



RESEARCH ARTICLE

10.22067/econg.2025.1146



An overview of lithium resources, geochemistry, exploration, extraction, processing, and applications with a focus on electric vehicles

Mohammad Hassan Karimpour ^{1*} , Bahareh Borouzi Niyat ²

¹ Professor, Department of Geology and Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 06 March 2025

Revised: 17 May 2025

Accepted: 19 May 2025

Keywords

Lithium
brine deposits
electric vehicles
lithium-ion batteries

ABSTRACT

Today, the demand for critical metals like lithium has enhanced significantly, leading to greater exploration, extraction, and utilize these metals. In this comprehensive review, we discuss the different types of lithium resources, minerals, exploration, extraction, processing, and applications. Pegmatites, sedimentary deposits, and brines are the main sources of lithium. One of the most important applications of lithium is in the battery industry, especially in electric vehicle batteries. The use of these batteries is increasing day by day, so it is important to explore more lithium reserves. Based on the global consumption and demand for lithium, it is necessary to use various exploration methods, including geology, geophysics, mineralogy, geochemistry, and remote sensing, followed by drilling operations to find new lithium reserves. Pegmatites, brines, and playas in Iran have high potential for lithium deposits. Exploration of lithium deposits in Iran and development of appropriate technologies can transform the country into a regional producer of this strategic metal.

*Corresponding author

Mohammad Hassan Karimpour

✉ karimpur@um.ac.ir

How to cite this article

Karimpour, M.H and Borouzi Niyat, B., 2025. An overview of lithium resources, geochemistry, exploration, extraction, processing, and applications with a focus on electric vehicles. *Journal of Economic Geology*, 17(2): 49–90. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1146>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Lithium is a soft, silvery-white alkali metal. It has an atomic mass of 6.941 g/mol, and atomic number 3 which is known as the least dense metal, highest electrochemical potential, and highly reactive. In addition, lithium is flammable and tends to react with water (form hydroxides) nitrogen, oxygen, and carbon dioxide in the air (Balaram et al., 2024; International Lithium Association, 2023). Lithium can replace magnesium due to its similar ionic and atomic radius. Lithium is found in a variety of geological environments and in the crust and can be extracted through various mining methods, depending on the location and composition of the deposit.

Pegmatites, brines, and sedimentary deposits are the most important sources of lithium. Over the past decade, lithium demand has increased due to its use in the lithium-ion batteries industry. Global consumption of lithium in 2024, a 29% increase from consumption in 2023. Global lithium demand is expected to reach nearly 1.8 million tonnes by 2030, almost six times the demand in 2020. Global lithium demand is expected to reach 1.8 million tonnes by 2030, almost six times the demand in 2020.

In this study, given the increasing demand for lithium and its extensive applications, an attempt has been made to present an up-to-date global perspective on various aspects of lithium, including its applications, geology, mineralogy, different types of lithium reserves, exploration indicators, analysis methods, extraction of lithium reserves, and finally its position and impact in the global market.

Geology and classification of lithium deposits

Lithium is enriched in the continental crust with an average crustal value of ~25 ppm. The most important sources of lithium include pegmatites, sedimentary deposits, and brines. Pegmatites are coarse-grained igneous rocks enriched in trace elements, including lithium. Pegmatite deposits are one of the primary sources of the lithium, particularly spodumene. The source granitic magma must be rich in lithium and also undergo extreme fractional crystallisation to form pegmatite deposits (London, 2018; Sykes et al., 2019). Lithium accumulates in the latest differentiates of granitic complexes at their final stage of consolidation and thus gets

concentrated in significant amounts in pegmatites.

Lithium can also be found in sedimentary deposits, where it is usually associated with clay minerals or evaporites. The sedimentary lithium deposits can be divided into two categories: (1) land-based sedimentary deposits, and (2) deep-sea sedimentary deposits.

Lithium can be found in brine deposits, which are formed by the evaporation of saline water in arid regions. These deposits are rich in lithium salts such as lithium chloride, lithium carbonate, and lithium hydroxide. Lithium brine deposits are formed over millions of years through a complex combination of geological and hydrological processes involving evaporation, mixing, halite, and hectorite dissolution, and precipitation (Munk and Jochens, 2011; Munk et al., 2016). These deposits are typically found in regions with arid or semi-arid climates, where the rate of evaporation is higher than the rate of precipitation.

Discussion and Result

Based on the lithium demand, especially in the manufacture of various types of batteries, research to further explore lithium reserves is so important. The largest amount of lithium reserves is in the brine type in Bolivia and Argentina (21 and 20 million tons, respectively), and the smallest amount is in the pegmatite type reserve (0.1 million tons) in Australia. Australia and Chile also have the highest levels of lithium mining. The highest level of processing and production of electrochemical products and batteries is in China (Stringer, and Millan, 2019).

The potential supply gap looms large. Projections indicate that by 2034, global demand for lithium could be 6.5 times greater than in 2023, further widening the supply-demand imbalance. By 2029, the industry could face a tipping point where demand far outstrips supply, creating significant challenges for the global energy transition. This impending shortage highlights the critical need for innovative, scalable, and environmentally responsible methods to extract lithium to meet future demand.

The electric vehicles need is increasing year by year. Using these types of vehicles will help reduce air pollution and protect the environment. Lithium-ion battery demand is expected to grow by about 27 percent annually to reach around 4700 GWh by 2030. In 2024, the global electric vehicle market had

significant changes. Chinese car company BYD took the top spot as the largest electric vehicle manufacturer, followed by Tesla in second place.

In Iran, the presence of brines and playas located in the Zagros and Central Iran zones, especially in desert areas, has high potential for lithium deposits. Hectorite in clay deposits should be prioritized for lithium exploration. Exploration of lithium deposits in Iran and development of appropriate technologies can transform the country into a regional producer of

this strategic metal.

Acknowledgements

With utmost respect and gratitude, we would like to thank Mr. Ali Abedi, the management of Atametal industrial and mining holding, for his valuable support in advancing this research project.



مروری بر ذخایر، زمین‌شیمی، اکتشاف استخراج، فراوری و کاربرد لیتیوم با نگرشی بر خودروهای برقی

محمدحسن کریم‌پور^{۱*}، بهاره بروزی‌نیت^۲

^۱ استاد، گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
امروزه تقاضا برای فلزهای حیاتی مانند لیتیوم به طور قابل توجهی افزایش یافته و به اکتشاف، استخراج و استفاده بیشتر از این فلزها منجر شده است. در این بررسی جامع، انواع مختلف منابع لیتیوم، کانی‌ها، اکتشاف، استخراج، فراوری و کاربردهای آن را مورد بحث قرار می‌دهیم. پگماتیت‌ها، ذخایر رسوبی و شورابه‌ها منابع اصلی لیتیوم هستند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای لیتیوم در صنعت باتری‌سازی به ویژه در باتری خودروهای الکتریکی است. استفاده از این باتری‌ها روز به روز افزایش یافته؛ لذا اکتشاف هرچه بیشتر ذخایر لیتیومی حائز اهمیت است. بر اساس میزان مصرف و تقاضای جهانی لیتیوم، به کارگیری روش‌های گوناگون اکتشافی از جمله زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، کانی‌شناسی، زمین‌شیمیایی و سنجش از دور و پس از آن عملیات حفاری برای یافتن ذخایر جدید لیتیوم ضروری است. پگماتیت‌ها، شورابه‌ها و پلایاهای کشور ایران پتانسیل بالایی برای ذخایر لیتیوم دارند. کشف ذخایر لیتیوم در ایران و توسعه فناوری‌های مناسب، می‌تواند کشور را به یکی از تولیدکنندگان منطقه‌ای این فلز استراتژیک تبدیل کند.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹ واژه‌های کلیدی لیتیوم ذخایر شورابه‌ای وسایل نقلیه الکتریکی باتری‌های لیتیومی نویسنده مسئول محمدحسن کریم‌پور karimpur@um.ac.ir

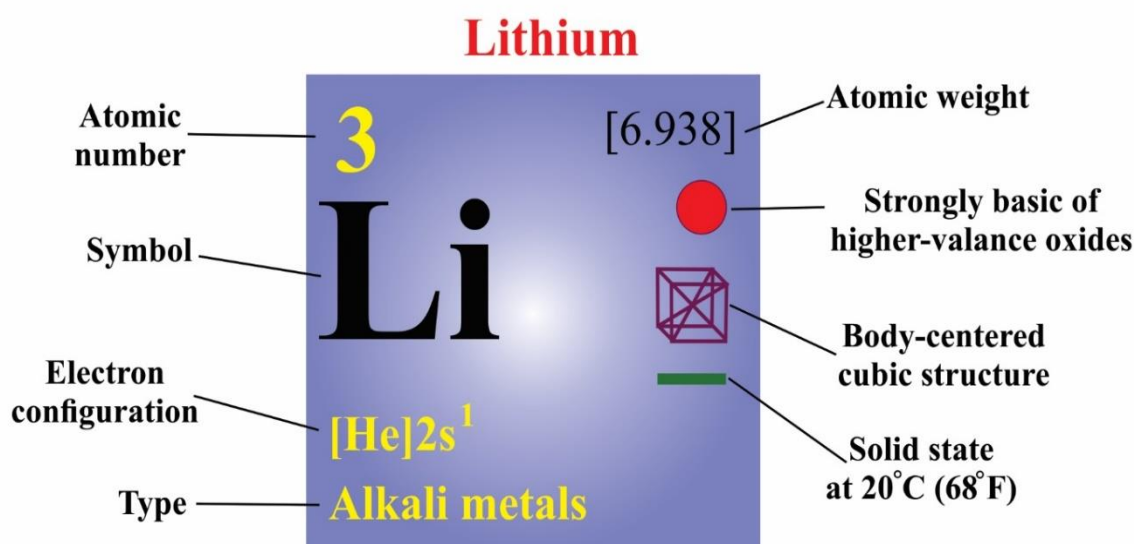
استناد به این مقاله

کریم‌پور، محمدحسن و بروزی‌نیت، بهاره، ۱۴۰۴. مروری بر ذخایر، زمین‌شیمی، اکتشاف استخراج، فراوری و کاربرد لیتیوم با نگرشی بر خودروهای برقی. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۷(۲): ۴۹-۹۰. <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1146>

مقدمه

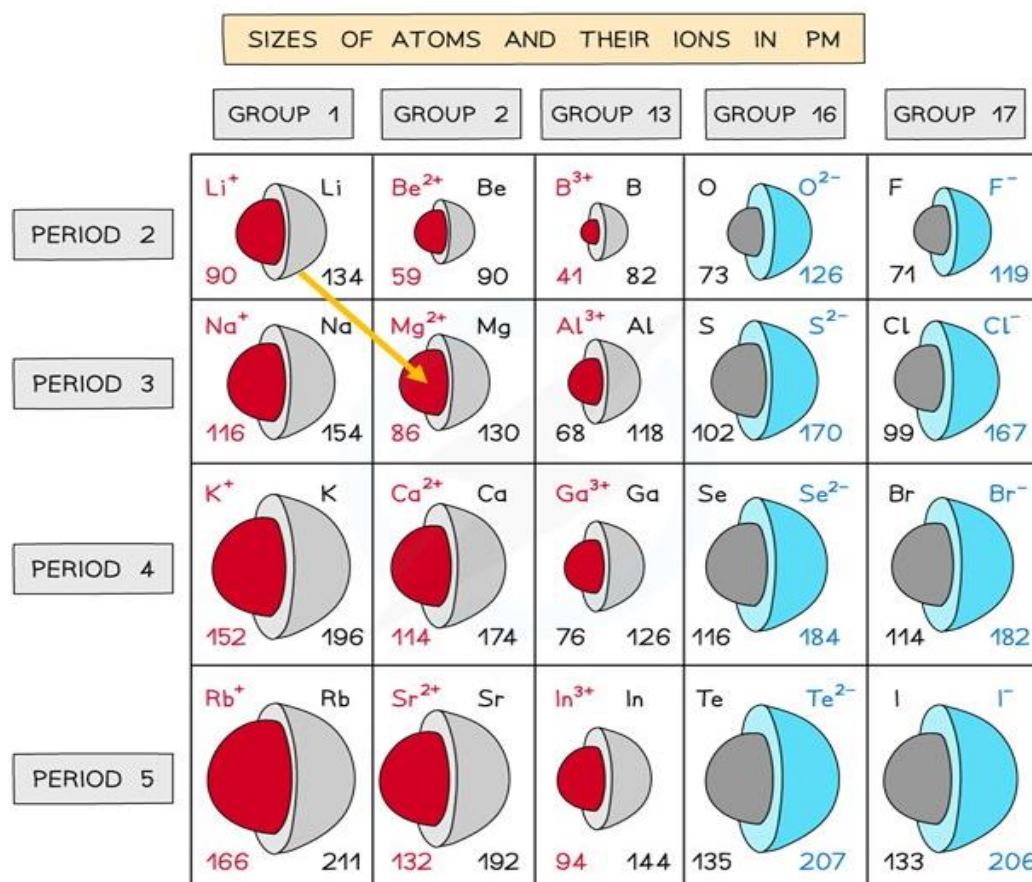
لیتیوم نوعی فلز قلیایی (گروه یک جدول تناوبی) نرم به رنگ سفید تا نقره‌ای است. این عنصر دارای عدد اتمی ۳ و جرم اتمی ۶/۹ است (شکل ۱) که به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله سبک‌ترین فلز، بالاترین پتانسیل الکتروشیمیایی و واکنش‌پذیری بالا شناخته شده است. علاوه بر این، لیتیوم قابل اشتعال است و تمایل به واکنش با آب (تشکیل هیدروکسید)، اکسیژن، کربن دی‌اکسید و نیتروژن در معرض هوا دارد (Balaram et al., 2024; International Lithium Association, 2023). لیتیوم به دلیل شعاع یونی و اتمی یکسان می‌تواند جانشین عنصر منیزیم شود (شکل ۲). لیتیوم در محیط‌های گوناگون زمین‌شناسی و در پوسته زمین یافت می‌شود و می‌توان آن را از طریق روش‌های مختلف معدن‌کاری، بسته به موقعیت و ترکیب کانسار استخراج کرد. پگماتیت‌ها، شورابه‌ها و ذخایر رسوبی از جمله مهم‌ترین منابع لیتیوم هستند. در طول دهه گذشته، تقاضای لیتیوم به دلیل استفاده از آن در صنعت باتری‌های لیتیومی افزایش یافته است. مصرف جهانی لیتیوم در سال ۲۰۲۴،

۲۹ درصد افزایش نسبت به سال ۲۰۲۳ داشته است (Jaskula, 2024). انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۰ تقاضای جهانی لیتیوم نزدیک به ۱/۸ میلیون تن باشد که این مقدار تقریباً شش برابر تقاضا در سال ۲۰۲۰ است (Statista Available online, 2025). باتری‌های لیتیومی نقش مهمی در وسایل نقلیه الکتریکی، ذخیره انرژی و وسایل الکترونیکی مانند گوشی‌های همراه، لپ‌تاپ، ساعت‌های هوشمند و دوربین‌های دیجیتال ایفا می‌کنند. همچنین این باتری‌ها به دلیل ظرفیت بالا، ایمنی، طول عمر و سرعت شارژ زیاد محبوب هستند. کاربرد وسیع لیتیوم به اکتشاف روزافزون منابع لیتیوم و استخراج آن در سطح جهان منجر شده است. پیش‌بینی می‌شود تقاضا برای لیتیوم در سال‌های آینده به طور چشمگیری افزایش یابد. در این پژوهش، با توجه به افزایش تقاضای لیتیوم و کاربردهای گسترده آن، سعی شده است یک چشم‌انداز جهانی به روز در مورد جنبه‌های مختلف لیتیوم از جمله کاربردهای آن، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، انواع مختلف ذخایر لیتیومی، شاخص‌های اکتشاف، روش‌های آنالیز، استخراج ذخایر لیتیومی و در نهایت جایگاه و اثر آن در بازار جهانی ارائه شود.



شکل ۱. مشخصات عنصر لیتیوم

Fig. 1. Properties of lithium element



شکل ۲. نمایش جانشینی لیتیوم بجای منیزیم (Boole, 2024)

Fig. 2. Replacement of lithium with magnesium (Boole, 2024)

زمین شناسی و تقسیم بندی کانسارهای لیتیوم

لیتیوم در پوسته قاره ای غنی شدگی دارد و مقدار آن به طور میانگین ۲۵ گرم در تن است (Balaram et al., 2024). مقدار فراوانی عنصر لیتیوم در سنگ ها، آب ها و محیط های مختلف زمین شناسی در جدول ۱ ارائه شده است. از مهم ترین منابع لیتیوم می توان به پگماتیت ها، ذخایر رسوبی و شورابه ها اشاره کرد (شکل ۳).

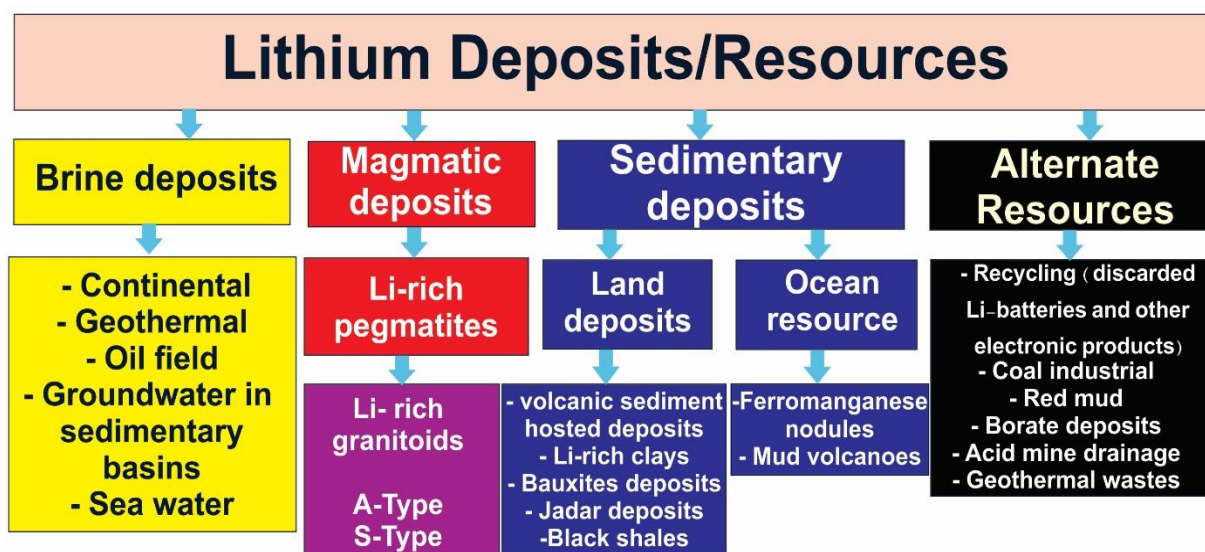
پگماتیت ها سنگ های آذرین دانه درشتی هستند که از عناصر کمیاب از جمله لیتیوم غنی شده اند (Benson et al., 2025). ذخایر پگماتیت یکی از منابع اولیه ماده معدنی لیتیوم، به ویژه

اسپودومن است. ذخایر پگماتیت در کشورهای مختلفی از جمله استرالیا، کانادا، ایالات متحده و برزیل یافت می شود. ماگمای گرانیتی منشأ باید غنی از لیتیوم باشد و همچنین تحت تبلور تفریقی شدیدی قرار بگیرد تا ذخایر پگماتیت تشکیل شود (London, 2018; Sykes et al., 2019). لیتیوم در نتیجه تفریق ماگماهای گرانیتی در مراحل نهایی تبلور، در پگماتیت ها با فراوانی بالایی متمرکز می شود (Balaram et al., 2024). ذخایر پگماتیت در کشور استرالیا دارای مجموعه ای از قلع، تانتالوم، لیتیوم و کائولن است. این پگماتیت ها حاوی بیشترین مقدار لیتیوم (بیشتر از ۵ درصد وزنی Li₂O) هستند (Sykes et al., 2019).

