ریاست جمهوری
مرکز بکارگیری تحول و پیشرفت

بسم الله الرحمن الرحیم

پایش وضعیت فناوری باتری‌های لیتیوم-یونی در جهان

مهر ماه ۱۳۹۹

فهرست مطالب

فصل ۱– باتری‌های لیتیوم–یون پیشرفته ۴

۱-۱. تحولات در حوزه کاتد ۷

۱-۲. تحولات در حوزه آند ۱۱

۱-۳. تحولات در حوزه الکترولیت ۱۱

۱-۴. دیگر تحولات ۱۲

فصل ۲– باتری‌های پسا–لیتیوم‌یون ۱۴

۲-۱. باتری‌های سیلیکونی ۱۴

۲-۲. باتری‌های لیتیوم–فلز ۱۸

۲-۳. باتری‌های لیتیوم–سولفور ۲۱

۲-۴. باتری‌های حالت جامد ۲۳

فصل ۳– جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۷

فصل ۴– منابع ۳۲

چکیده

کاربرد باتری‌های لیتیوم یون در دهه‌های اخیر بسیار گسترده شده و با توجه به اهمیت آن، جائزه نوبل شیمی سال گذشته به طور مشترک به سه محقق موثر در حوزه باتری لیتیوم-یون داده شد. یکی از اصلی‌ترین کاربردهای باتری‌های لیتیوم یونی می‌تواند در خودروهای الکتریکی باشد اما به علت وجود برخی موانع از جمله قیمت بالا، این امر هنوز گسترده نشده است. با توجه به نزدیک‌شدن باتری‌های لیتیوم یونی به حد بلوغ خود، برخی مراکز معتقدند که نسل جدید این باتری‌ها می‌تواند موانع اصلی بر سر تجاری‌سازی باتری‌های لیتیوم یونی در خودروهای الکتریکی را مرتفع کند. به همین دلیل در این گزارش جدیدترین تحولات صورت گرفته در چند ماه گذشته در حوزه‌های مختلف از باتری‌های لیتیوم-یون شامل لیتیوم یون پیشرفته و پسا لیتیوم-یون بررسی شده و در نهایت نیز با هدفگذاری وزارت انرژی آمریکا برای تجاری‌سازی خودروی الکتریکی مقایسه شده است.

رصد اخبار این حوزه نشان می‌دهد که در زمینه باتری‌های لیتیوم یون پیشرفته، تحولات مهمی صورت گرفته است. برخی شرکت‌ها از محصولات جدیدی رونمایی کرده که امسال روانه بازار خواهند شد. با توجه به رصد اخبار و گزارش‌های مختلف، یک رویکرد اصلی در زمینه باتری‌های لیتیوم یون پیشرفته، کاهش سهم کبالت در کاتد به علت هزینه بالای آن است. به همین دلیل کاتدهای با کبالت پایین یا فاقد کبالت از اهمیت خاصی برخوردار هستند که بایستی تولیدکنندگان جدید باتری به آن توجه کنند.

در زمینه باتری‌های پسا-لیتیوم‌یون نیز پیشرفت‌های قابل توجهی صورت گرفته است و مهم‌ترین آن‌ها شامل جایگزینی آند گرافیتی با سیلیکون یا فلز لیتیوم، جایگزینی کاتد فعلی با سولفور و جایگزینی الکترولیت مایع با الکترولیت جامد می‌شود.

باتری‌های سیلیکونی و لیتیوم فلز دارای پیشرفت‌های قابل توجهی بوده‌اند و برخی محصولات با ویژگی‌های برجسته از جمله ظرفیت بیشتر، زمان شارژ سریع‌تر و عمر مطلوب از باتری‌های سیلیکونی و لیتیوم فلز ساخته شده که در حال حاضر برخی از آن‌ها قابلیت استفاده در خودروی الکتریکی را دارند. بررسی بیشتر باتری سیلیکونی و فلزی و به خصوص محصولات ارائه‌شده در این گزارش، اهمیت و ضرورت دارد و به نظر می‌رسد در دهه فعلی، باتری سیلیکونی بیش از دیگر انواع باتری مورد توجه

شرکت‌ها قرار گرفته و سهم قابل توجهی از بازار باتری را به خود اختصاص دهد. به همین دلیل لازم است تا به صورت ویژه بر روی باتری سیلیکونی متمرکز شد.

در زمینه باتری‌های لیتیوم–سولفور اگرچه نمونه‌های کوچکی با عمر و عملکرد بالا ساخته شده است اما در ابعاد بزرگتر برای استفاده در خودروی الکتریکی همچنان با چالش عمرِ قابل قبول روبرو هستند. بر اساس اعلام نظر برخی مراکز تحقیقاتی، یکی از چالش‌های اساسی در عمر مطلوب این باتری‌ها، عدم توسعه آند مناسب است. با توجه به مزایای سولفور از جمله فراوانی و قیمت پایین آن و همچنین پیشرفت‌های موجود در حوزه آند سیلیکونی و فلزی بهتر است تا مراکز مختلف کشور، پیشرفت‌های باتری‌های لیتیوم–سولفور را نیز دنبال کنند.

در زمینه باتری‌های حالت جامد نیز اگرچه نمونه‌های جدید با عملکردهای بالا از جمله ظرفیت بالا و قابلیت کاربرد در دماهای مختلف توسط برخی شرکت‌ها و محققان رونمایی شده اما به اعتقاد بسیاری از کارشناسان، چالش اصلی این نوع باتری‌ها در عدم وجود یک فرآیند اقتصادی به صرفه در تولید این نوع از باتری‌ها است. به همین دلیل به اعتقاد این کارشناسان بسیار بعید است این نمونه‌ها حداقل تا یک دهه آتی تجاری شوند. به طور کلی رصد اخبار حوزه باتری حالت جامد برای دهه فعلی اهمیت کمتری نسبت به سایر باتری‌ها دارد اما ممکن است برای دهه آتی مهم بشود.

در مجموع پیشرفت‌های حوزه باتری نشان می‌دهد که هدفگذاری مراکز مهم از جمله وزارت انرژی آمریکا برای اقتصادی نمودن خودروی الکتریکی از جمله ظرفیت و زمان شارژ مطلوب تقریبا محقق شده اما قیمت باتری همچنان بسیار بالاتر از حد مطلوب است. به همین دلیل فناوری‌هایی که در آینده بتوانند به هر طریق ضمن حفظ عملکرد، قیمت باتری را کاهش دهند برای گسترش خودروی الکتریکی بسیار مهم و حیاتی خواهند بود.

فصل ۱– باتری‌های لیتیوم–یون پیشرفته

به طور کلی سه عنصر اصلی و مورد توجه در هر باتری از جمله باتری‌های لیتیوم–یون وجود دارد که عبارتند از کاتد، آند و الکترولیت.

کاتد در اغلب باتری‌های لیتیوم–یون فعلی یا از ترکیب اکسید کبالت با عناصر نیکل و منگنز[۱] و یا از ترکیب آهن و فسفات[۲] تشکیل شده است که هرکدام دارای مزایا و معایب خاصی هستند. باتری‌های بر پایه کبالت معمولا دارای تراکم انرژی بیشتری هستند اما هزینه تمام‌شده آن‌ها نسبتا بالا و همچنین ایمنی کمتری دارند. در مقابل باتری‌های متشکل از فسفات آهن هرچند تراکم انرژی کمتری دارند اما در مقابل قیمت آن‌ها نیز کمتر و ایمنی آن‌ها بیشتر است. اکسید کبالت اولین کاتدی بود که در سال ۱۹۸۰ توسط پروفسور گودونوف[۳] معرفی شد که توانست اختلاف پتانسیل چهار ولتی بین دو سر کاتد و آند تولید نماید. این اکتشاف یک نقطه عطف مهم در زمینه پیشرفت باتری‌های لیتیوم–یونی بود. اما به علت معایبی که اشاره شد چند سال بعد، کاتدهای مبتنی بر فسفات آهن توسط محقق مذکور معرفی گردید [۱]و [۲].

آند در باتری‌های لیتیوم–یون تا سال ۱۹۸۵، فلز لیتیوم بود اما اصلی‌ترین چالش این فلز تشکیل دندریت بر روی فلز لیتیوم به هنگام شارژ مجدد و در نتیجه اتصال کوتاه بین کاتد و آند بود که منجر به

---

[۱] Nickel manganese cobalt oxides (NMC)

[۲] Lithium Iron Phosphate (LFP)

[۳] John Goodenough

انفجار باتری می‌شد. اما در سال ۱۹۸۵، پروفسور آکیرو یوشیونو[۱]، گرافیت را به عنوان ماده جایگزین با فلز لیتیوم مطرح کرد. این ماده آندی توانست تا علاوه بر حفظ ولتاژ بالای هر سلول در حدود ۴ ولت، چگالی انرژی بسیار قابل قبول در مقایسه با سایر باتری‌های موجود و در دامنه ۸۰ تا ۲۰۰ وات-ساعت بر لیتر داشته باشد. با توجه به ظرفیت قابل قبول گرافیت و قیمت مناسب آن، این ماده تا امروز به عنوان اصلی‌ترین ماده آندی بوده است [۱]و [۲].

همه مواد الکترولیت باتری‌های لیتیوم-یون فعلی نیز علیرغم تنوع از زمان معرفی تاکنون، به صورت یک محلول آلی شامل نمک لیتیوم بوده‌اند. محلول لیتیوم-هگزافلروفسفات[۲] برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ توسط پروفسور ویتینگهام[۳] و شرکت اگزون معرفی گردید و این ماده از آن سال تاکنون به عنوان اصلی‌ترین ماده الکترولیتی به همراه اتیلن-کربنات[۴] به عنوان حلال محلول آلی در باتری لیتیوم-یون استفاده می‌شود. همچنین از مواد پلیمری مختلف مانند پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن به عنوان یک پوشش برای الکترولیت و به منظور جداسازی محلول از کاتد و آند استفاده می‌گردد [۱]و [۲].

با توجه به مطالب فوق کاملا مشخص است که هر سه محقق اشاره شده، نقش کلیدی در توسعه باتری‌های لیتیوم یونی داشته‌اند و به همین دلیل جائزه نوبل شیمی در سال ۲۰۱۹ به این سه محقق اعطا شد. شکل زیر نمایی از اولین باتری تجاری شده لیتیوم-یونی را نشان می‌دهد که در سال ۱۹۹۱ به طور گسترده توسط شرکت‌های بزرگ الکترونیکی ژاپنی تولید و استفاده شد [۱]و [۲].

