

# دستنامه طراحی پک باتری لیتومی

ویرایش دوم

شیمی، قطعات، مدل ها و واژه شناسی  
با کاربرد در خودروهای هیبریدی و الکتریکی



**John T. Warner**

مؤلف: جان وارنر

مترجم: مهندس علیرضا صالحین



### نشر علمی صالحین

نام کتاب: دستنامه طراحی پک باتری لیتومی ویرایش دوم، شیمی، قطعات، مدل ها و واژه شناسی  
با کاربرد در خودروهای هیبردی و الکتریکی

مؤلف: جان وارنر

مترجم: مهندس علیرضا صالحین

سال چاپ: ۱۴۰۴

نوبت چاپ: اول

شمارگان: ۱۰۰

بها: ۶۵۰۰۰۰ تومان

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۸۹۵۵۳-۲-۲

**حق چاپ برای نشر علمی صالحین محفوظ می باشد**

نشانی مرکز پخش: تهران، خیابان انقلاب، روبروی در اصلی دانشگاه، پاساژ فروزنده، طبقه اول واحد ۴۱۹

تلفن: ۰۹۱۲۴۸۸۶۴۹۸ - ۸۸۲۸۳۶۹۸ - ۶۶۹۶۸۶۱۴ - ۰۱۰۳۰ - ۰۹۱۲۵۰

## میثاق نامه حقوقی مالکیت فکری و شرایط بهره‌برداری انتشارات علمی صالحین (حق نشر (Copyright) ۱۴۰۴ ©)

### ماده ۱: تعاریف و دامنه شمول اثر

- ۱-۱. تعریف اثر: این اثر شامل، اما نه محدود به، کلیه متون، نگاره‌ها، تصاویر، نمودارها، جداول، داده‌ها (اینفوگرافیک)، طرح جلد، صفحه‌آرایی (Layout)، تایپوگرافی، کدهای منبع (در نسخه‌های دیجیتال)، فراداده‌ها (Metadata) و ساختار سازماندهی محتوا می‌باشد.
- ۱-۲. دامنه حقوق: کلیه حقوق مادی (Economic Rights) ناشی از پدیدآوردن این اثر، شامل حق تکثیر، نشر، پخش، عرضه، اجراء، ترجمه، اقتباس و بهره‌برداری در هر فرمت (چاپی، صوتی، تصویری، الکترونیکی) و در هر بستر (فیزیکی، سایبری، متاورس) که اکنون موجود است یا در آینده ابداع گردد، به موجب قراردادهای معتبر قانونی، به صورت انحصاری، مطلق و غیرقابل رجوع به «انتشارات علمی صالحین» (که از این پس «ناشر» نامیده می‌شود) تعلق دارد.
- ۱-۳. حقوق معنوی: حقوق معنوی اثر، طبق ماده ۴ «قانون حمایت حقوق مؤلفان، مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸»، برای پدیدآورندگان محفوظ است؛ لکن حق انحصاری صیانت از این حقوق و پیگرد قانونی هرگونه تحریف، تغییر یا آسیب به تمامیت اثر، به ناشر تفویض گردیده است.

### ماده ۲: ماهیت حقوقی تملک و بهره‌برداری

- ۱-۲. تفکیک مالکیت (در نسخ چاپی): خرید نسخه فیزیکی این اثر، صرفاً موجب انتقال مالکیت بر «عین کالا» (صفحات و جلد) مطابق با عقد بیع در قانون مدنی می‌گردد. این خرید، هیچ‌گونه حقی نسبت به مالکیت محتوا، حق تکثیر، یا بهره‌برداری تجاری از آن برای خریدار ایجاد نمی‌نماید. قاعده «استفاده منصفانه» یا «مالکیت نسخه» مجوزی برای اسکن، فتوکپی یا تبدیل نسخه فیزیکی به دیجیتال نیست.
- ۲-۲. پروانه بهره‌برداری (در نسخ دیجیتال): دریافت، دانلود یا دسترسی به نسخه الکترونیکی این اثر، به منزله «بیع» نیست؛ بلکه اعطای یک «پروانه بهره‌برداری» (License Agreement) با ویژگی‌های زیر است:

- الف) شخصی: فقط مختص شخصی است که هزینه را پرداخت کرده یا حساب کاربری به نام اوست.
- ب) محدود: محدود به مطالعه و استفاده متعارف.
- ج) غیرانحصاری و غیرقابل انتقال: کاربر حق فروش، اجاره، هدیه و اگارداری لایسنس یا اشتراک‌گذاری حساب کاربری خود با اشخاص ثالث را ندارد.

### ماده ۳: ممنوعیت‌های صریح و نقض کی‌رایت

- هرگونه فعل یا ترک فعلی که منجر به نقض حقوق انحصاری ناشر گردد، مستند به مواد ۲۳، ۲۴ و ۲۵ «قانون حمایت حقوق مؤلفان» و مواد ۶۱، ۷۴ و ۷۵ «قانون تجارت الکترونیکی»، جرم تلقی شده و علاوه بر جبران کامل خسارات وارده (اعم از مادی و معنوی و افت منافع)، موجب پیگرد کیفری (حبس و جزای نقدی) خواهد بود. مصادیق نقض شامل موارد زیر است (حصری نیست):
- ۱-۳. بازتولید غیرمجاز: هرگونه عکس‌برداری، اسکن، فتوکپی، ضبط صوتی (روخوانی متن)، بازنویسی دستی یا تایپی و ذخیره‌سازی در پایگاه‌های داده.
  - ۲-۳. توزیع شبکه: بارگذاری (Upload) اثر در وبسایت‌ها، فضای ابری (Cloud)، شبکه‌های اجتماعی (تلگرام، اینستاگرام و...)، سامانه‌های اشتراک فایل (Torrent/PrP) و اینترنت‌های سازمانی.
  - ۳-۳. آثار اشتقاقی و تبدیلی: هرگونه ترجمه، تلخیص، خلاصه‌نویسی، تبدیل به نمایشنامه، فیلم‌نامه، محتوای آموزشی ویدیویی، یا تولید آثار جدید بر پایه این اثر بدون مجوز کتبی ناشر.

- ۴-۳. بهره‌برداری تجاری ثانویه: فروش مجدد نسخه‌های دیجیتال، اجاره دادن نسخه‌های چاپی در مقیاس تجاری (غیر از کتابخانه‌های عمومی دارای مجوز)، یا استفاده از اثر در بسته‌های آموزشی انتفاعی.

### ماده ۴: هوش مصنوعی، داده‌کاوی و فناوری‌های نوین

- با توجه به پیشرفت فناوری، موارد زیر صراحتاً ممنوع اعلام می‌گردد و نقض آن به منزله سرقت محتوای علمی/ادبی تلقی می‌شود:
- ۱-۴. داده‌کاوی (Text & Data Mining): هرگونه استخراج ماشینی متن، تحلیل خودکار داده‌ها، خز (Crawling) و اسکرپینگ (Scraping) محتوای اثر.

- ۲-۴. تغذیه هوش مصنوعی: استفاده از تمام یا بخشی از این اثر به عنوان «داده ورودی» (Input Data)، «داده آموزشی» (Training Set) یا جهت «تنظیم دقیق» (Fine-tuning) هرگونه سامانه هوش مصنوعی، مدل‌های زبانی بزرگ (LLMs)، هوش مصنوعی مولد (Generative AI) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین.

### ماده ۵: استثنائات قانونی

- صرفاً استفاده‌هایی که مشمول ماده ۷ «قانون حمایت حقوق مؤلفان» باشد مجاز است:
- نقل قول مستقیم یا غیرمستقیم از بخش‌های مختصر اثر، منحصراً برای اهداف نقد، تحلیل، آموزش و پژوهش علمی.
- شرط الزامی: در تمامی موارد فوق، ذکر کامل منبع (عنوان اثر، نام مؤلف، نام ناشر) الزامی است. عدم ذکر منبع، حتی در استفاده جزئی، سرقت علمی (Plagiarism) محسوب می‌شود.

### ماده ۶: تدابیر فنی حفاظتی (DRM) و مهندسی معکوس

- در صورتی که اثر (فیزیکی یا دیجیتال) حاوی قفل‌های نرم‌افزاری واترمارک (Watermark)، هولوگرام یا هرگونه تدابیر حفاظتی فنی باشد:
- هرگونه اقدام جهت خنثی‌سازی، شکستن قفل، کرک کردن (Crack)، مهندسی معکوس، دی‌کامپایل (Decompile) یا دور زدن این تدابیر، طبق مواد ۷۱ تا ۷۳ قانون تجارت الکترونیکی و مواد ۲۵ تا ۲۷ قانون جرایم رایانه‌ای، جرم مستقل محسوب شده و مستوجب مجازات حبس و جریمه سنگین است.

**ماده ۷: سلب مسئولیت (Disclaimer) و حدود ضمانت**

۷-۱. ماهیت محتوا: ناشر و پدیدآورندگان نهایت تلاش خود را برای صحت و دقت محتوا به کار بسته‌اند، اما هیچ‌گونه ضمانتی (صریح یا ضمنی) مبنی بر بی‌عیب بودن، به‌روز بودن، یا تناسب محتوا برای یک هدف خاص (Fitness for a Particular Purpose) ارائه نمی‌دهند.

۷-۲. محدودیت مسئولیت: مسئولیت هرگونه استفاده از اطلاعات، دستورالعمل‌ها یا داده‌های موجود در این اثر و عواقب ناشی از آن (اعم از خسارات مستقیم، غیرمستقیم، تبعی، جانی یا مالی) تماماً بر عهده کاربر است. سقف مسئولیت مالی ناشر در برابر کاربر در هر شرایطی، محدود به «مبلغ پرداختی برای خرید اثر» خواهد بود.

**ماده ۸: حل اختلاف و قانون حاکم**

این توافق‌نامه تابع قوانین و مقررات جمهوری اسلامی ایران است. در صورت بروز هرگونه اختلاف، ناشر حق دارد حسب صلاحدید خود، موضوع را از طریق مراجع قضایی صالح در شهر تهران (یا محل اقامتگاه قانونی ناشر) یا از طریق داوری پیگیری نماید. کاربر با تهیه این اثر، صلاحیت محلی دادگاه‌های تهران را پذیرفته و حق اعتراض به صلاحیت را از خود سلب می‌نماید.

**ماده ۹: ضمانت اجرا و جبران خسارت**

کاربر متعهد می‌گردد در صورت نقض هر یک از مفاد این توافق‌نامه، کلیه خسارات وارده به ناشر (شامل زیان‌های مالی، از دست رفتن سود، لطمه به شهرت تجاری) و تمامی هزینه‌های دادرسی و حق‌الوکاله وکیل انتخابی ناشر را بدون هیچ‌گونه قید و شرطی جبران نماید.

## تقدیم نامه :

تقدیم به برادران (احمد و محمود) خیامی بنیانگذاران صنعت خودروی ایران



مردانی که ثابت کردند بزرگ‌ترین کارخانه‌ها، از کوچک‌ترین رویاها جوانه می‌زنند. آن روز که مغازه‌ی کوچک قطعات یدکی در خیابان اکباتان با تابلوی «فروشگاه تضامنی برادران خیامی» بنا شد، نه فقط یک کسب‌وکار، که سنگ بنای اعتماد و خودباوری در صنعت ایران گذاشته می‌شد.

آن‌ها به ما آموختند که نوآوری، الزاما در آزمایشگاه‌های پیچیده متولد نمی‌شود؛ گاهی در افزودن یک دستشویی کوچک به اتوبوس یا نصب یک یخچال برای آسایش مسافر تجلی می‌یابد و همین جرقه‌های کوچک، بازارهای بزرگ را فتح می‌کند.

«ایران ناسیونال» تنها نام یک کارخانه نبود؛ تجسم یک آرمان بود. روزی که چرخ‌های «پیکان»، این نام برگزیده‌ی ایرانی، در جاده‌های وطن به حرکت درآمد، فقط یک خودرو متولد نشد؛ غرور یک ملت بر ریل پیشرفت صنعتی به حرکت افتاد. آن‌ها خودرویی از یک شرکت در آستانه ورشکستگی را به محبوب‌ترین مرکب ایرانیان بدل کردند و به همگان نشان دادند که با اراده و تدبیر، می‌توان از دل تهدید، فرصتی تاریخی ساخت.

این تقدیم‌نامه، ستایشی است از مرامی که «اول کارگران، بعد خانواده» را سرلوحه‌ی خود قرار داد و پیش از ساختن خانه‌ای برای خود، برای کارگزارانش سرپناه ساخت. میراث خیامی‌ها تنها در کارخانه‌های عظیم، شرکت‌های متعدد و فروشگاه‌های زنجیره‌ای خلاصه نمی‌شود؛ یادگار جاودان آن‌ها در ده‌ها مدرسه و مرکز درمانی است که برای فردای ایران بنا کردند.

این صفحات، به یاد مردانی نگاشته شده که نشان دادند برای ساختن وطن، دستان خالی اما همتی بلند، کافی است. یادشان گرامی و راهشان، الهام‌بخش نسل‌های آینده‌ی ایران باد.

مهندس علیرضا صالحین، پاییز ۱۴۰۴

## درباره نویسنده



دکتر جان تی. وارنر (John T. Warner) مدرک دکترای خود را در رشته مهندسی شیمی از دانشگاه کلارکسون دریافت کرده است. او بیش از ۳۰ سال تجربه در زمینه توسعه محصول و تولید باتری‌های لیتیوم-یون دارد. دکتر وارنر کار خود را در حوزه باتری با شرکت AEA Technology در انگلستان آغاز کرد و در آنجا به تولید سلول‌های لیتیوم-یون پلیمری برای کاربردهای تلفن همراه و کامپیوترهای قابل حمل (لپ‌تاپ) مشغول بود. سپس به شرکت Valence Technology در آستین، تگزاس پیوست و در آنجا بر روی توسعه کاتدهای فسفات آهن لیتیوم و طراحی پک‌های باتری برای کاربردهای مختلف، از خودروهای الکتریکی گرفته تا تجهیزات پزشکی، تمرکز داشت. در سال ۲۰۱۰، او به شرکت Xtreme Power در کایل، تگزاس منتقل شد تا بر روی طراحی و تولید سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس شبکه (grid-scale) برای پایداری شبکه برق و یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر کار کند. پس از آن، به شرکت InoBat در اسلواکی پیوست و در آنجا به توسعه سلول‌های باتری سفارشی برای مشتریان اروپایی کمک کرد.

امروزه، دکتر وارنر از طریق شرکت مشاوره خود، Warner Energy Consulting LLC، خدمات مشاوره‌ای در زمینه تمام جنبه‌های صنعت باتری ارائه می‌دهد. او همچنین نویسنده کتاب «الکتروشیمی لیتیوم-یون: برای مهندسان» است.

## پیشگفتار ویراست دوم

از زمان انتشار ویراست نخست این کتاب، تغییرات بسیاری در دنیای پک‌های باتری رخ داده است. در سال ۲۰۱۵، فروش جهانی خودروهای الکتریکی (EV) تقریباً به نیم میلیون دستگاه رسید. در سال ۲۰۲۱، این رقم از ۶٫۵ میلیون دستگاه فراتر رفت و انتظار می‌رود در سال ۲۰۲۲ به ۱۰ میلیون دستگاه برسد. این رشد چشمگیر، تقاضای بی‌سابقه‌ای برای باتری‌های لیتیوم-یون ایجاد کرده است. در واکنش به این تقاضا، سرمایه‌گذاری‌های هنگفتی در زمینه ساخت کارخانه‌های تولید سلول باتری (ابزارخانه‌ها) در سراسر جهان صورت گرفته است.

در همین حال، پیشرفت‌های فناوریانه همچنان ادامه دارد. شرکت تسلا (Tesla) در حال توسعه خط تولید آزمایشی خود برای سلول‌های استوانه‌ای جدید با فرمت ۴۶۸۰ است که نویدبخش کاهش هزینه و افزایش چگالی انرژی است. شرکت جنرال موتورز (GM) در حال عرضه پلتفرم باتری ماژولار «آلتیوم» (Ultium) خود است که از سلول‌های کیسه‌ای (pouch cells) بزرگ با شیمی نیکل-منگنز-کبالت-آلومینیوم (NMCA) بهره می‌برد.

با این حال، این دوره با چالش‌های بزرگی نیز همراه بوده است. کمبود تراشه‌های نیمه‌رسانا (semiconductor chips) تولید خودرو را با اختلال مواجه کرده است. قیمت مواد اولیه باتری، به‌ویژه لیتیوم و کبالت، به شدت افزایش یافته است. دنیا با یک همه‌گیری جهانی (کرونا و ویروس) دست و پنجه نرم کرده است که هم بر زنجیره تأمین و هم بر نیروی کار تأثیر گذاشته است.

دولت ایالات متحده با تصویب «قانون زیرساخت دوحزبی» و «قانون کاهش تورم»، سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی را برای حمایت از توسعه زنجیره تأمین داخلی باتری آغاز کرده است.