جدول ۱. غلظت عنصر لیتیوم در سنگ‌ها، آب‌ها و محیط‌های مختلف زمین‌شناسی (برگرفته از بالارام و همکاران (Balaram et al., 2024))

Table 1. Lithium concentrations in different types of rocks, water, and other geological materials (modified after Balaram et al., 2024)

Type of geological material	Concentration	Reference
Upper continental crust	35 ± 11 ppm	Teng et al., 2004
Continental crust	17 ppm	Rudnick and Gao, 2005
Igneous rocks	29 ppm	Horstman, 1957
Sedimentary rocks	53–60 ppm	Evans, 2014
Hydrothermal waters (general)	8.2 µg/mL	Shaw et al., 1977
Marine sediments (manganese nodules)	139 ppm	Heller et al., 2018
Brines	200 – 1400 ppm	Gruber et al., 2011
Sea water	0.1–0.2 ppm	Li et al., 2021a; Li et al., 2021b
Groundwater	0.9 – 161 ppb (average 13.9 ppb)	Sharma et al., 2022
Surface water	<0.5 to 130 ppb (average 3.9 ppb)	Sharma et al., 2022
Geothermal waters	77.31 – 99.40 ppm	Suud et al., 2023
Brines associated with oilfield	7.56 – 150 ppm	Yu et al., 2023a; Yu et al., 2023b



شکل ۳. نمایی از طبقه‌بندی تقریبی انواع ذخایر و منابع لیتیوم (برگرفته از بالارام و همکاران (Balaram et al., 2024))

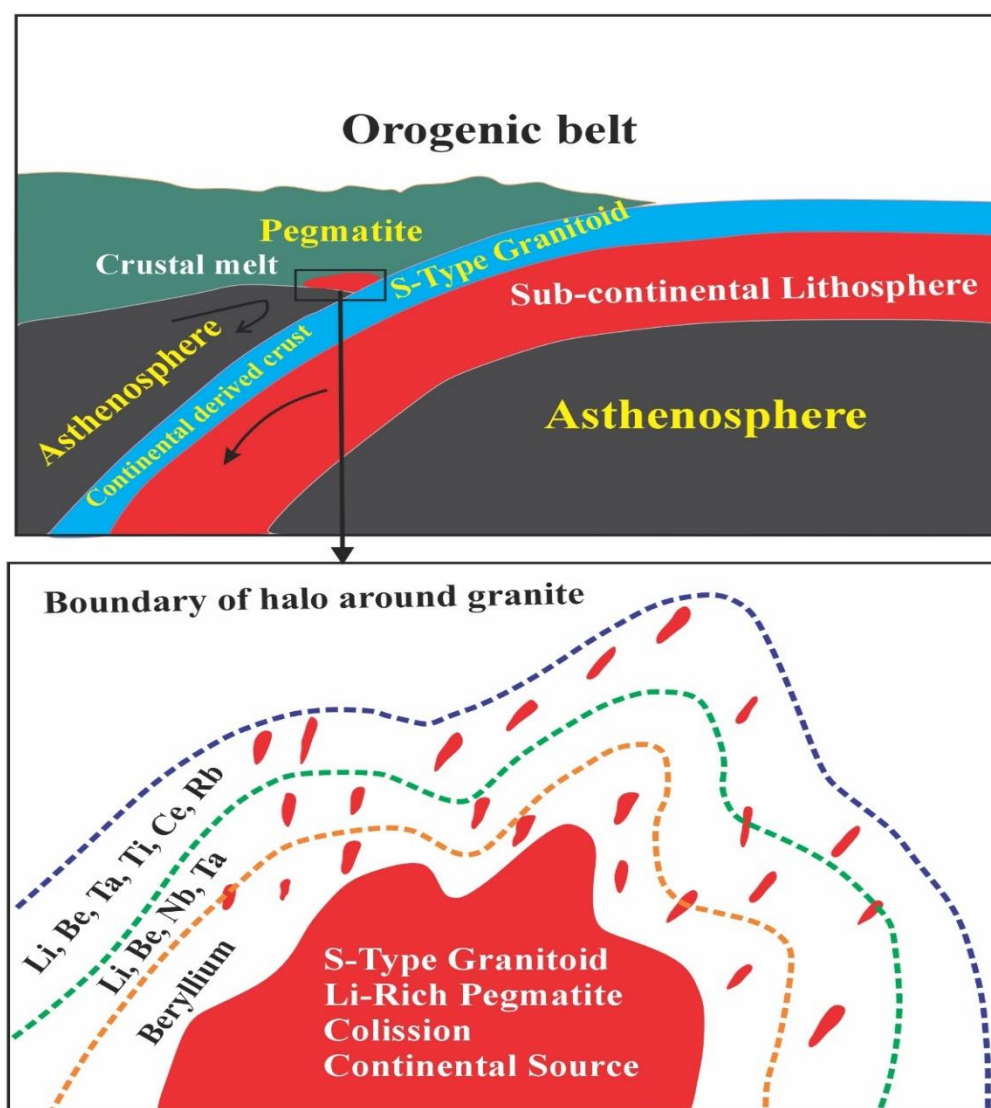
Fig. 3. Illustrative view of the approximate classification of all kinds of lithium deposits/resources modified after (Balaram et al., 2024)

رخساره‌های دگرگونی در کمریندهای کوه‌زایی و میزان
بالاآمدگی در طول گسترش کوه‌زایی اشاره کرد. دو نوع ذخیره

عوامل مختلفی در تنوع طبقه‌بندی پگماتیت‌ها اثر دارد، از جمله
این عوامل می‌توان به ترکیب‌های سنگ‌های پوسته‌ای، سری

دگرگون شده در رخساره شیست سبز بالایی تا آمفیبولیت زیرین میزبان، بیشتر پگماتیت های LCT هستند. این پگماتیت ها اغلب مرتبط با سنگ های پرکامبرین هستند. در شکل ۴، نمودار شماتیکی از منشأ گرانیت ها نوع S در زون برخورد قاره ای به همراه هاله های زمین شیمی آن نمایش داده شده است.

پگماتیت لیتیوم دار وجود دارد:
(۱) **پگماتیت های LCT**: پگماتیت های LCT غنی شدگی قابل توجهی از عناصر لیتیوم (Li)، سزیم (Cs) و تانتالیم (Ta) نشان می دهند. این پگماتیت ها در محیط های زمین ساختی زون فرورائش و برخورد قاره ای تشکیل می شوند و کانی های اسپودومن، لپیدولیت و پتالیت در آنها فراوان است. سنگ های پوسته ای

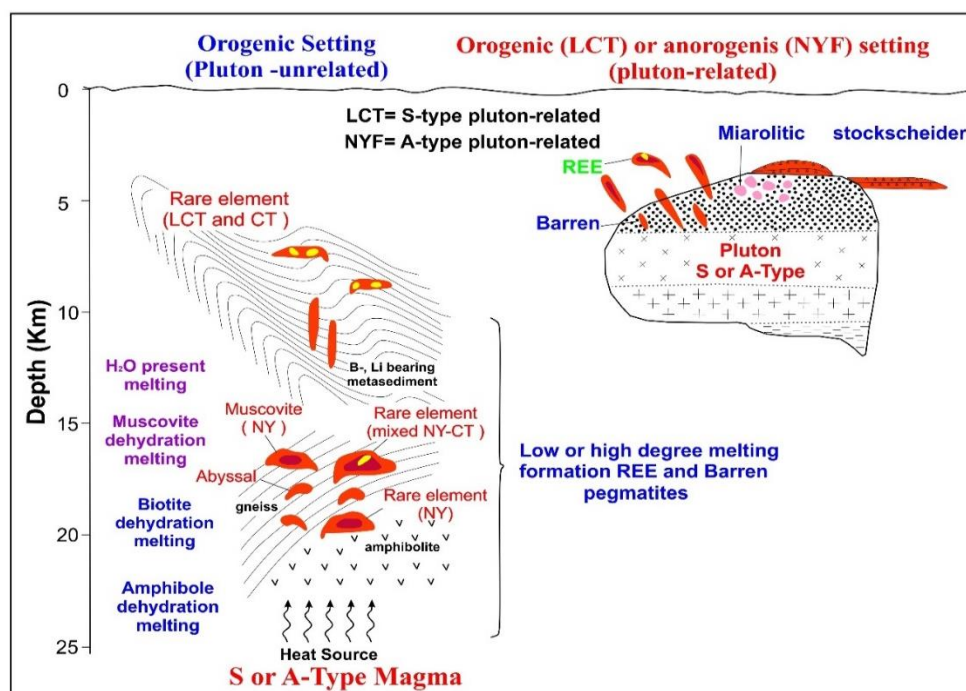


شکل ۴. نمودار نمایش گرانیتوئیدهای نوع S در زون برخورد قاره ها، منشأ پگماتیت های حاوی لیتیوم (Trueman and Černý, 1982; Serri et al., 1993; Galeschuk and Vanstone, 2007).

Fig. 4. Schematic diagram of S-type granitoids in continental collision zone, source of Li-bearing pegmatites (Trueman and Černý, 1982; Serri et al., 1993; Galeschuk and Vanstone, 2007).

LCT بدون لیتیوم هستند (CT). وجود لیتیوم در پگماتیت‌های LCT به فراوانی آن در مذاب حاصل از ذوب سنگ منشأ در زون فرورانش بستگی دارد (Muller et al., 2017). موقعیت زمین‌ساختی گرانیت‌های نوع A در ریف‌های درون قاره‌ای (غیر کوه‌زایی) است. این گرانیت‌ها از ذوب بخشی سنگ‌های پوسته‌ای منشأ می‌گیرند. گرانیت‌های نوع A نیز می‌توانند در منشأ پگماتیت‌های حاوی لیتیوم نقش داشته باشند (شکل ۵).

لیتیوم در آخرین فاز تفریق کمپلکس‌های گرانیتی در مرحله نهایی تبلور تجمع می‌یابد و در نتیجه به مقدار قابل توجهی در پگماتیت‌ها متمرکز می‌شود (Balaram et al., 2024). مجموعه کانی‌هایی که در نهایت تشکیل می‌شوند، حاوی مقدار بالایی لیتیوم هستند مثل اسپودومن، لپیدولیت و پتالیت (London, 2018). به عقیده مولر و همکاران (Muller et al., 2017)، پگماتیت‌های LCT مربوط به گرانیت‌های نوع S نوع کالک‌آلکان کوه‌زایی هستند که در زون فرورانش و برخورد قاره‌ای تشکیل شده‌اند (شکل ۵). برخلاف طبقه‌بندی شناخته‌شده پگماتیت‌ها، گاهی پگماتیت‌های



شکل ۵. نمودار نمایش گرانیتوئیدهای نوع A و S ریف‌های درون قاره، منشأ پگماتیت‌های حاوی لیتیوم (برگرفته از مولر و همکاران (Muller et al., 2017))

Fig. 5. Schematic diagram of S and A-type granitoids in continental rift, source of Li-bearing pegmatites (modified after Muller et al., 2017)

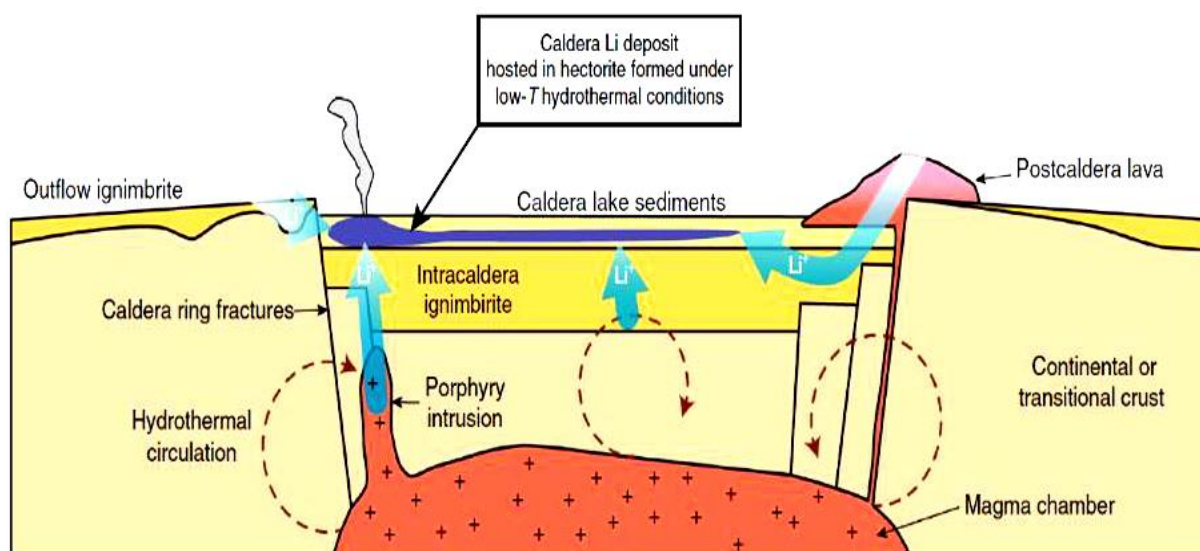
پگماتیت‌ها می‌توان به دایک‌های پگماتیتهای در گنایس‌های پورفایروبلاستی در هند (Singhm and Kaistha, 1999) و یا پگماتیت‌های لیتیوم‌دار چین (Zhang et al., 2021) اشاره کرد.

۲) پگماتیت‌های همراه با سنگ‌های ماگمایی و متاسوماتیکی: این پگماتیت‌ها در کمرندهای کوه‌زایی، همراه با سنگ‌های دگرگونی و ماگمایی مشاهده می‌شوند. از جمله این

لیتیوم از گدازه‌های ریولیتی، سنگ‌های آتشفشانی و ماگماهای حاوی لیتیوم توسط سیالات گرمابی در اطراف سامانه‌های آتشفشانی بسیار بزرگ برای تولید دریاچه‌های کالدرای تشکیل می‌شوند (شکل ۶). آب‌های سطحی و گرمابی می‌توانند در شست‌وشوی بیشتر لیتیوم نقش داشته باشند. در ذخایر رسی، لیتیوم معمولاً در کانی اسمکتیت وجود دارد، مانند ذخایر رسی لیتیوم‌دار در نوادا، مکزیک و آریزونا که لیتیوم در اسمکتیت متمرکز شده است (Thompson et al., 2025). هکتوریت، رایج‌ترین نوع اسمکتیت است که غنی از منیزیم و لیتیوم است (Balaram et al., 2024). ذخایر رسی لیتیوم شامل سه دسته هستند: ۱- ذخایر هکتوریت، ۲- ذخایر ایلیت-اسمکتیت و ۳- ذخایر جاداریت (Balaram et al., 2024).

از جمله ذخایر ماگمایی جدید لیتیوم می‌توان به مقدار بالای لیتیوم (۲۸۶ تا ۹۵۷ گرم در تن) در سنگ میزبان توف در کشور چین اشاره کرد که یک منبع لیتیوم مهم است (Peng et al., 2023). لیتیوم همچنین می‌تواند در ذخایر رسوبی، جایی که معمولاً با کانی‌های رسی یا تبخیری‌ها همراه است، وجود داشته باشد. ذخایر لیتیوم رسوبی در کشورهایی مانند چین، روسیه و ایالات متحده یافت می‌شود (Balaram et al., 2024). ذخایر رسوبی لیتیوم به دو دسته تقسیم می‌شوند:

ذخایر رسوبی خشکی: منشأ لیتیوم در ذخایر رسوبی همواره مورد بحث بوده است. در یکی از فرضیه‌های مطرح‌شده، تصور می‌شود که ذخایر رسوبی خشکی ذخایر رسی لیتیوم‌دار مرتبط با مناطق آتشفشانی هستند. ذخایر رسی غنی از لیتیوم در نتیجه شسته‌شدن



شکل ۶. مدل شماتیکی از نحوه تشکیل ذخایر رسی لیتیوم (هکتوریت) (برگرفته از بنسون و همکاران (Benson et al., 2017))

Fig. 6. Schematic model of hectorite lithium clay deposits formation (modified after (Benson et al., 2017))

در امتداد یک منطقه گسلی ۸ کیلومتری قرار گرفته است (Ames et al., 1958). دریاچه تشکیل شده در دهانه آتشفشان، محل ته‌نشینی رسوب‌های آتشفشانی آواری بوده که اکنون یک حلقه تقریباً پیوسته را در دهانه کالدرای تشکیل می‌دهند و میزبان

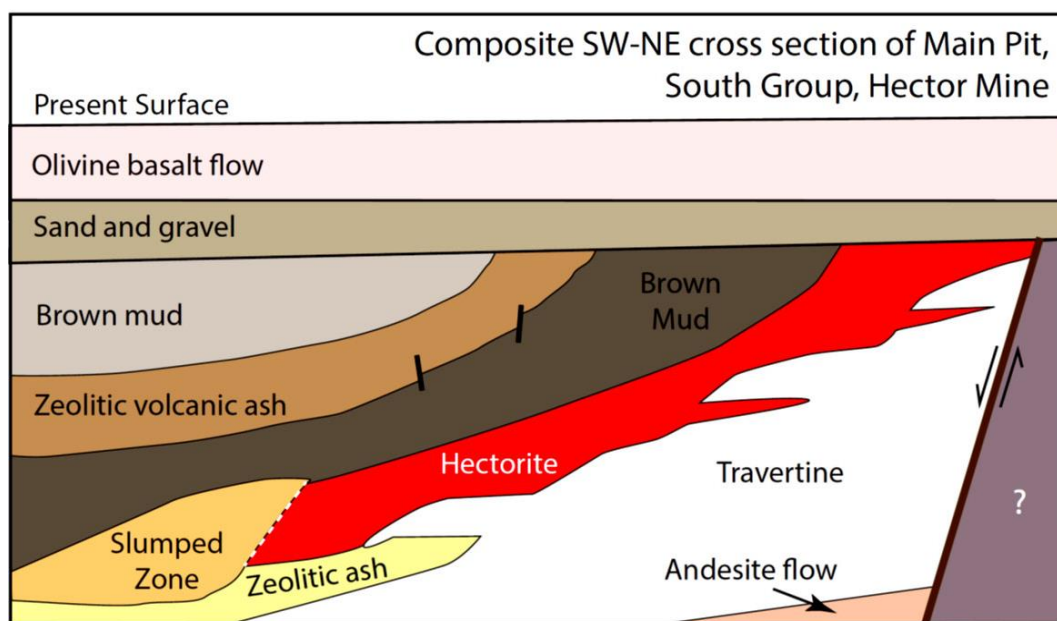
یکی از معادن شناخته‌شده هکتوریت، معدن هکتور در نزدیکی بارستو واقع در ایالت کالیفرنیا امریکاست. در این معدن، هکتوریت کانی رسی اصلی در توالی لایه‌های خاکستر آتشفشانی آلتره‌شده است که به صورت میان لایه‌ای با رسوب‌های دریاچه‌ای و تراورتن

Segovia-More et al.,) ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ گرم در تن است (

(2023).

عدسی‌های مختلف هکتوریتی هستند (شکل ۷).

همچنین از دیگر ذخایر رسی می‌توان به ذخیره آتشفشانی ماکوسانی در امریکا جنوبی اشاره کرد که محتوای بالای لیتیوم آن



شکل ۷. موقعیت مکانی تشکیل هکتوریت در معدن هکتور کالیفرنیا (برگرفته از آموز و همکاران (Ames et al., 1958))

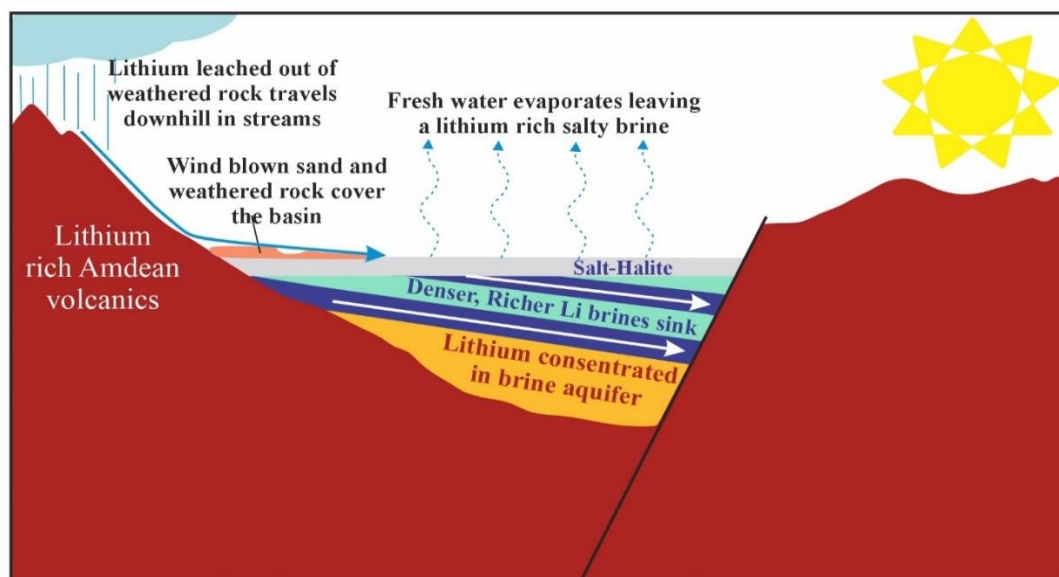
Fig. 7. Location of hectorite formation in the Hector mine, California (modified after Ames et al., 1958)

لیتیوم را می‌توان در ذخایر شورابه‌ای یافت که در اثر تبخیر آب شور در مناطق خشک تشکیل می‌شوند. این رسوب‌ها سرشار از نمک‌های لیتیوم مانند کلرید لیتیوم، کربنات لیتیوم و هیدروکسید لیتیوم هستند. ذخایر شورابه‌ای اغلب در کشورهایی مانند شیلی، آرژانتین و بولیوی یافت می‌شوند؛ جایی که نمکزارهای بزرگ، معروف به پلایا وجود دارند. شورابه‌های فوق شور می‌توانند تا ۶۰۰۰ گرم در تن لیتیوم داشته باشند (Karimpour, 2024). ذخایر لیتیوم شورابه‌ای بالغ بر میلیون‌ها سال در طی ترکیب پیچیده‌ای از فرایندهای زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی شامل تبخیر، اختلاط، انحلال‌هالیت و هکتوریت و ته‌نشینی تشکیل می‌شوند (Munk and Jochens, 2011; Munk et al., 2016). این ذخایر در آب و هوای خشک تشکیل می‌شوند؛ جایی که مقدار

ذخایر رسوبی دریای عمیق: مقدار لیتیوم در آب دریایی پایین و حدود ۰/۱ تا ۰/۲ میلی گرم در میلی لیتر است (Li et al., 2021a; Li et al., 2021b). رودخانه‌ها مقدار زیادی لیتیوم به آب دریا اضافه می‌کنند و فعالیت گرمابی در پشته‌های میان اقیانوسی، مقدار قابل توجهی لیتیوم را به آب‌های اقیانوسی تزریق می‌کنند (Edmond et al., 1979; Schlesinger et al., 2021). لیتیوم فعالیت بیولوژیکی محدودی دارد؛ اما می‌تواند جایگزین یون‌های آلومینیم، منیزیم و آهن در آلومینوسیلیکات‌های موجود در رسوب‌ها شود و در نتیجه در رسوب‌های دریایی غنی‌شدگی لیتیوم رخ می‌دهد (Steiner et al., 2022). به همین دلیل رسوب‌های دریایی مانند نودول‌ها و پوسته‌های فرومکنز در اعماق دریا حاوی غلظت قابل توجهی لیتیوم هستند.

