



Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Review Paper

A Review on Lithium Bioleaching from Solid Resources

Ali Naderi¹, Seyyed Mohammad Mousavi^{1,2*}

¹ Biotechnology Group, Chemical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Modares Environmental Research Institute, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Received 2025-01-13

Accepted 2025-01-31

Available online 2025-07-07

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

lithium

bioleaching

lithium-ion batteries

solid resources

microorganisms

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: Bioleaching of lithium has emerged as an innovative and sustainable approach for extracting this valuable metal from solid sources, including mineral ores, spent lithium-ion batteries, and other electronic waste. The increasing global demand for lithium-ion batteries, especially for consumer electronics and electric vehicles, has intensified the need for efficient lithium resource recovery. Given the environmental and economic challenges associated with traditional extraction methods, bioleaching has been proposed as an eco-friendly and cost-effective alternative.

Research approach: This study provides a comprehensive review of the scientific literature and research on lithium bioleaching. It begins with an overview of lithium resources and applications, followed by an evaluation of studies on the bioleaching of lithium-ion batteries and other solid sources. The mechanisms involved and commonly used microorganisms are analyzed. Additionally, key parameters influencing metal recovery efficiency—such as pH, temperature, medium composition, pulp density, and leaching time—are investigated. The study also explores innovative approaches, including the use of artificial intelligence, systems biology, and synthetic biology, to optimize bioleaching processes.

Main results: The findings demonstrate that bioleaching not only achieves efficient lithium recovery from solid sources but also significantly reduces environmental hazards. Spent lithium-ion batteries are identified as a rich and valuable source for lithium extraction. The use of microorganisms such as *Aspergillus niger* and *Acidithiobacillus ferrooxidans* has achieved lithium recovery rates of up to 100%. Studies indicate that optimizing microbial strains through synthetic and systems biology, along with refining cultivation conditions using modern AI-based techniques, can address industrial challenges in bioleaching. Furthermore, this research highlights the role of bioleaching in promoting a circular economy and presents a promising outlook for its industrial application in sustainable lithium resource recovery.

* Corresponding author: mousavi_m@modares.ac.ir

Copyright© 2025, The Authors. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی-پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله مروری

مروری بر فروشویی زیستی لیتیوم از منابع جامد

علی نادری^۱، سیدمحمد موسوی^{۲*}

^۱ گروه بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: فروشویی زیستی لیتیوم به‌عنوان رویکردی نوآورانه و پایدار برای استخراج این فلز ارزشمند از منابع جامد، شامل کانی‌های معدنی، باتری‌های مستعمل یون لیتیومی و سایر پسماندهای الکترونیکی، مورد توجه قرار گرفته است. افزایش تقاضای جهانی برای باتری‌های یون لیتیومی، به‌ویژه در تجهیزات الکترونیکی و خودروهای الکتریکی، نیاز به بازیابی منابع لیتیوم را دوچندان کرده است. با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی روش‌های سنتی استخراج، فروشویی زیستی به‌عنوان گزینه‌ای سازگار با محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه مطرح شده است.

روش تحقیق: این پژوهش بر پایه بررسی جامع منابع علمی و پژوهش‌های انجام‌شده درباره استفاده از ریزاندامگان‌ها در فروشویی زیستی لیتیوم استوار است. در این راستا، ابتدا به بررسی منابع و کاربردهای لیتیوم پرداخته شد. سپس مطالعات انجام‌شده بر فروشویی زیستی باتری‌های یون لیتیومی و منابع جامد دیگر و سازوکار ریزاندامگان‌های مرسوم مورد ارزیابی قرار گرفت. در انتها عوامل مختلفی نظیر شرایط محیطی، pH، دما، ترکیب محیط کشت، غلظت دوغاب و زمان فروشویی بر کارایی بازیابی فلز لیتیوم بررسی و اشاره‌ای به روش‌های نوین استفاده از هوش مصنوعی و زیست‌شناسی سامانه‌ای و سنتزی شد.

نتایج اصلی: نتایج نشان دادند فروشویی زیستی نه تنها منجر به بازیابی موفق لیتیوم از منابع جامد با کارایی بالا می‌شود، بلکه به‌طور قابل توجهی اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. باتری‌های یون لیتیومی می‌توانند به‌عنوان منبعی بسیار غنی و ارزشمند برای استخراج لیتیوم به کار گرفته شوند. استفاده از گونه‌های قارچی نظیر *Aspergillus niger* و باکتری‌هایی نظیر *Acidithiobacillus ferrooxidans* می‌تواند نرخ بازیابی لیتیوم را تا ۱۰۰٪ افزایش دهد. مطالعات نشان دادند استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی سویه همچون زیست‌شناسی سنتزی و سامانه‌ای و بهینه‌سازی شرایط کشت همچون استفاده از روش‌های نوین هوش مصنوعی می‌تواند محدودیت‌های استفاده از فروشویی زیستی در صنعت را برطرف کند. همین‌طور این مطالعه بر اهمیت فروشویی زیستی در ایجاد اقتصاد چرخشی تأکید داشته و چشم‌اندازی روشن برای کاربرد صنعتی آن در بازیافت پایدار منابع لیتیوم ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها

لیتیوم

فروشویی زیستی

باتری‌های یون لیتیومی

منابع جامد

ریزاندامگان‌ها

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲

دسترس آنلاین: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول mousavi_m@modares.ac.ir

۱ مقدمه

لیتیوم (Li) به‌عنوان عنصری کلیدی در اقتصاد انرژی نوین به‌دلیل نقش اساسی در فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، به‌ویژه در باتری‌های یون‌لیتیومی (Lithium-Ion Battery, LIBs)، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. با افزایش وابستگی جهانی به باتری‌های یون‌لیتیومی برای کاربردهایی مانند خودروهای برقی، وسایل الکترونیکی قابل حمل و ذخیره‌سازی انرژی تجدیدپذیر، تقاضا برای لیتیوم به شکل چشمگیری افزایش یافته است. این تقاضای فزاینده فشار زیادی بر منابع لیتیوم، که عمدتاً از سنگ معدن و ذخایر شورابه استخراج می‌شوند، وارد کرده است. استخراج لیتیوم به روش‌های سنتی معدن‌کاری و فرآوری نه تنها منابع زیادی مصرف می‌کند، بلکه پیامدهای زیست‌محیطی جدی مانند تخریب زیستگاه‌ها، کاهش منابع آبی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به همراه دارد. با افزایش نگرانی‌ها در مورد پایداری منابع و تأثیرات زیست‌محیطی، نیاز به روش‌های جایگزین بازیابی لیتیوم به وضوح احساس می‌شود [۱]. یکی از این روش‌ها، فرایند زیستی استخراج لیتیوم یا فروشویی زیستی است که از ریزاندامگان‌ها برای استخراج لیتیوم از پسماندهای جامد و باتری‌های یون‌لیتیومی استفاده می‌کند. این روش نوآورانه نسبت به روش‌های سنتی مزایای متعددی از جمله کاهش مصرف انرژی، کاهش اثرات زیست‌محیطی و امکان بازیافت فلزات ارزشمند از محصولات استفاده‌شده و ضایعات فلزی دارد. استفاده از فروشویی زیستی برای بازیابی لیتیوم از پسماندها و باتری‌های یون‌لیتیومی با اصول اقتصاد چرخه‌ای هماهنگ است، که هدف آن کاهش پسماند، به‌بیشینه رساندن بازیافت منابع و کاهش وابستگی به مواد خام اولیه است [۲]. رشد سریع استفاده از باتری‌های یون‌لیتیومی همچنین باعث افزایش موزای پسماند این باتری‌ها شده است. برآوردها نشان می‌دهد که میلیون‌ها تن باتری‌های یون‌لیتیومی مستعمل در دهه‌های آینده در سراسر جهان انباشته خواهند شد که چالش زیست‌محیطی جدی را ایجاد می‌کند. این باتری‌های مستعمل سرشار از فلزات ارزشمندی مانند لیتیوم، کبالت، نیکل و منگنز هستند که آن‌ها را به منبع ثانویه حیاتی تبدیل می‌کند. اگرچه روش‌های سنتی بازیافت مانند فرایندهای پیرومتالورژیکی و هیدرومتالورژیکی مؤثر هستند، اما اغلب پرهزینه، انرژی‌بر و همراه با محصولات جانبی خطرناک هستند. در مقابل، فروشویی زیستی گزینه‌ای پایدار و کارآمد برای بازیافت فلزات ارائه می‌دهد [۳].

لیتیوم عمدتاً از دو نوع ذخایر استخراج می‌شود: مواد معدنی سخت (مانند اسپادومن و پتالیت) و مخازن شورابه. این منابع سهم عمده‌ای در تأمین جهانی لیتیوم دارند، اما با چالش‌های بسیاری همراه هستند. معدن‌کاری سنگ‌های سخت نیازمند منابع گسترده زمین و آب بوده و پسماند زیادی تولید می‌کند، درحالی‌که استخراج لیتیوم از شورابه‌ها فرایندی کند و پرمصرف از نظر آب است که تأثیر زیست‌محیطی قابل توجهی دارد. علاوه بر این، تمرکز جغرافیایی منابع لیتیوم در مناطقی مانند آمریکای جنوبی، استرالیا و چین نگرانی‌هایی در مورد امنیت تأمین و نوسانات بازار ایجاد می‌کند [۴]. هم‌زمان، افزایش تولید باتری‌های یون‌لیتیومی علاقه‌مندی به معدن‌کاری شهری یعنی بازیابی فلزات ارزشمند از محصولات دورریخته‌شده را افزایش داده است. باتری‌های مستعمل یون‌لیتیومی به‌عنوان منبع غنی از

لیتیوم، قابلیت سودآور و پایداری را ارائه می‌دهند. با این حال، برای بهره‌برداری از این قابلیت به روش‌های کارآمد بازیافت نیاز است که هزینه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی را به حداقل برساند [۵و۴]. فروشویی زیستی فرایندی است که ریزاندامگان‌ها را برای حل کردن فلزات از ماتریس‌های جامد به کار می‌گیرد. این روش عمدتاً از دو نوع ریزاندامگان استفاده می‌کند: باکتری‌های خودپرورد (Autotrophic) مانند *Acidithiobacillus thiooxidans* و *Acidithiobacillus ferrooxidans* که انرژی خود را از اکسایش ترکیبات معدنی به‌دست می‌آورند و قارچ‌های دگرپرورد (Heterotrophic) مانند *Aspergillus niger* که اسیدهای آلی تولید می‌کنند تا به انحلال فلزات کمک کنند. این ریزاندامگان‌ها از طریق واکنش‌های شیمیایی زیستی، اغلب شامل تولید اسید و تغییرات اکسایش-کاهش، لیتیوم و فلزات ارزشمند دیگر را از ماتریس‌های میزبان آزاد می‌کنند. در زمینه بازیافت باتری‌های یون‌لیتیومی، فروشویی زیستی نتایج امیدوارکننده‌ای در بازیابی لیتیوم از مواد کاتدی مانند LiCoO_2 و LiFePO_4 نشان داده است. این فرایند معمولاً در شرایط ملایم انجام می‌شود و نیاز به مصرف انرژی کمتری نسبت به روش‌های سنتی دارد. علاوه بر این، فروشویی زیستی می‌تواند برای بازیابی انتخابی فلزات خاص طراحی شود که این امر کارایی کلی را بهبود بخشیده و تولید پسماندهای ثانویه را کاهش می‌دهد [۶]. باوجود قابلیت بالای فروشویی زیستی، اجرای آن در مقیاس صنعتی با چندین چالش مواجه است. نرخ واکنش کند فرایندهای زیستی و بازده محدود بازیابی لیتیوم در برخی موارد از موانع اصلی هستند. علاوه بر این، ترکیب پیچیده پسماندهای باتری که شامل چسب‌های آلی، پلاستیک‌ها و الکترولیت‌هاست، چالش‌هایی در پیش‌پردازش و تضمین عملکرد پایدار فروشویی زیستی ایجاد می‌کند [۷]. یکی از جنبه‌های حیاتی، انتخاب و مهندسی ریزاندامگان‌ها برای افزایش تحمل آن‌ها در برابر شرایط سخت موجود در پسماندهای باتری، مانند غلظت‌های بالای فلزات و ترکیبات سمی است.

