اولین همایش ملی باتری لیتیومی
1st National Lithium Battery Conference
(LBC 2021)
قطب باتری لیتیومی

محرک‌های اصلی فناوری و بازار باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد و چالش‌های موجود

نسرین آزاد[1,*]، علی کهن[2]، هادی عربی[3و4]، مسعود یاوری نسب[5]، میلاد قربان زاده[6]

1- کارشناس مرکز توسعه فناوری ذخیره‌سازهای انرژی، فیزیک حالت جامد، پژوهشکده هواخورشید، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
2- کارشناس مرکز توسعه فناوری ذخیره‌سازهای انرژی، مهندسی شیمی، پژوهشکده هواخورشید، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
3- مشاور مرکز توسعه فناوری ذخیره‌سازهای انرژی، فیزیک حالت جامد، پژوهشکده هواخورشید، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
4- استاد دانشکده علوم، گروه فیزیک، فیزیک حالت جامد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
5- مدیر مرکز توسعه فناوری ذخیره‌سازهای انرژی، مهندسی برق، پژوهشکده هواخورشید، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
6- مشاور مرکز توسعه فناوری ذخیره‌سازهای انرژی، مهندسی مواد، پژوهشکده هواخورشید، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
* مشهد، 9177948974، nasrin-azad@um.ac.ir@gmail.com

چکیده

با توجه به افزایش تقاضا برای سیستم‌های ذخیره انرژی با چگالی انرژی و توان بالا، باتری‌های لیتیوم-یونی به عنوان کاندیدی راه حلی برای ذخیره انرژی در وسایل نقلیه الکتریکی و وسایل الکترونیکی قابل حمل بکار گرفته شده‌اند. در سال‌های اخیر، با هدف دستیابی به حمل و نقل پاک و غلبه بر مشکلات مرتبط با وسایل نقلیه الکتریکی، باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد به عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته باتری لیتیوم-یونی مورد توجه قرار گرفته است. محرک‌های اصلی فناوری بکارگیری باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد، شامل کاهش هزینه، ایمنی بیشتر و بهبود عملکرد می‌باشند. درحالی که مشوق بازار در استفاده از این باتری‌ها، کاهش گسیل گازهای گلخانه‌ای، افزایش تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و جایگزینی سوخت‌های فسیلی می‌باشد. دستیابی به دانش فنی ساخت و تجاری‌سازی باتری‌های حالت جامد با چالش‌های علمی متفاوتی در زمینه مواد، ساخت و مهندسی طراحی مواجه می‌باشند و موفقیت در این حوزه، منوط به حل این چالش‌ها می‌باشد. رصد فناوری صورت گرفته بر روی شرکت‌های فعال در زمینه باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد بر پایه الکترولیت‌های معدنی نشان می‌دهد که آمریکا و ژاپن در بخش تحقیق، توسعه و صنعت پیشتاز می‌باشند. همچنین بر اساس آنالیزهای انجام شده، بیشترین تعداد پتنت‌های ثبت شده متعلق به کشور ژاپن می‌باشد. نتایج بدست آمده از این بررسی‌ها نشان می‌دهند که الکترولیت‌های سولفیدی نسبت به دیگر الکترولیت‌های معدنی بیشتر مورد توجه بوده‌اند.

کلیدواژگان

باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد، چالش‌ها، رصد فناوری، الکترولیت‌های سولفیدی.

The main drivers of technology and market of solid state Li-ion batteries and existing challenges

Nasrin Azad[1,2*], Ali Kohan [1], Hadi Arabi[1,2], Masoud Yavari Nasab[1], Milad Ghorbanzadeh[1]

1- Technology center of energy storages, Sun-Air Research Institute, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Department of Physics, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 9177948974, Mashhad, Iran, nasrin-azad@um.ac.ir

Abstract

Due to increasing demand for energy storage systems with high energy and power density, Li-ion batteries have been used as a candidate for energy storage in electric vehicles and portable electronic devices. In recent years, solid state lithium-ion batteries have been considered as one of the advanced technologies of lithium-ion batteries with the aim of achieving green transportation and overcoming problems related to electric vehicles. The main technology drivers of solid state Li-ion battery include cost reduction, greater safety and improved performance, while the market incentive to use of these batteries include reducing greenhouse emission, increasing renewable energy production and replacing fossil fuels. Obtaining the technical knowledge of manufacturing and commercializing solid state batteries is faced with different scientific challenges in the field of materials, processing, and design engineering and success in this field depends on solving these challenges. Technology monitoring of active companies in the field of solid state Li-ion batteries based on inorganic electrolytes shows the United States and Japan are pioneer in the section of research, development, and industry. Also, according to the analysis, the largest number of registered patents belongs to Japan. The results of these studies show that sulfide electrolytes have received more attention that other inorganic electrolytes.

