

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

تخمین حالت شارژ و حالت سلامت باتری ربات های صنعتی

پرویز علی نژاد حیدری

اساتید راهنما:

دکتر امین حاجی زاده

دکتر علی اکبر زاده کلات

بهمن ۱۳۹۴

تقدیم به

## پدر و مادر مهربانم

به حرمت حضور مومن توست که هنوز فکر می کنم ... که هنوز فکر می کنم  
خدایی هست که تو می پرستیش. به سبب عشق بی پایان توست که هنوز فکر می کنم ...  
حتما عشقی هست که می توان نثار کرد. به خاطر وجود توست که هنوز فکر می کنم ...  
می توان بود و بود و بود.

## تشکر و قدردانی

از زحمات و راهنمایی های ارزنده و دلسوزانه اساتید محترم جناب آقای دکتر امین حاجی زاده و همچنین جناب آقای دکتر علی اکبرزاده کلات در طول انجام این پایان نامه کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

در اینجا لازم است از راهنمایی ها و کمک های دوستان خوبم جناب آقای دکتر رضا قلی پور و دکتر آریا سلیمانی کورنده تشکر و قدردانی نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب پرویز علی نژاد حیدری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی رباتیک دانشکده برق و رباتیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه تخمین حالت شارژ و حالت سلامت باتری ربات های صنعتی تحت راهنمایی دکتر امین حاجی زاده و دکتر علی اکبرزاده کلات متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « **Shahrood University** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ :

امضای دانشجو :

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

امروزه مسائلی از قبیل نگرانی‌های زیست محیطی و محدودیت منابع تجدید ناپذیر، توسعه منابع انرژی، جایگزین سوخت‌های فسیلی را سرعت بخشیده است. در میان گزینه‌های مختلف تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی انرژی، به خوبی درک شده است که سیستم‌های باتری می‌توانند ارائه‌دهنده فرصت‌های با ارزشی باشند که مزیت‌هایی در قابلیت و کارآمدی انرژی دارند، بخصوص برای کاربرد های سیال مثل ربات استفاده می‌شود. با دانستن این حقیقت که باتری‌ها برای تامین کردن نیروی کار بسیاری از مصارف، مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از تلفن‌های سلولی تا وسایل نقلیه، ربات‌ها و غیره نیاز به طراحی سیستم‌های کارآمدتر و مطمئن‌تر مدیریت باتری می‌باشد، سیستم مدیریت انرژی در میان عملکردهای بسیار، نیاز به یک روش برای تخمین حالت شارژ و تعیین حالت سلامت باتری ربات دارد. اطلاعات ولتاژ مدار باز برای مشخص ساختن ویژگی‌های باتری تحت شرایط مختلف بسیار پرکاربرد می‌باشد. این اطلاعات شامل موضوعاتی است که می‌تواند در شناسایی وضعیت شارژ و وضعیت سلامت باتری کمک کند. لازم به ذکر است که اکثر مدل‌های مختلف ولتاژ مدار باز برای تخمین حالت شارژ باتری طراحی شده‌اند، مدل‌های کمکی برای کنترل تدوین شده‌اند. هدف ما ایجاد مدلی منسجم می‌باشد که بتواند هم برای کنترل و هم تخمین بکار رود. پیشرفت‌ها در زمینه تخمین حالت شارژ با استفاده از مدل جدید در مقایسه با مدل‌های موجود دیگر توضیح داده شده است. بعلاوه نشان داده شده است که مدل پیشنهادی می‌تواند برای انجام کنترل هم بکار رود چون اطلاعات طول عمر را به طور کارآمد بر اساس تحلیل فزاینده‌ی ظرفیت دریافت می‌کند. تحلیل پارامتری و کاهش پیچیدگی مدل نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با روش صافی کالمن توسعه یافته برای تخمین حالت شارژ باتری ربات مورد بررسی قرار گرفته و نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: ربات، ولتاژ مدار باز، حالت شارژ، حالت سلامت، صافی کالمن توسعه یافته، آنالیز ظرفیت

افزایشی

## فهرست مطالب

۱ فصل اول	۱
۱ - ۱ مقدمه	۲
۱ - ۲ اهداف تحقیق	۸
۱ - ۳ مروری بر ساختار پایان نامه	۹
۲ فصل دوم. باتری و تخمین شارژ	۱۱
۲ - ۱ مقدمه	۱۲
۲ - ۲ باتری و مفاهیم آن	۱۳
۲ - ۳ انواع باتری ها از نظر شارژ	۱۳
۲ - ۴ اصطلاحات مربوط به باتری	۱۴
۲ - ۵ پتانسیل الکتروشیمیایی	۱۶
۲ - ۶ پدیده خود دشارژی	۱۷
۲ - ۷ باتری نیکل کادمیم	۱۷
۲ - ۷ - ۱ ویژگیهای باتری نیکل کادمیم	۱۸
۲ - ۸ باتری نیکل متال هیدرید	۱۹
۲ - ۸ - ۱ مزایای باتری نیکل هیدرید	۱۹
۲ - ۸ - ۱ - ۱ ظرفیت بالاتر از نیکل متال هیدرید	۱۹
۲ - ۸ - ۱ - ۲ هزینه معقول تر نسبت به نیکل متال هیدرید	۲۰
۲ - ۸ - ۱ - ۳ عدم مشکل اثر حافظه	۲۰
۲ - ۸ - ۱ - ۴ تعداد سیکل شارژ بالا	۲۰
۲ - ۸ - ۲ معایب باتری نیکل متال هیدرید	۲۰
۲ - ۹ باتری لیتیوم یون	۲۰
۲ - ۹ - ۱ جنس الکتروود در باتری لیتیوم یون	۲۱
۲ - ۹ - ۲ عملکرد باتری های لیتیوم یون	۲۲
۲ - ۹ - ۳ کاهش ظرفیت و انفجار باتری	۲۳
۲ - ۹ - ۴ دشارژ باتری لیتیوم یون	۲۴
۲ - ۹ - ۵ بدون حافظه بودن باتری لیتیوم یون	۲۵
۲ - ۹ - ۶ پیشرفت باتری های لیتیوم یون	۲۵



۲۷	۲ - ۱۰ باتری پلیمر لیتیوم یون
۲۷	۲ - ۱۱ باتری سربی اسیدی
۲۸	۲ - ۱۱ - ۱ معادلات شیمیایی درون سلول سربی اسیدی
۲۹	۲ - ۱۱ - ۲ مشخصه های عملکرد باتری سربی اسیدی
۲۹	۲ - ۱۱ - ۲ - ۱ منحنی های شارژ و دشارژ
۳۱	۲ - ۱۱ - ۳ مزایای باتری سرب اسید
۳۱	۲ - ۱۱ - ۴ معایب باتری سرب اسید
32	۲ - ۱۱ - ۵ منحنی تاثیر دما بر ظرفیت
۳۳	۲ - ۱۱ - ۶ منحنی دشارژ خود به خود
۳۴	۲ - ۱۱ - ۷ منحنی مقاومت داخلی باتری
۳۵	۲ - ۱۱ - ۸ اثر پوکرت
۳۶	۲ - ۱۲ تعیین وضعیت شارژ باتریها
۳۷	۲ - ۱۳ پارامترهای باتری
۳۸	۲ - ۱۴ مدل باتری های سربی اسیدی
۴۱	۳ فصل سوم. روشهای تخمین شارژ باتری ربات
۴۲	۳ - ۱ مقدمه
43	۳ - ۲ مشخصات و دسته بندی تخمین حالت شارژ
۴۴	۳ - ۳ مرور کلی بر روشهای ریاضیاتی تخمین SOC
۴۴	۳ - ۳ - ۱ روش اندازه گیری مستقیم
۴۵	۳ - ۳ - ۱ - ۱ روش ولتاژ مدار باز
۴۶	۳ - ۳ - ۱ - ۲ روش ولتاژ ترمینال
۴۶	۳ - ۳ - ۱ - ۳ روش امیدانس
۴۷	۳ - ۳ - ۱ - ۴ روش طیف نمایی امیدانس
۴۷	۳ - ۳ - ۲ روش تخمین Book-Keeping
۴۷	۳ - ۳ - ۱ روش شمارنده کولن
۴۸	۳ - ۳ - ۲ روش شمارنده کولن اصلاح شده
۴۸	۳ - ۳ - ۳ سیستم تطبیقی
۴۹	۳ - ۳ - ۱ الگوریتم پس انتشار BP
۵۱	۳ - ۳ - ۲ شبکه عصبی RBF
۵۱	۳ - ۳ - ۳ روش منطق فازی

۵۲	..... ۳ - ۳ - ۳ - ۴ ماشین برداری حمایت کننده
۵۲	..... ۳ - ۳ - ۳ - ۵ شبکه عصبی فازی
۵۳	..... ۳ - ۳ - ۴ روش های هیبریدی یا ترکیبی
۵۴	..... ۳ - ۳ - ۴ - ۱ ترکیب شمارنده کولن و جبر متحرکه برقی یا EMF
۵۴	..... ۳ - ۴ برآورد حالت شارژ
۵۵	..... ۳ - ۵ برآورد انرژی قابل دسترس
۵۶	..... ۳ - ۶ برآورد حالت سلامت باتری
۵۶	..... ۳ - ۷ طول عمر
58	..... ۳ - ۸ صافی کالمن خطی
۶۵	..... ۳ - ۹ صافی کالمن پیشرفته
68	..... ۳ - ۱۰ نمونه ای از صافی کالمن
۷۳	..... ۳ - ۱۱ نتیجه گیری
۷۵	..... ۴ فصل چهارم. تخمین حالت شارژ باتری ربات با روش صافی کالمن توسعه یافته
۷۶	..... ۴ - ۱ مقدمه
۸۰	..... ۴ - ۲ یک مدل جدید از ولتاژ مدار باز
۸۱	..... ۴ - ۲ - ۱ مدل پارامتری ولتاژ مدار باز
۸۲	..... ۴ - ۲ - ۲ تحلیل و مقایسه مدل
۸۹	..... ۴ - ۳ تخمین حالت شارژ براساس صافی کالمن توسعه یافته
۹۳	..... ۴ - ۴ کنترل وضعیت سلامت براساس تحلیل ظرفیت فزاینده
۹۴	..... ۴ - ۴ - ۱ تحلیل ظرفیت فزاینده در دمای مختلف
۹۵	..... ۴ - ۵ تحلیل پارامتری و ساده سازی مدل
۱۰۱	..... ۵ فصل پنجم. نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۲	..... ۵ - ۱ نتیجه گیری
۱۰۲	..... ۵ - ۲ پیشنهادات
۱۰۴	..... مراجع

## فهرست اشکال

- شکل ( ۱-۲ ) اجزای یک باتری ساده ..... ۱۳
- شکل ( ۲-۲ ) ولتاژ الکتروشیمیایی بعضی عناصر و مواد ..... ۱۷
- شکل ( ۳-۲ ) شماتیکی از ساختار باتری لیتیوم یون ..... ۲۲
- شکل ( ۴-۲ ) شماتیکی از انفجار یک باتری ..... ۲۳
- شکل ( ۵-۲ ) نمودار دشارژ یک باتری لیتیوم یون برحسب جریان ..... ۲۴
- شکل ( ۶-۲ ) مرز بین بخش دشارژ شده یا FP باتری با بخش شارژ شده ..... ۲۶
- شکل ( ۷-۲ ) شماتیکی از یک باتری سربی اسیدی ساده ..... ۲۷
- شکل ( ۸-۲ ) منحنی شارژ و دشارژ یک باتری ..... ۲۹
- شکل ( ۹-۲ ) منحنی دشارژ یک باتری سربی اسیدی با نرخ دشارژ  $0.05c-0.2c$  ..... ۳۰
- شکل ( ۱۰-۲ ) نمودار شارژ باتری سرب اسید در ۷۴ درجه فارانهایت ..... ۳۲
- شکل ( ۱۱-۲ ) منحنی تاثیر دما بر ظرفیت باتری [۵۰] ..... ۳۳
- شکل ( ۱۲-۲ ) منحنی مدت زمان نگهداری باتری سربی اسیدی در حالت بدون استفاده [۵۰] ..... ۳۴
- شکل ( ۱۳-۲ ) منحنی مقاومت داخلی باتری برحسب وضعیت شارژ [۵۱] ..... ۳۵
- شکل ( ۱۴-۲ ) مدار معادل تونن یک باتری سربی اسیدی ..... ۳۹
- شکل ( ۱۵-۲ ) مدل یک باتری سربی اسیدی [۵۴] ..... ۳۹
- شکل ( ۱۶-۲ ) مدل یک باتری سربی اسیدی [۵۴] ..... ۴۰
- شکل ( ۱-۳ ) ارتباط نوعی بین OCV و SOC ..... ۴۵
- شکل ( ۲-۳ ) معماری شبکه عصبی BP برای تخمین حالت شارژ باتری ..... ۵۰
- شکل ( ۳-۳ ) نمودار سیستم خطی زمانی به شکل فضایی-وضعیتی ..... 60
- شکل ( ۴-۳ ) نمودار بروز رسانی وضعیت ..... ۶۴
- شکل ( ۵-۳ ) نمودار سیستم غیرخطی با زمان ناپیوسته به شکل فضایی-وضعیتی ..... ۶۶
- شکل ( ۶-۳ ) مدار خطی ساده ..... 68
- شکل ( ۷-۳ ) مسیر ولتاژ خازن ..... 70

- شکل ( ۳-۸ ) مسیر کوواریانس خطای وضعیت ..... ۷۱
- شکل ( ۳-۹ ) خطا حسگر جریان در مقایسه با جریان سلول ..... ۷۲
- شکل ( ۳-۱۰ ) خطا حسگر ولتاژ در مقایسه با جریان سلول ..... ۷۲
- شکل ( ۴-۱ ) بلوک دیاگرام ساده ای برای الگوریتم مدیریت باتری ریات ..... ۷۷
- شکل ( ۴-۲ ) عملکرد ICA بر روی منحنی ولتاژ شارژ با میزان  $1/20C$  ..... ۷۸
- شکل ( ۴-۳ ) متناسب ساختن نتایج با مدل پیشنهادی OCV ..... ۸۱
- شکل ( ۴-۴ ) مدل OCV که در طول SOC از ۰.۱ تا ۰.۹ هماهنگ شده است ..... ۸۲
- شکل ( ۴-۵ ) برازش منحنی OCV-SOC براساس مدل شماره ۱ ..... ۸۴
- شکل ( ۴-۶ ) برازش منحنی OCV-SOC براساس مدل شماره ۲ ..... ۸۴
- شکل ( ۴-۷ ) برازش منحنی OCV-SOC براساس مدل شماره ۳ ..... ۸۴
- شکل ( ۴-۸ ) برازش منحنی OCV-SOC براساس مدل شماره ۴ ..... ۸۵
- شکل ( ۴-۹ ) برازش منحنی OCV-SOC براساس مدل شماره ۵ ..... ۸۵
- شکل ( ۴-۱۰ ) برازش منحنی OCV-SOC براساس مدل ۶ (مدل پیشنهادی) ..... ۸۵
- شکل ( ۴-۱۱ ) نمودار IC مدل اول ..... ۸۷
- شکل ( ۴-۱۲ ) : نمودار IC مدل دوم ..... ۸۷
- شکل ( ۴-۱۳ ) نمودار IC مدل سوم ..... ۸۸
- شکل ( ۴-۱۴ ) نمودار IC مدل چهارم ..... ۸۸
- شکل ( ۴-۱۵ ) نمودار IC مدل پنجم ..... ۸۸
- شکل ( ۴-۱۶ ) نمودار IC مدل ششم ..... ۸۹
- شکل ( ۴-۱۷ ) اطلاعات باتری تحت برنامه زمانی یک جرثقیل مورد آزمایش ..... ۹۱
- شکل ( ۴-۱۸ ) تخمین حالت شارژ با مدل پیشنهادی ..... ۹۳
- شکل ( ۴-۱۹ ) نمودار V-SOC و IC برای اطلاعات شارژ در  $0.5C$  ..... ۹۴
- شکل ( ۴-۲۰ ) منحنی های اطلاعات IC در دماهای مختلف ..... ۹۵
- شکل ( ۴-۲۱ ) نمودار IC پس از ساده سازی مدل OCV در دمای  $35^{\circ}C$  ..... ۹۷
- شکل ( ۴-۲۲ ) نتایج شناسایی اطلاعات آزمایش باتری یک سلول واحد ..... ۹۹

شکل ( ۴-۲۳ ) هماهنگ سازی یک نمونه بدست آمده از اطلاعات دو سول دیگر با بکارگیری 3 ~ 01 . ۱۰۰

### فهرست جداول

جدول ( ۲-۱ )	مقایسه ای بین باتری های قابل شارژ .....	۲۸
جدول ( ۲-۲ )	ولتاژ پایان دشارژ برحسب جریان دشارژ .....	۳۱
جدول ( ۲-۳ )	چگالی و نقطه انجماد الکترولیت یک باتری سربی اسیدی برحسب وضعیت شارژ [۴۳] .....	۳۵
جدول ( ۳-۱ )	طبقه بندی روشهای ریاضیاتی تخمین SOC .....	۴۴
جدول ( ۳-۲ )	خلاصه ای از صافی کالمن خطی [۷۴] .....	۶۱
جدول ( ۳-۳ )	خلاصه ای از شکل صافی کالمن غیرخطی پیشرفته [۷۶] .....	۶۷
جدول ( ۳-۴ )	پارامترهای بکار رفته در شبیه سازی .....	۷۰
جدول ( ۴-۱ )	برخی از رایج ترین مدل‌های OCV-SOC ارائه شده تاکنون .....	۸۳
جدول ( ۴-۲ )	نتایج مدل های مختلف ولتاژ مدارباز OCV .....	۸۶
جدول ( ۴-۳ )	مقادیر پارامترهای مدل ۵ و ۶ که در تخمین حالت شارژ .....	۹۲
جدول ( ۴-۴ )	مقایسه‌های از دقت هماهنگی میان مدل ساده شده و مدل کامل .....	۹۸
جدول ( ۴-۵ )	پارامترهای مدل OCV ساده شده .....	۹۸

# ۱ فصل اول. مقدمه و پیشینه ی تحقیق

افزایش نگرانی‌ها حول کمبود نفت و مسائل محیط زیست باعث گسترش انرژی‌های جایگزین، به عنوان یک عنصر مهم در انرژی‌های پاک، نقطه بحرانی برای نسل‌های بعدی تکنولوژی توان<sup>۱</sup>/انرژی<sup>۲</sup> می‌باشد و باعث ایجاد راه‌کارهایی برای جایگزین سوخت‌های فسیلی در سال‌های اخیر شده است [۱-۳]. از بین تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی انرژی، سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری، می‌تواند موقعیت‌های بهتری را به واسطه برتری‌هایش در قابلیت حمل و نقل و بازده انرژی بخصوص برای وسایل سیار از جمله ربات<sup>۳</sup>‌ها مهیا سازد [۴]. با توجه به استفاده گسترده از باتری در وسایل مختلف مثل ربات‌ها، خودروهای الکتریکی، تلفن و غیره، به یک سیستم قابل اعتمادتر و موثر برای مدیریت باتری مورد نیاز می‌باشد [۵]. سیستم مدیریت باتری<sup>۴</sup> در میان عملکردهای بسیار دو وظیفه مهم یعنی تخمین حالت شارژ<sup>۵</sup>، و تعیین وضعیت سلامت<sup>۶</sup> دارد [۶،۷]. حالت شارژ<sup>۷</sup> معمولاً به صورت «درصدی از بیشترین شارژ ممکن است که داخل یک باتری قابل شارژ فراهم می‌شود» تعریف می‌شود و تخمین حالت شارژ بعنوان درجه سوخت باتری عمل می‌کند. همچنین، حالت سلامت «مقیاسی» است که منعکس کننده شرایط کلی باتری و قابلیت آن برای ارائه عملکرد ویژه در مقایسه با یک باتری تازه است [۸]. به طور ویژه، تعریف کمی حالت سلامت، یا بر اساس ظرفیت باتری یا مقاومت داخلی آن است که بستگی به کاربردهای خاص آن دارد [۷]. بخاطر نیاز به تخمین کامپیوتری حالت شارژ و حالت سلامت در طول عملکرد سیستم، طراحی یک مدل باتری ساده اما دقیق برای یک BMS موثر و منسجم، امری ضروری محسوب می‌شود. مطالعات بسیاری در زمینه‌ی تخمین حالت شارژ انجام شده است [۹]. اغلب این روش‌ها روش‌های مدل محور هستند و نیاز به یک مدل ولتاژ مدار

---

<sup>1</sup> Power

<sup>2</sup> Energy

<sup>3</sup> Robot

<sup>4</sup> Battery Management System(BMS)

<sup>5</sup> State Of Charge Estimate

<sup>6</sup> State Of Health(SOH)

<sup>7</sup> State Of Charge(SOC)

باز<sup>۱</sup> (OCV) دارند که ولتاژ مدار باز را به حالت شارژ مرتبط می سازد [۹-۱۱]. عملیات OCV-SOC در BMS بصورت یک جدول ارجاع یا یک عبارت تحلیلی انجام شده است، و این در حالی می باشد که رویه دوم دارای چندین مزایا مانند کارآیی محاسباتی و همچنین متناسب برای تحلیل می باشد. بخاطر محدوده مسطح بسیار در منحنی OCV-SOC برای باتری های فسفاتی یون لیتیومی، یک ناهماهنگی کوچک در متناسب سازی OCV می تواند موجب انحراف زیادی در تخمین SOC شود.

در مرجع [۱۲]، چندین مدل ولتاژ مدار باز که با متناسب سازی منحنی بدون در نظر گرفتن عملکرد پیچیده باتری در طول روند افزایش/کاهش یون لیتیومی ساخته می شوند، به طور خلاصه ارائه شده اند [۱۳، ۱]. اگرچه این مدل ها قسمتی از ویژگی های غیرخطی<sup>۲</sup> OCV باتری را نشان می دهند اما قادر به دریافت تثبیت و انتقالات ولتاژ که مطابق با پدیده مرحله بندی در آند گرافیتی می باشد، نیستند [۱۸-۱۴، ۷]. مدلسازی عملکرد OCV-SOC هنگام کنترل حالت سلامت باتری نیز ضروری می باشد، زیرا غالباً اطلاعات OCV طول عمر باتری و تجزیه عملکردی آن را منعکس می سازد [۱۹]. بخصوص با متمایز ساختن ظرفیت شارژ شده باتری (Q) با توجه به ولتاژ نهایی (V)، تثبیت ولتاژ بر روی منحنی OCV به پیک های کاملاً قابل شناسایی<sup>۳</sup>  $dQ/dV$  بر روی منحنی آنالیز ظرفیت فزاینده<sup>۳</sup> تغییر یافته است [۱۸-۱۴، ۷].

در این تحقیق ما یک روش یک پارچه از مدل OCV-SOC که برای تخمین حالت شارژ و مشاهده حالت سلامت باتری استفاده می شود را ارائه می دهیم. مطالعات برپایه تست عمر باتری ربات که از  $\text{LiFePO}_4$  برای قطب مثبت و از گرافیت برای قطب منفی استفاده می کنند انجام شده است [۲۱، ۷].

تخمین حالت شارژ یک باتری، برای توصیف باقیمانده ی ظرفیت باتری استفاده می شود و این یک پارامتر مهم برای استراتژی کنترل می باشد که منعکس کننده عملکرد باتری می باشد [۲۲].

<sup>1</sup> Open Circuit Voltage (OCV)

<sup>2</sup> Non Liner

<sup>3</sup> Increase Capacity Analyse (ICA)



بنابراین تخمین دقیق حالت شارژ فقط برای محافظت از باتری می باشد و همچنین از تخلیه بیش از حد آن جلوگیری می کند و نفس باتری را هم بهبود می بخشد لذا کاربرد آن این اجازه را به ما می دهد که استراتژی های کنترل معقولی را برای ذخیره سازی باتری بکار ببریم [۲۳]. اگرچه یک باتری منبع ذخیره سازی انرژی شیمیایی می باشد و این انرژی شیمیایی مستقیماً در دسترس نمی تواند باشد بنابراین این موضوع، تخمین از طریق SOC برای باتری های مختلف را می طلبد [۲۴]. تخمین درست و دقیق از این طریق خیلی پیچیده می باشد و به ابزارهای مختلفی نیاز دارد چون که مدل های باتری محدود نیستند و خطای تخمین<sup>۱</sup> پارامتری وجود دارد. تحقیقات و مطالعات زیادی در زمینه تخمین حالت شارژ باتری ها صورت گرفته است [۲۵].

روش اندازه گیری مستقیم، که به ویژگی های فیزیکی باتری از جمله ولتاژ ترمینال و امپدانس اشاره دارد که خود این روش متنوع بوده و به چند دسته تقسیم می شوند، از جمله روش ولتاژ مدار باز، روش ولتاژ ترمینال، روش اندازه گیری امپدانس<sup>۲</sup> و روش طیف نمایی امپدانس می باشد. در روش ولتاژ مدار باز، ارتباط بین حالت شارژ باتری های سربی اسیدی و ولتاژ مدار باز یک تقریب خطی زده می شود که در مرجع [۲۶] بیان شده است.

در مرجع [۲۷] روش ولتاژ ترمینال بر پایه ی افت ولتاژ ترمینال می باشد زیرا از امپدانس داخلی زمانی که باتری در حال تخلیه می باشد استفاده می کند. یکی دیگر از روش ها که در مرجع [۲۸، ۲۹] توضیح داده شده روش امپدانس می باشد که از جمله تکنیک هایی می باشد که وظیفه اش اندازه گیری امپدانس و تهیه کردن شناسایی چندین پارامتر می باشد که اهمیت آن منوط به SOC باتری است.

روش تخمین book\_Keeping از داده جریان تخلیه باتری که از ورودی می آید استفاده می کند، این روش اثرات داخلی باتری مثل تخلیه خود به خودی، از دست دادن ظرفیت و اثرات تخلیه

---

<sup>1</sup> Estimation Error

<sup>2</sup> Impedance

را نادیده می‌گیرد [۳۰].

یکی دیگر از روش‌ها برای تخمین حالت شارژ روش شمارنده‌ی کولن<sup>۱</sup> می‌باشد، در این روش جریان تخلیه از یک باتری اندازه‌گیری شده و سپس برای مرتب‌سازی تخمین  $SOC(t)$ ، در همه‌ی زمان‌ها از جریان تخلیه‌ی انتگرال گرفته می‌شود [۳۰].

روش شمارنده‌ی کولن اصلاح شده<sup>۲</sup>، بهبود یافته‌ی روش شمارنده‌ی کولن بوده و یک تکنیک جدید در تخمین حالت شارژ می‌باشد، در این روش از جریان تصحیح شده استفاده می‌شود تا صحت یا درستی تخمین را بهبود ببخشد [۳۱].

اخیرا با توسعه روش هوش مصنوعی<sup>۳</sup> سیستم‌های تطبیقی<sup>۴</sup> جدید گوناگونی برای تخمین حالت شارژ توسعه یافته است، روش‌های توسعه یافته‌ی جدید شامل شبکه عصبی<sup>۵</sup>، تابع پایه‌ای شعاعی، شبکه‌های عصبی فازی و صافی کالمن می‌باشد [۲۴]. الگوریتم پس انتشار BP تخمین درست SOC را پاسخ می‌دهد و توانایی خوبی در نگاشت غیرخطی خود سازماندهی شده و خودیادگیری دارد [۳۱].

روش شبکه عصبی RBF برای تخمین حالت شارژ مورد استفاده قرار گرفته است، این روش با داده‌هایی که از آزمایش کردن باتری بدست آمده، تست کرده بوده و نتایج نشان می‌دهد که سرعت عملکرد و دقت تخمین مدل می‌تواند مطابق با شرایط درخواست‌ها در آزمایشات باشد و همچنین مدل نیز مسلماً ارزش کاربردی خاص خود را دارد [۳۳، ۳۴].

یکی دیگر از روش‌های تخمین حالت شارژ باتری روش منطق فازی می‌باشد که در مرجع [۳۵] آمده است، روش منطق فازی برای سیستم‌های پیچیده و مدل غیر خطی توانایی قدرتمندی دارد، در مرجع [۳۶] روش کاربردی تخمین حالت شارژ برای سیستم باتری توسعه داده شده و برای

<sup>1</sup> Coulomb Counting Method

<sup>2</sup> Modified Coulomb Counting Method

<sup>3</sup> Artificial Intelligence

<sup>4</sup> Adaptive System

<sup>5</sup> Neural Network

چندین سیستم امتحان شده است.

روش ماشین بردار پشتیبان<sup>۱</sup>، برای دسته بندی در حیطه های گوناگون با تشخیص الگو عمل تخمین شارژ را انجام می دهد، هانسن و وانگ بطور کاربردی برای تخمین حالت شارژ باتری لیتیوم یون تحقیق کرده اند، این روش تخمین زنده ای است که مشکل تخمین زنده ای حالت شارژ شمارنده ی کولن را از بین نبرده است، اما این روش تخمین درست و دقیقی را ارائه داده است [۳۷].

روش دیگری که در تخمین حالت شارژ باتری ربات ها بکار می رود روش شبکه عصبی فازی<sup>۲</sup> می باشد، این روش در یک سری کاربرد های خاص از جمله در تعیین هویت سیستم های نامعلوم مورد استفاده قرار می گرفت، در تعیین هویت سیستم های غیرخطی، شبکه عصبی فازی بطور مؤثر شایسته ی سیستم های غیرخطی با محاسبه ی ضریب تاثیر بهینه ی ماشین های یادگیری<sup>۳</sup> می باشد [۳۸].

روش صافی کالمن<sup>۴</sup> نیز برای تخمین حالت شارژ باتری ربات ها به نتایج قابل اعتماد و موثری دست یافته است، در مرجع [۳۹] کاربرد روش صافی کالمن برای تخمین SOC بصورت زمان واقعی<sup>۵</sup> با قابلیت بازبینی مجدد که برای باتری های ربات ها تهیه شده، نشان داده شده است. یاتسیو و بای<sup>۶</sup>، یک صافی کالمن را که بر اساس تخمین حالت شارژ برای باتری های لیتیوم یون<sup>۷</sup> پایه ریزی شده اند معرفی نمودند.

تاریخچه ی تخمین حالت شارژ باتری ربات نشان می دهد که عموماً روش های هیبرید<sup>۸</sup> یا روش های ترکیبی نتایج تخمین SOC خوبی را در مقایسه با روش های اختصاصی ارائه می دهند، روش های هیبریدی با روش های مختلف دیگر از جمله روش اندازه گیری مستقیم و روش تخمین

---

<sup>1</sup> Support Vector Machine

<sup>2</sup> Fuzzy Neural Network

<sup>3</sup> Machine Learning

<sup>4</sup> Kalman Filter

<sup>5</sup> Real Time

<sup>6</sup> Yatsui and bai

<sup>7</sup> Lithium-ion Battery

<sup>8</sup> Hybrid Methods

book\_keeping ترکیب می‌شوند [۴۰-۴۲].

روش جدیدی در زمینه تخمین حالت شارژ باتری ربات‌ها ارائه شده است که از ترکیب کردن روش اندازه‌گیری مستقیم با اندازه‌گیری  $EMF^1$  باتری در طول حالت تعادل و تخمین نگهداری Book عمل تخمین شارژ را انجام می‌دهد، هیچ وقت باتری‌ها ظرفیتشان را در طول یک دوره از دست نمی‌دهند لذا شمارنده کولن در طول زمان تخلیه توسعه می‌یابد و ابزاری مناسب در یک سیستم زمان واقعی می‌باشد [۴۰].

وانگ<sup>۲</sup> نیز در مرجع [۴۱] یک روش جدیدی را پیشنهاد کرده است، این روش صافی کالمن و شمارنده کولن را ترکیب می‌کند که صافی کالمن برای بدست آوردن مقادیر اولیه در روش شمارنده کولن بکار می‌رود نتایج نشان می‌دهد که کالمن مقادیر اولیه را بدرستی و با دقت بالایی انتخاب می‌کند ولی در روش کالمن AH، روش صافی کالمن یک مقدار اولیه‌ی تقریبی همگرا به مقدار واقعی ایجاد می‌کند. سپس شمارنده‌ی کولن برای تخمین SOC در مدت زمان طولانی اعمال می‌شود.

در روشی دیگر این دو نفر یعنی آقایان کیم و چو<sup>۳</sup> با بکار بردن ترکیبی از صافی کالمن پیشرفته با یک سیستم پیش‌واحد<sup>۴</sup> توانستند به توصیف شناسایی پارامترهای مدل باتری سالم برای تخمینی با دقت بالا، از یک باتری فرسوده لیتیوم یون پردازند [۴۲].

برای بدست آوردن اطلاعات دقیق در مورد حالت شارژ معمولاً از حسگر<sup>۵</sup>هایی با دقت بالا استفاده می‌کنند که این حسگر به شمارش تعداد کولن‌های باتری می‌پردازد و اطلاعات بدست آمده بسیار دقیق می‌باشد، به این روش که به شمارش کولن‌ها می‌پردازد تخمین اولیه و دقیق گفته می‌شود، شایان ذکر است که در هنگام کار سیستم نمی‌توان از این روش استفاده کرد لذا نیاز به

---

<sup>1</sup> Electro Motive Force

<sup>2</sup> Wang

<sup>3</sup> Kim and Cho

<sup>4</sup> Per-Unit System

<sup>5</sup> Sensor

تخمین حالت شارژ باتری داریم که در این تحقیق از صافی کالمن پیشرفته<sup>۱</sup> برای این کار استفاده می‌کنیم لذا در فصل سوم به معرفی کامل صافی کالمن و همچنین صافی کالمن پیشرفته می‌پردازیم و بصورت مفصل در مورد آن توضیح خواهیم داد.

## ۱ - ۲ اهداف تحقیق

موضوع این پایان نامه تخمین حالت شارژ و حالت سلامت باتری ربات های صنعتی<sup>۲</sup> با استفاده از صافی کالمن توسعه یافته می باشد. در این پایان نامه ما یک مدل جدید پارامتری ولتاژ مدار باز ارائه می دهیم، پارامتری ساز مخصوص، پدیده‌ی سطح بندی را در طول مراحل پر شدن/خالی<sup>۳</sup> شدن باتری لیتیوم یون توصیف می‌کند. مدل پارامتری جدید که با صافی کالمن توسعه یافته به کار بسته شده است برای تخمین حالت شارژ استفاده می‌شود. از صافی کالمن توسعه یافته برای شرح چگونگی پیاده سازی مدل جدید ولتاژ مدار باز برای تخمین حالت شارژ باتری استفاده می‌شود. اطلاعاتی که برای حالت شارژ و سلامت باتری بدست آمده، از شمارش تعداد کولن ها بوده که از حسگر هایی با دقت بالا استفاده می‌شود که اطلاعات آن را می توان درست در نظر گرفت و به عنوان منبعی برای ارزیابی کارایی از آن استفاده کرد [۷،۱۴،۱۶].

مدل پارامتری می تواند برای آنالیز ظرفیت افزایشی<sup>۴</sup> بر پایه نظارت نیز استفاده شود. با مقایسه منحنی های آنالیز ظرفیت افزایشی مدل، صلاحیتش برای نشان دادن اتفاقات الکتروشیمیایی در دماهای مختلف کاری و در مراحل مختلف فرسودگی باتری نشان داده شده است. غیر از این، با آنالیز پارامتری می توانیم ساختار مدل را ساده سازی کنیم و یک تابع بوجود آوریم که ارتباط بین پارامتری های مدل و کاهش کارایی باتری را توصیف می‌کند و به ما اجازه می دهد که مقدار حالت سلامت و

---

<sup>1</sup> Extended Kalman Filter

<sup>2</sup> Industrial Robot

<sup>3</sup> Charge/Discharge

<sup>4</sup> Increase Capacity Analyse(ICA)

تخمین فرسایش ظرفیت باتری را فقط با استفاده از پارامترهای مدل بیان کنیم. تحقیقات آینده روی گسترش الگوریتم های موثرتر برای تعیین پارامترهای مدل ولتاژ مدار باز تمرکز خواهد کرد.

### ۱ - ۳ مروری بر ساختار پایان نامه

فصل های دیگر پایان نامه به ترتیب زیر تنظیم شده اند:

در فصل دوم، مفاهیم اولیه در مورد باتری و شارژ باتری ربات و تخمین شارژ و اصطلاحات مربوط به آن را توضیح خواهیم داد و همچنین یک مرور کلی در مورد انواع باتری های ربات و مدل های مختلف آنها خواهیم داشت.

