



مطالعه ساختار و عملکرد باتری در خودروهای الکتریکی

مریم رضی فر
کارشناس ارشد مکانیک

چکیده

با توجه به استقبال گسترده از خودروهای الکتریکی در جهان و بازارهای جهانی، نیاز به تولید این نوع خودرو با حداقل پیمایش ۵۰۰ کیلومتر در هر بار شارژ و با قیمت مناسب، بیشتر احساس می‌شود. در این مقاله به بیان پیشرفت‌ها و چالش‌های موجود در تولید باتری خودروهای الکتریکی، با دو رویکرد قیمت و عملکرد پرداخته شده است.

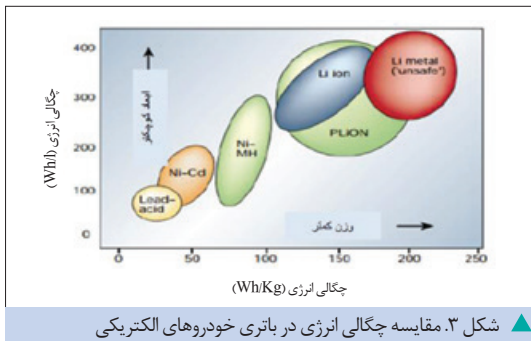
کلیدواژه‌ها: خودروی الکتریکی، مواد آند، مواد کاتد، الکترولیت، جداکننده‌ها

مقدمه

امروزه به دلیل افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی از یکسو و محدود بودن منابع این سوخت‌ها از سوی دیگر، استفاده از خودروهای الکتریکی^۱ و خودروهای الکتریکی هیبریدی^۲ به سرعت در حال رشد و

توسعه است. این موضوع به حدی اهمیت دارد که برخی دولت‌ها قوانین سخت‌گیرانه‌ای در این مورد وضع کرده‌اند و در بسیاری از کشورها تولید خودرو با مصرف سوخت کمتر، مورد حمایت دولت‌ها قرار گرفته است [۱].

سال‌های ۱۹۱۲-۱۹۰۰ را می‌توان سال‌های طلایی خودروی الکتریکی برشمرد. در سال ۱۹۱۲ تعداد خودروهای الکتریکی در ایالات متحده در حدود ۳۰۰۰۰ دستگاه بود. باتری این خودروها عموماً از نوع سرب-اسید^۳ ساخته شده بود [۲]. اکنون بعد از یک قرن برتری موتورهای احتراقی، لازم بود که سیستم حمل و نقل متحول گردد. به این ترتیب در سال ۲۰۱۶، در حدود ۱۶۰۰۰۰ دستگاه خودروی الکتریکی پلاگین هیبریدی^۴ در ایالات متحده وارد بازار شد. باتری‌های نیکل متال هیدرید^۵، اولین انتخاب برای خودروهای هیبریدی بودند، در حالی که، امروزه خودروهای الکتریکی پلاگین هیبریدی، از باتری‌های لیتیوم یونی جهت نیروی پیش‌ران استفاده می‌کنند [۳]. در (شکل ۱) خودروی الکتریکی پلاگین هیبریدی نشان داده شده است.



خودروهای الکتریکی، برخلاف خودروهای هیبریدی و خودروهای پلاگین هیبریدی که از ترکیب موتور الکتریکی و بنزینی در کنار هم بهره می‌برند، صرفاً از موتور الکتریکی جهت نیروی پیش‌رانش استفاده می‌کنند. اشکال عمده این نوع خودروها، وابستگی صددرصدی خودرو به نوعی باتری است که ظرفیت و چگالی آن با سوخت‌های طبیعی قابل قیاس نمی‌باشد. در خودروهای الکتریکی مسافت پیموده شده طی هر بار شارژ، کمتر از مسافتی است که خودرو موتور احتراق داخلی طی می‌کند.

اولین و اساسی‌ترین تفاوت بین خودروهای هیبریدی و پلاگین هیبریدی در اندازه باتری آن‌هاست. حجم باتری در خودروهای پلاگین هیبریدی بزرگ‌تر از باتری خودروهای هیبریدی است. زیرا، در خودروهای پلاگین هیبریدی، پیش‌راننده برقی تأمین‌کننده اصلی نیرو محرکه و قدرت خودرو است و پیش‌راننده بنزینی به‌عنوان یک ژنراتور عمل می‌کند. نکته دیگری که سبب افزایش جذابیت این خودروها شده، قابلیت شارژ خودرو حین ترمزگیری و امکان شارژ باتری از طریق دوشاخه‌های مخصوص در ایستگاه‌های شارژ و یا امکان شارژ آن‌ها در منزل است. علاوه بر اینکه با اتمام شارژ برقی خودرو، پیش‌راننده بنزینی وارد کار می‌شود و علاوه بر تأمین نیروی محرکه، باتری خودرو را نیز شارژ می‌کند.

کوچک‌ترین واحد سازنده باتری خودروی الکتریکی، سلول الکتروشیمیایی است؛ سلولی متشکل از دو الکتروود مثبت و منفی و غوطه‌ور در الکتrolیت که فرایند شارژ و تخلیه در آن، با الحاق و آزادسازی یون لیتیم بین دو الکتروود انجام می‌گیرد. از زمانی که باتری‌های لیتیم یونی حالت تجاری پیدا کردند مواردی نظیر ظرفیت ویژه بالا، پتانسیل بالای تخلیه بر حسب Li^+/Li ، ایمنی بالا، چگالی بالا، سینتیک سریع و حفظ ظرفیت بالا، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفت. تفاوت در چگالی انرژی باتری‌های مختلف، به ساختار شیمیایی الکتروودها مربوط می‌شود.

۲. ساختار باتری‌های لیتیم یونی مواد آند

امروزه استفاده از مواد کربنی و به‌طور ویژه گرافیت‌های مصنوعی یا سنتزی (SGs)، گرافیت‌های طبیعی (NGs) و همچنین کربن‌های بی‌شکل (سخت و نرم)، به‌عنوان مدرن‌ترین



در سال ۲۰۱۷، دپارتمان انرژی آمریکا اعلام کرد که نفوذ و دستیابی به بازار و تولید انبوه، با تولید باتری‌هایی با امکان ارائه ظرفیت پیمایش حداقل 235 wh/kg یا 500 wh/l ، توأم با کاهش قیمت آن، به ازای هر یک باتری امکان‌پذیر است [۴]. برای دستیابی به اهداف مورد انتظار در انرژی و هزینه تولید باتری بهبود می‌یافت. مطابق (شکل ۲)، این مراحل به ترتیب شامل فرآوری یا پردازش مواد، تولید اجزا، تولید سلول، تولید ماژول، مونتاژ بسته، یکپارچه‌سازی خودرو، بازیافت یا زندگی دوباره (این اصطلاح به سبب امکان بهره‌گیری از باتری‌های مستعمل خودرو در سایر تجهیزات نظیر کامپیوترها یا دستگاه‌های پزشکی به کار برده می‌شود) می‌باشد [۳].