بهبود عملکرد فروشویی زیستی با بهینه‌سازی فعالیت‌های میکروبی، اصلاح شرایط محیطی و بهره‌گیری از روش‌های نوین امکان‌پذیر است. یکی از راهکارهای مهم، مهندسی ژنتیک ریزاندامگان‌ها برای افزایش کارایی استخراج فلزات، مقاومت در برابر شرایط سخت و بهبود سوخت‌وساز سلولی آن‌هاست. تنظیم عوامل محیطی مانند pH، دما، میزان اکسیژن و تأمین مواد مغذی می‌تواند سرعت فروشویی زیستی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. استفاده از واکنشگاه‌های زیستی قابل تنظیم نیز به بهبود فرایند انحلال و بازیابی فلزات کمک می‌کند. به‌کارگیری مجموعه‌ای از ریزاندامگان‌های مختلف به‌جای یک گونه خاص، به‌دلیل تعاملات هم‌افزا، باعث تسریع فرایند فروشویی زیستی می‌شود. علاوه بر این، روش‌های پیش‌آمایش مانند فعال‌سازی مکانیکی یا افزودن مواد شیمیایی می‌توانند دسترسی به مواد معدنی را افزایش داده و فعالیت میکروبی را تسهیل کنند. ترکیب فروشویی زیستی با فرایندهایی مانند زیست‌اکسایش و روش‌های هیدرومتالورژیکی نیز می‌تواند بازده استخراج فلزات را بالا ببرد و این روش را به گزینه‌ای کارآمد و پایدار برای بازیابی منابع تبدیل کند [۸و۹].

پیشرفت‌های اخیر در حوزه هوش مصنوعی (Artificial Intelligence, AI)، یادگیری ماشین (Machine Learning, ML) و زیست‌شناسی سامانه‌ای و

یون‌لیتیومی به‌دلیل محتوای بالای لیتیوم و افزایش تقاضا برای مدیریت پایدار منابع، به یکی از روش‌های حیاتی بازیابی لیتیوم تبدیل شده‌اند. منابع مایع لیتیوم که بیش از ۸۰ درصد لیتیوم جهان را تأمین می‌کنند، عمدتاً شامل آب‌نمک‌های دریاچه‌های نمکی، آب‌نمک‌های زمین‌گرمایی، آب دریا و الکترولیت‌های لیتیوم ضایعاتی هستند. آب‌نمک‌های دریاچه‌های نمکی، به‌ویژه در مناطقی مانند مثلث لیتیوم در آمریکای جنوبی (شیلی، آرژانتین و بولیوی)، سرشار از نمک‌های لیتیوم هستند. آب‌نمک‌های زمین‌گرمایی که محصول جانبی تولید انرژی زمین‌گرمایی هستند، نیز به‌عنوان منبعی غنی برای لیتیوم محسوب می‌شوند و فناوری‌های پیشرفته استخراج مستقیم لیتیوم امکان بازیابی کارآمدتر را فراهم می‌کنند. آب دریا مقادیر کمی لیتیوم دارد و اگرچه استخراج آن در حال حاضر پرهزینه است، پیشرفت فناوری ممکن است آن را در آینده مقرون‌به‌صرفه کند [۱۳]. این منابع در شکل ۱ قابل مشاهده هستند.

۳ کاربردهای لیتیوم

لیتیوم، فلزی سبک و بسیار واکنش‌پذیر، به خاطر کاربردهای گسترده و نقش ضروری‌اش در صنایع مختلف شهرت دارد. ویژگی‌های منحصربه‌فرد لیتیوم، از جمله چگالی پایین، واکنش‌پذیری بالا و رسانایی عالی، آن را برای استفاده در حوزه‌هایی مانند ذخیره‌سازی انرژی، صنایع هوافضا، سرامیک، متالورژی و علوم زیست‌پزشکی ایده‌آل ساخته است. در زمینه ذخیره‌سازی انرژی، باتری‌های یون‌لیتیومی به‌عنوان استاندارد طلایی در دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل و خودروهای برقی شناخته می‌شوند، زیرا تراکم انرژی بالا، عمر طولانی و کارایی مطلوبی ارائه می‌دهند. این باتری‌ها همچنین نقش مهمی در سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر دارند و نوآوری‌هایی مانند باتری‌های لیتیوم-سولفور و حالت جامد، عملکرد بهتری نوید می‌دهند. با گسترش بازار خودروهای برقی، انتظار می‌رود تقاضا برای لیتیوم به‌شدت افزایش یابد. در صنایع سرامیک و شیشه، ترکیبات لیتیوم نظیر کربنات‌لیتیوم (Li_2CO_3) باعث کاهش دمای ذوب، بهبود مقاومت در برابر شوک حرارتی و افزایش دوام محصولات می‌شوند که برای تولید شیشه‌های با کارایی بالا و سرامیک‌های خاص ضروری است. Li_2CO_3 که از اسپودومن و آب‌های شور استخراج می‌شود، اهمیت فناوری‌های استخراج پایدار را برجسته می‌سازد. آلیاژهای لیتیوم-آلومینیوم در صنعت هوافضا به‌دلیل نسبت استحکام به وزن عالی خود بسیار ارزشمند هستند و در ساخت هواپیما و فضاپیما حیاتی‌اند. همچنین فلز لیتیوم با تقویت آلیاژهای خاص در مهندسی پیشرفته کاربرد دارد. در علوم زیست‌پزشکی، نمک‌های لیتیوم به‌عنوان استاندارد برای درمان اختلال دوقطبی محسوب می‌شوند و برای درمان بیماری‌های عصبی-تخریبی نیز امیدبخش‌اند. هیدروکسید لیتیوم (LiOH) نیز در سامانه‌های جذب CO_2 برای تصفیه هوا کاربرد دارد. ترکیبات لیتیوم در صنایع مختلف، از سامانه‌های تهویه مطبوع و رطوبت‌زدایی تا روان‌کننده‌ها و کاتالیزگرهای پیشرفته، نقش‌های متنوعی ایفا می‌کنند. LiOH به‌عنوان پیش‌ماده جاذب‌های نوترونی و کاتالیزگرهای پیشرفته کاربرد دارد و کلرید لیتیوم (LiCl) در فرایندهای بهداشتی و الکتروشیمیایی استفاده می‌شود. فناوری‌های نوظهور همچون ذخیره‌سازی هیدروژن و ابررساناها، پژوهش‌های هم‌جوشی هسته‌ای و تصویربرداری پزشکی نیز از انعطاف‌پذیری

سنتزی، چشم‌انداز فروشوی زیستی را دگرگون کرده و می‌تواند ابزارهای نوینی برای بهینه‌سازی و ارتقای این فرایند فراهم آورد. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین رویکردهای قدرتمندی بر پایه داده برای تحلیل و پیش‌بینی نتایج فروشوی زیستی ارائه می‌دهند. با توسعه مدل‌های پیش‌بینی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، این فناوری‌ها به پژوهشگران کمک می‌کنند تا عوامل کلیدی را شناسایی، عملکرد میکروبی را بهبود داده و شرایط فروشوی زیستی را در زمان کم بهینه‌سازی کنند. با ادغام مجموعه داده‌های گسترده‌ای از توالی‌یابی ژنومی (Genomic)، مطالعات کانی‌شناسی و پایش محیطی، رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی، شناسایی سریع راهبردهای کارآمد فروشوی زیستی را ممکن می‌سازند. زیست‌شناسی سامانه‌ای نیز درک جامعی از تعاملات میکروبی، مسیرهای متابولیکی و شبکه‌های تنظیمی در سامانه‌های فروشوی زیستی فراهم می‌کند. این دیدگاه کلی به طراحی میکروب مقاوم کمک می‌کند که بتواند در شرایط متنوع محیطی به‌خوبی عمل کرده و طیف گسترده‌ای از منابع فلزی را متابولیزه کنند. زیست‌شناسی سنتزی نیز با مهندسی ژنتیکی ریزاندامگان‌ها، قابلیت‌های فروشوی زیستی را بهبود می‌بخشد. به‌عنوان مثال، زیست‌شناسی سنتزی می‌تواند سبب افزایش تحمل به شرایط سخت، کارایی بیشتر در حل کردن فلزات و تولید سویه‌هایی هوشمند در استخراج منابع فلزی تحت هر شرایط خاص با قدرت تنظیمی پویا شود [۱۰ و ۱۱ و ۱۲].

این مقاله به بررسی فروشوی زیستی لیتیوم پرداخته و بر کاربرد آن در منابع جامد به خصوص بازیافت باتری‌های یون‌لیتیومی تمرکز دارد. بحث شامل مروری بر کاربرد و منابع لیتیوم، سازوکار و ریزاندامگان‌های مستعد فروشوی، فروشوی لیتیوم از منابع مختلف و عوامل مؤثر بر این فناوری است. به‌علاوه، این مقاله پیشرفت‌های اخیر در فرایندهای فروشوی زیستی، چالش‌ها و فرصت‌های مقیاس‌پذیری صنعتی را مورد بررسی قرار می‌دهد، تحلیل جامعی از وضعیت فعلی تحقیقات در زمینه فروشوی زیستی لیتیوم ارائه می‌دهد و بر کاربرد آن در منابع جامد به خصوص باتری‌های یون‌لیتیومی تمرکز می‌کند. با ترکیب نتایج حاصل از مطالعات اخیر، مقاله تلاش می‌کند روندها، چالش‌ها و مسیرهای آینده را در این حوزه شناسایی کند و نقشه راهی برای محققان و ذی‌نفعان صنعتی علاقه‌مند به بازیابی پایدار لیتیوم ارائه دهد.

۲ منابع لیتیوم

منابع لیتیوم متنوع هستند و به دو شکل جامد و مایع وجود دارند. منابع جامد شامل کانی‌های معدنی، رس‌ها، باتری‌های یون‌لیتیومی مستعمل (LIBs) و زباله‌های الکترونیکی می‌شوند. از میان این‌ها، کانی‌های معدنی مانند اسپودومن (Spodumene) و لپیدولیت (Lepidolite) که معمولاً در پگماتیت‌ها (Pegmatite) یافت می‌شوند، اهمیت ویژه‌ای دارند. پگماتیت‌ها نوعی از سنگ‌های گرانیته هستند که بیشترین غلظت لیتیوم را در خود دارند و عمدتاً اسپودومن و لپیدولیت با غلظتی تا ۸۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده می‌شوند. سایر کانی‌های دارای لیتیوم که از لحاظ تجاری اهمیت دارند شامل پتالیت (Petalite) و آمبلیگونیت (Amblygonite) هستند. همچنین رس‌های حاوی لیتیوم، مانند هکتوریت، منبع بالقوه دیگری از لیتیوم جامد محسوب می‌شوند. بازیافت باتری‌های مستعمل

لیتیوم بهره‌مند شده‌اند. همه این موارد که در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند نشان‌دهنده اهمیت علمی و صنعتی حیاتی لیتیوم هستند (۱۴ و ۱۵ و ۱۶).

۴ فروشوی زیستی لیتیوم

لیتیوم در طبیعت به شکل خالص یافت نمی‌شود و معمولاً در غلظت‌های اندک در سنگ‌های آذرین، چشمه‌های معدنی و سایر ساختارهای زمین‌شناسی وجود دارد. روش‌های استخراج بسته به منبع متفاوت است. برای منابع جامد مانند اسپودومن، فرایند شامل استخراج معدن، خردکردن، گرمادهی و فراوری‌های شیمیایی برای جداسازی ترکیبات لیتیوم است. در مقابل، استخراج از آب‌نمک‌ها به تبخیر خورشیدی برای تغلیظ نمک‌های لیتیوم وابسته است و روش‌های جدیدتر استخراج مستقیم لیتیوم در حال ظهور هستند تا بازدهی را افزایش داده و تأثیرات زیست‌محیطی را کاهش دهند. رس‌هایی مانند هکتوریت از طریق فرایند شستشوی اسیدی فراوری می‌شوند تا لیتیوم بازیابی شود. منابع ثانویه مانند باتری‌های مستعمل، زباله‌های الکترونیکی و محصولات جانبی صنعتی، به‌عنوان جایگزین‌های پایدار برای منابع اولیه اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند. در بازیافت باتری‌های یون‌لیتیومی، از روش‌های هیدرومتالورژیکی و پیرومتالورژیکی برای بازیابی لیتیوم و سایر فلزات ارزشمند استفاده می‌شود. روش‌های نوآورانه‌ای مانند فروشوی نیز در حال بررسی هستند. فرایند فروشوی ممکن است شامل تعامل مستقیم میکروب‌ها با مواد یا روش‌های غیرمستقیمی باشد که در آن میکروب‌ها عوامل شستشو مانند اسیدسولفوریک تولید می‌کنند. بهینه‌سازی این فرایند می‌تواند از طریق استفاده از ریزاندامگان‌های مقاوم به فلزات سمی یا کشت میکروبی مختلط انجام شود (۱۳ و ۱۷).

