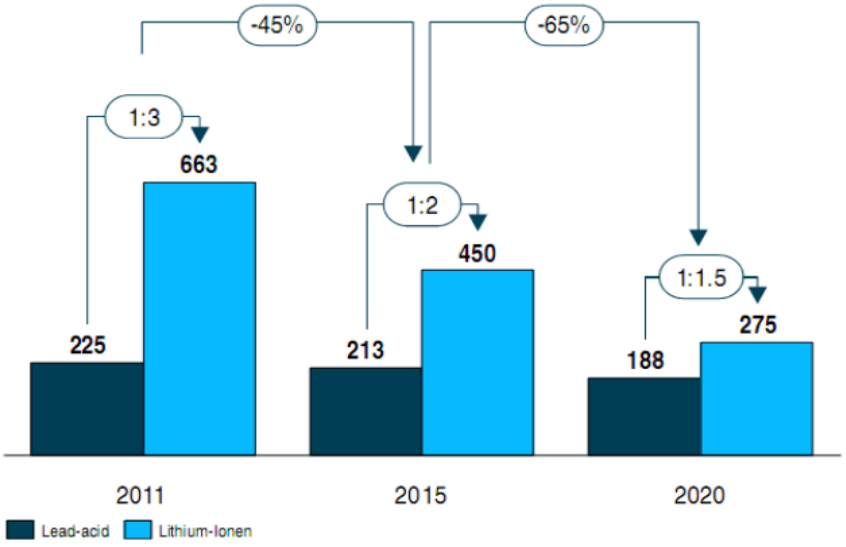
نمودار ۴. درآمد مالی (برحسب میلیارد دلار) حاصل از تولید باتری‌های الکتروشیمیایی در آمریکای شمالی بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴



باتری‌های یون ـ لیتیم از بیشترین میزان رشد و سهم عمده سرمایه‌گذاری برخوردارند. اگرچه جایگاه اروپا در زمینه باتری سرب ـ اسید و نیکل-کادمیوم قوی است، ولی فناوری باتری یون ـ لیتیم عمدتاً در اختیار کشورهای آسیایی ژاپن، چین و کره جنوبی می‌باشد. تقاضا برای باتری‌های لیتیمی سالیانه به‌طور متوسط ۳۵ درصد بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ رشد خواهد داشت. به‌عبارت دیگر میزان تقاضای این نوع باتری‌ها از ۲/۳ گیگاوات ساعت در سال ۲۰۱۵ به ۱۰/۴ گیگاوات ساعت در سال ۲۰۲۰ خواهد رسید. قیمت باتری‌های یون ـ لیتیم با نرخ متوسط سالیانه ۹-۱۰ درصد در حال کاهش است. این در حالی است که کاهش قیمت باتری‌های سرب ـ اسید تنها محدود به ۲-۳ درصد است. درنتیجه

فاکتور قیمت بین باتری‌های سرب ـ اسید و یون ـ لیتیم از ۱:۳ حال حاضر به ۱:۱/۵ تا سال ۲۰۲۰ تغییر خواهد کرد. شماتیکی از این موضوع در نمودار زیر نشان داده شده است.

شکل ۲. تغییرات قیمتی باتری سرب ـ اسید در مقایسه با باتری‌های یون-لیتیمی برحسب دلار به کیلووات ساعت

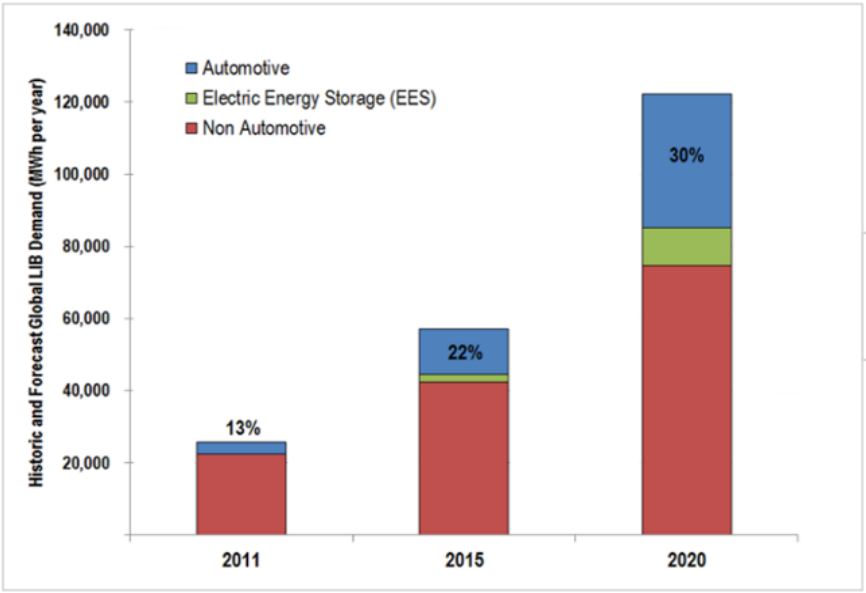


Daiwa Forecasts پیش‌بینی کرده است که بازار باتری یون - لیتیم بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، ۵/۵ برابر شود و مسیر اصلی فناوری در ۵ الی ۱۰ سال آینده باشد.

نمودار ۵. آینده بازار باتری یون ـ لیتیم در بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰

براساس پیش‌بینی Daiwa Forecasts، ارزش بازار جهانی ذخیره‌سازهای انرژی با نرخ رشد مرکب سالیانه ۹ درصد از ۴۴ میلیارد دلار آمریکا در سال ۲۰۱۰ به ۱۰۰ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۰ خواهد رسید. باتری‌های یون-لیتیم، با تغییر ترکیب شیمیایی به‌کار رفته در ساختار می‌تواند برای اکثر کاربردهای ذخیره‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. این باتری‌ها در محدوده گسترده‌ای از ابزارهای متحرک و وسایل نقلیه برقی تا استفاده در شبکه توزیع برق کاربرد دارند. در نمودار ۶ میزان تغییرات در استفاده از باتری‌های یون ـ لیتیم در بازار جهانی نشان داده شده است. سریع‌ترین رشد برای ذخیره انرژی در مقیاس شبکه مربوط به چرخ طیاره‌ها و باتری‌های یون - لیتیم است که جهت تنظیم فرکانس به‌کار گرفته می‌شوند. استفاده از چنین روش‌های ذخیره‌سازی، هزینه و تولید گازهای گلخانه‌ای کمتری را در پی دارد. به‌دلیل ماهیت صنعت انرژی، کشورهای دنیا سرمایه‌گذاری فراوانی در زمینه تأمین امنیت انرژی انجام داده‌اند و به آن بسیار توجه دارند. ازاین‌رو بیش از یک‌سوم پروژه‌های طرح شده در سال ۲۰۱۲ مشتمل‌بر باتری‌های یون ـ لیتیم بوده است.

نمودار ۶. بازار جهانی مصرف باتری یون ـ لیتیم به تفکیک کاربرد بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰



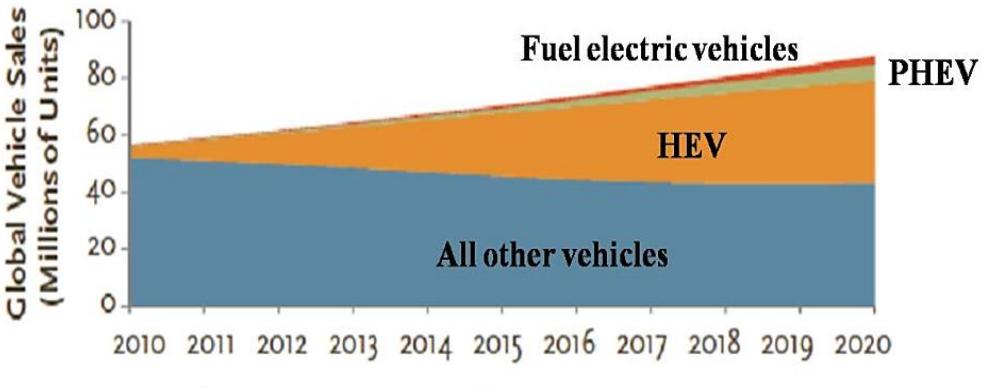
از باتری‌های ساکن، در وسایل ارتباط دور در مناطق درحال توسعه استفاده می‌شود. در ابتدا عمده استفاده از باتری‌های سرب ـ اسید بوده است، اما در طول زمان تغییر جهت به سمت باتری‌های یون ـ لیتیم صورت گرفته است. باتری‌های یون ـ لیتیم در مراکز و بخش‌های اداری به‌منظور ذخیره‌سازی انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگرچه این باتری‌ها در مقیاس متوسط یا بزرگ گران‌قیمت هستند،

اما فضای کمتری را اشغال می‌کنند. به گزارش مؤسسه IHS در سال ۲۰۱۷ ارزش باتری‌های یون ـ لیتیم استفاده شده در دستگاه‌های ارتباط دور ۴۰ میلیون دلار بوده است.

مؤسسه Lux Research پیش‌بینی کرده است که باتری‌های مورد استفاده در سامانه‌های توان پشتیبان و UPS[1] که در صدر آنها باتری‌های یون ـ لیتیم قرار دارد، با رشد ۶ برابری از ۱۴۳ میلیون دلار در سال ۲۰۱۳ به ۸۹۶ میلیون دلار در سال ۲۰۲۰ خواهند رسید. عمده مصرف‌کنندگان این سامانه‌ها، اپراتورهای مراکز داده، پزشکی و تجاری‌اند و تولیدکنندگان آن به‌دنبال ایجاد بازار مصرف بزرگ‌تری هستند. از آنجا که باتری‌های یون - لیتیم دارای دانسیته توان و عمر بیشتر نسبت به باتری‌های سرب ـ اسید هستند، تولیدکنندگان سعی دارند با کاهش ۴ تا ۱۱ درصدی قیمت نهایی، بازار مصرف این نوع باتری را در سامانه‌های پشتیبان و UPS افزایش دهند.

صنعت حمل‌ونقل الکتریکی به سه گروه وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی[2](HEV)، وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی پلاگین[3](PHEV) و وسایل نقلیه الکتریکی (EV) تقسیم‌بندی می‌شود. براساس پیش‌بینی شرکت مدیریت مشاوره بین‌المللی PRTM، فروش این سه گروه تا سال ۲۰۲۰ به حدود ۴۰ میلیون وسیله نقلیه خواهد رسید. این میزان که تقریباً نیمی از فروش وسایل نقلیه الکتریکی است، از تغییر پایدار باتری‌های نیکل متال هیبرید به سمت باتری‌های یون ـ لیتیم خبر می‌دهد. آسیا و اقیانوسیه فروش ترکیبی ۱/۶ میلیون PHEV و ژاپن و ایالات متحده نیز به‌ترتیب فروش ۱/۱ میلیون و ۱ میلیون HEV را تا سال ۲۰۲۰ تجربه خواهند کرد. نمودار زیر وضعیت فروش وسایل نقلیه برقی را نسبت به سایر وسایل حمل‌ونقل تا سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد.

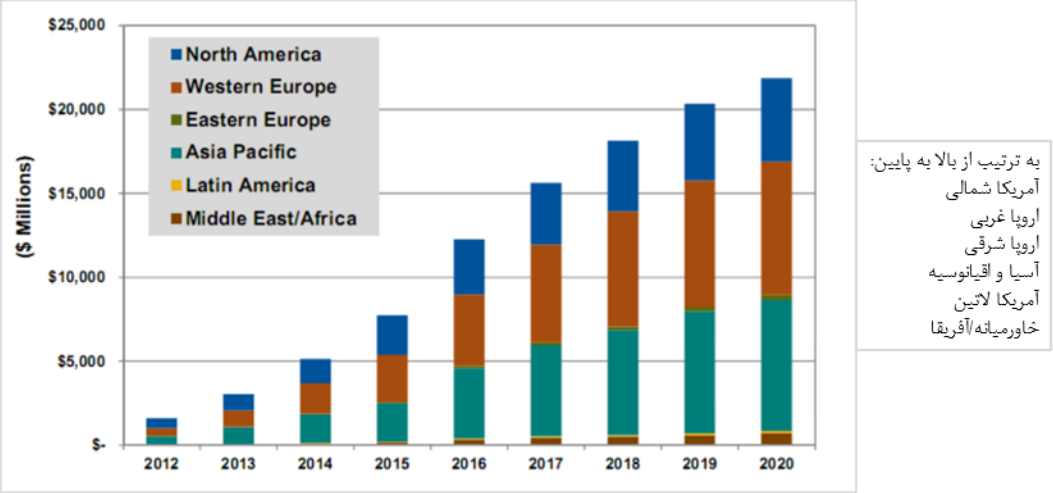
نمودار ۷. فروش جهانی کلیه وسایل نقلیه بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰
براساس پیش‌بینی شرکت PRTM



1. Uninterruptable Power Supply
2. Hybrid Electric Vehicles
3. Plug-in Hybrid Electric Vehicles

باتری‌های نیکل ـ کادمیوم، نیکل متال هیبرید و باتری‌های یون ـ لیتیم از فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی مناسب در بحث حمل‌ونقل به‌شمار می‌آیند و چین، ژاپن، کره جنوبی، فرانسه و ایالات متحده آمریکا، تولیدکنندگان اصلی باتری یون ـ لیتیم مورد استفاده در وسایل نقلیه الکتریکی هستند. از تولیدکنندگان باتری‌های با توان بالا برای وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی می‌توان به شرکت‌های Saft، LG Chem، SK Energy، Hitachi، AESC، A123، Enerdel و Panasonic اشاره کرد. براساس تخمین Merrill Lynch تا سال ۲۰۲۰ بازار باتری‌های یون ـ لیتیم به ۷۰ میلیارد دلار خواهد رسید که پیش‌بینی Boston Consulting Group از بازار ۲۵ میلیارد دلاری تنها برای باتری‌های مورد استفاده در وسایل نقلیه الکتریکی تا آن تاریخ حکایت دارد. Navigant Research ادعا کرده است که بازار باتری‌های لیتیمی در وسایل حمل‌ونقل سبک از ۱/۶ میلیارد دلار سال ۲۰۱۲ به ۲۲ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۰ خواهد رسید. نمودار ۸ درآمد باتری‌های یون ـ لیتیم را به تفکیک مناطق مختلف دنیا نشان می‌دهد.