اتصال سری و موازی سلول‌های الکتروشیمیایی موجود در باتری، ظرفیت و ولتاژ مورد نیاز سیستم را فراهم می‌سازند. هر سلول متشکل از الکتروود مثبت، الکتروود منفی و الکتrolیت است و در آن حرکت الکترون‌های آزاد شده طی واکنش شیمیایی، منجر به ایجاد جریان الکتریکی می‌شود. در (شکل ۳)، چگالی انرژی و سیر تحولی انواع باتری‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، باتری‌های سرب-اسیدی (LABs) و نیکل کادمیوم (Ni-Cd) در حالی که حجم و وزن بیشتری داشتند، از چگالی انرژی پایین‌تری برخوردار بودند. بر پایه تحقیقات انجام شده با وجود اینکه استفاده از باتری‌های نیکل-هیدرید فلز^۶ بسیار مرسوم است ولی باتری‌های لیتیم یونی که در سه دسته لیتیم یونی^۷، پلیمر لیتیم یون^۸ و لیتیم فلزی^۹ قرار دارند با دوبرابر بازده، چگالی انرژی بیشتری را فراهم می‌سازند که به این ترتیب با توجه به حجم کوچک، وزن سبک و قیمت مناسب، گزینه مناسبی جهت استفاده در خودروهای الکتریکی قابل شارژ محسوب می‌شوند [۵].

خودروهای الکتریکی، برخلاف خودروهای هیبریدی و خودروهای پلاگین هیبریدی که از ترکیب موتور الکتریکی و بنزینی در کنار هم بهره می‌برند، صرفاً از موتور الکتریکی جهت نیروی پیش‌رانش استفاده می‌کنند

کوچک ترین واحد سازنده باتری خودروی الکتریکی، سلول الکتروشیمیایی است؛ سلولی متشکل از دو الکترود مثبت و منفی و غوطه‌ور در الکترولیت که فرایند شارژ و تخلیه در آن، با الحاق و آزادسازی یون لیتیوم بین دو الکترود انجام می‌گیرد

آن سیلیکات، ترکیبات سدیم، پتاسیم و گوگرد است. سپس جهت آماده‌سازی و تولید گرافیت کروی (در ابعاد میکرومتر)، از یک روش آردسازی پیشرفته بهره گرفته می‌شود. آماده‌سازی مکانیکی همراه با فرایندهای افزایش خلوص که شامل شست‌وشو با هیدروفلوریک اسید و عملیات حرارتی تا ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است به کاهش ناخالصی آن به کمتر از ۵۰۰ درصد در میلی‌یون (PPM) کمک می‌کند. در نهایت نیز ذرات پالایش شده و عملیات پوشش‌دهی انجام می‌گیرد. فرایند پوشش‌دهی کربن از مهم‌ترین و مؤثرترین مراحل بوده و انجام صحیح آن، عملکرد مناسب مواد را در پی خواهد داشت.

اطلاعات موجود جهت تهیه کربن-سیلیس c-si یا ترکیب اکسید سیلیسیوم-سیلیس-کربن (SiO_x-Si-C)، در مقیاس آزمایشگاهی است و اطلاعات زیادی در مورد محصولات تجاری تولید شده در دسترس نیست. اطلاعات موجود حاکی از آن است که درصد بسیار کمی در حدود کمتر از ۵ درصد وزنی از این مواد به آند افزوده می‌شود. نانو ذرات سیلیس غالباً طی فرایند سنتز توسط پلاسما مانند پیرولیز (حرارت دادن مواد در غیاب اکسیژن) تهیه می‌شوند. در این مرحله SiO_x یا Si_۲، طی واکنش فاز گازی و یا هیدرولیز SiCl_۴ تهیه می‌شود. در مرحله دوم، طی مراحل مخلوط شدن با گرافیت و کربونیزاسیون، مواد فعال بر پایه سیلیس آماده‌سازی شده و در زمینه کربن مستقر می‌شود و در مرحله پایانی با کاهش سطح ویژه طی فرایند اصلاحی پوشش‌دهی کربن، آماده واکنش با الکترولیت می‌شوند. در (شکل ۶) نمایی از مراحل تهیه افزودنی سیلیس نشان داده شده است. همان‌طور که در (شکل ۷) مشاهده می‌شود، تهیه فلز لیتیوم

مواد برای الکترود منفی مورد توجه قرار گرفته‌اند. معمولاً در باتری‌های لیتیومی، مخلوطی از کربن‌های بی‌شکل و گرافیتی جهت بهینه‌سازی خواص نظیر نسبت قدرت به انرژی (P:E) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه مراحل تهیه اجزای آند شامل کربن سنتزی و طبیعی، سیلیس و فویل لیتیومی شرح داده شده است. در شکل ۴ مراحل تهیه و آماده‌سازی کربن سنتزی برای تهیه آندهایی با پایه گرافیت در باتری‌های لیتیومی نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به نحوه ساخت این باتری‌ها در انحصار شرکت‌های سازنده است و دست‌یابی به اطلاعات و جزئیات آن‌ها تقریباً غیرممکن است. فرایند تهیه کربن سنتزی^۱ شامل سه مرحله اصلی است. مرحله اول، آماده‌سازی مواد اولیه، شامل تبدیل کک به کربن نرم طی فرایند تکلیس با دمایی بین ۱۲۰۰-۸۰۰ °C است. سپس کربن نرم به دست آمده طی فرایند آردسازی و خرد کردن آماده‌سازی می‌شود و ذرات آن بر حسب میکرومتر جداسازی می‌شوند. سپس گرافیت نرم حاصله برای بار دوم در دمایی بین ۲۵۰۰-۲۴۰۰ °C برای چند روز تا یک هفته تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرند که این مرحله شامل فاز سرد کردن نیز می‌باشد. در مرحله آخر نیز، فرایندهای پالایش مکانیکی ذرات، سنگ‌زنی، طبقه‌بندی و در نهایت پوشش‌دهی برای بهینه‌سازی نهایی ذرات به کار گرفته می‌شود [۳].