یکی از فرایندهای مهم برای تشکیل شورابه‌هاست و تبخیر سطحی به همراه غلظت و تمرکز عنصر لیتیوم (شکل ۸) از سازوکارهای اصلی تشکیل ذخایر شورابه‌ای لیتیوم هستند (Wang et al., 2021a; Wang et al., 2021b). ذخایر شورابه‌ای لیتیوم سه نوع هستند که عبارتند از: ۱- ذخایر شورابه‌ای قاره‌ای، ۲- ذخایر شورابه‌ای ژئوترمال، ۳- ذخایر شورابه‌ای حوزه‌های نفتی.

تبخیر بیشتر از بارش است. فرونشست زمین برای تشکیل حوضه رسوب گذاری و زمان کافی برای انباشت لیتیوم از دیگر موارد ضروری تشکیل این ذخایر هستند (Munk et al., 2025). معمولاً وقتی سیال شور با سنگ‌های آتشفشانی مانند بازالت‌ها و ریولیت غنی از لیتیوم واکنش می‌دهد، لیتیوم و پتاسیم حل می‌شوند. دماهای بالاتر و دوره‌های زمانی طولانی‌تر توانایی شست‌وشو را افزایش می‌دهند (Balaram et al., 2024). واکنش آب و سنگ



شکل ۸. مدل شماتیکی از نحوه تشکیل شورابه‌های لیتیوم‌دار (برگرفته از هوستون و همکاران (Houston et al., 2011))

Fig. 8. Schematic model of Li-bearing brines formation (modified after Houston et al., 2011)

2024). ذخایر شورابه‌ای زیرسطحی غنی از لیتیوم معمولاً در عمق صدها یا هزاران متری دفن می‌شوند. فعل و انفعالات زمین شیمیایی زیرسطحی بین آب و فازهای جامد توده‌ای از رسوب‌های دریاچه‌ای مهم‌ترین فرایند برای تشکیل رسوب‌های شورابه است (Coffey et al., 2021). مثلث لیتیوم (آرژانتین، شیلی و بولیوی) بهترین نمونه از ذخایر شورابه‌ای قاره‌ای است (شکل ۹). غلظت‌های بسیار بالای لیتیوم (تا ۷۰۰۰ گرم در تن) از این رسوب‌ها گزارش شده است (Warren, 2016).

ذخایر شورابه‌ای قاره‌ای: رایج ترین رسوب‌های شورابه‌ای لیتیوم، ذخایر شورابه‌ای قاره‌ای هستند که به عنوان دریاچه‌های نمک، نمکزار یا پلایا نیز شناخته می‌شوند. شرایط زمین شناسی و اقلیمی لازم برای تشکیل این ذخایر عبارتند از: ۱- منبع لیتیوم، ۲- سازوکار استخراج، ۳- سازوکار انتقال، ۴- یک حوزه بسته برای به دام افتادن سیال، ۵- اقلیم خشک تا نیمه خشک برای سرعت تبخیر مورد نیاز، ۶- مقدار زیادی نمک محلول حاوی غلظت قابل توجهی از لیتیوم، ۷- فرونشست و ۸- زمان کافی برای تمرکز و ته‌نشینی عناصر (Munk et al., 2016; Balaram et al., 2024).



شکل ۹. نمایش موقعیت مکانی ذخایر لیتیوم نوع شورابه‌ای در آمریکای جنوبی (Nelson, 2022)

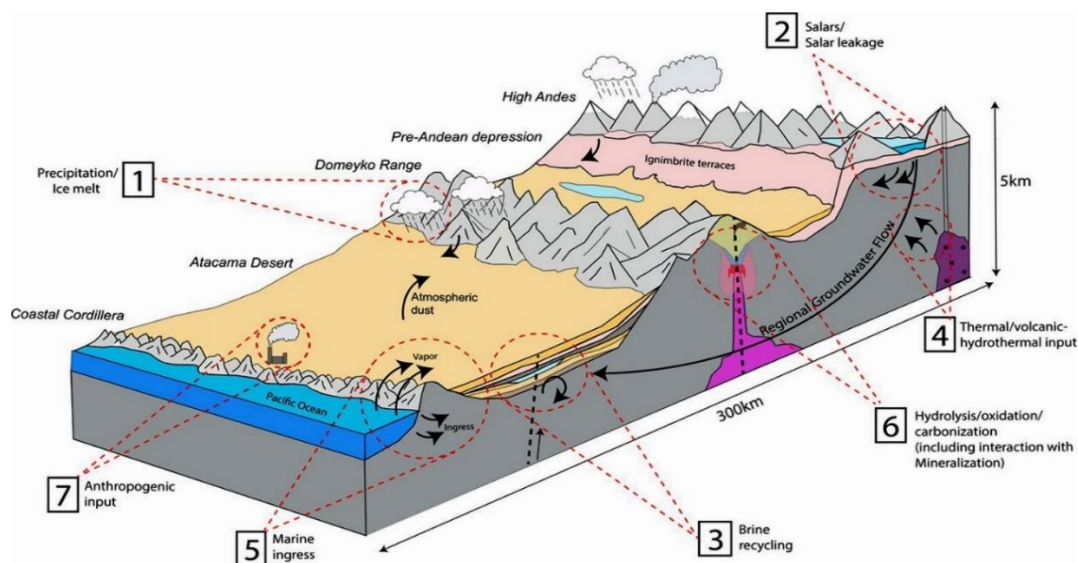
Fig. 9. Location of lithium brine deposits in the South America (Nelson, 2022)

به عنوان منبع با پتانسیل لیتیوم (۸۰ تا ۳۰۰ گرم در تن) در آب تولید شده از ذخایر شیل شناخته می‌شوند (Lee et al., 2024). شورابه‌های حوزه‌های نفتی علاوه بر منیزیم، برم و پتاسیم حاوی ناهنجاری لیتیوم هستند. لیتیوم موجود در این نمک‌ها ممکن است از تماس با محلول نمکی با لایه‌های حاوی فیلوسیلیکات منشأ بگیرد (Mertineit and Schramm, 2019).

به طور کلی، املاح شورابه‌ها می‌توانند ۷ منشأ داشته باشند (شکل ۱۰) که عبارتند از: ۱- انحلال املاح در نتیجه بارش و ذوب یخ، ۲- شست‌وشو از پلایاها، ۳- بازیافت شورابه‌ها، ۴- آتشفشانی- گرمابی، ۵- دریا، ۶- اکسایش و دگرسانی و ۷- آلودگی‌های انسان‌زا (Kidder et al., 2020).

ذخایر شورابه‌ای ژئوترمال: این ذخایر زمانی تشکیل می‌شوند که محلول‌های شور غلیظ و گرم (چشمه‌های گرمابی) در میان سنگ‌های پوسته‌ای در مناطقی با جریان حرارت بسیار بالا به گردش در می‌آیند و از عناصری مانند لیتیوم، بور و پتاسیم غنی می‌شوند. ذخیره ژئوترمال غنی از لیتیوم در جنوب غربی **شیانگ** در چین، یکی از ذخایر شورابه‌ای ژئوترمال لیتیوم با پتانسیل بالاست که در مقایسه با سایر حوزه‌های ژئوترمال غنی از لیتیوم در سراسر جهان، بالاترین غلظت لیتیوم (۲۳۹ گرم در تن) را دارد (Wang et al., 2021a; Wang et al., 2021b).

ذخایر شورابه‌ای حوزه‌های نفتی: سنگ‌های منشأ نفت (شیل) که از قدیم منبع نفت و گاز در نظر گرفته می‌شدند، در حال حاضر



شکل ۱۰. منشأ املاح موجود در شورابه‌ها (Kidder et al., 2020)

Fig. 10. The sources of solutes brines (modified after Kidder et al., 2020)

کانی‌شناختی و زمین‌شیمی کانسارهای لیتیوم

رایج‌ترین کانی‌های لیتیوم‌دار به شرح زیر هستند. این کانی‌ها به طور معمول در سنگ‌های آذرین، پگماتیت‌ها و ذخایر رسوبی یافت می‌شوند. در جدول ۲ مقدار غلظت لیتیوم در کانی‌های مختلف ارائه شده است.

اسپودومن: کانی اسپودومن ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) یکی از مهم‌ترین کانی‌های لیتیوم‌دار است که از سرد شدن آهسته ماگما به وجود می‌آید. اسپودومن یک کانی پیروکسن است که حاوی لیتیوم آلومینیم اینوسیلیکات است. این کانی می‌تواند به شکل‌های توده‌ای، دانه‌ای یا بلوری باشد. به طور معمول بی‌رنگ تا صورتی کم رنگ یا سبز است و دارای محتوای نسبتاً بالای لیتیوم است که آن را به منبع اصلی ماده معدنی لیتیوم تبدیل می‌کند.

پتالیت: کانی پتالیت ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$) یک کانی سیلیکاته آلومینیم لیتیوم است که در پگماتیت‌ها و برخی از رسوب‌های گرانیتی دیده می‌شود و معمولاً بی‌رنگ، سفید یا صورتی کم رنگ است. پتالیت دارای محتوای لیتیوم نسبتاً کمی در مقایسه با اسپودومن است؛ اما همچنان به عنوان یک منبع مهم سنگ لیتیوم در برخی از کانسارها در نظر گرفته می‌شود.

لیپدولیت: کانی لیپدولیت ($\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Al},\text{Si},\text{Rb})_4\text{O}_{10}$) یک کانی لیتیوم میکاست که در پگماتیت‌ها، گرانیت و برخی از ذخایر رسوبی رخمون دارد. لیپدولیت معمولاً صورتی یا بنفش است و در مقایسه با اسپودومن، لیتیوم نسبتاً کمی دارد. با این حال، به دلیل محتوای بالای عناصر کمیاب دیگر مانند روبیدیم، سزیم و تانتالیوم که می‌تواند ارزش اقتصادی نیز داشته باشد، شناخته شده است.

آمبلیگونیت: کانی آمبلیگونیت ($(\text{Li},\text{Na})\text{AlPO}_4(\text{F},\text{OH})$) یک کانی فسفات است که حاوی لیتیوم، آلومینیم و فلوئور است. اغلب در گرانیت، پگماتیت‌ها و برخی سنگ‌های دگرگونی یافت می‌شود. آمبلیگونیت به طور معمول بی‌رنگ، سفید یا زرد کم رنگ است و دارای محتوای لیتیوم متوسطی است.

تریفیلیت / لیتیوفیلیت: کانی تریفیلیت / لیتیوفیلیت ($\text{Li}(\text{Fe},\text{Mn})\text{PO}_4$) کانی فسفاتی است که می‌تواند حاوی لیتیوم نیز باشد. آنها معمولاً در گرانیت، پگماتیت‌ها و برخی از سنگ‌های دگرگونی یافت می‌شوند. تریفیلیت یا لیتیوفیلیت کانی تیره رنگ است و در مقایسه با سایر کانی‌های لیتیوم‌دار دارای محتوای لیتیوم نسبتاً کمی است.

لیتیوفوریت: کانی لیتیوفوریت $((\text{Al}, \text{Li}) \text{Mn}^{4+} \text{O}_2(\text{OH}))$ یک اکسید پایه منگنز لیتیوم و آلومینیم است. این کانی در ذخایر گرمابی و منگنزهای رسوبی یافت می‌شود.

جاداریت: کانی جاداریت $(\text{LiNaB}_3\text{SiO}_7(\text{OH}))$ یک نئوسیلیکات است که حاوی مقادیر قابل توجهی لیتیوم و بور است. این کانی برای نخستین بار در شیل‌های نفتی صربستان کشف شد (Stanley et al., 2007). معدن جادار در صربستان یکی از ذخایر رسوبی - آتشفشانی منحصر به فرد لیتیوم بوده و کانی میزبان اصلی آن جاداریت است (Putzolu et al., 2025).

زابولیت: کانی زابولیت (Li_2CO_3) یک کربنات لیتیوم است. این کانی در محیط‌های رسوبی تبخیری همراه با کانی هالیت یا به صورت ادخال در کانی اسپودومن یافت می‌شود.

تانیولیت: کانی تانیولیت $(\text{KLiMg}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2)$ یکی از کانی‌های گروه میکاست. رنگ این کانی از قهوه‌ای مایل به سبز تا بی‌رنگ متغیر است. تانیولیت در مراحل آخر تشکیل پگماتیت‌ها به وجود می‌آید.

زینوالدیت: کانی زینوالدیت $(\text{K}(\text{LiFeAl})(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{FOH})_2)$ از کانی‌های گروه میکاست. این کانی سیلیکات آهن و آلومینیم به همراه لیتیوم است. کانی زینوالدیت در کانسار زینوالد-سینووک (مرز آلمان و جمهوری چک) میزبان اصلی لیتیوم است که در زون‌های دگرسانی گرایزن در حاشیه داخلی توده‌های گرانیتی تجمع یافته است (Burisch et al., 2025).

کوکیت: کانی کوکیت $(\text{LiAl}_4(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8)$ یکی از کانی‌های گروه فیلسیلیکات‌هاست. این کانی معمولاً حاصل دگرسانی گرمابی در پگماتیت‌هاست.

یوکرپتیت: کانی یوکرپتیت (LiAlSiO_4) یک فلدسپاتوئید است که همراه با کانی‌های اسپودومن، آلپیت، پتالیت، آمبلیگونیت و کوآرتز در پگماتیت‌های لیتیوم‌دار یافت می‌شود. یوکرپتیت از دگرسانی کانی اسپودومن تشکیل می‌شود.

هکتوریت: کانی هکتوریت $(\text{Mg}, \text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ یک فیلسیلیکات و از کانی‌های رسی کمیاب است. هکتوریت اغلب با ذخایر بنتونیت همراه است.

جدول ۲. مقدار فراوانی لیتیوم در برخی از کانی‌های لیتیوم‌دار مهم (Peiro et al., 2013; Gourcerol et al., 2019; Howell et al., 2020; Balaram et al., 2023; Zhao et al., 2023a)

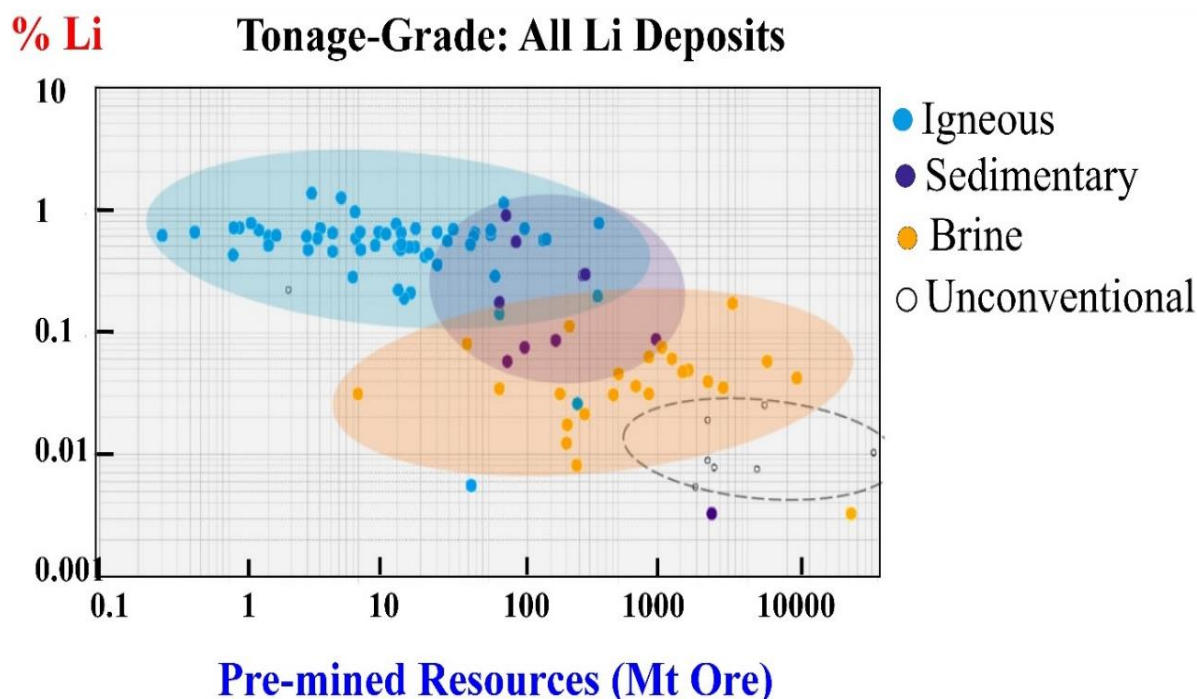
Table 2. Li concentration in some important lithium minerals (modified after Peiro et al., 2013; Gourcerol et al., 2019; Howell et al., 2020; Balaram et al., 2023; Zhao et al., 2023a)

Li-mineral	Mineral group	Formula	Li concentration (%)
Spodumene	Inosilicate	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	3.73
Lepidolite	Phyllosilicate	$\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si}, \text{Rb})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$	3.58
Hectorite	Phyllosilicate	$(\text{Mg}, \text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0.16-0.74
Jadarite	Neosilicate	$\text{LiNaB}_3\text{SiO}_7(\text{OH})$	3.39
Petalite	Tectosilicate	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$	2.26
Amblygonite	Phosphate	$(\text{Li}, \text{Na})\text{AlPO}_4(\text{F}, \text{OH})$	4.69
Cookeite	Phyllosilicate	$\text{LiAl}_4(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	1.34
Taeniolite	Phyllosilicate	$\text{KLiMg}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$	1.71
Lithiophorite	Oxide	$(\text{Al}, \text{Li}) \text{Mn}^{4+} \text{O}_2(\text{OH})$	0.57
Eucryptite	Feldspathoid	LiAlSiO_4	5.51
Zinnwaldite	Mica group	$\text{K}(\text{LiFeAl})(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{FOH})_2$	2-4 (Li_2O)
Muscovite	Mica group	$[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}\text{F}_2(\text{OH})_2] \text{KAl}_2$	0.23 (Li_2O)
Illite	Phyllosilicate	$\text{K}_{0.7}\text{Al}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	1.8
Montebrasite	Phosphate	$\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{OH})$	7.4 (Li_2O)
Triphylite	Phosphate	$\text{Li}(\text{Fe}, \text{Mn})\text{PO}_4$	9.47 (Li_2O)
Zabuyelite	Carbonate group	Li_2CO_3	18.79