نمودار ۸. درآمد کلی حاصل از باتری یون ـ لیتیم در بخش حمل‌ونقل به تفکیک منطقه بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۰



آسیا به‌دلیل عوامل متعددی همچون صنایع الکترونیکی از پیش موجود، سهم بزرگی از بازار تولید باتری‌های یون ـ لیتیم را داراست. چالش مطرح در مورد وسایل نقلیه الکتریکی، قیمت باتری است. قیمت باتری‌های سرب ـ اسید در حدود ۲۲۰ دلار/ کیلووات و باتری‌های نیکل متال هیبرید ۵۰۰ دلار/کیلووات است. باتری‌های پیشرفته به‌خصوص باتری‌های یون ـ لیتیم در صورت تولید انبوه با کاهش قیمت تولید همراه بوده و براساس پیش‌بینی مؤسسه Ronald Berger به قیمت ۲۵۰ دلار/کیلووات خواهد رسید. جدول ۲ قیمت مقایسه‌ای و پیش‌بینی سامانه‌های باتری در وسایل نقلیه الکتریکی را

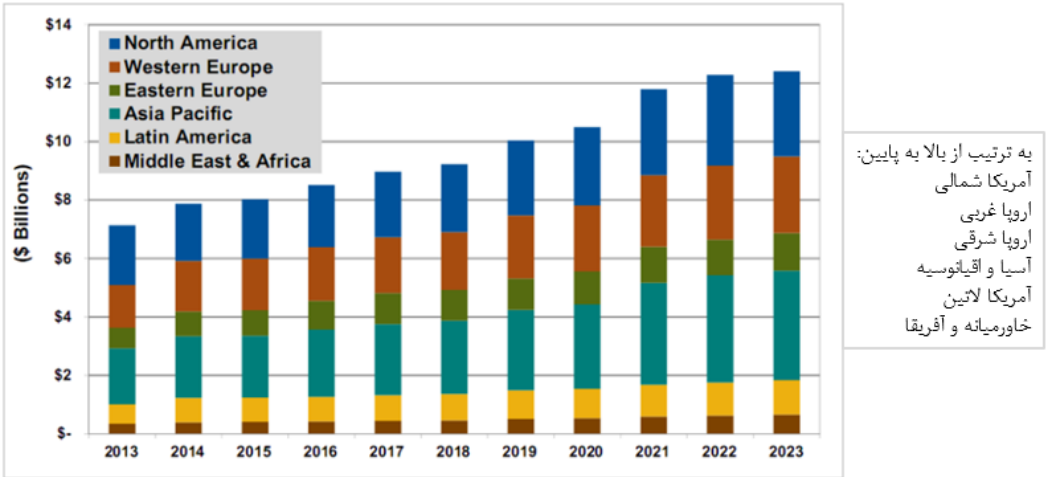
براساس گزارش این مؤسسه نشان می‌دهد.

جدول ۲. قیمت مقایسه‌ای و پیش‌بینی سامانه‌های باتری در وسایل نقلیه الکتریکی (دلار آمریکا/ کیلو وات ساعت)

سامانه باتری	۲۰۱۲	۲۰۱۵	۲۰۲۰
یون ـ لیتیم	۶۰۰-۷۵۰	۴۰۰-۵۰۰	۲۵۰-۳۰۰
نیکل متال هیبرید	۵۰۰-۷۰۰	۴۰۰-۵۰۰	۳۵۰-۴۰۰
نیکل ـ کادمیم	۴۰۰-۶۰۰	۳۵۰-۴۵۰	۳۰۰-۳۵۰
سرب ـ اسید	۲۲۰-۲۵۰	۲۰۰-۲۲۰	۱۸۰-۲۰۰

تلفن‌های هوشمند، لپ‌تاپ‌ها، تبلت‌ها، تجهیزات پزشکی و سامانه‌های دفاعی باعث رشد صنعت هشت میلیارد دلاری باتری در طول ۲۰ سال برای تأمین تقاضای موجود شده‌اند. بزرگ‌ترین چشم‌انداز برای باتری‌های پیشرفته مربوط به بخش باتری‌های یون ـ لیتیم است که توان تمامی ابزارهای قابل حمل را فراهم می‌کند. تخمین Navigation Research در مورد درآمد حاصل از فروش باتری‌های مورد استفاده در کاربردهای تأمین توان قابل حمل، رشد از ۷/۱ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۳ به ۱۲/۴ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۳ می‌باشد. نمودار ۹ درآمد کلی باتری‌های مورد استفاده در ابزارهای قابل حمل را به تفکیک منطقه نشان می‌دهد. بخش باتری‌های قابل شارژ بیشترین فرصت رشد را با نرخ رشد سالیانه ۱۰ درصد برحسب حجم ظرفیت برای باتری‌های قابل شارژ یون ـ لیتیم فراهم می‌کند.

نمودار ۹. درآمد کلی حاصل از باتری‌های مورد استفاده در ابزارهای قابل حمل به تفکیک منطقه بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳



باتری‌های یون ـ لیتیم، سرب ـ اسید، نیکلی و روی ـ هوا ازجمله باتری‌های مورد استفاده در صنایع نظامی هستند. به‌دلیل رشد تجهیزات نظامی، نیاز روزافزون به باتری‌های با دانسیته انرژی بالا و سبک‌وزن بیش از پیش مشهود است. بیشترین کاربرد در این حوزه به باتری‌های سرب ـ اسید مربوط می‌شود و در جایگاه بعدی باتری‌های یون ـ لیتیم کاربرد بیشتری دارند. حضور باتری‌های نیکل ـ کادمیوم در تجهیزات ارتباطی نظامی به‌دلیل نفوذ باتری‌های یون ـ لیتیم در حال کمرنگ‌تر شدن است. نگرانی‌های زیادی در مورد آینده مواد خام که امکان تولید باتری را فراهم می‌کند، وجود دارد. به‌گونه‌ای که با افزایش تقاضا و با توجه به عدم رشد همزمان و متناسب سرمایه‌گذاری‌ها در حوزه تأمین منابع اولیه تولید باتری، قیمت مواد اولیه به‌شدت رو به افزایش بوده و درنتیجه ممکن است قیمت باتری‌های تولید شده، در حالت بحرانی قرار گیرد. در چنین شرایطی به نظر می‌رسد که استراتژی پاسخ بازیگران عرصه تولید باید تغییر کند. بر همه بازیگران این حوزه واجب است تا پیچیدگی و پویایی این تغییرات سریع بازار را دریافته و استراتژی‌هایی را در پیش گیرند که در برابر این عدم قطعیت‌ها پایدار باشد.

۲-۲. منابع لیتیم

به‌طور کلی میزان لیتیم موجود در آب دریاها ۲۳۰ میلیارد تن با غلظت ۰/۱۴ تا ppm ۰/۲۵ برآورد شده است، در حالی که در پوسته زمین ۲۰ تا ppm ۷۰ لیتیم یافت می‌شود. در گذشته این تصور وجود داشت که منابع لیتیم در دنیا کمیاب است، در حالی که این امر حداقل در مقطع فعلی چندان صحیح نیست، به‌طوری که نتایج تحقیقات دانشمندان زمین‌شناسی نشان داده است که حدوداً ۰/۰۰۶ درصد پوسته زمین را عنصر لیتیم تشکیل می‌دهد. درنتیجه می‌توان گفت ذخایر لیتیم در مقایسه با فلزات روی، مس و تنگستن، کمیاب‌تر، ولی در مقایسه با کبالت و قلع فراوان‌تر است. براساس تخمین سازمان زمین‌شناسی آمریکا مقدار ذخایر قابل استحصال لیتیم در دنیا حدوداً ۴۰ میلیون تن بوده که بالغ بر ۶۵ درصد از آن در سه کشور آرژانتین، بولیوی و شیلی قرار دارد. در حال حاضر بزرگ‌ترین حجم تولید لیتیم کربنات در دنیا مختص به دریاچه نمک Salar de Atacama واقع در شمال شیلی است. به‌طوری که ۴۰ درصد تولید جهانی لیتیم در این منطقه انجام می‌شود. این شورابه حاوی ۰/۱۵ درصد لیتیم بوده و کل نمک‌های حل شده در آن ۲۸ درصد است. شورابه این منطقه از عمق ۳۰ متری زمین به حوضچه‌های تبخیری هدایت شده و مورد تغلیظ و تغییر ترکیب شیمیایی قرار می‌گیرد.

به‌طور کلی مقادیر اندکی از لیتیم در طبیعت در کانه‌ها، صخره‌ها، خاک‌ها و آب‌های طبیعی یافت می‌شود. منابع شناخته شده و قابل توجه لیتیم شامل پگماتیت،[1] شورابه‌های اقلیمی و ژئوترمال، شورابه میادین نفتی و خاک معدنی هکتوریت[2] است. جدول ۳ میزان لیتیم موجود و میزان لیتیم قابل

1. Pegmatite
2. Hectorite

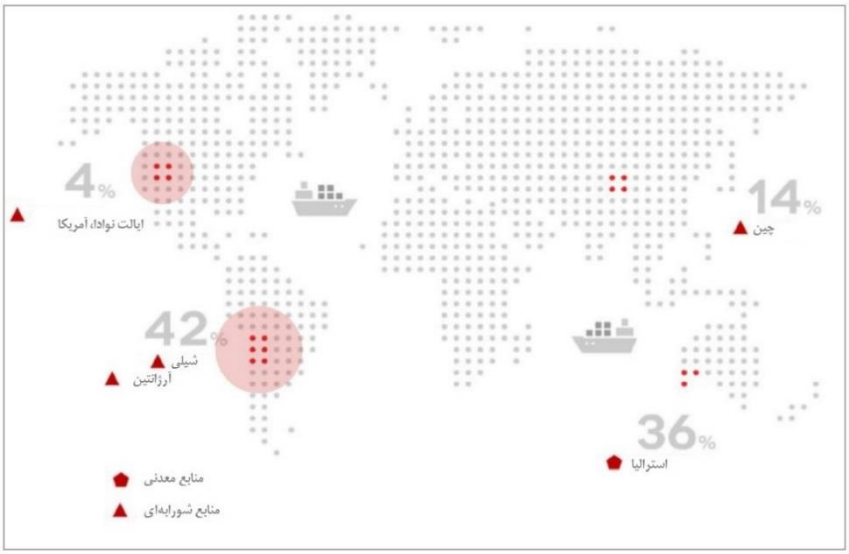
بهره‌برداری در هر منبع را به تفکیک نشان می‌دهد.

جدول ۳. میزان کل لیتیم موجود در منابع مختلف (میلیون تن)

منبع لیتیم	میزان لیتیم موجود	میزان لیتیم قابل بهره‌برداری
کانسارها	۸/۸	۴/۴
شورابه‌ها	۵۲/۳	۲۳/۵
هکتوریت	۲/۰	۱/۰
اقیانوس‌ها	۲۲۴۰۰۰	۴۴۸۰۰

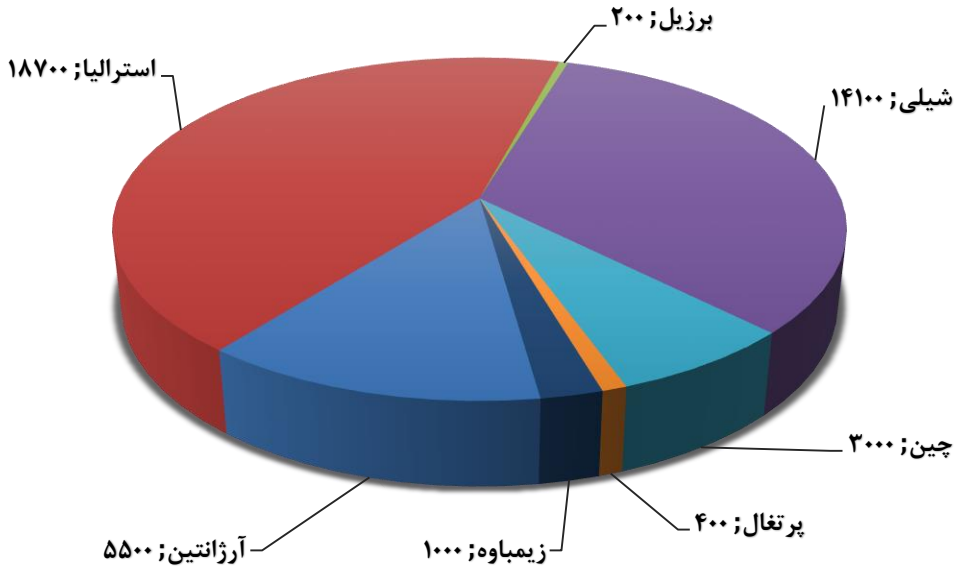
شکل ۳ به‌صورت شماتیک پراکندگی جغرافیایی تولید لیتیم در دنیا برحسب نوع منابع (شورابه‌ای و یا سنگ معدن) را طبق اعلام مؤسسه «ریسورس کپیتال سوئیس»[1] نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، بیش از ۸۰ درصد لیتیم دنیا در سه کشور شیلی، آرژانتین و استرالیا تولید می‌شود. با این تفاوت که منابع مورد استحصال در دو کشور شیلی و آرژانتین از نوع منابع شورابه‌ای و منابع کشور استرالیا از نوع معدنی هستند. نمودارهای بعدی نیز آمار تولید، ذخایر قابل برداشت و ذخایر کلی کشورها را براساس گزارش سازمان زمین‌شناسی آمریکا نشان می‌دهند.

شکل ۳. پراکندگی جغرافیایی تولید لیتیم برحسب نوع منابع در دنیا

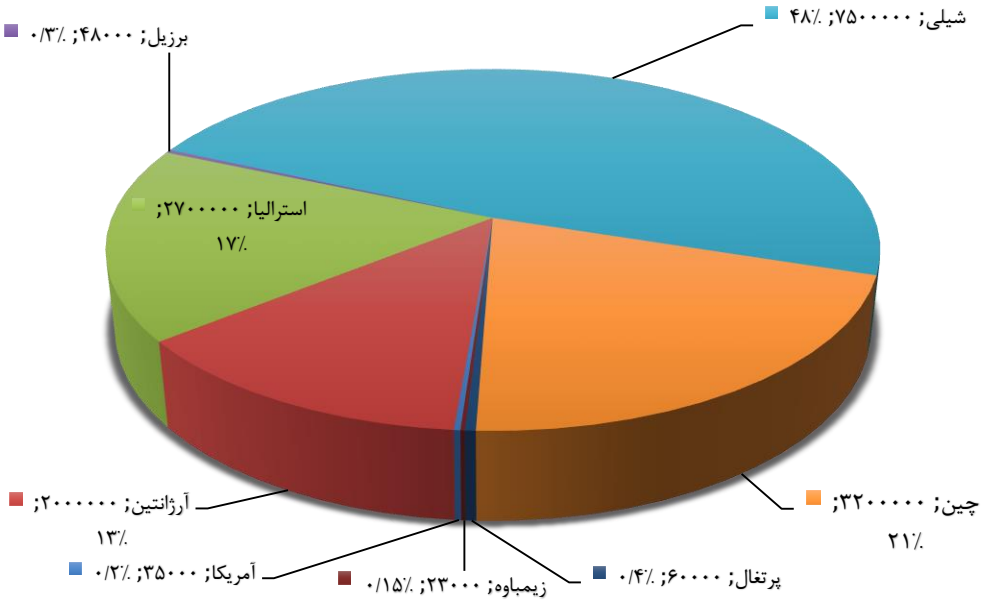


1. Swiss Resource Capital AG

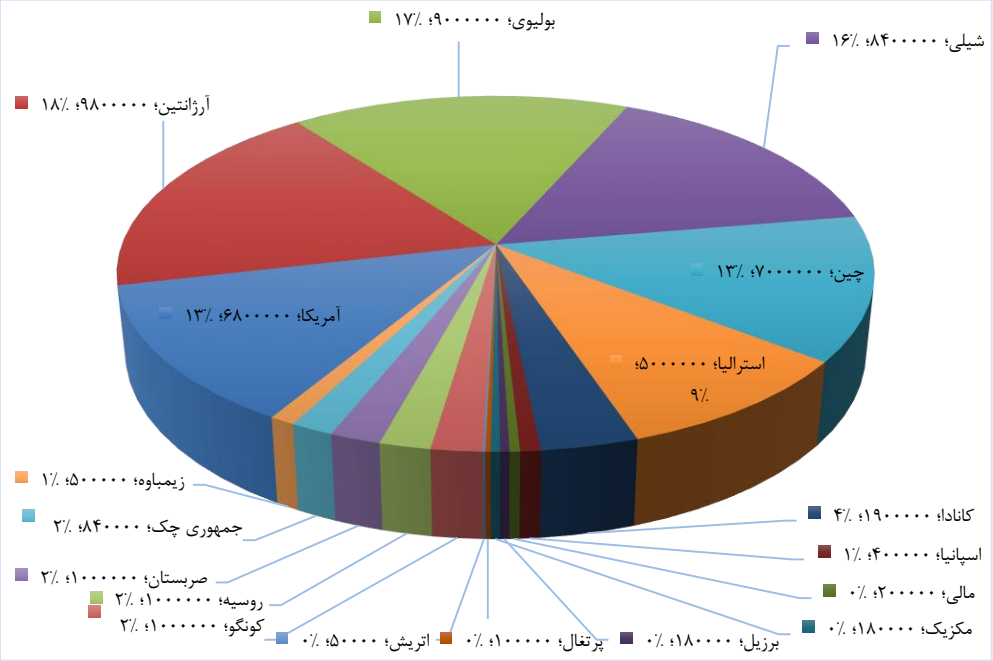
نمودار ۱۰. تولید لیتیم در دنیا (برحسب تن) براساس آخرین گزارش منتشر شده از سازمان زمین‌شناسی آمریکا در سال ۲۰۱۸



