

بهینه سازی آرایش سلول ها در یک بسته باتری صنعتی لیتیوم-یون ۱۸۶۵۰ با سامانه مدیریت حرارتی هواخنک

در این مقاله، چیدمان سلول ها در یک مجموعه باتری لیتیومی با مشخصات صنعتی جهت مدیریت بهینه حرارتی آن توسط یک سامانه هواخنک مورد مطالعه قرار می گیرد. تاثیر فاصله بین سلول ها بر حداکثر و یکنواختی توزیع دما، و کاهش توان مصرفی خنک کاری به عنوان اهداف بهینه سازی به طور مفصل مطالعه می گردد. با کاهش فاصله بین باتری ها، دمای سلول ها از یک طرف، و یکنواختی دما و بازده خنک کاری مجموعه از طرف دیگر کاهش می یابد. همچنین افزایش تعداد سلول ها در ابتدا باعث افزایش راندمان خنک کاری می گردد اما بعد از یک حد معین، منجر به کاهش این راندمان می شود.

علیرضا شامخی^۱

کارشناسی ارشد

مسعود آریانپور^۲

استادیار

واژه های راهنما: باتری لیتیوم-یون، مدیریت حرارتی مجموعه باتری، سامانه خنک کاری هواخنک، خنک کاری فعال، بهینه سازی باتری ها در حمل و نقل

۱- مقدمه

پس از انقلاب صنعتی در اروپا، استفاده از انرژی حاصل از سوخت های فسیلی برای چرخاندن چرخ های صنعت به میزان چشمگیری افزایش یافت. امروزه نیز جهان برای تأمین انرژی مورد نیاز خود وابستگی زیادی به این سوخت ها، به خصوص در بخش حمل و نقل، دارد. نگرانی در مورد کاهش سوخت های فسیلی و آسیب های زیست محیطی ناشی از مصرف این سوخت ها، باعث تلاش های گسترده برای تولید منابع مختلف انرژی و ساخت وسایل نقلیه الکتریکی^۳ و هیبریدی^۴ شده است [۱]. استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی و هیبریدی مجهز به باتری های پیشرفته قابل شارژ، دارای مزایای فراوانی از جمله عدم آلاینده گی هوا و محیط زیست است. در حال حاضر باتری های لیتیوم-یون بهترین گزینه برای این نوع وسایل نقلیه محسوب می شوند؛ زیرا در مقایسه با باتری های اسید-سرب یا باتری های نیکل متال هیدرید، دارای چگالی انرژی بیشتر، چرخه عمر طولانی تر، نرخ تخلیه خود به خودی کم تر، و کارایی بالاتری هستند [۱].

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران alirezashamekhi76@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران arianpour@sharif.edu

^۳ Electric vehicles (EVs)

^۴ Hybrid electric vehicles (HEVs)

انواع مختلفی از این سلول ها توسط سازندگان باتری های لیتیومی تولید می شود که از لحاظ ساختار شیمیایی، شکل هندسی و مشخصات خروجی متفاوت اند. این باتری ها به صورت سلول های مختلفی مانند استوانه ای^۱، سکه ای^۲، کیسه ای^۳ و منشوری^۴ ساخته می شوند. به دلایل تاریخی مشابه در سایر باتری ها، یکی از پرکاربردترین سلول های لیتیوم-یون، سلول های استوانه ای ۱۸۶۵۰ هستند، به نحوی که بسته باتری در بسیاری از خودروهای الکتریکی و هیبریدی امروزی هم از این نوع باتری ها تشکیل شده است.

عملکرد، قابلیت اعتماد و عمر باتری های لیتیوم-یون وابستگی شدیدی به دمای کاری آن ها دارد [۲]. این باتری ها در طی فرایند شارژ یا تخلیه خود، انرژی حرارتی تولید می کنند که باعث افزایش دمای آن ها می گردد و ممکن است منجر به فرار حرارتی^۵ باتری ها شود [۲]. دمای عملیاتی قابل قبول برای این باتری ها اکثراً بین ۲۰- تا ۶۰ درجه سانتی گراد است، در عین حالی که حداکثر اختلاف دما در یک ماژول^۶ هم نباید از ۵°C^۷ بیش تر شود [۳]. بنابراین اعمال یک سامانه مدیریت حرارتی مناسب برای کنترل حرارتی این نوع از باتری ها، به خصوص در مصارف پرنرژژی مانند حمل و نقل، بسیار ضروری است.