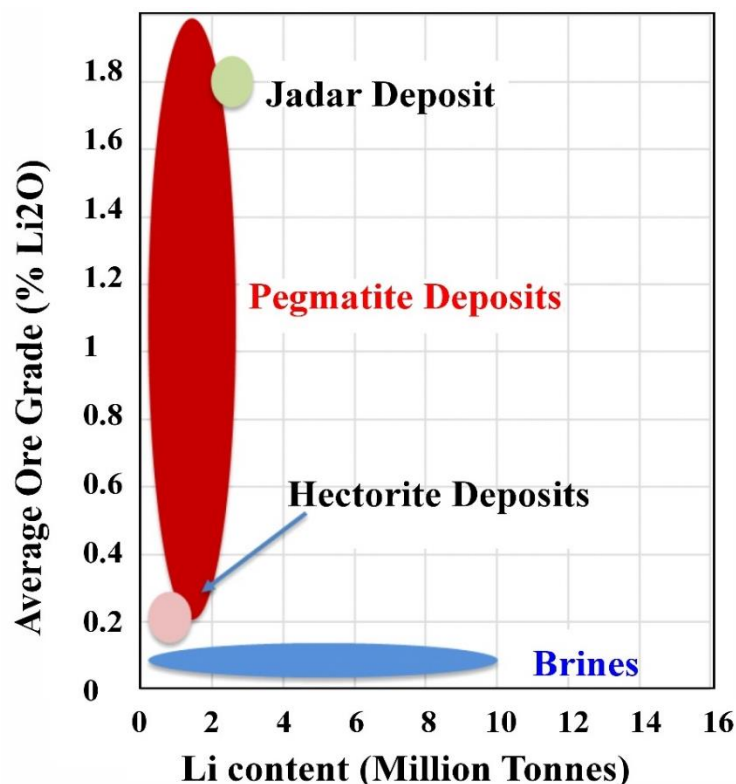
عیار و میزان ذخیره

در جدول ۱ مقدار زمینه عنصر لیتیوم در سنگ‌ها، آب‌ها و محیط‌های مختلف ارائه شد. در ذخایر لیتیوم‌دار، عیار حد لیتیوم به عوامل مختلفی از جمله نوع و اندازه ذخیره، نوع معدن‌کاری (رو باز یا زیرزمینی)، هزینه‌های استخراج و استحصال، فناوری موجود برای استحصال لیتیوم و میزان تقاضای آن بستگی دارد (Warren, 2021). عیار حد لیتیوم در ذخایر پگماتیتی بین ۰/۴ تا ۰/۶ درصد LiO_2 با عیار میانگین ۱ تا ۳ درصد LiO_2 است (Rifai et al., 2022). به عقیده ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2023b; al., 2023a)، عیار حد لیتیوم در پگماتیت‌ها ۷۰۰ گرم در تن در داخل پیت و شعاع ۱۰۰ متری چاه حفاری است. کمینه عیار صنعتی و عیار حد LiCl در ذخایر شورابه‌ای به ترتیب ۳۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم در لیتر است (Balaram et al., 2024). به عقیده سایک و همکاران (Sykes

et al., 2019)، دامنه تغییرات عیار لیتیوم در ذخایر آذرین بین ۰/۱ تا ۳، در ذخایر رسوبی بین ۰/۴ تا ۱/۵، در ذخایر شورابه‌ای بین ۰/۰۷ تا ۰/۲ و در سایر ذخایر از ۰/۰۰۳ تا ۰/۳ درصد متغیر است (شکل ۱۱). با توجه به اهمیت و تقاضای بالای عنصر لیتیوم، در سال‌های اخیر اکتشافات گسترده‌ای بر روی انواع ذخایر آن صورت گرفته است. بنا بر نظر کسلر و همکاران (Kesler et al., 2012)، بیشترین میزان ذخیره لیتیوم مربوط به ذخایر شورابه‌ای بوده و عیار آنها پایین (کمتر از ۰/۲ درصد LiO_2) است (شکل ۱۲). ذخایر پگماتیتی نیز حاوی عیار بالای لیتیوم (بیش از ۱/۸ درصد LiO_2) با مقدار ذخیره کم هستند (Kesler et al., 2012). مقدار کل ذخایر کشف شده لیتیوم در سطح جهانی تا سال ۲۰۲۴، ۳۰ میلیون تن است (جدول ۳). کشورهای شیلی، استرالیا، آرژانتین و چین به ترتیب بیشترین ذخایر لیتیومی را دارند.



شکل ۱۱. عیار لیتیوم در ذخایر مختلف (برگرفته از سایک و همکاران (Sykes et al., 2019))
Fig. 11. Lithium grade in different deposits (modified after Sykes et al., 2019)



شکل ۱۲. عیار و مقدار تناژ ذخایر مختلف لیتیوم دار (برگرفته از کسler و همکاران (Kesler at el., 2012))

Fig. 12. Tonage and ore grade in different lithium deposits (modified after Kesler at el., 2012)

جدول ۳. مقدار ذخایر و تولید معادن لیتیوم در کشورهای مختلف (Jaskula, 2024)

Table 3. Lithium reserves and mine production in different countries (Jaskula, 2024)

Countries	Mine Production (Metric Tons)		Reserves
	2023	2024	
United States			1,800,000
Argentina	8,630	18,000	4,000,000
Australia	91,700	88,000	7,000,000
Brazil	5,260	10,000	390,000
Canada	3,240	4,300	1,200,000
Chile	41,400	49,000	9,300,000
China	35,700	41,000	3,000,000
Namibia	2,700	2,700	14,000
Portugal	380	380	60,000
Zimbabwe	14,900	22,000	480,000
Other countries			2,800,000
World total (rounded)	204,000	240,000	30,000,000

اکتشاف کانسارهای لیتیوم

با توجه به میزان مصرف و تقاضای جهانی لیتیوم، به کارگیری روش‌های گوناگون اکتشافی از جمله زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، کانی‌شناسی، زمین‌شیمیایی و سنجش از دور و پس از آن عملیات حفاری برای یافتن ذخایر جدید لیتیوم ضروری است. بررسی‌های ایزوتوپی شاخص‌های زمین‌شیمیایی خوبی برای یک سامانه پگماتیت گرانیتی تکامل یافته هستند؛ زیرا نسبت $K/Rb=270$ در سنگ‌های آذرین ثابت است (Horstman, 1957; Garate- Olave et al., 2018). استفاده از زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه‌ای نیز برای بررسی و شناسایی کانی‌سازی پگماتیت‌ها مفید است (van de Ven et al., 2020). اکتشافات ژئوفیزیکی برای ذخایر لیتیوم پگماتیتی شامل ثقل سنجی، اکتشاف مغناطیسی و بررسی‌های ژئوالکتریکی است. ابزارهای متحرک تجزیه‌های شیمیایی از جمله XRF، XRD، LIBS و لیزر رامان می‌توانند در

اندازه‌گیری عناصر اصلی، فرعی و کمیاب سنگ در بازدیدهای صحرایی کمک‌کننده باشند. روش‌های سنجش از دور نوری و حرارتی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای، ابزارهای مهمی در اکتشافات زمین‌شناسی محسوب می‌شوند. سنجش از دور برای شرایطی کاربرد دارد که بازدید صحرایی بسیار سخت با ارتفاع زیاد و توپوگرافی شیب‌دار است. همچنین در برخی از ذخایر کانی‌ها و عناصر ردیاب کلید اکتشافی هستند. در ذخایر رسوبی لیتیوم، وجود کانی‌های نظیر اسمکتیت، ایلیت جاداریت و غیره به همراه عناصری مانند بور، برلیوم، پتاسیم، کلسیم و غیره می‌توانند ردیاب اکتشافی باشند. در ذخایر پگماتیتی نیز کانی‌های اسپودومن، پتالیت، آمبلیگونیت و غیره از جمله کانی‌های اصلی ردیاب هستند. در جدول ۴ کانی‌ها و عناصر ردیاب ذخایر رسوبی و پگماتیتی لیتیوم ارائه شده است.

جدول ۴. کانی‌های شاخص و عناصر ردیاب برای شناسایی ذخایر مختلف لیتیوم (Balaram and Sawant, 2022).

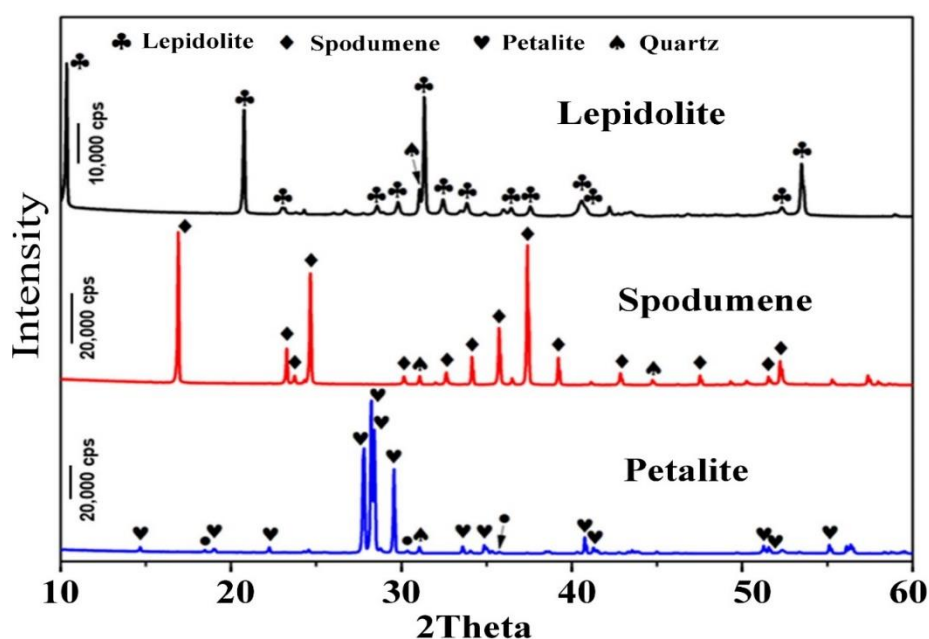
Table 4. Indicator minerals, pathfinder elements for identifying various lithium deposits (modified after Balaram and Sawant, 2022).

Deposits of interest	Type of seposit	Main pathfinder minerals	Main pathfinder elements
Lithium	Sedimentary	Smectites, illites, jadarite, searlesite, zeolite, beryl, diaspore, boehmite, kaolinite, illite and anatase, clinocllore and lithophosphate	B, Be, K, Ca, Cs, Rb, Sr, Y, Nb, Sn, Cs, Ta, Sb, W, Bi, As, Ga, Tl, and the REE
	Hard rock	Spodumene, petalite, amblygonite, quartz, K-feldspar, albite, or montebrasite, lepidolite, zinnwaldite, eucryptite, cassiterite, lithiophilite, holmquistite, triphylite, muscovite, apatite, tourmaline, tantalite-columbite, scheelite	

روش‌های تجزیه شیمیایی

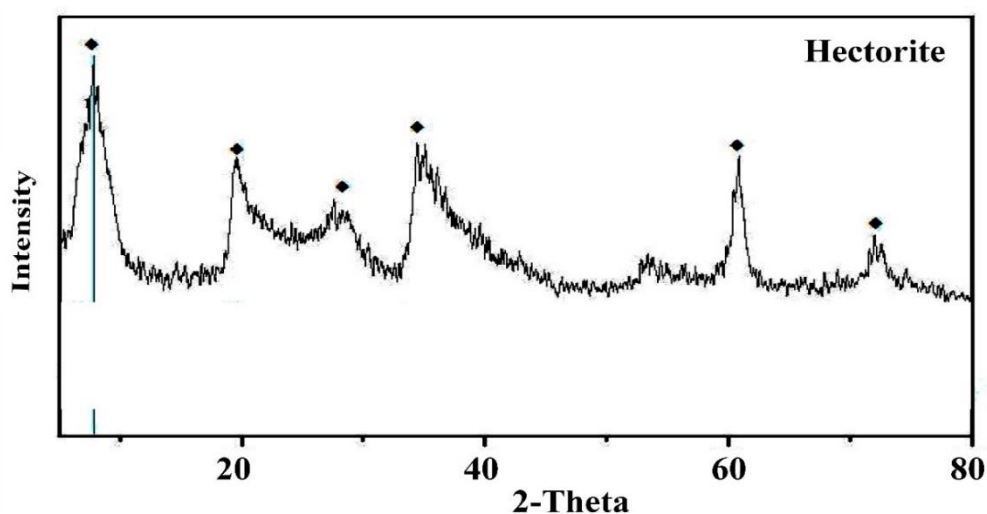
در پگماتیت بهتر است از تجزیه ICP-OES یا ICP-MS با روش چهار اسیدی یا ذوب پراکسیدی استفاده کرد. در ذخایر شورابه‌ای از روش **تیزاب سلطانی** استفاده می‌شود. مهم‌ترین نکته در تجزیه لیتیوم، روش محلول‌سازی است. در این روش نمونه را در محلول

HCl، HNO₃ و DI H₂O برای یک ساعت بر روی حرارت حل می‌کنند. به منظور شناسایی ترکیب کانی‌های موجود در یک ذخیره می‌توان از روش تجزیه XRD استفاده کرد (شکل‌های ۱۳ و ۱۴).



شکل ۱۳. گراف پرتو x حاصل از تجزیه XRD مربوط به کانی‌های پتالیت، اسپودومن و لپیدولیت

Fig. 13. X-ray graph obtained by XRD analysis of petalite, spodumene and lepidolite minerals



شکل ۱۴. گراف پرتو x حاصل از تجزیه XRD مربوط به کانی هکتوریت

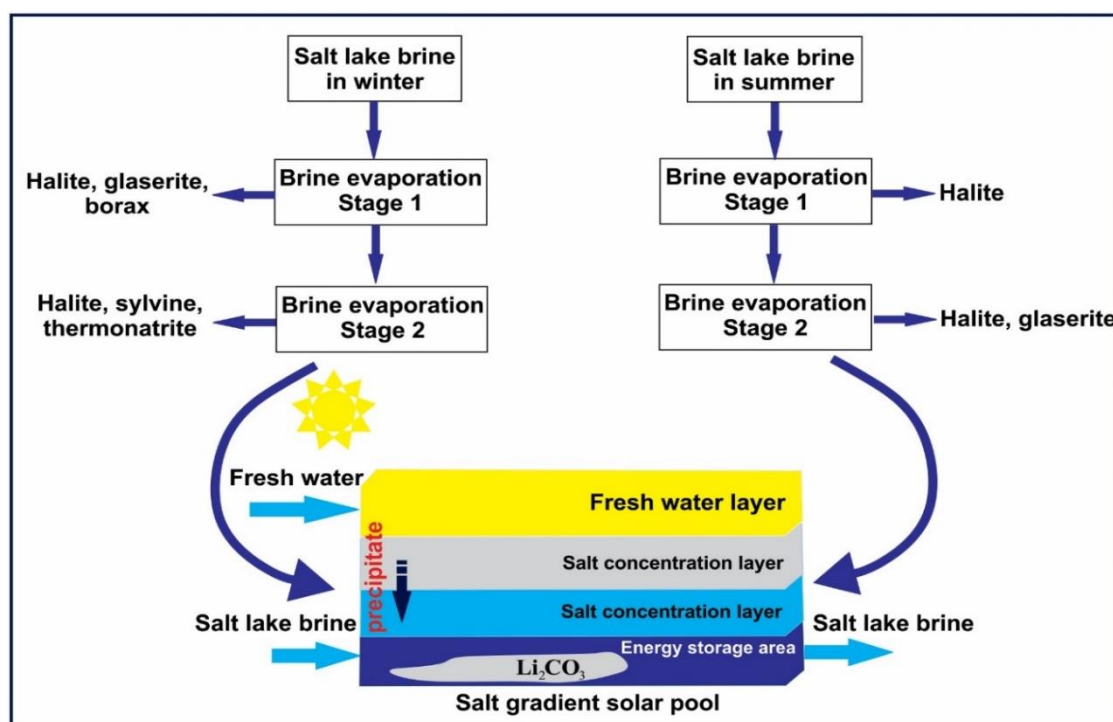
Fig. 14. X-ray graph obtained by XRD analysis of hectorite mineral

با مراحل تبخیری متوالی حذف نشده اند، با ته نشین شدن در طی افزودن معرف های شیمیایی، اغلب آهک هیدراته (Ca(OH)_2)، جدا می شوند. در کارخانه فراوری اجزایی باقی مانده در محلول غنی از لیتیوم، با روش هایی از جمله افزودن برخی مواد شیمیایی، فیلتر کردن، استخراج با حلال و تبادل یونی از محلول خارج می شوند. سپس شورابه خالص لیتیومی از نظر شیمیایی تصفیه می شود. در این مرحله با استفاده از کربنات سدیم (Na_2CO_3)، کربنات لیتیوم تولید می شود (Warren, 2021). بنا به عقیده مانک و همکاران (Munk et al., 2025) استخراج لیتیوم از ذخایر شورابه ای کمترین اثرات زیست محیطی را در بین روش های استخراجی دارد. در ذخایر رسی لیتیوم دار، روش شست و شو بیشتر از سایر روش ها استفاده می شود (شکل ۱۶). در طی شست و شو، لیتیوم از کانی های رسی جاذب شسته می شود. روش های تشویه، اسیدشویی و کلرزی نیز به منظور خارج کردن لیتیوم از شیکه کانی های لیتیوم دار استفاده می شود.

به کارگیری طیف سنجی رامان نیز در شناسایی سریع مواد معدنی لیتیوم دار کمک کننده است. در صورت نیاز به تجزیه نقطه ای نیز، روش laser ablation کاربردی است.

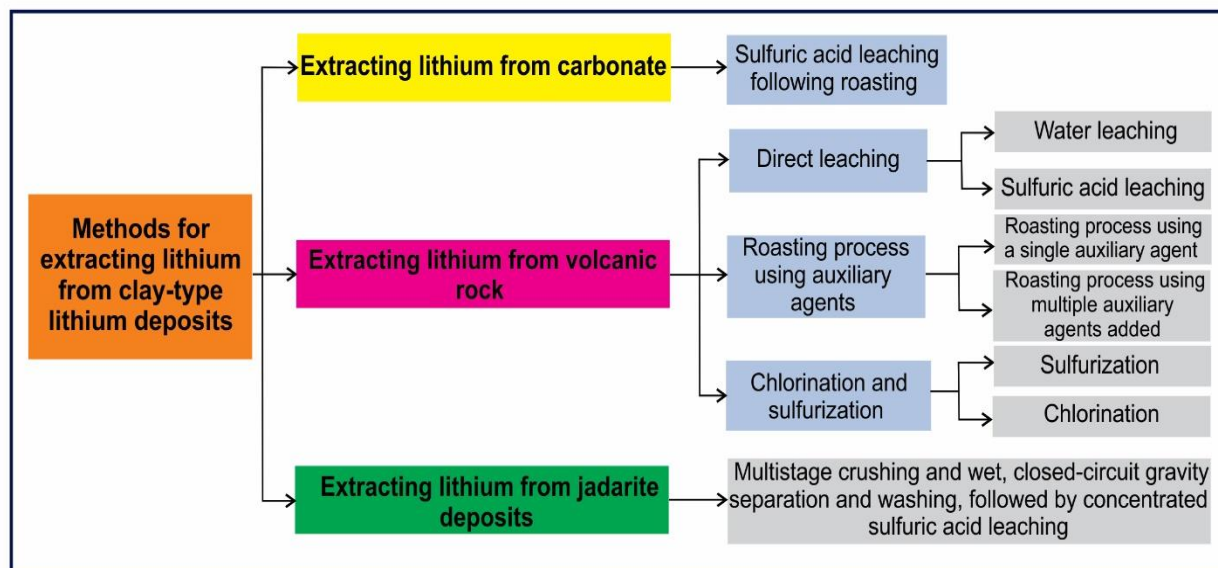
فراوری کانسارهای لیتیوم

طیف وسیعی از روش های فیزیکی و شیمیایی را می توان برای استخراج لیتیوم از شورابه ها و سنگ میزبان آن استفاده کرد. در پلایاها با استفاده از روش های جداسازی تبخیری و شیمیایی و در ذخایر سنگی، به ویژه در استرالیا، با استفاده از فرایندهای جداسازی انرژی بر و متالورژیکی، لیتیوم را استخراج می کنند. روش استاندارد برای استخراج لیتیوم از شورابه ها شامل پمپاژ شورابه های غنی از لیتیوم به مجموعه ای از حوضچه ها در سطح زمین است که می توانند هزاران هکتار را اشغال کنند. در حوضچه ها، لیتیوم و سایر نمک ها توسط تبخیر در طی یک سال یا بیشتر تغلیظ می شوند (شکل ۱۵). اجزای غیر لیتیومی که در گذشته



شکل ۱۵. نمودار جریانی استحصال لیتیوم از طریق فراوری حوضچه های خورشیدی نمکی (برگرفته از دینگ و همکاران (Ding et al., 2023))

Fig. 15. Flow chart showing the lithium extraction using the salt gradient solar pool process (Ding et al., 2023)



شکل ۱۶. مراحل استحصال لیتیوم از ذخایر لیتیوم نوع رسی (Zheng et al., 2023a)

Fig. 16. Processes for extracting lithium from clay-type lithium deposits (Zheng et al., 2023a)

می‌شود (شکل ۱۸).