نمودار ۱۱. منابع قابل برداشت لیتیم در دنیا (برحسب تن) براساس آخرین گزارش منتشر شده از سازمان زمین‌شناسی آمریکا در سال ۲۰۱۸

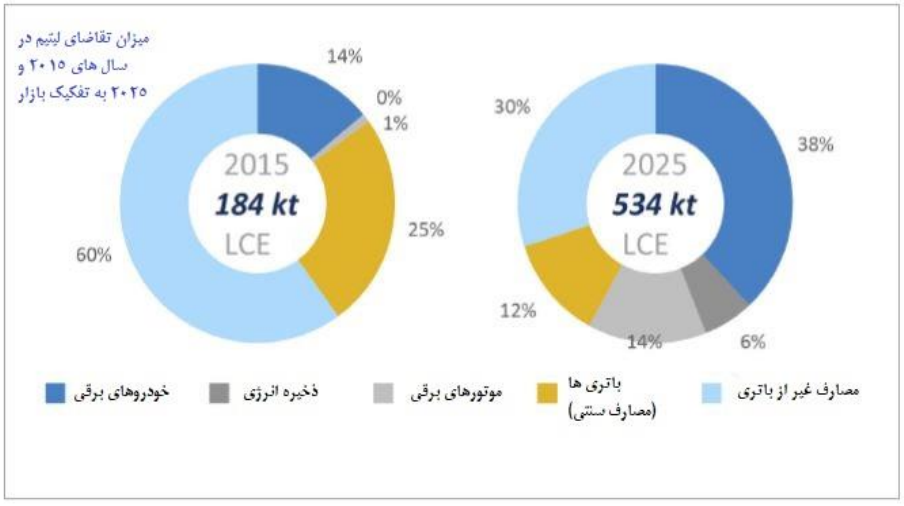


نمودار ۱۲. منابع لیتیم موجود در دنیا (برحسب تن) براساس آخرین گزارش منتشر شده از سازمان زمین‌شناسی آمریکا در سال ۲۰۱۸



براساس آمار، در سال ۲۰۱۵ میزان تولید جهانی لیتیم برمبنای واحد معادل لیتیم کربنات (LCE) برابر با ۱۷۵۰۰۰ تن بوده است که طبق پیش‌بینی‌ها، این رقم در سال ۲۰۲۰ به مقدار ۳۳۰ هزار تن در سال خواهد رسید. نمودار ۱۳ میزان نسبی مصرف لیتیم به تفکیک بازار در سال ۲۰۱۵ و همچنین پیش‌بینی برای سال ۲۰۲۵ را نشان می‌دهد. این آمار بیانگر رشد تقریباً سه برابری مصرف لیتیم در دنیاست و همچنین افزایش سه برابری سهم وسایل نقلیه الکتریکی در سال ۲۰۲۵ را نشان می‌دهد.

نمودار ۱۳. میزان نسبی مصرف لیتیم به تفکیک بازار در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵



به‌طور کلی منابع اصلی استخراج لیتیم در دنیا به سه شکل کلی وجود دارند که به‌ترتیب فراوانی عبارتند از:

ـ ذخایر شورابه‌ای،

ـ ذخایر موجود در پگماتیت (اسپادومین، لپیدولایت، پتالایت و ...)،

ـ ذخایر هکتوریت[1] و جاداریت.[2]

۱-۲-۲. منابع شورابه‌ای

منابع شورابه‌ای به‌عنوان اصلی‌ترین منبع استخراج لیتیم در دنیا درحال حاضر مطرح هستند. این منابع به‌صورت عمده به سه شکل موجود عبارتند از:

ـ دریاچه‌های نمک،

ـ منابع زمین‌گرمایی،[3]

ـ میادین نفتی.

منابع شورابه‌ای به‌صورت کلی حدود ۵۸ درصد کل ذخایر لیتیم دنیا را تشکیل می‌دهند که از این مقدار ۵۳ درصد متعلق به ذخایر موجود در دریاچه‌های نمک، ۳ درصد میادین نفتی و ۲ درصد منابع زمین‌گرمایی است. آرژانتین، شیلی و بولیوی سه کشوری هستند که بیشترین مقادیر ذخیره لیتیم به‌صورت شورابه در دریاچه‌های نمک[4] را در منطقه‌ای موسوم به مثلث لیتیم دارا می‌باشند (۷۸ درصد کل منابع شورابه‌ای در دنیا) و پس از آن چین و آمریکا ازجمله تولیدکنندگان لیتیم از منابع شورابه‌ای هستند.

شکل ۴. منطقه موسوم به مثلث لیتیم در مرز بین سه کشور شیلی، آرژانتین و بولیوی

1. Hectorite
2. Jadarite
3. Geothermal
4. Salar

کشورهای افغانستان، ایران، مکزیک، مغولستان و کشورهای منطقه آسیای میانه و شمال آفریقا از دیگر مناطق دارای پتانسیل تولید لیتیم از منابع شورابه‌ای می‌باشند.

برای بررسی اقتصادی بودن استحصال لیتیم از منابع شورابه‌ای، سه فاکتور اولیه و مهم عبارتند از:

۱. غلظت لیتیم موجود در منبع،

۲. نسبت منیزیم به لیتیم،

۳. مقدار تبخیر سطحی در محل منبع.

هرچه مقدار غلظت لیتیم در منبع و همچنین میزان تبخیر سطحی بیشتر باشد، مقدار تولید بیشتر، و زمان لازم برای استحصال لیتیم از شورابه، کمتر است. از طرفی هرچه نسبت منیزیم به لیتیم در یک منبع بیشتر باشد، استحصال لیتیم از آن دشوارتر است. بنابراین، منابعی که نسبت منیزیم به لیتیم آنها کمتر است، منبع مناسب‌تری برای استخراج لیتیم هستند.

برای تشکیل دریاچه‌های نمک غنی از لیتیم، شرایط معینی باید وجود داشته باشد که برخی از آنها عبارتند از:

ـ وجود منابع لیتیم اولیه مانند سنگ‌های آتشفشانی فلسیک یا گرانیتی در حوضه آبریز آنها. چرخش طبیعی آب به‌صورت بارش‌های سطحی یا تماس با سیالات زمین‌گرمایی می‌تواند لیتیم را به دریاچه‌های نمک منتقل کند. در حالت دیگر، چرخش آب‌های زیرزمینی می‌تواند لیتیم این سنگ‌ها را در خود حل کرده و آن را به حوضچه زیرزمینی دریاچه‌های نمک منتقل کند.

ـ وجود منبع عمیق گرمایی/ آتشفشانی برای تولید آب گرم در اعماق زمین. آب گرم می‌تواند لیتیم موجود در سنگ‌های لیتیم‌دار را بسیار بیشتر از آب سرد در خود حل کند.

ـ بارش باران و نرخ ورودی آب‌های زیرزمینی باید بسیار کمتر از نرخ تبخیر سطحی باشد، چراکه در غیر این صورت، شورابه به مرور زمان رقیق شده و از نظر اقتصادی استحصال آن غیرعملی می‌شود.

منابع شورابه‌ای زمین‌گرمایی لیتیم عبارتند از: مناطقی که گردش آب‌های داغ در میان صخره‌ها و سنگ‌های آتشفشانی غنی از لیتیم در زیر زمین جریان دارد. آب داغ شده ناشی از حرارت لایه‌های زیرین زمین مقادیر زیادی از لیتیم موجود در این سنگ‌ها را در مقایسه با آب‌های سردتر لایه‌های بالاتر در خود حل می‌کند که با استخراج این آب‌ها در سطح زمین، امکان استحصال لیتیم حل شده در آنها فراهم می‌شود. یکی از مهم‌ترین مناطق درحال توسعه استخراج لیتیم از منابع زمین‌گرمایی در دریاچه نمک «سالتون»[1] در ایالت کالیفرنیای آمریکا قرار دارد که غلظت لیتیم موجود در آب داغ استخراج شده در این منطقه تا حدود ۲۰۰ ppm هم می‌رسد.

یکی دیگر از منابع بالقوه شورابه‌ای برای استخراج لیتیم، ذخایر عمیق نفت و گاز هستند. این

---

1. Salton Sea

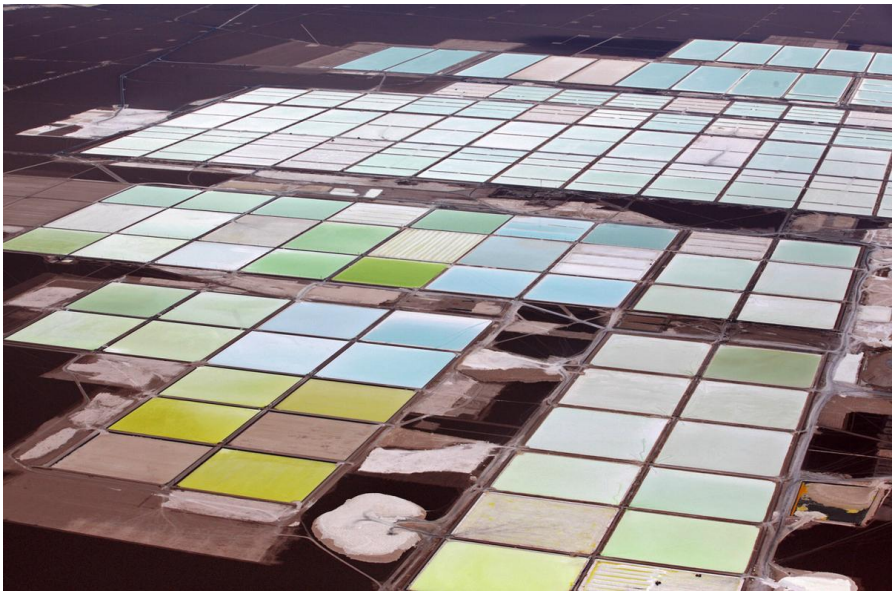
شورابه‌ها طبق گزارش‌ها می‌توانند بیش از ۱۰۰ هزار میلی‌گرم بر لیتر یون حل شده در خود داشته باشند و مقادیر لیتیم موجود در آنها حدود ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است. درحال حاضر روش غالبی برای استحصال لیتیم از شورابه‌های منابع نفتی وجود ندارد و یکی از دلایل عدم توجه زیاد به این روش در این مقطع، می‌تواند نسبت کم لیتیم در مقایسه با سایر یون‌ها و همچنین ارزان‌تر بودن استحصال لیتیم از شورابه‌های مرسوم باشد، هرچند در آینده و با توسعه روش‌های استحصال، این منابع نیز می‌توانند در تولید لیتیم اهمیت یابند.

لیتیم کربنات به‌صورت عمده به روش تبخیر شورابه‌های حاوی لیتیم با افزودن سدیم کربنات به حوضچه‌های حاوی شورابه استحصال می‌شود. برای تولید فلز خالص لیتیم، لیتیم کربنات در داخل هیدروکلریک اسید حل شده که منجر به تولید گاز کربن دی‌اکسید و خروج آن و تولید ترکیب لیتیم کلراید داخل محلول می‌شود. در ادامه این ترکیب در تبخیرکننده خلأ طی فرایند احیا تا کریستالیزاسیون فلز خالص لیتیم ادامه می‌یابد.

ـ استحصال لیتیم از شورابه‌ها (مورد مطالعه، دریاچه آتاکاما در شیلی)

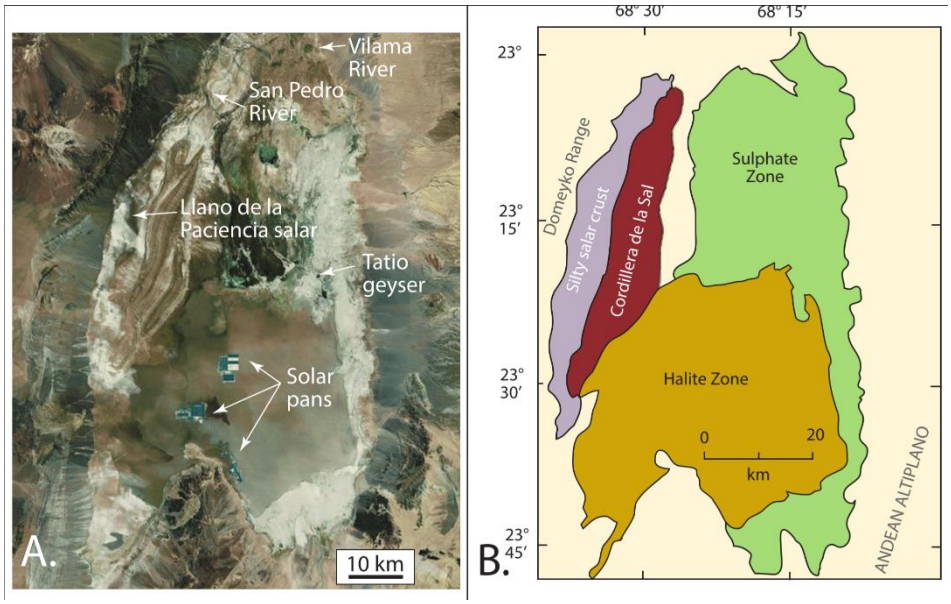
درحال حاضر استحصال لیتیم از منابع شورابه‌ای با روشی به‌نسبت سنتی صورت می‌پذیرد که طی سالیان گذشته تغییر چندانی نکرده است. یعنی استخراج شورابه از عمق کم زمین به سطح و قرار دادن آنها در حوضچه‌های بزرگ تبخیر سطحی که به مرور زمان و با تبخیر آب شورابه‌ها به‌وسیله نور خورشید، غلظت شورابه افزایش یافته و آماده فراوری لیتیم می‌شود. این فرایند به‌نسبت طولانی است و می‌تواند تا حدود یک سال به طول بینجامد.

شکل ۵. حوضچه‌های تبخیر سطحی شورابه در دریاچه آتاکاما در شیلی



«دریاچه نمک آتاکاما»[1] در شیلی باکیفیت‌ترین و پُربازده‌ترین منبع تولید لیتیم در دنیاست، به همین دلیل استحصال لیتیم از این منبع ارزان‌ترین فرایند ممکن در مقایسه با سایر منابع می‌باشد. این دریاچه مساحتی بالغ بر ۳۵۰۰ کیلومتر مربع دارد که مساحت هسته مرکزی سنگ نمک آن بین ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلومتر مربع است. شکل زیر نقشه ماهواره‌ای دریاچه آتاکاما، حوضچه‌های تبخیر موجود در آن و همچنین مناطق مختلف آن از نظر زمین‌شناسی را نشان می‌دهد. استخراج لیتیم از قسمت هالیتی (سنگ نمک) انجام می‌شود.