Keywords

Solid state Li-ion batteries, Challenges, Technology monitoring, Sulfide electrolytes

1- مقدمه

استفاده آسان از دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل و وسایل نقلیه الکتریکی با توسعه بیشتر باتری‌های قابل شارژ، از جمله اسید سربی، نیکل-کادمیومی، نیکل-هیبرید فلزی، و باتری‌های لیتیوم-یونی امکان‌پذیر شده‌است. باتری‌ها بایستی انعطاف‌پذیر، سبک و کم حجم باشند و با شکل ظاهری وسیله مورد نظر هم‌خوانی داشته باشند. آنها باید همچنین مقیاس‌پذیر بوده و چگالی انرژی بالایی را ارائه دهند و عمر طولانی‌تری داشته باشند. باتری‌های لیتیوم-یونی با ویژگی‌های چگالی انرژی حجمی (وزنی) دو برابر 700Wh/L (250 Wh/kg)،

ولتاژ بالاتر باتری (3/7 V)، عمر چرخه‌ای بالاتر با خود دشارژی پایین‌تر، به گسترش وسایل الکترونیکی قابل حمل (به عنوان مثال: تلفن‌های همراه، لپ تاپ‌ها، دوربین‌ها، تبلت‌ها) و همچنین فناوری‌های جدید در حال ظهور مانند دستگاه‌های الکترونیکی، ساعت‌های هوشمند و قطعات ردیابی مربوط به ورزش، کمک فوق العاده‌ای کرده‌اند. با این وجود، پیشرفت در بهبود چگالی انرژی، ایمنی، هزینه‌ها و انعطاف پذیری باتری‌ها در شکل و اندازه برای همگام شدن با افزایش تقاضا برای قطعاتی با طول عمر طولانی‌تر با قابلیت جمع آوری و انتقال اطلاعات در زمان کوتاه علاوه بر تقاضا برای افزایش چگالی انرژی در وسایل نقلیه الکتریکی (EV) لازم می‌باشد [1].

ایمنی باتری با بکارگرفتن قطعات حفاظت خارجی مثل قطعات محدود کننده جریان، سنسورهای فشار و دما و یا از طریق رویکردهای حفاظت داخلی می‌تواند بهبود یابد اما سبب افزایش هزینه ساخت و کاهش چگالی انرژی می‌گردد [2]. در سال‌های اخیر، باتری‌های حالت جامد بدلیل افزایش ایمنی ناشی از جایگزین کردن الکترولیت‌های مایع اشتعال زا با الکترولیت‌های جامد، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند.

الکترولیت های جامد در نظر گرفته شده‌اند تا جایگزین جدا کننده و الکترولیت مایع در باتری‌های لیتیوم-یونی معمولی شوند. این امر سبب کاهش اجزای غیرفعال و ایجاد سلول‌هایی با چگالی انرژی بیشتر در واحد وزن و حجم می‌گردد [3].

باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد نسبت به تغییرات دما، آسیب‌های فیزیکی و همچنین شارژ و دشارژ تحمل بیشتری دارند و در مقایسه با باتری‌های لیتیوم-یونی معمولی، ایمن‌تر و با عمر طولانی‌تری می‌باشند. علی‌رغم مزایای زیادی که باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد دارند، در مسیر تجاری شدنشان، چالش‌های زیادی وجود دارد که بایستی بررسی و رفع گردند [4 و 5]. با توجه به اینکه باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد به عنوان یکی از موضوعات بدیع و نوظهور مطرح شده است، گروه باتری در پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشهد، تحقیقاتی را در زمینه بررسی وضعیت کنونی این باتری‌ها هم در صنعت و هم در بخش تحقیق و پژوهش در دنیا مورد رصد و تحلیل قرار داده است. گزارش حاضر علاوه بر بیان چالش‌های موجود در مسیر تجاری شدن باتری‌های لیتیومی حالت جامد، گزیده‌ای از تحلیل‌های انجام شده بر روی باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد بر پایه الکترولیت‌های معدنی را ارائه می‌دهد.