مطابق (شکل ۵)، کربن طبیعی از سنگ معدن گرافیت طی چندین مرحله عملیات جداسازی و غلظت بخشیدن به ذرات گرافیت ورقه‌ای و در نهایت فرایند فلوتاسیون (روشی برای افزایش عیار کانی) حاصل می‌شود. به این ترتیب گرافیتی با درصد خلوص حدود ۹۵٪ به دست می‌آید که عمده ناخالصی‌های



قادر است ظرفیت ویژه را افزایش دهد معرفی شده است، ولی افزایش مقدار منگنز در ساختار آن سبب ایجاد تمایل به تغییر از حالت لایه‌ای به ساختار اسپینل شده که این تغییر و تبدیل، کاهش ولتاژ و ظرفیت باتری را به دنبال دارد. در (شکل ۸) مراحل سنتز اکسیدهای فلزی واسطه نشان داده شده است.

اکسیدهای لایه‌ای با ترکیبات فسفات فلزی واسطه، طی یک واکنش تهنشینی، مخلوط می‌گردند. طی این فرایند، محلول آبی از نمک‌های فلزی واسطه مانند MSO_4 و پایه آن مانند $NaOH$ و Na_2CO_3 و سورفکتانت (عامل فعال سطح) NH_4OH به‌طور مداوم به تانک حاوی عوامل واکنش پمپ می‌شوند که طی آن هیدروکسید فلزی یا کربنات تهنشین می‌شود. بعد از جداسازی و شست‌وشوی مکرر، مواد خشک شده و غربال می‌شوند سپس با نمک لیتیوم با مقادیر استوکیومتری مشخص مخلوط می‌گردند. آن‌گاه، خواص مطلوب محصول طی تکلیس با دمای $950-650$ °C شکل می‌گیرد. در نهایت نیز، طی مراحل از کلوخه شدن مواد پودری جلوگیری شده و ممکن است جهت برقراری اتصال بین الکتروود و الکترولیت، مواد تحت آماده‌سازی سطحی نیز قرار گیرند [۳].

الکترولیت‌ها و جداکننده‌ها

باتری‌های لیتیوم یونی تجاری دارای الکترولیت با پایه هگزافلورفسفات لیتیوم ($LiPF_6$)، به‌صورت نمک حل شده در مخلوط حلال‌های کربنات آلی می‌باشند. جهت بر خورداری از بیشترین هدایت یونی، غلظت نمک به‌کار رفته را معمولاً در محدوده $1/5 - 1/8$ مول بر لیتر انتخاب می‌کنند. افزودنی‌های الکترولیت به منظور بهبود عملکرد الکترولیت به‌کار گرفته می‌شود و معمولاً جهت جلوگیری از تغییر در ساختار و ترکیبات الکترولیت، درصد وزنی این افزودنی‌ها حدود 5% وزنی الکترولیت را تشکیل می‌دهد. در میان مواد مختلف، استفاده از کربنات حلقوی نظیر کربنات اتیلن (EC) به‌عنوان مواد افزودنی الکترولیت متداول تر است. مطابق (شکل ۹) و طی مسیر C_1 ، پس از سنتز متانول، دی‌متیل کربنات (DMC) از اکسیداسیون و کربونیل‌اسیون متانول حاصل می‌شود. دی‌اتیل کربنات (DEC)، نیز حاصل واکنش (DMC) با اتانول است. همچنین دو کربنات آلی خطی متقارن (DMC) و (DEC) نیز در حضور کاتالیست به اتیل متیل کربنات (EMC) تبدیل می‌شوند. طی مسیر C_2 ، اتیلن طی اکسیداسیون کاتالیزوری به اکسید اتیلن تبدیل شده و پس از واکنش با CO_2 ، محصول تجاری (EC) حاصل می‌شود. به این ترتیب کربنات‌های آلی از مسیر C_1 یا

در فرایندی از تبخیر و تغلیظ محلول نمکی $LiCl$ حاصل می‌شود. الکترولیز $LiCl$ با خلوص بالا، منجر به تولید فلز لیتیوم شده و در نتیجه تقطیر، ناخالصی‌هایی با نقطه ذوب پایین‌تر نظیر سدیم (Na) حذف می‌گردند. مرحله بعد شکل‌دهی فلز لیتیوم به فویل لیتیوم است که طی فرایندهایی نظیر اکستروژن و نورد انجام می‌گیرد. ضخامت فویل لیتیوم حاصل کمتر از 100 میکرومتر است و کنترل ضخامت در این فرایند حائز اهمیت می‌باشد. در نهایت نیز فویل لیتیومی به‌طور معمول با یک لایه غیرفعال تثبیت می‌گردد، این لایه عموماً طی فرایندهای آماده‌سازی سطحی با گاز، فلوراسیون و یا با لایه‌ای از پوشش واکس پلی‌اتیلن ایجاد می‌شود. در حالی که بهای شمش فلز لیتیوم $50-130$ دلار امریکا به‌ازای هر کیلوگرم است بهای فویل نازک با ضخامت کمتر از 100 میکرومتر در حدود $300-400$ دلار امریکا می‌باشد. این قیمت با توجه به نوع فرایند تولید تبخیر، لایه نشانی بخار و اکستروژن یا نورد متفاوت است [۳].

مواد کاتد

در ساختار باتری‌های لیتیوم یونی، معمولاً مواد به‌کار رفته در کاتد از بیشترین وزن و قیمت برخوردار است و معمولاً نام‌گذاری باتری‌ها بر اساس ماده به‌کار رفته در کاتد انجام می‌شود [۴]. همگام با رشد بالای تکنولوژی ساخت باتری، انواع کاتدهای اکسید لایه‌ای نوع $LiMO_2$ که در آن‌ها فلز (M) شامل (نیکل، کبالت و منگنز) یا (نیکل، کبالت و آلومینیوم) است به‌طور گسترده به‌عنوان مواد فعال مثبت در باتری‌های خودرو به‌کار گرفته شده‌اند. به‌طور کلی، استفاده از نیکل در ساختار کاتد ظرفیت بالاتری را فراهم می‌سازد و استفاده از ترکیب نیکل، کبالت و آلومینیوم در ساختار کاتد، فوایدی نظیر حفظ ظرفیت و تمایل کمتر به تجزیه شدن را دارد. استفاده از کاتد با نیکل غنی، به دلیل واکنش‌پذیری بالاتر ممکن است طی سنتز نیاز به افزودنی‌هایی نیز داشته باشد. بهینه‌سازی اجزا با انتخاب ترکیب ماده پوشش‌دهنده و انتخاب فرمولاسیون مناسب برای الکترولیت از پارامترهای کلیدی برای مواد به‌کار رفته در کاتد محسوب می‌شود.