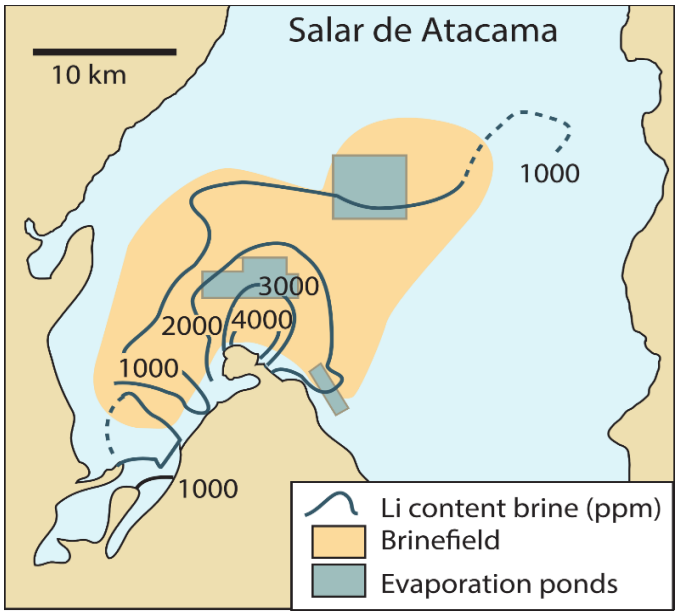
شکل ۶. نقشه مناطق مختلف دریاچه نمک آتاکاما در شیلی



هسته مرکزی منطقه هالیت به‌طور متوسط دارای غلظت ppm ۴۰۰۰ لیتیم است که در نوع خود بیشترین میزان لیتیم را در میان تمامی منابع اصلی شورابه‌ای در دنیا داراست. شکل ۷ کانتور غلظتی لیتیم در هسته هالیتی دریاچه آتاکاما را نشان می‌دهد.

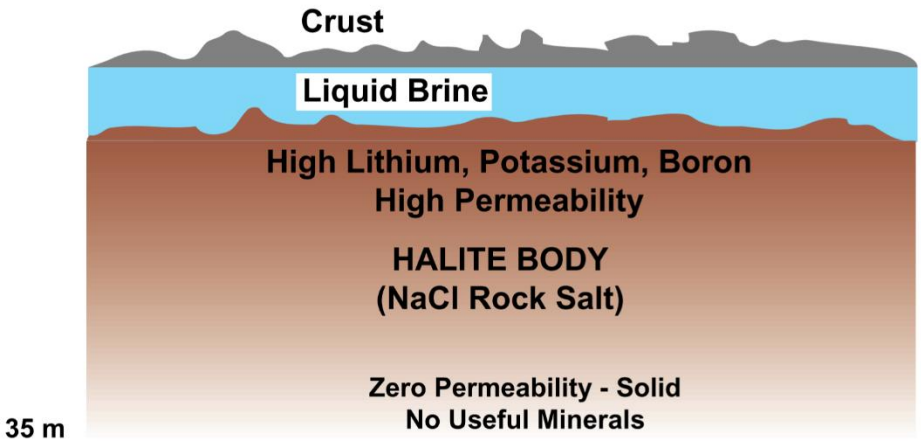
1. Salar de Atacama

شکل ۷. مناطق غلظتی لیتیم در هسته هالیتی دریاچه آتاکاما



منطقه بالایی پوسته نمک در کف دریاچه دارای ساختاری متخلخل با قابلیت نفوذ آب است که شورابه حاوی لیتیم، پتاسیم، بور، منیزیم و سایر عناصر، قابلیت جریان یافتن داخل آن را می‌یابد. کمی پایین‌تر، میزان تخلخل موجود در سنگ نمک به مرور کاهش یافته تا اینکه ساختار کاملاً جامد و بدون تخلخل بر اثر فشردگی، فشار لایه‌های بالایی و رسوب نمک تشکیل شود. از این منطقه به بعد، عملاً لیتیم زیادی وجود ندارد و منطقه اصلی و مفید بستر دریاچه برای استحصال لیتیم، درنهایت عمق ۳۵ متری (برای دریاچه آتاکاما) است.

شکل ۸. مقطع عمقی دریاچه آتاکاما و لایه‌های تشکیل‌دهنده آن



به‌صورت خلاصه، مراحل استحصال لیتیم از یک منبع شورابه‌ای به‌شرح زیر است:

۱. پمپاژ شورابه از عمق ۳۰ متری (دریاچه آتاکاما) به سطح زمین و انتقال آن به حوضچه‌های تبخیر بزرگ،

۲. رسوب سدیم کلراید (نمک طعام) از شورابه و استحصال آن (در صورت نیاز)،

۳. انتقال به حوضچه تبخیر دیگر و رسوب سدیم کلراید و پتاسیم کلراید،

۴. انتقال محلول باقی‌مانده به حوضچه دیگر و قرار گرفتن در آن به‌منظور تکمیل تبخیر سطحی و افزایش غلظت لیتیم تا ۶۰۰۰ ppm (در این مرحله با افزایش غلظت لیتیم محلول به مرور به رنگ سبز و زرد در می‌آید)،

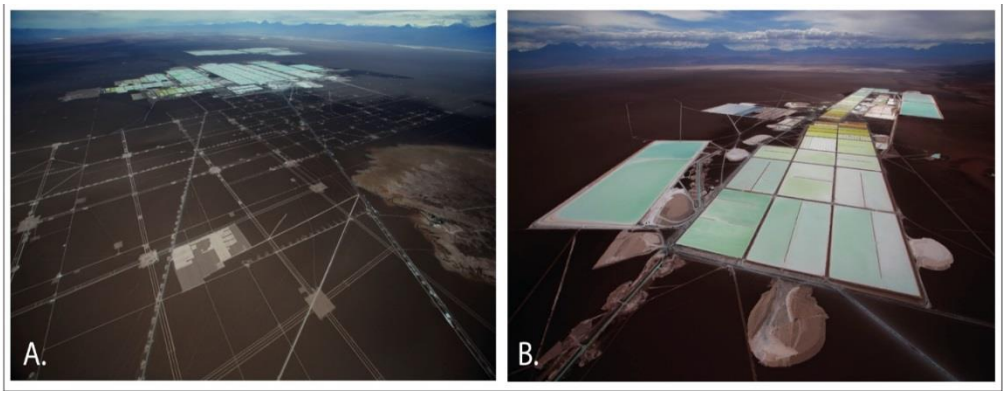
۵. انتقال ترکیب باقی‌مانده به کارخانه و حذف ناخالصی‌های باقی‌مانده ازجمله منیزیم و بور،

۶. افزودن سدیم کربنات به ترکیب غنی از لیتیم و تشکیل و رسوب لیتیم کربنات و استحصال آن،

۷. عملیات خالص‌سازی لیتیم کربنات و بسته‌بندی و تکمیل فرایند استحصال.

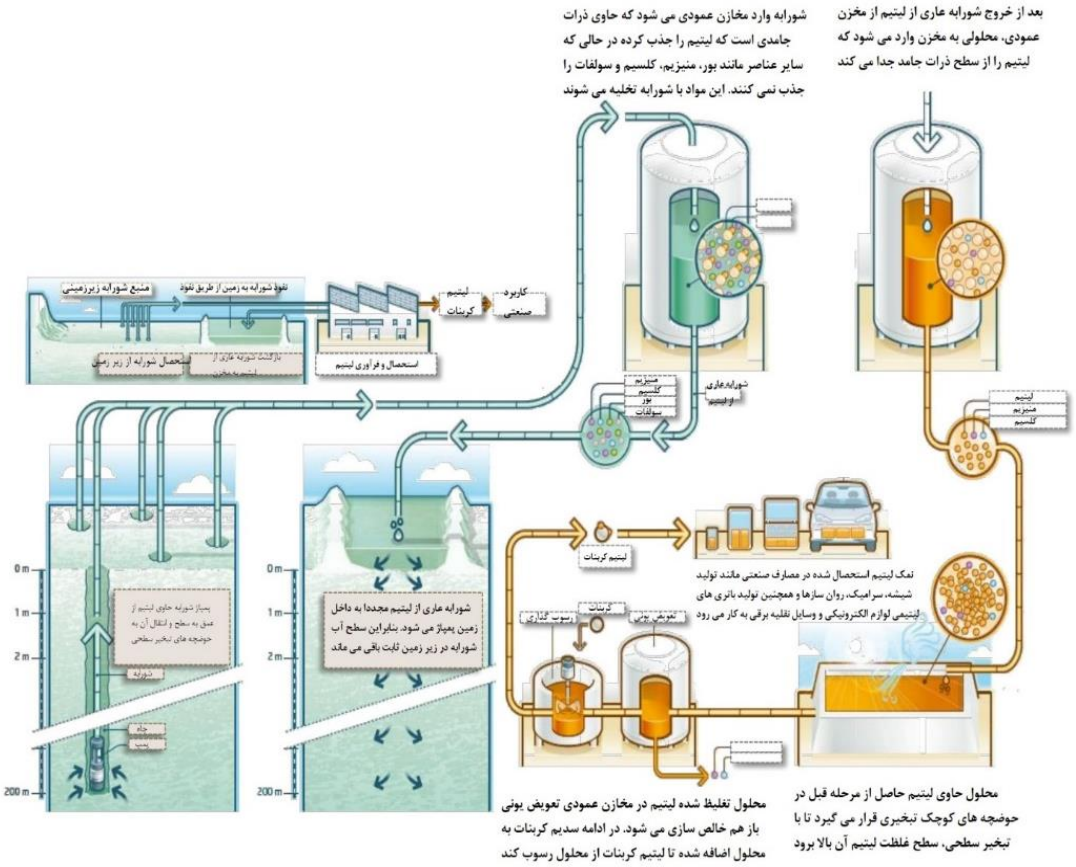
شکل زیر نمایی از حوضچه‌های تبخیر در دریاچه آتاکاما را نشان می‌دهد.

شکل ۹. الف) پمپاژ شورابه به سطح زمین و انتقال آن به حوضچه‌های تبخیری از طریق کانال ب) حوضچه‌های تبخیر شورابه



روش تبخیری فوق که به‌صورت سنتی سال‌هاست مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارای سرعت به‌نسبت پایینی در استحصال لیتیم می‌باشد. درحال حاضر مطالعات مختلفی روی سایر روش‌های استحصال لیتیم با سرعت و بازدهی بیشتر انجام گرفته یا درحال انجام است. به‌عنوان مثال شرکت فرانسوی ERAMET برای توسعه دریاچه نمک سنتناریو در آرژانتین جهت استحصال لیتیم (با ظرفیت تولید ۲۰ هزار تن لیتیم کربنات در سال) روشی توسعه داده که فاقد حوضچه‌های بزرگ تبخیر لیتیم است (که تبخیر از آنها ماه‌ها طول می‌کشد) و در عوض، لیتیم به‌صورت مستقیم توسط ذرات جامدی استخراج می‌شود. شکل ۱۰ شماتیکی از روش توسعه داده شده توسط این شرکت را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰. شماتیکی از روش استحصال لیتیم - ابداع شرکت ERAMET



۲-۲-۲. منابع سنگ معدن

غیر از شورابه‌ها، دیگر منبع اصلی استحصال لیتیم، ترکیبات معدنی حاوی لیتیم هستند که اغلب در نوع خاصی از سنگ‌های آذرین پگماتیت به نام «ال‌سی‌تی ـ پگماتیت»[1] یافت می‌شوند. لیتیم در کانسارهای پگماتیتی غالباً به‌صورت کانی‌های «اسپادومین»،[2] «لپیدولایت»[3] و «پتالایت»[4] مشاهده می‌شود. این نوع از ذخایر لیتیم حدود ۳۲ درصد کل منابع لیتیم دنیا را به‌خود اختصاص داده‌اند. به‌طور معمول تنها برخی از انواع مناطق دارای پگماتیت حاوی مقدار قابل صرفه اقتصادی لیتیم هستند، هرچند عناصر ارزشمند دیگری نظیر تانتالم، قلع، بریلیم، روبیدیم و سزیم نیز در کانسارهای پگماتیتی می‌توانند به‌صورت گسترده وجود داشته باشند. مناطق پگماتیتی لیتیم‌دار می‌توانند محدوده بزرگی را شامل شوند، به‌طور مثال کمربند پگماتیت کارولینای شمالی در ایالات متحده طول حدود ۵۰ کیلومتر و عرضی بین ۵۰۰ متر تا سه کیلومتر دارد. برخلاف منابع شورابه‌ای، لیتیم در منابع معدنی، از سنگ معدن اسپادومین،

1. Lithium Cesium Tantalum (LCT) Pegmatite
2. Spodumene
3. Lepidolite
4. Petalite

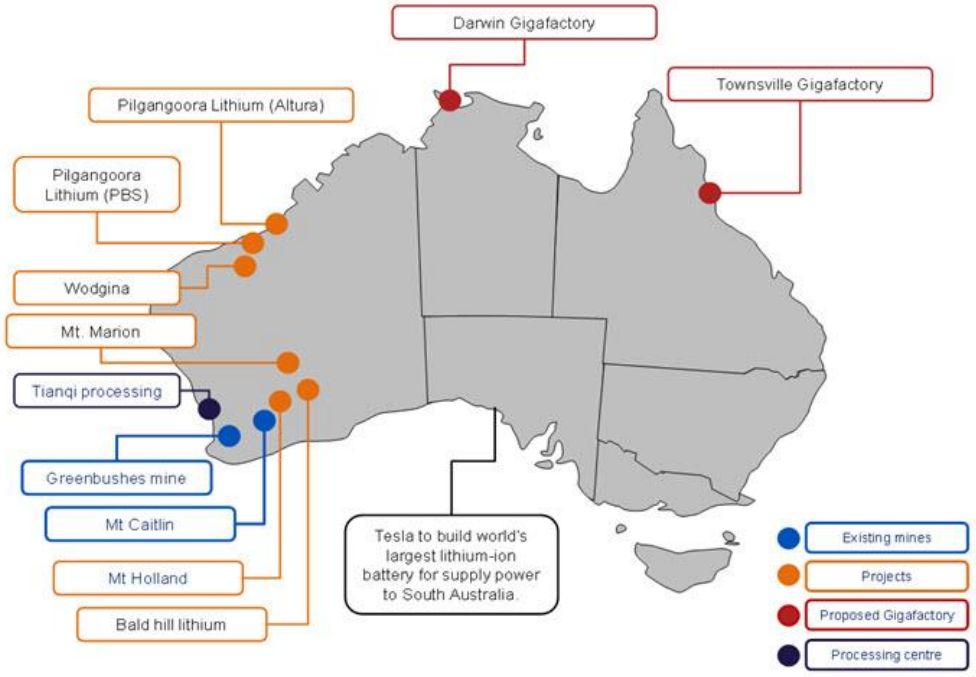
ترکیب سیلیکات آلومینیم حاوی لیتیم استخراج می‌شود. پروسه استحصال لیتیم از سنگ معدن شامل فرایندهای متداولی می‌شود که خروجی آن لیتیم کربنات با خلوص تا ۹۹/۵ درصد است. فرایندهای حرارتی و هیدرومتالورژیکی لازم برای استحصال لیتیم به این روش موجب شده که در این روش استحصال لیتیم به‌نسبت گران باشد. این منابع معدنی تقریباً به‌طور انحصاری در استرالیا استخراج می‌شوند و فراوری آنها در واحدهایی در کشور چین صورت می‌پذیرد.

در سال ۲۰۱۷، طبق اعلام سازمان زمین‌شناسی آمریکا، کشور استرالیا با پیشی گرفتن از شیلی به بزرگ‌ترین تولیدکننده لیتیم در دنیا تبدیل شده است. تقریباً تمامی ذخایر لیتیم استرالیا از نوع سنگ معدن پگماتیت هستند و این کشور همچنین سال‌هاست به‌عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده لیتیم از منابع غیر شورابه‌ای مطرح می‌باشد. بزرگ‌ترین معدن پگماتیت لیتیم‌دار دنیا (به‌صورت ترکیب اسپادومین)، معدن «گرین‌بوشز»[1] واقع در جنوب غرب استرالیاست.