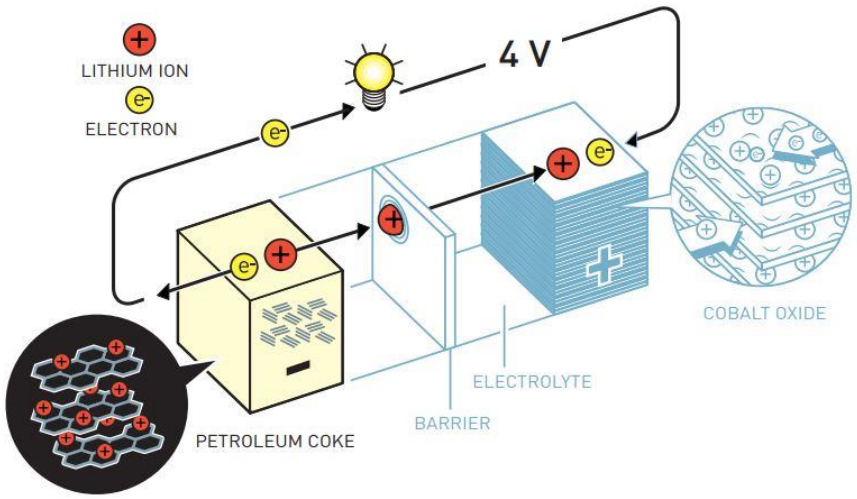
---

[۱] Akira Yoshino

[۲] Lithium hexafluorophosphate ($LPF_۶$)

[۳] Stanley Whittingham

[۴] Ethylene Carbonate



شکل ۱-۱، نمایی از اولین باتری تجاری‌شده لیتیوم یونی [۲]

با توجه به عناصر اصلی یادشده و تاریخچه باتری‌های لیتیوم-یون، مشخص است که تغییرات اساسی تا امروز در باتری‌های لیتیوم یونی رخ نداده است هرچند که قیمت آن‌ها تا میزان قابل توجهی کاهش و از بالای ۳۰۰۰ دلار در سال ۱۹۹۵ به زیر ۱۷۰ دلار در سال ۲۰۱۵ رسیده است. به همین دلیل معمولا به باتری‌هایی که تغییرات اساسی در عناصر اصلی رخ نداده و اصلی‌ترین پارامترهای عملکردی به خصوص تراکم انرژی به حد قابل توجهی تغییر نمی‌کند، باتری‌های لیتیوم-یون پیشرفته[۱] گفته می‌شود. اما در مقابل باتری‌هایی که جنس ماده یکی از سه عنصر اصلی در آن تغییر اساسی کرده و انتظار افزایش تراکم انرژی در آن‌ها تا چند برابر نیز وجود دارد، باتری‌های پسا لیتیوم-یون[۲] اطلاق می‌شود.

با توجه به مطالب گفته‌شده در این بخش مهم‌ترین تحولات مربوط به باتری‌های لیتیوم-یون پیشرفته آورده شده و در فصل بعد نیز به مهم‌ترین تحولات در حوزه باتری‌های پسا لیتیوم-یون پرداخته شده است.

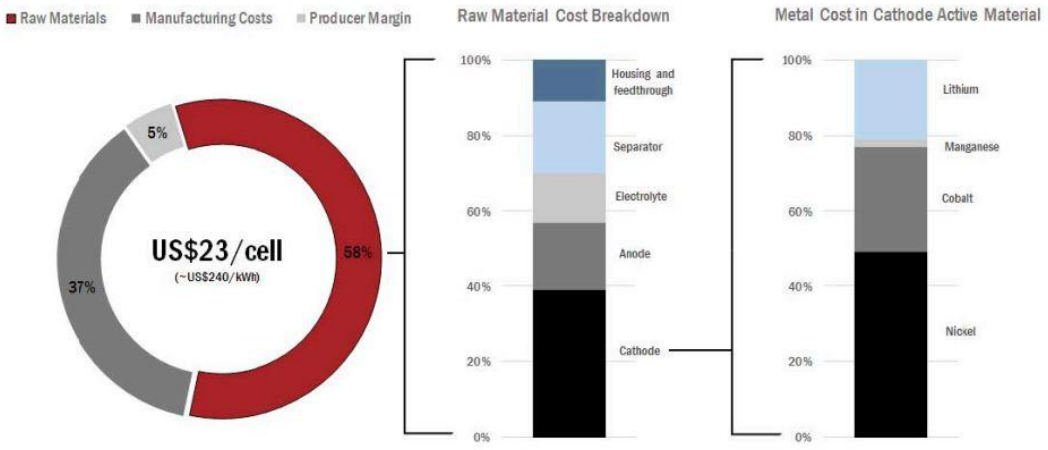
---

[۱] Advanced Lithium-Ion Batteries

[۲] Post Lithium-Ion Batteries

۱-۱. تحولات در حوزه کاتد

آنالیز اقتصادی تولید یک سلول معمولی در شکل زیر آورده شده است[۱]. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که عمده‌ترین قسمت در هزینه تولید یک سلول باتری مربوط به مواد اولیه است. به طوری که سهم مواد اولیه برابر ۵۸٪ و ۳۷٪ نیز مربوط به هزینه‌های ساخت است.



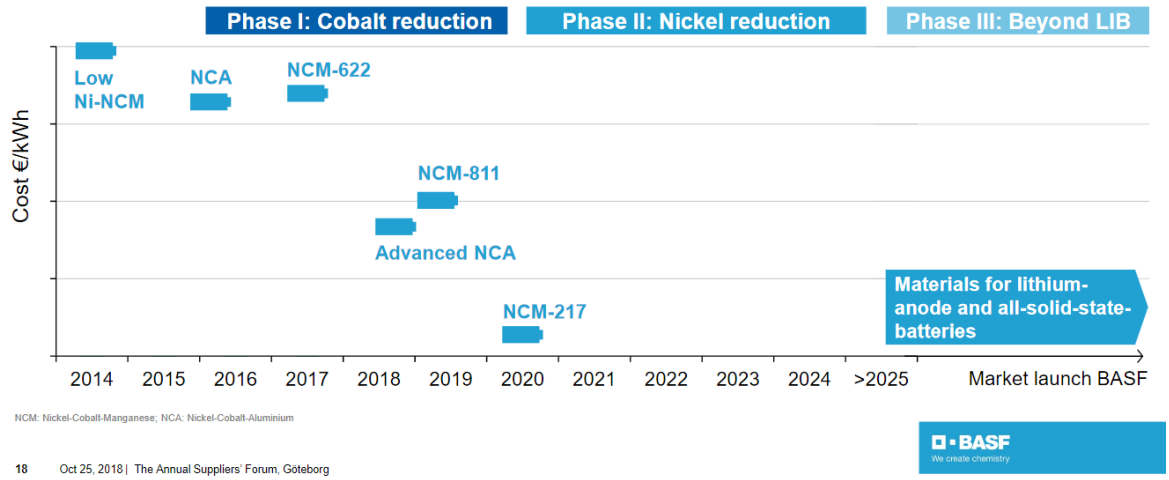
شکل ۱-۲، سهم هزینه‌های مختلف در تولید یک سلول باتری [۳]

باتوجه به شکل فوق، بیشترین سهم در هزینه تولید مواد اولیه نیز مربوط به کاتد و حدود ۴۰٪ از هزینه کل است. علاوه بر این در کاتد نیز، حدود ۸۰٪ هزینه مواد مربوط به نیکل و کبالت است. در نتیجه می‌توان گفت حدود ۲۰٪ از کل هزینه تولید یک سلول(شامل ساخت و مواد اولیه) به علت کبالت و نیکل است [۳]. قیمت این دو عنصر به ترتیب برابر ۲۷۰۰۰ و ۱۱۰۰۰ یورو بر تن است در حالی که قیمت منگنز ۲۰۰۰ یورو در تن می‌باشد.

به همین دلیل کاهش سهم کبالت و نیکل سهم بسزایی در کاهش قیمت باتری خواهد داشت که این امر به صورت تدریجی در دستور کار برخی شرکت‌ها قرار گرفته است. در همین اواخر فولکس‌واگن اعلام نمود که قصد دارد در سال آتی درصد نیکل را از ۶۵٪ به ۸۰٪ افزایش و کبالت و منگنز را به ترتیب از ۱۵٪ و ۲۰٪ به ۱۰٪ و ۱۰٪ کاهش دهد [۴].

[۱] در این محاسبه، سلول از نوع آند گرافیتی و کاتد NCM۶۲۲ درنظر گرفته شده است.

علاوه بر این بر اساس آخرین گزارشات شرکت BASF، هدفگذاری برای تولید تجاری باتری‌های با ۷۰٪ منگنز و تحت عنوان NCM ۲۱۷[۱] در سال جاری مطرح شده است. روند تغییر نسل‌های مختلف باتری نیکل–منگنز–کبالت در شکل زیر آورده شده است [۵].



شکل ۱-۳، روند تغییر نسل باتری‌های کبالتی و کاهش قیمت آن، محور عمودی معرف قیمت و محور افقی معرف زمان است

امید این است که NCM ۲۱۷ به اندازه باتری لیتیوم–آهن–فسفات مقرون به صرفه باشد، اما تراکم انرژی آن بسیار بالاتر از آن باشد. اگرچه ظرفیت آن به اندازه باتری نیکل–کبالت–منگنز نخواهد بود.

شرکت تسلا نیز اعلام نموده است باتری جدیدی را در اواخر سال جاری معرفی خواهد کرد که نویدبخش عملکرد و هزینه کمتر برای خودروسازان است. این باتری به صنعت خودروهای برقی کمک برجسته‌ای در قیمت در مقایسه با سایر بازارهای خودرو از جمله بنزینی می‌کند. این باتری‌ها برای اولین بار در مدل سدان ۳ تسلا در چین معرفی می شوند. این باتری در یک پروژه مشترک با سازنده باتری چینی به نام (CATL) و تیمی از متخصصین باتری دانشگاهی استخدام شده توسط مدیرعامل تسلا (ایلان ماسک) تولید شده است [۵]. صرفه جویی در هزینه با استفاده از بهبود ساختار شیمی باتری برای به حداقل رساندن یا از بین بردن اجزای کبالت پرهزینه به دست آمده است. در مقابل، از افزودنی های شیمیایی به همراه پوشش های ترکیبی استفاده می‌شود که باعث کاهش تنش داخلی باتری می‌شود.

[۱] با توجه به تعریف، این باتری شامل ۲۰٪ نیکل، ۱۰٪ کبالت و ۷۰٪ منگنز خواهد بود.