در فصل سوم در مورد روش های مختلف تخمین حالت شارژ و حالت سلامت باتری بحث خواهیم کرد و همچنین در آخر فصل سوم در مورد روش صافی کالمن و صافی کالمن پیشرفته در تخمین حالت شارژ بحث خواهیم کرد و در مورد اینکه کاربرد این روش ها در تخمین شارژ باتری ربات به چه شکلی خواهد بود، اشاره خواهیم داشت، و یک بررسی کلی بر روی تخمین حالت شارژ باتری تحت شرایط تخلیه مختلف و همچنین در مورد چهار دسته از روش های ریاضیاتی تخمین<sup>۱</sup>، که در مورد ویژگی های آن نیز بحث می شود اشاره خواهیم کرد. نا گفته نماند که در واقع ارزیابی عملکرد روش های متنوع تخمین حالت شارژ و سلامت باتری کار دشواری می باشد، به عنوان مثال برنامه های کاربردی موجود که از اهمیت زیادی در تخمین حالت شارژ برخوردار می باشد در شرایط تخلیه متنوع و اندازه های مختلف باتری های ربات مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار می گیرند.

در فصل چهار روش پیشنهادی ما که یک مدل ولتاژ مدار باز برای تخمین حالت شارژ باتری ربات می باشد شبیه سازی می شود و خروجی های بدست آمده از این شبیه سازی مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد و با دیگر مدل های قبلی که ارائه شده بود مقایسه می شود و نتایج حاکی از آن

---

<sup>1</sup> Estimating Mathematical Methods

است که مدل پیشنهادی بهتر از مدل های قبل دیگر می باشد و بعد از آن با استفاده از صافی کالمن پیشرفته یک تخمین خوب از حالت شارژ باتری خواهیم داشت و نهایتاً در فصل پنجم، نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات ارائه می شود.

شبیه سازی انجام شده با استفاده از نرم افزار متلب<sup>۱</sup> می باشد.

---

<sup>۱</sup> Matlab Software

## ۲ فصل دوم. باتری و تخمین شارژ



حدود دو قرن پیش در سال ۱۷۸۹ شخصی به نام گالوانی<sup>۱</sup> منبع ذخیره سازی الکتریسیته را به جهانیان معرفی نمود. سه سال بعد شخصی به نام ولتا<sup>۲</sup> بر اساس تحقیقات گالوانی تکنولوژی باتری های قابل حمل را ارائه داد [۴۳]. از سال ۱۸۰۰ به بعد پیشرفت زیادی در زمینه باتری ها صورت گرفت اما اولین باتری های قابل شارژ سرب اسید که امروزه نیز در خودروها و ربات ها از آن ها استفاده می شود در سال ۱۸۵۹ ساخته شد. تحول بعدی در باتری های قابل شارژ در سال ۱۹۶۰ با ساخت باتری های نیکل-کادمیم رخ داد اما این باتری ها نیز در سال ۱۹۹۰ جای خود را به باتری های جدید نیکل-هیدرید فلز دادند. چرخه پیشرفت باتری ها با اختراع اولین باتری های لیتیم-یون در سال ۱۹۹۱ و باتری های پلیمر-لیتیم یون در سال ۱۹۹۹ کامل گردید. در عصر حاضر، صنعت الکترونیک و رباتیک پیشرفت چشمگیری نموده است و به دلیل گسترش ارتباطات و فناوری اطلاعات وسایل الکترونیکی و مکانیکی همچون انواع ربات ها، خودروهای الکتریکی، خودروهای الکتریکی هیبریدی، گوشی های تلفن همراه، لب تاپ ها و ... توسعه یافته اند. تأمین انرژی به صورت آسان و مطلوب برای توسعه این وسایل یک ضرورت مهم و انکارناپذیر است و این تا به حدی است که می توان باتری را قلب وسایل الکترونیک قابل حمل دانست. با توجه به موارد ذکر شده در بالا تحقیقات وسیعی در زمینه باتری ها در مراکز تحقیقاتی دنیا صورت می پذیرد که باعث پیشرفت بسیار سریع باتری های قابل شارژ در چند دهه اخیر شده است. امروزه باتری ها در زندگی روزمره چنان نقشی پیدا کرده اند که به جرأت می توان گفت بدون آنها، زندگی با ساده ترین وسیله ذخیره سازی انرژی الکتریکی ممکن نیست و کاربرد های وسیعی در صنایع مختلف پیدا کرده است. نیاز روزافزون نسبت به آن باعث شده تا تلاش به منظور بهبود کیفیت و افزایش بهره وری از آن ادامه داشته باشد. باتری ها به عنوان بخشی اساسی در زندگی روزمره و صنعت کاربرد پیدا کرده اند. از مهمترین کاربرد باتری ها می توان به موارد تامین انرژی ربات ها، لوازم و تجهیزات خانگی همچون تلفن های همراه، کامپیوتر های شخصی قابل

---

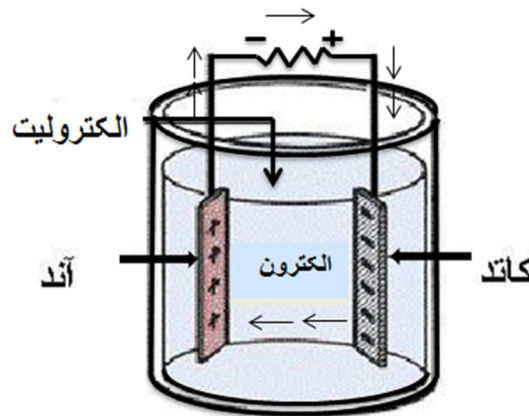
<sup>1</sup> Galvane

<sup>2</sup> Volta

حمل، دوربین و تجهیزات عکاسی و فیلمبرداری، تجهیزات روشنایی و انواع اسباب بازی ها و وسایل سرگرمی و تفریحی که نیازمند منبع تغذیه هستند اشاره کرد. در حال حاضر در سال های اخیر با به کارگیری نانوذرات مختلف در این باتری ها بازده آن ها به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش یافته است. باتری های لیتیوم یون در نوک قله این پیشرفت ها قرار دارند؛ بطوری که در اغلب وسایل الکترونیکی امروزی از باتری های لیتیوم- یون استفاده می شود و گروه های تحقیقاتی زیادی در سراسر دنیا در حال تحقیق جهت بهبود عملکرد این نوع باتری ها هستند.

## ۲ - ۲ باتری و مفاهیم آن

باتری ها مولدهایی هستند که انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. باتری ها معمولاً از کنار هم قرار دادن حداقل دو صفحه فلزی (یا آلیاژی) متفاوت در داخل یک محلول شیمیایی بوجود می آیند. یکی از این دو صفحه دارای خاصیت الکترون دهی (آند) و دیگری دارای خاصیت الکترون گیری (کاتد) می باشد. محلول شیمیایی که باعث ارتباط بین این دو صفحه می گردد الکترولیت نامیده می شود.



شکل (۱-۲) اجزای یک باتری ساده

## ۲ - ۳ انواع باتری ها از نظر شارژ

از آنجایی که باتری ها از نظر ساختار درونی با هم متفاوت می باشند نحوه شارژ شدن آنها نیز با هم تفاوت دارند لذا باتری ها را از نظر شارژ به دو دسته زیر تقسیم می نمایند:

**باتری های اولیه:** باتری هایی که در پایان فرآیند دشارژ عمر باتری به پایان رسیده و قابلیت شارژ مجدد نیز نخواهند داشت، به این باتری ها باتری های اولیه گفته می شود مانند باتری های لیتیومی اولیه، آلکالین (قلیایی) و روی دی اکسید منگنز.

**باتری های ثانویه:** این باتری ها بر خلاف باتری های اولیه با عبور جریان در جهت مخالف جریان دشارژ، مجددا شارژ خواهند شد و قابلیت استفاده مجدد خواهند داشت مانند باتری های سربی، اسیدی، نیکل کادمیم، هیدرید نیکل فلز، لیتیوم پلیمر و لیتیوم یون، نامگذاری باتری های ثانویه بر اساس جنس الکترولیت و صفحات کاتد و آند آنها انجام می شود.

## ۲ - ۴ اصطلاحات مربوط به باتری

در این بخش برای آشنایی بیشتر با باتری یک توضیح مختصر در مورد اصطلاحات معمول و رایج آنها بیان شده است.

- **سلول<sup>۱</sup>:** یک سلول شامل تعدادی صفحات باردار مثبت و منفی غوطه ور در یک الکترولیت است که به وسیله یک واکنش شیمیایی بار الکتریکی تولید می کند.

- **باتری:** از اتصال سری تعدادی سلول به یکدیگر ایجاد می شود.

- **ظرفیت باتری<sup>۲</sup>:** ظرفیت اسمی باتری  $C_n$ ، ظرفیت تخلیه آن باتری برای مدت زمان مشخص  $T_n$  با شدت جریان  $I_n$  است؛ طوریکه ولتاژ نهایی پس از تخلیه از حد معینی کمتر نشود و تخلیه با سطوح نامی و چگالی نامی الکترولیت و در درجه حرارت نامی انجام شود. در این صورت ظرفیت باتری برابر با رابطه (۱-۲) می شود.

اگر جریان بر حسب آمپر (A) و زمان بر حسب ساعت (h) محاسبه گردد ظرفیت باتری بر حسب آمپر ساعت (Ah) خواهد شد.

$$C_n = I_n \times T_n \quad (1-2)$$

<sup>1</sup> Cell

<sup>2</sup> Battery Capacity

**-ولتاژ نهایی تخلیه:** ولتاژ نهایی تخلیه مقدار است که ولتاژ باتری نباید به ازاء جریان تخلیه

مشخصی از آن کمتر شود.

**-وضعیت شارژ:** عموماً به صورت " درصدی از حداکثر شارژ ممکن موجود در یک باتری قابل

شارژ" و تخمین SOC به صورت تعیین مقدار سوخت باتری تعریف می‌شود، و به صورت ظرفیت شارژ

شده باتری به ظرفیت نامی آن تعریف می‌گردد و توسط رابطه (۲-۲) بیان می‌شود. در این رابطه  $SOC_0$

وضعیت شارژ اولیه باتری،  $C_n$  ظرفیت نامی باتری،  $I_b$  جریان باتری و  $t_c$  زمان شارژ کامل و ۱۰۰٪

نشان دهنده شارژ کامل باتری است [۴۵].

$$SOC = SOC_0 + \left( \frac{1}{C_n} \int_0^{t_c} I_b(z) dz \right) \times 100\% \quad (2-2)$$

**-وضعیت سلامت باتری:** مقیاسی برای نشان دادن وضعیت کلی باتری و توانایی اش برای

تحويل کارایی مورد نظر در مقایسه با یک باتری نو می باشد، به طور کلی تعریف دقیق SOH بر

اساس گنجایش باتری یا دوام آن، بسته به نوع وسیله‌ای مشخص است. به خاطر اهمیت نیاز به

تخمین SOH به صورت آنلاین<sup>۱</sup> یا در هنگام کار سیستم، ساخت یک مدل ساده اما دقیق از باتری

بسیار مهم است.

**- سیستم مدیریت باتری:** با توجه به استفاده گسترده از باتری در وسایل مختلف مثل تلفن و

خودروهای الکتریکی، به یک سیستم های قابل اعتمادتر و موثرتر برای مدیریت باتری مورد نیاز می

باشد، که در واقع به تعیین وضعیت شارژ باتری و سلامت باتری در هنگام کار یک سیستم بصورت

آنلاین مثل ربات های فزانورد و خودروهای الکتریکی می پردازد که در این پایان نامه هم به این

موضوع پرداخته ایم و توضیحات آن را به تفصیل در فصل های بعدی بیان می نمایم.

---

<sup>1</sup> Online

- **عمق دشارژ:** به بیان ساده به صورت ظرفیت دشارژ شده باتری به ظرفیت نامی آن تعریف می‌گردد و به صورت رابطه (۳-۲) نشان داده می‌شود. به عبارت دقیق تر  $DOD^1$  برابر با حاصل تقسیم ظرفیت تحویل داده شده توسط باتری بر ظرفیت نامی است. در واقع باتری‌ها در شرایط متفاوت مثلاً در دماهای مختلف، به مرور زمان عملکرد دشارژ آنها متفاوت خواهد بود به همین دلیل با تعریف عمق دشارژ می‌توانیم عملکرد دشارژ باتری را در هر دفعه محاسبه کنیم.  $t_d$  زمان دشارژ باتری می‌باشد. می‌توان گفت  $DOD$ ، ۰٪ بیان کننده شارژ کامل و ۱۰۰٪ بیان کننده دشارژ کامل باتری است [۴۵].

$$DOD = \left( \frac{1}{C_n} \int_0^{t_d} I_n(z) dz \right) \times \%100 = (1 - SOC) \times \%100 \quad (3-2)$$

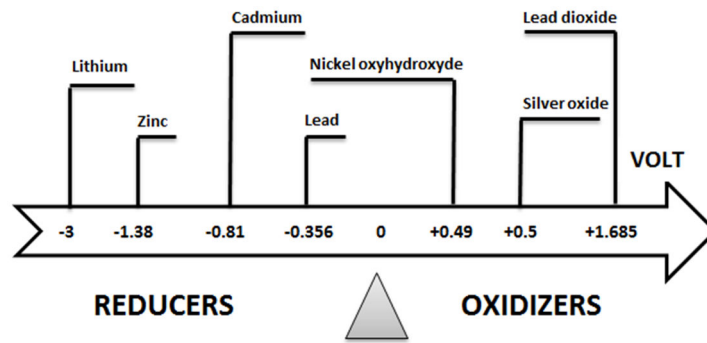
## ۲ - ۵ پتانسیل الکتروشیمیایی

ولتاژ هر باتری تابعی از جنس فلزات آند و کاتد آن می‌باشد. در واقع هنگام واکنش شیمیایی و جدا شدن و حرکت الکترون‌ها، یک اختلاف پتانسیلی بین دهنده و گیرنده بوجود می‌آید که این اختلاف پتانسیل ولتاژ باتری را سبب می‌شود. در علم شیمی یک شاخه به نام الکتروشیمی<sup>۲</sup> به محاسبه همین پتانسیل‌ها می‌پردازد. مبنای محاسبه ولتاژ باتری‌ها، پتانسیل اکسید هیدروژن ( $OH^3$ ) می‌باشد. در شکل (۲-۲) پتانسیل الکتروشیمیایی چندین اکسنده و کاهنده آورده شده است. در هر سلول شیمیایی، پتانسیل سلول از اختلاف ولتاژ بین اکسنده و کاهنده آن سلول حاصل می‌شود. ابعاد باتری تاثیری در ولتاژ سلول آن ندارد، اما ظرفیت باتری تابعی از تعداد صفحات، مساحت صفحات و حجم باتری است.

<sup>1</sup> Depth of Discharge

<sup>2</sup> Electro Chemical

<sup>3</sup> Oxide Hidrotion



شکل (۲-۲) ولتاژ الکترو شیمیایی بعضی عناصر و مواد [44]

## ۲ - ۶ پدیده خود دشارژی<sup>۱</sup>

حتی در صورتی که هر یک از باتری ها به مدار متصل نباشند، بعد از گذشت مدت زمانی دشارژ می شوند، به این پدیده خود دشارژی می گویند. سرعت این پدیده در باتری های نیکل کادمیم چندین برابر باتری های سربی اسیدی است. باتری نیکل کادمیم بسته به آلیاژ مورد استفاده در ساختارش و همچنین دمای محیط، حتی امکان دارد که روزانه ۱ درصد از ظرفیتشان را از دست بدهند. این مساله نیاز به شارژ مجدد باتری در هنگام استفاده و همچنین اتلاف انرژی را سبب می شود.

## ۲ - ۷ باتری نیکل کادمیم

در سال ۱۸۹۹ توسط یک مخترع سوئدی به نام والدمار جانگنر<sup>۲</sup> ابداع گردید. تمایل چندانی به استفاده از این باتری ها در صنایع تا اوایل دهه ۱۹۶۰ وجود نداشت ولی پس از آن و با افزایش چشمگیر مصارف الکتریکی بویژه در آمریکا و ژاپن طرفدار پیدا کرد.

سلول های نیکل کادمیم در دو نوع استوانه ای و دکمه ای ساخته و عرضه می شوند که در زیر به بعضی تفاوت های آن ها اشاره می کنیم:

سلول های دکمه ای همواره از یک یا دو جفت صفحه ای گرد که توسط ماده خلیل داری عایق شده اند تشکیل می شوند. خود این صفحات با فشردن ماده ای خمیری فعال در یک فلز مشبک تهیه می شوند. در باتری های نوع استوانه ای از ورقه های نرمی استفاده شده که می توان آن ها را به دور

<sup>1</sup> Self Discharge

<sup>2</sup> Valdmarr Jongener

هم پیچید. این ورقه ها از زینتر کردن پودر نیکل بر روی پایه‌ای از جنس نیکل ساخته می‌شوند. عایق بین صفحات از نوعی ماده متخلخل است. زینتر کردن روشی در عملیات حرارتی در متالوژی فلزات است. در هر دو گونه، باتری ها کلا ورقه‌ای از جنس نایلون پوشیده شده و نفوذ پذیر می‌شوند.

باتری نیکل کادمیم با سرعت بالایی شارژ می‌شوند و می‌توانند طول عمر خوبی داشته باشند (با بیش از هزار چرخه شارژ و دشارژ). باتری های نیکل کادمیم از اثر حافظه برخوردارند، یعنی در طی شارژهای متوالی به تدریج انرژی کمتری را بعد از هر شارژ ذخیره می‌کنند و کارایی باتری کمتر می‌گردد. برای جلوگیری از اثر حافظه، قبل از شارژ این باتری ها، باید آنها را بطور کامل دشارژ کرد. بعضی از شارژرهای باتری های نیکل کادمیم دارای مداری برای دشارژ کردن باتری، پیش از شارژ کردن آنها هستند. بسیاری از سازندگان این نوع باتریها سه بار چرخه شارژ/دشارژ را پیش از آنکه باتری به حالت بهینه خود برسد توصیه می‌کنند. شاید در دسترس ترین و مرسوم ترین باتری قابل شارژ، این نوع باتری ها باشند. این باتری ها تقریبا تا ۷۰۰ بار شارژ و استفاده را جواب می‌دهند. باتری های نیکل کادمیم باید حداقل هفته‌ای یک بار شارژ کامل شوند، چون در غیر این صورت روزانه ۱٪ از ظرفیت آنها کم می‌شود. از اینرو این نوع باتری ها در وسایلی که بطور دائم استفاده می‌شوند کاربرد دارند. ظرفیت های نیکل کادمیم معمولا در حدود میلی آمپر ساعت می باشد. باتری های نیکل کادمیم می‌توانند در عرض ۱ تا ۲ ساعت شارژ شوند. این باتری ها دارای ماده سمی کادمیم هستند [۴۴].

## ۲ - ۷ - ۱ ویژگی های باتری نیکل کادمیم

۱. طول عمر بسیار بالا
۲. مقاومت بسیار زیاد در برابر تاثیرات الکتریکی و مکانیکی مخرب
۳. مقدار دشارژ خودبخودی بسیار پایین
۴. مقدار مقاومت داخلی بسیار پایین
۵. قابلیت شارژ و دشارژ بیش از ۶۰۰ بار

۶. قابلیت تامین جریان ۵۰۰ میلی آمپر ساعت و یا بیشتر

۷. تامین شدت جریان چند آمپری نسبتا بالا

۸. محدوده کاربرد وسیع و مناسب ( از ۴۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد)

## ۲ - ۸ باتری نیکل متال هیدرید

انواع NiMH به دلایل مزایای آشکار، به سرعت در حال گسترش و جایگزینی با انواع قدیمی تر NiCd می باشد. انواع LiIon که دارای بهترین نسبت کارایی به وزن می باشد، به دلیل گران بودن در ربات های مسیر یاب که قرار است مسیر زیادی را طی کند مناسب می باشد. ولتاژ باتری های سیلندری شکل عموما برابر ۱.۵ ولت می باشد که در انواع باتری های قابل شارژ NiCd و NiMH کمی کمتر از این مقدار و برابر ۱.۲ ولت است، در حال حاضر اولین گزینه برای هر خریدار در انتخاب یک باتری قابل شارژ، انواع NiMH می باشد، کما این که از چند سال اخیر فرآیند جایگزینی این گونه با انواع قدیمی تر NiCd آغاز گردیده است [۴۳،۴۵].

## ۲ - ۸ - ۱ مزایای باتری نیکل هیدرید

این نوع باتری ها دارای مزایای بسیاری هستند که در ادامه به برخی از مهمترین آن ها اشاره می کنیم:

## ۲ - ۸ - ۱ - ۱ ظرفیت بالاتر از نیکل متال هیدرید

ظرفیت این باتری ها به مراتب بیشتر از انواع قدیمی تر است. در حال حاضر باتری های NiMH اندازه AA با ظرفیت فراتر از ۲۰۰۰ میلی آمپر ساعت (MAh) وارد بازار شده اند و مطالعه و تحقیق برای ساخت مدل هایی با ظرفیت بیشتر ادامه دارد. باتری های نیکل متال هیدرید نسبت به باتری های آلکالاین نیز از ظرفیت بیشتری برخوردارند و به خصوص در کاربردهای پرمصرف مدت سرویس دهی بیشتری را با هر بار شارژ کامل فراهم می کنند. بسیاری از شرکت های سازنده مدعی هستند که این باتری ها، ساخت آن ها در هر بار شارژ تا چهار یا پنج برابر یک باتری آلکالاین کارایی



دارد، البته این مقدار به عوامل بسیاری چون ظرفیت باتری، نحوه شارژ و نوع کاربرد بستگی دارد.

#### ۲ - ۸ - ۱ - ۲ هزینه معقول تر نسبت به نیکل متال هیدرید

در ابتدا هزینه بالاتر مانع استفاده گسترده از باتری های NiMH بود، ولی در حال حاضر قیمت تقریبی این گونه تنها ۲۰ درصد بیشتر از نیکل کادمیم می باشد این در حالی است که قیمت باتری های لیتیوم یون در حدود دو برابر این مقدار است.

#### ۲ - ۸ - ۱ - ۳ عدم مشکل اثر حافظه

شاید بزرگترین مزیت باتری های نیکل هیدرید در عدم وجود اثر حافظه در آن ها باشد. این اثر به زبان ساده افت تدریجی ولتاژ و ظرفیت در اثر عدم تخلیه کامل باتری پیش از شارژ مجدد آن می باشد، بنابراین استفاده کنندگان این گونه باتری ها نگرانی بابت این مشکل ندارند.

#### ۲ - ۸ - ۱ - ۴ تعداد سیکل شارژ بالا

حداکثر دفعات شارژ برای باتری های نیکل هیدرید تا ۱۰۰۰ نوبت است، که بسیار بیشتر از سایر انواع باتری های قابل شارژ می باشد [۴۴،۴۵].

#### ۲ - ۸ - ۲ معایب باتری نیکل متال هیدرید

در مقابل، نقاط منفی اندکی در مورد باتری های نیکل متال هیدرید وجود دارد. همان طور که اشاره شد، قیمت تقریبی هنوز ۲۰ درصد بیشتر از مدل های قدیمی تر نیکل کادمیم می باشد. همچنین زمان شارژ و تخلیه مجدد آن ها کمی بیشتر از انواع نیکل کادمیم است.

#### ۲ - ۹ باتری لیتیوم یون

باتری های لیتیوم یونی (تلفظ صحیح لیتیوم-آیون است اما یون رایج شده است) که به اختصار LIB<sup>۱</sup> هم گفته می شود، یکی از انواع باتری هستند که ساختار خاص خود را دارند ولیکن اصول کلی یک باتری را در این نوع خاص هم شاهد هستیم مثل استفاده از مادهی الکترولیت که قرار است یون ها

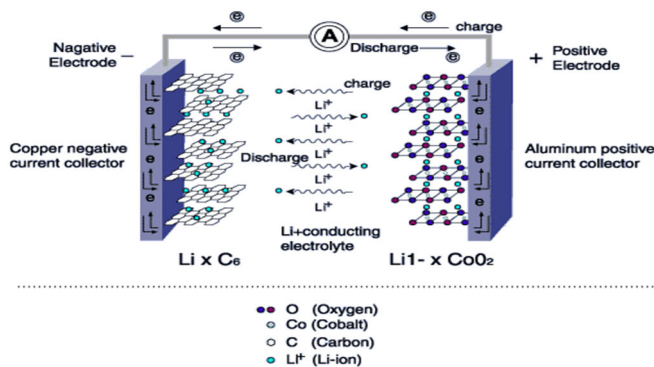
<sup>۱</sup> Lithium-Ion Battery

را بین دو قطب مثبت یا کاتد و منفی یا آند جابجا کند. مثلاً در یک نوع از این باتری ها از دو الکتروود و الکتروودی از جنس نمک برای ذخیره کردن انرژی به کار رفته است. در این باتری ها شارژ و دشارژ با حرکت یون لیتیوم ممکن می‌شود. در باتری لیتیوم یون، همان‌طور که نام باتری گویای آن است، این یون‌های لیتیوم هستند که با جابجایی خود در الکتروولیت، عمل شارژدهی یا شارژ شدن را ممکن می‌کنند. سر مثبت باتری از جنس آلومینیوم است و سر منفی از مس تشکیل می‌شود. وقتی باتری کاملاً دشارژ شده باشد، تمام یون‌های لیتیوم در اطراف الکتروود مثبت یا کاتد جمع شده‌اند. هنگام دشارژ یا شارژدهی باتری، لیتیوم الکترون خود را به آند واگذار می‌کند و خودش به عنوان یون مثبت، به کاتد می‌پیوندد. همان‌طور که می‌دانید، لیتیوم از فلزات گروه یک جدول تناوبی است که به شدت با نافلزات واکنش می‌دهد. اگر طبق تئوری کلاسیک صحبت کنیم، یک الکترون لایه‌ی آخر خود را در اختیار نافلزات قرار می‌دهد تا پیوندی یونی شکل بگیرد. در محیط الکتروولیت هم اگر بازه‌ی دشارژ را در نظر بگیریم، لیتیوم الکترون خود را به قطب منفی یا آند واگذار کرده و تبدیل به یونی با بار مثبت می‌شود. در ادامه بدون یک الکترون خود سراغ الکتروود مثبت می‌رود. به عبارت ساده‌تر، خاصیت شیمیایی لیتیوم آن را به سمت قطب مثبت می‌کشاند. اما در هنگام شارژ اوضاع کاملاً برعکس می‌شود. به این معنی که الکترون‌ها از قطب منفی وارد الکتروولیت شده و به یون‌های لیتیوم می‌پیوندند. لیتیوم‌ها که حالا خنثی شده‌اند، دوباره به سمت قطب منفی کوچ می‌کنند تا مجدداً آماده‌ی تحویل الکترون و به عبارتی شارژدهی شوند [۴۱].

## ۲ - ۹ - ۱ جنس الکتروود در باتری لیتیوم یون

جنس الکتروود در باتری لیتیوم یون متنوع است، معمول‌ترین ماده‌ای که به عنوان الکتروود منفی ایفای نقش می‌کند، گرافیت است. ساختار صفحه‌ای اتم‌های کربن که آرایش شش ضلعی دارند و هادی الکتریسیته هستند. قطب مثبت یا کاتد هم معمولاً سه نوع دارد. اکسید لیتیوم کبالت یا اکسیدهای مشابه به صورت لایه‌ای، پلی‌الکتروولیت‌هایی مثل فسفات لیتیوم آهن و اسپینل‌هایی مثل اکسید لیتیوم منیزیم. شکل زیر گویای همه چیز است. فرآیند شارژ به صورت خلاصه این است که

یون لیتیوم با دریافت الکترون از آند، در کنار لایه‌های گرافیتی جا خوش کند. در هنگام دشارژ هم یک الکترون خود را مجدداً به لایه‌های گرافیکی قطب منفی واگذار کرده و اکسید لیتیوم کبالت شکل بگیرد. کبالت هم در این فرآیند، از حالت ۴ بار مثبت به ۳ بار مثبت تغییر می‌کند تا لیتیوم یک بار مثبت را کنار خود جای دهد.



شکل (۳-۲) شماتیکی از ساختار باتری لیتیوم یون

فرض کنید باتری کاملاً شارژ شده است. در این لحظه درون باتری مجموعه‌ای از اتم‌های لیتیوم را می‌بینیم که کنار قطب منفی قرار دارند و آماده‌ی واگذاری الکترون می‌باشد. در ابتدای فرآیند دشارژ با توجه به زیاد بودن اتم‌های لیتیوم، ولتاژ بالاتر است و جریان به راحتی تأمین می‌شود. البته برای شروع دشارژ باید قطب مثبت و منفی باتری لیتیوم-یون به هم پیوند، مهم این است که الکترولیت بخشی از چرخه را تشکیل داده تا الکترون‌ها شروع به حرکت کنند و بخش دیگر، اتصال قطب مثبت و منفی باتری در محیط بیرون است [۴۶].

## ۲ - ۹ - ۲ عملکرد باتری‌های لیتیوم یون

با توجه به موارد ذکر شده در بالا اگر فرض کنیم که یک نمونه از باتری لیتیومی دارای الکتروود مثبت لیتیوم-کبالت اکسید و الکتروود منفی گرافیتی باشد، در فرآیند شارژ در الکتروود مثبت نیم واکنش زیر صورت می‌پذیرد [۴۶].

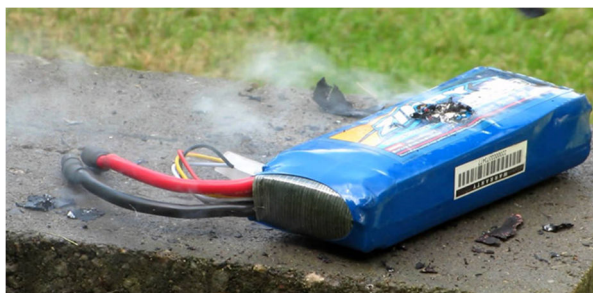


و در الکتروود منفی نیم واکنش زیر را خواهیم داشت:



### ۲ - ۹ - ۳ کاهش ظرفیت و انفجار باتری

باتری‌های لیتیوم یونی هم مثل دیگر انواع باتری به مرور زمان ظرفیت مفید خود را از دست می‌دهند. باتری‌های لیتیوم یونی و نحوه‌ی شارژ صحیح که دمای کارکرد پایین‌تر و پرهیز از شارژ کامل و خالی شدن کامل، به افزایش عمر باتری کمک می‌کند ولیکن همیشه ظرفیت باتری در حال کاهش است. مشکل اینجاست که در گذر زمان، در اطراف کاتد واکنش ایده‌آلی که انتظارش را داریم رخ نمی‌دهد. واکنش برگشت‌ناپذیر و به خصوص استفاده‌ی ناصحیح عاملی است که کاتد را فرسوده می‌کند. البته باتری‌ها به مدار کنترل دشارژ تجهیز می‌شوند تا از دشارژ عمیق جلوگیری شود. اما علت انفجار چیست؟ پدیده‌ای که کمتر اتفاق می‌افتد اما به هر حال مهم و خطرناک است. فرض کنید گوشی در دست کاربر و کنار گوش او باشد، آتش گرفتن ناگهانی بسیار خطرناک است. نکته این است که لیتیوم از عناصر فعال گروه یک جدول تناوبی عنصرهاست. شاید دیده باشید که دو هم‌گروه لیتیوم یعنی سدیم و پتاسیم، وقتی روی سطح آب می‌افتند، چه واکنش شدیدی نشان می‌دهند، کار به آتش گرفتن و پرتاب شدن تکه‌های پتاسیم به بیرون ظرف هم می‌کشد، دقیقاً به همین علت است که الکترولیت باتری‌های لیتیوم یونی باید عاری از آب باشد. الکترولیت معمولاً محلول یکی از نمک‌های لیتیوم در حلالی آلی است. شکل زیر شماتیکی از باتری که در آن انفجار صورت گرفته را نمایش می‌دهد:

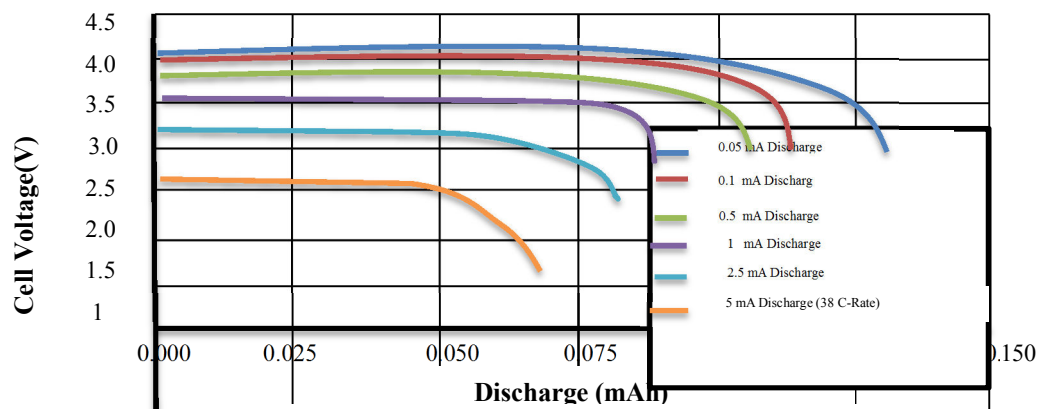


شکل (۴-۲) شماتیکی از انفجار یک باتری

عامل آتش گرفتگی و انفجار غشا برای جدا کردن دو بخش باتری به کار رفته لذا یک آسیب هر چند کوچک، باعث می‌شود که درون باتری پدیده‌ی اتصال کوتاه بیافتد. شاید اتصال کوتاه سیم‌های برق منزل را دیده باشید، جرقه و گرمای زیاد محصول آن است. در باتری لیتیوم یونی، تولید گرمای زیاد در داخل باتری، پایان کار نیست، گرمای تولید شده مسبب واکنش‌های بعدی که گرمازا هستند می‌شود و در یک زمان نسبتاً کوتاه، متوجه می‌شوید که باتری آتش گرفته و حتی منفجر می‌شود.

## ۲ - ۹ - ۴ دشارژ باتری لیتیوم یون

اگر قطب مثبت را با یک سیم نازک به قطب منفی متصل کنید، سریعاً سیم ذوب می‌شود، علت جریان بسیار بالایی می‌باشد که از آن عبور می‌کند. هر چه دشارژ باتری‌های لیتیوم پلیمری به صورت عدد مربوطه بالاتر باشد سرعت دشارژ هم بیشتر است. به عنوان مثال فرض کنید شما هم به ساختن یک کوآدکاپتر نسبتاً سنگین علاقه‌مند شده‌اید، باتری‌های قلمی جوابگوی مسأله نیستند چرا که جریان الکتریکی کمی فراهم می‌کنند. به اصطلاح آمپر کمی دارند. این است که یک باتری با جریانی C یا نرخ دشارژ<sup>۱</sup> تعریف دقیق ۱۰۰۰ برابر با ظرفیت خود به مدت ۱ ساعت دشارژ می‌شود. مثلاً یک باتری میلی‌آمپر ساعتی در شرایط ایده‌آل قادر است جریانی ۱۰۰۰ میلی‌آمپر رابه مدت ۱ ساعت تأمین کند. شکل زیر نمودار دشارژ یک باتری لیتیوم یون در جریان‌های مختلف نشان می‌دهد [۴۶،۴۷].