شکل ۱۱. معدن و تأسیسات گرین‌بوشز در جنوب غربی استرالیا، بزرگ‌ترین معدن کشف شده لیتیم پگماتیتی در دنیا

1. Greenbushes

شکل ۱۲. معادن و پروژه‌های مهم لیتیم در استرالیا



تولید لیتیم کربنات از ترکیبات اسپادومین دارای مراحل مختلفی است که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

ـ خرد کردن، آسیاب و سایز کردن سنگ معدن حاوی اسپادومین،

ـ استحصال کنسانتره اسپادومین، حاوی ۷۵ تا ۸۵ درصد اسپادومین (۶ تا ۷ درصد لیتیم اکساید)،

ـ حرارت‌دهی تا دمای ۱۰۵۰ درجه سیلسیوس برای تبدیل کریستال اسپادومین - α به اسپادومین - β که واکنش‌پذیری بسیار بهتری با اسید سولفوریک دارد،

ـ حل‌سازی ترکیب اسپادومین - β به‌وسیله اسید سولفوریک و تولید لیتیم سولفات و سیلیکات آلومینیم،

ـ شستن کنسانتره جهت حل‌سازی لیتیم سولفات در محلول،

ـ چندین مرحله خالص‌سازی محلول (استخراج آهن و آلومینیم و سایر ترکیبات)،

ـ تولید لیتیم هیدروکساید گرید باتری به‌وسیله الکترولیز شیمیایی محلول خالص شده حاوی لیتیم سولفات یا تولید لیتیم کربنات با افزودن سدیم کربنات به محلول.

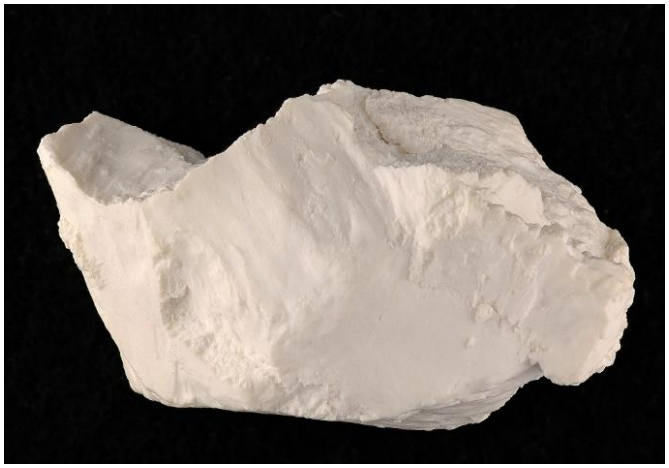
استحصال لیتیم از سنگ‌های پگماتیت حاوی ترکیبات لیتیم‌دار (غالباً اسپادومین و لپیدولایت) در مقایسه با روش شورابه، بسیار سریع‌تر و از نظر تکنیکی به‌نسبت ساده‌تر است، چراکه در روش شورابه‌ای، تبخیر و افزایش خلوص شورابه در حوضچه‌های تبخیر عملاً ماه‌ها زمان می‌برد. اما از طرف دیگر، روش استخراج از سنگ معدن، از نظر مصرف انرژی بسیار پُرهزینه‌تر است (به‌خصوص در مرحله تبدیل

اسپادومین - α به اسپادومین - β) و همچنین هزینه اکتشاف و توسعه معادن آن نیز در مقایسه با منابع شورابه‌ای گران‌تر است. طبق براوردها، منابع پگماتیت حاوی اسپادومین یا سایر ترکیبات لیتیم‌دار مانند معدن گرین‌بوشز استرالیا، باید دارای حداقل یک درصد لیتیم باشند تا توسعه آنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. لذا اکتشاف چنین ذخایر غنی از لیتیم ممکن است زمان و هزینه زیادتری را طلب کند.

ـ منابع هکتوریت و جاداریت

هکتوریت یک کانی رسی لیتیم‌دار به‌نسبت کمیاب، نرم و سفیدرنگ با ترکیب $Na0.^{3}(Mg,Li)^{3}Si^{4}O^{10}(OH)^{2}$ است که با ذخایر کشف شده دارای ۱/۳ میلیون تن لیتیم، حدود ۳ درصد کل ذخایر لیتیم دنیا را به‌خود اختصاص می‌دهد. مهم‌ترین منابع کشف شده هکتوریت در دنیا در ایالت نوادا آمریکا و استان سونارا مکزیک قرار دارند.

شکل ۱۳. نمونه‌ای از کانی رسی هکتوریت

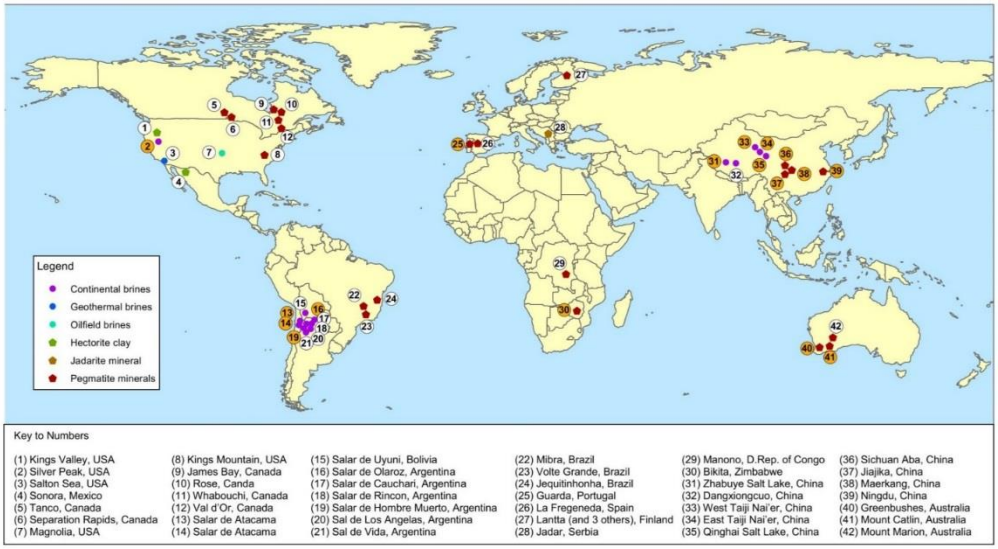


هرچند هکتوریت درحال حاضر به‌عنوان منبع مهمی در استخراج لیتیم مطرح نیست، اما در آینده و با توسعه روزافزون مصرف لیتیم در دنیا، اهمیت منابع هکتوریت جهت استحصال لیتیم قطعاً بیشتر خواهد شد.

جاداریت ترکیب معدنی به‌نسبت جدیدی است که در سال ۲۰۰۷ و در منطقه جادار در صربستان کشف شده و درحال حاضر نیز این منطقه تنها منطقه دارای ذخایر قابل توجه جاداریت در دنیاست. جاداریت یک بوروسیلیکات با فرمول شیمیایی $LiNaSiB^{3}O^{7}(OH)$ و رنگ سفید می‌باشد که کل لیتیم در ذخایر کشف شده آن، بالغ بر یک میلیون تن یا حدود ۲ درصد کل ذخایر لیتیم دنیاست. در آینده و با کشف احتمالی منابع بیشتری از جاداریت، این نوع منبع می‌تواند به یکی از ذخایر تأثیرگذار تأمین لیتیم در دنیا تبدیل شود.

شکل ۱۴ به‌صورت کلی، مهم‌ترین منابع لیتیم موجود در دنیا، نوع منبع و نام آنها را نشان می‌دهد.

شکل ۱۴. مهم‌ترین منابع لیتیم در دنیا و نوع آنها



۳. بررسی منابع لیتیم، عرضه و تقاضای آن در ایران

۳-۱. بازار مصرف لیتیم در داخل کشور

با وجود اینکه اطلاعات آماری مشخصی از میزان مصرف لیتیم در داخل کشور وجود ندارد، اما روند روبه‌رشد تعداد شرکت‌های تولیدکننده تجهیزات الکترونیکی قابل حمل، شرکت‌های تولیدکننده وسایل نقلیه الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در کشور حاکی از مصرف قابل توجه این فلز در صنایع مذکور است. از طرفی صنایع نظامی کشور به‌عنوان قطب محرک و اثرگذار صنایع دیگر نیز در سالیان اخیر مطالعات زیادی در حوزه تولید باتری‌های لیتیمی و همچنین بازیافت منابع آن انجام داده‌اند، هر چند کماکان بحث واردات ماده اولیه لیتیم از کشورهای خارجی به‌ویژه چین، مهم‌ترین معضل شرکت‌های مذکور است. درحال حاضر به‌دلیل تحریم‌های اعمال شده، امکان ارتباط مستقیم با کشورهای اروپایی و آمریکایی که از تولیدکنندگان این محصول به‌شمار می‌روند، وجود نداشته و نیاز کشور از چین تأمین می‌شود. همین مسئله نیاز به مطالعه و بررسی‌های بسیار جدی در زمینه اکتشاف لیتیم از منابع موجود داخل کشور را بیش از پیش آشکار می‌سازد. همچنین استفاده از لیتیم به‌عنوان عایق حرارتی مقاوم در کلاهک نیروگاه‌های اتمی، دلیل دیگری بر اهمیت بحث، مطالعه و سرمایه‌گذاری کلان در حوزه اکتشاف و استحصال این فلز باارزش است. شایان ذکر است کشورهای آمریکای لاتین به‌دلیل در اختیار داشتن منابع معدنی، دارای جایگاه ویژه‌ای در زمینه تولید مواد معدنی هستند و بررسی روند سرمایه‌گذاری اکتشافی در جهان نیز نشان‌دهنده اهمیت و جایگاه ویژه این مجموعه کشورهاست. ایران با بولیوی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین دارندگان منابع لیتیم دنیا در گذشته همکاری‌های مطالعاتی مشترکی در

زمینه منابع صنعتی لیتیم در آن کشور داشته است. سازمان زمین‌شناسی برای اولین بار در سال ۱۳۹۱-۱۳۹۰ طرح نوینی را جهت استحصال لیتیم به‌کار گرفته است که فقط در اختیار پنج کشور دنیا، یعنی انگلیس، آمریکا، فرانسه، روسیه و ژاپن قرار دارد. در این روش فلز لیتیم در حد خالص‌ترین عیار، یعنی ۹۷/۹۹ درصد از منابع شورابه‌ای استخراج شده است. این طرح برای اولین بار بر پهنه نمکی کشور بولیوی اجرا شده است و مطالعات روی ۸۰ لیتر شورابه از این پهنه که بزرگ‌ترین پهنه نمکی دنیاست، اجرا گردیده و بعد از آن مطالعات روی پهنه‌های نمکی ایران صورت گرفته است.

۲-۳. منابع لیتیم

۱-۲-۳. منابع شورابه‌ای

ترکیب لیتیم در شورابه‌های طبیعی اغلب به‌صورت کلریدی است و عناصر دیگری همچون منیزیم، سدیم و پتاسیم در کنار آن یافت می‌شود. توجه به این مطلب ضروری است که استخراج لیتیم از این شورابه‌ها به‌لحاظ اقتصادی نه تنها به غلظت این عنصر وابسته است، بلکه غلظت سایر یون‌های همراه آن ازجمله منیزیم و کلسیم نیز بسیار حائز اهمیت است. در ایران حدود ۶۰ پلایا موجود است که تعدادی از آنها مطابق با بررسی‌های صورت گرفته حاوی مقادیری از این فلز باارزش می‌باشند. پلایای خور و بیابانک، کویر بزرگ نمک، باتلاق گاوخونی و دریاچه نمک قم ازجمله مهم‌ترین پلایای کشور هستند. اغلب شورابه‌های موجود در کشور از نوع شورابه‌های با غلظت لیتیم کم و منیزیم بالاست. درواقع وجود مقادیر زیاد منیزیم در این شورابه‌ها مانع اصلی جهت رسوب لیتیم در آنهاست. یکی از فاکتورهای بسیار مهم در استحصال لیتیم از شورابه‌ها موقعیت جغرافیایی و فراهم بودن امکان تبخیر می‌باشد. کشور ایران نیز در نواحی پُرتابش خورشید واقع است. با توجه به اینکه متوسط روزهای آفتابی در ایران حدود ۳۰۰ روز است که ۶ برابر تعداد روزهای آفتابی در اروپاست، بنابراین شورابه‌ها به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین لیتیم در داخل کشور بسیار مورد توجه هستند. علاوه‌بر این هزینه پایین مواد اولیه، قابلیت جداسازی رسوبات در هر مرحله، سرعت بالای فرایند و امکان جداسازی در حجم بالا موجب می‌شود که روش رسوب‌دهی بیش از سایر روش‌های استخراج لیتیم از شورابه‌های داخلی کشور مورد توجه قرار گیرد. ازجمله مهم‌ترین منبع لیتیم شورابه‌ای، پلایای شرق ایران (پلایای بجستان، پلایای ترود و کویر حاج علیقلی)، دریاچه‌های نمک (دریاچه نمک قم) و آب دریا (سواحل دریای عمان در منطقه چابهار) است.

هرچند میزان لیتیم موجود در منابع شورابه‌ای بسیار پایین است، اما به‌دلیل حجم بالای این منابع و همچنین آب دریا، استحصال این فلز از منظر اقتصادی مقرون به‌صرفه خواهد بود. به‌طور کلی روش‌هایی همچون رسوب‌دهی، استخراج حلالی و استخراج از طریق تبادل یونی جهت استحصال فلز لیتیم به‌کار می‌رود. با توجه به متفاوت بودن ترکیب شیمیایی شورابه‌ها در مناطق مختلف، میزان لیتیم و منیزیم

موجود در آن تعیین‌کننده روش استحصال مناسب خواهد بود. به‌طوری که امروزه فرایند رسوب‌دهی، ۸۰ درصد استخراج منیزیم و لیتیم از منابع شورابه‌ای با نسبت مولی منیزیم به لیتیم کمتر از ۳ را شامل می‌شود. برای نسبت‌های بالاتر از ۳ فرایند رسوب‌دهی به‌دلیل رسوب همزمان منیزیم، جهت استخراج لیتیم مناسب نبوده و لذا از فرایندهای استخراج حلالی و تبادل یونی استفاده می‌شود. در این میان روش استخراج حلالی به جهت هزینه بالای واکنشگرها و همچنین مخاطرات زیست‌محیطی برای استحصال لیتیم از منابع شورابه‌ای و نیز آب دریا با غلظت لیتیم پایین، مناسب نبوده و لذا روش تبادل یونی برای استحصال لیتیم از منابع مذکور پیشنهاد شده است.

در سالیان اخیر مطالعاتی جهت استحصال لیتیم از منابع شورابه‌ای داخل کشور انجام شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان می دهد که استخراج فسفات لیتیم با خلوص ۹۹/۴ درصد و کربنات لیتیم با خلوص ۹۷ درصد به روش رسوب‌دهی از شورابه‌های کویر خور و بیابانک امکان‌پذیر است. نتایج بررسی‌ها روی شورابه دریاچه ارومیه با غلظت لیتیم بسیار پایین (حدود ۳۰ ppm) حاکی از استحصال ۵۸ درصدی لیتیم از این منابع است. هرچند به‌لحاظ اقتصادی، استحصال این میزان لیتیم از این شورابه، توجیه‌پذیر نیست، اما در صورت اتخاذ تدابیر مناسب جهت استحصال لیتیم در کنار فراورده‌های باارزش دیگری نظیر منیزیم، نه تنها ظرفیت مناسبی جهت سرمایه‌گذاری در این بخش ایجاد می‌شود، بلکه خود می‌تواند به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های موجود جهت حل معضل خشک شدن دریاچه ارومیه، حفظ آن و جلوگیری از هدررفت منابع آب شیرین در آن منطقه مطرح باشد. چراکه خروج شورابه‌ها از یک‌سو باعث کاهش تبخیر سطحی این دریاچه گشته و ازسوی دیگر نیاز به افزودن آب شیرین را کاهش می‌دهد.