2- محرک‌ها در بکارگیری باتری لیتیوم-یونی حالت جامد

در زمینه فناوری، محرک‌ها در بکارگیری باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد، چگالی انرژی و ایمنی بالاتر و کاهش هزینه می‌باشند که در مجموع ارزش افزوده بیشتری را در مقایسه با سایر باتری‌های لیتیوم-یونی برای مصرف کنندگان باتری‌های حالت جامد ایجاد می‌کنند. باتری‌های حالت جامد با آند فلز لیتیوم قابلیت فراهم کردن چگالی انرژی وزنی بیشتر از 500 Wh/kg و چگالی انرژی حجمی بیشتر از 1500 Wh/L با قیمت کمتر از 100 $/kWh را در مقایسه با دیگر سیستم‌های باتری لیتیوم-یونی پیشرفته دارند. در حال حاضر، بیشترین حوزه کاربرد باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد در بخش خودروهای الکتریکی و هیبریدی می‌باشد. با گذشت زمان، کاربردها به بخش‌های هوافضا، الکترونیک قابل حمل و هواپیماهای بدون سرنشین گسترش خواهد یافت. محرک‌های اصلی بازار برای توسعه باتری‌های حالت جامد، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و نیاز به جایگزینی برای انرژی‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی می‌باشند. با توجه به اینکه بیشتر انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به بخش حمل و نقل می‌باشد که دلیل اصلی آلودگی هوا در شهرها می‌باشد، فعالان سیاسی بر روی راه‌حل‌های پایدار در بخش حمل و نقل متمرکز شده‌اند. با افزایش تمایل به خودروهای هیبریدی و الکتریکی، نگرانی‌هایی در ارتباط با برد کوتاه قابل رانندگی با باتری شارژ شده و زمان شارژ طولانی وجود دارد که با استفاده از باتری‌های حالت جامد قابل رفع خواهد بود. دلیل اصلی که باتری‌های حالت جامد در نقشه راه بیشتر تولیدکنندگان باتری و سازندگان تجهیزات اصلی سیستم های حمل و نقل قرار دارد، این است که شاخص‌های اصلی عملکرد تئوری این باتری‌ها، مناسب برای خودروهای الکتریکی می‌باشد [3].

2-1- بازار باتری‌های حالت جامد

بر اساس گزارش تهیه شده در موسسه فرانهوفر، بازار این نوع باتری‌ها در حالت کلی تا سال 2030 به 2/6 ترا وات ساعت رشد خواهد کرد که از این مقدار 2/3 ترا وات ساعت مربوط به بخش حمل و نقل وسایل نقلیه الکتریکی خواهد بود. برای بازار باتری‌های حالت جامد، هنوز نمی‌توان پیش بینی‌هایی را برای آینده نزدیک انجام داد، اما به میزان قابل توجهی حجم کمتری از بازار را به خود اختصاص خواهند داد، زیرا باتری‌های حالت جامد احتمالاً از سال 2025 به بازار وارد شوند [3]. تحقیقات انجام شده پیش‌بینی می‌کند که بازار باتری های حالت جامد، زنجیره تامین را تغییر خواهد داد و تا سال 2031 به بیش از 8 میلیارد دلار خواهد رسید [6]. بر اساس این فرضیه که موانع اصلی دستیابی به فناوری باتری حالت جامد برطرف خواهند شد، تقاضای احتمالی این باتری‌ها در خودروهای الکتریکی از 200 مگاوات ساعت در سال 2022 به 2 گیگاوات ساعت در سال 2025 افزایش خواهد یافت. بااین‌حال این پیش‌بینی‌ها با بررسی منابع دیگر، که تجاری سازی انبوه باتری‌های حالت جامد را قبل از سال 2025، بر اساس مشاهده تلاش فعالان صنعتی و علمی مربوطه گزارش کرده‌اند، مورد تردید می‌باشند.