۱- **باتری‌های لیتیومی:** یکی از مهم‌ترین کاربردهای لیتیوم در صنعت باتری است. باتری‌های لیتیومی به دلیل ظرفیت بالا، ایمنی، طول عمر و سرعت شارژ بسیار محبوب هستند. استفاده از لیتیوم در صنعت باتری‌سازی از سال ۱۹۸۰ آغاز شد و با گذشت زمان به میزان مصرف آن افزوده شد (جدول ۵). بر اساس آخرین گزارش سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده، در سال ۲۰۲۴، مقدار مصرف لیتیوم در صنعت باتری ۸۷ درصد بوده است. باتری‌های لیتیومی انواع مختلفی دارند که در جدول ۶ ترکیب و کاربرد اصلی آنها ارائه شده است. ترکیب‌های گوناگونی از لیتیوم مانند کربنات لیتیوم، هیدروکسید لیتیوم و فلزهای لیتیوم (اکسید منگنز لیتیوم، اکسید کبالت لیتیوم، فسفات آهن لیتیوم و ...) در باتری‌ها نقش دارند (جدول ۷). کشورهای شیلی و چین بیشترین مقدار تولید کربنات لیتیوم و هیدروکسید لیتیوم را در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ داشته‌اند. مقدار تولید هیدروکسید لیتیوم در کشور استرالیا نیز در سال ۲۰۱۹ چشمگیر بوده است (شکل ۱۹).

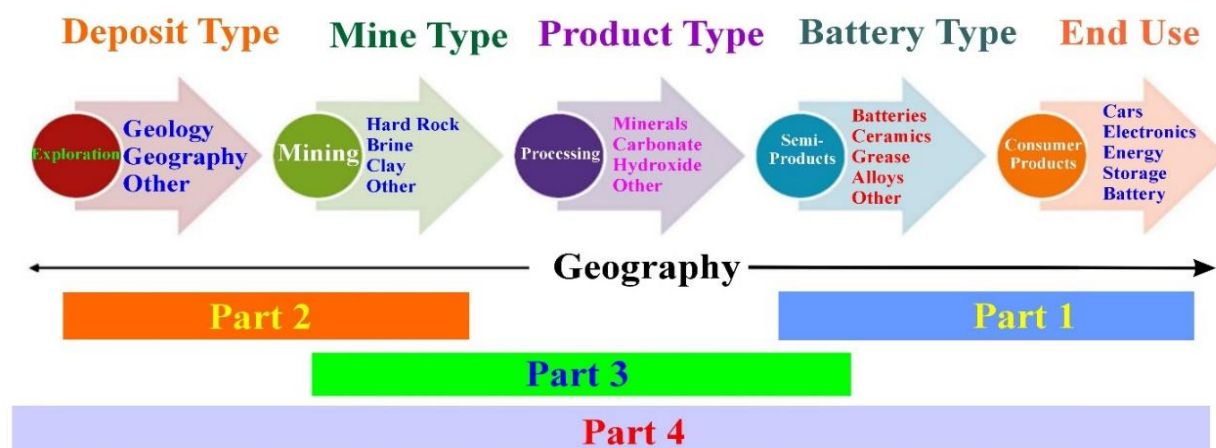
استخراج و تغلیظ لیتیوم از ذخایر سنگی مثل پگماتیت‌ها مستلزم خردایش، تغلیظ کانی‌های لیتیوم‌دار با فلوئاسیون، تشویه در دمای حدود ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، استفاده از اسید سولفوریک (H_2SO_4) برای شست‌وشو و تصفیه و تشویه دوم در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است. سپس لیتیوم تغلیظ‌شده با استفاده از روش‌های فراوری متعدد از جمله شست‌وشو، جداسازی مایع-جامد، حذف ناخالصی‌ها از طریق ته‌نشست و تبادل یونی به کربنات لیتیوم و هیدروکسید لیتیوم تبدیل می‌شود (Warren, 2021).

در شکل ۱۷ مراحل چرخه لیتیوم از اکتشاف ذخایر آن، معدن‌کاری، محصولات تولید شده تا بازار مصرف آن ارائه شده است.

کاربردهای لیتیوم

مهم‌ترین مصرف لیتیوم در انواع باتری‌هاست. لیتیوم در صنایع دیگر از جمله هوافضا، سرامیک، شیشه و داروسازی نیز استفاده

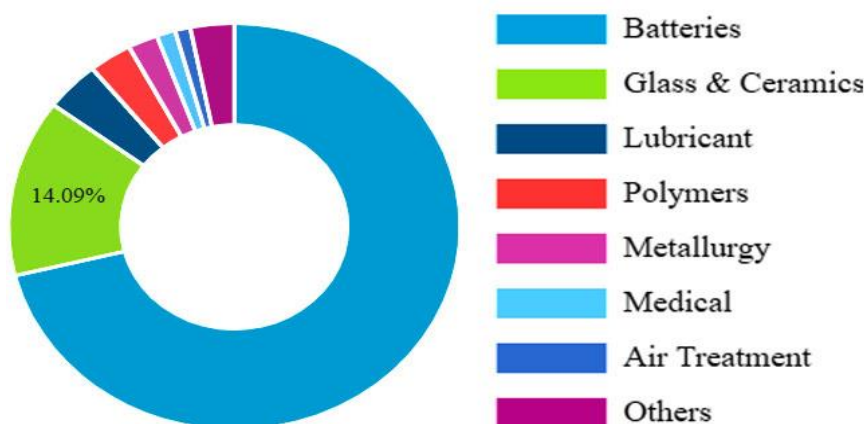
Lithium: Mine To Market



شکل ۱۷. مراحل اکتشاف ذخایر لیتیوم تا موارد مصرف آن (Sykes et al., 2019)

Fig. 17. Stages of lithium reserve exploration to its uses (Sykes et al., 2019)

Global Lithium Market Share, By Application, 2023



شکل ۱۸. نمودار دایره‌ای که کاربردهای مهم مختلف لیتیوم را به عنوان درصدی از مصرف جهانی در سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد (Fortune Business Insights, 2025)

Fig. 18. Pie chart showing the various major applications of lithium as a percentage of global consumption in 2023 (Fortune Business Insights, 2025)

برسد (شکل ۲۰). همچنین پیش‌بینی شده است بیشترین ظرفیت تولید باتری‌های لیتیومی تا سال ۲۰۳۰ و بالاترین سهم استفاده از باتری‌های برقی تا سال ۲۰۲۷ مربوط به کشور چین است (شکل‌های ۲۱ و ۲۲).

لیتیوم ماده اولیه حیاتی برای باتری‌های وسایل نقلیه الکتریکی محسوب می‌شود (Goodenough et al., 2025). مقدار مصرف این باتری‌ها در سال ۲۰۱۶، حدود ۴۰ درصد بوده است. پیش‌بینی می‌شود، مصرف باتری‌های لیتیومی تا سال ۲۰۳۰ به ۹۴ درصد

جدول ۵. تاریخچه انواع باتری های لیتیومی (Ufine, 2025)

Table 5. History of lithium battery types (Ufine, 2025)

Year	Name	Description
1980	JB. Goodenough	He discovered that lithium cobalt oxide could be used as a cathode material in batteries.
1970	Whittingham	Development of lithium-ion batteries
1985	Akira Yoshino	Yoshino developed the first practical Commercially Viable Battery, lithium-ion battery using Goodenough's lithium cobalt oxide cathode and a carbon anode
1991	Japan's Sony	Sony's Commercial Release, Sony's first lithium-ion battery product was launched.
2000		The 2000s saw significant advances in battery technology, leading to the development of high-capacity and safer lithium-ion batteries
1987	Japan's Sony	In 1987, "the era of mobile phones is coming," mobile phone batteries using nickel-chromium batteries needed to be charged once a day.
1988	Japan's Sony	Sony applied for the first lithium battery patent and named the new product Li-ion battery
1992	Japan's Sony	Japan's Sony Corporation invented a lithium battery using carbon material as the cathode and lithium-containing compounds
1994		lithium-ion batteries became available to the public.
1996	Goodenough	lithium iron phosphate was successfully developed.
1999	Japan	Eight Japanese companies led by Panasonic launched their first polylithium products.
1999	South Korea	South Korea entered the lithium-ion battery market
2004	China	China's lithium battery industry emerged. China's annual output of lithium-ion batteries is 800 million units.
2006		BYD launched its first electric car, the F3e.
2011	China	China's megawatt energy storage stations were connected to the grid
2012	Tesla	The Tesla Model S was launched.
2014		Drone production exploded. Global sales
2019		Three people who contributed significantly to lithium ions won the Nobel Prize in Chemistry.
2023		Global lithium battery shipments will be 1,192Gwh, a year-on-year increase of 24.9%.
2025		Current development
Improved Energy Density, Faster Charging, Enhanced Safety, Environmental Considerations, Solid-State Batteries		

جدول ۶. انواع مختلف باتری های لیتیومی (Lithium Harvest, 2025)

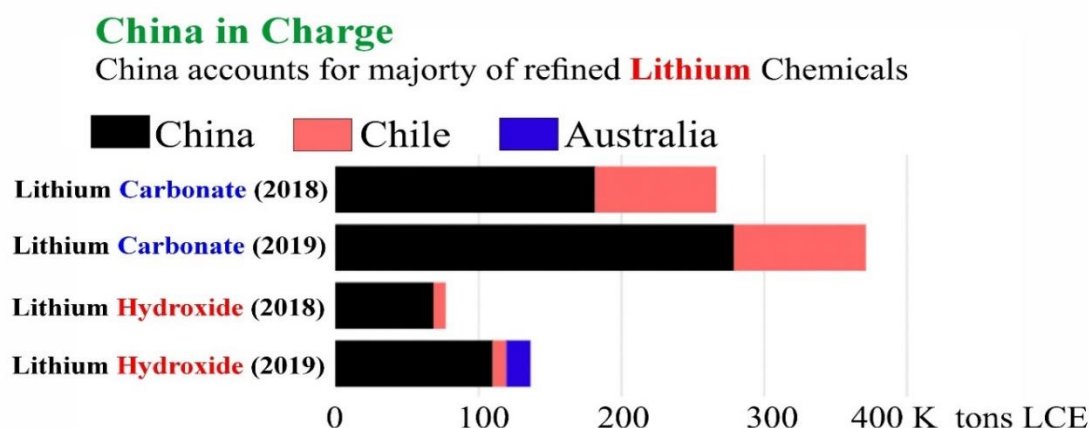
Table 6. Different lithium battery types (Lithium Harvest, 2025)

Type	Main application	Materials used	Advantages
Lithium Nickel Manganese Cobalt (LNMC)	EV batteries, consumer electronics, energy storage	Lithium hydroxide/Lithium carbonate nickel, manganese, and cobalt	Higher energy density and faster charging performance in cold climates
Lithium Nickel Cobalt Aluminum oxides (LNCA)	EV batteries	Lithium hydroxide, nickel, cobalt, aluminum	Higher energy density
Lithium Iron Phosphate (LFP)	EV and mobility batteries, energy storage	Lithium carbonate, iron, phosphorus	Longer life cycle, less thermal runaway risk and lower cost
Lithium Cobalt Oxide (LCO)	Smartphones, tablets, laptops, cameras and other handheld devices	Lithium carbonate, cobalt	High energy density, impressive cycle life, and reliability
Lithium Manganese Oxide (LMO)	Power tools, e-bikes, minimal EV applications	Lithium carbonate, manganese	Lower internal resistance and improved current handling. High thermal stability and enhanced safety
Lithium titanate (LTO)	Energy storage, industrial tools, electrical power trains	Lithium carbonate, titanium	Good thermal stability under high temperature

جدول ۷. کاربرد انواع ترکیب لیتیوم (Lithium Harvest, 2025)

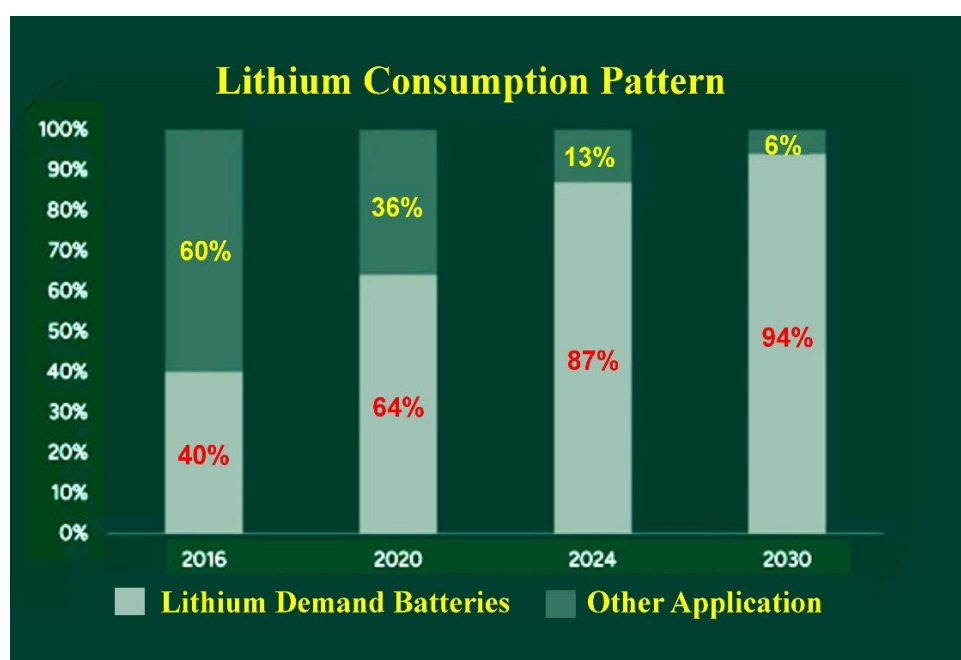
Table 7. The application of lithium compounds (Lithium Harvest, 2025)

Type	Usage
Lithium carbonate	Widely used in lithium-ion batteries and pharmaceuticals.
Lithium hydroxide	Important for battery production, ceramics, and lubricants.
Lithium chloride	Utilized in air conditioning systems and as a catalyst in organic synthesis.
Butyllithium	An organolithium compound used in chemical reactions and as a polymerization initiator.
Lithium metal	Valuable for specialized applications, including lithium batteries and alloys



شکل ۱۹. میزان تولیدات جهانی کربنات و هیدروکسید لیتیوم در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ (Stringer, and Millan, 2019).

Fig. 19. The global production of lithium carbonate and hydroxide in 2018 and 2019 (Stringer, and Millan, 2019)



شکل ۲۰. الگوی مصرف لیتیوم در باتری‌ها و سایر موارد از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۰ (Lithium Harvest, 2025)

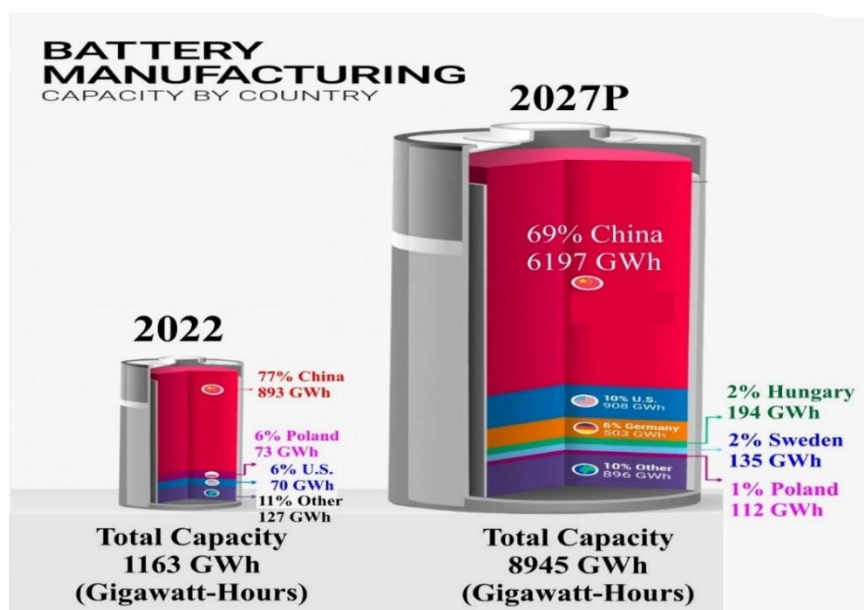
Fig. 20. Lithium consumption pattern of batteries and other application from 2016 to 2030 (Lithium Harvest, 2025)

در کاهش آلاینده‌های هوا نقش دارند. در خودروهای دوگانه‌سوز، شارژ باتری خودرو و بنزین، هردو مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع خودرو مقدار مسافتی که شارژ باتری تأمین می‌کند، حدود

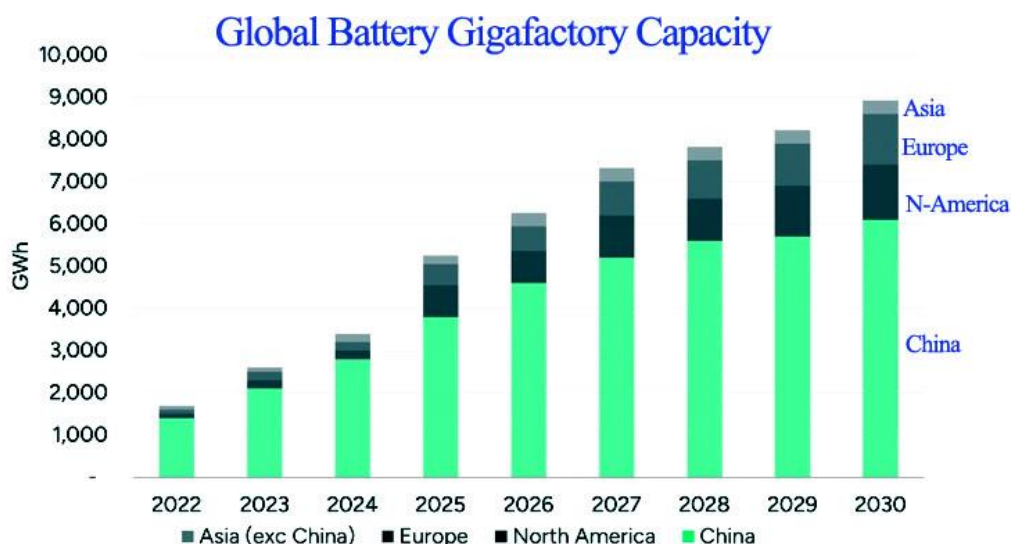
خودروهای الکتریکی تنها با برق کار می‌کنند. با هر مرحله شارژ باتری این خودروها، بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ کیلومتر مسافت طی می‌شود. تلاش بر این است تا نسل این خودروها در آینده افزایش یابد؛ زیرا

است. در جدول ۸ مقادیر لیتیوم استفاده شده در انواع باتری ها ارائه شده است.

۷۰ تا بیشینه ۱۵۰ کیلومتر است. خودروهای هیبریدی بر مبنای بنزین کار می کنند و هم زمان باتری آن شارژ می شود. مسافتی که این خودروها با شارژ باتری طی می کنند، کمتر از ۸۰ کیلومتر



شکل ۲۱. میزان و سهم درصد تولیدات باتری های برقی کشورهای مختلف در سال ۲۰۲۲ و پیش بینی آن تا سال ۲۰۲۷ (Visual Capitalist, 2025)
 Fig. 21. Lithium batteries production of different countries in 2022 and anticipation until 2027 (Visual Capitalist, 2025)

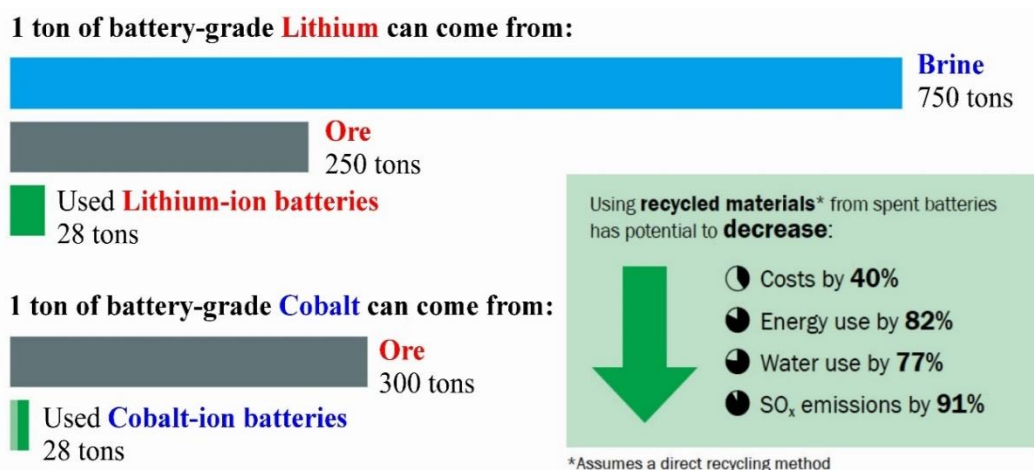


شکل ۲۲. ظرفیت کارخانه های بسیار بزرگ تولید کننده باتری در جهان (Lithium Harvest, 2025)

Fig. 22. Global battery gigafactory capacity (Lithium Harvest, 2025)

مصرف انرژی کمتر، کاهش مصرف آب و انتشار گازهای سولفیدی از جمله مزیت‌های بازیافت این باتری‌هاست (شکل ۲۳).