شکل (۲-۵) نمودار دشارژ یک باتری لیتیوم یون بر حسب جریان

<sup>1</sup> c-rate

## ۲ - ۹ - ۵ بدون حافظه بودن باتری لیتیوم یون

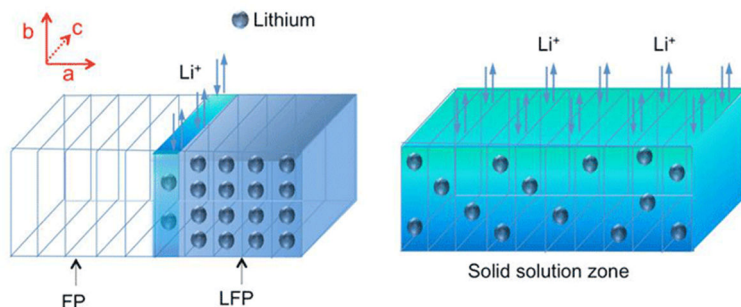
اکنون باید کاملاً مشخص شده باشد که باتری لیتیوم را نباید در شرایط عادی کاملاً خالی و کاملاً پر کرد. این کار فقط برای باتری های نیکل، مانند نیکل کادمیم و نیکل متال هیدرید صحیح است، چون باتری های نیکلی اثر حافظه ای دارند، که اگر باتری بصورت مداوم، کمتر از مقدار واقعی آن شارژ شود، اثر حافظه باعث می شود که باتری بیشتر از آن نتواند شارژ شود. عکس این حالت در هنگام دشارژ هم صادق است، و اگر باتری نیکلی بصورت مداوم فقط درصدی دشارژ شود، این اثر حافظه ای در آن باقی می ماند، و دیگر بیش از آن تخلیه نمی شود. بنابراین باتری های نیکلی را باید تا تخلیه کامل استفاده کرد و بعد کاملاً شارژ کرد. اما اگر این روش در مورد باتری های لیتیومی انجام شود، به معنی از بین بردن باتری لیتیومی خواهد بود، چون همانگونه که تاکید شد، باتری های لیتیومی تخلیه نسبی و شارژ مکرر را می طلبد [۴۷].

## ۲ - ۹ - ۶ پیشرفت باتری های لیتیوم یون

سال هاست که محققین روی باتری ها مشغول به کار هستند تا تکنولوژی های بهتری پیدا کنند. همان طور که امروزه ربات ها و گوشی ها و تبلت ها از تمام جنبه ها پیشرفت کرده اند و به نوعی یک کامپیوتر کوچک با امکانات اضافی مثل دوربین و جی پی اس و مودم مخابراتی هستند. یکی از بخش هایی که به نظر می رسد از قافله ی پیشرفت جا مانده، باتری است. در کنار آزمایشات مختلف برای یافتن باتری هایی با ساختار الکتروشیمیایی جدید، باتری های لیتیوم-یونی هم زیر میکروسکوپ های محققین قرار داشته اند و کمی بهینه شده اند. اما اخیراً نتایج خوبی در تحقیقات دانشگاه MIT بر روی باتری هایی که الکتروود فسفات آهن لیتیوم دارند، به دست آمده است الکتروود فسفات آهن در ترکیب با یون لیتیوم به فسفات آهن لیتیوم تبدیل می شود که آماده ی شارژدهی است . محققین با بررسی دقیق به این نتیجه رسیده اند که در فرآیند شارژ شدن باتری، مرزی بین بخش

دشارژ شده یا FP که مخفف  $\text{FePO}_4$  است یا LFP که مخفف  $\text{LiFePO}_4$  است شکل می‌گیرد.

مرزی با ساختار نامنظم که در شکل زیر مشاهده می‌کنید.



شکل (۶-۲) مرز بین بخش دشارژ شده یا FP باتری با بخش شارژ شده

کشف<sup>۱</sup> SSZ بسیار مهم است چرا که عامل کلیدی در افزایش کارایی و عمر باتری‌های لیتیوم یونی است. ناحیه‌ی آبی روشن یا SSZ، نام مرز مورد بحث است. یون‌های لیتیوم از این ناحیه جدا می‌شوند یا به آن اضافه می‌گردند. علت دوام بالای باتری‌های مبتنی بر LFP هم وجود همین مرز باریک است. بنابراین روشن است که اگر SSZ گسترش یابد، نرخ شارژ و دشارژ و عمر باتری افزایش می‌یابد. از همه مهم‌تر، سطح شارژ و دشارژ یکنواخت خواهد شد و این به معنی ولتاژ نسبتاً ثابت است. در نتیجه نیازی به ثابت و یکنواخت کردن ولتاژ باتری نیست. در حال حاضر باتری کاملاً پر ولتاژی بیش از ۴ ولت دارد در حالیکه با خالی شدن باتری به ۳.۶ ولت افت پیدا می‌کند؛ بنابراین مدارات اضافی برای یکنواخت کردن آن نیاز است. از مدت‌ها پیش محققین می‌دانستند که به لحاظ تئوری ناحیه‌ای به نام SSZ وجود دارد ولیکن این اولین بار است که صحنه‌های شارژ و دشارژ باتری را باروش خاصی که Akihiro Kushima و Li در سال ۲۰۱۰ معرفی کرده‌اند. آزمایشات محققین از اضافه کردن ناخالصی یعنی پوشش کربنی استفاده کردند. نانوذرات کربن کاری می‌کنند که SSZ به شکل گسترده‌تر و پایدارتری شکل بگیرد و به فرآیند شارژ یا دشارژ کمک کند.

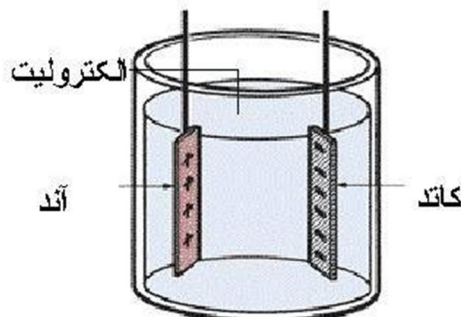
<sup>1</sup> Solid Solution Zone

## ۲ - ۱۰ باتری پلیمر لیتیوم یون<sup>۱</sup>

باتری های پلیمر لیتیوم یون اساسا شبیه باتری های لیتیوم یون هستند و از لحاظ ساختار اندکی اختلاف با آنها دارند. باتری های پلیمر لیتیوم یون بسیار سبکتر و در برابر شارژ بیش از حد و نشت مواد شیمیایی نیز مقاوم ترند. اما تولید آنها گرانتر از باتری های لیتیوم یون تمام می شود و چگالی انرژی پایین تری دارند. باتری های پلیمر لیتیوم یون بیشتر در وسایل الکتریکی سبک وزن و گران قیمت مانند گوشی های موبایل به کار می روند [۴۴].

## ۲ - ۱۱ باتری سربی اسیدی<sup>۲</sup>

باتری سربی اسیدی که اصطلاح صحیح تر آن باتری سرب اکسید سرب می باشد. برای اولین بار توسط یک فیزیکدان فرانسوی به نام Gaston Plante در سال ۱۸۵۹ ساخته شد. در این باتری، سرب و اکسید سرب صفحات آند و کاتد و اسید سولفوریک الکترولیت باتری را تشکیل می دهد. باتری های سربی اسیدی در مقایسه با سایر باتری های قابل شارژ، به نسبت توانی که تولید می کنند، ارزان ترین باتری می باشد [۴۷].



شکل (۲-۷) شماتیکی از یک باتری سربی اسیدی ساده

چگالی انرژی این باتری ها در مقایسه با سایر باتری ها کمتر است و دارای طول عمر شارژ و دشارژ ۳۰۰ تا ۷۰۰ چرخه هستند. در باتری های سربی اسیدی ولتاژ هر سلول ۲ ولت (-)  $1.685V$  (  $0.356V=2.041V$ ) می باشد. باتری های سربی اسیدی به دلیل انرژی مخصوص مناسب و توانایی

<sup>1</sup> Lithium-Ion Polimer

<sup>2</sup> Lead-Acid



عملکرد در دشارژ با جریان‌های زیاد، بطور گسترده‌ای در سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی استفاده می‌شوند. با توجه به توانایی عملکرد در دشارژ با نرخ بالا و قیمت کم، این باتری‌ها برای ربات‌های جنگجو و امدادگر بسیار مناسب هستند و کشتی‌ها و زیردریایی‌های دیزل الکتریک، سیستم‌های برق اضطراری و منابع تغذیه سیستم‌های مخابراتی که نیاز به تعداد زیادی باتری است بیشترین استفاده را دارند [۴۸]. جدول (۱-۲) مقایسه‌ای بین باتری‌های قابل شارژ را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۲) مقایسه‌ای بین باتری‌های قابل شارژ

واحد	سربی اسیدی	نیکل کادمیم	نیکل هیدرید فلز	لیتیوم یون
ولتاژ سلول (V)	۲	۱.۲	۱.۲	۳.۶
انرژی مخصوص (Wh/Kg)	۱-۶۰	۲۰-۵۵	۱-۸۰	۳-۸۰
توان مخصوص (W/Kg)	<۳۰۰	۱۵۰-۳۰۰	<۲۰۰	۱۰۰-۱۰۰۰
چگالی انرژی ( $KWh/m^3$ )	۲۵-۶۰	۲۵	۷۰-۱۰۰	۸۰-۲۰۰
چگالی توان ( $MW/m^3$ )	<۰.۶	۰.۱۲۵	۱.۵-۴	۰.۴-۲
تعداد دفعات شارژ	۳۰۰-۷۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰	۶۰۰-۱۰۰۰	۲۰۰۰-۳۰۰۰
محدوده زمان دشارژ	>1min	1 min-8hr	>1min	10s-1hr
هزینه (\$/KWh)	۱۲۵	۶۰۰	۵۴۰	۶۰۰
هزینه (\$/KWh)	۲۰۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰
راندمان (%)	۷۵-۹۰	۷۵	۸۱	۹۹

## ۲ - ۱۱ - ۱ معادلات شیمیایی درون سلول سربی اسیدی

در یک سلول اسیدی، صفحه مثبت از جنس دی اکسید سرب<sup>۱</sup> و صفحه منفی از جنس سرب (Pb) و الکترولیت آن اسید سولفوریک رقیق شده با آب ( $H_2SO_4 + H_2O$ ) می‌باشد. واکنش شیمیایی که در یک سلول سربی اسیدی انجام می‌شود توسط رابطه (۶-۲) بیان می‌گردد [۴۸].



<sup>۱</sup> PbO<sub>2</sub>

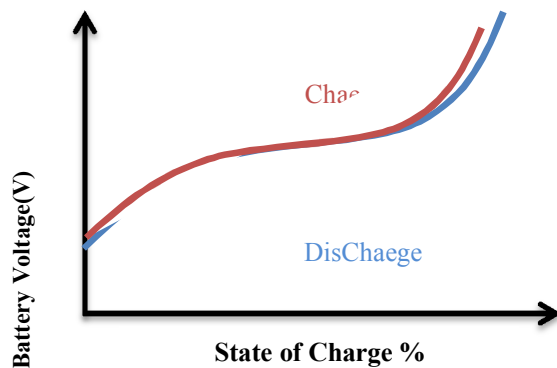
در یک سلول سربی نرخ واکنش‌های شیمیایی تابعی از وضعیت شارژ باتری، نرخ شارژ و دشارژ، دمای محیط و عمر باتری می باشد. در یک سلول سربی اسیدی سرب و دی اکسید سرب با اسید سولفوریک واکنش می دهند و حاصل این واکنش سولفات سرب و آب می باشد. پس از دشارژ باتری، با تزریق جریان به باتری، واکنش در جهت برگشت انجام می شود و باتری مجددا شارژ می گردد.

## ۲ - ۱۱ - ۲ مشخصه های عملکرد باتری سربی اسیدی

هر شرکت سازنده باتری، یک کاتالوگ برای محصولات خود در نظر می گیرد که در این کاتالوگ برخی مشخصه های مهم همچون منحنی های شارژ و دشارژ، منحنی ولتاژ مدار باز بر حسب وضعیت شارژ، تغییرات ظرفیت بر حسب دما، منحنی اثر پوکرت<sup>۱</sup> و... آورده می شود.

### ۲ - ۱۱ - ۲ - ۱ منحنی های شارژ و دشارژ

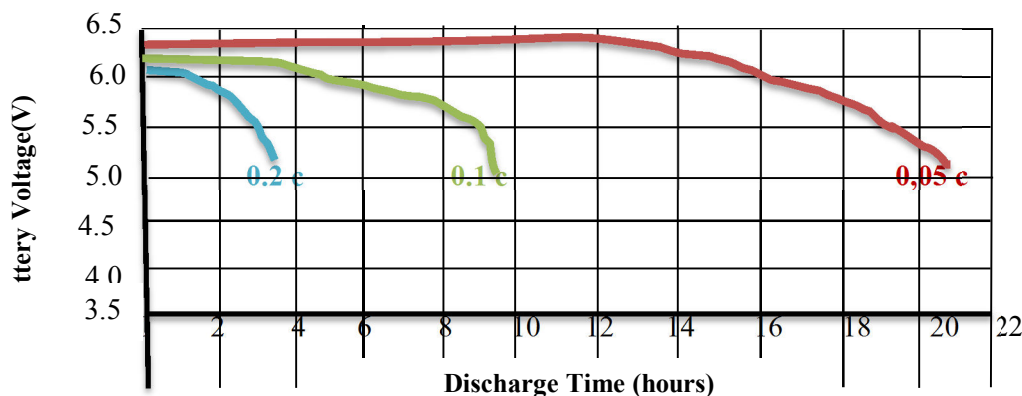
شکل موج ولتاژ باتری بر حسب زمان بر اساس جریانی که از آن کشیده می شود با توجه به جهت جریان، منحنی شارژ یا دشارژ باتری نامیده می شود. منحنی های شارژ و دشارژ باتری مهمترین مشخصه باتری می باشند که مدلسازی باتری بر اساس آنها انجام می شود. در منحنی های شارژ و دشارژ عموماً محور عمودی بر حسب ولتاژ یک سلول (یا ضربی از آن بر حسب تعداد سلول های باتری) و محور افقی بر حسب زمان دشارژ (معمولاً ساعت) و یا درصد وضعیت شارژ است. در حالت کلی در باتری ها مشخصه شارژ کاملاً منطبق بر مشخصه دشارژ نمی باشد و بین مشخصه شارژ و دشارژ یک حلقه هیستریزیس بوجود می آید (شکل (۲-۸)).



شکل (۲-۸) منحنی شارژ و دشارژ

<sup>1</sup> Peukert Effect

در باتری های سربی اسیدی مساحت این حلقه بسیار ناچیز است و در اکثر مدلسازی از این عدم انطباق صرف نظر می شود. از اینرو در کاتالوگ شرکت های سازنده باتری های سربی اسیدی، فقط منحنی های دشارژ باتری ها داده می شود. در باتری های سربی اسیدی منحنی های دشارژ، بر اساس جریان های مختلف دشارژ و معمولا از رنج 0.2c تا 5c رسم می شوند. ماهیت منحنی های دشارژ باتری های سربی اسیدی یکسان است. اما ممکن است با توجه به مواد به کار رفته در باتری، عناصر اضافه شده به باتری (مانند کلسیم و آنتیموان و...) اندکی تفاوت در منحنی های دشارژ باتری های کارخانه های سازنده مشاهده شود. شکل (۲-۹) منحنی دشارژ مربوط به یک باتری سربی اسیدی را بر اساس جریان های متفاوت دشارژ نشان می دهد. در این شکل محور محیطی (فشار و دما و رطوبت) استاندارد داده می شود. در ادامه خواهیم دید که تغییرات شرایط محیطی تغییراتی رو پارامترهای باتری به وجود می آورد.



شکل (۲-۹) منحنی دشارژ یک باتری سربی اسیدی با نرخ دشارژ 0.05c-0.2c

منحنی های دشارژ باتری ها بعد از مدت زمانی که در ناحیه خطی هستند به ناحیه غیر خطی وارد می شوند و در این ناحیه به سرعت ولتاژ افت می کند. شروع نقطه ای که تغییرات افت ولتاژ به شدت زیاد می شود نقطه ولتاژ پایان دشارژ را نشان می دهد. در باتری ها، ناحیه کار، ناحیه خطی می باشد. در جدول (۲-۲) ولتاژ پایان شارژ باتری نمونه شکل (۲-۹) نشان داده شده است.

جدول ( ۲-۲ ) ولتاژ پایان دشارژ بر حسب جریان دشارژ

ولتاژ پایان دشارژ (V/Cell)	نرخ جریان شارژ
1.75	کمتر از 0.2c
1.7	0.2c-0.5c
1.6	0.5c-1c
1.5	1c-2c
1.35	2c-3c
1	بیشتر از 3c

#### ۲ - ۱۱ - ۳ مزایای باتری سرب اسید

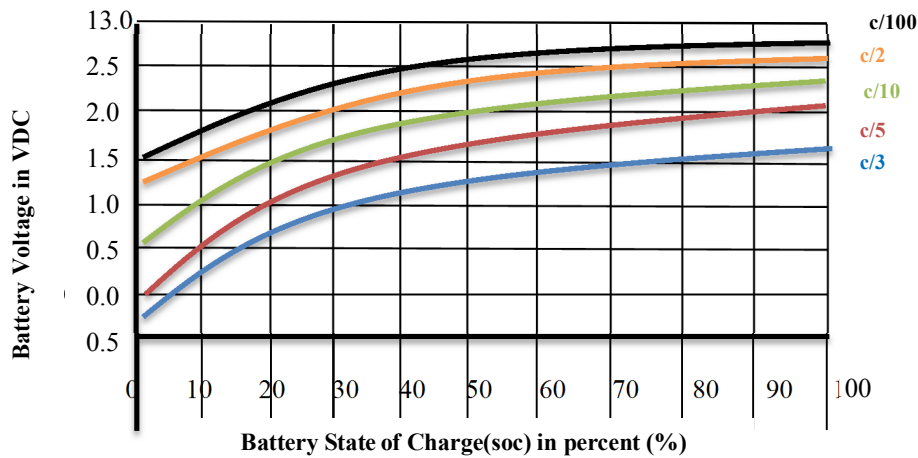
- ۱- بسیار ارزان و از نظر ساختار و تولید آنها بسیار ساده اند.
- ۲- بیش از ۱۴۰ سال از تولید و استفاده آنها می‌گذرد پس بسیار قابل اتکا و اطمینان پذیری بالایی دارند.
- ۳- در میان باتری های شارژ شونده یکی از کمترین نرخ های دشارژ خود بخودی را داراست.
- ۴- قادرند نسبت به وزنشان حجم زیادی از انرژی را آزاد کنند.
- ۵- بالاترین طول عمر را در میان گروه هم قیمت خود دارند.
- ۶- بسیار برگشت پذیر به طبیعت آند می باشند به گونه‌ای که هم اکنون بیش از ۹۸ درصد آنها به طبیعت بازگردانده می‌شود.
- ۷- به ابزار جانبی همانند حافظه و یا الکترولیت برای پر کردن در نسخه های مهر شده ندارند. بیش از ۷۰ درصد راندمان دارند که بالاترین راندمان برای باتری های ۲ ولت الکترولیتی است.

#### ۲ - ۱۱ - ۴ معایب باتری سرب اسید

امروزه به سبب وزن بالا و آلاینده‌گی محیط زیستی این گونه باتری ها استفاده از آن ها به عنوان باتری اصلی خودروهای الکتریکی در برخی کشورها منسوخ شده است.

این باتری ها دارای لایه های نازک سرب هستند. این باتری ها نمی توانند به طور عمیق دشارژ شوند به این دلیل که لایه نازک سرب برای جریان راه اندازی بسیار سریع نیاز است و اگر این باتری شوند به این دلیل که لایه نازک سرب برای جریان راه اندازی بسیار سریع نیاز است و اگر این باتری

ها بطور کامل دشارژ شوند برای چندین بار به صورت غیر قابل بازگشت دشارژ می‌شوند.



شکل (۱۰-۲) نمودار شارژ باتری سرب اسید در ۷۴ درجه فارانهات

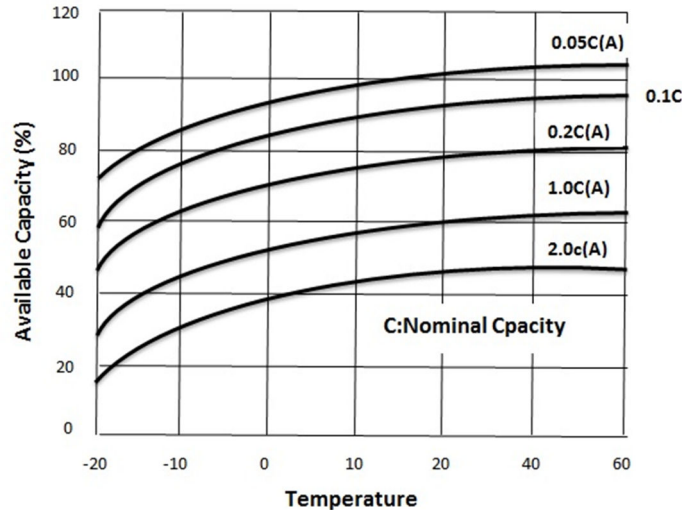
## ۲ - ۱۱ - ۵ منحنی تاثیر دما بر ظرفیت

یکی از پارامترهای مهم در نگهداری باتری های سربی اسیدی دمای نگهداری آنها می باشد. کاهش دما سبب کم شدن ظرفیت باتری می شود. در واقع تاثیر دما بر روی نرخ واکنش های درون سلول می باشد و با کم شدن دما، ویسکوزیته الکترولیت بیشتر شده و در نتیجه واکنش های کمتری بین صفحات باتری رخ می دهد و سبب کم شدن ظرفیت باتری می گردد. باید توجه داشت در باتری های سربی اسیدی هرچند افزایش دما سبب افزایش ظرفیت می شود اما مشکلات دیگری مانند افزایش دشارژ خود به خود و کاهش عمر باتری را به دنبال دارد. از اینرو سازندگان باتری، بهترین محدوده دمایی برای نگهداری از باتری ها را ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی گراد پیشنهاد می کنند. در مدلسازی های باتری سربی معمولا اثر دما در نظر گرفته نمی شود و مدل سازی برای دمای استاندارد ۲۵ درجه انجام می شود.

همانگونه که در شکل (۱۱-۲) مشخص می باشد اثر دما بر روی ظرفیت باتری های سربی

اسیدی تقریباً به صورت خطی است و می توان آن را به صورت یک عامل خارجی تاثیر گذار در

ظرفیت باتری دانست.

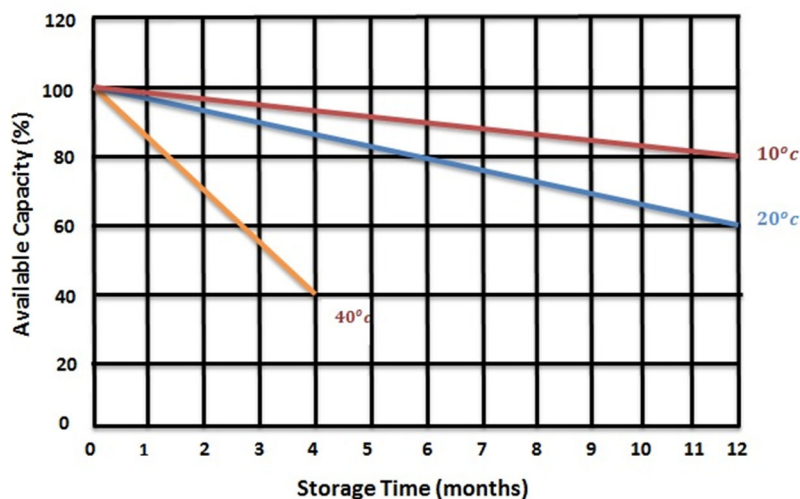


شکل (۲-۱۱) منحنی تاثیر دما بر ظرفیت باتری [۵۰]

## ۲ - ۱۱ - ۶ منحنی دشارژ خود به خود

باتری های سربی اسیدی مانند سایر باتری ها اگر بدون استفاده قرار گیرند، پس از مدت زمانی معلوم تخلیه می گردند. کاهش خود به خود ظرفیت و یا دشارژ باتری بدون عبور جریان از مدار خارجی دشارژ خود به خود نام دارد. در یک باتری سربی اسیدی، حتی در حالت مدار باز، سرب و دی اکسید سرب با اسید سولفوریک واکنش می دهند که نتیجه آن آزاد شدن اکسیژن در الکتروود مثبت و هیدروژن در الکتروود منفی است. با گذشت زمان بر اثر انجام این واکنش های شیمیایی باتری دشارژ می شود. دلیل اصلی دشارژ خود به خود، مقاومت داخلی باتری است که با توجه به اندازه آن، نرخ دشارژ خود به خود مشخص می گردد. از عوامل محیطی، تاثیر گذارترین عامل در دشارژ خود به خود یک باتری سربی اسیدی، دما می باشد که با افزایش دما، دشارژ خود به خود باتری ها به میزان ۵۰٪ رسید، باتری ها می باید دوباره شارژ شوند. شکل (۲-۱۲) منحنی مدت زمان نگهداری باتری سربی اسیدی در حالت بدون استفاده را نشان می دهد. همانگونه که در شکل (۲-۱۲) مشخص می باشد در

دمای ۲۰ درجه سانتی گراد باتری سربی اسیدی نمونه بعد از یکسال و در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد بعد از ۴ ماه، ۳۰ درصد از ظرفیت خود را از طریق دشارژ خود به خود از دست می دهد.



شکل (۲-۱۲) منحنی مدت زمان نگهداری باتری سربی اسیدی در حالت بدون استفاده [۵۰]

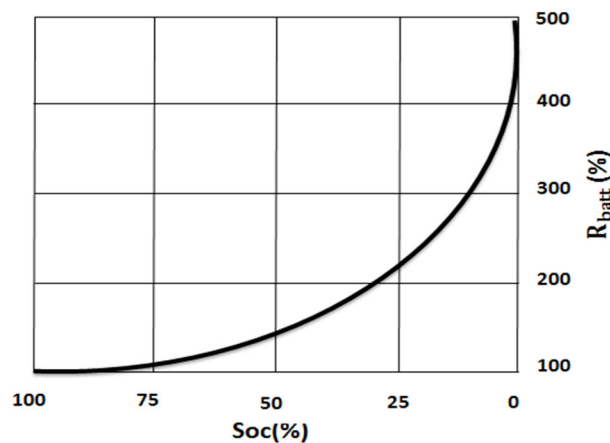
## ۲ - ۱۱ - ۷ منحنی مقاومت داخلی باتری

مقاومت داخلی باتری تابع پارامترهای متفاوتی همچون جنس جداساز، فاصله بین صفحه ها، وزن مخصوص الکترولیت، مساحت صفحات و ارتباطات درون سلول است. از میان پارامترهای فوق، وزن مخصوص الکترولیت تابعی از وضعیت شارژ باتری است. با دشارژ باتری و تولید آب در سلول، رفته رفته غلظت اسید سولفوریک کم می شود. با تولید آب وزن مخصوص الکترولیت کم شده و مقاومت الکتریکی آن افزایش می یابد. یکی از راه های تعیین وضعیت شارژ باتری های سربی اسیدی اندازه گیری چگالی الکترولیت آن می باشد. در جدول (۲-۳) چگالی الکترولیت و نقطه انجماد آن برای وضعیت شارژهای مختلف نشان داده شده است.

جدول ( ۳-۲ ) چگالی و نقطه انجماد الکترولیت یک باتری سربی اسیدی بر حسب وضعیت شارژ [۴۳]

وضعیت شارژ	چگالی الکترولیت (گرم بر سانتی متر مربع)	نقطه انجماد الکترولیت (درجه سانتی گراد)
٪۷۵-٪۱۰۰	1.27 – 1.29	-67
٪۵۰-٪۷۵	1.25 – 1.27	-23
٪۲۵-٪۵۰	1.11 – 1.25	-9
٪۰-٪۲۵	کمتر از 1.11	-7

همانگونه که در جدول (۳-۲) مشاهده می‌شود با دشارژ باتری، چگالی الکترولیت کم شده که این امر سبب افزایش مقاومت داخلی باتری می‌شود. مهمترین پارامتری که باعث تغییر در مقاومت داخلی باتری می‌شود میزان شارژ باتری است. زمانیکه یک سلول به طور کامل شارژ است مقدار مقاومت داخلی آن مقدار نامی خواهد بود. با دشارژ سلول از وضعیت شارژ ۱۰۰٪ تا وضعیت شارژ ۲۵٪ مقاومت داخلی رفته رفته زیاد می‌شود و بعد از آن تا دشارژ کامل و مقاومت داخلی به طور سریع افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت در شکل (۲-۱۳) نمایش داده شده است.



شکل (۲-۱۳) منحنی مقاومت داخلی باتری بر حسب وضعیت شارژ [۵۱]

## ۲ - ۱۱ - ۸ اثر پوکرت

ظرفیت باتری های سربی اسیدی بطور قابل ملاحظه‌ای تابع جریان دشارژ می باشد. در سال ها



۱۹۸۷، پوکرت ظرفیت سلول ها را به صورت تابعی از جریان دشارژ معرفی کرد. پوکرت ظرفیت باتری ها را بصورت رابطه (۷-۲) بیان کرد که در این معادله K و P ضرایب ثابتی هستند که توسط منحنی های دشارژ شرکت های سازنده تعیین می شوند. متغیر P به طور نوعی ۱/۳ تا ۱/۴ می باشد [۴۹].

$$C = \frac{K}{I_b^{(P-1)}} \quad (7-2)$$

## ۲ - ۱۲ تعیین وضعیت شارژ باتری ها

تعیین وضعیت شارژ یک موضوع مهم در مبحث باتری ها می باشد. این امر باعث کنترل مناسب پروسه شارژ باتری و کاهش خطراتی همچون گازدهی و اضافه ولتاژ می شود. اضافه ولتاژ باتری سبب کاهش ظرفیت و کم شدن عمر باتری می شود. راه های متفاوتی برای تعیین SOC همچون اندازه گیری ولتاژ ترمینال، اندازه گیری امپدانس داخلی باتری، اندازه گیری چگالی الکترولیت و... وجود دارد. مشخصه های شارژ و دشارژ باتری های سربی اسیدی، رابطه بین SOC و ولتاژ مدار باز باتری را مشخص می کند. نتایج تجربی نشان می دهد که ولتاژ مدار باز باتری سربی اسیدی تابعی از SOC می باشد. دانستن SOC به کاربر این اجازه را می دهد که یک استفاده کارآمد و یک مدیریت مناسب برای استفاده از باتری ها را داشته باشد. همچنین با دانستن SOC می توان از اضافه شارژ و یا اضافه دشارژ کردن باتری ها جلوگیری کرد و سبب افزایش عمر باتری ها شد. برای محاسبه یا تخمین SOC تکنیک های مختلفی بیان شده است. به هر حال بسیاری از این روش ها نیاز به اندازه گیری های خیلی دقیق از عوامل شیمیایی و با شرایط عملکرد باتری دارند و تنها مناسب برای آزمایشگاه می باشد. در میان آنها، ساده ترین و معمول ترین روش، روش شمارش آمپر ساعت باتری است. دقت این روش، متکی بر دقت در کالیبراسیون قبل از شمارش است. بدون کالیبراسیون مجدد، خطای انباشته شده اندازه گیری رفته رفته زیاد شده و پس از مدتی شارژ و دشارژ نتیجه غیر قابل قبولی می دهد. یکی دیگر از روش های تعیین SOC بر اساس ولتاژ ترمینال باتری می باشد. در این روش نیز مشکلاتی همچون وابستگی ولتاژ ترمینال به نرخ جریان شارژ یا دشارژ وجود دارد که در محاسبات می باید

لحاظ شوند [۵۰].

## ۲ - ۱۳ پارامترهای باتری

چندین پارامتر که به مدل سازی باتری مربوط می شود وجود دارد، و این پارامترها بطور خلاصه بصورت زیر شرح داده می شود:

### • مقاومت داخلی

- **مقاومت خود دشارژ:** این مقاومت به تجزیه کردن آب تحت ولتاژ سطح بالا وابسته است و این مقاومت معمولا حساس به دما می باشد و این با معکوس دما تناسب دارد.
- **مقاومت تخلیه و شارژ ( $R_c/R_d$ ):** این مقاومت ها به مقاومت الکترولیت، مقاومت پلات و مقاومت مایع وابسته هستند و این مقاومت ها در طول شارژ و دشارژ با هم فرق دارند.
- **مقاومت شارژ و دشارژ بیش از حد ظرفیت:** این مقاومت ها با تخلیه الکترولیت در طول شارژ و دشارژ بیش از حد، بطور گسترده مشخص می شود.

### • ظرفیت دو قطبی (c)

این ظرفیت ناشی از تخلیه شیمیایی داخل باتری می باشد و لزوما بصورت کامل نشان دهنده ی یک ظرفیت الکتریکی نیست. این مربوط به SOC، دما و همچنین شیوه ی طراحی می باشد.

### • نوع تخلیه

- **تخلیه ی متوالی:** در این وضعیت با این حالت، باتری بصورت مداوم انرژی را به باری که به صورت مداوم و تصادفی به ظرفیت باتری هدایت می شود، تحویل می دهد.
- **تخلیه ی متناوب:** در این حالت، باتری انرژی را به باری که در یک بازه از زمان به صورت منظم یا غیر منظم است تحویل می دهد، به عنوان مثال در خودروهای هیدریدی انرژی بوسیله ی موتور برای بعضی از زمان ها با پیروی از زمان بازیافت ولتاژ

دریافت می‌شود.

## • مد تخلیه

- **مد بار ثابت :** در این مد، باتری انرژی را به بار ثابت تحویل می‌دهد. جریان بار به نسبت کاهش در ولتاژ ترمینال باتری خودروه‌های الکتریکی کاهش می‌یابد.
- **مد جریان ثابت :** در این مد، باتری جریان ثابتی را برای بار تامین می‌کند. این کار از طریق کاهش مداوم مقاومت بار که با کاهش ولتاژ ترمینال باتری در نگهداری جریان ثابت بار ترتیب داده می‌شود انجام می‌شود.
- **مد توان ثابت :** در این مد، باتری توان الکتریکی ثابتی را به بار می‌دهد. جریان بار افزایش می‌یابد تا برای درج تصادفی ولتاژ، طرز نگهداری توان ثابت بار را جبران کند.

## • نرخ شارژ و تخلیه

برای طولانی شدن یا توسعه‌ی دوام سرویس باتری، نرخ شارژ و تخلیه نباید خیلی بالا باشد. همچنین فرکانس سیکل‌های شارژ و تخلیه اثر عمر باتری را معنی‌دارتر می‌کند. فرکانس سویچ زنی بین شارژ و تخلیه مخصوصاً در خودروه‌های الکتریکی و الکتریکی هیبریدی که کاهش شدیدی در عمر باتری دارد، بالا می‌باشد.

### ۲ - ۱۴ مدل باتری های سربی اسیدی

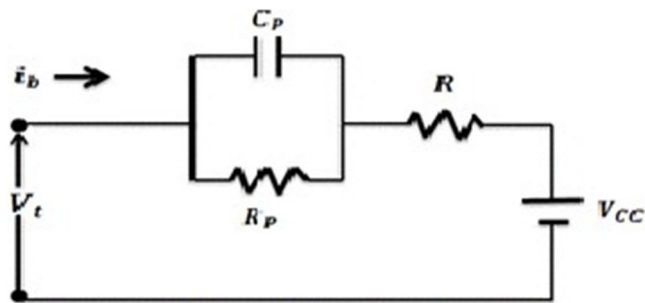
باتری های سربی اسیدی معمولاً بر اساس اطلاعات در دسترس و کاتالوگ شرکت های سازنده مدل سازی می‌شوند. مدلسازی و شبیه سازی ها با استفاده از داده های تولید کنندگان و معادلات جبری که بیانگر تعریفات زیر می باشد انجام می‌گیرد.

۱. ظرفیت باتری تابعی از جریان دشارژ است.

۲. ولتاژ شارژ و دشارژ باتری تابعی از وضعیت شارژ است.

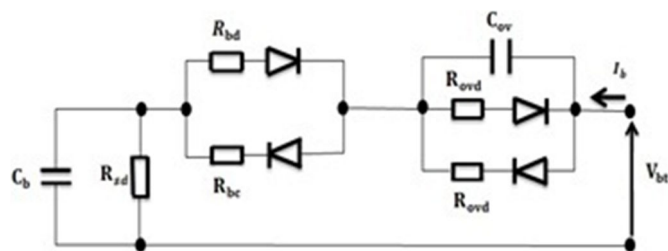
۳. مقاومت داخلی باتری تابعی از وضعیت شارژ است.

برای باتری های سربی اسیدی مدل بسیار در نظر گرفته شده است و مقالات بسیاری در این زمینه نوشته شده است. در حالت کلی برای یک سلول باتری سربی اسیدی می توان یک مدار معادل از دید دو سر ترمینال آن در نظر گرفت که در شکل (۲-۱۴) نمایش داده شده است. این مدل یک راه ساده برای نشان دادن رفتار باتری است.  $V_{CC}$  ولتاژ مدار باز،  $V_t$  ولتاژ ترمینال باتری،  $R$  مقاومت داخلی باتری،  $R_p$  مقاومت اضافه ولتاژ و  $C_p$  خازن اضافه ولتاژ می باشد. تمامی پارامترهای فوق متغیر و تابعی از وضعیت باتری می باشد [۵۱].