در مطالعه‌ای که در دو مرحله بر شورابه‌های منطقه خراسان، توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی شمال شرق کشور صورت گرفته است، تعداد ۳۱ نمونه شورابه از محل پلایای ده‌سلم، چاه‌وک و غیره در مرحله اول و تعداد ۵۸ نمونه در مرحله دوم از همان مناطق برداشت شده و با هدف تجزیه و اندازه‌گیری عناصر کلر، منیزیم، کبالت، کلسیم، سدیم، پتاسیم و به‌طور خاص لیتیم در اختیار آزمایشگاه شیمی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی تهران قرار گرفته است. براساس گزارش‌های به‌دست آمده بیشترین و کمترین مقدار لیتیم به‌ترتیب ۱۵۵ و ۱/۸ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. همچنین بیشترین میزان لیتیم مربوط به پلایه سیروان و بجستان است. در این پژوهش همچنین میزان همبستگی این عنصر با عناصر دیگر مورد بررسی قرار گرفته که بر این اساس عناصر منیزیم، کلسیم، سدیم، کلر و پتاسیم از عناصر همبسته این ماده بوده و همراه با آن حضور خواهند داشت.

۲-۲-۳. سنگ‌های معدنی

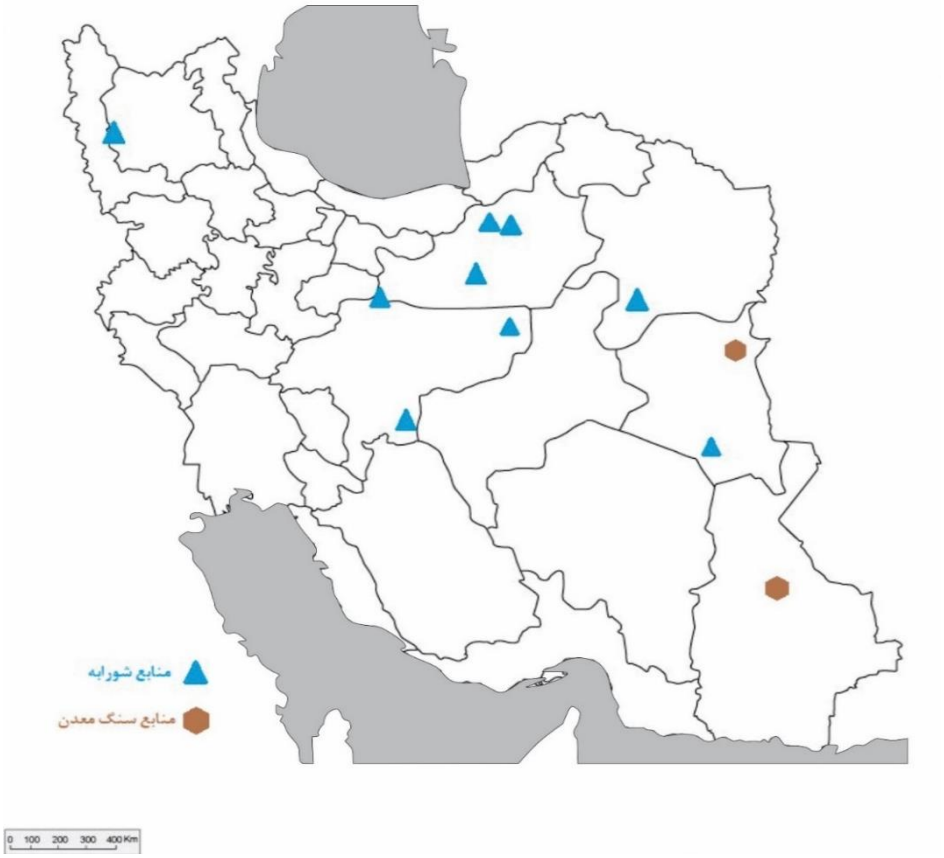
براساس بررسی‌های انجام شده، یکی از ذخایر قابل توجه لیتیم در کشور افغانستان قرار دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، استان‌های هرات، فراه، غزنی و بخش‌هایی از شرق این کشور حاوی ذخایر قابل توجهی

لیتیم هستند. با توجه به پیوند زمین‌شناسی ایران و افغانستان، این ذخایر می‌تواند در کشور ما نیز محتمل باشد؛ یعنی از نظر زمین‌شناسی، شرایط کشور ما و افغانستان تشابه قابل توجهی دارند. ازسوی دیگر سنگ‌های گرانیتی و به‌دنبال آن پگماتیت‌ها، در کشور ما و در دوره‌های مختلف شکل گرفته‌اند. برای نمونه در زون (قطب) سنندج ـ سیرجان سنگ‌های گرانیتی بسیاری وجود دارند. در کنار این زون، گرانیت‌های مشهد و زاهدان نیز می‌تواند یک تارگت باشد. این موضوع حاکی از آن است که همچنان نیاز به اقدامات مطالعاتی فراوان در زمینه ذخایر لیتیم در کشور ما وجود دارد. ضمن آنکه مطابق بررسی‌های انجام گرفته، آثاری از وجود اندیس‌های لیتیمی در گرانیت‌های استان سیستان و بلوچستان مشاهده شده که به‌دلیل نبود منابع مالی، عملیات اکتشافی تکمیل نشده است.

شایان ذکر است عملیات اکتشافی برای عناصر فلزی همچون منیزیم، سرب، روی و فلزات باارزش دیگر در سالیان اخیر همواره وجود داشته است، اما هیچ‌یک از آنها منحصراً برای استحصال لیتیم انجام نشده است. گزارش‌ها حاکی از آن است که کشف نخستین ذخایر لیتیم در تاریخ معدن ایران برای اولین بار در سال ۱۳۹۵ توسط سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) به‌وقوع پیوست. در سال ۱۳۹۷ به نقل از مدیر اکتشافات این سازمان، محدوده‌ای در شرق کشور واقع در خراسان جنوبی به نام دق پترکان به‌عنوان نخستین محدوده لیتیم ایران کشف شده است. درحال حاضر اقدامات اکتشافی در زمینه استحصال این فلز باارزش، با همکاری یک شرکت خارجی در سازمان مذکور در حال انجام است. هرچند این اقدامات به‌ویژه در سالیان اخیر شتاب بیشتری به‌خود گرفته است، اما کماکان نیاز به سرمایه‌گذاری و تخصیص منابع مالی از طرف نهادهای تصمیم‌گیرنده جهت اکتشاف این فلز باارزش برای سالیان پیش رو به‌شدت ضروری است.

شکل ۱۵، برخی مناطق شورابه‌ای و همچنین معدنی دارای پتانسیل استحصال لیتیم در ایران را که قبل‌تر برخی از آنها نام برده شدند، نشان می‌دهد. بدیهی است که با توجه به عدم انجام مطالعات اکتشافی کافی در حوزه عنصر لیتیم در کشور، فهرست مناطق مستعد استحصال لیتیم چندان دقیق نیست و همچنان نیاز به تخصیص بودجه مناسب در این حوزه و انجام مطالعات جامع در زمینه شناسایی مناطق مستعد کشف و استحصال لیتیم در ایران کاملاً احساس می‌شود.

شکل ۱۵. منابع مستعد اکتشاف و استحصال لیتیم در ایران به تفکیک نوع منبع، شورابه‌ای یا سنگ معدن



۴. ارزیابی اقتصادی و امکانسنجی تولید لیتیم در داخل کشور

به‌طور معمول هزینه‌های دقیق تولید لیتیم و حتی قیمت فروش عمده آن در دنیا به‌صورت عمومی منتشر نمی‌شود و بیشتر قیمت‌ها بین تولیدکننده لیتیم و مصرف‌کنندگان انبوه (شرکت‌های تولیدکننده باتری، صنایع شیشه و سرامیک و ...) محفوظ باقی می‌ماند؛ لذا براورد دقیق هزینه تولید لیتیم از منابع مختلف، مستلزم داشتن اطلاعات از تولیدکننده، شرایط جغرافیایی، سیاسی، هزینه‌های جاری، کارگر و غیره است، اما طبق آمار سال ۲۰۱۴، هزینه استحصال هر تن لیتیم کربنات به روش شورابه‌ای از سه منبع مختلف، بین ۱۵۹۱ تا ۲۲۸۰ (متوسط ۱۹۱۶) دلار متغیر بوده، در حالی که تولید هر تن لیتیم کربنات از سنگ پگماتیت براساس چهار منبع، بین ۲۹۰۰ تا ۴۵۰۰ (متوسط ۳۶۱۱) دلار و درنهایت هزینه استحصال هر تن از ذخایر هکتوریت «کینگز ولی»[1] در نوادای آمریکا، حدود ۳۲۰۰ دلار بوده است. البته باید به این موضوع اشاره کرد که هزینه واقعی تولید لیتیم کربنات از واحدهای فراوری لیتیم، به‌دلیل وجود عناصر جانبی همراه با لیتیم، کمتر از هزینه صرفاً استحصال لیتیم است. برای مثال، در

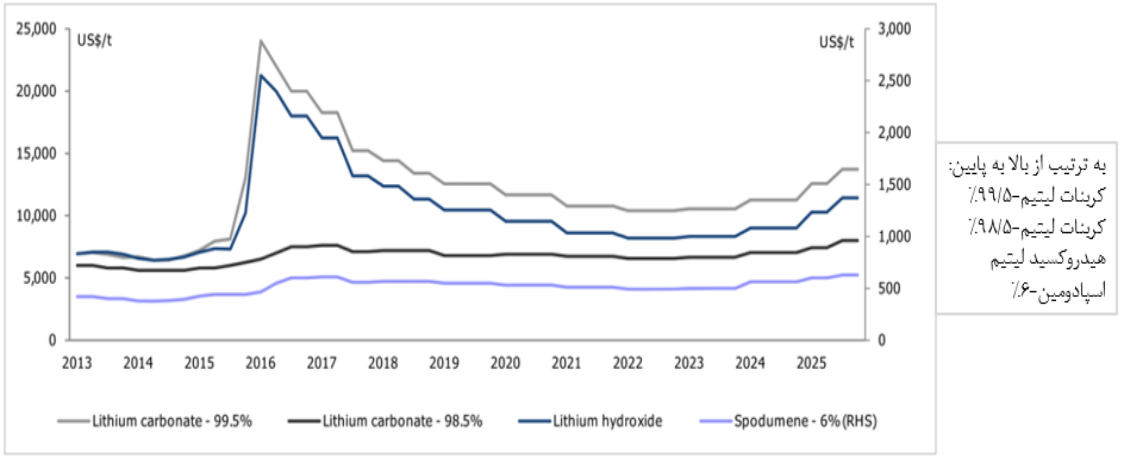
1. King's Valley

منابع شورابه‌ای، وجود بور و پتاسیم و در ذخایر پگماتیت، وجود تانتالم یا فلدسپار به‌عنوان محصولات جانبی، می‌تواند به‌طور قابل توجهی از هزینه‌های تولید لیتیم بکاهد.

درحال حاضر متوسط قیمت لیتیم کربنات گرید باتری با خلوص ۹۹/۵ درصد در سال ۲۰۱۸، بین ۱۷ تا ۲۱ هزار دلار به‌ازای هر تن متغیر است. نمودار ۱۴ پیش‌بینی قیمت انواع لیتیم کربنات، لیتیم هیدروکسید و همچنین اسپادومین را تا سال ۲۰۲۵ نشان می‌دهد. انتظار می‌رود با افزایش تولید و کشف ذخایر بیشتر، قیمت لیتیم پس از افزایش قابل توجه در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷، به مرور کاهش یافته و یا حداقل افزایش ناگهانی نداشته باشد.

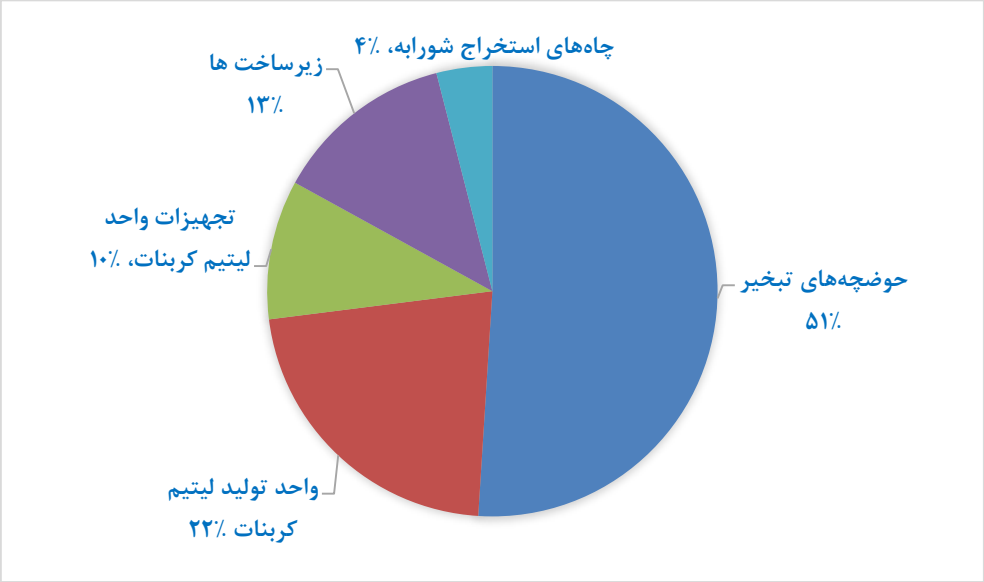
نمودار ۱۴. پیش‌بینی بانک دویچه آلمان از تغییرات قیمت و پیش‌بینی آن برای لیتیم کربنات، لیتیم هیدروکسید و اسپادومین طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۵

(محور سمت راست قیمت اسپادومین را نمایش می‌دهد)

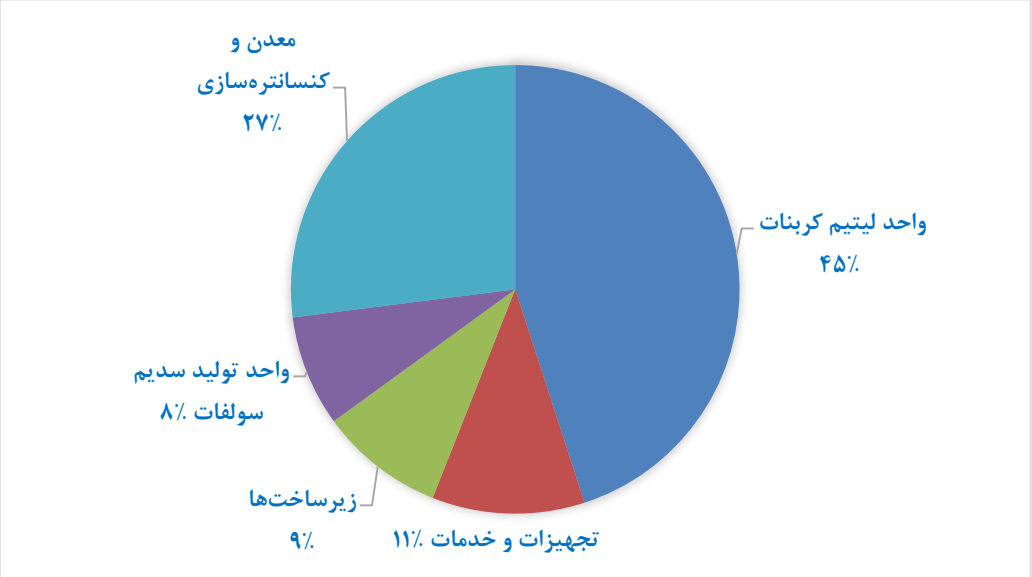


براساس آمار، برای ساخت یک واحد تولید لیتیم از شورابه، بیش از نیمی از هزینه ساخت صرف احداث حوضچه‌های تبخیری بسیار بزرگ برای تغلیظ شورابه می‌شود. پس از آن، بیشترین هزینه‌ها متعلق به واحد تولید لیتیم کربنات، زیرساخت‌ها و سایر موارد است. از طرفی، برای احداث واحد تولید لیتیم از سنگ معدن پگماتیت، بیشترین هزینه صرف ساخت واحد لیتیم کربنات و پس از آن واحد کنسانتره‌سازی می‌شود. نمودارهای زیر درصد هزینه هر بخش در احداث واحدهای لیتیم از نوع شورابه‌ای و سنگ معدن را نشان می‌دهند.