بازیافت کردن باطله‌های حاصل از باتری‌های لیتیومی تأثیر به سزایی در اقتصاد و مصرف انرژی دارد. کاهش هزینه‌ها، مقدار

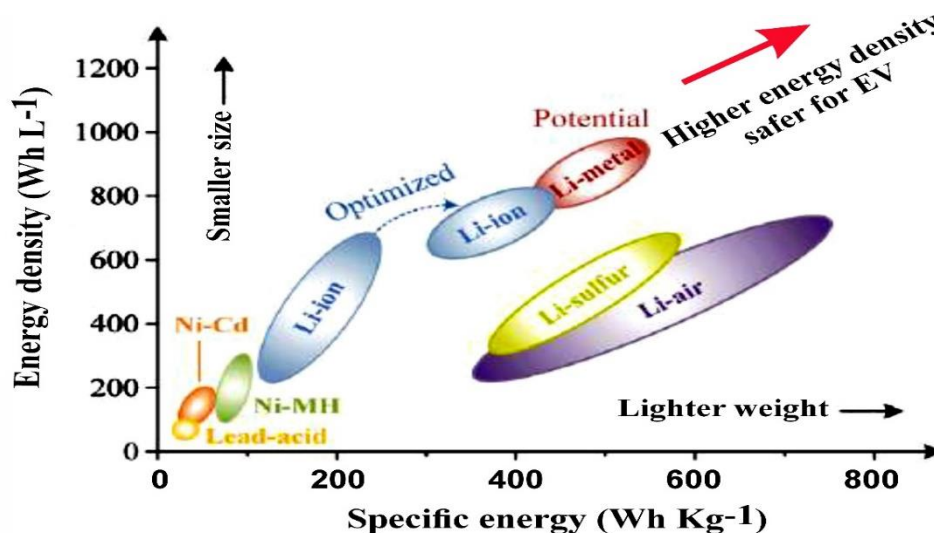


شکل ۲۳. مزیت بازیافت باطله‌های باتری‌های لیتیومی برای استفاده مجدد (U.S. Department of Energy, 2021)

Fig. 23. The benefits of recycling spent Li-batteries to reuse (U.S. Department of Energy, 2021)

یونی هستند. باتری‌های نوع لیتیوم-هوای متخلخل، از نظر انرژی ویژه جایگاه مخصوصی در مقایسه با بنزین دارند (Itani and Bernardinis, 2023). در شکل ۲۴ انرژی ویژه و چگالی انرژی انواع باتری‌های لیتیومی ارائه شده است.

به عقیده ایتانی و برناردینیس (Itani and Bernardinis, 2023)، باتری‌های فلزی لیتیومی نشان‌دهنده یک فناوری بسیار امیدبخش هستند که قادر به افزایش قابل توجه چگالی انرژی است. باتری‌های سولفوری لیتیومی جایگزین بسیار خوبی برای باتری‌های لیتیوم



شکل ۲۴. انرژی ویژه و چگالی انرژی باتری‌های لیتیومی (Itani and Bernardinis, 2023)

Fig. 24. Specific energy and energy density of lithium-based batteries (Itani and Bernardinis, 2023)

(Venkateswaran et al., 2022).

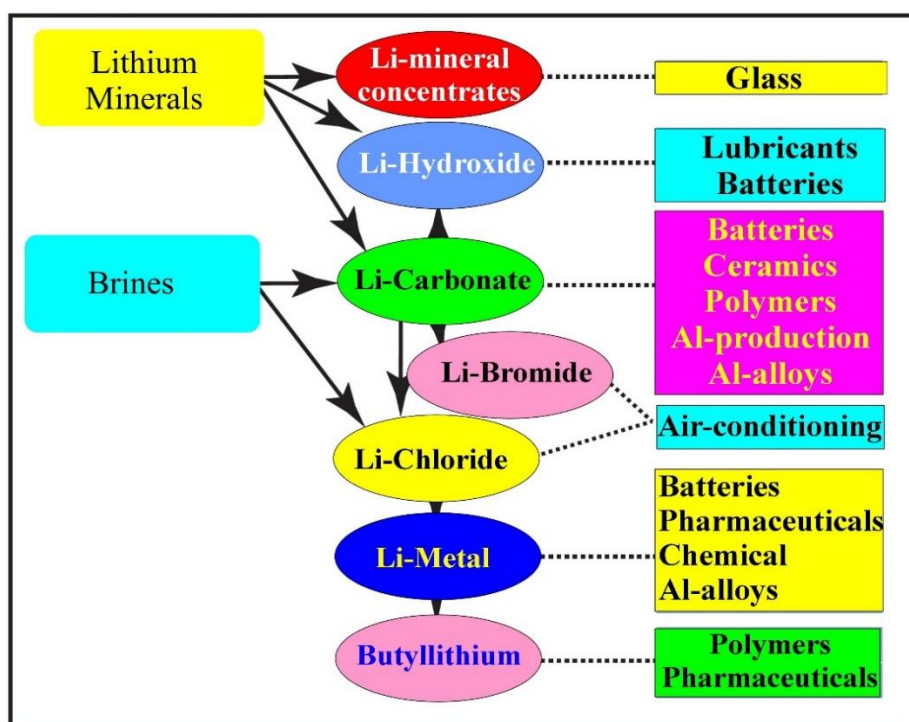
۵- **سایر:** لیتیوم در ساخت طعم‌دهنده‌ها و عطرها نیز کاربرد دارد (Kleoff et al., 2022). نمک‌های لیتیوم مانند لیتیوم برومید به عنوان جاذب در چیلرهای جذبی صنعتی و لیتیوم کلرید به عنوان رطوبت‌گیر برای تجهیزات خشک‌کن کاربرد دارد. لیتیوم فلورید بسیار شفاف و مناسب برای استفاده در نورهای مادون قرمز و فرابنفش است (Hennessy and Nikzad, 2018). همچنین لیتیوم در بخش‌های شیمیایی و فنی مانند کاتالیزورها و تصفیه‌کننده هوا استفاده می‌شود.

به طور کلی، انواع محصولات لیتیومی از جمله کانی‌هایی با غلظت بالای لیتیوم، هیدروکسید لیتیوم، کلرید لیتیوم، برمید لیتیوم و غیره به همراه کاربرد آن در صنایع مختلف در شکل ۲۵ نشان داده شده است.

۲- **هوافضا:** لیتیوم در تولید آلیاژهای سبک وزن با چندین عنصر مانند آلومینیم، کادمیوم، مس و منگنز که در هواپیما و هوافضا استفاده می‌شود، کاربرد دارد و همچنین در ساخت قطعه‌های با استحکام بالا و مقاوم در برابر خوردگی برای کاربردهای نظامی استفاده می‌شود.

۳- **داروسازی:** از دیگر کاربردهای این عنصر می‌توان به استفاده لیتیوم در صنعت داروسازی برای تولید مسکن‌ها، آرام‌بخش‌ها و قرص‌های خواب اشاره کرد. نمک‌های لیتیومی مانند کربنات لیتیوم و سیترات لیتیوم در درمان بیماران مبتلا به اختلال دوقطبی، افسردگی و سایر شرایط سلامت روان مورد استفاده قرار می‌گیرند (Gao and Calabrese, 2021).

۴- **شیشه و سرامیک:** وجود لیتیوم در محصولات شیشه و سرامیک باعث افزایش دوام از جمله مقاومت حرارتی و مقاومت در برابر خوردگی در دماهای بسیار بالا می‌شود



شکل ۲۵. فراوری ترکیب‌های لیتیوم و کاربردهای اصلی آنها (Yaksic and Tilton, 2009; Ebensperger et al., 2005)

Fig. 25. Processing of lithium compounds and their major end-use applications (Yaksic and Tilton, 2009; Ebensperger et al., 2005)

لیتیوم در صنعت شیشه سازی استفاده می شوند. بیشترین مقدار استفاده لیتیوم در وسایل نقلیه الکترونیکی و خودروهای تسلا (۵۰ تا ۶۳ کیلوگرم) است. مقدار مصرف لیتیوم در وسایل نقلیه، وسایل الکترونیکی و باتری ها در **شکل ۲۶** و **جدول ۸** ارائه شده است. افزایش اکتشاف ذخایر و استخراج لیتیوم به کاهش قیمت این ماده معدنی منجر شده است (**شکل ۲۷**).

بوتیل لیتیوم که یک ترکیب فلز آلی است در پلیمرها و داروسازی استفاده می شود. فلزهای لیتیومی در صنایع باتری سازی، داروسازی، شیمیایی و آلیاژها کاربرد دارند. برمید لیتیوم و کلرید لیتیوم در تهویه هوا استفاده می شوند. همچنین در باتری سازی، سرامیک، پلیمرها و آلیاژها کربنات لیتیوم به کار می رود. هیدروکسید لیتیوم در روان کننده ها و باتری ها کاربرد دارد. کانی هایی با غلظت بالای



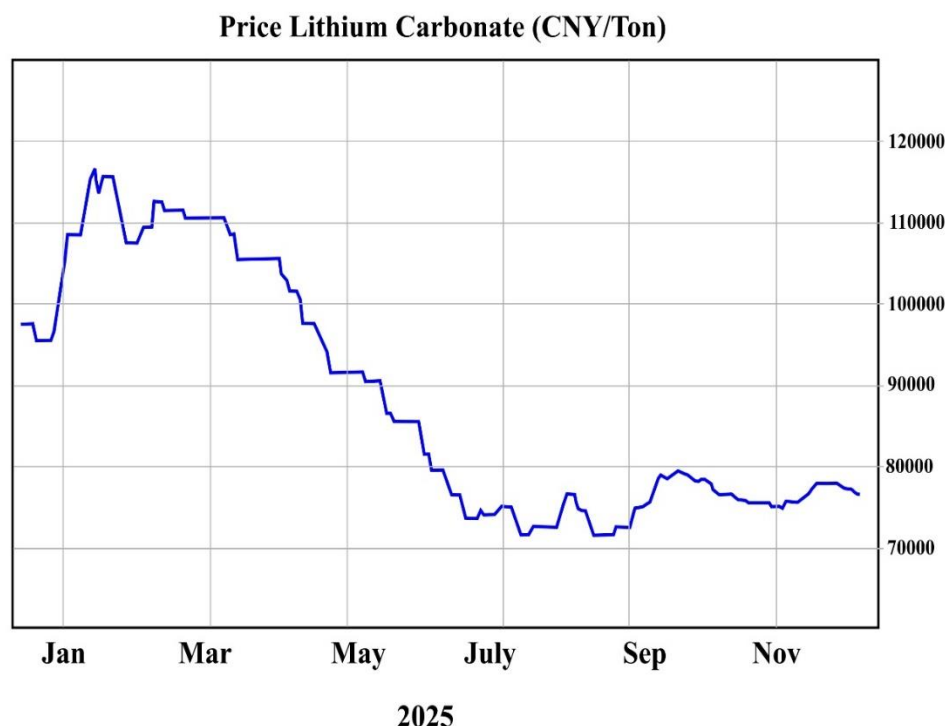
شکل ۲۶. مقدار لیتیوم در وسایل نقلیه الکترونیکی و ابزار الکترونیکی (Visual Capitalist, 2025)

Fig. 26. Lithium amount of electric vehicle and electronic tools (Visual Capitalist, 2025)

جدول ۸. مقادیر تقریبی لیتیوم در انواع مختلف باتری ها (برگرفته از سایت های مختلف تولید باتری های لیتیومی)

Table 8. Approximate amounts of lithium in different types of batteries (data from the websites of different lithiumion battery making firms)

Product	Quantity of Li
A rechargeable AA battery	0.1 g
Mobile phone	3 g
iPad	20–30 g
Laptop	30 g
Power tool	40–60 g
Hybrid vehicle	0.8–2.0 kg
A typical EV battery	8 kg
Typical power storage system	10 kg
Tesla EV	50 kg
An average EV	10–63 kg



شکل ۲۷. نمودار قیمت جهانی لیتیوم (Trading Economics, 2025)

Fig. 27. Global lithium price chart (Trading Economics, 2025)

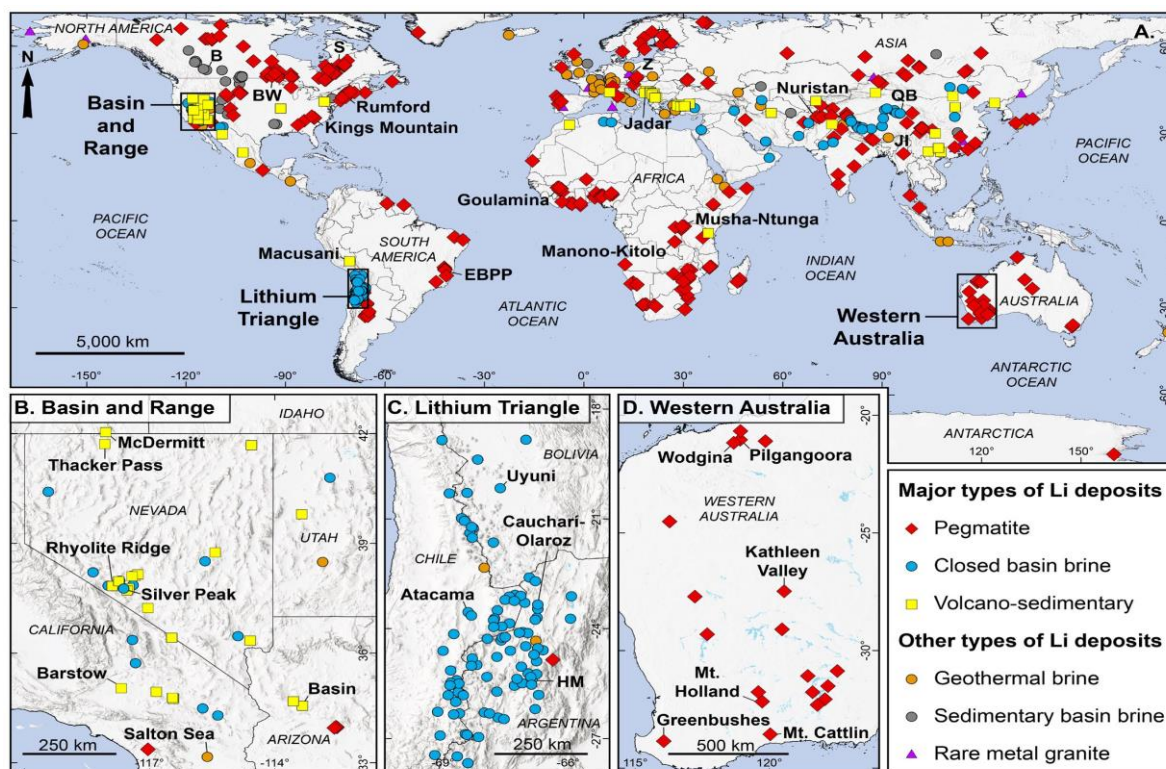
بحث و نتیجه گیری

برابر بیشتر از سال ۲۰۲۳ باشد و عدم تعادل تقاضا، عرضه را بیشتر می کند (شکل ۳۰). تا سال ۲۰۲۹، ممکن است نقطه بحرانی ایجاد شود که در آن تقاضا بسیار بیشتر از عرضه باشد و چالش های مهمی برای انتقال انرژی جهانی ایجاد کند. این کمبود، نیاز حیاتی به روش های نوآورانه، کاربردی و سازگار با محیط زیست را برای استخراج لیتیوم در راستای برآورده کردن تقاضای آینده بیان می کند (Lithium Harvest, 2025).

تقاضا برای لیتیوم رو به افزایش است؛ به نحوی که برای بازار اهداف مختلف تا سال ۲۰۳۰ به ۱/۶ میلیون تن خواهد رسید (شکل ۳۱). این میزان تقاضا از تولید لیتیوم توسط کارخانه ها پایین تر است. پیش بینی می شود تقاضای جهانی باتری های لیتیوم یونی تا سال ۲۰۳۰ از ۲۰۰۰ گیگاوات ساعت فراتر رود (Stringer, 2019 and Millan, 2019). مقدار نیاز به هیدروکسید لیتیوم نسبت به کربنات لیتیوم تا سال ۲۰۳۰ چندین برابر خواهد بود (شکل ۳۲).

با توجه به نیاز و تقاضای روزافزون برای لیتیوم به ویژه در ساخت انواع باتری ها، پژوهش برای اکتشاف بیشتر ذخایر لیتیوم از اهمیت بالایی برخوردار است. از جمله ذخایر شناخته شده لیتیوم می توان به ذخایر پگماتی، شورابه ای و ذخایر رسوبی اشاره کرد. بیشترین مقدار ذخیره لیتیوم مربوط به نوع پگماتی و سپس ذخایر رسوبی - آتشفشانی است که از پراکندگی خوبی در سطح جهان برخوردارند (شکل ۲۸). همچنین کشورهای استرالیا و شیلی بیشترین میزان فعالیت معدن کاری لیتیوم را دارند (شکل ۲۹). بالاترین میزان فراوری و تولید محصولات الکتروشیمیایی و باتری ها مربوط به کشور چین است (Stringer, and Millan, 2019).