علاوه بر این، چندین فراخوان (recall) بزرگ و پرهزینه برای باتری‌ها به دلیل آتش‌سوزی‌های میدانی رخ داده است. آتش‌سوزی‌ها در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در کره توجه‌ها را به اهمیت ایمنی باتری جلب کرد. شرکت هیوندای (Hyundai) مجبور شد باتری‌های ساخت شرکت ال‌جی (LG) را که در خودروی الکتریکی کُنا (Kona) به کار رفته بودند، فراخوانی کند. شرکت جنرال موتورز نیز به دلیل نقص در باتری‌های ساخت ال‌جی که در خودروی شورولت بولت (Chevy Bolt) استفاده شده بود، با فراخوان مشابهی مواجه شد. در هر دو مورد، نقص‌های تولیدی در سلول‌های کیسه‌ای به عنوان علت اصلی شناسایی شدند. این حوادث یادآور آن است که با وجود پیشرفت‌های فراوان، همچنان راه درازی برای بهبود ایمنی و قابلیت اطمینان باتری‌ها در پیش داریم. در این ویراست دوم، تلاش کرده‌ام تا این تحولات را منعکس کنم. فصل جدیدی در مورد مدل‌سازی باتری اضافه شده است. فصول مربوط به سیستم‌های مدیریت باتری (BMS)، سیستم‌های مدیریت حرارتی (TMS) و ایمنی باتری به‌طور کامل بازنویسی و به‌روزرسانی شده‌اند تا آخرین پیشرفت‌ها و درس‌های آموخته شده از تجربیات میدانی را پوشش دهند.

جان تی. وارنر

آستین، تگزاس

اوت ۲۰۲۲

## References

Boudette, N. E. (۲۰۲۱). LG will pay G.M. \$۱.۹ billion for a battery flaw that led to a Bolt recall. The New York Times, ۱. Retrieved from <https://www.nytimes.com/۲۰۲۱/۱۰/۱۲/business/lg-gm-bolt-battery-recall.html>.

Cummings, S. (۲۰۱۹). South Korea Identifies Top ۴ Causes for ESS Fires. Li-ion Tamer, ۱. Retrieved from <https://liiontamer.com/south-korea-identifies-top-4-causes-that-led-to-ess-fires/#:w:text=This%۲۰week%۲۰South%۲۰Korea%۲۰announced%۲۰the%۲۰conclusions%۲۰from,in%۲۰system%۲۰losses%۲۰valued%۲۰at%۲۰over%۲۰%۲۰۴۲M%۲۰USD>.

International Energy Association. (۲۰۲۱). Global EV Data Explorer. Retrieved from <https://www.iea.org/articles/global-ev-data-explorer>.

Reuters. (۲۰۲۱). EV battery maker SES Holdings to go public in \$۳.۶ bln SPAC deal. Nasdaq. Retrieved from <https://www.nasdaq.com/articles/ev-battery-maker-ses-holdings-to-go-public-in-%۲۴۳.۶-bln-spac-deal-۲۰۲۱-۰۷-۱۳>.

SES. (۲۰۲۱). SES Battery World ۲۰۲۱. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v%۴ekKyfh۷t۵uY>.

Shilling, E. (۲۰۲۱). Volkswagen Is Coming After Tesla And Wants To Be The World's Biggest EV Maker. Retrieved from <https://jalopnik.com/volkswagen-is-coming-after-tesla-and-wants-to-be-the-wo-۱۸۴۷۳۸۴۷۰۴>.

Stellantis. (۲۰۲۱a). Stellantis and LG Energy Solution to Form Joint Venture for Lithium-Ion Battery Production in North America. Retrieved from <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/۲۰۲۱/october/stellantis-and-lg-energy-solution-to-form-joint-venture>.

Stellantis. (۲۰۲۱b). Stellantis and Samsung SDI to Form Joint Venture for Lithium-Ion Battery Production in North America. Retrieved from <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/۲۰۲۱/october/stellantisand-samsung-sdi-to-form-joint-venture-for-lithium-ion-battery-production-in-north-america>.

Tesla. (۲۰۲۰). ۲۰۲۰ Battery Day Presentation. Retrieved from <https://tesla-share.thron.com/content/?id%۴۹۶ea۷۱cf-۸fda-۴۶۴۸-a۷۲c-۷۵۳af۴۳۶c۳b۶&pkey%۴S۱dbe۴>.

Wayland, M. (۲۰۱۹). GM, LG Chem to create \$۲.۳ billion battery cell venture for electric vehicles, to create ۱,۱۰۰ jobs in Ohio. Retrieved from <https://www.cnbc.com/۲۰۱۹/۱۲/۰۵/gm-lg-to-form-%۲point۳-billion-jointventure-for-battery-cell-production.html>.

## آشنایی با مترجم



**مهندس علیرضا صالحین (مدیر علمی نشر دانشگاهی فرهنگد بیش از یک دهه و مدیر انتشارات علمی صالحین)**

مهندس علیرضا صالحین، چهره‌ای برجسته و چندرشته‌ای در عرصه مهندسی و نشر علمی کشور است که از سال ۱۳۹۲ مدیریت علمی نشر دانشگاهی فرهنگد را بر عهده دارد. وی با تلفیق کم‌نظیری از دانش آکادمیک در مهندسی عمران و معماری، تخصص فنی در فناوری اطلاعات و مهارت‌های عملی عمیق در مکانیک و الکترونیک خودرو، جایگاهی منحصر به فرد به عنوان یک متخصص میان‌رشته‌ای و پیشگام در تولید محتوای فنی روزآمد به دست آورده است. انتشارات علمی صالحین توسط ایشان در سال ۱۴۰۴ تاسیس گردید.

ایشان با بیش از دو دهه تجربه اجرایی در پروژه‌های عمرانی و بیش از یک دهه مدیریت علمی، همواره به عنوان یک تحلیلگر و منتقد فعال در صنایع ساخت‌وساز و خودرو شناخته شده‌اند. رویکرد ایشان مبتنی بر پر کردن خلاء میان دانش تئوریک و نیازهای عملی صنعت است؛ امری که در کارنامه درخشان ایشان شامل تألیف، ترجمه، گردآوری و ویراستاری تخصصی بیش از ۵۰ عنوان کتاب در حجمی بالغ بر ۲۳,۰۰۰ صفحه به‌خوبی نمایان است. این آثار، که بسیاری از آن‌ها به موضوعات پیچیده و فناورانه روز دنیا می‌پردازند، گواهی بر تعهد وی به ارتقای دانش فنی جامعه مهندسی ایران است.

تسلط ایشان بر زبان تخصصی و مهارت‌های عملی متعدد، از جوشکاری و بازرسی‌های غیرمخرب تا تعمیرات پیشرفته الکترونیکی و مکانیکی، به وی این امکان را داده است که پیچیده‌ترین منابع بین‌المللی را برای مخاطب فارسی‌زبان دسترس‌پذیر و کاربردی سازد.

### تحصیلات و برخی گواهینامه‌های تخصصی:

- مهندس عمران
- تحصیل در رشته مهندسی معماری و معماری داخلی
- مهندسی شبکه مایکروسافت (MCSE – MCITP)
- بازرس جوشکاری (CWI) و گواهینامه‌های تست‌های غیرمخرب (VT, MT, PT, RTi, UT)

- دوره های متعدد تخصصی مکانیکی، برق و الکترونیک و تعمیرات خودرویی (بیش از ۴۰ دوره)
- تعهد ایشان به دانش عملی در حوزه خودرو، در طی دوره های تخصصی متعددی که گذرانده اند، متبلور شده است. این آموزش ها طیف وسیعی از مباحث را پوشش می دهد: از مبانی برق و الکترونیک، سیستم های سوخت رسانی و پارامترخوانی گرفته تا مباحث پیشرفته ای چون شبکه های مالتی پلکس، تعمیرات تخصصی ECU و نودهای کنترلی، ریمپ حرفه ای، اورهال موتورهای مدرن و تعمیرات گیربکس های اتوماتیک.
- سایر کتب منتشر شده تالیف/ترجمه، گردآوری و ویراستاری توسط مهندس صالحین در زمینه خودرو عبارتند از (منتشر شده در نشر فرهنگ و نشر علمی صالحین):
- تکنولوژی خودروهای الکتریکی و مقایسه جامع برای انتخاب و خرید اتومبیل های برقی - ویرایش دوم (انتشارات SAE) تمام رنگی، نشر دانشگاهی فرهنگ، مترجمان: مهندس علیرضا صالحین و مهندس امیر زینی
- خودروهای الکتریکی و هیبریدی - ویرایش سوم، چاپ تمام رنگی، ۲۰۲۴ (انتشارات IMI)، مترجمان: مهندس علیرضا صالحین و مهندس امیر زینی
- راهنمای کاربردی تبدیل خودروهای بنزینی به الکتریکی (برقی) (به همراه پروژه های عملی و نکات فنی)، دو جلد، چاپ تمام رنگی، مؤلفین: مهندس علیرضا صالحین و مهندس امیر زینی
- تست داینو و تیونینگ، راهنمای آزمون های دینامومتر برای ارزیابی و ارتقاء عملکرد خودروها شامل تست های دینامومتر موتور و شاسی، مناسب تیونرها، مکانیک ها و علاقه مندان به صنعت خودرو، نشر دانشگاهی فرهنگ، مترجمان: مهندس امیر زینی و مهندس علیرضا صالحین
- آموزش کاربردی مسابقات دریفت، دریفت اصولی به همراه قوانین مسابقات اتومبیل رانی، تقویت تخصصی خودرو برای دریفت، تالیف: علیرضا محسنی فخر ویراستار: مهندس علیرضا صالحین
- آموزش کاربردی مسابقات درگ، اصول علمی و فنی به همراه قوانین مسابقات اتومبیل رانی، تالیف: علیرضا محسنی فخر ویراستار: مهندس علیرضا صالحین
- فرهنگ تخصصی مکانیک و برق خودرو، تالیف: مهندس امیر زینی ویراستار: مهندس علیرضا صالحین
- مجموعه دو جلدی سیم کشی خودرو و سیستم های برقی اتومبیل، مترجم: مهندس علیرضا صالحین (تمام رنگی)
- تراشکاری و ماشین کاری موتور برای مکانیک ها، راهنمای کف تراشی، هونینگ، بالانس و مونتاژ دقیق بلوک مترجم: مهندس علیرضا صالحین (تمام رنگی)
- هنر بهینه سازی موتور، از بازرسی بلوک تا مونتاژ نهایی برای دستیابی به عملکرد و پایداری، مترجم: مهندس علیرضا صالحین (تمام رنگی)
- طراحی و ساخت سیستم اگزوز تقویتی خودرو، راهنمای تخصصی ساخت هدرز، خم کاری لوله و تیونینگ، مترجم: مهندس علیرضا صالحین (تمام رنگی)

## فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه

فصل ۲: تاریخچه الکتریکی سازی خودرو (Vehicle Electrification)

فصل ۳: اصطلاحات پایه

فصل ۴: معیارهای طراحی و انتخاب پک باتری

فصل ۵: فرآیندها و روش های مهندسی باتری

فصل ۶: ابزارهای مهندسی باتری: مهندسی، طراحی و تحلیل به کمک کامپیوتر (CAE/CAD)

فصل ۷: لیتیوم-یون و سایر شیمی های سلول

فصل ۸: کنترل های سیستم مدیریت باتری (BMS)

فصل ۹: الکترونیک کنترل سیستم

فصل ۱۰: مدیریت حرارتی

فصل ۱۱: ساختار باتری، پکیجینگ مکانیکی و انتخاب مواد

فصل ۱۲: سازمان ها و استانداردهای صنعتی

فصل ۱۳: تست باتری و تحمل سوءاستفاده (Abuse Tolerance)

فصل ۱۴: ساخت ماژول و پک باتری

فصل ۱۵: زندگی دوم و بازیافت باتری های لیتیوم-یون

فصل ۱۶: شارژ و باتری به عنوان سرویس (BaaS)

فصل ۱۷: کاربردهای باتری لیتیوم-یون

فصل ۱۸: آینده باتری های لیتیوم-یون و الکتریکی سازی

مراجع

واژه نامه تخصصی انگلیسی به فارسی

## پیشگفتار ویرایش دوم

امروزه باتری‌های لیتیوم-یون در همه جا حضور دارند. این باتری‌ها نیروی ساعت‌ها، گوشی‌های هوشمند، تبلت‌ها، لپ‌تاپ‌ها، لوازم خانگی قابل حمل، دستگاه‌های GPS، کنسول‌های بازی دستی و تقریباً هر چیزی را که با خود حمل می‌کنیم، تأمین می‌کنند. در حقیقت، در مسیر حرکت بشریت به سوی پویایی (mobility) بیشتر، باتری‌ها به امری فراگیر تبدیل شده‌اند. آن‌ها همچنین نیروی محله‌ها، خانه‌ها و وسایل نقلیه ما را تأمین می‌کنند. شاید وقتی صحبت از کاربردهای حمل و نقل به میان می‌آید، دقیق‌تر آن است که بگوییم باتری‌ها «دوباره» نیروی حمل و نقل ما را تأمین می‌کنند. امروز، با تکامل فناوری و رشد سریع صنایع جدید، بسیاری از افرادی که پیش از این با باتری‌های لیتیوم-یون کار نکرده‌اند، خود را در نقش فروشنده باتری، فعال تجاری، تکنسین، تعمیرکار، پژوهشگر یا مهندسی می‌یابند که به حوزه خودروهای الکتریکی (EVs) و باتری‌های لیتیوم-یون وارد شده و نیازمند مقدمه‌ای بر فناوری باتری لیتیوم-یون هستند. اگر چنین است، این کتاب دقیقاً برای شما نوشته شده است!

این کتاب طیف وسیعی از موضوعات مرتبط با باتری‌های لیتیوم-یون و طراحی باتری را در سطحی از جزئیات معرفی می‌کند که درک آن برای «افراد غیرمتخصص» نیز ممکن باشد. اگر مهندس باشید، این مفاهیم را به سرعت درک خواهید کرد. با این حال، اگر مانند بسیاری از ما مهندس نیستید، این کتاب به شما کمک می‌کند تا دنیای باتری‌های لیتیوم-یون را بهتر بشناسید و بتوانید با آگاهی و هوشمندی درباره آن‌ها صحبت کنید. مفاهیم این کتاب بر برقی‌سازی وسایل نقلیه متمرکز است، اما برای بسیاری از کاربردهای دیگر از جمله ذخیره‌سازی انرژی ثابت (stationary energy storage)، کشتی‌ها و شناورهای دریایی و فراساحلی، انرژی محرکه صنعتی، رباتیک و سایر انواع کاربردهای الکتریکی نیز مناسب است. در اصل، این کتاب قصد دارد تا ابهام را از کاربردهای مدرن باتری بزداید. اما اجازه دهید در همین ابتدا یک نکته را روشن کنم (disclaimer): این کتاب به عنوان یک متن مهندسی دقیق طراحی نشده و قرار نیست جایگزین تیم مهندسی باتری شما شود. در عوض، این کتاب ابزاری مکمل برای شماست تا به درک بهتری از این فناوری‌های نوظهور دست یابید.

باتری‌ها در حوزه محصولات ذخیره‌سازی انرژی منحصر به فرد هستند، زیرا همزمان از طریق فرآیندهای شیمیایی انرژی تولید کرده و آن انرژی را در همان دستگاه ذخیره می‌کنند. سایر دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی نیازمند آن هستند که انرژی در یک مکان تولید و در مکانی دیگر ذخیره شود. برای مثال، در یک خودرو، انرژی از طریق پالایش نفت خام مایع تولید می‌شود. سپس به پمپ بنزین‌ها منتقل شده و در آنجا مجدداً ذخیره می‌شود تا زمانی که شما آن را خریداری کرده و دوباره به عنوان سوخت مایع در باک خودرو ذخیره کنید. در نهایت، این سوخت طی فرآیند احتراق در موتور احتراق داخلی (ICE) به انرژی (و کار) تبدیل می‌شود.

در ویراست نخست این کتاب، نگاهی مقدماتی به ملاحظات طراحی باتری لیتیوم-یون و مباحثی پیرامون سلول‌ها و اجزای مکانیکی، حرارتی و الکترونیکی پک‌های باتری لیتیوم-یون ارائه دادم. این ویراست دوم از «راهنمای طراحی پک باتری لیتیوم-یون»، بر پایه همان بحث اولیه بنا شده و هر یک از این سیستم‌ها را عمیق‌تر مورد کاوش قرار می‌دهد. علاوه بر این موضوعات اصلی، این کتاب به بسیاری از مباحث مرتبط دیگر مانند الزامات آزمون و صدور گواهینامه برای کاربردهای مختلف و همچنین گروه رو به رشد سازمان‌های صنعتی و تعداد فزاینده کاربردهایی می‌پردازد که از فناوری ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی بهره‌مند می‌شوند.

با توجه به پوشش رسانه‌ای مکرر در مورد باتری‌های لیتیوم-یون، مانند فراخوان‌های (recalls) شرکت‌های ال‌جی، جنرال موتورز و کیا؛ خرابی باتری‌های بوئینگ ۷۸۷ دریم‌لاینر؛ و خرابی باتری در خودروهای الکتریکی پرآوازه تسلا و شورولت (Santos, ۲۰۱۳; Voelcker, ۲۰۲۱; Lowy, ۲۰۱۱; Klayman, ۲۰۱۳)، تمرکز بر طراحی باتری لیتیوم-یون به عنوان یک «سیستم» بیش از هر زمان دیگری اهمیت یافته است. دیدگاهی که من مدتی است اتخاذ کرده‌ام این است که این سلول نیست که سیستم را ایمن می‌کند؛ در واقع، برعکس است: این سیستم است که سلول‌های باتری را ایمن می‌سازد. بنابراین، شما می‌توانید با کیفیت‌ترین و بهترین سلول‌های باتری لیتیوم-یون در جهان را برداشته و آن‌ها را در یک پک با طراحی ضعیف قرار دهید و احتمالاً با شکست مواجه شوید. این کار می‌تواند به کاهش عمر یا توان پایین و در نهایت به مشکلات ایمنی و فرار حرارتی منجر شود. در مقابل، شما می‌توانید یک سلول باتری با طراحی یا ساخت نسبتاً ضعیف را برداشته و با یک طراحی سیستم پک باتری خوب، آن را به طور ایمن به کار اندازید. طراحی سیستم ذخیره‌سازی انرژی لیتیوم-یون نیازمند اتخاذ یک رویکرد در سطح سیستمی (systems-level approach) است. هیچ سلول یا شیمی ذاتاً ایمنی (intrinsically safe) وجود ندارد که بتواند ایمنی یک پک را تضمین کند. با این حال، فناوری‌هایی در حال توسعه هستند که پتانسیل آن را دارند که پک‌های باتری لیتیوم-یون را حتی ایمن‌تر از سیستم‌های باتری امروزی سازند.