با وجود این منابع و روش‌های متنوع، چالش‌هایی نیز وجود دارد. استخراج از آب‌نمک‌ها در مناطق خشک بر دسترسی به آب و بوم‌سازگان‌ها تأثیر می‌گذارد، درحالی‌که استخراج از سنگ‌های سخت اغلب منجر به تخریب زیستگاه‌ها و انتشار قابل‌توجه کربن می‌شود. موانع اقتصادی همچنان برای منابع غیرمعارف مانند آب دریا و رس‌ها به‌دلیل هزینه‌های بالای استخراج وجود دارد و فرایندهای بازیافت، با وجود پیشرفت‌ها، به فناوری‌های بیشتری برای بهبود نرخ بازیابی و اقتصادی‌تر شدن نیاز دارند. با افزایش تقاضا برای لیتیوم، به‌ویژه در باتری‌های خودروهای برقی و دستگاه‌های قابل‌حمل، نوآوری در روش‌های استخراج و بازیابی ضروری است. فناوری‌های استخراج مستقیم لیتیوم، مصرف آب و تأثیرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهند. سامانه‌های بازیافت باتری در حال تکامل هستند تا به پایداری چرخه‌ای برسند. تحقیقات روی منابع غیرمعارف مانند آب دریا و آب‌نمک‌های زمین‌گرمایی، پایگاه منابع را گسترش می‌دهند، درحالی‌که فروشوی گزینه‌ای سبز و نویدبخش ارائه می‌دهد. آینده لیتیوم در گرو ایجاد تعادل بین استفاده از منابع و پایداری زیست‌محیطی است.

۴-۱ فروشوی زیستی لیتیوم از باتری‌های یون‌لیتیومی

افزایش تقاضای جهانی برای باتری‌های یون‌لیتیومی در کاربردهای مختلف مانند خودروهای برقی و ذخیره‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر منجر به افزایش چشمگیر تولید باتری شده است. این باتری‌ها حاوی فلزات ارزشمندی نظیر لیتیوم، کبالت، نیکل و منگنز هستند. با این حال، دفع و بازیافت این مواد

به دلیل فرایندهای پیچیده و خطرناک بازیافت سنتی همچنان از چالش‌های اصلی محسوب می‌شود. بنابراین، روش‌های پایدارتر و کارآمدتر برای بازیافت فلزات از LIBs، برای توسعه روش‌های سازگار با محیط‌زیست مانند فروشوی زیستی نیاز است. فروشوی زیستی، فرایندی که در آن از ریزاندامگان‌ها برای استخراج فلزات از سنگ معدن یا مواد زائد استفاده می‌شود، در بازیافت باتری‌های مصرف‌شده توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این روش مزایایی مانند مصرف کمتر انرژی، کاهش آلودگی محیط‌زیست و امکان بازیابی انتخابی فلزات را نسبت به روش‌های معمول ارائه می‌دهد. در سال‌های اخیر، مطالعات امیدبخش زیادی در بازیابی لیتیوم و سایر فلزات حیاتی از باتری‌های مصرف‌شده به‌روش فروشوی زیستی با استفاده از انواع ریزاندامگان‌ها مانند قارچ‌ها و باکتری‌ها برای بهبود کارایی فرایند استخراج انجام شده‌است.

به‌عنوان مثال در پژوهشی از قارچ *A. niger* سازگار یافته برای بازیافت فلزاتی مانند لیتیوم (Li)، مس (Cu)، منگنز (Mn)، آلومینیوم (Al)، کبالت (Co)، و نیکل (Ni) از باتری‌های مصرف‌شده استفاده شده است. در این مطالعه، قارچ *A. niger* با موفقیت خوددهی شد تا کارایی استخراج فلزات را افزایش دهد. در شرایط بهینه، این قارچ توانست ۱۰۰٪ لیتیوم، ۹۴٪ مس و مقدار قابل‌توجهی از فلزات دیگر را بازیابی کند که نشان‌دهنده قابلیت متابولیت‌های قارچی برای بازیافت باتری‌های یون‌لیتیومی است. استفاده از اسیدسیتریک قارچی به‌عنوان عامل زیستی برای استخراج فلزات به‌ویژه مؤثر بود [۱۸]. علاوه بر این، مطالعات فروشوی زیستی غیرتماسی را که شامل استفاده از آهن فریک و اسیدسولفوریک زیستی تولیدشده توسط ریزاندامگان‌هاست، بررسی کرده‌اند. این عوامل زیستی می‌توانند استخراج فلزات از ساختار پیچیده باتری‌های مصرف‌شده را تسهیل کنند. در مطالعه‌ای، مراحل شستشوی متوالی موفق به بهبود بازیابی فلزات، به‌ویژه لیتیوم با نرخ بازیابی ۶۰٪ شد. سایر فلزات نیز بازیابی‌های قابل‌توجهی نشان دادند که نشان می‌دهد فروشوی زیستی مبتنی بر عوامل زیستی می‌تواند جایگزینی سازگار با محیط‌زیست برای روش‌های سنتی باشد [۱۹]. پیشرفت قابل‌توجه دیگر در فروشوی زیستی لیتیوم، غنی‌سازی و سازگارسازی ریزاندامگان‌های شیمی‌کانی‌پرورد (Chemolithotroph) اسیددوست (Acidophile) بومی از دریاچه آلودگی فلزی معدنی است. این ریزاندامگان‌ها به غلظت‌های فزاینده فلزات مختلف سازگار شدند و توان فروشوی زیستی آن‌ها برای لیتیوم و سایر فلزات مورد ارزیابی قرار گرفت. کشت سازگار یافته توانست تا ۱۰۰٪ لیتیوم و سایر فلزات را از طریق فرایند فروشوی زیستی دومرحله‌ای بازیابی کند. این روش بازده استخراج فلزات را به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از کشت‌های ناسازگار غیرزیستی نشان داد که اهمیت سازگارسازی ریزاندامگان‌ها را در بهینه‌سازی کارایی فروشوی زیستی برجسته می‌کند [۲۰]. فروشوی زیستی با گونه‌های گرمادوست متوسط به‌عنوان روشی امیدوارکننده برای استخراج فلزات از باتری‌های مصرف‌شده به‌کار گرفته شد. در دمای حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد، ریزاندامگان‌های گرمادوست می‌توانند فرایند فروشوی زیستی را تسریع کنند. مطالعه‌ای نشان داد که افزایش غلظت گوگرد، بازیابی لیتیوم را بهبود می‌بخشد، درحالی‌که افزودن $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ به‌عنوان عامل کاهنده به‌طور قابل‌توجهی بازیابی کبالت را افزایش می‌دهد. این فرایند فروشوی زیستی توانست نرخ

بهینه‌سازی فرایندهای فروشوی زیستی برای بازیافت کارآمدتر و پایدارتر مواد حیاتی از باتری‌های مصرف‌شده تأکید می‌کند [۲۷]. در نتیجه این پژوهش‌ها، فروشوی زیستی لیتیوم روشی نویدبخش و پایدار برای بازیافت فلزات حیاتی از باتری‌های مصرف‌شده یون‌لیتیومی ارائه داده است. با پیشرفت‌های صورت گرفته در سازگاری میکروبی، توسعه عوامل زیستی و روش‌های نوآورانه مانند فروشوی زیستی گرمادوست و مغناطیسی، این فرایند در آستانه تبدیل شدن به روشی کلیدی برای بازیابی فلزات ارزشمند از باتری‌های مصرف‌شده است. ادامه تحقیقات و بهینه‌سازی شرایط فروشوی زیستی برای کارآمدتر و مقرون‌به‌صرفه‌تر کردن آن برای سازگاری بیشتر با محیط زیست در کاربردهای صنعتی بزرگ مقیاس ضروری است. جدول ۱ مروری بر مطالعات پیشین در فروشوی زیستی باتری‌های یون‌لیتیومی انجام داده است.

۴-۲ فروشوی زیستی لیتیوم از منابع جامد

با اینکه تحقیقات زیادی بر بازیابی لیتیوم از باتری‌های یون‌لیتیومی متمرکز شده است، فرایند فروشوی زیستی برای دیگر منابع حاوی لیتیوم نیز بررسی شده است. نمونه‌های متعددی از فروشوی زیستی لیتیوم از منابع غیر از باتری‌های یون‌لیتیومی گزارش شده‌اند که نتایج متنوعی داشته‌اند. در مورد لپیدولیت، از کشت ترکیبی باکتری‌های *A. ferrooxidans* و مخمر *R. rubra* برای استخراج لیتیوم استفاده شد که توانستند ۴۷ میکروگرم لیتیوم را در هر گرم زیست‌توده میکروبی انباشته کنند و غلظت ۶۰ میکروگرم در لیتر لیتیوم در محلول استخراج‌شده به دست آورند [۳۲]. در مطالعه‌ای دیگر، مخمر *R. rubra* توانست با استفاده از محیط کشت مغذی ۴۱۲/۶ میکروگرم در هر گرم لیتیوم و ۲۵ میکروگرم در لیتر در محلول استخراج‌شده، در محیط کشت کم‌نمک ۱۸۱/۲ میکروگرم در هر گرم لیتیوم و ۸۹ میکروگرم در لیتر لیتیوم استخراج کند [۳۳]. همچنین از باکتری *A. ferrooxidans* برای فروشوی زیستی لپیدولیت استفاده شد که طی ۳۰ روز، تا ۱۴٪ (معادل حدود ۱۲ میلی‌گرم در لیتر) لیتیوم آزاد کرد [۳۴]. مقایسه سه سامانه مختلف فروشوی زیستی برای بازیابی لیتیوم از لپیدولیت نشان داد که کشت ترکیبی *A. ferrooxidans* و *A. thiooxidans* مؤثرترین بوده و در مدت ۳۳۶ روز توانسته ۱۱ میلی‌گرم در لیتر، لیتیوم حل کند. فروشوی زیستی با قارچ و مخمر سریع‌تر بوده و در ۴۰ روز تکمیل شده، اما بازده استخراج پایین‌تری داشته است. بازده نهایی فروشوی زیستی ۸/۸٪ برای کشت باکتریایی، ۰/۲٪ برای *A. niger* و ۱/۱٪ برای *R. mucilaginosa* گزارش شد [۳۵]. همچنین از قارچ‌های *Penicillium purpurogenum*، *A. niger* و مخمر *R. rubra* برای فروشوی زیستی اسپودومین استفاده شد که به ترتیب ۰/۷۵، ۱/۵۳ و ۱/۵۳ میلی‌گرم در لیتر لیتیوم در محیط کشت غنی بازیابی کردند. در محیط کشت فقیر، مقادیر بازیابی به ترتیب ۰/۳۷، ۰/۵ و ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر بود. در فروشوی زیستی جاداربت با *A. ferrooxidans*، نرخ استخراج لیتیوم بیش از ۵۰٪ افزایش یافت و طی ۲۱ روز بیش از ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر لیتیوم آزاد شد. با این حال، استخراج شیمیایی با H_2SO_4 مؤثرتر بود و حدود ۷۵٪ (۱۸۰ میلی‌گرم در لیتر) لیتیوم آزاد کرد، اما به مقدار بیشتری اسید نیاز داشت.