3- چالش‌های موجود در مسیر تجاری شدن باتری‌های حالت جامد

در سال 2020، کارگاهی متشکل از 30 متخصص علمی و صنعتی در زمینه باتری‌های حالت جامد در آزمایشگاه ملی اوک ریج برگزار گردید. بر اساس اطلاعات و تجربیات مبادله شده، چالش‌های اصلی در راستای پیشرفت باتری‌های حالت جامد بر پایه الکترولیت‌های جامد اکسیدی، سولفیدی و پلیمری در قالب شکاف‌های علمی در مواد، ساخت و طراحی مهندسی مطرح شدند [7].

چالش علمی مواد مربوط به آند فلز لیتیوم، فصل مشترک الکترولیت جامد با آند فلز لیتیوم، مواد کاتد و کاتدهای کامپوزیتی می‌باشد. در مورد آند فلز لیتیوم، تعیین ضخامت یکی از پارامترهای مهم می‌باشد. بر اساس گزارش انجام شده، وقتی حجم لیتیوم کاهش یابد سختی و قدرت حاصله می‌تواند بیشتر از لیتیوم حجیم شود. در نتیجه، بایستی ابعاد مربوطه را برای آزمایشات مکانیکی

تعیین کنیم تا درک خود را از آند فلز لیتیوم و مکانیسم‌هایی که منجر به باز توزیع لیتیوم می‌شوند به ویژه هنگامی که مربوط به خرابی باتری است، بالاتر ببریم.

در سال‌های اخیر، اطلاعات علمی زیادی در مورد عدم کارایی درحوزه فصل مشترک لیتیوم/الکترولیت کسب شده است، که در جهت رفع این مشکل، سوالاتی مانند "چه چیزی پایداری الکتروشیمیایی و یا به لحاظ سنتیکی، غیرفعال بودن با لیتیوم را افزایش می‌دهد؟" و یا "چگونه خواص حجمی الکترولیت جامد و فصل مشترکش، عملکرد چرخه‌ای لیتیوم را تحت تاثیر قرار می‌دهد؟" مطرح می‌شوند که بایستی پاسخ داده شوند.

برای دستیابی به چگالی انرژی بالا، کاتد بایستی حجم بیشتری از باتری رااشغال کند. اینکه چگونه کاتدهای ضخیم، تغییرات حجمی را در مقیاس سلول کامل، تحت تاثیر قرار می‌دهند هنوز بررسی نشده است. محققان و صنعت گرانی که در حال توسعه فناوری باتری‌های حالت جامد بر پایه سولفید هستند، دریافتند که فشار خارجی قابل ملاحظه‌ای (اغلب از مرتبه 10 MPa) برای حفظ تماس خوب در طی عملکرد چرخه‌ای نیاز می‌باشد. همچنین طراحی هوشمندانه کامپوزیت‌ها که فشار داخلی مناسبی در طی عملکرد چرخه‌ای برای حفظ تماس خوب ایجاد شود، مورد بحث می‌باشد.

در حالی که بسیاری از چالش‌های مربوط به مواد و فصل مشترک‌ها حل نشده باقی مانده است، تلاش برای درک موانع ساخت ممکن است در زمان به‌طور قابل توجهی صرفه جویی نماید. روش ساخت، خواص مکانیکی و میکروساختار الکترولیت جامد را تعیین می‌کند. روش‌های شناخته شده‌ای برای تقویت ساختاری مواد سرامیک و شیشه وجود دارد، اما مکانیسم‌های مشابهی برای الکترولیت‌های جامد گزارش نشده است. یکی از گاف‌های علمی در ساخت باتری‌های حالت جامد، تعیین وجود یا عدم وجود مکانیسم‌هایی برای تقویت الکترولیت‌های جامد نازک و کاتدهای ضخیم بدون اینکه مانع ترابرد یون لیتیوم شوند، می‌باشد.