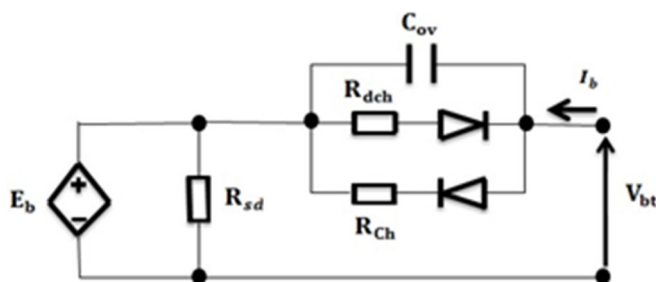
شکل (۲-۱۴) مدار معادل تونن یک باتری سربی اسیدی

تمامی مدلسازی های باتری های سربی اسیدی، بر پایه مدار تونن آن می باشد. در شکل (۲-۱۵) یک مدل دقیق تر برای باتری بیان شده است. این مدل شبیه مدار معادل تونن باتری و دقیق تر از آن می باشد. در این مدل ولتاژ داخلی باتری با ولتاژ خازن  $C_b$  مشخص می شود.  $R_{sd}$  بیانگر دشارژ خود به خود باتری است.



شکل (۲-۱۵) مدل یک باتری سربی اسیدی [۵۴]

شکل (۱۶-۲) یک مدلسازی دیگر برای باتری سربی اسیدی را نشان می دهد. تفاوت عمده این مدل با مدل قبلی در مدلسازی ولتاژ داخلی باتری است که در این مدل، ولتاژ داخلی باتری، به صورت یک منبع ولتاژ وابسته به وضعیت شارژ باتری مدلسازی شده است.



شکل (۱۶-۲) مدل یک باتری سربی اسیدی [۵۴]

در سال ۱۹۶۵ آقای Shepherd یک معادله ریاضی (۸-۲) را بیان نمود که بطور مستقیم رفتار الکتروشیمیایی باتری را توصیف می کرد. در این معادله E ولتاژ بی باری،  $E_S$  مقدار ثابت ولتاژ، Q ظرفیت باتری، i جریان شارژ (دشارژ)، A، B، K ضرایب ثابت و مخصوص به باتری و شرکت سازنده آن می باشد. این یک مدل ساده برای بیان عملکرد باتری در شرایط دینامیکی می باشد [۵۳].

$$E = E_S - K \left( \frac{Q}{Q-i} \right) i + A \exp(-BQ^{-1}i) \quad (۸-۲)$$

## ۳ فصل سوم. روش های تخمین شارژ باتری ربات

چندین گونه از باتری بطور جاری در صنعت استفاده می‌شود از جمله باتری های سربی اسیدی، لیتیوم یون و نیکل کادمیوم و غیره، که در فصل دوم بطور مفصل بررسی شدند. باتری از لحاظ کارکرد بالای ولتاژ سلولی مزیت هایی مثل آلودگی کمتر، نرخ خود دشارژی پایین و چگالی انرژی بالایی دارد. معمولاً باتری ها برای صنایع همگانی قابل حمل مثل خودروهای الکتریکی هیبریدی<sup>۱</sup> و کاربردهای صنعتی<sup>۲</sup> بکار گرفته می‌شوند.

تخمین حالت شارژ یک چالش پایه‌ای برای باتری ای که استفاده می‌شود دارد. تخمین حالت شارژ یک باتری که برای توصیف باقیمانده‌ی ظرفیت باتری استفاده می‌شود برای استراتژی کنترل، یک پارامتر مهم می باشد. تخمین حالت شارژ یک پارامتر مهمی است که منعکس کننده عملکرد باتری می باشد، بنابراین تخمین دقیق SOC برای محافظت از باتری می باشد و از تخلیه‌ی بیش از حد آن جلوگیری می کند و همچنین نفس باتری را بهبود می بخشد، لذا کاربرد آن این اجازه را به ما می دهد که استراتژی های کنترل معقولی را برای ذخیره‌ی انرژی بکار ببریم [۲۲]. اگرچه یک باتری منبع ذخیره سازی انرژی شیمیایی می باشد، و مستقیماً این انرژی شیمیایی نمی تواند در دسترس باشد. این موضوع، تخمین از طریق SOC برای باتری های مختلف را می طلبد [۲۳]. تخمین دقیق حالت شارژ خیلی پیچیده می باشد و به ابزارهای مختلفی نیاز دارد چون که مدل های باتری محدود هستند و خطای تخمین پارامتری وجود دارد. چندین مثال از دقت ناچیز و قابلیت اطمینان تخمین حالت شارژ وجود دارد که قالب طرز کار SOC هستند [۲۴]. و در این فصل ما یک مرور کلی از جزئیات روش های ریاضیاتی موجود در تخمین حالت شارژ و شناسایی بیشتر و توسعه و رشد ممکن در آینده خواهیم داشت [۲۵].

---

<sup>1</sup> Hybrid Electric Vehicle

<sup>2</sup> Industrial Application

## ۲ - ۳ مشخصات و دسته بندی تخمین حالت شارژ

SOC یکی از بیشترین پارامترهای مهم برای باتری می باشد، اما این تعریفی است که چندین نوع مختلف دارد. در حالت کلی، SOC یک باتری مشخص کننده میزان ظرفیت کنونی ( $Q(t)$ ) به ظرفیت صوری ( $Q_n$ ) می باشد. ظرفیت صوری (ظاهری) بوسیله‌ی سازنده اش داده می‌شود و نشان دهنده بیشترین مقدار شارژی است که می تواند در باتری ذخیره شود. SOC می تواند بصورت زیر تعریف شود:

$$\text{Soc}(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (1-3)$$

روش‌های ریاضیاتی گوناگونی برای تخمین هستند که بر پایه‌ی متدلوژی طبقه بندی می‌شوند. دسته بندی روش‌های SOC در ادبیات های متنوع (منظور تاریخچه‌ی SOC)، متفاوت می باشد. اگرچه، تقریباً ادبیات ها این اجازه را می دهد که یک دسته بندی در میان چهار اقلام زیر بیان شود [۲۴، ۵۴].

۱. **اندازه گیری مستقیم:** این روش از ویژگی های فیزیکی باتری از جمله ولتاژ و امپدانس باتری استفاده می کند.
  ۲. **تخمین Book-Keeping:** این روش از جریان تخلیه استفاده می کند، بعنوان مثال ورودی و انتگرال گیرها از جریان تخلیه در همه‌ی زمان ها برای محاسبه کردن Soc می باشد.
  ۳. **سیستم های تطبیقی:** سیستم های تطبیقی خود طراحی شده هستند و می توانند بصورت اتوماتیک برای شرایط تخلیه‌ی مختلف با Soc وقف داده شوند. سیستم های تطبیقی جدید متنوعی برای تخمین Soc هستند که توسعه یافته اند.
  ۴. **روش‌های هیبریدی یا پیوندی:** مزایای روش‌های هیبریدی از مزیت های همه‌ی روش‌های تخمین Soc تشکیل می‌شود و اجازه می دهد عملکرد یک تخمین بهینه‌ی سراسری را داشته باشد. تاریخچه‌ی تخمین حالت شارژ نشان می دهد که بطورکلی روش‌های پیوندی یا هیبریدی ایجاد کننده‌ی یک تخمین خوب برای Soc می باشد.
- جدول زیر روش‌های مختلف تخمین از نگاه متدلوژی را که ثبت شده اند نشان می دهد، کاربردهای روش‌های تخمین Soc در سیستم مدیریت باتری از اهمیت زیادی برخوردار است.



جدول ( ۳-۱) طبقه بندی روش‌های ریاضیاتی تخمین [27] SOC

روش های ریاضیاتی	اقلام
۱. روش ولتاژ مدار باز ۲. روش ولتاژ ترمینال ۳. روش امپدانس ۴. روش طیف نمایی	اندازه گیری مستقیم
۱. روش شمارنده کولن ۲. روش شمارنده کولن اصلاح شده	تخمین Book-keeping
۱. الگوریتم پس انتشار BP ۲. شبکه عصبی با روش RBF ۳. ماشین برداری پشتیبان ۴. شبکه عصبی فازی ۵. صافی کالمن	سیستم های تطبیقی
۱. ترکیب شمارنده کولن با EMF ۲. ترکیب صافی کالمن با شمارنده کولن ۳. روش صافی کالمن پیشرفته با سیستم Per-Unit	روش های هیبریدی یا پیوندی

### ۳ - ۳ مرور کلی بر روش‌های ریاضیاتی تخمین SOC

#### ۳ - ۳ - ۱ روش اندازه گیری مستقیم

روش‌های اندازه گیری مستقیم به تعداد ویژگی های فیزیکی باتری از جمله امپدانس و ترمینال ولتاژ اشاره دارد، تعداد روش‌های مستقیم متنوعی وجود دارد که همه‌ی این روش‌ها کاربردی بوده و خروجی آنها خوب و نسبتاً دقیق می باشد که این روش‌ها عبارت اند از: روش ولتاژ حلقه باز، روش

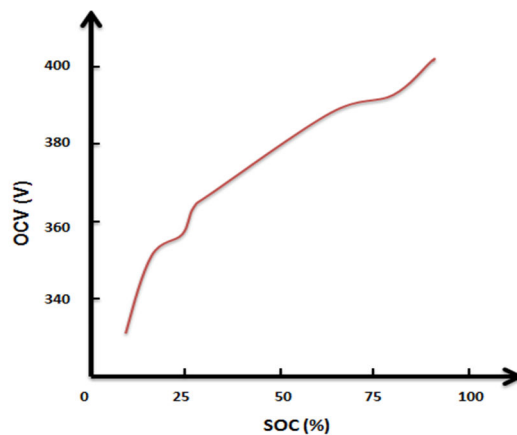
کاربردی بوده و خروجی آنها خوب و نسبتاً دقیق می باشد که این روش ها عبارت اند از: روش ولتاژ حلقه باز، روش ولتاژ ترمینال، روش اندازه گیری امپدانس و روش طیف نمایی امپدانس.

### ۳-۱-۱ روش ولتاژ مدار باز

برای تقریب زدن بین حالت شارژ باتری سربی اسیدی و ولتاژ مدار باز، یک ارتباط خطی وجود دارد که با رابطه ذیل بیان می شود:

$$V_{OC}(t) = a_1 \times SOC(t) + a_0 \quad (2-3)$$

که  $SOC(t)$  حالت شارژ باتری در لحظه  $t$  می باشد و  $a_0$  ولتاژ ترمینال باتری وقتی که  $SOC=0\%$  است می باشد، و  $a_1$  با دانستن مقدار  $a_0$  و  $V_{OC}(t)$  در لحظه ای که  $SOC=100\%$  است بدست می آید. با استفاده از رابطه ی فوق حالت شارژ باتری تخمین زده می شود که این تخمین معادل با تخمین ولتاژ مدار باز می باشد [۵۵]. روش ولتاژ مدار باز بر اساس OCV باتری ها می باشد که این متناسب با تخمین حالت شارژ در لحظه ای که بارگذاری باتری برای مدت طولانی که معمولاً دو ساعت است قطع می شود می باشد، هرچند این زمان قطع طولانی ممکن است برای بعضی باتری ها با زمان خیلی طولانی تری انجام شود [۵۶]. برخلاف باتری های سربی اسیدی، برای باتری های لیتیوم یون یک ارتباط خطی ای بین ولتاژ مدار باز و حالت شارژ باتری وجود ندارد، ولی یک ارتباط نوعی بین ولتاژ مدار باز و حالت شارژ برای باتری های لیتیوم یون وجود دارد که این ارتباط در شکل (۱-۳) نشان داده شده است [۵۷]:



شکل (۱-۳) ارتباط نوعی بین OCV و SOC

ارتباط بین ولتاژ مدار باز با حالت شارژ از روی پاسخ دهی یک پالس باری روی باتری لیتیوم یون تعیین شده است، که اجازه می دهد باتری به یک نقطه ی تعادل برسد. این ارتباط برای همه باتری ها همانند هم نمی باشد، این یعنی ارتباطی که بین ولتاژ مدار باز و حالت شارژ باتری وجود دارد برای دو باتری مختلف با هم تفاوت دارد، این تفاوت ناشی از تفاوت در نوع ارتباط بین OCV و SOC برای باتری های مختلف می باشد و با این ارتباط بین این دو یک تخمین دقیقی برای حالت شارژ حاصل می شود [۵۸]. در این پایان نامه نیز پس از تعیین ارتباط بین ولتاژ مدار باز و حالت شارژ باتری، برای تخمین حالت شارژ از صافی کالمن توسعه یافته استفاده می کنیم تا تخمین دقیق انجام شود که در فصل بعدی بطور مفصل به آن خواهیم پرداخت.

### ۳ - ۱ - ۳ روش ولتاژ ترمینال

روش ولتاژ ترمینال بر پایه ی افت ولتاژ ترمینال به علت امپدانس های داخلی باتری در لحظه ی تخلیه می باشد، همچنین نیرو محرکه الکتریکی<sup>۱</sup> باتری متناسب با ولتاژ ترمینال می باشد. از آنجایی که نیرو محرکه الکتریکی باتری تقریباً نسبت خطی با حالتی از شارژ دارد، ولتاژ ترمینال باتری نیز تقریباً نسبت خطی با حالتی از شارژ دارد [۲۷]. این روش افت ولتاژ را در جریان ها و دماهای مختلف انجام می دهد، افت ولتاژ ترمینال در این روش تا لحظه ی تخلیه کامل انجام می شود به همین دلیل خطای تخمین در این روش زیاد می باشد در نتیجه این روش برای تخمین حالت شارژ باتری های ربات هایی که با حساسیت بالا عمل می کنند مفید و عاقلانه نمی باشد [۵۹].

### ۳ - ۱ - ۳ روش امپدانس

از جمله تکنیک هایی می باشد که وظیفه اش اندازه گیری امپدانس و شناسایی چندین پارامتر مثل دما و ولتاژ می باشد و این پارامترها در تعیین تخمین دقیق نقشی اساسی ایفا می کنند. اگرچه پارامترهای امپدانس و نوسان های موجود برای همه ی سیستم های باتری یکسان نمی باشد، این نوسان هایی که در حین انجام آزمایش های امپدانس انجام می شود برای شناسایی پارامترها می باشد و

<sup>1</sup> ElectroMotive Force(EMF)

همچنین خود پارامترهای امیدانس برای انجام دقیق تخمین حالت شارژ باتری ربات می باشد و از حساسیت بالایی برخوردار می باشد، تخمین دقیق حالت شارژ باتری رباتی که برای انجام یک کاوشی باشد و همچنین خود پارامترهای امیدانس برای انجام دقیق تخمین حالت شارژ باتری ربات می باشد و از حساسیت بالایی برخوردار می باشد، تخمین دقیق حالت شارژ باتری رباتی که برای انجام یک کاوشی مثل شناسایی و دریافت نمونه به یک کره‌ی دیگر فرستاده می‌شود از اهمیت بالایی برخوردار می باشد و در مواقعی که یک سیستم بصورت زمان واقعی<sup>۱</sup> عمل می‌کند حساسیت کار به مراتب بالاتر و بیشتر می باشد [۲۹].

### ۳ - ۳ - ۱ - ۴ روش طیف‌نمایی امیدانس

روش طیف‌نمایی امیدانس، از بیشتر شدن امیدانس باتری از لحاظ فرکانس های ac، تحت جریان‌های شارژ و دشارژ مختلف از یک دامنه‌ی مشخص پیشگیری می‌کند. مقادیر امیدانس های مدل بوسیله‌ی کمترین مربعات متناسب با مقادیر امیدانس اندازه‌گیری شده مقدار دهی می‌شود. لذا حالت شارژ باتری بطور مستقیم بوسیله‌ی اندازه‌گیری کنونی امیدانس ها و وابستگی آنها با دانستن امیدانس ها تحت سطوح Soc متنوع ممکن است استنتاج شود [۱۸،۱۹].

### ۳ - ۳ - ۲ روش تخمین Book-Keeping

روش تخمین Book-Keeping از اطلاعات جریان تخلیه‌ی باتری که از ورودی می‌آید استفاده می‌کند، این روش یک سری اثرات داخلی باتری از جمله خود دشارژی، از دست دادن ظرفیت و اثرات دشارژ را نادیده در نظر می‌گیرد. این روش خود به دو روش ذیل تقسیم می‌شود:

- روش شمارنده کولن
  - روش شمارنده کولن اصلاح شده
- که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

---

<sup>1</sup> Real Time

### ۳ - ۳ - ۲ - ۱ روش شمارنده کولن

در روش شمارنده کولن جریان تخلیه یک باتری اندازه گیری می‌شود و از جریان تخلیه در همه‌ی زمان‌ها انتگرال گرفته می‌شود تا تخمین درست و صحیح صورت پذیرد. تخمینی که با روش شمارنده‌ی کولن در لحظه  $t$  انجام می‌شود با  $SOC(t)$  بیان می‌شود، که در این تخمین جریان تخلیه  $I(t)$ ، تخمین قبلی حالت شارژ برابر با  $SOC(t-1)$  و تخمین با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{I(t)}{Q_n} \Delta t \quad (3-3)$$

### ۳ - ۳ - ۲ روش شمارنده کولن اصلاح شده

این روش بهبود یافته‌ی روش شمارنده‌ی کولن می‌باشد، یک تکنیک جدیدی است که روش شمارنده کولن اصلاح شده می‌نامند. این روش از جریان تصحیح شده استفاده می‌کند که صحت یا درستی تخمین را بهبود می‌بخشد. جریان تصحیح شده تابعی از جریان تخلیه می‌باشد که یک ارتباط درجه دوم بین جریان تصحیح شده و جریان تخلیه‌ی باتری وجود دارد.

بر حسب داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده، جریان تصحیح شده با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_C(t) = k_2 I^2(t) + k_1 I(t) + k_0 \quad (4-3)$$

که  $k_0$  و  $k_1$  و  $k_2$  مقدار ثابتی دارند که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آیند، در

روش شمارنده کولن اصلاح شده،  $SOC$  با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{I_C(t)}{Q_n} \Delta t \quad (5-3)$$

نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که صحت و درستی روش شمارنده کولن اصلاح شده برتر و

دقیق‌تر از روش شمارنده کولن متداول می‌باشد.

### ۳ - ۳ - ۳ سیستم تطبیقی

اخیراً، با توسعه روش هوش مصنوعی سیستم‌های تطبیقی جدید گوناگونی برای تخمین حالت

شارژ رشد و توسعه یافته است. روش‌های توسعه یافته جدید شامل شبکه عصبی، تابع پایه‌ای شعاعی<sup>۱</sup>، روش‌های منطق فازی<sup>۲</sup>، ماشین بردار پشتیبان<sup>۳</sup>، شبکه عصبی فازی و صافی کالمن می‌باشند. سیستم‌های تطبیقی حالت خود طراحی دارند که می‌توانند بصورت خودکار در سیستم‌های شارژ تنظیم شوند، بطوریکه باتری‌ها بوسیله‌ی یک سری فاکتورهای شیمیایی تاثیر خود را بجا می‌گذارند و حالت شارژ نیز بصورت غیرخطی می‌باشد. سیستم‌های تطبیقی اغلب راه حل خوبی برای تخمین حالت شارژ می‌باشد [۲۴].

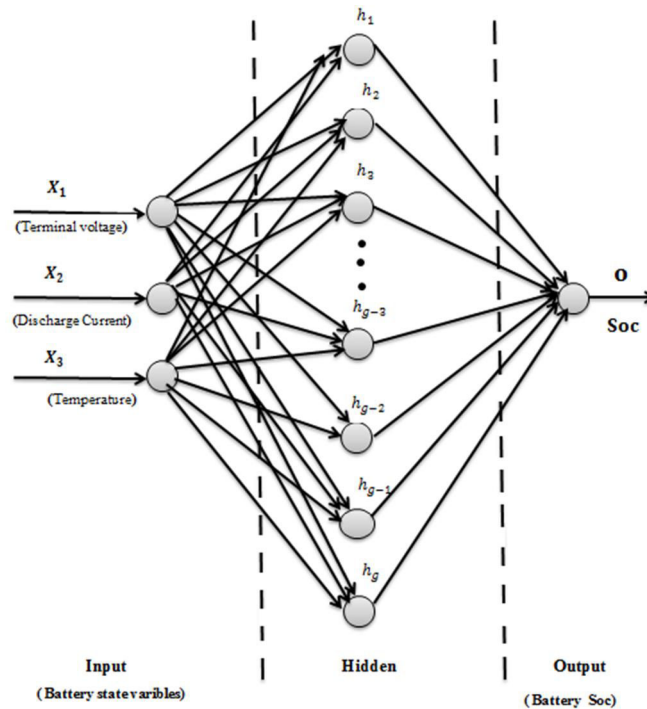
### ۳ - ۳ - ۱ الگوریتم پس انتشار BP

الگوریتم پس انتشار BP متداول ترین نوع شبکه عصبی مصنوعی<sup>۴</sup> می‌باشد، این روش به علت توانایی خوب خود در و توانایی خوبی در نگاشت غیر خطی خودسازمان یافته<sup>۵</sup> و خودفراگیر<sup>۶</sup> در تخمین حالت شارژ بکار برده می‌شود. به عنوان یک مساله تعریف شده ارتباط بین ورودی و خروجی در تخمین SOC غیرخطی و پیچیده می‌باشد [۳۲]. شبکه عصبی هوشمند نشان دهنده‌ی SOC می‌باشد که با استفاده از جریان SOC، ولتاژ و جریان و درجه حرارت اخیر باتری را پیش بینی می‌کند [۶۲].

ساختار تخمین حالت شارژ با استفاده از الگوریتم پس انتشار BP در شکل (۲-۳) نشان داده شده است، معماری یا ساختار شبکه عصبی با روش BP در برگزیده یک لایه ورودی<sup>۷</sup>، یک لایه خروجی<sup>۸</sup> و یک لایه پنهان<sup>۹</sup> می‌باشد [۶۳].

---

<sup>1</sup> Radial Basis Function  
<sup>2</sup> Fuzzy Logic Methods  
<sup>3</sup> Support Vector Machine  
<sup>4</sup> Artificial Neural Networks  
<sup>5</sup> Self-organization  
<sup>6</sup> Self-learning  
<sup>7</sup> Input Layer  
<sup>8</sup> Output Layer  
<sup>9</sup> Hidden Layer



شکل (۲-۳) معماری شبکه عصبی BP برای تخمین حالت شارژ باتری

لایه ورودی سه نرون<sup>۱</sup> برای ولتاژ ترمینال، جریان تخلیه و دما دارد، لایه مخفی به تعداد  $g$

نرون و لایه خروجی تنها یک نرون برای حالت شارژ یا SOC دارد [۳۲].

مجموع ورودی ها از یک نرون در لایه مخفی با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$neti_j = \sum_{i=1}^3 x_i v_{ij} + b_j \quad (۶-۳)$$

که  $neti_j$  مجموع ورودی از نرون  $j$  در لایه مخفی می باشد،  $x_i$  ورودی لایه مخفی نرون  $j$  از لایه

ورودی نرون  $i$ ،  $v_{ij}$  وزن بین لایه ورودی نرون  $i$  و لایه مخفی نرون  $j$  می باشد،  $b_j$  ولتاژ بایاس لایه

مخفی نرون  $j$  می باشد. تابع فعال سازی اعمال شده به نرون در لایه مخفی یک تابع تانژانت هذلولی<sup>۲</sup>

می باشد که با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$h_j = F(neti_j) = \frac{1 - e^{-2neti_j}}{1 + e^{-2neti_j}} \quad (۷-۳)$$

<sup>۱</sup> Neuron

<sup>۲</sup> Hyperbolic Tangent Function

جمع ورودی نرون O در لایه خروجی با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$netO = \sum_{i=1}^j h_i w_i + k \quad (۸-۳)$$

که net o مجموع ورودی از لایه خروجی نرون O می باشد،  $h_i$  ورودی به نرون لایه خروجی از لایه پنهان نرون i می باشد،  $w_i$  وزن بین نرون i لایه مخفی و نرون لایه خروجی می باشد، k ولتاژ بایاس نرون O لایه خروجی و j تعداد نرون ها در لایه مخفی می باشد:

$$O = F(net o) = \frac{1}{1 + e^{-net o}} \quad (۹-۳)$$

### ۳ - ۳ - ۲ شبکه عصبی RBF

شبکه‌ی عصبی RBF متدلوژی تخمین مفیدی برای سیستم هایی با اطلاعات ناتمام و ناقص می باشد، با استفاده از این متدلوژی می توان به آنالیز ارتباطات بین دنباله مرجع و دیگر موارد تطبیقی در مجموعه پرداخت. شبکه عصبی RBF برای تخمین حالت شارژ مورد استفاده قرار می گیرد، این روش برای تست از داده هایی که با آزمایش کردن باتری بدست می آید استفاده می کند و نتایج نشان می دهد که سرعت عملکرد و دقت تخمین مدل می تواند مطابق با شرایط درخواست ها در آزمایشات باشد و مسلماً مدل ارزش کاربردی دارد [۳۳]. در مرجع [۳۴] روش تخمین حالت شارژ با شبکه عصبی RBF، از داده های ورودی ولتاژ ترمینال، جریان تخلیه و دمای باتری در تخمین SOC برای طول عمر باتری  $PO_4$  تحت شرایط تخلیه‌ی مختلف استفاده می کند.

### ۳ - ۳ - ۳ روش منطق فازی

روش منطق فازی ابزار قدرتمندی برای مدلسازی سیستم های غیرخطی و پیچیده فراهم می سازد [۳۵]. روش کاربردی تخمین حالت شارژ سیستم باتری توسعه داده شده و برای چندین سیستم تست شده است، این روش با استفاده از مدل های منطق فازی داده های تجزیه و تحلیل شده را وارد می کند و با طیف نمایی امپدانس روش های شمارنده کولن and/or را فراهم می نماید.

در مرجع [۳۶] یک روش تخمین حالت شارژ بر پایه منطق فازی برای باتری های لیتیوم یون



برای استفاده بالقوه در الکتروشوک های قابل عمل توسعه پیدا کرده است. امپدانس ac و ولتاژ بازگشت اندازه گیری شده برای ایجاد پارامترهای ورودی مدل منطق فازی مورد استفاده قرار گرفته است. در مرجع [۶۴]، یک سیستم تخمین که می تواند ویژگی های انتخابی در پایگاه داده<sup>۱</sup> شامل مدل های منطق فازی برای ظرفیت قابل دسترس و تخمین حالت شارژ را داشته باشد معرفی شده است، و این کار بوسیلهی اندازه گیری امپدانس برحسب آن فرکانس ها انجام می شود. در مرجع [۶۵]، حالت شارژ بوسیلهی بهبود روش متریک یا اندازه ای کولن تخمین زده شده است و پراکندگی زمان، وابسته به تنظیم کردن بوسیلهی سیستم یادگیری مورد استفاده، می باشد. تنظیم یا وقف دادن سیستم یادگیری روش متریک کولن، در اغلب موارد یک راه یا روشی است که خطای آزاد باقیماندهی پردازش های تخمین که به پراکندگی زمانی وابسته است را بدست می آورد. سیستم یادگیری پیشنهادی، از مدل های منطق فازی استفاده می کند که برای تخمین حالت شارژ استفاده نمی شود ولی سیستم یادگیری ترکیب دهنده را انجام می دهد.

#### ۳ - ۳ - ۳ - ۴ ماشین برداری پشتیبان

روش ماشین برداری پشتیبان، برای دسته بندی در حیطه های گوناگون از تشخیص الگو و همچنین برای مساله رگرسیون که بطور ذاتی مشکل تر از مساله دسته بندی می باشد بکار می رود. ماشین برداری حمایت کننده از سیستم تخمین غیرخطی که بیشتر تطبیقی می باشد استفاده می کند، و به این دلیل که سیستم تخمین از ایدهی کمترین مربعات<sup>۲</sup> استفاده می کند نسبت به تغییرات کوچک غیرحساس می باشد. هانسن و وانگ، بطور کاربردی بر روی یک سیستم برداری حمایت کننده برای تخمین حالت شارژ برای باتری لیتیوم-یون تحقیق و بررسی کرده اند. روش ماشین برداری حمایت کننده تخمین زنده ای می باشد که مشکل تخمین زنده ای حالت شارژ با روش شمارنده کولن را از بین نبرده است ولی یک تخمین حالت شارژ دقیقی را ارائه داده است [۳۷].

<sup>1</sup> Data Base

<sup>2</sup> Least Squares

### ۳ - ۳ - ۵ شبکه عصبی فازی

شبکه عصبی فازی در کاربردهای زیادی به ویژه در شناسایی سیستم های ناشناخته استفاده شده است. شبکه عصبی فازی در تعیین هویت سیستم های نامشخص یا نامعلوم و سیستم های غیرخطی و همچنین با محاسبه ی ضرایب بهینه سازی ماشین های یادگیری بصورت هوشمندانه و شایسته ای عمل می کند. این روش یکی از روش های دقیقی می باشد که برای تخمین حالت شارژ باتری های ربات هایی که بصورت بلادرنگ عمل می کنند بصورت هوشمند عمل کرده و تخمین خوب و درستی را انجام می دهد، از آنجایی که این ربات ها با حساسیت زیادی عمل می کنند و یک اشتباه کوچک ممکن است خطرات زیادی را برای یک کاری که مهم و حیاتی می باشد داشته باشد، لذا نیاز به یک تخمین لحظه به لحظه و درست از حالت شارژ باتری خواهد داشت و چه بسا یک اشتباه کوچک در سیستم های بلادرنگ مثل جرثقیل های سنگین و صنعتی خطرات جانی و مالی زیادی را به جا خواهد گذاشت [۳۸].

### ۳ - ۳ - ۴ روش های هیبریدی یا ترکیبی

هدف از مدل های هیبریدی استفاده از هر یک از مدل های قبلی و فراهم ساختن عملکرد تخمین بهینه ی سراسری<sup>۱</sup> می باشد. در مبحث سازی تخمین ها ممکن است یک ذره در بهینه ی محلی<sup>۲</sup> گیر کند و آن را به عنوان بهینه ی سراسری تشخیص دهد و کار به اتمام برسد و این در حالیکه بهینه ی سراسری نقطه ی دیگری می باشد و ذره در بهینه ی محلی قرار دارد لذا برای اینکه این مشکل ها به وجود نیاید و ذره در بهینه ی محلی گیر نکند از الگوریتم های بهتر و هوشمندانه تری استفاده می کنند که معمولاً در مبحث بهینه ی سراسری در تخمین شارژ با استفاده از روش های هیبریدی این کار انجام می شود. از آنجایی که اطلاعات در برگرفته ی روش تخمین، منحصر بفرد می باشد از روش های هیبریدی برای این کار استفاده می کنند، روش هیبریدی با ماکزیمم کردن

<sup>1</sup> Globally Optimal estimating

<sup>2</sup> Local Optimal

اطلاعات در دسترس و با جمع کردن اطلاعات اختصاصی مدل و ایجاد بهترین مدل می تواند از مزیت های مدل های تخمین چندگانه برای بهبود صحت و درستی تخمین بهره مند شود. تاریخچه ی تخمین شارژ حاکی از آن است که عموماً روش های هیبریدی نتایج تخمین حالت شارژ خوبی را در مقایسه با روش های اختصاصی خاص یا منفرد دارا می باشند. روش های هیبریدی با روش های مختلف از جمله روش اندازه گیری مستقیم و روش تخمین Book-Keeping ترکیب می شوند [۴۰-۴۲].

### ۳ - ۳ - ۱ ترکیب شمارنده کولن و نیرو محرکه الکتریکی

روش تخمین حالت شارژ جدید که از ترکیب کردن روش اندازه گیری مستقیم با اندازه گیری نیرو متحرکه برقی در طول نقطه تعادل حاصل می شود و همچنین روش تخمین Book-Keeping با روش شمارنده کولن در طول زمان تخلیه توسعه می یابد و ابزاری دقیق در یک سیستم تخمین حالت شارژ بصورت زمان واقعی می باشد [۴۰]. هیچ وقت باتری ها در طول یک دوره ظرفیتشان را بطور کامل از دست نمی دهند و اکثراً محاسبه ی حالت شارژ و باقیمانده ی زمان اجرا به درستی انجام می شود و بهبود سیستم تخمین حالت شارژ توانایی غلبه بر اثر کهنگی باتری را دارد، و همچنین یک الگوریتم تطبیق  $Q_{Max}$  ساده برای این کار معرفی شده است که در این الگوریتم با در نظر گرفتن شرایط پایدار، تعادل یا ثابت حالت شارژ از تطبیق  $Q_{Max}$  با اثر کهنگی یا عمر باتری به درستی استفاده شده است. و همچنین اثبات شده است که این الگوریتم می تواند  $Q_{Max}$  را با حالت شارژ تطبیق دهد و تخمین حالت شارژ باتری نو یا جدید را بهبود می بخشد. اساساً از ظرفیت از دست رفته ی باتری در طول یک دوره، نتیجه می شود که الگوریتم تطبیق  $Q_{Max}$ ، صحت و درستی تخمین RRT و حالت شارژ را افزایش خواهد داد.

### ۳ - ۴ برآورد حالت شارژ

اهمیت اولیه در روش تخمین حالت شارژ، تخمین درست می باشد، ما بعداً SOC را با دقت بیشتری مشخص خواهیم ساخت [۷۰]، اما چیزی که مهم است مشخص کردن بار باقیمانده از صفر تا

۱۰۰ درصد در هر سلول می باشد، که برای انجام کار مفید قابل دسترس می باشد. مشاهده‌ی برآورد SOC باتری بسیار شبیه درجه گاز ماشین روی داشبورد ماشین می باشد که بصورت خالی ۰٪ و پر ۱۰۰٪ خوانده می شود. در حالیکه حسگرهایی برای اندازه گیری درست سطح سوخت در مخزن وجود دارد، اما هیچ حسگری برای اندازه گیری SOC وجود ندارد. در عوض، SOC می بایست از طریق اندازه گیری های فیزیکی توسط یک الگوریتم برآورد شود. روشی که در این پایان نامه تدوین شده است منحصر به فرد می باشد زیرا نه تنها ارائه دهنده برآورد صحیح از SOC می باشد، بلکه ارائه دهنده میزان سلامت باتری نیز می باشد، این پیامد مستقیم روش فیلترسازی کالمن پیشرفته است که ما از آن استفاده می کنیم. تخمین دقیق حالت شارژ می تواند امتیازات زیر را فراهم سازد [۶۹]:

- **عمر طولانی.** اگر مخزن سوخت بسیار پر یا خالی باشد، هیچ آسیبی به مخزن نمی رسد. به هر حال شارژ یا تخلیه بیش از حد سلول باتری، می تواند موجب صدمه دائمی شود و منجر به کاهش عمر آن شود. تخمین دقیق SOC می تواند جهت جلوگیری از صدمه دیدن سلول ها بوسیله مانع شدن از عبور جریان مضر مورد کاربرد قرار گیرد.
- **عملکرد.** بدون یک تخمین زنده SOC خوب، فرد می بایست همیشه هنگام استفاده از باتری محتاط باشد تا از شارژ یا تخلیه بیش از حد به خاطر اعتماد به تخمین ضعیف جلوگیری شود. با یک تخمین خوب، بخصوص تخمینی با محدوده های شناخته شده خطاها، فرد می تواند بدون ترس از تمام ظرفیت باتری استفاده نماید.
- **قابلیت اعتماد.** تخمین زنده ضعیف SOC برای حالت های مختلف عملکرد ربات بصورت متفاوتی عمل می کند. یک تخمین زنده خوب، قابل اعتماد و پایدار است که موجب ارتقا قابلیت اعتماد سیستم انرژی ربات می شود.
- **چگالی یا غلظت.** اطلاعات درست از وضعیت باتری و SOC این امکان را برای بسته باتری فراهم می سازد تا در محدوده های طراحی بدون ترس مورد استفاده قرار گیرد، بنابراین نیازی به مهندسی بیش از حد بسته نمی باشد. این مسئله موجب ایجاد بسته های سبک تر و کوچک تر باتری می شود.
- **اقتصادی.** سیستم های باتری کوچک تر هزینه کمتری دارند. خدمات گارانتی این سیستم ها نیز هزینه های کمتری دارد.