بازیابی ۸۴٪ برای لیتیوم، ۹۹/۹٪ برای کبالت، و ۹۹/۷٪ برای نیکل را تنها در دو روز به دست آورد. این مطالعه همچنین نشان داد که ضایعات آهن می‌تواند به عنوان جایگزینی مقرون‌به‌صرفه برای $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ عمل کند، اگرچه به دلیل تشکیل جاروسیت روی ذرات ضایعات، زمان فروشوی زیستی را افزایش می‌دهد [۲۱]. قابلیت باکتری اتوتروف *A. ferrooxidans* نیز در فروشوی زیستی لیتیوم و کبالت از باتری‌های مصرف‌شده مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه‌ای، از این باکتری برای استخراج لیتیوم با نرخ بازیابی ۹۴٪ و کبالت با ۹۹/۹٪ انحلال استفاده شد که منجر به تولید کربنات لیتیوم (Li_2CO_3) با خلوص بالا شد. آزمایش‌های الکتروشیمیایی روی Li_2CO_3 بازیافت‌شده، عملکرد مطلوبی با ظرفیت اولیه ۱۰۲ میلی‌آمپر ساعت بر گرم و ۷۹٪ حفظ ظرفیت پس از ۵۰ چرخه شارژ/دشارژ نشان داد. این نتایج پتانسیل لیتیوم فروشوی زیستی‌شده را در تولید مواد باتری پایدارتر و کارآمدتر برجسته کرد [۲۲]. همچنین، فرایند فروشوی زیستی با چگالی دوغاب بالا با *A. ferrooxidans* توانست ۹۴٪ کبالت و ۶۰٪ لیتیوم را طی ۷۲ ساعت بازیابی کند [۲۳]. علاوه بر این، تأثیر مواجهه با فلزات بر رشد قارچ و تولید اسید آلی به عنوان روشی برای افزایش کارایی فروشوی زیستی بررسی شد. در مطالعه‌ای، سه گونه قارچ *Penicillium*، *A. niger* و *chrysogenum* در معرض لیتیوم و کبالت قرار گرفتند تا تحمل فلزی و تولید زیست‌توده آن‌ها ارزیابی شود. مواجهه قبلی با این فلزات به مدت ۲۰ روز به طور قابل توجهی تحمل و تولید زیست‌توده *A. niger* را افزایش داد، که نشان داد سازگاری قارچ‌ها در مواجهه با فلزات می‌تواند برای بهبود فرایندهای فروشوی زیستی لیتیوم و کبالت از باتری‌های مصرف‌شده استفاده شود [۲۴]. قابلیت فروشوی زیستی برای بازیابی فلزات از باتری‌های مصرف‌شده $LiCoO_2$ نیز از طریق استفاده از کشت‌های ترکیبی *A. caldus* و *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* نشان داده شد. با استفاده از Fe^{2+} به عنوان عامل کاهنده، فرایند فروشوی زیستی کشت ترکیبی توانست ۹۹٪ کبالت و ۱۰۰٪ لیتیوم را بازیابی کند و به طور مؤثر چالش‌های بازده پایین فلزی در روش‌های فروشوی زیستی سنتی را برطرف کند [۲۵]. فروشوی زیستی همچنین با استفاده از عوامل زیستی جایگزین به دست آمده از بقایای ذرت توسط باکتری *Gluconobacter oxydans* برای بازیابی مواد حیاتی نظیر کبالت ترکیب شده است. این فرایند فروشوی زیستی از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه تشخیص داده شد و حاشیه سود ۲۱٪ را به همراه داشت، درحالی‌که به طور قابل توجهی انتشار CO_2 را در مقایسه با روش‌های هیدرومتالورژیکی سنتی کاهش داد [۶]. علاوه بر این، استفاده از پیریت (FeS_2) همراه با عنصر گوگرد (S) به عنوان عاملی زیستی در بهبود استخراج فلزات از LIBS قابل توجه بوده است. این ترکیب فعالیت باکتریایی، تولید اسید و تخریب ساختار باتری را بهبود بخشیده، سطح تماس برای کاهش فلزات را افزایش داده و به بازده استخراج ۱۰۰٪ برای لیتیوم و سایر فلزات دست یافته است [۲۶]. در نهایت، استفاده از میدان‌های مغناطیسی ایستای ضعیف برای تسریع فرایند فروشوی زیستی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه‌ای، اعمال میدان مغناطیسی ۳ میلی‌تسلا بر *A. ferrooxidans* به طور قابل توجهی بازیابی لیتیوم را تسریع کرده و طی دو روز به ۱۰۰٪ رسانده، درحالی‌که بازیابی بدون میدان مغناطیسی تنها ۵۷٪ بود. این رویکرد بر پتانسیل



شکل ۱ منابع لیتیوم شامل منابع جامد و مایع
Figure 1 Solid and liquid lithium resources



شکل ۲ کاربردهای مختلف لیتیوم در ذخیره‌سازی انرژی، صنایع هوافضا، سرامیک، متالورژی و علوم زیست‌پزشکی
Figure 2 Lithium applications in energy storage, aerospace industries, ceramics, metallurgy, and biomedical sciences

جدول ۱ مطالعات فروشویی زیستی انجام‌شده بر باتری‌های یون‌لیتیومی برای استخراج فلزات

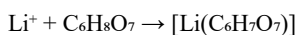
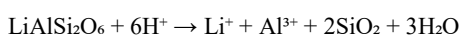
Table 1 Bioleaching studies on Li-ion batteries for metal extraction

No.	Microorganism / Process	Metal(s) Recovered	Recovery Efficiency	Key Findings	Reference
1	<i>Aspergillus niger</i>	Li, Mn, Cu, Al, Co, Ni	100% Li, 94% Cu	Fungal metabolites improved metal leaching efficiency for LIB recycling.	[18]
2	Biogenic ferric iron and sulfuric acid (indirect bioleaching)	Li, Other metals	60% Li	Sequential leach stages enhanced recovery, offering an eco-friendly alternative.	[19]
3	Acidophilic chemolithotrophic microorganisms	Li, Other metals	100% Li	Two-step bioleaching process demonstrated significantly higher recovery efficiency.	[20]

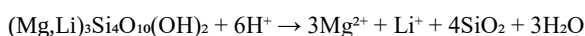
No.	Microorganism / Process	Metal(s) Recovered	Recovery Efficiency	Key Findings	Reference
4	Thermophilic bioleaching at 45 °C	Co, Ni, Li	99.9% Co, 99.7% Ni, 84% Li	Sulfur concentration and $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ improved metal recovery, with cost-effective alternatives explored.	[21]
5	<i>Aspergillus niger</i>	Li, Cu	95% Li, 100% Cu	Citric acid produced by the fungus outperformed chemical leaching methods.	[28]
6	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Li, Co	94% Li, 99.9% Co	High-purity lithium carbonate (Li_2CO_3) produced with superior electrochemical performance.	[22]
7	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Co, Li	94% Co, 60% Li	High pulp density and bacterial culture cycles provided an environmentally friendly method.	[23]
8	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium simplicissimum</i>	Li, Co	Enhanced tolerance and biomass in <i>A. niger</i>	Metal pre-exposure enhanced fungal tolerance, beneficial for bioleaching.	[24]
9	<i>Acidithiobacillus caldus</i> , <i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>	Li, Co	99% Co, 100% Li	Mixed-culture bioleaching improved metal recovery, with appropriate reductants highlighted.	[25]
10	<i>Gluconobacter oxydans</i> (corn stover-derived biolixiviant)	Li, Co	Economically viable, sustainable	Bioleaching process more sustainable than traditional methods, with a 21% profit margin.	[6]
11	Pyrite (FeS_2) + Elemental sulfur (S_0)	Li, Ni, Co, Mn	100% leaching efficiency	Sulfur combination enhances bacterial activity and improves metal extraction.	[26]
12	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Li, Ni, Co	100% Li	Weak static magnetic field accelerated bioleaching kinetics, improving recovery efficiency.	[27]
13	Optimized bioleaching conditions of <i>Gluconobacter oxydans</i>	Li, Co, Ni, Mn	100% Li, 71%-86% Co, 57%-84% Ni, 100% Mn	Optimal conditions achieved high recovery rates, with potential for cost-effective recycling.	[29]
14	Bioleaching residue	Graphite (anode material)	99.78% purity	Mild acid cleaning and calcination regenerated high-purity graphite with excellent electrochemical performance.	[30]
15	Bioleaching residue	Graphite (anode material)	99.78% purity	Bioleaching residue process enhanced graphite purity and performance, surpassing commercial material.	[31]

رایج‌اند. سایر باکتری‌ها مانند *Leptospirillum A. thiooxidans* و *ferrooxidans* گونه‌های *Sulfobacillus* و *Alicyclobacillus* نیز به کار می‌روند. برخی از باکتری‌ها مانند *Acidithiobacillus caldus* و *L. ferriphilum* در دماهای بالاتر تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد فعالیت دارند. شیمی‌آلی‌پروردها که از کربن آلی برای انرژی استفاده می‌کنند، شامل قارچ‌ها و مخمرهایی هستند که اسیدهای آلی مختلف مانند سیتریک، ایزالیک و مالیک تولید می‌کنند که به انحلال فلزات کمک می‌کنند. از میان قارچ‌ها، *A. niger* به دلیل تولید اسیدهای آلی و نفوذ به ساختارهای معدنی به کار می‌رود. مخمرهایی مانند *Rhodotorula mucilaginosa* و *R. rubra* نیز عملکرد خوبی در این فرایند دارند. استفاده از کشت‌های مخلوط میکروبی شامل ترکیبی از باکتری‌ها و مخمرها نیز موجب افزایش کارایی فروشویی می‌شود. برای مثال، ترکیب *A. ferrooxidans* با *R. rubra* اثرات هم‌افزایی دارد و تولید زیست‌توده و انحلال فلز را بهبود می‌بخشد. در مجموع، ریزاندامگان‌های مختلفی با فعالیت‌های متابولیکی گوناگون در فروشویی لیتیوم به کار می‌روند و می‌توان با تنظیم عواملی مانند pH، دما، تراکم مواد معدنی و در دسترس بودن مواد مغذی، کارایی این فرایند را بهینه کرد [۳۷ و ۳۳ و ۳۵].

در فروشویی زیستی لیتیوم، ریزاندامگان‌ها از طریق انواع سازوکارها به استخراج فلزات کمک می‌کنند. اما روش هم‌تافت‌کافت بسیار مؤثر است، زیرا اسیدهای آلی تولیدشده توسط میکروب‌ها مانند اسیدسیتریک می‌توانند لیتیوم را از مواد معدنی مانند اسپودومن ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) و هکتوریت آزاد کنند. به‌عنوان نمونه، در واکنش اسپودومن با یون‌های H^+ ، لیتیوم آزاد شده، سپس با اسید سیتریک ترکیب می‌شود و هم‌تافت محلول لیتیوم تشکیل می‌دهد:



علاوه بر هم‌تافت‌کافت، روش اسیدکافت نیز در استخراج لیتیوم کاربرد دارد، زیرا لیتیوم در محیط‌های اسیدی به‌خوبی حل می‌شود. ریزاندامگان‌هایی مانند *Acidithiobacillus* با تولید اسیدسولفوریک، لیتیوم را در بین مواد معدنی حل کرده، به استخراج آن کمک می‌کنند. برای مثال، در فرایند اسیدکافت هکتوریت، یون‌های H^+ با این کانی واکنش داده، یون‌های لیتیوم، منیزیم و سیلیس آزاد می‌شوند:



این واکنش‌ها نشان می‌دهند که ریزاندامگان‌ها با تولید اسید و هم‌تافت‌های آلی نقش مهمی در استخراج لیتیوم ایفا می‌کنند.

۵ عوامل مؤثر بر فروشویی لیتیوم

فروشویی از ریزاندامگان‌ها برای استخراج فلزات استفاده می‌کند. چندین عامل می‌توانند بر کارایی فروشویی لیتیوم تأثیر بگذارند، از جمله ریزاندامگان‌ها، غلظت دوغاب، pH، دما، مواد مغذی، زمان فروشویی، هوادهی، توان اکسایش-کاهش و دیگر عوامل که در شکل ۳ قابل مشاهده

برای زینوالدیت، از کشت ترکیبی باکتری‌های گوگرداکسیدکننده، شامل *Acidithiobacilli*، برای فروشویی زیستی استفاده شد که در آزمایش‌های ناپیوسته با افزودن گوگرد، ۱۱٪ و در آزمایش‌های راکتوری ۲۶٪ لیتیوم را بازیابی کردند. در فروشویی زیستی آلومینوسیلیکات‌ها، سازوکارهای مرتبط با ریزاندامگان‌های دگرپرورد مطالعه شده و برای میکاها نیز بازیابی لیتیوم با استفاده از باکتری‌های گوگرداکسیدکننده بررسی شده است. فروشویی زیستی لیتیوم از سنگ‌های سخت به اندازه روش‌های دیگر رایج نیست، اما این مطالعات نشان می‌دهند که ریزاندامگان‌های مختلف قابلیت استخراج لیتیوم از منابع معدنی گوناگون را دارند [۳۵]. جدول ۲ مطالعات پیشین در فروشویی زیستی لیتیوم از منابع جامد را نمایش می‌دهد.