باتری‌های جدید قادر به ذخیره انرژی بیشتری برای مدت زمان طولانی تر هستند. باتری‌های بهبود یافته قادر به ماندگاری طولانی انرژی حتی برای یک میلیون مایل خواهند بود. در اوایل سال جاری، ایلان ماسک به سرمایه گذاران گفت : «ما باید واقعاً اطمینان حاصل کنیم که در تولید باتری یک شیب بسیار تند داریم و به کاهش هزینه در هر کیلووات ساعت باتری‌ها ادامه می دهیم، این بسیار اساسی و بسیار دشوار است» [۵].

یکی دیگر از شرکت‌های فعال در زمینه کاهش کبالت، کمپانی باتری خودروسازی چینی اسولت[۱] است. این کمپانی که در سال ۲۰۱۸ از شرکت گریت وال [۲] جدا شد، دو باتری بدون کبالت را در اواخر سال ۲۰۱۹ رونمایی کرد. این دو نمونه شامل سلول های باتری لیتیوم فاقد کبالت (NMx) و سلول های باتری لیتیوم یونی چهار عنصر (NCMA[۳]) هستند. در رویداد رونمایی از محصول، یانگ هونگ‌کسین، رئیس اسولت، گفت که سلول باتری فاقد کبالت NMx از نظر عملکردی رقیب سلول NCM۸۱۱ خواهد بود در حالی که هزینه مواد را ۵٪ الی ۱۵٪ و هزینه نهایی سلول را حدود ۵٪ کاهش می دهد. به گفته این مقام مسئول، باتری‌های بدون کبالت به تازگی راه اندازی شده، دارای چندین مزیت اساسی از جمله عمر چرخه عمر طولانی‌تر ، ایمنی بهتر و تراکم انرژی بالاتر است [۶].

در همین اواخر این شرکت نشان داد باتری‌های شامل سلول‌های بلند بدون کبالت[٤] با آخرین مدل از شرکت خودروسازی وال موتورز سازگار است. به طوری که این وسیله نقلیه با طراحی پک ماتریسی خود می تواند با یکبار شارژ به محدوده رانندگی ۸۸۰ کیلومتر (۵۴۷ مایل) برسد در حالی که ۱۵ سال عمر برای آن تضمین شده است [۶].

---

[۱] Svolt

[۲] Great Wall Motors

[۳] شامل نیکل، کبالت، منگنز و آلومینیوم

[٤] موسوم به L۶

شرکت آی‌بی‌ام[1] نیز در سال جاری اعلام نمود یک باتری لیتیوم–یونی را توسعه داده که در آن نیکل و کبالت که تنها از معدن استخراج می‌شود را حذف کرده و مواد استفاده شده کاتدی جدید از آب دریا نیز قابل استحصال هستند. الکترولیت این باتری نیز هرچند مایع است اما دمای اشتعال آن بالا است و ترکیب جدید کاتد با الکترولیت این اجازه را داده است تا با غلبه بر رشد دندریت، بتوان از فلز لیتیوم به عنوان آند استفاده کرد. ۸۰٪ از این باتری در مدت زمان ۵ دقیقه شارژ می‌شود و چگالی انرژی آن نیز بیش از ۸۰۰ وات–ساعت بر لیتر است. این شرکت اعلام نموده برای توسعه و تجاری‌سازی این باتری با شرکت مرسدس–بنز وارد مشارکت شده است. همچنین این شرکت از ابزار هوش مصنوعی استفاده خواهد کرد تا تعداد تست‌های عملی را کاهش دهد و در نتیجه بتواند سرعت توسعه باتری را به چند برابر افزایش دهد [۷].

برخی پژوهش‌های جدید نیز در حوزه تغییر برخی مواد کاتد مطرح شده که بسیار اندک هستند. اخیرا در پژوهشی که توسط محققان دانشگاه یوکوهوما[2] منتشر شده، جایگزینی نیکل و کبالت با تیتانیوم و منگنز بررسی شده است. این پژوهش نشان داد که الکترود متشکل از یون های منگنز و تیتانیوم با ابعاد نانویی منجر به تبادل قوی‌تر الکترون‌ها و یون‌های لیتیوم می‌شود و در نتیجه ظرفیت باتری افزایش یافته و در عین حال عمر طولانی‌تری نیز خواهد داشت. علاوه بر این هر دو عنصر تیتانیوم و منگنز در روی زمین فراوان بوده و نسبت به نیکل و کبالت ارزان‌تر هستند. با وجود این خبر بایستی دید که آیا کل فرآیند تولید و جایگزینی کاتد نیز ارازنتر از روش‌های فعلی است یا خیر که به بررسی بیشتر نیاز دارد [۸].

---

[1] IBM

[2] Yokohama National University

۱-۲. تحولات در حوزه آند

در حوزه آند عمده اخبار، مربوط به باتری‌های سیلیکونی بوده و با این وجود برخی اخبار در زمینه‌های دیگر از جمله نانولوله های کربنی[۱] نیز به چشم می‌خورد. یکی از مهم‌ترین آن‌ها مربوط به شرکت ال‌جی-کمیکال[۲] از بزرگترین سرمایه‌گذاران در حوزه باتری است که برای سال آینده حدود ۵۳ میلیون دلار برای توسعه تولید نانولوله های کربنی در کارخانه یوسو کره سرمایه گذاری خواهد کرد. پس از انجام این توسعه، این شرکت ظرفیت تولید کل ۱۷۰۰ تن از نانولوله کربنی را خواهد داشت. با استفاده از نانولوله‌های کربنی به عنوان مواد افزودنی رسانا، می توان هدایت را حدود ۱۰٪ در مقایسه با کربن سیاه موجود افزایش داد و در نتیجه میزان مصرف مواد رسانا را حدود ۳۰٪ کاهش داد. این امر موجب می‌شود تا فضای جدید با مواد الکترود اضافی پر شده و عملکرد باتری نیز اندکی بهبود یابد.

با وجود مزیت نسبی در نانولوله‌های کربنی، یکی از دلائل این سرمایه‌گذاری نسبتا اندک در بهینه‌سازی آند ممکن است به علت پیشرفت‌های مهم در حوزه باتری سیلیکونی باشد. زیرا این نوع از باتری عملا مهم‌ترین رقیب نانولوله‌های کربنی است و ممکن است بیش از دیگر پژوهش‌ها در حوزه آند مهم باشد که به علت اهمیت نیز به طور مجزا آورده شده است [۹].

۱-۳. تحولات در حوزه الکترولیت

یکی از مشکلات الکترولیت‌های فعلی، مساله ایمنی و آتش سوزی الکترولیت مایع آن است. اخیرا محققان دانشگاه توکیو به یک روش جدید برای افزایش عملکرد و ایمنی باتری دست پیدا کردند. ایشان نشان دادند با استفاده از محلول فسفات حلقه‌ای فلوئوره[۳] به جای اتیلن کربنات که در حال حاضر یک ماده رایج در الکترولیت است، عملکرد و ایمنی باتری بسیار بهبود می‌یابد. زیرا اتیلن کربنات قابل اشتعال بوده و در ولتاژ بالای ۴٫۳ ولت ناپایدار است. اما الکترولیت جدید غیرقابل اشتعال بوده و می‌تواند تا

---

[۱] Carbon Nanotube (CNT)

[۲] LG Chem

[۳] (TFEP)

ولتاژ ۴۰۹ ولت را نیز تحمل کند. این افزایش ولتاژ در سایز یکسان بدین معناست که باتری با هر بار شارژ مدت زمان بیشتری می‌تواند به فعالیت خود ادامه دهد. این پژوهش در نشریه نیچر چاپ شده و در صورت اقتصادی بودن آن می‌تواند در عملکرد باتری‌ها بسیار موثر باشد. فیلم تست اشتعال این پژوهش و مقایسه عملکرد ماده جدید با اتیلن کربنات قابل دسترس است که به خوبی تمایز میان دو ماده را نشان می‌دهد [۱۰].

۱-۴. دیگر تحولات

رصد اخبار فناوری نشان می‌دهد برخی شرکت‌ها اقدام به برخی تغییرات ساختاری در دسته‌بندی یا طراحی باتری‌های لیتیوم-آهن-فسفات بدون تغییر مواد نموده‌اند که عملکرد باتری را بسیار بهبود بخشیده‌اند. از آن جمله می‌توان به عملکرد شرکت‌های لکسوس و بی‌وای‌دی اشاره کرد.

شرکت لکسوس با تغییر شکل باتری از حالت متداول، اقدام به پخش تمامی ۲۸۸ سلول باتری لیتیوم-یون در کف کابین و صندلی عقب نموده است. شکل زیر نمایی از باتری‌های تعبیه‌شده را نشان می‌دهد.

شکل ۱-۴، نمایی از جانمایی باتری در کف خودرو شرکت لکسوس

در هر لحظه ولتاژ و دمای هر سلول و بلوک باتری به منظور افزایش کنترل و ماندگاری باتری توسط سنسورهای تعبیه‌شده بررسی می‌شود. این شرکت اولین خودروی برقی کامل خود با استفاده از این روش

موسوم به UX ۳۰۰E، را در نوامبر ۲۰۱۹ در چین رونمایی کرد. در این خودرو از یک سیستم هوا–خنک برای سلول باتری استفاده شده که از سیستم های آب–خنک، ایمن‌تر و سبک‌تر است. با گردش هوای خنک شده در داخل باتری می توان بازده پایدار باتری را حتی با سرعت بالا و در حین شارژ سریع تکرار کرد. این سیستم خنک کننده در کنار سیستم تهویه مطبوع کابین می تواند عملکرد خودرو، عمر باتری و عملکرد شارژ را افزایش دهد [۱۱]. خودروی اشاره شده دارای یک باتری ۵۴٫۳ کیلووات–ساعتی بوده و می‌تواند با یکبار شارژ تا ۴۰۰ کیلومتر پیمایش کند. عمر باتری بسیار مطلوب بوده و این شرکت ضمانت ۱۰ ساله (۱ میلیون کیلومتر یا۶۲۱،۰۰۰ مایل) را برای این خوردو تعهد داده و قرار است تا پایان سال جاری به بازارهای منتخب اروپا معرفی شود [۱۱].