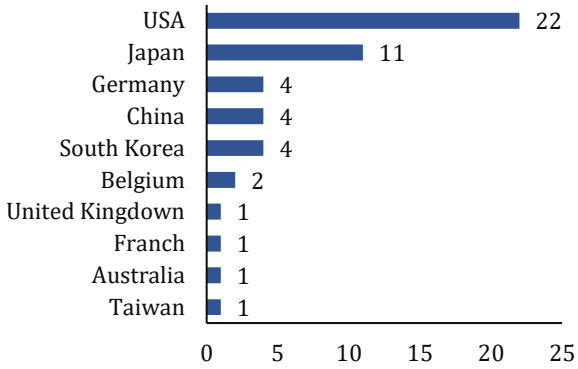
در حال حاضر اکثر سلول‌های حالت جامد دارای طراحی انباشته با کامپوزیت کاتدی می باشند که از معماری باتری لیتیوم-یونی رایج گرفته شده است. این طراحی‌ها برای افزایش سطح فصل مشترک و کاهش چگالی جریان موضعی در تماس الکترود-الکترولیت اتخاذ شده است. چنین رویکردهایی امیدوار کننده است، اما در بیشتر موارد، روش مشخصی برای افزایش در مقیاس و مقرون به صرفه بودن وجود ندارد. معماری های جایگزین ممکن است ساختارها و فصل مشترک‌های قوی به لحاظ مکانیکی را فراهم کنند.

تحقیقات در چنین ساختارهایی با نگرانی هایی همراه می‌باشد که حفظ فشار بالای انباشته (5 MPa) بر روی سلول‌های حالت جامد ممکن است به یک دستگاه مکانیکی خارجی نیاز داشته باشد که مزیت چگالی انرژی وزنی/ چگالی انرژی حجمی بالای سلول‌ها را خنثی کنند.

4- رصد فناوری باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد بر پایه الکترولیت‌های جامد معدنی

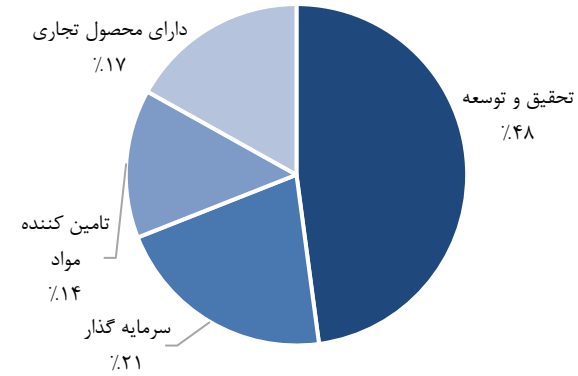
به‌منظور بررسی وضعیت باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد، فعالیت شرکت-های مختلف در این حوزه را تحلیل و بررسی نموده‌ایم. بر اساس جستجوهای صورت گرفته، 51 شرکت شناسایی شدند. در شکل 1، شرکت‌های مهم در هر منطقه جغرافیایی مشخص شده‌اند. شکل 2، تعداد شرکت‌های فعال در حوزه باتری‌های لیتیوم-یونی شناسایی شده در ده کشور اول را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود کشورهای آمریکا و ژاپن در این حوزه پیشتاز می‌باشند. بر اساس آنالیز شرکت‌های مذکور، برخی از آنها در مرحله تحقیق و توسعه در زمینه مواد الکترولیت و یا سلول باتری می‌باشند، تعدادی از شرکت‌های بررسی شده نیز به عنوان سرمایه‌گذار در جهت پیشرفت این فناوری فعالیت دارند و برخی از شرکت‌ها تامین کننده مواد و برخی دارای محصول تجاری می‌باشند (شکل 3). همچنین شرکت‌ها را بر حسب نوع الکترولیت جامدی که در حال کار هستند مورد آنالیز قرار دادیم که نتایج آن در شکل 4 ارائه شده است.

شکل 1 شرکت‌های مهم فعال در حوزه باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد بر پایه الکترولیت‌های معدنی در هر منطقه جغرافیایی

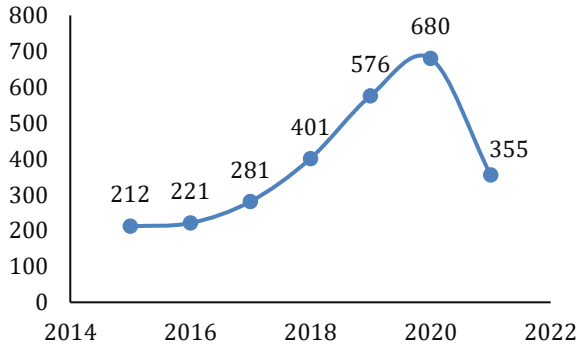


شکل 2 تعداد شرکت‌های فعال در حوزه باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد بر پایه الکترولیت‌های معدنی در هر کشور