سامانه های مدیریت حرارتی باتری از نظر نوع ماده خنک کننده می توانند به سه دسته اصلی تقسیم شوند [۴]:

- خنک کاری با هوا
- خنک کاری با مایع
- خنک کاری توسط ماده تغییر فاز دهنده^۸ (PCM)

به طور کلی اعمال روش خنک کاری باتری ها می تواند به سه نوع فعال^۹، غیرفعال^۹ و یا ترکیبی انجام گیرد [۵]. در روش فعال از انرژی مکانیکی برای به گردش درآوردن سیال خنک کننده استفاده می شود [۵]. سامانه های خنک کاری مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده معمولاً غیرفعال هستند [۱] و هدف اصلی از کاربرد آن ها توزیع یکنواخت دما در بسته باتری است. از طرف دیگر، به خاطر دلالتی چون سادگی ساختار، هزینه کم و نگهداری آسان در مقایسه با سایر سیستم ها، سامانه های هواخنک یکی از پرکاربردترین سیستم های مدیریت حرارتی باتری در خودروهای الکتریکی و هیبریدی می باشند [۱].

در سال ۲۰۰۵ الحلاج و همکاران [۶] نشان دادند که مواد تغییر فاز دهنده می توانند به عنوان یک سامانه مدیریت حرارتی غیرفعال مؤثر در ماژول های باتری لیتیوم-یون مورد استفاده قرار گیرند. آن ها همچنین نشان دادند که سامانه مدیریت حرارتی مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده به طور قابل ملاحظه ای باعث بهبود عمر ماژول های باتری لیتیوم-یون می شود. مقاله آن ها در نهایت یک ماژول و یک بسته باتری لیتیوم-یون دارای سامانه مدیریت حرارتی PCM، برای استفاده در خودروهای هیبریدی پیشنهاد می کند.

¹ Cylindrical cells

² Coin cells

³ Pouch cells

⁴ Prismatic cells

⁵ Thermal runaway

⁶ Module

⁷ Phase change material

⁸ Active

⁹ Passive

در سال ۲۰۰۸ صباح و همکاران [۷] کارایی خنک کاری غیرفعال به وسیله مواد تغییر فاز دهنده را با خنک کاری فعال، یعنی با جابه جایی اجباری هوا، در یک بسته شامل ۶۸ ماژول با آرایش 4S5P از سلول های لیتیوم-یون ۱۸۶۵۰، مقایسه کردند. آن ها نتیجه گرفتند که در شرایطی که شدت جریان تخلیه باتری و دمای محیط پایین باشد، خنک کاری به وسیله مواد تغییر فاز دهنده و خنک کاری توسط جریان هوا تفاوت چندانی نداشته و هر دو سامانه برای این شرایط مناسب اند. اما در شرایط کاری پرتنش، یعنی تحت شدت جریان تخلیه بالا و در دمای محیط بالا، خنک کاری فعال بدون استفاده از دمنده های پرتوان نمی تواند دمای تمام سلول ها را در محدوده کاری مطلوب حفظ کند. از طرف دیگر، سامانه خنک کننده غیرفعال (PCM) تحت همان شرایط پرتنش قادر است بدون نیاز به توان اضافی مصرفی برای دمنده، دمای سلول ها را در محدوده مطلوب نگه دارد. در سال ۲۰۱۳ فتح آبادی [۸] یک طرح جدید شامل محیط های خنک کننده بین ماژول ها برای بسته بندی باتری های لیتیوم-یون کیسه ای مورد استفاده در خودروهای هیبریدی و الکتریکی ارائه داد. این بسته باتری از چندین کانال نازک توزیع شده برای خنک کاری استفاده می کند که مبتنی بر همرفت طبیعی توزیع شده هوا است. این طرح پیشنهادی عملکرد خنک کاری بالایی در دماهای مختلف محیط (حداکثر تا 48°C) بدون نیاز به انرژی مصرفی اضافی برای وسایل الکتریکی نظیر دمنده ها دارد. استفاده از آن سامانه منجر به توزیع بسیار یکنواختی از دما و ولتاژ در واحدهای باتری شده است.