شرکت بی‌وای‌دی نیز یک طراحی جدید برای شکل سلول‌ها و بسته‌بندی آن‌ها موسوم به بلید باتری[۱] ارائه کرده است. در طراحی جدید به جای استفاده از سلول‌های متداول منشوری، از سلول‌های باریک‌تر و بلندتر استفاده شده است که علاوه بر کاهش هزینه، میزان ایمنی و همچنین چگالی حجمی باتری افزایش پیدا کرده است [۱۲]. این شرکت اعلام کرده است که خودرو الکترونیکی هان[۲]، مدل پرچمدار برقی خالص این شرکت بزودی در اروپا رونمایی خواهد شد. خودرو الکترونیکی هان اولین خودرو سواری تمام الکتریکی است که مجهز به فناوری جدید بلید باتری است که قابلیت محدوده طی شده در یک بار شارژ را تا ۶۰۵ کیلومتر (۳۷۶ مایل) دارد. این وسیله نقلیه همچنین دارای یک کنترل موتور کاربید سیلیکون با کارایی بالا است که موجب می‌شود خودرو الکترونیکی هان صفر تا ۱۰۰ کیلومتر در ساعت (۶۲ مایل در ساعت) را در ۳٫۹ ثانیه پیش بروند [۱۲].

هرچند چگالی انرژی و عمر باتری در هر دو نمونه اشاره شده بسیار قابل توجه است اما به نظر می‌رسد یک چالش باقی‌مانده در هر دو نمونه، زمان شارژ باتری باشد. اخیرا برخی پژوهشگران نشان داده‌اند که با ایجاد اختلاف بین دمای شارژ و تخلیه می‌توان سرعت شارژ را تا حد قابل توجهی افزایش داد [۱۳]. احتمال دارد که این پژوهش و تحقیقات علمی دیگر بتوانند به بهبود زمان شارژ باتری‌های لیتیوم- یون معمولی و پیشرفته کمک نماید.

---

[۱] Blade Battery

[۲] Han EV

فصل ۲– باتری‌های پسا–لیتیوم‌یون

باتری‌های پسا لیتیوم–یون به باتری‌هایی اطلاق می‌شود که ضمن حفظ یون لیتیوم به عنوان عامل انتقال بار در درون باتری، عناصر اصلی شامل کاتد، آند یا الکترولیت در آن‌ها تغییر نموده و منجر به افزایش پارامترهای مطلوب باتری از جمله تراکم انرژی بشود. در حال حاضر چند گزینه مطرح برای این نوع از باتری‌ها وجود دارد که عبارتند از:

- جایگزینی همه یا بخشی از آند فعلی با سیلیکون یا فلز لیتیوم
- جایگزینی همه یا بخشی از کاتد فعلی با فلز گوگرد
- جایگزینی الکترولیت مایع با یک الکترولیت جامد

هرکدام از موارد اشاره شده دارای مزایا و چالش‌های خاص خود است که در ادامه به آن‌ها اشاره شده و مهم‌ترین تحولات مربوط به هرکدام نیز به تفکیک آورده شده است.

۲-۱. باتری‌های سیلیکونی

ظرفیت انرژی ذخیره‌شده در سیلیکون نسبت به گرافیت حدود پنج برابر است و با استفاده از باتری سیلیکونی می‌توان ظرفیت کل باتری را تا سه برابر نسبت به باتری گرافیتی افزایش داد. با این وجود مهم‌ترین مشکل سیلیکون در افزایش حجم ماده به هنگام جذب لیتیون و در نتیجه کاهش عمر باتری در اثر تعدد دفعات شارژ و انبساط و انقباض‌های متعدد است. بدین صورت که در پایان اولین شارژ هر باتری یک لایه محافظتی بین الکترود و الکترولیت مایع[۱] تشکیل می‌شود که این لایه از خوردگی بیشتر الکترود و مصرف آن جلوگیری می‌کند. مشابه این امر زنگ روی آهن است به طوری که اکسید آهن وقتی روی آهن تشکیل می‌شود از خوردگی بیشتر آن جلوگیری می‌کند. اما در باتری سیلیکونی به علت

[۱] solid electrolyte interphase (SEI)

انبساط سیلیکون این لایه محافظتی در هر دفعه تخلیه شکسته می‌شود و مجددا در پایان سیکل بعدی تشکیل می‌شود. این امر باعث می‌شود تا آند سیلیکونی به سرعت مصرف شده و زمان عمر باتری بشدت کاهش یابد. به‌طوری‌که معمولا عمر باتری سیلیکونی به ۵۰ دفعه چرخه شارژ و تخلیه هم نمی‌رسد.

اکثر پژوهش‌های صورت گرفته برای حل مشکل عمر پایین سیلیکون، به سه دسته تقسیم می‌شود. در روش اول که بسیار نیز متداول است مقدار کمی سیلیکون به گرافیت افزوده می‌شود. روش دوم استفاده از سیلیکون در ابعاد نانویی است که به علت ابعاد نانویی، مقدار تنش‌های ایجاد شده به حدی نیست که بتواند باعث شکست سیلیکون بشود. این روش چندسالی است مورد توجه شرکت‌های مختلف قرار گرفته و در عمل نیز سیلیکون به عنوان یک پوشش برای گرافیت یا گرافن قرار می‌گیرد. با استفاده از این روش می‌توان تراکم انرژی باتری را تا ۴۰٪ افزایش داد. روش سومی که برخی تولیدکنندگان از آن استفاده کرده‌اند، تغییر معماری باتری و تولید باتری سه‌بعدی در ابعاد کوچک است [۱۴].

امروزه سازندگان باتری مانند تسلا از روش اول استفاده کرده و مقادیر جزئی از سیلیکون را به پودر گرافیت اضافه می‌کنند. این پودر با پلاستیک چسب مانندی ترکیب شده و سطح فویل مسی نازکی را می‌پوشاند تا آند را تشکیل دهد. اما یون‌های لیتیوم قبل از گرافیت با سیلیکون واکنش می‌دهند و سیلیکون منبسط می‌شود و چسب پلاستیکی تضعیف می‌شود. به همین دلیل ضروری است تا در این روش درصد اکسید سیلیکون از ۵ درصد تجاوز نکند. با استفاده از این روش مقدار ظرفیت باتری به مقدار اندکی افزایش می‌یابد [۱۵].

یکی از ابتکاراتی که اخیرا توسط شرکت اینیویت[۱] انجام گرفته است، حذف چسب پلاستیکی است. در عوض فرایند مورداستفاده این شرکت یک لایه متخلخل سیلیکونی به ضخامت ۱۰ تا ۶۰ میکرون را مستقیما روی فویل مسی ایجاد می‌کند. یک پوشش حفاظتی به ضخامت چند نانومتر مانع از واکنش سیلیکون با الکترولیت می‌شود. این فرایند به سیلیکون با کیفیت بالا احتیاج ندارد، بنابراین هزینه تولید این نوع آند از آند گرافیتی با ظرفیت مشابه کمتر است. هم‌چنین با توجه به اینکه ورود و خروج یون‌های لیتیوم به/از سیلیکون خیلی سریع روی می‌دهد، ۷۵ درصد از ظرفیت این باتری ظرف مدت ۵

[۱] Enevate

دقیقه و بدون انبساط زیاد شارژ می‌شود و پیمایش آن توسط یک خودروی معمولی نیز به میزان ۴۰۰ کیلومتر خواهد بود [۱۵].

کمپانی سیلا نانوتکنولوژی[۱] نیز اخیرا توانسته با افزایش سهم سیلیکون به یک باتری جدید دست پیدا کند. رویکرد این شرکت این بوده که اتم‌های سیلیکون را درون یک پوسته با ابعاد نانو با فضای خالی زیادی درون آن قرار دهد. بدین ترتیب لایه محافظتی بر روی پوسته تشکیل می‌شود در حالی که انقباض و انبساط سیلیکون درون پوسته انجام می‌شود و در نتیجه لایه محافظتی شکسته نمی‌شود. همچنین در فرآیند خالص‌سازی سیلیکون در ابتدا سیلیکون با استفاده از شن پودر شده و سپس با نمک و منیزیم قبل از گرم کردن ته‌نشین می‌شود تا هرگونه اکسیژن درون سیلیکون حذف شود [۱۶]. ظرفیت این باتری نسبت به باتری‌های معمولی حداقل ۲۰٪ بهینه شده و تا ۴۰٪ نیز افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین با کاهش ضخامت آند تا ۶۷٪، میزان زمان شارژ نسبت به باتری‌های معمولی تا ۹ برابر سریعتر شود بدون آنکه دندریت‌ها در باتری شروع به رشد کنند. زمان عمر این باتری در حالت شارژ و تخلیه کامل بین ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ چرخه است. ارزش شرکت سیلانانو بیش از ۳۵۰ میلیون دلار است و جدیدا شرکت بی‌ام‌دبلیو و دایملر نیز به این باتری ابراز علاقه کرده و به دنبال تجاری‌سازی آن برای استفاده در خودروهای الکتریکی هستند. بدین منظور این شرکت بودجه ۴۵ میلیون دلاری را دریافت و دو مدیر بلندپایه از جمله کورت-کلتی از فعالین حوزه باتری در شرکت تسلا را استخدام کرده است. [۱۷] و [۱۸].

شرکت اینویکس[۲] از فعالین در حوزه باتری سیلیکونی توانسته با استفاده از روش سوم یعنی تغییر معماری سلول‌های سه‌بعدی، عملکرد باتری را فعلا در ابعاد کوچک تا حد قابل توجهی افزایش دهد. این شرکت اولا با استفاده از اضافه نمودن فولاد ضدزنگ بر روی سیلیکون بر روی آن محدودیت مکانیکی اعمال کرده است تا سلولهای سیلیکونی نتوانند منبسط شوند. برای یک فضای یک میلیمتر مربعی از سیلیکون به یک کیلوگرم نیرو نیاز است تا انبساط آن برگردد و اتصال سیلیکون به هنگام تخلیه

---

[۱] Sila Nanotechnologies

[۲] Enovix

حفظ شود. برای یک فضای ۲۰ *۲۰ میلیمتری از سیلیکون به ۴۰۰ کیلوگرم نیرو و یک سلول به ۲۰۰۰ کیلوگرم نیرو نیاز است تا از انبساط سیلیکون جلوگیری شود. به منظور اینکه این مقدار نیرو در کل باتری یکنواخت اعمال شده و از نیروی اضافی به خصوص در سلول‌های پایینی جلوگیری شود، این شرکت اقدام به تغییر معماری باتری نموده است. به طوری که به جای ساخت سلول از لایه‌های عمودی پایین به بالا و متشکل از الکترود و جداکننده بر روی یکدیگر، با استفاده از تغییر جهت ۹۰ درجه‌ای، سلول‌ها به صورت افقی از چپ به راست در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. این شرکت توانسته است تا ظرفیت باتری را حداقل ۴۰٪ افزایش دهد در حالی که عمر باتری‌های این شرکت حداقل ۶۰۰ چرخه باشد. بیش از ۷۵٪ از فرآیند تولید باتری‌های این شرکت مشابه باتری‌های معمولی بوده و به همین دلیل از لحاظ اقتصادی قابل رقابت با باتری‌های لیتیوم-یون معمولی است. این شرکت اعلام کرده است محصول جدید خود که در سال ۲۰۲۱ روانه بازار خواهد شد، خواهد توانست ظرفیت باتری را تا ۱۰۰٪ نیز افزایش دهد و عمر باتری نیز در آینده به ۱۰۰۰ چرخه خواهد رسید. محصولات این شرکت در زمینه باتری‌های تلفن همراه و ابعاد کوچک است اما مسئولان این شرکت اعلام کرده‌اند در حال همکاری با بی‌ام‌دبلیو و دایملر هستند و به دنبال تولید نسل‌های جدید باتری سیلیکونی در آینده در خودروی الکتریکی هستند [۱۴].