نمودار ۱۵. تقسیم هزینه واحدهای مختلف برای احداث یک واحد تولید لیتیم از شورابه



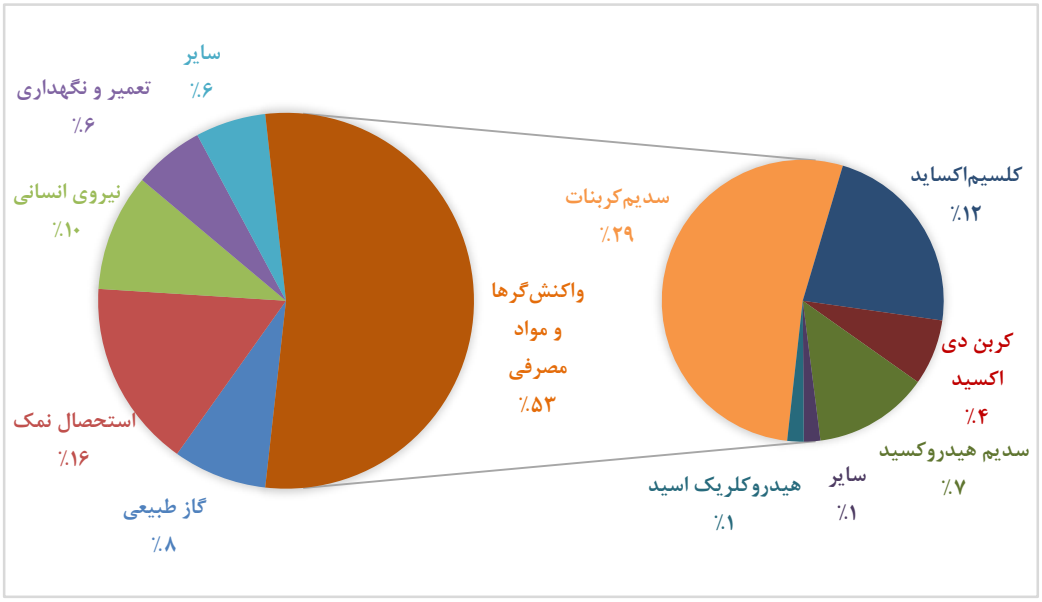
نمودار ۱۶. تقسیم هزینه واحدهای مختلف برای احداث یک واحد تولید لیتیم از سنگ معدن پگماتیت



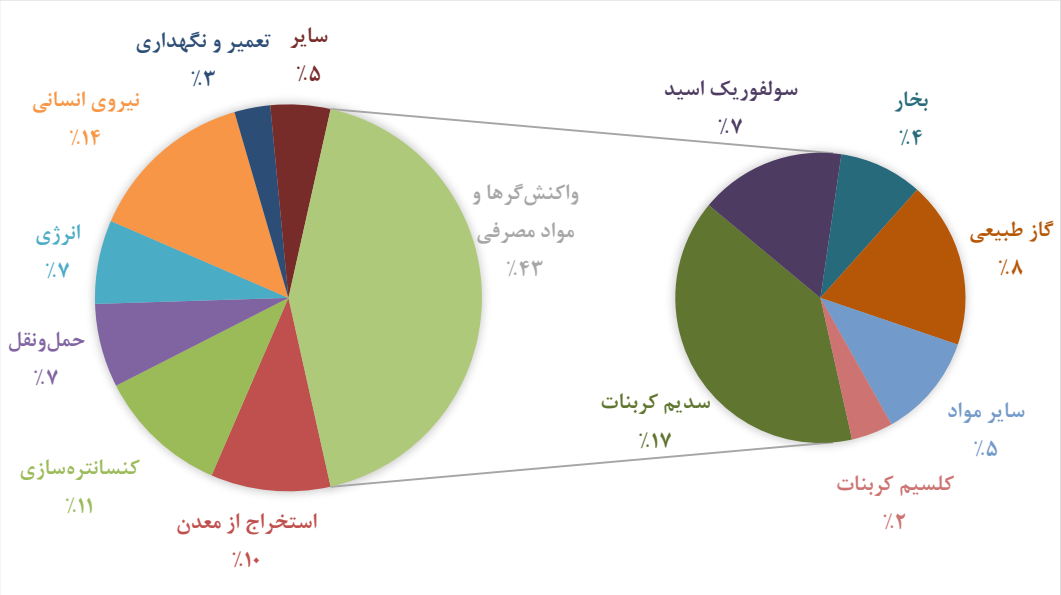
نمودارهای زیر نیز هزینه‌های جاری یا عملیاتی[1] واحدهای تولیدی لیتیم از شورابه و سنگ معدن را نشان می‌دهند.

1. Operational Costs

نمودار ۱۷. هزینه‌های عملیاتی واحد تولید لیتیم از شورابه به تفکیک هر بخش



نمودار ۱۸. هزینه‌های عملیاتی واحد تولید لیتیم از سنگ معدن به تفکیک هر بخش



به‌طور کلی در صنعت باتری‌سازی به‌عنوان مهم‌ترین صنعت مصرف لیتیم در سالیان اخیر، چگونگی و شرط جدا شدن مواد تشکیل‌دهنده باتری به چند پارامتر بستگی دارد که مهم‌ترین آنها سرعت فراگیری خودروهای الکتریکی و جابه‌جایی شیمی باتری‌های خودروهای الکتریکی نسبت به موقعیت جغرافیایی است. فعالان عرصه صنعت باید در فهم نیازها و تأمین آینده بازار، تکامل تکنولوژی باتری، قیمتگذاری و مکانیسم مدیریت ریسک، استراتژی‌هایی را تدوین کنند. برخی از ملاحظات این فعالان به‌شرح زیر است:

فعالان بخش استخراج معدن باید شرایطی تعادلی بین سود حاصل از افزایش قیمت ماده و احتمال از دست

دادن تقاضاکنندگان به‌علت بالا بودن قیمت، برقرار کنند. برای این منظور، به‌جای چشم دوختن به سود کوتاه‌مدت، باید با تأمین‌کنندگان باتری، خودروسازان و فعالان بخش مالی همکاری کنند تا بازار مصرف بزرگ‌تری را برای مواد خود فراهم سازند. این همکاری با سازندگان باتری می‌تواند به نحوی باشد که با تکنولوژی موجود، مواد مورد نیاز تولیدکنندگان به‌صورت شرایط پایدار و رقابتی از نظر قیمت، توسط بخش معدن تأمین شود. همچنین همکاری با فعالان بخش مالی، موجب تأمین سرمایه بلندمدت و رقابتی برای گسترش ظرفیت‌های جدید می‌شود.

سازندگان باتری و خودروسازان نیازمند به‌کارگیری استراتژی برای تأمین پایدار مواد اولیه بوده که ریسک کمبود و یا افزایش قیمت احتمالی را به حداقل برساند. نکته حائز اهمیت به‌کارگیری روش‌های دیگری در تکنولوژی ساخت باتری است که محدودیت مواد خام اولیه را در مرحله تولید کمرنگ کند. این رویکرد نیازمند در نظر گرفتن یک برنامه میان‌مدت در کنار برنامه بلندمدت در پیشبرد تکنولوژی باتری برای چنین شرکت‌هایی است و ماحصل آن تولید باتری‌هایی همچون باتری‌های حالت جامد، باتری‌های پایه گرافن و باتری‌های روی ـ هوا خواهد بود. شرکت‌های سازنده باتری و خودروسازان باید فراتر از جایگزینی حرکت کنند. به‌عبارتی باید با بخش معدن و شرکت‌های ذوب و تصفیه همکاری داشته باشند تا امنیت تأمین و همچنین دنبال کردن مواد در زنجیره ارزش، از معدن تا باتری نصب شده در خودروی برقی، فراهم شود.

گردانندگان بخش مالی از دو منظر در گسترش این صنعت نقش مهمی ایفا می‌کنند. از یک‌سو با سرمایه‌گذاری مستقیم و ایجاد قرارداد و کمک به شرکت‌ها، از ریسک مالی در چرخه ارزش باتری جلوگیری می‌کنند و ازسوی دیگر با فعالیت در شبکه مبادلات جهانی و میانجی، امکان حصول پول در شبکه دادوستد با مکانیسم ایجاد بازارهای جدید را افزایش می‌دهند.

درحال حاضر پشتوانه مالی برای تأمین جدید با قیمت ثابت برای مواد، از طریق ایجاد نیاز گسترده مبادلات در یک بازه زمانی طولانی ایجاد شده است. در این شرایط تجارت به سمت مبادله نقدی، به‌جای مبادله غیرنقدی سوق داده می‌شود. همچنین سرمایه‌گذاران شخصی در بخش معدن برای سرمایه‌گذاری بالا ترغیب می‌شوند.

تمامی ارگان‌های ذی‌نفع از بخش معدن تا شرکت‌های خودروسازی و مالی، نیازمند درک چرخه ارزش باتری به‌عنوان یک اکوسیستم هستند تا با فعالیت در کنار هم شفافیت و تعهد را در حوزه‌های کلیدی، همچون تکنولوژی باتری، تأمین‌کنندگان جانبی و مکانیسم قیمتگذاری ایجاد کنند و نشان دهند که حوزه مواد خام باتری به یقین مسیری طلایی است.

۵. آثار استحصال و تولید لیتیم بر محیط زیست و سلامت

به‌طور کلی، لیتیم عنصری سمی یا مضر برای سلامت انسان تلقی نمی‌شود و حتی مقادیری از آن جهت درمان برخی بیماری‌های روحی ـ روانی، مانند اختلال دوقطبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هرچند،

مقادیر زیاد یا استفاده بلندمدت از آن می‌تواند باعث بروز مشکلاتی مانند تهوع، اسهال، تار شدن بینایی، سردرد و یا سرگیجه شود. از دیدگاه زیست‌محیطی، لیتیم به‌عنوان عنصر اصلی مورد استفاده در باتری‌ها و متعاقباً وسایل نقلیه الکتریکی، یکی از عناصر اصلی حرکت به سمت انرژی پاک تلقی می‌شود. هرچند در طول چرخه استحصال تا مصرف، خطراتی زیست‌محیطی وجود دارد که در فرایند تولید و مصرف باید به آنها توجه کرد. در جدول ۴ فاکتورهای زیست‌محیطی دو روش شورابه و معدنی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به‌طور کلی، روش‌های استحصال لیتیم، به‌خصوص روش شورابه‌ای، از نظر زیست‌محیطی در مقایسه با بسیاری از صنایع و تولیدات دیگر، خطرات کمتری را برای محیط زیست در پی دارند.

جدول ۴. مقایسه فاکتورهای زیست‌محیطی برای دو روش شورابه و معدنی

مرحله طول عمر لیتیم	روش معدنی	روش شورابه‌ای
استحصال	مصرف انرژی (برای استخراج، حمل‌ونقل، خرد کردن و فراوری اولیه)، توسعه زیرساخت، آثار بصری بر محیط زیست، صدا و ریزگرد، جابه‌جایی خاک و تغییر در اکوسیستم محیط، مصرف آب، پسماندهای حین تولید و امکان اثرگذاری معادن زیرزمینی بر منابع آب در زیر زمین	مصرف کم انرژی در صورت استفاده از حوضچه‌های تبخیری برای تغلیظ شورابه با نور خورشید، هرچند همچنان جهت پمپاژ شورابه و دستگاه‌ها انرژی مصرف می‌شود، آثار بصری بر محیط، آلودگی‌های صوتی احتمالی، امکان آسیب به اکولوژی دریاچه نمک، استفاده از آب در فراوری، امکان نشت مواد شیمیایی از حوضچه‌ها، پسماندها (هرچند بیشتر آن نمک است که می‌توان آن را در سطح دریاچه دپو کرد)
فراوری و تولید	مصرف انرژی در واحدهای فراوری و تولید، استفاده از اسید و سایر مواد شیمیایی برای لیچینگ، عملیات تبدیل حرارتی در دمای بالا ممکن است باعث ورود ترکیبات شیمیایی به هوا شود، حذف ناخالصی‌ها باعث تولید پسماند می‌شود، مصرف آب و حمل‌ونقل	مصرف انرژی در واحدهای استحصال لیتیم، استفاده از مواد شیمیایی جهت جداسازی ناخالصی‌ها یا برای فرایند تعویض یونی، برخی مراحل ممکن است نیاز به حرارت‌دهی داشته باشند که موجب انتشار گاز به هوا می‌شود، مصرف آب، تولید پسماند و حمل‌ونقل
مصرف نهایی	مصرف لیتیم در صنایع شیشه و سرامیک باعث کاهش دمای ذوب ترکیبات و درنتیجه کاهش مصرف انرژی می‌شود. همچنین مصرف آن در باتری‌ها باعث کاهش نسبت وزن به انرژی آنها و افزایش بهره‌وری و دانسیته انرژی آنها شده است. وسایل حمل‌ونقل برقی استفاده‌کننده از باتری‌های لیتیمی باعث کاهش بسیار قابل توجه ورود گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر زمین می‌شوند.	

۶. بازیافت لیتیم

در بسیاری از مصارف مختلف لیتیم در دنیا، به‌طور عمومی بازیافت انجام نمی‌گیرد. برای مثال، شیشه‌ها و سرامیک‌ها خود معمولاً به‌صورت گسترده بازیافت می‌شوند و متعاقباً هرگونه لیتیم باقی‌مانده در آنها نیز در این فرایند مورد بازیافت قرار می‌گیرد. از طرفی، در مصارفی که لیتیم به‌عنوان کاتالیست استفاده

می‌شود، معمولاً با توجه به عدم مصرف شدن کاتالیست، عملاً نیازی به بازیافت وجود ندارد. بنابراین تنها حوزه‌ای که برای بازیافت لیتیم می‌توان بر آن تمرکز کرد، حوزه باتری‌های لیتیم است.