### عوامل مؤثر بر پذیرش خودروهای الکتریکی توسط مصرف‌کننده

پرسشی که باید به بحثی پیرامون باتری‌های لیتیوم-یون منتهی شود، به عواملی مربوط است که پذیرش خودروهای مجهز به باتری لیتیوم-یون را توسط مصرف‌کنندگان هدایت می‌کند. سرعت پذیرش خودروهای الکتریکی، موضوع بحثی مستمر در بسیاری از بخش‌های صنعت است و طرفداران و مخالفانی در هر دو سوی این بحث وجود دارند. در سال ۲۰۲۲، هیئت منابع هوایی کالیفرنیا (California Air Resource Board) پیشنهاد «خودروهای پاک ۲» (Clean Cars II) را تصویب کرد که عملاً فروش خودروهای سبک با موتور احتراق داخلی را تا سال ۲۰۳۵ ممنوع می‌کند (Mihalascu, ۲۰۲۲). البته، چرخه توسعه خودرو ۵ تا ۶ سال و عمر متوسط خودرو در ایالات متحده بیش از ۱۱٫۵ سال است، بنابراین حتی اگر این پیشنهاد به طور کامل اجرا شود، تمام خودروهای احتراق داخلی از جاده‌ها حذف نخواهند شد. همچنین سوالات بسیاری در مورد اینکه صنعت با چه سرعتی می‌تواند چنین تغییر بنیادینی را ایجاد کند و زنجیره تأمین تا چه حد می‌تواند همگام با آن پیش برود وجود دارد. پذیرش توسط مصرف‌کننده، که اندکی با پذیرش توسط ناوگان‌ها و شرکت‌های تجاری متفاوت است، تحت تأثیر چندین عامل قرار دارد. پنج عاملی که نیازمند توجه مستمر از سوی ذی‌نفعان اصلی برای تضمین رشد موفق خودروهای مجهز به باتری و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند، عبارتند از:

۱. **هزینه:** ما پیشرفت بزرگی در کاهش هزینه‌های باتری داشته‌ایم، اما هنوز کارهای زیادی برای مقرون‌به‌صرفه کردن راهکارهای مبتنی بر باتری لیتیوم-یون باقی مانده است. هزینه‌ها نسبت به سال ۲۰۱۰ نزدیک به ۹۰٪ کاهش یافته است، که این امر لیتیوم-یون را برای بسیاری از کاربردها و مشتریان جدید در محدوده توان خرید قرار می‌دهد. با این حال، در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲، افزایش هزینه مواد اولیه، صنعت را در مسیری اشتباه قرار داد و در برخی موارد هزینه‌ها را بیش از ۴۰٪ افزایش داد. وقتی صحبت از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی ثابت به میان می‌آید، فناوری‌های رقیب بسیاری برای انتخاب وجود دارد که این امر، اهمیت تداوم کاهش هزینه‌های لیتیوم-یون را دوچندان می‌کند.

۲. **تنوع و در دسترس بودن:** برای اینکه مصرف‌کنندگان به خودروهای الکتریکی روی آورند، باید گزینه‌های متنوعی از مدل‌ها و برندها در اندازه‌ها، شکل‌ها و انواع مختلف برای انتخاب در دسترس باشد تا نیازهای گوناگون آن‌ها را برآورده

سازد. در ایالات متحده، در سال ۲۰۰۹ شما سه گزینه خودروی سبک داشتید: تسلا رودستر، نیسان لیف یا شورولت ولت. در سال ۲۰۲۲، بیش از ۱۰۲ مدل مختلف در ایالات متحده موجود بود (Kane, ۲۰۲۲)، اما این تعداد تنها نماینده ۲۰ برند خودرویی است. بین سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۵، تعداد مدل‌ها و برندهای جدید به شدت افزایش خواهد یافت و گزینه‌های بیشتری در اختیار مصرف‌کنندگان قرار خواهد داد.

۳. **اضطراب بُرد (Range Anxiety):** موضوع اضطراب برد در حال انتقال به انتهای فهرست نگرانی‌ها است، زیرا مدل‌های تولیدی متوسط به بردی بیش از ۲۷۵ مایل (حدود ۴۴۲ کیلومتر) با یک بار شارژ دست می‌یابند (McDonald, ۲۰۱۸). با توجه به اینکه برخی مدل‌های تسلا به بردی بیش از ۳۵۸ مایل (حدود ۵۷۶ کیلومتر) با یک بار شارژ می‌رسند، نگرانی مصرف‌کنندگان در این زمینه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. بر اساس گزارش وزارت انرژی، تعداد مدل‌های خودروی الکتریکی که در سال ۲۰۲۲ به برد بیش از ۳۰۰ مایل (حدود ۴۸۲ کیلومتر) دست یافتند، نسبت به سال ۲۰۲۱ تقریباً سه برابر شده و به ۱۴ مدل رسیده است (U.S. Department of Energy Vehicle Technologies Office, ۲۰۲۲). با این حال، حتی با وجود نسخه‌های برقی بیشتر از خودروهای فعلی، نگرانی مشتریان در مورد برد الکتریکی خودروها همچنان وجود دارد که این مشکل تنها از طریق بهبود شبکه شارژ قابل حل است.

۴. **زیرساخت شارژ:** این عامل یک سناریوی «مرغ و تخم‌مرغ» است. هیچ‌کس نمی‌خواهد در شبکه‌ای سرمایه‌گذاری کند که مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، اما بدون وجود شبکه شارژ نیز مصرف‌کنندگان احتمالاً خودروهایی را که به آن نیاز دارند، خریداری نخواهند کرد. در سال ۲۰۲۲، ایالات متحده «قانون کاهش تورم» را تصویب کرد که اعتبار مالیاتی فدرال برای تجهیزات شارژ را تا سال ۲۰۳۲ تمدید نمود. برای ایستگاه‌های شارژ تجاری، این امر بسیار حائز اهمیت است، زیرا این اعتبار ۶٪ تا سقف ۱۰۰,۰۰۰ دلار برای هر واحد در مناطق کم‌درآمد یا غیرشهری است (Electrification Coalition, ۲۰۲۲). این منابع مالی جدید باید شبکه شارژ ایالات متحده را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده و نگرانی‌های مصرف‌کنندگان در مورد اضطراب برد را کاهش دهد.

۵. **آموزش:** شاید یکی از زمینه‌هایی که نه صنعت و نه دولت‌ها در آن عملکرد خوبی نداشته‌اند، آموزش مصرف‌کنندگان در مورد تفاوت‌ها، شباهت‌ها، مزایا و چالش‌های مربوط به خودروهای برقی شده است. مصرف‌کنندگان هنوز هر سطحی از برقی‌سازی را یک فناوری پیشرفته می‌دانند و نه محصولی آماده برای بازار انبوه. در واقعیت، خودروی متعارف به غیر از سیستم انتقال قدرت (powertrain)، تقریباً به طور کامل برقی شده است. سازمان‌هایی مانند NAATBatt International و ائتلاف دولت و صنعت ایالات متحده به نام Li-Bridge در تلاشند تا آموزش کارگران را در سراسر زنجیره ارزش بهبود بخشند.

از فهرست اصلی خودم، ممکن است یک یا دو مورد دیگر را که بر پذیرش خودروهای الکتریکی توسط مصرف‌کننده تأثیر می‌گذارد، اضافه کنم:

۶. **ایمنی:** ایمنی موضوعی نیست که بتوانیم در آن اشتباه کنیم. مصرف‌کنندگان هنوز در مورد ایمنی خودروهای الکتریکی خود نگرانی‌هایی دارند. واقعیت این است که باتری‌های لیتیوم-یون دارای یک حالت خرابی هستند که اگر به درستی طراحی و مدیریت نشود، می‌تواند بسیار خطرناک باشد (موضوع این کتاب!) و خرابی آن می‌تواند بسیار پر سر و صداتر از یک خودروی احتراق داخلی مشابه باشد. ایمنی توسط مصرف‌کننده یک امر مفروض تلقی می‌شود، اما باید به اثبات برسد.

این‌ها مسائل کلیدی هستند که برای تحقق پیش‌بینی‌های رشد عظیم و نرخ‌های پذیرش باید حل شوند. برخی از این مسائل، مانند هزینه، موانعی هستند که با افزایش حجم تولید و حرکت از تولید در مقیاس پایین به سمت بهره‌مندی از مزایای محصولات با تولید انبوه، برطرف خواهند شد. با این حال، هزینه و حجم تولید مستقیماً با آگاهی مصرف‌کننده و وجود زیرساخت شارژی که با تقاضای مصرف‌کننده مطابقت داشته باشد و همچنین وجود تعداد کافی از مدل‌های الکتریکی در دسترس، مرتبط هستند. این‌ها مسائل در هم تنیده‌ای هستند که برای تداوم پذیرش با سرعت بالای فعلی، باید حل شوند.

### سایر عوامل پذیرش

اگر به مصرف‌کننده معمول خودروهای سبک فکر کنیم، درمی‌یابیم که ما بسیار بیشتر به فناوری خودروهایمان وابسته شده‌ایم، اما درک ما از نحوه عملکرد آن فناوری کاهش یافته است. بیشتر مصرف‌کنندگان اهمیتی نمی‌دهند یا حتی نمی‌فهمند زیر کاپوت خودرو چه خبر است، تنها چیزی که برایشان مهم است این است که خودرو آن‌ها را به هر کجا که لازم است برساند. من با آچار به دست گرفتن و سرپا نگه داشتن خودروهایم بزرگ شدم، اما دقیقاً لحظه‌ای را به یاد می‌آورم که به این نتیجه رسیدم فناوری آنقدر پیشرفت کرده که دیگر نمی‌توانم به عنوان یک مکانیک آماتور به کارم ادامه دهم. مصرف‌کننده خودروی الکتریکی مدرن، تلفن همراه یا تبلت نیز در همین وضعیت قرار دارد و برای کارکرد صحیح همه چیز به طراحان و تولیدکنندگان متکی است.

پذیرش توسط مصرف‌کننده مستلزم آن است که خودروهای الکتریکی «فقط کار کنند». به عبارت ساده، مصرف‌کننده باید به قدری به خودروی الکتریکی اطمینان داشته باشد که او را بدون هیچ مشکلی به مقصد رسانده و بازگرداند. این موضوع به مسئله «قابلیت اطمینان» (reliability) منجر می‌شود که از طریق عوامل مختلفی از جمله گارانتی، مشکلات خدمات پس از فروش و فراخوان‌ها تجربه می‌شود.

مصرف‌کنندگان بازار انبوه همچنین باید بدانند که فناوری «ضد گلوله» (bulletproof) است. آن‌ها نمی‌خواهند روی فناوری‌های مراحل اولیه سرمایه‌گذاری کنند، زیرا شواهد کمتری برای کارایی آن‌ها وجود دارد و اغلب تمایلی به پذیرش ریسک‌ها و شکست‌های احتمالی که با فناوری‌های مراحل اولیه همراه است، ندارند. مصرف‌کنندگان بازار انبوه همچنین حاضر نیستند از عملکرد خودرو صرف‌نظر کنند. این موضوع برای رشد خودروهای الکتریکی بسیار مهم است، زیرا مصرف‌کنندگان بازار انبوه به خودرویی نیاز دارند که بتواند ویژگی‌های عملکردی مشابه خودروهای سنتی را به آن‌ها ارائه دهد.

داشتن یک فناوری پیشرفته دلیلی برای خرید توسط مصرف‌کننده بازار انبوه نخواهد بود، اما بهبود در عملکرد، که به صورت کاهش هزینه‌های سوخت و برد طولانی رانندگی مشاهده می‌شود، آن را با سایر گزینه‌ها رقابتی‌تر خواهد کرد. برای حرکت به سمت کاربر بازار انبوه، فناوری باید بازگشت مالی، نرخ بازده داخلی (internal rate of return) یا بهبودهای قابل توجهی در مصرف سوخت ارائه دهد. مصرف‌کنندگان باید بدانند که این سرمایه‌گذاری، منفعت مالی در قالب کاهش هزینه‌های سوخت برایشان به همراه خواهد داشت. انصافاً، بیشتر مصرف‌کنندگان تحلیل چرخه عمر (life cycle analysis) یا محاسبه بازگشت سرمایه انجام نمی‌دهند، بلکه خرید را از دو منظر بررسی می‌کنند: توانایی خرید، که عموماً بر اساس پرداخت‌های ماهانه سنجیده می‌شود؛ و هزینه عملیاتی، که به صورت کاهش هزینه‌های سوخت خود را نشان می‌دهد.

برای پذیرندگان اولیه خودروهای هیبریدی و الکتریکی، «سبز» بودن و داشتن تصویری قوی از نظر زیست‌محیطی، عوامل مهمی در خرید بودند. با این حال، هنگامی که این خودروها از مرحله پذیرندگان اولیه به پذیرندگان بازار انبوه

می‌رسند، این تصویر زیست‌محیطی برای مصرف‌کننده اهمیت کمتری پیدا می‌کند. برای مصرف‌کننده بازار انبوه، این موضوع به چیزی تبدیل می‌شود که من آن را «عامل بهداشتی» (hygiene factor) می‌نامم. این اصطلاح از حوزه روانشناسی سازمانی و انگیزش گرفته شده است، جایی که اولین بار توسط فردریک هرزبرگ به کار رفت. هرزبرگ عامل بهداشتی را به عنوان یک عامل انگیزشی فردی توصیف کرد که نبود آن باعث نارضایتی می‌شود، اما وجود آن به تنهایی لزوماً باعث رضایت نمی‌گردد (Snyderman, ۱۹۵۹ & Herzberg, Mausner). باتری‌ها و خودروهای الکتریکی برای مصرف‌کننده جریان اصلی در این دسته قرار می‌گیرند. تا زمانی که ایمنی، برد یا شارژ به حداقل سطح قابل قبول برسند، باعث رضایت مصرف‌کننده نخواهند شد، اما اگر وجود نداشته باشند، باعث نارضایتی مصرف‌کننده می‌شوند.

علاوه بر دوستدار محیط زیست بودن، یکی از جنبه‌های خودروهای الکتریکی و باتری‌های آن‌ها که توجه بیشتری را به خود جلب کرده، تأثیر بر  $\text{CO}_2$  جهانی است. بحث داغی در این زمینه وجود دارد که خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن مصرف انرژی کامل از «چاه تا چرخ» (well to wheels) واقعاً چقدر سبز یا تولیدکننده  $\text{CO}_2$  هستند. با این حال، مقایسه با خودروهای مجهز به موتور احتراق داخلی واضح است: خودروهای الکتریکی تولیدکننده  $\text{CO}_2$  کمتری نسبت به خودروهای احتراق داخلی هستند. سال ۲۰۲۰ به ما ایده خوبی داد که وقتی تمام حمل و نقل متوقف شود چه اتفاقی می‌افتد: آلودگی هوا به سرعت کاهش می‌یابد. سوال واقعی در مورد خودروهای الکتریکی این است که برقی که برای شارژ آن‌ها استفاده می‌شود چقدر پاک است. بر اساس مرکز داده‌های سوخت‌های جایگزین وزارت انرژی ایالات متحده (DOE)، تمام خودروهای الکتریکی به طور متوسط حدود ۳۹۰۲ پوند معادل  $\text{CO}_2$  تولید می‌کنند و خودروهای بنزینی حدود ۱۱۴۳۵ پوند معادل  $\text{CO}_2$  تولید می‌کنند (U.S. Department of Energy Vehicle Technologies Office, ۲۰۲۲). بر اساس این داده‌ها، یک خودروی الکتریکی متوسط حدود یک سوم  $\text{CO}_2$  یک خودروی احتراق داخلی بنزینی مشابه را تولید می‌کند. این موضوع توسط کارهای دیگر دفتر فناوری‌های خودروی وزارت انرژی نیز پشتیبانی می‌شود، که در «واقعیت هفته» مورخ ۳ اکتبر ۲۰۲۲ اعلام کرد که در اوت ۲۰۲۱ حدود ۴۰٪ از انرژی کشور از منابع غیرسوخت فسیلی شامل هسته‌ای، برق‌آبی و سایر انرژی‌های تجدیدپذیر تولید شده است (U.S. Department of Energy Vehicle Technologies Office, ۲۰۲۲). به عنوان آخرین استدلال برای مزایای  $\text{CO}_2$  خودروهای الکتریکی، آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (EPA) فهرستی از حقایق را برای پاسخ به برخی از باورهای غلط رایج در مورد خودروهای الکتریکی منتشر کرد. اولین مورد در این فهرست، این باور غلط بود که خودروهای الکتریکی برای محیط زیست بدتر از خودروهای بنزینی هستند. EPA پاسخ داد که این در واقع یک باور غلط است و یک خودروی الکتریکی متوسط مسئول «سطوح پایین‌تری از گازهای گلخانه‌ای نسبت به یک خودروی بنزینی جدید متوسط» است (United States Environmental Protection Agency, ۲۰۲۲). این موضوع توسط کارهای دیگری نیز پشتیبانی می‌شود، مانند یک مطالعه تحقیقاتی در سال ۲۰۲۰ توسط موسسه فناوری ماساچوست (MIT)، که به رشد خودروهای الکتریکی بین سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۵۰ در سناریوهای مختلف پذیرش پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که اگر نرخ‌های پذیرش خودروهای الکتریکی با نرخ‌های توافق پاریس همسو شود، انتظار می‌رود شاهد رشد کل خودروهای سبک حدود ۵۰٪ باشیم، اما انتشار گازهای گلخانه‌ای ممکن است حدود ۵۰٪ نسبت به سطح سال ۲۰۱۵ کاهش یابد (Abbas Ghandi, ۲۰۲۰).