یکی از مهم‌ترین رویدادهایی که به صورت سالانه توسط موسسه نوآوری کمبریج[۱] در حوزه باتری انجام می‌شود، سمینار بین المللی رویدادهای باتری است که سی و هفتمین دوره آن در در اواخر ماه جولای سال جاری و به صورت مجازی برگزار گردید. زمینه بهینه‌سازی و توسعه الکترودها یکی از محورهای سیمنار است و ارائه ویژه این قسمت توسط لئون شائو[۲] از محققان موسسه فناوری الینیوز[۳] انجام خواهد شد. ایشان و تیم همراه یک طراحی جدیدی از باتری‌های سیلیکونی ارائه خواهند داد که در نتیجه آن

[۱] Cambridge Innovation Institute

[۲] Leon Shaw

[۳] Illinois Institute of Technology

تراکم انرژی آن به ۸۰۰ میلی‌آمپر ساعت بر گرم با سرعت بالای شارژ و تخلیه رسیده و عمر باتری نیز ۱۰۰۰ چرخه خواهد بود [۱۹].

۲-۲. باتری‌های لیتیوم-فلز

لیتیوم در بین فلزات دارای بیشترین تراکم انرژی است و در نتیجه می‌تواند نسبت به سایر فلزات انرژی بیشتری را در خود ذخیره کند. درحالیکه این ویژگی فلز لیتیوم دهه‌هاست که شناسایی شده است، تاکنون مسئلهٔ ایمنی استفاده از فلز لیتیوم و تشکیل دندریت (به علت سطح واکنش‌پذیری بالا) حل نشده است. به همین دلیل عمر باتری‌های لیتیوم-فلز بسیار کوتاه و در حد ۵۰ چرخه شارژ و تخلیه است. چالش بعدی در گران بودن کاتد مناسب برای آند لیتیومی است زیرا کاتدهای فعلی پاسخگوی فلز لیتیوم به عنوان آند نیستند. در زمینه جلوگیری از رشد دندریت پژوهش‌های گوناگون صورت گرفته اما هرکدام دارای معایبی هستند و در کل علیرغم افزایش ظرفیت نسبت به باتری معمولی، عمر آن‌ها همچنان پایین است [۲۰].

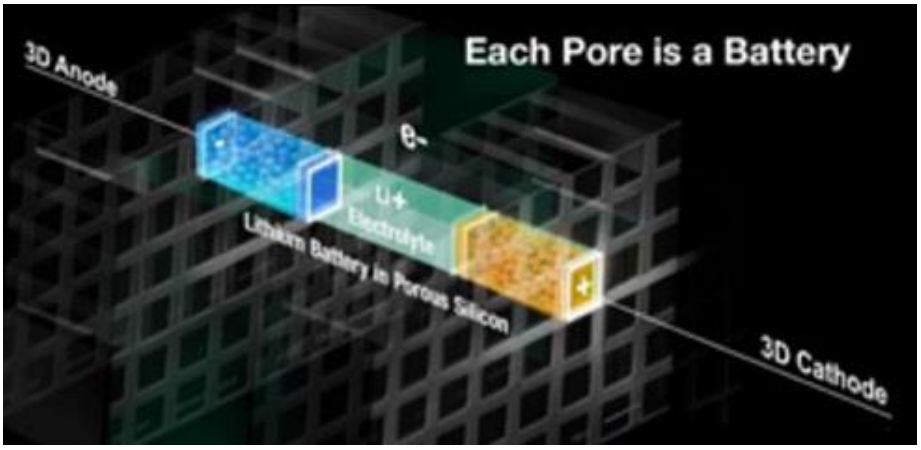
جدیدا شرکت XNRGI که تحت حمایت آزمایشگاه ملی آرگون آمریکا نیز است، اعلام نمود که یک محصول جدید به نام پاورچیپ[۱] را تولید کرده است که با استفاده از تکنیک‌های مختلف، سطح واکنش‌پذیری لیتیوم در آن کاهش یافته و عملکرد باتری نسبت به باتری لیتیوم-یونی بهبود یافته است. این بهبود عملکرد با قرار دادن لیتیوم فلز در بستر سیلیکون که با فیلم های نازک، پوشانده شده و از میلیون ها سلول کوچک تشکیل شده، انجام گرفته است. این بستر سه بعدی، سطح آند را در مقایسه با آند سنتی دو بعدی لیتیوم یون افزایش می دهد. همچنین به جای ابداع یک روش تولید جدید، برخی از روش‌های تراشه سازان در ساخت مدارها استفاده گردیده که شامل حفر حفره های ۲۰ در ۲۰ میکرومتر به داخل سیلیکون و کاربرد فیلم های نازک است. از این رو نام باتری پاور چیپ نامیده شده است [۲۱] و [۲۲].

---

۱ Power Chip

این باتری نسبت به باتری‌های معمولی چند مزیت مهم دارد. تراکم انرژی آن حداقل دو برابر است و ۸۰٪ باتری نیز در زمان ۱۵ دقیقه نیز شارژ می‌شود. رشد دندریت در آن شکل نمی‌گیرد و حتی در صورت تشکیل از سلولی به سلول دیگر منتقل نشده و باعث خرابی کل باتری نخواهد شد. این باتری نسبت به باتری‌های معمولی سبک‌تر بوده و در صورت تولید انبوه نیز هزینه آن حداقل ۳۰٪ نسبت به باتری‌های معمولی می‌تواند کمتر باشد [۲۱] و [۲۲].

این شرکت انتظار دارد تا در سال جاری از این باتری‌ها در محصولات متحرک مانند موتورسیکلت، پهباد، اسکوتر، ربات‌ها و غیره استفاده شود، اما این باتری برای خودروی الکتریکی در سال ۲۰۲۲ یا ۲۰۲۳ به صورت محدود و در سال ۲۰۲۴ به صورت گسترده به کاربرد برسد [۲۲]. قیمت فعلی باتری در حدود ۱۵۰ دلار بر وات–ساعت است اما انتظار می‌رود تا در سال ۲۰۲۱ به ۱۰۰ دلار کاهش یابد. در صورتی که این رقم برای باتری‌های خودروهای الکتریکی محقق شود بسیار حائز اهمیت خواهد بود. شکل زیر نمایی از ویژگی‌های باتری و شکل ساختاری آن را نشان می‌دهد [۲۳].



شکل ۲-۱، نمایی سلول‌های کوچک باتری پاورچیپ

این شرکت همچنین در بخش ذخیره سازی شبکه نیز اهدافی دارد و قادر است سالانه ۲۴۰ مگاوات‌ساعت باتری لیتیوم–یون با قابلیت کارکرد در دمای بالای ۵۵ درجه سلسیوس را تولید کند. این شرکت در سال گذشته، توافق نامه ای برای ایجاد یک سرمایه گذاری مشترک با استارتاپ کانادایی کراس بوردر پاور، برای فروش و توزیع باتری‌های خود به مشتریان در آمریکای شمالی امضا نمود [۲۲] [۲۴].

یکی از روش‌های جدیدی که توسط محققان دانشگاه کالیفرنیا ابداع شده، استفاده از دستگاه فراصوت[۱] برای جلوگیری از رشد دندریت در باتری‌های لیتیوم–فلز است. دستگاهی که این گروه ابداع کرده‌اند، یکی از اجزاء درونی باتری است و وظیفهٔ آن انتشار امواج فراصوت برای تولید یک جریان مدور (چرخشی) در مایع الکترولیت بین آند و کاتد است. این جریان باعث می‌شود تا از رشد دندریت‌های لیتیوم در هنگام شارژ باتری جلوگیری شود. محققان نشان دادند که عمر باتری لیتیوم فلزی که مجهز به این دستگاه انتشار امواج فراصوت باشد می‌تواند به ۲۵۰ چرخهٔ شارژ و تخلیه برسد. همچنین چرخه عمر باتری لیتیوم–یون معمولی با استفاده از این دستگاه به ۲۰۰۰ چرخه خواهد رسید در حالی که زمان شارژ به ۱۰ دقیقه می‌رسد. اگرچه هنوز مقدار عمر بهینه‌شده با استفاده از این فناوری برای باتری‌های

[۱] Ultrasound

لیتیوم-فلزی مطلوب نیست اما اهمیت این فناوری به این است که می‌توان در هر باتری با الکترولیت مایع از آن استفاده کرد و علاوه بر افزایش عمر باتری، زمان شارژ را نیز بسیار کاهش داد [۲۵].

۲-۳. باتری‌های لیتیوم-سولفور

در حال حاضر سولفور مهم‌ترین گزینه برای جایگزینی با کاتدهای فعلی است، زیرا عنصر سولفور علاوه بر فراوانی در سطح زمین و در نتیجه کاهش قیمت آن، می‌تواند ظرفیت باتری را تا چند برابر افزایش دهد. اما در مقابل استفاده از این ماده با چالش‌های اساسی همراه است که از آن جمله می‌توان به پایین بودن هدایت الکتریکی، انبساط حجمی و به خصوص عمر پایین آن اشاره کرد.