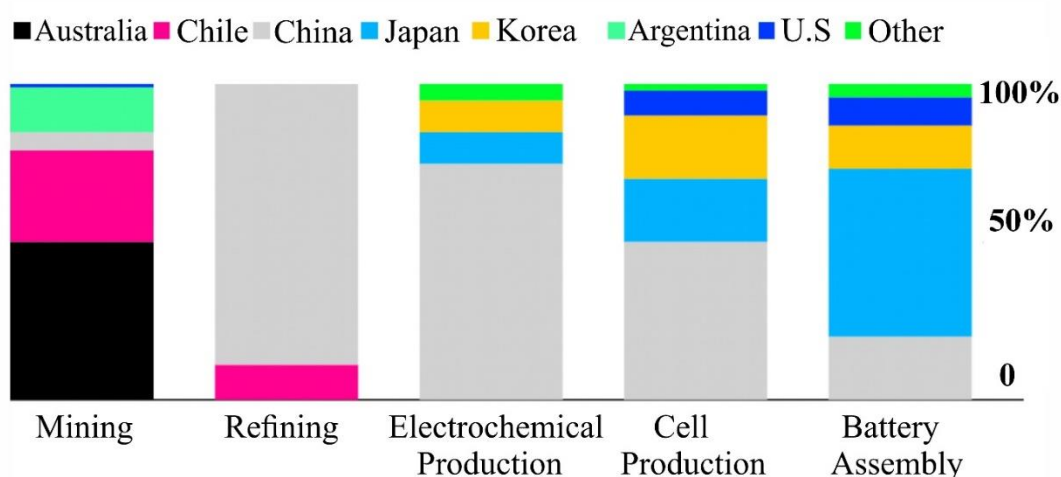
پتانسیل عرضه لیتیوم با چالش مواجه شده است. پیش بینی ها نشان می دهد که تا سال ۲۰۳۴، تقاضای جهانی برای لیتیوم می تواند ۶/۵



شکل ۲۸. توزیع جهانی ذخایر لیتیوم بر اساس نوع کانسار (Benson et al., 2025)

Fig. 28. Global distribution of Li deposits, categorized by deposit type (Benson et al., 2025)

Lithium Mine to Products



شکل ۲۹. میزان معدن کاری و مقدار مصرف لیتیوم در محصولات مختلف کشورها (Stringer and Millan, 2019)

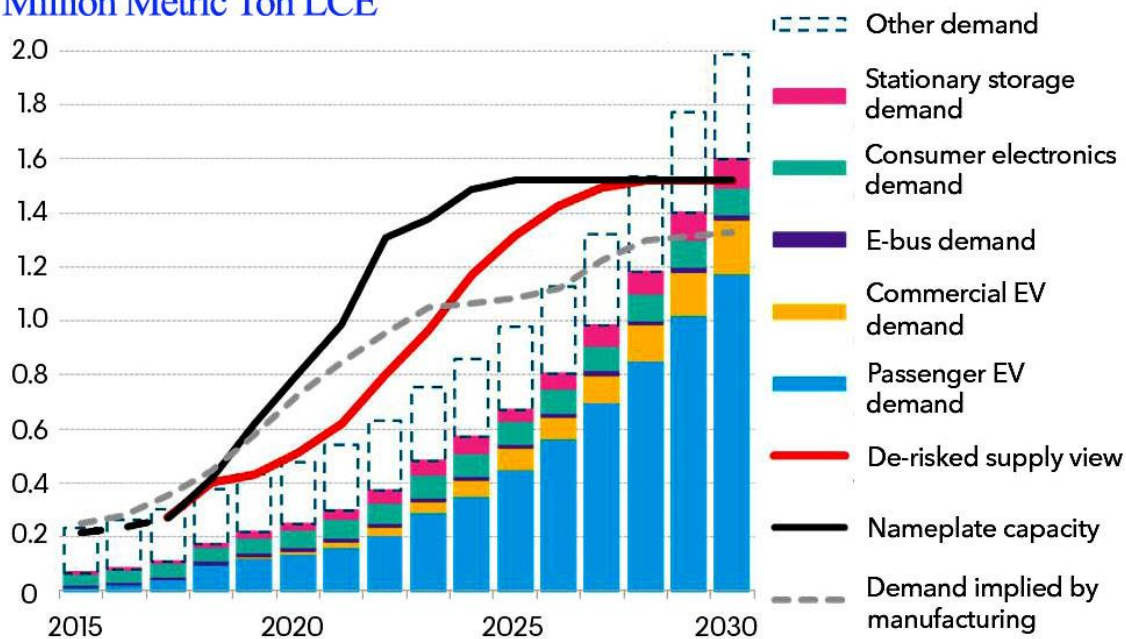
Fig. 29. Lithium mining and consumption in different products of countries (Stringer and Millan, 2019)



شکل ۳۰. پیش‌بینی میزان مصرف و تقاضای جهانی لیتیوم (Lithium Harvest, 2025)

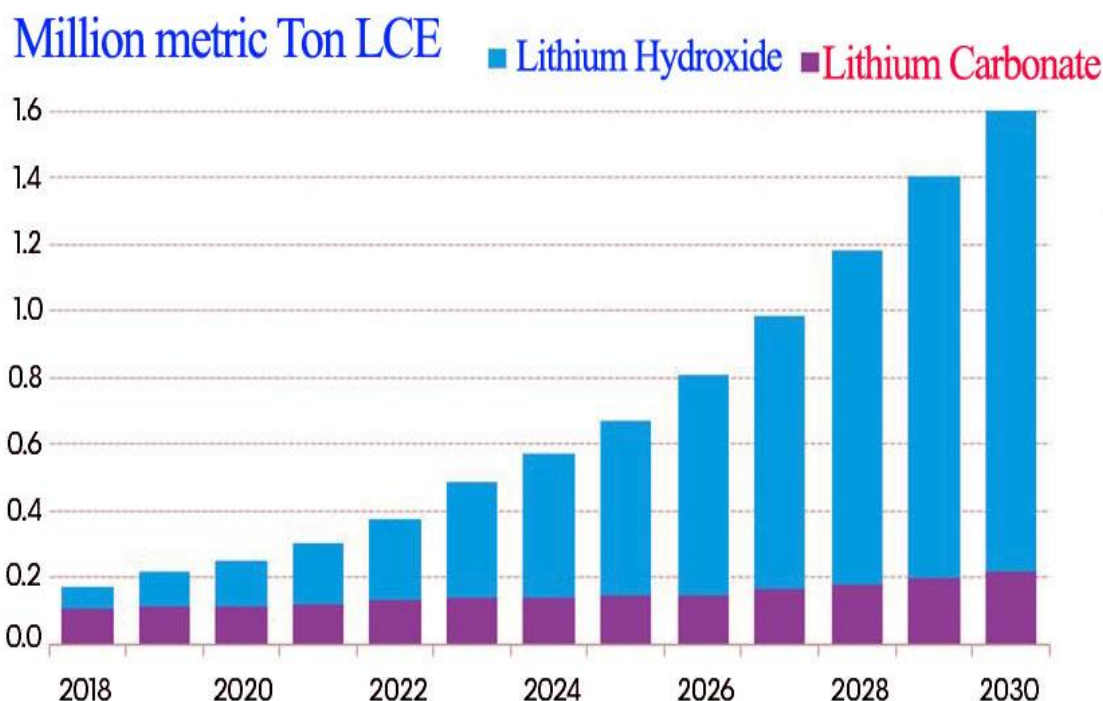
Fig. 30. Global lithium supply and demand forecast (Lithium Harvest, 2025)

Million Metric Ton LCE



شکل ۳۱. پیش‌بینی میزان عرضه و تقاضای جهانی لیتیوم (Stringer, and Millan, 2019)

Fig. 31. Global lithium supply and demand forecast (Stringer, and Millan, 2019)



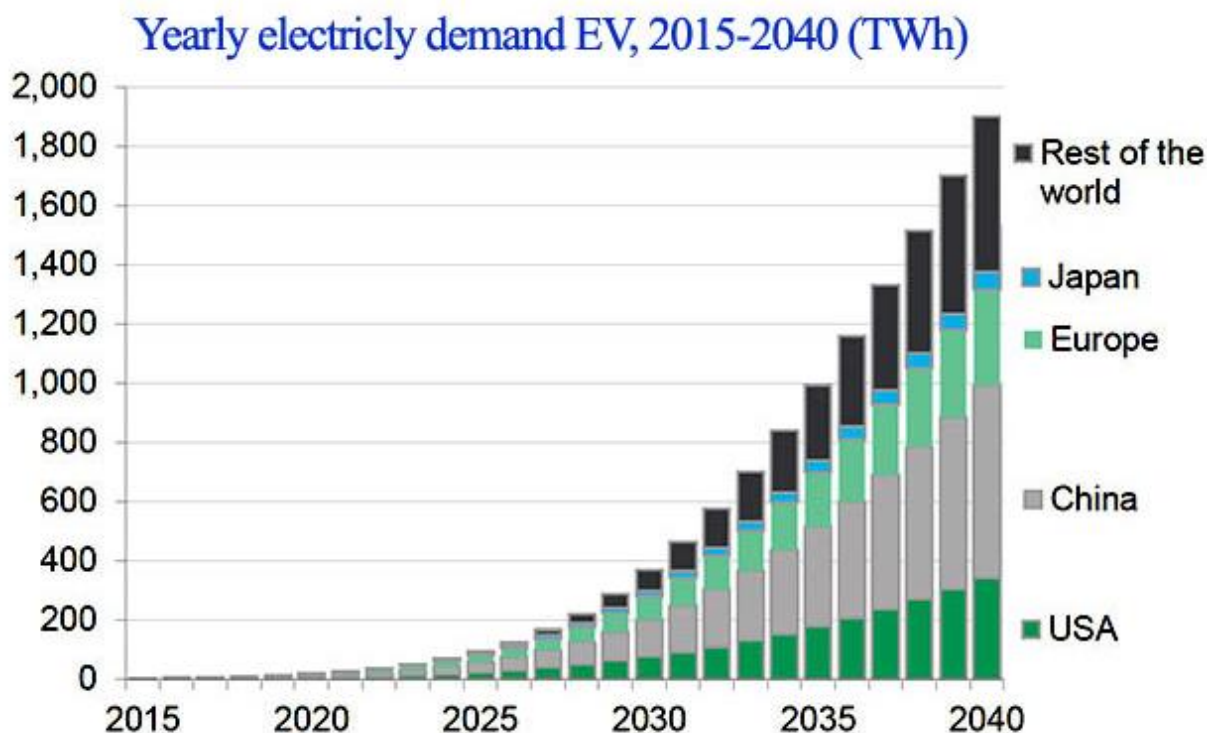
شکل ۳۲. پیش‌بینی میزان مصرف لیتیوم هیدروکسید و کربنات در باتری‌ها (Stringer, and Millan, 2019)

Fig. 32. Lithium hydroxide and carbonate consumption forecast in batteries (Stringer, and Millan, 2019)

داشتند (شکل ۳۶).

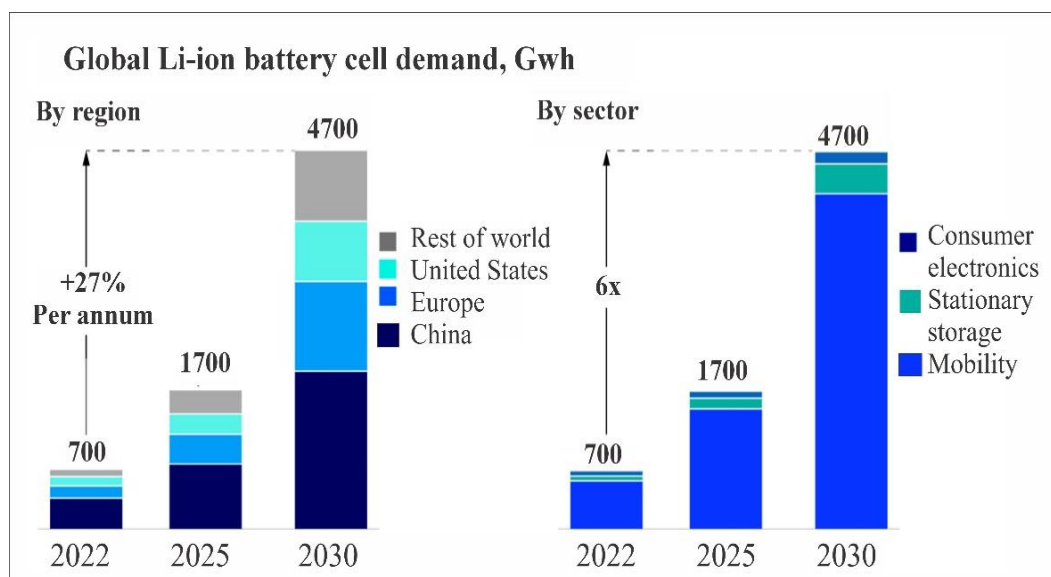
در کشور ایران وجود شورابه‌ها و پلایاهای واقع در زون‌های زاگرس و ایران مرکزی به ویژه در مناطق کویری، پتانسیل بالایی برای ذخایر لیتیوم دارند. شورابه‌های کرمان (Sarkheil et al., 2025) و گنبد‌های نمکی در کوه‌های زاگرس (Bazamad et al., 2023) دارای لیتیوم هستند. پگماتیت‌های حاوی لیتیوم (نوع LCT) نیز از مناطق مختلف ایران از جمله پگماتیت‌های قروه (Daneshvar et al., 2021)، پگماتیت‌های همدان (Sheikhi et al., 2022)، پگماتیت‌های مشهد (Didar et al., 2015) و غیره گزارش شده است. همچنین ذخایر هکتوریت در نهشته‌های رسی باید در اولویت اکتشاف لیتیوم قرار بگیرد. اکتشاف ذخایر لیتیومی در ایران و توسعه فناوری‌های مناسب، می‌تواند کشور را به یکی از تولیدکنندگان منطقه‌ای این فلز راهبردی تبدیل کند.

نیاز به خودروهای الکتریکی سال به سال افزایش می‌یابد. استفاده از این نوع خودروها به کاهش آلودگی هوا و حفاظت از محیط زیست کمک خواهد کرد. در شکل ۳۳، افزایش تقاضای خودروهای الکتریکی (EV) تا سال ۲۰۴۰ را در کشورهای آمریکا، چین، اروپا، ژاپن و سایر کشورها نشان داده است. از این رو تقاضای باتری‌های لیتیومی هر سال افزایش خواهد یافت؛ به نحوی که با رشد ۲۷ درصدی سالانه، مقدار تقاضا به ۴۷۰۰ گیگاوات ساعت تا سال ۲۰۳۰ خواهد رسید (شکل ۳۴). در سال ۲۰۲۴، بازار جهانی خودروهای الکتریکی تغییرات قابل توجهی داشت. برند خودروسازی چینی BYD رتبه بزرگ‌ترین تولیدکننده خودروهای الکتریکی را به دست آورد و پس از آن برند تسلا در دومین رتبه تولید قرار گرفت (شکل ۳۵). در چهار ماه اول سال ۲۰۲۳، برندهای CATL و BYD به عنوان برندهای برتر، بیش از ۵۰ درصد از بازار فروش باتری خودروهای الکتریکی را در اختیار



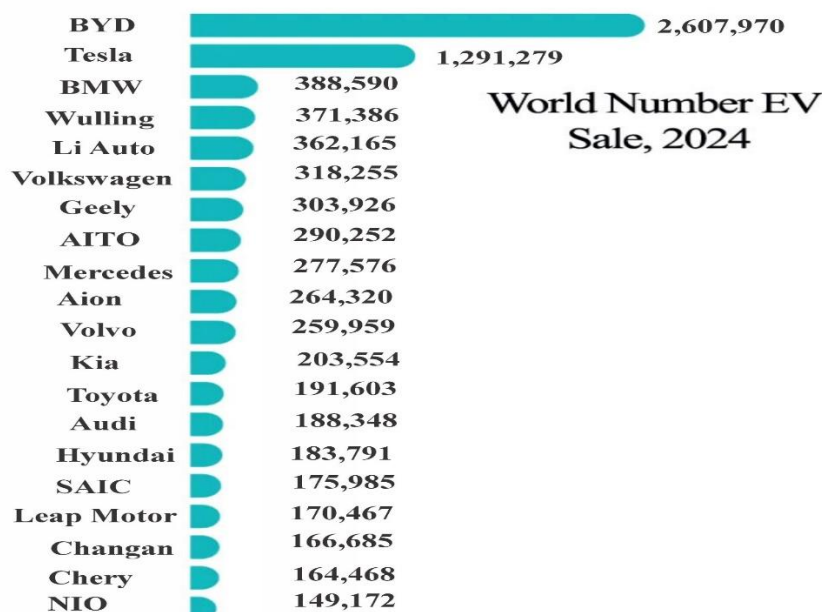
شکل ۳۳. میزان تقاضای خودروهای الکتریکی در سطح جهانی (Motherjones, 2025)

Fig. 33. Global demand for electric vehicles (Motherjones, 2025)



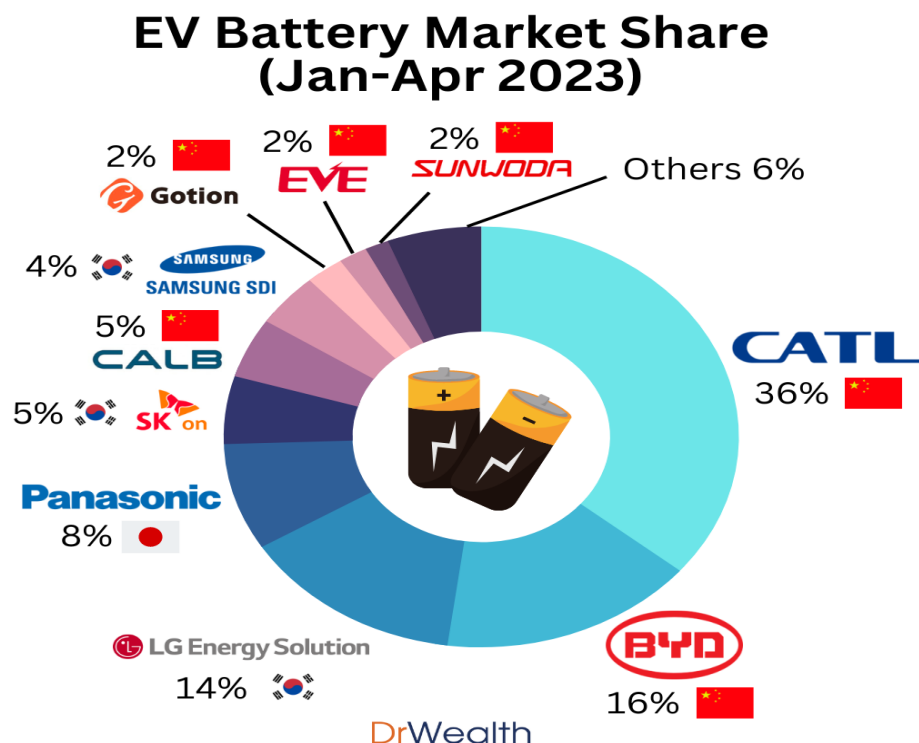
شکل ۳۴. میزان تقاضای باتری‌های لیتیومی تا سال ۲۰۳۰ (Nol-Tec Systems, 2025)

Fig. 34. Lithium battery demand by 2030 (Nol-Tec Systems, 2025)



شکل ۳۵. برترین برندهای خودرو در جهان بر اساس فروش خودروهای الکتریکی در سال ۲۰۲۴ (Alcott Global, 2025)

Fig. 35. Global top car brands based on electric vehicle sales in 2024 (Alcott Global, 2025)



شکل ۳۶. مقدار فروش باتری خودروهای الکتریکی در ۴ ماه اول سال ۲۰۲۳ (Chow, 2023)

Fig. 36. Electric vehicle battery sales in the first 4 months of 2023 (Chow, 2023)

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

از حمایت‌های ارزشمند جناب آقای مهندس علی عابدی، مدیریت محترم هلدینگ صتعی و معدنی عطامتال، در پیشبرد این پروژه پژوهشی سپاسگزاریم.

1. Lithium (Li)
2. uplift
3. Lithium-Cesium-Tantalum
4. Hector
5. Xizang
6. Zinnwald-Cínovec
7. Aqua regia
8. Electric Vehicle (EV)
9. Plug-in Hybrid Electrical Vehicle (PHEV)
10. Hybrid electric vehicle (HEV)

References

- Alcott Global, 2025. Top 20 Automotive Brands in the World by Electric Vehicle Sales. Retrieved February 21, 2025 from <https://alcottglobal.com/infographic/top-20-automotive-brands-in-the-world-by-electric-vehicle-sales>
- Ames, L.L., Sand, L.B. and Goldich, S.S. 1958. A contribution on the Hector California bentonite deposit. *Economic Geology*, 53(1): 22–37. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.53.1.22>
- Balaram, V., Copia, L., Kumar, U.S., Miller, J. and Chidambaram, S., 2023. Pollution of water resources, causes, application of ICP-MS techniques in hydrological studies, monitoring, and management. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2(4): 100210. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100210>
- Balaram, V., Santosh, M., Satyanarayanan, M., Srinivas, N. and Gupta, H., 2024. Lithium: A review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 15(5): 101868. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101868>
- Balaram, V. and Sawant, S.S., 2022. Indicator minerals, pathfinder elements, and portable analytical instruments in mineral exploration studies. *Minerals*, 12(4): 394. <https://doi.org/10.3390/min12040394>
- Bazamad, M., Tangestani, M.H., Asadi, S. and Staubwasser, M., 2023. Investigating the geochemical behavior and exploration potential of lithium in brines; a case study of Bam salt plug, Zagros Zone, southern Iran. *Scientific Reports*, 13: 21567. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48909-5>
- Benson, T.R., Coble, M.A., Rytuba, J.J. and Mahood G.A., 2017. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nature Communications*, 8: 270. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00234-y>
- Benson, R.T., Jowitt, S.M. and Simon Adam C.A., 2025. Special Issues on the Geology and Origin of Lithium Deposits—Introduction: Lithium Deposit Types, Sizes, and Global Distribution. *Economic Geology*, 120(3): 503–511. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5149>
- Boole, R., 2024. Variations in Atomic & Ionic Radius (Cambridge (CIE) AS Chemistry): Revision Note. Retrieved February 21, 2025 from <https://www.savemyexams.com/as/chemistry/cie/25/revision-notes/1-atomic-structure/1-1-particles-in-the-atom-and-atomic-radius/1-1-variations-in-atomic-and-ionic-radius/>
- Bowell, R.J., Lagos, L., de los Hoyos, C.R. and Declercq, J., 2020. Classification and characteristics of natural lithium resources. *Elements*, 16(4): 259–264. <https://doi.org/10.2138/gselements.16.4.259>
- Burisch, M., Leopardi, D., Guilcher, M., Šešulka, V., Dittrich, T. and Lehmann, B., 2025. Greisen-Hosted Lithium Resources of the Erzgebirge/Krušné Hory Province (Germany and Czech Republic). *Economic Geology*, 120(3): 627–647. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5136>
- Chow, A., 2023. China Commanded 63% of EV Battery Market With 6 Companies. Retrieved February 21, 2025 from <https://growthdragons.substack.com/p/china-commanded-63-of-ev-battery>
- Coffey, D.M., Munk, L.A., Ibarra, D.E., Butler, K.L., Boutt, D.F. and Jenckes, J., 2021. Lithium storage and release from lacustrine sediments: Implications for lithium enrichment and sustainability in continental brines. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(12): e2021GC009916. <https://doi.org/10.1029/2021GC009916>
- Daneshvar, N., Azizi, H., Asahara, Y., Tsuboi, M., Minami, M. and Mohammad, Y.O., 2021. Geochemistry and Genesis of Beryl Crystals in the LCT Pegmatite Type, Ebrahim-Attar Mountain, Western Iran. *Minerals*, 11(7): 717. <https://doi.org/10.3390/min11070717>
- Didar, P., Emami, M.H. and Emamian, F., 2015. Introduction to the geology and mineralogy of pegmatites located south of Mashhad (first report of Li-bearing pegmatites from Iran). *Journal of Tethys*, 3(2):123–136. (in Persian with English abstract) Retrieved May 15, 2025 from https://www.researchgate.net/publication/291974107_Introduction_to_the_geology_and_mineralogy_of_pegmatites_located_south_of_Mashhad_first_report_of_Li-bearing_pegmatites_from_Iran
- Ding, T., Zheng, M.P., Peng, S.P., Lin, Y.H., Zhang, X.F. and Li, M.M., 2023. Lithium extraction