### ۳ - ۵ برآورد انرژی قابل دسترس

دومین شرایط الگوریتم BMS برآورد دینامیک بیشترین انرژی قابل دسترس شارژ و تخلیه باتری می باشد (یا بیشترین جریان شارژ یا تخلیه). این برآورد جهت محاسبه SOC دما و مدل دینامیک سلولی می باشد، و می بایست در طول محدوده عملیاتی دما و SOC قابل اعتماد باشد. بر اساس محاسبه محدوده تخلیه (یا شارژ)، BMS تضمین می کند که ربات می تواند به طور ایمن این سطح انرژی یکنواخت را برای چندین ثانیه از پیش تعیین شده و بدون تجاوز به محدوده خطای طراحی SOC و ولتاژ، دریافت کند. ما با برآورد EKF SOC همراه با محدوده های متناظر خطا، جهت پیش بینی درست و محتاطانه انرژی قابل دسترس استفاده می کنیم در حالیکه این امکان را برای بسته فراهم می سازد تا برای اطلاعات قابل دسترس مورد استفاده قرار گیرد [۶۷].

### ۳ - ۶ برآورد حالت سلامت باتری

برای یک رباتی که در حال انجام یک کار می باشد آگاهی از وضعیت سلامت باتری مورد نیاز است. SOH با مقیاس های ساده ای توصیف می شود از قبیل (آیا هیچ سلولی با SOC بالاتر یا پایین تر از محدوده های طراحی وجود دارد؟) یا (آیا قابلیت یا ظرفیت هر سلول پایین تر از کمترین میزان قابل قبول کاهش می یابد؟) و (آیا مقاومت داخلی هر سلول از یک محدوده متجاوز می شود؟) و غیره. این امر امکان شناسایی سلول های داخل یک بسته را که نیاز به جابجایی دارند بدون نیاز به جابجایی همه سلول ها را فراهم می سازد. اطلاعات SOH می تواند به خاطر اهداف گارانتی در گزارش داده ها نوشته شود. در یک ربات، برآورد پیچیده SOH مورد نیاز نیست، هنگامیکه کاربر تعیین می کند که باتری دیگر عملکرد قابل قبولی ندارد، صرفاً کل بسته را تعویض می کند [۶۷].

### ۳ - ۷ طول عمر

برای موفقیت های تجاری، طول عمر سلول های باتری ربات باید پاسخگوی عمر مفید ربات باشد. جایگزین ساختن یک بسته باتری در هر چند سال قابل قبول نیست. ساختار و شیمی الکترودی سلول نقش برجسته ای را در مدت عمر طولانی ایفا می کند، اما الگوریتم های خوب BMS می توانند

طول عمر را افزایش دهند، همچنین مانع فشارهای اضافی بر سلول ها و در نتیجه مانع خراب شدن می شود. عمر طولانی بسته پیامدهای دیگری دارد؛ برای مثال ما می دانیم که BMS باید قادر به پیش بینی درست طول عمر کلی سلول ها باشد. این مسئله حاکی از آن است که BMS باید همه پارامترهای سلولی را، برآورد یا ردیابی کند. با تطبیق تغییرات ویژگی های سلولی، BMS می تواند بدرستی انرژی قابل دسترس عمر کلی سیستم باتری را برآورد کند و مانع ورود جریان بالایی شود که موجب خراب شدن باتری می شود. ما از روش EKF جهت انجام این کار استفاده می کنیم [۶۷].

از آنجایی که اهمیت سیستم های ذخیره سازی انرژی در لوازم الکتریکی قابل حمل و برنامه های کاربردی وسیله ی نقلیه هیبریدی زیاد شده است، تخمین دقیق حالت شارژ به طور فزاینده ای مهم می باشد. در چند سال اخیر بسیاری از محققان تحقیقات بسیاری را در زمینه ی تخمین حالت شارژ انجام داده اند. دقت تخمین به طور مداوم بهبود یافته است، و می توان انتظار داشت که تحقیقات زیاد و تلاش های چشمگیر و توسعه یافته ای در این مسیر در حال انجام می باشد. به منظور بهبود بیشتر تخمین حالت شارژ، همراه با یک سری از متون، پیشرفت هایی برای تحقیق بیشتر شامل زمینه های زیر پیش بینی می شود.

- i. انجام تحقیقات زیاد بر روی روش های هیبریدی مانند ترکیب روش اندازه گیری مستقیم و روش تخمین نگهداری بوک یا **Book-Keeping** برای دستیابی به نتایج خوب در تخمین حالت شارژ انجام شده است.
- ii. روش تخمین موجود باید در انواع مختلفی از باتری مورد استفاده قرار گیرد، تحقیقات و پژوهش های زیادی در کاربرد همه منظوره سودمندی، بر روی روش ها انجام شده است.
- iii. تحقیقات عمیق زیادی بر روی بهبود سیستم تخمین حالت شارژ که توانایی مقابله با اثر پیری یا کهنگی باتری را دارد، انجام شده است.
- iv. بررسی و مطالعات، بیشتر روی روش های هوش مصنوعی<sup>۱</sup> جدید و بهبود الگوریتم های آموزشی می باشد. علاوه بر این، روش های جدید بر روی زمینه ی پیچیدگی تخمین می

---

<sup>1</sup> Artificial Intelligence

باشند و پژوهش‌های آینده روی این زمینه تمرکز خواهند داشت.

v. برای بهبود بیشتر عملکرد تخمین با روش شبکه عصبی، روش‌های جستجوی بهینه برای تعداد بهینه نورون‌ها در لایه‌های پنهانی به بررسی و یکپارچگی در روش شبکه عصبی نیاز دارد.

vi. انجام تحقیقات، بیشتر برای تخمین پارامترهای تطبیقی می‌باشد. مدل‌ها توانایی تطبیق بصورت خودکار با انواع مختلفی از باتری‌ها، شرایط تخلیه متنوع و یاتری‌های با سنین مختلف را دارد [۲۶].

باید یک سیستم ارزیابی دقیق‌تر و استاندارد برای اندازه‌گیری عملکرد روش تخمین ایجاد کرد. در ادامه به معرفی کامل صافی کالمن و صافی کالمن توسعه یافته خواهیم پرداخت و به تفاوت بین این دو نیز اشاره خواهیم کرد.

### ۳ - ۸ صافی کالمن خطی

بسیاری از مقتضیات توصیف شده الگوریتم تنها پارامترهای برآوردی یک باتری را مشخص می‌سازد که مستقیماً نمی‌تواند اندازه‌گیری شوند. ما دریافتیم که فیلترسازی کالمن ارائه دهنده یک راه حل قدرتمند و دقیق می‌باشد. این فیلترسازی یک تکنولوژی تثبیت شده برای برآورد وضعیت دینامیک سیستم است که به طور معمول در بسیاری از زمینه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که شامل ردیابی هدف، موقعیت‌یابی جهانی، کنترل سیستم‌های دینامیک، دریاوردی و ارتباطات می‌باشد همچنین در زمینه باتری بسیار شناخته شده می‌باشد صافی کالمن متشکل از یک مجموعه از معادلات تکراری است و همچنان که سیستم فعال است مکرراً مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در اینجا ما مستقیماً به این معادلات دست نیافتیم بلکه امید ما این است که مبحث زیر ما را در درک نحوه‌ی عمل روش کمک خواهد کرد [۶۹-۷۳].

به طور بسیار کلی، هر سیستم دینامیک سببی شامل یک سلول باتری، خروجی‌های خود را مانند عملکرد ورودی‌های کنونی و قبلی ایجاد می‌نماید. همچنین برای تصور داشتن مسیر وضعیتی سیستم نیز متقاعد کننده است (جاییکه مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیست)، در اینجا وضعیت

خلاصه‌ای از تاثیر همه ورودی‌های گذشته سیستم می‌باشد.

خروجی فعلی سیستم می‌تواند با ورودی کنونی و وضعیت فعلی محاسبه شود، مقادیر ورودی گذشته باید ذخیره شوند. ما تئوری صافی کالمن را با مشاهده هر سلول در بسته باتری به کار خواهیم برد که تبدیل به یک سیستم دینامیک می‌شود که ورودی‌های آن شامل دما و جریان سلول، و خروجی آن ولتاژ نهایی می‌باشد. بردار وضعیت می‌تواند شامل SOC و تاثیرات هیستریزس باشد [۶۹]. جهت محاسبه کارآمد توسط BMS، ما یک نوع زمانی ناپیوسته از دینامیک‌های سلولی را در نظر خواهیم گرفت. با هر فاصله اندازه‌گیری که بوسیله شاخص زمانی عدد صحیح  $K$  فهرست شده است، این مدل مقادیر خروجی و وضعیتی خود را بر اساس ورودی خود بروز می‌کند. یک قالب کلی تر که ما می‌توانیم از آن استفاده کنیم یک مدل (فضایی-وضعیتی) از سیستم‌های دینامیک خطی با زمان ناپیوسته است:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (10-3)$$

$$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k \quad (11-3)$$

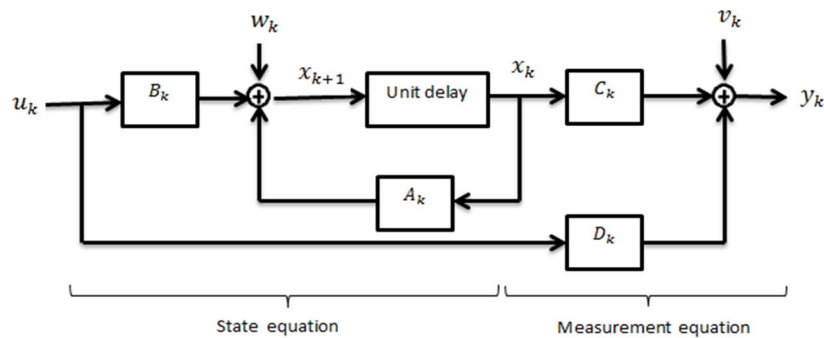
در اینجا  $x_k \in \mathbb{R}^n$  بردار وضعیت سیستم در شاخص زمانی  $k$  است، و معادله (۱۰-۳) معادله حالت نامیده می‌شود. معادله حالت، دینامیک سیستم در حال شکل‌گیری را دریافت می‌کند. ثبات سیستم، قابلیت کنترل دینامیک، و حساسیت آن به اختلالات می‌تواند از طریق این معادله تعیین شود. ورودی مشخص و تعیین‌کننده، به سیستم  $u_k \in \mathbb{R}^p$  است، و  $w_k \in \mathbb{R}^n$  اختلال یا روند نویز<sup>۱</sup> می‌باشد که ورودی اندازه‌گیری نشده‌ای را که بر وضعیت سیستم تاثیر می‌گذارد، مدلسازی می‌کند. خروجی سیستم  $y_k \in \mathbb{R}^n$  که توسط معادله خروجی (۱۱-۳) که بصورت یک ترکیب خطی از حالات و ورودی بعلاوه  $v_k \in \mathbb{R}^m$  محاسبه می‌شود که نویز حسگر را با یک روش کم حافظه که در اندازه‌گیری خروجی سیستم تاثیر دارد ولی رو حالت سیستم اثری ندارد مدل می‌کند.

ماتریس‌های  $A_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ،  $B_k \in \mathbb{R}^{n \times p}$ ،  $C_k \in \mathbb{R}^{m \times n}$  و  $D_k \in \mathbb{R}^{m \times p}$  دینامیک سیستم را توصیف می‌کنند، و از

<sup>1</sup> Noise



لحاظ زمانی متفاوت هستند. این معادله نیز در نمودار شکل (۳-۳) نشان داده شده است [۶۷].



شکل (۳-۳) نمودار سیستم خطی زمانی به شکل فضایی-وضعیتی

با ارائه مدلی مانند معادلات فوق ما خواستار تخمین وضعیت اندازه گیری نشده سیستم فیزیکی متناظر  $x_k$  در یک محیط دینامیک، با آگاهی از سیگنال های خروجی/ورودی<sup>۱</sup> اندازه گیری شده سیستم هستیم. صافی کالمن یک روش برای انجام چنین فرضیه هایی می باشد. با مدلسازی دینامیک سلولی با کمیت های دلخواه و نامعلوم (مثلا SOC) مانند اجزای بردار وضعیت مدل، صافی کالمن به طور خودکار بهترین تخمین مقادیر کنونی را محاسبه خواهد کرد.

مسئله صافی کالمن استفاده از اطلاعات مشاهده شده کلی  $\{u_0, u_1, \dots, u_k\}$  و  $\{y_0, y_1, \dots, y_k\}$  جهت یافتن کمترین برآورد خطای مجذور میانگین  $\hat{x}_k$  در وضعیت واقعی  $x_k$  می باشد. یعنی، با فرضیه هایی در مورد  $w_k$  و  $v_k$  و یک سیستم مدلسازی شده مانند معادلات (۳-۱۰) و (۳-۱۱)، راه حل اینگونه است:

$$\hat{x}_k = \arg \min E[(x_k - \hat{x})^T (x_k - \hat{x}) \mid u_0, u_1, \dots, u_k, y_0, y_1, \dots, y_k] \quad (12-3)$$

راه حل این مسئله بسیار معروف است و در جدول (۳-۲) ارائه شده است.

<sup>۱</sup> Input /Output

جدول (۲-۳) خلاصه‌ای از صافی کالمن خطی [۷۴]

---



---

### Linear state-space

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k$$

$$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k$$

### Initialization

For  $k=0$ , set

$$\hat{x}_0^+ = E[x_0]$$

$$\Sigma_{\tilde{x},0}^+ = E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T]$$

### Computation

For  $k = 1, 2, \dots$  compute

$$\text{State estimate time update: } \hat{x}_k^- = A_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + B_{k-1} u_{k-1}$$

$$\text{Error covariance time update: } \Sigma_{\tilde{x},k}^- = A_{k-1} \Sigma_{\tilde{x},k-1}^+ A_{k-1}^T + \Sigma_w$$

$$\text{Kalman gain matrix: } L_k = \Sigma_{\tilde{x},k}^- C_k^T [C_k \Sigma_{\tilde{x},k}^- C_k^T + \Sigma_v]^{-1}$$

State estimate measurement update:

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k [y_k - C_k \hat{x}_k^- - D_k u_k]$$

$$\text{Error covariance measurement update: } \Sigma_{\tilde{x},k}^+ = (I - L_k C_k) \Sigma_{\tilde{x},k}^-$$


---



---

قسمت اصلی این راه حل، مجموعه‌ای از روابط متناوب کارآمدی است که شامل برآوردی از خود حالت و همچنین ماتریس کوواریانس  $\Sigma_{\tilde{x},k}$ ، از خطای تخمین وضعیت  $x_k - \hat{x}_k$  می‌باشد [۶۹-۷۳]. ماتریس کوواریانس عدم قطعیت تخمین حالت را نشان می‌دهد و برای تولید باند های خطا استفاده می‌شود. یک  $\Sigma_{\tilde{x},k}$  بزرگ، با مقدار ویژه بزرگ یک سطح عدم قطعیت بالا را در تخمین حالت نشان می‌دهد و یک  $\Sigma_{\tilde{x},k}$  کوچک، با مقادیر ویژه کوچک، اطمینان در تخمین را نشان می‌دهد.

صافی کالمن زمان گسسته دو تخمین مختلف از حالت و ماتریس کوواریانس هر بازه‌ی نمونه

برداری را محاسبه می‌کند. تخمین اول،  $\hat{x}_k^-$  بر اساس تخمین وضعیت اولیه می‌باشد، همانطور که در تناوب قبلی محاسبه شد،  $\hat{x}_{k-1}^+$  با استفاده از مدل دینامیک سیستم به سمت فاصله یک نمونه میل می‌کند. این تخمین قبل از اندازه‌گیری‌های سیستم محاسبه می‌شود و به وسیله زیرنوشت «-» اشاره می‌شود. تخمین دوم،  $\hat{x}_k^+$  پس از اندازه‌گیری خروجی سیستم،  $y_k$ ، تخمین اول را تنظیم می‌کند، این تخمین با زیرنوشت «+» ارائه می‌شود. بنابراین تخمین وضعیت و کوواریانس  $\hat{x}_k^+$  و  $\Sigma_{\hat{x},k}^+$  دقیق‌تر از  $\hat{x}_k^-$  و  $\Sigma_{\hat{x},k}^-$  هستند چون معلومات گردآوری شده از اندازه‌گیری  $y_k$  را با یکدیگر ادغام می‌سازند و می‌بایست توسط BMS جهت گزارش تخمین SOC بکار روند [۶۷].

صافی کالمن با بهترین اطلاعات قابل دسترس در مورد حالت و کوواریانس خطا، آغاز می‌شود:

$$\hat{x}_0^+ = E[x_0], \quad \Sigma_{\hat{x},0}^+ = E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T] \quad (۱۳-۳)$$

گاهی اوقات، این کمیت‌ها به طور دقیق معلوم نیستند و مرحله آغازین می‌بایست به روشی غیر رسمی اجرا شود. این موضوع یک مسئله محسوب نمی‌شود زیرا صافی کالمن برای آغازی ضعیف بسیار مناسب است و همچنان که ادامه می‌یابد به سرعت مقادیر صحیح را پوشش می‌دهد. در آغازسازی بعدی، صافی مکرراً دو مرحله را در هر فاصله اندازه‌گیری اجرا می‌کند. ابتدا، مقدار وضعیت کنونی، خروجی سیستم، و کوواریانس خطا:  $\hat{x}_k^-$ ،  $\Sigma_{\hat{x},k}^-$  و  $\Sigma_{\hat{x},k}^-$  را پیش‌بینی می‌کند. دوم، با استفاده از یک اندازه‌گیری از خروجی سیستم واقعی تخمین وضعیت و کوواریانس خطا را به صورت  $\hat{x}_k^+$  و  $\Sigma_{\hat{x},k}^+$  تصحیح می‌سازد.

مرحله پیش‌بینی، که معروف به بروز رسانی زمانی نیز می‌باشد. مقدار پیش‌بینی شده وضعیت را در نقطه اندازه‌گیری بعدی محاسبه می‌کند. آن با وارد کردن ورودی سیستم به معادله‌ی دینامیکی سیستم انجام می‌شود، با فرض اینکه نویز پیش‌بینی شده فرآیند صفر است:

$$\hat{x}_k^- = A_{k-1}\hat{x}_{k-1}^+ + B_{k-1}u_{k-1} \quad (۱۴-۳)$$

عدم قطعیت وضعیت نیز بروز می‌شود:

$$\Sigma_{\tilde{x},k}^- = A_{k-1} \Sigma_{\tilde{x},k-1}^+ A_{k-1}^T + \Sigma_w \quad (15-3)$$

اگر سیستم پایدار باشد کوواریانس خطا کاهش می یابد و در این صورت  $A_{k-1} \Sigma_{\tilde{x},k-1}^+ A_{k-1}^T$  با هم ترکیب می شوند که موجب کاهش عدم قطعیت می شود چون در واقع یک سیستم پایدار بیانگر میرایی به صفر می باشد، زیرا دقت تخمین حالت، همیشه در حال افزایش است. نویز فرآیند،  $\Sigma_w$ ، همیشه عدم قطعیت را افزایش می دهد، زیرا ما نمی توانیم جهت تعیین دقیق تر چگونگی تاثیر آن بر وضعیت  $w_k$  را اندازه گیری کنیم [67].

پس از اندازه گیری خروجی، مرحله تصحیح وضعیت، که نوسازی اندازه گیری نیز معروف است، اینگونه می باشد:

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k [y_k - (C_k \hat{x}_k^- + D_k u_k)] \quad (16-3)$$

تخمین حالت به روز شده معادل با تخمین حالت پیش بینی شده بعلاوه یک ضریب تصحیح وزنی یا وزن داده شده می باشد. تخمین اصلی همان عبارت موجود در گروه می باشد که برابر با مقدار ولتاژ پیش بینی شده سلول از طریق مدل سلولی منهای ولتاژ سلول اندازه گیری شده سلول باتری می باشد. داریم  $\hat{y}_k = C_k \hat{x}_k^- + D_k u_k$  و این امکان وجود دارد که مقدار  $y_k - \hat{y}_k$  یک عدد منفی شود، و این بخاطر نویز اندازه گیری یک تخمین وضعیتی اشتباه  $\hat{x}_k^-$  یا یک مدل سلولی غیر صحیح ایجاد می شود. این اختلاف ارائه دهنده «اطلاعات جدید» در اندازه گیری می باشد و به دلیل دست یابی به این اطلاعات جدید به این دنباله اختلافات اغلب «پروسه نوآوری» می گویند. اگر هر تغییری بزرگ باشد، به روز رسانی حالت متناظر به سمت یک مقداری بزرگ میل می کند و اگر کوچک باشد، بروز رسانی وضعیت نیز کوچک می شود. هر تغییری بوسیله بردار بهره کالمن  $L_k$  در معادله به روز رسانی وزن دهی می شود:

$$L_k = \Sigma_{\tilde{x},k}^- C_k^T [C_k \Sigma_{\tilde{x},k}^- C_k^T + \Sigma_v]^{-1} \quad (17-3)$$

اگر تخمین وضعیت کنونی بسیار نامعلوم باشد،  $\Sigma_{\tilde{x},k}^-$  بزرگ می شود و مقادیر  $L_k$  به سمت بزرگ شدن سوق می یابند که موجب افزایش میزان نوسازی می شود. اگر تخمین وضعیت کنونی مشخص

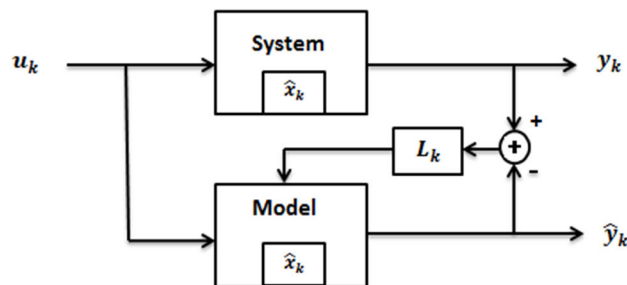
باشد، مقادیر  $L_k$  کوچک می‌شوند و نوسازی تخمین وضعیت کوچک خواهد شد. همچنین، اگر نویز حسگر بزرگ باشد،  $\Sigma_v$  بزرگ می‌شود، که موجب کوچک شدن  $L_k$  و نوسازی می‌شود.

نتیجه اعمال بهره‌ی صافی کالمن می‌تواند به عنوان فاکتور متوازن سازی نسبت سیگنال تغییرات به نویز (SNR) تصور شود که اگر سیگنال بدست آمده دارای SNR نسبتاً بزرگی باشد، نتیجه بالایی دارد و اگر SNR کم باشد، نتیجه نیز کم می‌شود.

مرحله تصحیح کوواریانس اینگونه است:

$$\Sigma_{\hat{x},k}^+ = (I - L_k C_k) \Sigma_{\hat{x},k}^- \quad (18-3)$$

عدم قطعیت وضعیت همیشه کاهش می‌یابد که بخاطر اطلاعات جدید ارائه شده توسط اندازه‌گیری می‌باشد. با این درک مهم، ما می‌توانیم صافی کالمن را به صورت ماکروسکوپی مشاهده کنیم، همان‌طور که در نمودار (۳-۴) ترسیم شده است. سیستم واقعی دارای یک ورودی اندازه‌گیری شده  $u_k$  و یک خروجی اندازه‌گیری شده  $y_k$  می‌باشد.



شکل (۳-۴) نمودار بروز رسانی حالت [67]

همچنین دارای یک وضعیت داخلی اندازه‌گیری نشده  $x_k$  می‌باشد. مدلی از این سیستم موازی با سیستم واقعی فعال می‌شود. که عملکرد آنرا شبیه سازی می‌کند. این مدل دارای همان ورودی  $u_k$  و خروجی  $\hat{y}_k$  می‌باشد. همچنین وضعیت داخلی  $\hat{x}_k$  را داراست، که همچنانکه قسمتی از شبیه سازی مدل می‌باشد دارای مقدار معلومی است. خروجی سیستم واقعی (یک اسکالر) با خروجی مدل مقایسه می‌شود و اختلاف یک خطای خروجی است. این خطا بوسیله ضرب با نتیجه کالمن،  $L_k$

به یک مقدار برداری تبدیل می‌شود، و برای تطبیق وضعیت مدل  $\hat{x}_k$  با وضعیت سیستم واقعی با تقریب دقیق تر بکار گرفته می‌شود. برآورد وضعیت و عدم قطعیت برآوردها از طریق روابط تکرار شونده‌ی کارآمد نوسازی می‌شوند. در نتیجه، صافی کالمن ارائه دهنده یک روش تئوریک دقیق جهت اندازه گیری های صافی از خروجی و ورودی سیستم به منظور ارائه برآوردی هوشمند از وضعیت سیستم دینامیک می باشد. معادلات شامل عملیات اساسی ماتریسی است که اجرای آنها بر روی تراشه های پردازشگر سیگنال دیجیتال (DSP) آسان می باشد. تاثیر جانبی این صافی این است که ماتریس نامعلوم وضعیت به طور خودکار ارائه می‌شود که تعیین کننده علامتی از محدوده خطا در برآورد است. برای فرضیه های کالمن، ۹۵/۴٪ از زمان وضعیت نامعلوم واقعی،  $x_k$ ، بوسیله‌ی نمودار  $\hat{x}_k \pm 2\sqrt{\Sigma_{\hat{x},k}}$  یا ۹۹/۷٪ از زمان  $x_k$  بوسیله‌ی نمودار  $\hat{x}_k \pm 3\sqrt{\Sigma_{\hat{x},k}}$  محدود شده است [۶۷].

### ۳ - ۹ صافی کالمن پیشرفته

صافی کالمن مطلوب ترین برآورد کننده‌ی وضعیت برای یک سیستم خطی با این فرضیه ها می باشد. همان طور که توصیف شد اگر سیستم خطی باشد، می توانیم از یک روند خطی سازی در هر مرحله جهت نزدیک ساختن سیستم غیرخطی با یک سیستم خطی که از لحاظ زمانی متفاوت است (LTV) استفاده کنیم. این سیستم LTV در صافی کالمن مورد استفاده قرار گرفته است که منتج به یک صافی گسترده در سیستم غیرخطی شده است. توجه کنید که اگرچه EKF الزاما مطلوب نیست، ولی اغلب خیلی خوب کار می‌کند [۶۷].

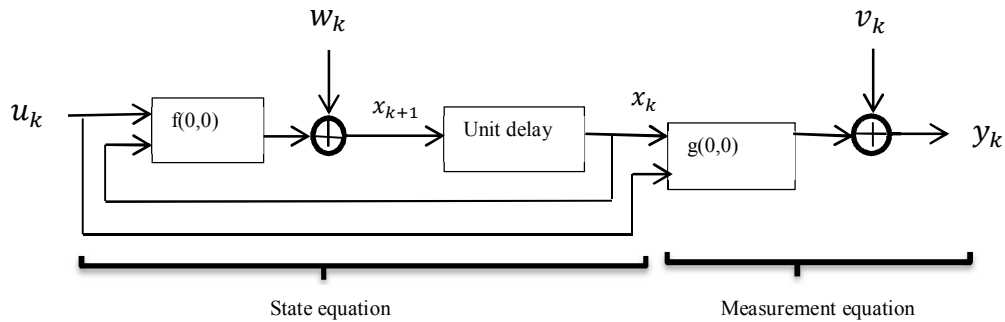
ما سیستم غیرخطی را بصورت زیر مدلسازی می‌کنیم:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (۱۹-۳)$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k \quad (۲۰-۳)$$

مانند قبل  $w_k$  و  $v_k$  فرآیند گوسی تصادفی با میانگین صفر به ترتیب همراه با ماتریس های کوواریانس هستند. هم اکنون،  $f(x_k, u_k)$  یک عملکرد غیرخطی انتقال وضعیت می باشد و  $g$

$(x_k, u_k)$  یک عملیات غیرخطی اندازه گیری است. همچنین سیستم غیرخطی در نمودار بلوکی شکل (۵-۳) نشان داده شده است.



شکل (۵-۳) نمودار سیستم غیر خطی با زمان ناپیوسته به شکل فضایی-وضعیتی [67]

در هر مرحله زمانی،  $f(x_k, u_k)$  و  $g(x_k, u_k)$  بوسیله گسترش مجموعه های تیلر مرتبه ی اول به صورت خطی تبدیل می شوند. ما فرض می کنیم که  $f(0, 0)$  و  $g(0, 0)$  در همه نقاط عملیاتی قابل تمایز از یکدیگر هستند. بنابراین:

$$f(x_k, u_k) \approx f(\hat{x}_k, u_k) + \left. \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_k} (x_k - \hat{x}_k) \quad (21-3)$$

Defined as  $\hat{A}_k$

$$g(x_k, u_k) \approx g(\hat{x}_k, u_k) + \left. \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_k} (x_k - \hat{x}_k) \quad (22-3)$$

Defined as  $\hat{C}_k$

با ترکیب معادلات (۱۹-۳) و (۲۰-۳) با (۲۱-۳) و (۲۲-۳)، ما معادلات خطی داریم که توصیف کننده وضعیت سیستم واقعی بعنوان خود عملیات می باشد، ورودی ها شامل  $u_k$  و  $\hat{x}_k$ ، و ورودی های نویزی غیر قابل اندازه گیری  $w_k$  و  $v_k$ :

$$x_{k+1} \approx \underbrace{\hat{A}_k x_k + f(\hat{x}_k, u_k)}_{\text{Not a function of } x_k} - \hat{A}_k \hat{x}_k + w_k \quad (23-3)$$

$$y_k \approx \underbrace{\hat{C}_k x_k + g(\hat{x}_k, u_k)}_{\text{Not a function of } x_k} - \hat{C}_k \hat{x}_k + v_k \quad (24-3)$$

با استفاده از این تقریب ها ، الگوریتم EKF می تواند شکل بگیرد.

الگوریتم نهایی در جدول (3-3) خلاصه شده است:

جدول (3-3) خلاصه‌ای از شکل صافی کالمن غیر خطی پیشرفته [76]

### Nonlinear State-space Model

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k$$

### Definitions

$$\left. \begin{array}{l} \hat{A}_k = \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \\ x_k = \hat{x}_k \end{array} \right| \left. \begin{array}{l} \hat{C}_k = \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} \\ x_k = \hat{x}_k^- \end{array} \right|$$

### Initialization

For  $k = 0$  , set

$$\hat{x}_0^+ = E [ x_0 ]$$

$$\Sigma_{\hat{x},0}^+ = E [(x_0 - \hat{x}_0^+) (x_0 - \hat{x}_0^+)^T]$$

### Computation

For  $k = 1, 2, \dots$  compute

$$\text{State estimate time update : } \hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1})$$

$$\text{Error covariance time update : } \Sigma_{\hat{x},k}^- = \hat{A}_{k-1} \Sigma_{\hat{x},k-1}^+ \hat{A}_{k-1}^T + \Sigma_w$$

$$\text{Kalman gain matrix : } L_k = \Sigma_{\hat{x},k}^- \hat{C}_k^T [ \hat{C}_k \Sigma_{\hat{x},k}^- \hat{C}_k^T + \Sigma_v ]^{-1}$$

$$\text{State estimate measurement update : } \hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k [ y_k - g(\hat{x}_k^-, u_k) ]$$

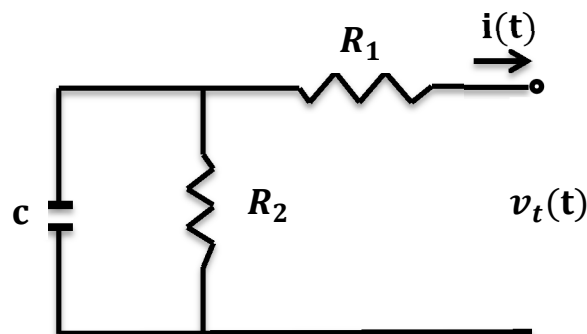
$$\text{Error covariance measurement update : } \Sigma_{\hat{x},k}^+ = (I - L_k \hat{C}_k) \Sigma_{\hat{x},k}^-$$



در اصل، EKF بسیار مشابه KF استاندارد می باشد. مرحله آغازین یکسان می باشد. در هر تکرار، یک مرحله تصحیح و یک پیش بینی انجام می شود. در EKF مرحله انتشار جهت پیش بینی وضعیت کنونی در همان روشی که KF از مدل خطی استفاده می کند، مدل خطی را مورد استفاده قرار می دهد. انتشار کوواریانس خطا و معادلات بهره ای کالمن با معادلات KF یکسان می باشد، جز در موردی که ماتریس خطی  $\hat{A}_k$  جایگزین  $A_k$  و  $\hat{C}_k$  جایگزین  $C_k$  می شود. نوسازی برآورد حالت یکسان است، جز  $\hat{y}_k = g(\hat{x}_k, u_k)$  و نوسازی کوواریانس خطا که در استفاده از  $\hat{C}_k$  به جای  $C_k$  متفاوت است [۶۹]. قبل از ادامه دادن مبحث، ما باید توجه کنیم که EKF تنها امتداد غیرخطی ممکن KF نمی باشد. بخصوص، صافی های NPR کالمن روش های جایگزینی هستند که بدون نیاز به متمایز ساختن مدل ارائه دهنده برآوردهای بهتری نسبت به EKF هستند [۷۷-۷۵].

### ۳ - ۱۰ نمونه ای از صافی سازی کالمن

به منظور توضیح برخی از مفاهیم گفته شده در مباحث اخیر، ما نمونه ساده ای از صافی سازی خطی کالمن را ارائه می دهیم. ما سیستم مشخص شده توسط مدار خطی را در شکل (۳-۶) مد نظر می گیریم. در می یابیم که مدل فضایی - حالتی با زمان پیوسته از این مدار به صورت زیر می باشد:



شکل (۳-۶) مدار خطی ساده

و معادلات ولتاژ و جریان به صورت ذیل می باشد:

$$v_c(t) = -\frac{1}{R_2 C} v_c(t) - \frac{1}{C} i(t) + \frac{1}{C} w(t) \quad (25-3)$$

$$v_t(t) = v_c(t) - R_1 i(t) + v(t) \quad (26-3)$$

در اینجا  $v_c(t)$  ولتاژ خازن به عنوان یک تابعی از زمان محسوب می‌شود،  $i(t)$  جریان مدار و  $v_t(t)$  ولتاژ نهایی می‌باشد، همان طور که در نمودار نشان داده شده است. این مدار یک مدل خطی ابتدایی از یک سلول باتری محسوب می‌شود، البته در صورتی که هم  $C$  و هم  $R_2$  بزرگ باشد و  $R_1$  کوچک باشد.  $R_2$  مقاومت مقاوم خودتخلیه و  $R_1$  مقاومت داخلی سلول می‌باشد [۶۷]. سیگنال  $w(t)$  یک ورودی نامشخص است که بر حالت سیستم تاثیر می‌گذارد (ولتاژ خازن) و ممکن است در حسگر جریان به صورت اشتباه مدل سازی نماید، مانند یک خطای کمیتی. طبق فرضیه های کالمن،  $w(t)$  می‌تواند تابع گاوسین<sup>۱</sup> باشد، اگرچه در عمل این روش هنوز در مواردی که این فرضیه ها تنها تا حدی پاسخگو هستند، بسیار خوب عمل می‌کند. سیگنال  $v(t)$  می‌تواند نویز سنسور ولتاژ را که تاثیری بر وضعیت سیستم نمی‌گذارد، مدل‌سازی نماید (مثلا نویز کمیتی در حسگر)، همچنین تصور می‌شود که گاوسی باشد، اما مجدداً این صافی اغلب در مواردی که این فرضیه ها تنها تا حدودی پاسخگو هستند بسیار خوب عمل می‌کند [۷۸].