## تکامل فناوری‌ها و سیستم‌های خودرو

با انتقال برخی از خودروهای سنتی احتراق داخلی به خودروهای الکتریکی، لازم می‌شود که برخی از سیستم‌هایی که به طور سنتی توسط هیدرولیک یا قدرت موتور کار می‌کردند، به اجزای الکتریکی تبدیل شوند. این امر منجر به تغییراتی در سیستم‌هایی مانند تهویه مطبوع (HVAC)، فرمان برقی، پمپ‌های روغن و پمپ‌های سوخت می‌شود که باید به سیستم‌های برقی تبدیل شوند. با اضافه شدن این اجزای جدید برقی شده به حجم رو به رشد برقی‌سازی داخل خودرو مانند GPS و سیستم‌های رادیویی و ناوبری پیشرفته، تقاضا برای توان در سراسر خودرو بیشتر می‌شود. این را به سطوح بالاتر ارتباطات خودرو با خودرو، افزایش تعداد حسگرها و خودرانی (autonomy) اضافه کنید تا ببینید که میزان توان مورد نیاز در خودروی مدرن به صورت نمایی رشد می‌کند. در خودروهای احتراق داخلی، فناوری باتری می‌تواند با انتقال این بارهای پارازیتی (parasitic loads) از موتور به باتری در یک سیستم هیبریدی، بهینه‌سازی بیشتر موتور را ممکن سازد، که به نوبه خود امکان کوچک‌سازی بیشتر موتور (engine downsizing) و بهبود بهره‌وری انرژی را فراهم می‌کند.

نسل اول خودروهای الکتریکی بر روی معماری‌های نسل قبلی خودروهای احتراق داخلی طراحی شد، نه به عنوان خودروهای الکتریکی اختصاصی (purpose-built). شورولت ولت یک نمونه بارز است. هیچ رازی در این مورد وجود ندارد که چرا باتری ولت به شکل تونل گیربکس و باک بنزین است؛ آن قطعاتی بودند که باتری جایگزینشان شد. با این حال، فناوری در حال تکامل است و ما شاهد معماری‌های خودروی الکتریکی اختصاصی بیشتری هستیم که شروع به بهینه‌سازی حول محور پیشران الکتریکی کرده‌اند. اما با توجه به چرخه طولانی توسعه خودرو، احتمالاً برای سال‌های متعددی همچنان شاهد استفاده از معماری‌های تبدیل شده از خودروهای احتراق داخلی به عنوان پایه و اساس خودروهای الکتریکی خواهیم بود.

در مورد معماری تبدیل شده از احتراق داخلی، هیچ مکان استاندارد برای باتری وجود ندارد، به همین دلیل است که ما اماکن نصب بسیار متفاوتی را در خودروهای مختلف می‌بینیم. به جز موارد استثنایی جزئی، بیشتر خودروهای برقی این نسل، باتری‌ها را زیر صندلی‌ها، در صندوق عقب یا در تونل گیربکس بسته‌بندی می‌کنند و در اصل سعی می‌کنند «میخ مربع» باتری را در «سوراخ گرد» معماری موجود خودرو جای دهند. با این حال، در خودروهای الکتریکی اختصاصی‌تر امروزی، شاهد شکل و نصب رایج‌تری برای باتری هستیم، با یک پک باتری تخت که از یک ریل شاسی جانبی به دیگری و از محور جلو تا محور عقب امتداد دارد. خودروهای آینده با باتری به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از معماری خودرو طراحی خواهند شد، نه اینکه به عنوان یک فکر ثانویه به آن اضافه شود.

## هدف کتاب

با توجه به تعداد چالش‌هایی که کاربردهای خودرو و ذخیره‌سازی انرژی با آن روبرو هستند، یافتن راهی مشترک برای بحث و ارائه آن‌ها دشوارتر می‌شود. ما همچنین شاهد یک تغییر عظیم هستیم، زیرا نیروی کار از طراحی و ساخت موتورهای احتراق داخلی به سمت خودروهای الکتریکی در حال تغییر است. این کتاب برای شماست. این کتاب یک راهنمای قابل فهم برای ورود به دنیای خودروهای الکتریکی و فناوری باتری پیرامون آن است. من با علاقه این کتاب را «آنچه آرزو می‌کردم وقتی بیش از یک دهه پیش کار در صنعت باتری را شروع کردم، می‌دانستم» می‌نامم. این کتاب قصد دارد با پاسخ به سوالاتی مانند موارد زیر، به پر کردن شکاف دانش کمک کند: تفاوت بین یک باتری «توان» (power battery) و یک باتری «انرژی» (energy battery) چیست؟ تفاوت‌های بین شیمی‌های مختلف سلول لیتوم-یون چیست؟ آیا پک باید با مایع خنک شود یا با هوا؟ سیستم مدیریت باتری (BMS) چیست و چه کاری انجام می‌دهد؟ این‌ها از جمله سوالاتی هستند که این کتاب سعی در پاسخ به آن‌ها دارد. آیا پس از اتمام این

کتاب، شما واجد شرایط مهندس باتری شدن خواهید بود؟ قطعاً نه، اما آیا شما را برای پرسیدن سوالات درست و ساختن یک پایگاه دانش محکم از موضوعات آماده خواهد کرد؟ کاملاً.

در سراسر کتاب سعی خواهیم کرد از برخی تشبیه‌ها، مثال‌ها و مطالعات موردی برای مرتبط ساختن اصطلاحات و مفاهیم استفاده شده در اینجا استفاده کنیم تا درک آن‌ها آسان‌تر شود. به عنوان مثال، ما ممکن است انرژی را که معمولاً بر حسب کیلووات-ساعت (kWh) اندازه‌گیری می‌شود، مشابه اندازه یک باک بنزین در نظر بگیریم. بنابراین وقتی در مورد انرژی یک باتری صحبت می‌کنیم، در واقع در مورد این صحبت می‌کنیم که آن «باک باتری» چقدر انرژی در خود نگه می‌دارد. من از مثال‌های زیادی از حوزه خودرو برای نشان دادن اصول و مفاهیم مورد بحث در اینجا استفاده خواهم کرد، اما به یاد داشته باشید که این مفاهیم برای طیف بسیار گسترده‌تری از کاربردها قابل استفاده هستند. در اواخر کتاب، نگاهی گسترده به برخی نمونه‌های مختلف باتری‌های لیتیوم-یون در طیف وسیعی از کاربردها از دوچرخه‌های برقی گرفته تا خودروهای برقی شده، لیفتراک‌ها، کامیون‌ها، اتوبوس‌ها و ذخیره‌سازی انرژی ثابت خواهیم داشت.

باتری‌های لیتیوم-یون، بیش از بسیاری از زیرسیستم‌های دیگر در خودرو، نیازمند یک رویکرد در سطح سیستمی برای مهندسی و طراحی هستند. مهندسی یک باتری با شیمی که در سطح سلول اتفاق می‌افتد آغاز می‌شود و سپس گسترش می‌یابد تا عملکرد الکتریکی سلول و پک، الکترونیک سیستم کنترل، مدیریت حرارتی سلول‌ها، سیستم الکتریکی، کنترل الکترونیکی و نرم‌افزاری که سیستم را مدیریت می‌کند و اجزای مکانیکی و ساختاری باتری را شامل شود. موضوع واحد مهندسی یک باتری لیتیوم-یون تقریباً همه رشته‌های مهندسی را در بر می‌گیرد.

یکی از بزرگترین چالش‌هایی که بسیاری از افراد هنگام فکر کردن به باتری‌ها با آن روبرو هستند این است که با باتری‌ها به عنوان کالا، قطعه و اجزایی رفتار می‌شود که به راحتی با قطعات مشابه از تولیدکنندگان مختلف قابل تعویض هستند. متأسفانه، باتری‌های لیتیوم-یون بیشتر به سیستم‌های مهندسی هسته‌ای حیاتی و منحصر به فرد مانند موتور یا گیربکس شباهت دارند. این دیدگاه کالامحور منجر به یک دیدگاه محدود برای برنامه‌ریزی، دامنه و هزینه سیستم‌های باتری می‌شود که واقعیت این فناوری را منعکس نمی‌کند. این کتاب سعی خواهد کرد تا دیدگاهی از پیچیدگی سیستم باتری ارائه دهد تا به خواننده کمک کند بفهمد که باتری امروزه در بازار خودرو یک کالا نیست و بعید است در آینده نزدیک به چنین چیزی تبدیل شود.

این ما را به هدف دوم این کتاب می‌رساند، که قرار دادن این اجزا و زیرسیستم‌های مختلف در چارچوب فرآیند طراحی مهندسی استاندارد است. یک چالش مکرر در مهندسی پک‌های باتری، به ویژه برای کاربردهای بزرگ و مرتبط با حمل و نقل، این است که زمان‌بندی مربوط به این فعالیت‌ها به وضوح درک نمی‌شود. بسیاری از افراد با صنعت برق قابل حمل مقایسه می‌کنند که از یک چرخه طراحی حدوداً ۱۲ ماهه از مفهوم تا تولید انبوه محصولی با عمر ۲ تا ۳ سال استفاده می‌کند. با این حال وقتی ما فرآیند تکراری طراحی، ساخت، آزمایش را برای کاربردهای خودرویی به کار می‌بریم، عموماً یک فرآیند ۲ یا ۳ ساله از ایده‌پردازی تا تولید کامل است. این موضوع بسیاری را شگفت‌زده می‌کند، اما چرخه طراحی معمول خودرو بسته به میزان آزمایش‌های اعتبارسنجی و صحت‌گذاری (validation and verification) مورد نیاز، می‌تواند تا ۴ سال یا بیشتر طول بکشد.

دلایل متعددی برای این زمان طولانی وجود دارد، از جمله دوره‌های طولانی آزمایش (یک آزمایش چرخه عمر باتری معمولاً یک سال یا بیشتر طول می‌کشد) و زمان‌های طولانی ابزارسازی تولید (برخی ابزارهای سخت می‌توانند زمان تحویل ۳۰ تا ۴۰ هفته یا بیشتر داشته باشند) و علاوه بر این موارد با زمان تحویل طولانی، توقف‌های قطعی در فرآیند وجود دارد، مانند نیاز به تکمیل آزمایش قبل از تأمین منابع و رسیدن به تثبیت طرح (design freeze) قبل از شروع

تأمین منابع و ساخت نمونه اولیه. به این‌ها نیاز به تکمیل، به طور متوسط، دو تا سه چرخه طراحی (که معمولاً با ساخت نمونه اولیه خودرو هماهنگ می‌شود) را اضافه کنید و در نهایت به یک چرخه طراحی پک باتری ۲۴ تا ۳۶ ماهه می‌رسید. البته، این بدان معنا نیست که هیچ روشی برای کاهش این زمان‌بندی وجود ندارد، که عمدتاً به این بستگی دارد که آیا این یک برنامه تولیدی است؛ کاربرد، بازار و مصرف نهایی مورد نظر؛ عملکرد طول عمر؛ وجود محصولات مشابه در سید محصولات تولیدکننده؛ و میزان ریسکی که شرکت مایل به پذیرش آن است. در یک پروژه طراحی معمولی، تمام فازها به صورت سری، یکی پس از دیگری تکمیل می‌شوند. با این حال، دلایل مختلفی وجود دارد که ممکن است بتوانید برخی از فازها را همپوشانی کرده و آن‌ها را به صورت موازی اجرا کنید تا زمان‌بندی کلی پروژه را کاهش دهید.

## نمای کلی فصل‌ها

فصل ۲ تاریخچه مختصری از برقی‌سازی خودرو، تکامل باتری مدرن و رشد زیرساخت‌های الکتریکی را ارائه می‌دهد و بحث می‌کند که آن‌ها از کجا آمده‌اند و امروز در کجا قرار دارند، زیرا این ممکن است بینش‌هایی در مورد اینکه فناوری در آینده به کجا می‌تواند برسد، ارائه دهد. این فصل درک پایه‌ای از چگونگی شکل‌گیری این صنعت و چالش‌هایی که در طول بیش از ۱۰۰ سال رشد خود با آن روبرو بوده است را برای خواننده فراهم می‌کند.

فصل ۳ اصطلاحات و مفاهیم اساسی باتری‌های لیتیوم-یون و برقی‌سازی خودرو را معرفی می‌کند. یکی از بزرگترین چالش‌هایی که افراد هنگام ورود به یک صنعت جدید با آن روبرو هستند، عدم درک سرواژه‌ها، زبان فنی، اصطلاحات و عباراتی است که برای توصیف بخش‌های مختلف محصول استفاده می‌شود. علاوه بر کسب درک از اصطلاحات مورد استفاده در این صنعت، اشکال اساسی برقی‌سازی به زبان ساده توصیف و اجزای کلیدی آن‌ها شناسایی خواهد شد.

در فصل ۴ فرآیند انتخاب و اندازه‌بندی باتری برای یک کاربرد را توصیف خواهیم کرد. ایده درک الزامات کاربرد و تبدیل آن الزامات به یک مشخصات سیستم پوشش داده شده و به اندازه‌بندی سیستم مرتبط خواهد شد. این شامل ارائه برخی فرمول‌های ساده است که می‌توان از آن‌ها برای تعیین ظرفیت، توان و ولتاژ یک سیستم باتری استفاده کرد. این فصل تلاش می‌کند تا به وضوح نحوه توسعه یک مفهوم پک باتری را با استفاده از محاسبات اساسی مبتنی بر قانون اهم توصیف کند.

فصول ۵ و ۶ برای ارائه بحث‌های پشتیبان برای فرآیند طراحی مهندسی در نظر گرفته شده‌اند. فصل ۵ موضوعات فرآیند طراحی مهندسی را مرور می‌کند: طراحی برای قابلیت اطمینان و طراحی برای سرویس. از آنجا که باتری‌های لیتیوم-یون در بازار نسبتاً جدید هستند، در مورد قابلیت اطمینان و سرویس به توجه بیشتری نیاز دارند. در بیشتر موارد، سلول‌های لیتیوم-یون در واقع به اندازه‌ای که تحت پوشش گارانتی قرار می‌گیرند، در بازار استفاده نشده‌اند. با توجه به اینکه بسیاری از باتری‌ها با دوره‌های گارانتی بسیار طولانی‌تر از بقیه خودرو به مصرف‌کننده عرضه می‌شوند، چه مواردی باید در فرآیند طراحی مهندسی در نظر گرفته شود تا اطمینان حاصل شود که باتری این اهداف را برآورده می‌کند؟ درک عواملی که بر کیفیت و قابلیت اطمینان بلندمدت در راهکارهای باتری پیشرفته تأثیر می‌گذارند، مهم است. این به بحثی در مورد خدمات میدانی، عیب‌یابی و گارانتی باتری منجر خواهد شد. فصل ۶ به بحث در مورد برنامه‌ها و نرم‌افزارهای طراحی و تحلیل به کمک کامپیوتر موجود برای استفاده می‌پردازد. ابزارهایی مانند مهندسی به کمک کامپیوتر (CAE) و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌توانند با بهینه‌سازی طرح قبل از ساخت و آزمایش قطعات فیزیکی، فرآیند توسعه را به طور قابل توجهی تسریع کنند. محصولات نرم‌افزاری کمی در بازار وجود دارد که به طور خاص برای طراح باتری طراحی شده باشند. با این حال، برخی از بسته‌های نرم‌افزاری را می‌توان برای ارزیابی عملکرد حرارتی یا مکانیکی یک باتری استفاده کرد.

فصل ۷ فناوری‌های مختلف سلول باتری موجود در بازار و همچنین آن‌هایی که در حال توسعه هستند را مرور خواهد کرد. این شامل بحث‌های مختصری در مورد شیمی‌ها از سرب-اسید گرفته تا نیکل-متال هیدرید و شیمی‌های مبتنی بر سدیم خواهد بود، اما تمرکز بر روی اشکال اساسی سلول‌های لیتیوم-یون و تفاوت‌های بین آن‌ها خواهد بود. این فصل همچنین به بحث در مورد معیارهای انتخاب سلول لیتیوم-یون و انواع سلول‌های موجود خواهد پرداخت. در نهایت، نسل بعدی باتری‌های حالت جامد و باتری‌های هیبریدی حالت جامد در میان سایر فناوری‌های نوظهور مرور خواهد شد.

فصل ۸ به بخش کنترل و الکترونیک نرم‌افزاری باتری می‌پردازد. BMS چیست و چه کاری انجام می‌دهد؟ چرا به آن نیاز داریم؟ آیا یک سیستم باتری می‌تواند بدون BMS کار کند؟ اجزای اصلی BMS کدامند و چگونه با باتری و سیستم‌های خودرو تعامل دارند؟ انواع مختلف معماری‌های BMS کدامند و کدام یک برای کاربرد من مناسب‌تر است؟ توسعه نرم‌افزار برای یک باتری لیتیوم-یون چگونه است؟ این‌ها انواع سؤالاتی هستند که در فصل ۸ مورد بحث قرار خواهند گرفت.