دست‌یابی به چگالی انرژی بالاتر برای اکسیدهای لایه‌ای همراه با حفظ طول عمر و ایمنی، از طریق سنتز ذرات (نیکل، کبالت و منگنز) کروی با هسته نیکل غنی و پوسته غنی منگنز بسیار امیدبخش بوده است. در این ساختار، ذرات نیکل غنی به‌عنوان هسته، سبب ایجاد ظرفیت بالا و پوسته غنی منگنز، پایداری در برابر الکترولیت را فراهم می‌کند. ترکیب لیتیوم غنی به همراه اکسیدهای منگنز غنی، به‌عنوان ساختاری که

در ساختار باتری‌های

لیتیوم یونی،

معمولاً مواد

به‌کار رفته

در کاتد از

بیشترین

وزن و قیمت

برخوردار

است و معمولاً

نام‌گذاری

باتری‌ها بر

اساس ماده

به‌کار رفته در

کاتد انجام

می‌شود



شکل ۸. مراحل تهیه اکسید فلزی واسطه برای کاتد

دست یابی به چگالی انرژی بالاتر برای اکسیدهای لایه‌ای همراه با حفظ طول عمر و ایمنی، از طریق سنتز ذرات (نیکل، کبالت و منگنز) کروی با هسته نیکل غنی و پوسته غنی منگنز بسیار امیدبخش بوده است

خشک تهیه می‌شوند که تولید آن‌ها طی مراحل اکستروژن مذاب، عملیات حرارتی آنیل کردن، کشش تک‌محوری یا چندمحوری و سپس تهیه رول انجام می‌گیرد. در فرایند مرطوب این مراحل شامل تهیه محلول پلیمر، اکستروژن، خارج نمودن حلال و کشش است [۳].

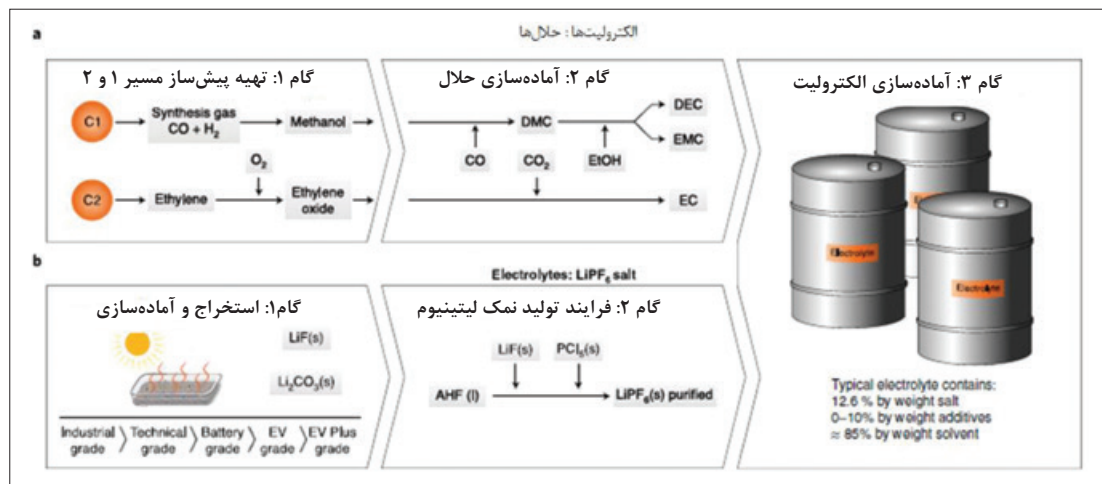
امروزه استفاده از الکترولیت‌های جامد به جای حلال‌های آلی مضر، مورد توجه قرار گرفته است. به‌خصوص اینکه الکترولیت‌های جامد در ساختار باتری می‌توانند به‌طور همزمان دو نقش الکترولیت و لایه جداکننده را ایفا کنند. الکترولیت‌های جامد، در دو گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند. ۱. الکترولیت‌های جامد پلیمری ۲. الکترولیت‌های جامد غیرآلی (دارای ساختار کریستالی، شیشه‌ای و شیشه-سرامیکی)

باتری‌های خودروهای الکتریکی، در محدوده دمایی 0°C تا 80°C بهترین عملکرد را دارند. بنابراین سطح انرژی قابل استفاده در باتری، به دلیل هدایت ضعیف الکترولیت‌های جامد پلیمری در دماهای پایین، کاهش می‌یابد. چالش اصلی، ایجاد تطابق میان الکترولیت‌های جامد و حفظ واکنش سطحی در طول چرخه است. اخیراً الکترولیت‌های جامد غیرآلی، به‌صورت سلول‌هایی با فیلم‌های نازک، بر پایه اکسی نیتريد فسفر لیتیومی (LIPON)، ساخته شده‌اند، ولی قیمت بالای آن‌ها مانع نفوذ و گسترش آن‌ها در بازار شده است. مقدار بالای لیتیوم در الکترولیت‌های جامد از مهم‌ترین علل بالا بودن قیمت آن‌هاست؛ بنابراین هنوز نیاز به توسعه و پیشرفت دارد [۳].

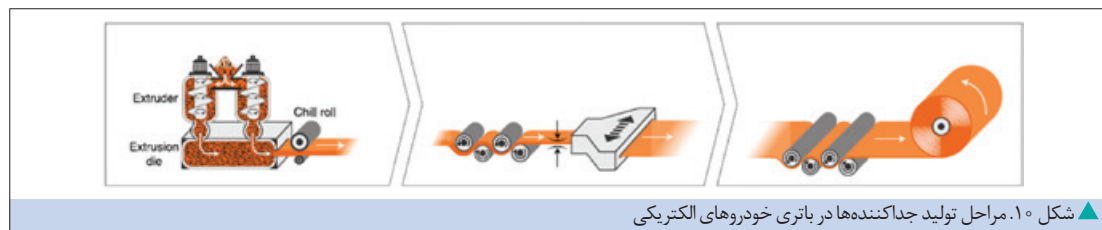
C_4 طی واکنش‌های کراکینگ (فرایندهایی جهت کاهش وزن مولکولی هیدروکربن‌ها) به‌دست می‌آیند. نمک لیتیوم (LiPF_6)، بخش اصلی هزینه‌های مربوط به الکترولیت‌های پایه کربنات را تشکیل می‌دهد. LiPF_6 محصول واکنش پیش‌ساز فلوراید لیتیوم (حاصل از تقطیر و تغلیظ)، با پنتا کلراید فسفر در فلوراید هیدروژن بدون آب (AHF) است که با خلوص‌های مختلف در باتری خودروهای الکتریکی به‌کار گرفته می‌شود [۳].

در باتری‌های لیتیوم-یونی با الکترولیت مایع، وجود غشاء میان الکترودهای مثبت و منفی به‌منظور جلوگیری از اتصال کوتاه اجتناب‌ناپذیر است. از نظر فنی چهار نوع مختلف غشای جداکننده وجود دارد که از نظر ساختار شیمیایی و نوع فرایند تولید با یکدیگر متفاوت‌اند.