۴-۳ سازوکار ریزاندامگان‌های مستعد در فروشویی زیستی لیتیوم

در فرایند فروشویی برای استخراج لیتیوم، دو سازوکار اصلی تعریف می‌شود: مستقیم (تماسی) و غیرمستقیم (غیرتماسی). با این حال، استخراج لیتیوم عمدتاً از طریق سازوکار غیرمستقیم انجام می‌شود. در روش مستقیم، ریزاندامگان‌ها به‌صورت فیزیکی به سطح ماده جامد متصل می‌شوند و از طریق واکنش‌های اکسایش/کاهش و انتقال الکترون، انحلال فلز را تسهیل می‌کنند که اغلب با استفاده از مواد پلیمری خارج سلولی (EPS) صورت می‌گیرد. با این حال، این روش برای لیتیوم چندان کارآمد نیست و سازوکار غیرمستقیم ترجیح داده می‌شود. در روش غیرمستقیم، عوامل شیمیایی تولیدشده توسط ریزاندامگان‌ها بدون تماس مستقیم باعث انحلال فلز می‌شوند. یکی از سازوکارهای اصلی در این روش، اسیدکافت (Acidolysis) است که طی آن پروتون‌های اسیدهای تولیدشده مانند اسیدسیتریک با اتم‌های اکسیژن سطح فلز واکنش داده، یون‌های فلز را آزاد می‌کنند. در سازوکار اکسایش-کاهش کافت (Redoxolysis)، فلزات در محیط اسیدی اکسید یا احیا می‌شوند و سرعت آزادسازی فلز به نوع و حالت اکسایش آن بستگی دارد. همچنین در هم‌تافت کافت (Complexolysis)، اسیدهای آلی با یون‌های فلزی هم‌تافت (Complex) تشکیل داده و به انحلال آن‌ها کمک می‌کنند. فروشویی لیتیوم عمدتاً از طریق اسیدکافت انجام می‌شود، زیرا اسیدهای زیستی فرایند انحلال لیتیوم را تسهیل می‌کنند. در این فرایند، pH پایین معمولاً مناسب‌تر است، زیرا انحلال لیتیوم وابسته به اسید است [۱۵ و ۳۶].

ریزاندامگان‌ها نقش کلیدی در فروشویی لیتیوم دارند و بر اساس منابع تغذیه و انرژی خود به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: شیمی‌کانی‌پروردها و شیمی‌آلی‌پروردها (Chemoorganotroph). شیمی‌کانی‌پروردها موجوداتی هستند که از ترکیبات معدنی برای انرژی و از دی‌اکسیدکربن به‌عنوان منبع کربن استفاده می‌کنند. این ریزاندامگان‌ها در شرایط اسیدی، معمولاً با pH کمتر از ۲ رشد می‌کنند. باکتری‌های جنس *Acidithiobacillus* و *Leptospirillum* از جمله شیمی‌کانی‌پروردهایی هستند که از طریق اکسایش آهن دو ظرفیتی (Fe^{2+}) و ترکیبات گوگردی انرژی کسب می‌کنند و اسیدسولفوریک تولید می‌کنند که به کاهش pH و انحلال فلزات کمک می‌کند. باکتری‌هایی مانند *A. ferrooxidans* که اسیدسولفوریک تولید می‌کنند و از CO_2 به عنوان منبع کربن استفاده می‌کنند، در فروشویی لیتیوم

هستند. ریزاندامگان‌های مختلفی مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها و مخمرها برای فروشویی قابل استفاده هستند. باکتری‌های معمولی مانند *A. ferrooxidans* و *A. thiooxidans* تولید اسیدسولفوریک می‌کنند که به انحلال فلزات کمک می‌کند. قارچ‌هایی مانند *A. niger* و گونه‌های *Penicillium* اسیدهای آلی تولید می‌کنند که می‌توانند فلزات را حل کنند، درحالی‌که مخمرهایی مانند *R. rubra* و *R. mucilaginosa* نیز قابل استفاده هستند. ریزاندامگان‌ها همین‌طور می‌توانند لیتیوم را در سلول‌های خود انباشته کنند. غلظت دوغاب به غلظت مواد جامد در محلول فروشویی اشاره دارد و تأثیر زیادی بر کارایی فروشویی دارد. غلظت‌های پایین‌تر دوغاب معمولاً باعث کارایی بالاتر فروشویی می‌شوند، چنانچه در مطالعه‌ای نشان داده شد که غلظت‌های بالاتر کبالت و لیتیوم در غلظت‌های ۰/۱٪ و ۰/۵٪ دوغاب نسبت به ۱٪ بهتر استخراج شدند. با این حال، غلظت‌های پایین‌تر دوغاب نیاز به حجم بیشتری از محیط و مواد مغذی دارند. غلظت‌های بالاتر دوغاب می‌توانند هزینه‌ها را کاهش دهند، اما ممکن است رشد ریزاندامگان‌ها را به دلیل افزایش غلظت مواد سمی از ضایعات محدود کنند. به عنوان مثال، کارایی فروشویی برای کبالت و لیتیوم زمانی که غلظت دوغاب از ۱٪ به ۴٪ افزایش یافت، کاهش یافت [۳۸]. برخی مطالعات با استفاده از فرایندی دو مرحله‌ای به استخراج بالاتر فلزات در غلظت‌های بالاتر دوغاب دست یافته‌اند که در آن ابتدا ریزاندامگان‌ها در محیط مغذی رشد داده می‌شوند و سپس مواد به آن اضافه می‌شود. pH محلول فروشویی برای این فرایند بسیار حیاتی است و شرایط اسیدی معمولاً برای فروشویی لیتیوم ترجیح داده می‌شود. انحلال اسیدی اصلی‌ترین سازوکار برای بازیابی لیتیوم است و ریزاندامگان‌های خودپرورد مانند *Acidithiobacillus* در محیط‌های اسیدی به خوبی رشد می‌کنند. pH می‌تواند به دلیل تولید اسیدسولفوریک توسط ریزاندامگان‌ها کاهش یابد. pH اولیه برابر با ۲/۵ در مطالعه‌ای بیشترین بازیابی لیتیوم را به همراه داشت، اگرچه مصرف زیاد اسید می‌تواند باعث افزایش pH شود که ممکن است رشد سلولی و کارایی فروشویی را کاهش دهد [۳۹]. دما همچنین بر رشد و فعالیت ریزاندامگان‌ها در طول فرایند فروشویی تأثیر می‌گذارد. باکتری‌های میان‌دمادوست (Mesophilic) بهترین رشد را در دماهای معتدل، حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد، دارند. مطالعه‌ای نشان داد که کشت مخلوطی از *A. ferrooxidans* و *A. thiooxidans* بهترین رشد را در این دما داشت. ریزاندامگان‌ها همچنین برای رشد و فعالیت متابولیکی خود به مواد مغذی نیاز دارند. منابع کربن و نیتروژن مانند گلوکز و سولفات آمونیوم برای ریزاندامگان‌های دگرپرورد مانند قارچ‌ها و مخمرها ضروری هستند [۳۹]. آهن می‌تواند به عنوان اهداکننده الکترون برای برخی باکتری‌ها عمل کند و فعالیت متابولیکی آن‌ها را افزایش دهد و افزودن یون‌های آهن می‌تواند فعالیت باکتری‌های اسیددوست را تقویت کند. گوگرد نیز ماده‌ای مغذی و ضروری برای باکتری‌های گوگرداکسیدکننده است. مدت زمان فرایند فروشویی می‌تواند تأثیر زیادی بر مقدار فلز بازیابی‌شده داشته باشد. فروشویی ممکن است فرایندی کند باشد و زمان‌های طولانی‌تری برای بازیابی بالاتر فلزات نیاز داشته باشد. برای مثال، کشت مخلوط باکتریایی به ۳۳۶ روز زمان نیاز داشت تا به بازده نهایی فروشویی خود در مطالعه‌ای دست یابد. با این حال، مطالعات دیگر نشان داده‌اند که فروشویی کارآمد در مدت زمان‌های کوتاه‌تر، مانند ۸ روز، با استفاده از افزودن تدریجی

اسیدسولفوریک زیست‌زاد (Biogenic) صورت گرفته است [۳۵]. غلظت اکسیژن در محیط فروشویی، همچنین می‌تواند بر فعالیت ریزاندامگان‌ها تأثیر بگذارد. توان اکسایش-کاهش محلول فروشویی که به واکنش‌های اکسایش و احیا مرتبط است، عامل دیگری است که اهمیت دارد. توان اکسایش-کاهش بین ۵۰۰ و ۶۰۰ میلی‌ولت نشان داده شده است که انحلال کالکوپریت را تسهیل می‌کند [۴۰]. عوامل دیگر شامل اندازه ذرات است که می‌تواند بر کارایی فروشویی تأثیر بگذارد. اندازه ذرات کوچک‌تر معمولاً به فروشویی بهتر منجر می‌شود. تطابق ریزاندامگان‌ها با ضایعات و سمیت آن نیز می‌تواند فروشویی را تقویت کند، و افزودن تدریجی اسیدسولفوریک زیست‌زاد در غلظت دوغاب بالا می‌تواند بازیابی فلزات را بهبود بخشد. در نتایج فروشویی، *Penicillium sp.* JM24 پس از ۳۰ روز، ۷۷/۸۷٪ کبالت و ۹۹/۸۸٪ لیتیوم را در غلظت دوغاب ۰/۱٪ فروشویی کرد. *A. thiooxidans* با استفاده از افزودن تدریجی اسیدسولفوریک زیست‌زاد در غلظت دوغاب بالای ۶۰ گرم در لیتر، ۹۳٪ لیتیوم و ۵۳٪ منگنز را بازیابی کرد. کشت مخلوطی از *A. ferrooxidans* و *A. thiooxidans* پس از ۳۳۶ روز، ۸/۸٪ لیتیوم را از لپیدولیت بازیابی کرد. علاوه بر این، *A. niger* با استفاده از روش فروشویی محیط مصرف‌شده ۱۰۰ درصد لیتیوم را از باتری‌های یون‌لیتیومی بازیابی کرد [۱۱].

۶ مباحث نوین در فروشویی زیستی

فروشویی زیستی، با وجود این‌که روشی دوستدار محیط‌زیست محسوب می‌شود، با چالش‌ها و محدودیت‌هایی روبه‌رو است. این فرایند معمولاً کند پیش می‌رود و ممکن است هفته‌ها یا حتی ماه‌ها طول بکشد تا مقدار قابل‌توجهی فلز استخراج شود که آن را برای صنایع با تقاضای بالا کمتر کارآمد می‌کند. همچنین، برخی فلزات مانند آلومینیوم و عناصر نادر خاکی به دلیل ویژگی‌های شیمیایی خود به سختی از طریق فروشویی زیستی بازیابی می‌شوند. علاوه بر این، اجرای این روش در مقیاس بزرگ نیازمند تنظیم دقیق شرایط محیطی مانند pH، دما و مواد مغذی است که پیچیدگی آن را افزایش می‌دهد. پیشرفت‌های اخیر در فروشویی زیستی همچون علوم دیگر تحت تأثیر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و روش‌های بهینه‌سازی قرار گرفته‌اند. این فناوری‌ها راهکارهای نوینی برای بهبود کارایی، پیش‌بینی‌پذیری و مقیاس‌پذیری در این حوزه ارائه کرده‌اند. این نوآوری‌ها نوبدبخش پیشرفت‌های چشمگیر در فروشویی زیستی لیتیوم و به‌طور کلی فرایندهای بازیابی فلزات هستند. یادگیری عمیق به عنوان ابزاری تحول‌آفرین در تحقیقات فروشویی زیستی، به‌ویژه در تحلیل تعاملات میکروبی، ظاهر شده است. برای مثال، مطالعه‌ای نشان داد که شبکه‌های عصبی عمیق می‌توانند تصاویر میکروسکوپی الگوهای استقرار (Colonization) فیلم زیستی روی کالکوپریت را با دقتی حدود ۹۰ درصد طبقه‌بندی کنند، که بسیار بالاتر از عملکرد پژوهشگران انسانی (تقریباً ۵۰٪) است [۴۱]. این قابلیت امکان شناسایی سریع و دقیق ترکیب باکتریایی را فراهم کرده، نیاز به روش‌های بیوشیمیایی سنتی و پرحمت را برطرف می‌کند.