فصل ۹ سایر اجزای الکترونیکی را که برای کارکردن یک پک باتری و ایمن‌سازی آن لازم است، تشریح می‌کند. کنتاکتور و کنتاکتور پیش‌شارژ چیست؟ قطع‌کننده سرویس (service disconnect) چیست و چرا به آن نیاز دارید؟ هم سیستم‌های الکتریکی ولتاژ بالا و هم ولتاژ پایین مورد بحث قرار خواهند گرفت. انواع کنتاکتورها، کنتاکتورهای پیش‌شارژ، فیوزها، سنسورهای جریان و سوئیچ‌ها همگی مورد بحث قرار خواهند گرفت.

فصل ۱۰ مدیریت حرارتی پک باتری را مرور می‌کند. سیستم مدیریت حرارتی (TMS) برای تضمین ایمنی و عمر باتری لیتیوم-یون حیاتی است. فصل ۱۰ به تمام جنبه‌های گرمایش و سرمایش باتری‌ها می‌پردازد. چگونه سیستم مناسب را انتخاب می‌کنید؟ چه معیارهایی برای این تصمیم‌گیری لازم است؟ چه نوع سیستم‌های مدیریت حرارتی برای انواع مختلف باتری‌ها در مناطق و کاربردهای مختلف مؤثرتر هستند؟ چه زمانی یک سیستم مدیریت با مایع بهتر از یک سیستم مبتنی بر هوای فشرده است؟ چه بخش‌هایی از TMS داخل و چه بخش‌هایی خارج از باتری قرار دارند؟ این فصل موضوعاتی مانند انواع مختلف مواد رابط حرارتی و مواد محافظ فرار حرارتی و نحوه استفاده از آن‌ها در انواع مختلف باتری‌ها را پوشش خواهد داد.

فصل ۱۱ موضوعات مربوط به بسته‌بندی، انتخاب مواد و اجزای مکانیکی و ساختاری سیستم باتری را مرور می‌کند. ما نیاز به یکپارچگی ساختاری در اطراف باتری و نحوه دستیابی به آن را بررسی خواهیم کرد. فولاد، آلومینیوم، فایبرگلاس و کامپوزیت‌ها همگی به عنوان مواد محفظه باتری استفاده می‌شوند: کدام یک برای چه نوع سیستمی بهتر است و نقاط قوت و ضعف هر کدام چیست. این فصل همچنین به انواع مختلف اتصالات سلول به سلول مورد استفاده، از جوشکاری لیزری گرفته تا اتصال سیمی (wire bonding) و اتصالات مکانیکی، می‌پردازد. موضوعات نوظهور پیرامون ملاحظات طراحی «سلول به پک» (cell-to-pack) و «سلول به شاسی» (cell-to-chassis) پوشش داده خواهد شد.

فصل ۱۲ برای ویراست دوم جدید است. در این فصل ما هم ساخت مازول و هم پک را مورد بحث قرار خواهیم داد. این فصل فرآیند اساسی مورد استفاده برای ساخت سلول‌ها و برای مازول‌ها و پک‌ها را توصیف می‌کند. در حالی که فرآیند واقعی ممکن است بین تولیدکنندگان متفاوت باشد، فرآیند کلی برای همه آنها مشابه است.

فصل ۱۳ به بحث در مورد تحمل سوءاستفاده (abuse tolerance) باتری می‌پردازد، از جمله اینکه دامنه‌های دمایی عملیاتی و بقای عمومی که باتری‌های لیتیوم-یون می‌توانند در آن کار کنند، چیست. مفهوم ایمنی در سطح سیستم معرفی و در سراسر فصل به کار گرفته خواهد شد. این شامل بحثی در مورد آزمایش‌های سوءاستفاده، مشخصه‌یابی و صدور گواهینامه خواهد بود. به طور خاص، ما برخی از آزمایش‌های صدور گواهینامه را که برای باتری‌های لیتیوم-یون

از سوی سازمان ملل (UN) و آزمایشگاه‌های ایمنی (Underwriter's Laboratory) هدف‌گذاری شده‌اند، مرور خواهیم کرد.

فصل ۱۴ تعداد رو به رشد استانداردهای صنعتی را که در سراسر جهان در حال اجرا هستند، مرور می‌کند و به همه چیز از SAE گرفته تا ECE, IEC, IEEE, بریتانیای کبیر و الزامات حمل و نقل سازمان ملل و تأثیر آنها بر طراحی باتری‌های مدرن می‌پردازد. این فصل شامل استانداردهای داوطلبانه و اجباری و همچنین سازمان‌های تحقیق و توسعه و تجاری خواهد بود.

فصل ۱۵ موضوعات مجاور باتری در زمینه شارژ، تعویض باتری و «باتری به عنوان سرویس» (battery-as-a service) را پوشش می‌دهد. چندین تولیدکننده تجهیزات اصلی (OEM) مدل‌های مختلف تعویض باتری یا باتری به عنوان سرویس را در مناطق مختلف به اجرا گذاشته‌اند. به نیازهای شارژ و زیرساخت‌های مرتبط با تقاضای رو به رشد برای خودروهای الکتریکی پرداخته خواهد شد.

فصل ۱۶ مفاهیم عمر دوم (second life)، بازتولید (remanufacturing)، تعمیر و بازیافت باتری‌های لیتیوم-یون را مرور می‌کند. این بخش از صنعت در مراحل اولیه شکل‌گیری خود قرار دارد، اما به سرعت در حال رشد است. باتری‌های سرب-اسید دارای سطوح شگفت‌انگیز بالایی از بازیافت هستند، بالای ۹۸٪ در بیشتر ایالات متحده و اروپا. چه نوع زیرساختی برای باتری‌های لیتیوم-یون لازم است تا به همان سطح از بازیافت دست یابند؟ ارزش باتری‌های عمر دوم چقدر است؟ آیا هزینه‌های اولیه آنقدر پایین می‌آید که عمر دوم را بی‌معنا کند، یا هزینه‌های باتری لیتیوم-یون با نرخ به اندازه‌ای کند کاهش می‌یابد که باتری‌های عمر دوم را به یک راه حل قابل دوام تبدیل کند؟

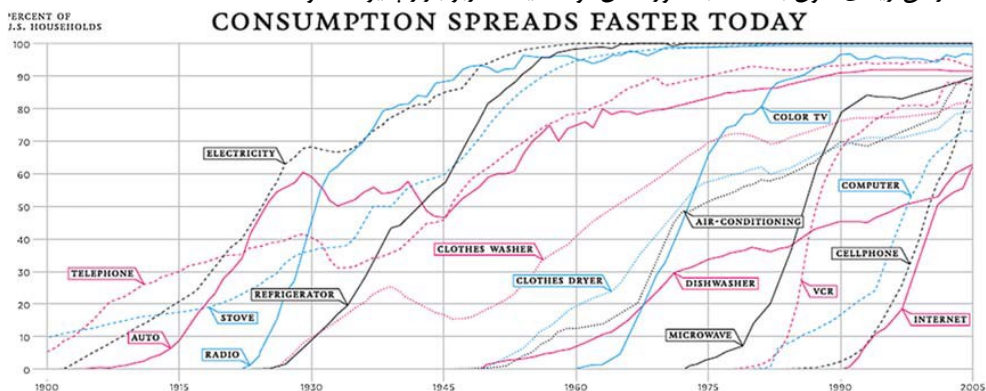
فصل ۱۷ نگاهی عمیق‌تر به برخی از انواع کاربردها خواهد داشت که در آنها توان باتری و برقی‌سازی می‌تواند مزایای قابل توجهی ارائه دهد، از دوچرخه‌های برقی گرفته تا خودروها و کاربردهای ثابت، دریایی و صنعتی. تعداد کاربردهای بالقوه‌ای که می‌توانند بهبود یافته یا به لیتیوم-یون منتقل شوند، تقریباً غیرقابل شمارش است. هر کاربردی که مصرف سوخت بالا یا انتشار آلاینده‌ی بالایی دارد ممکن است از افزودن یک جزء برقی‌سازی بهره‌مند شود و با تکامل فناوری، کاربردهای زیادی در حال ظهور هستند.

در نهایت، فصل ۱۸ برخی از نکات کلیدی را خلاصه می‌کند و مهمتر از آن، به بحث در مورد آینده باتری‌های لیتیوم-یون در بازارهای حمل و نقل و ذخیره‌سازی انرژی می‌پردازد. فناوری‌ها و شیمی‌های امیدوارکننده که می‌توانند بازار را در آینده تغییر دهند، کدامند؟ چه روندهایی ما را به آینده‌ای الکتریکی نزدیک‌تر می‌کنند؟

## فصل ۱: تاریخچه برقی سازی وسایل نقلیه

الکتریسیته شاید یکی از نادیده گرفته شده ترین آسایش های مدرن عصر ما باشد. ما تمایل داریم وجود آن را بدیهی فرض کنیم تا زمانی که با قطعی برق مواجه می شویم؛ آنگاه است که درمی یابیم الکتریسیته تا چه حد در زندگی روزمره ما ریشه دوانده و ما واقعاً چقدر به آن وابسته شده ایم. این اتفاق همچنین به ما یادآوری می کند که باتری ها چقدر برای زندگی ما اهمیت یافته اند. یکی از جالب ترین حقایق در مورد الکتریسیته و به ویژه ذخیره سازی انرژی الکتریکی و خودروهای الکتریکی (EVs)، این است که آن ها ایده های کاملاً جدیدی نیستند. در این فصل، تاریخچه مربوط به رشد بازار الکتریسیته، ذخیره سازی انرژی با باتری و خودروهای الکتریکی را مرور خواهیم کرد. در اینجا، خط زمانی را از نخستین باتری های شناخته شده ذخیره سازی انرژی تا اواخر انقلاب صنعتی، زمانی که الکتریسیته در دسترس توده ها قرار گرفت و تا حرکت به سوی برقی سازی وسایل نقلیه که از اواخر دهه ۱۸۰۰ آغاز شد و تا به امروز ادامه دارد، دنبال خواهیم کرد. شاید بپرسید چرا باید به تاریخچه باتری های ذخیره ساز الکتریکی و خودروهای الکتریکی اهمیت بدهیم. پاسخ را می توان در اوایل دهه ۱۹۰۰ یافت. فیلسوف، جورج سانتایانا، نوشت: «کسانی که گذشته را به یاد نمی آورند، محکوم به تکرار آن هستند» (Santayana, ۱۹۰۵). یکی از بدترین کارهایی که می توانیم انجام دهیم، تکرار اشتباهات و عدم بهره گیری از آموخته های دیگران است. مانند هر نوآوری فناورانه ای، باتری ذخیره ساز انرژی، به ویژه در ارتباط با برقی سازی وسایل نقلیه، در طول ۱۵۰ سال گذشته فراز و نشیب های بسیاری داشته است. هر دو فناوری چندین شروع ناموفق را تجربه کرده اند، بنابراین کسب درکی بنیادین از چگونگی تکامل این فناوری به شکل امروزی آن، ممکن است نقش مهمی در درک چگونگی ادامه تکامل آن در آینده و شناسایی عوامل کلیدی موفقیت واقعی آن در دنیای امروز داشته باشد. البته، ما امیدواریم برخی از دلایلی را که این فناوری ها در روزگاران قدیم مورد پذیرش قرار نگرفتند، شناسایی کنیم تا اطمینان حاصل کنیم که خود را در شرایط مشابه قرار ندهیم.

پذیرش یک فناوری جدید همیشه به سرعت اتفاق نمی افتد و ممکن است به شدت به عوامل خاصی وابسته باشد. نمودار نشان داده شده در شکل ۱،۱، که در ابتدا در روزنامه نیویورک تایمز چاپ شد (Felton, ۲۰۰۸)، معرفی فناوری های جدید را در مقایسه با درصد خانوارهای آمریکایی که آن ها را از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۵ پذیرفته اند، نشان می دهد. این نمودار نشان می دهد که یک فناوری جدید، حتی اگر در زمان معرفی خود واقعاً انقلابی باشد، مانند تلفن یا الکتریسیته، ممکن است زمان زیادی طول بکشد تا به طور کامل توسط یک کاربر بازار پذیرفته شود.



شکل ۱،۱: نرخ پذیرش فناوری. برگرفته از نیویورک تایمز (Felton, ۲۰۰۸).

پذیرش خودرو از تقریباً صفر در سال ۱۹۰۰ به نزدیک ۶۰٪ از کل خانوارهای آمریکایی در سال ۱۹۳۰ افزایش یافت، زمانی که با رکود بزرگ سال ۱۹۲۹ متوقف شد. پذیرش خودرو تا پس از جنگ جهانی دوم واقعاً شروع به افزایش مجدد

نکرد و پس از آن رشد ثابتی داشت تا به جایگاه فعلی خود یعنی بیش از ۹۰٪ از کل خانوارهای آمریکایی رسید. بین سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۱ این عدد تقریباً ثابت ماند و حدود ۹۱٫۵٪ از خانوارهای آمریکایی صاحب خودرو بودند (Daly, ۲۰۲۲). این جدول خودروهای الکتریکی را تفکیک نمی‌کند، اما می‌توانیم به چند نکته اشاره کنیم. در سال ۱۹۰۰ حدود یک سوم از کل خودروها الکتریکی بودند. این روند تا حدود سال ۱۹۱۵ ادامه یافت، زمانی که چندین اتفاق همزمان رخ داد و بازار اولیه را متوقف کرد. اولین مورد، شروع جنگ جهانی اول بود که به منبع سوختی نیاز داشت که به راحتی بتوان آن را به میدان نبرد آورد. این موضوع با کشف نفت خام در تگزاس همزمان شد که بنزین را به طور گسترده در دسترس و ارزان ساخت. علاوه بر این، در سال ۱۹۱۶ «قانون جاده کمک فدرال» (Federal Aid Road Act) تصویب شد. هر یک از این عوامل با معرفی مدل T هنری فورد تقویت شد، که وسایل نقلیه مجهز به موتور احتراق داخلی (ICE) را در دسترس عموم مردم قرار داد (U.S. Department of Energy, ۲۰۱۴; U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, ۲۰۲۲). این قانون، توسعه چیزی را که به سیستم مدرن بزرگراه‌های بین ایالتی تبدیل شده است، تسریع کرد. قبل از تصویب این قانون، هیچ بزرگراهی برای اتصال یک شهر به شهر دیگر وجود نداشت. اما پس از تصویب قانون و شروع ساخت شبکه بزرگراه‌های بین ایالتی، دوران خودروهای الکتریکی اولیه به سرعت به پایان رسید. تعداد کمی از کامیون‌های تحویل بار الکتریکی تا دهه ۱۹۵۰ به فعالیت در داخل شهرها ادامه دادند، اما خودروی الکتریکی مصرف‌کننده تا آن زمان تقریباً ناپدید شده بود.

ما همچنین می‌توانیم ببینیم که نرخ پذیرش در مقایسه با ۱۰۰ سال پیش در حال افزایش است. در حالی که نزدیک به ۱۰۰ سال طول کشید تا تلفن به تقریباً ۹۰٪ از خانوارهای آمریکایی برسد، نوآوری‌های فناورانه جدیدتر مانند تلفن همراه تقریباً به همان سطح نفوذ در بازار تنها در عرض ۲۰ سال، یعنی کمتر از یک پنجم زمان، دست یافتند. در این دوره، جامعه به موازات فناوری به تکامل خود ادامه داده و از یک فرهنگ عمدتاً مبتنی بر کشاورزی در اوایل دهه ۱۹۰۰ به یک فرهنگ سیار و پسا صنعتی در دهه ۲۰۲۰ تغییر یافته است. این تأثیرات بر بازارهای باتری و برقی‌سازی نیز بی‌تأثیر نبود. زمانی که اولین خودروهای الکتریکی به ایالات متحده معرفی شدند، نه مصرف‌کننده متوسط و نه خرده‌فروشان به خدمات برق دسترسی نداشتند. بنابراین، پذیرش اولیه توسط مصرف‌کنندگان خصوصی، که پیشرفت اولیه بسیار خوبی داشت، به دلیل نبود امکانات برای تأمین برق مورد نیاز برای شارژ وسایل نقلیه به سرعت متوقف شد و به شرکت‌های صنعتی یا افراد ثروتمند محدود گشت، که هر دو از اولین پذیرندگان خدمات برق بودند. حتی با افزایش دسترسی به خدمات برق، تقاضا برای خودروهای الکتریکی کاهش یافت. دلایل بالقوه زیادی برای این امر وجود داشت، از معرفی فناوری‌های رقیب مانند خودروی احتراق داخلی با سوخت مایع گرفته تا رشد سریع سیستم بین ایالتی آمریکا، همانطور که پیشتر توضیح داده شد، که مسافتی را که وسایل نقلیه باید طی می‌کردند افزایش داد، هزینه پایین و در دسترس بودن زیاد بنزین به عنوان منبع سوخت و تمایل مداوم آمریکایی‌ها به پویایی (mobility).

بنابراین، به سوالات اصلی باز می‌گردیم: آیا ما مجبور خواهیم بود تاریخ خودروهای الکتریکی را تکرار کنیم و شاهد مرگ تدریجی دیگری برای آن‌ها باشیم؟ آیا بازار امروز دوباره به دلیل کمبود زیرساخت شارژ متوقف خواهد شد؟ آیا محدودیت‌های برد و زمان شارژ همچنان مصرف‌کنندگان را از خودروهای الکتریکی دور خواهد کرد؟

اجازه دهید لحظه‌ای به عقب برگردیم قبل از اینکه به تاریخچه خودروی الکتریکی بپردازیم. ما باید درک کنیم که فناوری توانمندساز از کجا نشأت گرفته است. معرفی و رشد خودروی الکتریکی با اختراع یک فناوری ذخیره‌سازی انرژی که هم قابلیت ذخیره‌سازی انرژی بالا و هم توانایی شارژ مجدد آن منبع انرژی را ارائه می‌داد، قدرت گرفت. اینجاست که باتری

وارد داستان می‌شود. این فصل تلاش خواهد کرد تا داستان چگونگی تکامل این فناوری را بیان کند تا خواننده بتواند درک کند که هنوز چه موانعی را باید برای کسب پذیرش واقعی بازار و پذیرش در بازار انبوه برطرف کنیم.