یکی از مهم‌ترین خبرها در حوزه باتری‌های لیتیوم-گوگرد، مربوط به راه‌اندازی یک کارخانه جدید باتری لیتیوم-گوگرد در برزیل است. اکسیس انرژی[۱] و شرکت توسعه میناس گرایس کودمگی[۲] یک اجاره نامه ۱۵ ساله با مرسدس بنز برزیل به منظور تصاحب یک کارخانه واقع در محل تولید مرسدس بنز در جنوب شرقی برزیل امضا کردند. در این کارخانه قرار است عملیات تولید باتری لیتیوم-گوگرد شروع شود که در آن بالغ بر ۵۰ میلیون دلار آمریکا سرمایه گذاری شده است. نوردیکا فارمکیوتیکال[۳] از برزیل، طراحی و مهندسی مرتبط با طرح کارخانه و ماشین آلات را انجام خواهد داد و قرار است تا سال ۲۰۲۳ راه اندازی و بهره برداری شود. در فاز اول، حدود ۲۰،۰۰۰ متر مربع برای تولید ۵ میلیون سلول لیتیوم-گوگرد در سال اجاره شده است که امکان گسترش و دو برابر شدن املاک و ظرفیت سلول نیز در فار بعدی وجود خواهد داشت [۲۶]. پیشتر نیز شرکت اکسیس انرژی در ژانویه سال ۲۰۲۰، گزارش داد که نمونه های سلولی خود را با موفقیت ۴۷۱ وات-ساعت بر کیلوگرم آزمایش کرده و از دستیابی به ۵۰۰ وات-ساعت بر کیلوگرم در سال آینده اطمینان داد [۲۶].

در یک نمونه جدید که اخیرا توسط محققان دانشگاه موناش استرالیا رونمایی شد، ایشان توانستند با

---

[۱] OXIS Energy Ltd UK

[۲] Minas Gerais CODEMGE

[۳] NORDIKA Pharmaceutical

استفاده از اتصالات پلیمری در فرآیند ساخت کاتد، نوعی باتری سولفوری کوچک را بسازند که به علت ظرفیت بالا می‌تواند با یکبار شارژ به مدت پنج روز در گوشی همراه کار بکند. این باتری مزایای زیادی از قبیل عمر مناسب و هزینه ساخت پایین نیز دارد و ثبت اختراع نیز شده است. سلول‌های نمونه اولیه این محصول با مشارکت مؤسسه تحقیق و توسعه آلمانی فرانهافر در حال توسعه است تا با پشتیبانی ۲,۵ میلیون دلار بودجه دولتی بر روی خودروها و شبکه های خورشیدی نیز بررسی شود. مدیر این پروژه خانم پروفسور مهدخت شعبانی است و در مصاحبه‌ای اعلام کرد که یک خودروی الکتریکی معمولی می‌تواند با استفاده از این باتری تا ۱۰۰۰ کیلومتر پیمایش کند. در حالی که بسیار سبک بوده و هزینه ساخت آن نیز به مراتب پایین‌تر از باتری‌های فعلی است. با این وجود وی اظهار داشت که به علت عدم توسعه آند مناسب (به خصوص فلز لیتیوم)، عمر این باتری برای استفاده در خودروی الکتریکی به اندازه مطلوب نبوده و زیر ۵۰۰ چرخه شارژ و تخلیه است. در نتیجه اصلی‌ترین چالش برای استفاده این باتری در خودروی الکتریکی، عمر پایین آن است و تیم مذکور در حال تحقیق بر روی رفع این چالش هستند [۲۷] [۲۸].

در نمونه دیگر محققان دانشگاه تگزاس نشان دادند که ورود تلوریم (Te) به سیستم لیتیوم سولفور به عنوان یک افزودنی کاتدی به طور قابل توجهی برگشت پذیری آبکاری/لایه برداری لیتیوم را با شکل دادن فاز میانی الکترولیت جامد غنی از سولفید بر روی سطح لیتیوم بهبود می بخشد [۲۹].

در پژوهشی دیگری، گروهی از محققان دانشکده مهندسی کاکرل نشان دادند که ایجاد یک لایه حاوی تلوریم درون باتری در بالای فلز لیتیوم می تواند دوام آن را چهار برابر بیشتر کند. در این فناوری لایه تثبیت کننده طی یک فرآیند ساده در موقعیت از پیش تعیین‌شده تشکیل می‌شود و نیازی به انجام مراحل پیچیده و پرهزینهٔ آماده‌سازی و یا ایجاد پوشش بر روی آند لیتیوم–فلز نیست. به همین دلیل تیم مذکور این فناوری را به سودآوری تجاری نزدیک کرده اند [۳۰].

با توجه به این دو پژوهش، به نظر می‌رسد استفاده از عنصر تلوریوم در باتری‌های لیتیوم–سولفور به عنوان یک راهکار برای بهبود کارآیی این نوع از باتری‌ها باشد که قابلیت بررسی عملی دارد.

۲-۴. باتری‌های حالت جامد

باتری‌های لیتیوم-یون فعلی برای انتقال یون های لیتیوم بین آند و کاتد از الکترولیت های مایع استفاده می‌کنند. در این حالت اگر یک سلول باتری خیلی سریع شارژ شود باعث اتصال کوتاه شده و منجر به انفجار و آتش سوزی می‌شود. همچنین الکترولیت‌های فعلی تحمل نوسانات دمایی را نیز نداشته و این امر نیز باعث آسیب باتری می‌شود. به همین دلیل باتری‌های الکترولیت جامد برای جایگزینی با باتری‌های فعلی مطرح شده است. مواد مختلفی در این نوع از باتری‌ها به عنوان جایگزین الکترولیت مطرح شده که هرکدام مزایا و معایب خاص خود را دارند.

یکی از آخرین تکنولوژی‌هایی که وارد مسابقهٔ بهترین تکنولوژی باتری شده است نوع جدیدی از باتری‌های حالت جامد است که یک نمونه آن توسط مؤسسهٔ فناوری‌های پیشرفتهٔ سامسونگ و مؤسسهٔ تحقیق و توسعهٔ سامسونگ ساخته شده است. تیم تحقیقاتی این پروژه اعلام کردند با استفاده از یک لایهٔ بسیار نازک و نانوکامپوزیت از نقره و کربن بر روی آند فلز لیتیوم توانسته‌اند ایمنی، طول عمر و تراکم انرژی باتری را بهبود بخشند. کاتد این محصول از نیکل-منگنز-کبالت تشکیل شده و الکترولیت آن نیز از سولفید است. به گفتهٔ این تیم تحقیقاتی استفاده از این لایهٔ نانوکامپوزیتی باعث شده تا چگالی انرژی باتری به ۹۰۰ وات -ساعت بر لیتر (حدود سه برابر باتری‌های فعلی) افزایش یابد و خودرو الکتریکی را قادر می‌سازد تا با یک بار شارژ مسافت ۵۰۰ مایل (۸۰۰ کیلومتر) را بپیماید. اندازهٔ این باتری نصف اندازهٔ یک باتری لیتیومی معمول بوده و چرخهٔ عمر این باتری با قابلیت بیش از ۱۰۰۰ بار شارژ نیز بسیار مطلوب است [۳۱].

باتری حالت جامد دیگری که در سال‌های اخیر بر روی آن تحقیق و توسعه داده شده است، یک باتری شیشه‌ای[۱] است که توسط پروفسور گودونوف (یکی از سه برنده جائزه نوبل شیمی در سال ۲۰۱۹) رونمایی شده است. ایشان برای اولین بار در سال ۲۰۱۷ به جای مایع، از الکترولیت‌های شیشه‌ای استفاده کردند که به نوبه خود امکان استفاده از یک آند قلیایی-فلزی را نیز فراهم می آورد که مانع از تشکیل

[۱] glass

دندریت ها می‌شود. این تیم در سال ۲۰۲۰ نیز از همین نوع باتری درخواست یک ثبت اختراع داده است. در همین اواخر شرکت هیدروکبک از فعالین حوزه باتری و به خصوص حالت جامد اعلام نموده که قصد دارد این باتری را تجاری‌سازی کند که باتری شیشه‌ای نسل سوم باتری‌های حالت جامد این شرکت خواهد بود. بنابر ادعای شرکت، نسل اول باتری‌های حالت جامد (پلیمری) توسط شرکت هیدروکبک تجاری شده است. شرکت فرانسوی بلو سلوشنز[۱] نیز هم‌اکنون از باتری‌های لیتیوم پلیمر این شرکت برای اتوبوس‌های برقی و ذخیرهٔ انرژی استفاده می‌کند [۳۲].

چگالی انرژی باتری شیشه‌ای سه برابر باتری‌های لیتیوم یون معمولی است. این امر بدان معنا است که اگر مسافت طی‌شده خودرو چوی‌بولت[۲] به وسیله باتری‌های فعلی به اندازه ۳۲۰ کیلومتر باشد آنگاه این مسافت با یکبار شارژ به ۱۰۰۰ کیلومتر افزایش می‌یابد. در حالی که عمر باتری نیز بیش از ۱۲۰۰ چرخه خواهد بود که کاملا مطلوب است. چگالی انرژی بالاتر تنها مزیت این باتری حالت جامد نیست، بلکه اولا سلول‌های باتری را می توان از مواد سازگار با محیط زیست تهیه کرد. ثانیا این باتری می‌تواند در دمای منهای ۲۰ درجه تا ۶۰ درجه سلسیوس استفاده شود که مزیت بسیار مهمی نسبت به دیگر باتری‌ها و مناسب برای کشورهای سردسیر مانند کانادا است. همچنین به علت استفاده از شیشه می‌توان سدیم را با لیتیم جایگزین کرد و یا اینکه هر دو را در کنار هم استفاده نمود. مزیت سدیم در فراوانی و ارزان بودن آن است. زمان شارژ آن نیز سریع و در عرض چند دقیقه خواهد بود [۳۲].

با وجود مزایای فراوان هر دو باتری حالت جامد سامسونگ و پروفسور گودونوف، مقیاس‌پذیری و اقتصادی بودن این باتری‌ها در هاله‌ای از ابهام است. موضوعی که شاید اصلی‌ترین چالش برای تجاری‌سازی باتری‌های حالت جامد باشد.