۱. غشاءهای میکرومتخلخل^{۱۲}
۲. نسوج بافته نشده^{۱۳}
۳. غشاهای جداکننده پوشش داده شده با سرامیک^{۱۴}
۴. غشای جامد غیرآلی (موادی نظیر الکترولیت‌های پلیمری و یا ترکیبی که در ترکیب با الکترولیت همان عملکرد را دارند. اکثر غشاءهای میکرومتخلخل، بر پایه پلی‌اولفین‌ها^{۱۵} به‌صورت تک‌لایه و چندلایه طراحی می‌شوند. پوشش‌دهی غشاءهای میکرومتخلخل و نسوج بافته نشده با سرامیک، سبب مقاومت آن‌ها در برابر حرارت و افزایش ایمنی در آن‌ها می‌شود. همچنین ذرات سرامیک سبب بهبود خاصیت ترشوندگی^{۱۶} غشاء نیز می‌شوند. با وجود معماری چندلایه، ضخامت غشاءهای جداکننده کمتر از ۲۰ میکرون است. مطابق (شکل ۱۰)، غشاهای تک‌لایه غالباً طی فرایند



شکل ۹. مراحل تهیه الکترولیت در باتری‌های لیتیوم یونی



شکل ۱۰. مراحل تولید جداکننده‌ها در باتری خودروهای الکتریکی

۳. اساس کار در باتری‌های لیتیوم یونی

باتری‌های لیتیوم یونی متشکل از اجزای فعال نظیر الکتروود مثبت، الکتروود منفی و الکتروولیت حاوی نمک لیتیوم، و اجزای خنثی شامل جداکننده، چسب‌ها، افزودنی‌های هادی، جمع‌کننده جریان، ضریب دمایی مثبت^{۱۷} (PTC) و شیر اطمینان^{۱۸} می‌باشند در ادامه شرح مختصری پیرامون آن‌ها ارائه می‌گردد.

۱. الکتروود مثبت معمولاً جایگاهی برای جای‌گیری یون‌های لیتیوم و انتشار آن‌هاست، و همین تا حد زیادی عملکرد کلی باتری را تعیین می‌کند. در حال حاضر، متداول‌ترین مواد الکتروود مثبت عبارت‌اند از لیتیوم کبالت اکساید، لیتیوم منگنز اکساید، فسفات آهن-لیتیوم و ترکیبات سه‌تایی آن‌ها نظیر نیکل، کبالت، منگنز و نیکل، کبالت، آلومینیوم، در ترکیب با اکسیدهای فلزی.

۲. مواد فعال تشکیل‌دهنده الکتروود منفی شامل ماده خمیر شکل کربنی، اتصال‌دهنده و محلول آلی است که به صورت یک پوشش نازک روی فلز مس مستقر می‌باشد. البته در انواع جدید باتری‌ها سریع شارژ‌شونده، از لیتیوم تیتانیوم اکساید ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{13}$) به عنوان ماده الکتروود منفی استفاده می‌شود.

۳. جهت جداسازی الکترون‌ها بین الکتروود مثبت و منفی از جداکننده استفاده می‌شود که تنها یون‌های لیتیوم مجاز به عبور از آن هستند و معمولاً از یک فیلم میکرومتخلخل از جنس پلی‌اتیلن یا پلی‌پروپیلن ساخته شده است.

۴. الکتروولیت متشکل از ترکیبی از نمک لیتیوم و محلول‌های آلی با قابلیت‌گذردهی بالا برای یون‌هاست و از نظر شیمیایی در برابر مواد فعال پایدار است و قابلیت تطبیق با تغییرات ناشی از واکنش‌های اکسایشی شدید انجام شده حین شارژ و تخلیه را دارد.

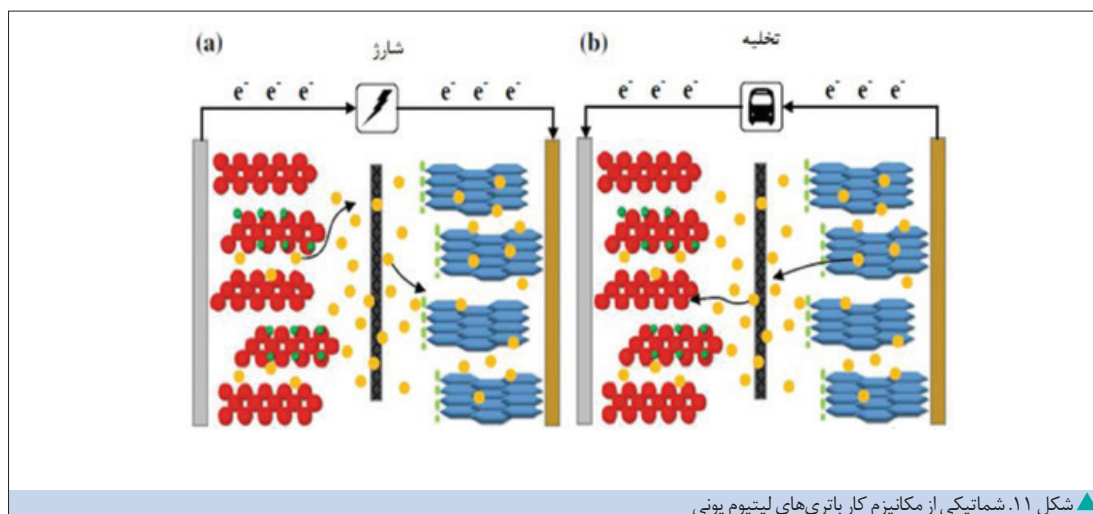
۵. باتری‌های لیتیوم یونی عموماً دارای جریان غیرعادی هستند، بنابراین استفاده از ضریب دمایی مثبت (PTC) به جهت اطمینان از ایمنی و جلوگیری از افزایش دمای داخلی است. استفاده از شیر اطمینان به‌طور مؤثری مانع افزایش فشار و ایجاد

پارگی و گسیختگی در آن می‌گردد.