### تاریخچه باتری ذخیره‌ساز مدرن

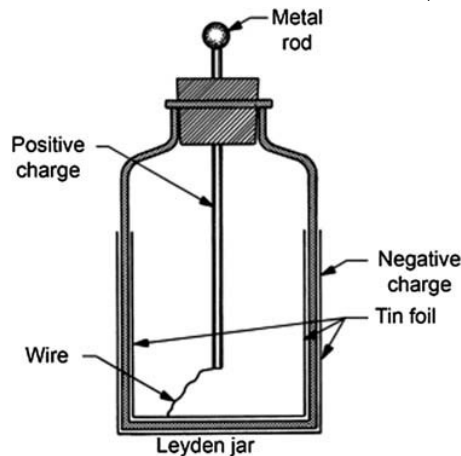
ما عموماً باتری‌ها را به عنوان یک اختراع جدید در نظر می‌گیریم. با این حال، شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد باتری‌ها حداقل در ۲۰۰۰ سال گذشته مورد استفاده بوده‌اند. در دهه ۱۹۳۰، یک باستان‌شناس آلمانی در یک سایت ساختمانی در بغداد کار می‌کرد و چیزی را یافت که تاریخچه باتری را بازنویسی کرد. آنچه او در حین حفاری کشف کرد، شبیه یک کوزه گلی ساده بود، اما در داخل آن یک استوانه مسی حاوی یک میله آهنی قرار داشت. داخل کوزه گلی نشانه‌هایی از خوردگی را نشان می‌داد که با استفاده از کوزه برای نگهداری یک مایع اسیدی مانند سرکه، شراب یا آب نمک مطابقت داشت. این کشف در ابتدا یک راز بود، اما تحقیق و آزمایش منجر به این کشف شد که این پیکربندی می‌تواند یک باتری با قابلیت تولید حدود ۱ تا ۲ ولت الکتریسیته ایجاد کند. این کشف به عنوان باتری بغداد شناخته شده است که گاهی اوقات بر اساس دوره‌ای که گمان می‌رود بیش از ۲۰۰۰ سال پیش در آن توسعه یافته، باتری پارثی (Parthian battery) نیز نامیده می‌شود (شکل ۱،۲). هدف از این باتری احتمالاً یک راز باقی خواهد ماند، اما مصریان باستان به آبرکاری جواهرات و سایر قطعات تزئینی و مذهبی در همان دوره‌ای که این باتری استفاده می‌شده است، شهرت داشتند (Buchmann, ۲۰۱۱)، بنابراین شاید دور از ذهن نباشد که باور کنیم ممکن است برای این منظور استفاده شده باشد.



شکل ۱،۲: باتری پارثی.

با این وجود، باتری پارثی برای مدت طولانی در شن‌های تاریخ فراموش شد و برای مدتی طولانی پیشرفت کمی در توسعه باتری صورت گرفت. در اواسط دهه ۱۷۰۰، دو مخترع، اوالد گنورگ فون کلایست و پیتر ون موشنبروک، به طور موازی اما در کارهای جداگانه، آنچه را که به عنوان بطری لیدن (Leyden jar) شناخته شد، کشف کردند (شکل ۱،۳). در ابتدا این تلاشی برای به دام انداختن مایع الکتریسیته بود. در آن دوره، در بسیاری از محافل علمی اعتقاد بر این بود که الکتریسیته یک مایع است، اما در نهایت کار آنها به یک کشف بسیار مهم‌تر تبدیل شد. بطری لیدن الکتریسیته ساکن را ذخیره می‌کرد که می‌توانست بعداً تخلیه شود. این کار با پوشاندن داخل یک شیشه با فویل فلزی و افزودن یک لایه دیگر از فویل فلزی به بیرون شیشه انجام می‌شد. در نهایت، یک میله فلزی از طریق درپوش وارد و به فویل داخلی متصل می‌شد. شیشه تا حدی با آب پر می‌شد که به عنوان یک رسانا عمل می‌کرد و هنگامی که یک ژنراتور استاتیک

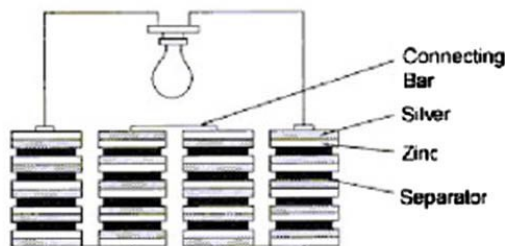
به الکتروود میله فلزی اعمال می‌شد، یک بار الکتریکی ساکن می‌توانست در شیشه ذخیره شود و اولین خازن الکتریکی را ایجاد کند (Buchmann, ۲۰۱۱).



شکل ۱،۳: بطری لیدن. برگرفته از [HQUEW.net](http://HQUEW.net) (۲۰۱۲).

تا اواسط دهه ۱۷۰۰ بود که اصطلاح باتری برای این نوع دستگاه به کار رفت. اعتقاد بر این است که این اصطلاح توسط کسی جز بنجامین فرانکلین، که به شدت مجذوب مطالعه الکتریسیته بود، ابداع شده است. گفته می‌شود که فرانکلین گروهی از بطری‌های لیدن را که به صورت الکتریکی به هم متصل شده بودند، با توپ‌های آتشبار نظامی (military battery cannons) مقایسه کرد و عبارت باتری (battery) را ابداع نمود (Marshall & Franklin, ۲۰۰۸). (College, The Phillips Museum of Art, ۲۰۰۸).

کشف مهم دیگر در تکامل باتری در ایتالیا در اواخر دهه ۱۷۰۰ توسط آلساندرو ولتا انجام شد. با این حال، کشف او تا سال ۱۸۰۰، زمانی که ولتا نتایج سال‌ها آزمایش با آنچه او پیل ولتایی (voltaic pile) می‌نامید را منتشر کرد، به طور گسترده شناخته نشد. اختراع ولتا اولین سلول ذخیره‌سازی انرژی الکتروشیمیایی بود. یعنی، دستگاهی است که موادی را ذخیره می‌کند که می‌توانند انرژی شیمیایی را از طریق واکنش‌های اکسایش-کاهش الکتروشیمیایی به انرژی الکتریکی تبدیل کنند، یا به سادگی یک سلول باتری. پیل ولتایی از دو صفحه فلزی، یکی از روی و دیگری از مس، تشکیل شده بود که الکتروودها را تشکیل می‌دادند و توسط یک تکه پارچه آغشته به الکترولیتی از اسید سولفوریک یا آب نمک از هم جدا می‌شدند (شکل ۱،۴). هنگامی که کنتاکت‌های بالا و پایین توسط یک سیم به هم متصل می‌شدند، جریان از طریق پیل عبور می‌کرد و ولتاژ واقعی به تعداد جفت صفحات فلزی در پیل بستگی داشت (Jonnes, ۲۰۰۴).



### شکل ۱,۴: پیل ولتایی.

گام تکاملی بزرگ بعدی در توسعه باتری مدرن در سال ۱۸۵۹ رخ داد، زمانی که گاستون پلانتیه، فیزیکدان فرانسوی، اولین باتری ذخیره‌ساز قابل شارژ سرب-اسید را اختراع کرد. اندکی پس از آن و عمدتاً بر اساس کار پلانتیه، کامیل فوره، مخترع فرانسوی دیگر، در سال ۱۸۸۱ با افزایش استحکام و قابلیت حمل جریان، آن فناوری را بهبود بخشید. کار این دو مخترع، پایه و اساس باتری مدرن سرب-اسید است که امروزه در هر خودرویی استفاده می‌شود. این اختراع، رشد اولیه بازارهای پویایی الکتریکی و ذخیره‌سازی انرژی ثابت را جرقه زد (Jonnes, ۲۰۰۴; Buchmann, ۲۰۱۱).

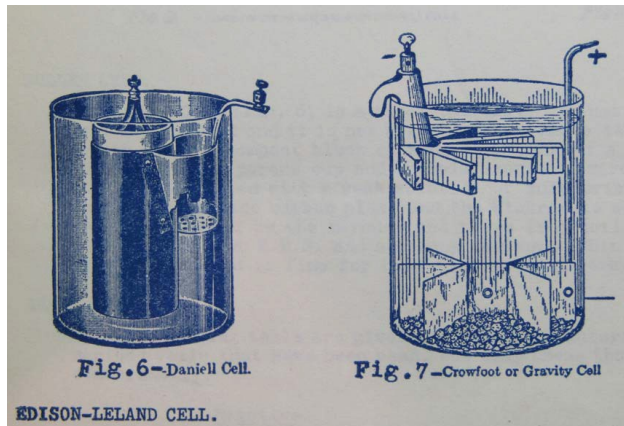
### سلول‌های اولیه (Primary Cells)

در آن دوره چندین فناوری کلیدی دیگر باتری با استفاده از مواد و طرح‌های مختلف ظهور کردند. بسیاری از سلول‌ها قبل از سال ۱۹۰۰ از یک ظرف شیشه‌ای یا سرامیکی برای نگهداری الکترولیت‌های اسیدی استفاده می‌کردند. سلول‌های باتری به دو دسته اولیه (primary) یا ثانویه (secondary) تقسیم می‌شوند که به قابل شارژ بودن یا نبودن آنها اشاره دارد. یک سلول اولیه فقط یک جریان دارد، یعنی تخلیه (discharge). یک سلول ثانویه یک جریان تخلیه، یعنی جریان اول و یک جریان شارژ، یعنی جریان دوم را دارد که نام آن از همین گرفته شده است. همچنین سلول‌های تر (wet cells) و سلول‌های خشک (dry cells) وجود دارند، آنهایی که دارای الکترولیت مایع هستند و آنهایی که جزء مایع ندارند. هر دوی اینها در اینجا به طور خلاصه پوشش داده می‌شوند تا تکامل سلول‌های باتری را معرفی کنند. سلول لکلانسه (Leclanché cell) یک طرح اولیه بود که از یک میله روی و یک استوانه دی‌اکسید منگنز و کربن در یک ظرف شیشه‌ای استفاده می‌کرد. میله و استوانه در اسید سال آمونیاک (نشادر) غوطه‌ور می‌شدند که به عنوان الکترولیت عمل می‌کرد. در اواخر دهه ۱۸۰۰ و اوایل دهه ۱۹۰۰ سلول لکلانسه برای کاربردهایی مانند زنگ در، دزدگیر و دربازکن‌های برقی استفاده می‌شد (شکل ۱,۵).



### شکل ۱,۵: سلول لکلانسه.

سلول دانیل (Daniell cell) یکی دیگر از سلول‌های اولیه بود که برای تلگراف، تلفن و کارهای سیگنال‌دهی استفاده می‌شد. این سلول از این جهت متفاوت بود که از دو نوع مایع الکترولیتی با الکترودهای روی و مس استفاده می‌کرد. الکترود روی در محلولی از سولفات روی و الکترود مس در محلولی از سولفات مس غوطه‌ور بود. این سلول، سلول گرانشی (gravity cell) یا سلول پنجه کلاغی (crowfoot cell) نیز نامیده می‌شد (شکل ۱,۶).



شکل ۱,۶: سلول دانیل و سلول پنجه کلاغی.

برای اینکه عقب نماند، توماس ادیسون یک سلول اولیه بر پایه روی و اکسید سیاه مس با استفاده از الکترولیتی مبتنی بر پتاس سوزآور (caustic potash) توسعه داد. روغن پارافین یا روغن باتری به بالای محلول اضافه می‌شد تا عمر آن را افزایش داده و محلول را از آلودگی‌ها محافظت کند. تکرار اول این کار در یک ظرف سرامیکی انجام شد و به آن سلول ادیسون-لالاند (Edison-Lalande cell) گفته می‌شود (شکل ۱,۷). این سلول‌ها برای کاربردهایی مانند خدمات سیگنال‌دهی مورد استفاده برای تقاطع‌های راه‌آهن و چراغ‌های سیگنال و برای احتراق موتورهای گازی ثابت استفاده می‌شدند.



شکل ۱,۷: سلول‌ها و الکترودهای ادیسون-لالاند.

ادیسون بعداً این طرح را به یک ظرف شیشه‌ای با طراحی الکترود چندگانه اصلاح‌شده تبدیل کرد. باتری اولیه ادیسون همچنین از نظر شیمیایی تغییر کرد و به الکترودهای آهن-نیکل با الکترولیت هیدروکسید پتاسیم روی آورد (شکل ۱,۸). هر دو طرح عمدتاً برای کاربردهای ثابت مانند سیستم‌های سیگنال‌دهی راه‌آهن، تلفن‌ها، تلگراف‌ها، زنگ درها و دزدگیرها استفاده می‌شدند (Cooke, Lesson ۳ Primary Cells, ۱۹۲۴; Edison Tech Center, ۲۰۱۴).



شکل ۱,۸: سلول‌های اولیه ادیسون.

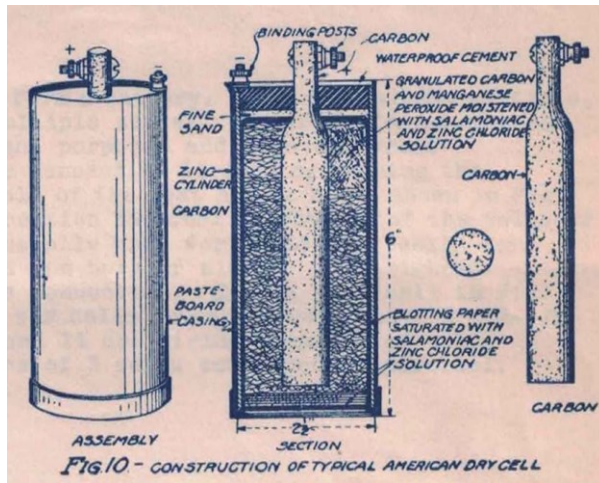
بسیاری از سلول‌های مشابه در آن دوره توسعه یافتند، از جمله سلول استوانه کربنی، که اصلاحی از سلول لکلانسه بود (شکل ۱,۹). در آن نوع سلول، یک استوانه کربنی وجود دارد که یک میله روی در آن قرار گرفته اما با آن تماس ندارد.



شکل ۱,۹: سلول اولیه سامسون با الکتروود کربنی و استوانه روی.

### سلول‌های خشک (Dry Cells)

در همین دوره، از اواخر دهه ۱۸۸۰ تا اوایل دهه ۱۹۰۰، نوع دومی از باتری وجود داشت که توسعه زیادی یافته بود: سلول خشک. این نیز یک باتری اولیه و غیرقابل شارژ است که برای تأمین انرژی دستگاه‌های دستی کوچک مانند چراغ قوه در نظر گرفته شده بود. در مناطقی که شوک و لرزش قابل توجهی وجود داشت، سلول خشک گزینه بهتری بود. این سلول اولین بار توسط ای. دبلیو. جوئت در سال ۱۸۹۴ توسعه یافت که از یک آند کربنی و یک کاتد روی در یک استوانه با آستر کاغذی استفاده می‌کرد، همانطور که در شکل ۱,۱۰ نشان داده شده است. روی با کلرید آمونیوم، گچ پاریس، کلرید روی، خمیر روی و خاک اره... به صورت خمیر مخلوط می‌شد. این خمیر در اطراف الکتروود کربن در یک لوله کاغذی فشرده و مهر و موم می‌شد تا از خشک شدن خمیر جلوگیری شود (Ginsberg, ۲۰۰۵).



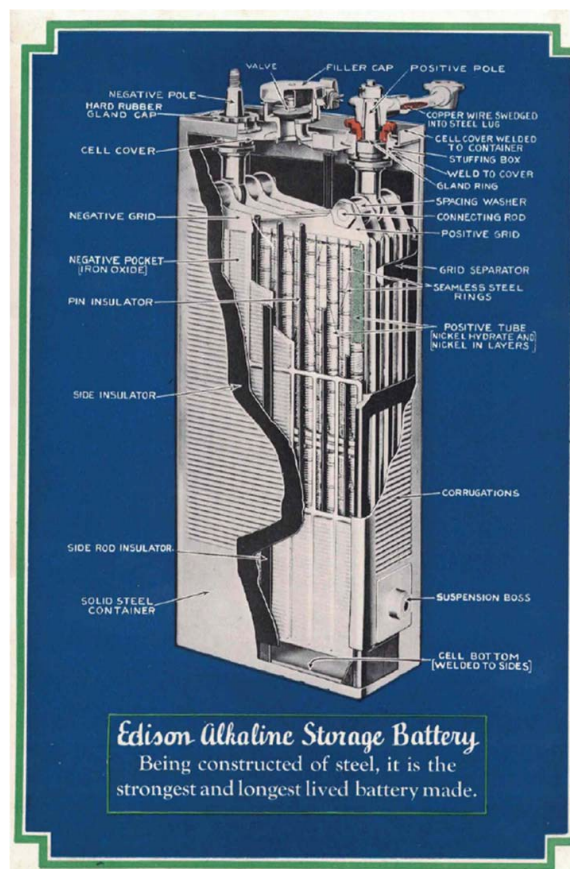
شکل ۱۰، ۱: سلول خشک.