- from salt lakes with different hydrochemical types in the Tibet Plateau. *Geoscience Frontiers*, 14(1): 101485.
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101485>
- Ebensperger, A., Maxwell, P. and Moscoso, C., 2005. The lithium industry: its recent evolution and future prospects. *Resources Policy*, 30(3): 218–31.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2005.09.001>
- Edmond, J.M., Measures, C., McDuff, R.E., Chan, L.H., Collier, R., Grant, B., Gordon, L.I. and Corliss, J.B., 1979. Ridge crest hydrothermal activity and the balances of the major and minor elements in the ocean: the Galapagos data. *Earth and Planetary Science Letters*, 46(1): 1–18.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(79\)90061-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(79)90061-X)
- Evans, R.K., 2014. Lithium. In: Gunn, A.G. (Editor), *Critical Metals Handbook*. John Wiley and Sons Ltd, UK, pp. 230–260.
<https://doi.org/10.1002/9781118755341.ch10>
- Fortune Business Insights, 2025. Lithium Market Size, Share & Industry Analysis, By Product (Carbonate, Hydroxide, Chloride, Metal, Fluoride, and Others), By Application (Batteries, Glass & Ceramics, Lubricant, Polymers, Metallurgy, Medical, Air Treatment, and Others), By End-User (Automotive, Consumer Electronics, Industrial, Energy Storage, and Others), and Regional Forecast, 2024-2032. Report ID: FBI104052. Retrieved February 21, 2025 from <https://www.fortunebusinessinsights.com/lithium-market-104052>
- Galeschuk, C. and Vanstone, P., 2007. Exploration techniques for rare-element pegmatite in the Bird-River Greenstone Belt, southeastern Manitoba. In: Milkereit, B. (Editor), *Ore Deposits and Exploration Technology. Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, Canada*, p. 823–839. Retrieved May 15, 2025 from <https://911metallurgist.com/wp-content/uploads/2015/10/Exploration-Techniques-for-Rare-Element-Pegmatite-in-the-Bird-River-Greenstone-Belt-Southeastern-Manitoba.pdf>
- Gao, K. and Calabrese, J.R., 2021. The mechanisms of action of lithium in bipolar disorder. In: J. Quevedo, A.F. Carvalho and E. Vieta (Editors), *Neurobiology of Bipolar Disorder*. Academic Press, Cambridge, pp. 357–364.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819182-8.00033-8>
- Garate-Olave, I., Roda-Robles, E., Gil-Crespo, P.P. and Pesquera, A., 2018. Mica and feldspar as indicators of the evolution of a highly evolved granite-pegmatite system in the Tres Arroyos area (Central Iberian Zone, Spain). *Journal of Iberian Geology*, 44 (3): 375–403.
<https://doi.org/10.1007/s41513-018-0077-z>
- Goodenough, K.M., Shaw, R.A., Borst, A.M., Nex, P.A.M., Kinnaird, J.A., van Lichtenvelde, M., Essaifi, A., Koopmans, L. and Deady E.A., 2025. Lithium Pegmatites in Africa: A Review. *Economic Geology*, 120(3): 513–539.
<https://doi.org/10.5382/econgeo.5133>
- Gourcerol, B., Gloaguen, E., Melleton, J., Tuduri, J. and Galiege, X., 2019. Re-assessing the European lithium resource potential– A review of hard-rock resources and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 109: 494–519.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.015>
- Gruber, P.W., Medina, P.A., Keoleian, G.A., Kesler, S.E., Everson, M.P. and Wallington, T.J., 2011. Global Lithium Availability. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5): 760–775.
<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00359.x>
- Heller, C., Kuhn, T., Versteegh, G.J.M., Węgorzewski, A.V. and Kasten, S., 2018. The geochemical behavior of metals during early diagenetic alteration of buried manganese nodules. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 142: 16–33.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2018.09.008>
- Hennessy, J. and Nikzad, S., 2018. Atomic layer deposition of lithium fluoride optical coatings for the ultraviolet. *Inorganics*, 6(2): 46.
<https://doi.org/10.3390/inorganics6020046>
- Horstman, E.L., 1957. The distribution of lithium, rubidium and caesium in igneous and sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 12(1–2): 1–28.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(57\)90014-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(57)90014-5)
- Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K. and Godfrey, L., 2011. The evaluation of brine prospects and the requirement for modifications to filing standards. *Economic Geology*, 106(7): 1125–1239.
<https://doi.org/10.2113/econgeo.106.7.1225>

- International Lithium Association, 2023. Lithium. Retrieved January 23, 2025 from <https://lithium.org/lithium/>
- Jaskula, B.W., 2024. Lithium. USGS, Retrieved February 21, 2025 from <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information>
- Itani, K. and De Bernardinis, A., 2023. Review on New-Generation Batteries Technologies: Trends and Future Directions. *Energies*, 16(22): 7530. <https://doi.org/10.3390/en16227530>
- Karimpour, M.H., 2024. Lithium. 16th Iranian Society of Economic Geology, Tabriz University, Tabriz, Iran.
- Kesler, S.E., Gruber, P.W., Medina, R.A., Keoleian, G.A., Everson, M.P. and Wallington, T.J., 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48: 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.006>
- Kidder, J.A., Leybourne, M.I., Layton-Matthews, D., Howell, R.J. and R. Rissmann, C.W.F., 2020. A review of hydrogeochemical mineral exploration in the Atacama Desert, Chile. *Ore Geology Reviews*, 124: 003562. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103562>
- Kleoff, M., Kiler, P. and Heretsch, P., 2022. Synthesis of odorants in flow and their applications in perfumery. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 18: 754–768. <https://doi.org/10.3762/bjoc.18.76>
- Lee, K.J., You, J., Gao, Y. and Terlier, T., 2024. Release, transport, and accumulation of lithium in shale brines. *Fuel*, 356: 129629. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129629>
- Li, Z., Li, C., Liu, X., Cao, L., Li, P., Wei, R., Li, X., Guo, D., Huang, K.W. and Lai, Z., 2021a. Continuous electrical pumping membrane process for seawater lithium mining. *Energy and Environmental Science*, 14(5): 3152–3159. <https://doi.org/10.1039/d1ee00354b>
- Li, C., Li, Z., Wu, T., Luo, Y., Zhao, J., Li, X., Yang, W. and Chen, X., 2021b. Metallogenic characteristics and formation mechanism of Naomugeng clay-type lithium deposit in Central Inner Mongolia, China. *Minerals*, 11(3): 238. <https://doi.org/10.3390/min11030238>
- Lithium Harvest, 2025. The Lithium Mining Market. Retrieved February 21, 2025 from <https://lithiumharvest.com/>
- London, D., 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews*, 101: 349–383. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.020>
- Mertineit, M. and Schramm, M., 2019. Lithium occurrences in brines from two German salt deposits (Upper Permian) and first results of leaching experiments. *Minerals*, 9(12): 766. <https://doi.org/10.3390/min9120766>
- Motherjones, 2025. Electric vehicles. Retrieved February 21, 2025 from <https://www.motherjones.com/politics/2016/02/electric-vehicles-oil-prices/>
- Muller, A., Romer, R.L. and Pedersen, R-B. 2017. The Sveconorwegian Pegmatite Province – Thousands of pegmatites without parental granites. *The Canadian Mineralogist*, 55(2): 283–315. <https://doi.org/10.3749/canmin.1600075>
- Munk, L.A., Boutt, D., Butler, K., Aeon Russo, A., Jenckes, J., Moran, B. and Kirshen, A., 2025. Lithium Brines: Origin, Characteristics, and Global Distribution. *Economic Geology*, 120(3): 575–597. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5134>
- Munk, L.A., Hynek, S.A., Bradley, D.C., Boutt, D., Labay, K. and Jochens, H., 2016. Lithium Brines: A Global Perspective. In: Verplanck, P.L., Hitzman, M.W. (Editors.), *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits*. Review in Economic Geology, Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/Rev.18.14>
- Munk, L.A. and Jochens, H., 2011. Geochemistry of lithium-rich brines in Clayton Valley, Nevada, USA. 11th SGA Biennial Meeting Let's Talk Ore Deposits, Antofagasta, Chile, pp. 217–219.
- Nelson, S., 2022. C29 Metals about to set drills turning at Pocitos salar projects in Lithium Triangle, Argentina. Retrieved February 21, 2025 from <https://www.proactiveinvestors.co.uk/companies/news/998487/c29-metals-about-to-set-drills-turning-at-pocitos-salar-projects-in-lithium-triangle-argentina-998487.html>
- Nol-Tec Systems, 2025. Retrieved February 21, 2025 from https://www.noltec.com/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAiaC-BhBEEiwAjY99qIsosKQC-cnzhWv69qrdy9tPNxf0IttSP5lBv6Frq954KSs2CIDtNhoCshUQAvD_BwE
- Peiro, L.T., Mendez, G.V. and Ayres, R.U., 2013. Lithium: Sources, production, uses, and recovery outlook. *The Journal of The Minerals, Metals and*

- Materials Society, 65: 986–996.
<https://doi.org/10.1007/s11837-013-0666-4>
- Peng, Y., Zheng, M., Zhang, Y., Xing, E., Gui, B. and Zuo, F., 2023. Geochronology and geochemistry of lithium-rich tuffs in the Sichuan basin, western Yangtze: Implication for the magmatic origin and final closure of eastern Paleo-Tethys. *Geoscience Frontiers*, 14(1): 101480.
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101480>
- Putzolu, F., Armstrong, R.N., Boyce, A.J., Hepburn, L.E., Bompard, N., Najorka, J. Lefebvre-Desanois, M., Milton, A.J., Salge, T., Erak, D., Abad, I. and Herrington R.J., 2025. Origin of the Jadar Volcano-Sedimentary Li-B Deposit, Serbia. *Economic Geology*, 120(3): 599–625.
<https://doi.org/10.5382/econgeo.5132>
- Rifai, K., Constantin, M., Yilmaz, A., Özcan, L.Ç., Doucet, F.R. and Azami, N., 2022. Quantification of lithium and mineralogical mapping in crushed ore samples using laser induced breakdown spectroscopy. *Minerals*, 12(2): 253.
<https://doi.org/10.3390/min12020253>
- Rudnick, R.L. and Gao, S., 2005. Composition of the continental crust. In: R.L. Rudnick, (Editor), *Treatise on Geochemistry*, V. 3: The Crust. Oxford, Elsevier Pergamon, pp. 1–64.
<https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>
- Sarkheil, H., Shahbaznejad, M., Rayegani, B., Mohtat, Y., Salahjou, T. and Sadeghy Nejad, A., 2025. Lithium Extraction Assessment from Brines in Kerman Province: Challenges and Opportunities for Clean Energy Transition and Climate Change Mitigation. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 59(2): 401–409. (in Persian with English abstract) Retrieved May 15, 2025 from
https://ijmge.ut.ac.ir/article_100680_6f3a58ab7c_b176d2d55abb1d7f83b6c.pdf
- Schlesinger, W.H., Klein, E.M., Wang, Z. and Vengosh, A., 2021. Global biogeochemical cycle of lithium. *Global Biogeochemical Cycles*, 35(8): e2021GB006999.
<https://doi.org/10.1029/2021GB006999>
- Segovia-More, M.K., Torró, L., Benavent, C.V., Briones, J.R., Vallance, J., Monnier, L., Laurent, O. and Salvi, S., 2023. High-resolution mineralogy of Lithium-rich Tuff from the Macusani Volcanic Field, Puno, Peru. In: Proc. 17th SGA Biennial Meeting on Mineral Resources in a Changing World, SGA, Zurich, Switzerland, pp. 303–306.
- Serri, G., Innocenti, F. and Manetti, P., 1993. Geochemical and petrological evidence of the subduction of delaminated Adriatic continental lithosphere in the genesis of the Neogene-Quaternary magmatism of central Italy. *Tectonophysics*, 223(1-2): 117–147.
[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90161-C](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90161-C)
- Sharma, N., Westerhoff, P. and Zeng, C., 2022. Lithium occurrence in drinking water sources of the United States. *Chemosphere*, 305: 135458.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135458>
- Shaw, D.M., Pérignon, N.V. and John, M., 1977. Lithium in spilites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(11): 1601–1607.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(77\)90171-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(77)90171-5)
- Sheikhi Gheshlaghi, R., Ghorbani, M., Sepahi, A.A., Deevsalar, R., Nakashima, K. and Shinjo, R., 2022. The origin of gem spodumene in the Hamadan Pegmatite, Alvand Plutonic Complex, western Iran. *The Canadian Mineralogist*, 60(2): 249–266.
<https://doi.org/10.3749/canmin.2000087>
- Singhm, J. and Kaistha, M.K., 1999. Report on search for tin, tungsten, and lithium mineralisation in Chaur granitoid complex, Sirmaur and Shimla districts, Himachal Pradesh. Geological Survey of India, Northern Region, Lucknow, 12 pp.
- Stanley, C., Rumsey, M., Jones, G., Blake, C., Roberts, A., Stirling, J., Carpenter, G., Whitfield, P.S., Grice J.D. and LePage, Y.J., 2007. Jadarite, $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$ a new lithium sodium borosilicate mineral from the Jadar Basin, Serbia. *European Journal of Mineralogy*, 19(4): 575–580.
<https://doi.org/10.1127/0935-1221/2007/0019-1741>
- Statista Available online, 2025. Projected total demand for lithium globally. Retrieved February 6, 2025 from
<https://www.statista.com/statistics/452025/projected-total-demand-for-lithium-globally/>
- Steiner, Z., Landing, W.M., Bohlin, M.S., Greaves, M., Prakash, S., Vinayachandran, P.N. and Achterberg, E.P., 2022. Variability in the concentration of lithium in the IndoPacific Ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, 36(6): e2021GB007184.
<https://doi.org/10.1029/2021GB007184>

- Stringer, D. and Millan, L., 2019. These Mining Superpowers Supply the World's Lithium. Now They Want to Make Batteries, too. Bloomberg, Retrieved January 23, 2025 from <https://www.bloomberg.com/news/features/2019-06-03/lithium-miners-australia-chile-see-riches-as-ev-battery-makers>
- Suud, E.M., Suryantini, M. and Zaki, M., 2023. Lithium extraction method from geothermal brine to find suitable method for geothermal fields in Indonesia: A review. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1159(1): 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1159/1/012011>
- Sykes, J.P. and Schodde, R. and Davies, R.S., 2019. A global overview of the geology and economics of lithium production. Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM) Lithium Conference, Perth, Australia. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18537.42088>
- Teng, F.Z., Mcdonough, W.F., Rudnick, R.L., Dalpé, C., Tomascak, P.B., Chappell, B.W. and Gao, S., 2004. Lithium isotopic composition and concentration of the upper continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4167–4178. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.03.031>
- Thompson, L.A., Richardson, C.A., Gootee, B.F., Wilkins, J. and Fenerty B., 2025. Geology, Geochemistry, and Potential Origins of the Basin Volcano-Sedimentary Lithium Deposit, Kaiser Spring Volcanic Field, Northwestern Arizona, USA. *Economic Geology*, 120(3): 663–688. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5138>
- Trading Economics, 2025. Lithium. Retrieved February 21, 2025 from <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>
- Trueman, D.L. and Cerný, P., 1982, Exploration for Rare-Element Granitic Pegmatites. In: P. Cerný (Editor), *Granitic Pegmatites in Science and Industry: Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook*, pp. 463–493. Retrieved May 15, 2025 from <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2240858>
- Ufine, 2025. Custom Lithium-ion Battery Manufacturer. Retrieved February 21, 2025 from <https://www.ufinebattery.com/blog/a-complete-history-of-lithium-ionbatteries/>
- U.S. Department of Energy, 2021. NATIONAL BLUEPRINT FOR LITHIUM BATTERIES. Retrieved February 21, 2025 from https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/FCAB%20National%20Blueprint%20Lithium%20Batteries%200621_0.pdf
- van de Ven, M., Gazley, M., Sterk, R., Aldrich, S. and Werner, E., 2020. Exploration for Lithium-Caesium-Tantalum (LCT) pegmatites in New Zealand. Conference Paper New Zealand Minerals Forum, Hamilton, ON, Canada. Retrieved May 15, 2025 from: https://www.researchgate.net/publication/345988892_Exploration_for_Lithium-Caesium_Tantalum_LCT_pegmatites_in_New_Zealand
- Venkateswaran, C., Sreemoolanadhan, H. and Vaish, R., 2022. Lithium aluminosilicate (LAS) glass-ceramics: a review of recent progress. *International Materials Reviews*, 67(6): 620–657. <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1994108>
- Visual Capitalist, 2025. battery manufacturing. Retrieved February 21, 2025 from <https://www.visualcapitalist.com/chinas-dominance-in-batterymanufacturing/#:~:text=With%20nearly%20900%20gigawatt%2Dhours,metals%20to%20producing%20the%20EVs>
- Wang, C., Yu, X., Li, R., Liu, L., Yan, K. and You, C., 2021a. Origin of lithium–potassium rich brines in the Jiangnan Basin, South China: Constraints by water–rock reactions of Mesozoic–Cenozoic igneous rocks. *Minerals*, 11(12): 1330. <https://doi.org/10.3390/min11121330>
- Wang, C., Zheng, M., Zhang, X., Wu, Q., Liu, X., Ren, J. and Chen, S., 2021b. Geothermal type lithium resources in Southern Xizang, China. *Acta Geologica Sinica*, 95(3): 860–872. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14675>
- Warren, J.K., 2016. *Evaporites: A Geological Compendium*. Springer, Basel, Switzerland, 1813 pp.
- Warren, I., 2021. *Techno-Economic Analysis of Lithium Extraction from Geothermal Brines*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, U.S. NREL/TP-5700-79178. Retrieved May 15, 2025 from: <https://purl.fdlp.gov/GPO/gpo159005>
- Yaksic, A. and Tilton, E., 2009. Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: the case of lithium.

Resources Policy, 34(4): 185–94.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.05.002>

Yu, X., Wang, C., Huang, H. and Yan, K., 2023a. Origin of lithium in oilfield brines in continental petroliferous basin: Insights from Li and Sr isotopes in the Jiangnan Basin, central China. *Marine and Petroleum Geology*, 160: 106576.

<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106576>

Yu, X., Wang, C., Huang, R., Wang, J. and Yan, K., 2023b. Lithium and brine geochemistry in the Qianjiang Formation of the Jiangnan Basin, central China. *Scientific Reports*, 13: 4445.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-31421-1>

Zhao, H., Ling, K., Qin, S., Lei, M. and Wen, H., 2023a. Modes of occurrence of lithium in black shale in the Nandan area, Guangxi, SW China: Implications for clay-type resources. *Ore Geology Reviews*, 157: 105409.

<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105409>

Zhao, H., Wang, Y. and Cheng, H., 2023b. Recent advances in lithium extraction from lithium-bearing clay minerals. *Hydrometallurgy*, 217: 106025.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106025>

Zhang, H., Tian, S., Wang, D., Li, X., Liu, T., Zhang, Y.J., Fu, X.F., Hao, X.F., Hou, K.J., Zhao, Y. and Qin, Y., 2021. Lithium isotope behaviour during magmatic differentiation and fluid exsolution in the Jiajika granite–pegmatite deposit, Sichuan, China. *Ore Geology Reviews*, 134: 104139.

<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104139>

Zheng, R., Li, Y., Yu, H., Zhang, X., Yang, D., Yan, L., Li, Y., Shu, J. and Su, B.L., 2023a. Ammonium ion batteries: Material, electrochemistry and strategy. *Angewandte Chemie*, 62(23): e202301629.

<https://doi.org/10.1002/anie.202301629>

Zheng, M.P., Xing, E.Y., Zhang, X.F., Li, M.M., Che, D., Bu, L.Z., Han, J.H. and Ye, C.Y., 2023b. Classification and mineralization of global lithium deposits and lithium extraction technologies for exogenetic lithium deposits. *China Geology*, 6(4): 547–566. Retrieved May 15, 2025 from

<http://en.cgsjournals.com/article/doi/10.31035/cg2023061>