بسیاری از کارشناسان مانند کریس-روبینسون[۳]، از اعضای موسسه تحقیقاتی لوکس[۱] معتقدند باتری‌های حالت جامد حداقل تا یک دهه آتی تجاری نخواهند شد و نبایستی نسبت به این نوع اخبار هیجان زده

---

[۱] Blue Solutions

[۲] Chevy Bolt

[۳] Chris Robinson

شد. زیرا تبدیل یک نمونه آزمایشگاهی به نمونه تجاری کار کوچکی نیست. به اعتقاد ایشان یک مشکل اساسی که بسیاری از الکترولیت های حالت جامد با آن روبرو هستند عدم وجود یک فرآیند تولید مقرون به صرفه است. در همین راستا اگر چه مخترعین از مواد با قیمت کمتری (مانند سدیم) استفاده می‌کنند اما تولیدکنندگان از کل هزینه تولید باتری نگران هستند. وی معتقد است که اگر یک نمونه ای جدید از مواد کاتدی در باتری‌های معمولی یافت شود، حدود ۱۰ سال طول می کشد تا این کشف به اجرای تجاری برسد. به همین دلیل اگر نه بخشی از مواد بلکه کل سلول بخواهد به یک معماری جدید برسد زمان سپری شده به مراتب بیشتر و در حدود ۱۵ سال خواهد بود. به همین دلیل روبینسون معتقد است که این نوع باتری‌ها حداقل تا قبل از سال ۲۰۳۰ به بازار عرضه نخواهند شد. ضمن اینکه به احتمال زیاد برخی باتری‌های حالت جامد مانند مواد پلیمری وارد بازار خواهند شد و نه مواد شیشه‌ای، زیرا فرآیند ساخت آنها در مقیاس بزرگ بسیار راحت‌تر است [۳۳].

پروفسور لی–چو از اساتید دانشگاه استنفورد و فعالین در حوزه نانو با سابقه ثبت اختراع نیز با نظر روبینسون همراه است. به گفته وی، سرمایه‌گذاری های سنگین بسیاری از شرکت‌ها مانند سرمایه‌گذاری ۵ میلیارد دلاری تسلا در زمینه باتری‌های لیتیوم–یون نشان می‌دهد که پیش‌بینی ۱۵ ساله روبینسون کاملا معقول است. وی معتقد است حتی با تجاری‌سازی فناوری‌های جدید، حداقل ۵۰ سال طول خواهد کشید تا خودروهای الکتریکی به سهم ۷۰ درصدی در بازار خودرو برسند [۳۳].

برخی کارشناسان مانند پروفسور هاله اردبیلی نیز معتقدند برخی از باتری‌ها هستند که ظرفیت آن‌ها نسبت به باتری‌های لیتیوم یونی در حدود بیست برابر است که در برابر ظرفیت سه برابری باتری‌های حالت جامد بسیار بیشتر بوده و ممکن است یکی از نوآوری‌های در این زمینه حتی زودتر تجاری شود [۳۳].

---

[۱] LUX Research

با توجه به ضرورت کاهش هزینه‌های ساخت باتری حالت جامد و اقتصادی نمودن آن، اخیرا روشی در دانشگاه متروپولیتن توکیو[۱] برای تولید به صرفه یکی از سرامیک‌های متداول در باتری‌های حالت جامد ابداع شده است که نسبت به سائر پژوهش‌ها اهمیت دارد.

در حال حاضر سرامیک از نوع گارنت که با نام لیتیوم-لانتانیوم-زیرکونیم‌اکساید[۲] شناخته می‌شود بدلیل رسانایی یونی بالا و تطابق‌پذیری با فلز لیتیوم بعنوان مادهٔ اصلی الکترولیت حالت جامد مورد توجه قرار گرفته است. با این وجود تولید الکترولیت‌های لیتیوم-لانتانیوم-زیرکونیم‌اکساید با چگالی بالا نیاز به دماهای بالا و در حدود ۱۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد دارد. به همین دلیل تیمی به سرپرستی پروفسور کیوشی کانامورا[۳] در دانشگاه متروپولیتن توکیو شیوه‌ای ابداع کردند که بتوانند در دمای اتاق الکترولیت ورقه‌ای منطعف از کامپوزیت لیتیوم-لانتانیوم-زیرکونیم‌اکساید تولید کنند. آن‌ها دوغاب سرامیک را بر روی یک زیرلایهٔ نازک پلیمری پخش کردند. بعد از خشک شدن در اجاق خلاء الکترولیت صفحه‌ای با ضخامت ۷۵ میکرون در یک مایع یونی قرار می‌گیرد تا رسانایی یونی آن افزایش یابد. مایع یونی، نمک‌هایی هستند که در دمای اتاق، مایع می‌باشند. این نمک‌ها بسیار رسانا بوده و در عین حال غیرقابل اشتعال و پایدار هستند. مایع یونی فواصل میکروسکوپی ساختار الکترولیت صفحه‌ای را پر می‌کند و ذرات سرامیک را بهم متصل کرده و مسیری کارآمد برای عبور یون‌های لیتیوم ایجاد می‌کند. این مایع‌های یونی به طور قابل توجهی مقاومت سطحی کاتد را نیز کاهش می‌دهد. طی تحقیقات بیشتر، این گروه دریافتند که یون‌های لیتیوم هم از طریق مایع یونی و هم از طریق ذرات سرامیک موجود در ساختار منتشر و پخش می‌شوند که نقش هر دو ماده را برجسته می‌کند. این ترکیب ساده و مناسب تولید صنعتی است و کل فرآیند نیز در دمای اتاق بدون نیاز به دماهای بالا انجام می‌گیرد. به همین دلیل به نظر می‌رسد این شیوه می‌تواند در آینده برای باتری‌های حالت جامد سرامیکی بسیار مهم باشد و بایستی بیشتر مورد بررسی قرار بگیرد [۳۴].

---

[۱] Tokyo Metropolitan University

[۲] lithium, lanthanum, and zirconium oxide (LLZO)

[۳] Professor Kiyoshi Kanamura

فصل ۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این گزارش جدیدترین تحولات صورت گرفته در چند ماه گذشته در حوزه‌های مختلف از باتری‌های لیتیوم-یون بررسی شد که جمع‌بندی اخبار مربوط به هر بخش به طور جداگانه و به ترتیب اولویت در ادامه آورده شده است.

❖ باتری‌های لیتیوم-یونی پیشرفته

تحلیل اخبار منتشر شده نشان می‌دهد که پیشرفت‌ها در حوزه باتری‌های لیتیوم-یونی پیشرفته کاملا محسوس و برخی از آن‌ها نیز تجاری شده‌اند. از آن جمله می‌توان به محصولات شرکت‌های لکسوس، بی‌وای‌دی، تسلا و فولکس واگن اشاره کرد. شرکت‌های لکسوس و بی‌وای‌دی از مواد جدیدی استفاده نکرده‌اند اما شکل سلول و باتری را کاملا تغییر داده‌اند. در مقابل شرکت‌های تسلا و فولکس واگن اقدام به کاهش میزان کبالت موجود در کاتد و افزایش منگنز نموده‌اند که به نظر می‌رسد این روش کاملا متداول و در آینده نیز توسط دیگر شرکت‌ها دنبال شود. در نتیجه به نظر می‌رسد که در سال‌های نزدیک شاهد رشد باتری‌های لیتیوم-فسفات خواهیم بود. شاهد این ادعا این است که در کشور چین اقبال به باتری‌های لیتیوم-فسفات روندی صعودی به خود گرفته و از۲۳٫۵ درصد در ماه مارس به ۲۵٫۸ درصد در ماه آوریل رسیده است. مو کی، تحلیلگر ارشد تحقیقات ریلی[۱]، انتظار دارد که این نسبت امسال به ۴۰ درصد برسد، زیرا چنین باتری‌هایی ارزان تر بوده و از پیشرفت تکنولوژی نیز برخوردار هستند به طوری که طراحی‌های جدید شرکت‌های بی‌وای‌دی و سی‌ای‌تی‌ال[۲] به آن کمک خواهد کرد. همچنین خریداران خودرو با توجه به تأثیر ویروس کرونا، به قیمت‌ها توجه بیشتری نشان می‌دهند و خودروهایی که مجهز به باتری‌های لیتیوم-فسفات شده‌اند از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر هستند [۳۵]. به همین دلیل کاتدهای با کبالت پایین و فاقد کبالت بیش از گذشته مهم خواهند شد و بایستی فناوران تولید باتری به

---

[۱] RealLi

[۲] CATL

آن توجه کنند.

برخی فناوری‌ها نیز در حوزه باتری‌های لیتیوم یون پیشرفته اهمیت داشته و ممکن است در آینده کاربردی شود. به همین دلیل بررسی بیشتر این اخبار در آینده ضرورت دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به الکترولیت فسفات حلقه‌ای غیر قابل اشتعال توسط دانشگاه توکیو و پژوهش‌های مشابه برای افزایش ایمنی باتری اشاره کرد.

❖ باتری‌های لیتیوم-سیلیکونی

در حوزه باتری‌های سیلیکونی، چند خبر مهم نشان داد که بسیاری از شرکت‌ها برخی محصولات جدید را روانه بازار کرده و در آینده نیز ارتقا خواهند داد. شرکت اینویت توانست با یک ابتکار میزان پیمایش باتری را تا ۴۰۰ کیلومتر افزایش و زمان شارژ آن را به زیر ۱۰ دقیقه کاهش دهد. شرکت سیلا نانوتکنولوژی نیز یک باتری جدید ساخته است که بی‌ام‌دبلیو و دایملر به علت مزایای آن، به دنبال بررسی تجاری‌سازی آن در خودروهای الکتریکی هستند و لازم است این خبر در آینده رصد بشود. شرکت اینویکس نیز اعلام کرده باتری‌های پورتابل خود را امسال و نسل‌های جدید آن را در سال‌های آتی روانه بازار خواهد کرد. همچنین در سی و هفتمین کنفرانس سالانه رویدادهای باتری که در اواخر ماه جولای سال جاری برگزار خواهد شد، ارائه ویژه در زمینه بهینه‌سازی و توسعه الکترودها توسط لئون ژائو از محققان موسسه فناوری الینیوز برگزار خواهد شد که مربوط به یک باتری سیلیکونی با عملکرد عالی است.

از طرفی می‌دانیم که چگالی انرژی سیلیکون نسبت به فلز لیتیوم تنها ۲۰٪ کمتر است اما نسبت به گرافیت پنج برابر است و مشکلات ناشی از آن نیز کمتر از باتری لیتیوم-فلز است. ابتکارات و محصولات جدید همگی حاکی از آن هستند که ممکن است در آینده نزدیک شاهد تحولات مهمی در زمینه باتری سیلیکونی باشیم. به همین جهت تمرکز بیشتر بر روی این نوع از باتری اهمیتی خاصی دارد و ضرورت دارد تا علاوه بر شرکت‌ها و تحقیقات اشاره شده، محصولات دیگر شرکت‌ها و تحقیقات جدید در زمینه باتری سیلیکونی بیشتر بررسی شود.