در باتری‌های لیتیوم یونی، معمولاً آند از جنس اکسیدهای فلزی و یا گرافیت است و الکتروودها توسط جداکننده از هم جدا می‌شوند. در هر سمت الکتروود یک جمع‌کننده جریان تعبیه شده است که این جزء در سمت الکتروود منفی از جنس مس و در سمت الکتروود مثبت از جنس آلومینیوم است. آلومینیوم به کار رفته در سمت کاتد، با ایجاد یک لایه محافظ از خوردگی آن جلوگیری می‌کند. جداکننده به کار رفته در باتری، به منظور انتقال یون لیتیوم باید متخلخل باشد تا حرکت یون‌های لیتیوم از آند به کاتد و برعکس به آسانی انجام گیرد. علاوه بر آن، جداکننده ضمن آنکه کمک می‌کند که الکتروولیت در فضای بین دو الکتروود باقی بماند، از تماس الکتروودها و ایجاد اتصال کوتاه در باتری نیز جلوگیری می‌نماید.

در طی شارژ شدن باتری، یون‌های لیتیوم از قطب مثبت به سمت الکتروولیت حرکت می‌کنند و به سبب غلظت بالای یون‌ها در الکتروولیت و در مجاورت قطب مثبت، اختلاف غلظت یون‌ها سبب حرکت آن‌ها به سمت الکتروود منفی می‌شود و سرانجام نیز پس از عبور از لایه جداکننده به الکتروود منفی الحاق می‌شوند. در همان لحظه در مدار خارجی، الکترون از الکتروود مثبت به الکتروود منفی جریان می‌یابد و به این طریق روند شارژ باتری تحقق می‌یابد. به این ترتیب، الکتروود منفی طی واکنش کاهش الکترون‌ها را دریافت می‌کند و الکتروود مثبت طی واکنش اکسیداسیون الکترون از دست می‌دهد (عکس) این فرایند طی تخلیه رخ می‌دهد. طی تخلیه باتری، یون‌های لیتیوم از الکتروود منفی دفع و در الکتروود مثبت مستقر می‌شوند و به این ترتیب در مدار خارجی الکترون‌ها از الکتروود منفی به الکتروود مثبت حرکت می‌کنند که طی آن روند تخلیه و حرکت خودرو فراهم می‌شود. به این ترتیب، الکتروود منفی طی واکنش اکسیداسیون الکترون از دست می‌دهد و الکتروود مثبت نیز طی واکنش کاهش الکترون دریافت می‌کند. در شکل ۱۱ شماتیک نحوه کار باتری‌های لیتیوم یونی ارائه شده است.

مواد فعال
تشکیل‌دهنده
الکتروود منفی
شامل ماده
خمیر شکل
کربنی،
اتصال‌دهنده
و محلول
آلی است که
به صورت یک
پوشش نازک
روی فلز مس
مستقر می‌باشد



شکل ۱۱. شماتیکی از مکانیزم کار باتری‌های لیتیوم یونی

۴. عوامل تأثیرگذار بر عملکرد باتری‌های لیتیوم

یونی

عوامل متعددی نظیر مقاومت درونی، وضعیت شارژ و دما بر عملکرد باتری لیتیومی تأثیر گذارند که به شرح مختصری پیرامون آن‌ها پرداخته شده است.

مقاومت درونی عبارت از مجموع مقاومت‌های درونی و مقاومت یونی است و به‌عنوان نیروی مخالف جریان در داخل باتری تعریف می‌شود. مقاومت درونی، در عمل به سائز باتری، خواص شیمیایی، میزان چرخه‌های سیکل‌گذاری شده، دما و جریان تخلیه بستگی دارد. مقاومت الکتریکی، مقاومت مواد فعال و اجزای داخلی باتری است که در تماس با یکدیگر قرار دارند. تأثیر مقاومت الکتریکی بسیار سریع بوده و تنها چند میلی‌ثانیه پس از اعمال بار به باتری ظاهر می‌گردد. مقاومت یونی، مقاومت در برابر جریان در داخل باتری است که به دلیل عوامل مختلف الکتروشیمیایی مثل هدایت الکتروولیت، تحرک یون‌ها و مساحت سطح الکترودها پدیدار می‌شود. این آثار پلاریزاسیون بسیار آهسته‌تر از مقاومت الکتریکی رخ می‌دهد.

هرچه مقدار وضعیت شارژ بیشتر باشد، الحاق یون لیتیوم به آند با شدت بیشتری رخ می‌دهد و به دلیل محتوی انرژی بالا، دشارژ خودبه‌خودی محتمل‌تر است. به‌عبارتی واکنش‌های بیشتری رخ خواهد داد و لایه فصل مشترک جامد سریع‌تر رشد خواهد کرد. از طرفی کاند نیز دچار تغییر شکل می‌شود، زیرا به شدت از لیتیوم تخلیه می‌شود و ناپایداری ترمودینامیکی را تجربه می‌کند. افزایش وضعیت شارژ باعث اکسیداسیون الکتروولیت و افزایش مقاومت خواهد شد که این اثر باعث اتلاف ظرفیت و کاهش توان باتری می‌گردد. فرانشارژ به معنی شارژ شدن سل در ولتاژهای بالاتر از ولتاژ مشخصه و کارکرد در بالای نقطه تنش ماکزیمم است. در این مورد، ابتدا افزایش اندکی در ظرفیت رخ می‌دهد، اما عمر باتری به شدت کاهش می‌یابد. در حین فرانشارژ، انرژی الکتریکی به داخل باتری منتقل می‌شود، اما الحاق به سختی رخ می‌دهد که به صورت افزایش شدید مقاومت درونی و اتلاف انرژی الکتریکی مشاهده می‌شود. طی وقوع فرانشارژ، تجزیه چسب و الکتروولیت نیز رخ می‌دهد. تجزیه الکتروولیت باعث ایجاد محصولات غیرمحلول می‌شود که خلل و فرج موجود در الکتروود را مسدود می‌کند و باعث تولید گاز می‌شود. این گاز فشار درون سل را افزایش می‌دهد و به باتری آسیب می‌رساند.

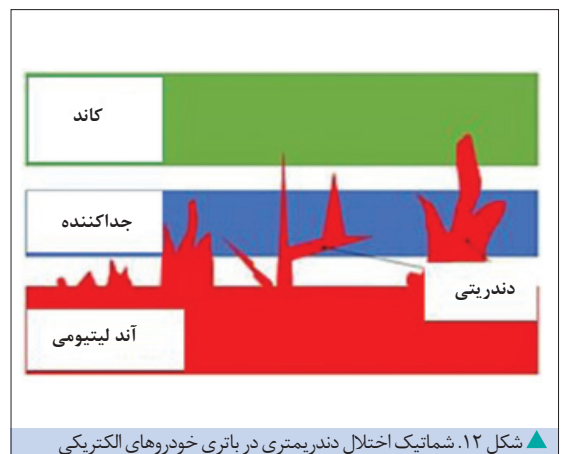
دماهای غیرایده‌آل، نرخ جریان بالا، وضعیت شارژ بالا و عمق تخلیه بالا، اثر منفی بر ظرفیت سل داشته و باعث افت عملکرد تشدیدشونده در سل لیتیوم یونی می‌شوند. دما، تأثیر زیادی در ظرفیت باتری لیتیوم یونی دارد و محدوده دمایی بهینه برای کارکرد این سل وجود دارد، به‌نحوی که در خارج از این محدوده دمایی، اتلاف ظرفیت دائمی یا موقت رخ می‌دهد. دمای بالای کارکرد سل، در ابتدا باعث افزایش توان و ظرفیت دشارژ سل لیتیوم یونی می‌شود و انرژی فعال‌سازی واکنش‌های شیمیایی را کاهش می‌دهد و همچنین باعث الحاق و عدم الحاق بیشتر می‌شود و نهایتاً باعث افزایش ولتاژ سل می‌گردد. از طرفی در دماهای بالاتر یون‌های لیتیوم سریع‌تر نفوذ می‌کنند و جریان بیشتری ایجاد می‌شود. این دو اثر در مجموع باعث