در سال ۱۸۸۶، شرکت ملی کربن (NCC) برای تجاری سازی این سلول خشک تأسیس شد. NCC اولین شرکتی بود که با استفاده از برند کلمبیا (Colombia) با موفقیت یک باتری سلول خشک مهر و موم شده را به تولید انبوه رساند. در سال ۱۹۰۶، NCC سهامی را در شرکت دیگری به دست آورد و شرکت جدید را «شرکت آمریکایی اور ردی» (American Ever Ready Company) نامید که کمی بعد به اور ردی (Eveready) تبدیل شد. در نهایت این شرکت به شرکتی که ما امروزه به نام انرجایزر (Energizer) می شناسیم تبدیل شد (شاید خرگوش معروف آنها را بشناسید). تقریباً در همان زمان، شرکت باتری فرانسوی (French Battery Company) در شیکاگو تأسیس شد که در نهایت به شرکتی که ما امروزه به نام ری-او-وک (Ray-O-Vac) می شناسیم تبدیل گشت. این ها به سلول های AA، C، D و AAA که ما می شناسیم و استفاده می کنیم، تکامل یافتند. هر دوی این شرکت ها، به همراه بسیاری دیگر، میلیون ها میلیون سلول از نوع استوانه ای، یعنی پیشینیان سلول های لیتیوم-یون امروزی، را ساختند.

### باتری های ثانویه (Secondary Batteries)

باتری های سرب-اسید که بر اساس کار فوره (Faure) و پلانته (Plante) ساخته شده بودند، برای تأمین نیروی محرکه خودروهای الکتریکی نوظهور مورد استفاده قرار گرفتند، اما مشکلات زیادی داشتند و توماس ادیسون از عملکرد باتری های آن زمان راضی نبود، بنابراین جایگزینی برای سرب-اسید توسعه داد. ادیسون در تلاش برای بهبود باتری های سرب-اسیدی که در خودروهای الکتریکی اوایل دهه ۱۹۰۰ استفاده می شدند، یک باتری مبتنی بر نیکل توسعه داد. ادیسون هر دو نوع باتری نیکل-روی و نیکل-آهن را به ثبت رساند، اما بر تجاری سازی باتری نیکل-آهن تمرکز کرد. این باتری ها به طور قابل توجهی با بسیاری از پیشینیان خود متفاوت بودند. ادیسون به جای استفاده از صفحات نیکل و آهن، از خمیر هیدرات نیکل فشرده شده در لوله های فولادی با روکش نیکل سوراخ دار برای سمت کاتد و خمیر اکسید آهن در جیب های فولادی سوراخ دار برای آند استفاده کرد. صفحات مثبت و منفی به طور متناوب با استفاده از چهار صفحه مثبت و پنج صفحه منفی قرار می گیرند که توسط میله های لاستیکی سخت یا پین های عایق از هم جدا می شوند. مجموعه شبکه الکتروود در یک محفظه فولادی با روکش نیکل نصب شده و ورق های نازک لاستیکی عایق بین الکتروودها و محفظه قرار می گیرند. سپس درب به بدنه جوش داده می شود. علاوه بر ترمینال های مثبت و منفی روی درب، یک درپوش پرکننده امکان اضافه کردن الکترولیت را فراهم می کند و به عنوان یک شیر عمل می کند تا گازهای هیدروژن

تولید شده در حین کار بتوانند خارج شوند، در حالی که پتاس (potash) مورد استفاده در الکترولیت را داخل سلول نگه می‌دارد (شکل ۱،۱۱) (Edison Storage Battery Company, ۱۹۲۵). این سلول‌های نیکل-آهن تا اواسط قرن بیستم در کاربردهایی از کامیون‌های تحویل بار گرفته تا قایق‌ها، کامیون‌های برقی صنعتی و وسایل نقلیه معدنی، چراغ‌های پیشانی معدنچیان، راه‌آهن و بسیاری دیگر از کاربردهای متحرک و ثابت مورد استفاده قرار گرفتند. ادیسون ادعا کرد که باتری ذخیره‌ساز تکامل‌یافته او ۱۰۰ سال عمر خواهد کرد. این ادعا در سال ۲۰۱۱ مورد بررسی قرار گرفت، زمانی که پیتر دمار (Peter DeMar) از شرکت «تحقیق و آزمایش باتری» (Battery Research and Testing, Inc) آن را آزمایش کرد. دمار و تیمش گروهی از سلول‌های نیکل-آهن ادیسون را که میانگین سنی ۸۵ سال داشتند، جمع‌آوری کردند. آنها این سلول‌ها را با استفاده از کتابچه‌های راهنمای نگهداری اصلی ادیسون احیا کردند. نتیجه این بود که تمام سلول‌ها توانستند به طور کامل احیا شوند و به ظرفیت نامی اولیه آمپر-ساعت (Ah) خود بازگردند (DeMar, ۲۰۱۱).



شکل ۱،۱۱: باتری نیکل-آهن ادیسون.

باتری‌های سرب-اسید از فرآیند مشابهی برای ایجاد خمیرهایی از اکسید سرب خالص برای ترمینال منفی (که گاهی اوقات سرب اسفنجی نامیده می‌شود) و پراکسید سرب برای ترمینال مثبت استفاده می‌کردند. این صفحات یا شبکه‌ها با یک تکه چوب عمل‌آوری شده یا لاستیک سخت به عنوان جداکننده (separator) مونتاژ می‌شدند. سپس آنها را در یک ظرف شیشه‌ای سنگین یا لاستیکی سخت قرار داده و در محلولی از آب مقطر و اسید سولفوریک غوطه‌ور می‌کردند.

(Cooke, ۱۹۲۴). شرکت‌هایی مانند Exide (شکل ۱،۱۲) و Willard باتری‌های سرب-اسید تجاری را در طول قرن بیستم ساختند. Willard از همان شیمی استفاده می‌کرد، اما تمایل داشت سلول‌های استوانه‌ای کوچکی بسازد که می‌توانستند به صورت موازی یا سری به هم متصل شوند تا سیستم‌های بزرگتری مانند باتری مزرعه یونیورسال Willard که در شکل ۱،۱۳ نشان داده شده است، ایجاد کنند. اگرچه سلول‌های خشک اولیه و باتری‌های ثانویه اولیه در بحث خودروهای الکتریکی کاربرد فوری ندارند، اما درک اینکه چگونه به فناوری‌های امروزی رسیده‌ایم، همچنان حیاتی است. این فناوری‌ها به انقلاب صنعتی قرن ۱۹ و ۲۰ قدرت بخشیدند، اما زمانی که نوبت به رقابت با هزینه و عملکرد خودروی موتور احتراق داخلی بنزینی رسید، نتوانستند رقابت کنند. تا اوایل دهه ۱۹۷۰ و تا دهه ۱۹۹۰ بود که بهبودها و نوآوری‌های واقعی در شیمی‌های دیگر صورت گرفت که منجر به جهش فناوری و امکان‌پذیر شدن باتری‌هایی شد که در حال حاضر استفاده می‌کنیم. با این حال، اجازه دهید این فکر را برای لحظه‌ای کنار بگذاریم و به چشم‌انداز صنعتی آن دوره و خودروهای الکتریکی اولیه‌ای که ایجاد کرد، بپردازیم.



شکل ۱،۱۲: ظرف شیشه‌ای باتری سرب-اسید Exide.



شکل ۱،۱۳: باتری سرب-اسید مزرعه یونیورسال Willard.

## ظهور یک صنعت الکتریکی

اینکه فناوری باتری جهش‌ها و پیشرفت‌های بزرگی داشت، تنها به دلیل گسترش، رشد و در دسترس بودن الکتریسیته و شبکه‌های برق آن زمان ممکن بود. بدون عرضه قابل اعتماد الکتریسیته، تقاضا برای ذخیره‌سازی انرژی ممکن بود هرگز به وجود نیاید. یکی از مهم‌ترین رویدادهای اواخر دهه ۱۸۰۰، نمایشگاه جهانی بود. این رویداد برای برجسته کردن جدیدترین و برترین فناوری‌ها و به نمایش گذاشتن آنها برای جهانیان استفاده می‌شد. نمایشگاه‌های جهانی آن زمان، نمایانگر خوبی از سرعت نوآوری و تغییرات فناورانه در جهان به طور کلی هستند. نمایشگاه جهانی صدساله ۱۸۷۶ که در فیلادلفیا برگزار شد، با لامپ‌های گازی روشن می‌شد؛ تنها فناوری الکتریکی به نمایش درآمده یک دینام الکتریکی اولیه بود. با این حال، ۱۶ سال بعد، نمایشگاه جهانی شیکاگو در سال ۱۸۹۲ عمدتاً با الکتریسیته تأمین نیرو و روشن می‌شد و بسیاری از فناوری‌های مختلف الکتریکی را به نمایش گذاشت. در نمایشگاه جهانی ۱۸۹۲، تعداد نمایشگاه‌های متمرکز بر الکتریسیته یا فناوری الکتریکی تقریباً به صورت نمایی رشد کرده بود و خودروی الکتریکی از یک نمایش صرف به یک محصول تولیدی تبدیل شده بود.

در اروپا، نمایشگاه جهانی ۱۸۷۸ که در پاریس برگزار شد، اولین خودروهای الکتریکی و دوچرخه‌های برقی را به نمایش گذاشت که در حال ظهور در بازارها بودند. این نمایشگاه جهانی همچنین نوآوری‌های مهم الکتریکی دیگری مانند تلفن الکساندر گراهام بل، روشنایی قوس الکتریکی و فونوگراف توماس ادیسون را به نمایش گذاشت (Snyder, & Gross, ۲۰۰۵). تنها ۴ سال بعد، در نمایشگاه جهانی شیکاگو در سال ۱۸۹۲، الکتریسیته و تجهیزات برقی به سبکی باشکوه به نمایش درآمدند. در واقع، سالن نمایشگاه‌های بین‌المللی به طور کامل توسط برق AC وستینگهاوس تأمین می‌شد. غرفه وستینگهاوس بسیاری از فناوری‌ها و نوآوری‌های جدید الکتریکی برای تولید و انتقال برق را به نمایش گذاشت، از جمله یک تابلوی برق، یک ژنراتور چند فاز، یک ترانسفورماتور افزایشنده، خطوط برق برای انتقال الکتریکی، یک ترانسفورماتور کاهنده، موتورهای القایی و سنکرون در اندازه تجاری و مبدل‌های دوار DC. غرفه وستینگهاوس تا آنجا پیش رفت که نمایشگاه‌هایی از تجهیزات طراحی شده توسط خود نیکولا تسلا را به نمایش گذاشت، از جمله نوآوری‌هایی مانند موتور القایی دو فاز و ژنراتورهایی که برای تأمین برق نمایشگاه استفاده می‌شدند. به عنوان یک نکته جانبی جالب، جنرال الکتریک، که رقیب اصلی وستینگهاوس بود، نیز برای تأمین برق نمایشگاه بین‌المللی با استفاده از راهکار DC ادیسون پیشنهاد داده بود، اما راهکار آنها هزینه بالاتری داشت و بنابراین جنرال الکتریک رقابت را به پیشنهاد ارزان‌تر تسلا/وستینگهاوس باخت (Seifer, ۱۹۹۶; Larsen, ۲۰۰۳; Jonnes, ۲۰۰۴; Barrett, ۱۸۹۴). همه اینها ممکن است امروزه عادی به نظر برسند، اما این اولین باری بود که این‌ها برای استفاده تجاری دیده می‌شدند و حدود ۹۹٪ از خانوارهای ایالات متحده و اروپا خدمات برق نداشتند. اگر به شکل ۱،۱ بازگردیم، می‌توانیم ببینیم که در ایالات متحده تا حدود سال ۱۹۴۷ طول کشید تا بیش از ۹۰٪ خانوارها برق داشته باشند و تا سال ۱۹۶۰ دسترسی به برق به نزدیک به ۱۰۰٪ تمام خانوارهای آمریکایی رسید.

## توسعه اولیه خودروهای الکتریکی

بین معرفی تجاری خودرو در اواخر دهه ۱۸۰۰ و اوایل دهه ۱۹۱۰، خودروها توسط یکی از سه منبع نیرو می‌گرفتند: موتورهای احتراق داخلی (ICEs) با سوخت مایع (بنزین)؛ موتورهای بخار با آتش، گرما و آب جوشیده؛ و موتورهای الکتریکی با باتری‌های الکتریکی با استفاده از انرژی شیمیایی. تا سال ۱۹۱۲، خودروهای الکتریکی بیش از یک سوم کل فروش وسایل نقلیه در ایالات متحده را تشکیل می‌دادند (Kirsch, ۲۰۰۰). موتورهای بنزینی پر سر و صدا بودند،

دودهای سمی منتشر می‌کردند، برای کار کردن به نگهداری قابل توجهی نیاز داشتند و روشن کردنشان دشوار بود، که این امر خودروی الکتریکی را به راهکار ترجیحی آن زمان تبدیل کرده بود. با ورود قرن نوزدهم به قرن بیستم، به نظر می‌رسید که خودروهای الکتریکی آماده تبدیل شدن به وسیله نقلیه انتخابی برای استفاده شخصی و تجاری هستند. در آن دوره، «انجمن خودروهای الکتریکی آمریکا» (EVA) که برجسته بود، اکثر بازیگران اصلی صنعت را گرد هم آورد تا بر رشد صنعت تمرکز کنند. کرش (Kirsch, ۲۰۰۰) انجمن EVA را اینگونه توصیف کرد: «... یک سازمان تجاری تمام عیار که نماینده تولیدکنندگان خودروهای الکتریکی، سازندگان باتری و شرکت‌های برق بود» (ص. ۸). با این حال، حتی با تلاش گروه‌های فعال صنعتی بزرگ مانند این، رشد بازار خودروهای الکتریکی نتوانست حفظ شود. علیرغم داشتن حمایت سراسری صنعت، خودروی الکتریکی در جامعه و فرهنگ آن روز ریشه ندوانده بود. استانداردسازی اندکی برای باتری‌های ذخیره‌ساز (ثانویه) آن زمان، حتی در صنعت خودروسازی وجود داشت یا اصلاً وجود نداشت.

اولین فروش مستند یک خودروی الکتریکی در ایالات متحده، کالسکه برقی ویلیام موریسون بود که به شرکت باتری آمریکایی شیکاگو فروخته شد تا فناوری باتری آنها را به نمایش بگذارد. در دی موبین، آیووا، موریسون کالسکه شش نفره و ۴ اسب بخاری خود را توسعه داد که می‌توانست به حداکثر سرعت حدود ۱۴ مایل در ساعت (mph) دست یابد (Schiffer, ۱۹۹۴). این اولین خودروی الکتریکی تولیدی در بازار ایالات متحده شد و در نمایشگاه جهانی ۱۸۹۳ در شیکاگو، ایلینوی به نمایش درآمد.

در سال ۱۸۹۷، ناوگان کوچکی از تاکسی‌های برقی در شهر نیویورک به کار گرفته شد که اولین ناوگان تجاری از این نوع بود. این نمونه‌ای از مدل‌های تجاری اولیه خودروهای الکتریکی در آن دوره بود. وسایل نقلیه، چه با احتراق داخلی، چه برقی و چه بخار، تمایل داشتند تحت نظر صاحبان ناوگان برای استفاده در تاکسی‌ها وسایل نقلیه تحویل بار و نقش‌های مشابه به خدمت گرفته شوند. وسایل نقلیه به صاحبان خصوصی فروخته می‌شدند که معمولاً مشتریان ثروتمندی بودند و به استفاده از مدل کسب و کار تاریخی اسب و کالسکه عادت داشتند. بسیاری از ثروتمندترین افرادی که از اسب و کالسکه استفاده می‌کردند، آنها را در یک مکان مرکزی نگهداری می‌کردند که در آنجا از حیوانات مراقبت و از کالسکه‌ها نگهداری می‌شد، اما در صورت نیاز در اختیار صاحبان قرار می‌گرفت. بازار اولیه خودروهای الکتریکی در ابتدا تلاش کرد تا این مدل را با استفاده از رانندگان استخدام شده توسط شرکت و نگهداری وسایل نقلیه در یک ایستگاه مرکزی که در آنجا می‌توانستند شارژ و در صورت نیاز سرویس شوند، تکرار کند (Kirsch, ۲۰۰۰). این امر ناشی از روند تاریخی اسب و کالسکه بود، اما چون برق هنوز به هر خانه‌ای نرسیده بود، این امکان را نیز فراهم می‌کرد که ایستگاه‌های برق مرکزی به عنوان اماکن شارژ برای این خودروهای الکتریکی اولیه عمل کنند.

در آن دوره، خودروهای الکتریکی در ایالات متحده توسط شرکت‌های متعددی مانند Baker, Anthony Electric Motor Vehicle (شکل ۱، ۱۴)، Anderson, Columbia Automobile Company (که بعداً به Detroit Electric تبدیل شد)، Edison, Studebaker Electric, Pope Manufacturing Company و Riker Electric Vehicle Company تولید می‌شدند (Kirsch, ۲۰۰۰; Schiffer, ۱۹۹۴). که اینها تنها چند نمونه هستند. خودروی الکتریکی مزایای بسیاری را برای مصرف‌کننده اولیه ارائه می‌داد. در مقایسه با موتورهای احتراق داخلی اولیه، بی‌صدا بود، لرزش‌های شدید ایجاد نمی‌کرد و بویی نداشت. همچنین نیازی به تعویض دنده دستی پیچیده‌ای که در موتورهای احتراق داخلی آن زمان ضروری بود، نداشت، زیرا خودروی الکتریکی از یک موتور الکتریکی واحد استفاده می‌کرد. خودروی الکتریکی همچنین نیازی به روشن کردن دستی موتور احتراق داخلی

نداشت، که این یک مزیت بزرگ برای رانندگان زن بود. تا اوایل دهه ۱۹۱۰، اکثر خانه‌ها در شهرهای بزرگ ایالات متحده برای برق سیم‌کشی شده بودند. در شهرهای اولیه دهه‌های ۱۸۰۰ و ۱۹۰۰، برد رانندگی کوتاه نیز چالش بزرگی برای کسب پذیرش اولیه بازار نبود. هر یک از این عوامل به سوق دادن خودروی الکتریکی به سطح بالایی از پذیرش اولیه بازار کمک کرد.