❖ باتری‌های لیتیوم-فلز

باتری لیتیوم فلز از گذشته علیرغم مزیت ظرفیت بالای آن، دارای مشکل تشکیل دندریت و عمر پایین بوده است. اما خبر مربوط به تولید باتری پاورچیپ[۱]، نشان داد که ممکن است بتوان با استفاده از یک فرآیند حتی اقتصادی بر این مشکل غلبه کرد. از طرفی شرکت انرژی-ایکس[۲] به فناوری تولید لیتیوم با بازدهی بالا از شورابه به نام لیتاس[۳] دست پیدا کرده که به موجب آن، هزینه تولید لیتیوم کاهش خواهد یافت. در نتیجه ممکن است باتری لیتیوم فلزی نیز در همین دهه از اهمیت خاصی برخوردار شود.

به همین دلیل پیشنهاد می‌شود تا اخبار و تحولات باتری‌های لیتیوم-فلز و به خصوص محصولات لیتاس و پاورچیپ مورد توجه قرار بگیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که به علت اهمیت باتری‌های لیتیوم فلز و مزایای باتری پاورچیپ، در صورت امکان یک نمونه از محصول پاورچیپ در آینده خریداری و در کشور تست بشود.

❖ باتری‌های لیتیوم-سولفور

در زمینه اخبار باتری سولفور، نمونه تولید شده توسط پژوهشگران دانشگاه موناش بسیار مهم بوده و می‌تواند در زمینه گوشی‌های همراه تجاری بشود. با این وجود اخبار فناوری نشان می‌دهد علیرغم پژوهش‌های مختلف در زمینه باتری‌های لیتیوم-سولفور، همچنان پیشرفت کاملی برای استفاده در خودروهای الکتریکی صورت نگرفته است و چالش عمر مطلوب (به خصوص به علت عدم توسعه آند مناسب)، همچنان پابرجا است. هرچند که باتری‌های ساخته شده به علت ظرفیت بهتر و قیمت کمتر به حالت تجاری نزدیک شده‌اند اما بعید است که تا یک دهه آتی سهم قابل توجهی از بازار را به خود اختصاص دهند. یکی از چالش‌های اساسی در عمر مطلوب این باتری‌ها، عدم توسعه آند مناسب است. به همین دلیل پیشرفت‌های باتری سیلیکونی و لیتیوم فلز می‌تواند سبب توسعه سریع باتری سولفور شود.

---

[۱] PowerChip

[۲] Energy-X

[۳] LiTAS

به همین دلیل بهتر است این نوع از باتری نیز در کنار باتری سیلیکونی و لیتیوم-فلز مورد توجه قرار بگیرد. بخش هایی که برای آنها عمر باتری از اهمیت کمتری برخوردار است، باید به باتری سولفور توجه ویژه ای را معطوف کنند.

باتری‌های حالت جامد

در زمینه باتری‌های حالت جامد دو نمونه مهم آورده شد که یکی باتری شیشه‌ای و دیگری باتری ساخته‌شده توسط شرکت سامسونگ بود. با وجود مزایای هر دو باتری حالت جامد سامسونگ و به خصوص پروفسور گودونوف، بسیاری از کارشناسان معتقدند به علت عدم یک فرآیند اقتصادی مناسب در تولید باتری‌های حالت جامد، این باتری‌ها تا یک دهه آتی تجاری نخواهند شد. با این وجود پیشنهاد می‌شود تا از بین اخبار باتری‌های حالت جامد، باتری‌های پلیمری و باتری شیشه‌ای آن هم به علت ادعای تجاری‌سازی از سمت شرکت هیدروکبک در آینده رصد شود و بیشتر تمرکز در این حوزه معطوف به فرآیندهایی باشد که بتواند تولید این باتری را اقتصادی نماید.

❖ نتیجه‌گیری

بسیاری از مراکز مهم از جمله وزارت انرژی آمریکا سه هدف زیر را برای تجاری‌سازی خودروی الکتریکی دنبال می‌کنند [۳۶].

الف) کاهش هزینه باتری به کمتر از ۱۰۰ دلار بر کیلووات-ساعت و نهایتا به ۸۰ دلار بر کیلووات-ساعت.

ب) افزایش پیمایش خودروی الکتریکی به ۳۰۰ مایل با هر دفعه شارژ

ج) کاهش زمان شارژ به کمتر از ۱۵ دقیقه

با توجه به پیشرفت‌هایی که در حوزه باتری انجام شده است، هدف‌گذاری افزایش ظرفیت باتری حتی با باتری‌های فعلی هم محقق شده است. چندین نمونه باتری سیلیکونی نیز نشان داده‌اند که کاهش زمان

شارژ با استفاده از این نوع باتری کاملا قابل دستیابی است. به همین دلیل به نظر می‌رسد در آینده مهم‌ترین پارامتر برای خودروسازان، کاهش هزینه باتری از قیمت ۱۷۰ دلار بر کیلووات‌ساعت فعلی به ۱۰۰ دلار بر کیلووات ساعت باشد. این مطلب بدان معنا نیست که از فناوری‌هایی که منجر به ظرفیت باتری می‌شوند غفلت شود. زیرا افزایش ظرفیت باتری بدین معنا است که پس از رسیدن به حد مطلوب ۳۰۰ مایلی در هر بار شارژ، می‌توان ظرفیت باتری را ثابت نگه داشت اما در عوض سلول‌های استفاده شده را به همان میزان کاهش و در نتیجه قیمت باتری را کاهش داد. در نتیجه فناوری یا روش‌هایی که بتواند به هر طریقی منجر به این کاهش قیمت بشود نسبت به سائر فناوری‌ها برای گسترش خودروی الکتریکی حائز اهمیت و در اولویت خواهند بود. با توجه به مطالب گفته‌شده پیشنهاد می‌شود که کاهش سهم کبالت در کاتد و افزایش سهم سیلیکون و فلز لیتیوم در آند با تمرکز بیشتری رصد بشود.

فصل ۴– منابع

[۱] "Lithium-ion Batteries," The Royal Swedish Academy Of Sciences, ۲۰۱۹.

[۲] "The Nobel Prize In Chemistry," The Royal Swedish Academy Of Sciences, ۲۰۱۹.

[۳] "Lithium ion battery," Clean TeQ, ۲۰۱۶.

[۴] "https://www.reuters.com/article/us-volkswagen-electric-batteries/vw-to-start-using-high-nickel-batteries-for-electric-car-idUSKBN۲۱۴۲HW".

[۵] "https://insideevs.com/news/۴۱۹۵۴۶/battery-cobalt-content-limited-now-nickel/".

[۶] "https://www.greencarcongress.com/۲۰۲۰/۰۵/۲۰۲۰۰۵۲۲-svolt.html".

[۷] "https://www.ibm.com/blogs/research/۲۰۱۹/۱۲/heavy-metal-free-battery/".

[۸] "https://eurekalert.org/pub_releases/۲۰۲۰-۰۴/ynu-nem۰۴۱۶۲۰.php".

[۹] "https://www.greencarcongress.com/۲۰۲۰/۰۴/۲۰۲۰۰۴۲۷-lgchem.html".

[۱۰] "https://www.nature.com/articles/s۴۱۵۶۰-۰۲۰-۰۵۶۷-z".

[۱۱] "https://www.greencarcongress.com/۲۰۲۰/۰۵/۲۰۲۰۰۵۱۳-lexus.html".

[۱۲] "https://www.renewableenergymagazine.com/electric_hybrid_vehicles/byd-announces-han-ev-to-be-revealed-۲۰۲۰۰۵۱۳".

[۱۳] "Penn State Li-ion battery design could charge an EV in ۱۰ minutes; asymmetric temperature modulation," [Online]. Available:

https://www.greencarcongress.com/٢٠١٩/١٠/٢٠١٩١٠٣٠-psu.html.

[١٤] "https://enovix.com/".

[١٥] "https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/batteries-storage/enevates-silicon-anodes-could-give-batteries-that-run-٤٠٠-km-on-a-٥minute-charge".

[١٦] "https://www.pocket-lint.com/gadgets/news/١٣٠٣٨٠-future-batteries-coming-soon-charge-in-seconds-last-months-and-power-over-the-air".

[١٧] "https://spectrum.ieee.org/energy/renewables/to-boost-lithiumion-battery-capacity-by-up-to-٧٠-add-silicon".

[١٨] "https://silanano.com/".

[١٩] "https://www.internationalbatteryseminar.com/battery-development".

[٢٠] "https://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid/the-return-of-the-lithiummetal-battery".

[٢١] "https://xnrgi.com/products-٢/?target=$random#powerchip".

[٢٢] "https://www.digitaltrends.com/cars/xnrgi-develops-ev-battery-tech-that-extends-range-to-٧٠٠-miles/".

[٢٣] "https://en.institut-seltene-erden.de/xnrgi-hat-auf-basis-von-poroesen-siliziumchips-das-erste-lithium-metall-akku-entwickelt/".

[٢٤] "https://www.altenergymag.com/news/٢٠٢٠/٠٣/١١/xnrgi-opens-lithium-metal-battery-factory-with-٢٤٠mwh-per-year-capacity/٣٢٨٤٨".

[٢٥] "https://phys.org/news/٢٠٢٠-٠٢-ultrasound-device-lithium-batteries.html".

[٢٦] "https://www.greencarcongress.com/٢٠٢٠/٠٥/٢٠٢٠٠٥١٤-oxis.html".

[٢٧] "https://www.monash.edu/news/articles/supercharging-tomorrow-australia-first-to-test-new-lithium-batteries".

[۲۸] "https://cleantechnica.com/۲۰۲۰/۰۲/۱۱/lithium-sulfur-batteries-could-be-cheaper-more-energy-dense/".

[۲۹] "https://www.greencarcongress.com/۲۰۲۰/۰۴/۲۰۲۰۰۴۲۷-te.html".

[۳۰] "https://techxplore.com/news/۲۰۲۰-۰۴-next-generation-batteries-major-commercial-viability.html".

[۳۱] "https://newatlas.com/energy/samsung-solid-state-ev-battery/".

[۳۲] "https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/batteries-storage/john-goodenough-glass-battery-news-hydroquebec".

[۳۳] "http://theamericanenergynews.com/markham-on-energy/solid-state-battery-advance-goodenough".

[۳۴] "https://scitechdaily.com/flexible-electrolyte-sheet-breakthrough-for-advanced-lithium-metal-batteries".

[۳۵] "https://news.metal.com/newscontent/۱۰۱۱۱۷۲۱۸/china%E۲٪۸۰٪۹۹s-installed-lfp-battery-capacity-soared-۷۴-in-april".

[۳۶] "https://www.energy.gov/eere/vehicles/batteries".