هرچند لیتیم در باتری‌ها کاملاً قابل بازیافت است و در بازیافت هم خواص خود را حفظ می‌کند، اما درحال حاضر انگیزه اقتصادی کافی برای این کار وجود ندارد. چراکه این فرایند هزینه‌بر است، در حالی که هزینه ماده اولیه لیتیم برای تولید زیاد نیست و این امر باعث عدم صرفه اقتصادی بازیافت لیتیم از باتری‌ها می‌شود. در صورت بازیافت باتری‌ها نیز، ارزش‌افزوده اصلی ناشی از استحصال سایر مواد ارزشمند، مانند کبالت یا نیکل است تا لیتیم که قیمت پایین‌تری دارد. بنابراین به‌صورت کلی می‌توان گفت که هنوز بازیافت باتری‌های لیتیمی صرفاً برای استحصال لیتیم، علی‌رغم انجام پروژه‌هایی در مقیاس کوچک و وجود شرکت‌های فعال در دنیا در این باره، با توجه به پایین بودن قیمت ماده اولیه لیتیم در مقایسه با هزینه‌های بازیافت آن، صرفه اقتصادی چندانی ندارد. حتی در آینده، در صورت گسترش استفاده از کاتدهایی مثل لیتیم آهن فسفات که فاقد عناصر گرانبهایی مانند کبالت هستند، بازیافت باتری‌ها صرفه اقتصادی بسیار کمتری نسبت به باتری‌های کنونی خواهد داشت.

با توجه به رشد قابل توجه مصرف لیتیم در دنیا، به‌خصوص برای استفاده در وسایل حمل‌ونقل برقی، ممکن است در دهه‌های آینده ذخایر لیتیم موجود در دنیا رو به کاهش رفته و موجب افزایش قابل توجه قیمت لیتیم شود که در صورت عدم جایگزینی باتری‌های لیتیمی با باتری‌های دیگر، در آن مقطع بازیافت این باتری‌ها از نظر اقتصادی می‌تواند قابل توجیه باشد و لیتیم بازیافتی در برابر لیتیم تولیدی از معادن و شورابه‌ها مزیت رقابتی داشته باشد.

جمع‌بندی

فلز لیتیم به‌عنوان یک ماده استراتژیک در توسعه صنایع مختلفی نظیر خودروسازی، صنایع باتری، نظامی، هسته‌ای، هوافضا، تولید آلومینیم و بسیاری صنایع دیگر کاربرد دارد. پتانسیل‌های موجود در کشور اعم از منابع شورابه‌ای، انرژی ارزان و در دسترس، دانش فنی، نیروی انسانی متخصص و ارزان، موقعیت جغرافیایی و سهولت دسترسی به بازارهای جهانی، موجب می‌شود که کشور ایران به‌عنوان یکی از پتانسیل‌های بالقوه تولید این ماده باارزش در دنیا مطرح شود. در سالیان اخیر پژوهش‌های متعددی در حوزه استحصال لیتیم از منابع شورابه‌ای داخل کشور انجام گرفته است. لذا دانش فنی استحصال لیتیم در اختیار پژوهشگران و متخصصان این حوزه قرار دارد. اما مسئله اساسی در این حوزه، عدم مطالعه دقیق و جامع زمین‌شناسی در مورد اکتشاف و شناسایی مناطق مستعد داخل کشور است. هرچند وجود پلایای متعدد و گوناگون در مناطق مختلف کشور همچون خور و بیابانک، کویر بزرگ نمک، باتلاق گاوخونی، دریاچه نمک قم و همچنین پلایای شناخته شده دیگر، حاوی عناصری همچون لیتیم، منیزیم،

پتاسیم و سدیم در داخل کشور بر همگان آشکار است، اما نقطه ضعف بزرگ در این حوزه، عدم تعیین محدوده لیتیمی در این نواحی است. به‌گونه‌ای که کماکان آمار دقیق و مدونی جهت شناسایی پلایای لیتیم‌دار در داخل کشور ارائه نشده است. هرچند فعالیت مختصری در حوزه اکتشاف، توسط سازمان توسعه نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) در سالیان اخیر انجام گرفته، اما به‌دلیل کمبود منابع مالی مورد نیاز، عملاً در مرحله اولیه باقی مانده است و لذا متأسفانه درحال حاضر، معدن فعالی از این محصول در کشور وجود ندارد. همچنین وجود اندیس‌های لیتیمی در گرانیت‌های مشهد و سیستان و بلوچستان در سالیان اخیر گزارش شده که متأسفانه به‌دلیل عدم تخصیص منابع مالی لازم، عملیات اکتشاف ناتمام مانده است.

ذکر این نکته ضروری است که اکتشاف و استحصال از منابع شورابه‌ای بدون وجود نگاهی جامع و کامل به همه عناصر باارزش موجود در این منابع، عملاً مقدور نیست، چراکه استحصال یک فلز خاص (مثلاً لیتیم) به تنهایی از منابع مذکور به‌لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود، حال آنکه در صورت اتخاذ تدابیر مناسب و سیاستگذاری‌های صحیح جهت استحصال تمامی مواد باارزش شورابه‌ها، همچون منیزیم، سدیم، پتاسیم و لیتیم، نه تنها شرایط برای ورود سرمایه‌گذاری در این بخش مهیا خواهد شد، بلکه با تبدیل کشور به قطب بزرگ تولید انواع فراورده‌های شورابه‌ای، امکان صادرات، ارزآوری و اشتغال‌زایی بی‌نظیری فراهم خواهد شد.

در هر صورت آنچه مسلم است، نیاز شدید کشور در سال‌های آتی به این فلز استراتژیک است. به‌گونه‌ای که هم‌اکنون شرکت‌های مرتبط با حوزه صنایع دفاعی و نیز فعالان حوزه سیستم‌های ذخیره انرژی ازجمله تولیدکنندگان باتری، جهت رفع نیاز خود، ناگزیر به تأمین ماده اولیه از کشورهای دیگر شده‌اند و همین مسئله سبب وابستگی صد درصدی صنایع مرتبط با فلز لیتیم به واردات از کشورهای خارجی به‌ویژه چین شده است که هرساله سبب خروج ارز زیادی از کشور می‌شود. حال آنکه دانش فنی استحصال لیتیم در داخل کشور کاملاً وجود داشته و تنها به‌دلیل عدم سرمایه‌گذاری لازم در حوزه اکتشاف، پیشرفتی حاصل نشده است.

پیشنهادها و راهکارهای سیاستی

دولت به‌عنوان نهاد اجرایی کشور و همچنین مجلس شورای اسلامی به‌عنوان نهاد قانونگذار، باید به صنعت تولید لیتیم در داخل کشور نگاه ویژه‌ای داشته و با تدوین برنامه مشخص، تخصیص منابع لازم و سیاستگذاری‌های کلان در حوزه اکتشاف، استحصال و تولید لیتیم، در جهت رشد و توسعه صنایع مرتبط با این فلز ارزشمند گام بردارند. توجه به این صنعت ضمن رفع نیاز صنایع داخلی، موجب تولید لیتیم به‌عنوان یک محصول با ارزش‌افزوده بالا و ارزآور شده و زمینه تبدیل کشور به قطب آینده لیتیم در

منطقه را فراهم می‌آورد. در این راستا به بعضی از اقدامات ضروری به‌شرح ذیل اشاره شده است:

۱. تشکیل ستاد ویژه لیتیم در ایمیدرو به‌منظور طراحی نقشه راه و برنامه‌ریزی برای جذب سرمایه در این حوزه،

۲. قرار دادن تولید لیتیم (به‌طور کلی استحصال مواد باارزش شورابه‌ها از قبیل لیتیم و منیزیم) در اولویت‌های بخش معدن و صنایع معدنی ضمن اینکه نگاه به سرمایه‌گذاری در رابطه با پروژه‌های استحصال مواد ارزشمند از شورابه‌ها باید همه‌جانبه باشد و صرف استحصال لیتیم از توجیه‌پذیری فنی و اقتصادی برخوردار نیست و برنامه‌ریزی جامع برای سایر عناصر نیز صورت گیرد

۳. سیاستگذاری مشخص و اصولی در حوزه اکتشاف و استحصال از منابع شورابه‌ای و درگیر کردن بخش خصوصی در این حوزه،

۴. همکاری با دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی کشور به‌منظور تعریف پروژه‌های مختلف در حوزه لیتیم، حمایت از پایان‌نامه‌ها و پروژه‌های پژوهشی توسط ایمیدرو، معاونت علمی و فناوری ریاست‌جمهوری و سرمایه‌گذاران بخش خصوصی به‌منظور تکمیل دانش فنی این صنعت در کشور،

۵. ارائه تسهیلات ارزی از محل منابع صندوق توسعه ملی جهت توسعه واحدهای تولید لیتیم در داخل کشور،

۶. ارائه تسهیلات بانکی اعم از وام‌های با بهره پایین به جهت حمایت از واحدهای کوچک تولیدی،

۷. استفاده از پتانسیل‌های سازمان‌های مرتبط همچون سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) و زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و تخصیص منابع مالی لازم جهت اکتشاف و تکمیل فرایندهای نیمه‌تمام،

۸. استفاده از مشوق‌های مالیاتی و گمرکی جهت حمایت از سرمایه‌گذاران بخش خصوصی و تشویق و ترغیب آنها برای ورود به حوزه تولید لیتیم با ارائه سیستم‌های حمایتی،

۹. سیاستگذاری در جهت توسعه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای حفظ منابع انرژی و جلوگیری از مخاطرات زیست‌محیطی و فرهنگ‌سازی در جامعه برای استفاده از سیستم‌های نوین ذخیره‌ساز انرژی،

۱۰. سیاستگذاری و تدوین نقشه جامع کشور در زمینه تولید فلزات باارزش و نادر در داخل کشور جهت رشد و توسعه صنایع پیشرفته مرتبط و توسعه اقتصاد دانش‌بنیان؛ چراکه درحال حاضر در کشور هیچ نقشه راه مشخصی برای توسعه صنایع مرتبط با تولید فلزات ارزشمند و نادر وجود ندارد،

۱۱. استفاده از باتری‌های لیتیمی به‌عنوان راهکار مناسب ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در منازل، جهت ذخیره انرژی خورشیدی، کاهش بار تحمیلی به شبکه برق‌رسانی در زمان اوج مصرف و استفاده به‌عنوان منبع تأمین انرژی پشتیبان در مناطق شهری، مناطق دورافتاده و روستاها (برای مثال سیستم

ذخیره انرژی خانگی پاوروال[1] تولید شرکت تسلا)،

۱۲. با توجه به اینکه منابع شورابه‌ای کشور از نظر غلظت لیتیم جزو منابع بسیار غنی محسوب نمی‌شوند، حمایت‌های دولتی برای بهره‌برداری از این منابع جهت توجیه‌پذیری اقتصادی این طرح‌ها ضروری است. بنابراین دولت باید ضمن خصوصی‌سازی واقعی در حوزه منابع شورابه‌ای کشور، نگاه درآمدی و کسب سود به این منابع نداشته باشد و با تدوین بسته‌های حمایتی، جذابیت سرمایه‌گذاری در این حوزه را افزایش دهد.

منابع و مآخذ

۱. سلیمانی، میلاد. استحصال لیتیم از شورابه‌های دریاچه ارومیه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۵.

۲. مؤذنی آفارانی، مریم. نحوه حضور لیتیم در شورابه‌ها و چگونگی استحصال آنها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۲.

۳. ناجی طوسی، علیرضا. استفاده از غربال یونی دی اکسید تیتانیومی برای جذب لیتیم از شورابه‌های داخلی منیزیم‌زدایی شده، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۴.

4. Lithium Process Chemistry Resources, Extraction, Batteries, and Recycling. Alexandre Chagnes, Jolanta Swiatowska, 2013.
5. A review of lithium supply and demand and a preliminary investigation of a room temperature method to recycle lithium ion batteries to recover lithium and other materials. Alexandru Sonoca, Jack Jeswieta, 2014.
6. Lithium in saline geosystems: Lake Brines and clays. John Warren, 2017.
7. Lithium Report 2018. Swiss Resource Capital AG, 2018.
8. Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe. Natalia Lebedeva, Franco Di Persio, Lois Boon-Brett, 2017.
9. Lithium, British Geological Survey, 2016.
10. Lithium 101, Deutsche Bank Markets Research, 2016.
11. Global Lithium Report, Macquarie Research, 2016.
12. Lithium, Global Commodity Summaries. U.S Geological Survey, 2018.
13. Lithium Resources and Production: Critical Assessment and Global Projections. Steve H. Mohr, Gavin M. Mudd and Damien Giurco, 2012.
14. The Lithium Market. Fox-Davies Resource Specialist, 2013.
15. Electricity Storage Technology Brief, ETSAP energy technology systems analysis
programme, IEA-ETSAP and IRENA© Technology Policy Brief E18, 2012.
16. Energy Storage Overview, Silicon Valley Bank Cleantech Practice, 2013; Energy Storage
17. Activities in the United States Electricity Grid, Electricity Advisory Committee Report, 2011.
18- A. Dehamna, Trends in energy storage markets, pv-magazine, 2013.

1. Powerwall

18. Joint EASE/EERA recommendations for a European Energy Storage Technology
Development Roadmap Towards 2030, Technical Annex, European Association for Storage of Energy, 2013.
19. Energy Storage Toolkit making the right connections, Special Report, Daiwa capital
markets, 2012.
20. C. Pillot, The worldwide battery market 2011-2025, Avicenne Energy, 2012.
21. Technology & Market Drivers for Stationary and Automotive Battery Systems, Ronald Berger Strategy Consultants, 2012.
22. J.Miller, Energy Storage: current status and future trends, Argonne National laboratory, presented at: building a scientific bridge on trans-atlantic eco-industries, European Commission, Joint Research Centre, Brussels, Belgium, 2013; M. Anderman, Advanced Automotive, Pike Research, 2013.
23. The world market for stationary batteries, HIS, 2013.
24. Back up and UPS: stable growth in the unstable stationary storage markets state of the market report, Lux Research, 2013.
25. F. Nemry, M. Brons, Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles Market penetration scenarios of electric drive vehicles, European Commission Joint Research centre Institute for Prospective Technological Studies, 2010.
26. Technology roadmap energy storage for electric mobility 2030, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, 2012; M. Lowe, S. Tokuoka, T. Trigg, G. Gereffi, A. Abayechi, Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: The U.S. Value Chain, Center on Globalization Governance and competetiveness and CGGC, 2010.
27. S. Kassatly, The lithium ion battery industry for electric vehicles, Master of Science Thesis, Massachusetts Institue of Technology, 2010.
28. Electric Vehicle Batteries Lithium Ion Batteries for Hybrid, Plug-In Hybrid, and Battery Electric Light Duty Vehicles: Market Analysis and Forecasts, Navigant Research.
29. Burke, B. Jungers, C. Yang, J. Ogden, Battery Electric Vehicles: An Assessment of the Technology and Factors Influencing Market Readiness, UC Davis, Istitute of Transportation Studies (ITS –Davis), 2007.
30. Advanced Batteries for Portable Power Applications, Navigantresearch.
31. The lithium ion battery value chain, Ronald Berger Strategy Consultants, 2012.

مرکز پژوهش‌ها
مجلس شورای اسلامی

شناسنامه گزارش	شماره مسلسل: ۱۶۱۴۵

عنوان گزارش: بررسی پتانسیل‌های کشور جهت اکتشاف، استحصال و بازیافت فلز لیتیم به‌عنوان مهم‌ترین ذخیره‌ساز انرژی در دنیا

نام دفتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن (گروه معدن و صنایع معدنی)

مدیران مطالعه: بابک بهادری، سعید خانی

تهیه و تدوین‌کنندگان: مسعود نعمتی، پیام سراج، امیرحسین صراف‌پور

ناظر علمی: حسین افشین

ویراستار تخصصی: ـــــــ

ویراستار ادبی: ـــــــ

واژه‌های کلیدی:

۱. لیتیم

۲. شورابه

۳. باتری لیتیم

۴. یون

۵. ذخیره‌ساز انرژی

تاریخ انتشار: ۱۳۹۷/۸/۲۳