می‌توانیم این مدل را با استفاده از تکنیک های استاندارد به یک مدل زمانی گسسته تبدیل کنیم:

$$v_{c,k+1} = e^{-\frac{T}{R_2 C}} v_{c,k} - R_2 (1 - e^{-\frac{T}{R_2 C}}) i_k + w_k \quad (27-3)$$

$$v_{t,k} = v_{c,k} - R_1 i_k + v_k \quad (28-3)$$

در اینجا،  $v_{c,k}$  ولتاژ خازن در شاخص زمانی  $k$ ،  $i_k$  مقیاس جریان (که در طول فاصله اندازه گیری ثابت در نظر گرفته شده است)، و  $v_{t,k}$  مقیاس ولتاژ نهایی محسوب می‌شود. ما یک صافی زمانی ناپیوسته و خطی را همراه با پارامترهایی برای شبیه سازی ارائه شده در جدول (۳-۴) در این سیستم فعال می‌سازیم. ورودی سیستم یک روند گاوسی همراه با واریانس هر نمونه برابر با  $\Sigma_i$  می‌باشد. توجه کنید که

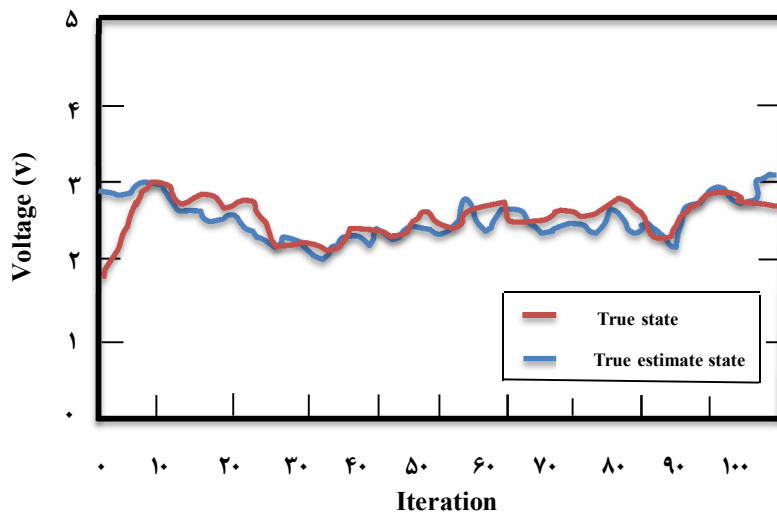
<sup>1</sup>Gaussian

برآورد وضعیت اولیه ضعیف می باشد، و برآورد کوواریانس خطای وضعیت اولیه بسیار کوچک است. با این وجود، صافی به سرعت پوشش می دهد و برآورد وضعیتی خوبی را ارائه می دهد.

جدول ( ۳-۴ ) پارامترهای بکار رفته در شبیه سازی [78]

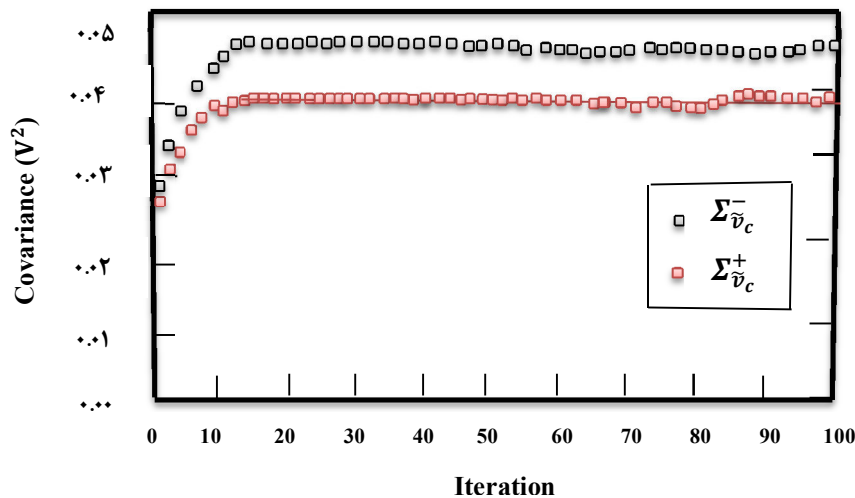
Variab	Value
$T (s)$	1
$R_1 (m\Omega)$	10
$R_2 (M\Omega)$	10
$C (kF)$	1
$\Sigma_I (A^2)$	1
$\Sigma_w (A^2)$	0.01
$\Sigma_v (V^2)$	0.1
$v_{c,0} (V)$	3.9
$\hat{v}_{c,0}^+ (V)$	2.5
$\Sigma_{\hat{v}_{c,0}}^+$	0.0

برخی از سیگنال های مهم گنجانده شده در صافی در نمودار ترسیم شده اند. در نمودار (۳-۶) ولتاژ واقعی خازن را می بینیم و ولتاژ برآورد شده خازن بصورت تابع زمانی ترسیم شده است.



شکل (۳-۷) مسیر ولتاژ خازن [78]

اگرچه ما به خواسته خود از برآورد ضعیف  $\tilde{v}_{c,0}^+$  برای نمونه استفاده می‌کنیم، صافی به سرعت میزان نزدیک به ولتاژ واقعی را پوشش می‌دهد. به علت نویز غیرقابل اندازه‌گیری  $w_k$  که پیوسته محرک سیستم می‌باشد که هیچ وقت به ولتاژ واقعی همگرا نمی‌شود. این صافی یک موازنه‌ی مطلوب میان تصور قرائت سیستم و تصور مدل جهت رسیدن به بهترین برآورد وضعیت می‌مکن می‌باشد. در نمودار (۷-۳) ماتریس نامشخص صافی را می‌بینیم. دو مقدار ترسیم شده است:

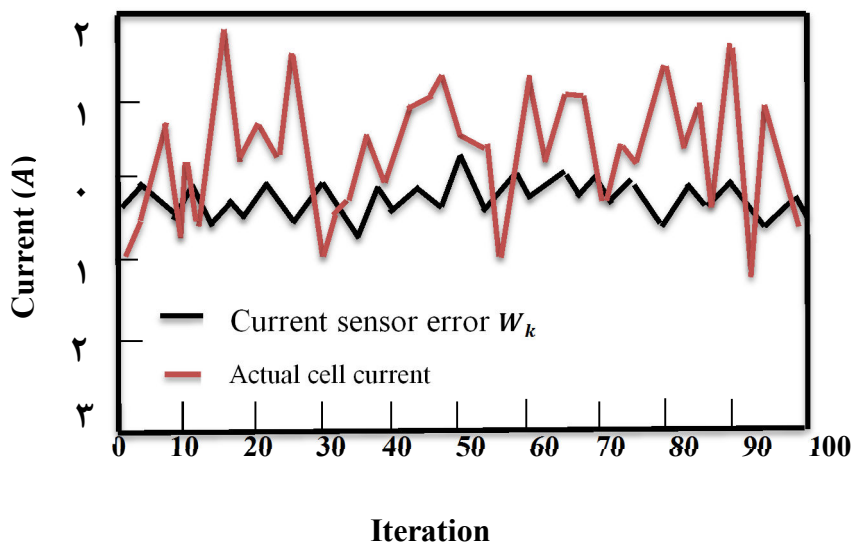


شکل (۸-۳) مسیر کوواریانس خطای وضعیت [77]

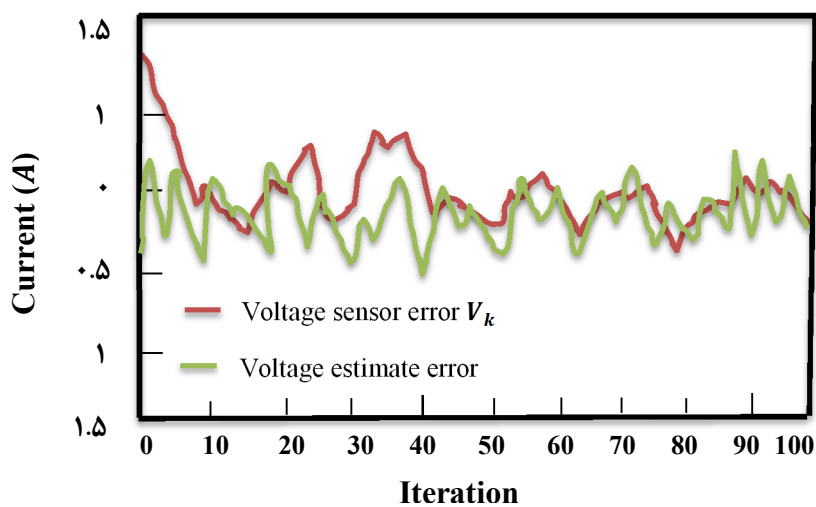
$\Sigma_{\tilde{v}_c,k}^-(V^2)$  و  $\Sigma_{\tilde{v}_c,k}^+(V^2)$  می‌بینیم که کمیت اول (عدم قطعیت وضعیت قبل از اندازه‌گیری خروجی) همیشه بزرگتر از مقدار کمیت دوم است (عدم قطعیت وضعیت بعد از اندازه‌گیری خروجی). همچنین در این مورد، می‌بینیم که این دو متغیر به سرعت به مقادیر وضعیتی ثابت می‌رسند. این مسئله در سیستم‌های خطیثابت با زمان، معمول است، اما در سیستم‌های متغیر با زمان یا غیرخطی بکار نمی‌رود. بنابراین نمی‌توانیم در سیستم خودمان از مقادیر وضعیتی ثابت برای  $\Sigma_{\tilde{x},k}^+$  و  $\Sigma_{\tilde{x},k}^-$  استفاده کنیم. در نمودار (۸-۳) و (۹-۳) نشان می‌دهیم که این نمونه یک مسئله سطحی را حل نمی‌کند.

در شکل (۸-۳) جریان واقعی سلول را در مقایسه با خطای حسگر جریان،  $w_k$ ، بعنوان تابع تکرار می‌بینیم.

می بینیم که خطای حسگر جریان یک قسمت قابل توجه از جریان واقعی سلول محسوب می‌شود. در شکل (۹-۳)، می‌توانیم ببینیم که خطای حسگر ولتاژ،  $v_k$ ، نیز بزرگتر از خطای برآورد ولتاژ است  $\hat{v}_c = v_c - \tilde{v}_c$ . اگرچه هر دو حسگر بسیار نویزی هستند. این صافی قادر به محاسبه یک برآورد دقیق از ولتاژ واقعی خازن می‌باشد.



شکل (۹-۳) خطا حسگر جریان در مقایسه با جریان سلول [78]



شکل (۱۰-۳) خطا حسگر ولتاژ در مقایسه با جریان سلول [78]

## ۲ - ۱۱ نتیجه گیری

به منظور برآورد SOC، به یک مدل فضایی \_حالی از دینامیک سلولی نیاز است، بنابراین، یک EKF قادر به برآورد SOC می باشد، و آنچه که باقی می ماند یافتن یک تابع مدل سلولی خوب و شناسایی پارامترهای این مدل است، پارامترهای مدل باید با استفاده از یک روش شناسایی سیستم تعیین شوند.

هنگامیکه ما دارای یک مدل سلولی خوب هستیم، می توانیم SOC را برآورد کنیم. همچنین نیاز به برآورد SOH خواهیم داشت، که شامل تحلیل رفتن ظرفیت، تحلیل رفتن انرژی، خودتخلیه سازی باشد، و قادر به تنظیم پارامترهای سلولی جهت منظور داشتن عمر سلول باشد. همچنین ما باید قادر به محاسبه انرژی شارژ/تخلیه باشیم.

در این فصل یک بررسی کلی بر روی روش های مختلف تخمین حالت شارژ باتری های ربات تحت شرایط مختلف صورت گرفته است. چهار دسته از روش های ریاضیاتی تخمین، که ویژگی های خود را مورد بحث قرار داده اند، و معمولاً مقالات با تأکید بر روش های متنوع ریاضیاتی تخمین حالت شارژ انتخاب می شوند.

تعدادی از این روش ها با در نظر گرفتن شرایط جریان تخلیه متفاوت بهتر بوده اند. همچنین روش صافی کالمن و صافی کالمن توسعه یافته و تخمین حالت شارژ با استفاده از این دو روش یعنی صافی کالمن و صافی کالمن توسعه یافته به صورت مفصل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

ارزیابی عملکرد روش های متنوع دشوار می باشد، به عنوان مثال برنامه های کاربردی موجود در شرایط تخلیه متنوع و اندازه های مختلف باتری ها می باشند. تحولات روش های تخمین حالت شارژ متنوعی در باتری، عملکردهایی مثل سیستم مدیریت باتری در خودروهای الکتریکی هیبریدی به

همراه دارد که از ارزش زیادی برخوردار می باشد. اساساً با در نظر گرفتن تاریخچه‌ی توسعه‌ی تخمین حالت شارژ با روش‌های مختلف، توسعه‌ی آینده در جهت تخمین حالت شارژ هدف پیشنهادی پایانی می باشد.

## ۴ فصل چهارم. تخمین حالت شارژ باتری ربات با روش صافی کالمن توسعه یافته

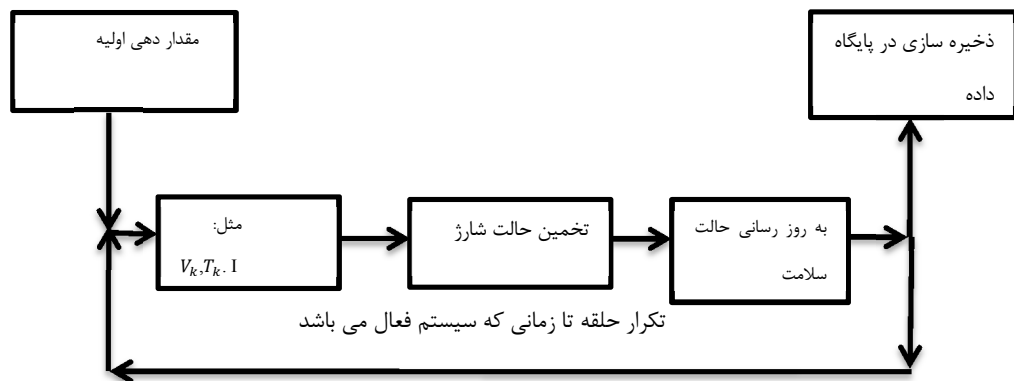


در این فصل ما به بررسی کامل تخمین حالت شارژ باتری ربات با استفاده از صافی کالمن توسعه یافته می پردازیم و همچنین به بررسی شبیه سازی انجام شده با استفاده از نرم افزار متلب خواهیم پرداخت و نتایج بدست آمده را در بصورت نمودار نشان خواهیم داد و مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار خواهیم داد. مطالعات و تحقیقات زیادی در زمینه ی تخمین SOC باتری شده است، اغلب این روش ها روش های مدل محور می باشند و نیاز به یک مدل ولتاژی با مدار باز دارند که OCV را با SOC مرتبط می سازد. عملیات OCV-SOC در سیستم مدیریت باتری ربات یا بصورت یک جدول ارجاع می باشد که به بررسی آن می پردازد یا بصورت یک عبارت تحلیلی انجام شده است، در حالیکه رویه دوم دارای چندین مزایا مانند کارایی محاسباتی و همچنین متناسب برای تحلیل می باشد. بخاطر محدوده مسطح بسیار در منحنی OCV-SOC برای باتری های فسفاتی، یون لیتیومی یک ناهماهنگی کوچک در متناسب سازی OCV می تواند موجب انحراف زیادی در برآورد SOC شود.

در اصل یک سیستم مدیریت باتری باید پاسخگوی مدیریت عملکرد باتری در هر سیستمی اعم از خودروهای الکتریکی، خودروهای هیبریدی و خصوصاً ربات ها باشد. سیستم ربات خواسته های متنوعی در زمینه ی سلول های باتری و سیستم مدیریت باتری دارد و این خواسته ها مسبب این شده است که از یک تکنیک پیشرفته ای استفاده کنیم. در شکل (۴-۱) ما بلوک دیاگرام ساده ای برای الگوریتم مدیریت باتری ربات نشان داده ایم، زمانی که یک ربات شروع به انجام یک فعالیتی می کند، الگوریتم نیز باید شروع به کار کند و دینامیک قالب بر یک سلول را مشخص کند. اگر سطح دشارژ خود به خودی خیلی بالا باشد، سیستم مدیریت با کم کردن شرایط نقص و مشکل موجود و برطرف کردن آن، حالت سلامت باتری را مشخص می کند.

به روز رسانی حالت شارژ با اندازه گیری زمان، ولتاژ، دما و جریان مشخص می شود، تخمین

حالت شارژ باتری سلول باید بر اساس به روز رسانی این متغیرها انجام شود. و همچنین این الگوریتم موظف است که ظرفیت باتری و همه‌ی پارامترهای دیگری که در طول عمر باتری تاثیر دارند را مشخص کند و در تعیین حالت سلامت باتری عملکرد خوب و بالایی داشته باشد.

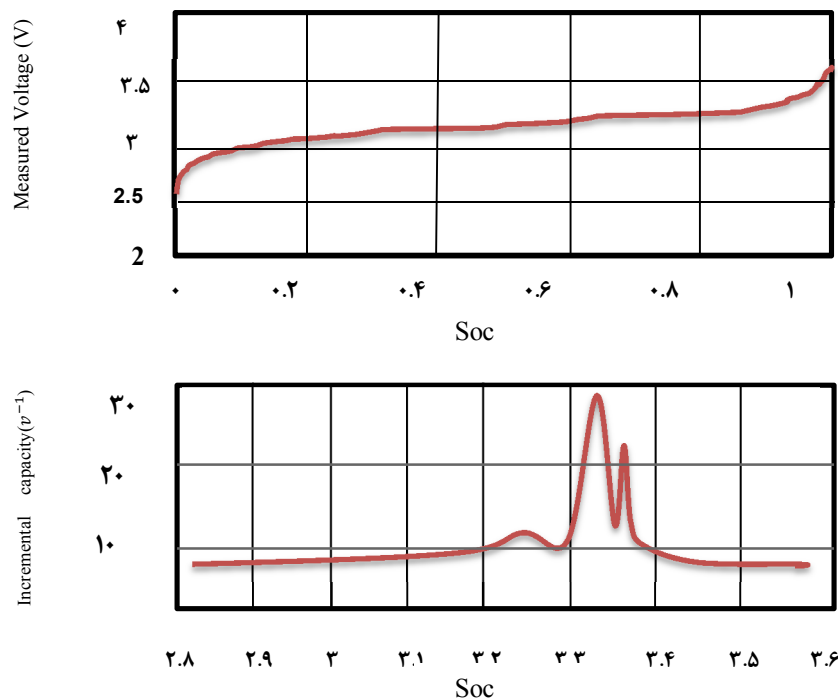


شکل ( ۴-۱) بلوک دیاگرام ساده‌ای برای الگوریتم مدیریت باتری ربات [78]

در مرجع [۷۳]، چندین مدل پدیده شناسی OCV، که با متناسب سازی منحنی بدون در نظر گرفتن عملکرد پیچیده باتری در طول روند افزایش یا کاهش یون لیتیوم ساخته می‌شوند که به طور خلاصه ارائه شده اند. اگرچه این مدل ها قسمتی از ویژگی های غیرخطی OCV باتری را نشان می دهند. قادر به دریافت تثبیت و انتقالات ولتاژ که مطابق با پدیده مرحله بندی در آند گرافیت می باشد، نیستند.

مدلسازی عملکرد OCV-SOC هنگام کنترل SOH باتری نیز ضروری می باشد، زیرا غالباً اطلاعات OCV طول عمر باتری و تجزیه عملکردی آن را منعکس می سازد. بخصوص با متمایز ساختن ظرفیت شارژ شده باتری (Q) با توجه به ولتاژ نهایی (V)، تثبیت ولتاژ بر روی منحنی OCV به پیک های کاملاً قابل شناسایی  $dQ/dv$  بر روی منحنی آنالیز ظرفیت فزاینده یا  $ICA^1$  تغییر یافته است. نمودار شکل (۴-۲) را مشاهده کنید.

<sup>1</sup> Incremental Capacity Analysis



شکل (۲-۴) عملکرد ICA بر روی منحنی ولتاژ شارژ با میزان [73] 1/20C

این روش تحلیل ظرفیت فزاینده به شناسایی تغییرات تدریجی در عملکرد سلولی کمک می‌کند، که بر اساس اطلاعات جمع آوری شده OCV از آزمایشات چرخه عمر، با حساسیتی بیشتر از روش‌های معمول می‌باشد. ICA برای باتری‌های لیتیومی قابل کاربرد است که گرافیت را بعنوان الکترود منفی بکار می‌برند. کارایی ICA با باتری‌های لیتیومی مختلف از جمله  $\text{LiFePO}_4$ ،  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ، LNCAO، LiNMC و غیره نشان داده شده است. در مرجع [۷۹] بخش طول عمر منتج شده توسط ICA از طریق روش تحلیل ظرفیت دیفرانسیلی دلتا بیشتر شرح و بسط یافته است، که به افراد کمک می‌کند تا تجزیه کم باتری ربات را در فاصله زمانی کوتاه تری شناسایی کنند. یک روش جایگزین برای بدست آوردن بخش طول عمر باتری و تحلیل SOH آن از طریق منحنی ولتاژ، تحلیل ولتاژ دیفرانسیلی<sup>۱</sup> می‌باشد. در مقابل ICA، DVA بر اساس منحنی  $dV / dQ$  است.

یک مشکل مهم در اجرای ICA و DVA حساسیت به نویز در اندازه‌گیری ولتاژ باتری ربات است. چون همه پیک‌های روی منحنی IC در داخل محدوده مسطح منحنی OCV قرار دارند. محاسبه

<sup>1</sup> Differential Voltage Analyse(DVA)

مستقیم مشتق ها از طریق اطلاعات، حتی پس از فیلترسازی دقیق اطلاعات می تواند منجر به نتایج نامطلوب و نادرستی شود. این مسئله می تواند با تحقق تجهیزات آزمایشی با دقت بالا و طراحی خاص مورد بررسی قرار گیرد. به هر حال، برای کاربرد در کشتی، دقت اندازه گیری معمولاً محدود می شود و پردازش مناسب داده مورد نیاز است.

در این تحقیق، یک مدل منسجم OCV-SOC را پیشنهاد می دهیم که قادر به برآورد SOC و کنترل SOH می باشد. مطالعه بر اساس مجموعه اطلاعات آزمایش چرخه عمر باتری ربات می باشد که از ۸ سلول گردآوری شد. این سلول ها از  $\text{LiFePO}_4$  به عنوان الکتروود مثبت و از گرافیت بعنوان الکتروود منفی در طول یک دوره ۱۸ ماهه استفاده می گردد. اطلاعات آزمایش از طریق میز آزمایش باتری بدست آمده اند که شامل یک آزمایشی آرین BT2000، اتافک حرارتی برای کنترل محیط، یک کامپیوتر برای واسطه ماشین کاربر و ذخیره سازی اطلاعات، یک برد سوئیچی برای اتصال کابلی و سلول های باتری می باشد. این سیستم دستیابی اطلاعات، دارای فرکانس عایق بندی 10 Hz می باشد و دقت اندازه گیری ولتاژ و جریان 0.02% است (یعنی 1mv برای اندازه گیری ولتاژ).

با توجه به نیاز تخمین آنلاین SOC و SOH باتری در حین عملکرد سیستم، استفاده از یک مدل ساده و در عین حال دقیق باتری برای انجام این تخمین ها، یکی از ملزومات اساسی به منظور دستیابی به یک سیستم مدیریت باتری کارا و موثر می باشد.

تاکنون مطالعات فراوانی به منظور تخمین میزان SOC باتری ها انجام شده است که بیشتر آن ها دارای رویکرد مدل محور بوده و بیانگر مدل دقیقی از ولتاژ مدار باز باتری (OCV) بوده که رابطه بین این ولتاژ و میزان SOC باتری را توصیف می نمایند. تابع OCV بر حسب SOC می تواند به صورت یک جدول جستجو<sup>۱</sup> یا یک تابع ریاضی در سیستم مدیریت باتری مورد استفاده قرار گیرد که استفاده از تابع ریاضی نسبت به جدول جستجو به دلیل مزایایی چون بازدهی بالاتر محاسباتی و امکان تحلیل آسان تر ترجیح داده می شود. از طرفی با توجه به ناحیه مسطح وسیع منحنی OCV بر حسب SOC در

---

<sup>1</sup>Look-up table

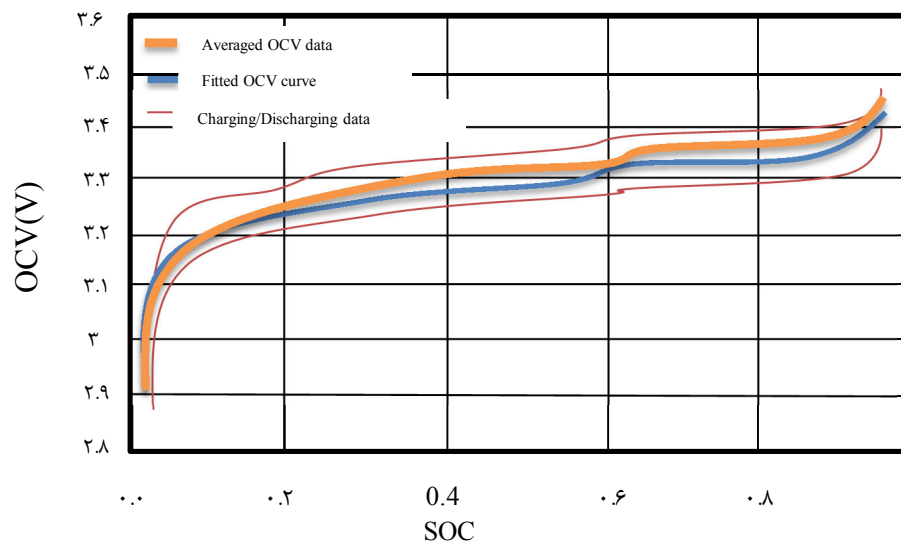
مورد باتری‌های لیتیم-یون، حتی عدم تطابق جزئی مدل‌های ارائه شده می‌تواند به خطاهای بزرگ در تخمین SOC منجر شود. بنابراین بهبود مدل‌های موجود می‌تواند به طور قابل توجهی در افزایش دقت عملیات تخمین SOC موثر باشد.

با توجه به موارد ذکر شده در این پروژه به بررسی دقت تعدادی از معروفترین مدل‌های ارائه شده به منظور توصیف منحنی OCV بر حسب SOC خواهیم پرداخت و پس از آن مدل جدیدی به منظور توصیف این رابطه ارائه خواهد شد. به منظور ارزیابی کارایی مدل ارائه شده شبیه‌سازی‌هایی با هدف برازش منحنی OCV بر حسب SOC بدست آمده از انجام آزمایش، بر اساس مدل‌های مختلف انجام شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از دقت بالاتر مدل ارائه شده نسبت به مدل‌های قبلی می‌باشد. باقی این فصل بصورت زیر تدوین شده است. ابتدا طراحی و پارامترسازی مدل جدید OCV را در بخش دوم خواهیم گفت. در بخش سوم مدل جدید OCV را با مدل‌های موجود دیگر بر اساس هماهنگ‌سازی اطلاعات OCV و دقت تخمین SOC مقایسه می‌کنیم. در بخش چهارم، کاربرد مدل OCV را برای کنترل SOH تشریح می‌کنیم، سپس تحلیل پارامتری و ساده‌سازی مدل در بخش پنجم دنبال می‌شود و نتایج در بخش آخر ارائه شده است.

#### ۴ - ۲ یک مدل جدید از ولتاژ مدار باز

ما یک ساختار از مدل جدید OCV پیشنهاد می‌کنیم که می‌تواند ویژگی‌های پدیده شناسی مرتبط با روند افزایش/کاهش یون لیتیوم را دریافت کند، در حالیکه اطلاعات OCV-SOC را هماهنگ سازد. یک ساختار مدل خاص جهت مستحکم ساختن مدل برای نشان دادن قسمت‌های سطح بر روی منحنی OCV انتخاب شده است. این قسمت‌های سطح ناشی از پدیده نحوه اجرا یون لیتیوم می‌باشد و بی شک از طریق اطلاعات تحقیقاتی مشاهده شده است. پارامترهای مدل پیشنهادی با اطلاعات تجربی شناسایی خواهد شد. بجای اندازه‌گیری OCV بعد از یک دوره‌ی آزادسازی طولانی در سطوح مختلف SOC که در طول کل محدوده گسترده شده است. اطلاعات بکار رفته بوسیله تخلیه/شارژ یک سلول باتری  $\text{LiFePO}_4$  در دمای اتاق جمع‌آوری شده است.

اطلاعات بدست آمده از ولتاژ بوسیله روند شارژ/تخلیه منعکس کننده OCV در یک وضعیت نزدیک به متوازن می باشد. اگرچه منحنی نزدیک به متوازن در نمودار شکل (۳-۴) می تواند تحت تاثیر انتشار ولتاژ به علت عدم آزادسازی باشد، ولی می تواند ویژگی های کلی الکتروشیمیایی ICA و تقلیل ظرفیت کمی را به اندازه کافی ارائه دهد.



شکل (۳-۴) متناسب ساختن نتایج با مدل پیشنهادی OCV

محدوده های بالاتر و پایین تر ولتاژ قطع بترتیب به میزان ۳.۴ و ۲.۹ تنظیم شده است. شارژ کلی ذخیره شده میان محدوده های پایین و بالا بعنوان ظرفیت باتری تعریف شده است.

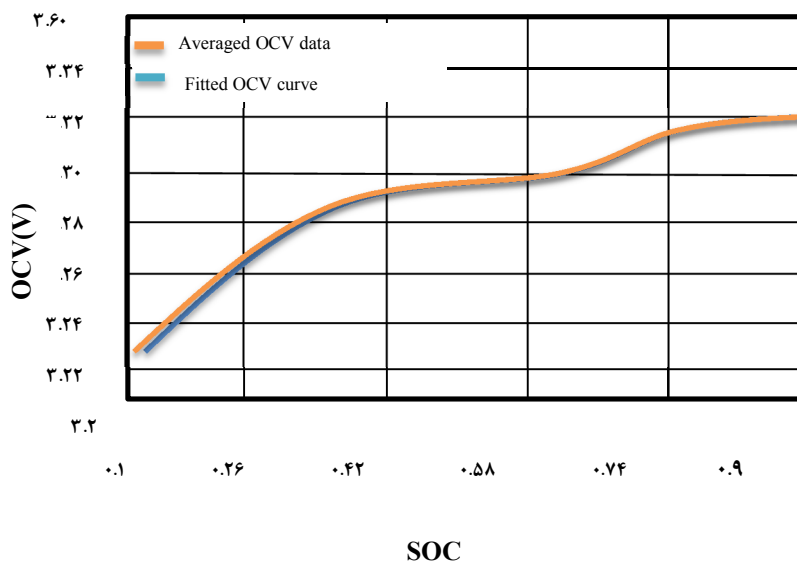
#### ۴ - ۲ - ۱ مدل پارامتری ولتاژ مدار باز

بر اساس مطالعات انجام شده، سه سطح مسطح و دو نقطه انتقالی ولتاژ وجود دارد که در مشخص ساختن ویژگی های OCV و ظرفیت باتری، اهمیت دارد. قسمت های مشاهده شده در طول محدوده ی مسطح منحنی OCV، سلول های باتری  $\text{LiFePO}_4$  قرار دارند. در مدل ما، این سطوح مسطح و انتقالی بوسیله تابع زیر ارائه شده است:

$$\text{OCV}(z) = K_0 + K_1 \frac{1}{1 + e^{\alpha_1(z - \beta_1)}} + K_2 \frac{1}{1 + e^{\alpha_2(z - \beta_2)}} + K_3 \frac{1}{1 + e^{\alpha_3(z - 1)}} + K_4 \frac{1}{1 + e^{\alpha_4 z}} + K_5 z \quad (4)$$

(۱)

در اینجا z معادل SOC است،  $K_{0\sim 5}$  پارامترهای خطی هستند، و  $\alpha_{1\sim 4}$  و  $\beta_{1\sim 4}$  پارامترهای غیرخطی هستند. به صورت ویژه، مدل ما می تواند بعنوان یک ساختار ساده، و تعمیمی از عملیات کاتدی و آندی تصور شود. نمونه‌ای از مجموعه اطلاعات کامل برای شناسایی مدل در نمودار شکل (۳-۴) نشان داده شده است که اطلاعات شارژ/تخلیه آن برای بدست آوردن داده های OCV روی هم قرار گرفتند. پارامترهای معادله (۴-۱) با استفاده از جعبه ابزار Matlab مشخص شده اند. ما بر روی هماهنگ سازی اطلاعات در طیف میانی SOC، یعنی 10%\_90%، تمرکز می کنیم، که عملاً ارائه دهنده اطلاعاتی است که صرفاً در طیف میانی SOC قابل دسترسی هستند. بعلاوه، این مسئله امکان رسیدن به دقت بیشتر را برای ما در طیفی که مدل بسیار مفید واقع خواهد شد، فراهم می سازد. منحنی OCV-SOC در نمودار (۴-۴) با ارجاعی به اطلاعات اندازه گیری شده OCV ترسیم شده است. rms ها و بیشترین مقادیر خطای هماهنگ سازی 1mv و 2.5mv است.



شکل (۴-۴) مدل OCV که در طول SOC از 0.1 تا 0.9 هماهنگ شده است

#### ۴ - ۲ - ۲ تحلیل و مقایسه مدل

همانطور که بیان شد تاکنون مدل های متعددی به منظور توصیف منحنی OCV بر حسب

SOC ارائه شده است. برخی از معروف ترین و رایج ترین مدل های ارائه شده تاکنون در جدول (۴-۱) نشان داده شده است. مدل چند شکلی دقیق ترین مدل می باشد که در اینجا ارائه شده است. همه پارامترها در این پنج مدل برای اطلاعات ارائه شده در نمودار (۴-۳) مجدداً مطابقت یافتند.

جدول (۴-۱) برخی از رایج ترین مدل های OCV-SOC ارائه شده تاکنون

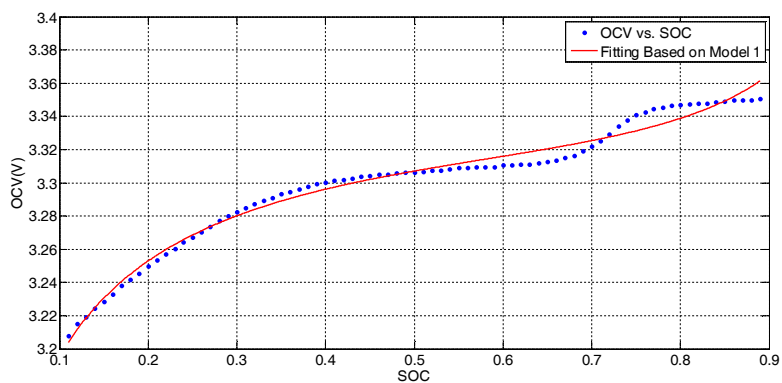
مدل	شماره
$OCV(z) = K_0 - K_1 / z - K_2 z + K_3 \ln(z) + K_4 \ln(1-z)$	۱
$OCV(z) = K_0 + K_1(1 - e^{-\alpha_1 z}) + K_2(1 - e^{-\frac{\alpha_2}{1-z}}) + K_3 z$	۲
$OCV(z) = K_0 + K_1 e^{-\alpha_1(1-z)} - K_2 z$	۳
$OCV(z) = K_0 + K_1 e^{-\alpha_1 z} + K_2 z + K_3 z^2 + K_4 z^3$	۴
$OCV(z) = K_0 + K_1 z + K_2 z^2 + K_3 z^3 + K_4 z^4 + K_5 z^5 + K_6 z^6$	۵

رابطه (۴-۱) مدل پیشنهادی در این پایان نامه برای توصیف منحنی OCV بر حسب SOC را نشان می دهد، که در مدل های بیان شده در جدول فوق  $z$  نشان دهنده SOC بوده و  $K_i$  پارامترهای خطی و  $\alpha_i$  پارامترهای غیرخطی مدل ها می باشند.