وقتی باتری لیتیوم یونی برای اولین بار شارژ می‌شود، فیلم جامد رابط که الکتروولیت جامد بین فازهای^{۱۹} (SEI) نامیده می‌شود بین الکتروولیت و در نزدیکی الکتروود منفی تشکیل می‌شود که این لایه مانع خوردگی و ایجاد واکنش کاهش‌ی بین الکتروود منفی و الکتروولیت می‌گردد. طی فرایند شارژ و تخلیه، لایه SEI به‌طور مداوم تشکیل شده و حل می‌شود که نتیجه آن کاهش مقدار یون‌های لیتیوم و مواد فعال است و از مهم‌ترین عوامل کاهش ظرفیت باتری به‌شمار می‌رود [۶].

از مزایای باتری‌های لیتیوم یونی در مقایسه با سایر باتری‌ها در سیر تحولی آن‌ها می‌توان به ولتاژ کاری بالا (در حدود ۳/۶ ولت)، انرژی ویژه بالا، عمر چرخه طولانی، نرخ خود تخلیه پایین (نرخ خود تخلیه در باتری‌های لیتیوم یونی در حدود ۰/۸-۰/۶٪ است در صورتی که این مقدار برای باتری‌های نیکل هیدرید فلزی در حدود ۰/۳۰-۰/۲۰٪ و برای باتری‌های نیکل کادمیوم ۰/۲۰-۰/۱۵٪ است)، کاهش اثر حافظه (پدیده کاهش ظرفیت باتری که در اثر شارژ مداوم باتری هنگامی که تنها بخشی از شارژ آن مصرف شده باشد ایجاد می‌شود) و قابلیت تهیه باتری‌های لیتیوم یونی در طرح‌ها و چیدمان‌های مختلف و همچنین عدم ایجاد آلودگی زیست‌محیطی اشاره نمود [۶].

هزینه تولید باتری‌های لیتیوم یونی، چندین برابر باتری‌های اسیدی و نیکل متال هیدریدی است. در حال حاضر برنامه‌های کاربردی بسیاری در زمینه کاهش هزینه‌های بالای تهیه مواد اولیه، پردازش مواد، ساخت سلول و بسته‌بندی آن‌ها در دست انجام است. علاوه بر آن، باتری‌های لیتیوم یونی به خودی خود ایمن نیستند و عواملی نظیر ایجاد اتصال کوتاه، شارژ و دشارژ بیش از حد و درجه حرارت بالا می‌تواند منجر به حوادثی نظیر آتش‌سوزی و انفجار در آن‌ها گردد، به همین دلیل، دپارتمان‌های انرژی با تمرکز بر روی هزینه، اجراء ایمنی و طول عمر باتری‌ها در صدد رفع این موانع برآمده‌اند [۷].

یکی دیگر از مشکلات باتری‌های لیتیومی حالت دندریتی یا رشد دندریتمتری مواد آند می‌باشد. طی این اختلال مواد آند به شکلی مانند انگشت رشد کرده و با نفوذ به جداکننده سبب اتصال کوتاه، شعله و انفجار باتری می‌شوند. در شکل ۱۲ شماتیک این اختلال نشان داده شده است.



شکل ۱۲. شماتیک اختلال دندریتمتری در باتری خودروهای الکتریکی

هزینه تولید باتری‌های لیتیوم یونی، چندین برابر باتری‌های اسیدی و نیکل متال هیدریدی است. در حال حاضر برنامه‌های کاربردی بسیاری در زمینه کاهش هزینه‌های بالای تهیه مواد اولیه، پردازش مواد، ساخت سلول و بسته‌بندی آن‌ها در دست انجام است

1. electric vehicles (EVs)
2. hybrid electric vehicles (HEVs)
3. Lead- acid
4. Plug- in hybrid electric vehicles (PHEV)
5. NiMH
6. Ni-MH
7. Li-ion
8. PLION
9. Li- Metal
10. SG
11. ??
12. porous Membranes Micro
13. Non-woven Mats
14. Ceramic coated separators
15. Polyolefins
16. Wettability
17. positive temperature coefficient
18. safety valve
19. Solid Electrolyte Interphase
20. Battery Management System
21. State of charge
22. State of health
23. State of power
24. Remaining useful life

فهرست منابع (در مقاله اصلی)

1. T.Suzuki, S. Inagaki, Y.Suzuki, A.T. Tran, Design and Analysis of Distributed Energy Management Systems, (2020).
2. T. B. Reddy, Linden's handbook of batteries, Mcgrow- hill NewYork, (2011).
3. R. Schumch, R. Wagner, G. Hörple, T. Placke, M. Winter, Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries, Nature Energy, 3(4) (2018) 267- 278.
4. W. Li, E. Erickson, High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries, (5) (2020) 26-34.
5. Y. Mekkonen, A. Sundararajan, A Review of Cathode and Anode materials for lithium- Ion Batteries, (2016).
6. Rui Xiong, Battery Management Algorithm for Electric Vehicles, (2019) 1-310.
7. D. Andre., S. Kim, Future generations of cathode materials: an automotive industry perspective, (3) (2015) 6709- 6732.
8. L. Lam, A Practical Circuitbased Model for State of Health Estimation of Lion Battery Cells in Electric Vehicles, Thesis (2011) 1- 174.

باتری^{۲۰} یا BMS می‌گویند.