جدول ۲ مطالعات فروشویی زیستی انجام‌شده بر منابع جامد برای استخراج لیتیوم

Table 2 Bioleaching studies on solid sources for lithium extraction

Source	Microorganism(s)	Conditions	Results	Reference
Lepidolite	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> + <i>Rhodotorula rubra</i>	Mixed culture	47 µg/g Li in biomass, 60 µg/L in leach liquor	[32]
	<i>Rhodotorula rubra</i>	Nutrient medium	412.6 µg/g Li in biomass, 25 µg/L in leach liquor	[33]
	<i>Rhodotorula rubra</i>	Salt-limited medium	181.2 µg/g Li in biomass, 89 µg/L in leach liquor	[33]
	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Single culture	~14% (12 mg/L) Li released	[34]
	<i>A. ferrooxidans</i> + <i>A. thiooxidans</i>	Mixed consortium	11 mg/L Li dissolved	[35]
	<i>Aspergillus niger</i>	Fungal bioleaching	0.2% Li extraction	
	<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	Yeast bioleaching	1.1% Li extraction	
	<i>A. ferrooxidans</i> + <i>A. thiooxidans</i>	Bacterial consortium	8.8% Li extraction	
Spodumene	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Single culture	~14% (12 mg/L) Li released	[35]
	<i>Penicillium purpurogenum</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>R. rubra</i>	Nutrient-rich medium	1.26, 0.75, and 1.53 mg/L Li recovered, respectively	
	<i>P. purpurogenum</i> , <i>A. niger</i> , <i>R. rubra</i>	Nutrient-poor medium	1.06, 0.37, and 0.5 mg/L Li recovered, respectively	
Jadarite	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Accelerated leaching	>120 mg/L Li released	[32]
	Chemical leaching (H ₂ SO ₄)	Comparatively higher acid use	~75% (180 mg/L) Li released	
Zinnwaldite	Sulfur-oxidizing bacteria	Batch experiments	11% Li recovery	[34]
	Sulfur-oxidizing bacteria	Bioreactor experiments	26% Li recovery	
Aluminosilicates	Heterotrophic microorganisms	Not specified	Mechanisms studied	[35]



شکل ۳ عوامل مؤثر بر فروشویی لیتیوم

Figure 3 Effective parameters on lithium bioleaching

مدل‌سازی پیش‌بینی‌محور مبتنی بر هوش مصنوعی نقش مهمی در بهینه‌سازی عوامل فروشویی زیستی ایفا کرده است. مدل‌های گرادیان بوستینگ که با روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology, RSM) بهینه‌سازی شده‌اند، موفقیت‌های قابل‌توجهی در پیش‌بینی بازایی مس در مرحله برق‌کافت (Electrolysis) فروشویی زیستی نشان داده‌اند. یکی از این مدل‌ها، با استفاده از زیست‌حسگر RGB، به دقت پیش‌بینی ۸۴ درصد دست یافت که کاربرد آن را در بهینه‌سازی عملیات در کارخانه‌های نیمه‌صنعتی بازایافت زباله‌های الکترونیکی نشان می‌دهد [۴۲]. در فروشویی قارچی نیز از هوش مصنوعی بهره برده شده است. در تحقیقی که از شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network, ANN) و ماشین‌های بردار پشتیبان (Support Vector Machine, SVM) استفاده کردند، دقت پیش‌بینی بازایی فلزات از صفحات مدار چاپی ضایعاتی را افزایش دادند. این مدل‌ها به بیشینه بازده فروشویی زیستی ۸۶ درصد برای مس، ۵۱ درصد برای نیکل و ۱۰۰ درصد برای روی دست یافتند که کارایی فرایند فروشویی زیستی دومرحله‌ای تحت شرایط بهینه را نشان می‌دهد [۴۳]. همچنین، فروشویی زیستی آنزیمی فلزات از طریق RSM و مدل‌های AI بهینه‌سازی شده، نرخ بازایی ۱۰۰ درصد برای مس و روی به دست آمده است. مدل‌های ANN به‌طور مداوم در دقت پیش‌بینی از SVM بهتر عمل کرده‌اند. علاوه بر این، بازایی انتخابی فلزات بیش از ۹۹ درصد از طریق رسوب شیمیایی تحقق یافته است که توانایی راهبردهای استخراج پایدار و هدفمند را نشان می‌دهد [۴۴]. در زمینه بازایافت باتری‌های یون‌لیتیومی، افزایش تولید زیست‌توده *A. niger* مورد توجه بوده است. با استفاده از وایزش (Regression) بردار پشتیبان و اعتبارسنجی متقاطع v-fold، پژوهشگران غلظت زیست‌توده را تا ۲۵ گرم بر لیتر بهینه‌سازی کردند و پیش‌بینی‌های پایدار و دقیقی به‌دست آوردند [۴۵]. این پیشرفت نشان‌دهنده قابلیت ادغام ابزارهای ML برای بهبود کارایی فروشویی زیستی در کاربردهای تجاری است. همچنین، کاربردهای وسیع ML در پژوهش‌های فروشویی زیستی با شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر نرخ‌های بازایی، فرایندها را تسهیل کرده است. مدلی مبتنی بر وایزش جنگل تصادفی که بر ۸۷۱ نمونه از ۲۰۶ مطالعه آموزش دیده بود، نرخ بازایی فلزات را با دقت ۷۷ درصد پیش‌بینی کرد و اهمیت عواملی مانند نوع منبع، اندازه و چگالی ذرات، دما و انتخاب میکروبی را نشان داد [۴۶]. این رویکرد مبتنی بر داده هزینه‌های آزمایشی را کاهش داده و توسعه فرایندها را تسريع می‌کند. شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی سامانه‌های پیچیده فروشویی زیستی مانند بازایی مولیبدن از کاتالیزورهای مصرف‌شده نیز مؤثر بوده‌اند. پیکربندی بهینه ANN به دقت پیش‌بینی بالایی ($R^2 = 0.988$) دست یافت که توانایی آن را در مواجهه با شرایط عملیاتی متنوع نشان می‌دهد [۴۷]. در فروشویی زیستی منگنز، یادگیری ماشین بهینه‌سازی فرایند را در استخراج پیرولوسیت تحت میدان الکتریکی تسهیل کرده است. وایزش بردار پشتیبان با دستیابی به بالاترین دقت پیش‌بینی ($R^2 = 0.92$) عوامل کلیدی مانند غلظت اسیدسولفوریک و سولفات آهن را شناسایی کرده است [۴۸]. این روش‌های نوین توانایی تحول‌آفرین ادغام AI، ML و روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی در فرایندهای فروشویی زیستی را نشان می‌دهند و راه را برای بازایی کارآمدتر و پایدارتر لیتیوم و سایر فلزات حیاتی هموار می‌کنند.

زیست‌شناسی سنتزی و زیست‌شناسی سامانه‌ای نیز به‌عنوان حوزه‌های نوظهور، توانایی تحول‌آفرینی در بهبود کارایی و کاربردهای فروشویی زیستی دارند. با بهره‌گیری از اصول مهندسی و ابزارهای پیشرفته زیستی، این حوزه‌ها راهبردهای جدیدی را برای بهینه‌سازی فرایند بازایی فلزات ارائه می‌دهند. زیست‌شناسی سنتزی و سامانه‌ای از رویکرد ساختاریافته‌ای با نام «طراحی، ساخت، آزمایش و یادگیری» استفاده می‌کند تا ریزاندامگان‌هایی با قابلیت‌های بهبودیافته در فروشویی زیستی ایجاد کند. این روش شامل استانداردسازی اجزای ژنتیکی برای ایجاد واحدهای رونویسی و اپرون‌هایی است که امکان توسعه کتابخانه‌های ژنتیکی و غربال‌گری صفات مطلوب را فراهم می‌کنند [۴۹]. ریزاندامگان‌های اسیددوست می‌توانند به‌طور ژنتیکی اصلاح شوند تا در شرایط pH بسیار پایین مقاوم‌تر شوند و بازدهی بیشتری در بازایی فلزات داشته باشند. همچنین، می‌توان با تکثیر پلاسمیدها کارایی موجودات غیرمدل را بهبود بخشید. علاوه بر این، با اصلاحات ژنتیکی می‌توان سویه‌های مقاوم‌تر و کارآمدتری ایجاد کرد که در شرایط محیطی متنوع به‌خوبی عمل کنند. مواد پلیمری برون‌سلولی (EPS) در فروشویی زیستی نقش مهمی ایفا می‌کنند و زیست‌شناسی سنتزی این امکان را فراهم می‌کند که این مواد را برای تسهیل واکنش‌های اکسایش-کاهش خاص و بهبود توانایی اتصال به فلزات اصلاح کرد. همچنین، می‌توان سطح میکروبی را به گونه‌ای طراحی کرد که گروه‌های کربوکسیلی در EPS برای اتصال به یون‌های فلزی دسترس‌پذیرتر شوند. با بیان بیش از حد پروتئین‌های پاسخ به تنش، می‌توان مقاومت میکروب‌ها را در برابر محیط‌های اسیدی و سمی افزایش داد [۵۰]. مدل‌سازی پیشرفته متابولیکی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای نیز برای بهینه‌سازی تولید عوامل فروشویی زیستی مانند سیانید به کار رفته‌اند و کارایی استخراج را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده‌اند [۵۱]. زیست‌شناسی سنتزی همچنین استفاده از متالوتئین‌ها و فیتوکلاتین‌ها - پپتیدهای غنی از سیستئین - را تسهیل می‌کند که به جذب فلزات در سطح میکروبی کمک کرده و مانند اسفنج‌های مولکولی، فلزات را در داخل سلول جمع‌آوری می‌کنند. سامانه‌های CRISPR-Cas9 نیز به ریزاندامگان‌ها توانایی دفاع در برابر عفونت‌های فازی در طول فرایند فروشویی زیستی را می‌دهند. زیست‌شناسی سامانه‌ای، مکمل زیست‌شناسی سنتزی است و با ارائه درک جامعی از سامانه‌های میکروبی و تعاملات آن‌ها در محیط‌های فروشویی زیستی، نقش مهمی ایفا می‌کند. با استفاده از ابزارهای محاسباتی و تجربی، این حوزه بهینه‌سازی‌های میکروبی را از طریق مطالعه تعامل بین گونه‌های مختلف ممکن می‌سازد و جمعیت میکروبی متعادل برای بازایی بهتر فلزات طراحی می‌کند. روش‌های امیکس به محققان کمک می‌کنند تا نقش‌های عملکردی میکروب‌ها را در محیط‌های پیچیده استخراج درک کنند. مدل‌سازی مبتنی بر محدودیت نیز مسیرهای متابولیکی را برای بهبود تولید عوامل فروشویی زیستی و بهینه‌سازی رفتار میکروبی شناسایی می‌کند. با وجود پتانسیل بالای این حوزه‌ها، یکپارچه‌سازی زیست‌شناسی سنتزی و سامانه‌ای در فروشویی زیستی صنعتی با چالش‌هایی همراه است [۵۰ و ۵۱]. پذیرش اجتماعی اندامگان‌های اصلاح‌شده ژنتیکی یکی از موانع اصلی است. علاوه بر این، مسائل مربوط به مقیاس‌پذیری نیازمند سرمایه‌گذاری‌های فناورانه و اقتصادی قابل‌توجهی برای انتقال موفقیت‌های آزمایشگاهی به عملیات صنعتی است. پیشرفت‌های زیست‌شناسی سنتزی و

با این حال، پیشرفت‌ها در مهندسی ژنتیک، زیست‌شناسی مولکولی و زیست‌داده‌ورزی (Bioinformatics) فرصت‌هایی برای رفع این چالش‌ها فراهم می‌کنند و توسعه سویه‌های میکروبی کارآمدتر و فرایندهای بهینه‌شده فروشویی را امکان‌پذیر می‌سازند [۵۸]. کشورهایی مانند چین، کره جنوبی و برزیل در تلاش‌های خود برای تحقیق و اجرای شیوه‌های بازیافت پایدار پیشرو هستند و اهمیت بازیابی لیتیوم برای تأمین نیازهای آینده به رسمیت می‌شناسند [۵۹]. همکاری‌های مشترک بین محققان، صنایع و دولت‌ها برای ترجمه یافته‌های آزمایشگاهی به کاربردهای صنعتی مقیاس‌پذیر بسیار حیاتی خواهد بود. اگرچه تاکنون عملیات فروشویی در مقیاس صنعتی برای بازیابی لیتیوم محقق نشده است، اما این روش قابلیت بالایی دارد. با تلفیق فروشویی با روش‌های موجود بازیافت و پیشرفت در فناوری‌های میکروبی، فروشویی لیتیوم می‌تواند نقشی تحول‌آفرین در حمایت از اقتصاد چرخشی و تأمین پایدار این فلز حیاتی ایفا کند [۶۰].