در سال ۲۰۱۵ یانگ و همکاران [۹] یک مدل ماژول باتری های لیتیوم-یون برای ارزیابی عملکرد سامانه خنک کاری به وسیله جریان اجباری هوا، معرفی کردند. آن ها دو آرایش هم راستا^۲ و پلکانی^۳ را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش نشان داد که حداکثر اختلاف دما در ماژول باتری می تواند با قرار دادن باتری ها در آرایش پلکانی کاهش یابد. فواصل طولی، عرضی و شعاعی بین سلول ها نیز متغیرهای مهمی در هر دو نوع آرایش باتری ها بودند.

در سال ۲۰۱۷ الضریر و همکاران [۱] یک سامانه جدید مدیریت حرارتی باتری مبتنی بر یک نوع ماده تغییر فاز دهنده برای بسته های باتری در خودروهای هیبریدی پیشنهاد کردند. در این سامانه برای دفع گرمای تولید شده توسط باتری ها، در مرحله اول پروپان مایع به دمای جوش می رسد و در مرحله دوم بخار تولید شده برای خنک کردن بخش دیگری از باتری که با پروپان مایع پوشانده نشده است، استفاده می شود. در ادامه، بخار پروپان به عنوان سوخت فسیلی وارد موتور احتراق داخلی خودروی هیبریدی می شود و انرژی تولید می کند. در سال ۲۰۲۰ کونگ و همکاران [۱۰] یک سامانه مدیریت حرارتی ترکیبی متشکل از ماده تغییر فاز دهنده کامپوزیتی و جریان مایع خنک کننده، معرفی کردند و شبیه سازی این سامانه را تحت چرخه ای با شدت جریان تخلیه بالا و شدت جریان شارژ پایین، انجام دادند. آن ها نشان دادند تا زمانی که دمای محیط کمتر از دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده (PCM) باشد، PCM به عنوان ماده اصلی دفع کننده حرارت عمل می کند. در این حالت سامانه مایع خنک بیش تر به بازیابی گرمای نهان PCM و کاهش اختلاف دمای داخل بسته باتری در طی فرایند شارژ که در آن به علت شدت جریان پایین، انرژی حرارتی کمتری تولید می شود، می پردازد. هنگامی

¹ Fan

² Thin ducts

³ Aligned

⁴ Staggered

که دمای محیط برابر یا بیشتر از دمای ذوب PCM باشد، دفع حرارت از بسته باتری کاملاً وابسته به سامانه مایع خنک است. در این حالت گرمای تولید شده به وسیله باتری‌ها یا جذب شده توسط PCM، به سامانه مایع خنک منتقل شده و توسط جریان مایع دفع می‌شود.

در سال ۲۰۲۰ صفدری و همکاران [۱۱] یک سامانه مدیریت حرارتی ترکیبی شامل ماده تغییر فاز دهنده به عنوان روش خنک‌کاری غیرفعال و جریان هوا به عنوان روش فعال خنک‌کاری را مطالعه کردند. در کار آن‌ها تأثیر شکل‌های مختلف محفظه نگهدارنده ماده تغییر فاز دهنده حول هر سلول، شامل مقاطع عرضی دایره‌ای، شش‌ضلعی و مربعی بر عملکرد خنک‌کاری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در مطالعات فوق، سیستم‌های مختلف خنک‌کاری با هوا، مایع و یا PCM پیشنهاد و عملکرد آن‌ها مقایسه شده است اما به طور خاص، مطالعه‌ای در زمینه بهینه‌سازی سیستماتیک یک سامانه خنک‌کاری برای یک بسته باتری با کاربرد در مصارف حمل و نقل دیده نمی‌شود. بهینه‌سازی چیدمان باتری‌ها در یک بسته باتری با مشخصات صنعتی با در نظر گرفتن رفتار ترمو-الکتروشیمیایی باتری‌ها هدف مقاله حاضر است.