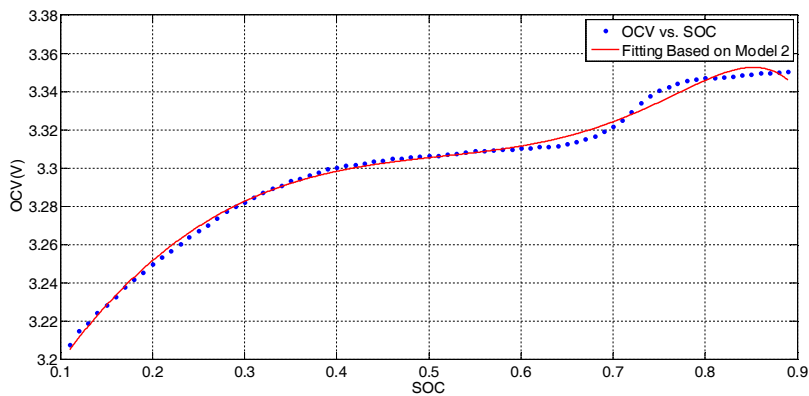
در این بخش به ارائه نتایج بدست آمده از شبیه سازی های انجام شده پرداخته می شود. شکل - های (۴-۵) تا (۴-۹) به ترتیب منحنی های برازش شده بر اساس مدل های ۱ تا ۵ را نشان می دهند. در این شکل ها منحنی آبی رنگ اطلاعات بدست آمده از انجام آزمایش و منحنی های قرمز رنگ

منحنی های بدست آمده از

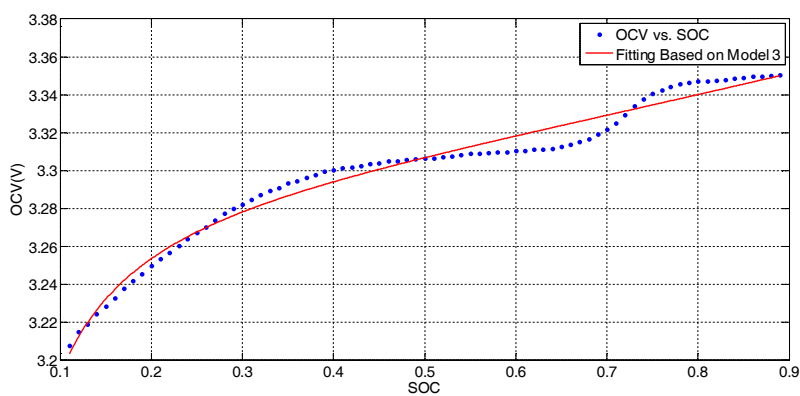




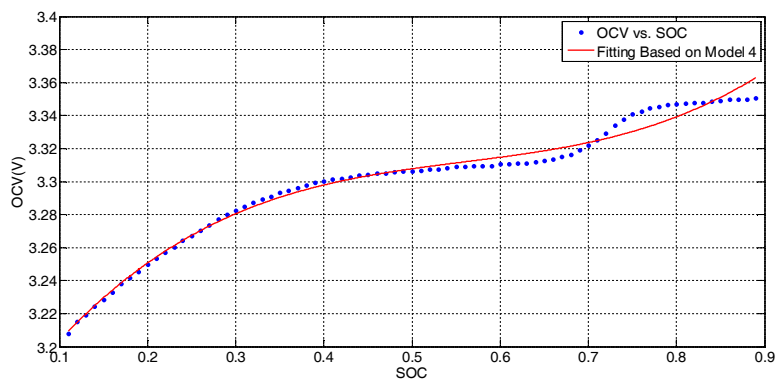
شکل ( ۴-۵ ) برازش منحنی OCV-SOC بر اساس مدل شماره ۱



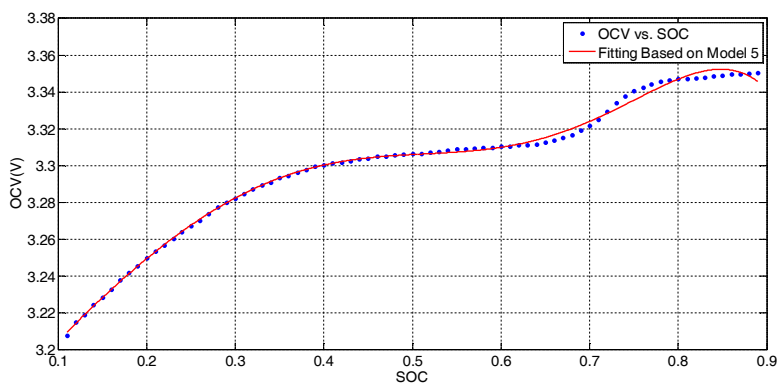
شکل ( ۴-۶ ) برازش منحنی OCV-SOC بر اساس مدل شماره ۲



شکل ( ۴-۷ ) برازش منحنی OCV-SOC بر اساس مدل شماره ۳

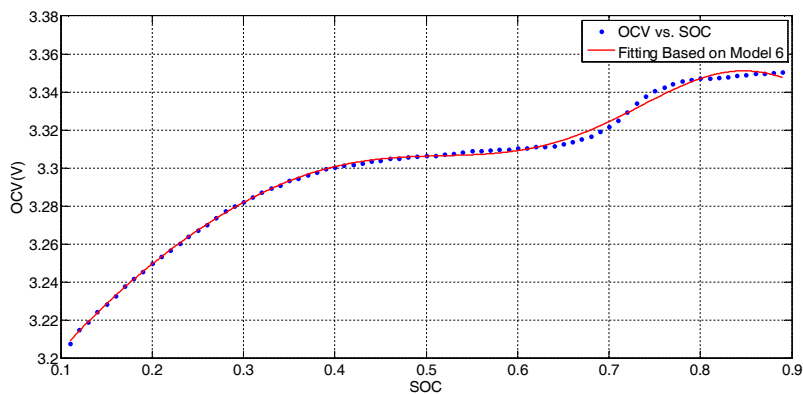


شکل ( ۴-۸ ) برازش منحنی OCV-SOC بر اساس مدل شماره ۴



شکل ( ۴-۹ ) برازش منحنی OCV-SOC بر اساس مدل شماره ۵

همچنین در شکل ( ۴-۱۰ ) نتیجه حاصل از برازش منحنی بر اساس مدل پیشنهادی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود منحنی برازش شده در این شکل نسبت به مدل‌های ۱ تا ۵ از تطابق بیشتری با منحنی آبی رنگ برخوردار است.



شکل ( ۴-۱۰ ) برازش منحنی OCV-SOC بر اساس مدل ۶ (مدل پیشنهادی)

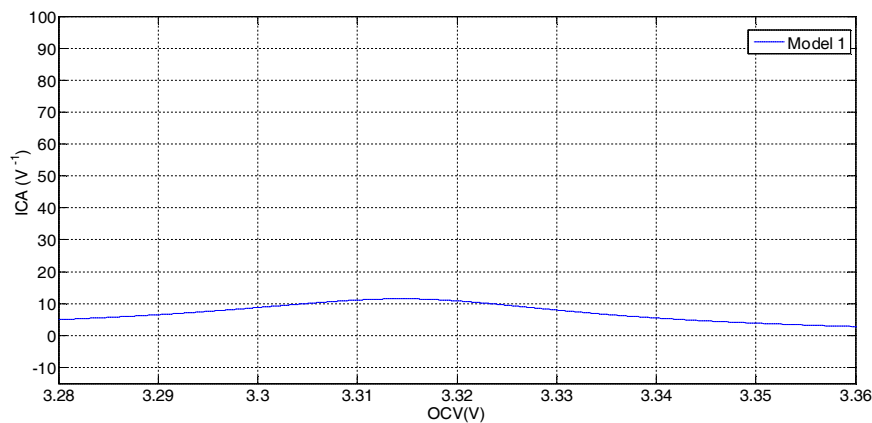
به منظور اثبات ان ادعا میزان خطای rms ناشی از برآزش منحنی OCV-SOC با استفاده از مدل‌های ۱ تا ۶ محاسبه شده و در جدول (۲-۴) نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های ۱ تا ۵ دارای دقت بالاتری می‌باشد. لازم به ذکر است که بالاتر بودن دقت مدل پیشنهادی نه تنها موجب دقت بالاتر تعیین میزان SOC باتری بر اساس ولتاژ مدار باز باتری می‌گردد، بلکه به دلیل استفاده‌های متعدد از منحنی OCV-SOC در کاربردهای متعدد از قبیل تخمین حالت سلامت باتری نیز منجر به بالا رفتن دقت و حصول نتایج صحیح‌تر می‌گردد که این امر بر اهمیت موضوع و ارزش مدل پیشنهادی افزوده و همچنین لزوم انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه و ارائه مدل‌های دقیق‌تر را روشن می‌سازد.

جدول ( ۲-۴ ) : نتایج مدل های مختلف ولتاژ مدار باز OCV

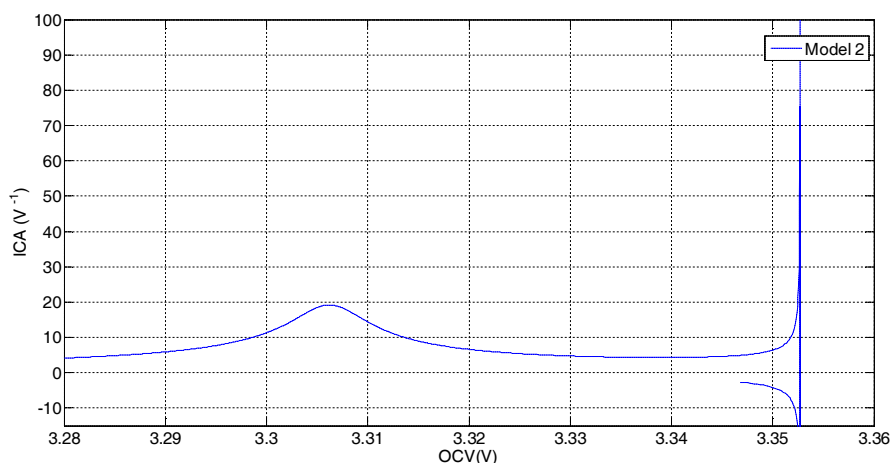
Model #	RMS error (mV)	Max error (mV)
1	5.11	12.6
2	2.576	12.6
3	5.704	12.6
4	4.609	12.6
5	1.909	12.6
6	1.699	12.6

باید اشاره شود که هیچ یک از ۵ مدل OCV برای تحلیل IC مناسب نیستند، چون ساختارهای مدل‌ها، مکانیسم روند اجرایی در مرحله‌ی افزایش/کاهش در نظر نگرفته اند. هر کسی می‌تواند ببیند که مدل جدید OCV در معادله (۱-۴) دقت هماهنگ سازی بهتری نسبت به همه پنج مدل دارد. به منظور روشن‌تر شدن بیشتر ادعای مطرح شده مبنی بر تاثیر افزایش دقت تخمین منحنی OCV-SOC بر سایر کاربردهای سیستم مدیریت باتری از قبیل تخمین میزان سلامت باتری در این بخش به ارائه نتایجی در این زمینه می‌پردازیم. یکی از منحنی‌های پر کاربرد در زمینه تخمین میزان

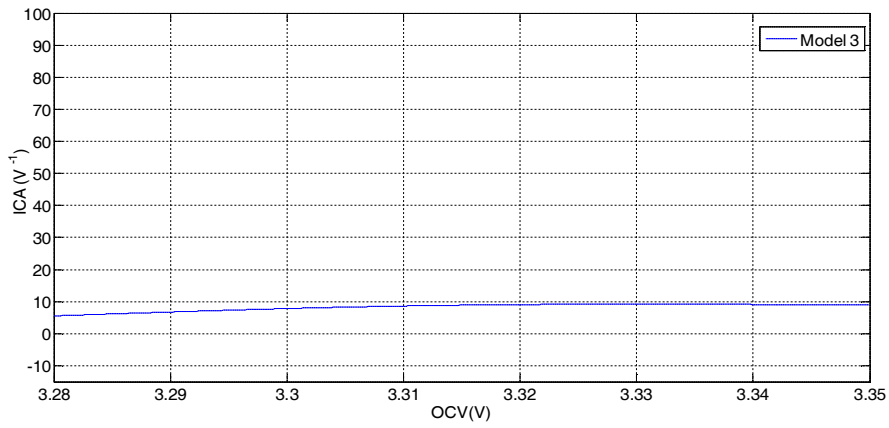
SOH باتری تکنیک تحلیل ظرفیت افزایشی یا ICA می‌باشد که با استفاده از مشتق‌گیری ظرفیت شارژ شده باتری نسبت به ولتاژ ترمینال باتری محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر این تحلیل با استفاده از مدل OCV-SOC که در بخش قبلی به طور مفصل در مورد مدل‌های ارائه شده تاکنون و مدل پیشنهادی بحث شد، انجام می‌شود. شکل‌های (۴-۱۱) تا (۴-۱۶) به ترتیب نتایج شبیه‌سازی به منظور بدست آوردن منحنی ICA بر اساس مدل‌های ۱ تا ۵ و همچنین مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که نتایج شبیه‌سازی بر اساس مدل پیشنهادی نسبت به نتایج شبیه‌سازی بر اساس مدل‌های ۱ تا ۵ به نتایج حاصل از آزمایش عملی منطبق‌تر می‌باشد.



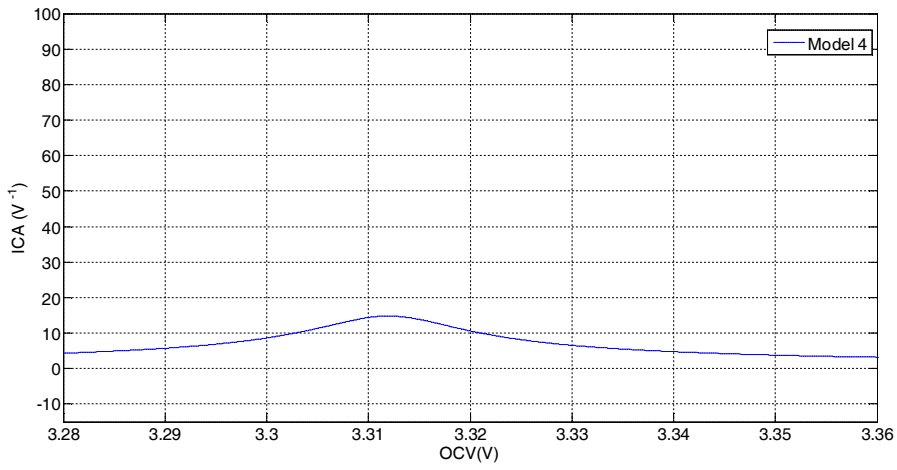
شکل ( ۴-۱۱) نمودار IC مدل اول



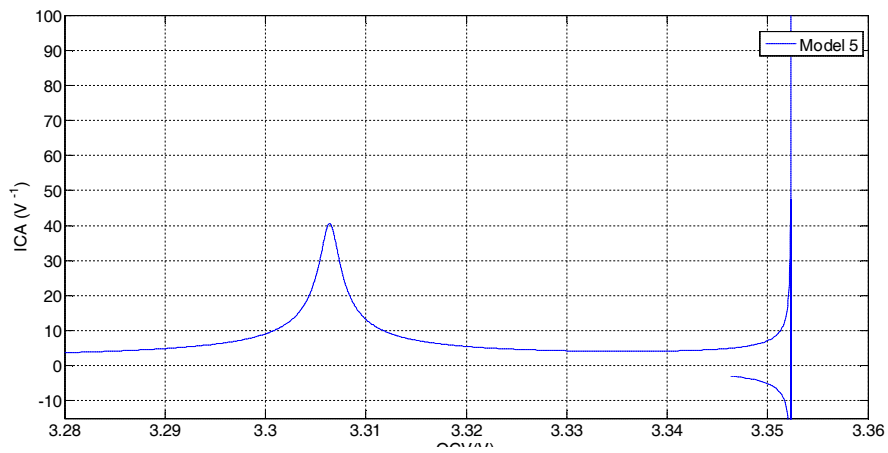
شکل ( ۴-۱۲) : نمودار IC مدل دوم



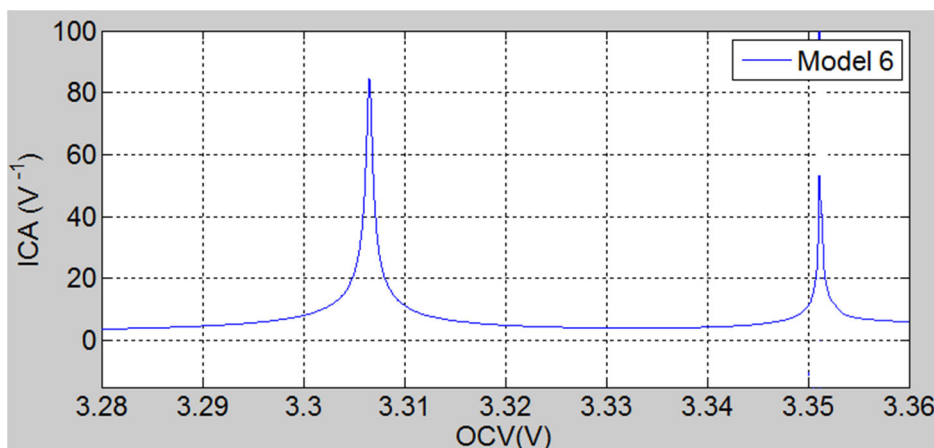
شکل (۴-۱۳): نمودار IC مدل سوم



شکل (۴-۱۴): نمودار IC مدل چهارم



شکل (۴-۱۵): نمودار IC مدل پنجم



شکل ( ۴-۱۶ ) نمودار IC مدل ششم

می توان مشاهده کرد که مدل جدید (مدل #۶) دو نقطه پیک IC مربوط به نحوه اجرا را دریافت می کند، در حالیکه مدل های دیگر تنها یک نقطه ی پیک را در منحنی های IC نشان می دهند. بنابراین مدل #۶ می تواند اطلاعات ظرفیتی بیشتری را از اطلاعات OCV، در مقایسه با مدل های دیگر استخراج کند و برای تحلیل بیشتر در کنترل SOH مورد استفاده قرار گیرد. برای مدل های #۲ و #۵، مقدار  $dq/dv$  در نقطه ی ۳/۳۵ مشخص نشده است و با تعریف تابع با توجه به نمودار تناقض دارد چون در نقطه ۳/۳۵ مقدار  $dq/dv$  مقدار مشخصی ندارد، و با توجه به نمودار این دو مدل مشاهده می شود که سر منحنی های هر دو مدل دوباره به سمت داخل منحنی برگشته است و این دومین تناقض و مشکل این دو مدل یعنی مدل #۲ و #۵ می باشد. لذا مدل ششم برای استخراج اطلاعات ظرفیتی نسبت به بقیه مدل های دیگر بهتر می باشد.

#### ۴ - ۳ تخمین حالت شارژ بر اساس صافی کالمن توسعه یافته

روش مبتنی بر صافی کالمن توسعه یافته (EKF) که در مرجع [۸۰] مورد بحث قرار گرفته است، برای تخمین SOC بکار گرفته شده است که اطلاعات آزمایش باتری بصورت تجربی بدست آمده است.

## MODEL:

$$Z_{k+1} = f(Z_k, I_k) + w_k$$

$$V_k = g(Z_k, I_k) + v_k$$

## EKF Algorithm:

$$A_{k-1} = \left. \frac{\partial f(z_{k-1}, I_{k-1})}{\partial z_{k-1}} \right|_{z_{k-1} = \hat{z}_{k-1}}$$

$$C_k = \left. \frac{\partial g(z_k, I_k)}{\partial z_k} \right|_{z_{k-1} = \hat{z}_{k-1}}$$

$$\hat{z}_{k-1} = f(\hat{z}_{k-1}, I_{k-1})$$

$$P_{k,k-1} = A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T + Q$$

$$G_k = P_{k,k-1} C_k^T [C_k P_{k,k-1} C_k^T + V]^{-1}$$

$$\hat{z}_k = \hat{z}_{k-1} + G_k [V_k - g(\hat{z}_{k-1}, I_k)]$$

$$P_k = [I - G_k C_k] P_{k,k-1}$$

## Where

$$f(Z_k, I_k) = Z_k - \left( \frac{\eta_i \Delta t}{Q_C} \right) I_k$$

$$g(Z_k, I_k) = \text{OCV}(Z_k) + V_{rc,k} + R_0 I_k$$

$$V_{rc,k+1} = \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_1 C}\right) V_{rc,k} + R_1 [1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_1 C}\right)] I_k$$

$Z_k$  معادل SOC می باشد،  $\eta_i$  کارایی تخلیه و شارژ،  $\Delta t$  مرحله زمانی،  $Q_C$  ظرفیت باتری،  $I_k$

جریان ورودی،  $V_k$  ولتاژ نهایی،  $V_{rc,k}$  ولتاژ مدار RC،  $R_0$ ،  $R_1$  و C مقاومت داخلی و ظرفیت باتری، Q

کوواریانس خطای نویزهای فرآیندها و V کوواریانس خطای نویز مشاهده شده می باشد. عملیات

OCV توسط مدل ارائه شده در معادله (۴-۱) نشان داده شده است.

در این پژوهش، همه پارامترهای مدل RC بدون انجام ایدهآل سازی های تکرارشونده، ثابت در

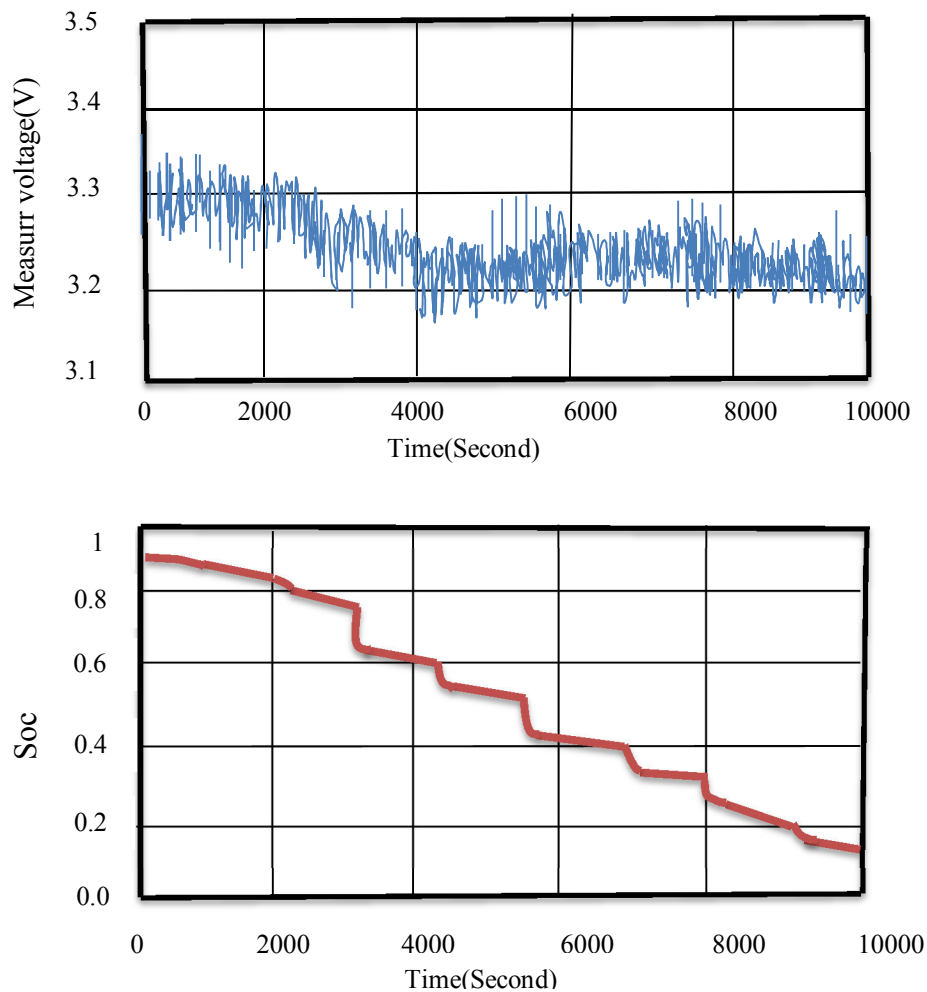
نظر گرفته شده اند.

اطلاعات باتری تحت برنامه زمانی یک ربات مورد آزمایش قرار گرفت و در نمودار (۴-۱۷) نشان

داده شده است. اطلاعات بدست آمده در مورد SOC بوسیله شمارش کولن بدست آمده است، که در آن حسگر دقیق جریان مورد استفاده قرار گرفته است و فرض بر این است که SOC واقعی باشد و بعنوان مرجعی برای ارزیابی عملکرد مورد استفاده قرار گیرد.

بنابراین، خطای برآورد SOC بصورت زیر مشخص می‌شود:

$$e_{soc,k} = \hat{z}_k - z_k \quad (۲-۴)$$



شکل ( ۴-۱۷) اطلاعات باتری تحت برنامه زمانی یک ربات مورد آزمایش

در اینجا خطای تخمین SOC است،  $\hat{z}_k$  معادل تخمین SOC توسط الگوریتم EKF می باشد و  $z_k$  مرجع یا منبع، SOC محاسبه شده از طریق داده اندازه گیری شده توسط حسگر می باشد. لطفا توجه کنید که SOC بدست آمده از طریق شمارش کولن، بخاطر خطای اجتناب ناپذیر و تراکم خطا



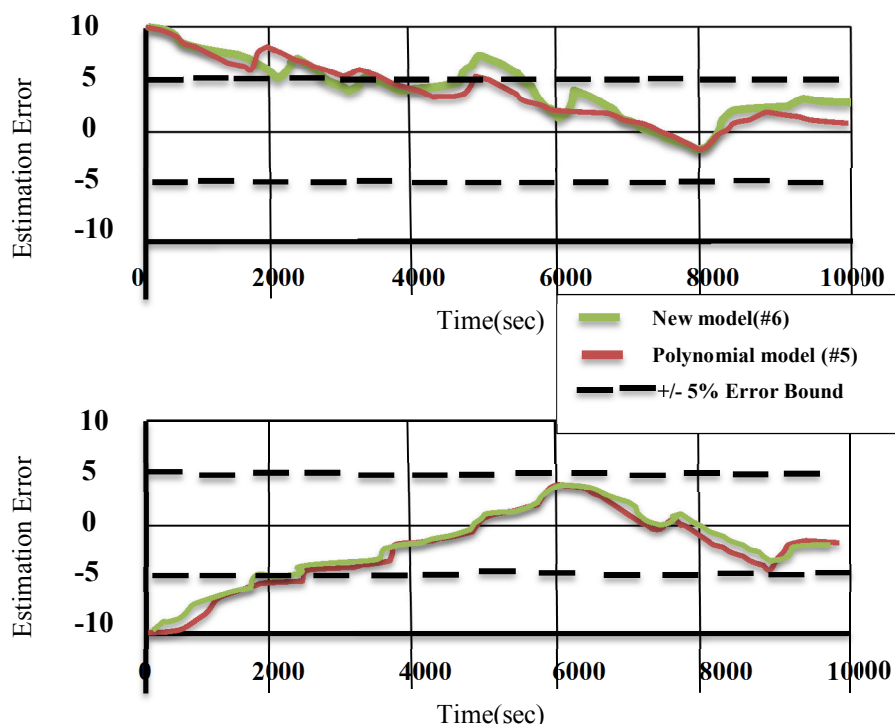
در مدیریت جریان، ارائه دهنده‌ی بهترین مرجعی است که می‌توانیم داشته باشیم که صرفاً تا حدودی درست و دقیق می‌باشد. پارامترهای بکار رفته مدل در EKF بر اساس تخمین SOC در جدول (۳-۴) نشان داده شده اند.

جدول ( ۳-۴ ) مقادیر پارامترهای مدل ۵ و ۶ که در تخمین حالت شارژ

Model parameters	Model #5	Model #6
$K_0$	3.0896	3.4002
$K_1$	1.1627	0.0080
$K_2$	-2.3821	0.0785
$K_3$	2.1870	-0.2150
$K_4$	-0.5444	-1.3032
$K_5$	-0.19339	0.0891
$K_6$	0.0582	N/A
$\alpha_1$	0.4876	-14
$\alpha_2$	N/A	-18
$\alpha_3$	N/A	28
$\alpha_4$	N/A	40

پارامترهای الگوریتم صافی کالمن توسعه یافته (یعنی  $V$  و  $Q$  بکار رفته در معادله (۲-۴)) با استفاده از اطلاعات جمع آوری شده در آزمایشات عمر مفید درجه بندی شدند، و همان پارامترها در ارزیابی عملکرد مدل جدید (#6) و مدل چند شکلی (#5) مورد استفاده قرار گرفتند. نمودار (۱۸-۴) نتایج تخمین SOC را مبتنی بر EKF نشان می‌دهد. دو نقطه ارائه دهنده، دو مورد با خطای اولیه و متفاوت SOC (۱۰٪ و -۱۰٪) می‌باشد. می‌توان مشاهده کرد که همگرایی SOC تخمین زده شده، به خطای تخمین ۵٪ هنگام بکار گرفتن مدل #۵ یا #۶ محدود می‌شود.

بخصوص، با خطای اولیه مثبت، SOC تخمین زده شده، با مدل #۶ بیشتر از SOC تخمین زده شده با مدل #۵ همگرایی دارد. این تفاوت در میزان همگرایی با خطای اولیه مثبت می تواند بوسیله نتایج هماهنگ سازی منحنی توضیح داده شود، همان طور که در نمودار های (۴-۱۰) و (۴-۱۶) نشان داده شده است، مدل آخردر محدوده ی SOC بالا دقت بهتری نسبت به مدل #۵ دارد. بعبارت دیگر، هنگامیکه SOC زیر ۷۰٪ است هر دو مدل تقریبا دقت یکسانی دارند و بنابراین، با خطای اولیه منفی میزان همگرایی مشابهی دارند.



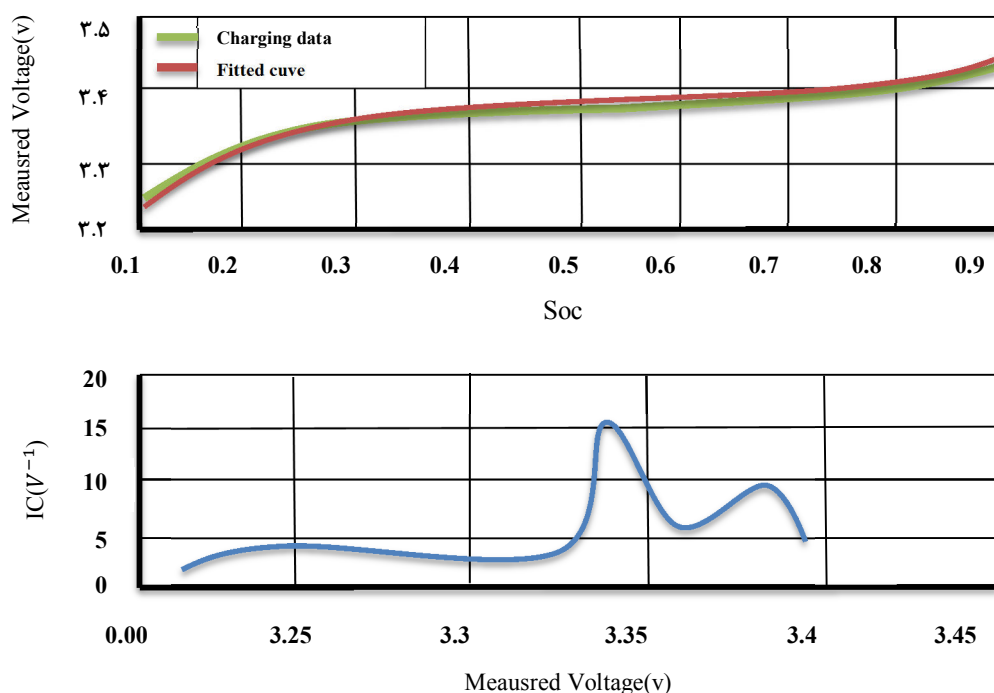
شکل (۴-۱۸) تخمین حالت شارژ با مدل پیشنهادی

محدوده ی خطای ۵٪ می تواند با خطای اولیه دیگری (مثلا ۲۰ یا ۳۰ درصد) حاصل شود. به طور خلاصه، مدل جدید OCV در برآورد SOC مبتنی بر EKF خیلی خوب عمل می کند. این مدل با خطاهای کمتر از ۵٪ بدون تعلیم و درجه بندی بسیار، نتایج برآوردی صحیحی ارائه می دهد. نتایج ارائه شده در این بخش پتانسیل اجرای این مدل جدید را برای مسائل برآورد SOC توضیح می دهد.

#### ۴ - ۴ کنترل وضعیت سلامت بر اساس تحلیل ظرفیت فزاینده

اگرچه ICA برای شرایط « نزدیک به متوازن » پیشنهاد شد، حتی برای اطلاعات شارژ نرمال، نقاط پیک منحنی IC نیز می توانند شناسایی شوند و اطلاعات قابل توجهی را در مورد SOH باتری معلوم می سازند. بنابراین، نتایج ارائه شده در این بخش برای ICA بر اساس اطلاعات شارژ 0.5C باتری می باشد. نشان داده خواهد شد که پارامترسازی پیشنهاد شده هم برای اطلاعات OCV و هم اطلاعات شارژ نرمال (یعنی شارژ در 0.5C) قابل کاربرد است.

همان طور که در نمودار (۴-۱۹) نشان داده شده است، جایگاه اطلاعات شارژ مطابق با مدل ارائه شده در معادله (۴-۱) همراه با OCV جایگزین شده توسط ولتاژ نهایی می باشد. می توانیم منحنی IC را مستقیماً بوسیله متمایز ساختن عملیات تحلیلی OCV-SOC و سپس گرفتن معکوس بدست آوریم.

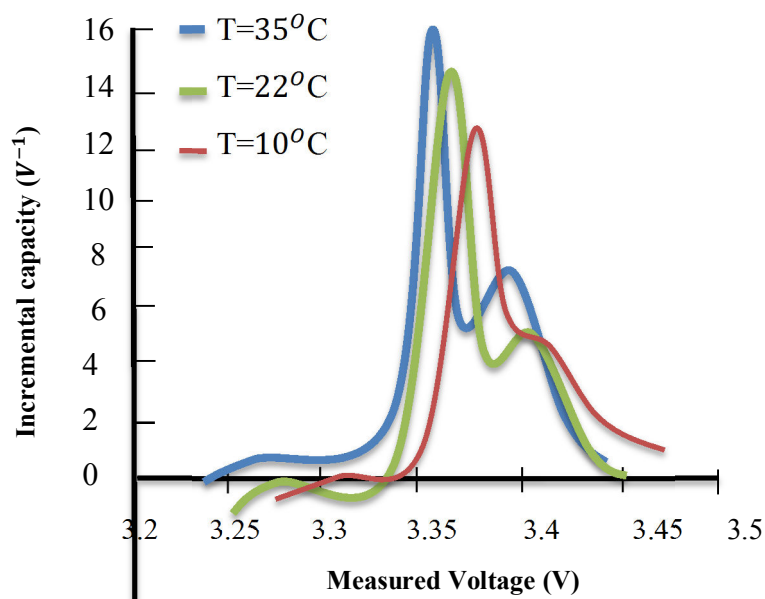


شکل (۴-۱۹) نمودار V-SOC و IC برای اطلاعات شارژ در 0.5C

#### ۴ - ۴ - ۱ تحلیل ظرفیت فزاینده در دمای مختلف

اطلاعات آزمایش نیز در دماهای مختلف در طول روند عمر مفید باتری جمع آوری شده است.

ICA با توجه به دماهای مختلف جهت ارزیابی و تایید حساسیت به دما انجام شد و نتایج در نمودار (۴-۲۰) ارائه شدند. شدت پیک های IC با افت دما کاهش می یابد که می توان به انتشار کند یون لیتیوم یا پدیده ی فلز کاری لیتیوم در دمای پایین نسبت داد. هنگامیکه دما بسیار پایین است، مثلاً  $10^{\circ}\text{C}$ ، پیک دوم از منحنی IC تقریباً ناپدید می شود. به هر حال، چون دمای عملیات سیستم های باتری معمولاً از طریق کنترل منسجم حرارتی در BMS حفظ می شود، ناپدید شدن پیک های IC در دمای پایین نباید یک مسئله باشد.



شکل ( ۴-۲۰ ) منحنی های اطلاعات IC در دماهای مختلف

#### تحلیل پارامتری و ساده سازی مدل

۴ - ۱

اگرچه نتایج شناسایی با استفاده از مدل جدید OCV کارآمدی آنرا نشان داده است. تعداد بالای پارامترها و غیر خطی بودن مدل می تواند چالشی را برای تحقق آن در حالت On-board مطرح سازد. یک تحلیل پارامتری جهت مشخص ساختن ویژگی های ارتباطی میان پارامترهای مدل و طول عمر باتری، ارزیابی حساسیت و استحکام ساختار مدل، و درک بهتر از کاربرد این مدل انجام شد. بعلاوه، نتایج تحلیل می تواند در شناسایی اهمیت هر پارامتر و ساده سازی مدل کمک کند، بنابراین،

کارآیی محاسباتی در تخمین ارتقا می یابد.