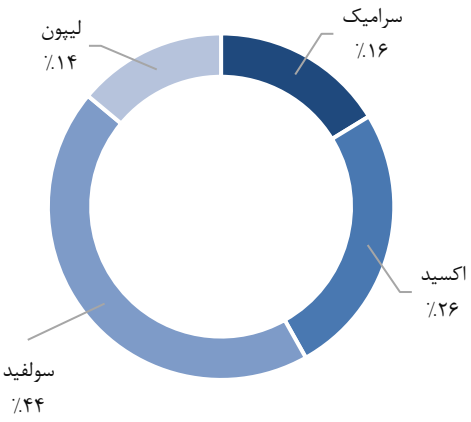
همچنین در زمینه اختراعات در مورد باتری‌های لیتیوم یونی حالت جامد نیز بررسی‌هایی انجام گرفته است. پایگاه استنادی مورد استفاده برای تحلیل آماری اختراعات، پایگاه استنادی Lens مربوط به کشور استرالیا می‌باشد که با بیش از 134 میلیون اختراع ثبت شده در 105 حوزه ثبت در سراسر دنیا، 27800 میلیون مخترع، 1500 میلیون مالک ا و 16 میلیون متقاضی، یکی از معتبرترین پایگاه‌های استنادی در دنیا به حساب می‌آید [8]. بر اساس کلیدواژه‌های انتخابی جهت جستجوی اختراعات مرتبط، تعداد 2761 اختراع ثبت شده‌اند. همانطور که در شکل 5 مشاهده می‌گردد آهنگ ثبت اختراعات در طی 5سال اخیر، روند صعودی دارد. همچنین بررسی اختراعات ثبت شده نشان می‌دهد که بیشتر مخترعین متعلق به کشور ژاپن می‌باشند (شکل 6). بررسی جامع‌تری در حوزه اختراعات بر حسب نوع الکترولیت انجام گرفت که نتایج آن در شکل 7 نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در طی چند سال اخیر، بیشترین تعداد اختراعات در زمینه الکترولیت سولفیدی سرامیکی Argyrodite و در کشور ژاپن به ثبت رسیده است.



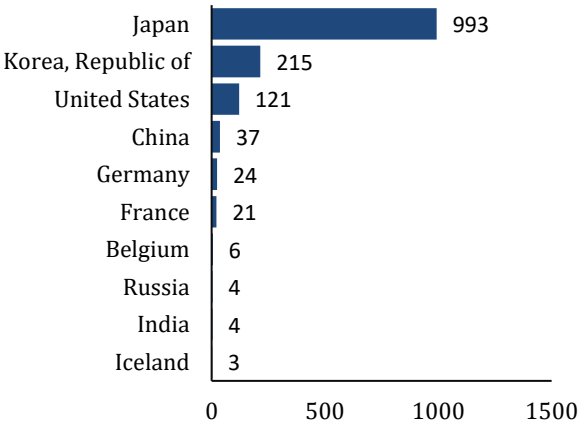
شکل 3 تعداد شرکت‌های فعال بر حسب فعالیت‌های مختلف در حوزه باتری حالت جامد



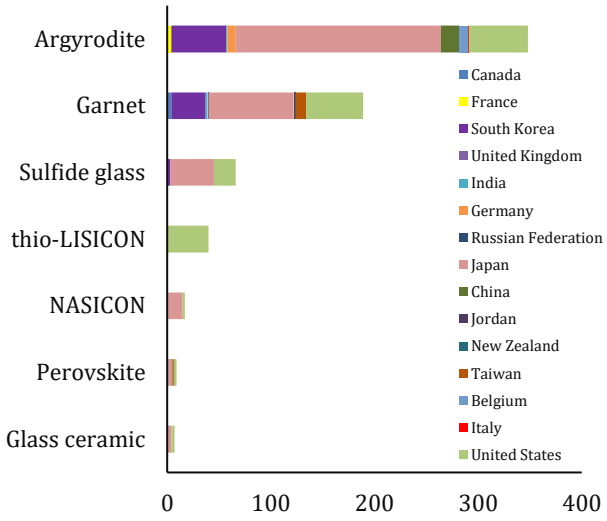
شکل 5 آهنگ تغییرات تعداد اختراعات ثبت شده در حوزه باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد بر پایه الکترولیت‌های معدنی