در این مطالعه، یک ماژول باتری ۱۸۶۵۰ مشابه آرایش مجموعه باتری پلکانی معرفی شده در اختراع تسلا^۱ [۱۲] در نظر گرفته شده و یک سامانه خنک‌کننده مبتنی بر جریان اجباری هوا به آن اعمال می‌گردد. مدل-سازی ترمو-الکتروشیمیایی باتری‌ها به کمک دو مدل کوپل شده صورت می‌گیرد. مدل اول، مدلی یک‌بعدی برای واکنش‌های الکتروشیمیایی رخ داده در باتری (مدل شبه دو‌بعدی) است. این واکنش‌ها منبع تولید توان الکتریکی و انرژی حرارتی اند. مدل دوم نیز یک مدل دو‌بعدی برای انتقال حرارت و جریان هوا است. چیدمان باتری‌ها با هدف بهینه‌سازی مقادیر متوسط دما، توان مصرفی سیکل خنک‌کاری (توان مورد نیاز دمنده)، حجم نسبی سامانه، راندمان خنک‌کاری، شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت حول هر سلول انجام می‌شود.

۲- توسعه مدل و شبیه‌سازی

ساختار بخش اصلی یک سلول واحد لیتیوم-یون شامل اجزای الکتروود منفی (آند)، جداکننده^۵ الکتروود مثبت (کاتد) و جمع‌کننده‌های جریان است (شکل (۱)). مدل و مشخصات مربوط به باتری لیتیوم-یون مورد مطالعه از پژوهش‌های الضریر و همکاران [۱،۱۳] و یانگ و همکاران [۹] استخراج شده است. فاز مایع (الکتروولیت)^۴ باتری از حلال ((3:7 EC/DMC)) تشکیل شده است که در آن نمک LiPF_6 با غلظت ۱/۲ مولار وجود دارد. بخش جداکننده از الکتروولیت و یک شبکه پلیمری (ماتریس جامد) تشکیل شده است. الکتروودهای متخلخل نیز متشکل از دو بخش الکتروولیت و ذرات جامد فعال هستند. ذرات فعال الکتروود مثبت از یک اکسید فلزی نظیر LiMn_2O_4 تشکیل شده اند و ذرات فعال الکتروود منفی، مواد کربنی هستند.