۸ جمع‌بندی و چشم‌اندازهای پیش رو

فروشویی روشی امیدبخش، پایدار و دوستدار محیط‌زیست برای بازیابی فلزات ارزشمند از باتری‌های یون‌لیتیومی مستعمل به‌شمار می‌آید. با افزایش تقاضا برای فلزاتی مانند لیتیوم، کبالت، نیکل و سایر فلزات حیاتی، فروشویی جایگزینی مناسب برای روش‌های سنتی ارائه می‌دهد که وابستگی به مواد شیمیایی خطرناک را کاهش داده، مصرف انرژی را به حداقل می‌رساند و امکان بازیابی انتخابی فلزات را فراهم می‌کند. در این فرایند، سویه‌های میکروبی نظیر *Aspergillus* و *Acidithiobacillus* نقش بسیار مؤثری ایفا می‌کنند. این فناوری با اصول اقتصاد چرخشی هم‌خوانی دارد و با استفاده مجدد از مواد ارزشمند منابع ثانویه، به افزایش بهره‌وری منابع و کاهش ضایعات کمک می‌کند. تحقیقات نشان داده‌اند که با بهینه‌سازی شرایط فرایندی مانند pH، در دسترس بودن مواد مغذی و چگالی دوغاب، نرخ بازیابی فلزات در فروشویی به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. مقرون‌به‌صرفه بودن این روش نسبت به روش‌های سنتی پرمصرف، پتانسیل آن را برای استفاده گسترده در مقیاس صنعتی برجسته‌تر می‌کند. افزون بر این، فروشویی کاربردی گسترده دارد و می‌تواند برای انواع زباله‌های الکترونیکی فراتر از باتری‌های یون‌لیتیومی نیز استفاده شود و تأثیرات مثبت زیست‌محیطی و اقتصادی بیشتری به همراه داشته باشد. پس از فروشویی، در پایین دست فرایند، فلزات حل‌شده در آب را می‌توان با روش‌های مختلفی بازیابی کرد، از جمله رسوب‌دهی شیمیایی، جذب، تبادل یونی و روش‌های الکتروشیمیایی. در رسوب‌دهی شیمیایی، با افزودن موادی مانند هیدروکسیدها، سولفیدها یا کربنات‌ها، ترکیبات نامحلول فلزی تشکیل شده، به‌راحتی جدا می‌شوند. جذب سطحی با استفاده از موادی مانند کربن فعال، زغال‌زیستی یا رزین‌های خاص، یون‌های فلزی را از محلول جدا می‌کند. در تبادل یونی، رزین‌های مصنوعی به‌طور انتخابی یون‌های فلزی را جذب کرده، سپس با فرایندی جداگانه آزادسازی و بازیابی می‌شوند. رسوب‌دهی الکتریکی فلزات از محلول یا استخراج الکتروشیمیایی نیز با اعمال جریان

سامانه‌ای ظرفیت تغییر و تحول در فروشویی زیستی را دارند. با ایجاد ریزاندامگان‌های مقاوم و کارآمد و بهینه‌سازی تعاملات میکروبی، این فناوری‌ها راه را برای بازیابی پایدار فلزات هموار می‌کنند و جایگزینی دوستدار محیط زیست برای روش‌های شیمیایی سنتی ارائه می‌دهند که نیاز فزاینده به فلزات حیاتی را به شکلی سازگار با طبیعت پاسخ می‌دهند.

۷ فروشویی لیتیوم در صنایع

بازیابی مواد زائد به‌ویژه از باتری‌های یون‌لیتیومی مستعمل، نقش بسیار مهمی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار و پیشبرد شیوه‌های صنعتی پایدار دارد. با افزایش تقاضا برای دستگاه‌های قابل حمل و وسایل نقلیه الکتریکی، استفاده از باتری‌های یون‌لیتیومی به‌طور چشمگیری افزایش یافته، نیاز به روش‌های بازیافت کارآمد را برجسته کرده است. روش‌های مرسوم بازیافت مانند پیرومتالورژی، هیدرومتالورژی و فرایندهای شیمیایی به‌طور گسترده برای بازیابی فلزات ارزشمندی مانند کبالت (Co) و نیکل (Ni) استفاده می‌شوند. اما بازیابی لیتیوم در عملیات صنعتی به حداقل می‌رسد، که عمدتاً به دلیل محدودیت‌های این روش‌ها است [۵۳ و ۵۴]. این چالش نشان‌دهنده نیاز به رویکردهای نوآورانه‌ای مانند فروشویی است که جایگزینی دوستدار محیط‌زیست برای روش‌های سنتی ارائه می‌دهد و به طور انتخابی فلزات را استخراج می‌کند [۵۵].

فروشویی لیتیوم از فعالیت‌های متابولیکی ریزاندامگان‌ها برای استخراج لیتیوم از سنگ‌معدن‌ها، آب‌نمک‌ها و مواد زائد استفاده می‌کند و راه‌حلی پایدار و مقرون‌به‌صرفه ارائه می‌دهد. برخلاف روش‌های متداول مانند فروشویی اسیدی و گرمادهی در دماهای بالا، فروشویی زیستی آسیب محیطی را به حداقل رسانده و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. هرچند فروشویی لیتیوم از منابع اولیه مانند اسپودومن و لپیدولیت به‌دلیل ماهیت مقاوم آن‌ها چالش‌برانگیز است، اما ریزاندامگان‌هایی مانند *A. ferrooxidans* و *L. ferrooxidans* توانسته‌اند با ایجاد محیط‌های اسیدی، ساختارهای معدنی را تجزیه کرده و امکان بازیابی لیتیوم را فراهم کنند [۵۶]. کاربرد فروشویی در بازیافت منابع ثانویه، مانند باتری‌های مستعمل، امکان‌پذیری و قابلیت فوری بیشتری نشان داده است. افزایش حجم پسماند باتری‌ها از وسایل نقلیه الکتریکی و سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر، بازیافت کارآمد را به اولویتی فوری تبدیل کرده است [۵۳ و ۵۷]. مطالعات در مقیاس آزمایشی توانسته‌اند تا ۹۰ درصد لیتیوم را از کاتدهای باتری بازیابی کنند و قابلیت صنعتی فروشویی را در چارچوب اقتصاد چرخشی نشان دهند. با این حال، مقیاس‌پذیری همچنان چالشی مهم است و سامانه‌های ترکیبی که فروشویی را با روش‌های هیدرومتالورژی یا بازیافت الکتروشیمیایی تلفیق می‌کنند، ممکن است کارایی و کاربرد صنعتی بیشتری ارائه دهند.

علاوه بر این، طراحی واکنشگاه‌های زیستی مقاوم و مقرون‌به‌صرفه برای عملیات در مقیاس بزرگ همچنان مانع اساسی محسوب می‌شود. مسائلی مانند خطرات آلودگی و نرخ رشد آهسته ریزاندامگان‌ها نیز تلاش‌ها برای مقیاس‌گذاری را پیچیده‌تر می‌کنند [۵۶].

- Lithium-Ion Battery Recycling: Advancements in Circular Hydrometallurgy, *Processes*, 12(7), 1485, 2024.
6. Alipanah M., Reed D., Thompson V., Fujita Y. and Jin H., Sustainable Bioleaching of Lithium-Ion Batteries for Critical Materials Recovery, *Journal of Cleaner Production*, 382, 199, 2023.
7. Li J., Zhang H., Wang H. and Zhang B., Research Progress on Bioleaching Recovery Technology of Spent Lithium-Ion Batteries, *Environmental Research*, 238, 117145, 2023.
8. Inaba T., Su T., Aoyagi T., Aizawa H., Sato Y., Suh C., Lee J.H., Hori T., Ogata A. and Habe H., Microbial Community in an Anaerobic Membrane Bioreactor and Its Performance in Treating Organic Solid Waste under Controlled and Deteriorated Conditions, *Journal of Environmental Management*, 269, 110786, 2020.
9. Vakilchap F. and Mousavi S.M., Exploring the Untapped Practices in Bacterial-Fungal Mixed-Based Cultures for Acidic Treatment of Metal-Enriched Printed Circuit Board Waste, *Waste Management*, 179, 245–61, 2024.
10. Naderi A., Vakilchap F., Motamedian E. and Mousavi S.M., Regulatory-Systemic Approach in *Aspergillus niger* for Bioleaching Improvement by Controlling Precipitation, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107, 7331–7346, 2023.
11. Saldaña M., Jeldres M., Galleguillos-Madrid F.M., Gallegos S., Salazar I., Robles P. and Toro N., Bioleaching Modeling—A Review, *Materials*, 18, 16(10), 2023.
12. Giachino A., Focarelli F., Marles-Wright J. and Waldron K.J., Synthetic Biology Approaches to Copper Remediation: Bioleaching, Accumulation and Recycling, *FEMS Microbiology Ecology*, 4, 97(2), 2020.
13. Chandakhiaw T., Teamroong N., Piromyong P., Songwattana P., Tanthanuch W., Tancharakorn S. and Khumkoa S., Efficiency of *Penicillium* sp. and *Aspergillus* sp. for Bioleaching Lithium Cobalt Oxide from Battery Wastes in Potato Dextrose Broth and Sucrose Medium, *Results in Engineering*, 24, 103170, 2024.
14. Xin Y., Guo X., Chen S., Wang J., Wu F. and Xin B., Bioleaching of Valuable Metals Li, Co, Ni and Mn from Spent Electric Vehicle Li-Ion Batteries for the Purpose of Recovery, *Journal of Cleaner Production*, 116, 249-258, 2016.
15. Priyadarsini S. and Das A., Lithium Bioleaching: A Review on Microbial-Assisted Sustainable Technology for Lithium Bio-Circularity, *Journal of Water Process Engineering*, 69, 106744, 2025.
16. Naseri T. and Mousavi S.M., Improvement of Li and Mn Bioleaching from Spent Lithium-Ion Batteries, Using Step-wise Addition of Biogenic Sulfuric Acid by *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Heliyon*, 10, e37447, 2024.
17. Arshad F., Lin J., Manurkar N., Fan E., Ahmad A., Tariq M., Wu F., Chen R. and Li L., Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries: A Critical Review, *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106164, 2022.
18. Bahaloo-Horeh N., Mousavi S.M. and Baniasadi M., Use of Adapted Metal Tolerant *Aspergillus niger* to Enhance Bioleaching Efficiency of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Mobile Phone Batteries, *Journal of Cleaner Production*, 197, 1546–57, 2018.
19. Boxall N.J., Cheng K.Y., Bruckard W. and Kaksonen A.H., Application of Indirect Non-Contact Bioleaching for Extracting Metals from Waste Lithium-Ion Batteries, *Journal of Hazardous Materials*, 360, 504–11, 2018.
20. Lalropuia L., Kucera J., Rassy W.Y., Pakostova E., Schild D., Mandl M., Kremser K. and Guebitz G.M., Metal Recovery from Spent Lithium-Ion Batteries via Two-Step Bioleaching Using Adapted Chemolithotrophs from an Acidic Mine Pit Lake, *Frontiers in Microbiology*, 30, 15, 2024.
21. Ghassa S., Farzanegan A., Gharabaghi M. and Abdollahi H., Novel Bioleaching of Waste Lithium Ion Batteries by Mixed

الکتریکی، فلزات را روی الکترودها رسوب می‌دهد. این روش‌ها به‌تنهایی یا در ترکیب با یکدیگر استفاده می‌شوند تا بیشینه بهره‌وری در بازیابی فلزات حاصل شود.

آینده فروشایی در غلبه بر محدودیت‌های فعلی و بهبود کاربرد آن در بازیافت باتری‌های یون‌لیتیومی نهفته است. حوزه‌های کلیدی برای تحقیقات و توسعه آتی شامل بهینه‌سازی سویه‌های میکروبی از طریق اصلاحات ژنتیکی و راهبردهای سازگاری برای افزایش کارایی و مقاومت، بهبود استخراج انتخابی فلزات خاص با بررسی تعاملات میکروب‌ها و سطوح فلزی و تعیین شرایط بهینه فروشایی با استفاده از مدل‌های آماری و ترمودینامیکی است. برای مقیاس‌پذیری صنعتی این فرایند، توسعه واکتشاف‌های زیستی کارآمد و روش‌های مقرون‌به‌صرفه بازیابی ضروری خواهد بود و این امر نیازمند همکاری میان بخش‌های دانشگاهی، دولتی و خصوصی است. بررسی روش‌های مرکب که فرایندهای بیولوژیکی و شیمیایی را ترکیب می‌کنند، می‌تواند بازده را افزایش دهد، درحالی‌که اجرای مدل‌های اقتصاد چرخشی به حداقل شدن ضایعات و ارتقای زنجیره تأمین پایدار باتری کمک خواهد کرد. رسیدگی به چالش‌های زیست‌محیطی مانند مصرف آب و دفع پسماند از طریق سامانه‌های حلقه بسته و توسعه فناوری‌هایی برای بازیابی فلزات باقیمانده از محلول‌های فروشایی نیز اقتصادی بودن این فناوری را تقویت می‌کند. در نهایت، سیاست‌ها و مقررات حمایتی نقشی کلیدی در ترویج پذیرش گسترده فروشایی زیستی خواهند داشت و این فناوری می‌تواند نقشی مهم در ایجاد اقتصادی پایدار و چرخشی برای مواد باتری ایفا کند. توسعه مستمر این فناوری نوید آینده‌ای پاک‌تر و پایدارتر را می‌دهد و از کاهش منابع طبیعی و اثرات زیست‌محیطی تولید و دفع باتری‌های یون‌لیتیومی جلوگیری خواهد کرد.