در شکل ۱۴ دیاگرام نوعی BMS که متشکل از حسگرها، اکچواتورها و الگوریتم‌های کنترلی است نشان داده شده است. که هدف اصلی آن، اطمینان از ایمنی باتری و تهیه اطلاعات پایه مورد نیاز برای کنترل و مدیریت انرژی، جهت مداخله مناسب در شرایط کاری غیرعادی است. هدف از جمع‌آوری ولتاژ، جریان، حرارت و سایر اطلاعات هر سلول باتری در زمان واقعی در مدار نمونه‌گیری، تخمین حالت شارژ باتری^{۲۱} SOC سلامت باتری^{۲۲} SOH، قدرت باتری^{۲۳} SOP باقی‌مانده عمر مفید باتری^{۲۴} RUL است. با استفاده از الگوریتم‌ها و به‌کارگیری استراتژی‌هایی جهت کنترل انرژی و توزیع توان در خودروی الکتریکی است. بنابراین هدف اصلی سیستم مدیریت باتری، جمع‌آوری اطلاعات، نظارت، ایمنی، کنترل شارژ، مدیریت انرژی، مدیریت حرارت باتری و مدیریت اطلاعات است. این اطلاعات کمک می‌کند تا خودروی الکتریکی خود را با تغییر شرایط محیطی و یا تغییرات شرایط جاده به سرعت تطبیق دهد. به این ترتیب، اختلالاتی نظیر ایجاد ولتاژ بالا، افت ولتاژ (تخلیه بیش از حد)، جریان بالا، حرارت بالا، اتصال کوتاه، قطع اتصال، نقصان عایق بندی و نشن الکترولیت به کمک این سیستم کنترل می‌شوند [۶].

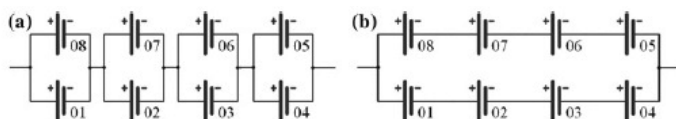
۵. چشم‌انداز تولید خودروهای الکتریکی

فناوری باتری‌های لیتیوم یونی هنوز کاستی‌های زیادی دارد، از جمله اینکه می‌توان بازه ذخیره‌سازی انرژی، چگالی قدرت و مسائل ایمنی را در این ادوات بهبود بخشید و همچنین قیمت تمام شده آن‌ها را تا حد معقولی کاهش داد. امروزه دست‌یابی به چگالی انرژی بیشتر از ۳۰۰ wh/kg و تنزل قیمت آن به یک‌چهارم مقدار فعلی، برای معقول بودن بهره‌گیری از این باتری‌ها در خودروهای الکتریکی ضروری است [۸]. در دهه گذشته، در ساختار کاند باتری‌های لیتیومی، از اکسیدهای لایه‌ای بر پایه نیکل استفاده می‌شده است. امروزه، استفاده از باتری‌های لیتیوم-فسفات آهن (LiFePo_۴ (LFP)، همچنان از نظر تجاری بر سایرین غالب است و انتظار می‌رود که تا سال ۲۰۲۵ و حتی زودتر دست‌یابی به انرژی ویژه ۳۵۰ wh/kg در سطح سلول باتری با استفاده از کاند با اکسید لایه‌ای و آندهای گرافیت-سیلیکون ممکن شود [۴].

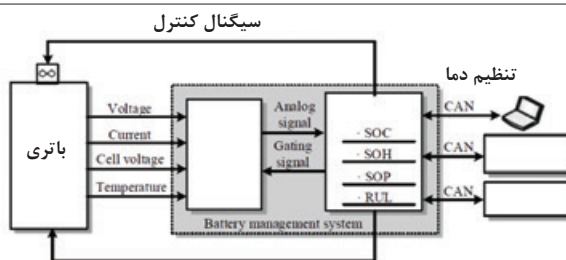
توان بالای باتری و ذخیره‌سازی بیشتر انرژی خواهد شد. در نگاه اولیه به‌نظر می‌رسد که افزایش دما اثر مثبت بر عملکرد سل دارد، اما در طولانی‌مدت، آسیب شدید به سل وارد خواهد کرد. دمای بالا باعث تخریب آهسته فصل مشترک جامد، شکستن و حل شدن آن در الکترولیت می‌شود. در نتیجه فلزات فعال آند در تماس با الکترولیت قرار می‌گیرند که باعث انجام واکنش‌های جانبی و ترمیم فصل مشترک جامد می‌گردد. از طرفی به‌واسطه دمای بالا، مواد آلی نیمه‌پایدار به مولکول‌های غیرآلی پایدار با تخلخل کمتر تبدیل می‌شوند. قسمت‌هایی از کاند در الکترولیت حل شده و در لایه فصل مشترک جامد تجمع می‌یابند. به این ترتیب، الحاق در آند با مشکل مواجه شده و هدایت یونی کاهش می‌یابد. علاوه بر تجزیه الکترولیت در دمای بالا، جداکننده نیز تجزیه می‌شود و سبب ایجاد اتصال کوتاه می‌گردد. در دماهای بالا، چسب‌های موجود در الکترولیت و جمع‌کننده جریان نیز تجزیه شده و باعث معیوب شدن ارتباط بین چسب و جمع‌کننده جریان می‌شود و افت توان باتری را سبب می‌گردد [۸].

اتصال باتری در خودروهای الکتریکی به سه روش سری، موازی و هیبریدی (ترکیبی از سری و موازی) انجام می‌شود که نوع طراحی، بسته به توان مورد نیاز انتخاب می‌گردد. سلول‌های باتری در حالت‌های سری و موازی به ترتیب می‌توانند تقاضای ولتاژ و ظرفیت بالا را فراهم سازند؛ در حالت اتصال هیبریدی نیز باتری قادر خواهد بود که به‌طور هم‌زمان تقاضای سیستم برای ولتاژ و ظرفیت بالا را تأمین نماید. در شکل ۱۳ دیاگرام اتصال سری و موازی در یک باتری خودروی الکتریکی نشان داده شده است [۶].

خودروی الکتریکی با میزان ظرفیت باتری بیشتر، شعاع حرکتی بیشتری را در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌دهد. به‌عبارت دیگر، افزایش ظرفیت باتری به معنای طی مسافت بیشتر طی یک بار شارژ باتری است. ولی دارندگان خودروی الکتریکی، هرگز کاملاً به تمام ظرفیت باتری دسترسی ندارند، زیرا به‌منظور حفظ کارایی باتری و افزایش عمر مفید آن، سیستم مدیریت خودروی الکتریکی مانع از شارژ و تخلیه ۱۰۰ درصدی باتری می‌شود. تکنولوژی کنترل و مدیریت عملکرد باتری را سیستم مدیریت



شکل ۱۳. نمایی از جایگاه باتری‌ها در خودروهای الکتریکی و دیاگرام اتصال سری و موازی در یک باتری خودروی الکتریکی



شکل ۱۴. دیاگرام سیستم مدیریت باتری (BMS)