¹ Tesla

² Thermo-electrochemical

³ Coupled

⁴ Anode

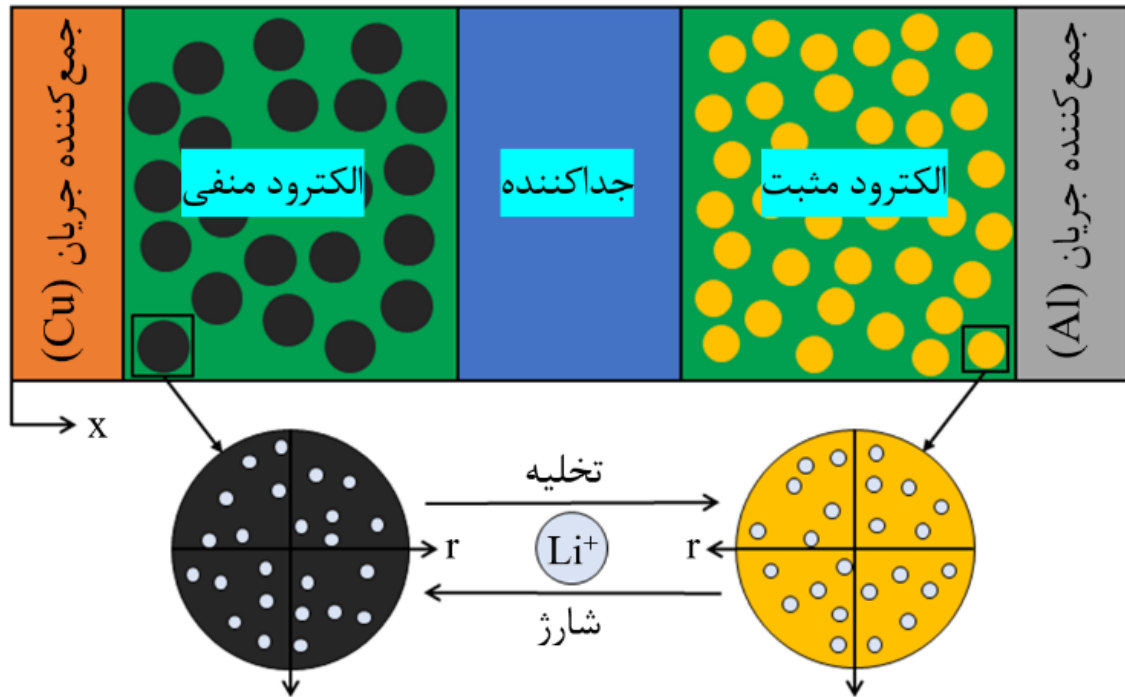
⁵ Separator

⁶ Cathode

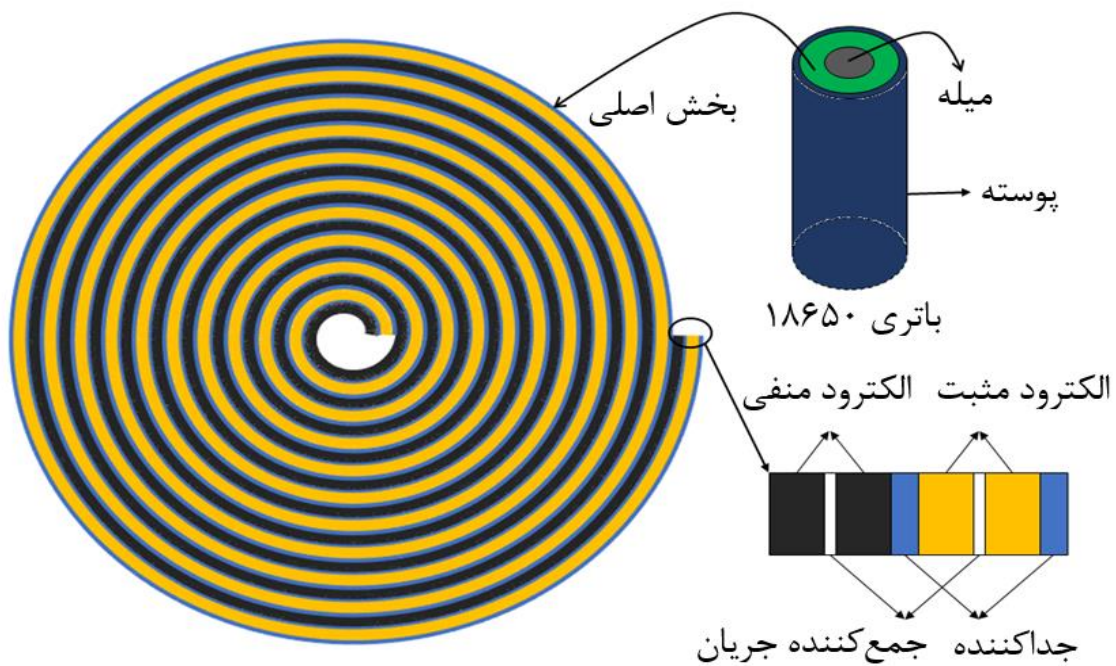
⁷ Current collectors

⁸ Electrolyte

وقتی باتری در حال تخلیه است، یون های لیتیوم از ذرات جامد الکتروود منفی جدا شده و به سمت الکتروود مثبت حرکت می کنند و در نهایت به داخل ذرات فعال الکتروود مثبت نفوذ می کنند [۹]. در فرایند شارژ، جهت حرکت این یون ها از کاتد به سمت آنود است.