برای تحلیل و رسم نمودار ICA از تابع مدل پیشنهادی ولتاژ مدار باز  $OCV(z)$  نسبت به  $Z$

مشتق میگیریم:

$$G(Z) = \frac{d}{dz} OCV(z) = -K_1 \frac{\alpha_1 e^{\alpha_1(z-\beta_1)}}{(1+e^{\alpha_1(z-\beta_1)})^2} - K_2 \frac{\alpha_2 e^{\alpha_2(z-\beta_2)}}{(1+e^{\alpha_2(z-\beta_2)})^2} - K_3 \frac{\alpha_3 e^{\alpha_3(z-\beta_3)}}{(1+e^{\alpha_3(z-\beta_3)})^2} - K_4 \frac{\alpha_4 e^{\alpha_4(z-\beta_4)}}{(1+e^{\alpha_4(z-\beta_4)})^2} + K_5 \quad (4-4)$$

$G(Z)$  می باشد، جایگاه ها و مقادیر پیک ها بوسیله مشتق  $G(Z)$  عکس IC توجه کنید که منحنی برابر با صفر و حل معادله جبری حاصل محاسبه می شوند. معادله حاصل بسیار غیرخطی است و نمی تواند به لحاظ تحلیلی به آسانی حل شود. در اینجا، روش جایگزینی که عبارت معادله (4-4) را به مورد  $G(Z)$  طور جداگانه تفکیک و تحلیل می کند جهت مرتبط ساختن پارامترهای مدل و راه حل کاربرد قرار می گیرد. جهت درک سهم هر عبارت از معادله (4-4)، ابتدا به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$f_1(z) = -K_1 \frac{\alpha_1 e^{\alpha_1(z-\beta_1)}}{(1+e^{\alpha_1(z-\beta_1)})^2} \quad (5-4)$$

$$f_2(z) = -K_2 \frac{\alpha_2 e^{\alpha_2(z-\beta_2)}}{(1+e^{\alpha_2(z-\beta_2)})^2} \quad (6-4)$$

$$f_3(z) = -K_3 \frac{\alpha_3 e^{\alpha_3(z-\beta_3)}}{(1+e^{\alpha_3(z-\beta_3)})^2} \quad (7-4)$$

$$f_4(z) = -K_4 \frac{\alpha_4 e^{\alpha_4(z-\beta_4)}}{(1+e^{\alpha_4(z-\beta_4)})^2} \quad (8-4)$$

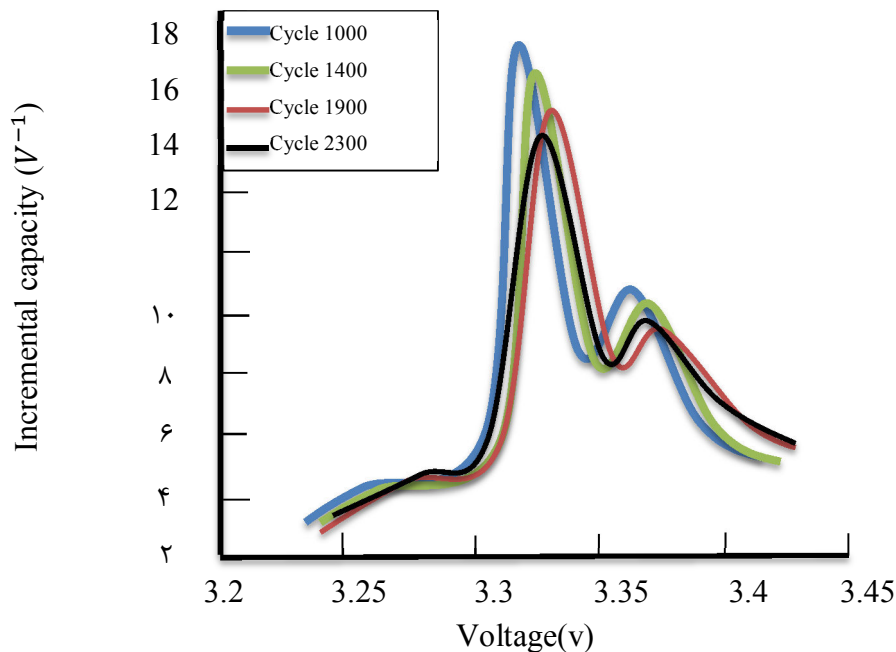
از طریق تحلیل عددی مشاهدات زیر را خواهیم داشت:

- $f_2$  و  $f_4$  در محدوده SOC بالا تا صفر کاهش می یابد، و پیک IC اتفاق می افتد. بنابراین، نمی توانند در پیک های IC و جایگاه آنها شرکت کنند. تحلیل ما بر روی  $f_1$  و  $f_3$  متمرکز خواهد بود.
- پارامتر  $K_5$  یک مقدار ثابت است و بنابراین در اینجا نیازی به در نظر گرفتن آن نیست.
- نتایج عددی نشان می دهد که  $K_1$  و  $K_3$  در مقایسه با  $\alpha_1$  و  $\alpha_3$  بسیار متفاوت نیستند.
- تحلیل ما نشان می دهد که پیک IC حساسیتی تقریباً برابر با  $\alpha_1$  و  $\alpha_3$  دارد. تحلیل حساسیت

بوسیله ارزیابی عددی مشتق نسبی عملیات IC انجام می‌شود، که بوسیله  $1/G(Z)$  با  $G(Z)$  ارائه شده در معادله (۴-۴) مشخص شده است، با توجه به پارامترهای  $\alpha_1$  و  $\alpha_3$  در مقدار  $Z$  جاییکه بیک دوم اتفاق می‌افتد. با مشاهدات بالا، مدل ساده‌ای را به شکل زیر شناسایی کردیم:

$$OCV(z) = K_1 \frac{1}{1 + e^{\alpha_1(z-\beta_1)}} + K_3 \frac{1}{1 + e^{\alpha_3(z-1)}} + \bar{K}_0 + \bar{K}_2 \frac{1}{1 + e^{(z-\beta_2)}} + \bar{K}_4 \frac{1}{1 + e^{\alpha z}} + \bar{K}_5 z \quad (9-4)$$

در اینجا ساختار مدل شامل ۴ پارامتر تغییر دهنده (یعنی  $K_1$ ،  $K_3$ ،  $\alpha_1$ ،  $\alpha_3$ ) می‌باشد و پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته می‌شوند، در نمودار (۴-۲۱)، می‌توان مشاهده کرد که منحنی‌های بدست آمده IC با استفاده از مدل ساده OCV به لحاظ کیفیتی رویه مشابهی با منحنی‌های بدست آمده از مدل کامل نشان می‌دهند. جدول (۴-۴) مقایسه‌ای از دقت هماهنگی میان مدل ساده شده و مدل کامل را نشان می‌دهد. در بدترین مورد، خطای rmsها کمتر از 2mv است. بنابراین، ساده سازی، دقت هماهنگی بالای مدل کامل را حفظ می‌کند.



شکل (۴-۲۱) نمودار IC پس از ساده سازی مدل OCV در دمای  $35^{\circ}C$

جدول ( ۴-۴ ) مقایسه ای از دقت هماهنگی میان مدل ساده شده و مدل کامل

Cycle	Full Model(mv)	simplified model(mv)
1000	0.760	0.805
1400	0.925	0.980
1900	0.946	1.247
2300	1.024	1.559

پارامترهای مدل ساده در جدول (۴-۵) فهرست شده است، در اینجا می توانید تغییرات موجود در  $\alpha_1$  و  $\alpha_3$  مطابق با تحلیل پارامتری را ببینید. بعلاوه، نشان می دهد که مقادیر پیک های متزلزل کننده در منحنی های IC می تواند مستقیماً از طریق پارامترهایی با رابطه زیر برآورد شود:

$$q = \theta_0 + \theta_1 \alpha_1 + \theta_2 K_1 + \theta_3 \alpha_3 \quad (۱۰-۴)$$

در اینجا  $q = P - P_0$  بصورت مشخص شده است که ارائه دهنده میزان تجزیه است. P نشان دهنده ی مقادیر پیک IC و  $P_0$  مقدار پیک اولیه است.  $\theta_0 \sim \theta_3$  دمای شناسایی شده در این معادله می باشند.  $K_3$  در این معادله گنجانده نشده است چون به تغییر مقادیر پیک حساس نیست. مقادیر پارامترهای  $\theta_0 \sim \theta_3$  بستگی به دمای عملیات دارد. برای تشخیص SOH باتری on-board، کنترل حرارتی می بایست بعنوان قسمتی از BMS گنجانده شود. بنابراین، هنگام کنترل SOH می توان انتظار داشت دما یکنواخت باقی بماند.

جدول ( ۴-۵ ) پارامترهای مدل OCV ساده شده

Cycle #	$\alpha_1$	$K_1$	$\alpha_3$	$K_3$
1000	-12.57	0.044	25.9352	-0.2459
1400	-12.29	0.0467	23.2749	-0.2435
1900	-11.57	0.0497	20.4778	-0.2413
2300	-11.4	0.0531	18.5991	-0.2447

با ارائه مجموعه‌ای از  $n$  داده و  $P_i, \alpha_{1i}, K_{1i}, \alpha_{3i}$  و  $i=1,2,\dots,n$  از یک سلول باتری در مراحل طول عمر مختلف، مقادیر  $\theta_{0-3}$  می‌توانند به آسانی از طریق روش زیر محاسبه شوند:

$$\theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T q$$

Where

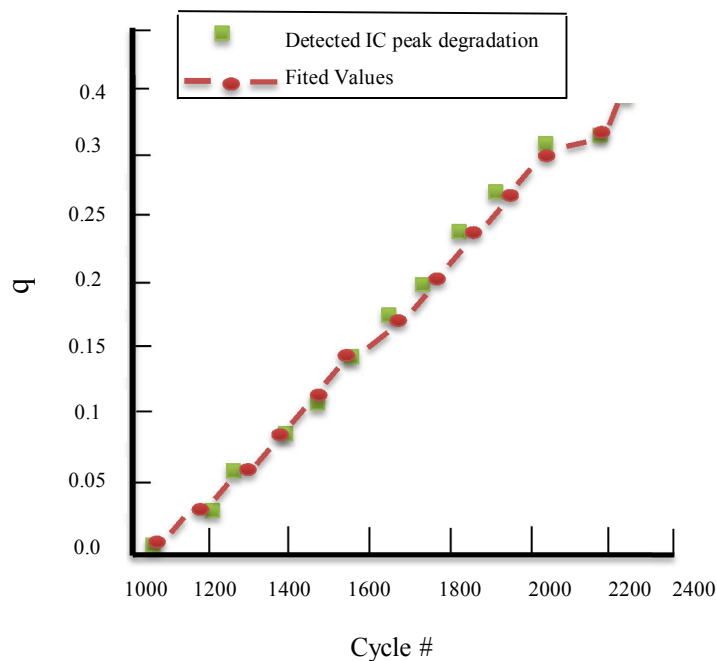
$$\theta = [\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3]$$

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]^T \quad (11-4)$$

$$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$$

$$\phi_i = [1, \alpha_{1i}, K_{1i}, \alpha_{3i}]^T$$

نتایج شناسایی معادله (۴-۱۰) همان طور که در نمودار (۴-۲۲) نشان داده شده است، بسیار دقیق هستند، در اینجا، اطلاعات آزمایش باتری یک سلول واحد (به نام سلول A) در همه مدت عمر مختلف گنجانده شده است.



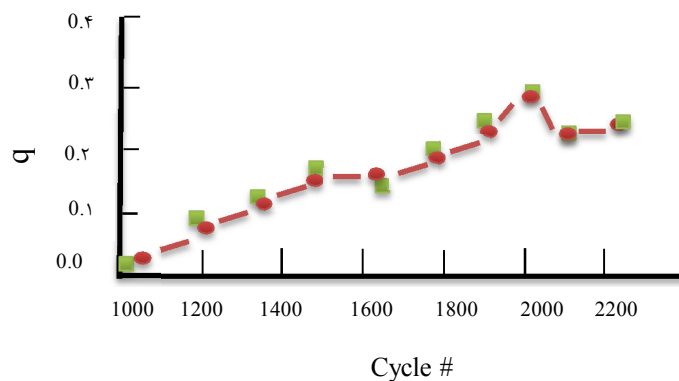
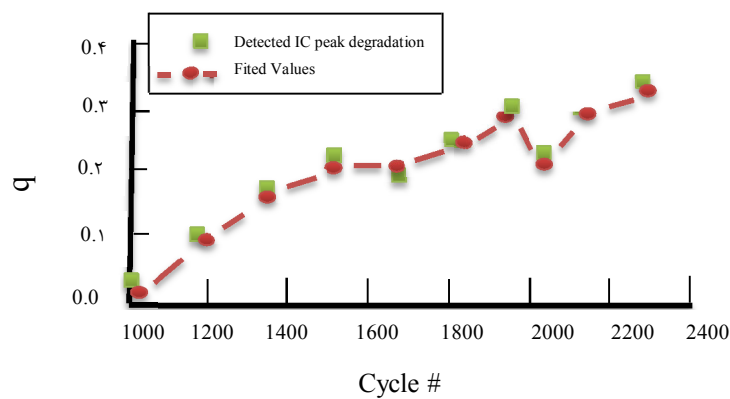
شکل (۴-۲۲) نتایج شناسایی اطلاعات آزمایش باتری یک سلول واحد

نمودار (۴-۲۳) نشان می‌دهد که اطلاعات اخذ شده از دو سلول دیگر، بعنوان یک نمونه، می



تواند بدرستی با بکار بردن  $\theta_{1\sim3}$  بدون اقدامات دیگر هماهنگ شوند. بعبارت دیگر، بعنوان یک نمونه، می تواند بدرستی با بکار بردن  $\theta_{1\sim3}$  بدون اقدامات دیگر هماهنگ شوند.

بعبارت دیگر، مقادیر پیک سلول های مختلف می تواند بر اساس پارامتر های  $\theta_{1\sim3}$  از یک سلول مرجع تخمین/پیش بینی شود. بنابراین، کنترل SOH مستقیماً با استفاده از معادله (۴-۱۰) بدون حصول عددی منحنی های IC امکان پذیر است.



شکل (۴-۲۳) هماهنگ سازی یک نمونه بدست آمده از اطلاعات دو سول دیگر با بکارگیری  $\theta_{1\sim3}$

به طور خلاصه، مدل ساده OCV قادر به دریافت ویژگی های عمر مفید باتری همراه با پارامترهای کمتری است، در نتیجه کارایی و قابلیت اجرای مدل در BMS بصورت on-board امکان پذیر می شود. با رابطه خطی تایید شده میان مقادیر پیک IC و پارامترهای مدل OCV در معادله (۴-۱۰)، اطلاعات طول عمر باتری می تواند تنها با نگاه کردن به پارامترها معلوم شود.

## ۵ فصل پنجم. نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۵ - ۱ نتیجه گیری

در این پژوهش ما شرایط الگوریتم BMS و محیط عملکردی آنرا در برنامه ربات های پیشرفته در فصل سوم توصیف کردیم، تقاضاهای خاص سیستم کنترل باتری ربات ها استفاده از الگوریتم های پیشرفته را توجیه می کند. ما همچنین روش های صافی کالمن و صافی پیشرفته کالمن را مورد بازبینی قرار دادیم که توضیح دهنده ی انگیزه هر مرحله محاسباتی است. نمونه ای را برای روشن ساختن مبحث ارائه دادیم. بمنظور برآورد SOC از یک مدل فضایی- وضعیتی از دینامیک سلولی همراه با SOC بعنوان جزئی از بردار حالت مدل استفاده خواهیم کرد. بنابراین، یک EKF قادر به تخمین SOC می باشد. EKF جهت درک یک عملکرد خوب از مدل سلول و شناسایی پارامترهای این مدل باقی می ماند. هنگامیکه مدل ارائه می شود باید با استفاده از یک روش شناسایی سیستم تعیین شوند.

هنگامیکه ما دارای یک مدل سلولی خوب هستیم، می توانیم SOC را تخمین بزنیم. همچنین نیاز به برآورد SOH خواهیم داشت، که شامل تحلیل رفتن ظرفیت، تحلیل رفتن انرژی، خود تخلیه سازی می باشد، و قادر به تنظیم پارامترهای مدل سلولی جهت منظورداشتن عمر سلول باشد. همچنین ما باید قادر به محاسبه انرژی شارژ/تخلیه باشیم.

همچنین در این پژوهش ما مدل پارامتری جدید OCV را پیشنهاد کردیم، پارامتربندی ویژه، نحوه اجرا را در طول روند افزایش/کاهش یون لیتیوم برای باتری های لیتیومی ربات در نظر می گیرد، بنابراین هنگام بکار گرفتن اطلاعات تحقیقاتی OCV منجر به تطابق درست و بهتری می شود. مدل پارامتری جدید همراه با EKF برای ارزیابی SOC بکار می رود. طریقه ی مقایسه منحنی های IC، نشان داده شده که مدل قادر به انعکاس ویژگی های الکتروشیمیایی سلول در شرایط دمایی مختلف می باشد. بعلاوه، از طریق تحلیل پارامتری، ما قادر به ساده سازی ساختار مدل و ساخت عملیاتی هستیم که ویژگی های رابطه ای میان پارامترهای مدل و تجزیه عملکرد باتری را مشخص می سازد.

## ۵ - ۲ پیشنهادات

در این بخش برای بهتر شدن نتایج و به منظور ارائه راهکارهایی برای پژوهش‌های آینده، پیشنهادات زیر بیان می‌گردد:

- با توجه به اینکه پارامترهای سیستم مدیریت باتری ربات زیاد می‌باشد و تغییرات جزئی هر پارامتر در نتیجه تخمین شارژ و تعیین سلامت تاثیر زیادی دارد لذا استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، برای بهبود عملکرد سیستم مدیریت باتری ربات می‌تواند مفید باشد و تحقیقات آینده روی گسترش الگوریتم‌های مؤثرتر برای تعیین پارامترهای مدل OCV تمرکز خواهد کرد.
- همانطور که می‌دانیم بعد از تخمین حالت شارژ باتری در سیستم مدیریت باتری ربات برآورد یا تعیین حالت سلامت باتری نیز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، لذا اگر بتوانیم یک مدل بهتری نسبت به مدل‌های ارائه شده قبلی ارائه دهیم می‌توانیم بعد از تخمین حالت شارژ، حالت سلامت باتری را هم با حساسیت بیشتری مشخص کنیم .
- با توجه به اینکه تاکنون تخمین حالت شارژ با روش صافی کالمن توسعه یافته بهتر از روش‌های قبلی می‌باشد، اگر بتوانیم بعد از تخمین با این روش آنرا با یکی از روش‌های بهینه سازی بهینه کنیم به پاسخ دقیق تر و بهتر و همچنین با حساسیت بیشتر دست خواهیم یافت.

## مراجع

- [1] M. Safari , C. Delacourt , Modeling of a Commercial Graphite/LiFePO<sub>4</sub> Cell, J. Electrochem. Soc .Vol. 158, pp.A562 – A5710, 2011.
- [2] M. Armond , J. M . Tarascon, Building better batteries, Nature, Vol.451, pp.653–657, 2008
- [3] M. A . Roscher , D. U . Sauer, Dynamic electric behavior and open-circuit-voltage modeling of LiFePO<sub>4</sub>-based lithium ion secondary batteries, J. Power Sources, Vol. 196, pp. 331 – 336, 2011.
- [4] B. Dunn , H . Kamath , J. M . Tarascon, Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices , Science, Vol. 6058, pp. 928-935, 2011.
- [5] B. Y. Liaw, M. Dubarry CHAPTER FIFTEEN – A Roadmap to Understand Battery Performance in Electric and Hybrid Vehicle Operation, pp. 375-403, 2010.
- [6] E. Meissner , G. Richter, Battery Monitoring and Electrical Energy Management: Precondition for future vehicle electric power systems, J. Power Sources, Vol. 116 pp. 79-98, 2003.
- [7] C. Weng, Y . Cui, J. Sun, H. Peng On-board state of health monitoring of lithium-ion batteries using incremental capacity analysis with support vector regression, J. Power Sources, Vol. 235, pp. 36-44, 2013.
- [8] V. Pop, H. J. Bergveld, D. Danilov , P.P.L. Regtien, P.H.L. Notten, Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications, first ed., Springer , 2008.
- [9] S. Piller, M. Perrin, A. Jossen, Methods for state-of-charge determination and their applications, J. Power Sources, Vol. 96, pp. 113-120, 2001.
- [10] S. Santhanagopalan, R.E. White, Online estimation of the state of charge of a lithium ion cell, J. Power Sources, Vol. 161, pp. 1346-1355, 2006.
- [11] M. Verbrugge, E. Tate, Adaptive state of charge algorithm for nickel metal hydride batteries including hysteresis phenomena, J. Power Sources, Vol. 126, pp. 236-249, 2004.
- [12] X. Hu, S. Li, H. Peng, F. Sun, Robustness analysis of State-of-Charge estimation

methods for two types of Li-ion batteries, *J. Power Sources*, Vol. 217, pp. 209-219, 2012.

[13] M. Safari, C. Delacourt, Mathematical Modeling of Lithium Iron Phosphate Electrode: Galvanostatic Charge/Discharge and Path Dependence, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 158, pp. A63-A73, 2011.

[14] J. Groot, State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Cycle Life Test Methods, Masters thesis, Chalmers University of Technology, 2012.

[15] R. Yazami, P. Touzain, A reversible graphite-lithium negative electrode for electrochemical generators, *J. Power Sources*, Vol. 9, pp. 365-371, 1983.

[16] M. Dubarry, V. Svoboda, R. Hwu, B.Y. Liaw, Incremental Capacity Analysis and Close-to-Equilibrium OCV Measurements to Quantify Capacity Fade in Commercial Rechargeable Lithium Batteries, *Electrochem. Solid St.*, Vol. 9, pp. A454-A457, 2006.

[17] M. Dubarry, B.Y. Liaw, Identify capacity fading mechanism in a commercial LiFePO<sub>4</sub> cell, *J. Power Sources*, Vol. 194, pp. 541-549, 2009.

[18] X. Feng, J. Li, M. Ouyang, L. Lu, J. Li, X. He, Using probability density function to evaluate the state of health of lithium-ion batteries, *J. Power Sources*, Vol. 232, pp. 209-218, 2013.

[19] X. Han, M. Ouyang, L. Lu, J. Li, Y. Zheng, Z. Li, A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electrical vehicle: Aging mechanism identification, *J. Power Sources*, Vol. 251, pp. 38-54, 2014.

[20] A.J. Smith, J.R. Dahn, Delta Differential Capacity Analysis, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 159, pp. A290-A293, 2012.

[21] X. Hu, S. Li, H. Peng, A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries, *J. Power Sources*, Vol. 198, pp. 359-367, 2012.

[22] H.V.He,R.Xiong.and.H. Q. Guo,"Online Estimation Model Parameters and state-of-charge of LiFePO<sub>4</sub> Batteries in electric vehicles," *Applied Energi*, Vol .89, no.1. pp. 413-420,2012

[23] Z. H. Cai, G. F. Liu, and J. Luo, "Research state of charge estimation tactics of nichel-hydrogen battery," in *Proceedings of the International Symposium on Intelligence Information Processing and Trusted Computing (IPTC 10)*. PP. 184 -187,Huanggang, China, October 2010.

[24] N. Watrin, B. Blunier, and A. Miraoui, "Review of adaptive systems for lithium

batteries state-of-charge and state-of-health estimation,” in Proceedings of IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, PP. 1-6, Dearborn, Mich, USA, June 2012.

[25] A. A. A. Elgammal and A. M. Sharaf, “Self-regulating particle swarm optimised controller for (photovoltaic-fuel cell) battery charging of hybrid electric vehicles”, IET Electrical Systems in Transportation, vol. 2. No. 2, pp. 77-89, 2012.

[26] M. Bruning and E. Di Nardo, “ The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review ” Department of Electrical Engineering St. John University pp. 2-3

[27] A. H. Anbuky and P. E. Pascoe, “VRIA battery state-of-charge estimation in telecommunication power systems”, IEEE Transactions on industrial Electronics, vol. 47, no. 3, pp. 565-573, 2000.

[28] S. Rodrigus, N. Munichandraiah, and A. K. Shukla, “A review of state-of-charge indication of batteries by means of A.C. impedance measurements”, Journal of Power Sources. Vol. 87, no. 1-2, pp. 12-20, 2000.

[29] F. Huet, “A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries”, Journal of Powers, Vol. 70, no. 1, pp. 59-69, 1998.

[30] K. S. Ng, C. S. Moo, Y. P. Chen, and Y. C. Hsieh, “Enhanced Coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries, “Applied Energy, Vol. 86, no. 9, pp. 1506-1511, 2009.

[31] M. Bruning and E. Di Nardo, “ The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review ” Department of Electrical Engineering St. John University pp. 2-3.

[32] W. Y. Charge, “State of charge estimation for  $\text{LiFePO}_4$  battery using artificial neural network”, International Review of Electrical Engineering, Vol. 7, no. 5, pp. 5874-5800, 2012

[33] H. Guo, J. Jiang, and Z. Wang, “Estimating the state of charge for Ni-MH battery in HEV by RBF neural network” in proceeding of the International Workshop on Intelligent Systems and Applications (ISA 09), PP. 1-4, Wuhan, china, May 2009.

[34] W. He, D. Huang, and D. Feng, “The prediction of SOC of Lithium batterie and varied pulse charge”, in proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 09), PP. 1578-1582, Changchun. China, August 2009.

[35] A. J. Salkind, c. Fennie, P. Singh, T. Atwater, and D. E. Reisner, “Determination of batteries by fuzzy logic methodology”, Journal of Power Sources, vol. 80, no. 1-2,

pp.293-300,1999.

[36] P.singh. R. Vinjamuri, X. Wang, and D. Reisner, "Design and implementation of a fuzzy logic-based state-of-charge meter for Li-ion batteries used in portable defibrillators", Journal of Power Sources, vol. 162,no. 2, pp. 829-836, 2006.

[37] T. Hasan and C. J. Wang, "Support vector based battery state of charge estimator", Journal of Power Sources. Vol. 141, no. 2, pp. 351-358, 2005.

[38] I. H. Li, W. Y. Wang, S. F. Su, and Y. S. Lee, "A merged fuzzy neural network and its applications in battery state-of-charge estimation", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 3, pp. 697-708, 2007.

[39] L. Xu, J. P. Wang, and Q. S. Chen, "Kalman filtering state of charge estimation for battery management system based on a stochastic fuzzy neural network battery model", Energy Conversion and Management , vol. 53, no. 1, pp. 33-39, 2012.

[40] V. Pop, H. J. Bergveld, P. H. L. Notten, J. H. G. Op het Veld, and P. P. L. Regtien, "Accuracy analysis of the state-of-charge and remaining run-time determination for lithium-ion batteries". Measurement, Vol. 42, no.8, PP.1131-1138, 2009.

[41] J. Wang, B. Cao, Q. Chen, and F. Wang, "Combined state of charge estimator for electric vehicle battery pack", Control Engineering Practice, vol. 15, no. 12, pp. 1569-1576, 2007.

[42] J. Kim and B. H. Cho, "State-of-charge estimation and state-of-health prediction of a Li-ion of a Li-ion degraded battery based on an EKF combined with a per-unit system", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 9, pp.4249-4260,2011.

[43] <http://www.sababattery.ir/content/251>.

[۴۴] صدری م، شولایی ع، (۱۳۸۸)، "مدلسازی امیدانس داخلی باتری سرب اسید با در نظر گرفتن اثر

سطح شارژ"، هفدمین کنفرانس مهندسی برق ایران

[45] Jantharanin N, Zhang Z., (2006) "A New Dynamic Model for Lead-Acid batteries"

[46] Sauer D. (2003) "Electrochemical storage for photovoltaics", Handbook of photovoltaic science and engineering, A. Luque and S. Hegedus, Ed Chichester.UK:John Wiley & Sons Ltd., pp. 799-862.

[47] Ziyad M, Salameh Margaret A, Casaca William A, (1992) " A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, No.1



- [48] Technical Handbook Value-Regulated Lead Acid Batteries, FIAMM-GS
- [49] Handbook for Stationary AGM-VRIA batteries, Part 2: Installation, Commissioning and Operation.
- [50] Kong-Soon N, Chin-sien M, Yi-Ping C, Yao-Ching H, (2008) “ State-of-Charge Estimation for Lead-Acid Batteries Based on Dynamic Open-Circuit Voltage”, 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), Johor Baharu, Malaysia.
- [51] Ziyad M, Salameh Margaret A, Casacca William A., (1992) “A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 7.No.1.
- [52] Salameh M, Casacca M, Lynch W. (1992) “A mathematical model for lead- acid batteries”. IEEE Transactions on Energy Conversion, volume 7, No. 1.
- [53] Shepherd C, (1965) “Design of Primary and Secondary Cells”, Journal of The Electrochemical Society, vol. 112, pp. 657-664.
- [54] V.Prajapati, H. Hess, E. J. William et., “A literature review of state of charge estimation techniques applicable to lithium poly-carbon monofluoride (Li/CF<sub>x</sub>) battery”, in Proceedings of the India International Conference on Power Electronics (IICPE'10), PP. 1-8, New Delhi, India, January 2011.
- [55] J. Chiasson and B. Vairamohan, “Estimating the state of charge of a battery”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, no. 3, pp. 465-470, 2005.
- [56] K. S. Ng, C. S. Moo, Y. P. Chen, and Y. C. Hsieh, “State-of-charge estimation for lead-acid batteries based on dynamic open-circuit voltage”, in Proceeding of the 2nd IEEE International Power and Energy Conference (PECon '08), pp.972-976, Johor Bahru, Malaysia, December 2008.
- [57] M. Coleman, C. K. Lee, C. Zhu, and W. G. Hurley “State-of-charge determination from EMF voltage estimation: using impedance, terminal voltage, and current for lead-acid and lithium-ion batteries”, IEEE Transactions on Electronics, vol. 54, no. 5, pp. 2550-2557, 2007.
- [58] S. Abu-Sharkh and D. Doerffel, “Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries”, Journal of Power Sources, vol. 130, no. 1-2, pp. 266-274, 2004.
- [59] S. Sato and A. Kawamura, “A new estimation method of State of charge using terminal voltage and internal resistance for lead acid battery”, in Proceedings of the

Power Conversion Conference, pp. 565-570, Osaka, Japan, April 2002.

[60] R. Li, J. F. Wu, H. Y. Wang, and G. C. Li, "Prediction of state of charge of lithium-ion rechargeable battery with electrochemical impedance spectroscopy theory", in Proceeding of the 5<sup>th</sup> IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA'10), pp. 684-688, Taichung, Taiwan, June 2010.

[61] V. Prajapati, H. Hess, E. J. William et al., "A literature review of state of charge estimation techniques applicable to lithium poly-carbon monofluoride (Li/CF<sub>x</sub>) battery", in Proceedings of the India International Conference on Power Electronics (IICPE'10), pp. 1-8, New Delhi, India, January 2011.

[62] T. Weigert, Q. Tian, and K. Lian, "State-of-charge prediction of batteries and battery-supercapacitor hybrids using artificial neural networks" Journal of Power Sources, vol. 196, no. 8. Pp. 4061-4066, 2011.

[63] O. Lianda, E. J. William, M. Huff et al., "Intelligent neural network implementation for SOCI development of Li/CF<sub>x</sub> batteries", in Proceedings of the 2nd International Symposium on Resilient Control Systems (ISRCS'09), pp.57-62, Idaho Falls, Idaho, USA, August 2009.

[64] T. Weigert, Q. Tian, and K. Lian, "State-of-charge prediction of batteries and battery-supercapacitor hybrids using artificial neural networks", Journal of Power Sources, Vol. 196, no. 8, pp. 4061-4066, 2011.

[65] S. Malkhandi, "Fuzzy logic-based learning system and estimation of state-of-charge of lead-acid battery", Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol.19, no. 5, pp. 479-485, 2006.

[66] Y. S. Lee, W. Y. Wang, and T. Y. Kuo, "Soft computing for battery state-of-charge (BSOC) Estimation in battery string systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 1, pp. 229-239, 2008.

[67] Austin Bluffs Parkway, P.O. Colorado Springs, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs", Department of Electrical and Computer Engineering University of Colorado CO 80933-7150, USA.

[68] M. A. Roscher, D. U. Sauer, Dynamic electric behavior and open-circuit-voltage modeling of LiFePO<sub>4</sub>-based lithium ion secondary batteries, J. Power Sources, Vol. 196, pp. 333 – 335, 2011.

[69] C. Weng, Y. Cui, J. Sun, H. Peng On-board state of health monitoring of lithium-

ion batteries using incremental capacity analysis with support vector regression, *J. Power Sources*, Vol. 235, pp. 38-47, 2013.

[70] S. Piller, M. Perrin, A. Jossen, Methods for state-of-charge determination and their applications, *J. Power Sources*, Vol. 96, pp. 115-119, 2001.

[71] S. Santhanagopalan, R.E. White, Online estimation of the state of charge of a lithium ion cell, *J. Power Sources*, Vol. 161, pp. 1344-1350, 2006.

[72] M. Verbrugge, E. Tate, Adaptive state of charge algorithm for nickel metal hydride batteries including hysteresis phenomena, *J. Power Sources*, Vol. 126, pp. 233-242, 2004.

[73] X. Hu, S. Li, H. Peng, F. Sun, Robustness analysis of State-of-Charge estimation methods for two types of Li-ion batteries, *J. Power Sources*, Vol. 217, pp. 211-218, 2012.

[74] J. Groot, State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Cycle Life Test Methods, Master's thesis, Chalmers University of Technology, Vol.131, pp.145-152, 2012.

[75] R. Yazami, P. Touzain, A reversible graphite-lithium negative electrode for electrochemical generators, *J. Power Sources*, Vol. 9, pp. 360-361, 1983.

[76] R. Yazami, P. Touzain, A reversible graphite-lithium negative electrode for electrochemical generators, *J. Power Sources*, Vol. 9, pp. 365-371, 1983.

[77] R. Yazami, Y. Reynier, Thermodynamics and crystal structure anomalies in lithium-intercalated graphite, *J. Power Sources* Vol. 153, pp. 312-318, 2006.

[78] M. Dubarry, V. Svoboda, R. Hwu, B.Y. Liaw, Incremental Capacity Analysis and Close-to-Equilibrium OCV Measurements to Quantify Capacity Fade in Commercial Rechargeable Lithium Batteries, *Electrochem. Solid St.*, Vol. 9, pp. A454-A457, 2006.

[79] A.J. Smith, J.R. Dahn, Delta Differential Capacity Analysis, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 159, pp. A288-A290, 2012.

[80] G.L. Plett, Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation, *J. Power Sources*, Vol. 134, pp. 277-292, 2004.

## **Abstract**

The growing concern over oil shortage and environment issues has greatly accelerated the development of alternative power and energy solutions to displace fossil fuel in recent years. Among the various choices of energy storage technologies, it is well recognized that battery systems can offer a number of high-value opportunities given their advantages in portability and energy efficiency, particularly for mobile applications like robot. Given the fact that batteries have been used to power an increasingly diverse range of applications, from cell phones to electric vehicles, robot and et cetera, more reliable and efficient battery management systems (BMSs) need to be developed.

Open-circuit-voltage (OCV) data is widely used for characterizing battery properties under different conditions. It contains important information that can help to identify battery state-of-charge and state-of-health. While various OCV models have been developed for battery SOC estimation, few have been designed for SOH monitoring. We propose a unified OCV model that can be applied for both SOC estimation using the new model compared to other existing models are demonstrated. Moreover, it is shown that the proposed OCV model can be used to perform battery SOH monitoring as it effectively captures aging information based on incremental capacity analysis (ICA) parametric analysis and model complexity return are also addressed. Experimental data is used to illustrate the effectiveness of the model and its simplified version in the application context of SOC estimation and SOH monitoring. Also to study state-of-charge estimation based on extended Kalman filter for robot battery and shown is similar result too.

**Keywords:** Robot, Open Circuit Voltage, State Of Charge, State Of Health, Extended Kalman Filter, Increase Capacity Analysis.



**Shahrood University of Industrial Technology**

**Department of Electrical and Robotic Engineering**

**State of Charge and State of Health Estimation of Battery  
Energy Storage in industrial Robotic Application**

**Parviz Alinezhad Heydari**

**Supervisor:**

**Dr. amin hajizade**

**Dr. ali akbarzade kalat**

**February 2015**