۹. قدردانی

این پژوهش توسط دانشگاه تربیت مدرس [با شماره گرنت IG-39701] حمایت مالی شد.

مراجع

1. Alashur M., Advancements in Lithium-Ion Battery Technology, *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 9(9), 984-985, 2024.
2. Panda M., Dembele S., Mishra S., Akcil A., Agcasulu I., Hazrati E., Tuncuk A., Malavasi P. and Gaydardzhiev S., Small-Scale and Scale-Up Bioleaching of Li, Co, Ni and Mn from Spent Lithium-Ion Batteries, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 99, 1069-1082, 2024.
3. Zanoletti A., Carena E., Ferrara C. and Bontempi E., A Review of Lithium-Ion Battery Recycling: Technologies, Sustainability, and Open Issues, *Batteries*, 10(1), 38, 2024.
4. Gao T., Fan N., Chen W. and Dai T., Lithium Extraction from Hard Rock Lithium Ores (Spodumene, Lepidolite, Zinnwaldite, Petalite): Technology, Resources, Environment and Cost, *China Geology*, 6, 137–153, 2023.
5. Cerrillo-Gonzalez M., Villen-Guzman M., Vereda-Alonso C., Rodriguez-Maroto J. and Paz-Garcia J., Towards Sustainable

- 14, 2023.
37. Moazzam P., Boroumand Y., Rabiei P., Baghbaderani S.S., Mokarian P., Mohagheghian F., Mohammed L.J. and Razmjou A., Lithium Bioleaching: An Emerging Approach for the Recovery of Li from Spent Lithium Ion Batteries, *Chemosphere*, 277, 130196, 2021.
38. Niu Z., Zou Y., Xin B., Chen S., Liu C. and Li Y., Process Controls for Improving Bioleaching Performance of Both Li and Co from Spent Lithium Ion Batteries at High Pulp Density and Its Thermodynamics and Kinetics Exploration, *Chemosphere*, 109, 92–8, 2014.
39. Mishra D., Kim D.J., Ralph D.E., Ahn J.G. and Rhee Y.H., Bioleaching of Metals from Spent Lithium Ion Secondary Batteries Using *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Waste Management*, 28(2), 333, 2008.
40. Gericke M., Govender Y. and Pinches A., Tank Bioleaching of Low-Grade Chalcopyrite Concentrates Using Redox Control, *Hydrometallurgy*, 104, 414, 2010.
41. Buetti-Dinh A., Galli V., Bellenberg S., Ilie O., Herold M., Christel S., Boretska M., V.Pivkin I., Wilmes P., Sand W., Vera M. and Dopson M., Deep Neural Networks Outperform Human Expert's Capacity in Characterizing Bioleaching Bacterial Biofilm Composition, *Biotechnology Reports*, 22, e00321, 2019.
42. Pons V.J., Comerma A., Escobet T., Dorado A.D. and Tarrés-Puertas M.I., Optimizing Bioleaching for Printed Circuit Board Copper Recovery: An AI-Driven RGB-Based Approach, *Applied Sciences*, 27, 129, 2024.
43. Trivedi A. and Hait S., Fungal Bioleaching of Metals from WPCBs of Mobile Phones Employing Mixed *Aspergillus spp.*: Optimization and Predictive Modelling by RSM and AI Models, *Journal of Environmental Management*, 349, 119565, 2024.
44. Trivedi A. and Hait S., Metal Bioleaching from Printed Circuit Boards by Bio-Fenton Process: Optimization and Prediction by Response Surface Methodology and Artificial Intelligence Models, *Journal of Environmental Management*, 326, 116797, 2023.
45. Ruhatiya C., Gandra R., Kondaiah P., Manivas K., Samhith A., Gao L., Lam J.S.L. and Garg A., Intelligent Optimization of Bioleaching Process for Waste Lithium-Ion Batteries: An Application of Support Vector Regression Approach, *International Journal of Energy Research*, 25, 6152, 2020.
46. Mokarian P., Bakhshayeshi I., Taghikhah F., Boroumand Y., Erfani E. and Razmjou A., The Advanced Design of Bioleaching Process for Metal Recovery: A Machine Learning Approach, *Separation and Purification Technology*, 291, 120919, 2022.
47. Vyas S., Das S. and Ting Y.P., Predictive Modeling and Response Analysis of Spent Catalyst Bioleaching Using Artificial Neural Network, *Bioresource Technology Reports*, 9, 100389, 2020.
48. Zhang Z., Zhang X., Zhang D., Zhang X., Qiu F., Li W., Liu Z., Shu J. and Tang C., Application of Machine Learning in a Mineral Leaching Process—taking Pyrolusite Leaching as an Example, *ACS Omega*, 14, 48130, 2022.
49. Capeness M.J. and Horsfall L.E., Synthetic Biology Approaches Towards the Recycling of Metals from the Environment, *Biochemical Society Transactions*, 6, 1367, 2020.
50. Brar K.K., Magdoui S., Eteieb S., Zolfaghari M., Fathollahzadeh H., Calugaru L., Komtchou S.P., Tanabene R. and Brar S.K., Integrated Bioleaching-Electrometallurgy for Copper Recovery - A Critical Review, *Journal of Cleaner Production*, 291, 125257, 2021.
51. Aminian-Dehkordi J., Mousavi S.M., Marashi S.A., Jafari A. and Mijakovic I., A Systems-Based Approach for Cyanide Overproduction by *Bacillus megaterium* for Gold Bioleaching Enhancement, *Frontiers in Bioengineering and Moderate Thermophilic Microorganisms, Using Iron Scrap as Energy Source and Reducing Agent, Hydrometallurgy*, 197, 105465, 2020.
22. Alhaqie A.D., Damay D.M. and Haidar M.T., Advanced Recycling and Recovery of Spent Lithium-Ion Batteries with Bioleaching Processes Using *A. ferrooxidans* to Achieve Cleaner Battery Production, *Journal of Batteries for Renewable Energy and Electric Vehicles*, 20, 76–81, 2023.
23. Roy J.J., Madhavi S. and Cao B., Metal Extraction from Spent Lithium-Ion Batteries (LIBs) at High Pulp Density by Environmentally Friendly Bioleaching Process, *Journal of Cleaner Production*, 280, 124242, 2021.
24. Lobos A., Harwood V.J., Scott K.M. and Cunningham J.A., Tolerance of Three Fungal Species to Lithium and Cobalt: Implications for Bioleaching of Spent Rechargeable Li-Ion Batteries, *Journal of Applied Microbiology*, 9, 743–55, 2021.
25. Liao X., Ye M., Liang J., Guan Z., Li S., Deng Y., Gan Q., Liu Z., Fang X. and Sun S., Feasibility of Reduced Iron Species for Promoting Li and Co Recovery from Spent LiCoO₂ Batteries Using a Mixed-Culture Bioleaching Process, *Science of the Total Environment*, 830, 154577, 2022.
26. Liu Z., Liao X., Zhang Y., Li S., Ye M., Gan Q., Fang X., Mo Z., Huang Y., Liang Z., Dai W. and Sun S., A Highly Efficient Process to Enhance the Bioleaching of Spent Lithium-Ion Batteries by Bifunctional Pyrite Combined with Elemental Sulfur, *Journal of Environmental Management*, 351, 119954, 2024.
27. Kim J., Nwe H.H. and Yoon C.S., Enhanced Bioleaching of Spent Li-Ion Batteries Using *A. ferrooxidans* by Application of External Magnetic Field, *Journal of Environmental Management*, 367, 122012, 2024.
28. Bahaloo-Horeh N., Mousavi S.M. and Shojaosadati S.A., Bioleaching of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Mobile Phone Batteries Using *Aspergillus niger*, *Journal of Power Sources*, 320, 257–66, 2016.
29. Alipanah M., Jin H., Zhou Q., Barboza C., Gazzo D., Thompson V., Fujita Y., Liu J., Anderko A. and Reed D., Sustainable Bioleaching of Lithium-Ion Batteries for Critical Metal Recovery: Process Optimization through Design of Experiments and Thermodynamic Modeling, *Resources, Conservation and Recycling*, 199, 107293, 2023.
30. Roy J.J., Tang E.J.J., Do M.P., Cao B. and Srinivasan M., Closed-Loop Graphite Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries through Bioleaching, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 17, 6567–77, 2023.
31. Nazerian M., Bahaloo-Horeh N. and Mousavi S.M., Enhanced Bioleaching of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries Using Ultrasonic Treatment, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 10, 584–93, 2023.
32. Marcincakova R., Kadukova J. and Mrazikova A., Bioleaching of Lithium from Lepidolite by the Mixture of *Rhodotorula rubra* and *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 367, 122012, 2015.
33. Marcincakova R., Kadukova J., Mražíková A., Velgosová O. and Vojtko M., Lithium Bioleaching from Lepidolite Using the Yeast *Rhodotorula rubra*, *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 16, 25–35, 2015.
34. Kirk R.D., Newsome L., Falagan C. and Hudson-Edwards K.A., Bioleaching of Lithium from Jadairite, Spodumene, and Lepidolite Using *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Frontiers in Microbiology*, 13, 15, 2024.
35. Kadukova J., Marcincakova R., Luptakova A., Vojtko M., Fujda M. and Pristas P., Lithium Comparison of Three Different Bioleaching Systems for Li Recovery from Lepidolite, *Scientific Reports*, 10, 14594, 2020.
36. Biswal B.K. and Balasubramanian R., Recovery of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries Using Microbial Agents for Bioleaching: A Review, *Frontiers in Microbiology*,

- Biotechnology*, 3, 8, 2020.
52. Vera M., Schippers A., Hedrich S. and Sand W., Progress In Bioleaching: Fundamentals and Mechanisms of Microbial Metal Sulfide Oxidation – Part A, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 4, 6933, 2022.
 53. Zhang L., Dong H., Liu Y., Bian L., Wang X., Zhou Z. and Huang Y., Bioleaching of Rare Earth Elements from Bastnaesite-Bearing Rock by Actinobacteria, *Chemical Geology*, 483, 544, 2018.
 54. Ferronato N. and Torretta V., Waste Mismanagement In Developing Countries: A Review of Global Issues, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 24, 1060, 2019.
 55. Heydarian A., Vakilchap F., Mousavi S.N. and Mousavi S.M., Bacterial Acidic Agents-Assisted Multi-Elemental (Ni, Co, and Li) Leaching of Used Lithium-Ion Batteries at High Pulp Densities, *Scientific reports*, 15, 16517, 2025.
 56. Marra A., Cesaro A., Rene E.R., Belgiorno V. and Lens P.N.L., Bioleaching of Metals from WEEE Shredding Dust, *Journal of Environmental Management*, 210, 180, 2018.
 57. Shokri Z., Mousavi S.M. and Omidkhah M.R., Advancing Sustainable Lithium Recovery from Spent Laptop Lithium-Ion Battery Cathodes through High Pulp Density Bioleaching Followed by Li_2CO_3 Precipitation: Process Intensification and Environmental Insights, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13, 117014, 2025.
 58. Baniasadi M., Vakilchap F., Bahaloo-Horeh N., Mousavi S.M. and Farnaud S., Advances in Bioleaching as a Sustainable Method for Metal Recovery from E-waste: A Review, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 76, 75, 2019.
 59. Hu W., Feng S., Tong Y., Zhang H. and Yang H., Adaptive Defensive Mechanism of Bioleaching Microorganisms under Extremely Environmental Acid Stress: Advances and Perspectives, *Biotechnology Advances*, 42, 107580, 2020.
 60. Yang L., Hu W., Chang Z., Liu T., Fang D., Shao P., Shi H. and Luo X., Electrochemical Recovery and High Value-Added Reutilization of Heavy Metal Ions from Wastewater: Recent Advances and Future Trends, *Environment International*, 152, 106512, 2021.