با این حال، چالش‌های عمده‌ای نیز برای فناوری و زیرساخت آن زمان وجود داشت که عمدتاً به دلیل محدودیت‌های فناوری آن روز بود. به عنوان مثال، موتورهای DC اولیه سرعت وسایل نقلیه را به حدود ۲۰ مایل در ساعت محدود می‌کردند، که برای رانندگی در داخل شهر مشکلی نبود. از دیدگاه زیرساختی، در آن زمان برق در بسیاری از خانه‌های شخصی نصب شده بود، اما اکثریت قریب به اتفاق مناطق فاقد خدمات برق خصوصی یا عمومی بودند. با این وجود، حتی با فناوری‌های آن روز، بسیاری از خودروهای الکتریکی توانستند به برد رانندگی الکتریکی ۵۰ تا ۱۰۰ مایل دست یابند، که تفاوت چندانی با امروز ندارد.

با این حال، چهار چیز که در فصل ۱ ذکر شد، تقریباً همزمان با هم اتفاق افتادند تا خودروهای الکتریکی را به حاشیه برانند: کشف نفت خام در تگزاس که بنزین را فراوان و ارزان کرد؛ رشد سیستم‌های جاده‌ای ایالات متحده؛ شروع جنگ جهانی اول؛ و شاید میخ آخر بر تابوت خودروی الکتریکی، معرفی مدل T هنری فورد. یک اتفاق دیگر هم افتاد که استفاده از خودروی احتراق داخلی را بسیار آسان‌تر کرد: استارت برقی توسط چارلز کترینگ اختراع شد. این اختراع جایگزین هندل موتور شد و اولین بار در سال ۱۹۱۲ در کادیلاک معرفی شد (Schreiber, ۲۰۱۹). بخشی از اهمیت آن این بود که بازار خودروهای احتراق داخلی را به روی زنان باز کرد، که خودروی برقی را به دلیل سهولت در روشن شدن بسیار ترجیح می‌دادند.



شکل ۱،۱۴: تبلیغ خودروی برقی بیکر مدل ۱۹۰۸.

در آن دوره، اروپا در حال پیشرفت‌های عمده‌ای در زمینه برقی‌سازی در حمل و نقل شخصی، مانند دوچرخه‌ها و خودروهای برقی و در زمینه حمل و نقل عمومی، مانند قطارها و حمل و نقل انبوه بود. با این حال، همان چهار عاملی که پایان خودروی الکتریکی را در ایالات متحده رقم زد، باعث شد که خودروی الکتریکی در اروپا برای همیشه به تعویق بیفتد.

تا اواسط دهه ۱۹۲۰، خودروی الکتریکی به سرعت در حال تبدیل شدن به یک پاورقی در تاریخ بود. برخی از وسایل نقلیه تجاری درون شهری و کامیون‌های تحویل بار (شکل ۱، ۱۵)، که به دلیل برد محدود و شارژ در انبار برای خودروهای الکتریکی کاملاً مناسب بودند، تا اواسط دهه ۱۹۳۰ یا اوایل دهه ۱۹۴۰ به سختی به کار خود ادامه دادند، تا اینکه حتی این چند کاربرد نهایی نیز به طور کامل ناپدید شدند (Kirsch, ۲۰۰۰). بنابراین، چندین عامل از این عوامل اصلی باعث شدند که خودروهای الکتریکی در اوایل کار از صحنه محو شوند.



شکل ۱، ۱۵: تبلیغ خودروی برقی Ward مدل ۱۹۱۶.

### برقی‌سازی وسایل نقلیه ۱۹۷۰-۱۹۹۰

بین سال‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۷۰، خودروی احتراق داخلی به تکامل خود ادامه داد، اما تحریم نفتی دهه ۱۹۷۰ باعث شد شرکت‌ها بار دیگر به دنبال فناوری‌هایی برای بهبود بهره‌وری سوخت و کاهش وابستگی به نفت خارجی باشند. اکثر خودروسازان بزرگ شروع به آزمایش انواع مختلف برقی‌سازی، توربین‌ها، هیبریدها و انواع مختلف سوخت‌ها برای حل این چالش کردند.

یک نمونه، سیتی کار (CitiCar) شرکت سبرینگ-ونگارد مستقر در فلوریدا است (شکل ۱،۱۶)، که از سال ۱۹۷۴ تا ۱۹۷۷ تولید شد و قدرت سرسام‌آور ۵ اسب بخار را ارائه می‌داد. این خودرو می‌توانست به سرعت ۳۵ تا ۴۰ مایل در ساعت و برد ۴۰ تا ۵۰ مایل قبل از نیاز به شارژ مجدد دست یابد (Morris, ۲۰۲۱; Flavius, ۲۰۱۹). نمونه دیگری از این دوره، برنامه‌ای است که توسط ناسا برای وزارت انرژی (DOE) مدیریت می‌شد و به آن «برنامه توسعه خودروی الکتریکی کوتاه‌مدت DOE» گفته می‌شد. یک وسیله نقلیه واحد با فناوری هیبریدی فلایویل و باتری سرب-اسید ساخته شد (Torchinsky, ۲۰۱۷). در سال ۱۹۷۳، جنرال موتورز یک نمونه اولیه از خودروی برقی شهری (Urban Electric car) ساخت (شکل ۱،۱۷) و برای غلبه بر مشکلات مرتبط با تحریم نفتی مداوم و هزینه‌های بالای سوخت تلاش می‌کرد.



شکل ۱،۱۶: سیتی کار سبرینگ-ونگارد مدل ۱۹۷۶.



شکل ۱،۱۷: خودروی برقی شهری جنرال موتورز که در اولین سمپوزیوم توسعه سیستم‌های قدرت با آلودگی کم در سال ۱۹۷۳ در متل ماریوت، آن آربر، به نمایش درآمد.

نمونه دیگری که بلافاصله قابل تشخیص است، خدمات پستی ایالات متحده (USPS) است که سابقه طولانی با خودروهای الکتریکی دارد. در سال ۱۹۷۳، USPS تعداد ۳۵۰ جیب برقی را از شرکت امریکن موتورز سفارش داد. اولین وسایل نقلیه در ژوئیه ۱۹۷۵ به خدمت گرفته شدند و تا سال ۱۹۷۶ عرضه شدند. این وسایل نقلیه دارای سرعت نهایی ۳۳ مایل در ساعت و برد حدود ۲۹ مایل با یک شارژ ۸ ساعته بودند. این ناوگان تا زمان از رده خارج شدن در سال

۱۹۸۳ به فعالیت خود ادامه داد ( Department of Energy, ۲۰۱۴; Historian US Postal Service, ۲۰۱۴).

این نمونه‌ها نمایانگر انواع وسایل نقلیه توسعه یافته در آن دوره هستند. تمام نمونه‌های اولیه از طیف گسترده‌ای از راهکارهای فناوریانه برای کاهش مصرف سوخت استفاده می‌کردند، اما به طور کلی برای چیزی غیر از وسایل نقلیه نمایشی قابل استفاده نبودند. بسیاری از وسایل نقلیه آزمایشی دیگر در آن دوره در ایالات متحده، اروپا و ژاپن توسعه یافتند. بسیاری از نوآوری‌های اولیه از خودروسازان نوظهور ژاپنی نشأت گرفت که بر روی وسایل نقلیه کوچک و کارآمد تمرکز داشتند.

تا دهه ۱۹۸۰، همه خودروسازان بزرگ درگیر تحقیق در مورد فناوری‌های مختلف برقی‌سازی و بهره‌وری خودرو بودند، اما بار دیگر هیچ یک از این وسایل نقلیه به تولید انبوه نرسید. با این حال، صنعت پیشرفت کرد زیرا وسایل نقلیه نمونه اولیه در این دوره با ساخته شدن بر روی معماری‌های خودروی موجود، بیشتر شبیه به تولید شدند. با این حال، آنها هنوز برای یک دهه دیگر به قابلیت واقعی نرسیدند. به عنوان مثال، فورد از پلتفرم خودروی کوچک فیستا برای توسعه یک خودروی نمایشی الکتریکی استفاده کرد (شکل ۱،۱۸). این وسیله نقلیه دارای برد ۷۰ مایل بود و بر اساس یک باتری نیکل-روی ۹۶ ولت و ۲۲۵ آمپر-ساعت (۲۱،۶ کیلووات-ساعت) با حداکثر سرعت ۶۵ مایل در ساعت کار می‌کرد (Adams, ۲۰۲۰).

یک پاورقی جالب در مورد فورد فیستا این است که اگرچه فناوری خودروهای الکتریکی بر اساس این خودروی نمایشی ۱۹۸۰ رشد نکرد، در سال ۲۰۲۲ فورد اعلام کرد که پس از ۴۶ سال تولید، فیستا را بازنشته می‌کند تا برنامه‌های خودروی الکتریکی خود را تسریع بخشد (John, ۲۰۲۲; Johnson, ۲۰۲۲).

به طور مشابه، در سال ۱۹۷۹، شرکت کرایسلر با مرکز تحقیق و توسعه جنرال الکتریک در یک برنامه با بودجه DOE برای توسعه یک خودروی مفهومی مبتنی بر باتری‌های سرب-اسید همکاری کرد. این وسیله نقلیه مفهومی از ۱۸ باتری سرب-اسید ۶ ولتی متصل به صورت سری برای ایجاد یک سیستم ۱۰۸ ولتی استفاده می‌کرد (GE Research and Chrysler Corporation, ۲۰۲۲). جنرال موتورز یک نمونه اولیه بر اساس پلتفرم خودروی کوچک شوت به نام نسخه برقی الکترودت (Electrovette) توسعه داد (شکل ۱،۱۹). این وسیله نقلیه از یک باتری اکسید نیکل-روی ۲۴۰ ولتی استفاده می‌کرد که در صورت حفظ سرعت ۳۰ مایل در ساعت، برد ۱۱۲ مایلی به آن می‌داد. حداکثر سرعت آن ۶۵ مایل در ساعت بود اما برد رانندگی هنگام رانندگی با سرعت‌های بالا تحت تأثیر قرار می‌گرفت (Adams, ۲۰۲۰).



شکل ۱،۱۸: خودروی نمایشی برقی فورد فیستا. با مجوز شرکت فورد موتور.



شکل ۱،۱۹: جنرال موتورز الکترولیت. با مجوز جنرال موتورز.

### برقی سازی وسایل نقلیه ۱۹۹۰-۲۰۰۰

تا زمانی که وارد دهه ۱۹۹۰ شدیم، تلاش‌های خودروسازان بزرگ بر روی راهکارهای هیبریدی و الکتریکی شروع به نتیجه دادن کرد. به موازات پیشرفت‌های سطح خودرو، اولین سلول‌های باتری لیتیوم-یون تجاری توسط سونی در سال ۱۹۹۱ به بازار معرفی شد و باتری‌های نیکل-متال هیدرید (NiMH) که توسط Ovonic Battery Systems در اوایل دهه ۱۹۸۰ توسعه یافته بودند، در اواسط دهه ۱۹۹۰ تجاری شدند. با گسترش سریع لوازم الکترونیکی شخصی، ارتباطات سیار، کامپیوترهای قابل حمل و خودروهای هیبریدی و الکتریکی، این باتری‌های با چگالی انرژی بالا به راهکار ذخیره‌سازی انرژی منتخب تبدیل شدند. این دو فناوری باتری در تکامل و رشد خودروهای هیبریدی و الکتریکی حیاتی بودند.

یکی از بزرگترین محرک‌ها در ایالات متحده برای تحولات دهه ۱۹۹۰ زمانی رخ داد که کالیفرنیا یک دستورالعمل خودروی با آلایندگی صفر (ZEV) را تصویب کرد که هدف آن گذار تا سال ۲۰۰۰ بود. این یکی از اولین قوانین در ایالات متحده بود که تولیدکنندگان را ملزم می‌کرد وسایل نقلیه‌ای را ارائه دهند که هیچ گونه آلایندگی منتشر نمی‌کنند. اساساً این قانون، معرفی خودروهای الکتریکی و خودروهای پیل سوختی را الزامی کرد. این تکاملی از قانون ZEV قبلی بود که در سال ۱۹۹۰ به عنوان بخشی از برنامه خودروی با آلایندگی کم کالیفرنیا تصویب شده بود و هدف آن شروع به مهار آلودگی هوای رو به رشد در کالیفرنیا بود.

شاید اولین خودروی الکتریکی واقعاً با هدف تولید، جنرال موتورز EV۱ بود (شکل ۱،۲۰). هدف آن یک پلتفرم بهینه‌سازی شده خودرو بود که از پایه به طور کامل برای برقی سازی طراحی شده بود. اولین نسخه‌های این وسیله نقلیه از باتری‌های سرب-اسید استفاده می‌کردند، اما وسایل نقلیه بعدی به NiMH شرکت Ovonic Battery Company روی آوردند که اندازه باتری را حدود ۵۰٪ کاهش داد در حالی که تقریباً همان مقدار ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی را ارائه می‌داد. اولین نسخه سرب-اسید از یک باتری سرب-اسید Delphi با ولتاژ ۳۱۲ ولت / ۱۶،۲ کیلووات-ساعت / ۶۰ آمپر-ساعت استفاده می‌کرد که ۱۱۷۵ پوند وزن داشت و بسته به اینکه در شهر یا بزرگراه رانندگی می‌کردید، برد رانندگی ۷۰ تا ۹۰ مایل را ارائه می‌داد (Keebler, ۱۹۹۶ & Bartlett).



شکل ۱،۲۰: جنرال موتورز EV۱ مدل ۱۹۹۶.

در مدل سال ۱۹۹۹، گزینه باتری سرب-اسید به یک باتری سرب-اسید پاناسونیک با همان ولتاژ تغییر کرد، اما انرژی را به ۳۱۲ ولت / ۱۸،۷ کیلووات-ساعت / ۶۰ آمپر-ساعت افزایش داد و ۱۳۱۰ پوند وزن داشت. در آن زمان یک باتری NiMh تولید شده توسط Ovonics Battery Systems ارائه شد. باتری NiMh ولتاژ و انرژی پک را افزایش داد و به پک باتری ۳۴۳ ولت / ۲۶،۴ کیلووات-ساعت / ۷۷ آمپر-ساعت رسید در حالی که تقریباً ۳۰۰ پوند از وزن پک را با وزن تنها ۱۰۶۰ پوند کاهش داد ([Electricvehiclenews.com](http://Electricvehiclenews.com), ۲۰۲۲). اگرچه تنها ۱۱۱۷ دستگاه در طول دوره تولید آن بین سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۹ تولید شد، این وسیله نقلیه پایه‌ای برای بسیاری از خودروهای الکتریکی بعدی شد و طرفداران متعصبی در میان علاقه‌مندان و پذیرندگان اولیه پیدا کرد. این وسایل نقلیه هنوز برد نسبتاً محدودی بین ۵۵ تا ۷۵ مایل با باتری سرب-اسید Delphi، ۷۵ تا ۱۰۰ مایل با باتری سرب-اسید پاناسونیک و ۷۵ تا ۱۵۰ مایل با باتری NiMh اوانیکس داشتند. همه اینها مسافت پیموده شده شهری هستند. مسافت پیموده شده بزرگراهی این وسیله نقلیه با باتری‌های سرب-اسید به شدت کاهش یافت و در برخی شرایط با باتری‌های سرب-اسید به ۲۸ مایل می‌رسید ([Electricvehiclenews.com](http://Electricvehiclenews.com), ۲۰۲۲).

در اوایل دهه ۱۹۹۰، تویوتا شروع به کار بر روی سیستمی برای هیبریدی کردن خودروهای کوچک خود کرد. مانند تلاش‌های جنرال موتورز با EV۱، تویوتا یک پلتفرم خودروی هیبریدی را از پایه طراحی کرد. سیستم هیبریدی تویوتا (THS) پایه‌ای برای آنچه به پر فروش‌ترین خودروی هیبریدی در بازار، یعنی تویوتا پریوس، تبدیل شده است، تشکیل داد. سیستم هیبریدی تویوتا از یک باتری NiMh خنک‌شونده با هوا با ولتاژ ۲۸۸ ولت و حدود ۱،۷ کیلووات-ساعت انرژی برای بخش ذخیره‌سازی انرژی THS استفاده می‌کرد. بخشی از پذیرش قوی پریوس در بازار ناشی از ظاهر منحصر به فرد و طراحی آیرودینامیکی آن بود. این خودرو به یک وسیله نقلیه نمادین برای افرادی تبدیل شد که سعی در بیان یک موضع زیست‌محیطی یا سیاسی داشتند و به سرعت به استاندارد سیستم‌های هیبریدی با مصرف سوخت بالا تبدیل شد. تویوتا همچنین یک RAV۴ SUV کاملاً الکتریکی توسعه داد که بین سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۰۳ برای اجاره ارائه می‌کرد. بعدها با تسلا برای توسعه نسل دوم RAV۴ الکتریکی همکاری کرد.

در اواخر دهه ۱۹۹۰، هوندا، مدل اینسایت (Insight) را معرفی کرد، یک هیبرید مبتنی بر فناوری کمک موتور یکپارچه (integrated motor assist)، که قبل از تویوتا پریوس در ایالات متحده عرضه شد و اولین خودروی هیبریدی تولیدی موجود در بازار ایالات متحده بود. مانند سایر خودروسازان، اینسایت یک طراحی از پایه با تمرکز عمده بر وزن