شکل 4 تعداد شرکت‌های فعال بر حسب نوع الکترولیت جامد



شکل 6 تعداد مخترعین در ده کشور اول در حوزه باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد بر پایه الکترولیت‌های معدنی



شکل 7 حوزه اختراعات باتری لیتیوم-یونی حالت جامد بر حسب نوع الکترولیت

5- نتیجه‌گیری

باتری‌های لیتیوم-یونی حالت جامد به‌دلیل عملکرد خوبی که انتظار می‌رود در ترکیب با آند فلز لیتیوم داشته باشند، تحقیقات زیادی را به خود اختصاص داده‌اند. دستیابی به چگالی انرژی بالاتر، افزایش ایمنی و کاهش هزینه نیاز بخش فناوری در حوزه باتری‌حالت جامد می‌باشند. همچنین اهداف بازار از بکارگیری این نوع از باتری‌ها این است که با کنترل گسیل گازهای گل خانه‌ای، افزایش منابع انرژی تجدیدپذیر و جایگزینی سوخت‌های فسیلی، آلودگی هوا را کاهش دهند که بیشتر ناشی از بخش حمل و نقل می‌باشد. با اینحال، چالش‌های موجود در بخش مواد، ساخت و طراحی، مانع از تجاری شدنشان در مقیاس بالا شده‌اند. بر اساس رصد فناوری انجام شده، آمریکا و ژاپن نسبت به سایر کشورها در حوزه باتری لیتیوم-یونی حالت جامد بر پایه الکترولیت‌های جامد معدنی پیشرو هستند. همچنین بر اساس تحلیل اختراعات ثبت شده در این حوزه از فناوری، در سال‌های اخیر، تمرکز، بیشتر بر روی الکترولیت‌های Argyrodyte از نوع سولفیدی و متعلق به کشور ژاپن می‌باشد.

6- مراجع

[1] K. J. Kim, M. Balaish, M. Wadaguchi, L. Kong and J. L. Rupp, Solid - State Li - Metal Batteries: Challenges and Horizons of Oxide and Sulfide Solid Electrolytes and Their Interfaces, *Advanced Energy Materials*, Vol. 11, No. 1, pp. 2002689-2002752, 2021.

[2] P. G. Balakrishnan, R. Ramesh, T. Prem Kumar,Safety mechanisms in lithium-ion batteries, *Journal of power sources*, Vol. 155, No. 2, pp.401-414, 2006.

[3] T. Kaufmann, A. Thielmann, Ch. Neef, *Solid–state-Lithium-ion batteries for electric vehicles*, Advanced technologies for industry-product watch, January 2021; https://ati.ec.europa.eu/reports/product-watch/solid-state-lithium-ion-batteries-electric-vehicles.

[4] S. Xia, X.Wu, Z. Zhang, Y. Cui, W. Liu, Practical challenges and future perspectives of all-solid-state lithium-metal batteries. *Chem*, Vol. 5, No. 4, pp.753-785, 2019.

[5] C. Li, Z.Y. Wang, Z.J.He, Y.J. Li, J. Mao, K.H. Dai, C. Yan, J.C. Zheng, An advance review of solid-state battery: Challenges, progress and prospects, *Sustainable Materials and Technologies*, Vol. 29, pp.e00297, 2021.

[6] X. He, *IDTechEx Dissects the Market for Solid-state Batteries in New Report*, 2 September 2021; https://www.idtechex.com/en/research-article/idtechex-dissects-the-market-for-solid-state-batteries-in-new-report/24658.

[7] P. Albertus, V. Anandan, C. Ban, N. Balsara, I. Belharouak, J. Buettner-Garrett, Z. Chen, C. Daniel, M. Doeff, N. J. Dudney, Challenges for and pathways toward Li-metal-based all-solid-state batteries, ACS Energy Lett., vol. 6, pp. 1399-1404, 2021.

[8] Search, Analyze and Manage Patent and Scholarly Data, https://www.lens.org.