شکل ۱- ساختار بخش اصلی باتری لیتیوم-یون



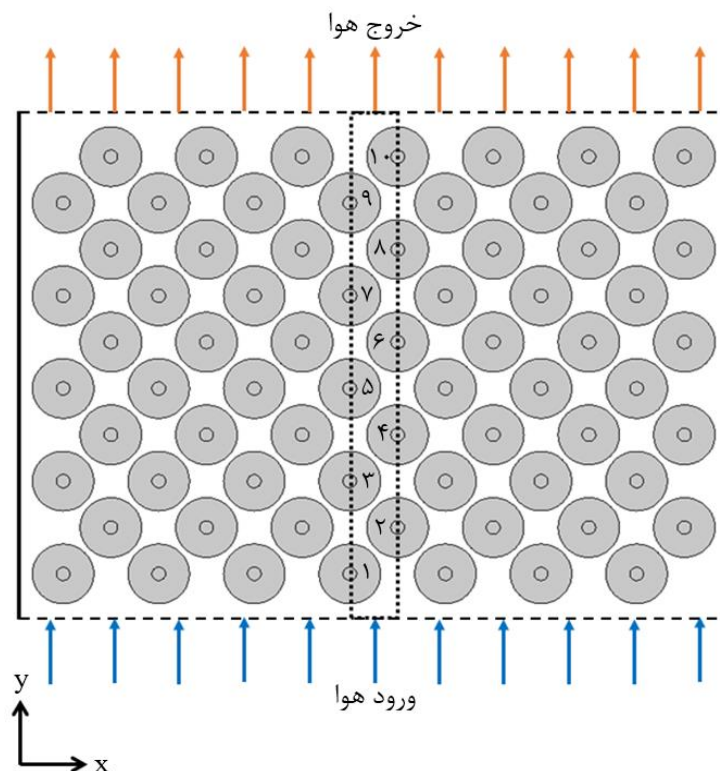
شکل ۲- ساختار یک باتری تجاری ۱۸۶۵۰

سلول های استوانه ای تجاری ۱۸۶۵۰ (با قطر ۱۸mm و ارتفاع ۶۵mm) به طور معمول از سه قسمت زیر تشکیل شده اند:

- میله نایلونی
- بخش اصلی باتری
- پوسته فلزی نگهدارنده

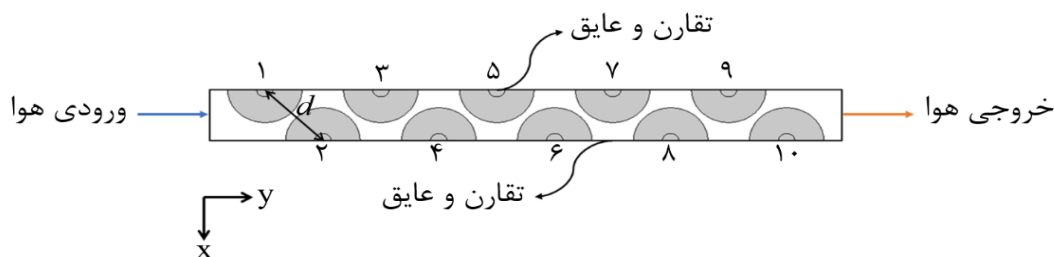
این ساختار در شکل (۲) نمایش داده شده است. میله نایلونی (با قطر ۴mm) در مرکز باتری قرار می گیرد و لایه های تشکیل دهنده بخش اصلی باتری (الکترودها، جداکننده و جمع کننده های جریان)، به شکل یک مارپیچ، حول آن پیچیده می شوند. واکنش های الکتروشیمیایی و تولید حرارت در بخش اصلی اتفاق می افتد. این مواد در نهایت داخل یک پوسته نگهدارنده نازک قرار می گیرند.

در این مطالعه یک ماژول باتری متشکل از ۷۰ سلول استوانه ای ۱۸۶۵۰ با آرایشی شبیه مجموعه باتری پلکانی معرفی شده در اختراع تسلا [۱۲] در نظر گرفته می شود. به این مجموعه یک سامانه هواخنک مطابق شکل (۳) اعمال می گردد. جریان هوای ورودی یکنواخت فرض شده است و از تأثیر دیواره های جانبی بر جریان هوا صرف نظر می شود. بنابراین می توان محدوده محاسباتی را کاهش داد و محاسبات و شبیه سازی را تنها در محدوده مستطیلی مشخص شده با خطوط نقطه چین (شکل (۳)) انجام داد. روی دیواره های جانبی محدوده مستطیلی شرط مرزی تکرارشونده^۱ در نظر گرفته می شود. شرایط مرزی بخش شبیه سازی شده در شکل (۴) مشخص شده است.



شکل ۳- مجموعه باتری و سامانه هواخنک

^۱ Periodic



شکل ۴- شرایط مرزی در مجموعه شبیه سازی شده

واکنش های الکتروشیمیایی، تولید و انتقال حرارت در این مجموعه به کمک مدل کوپل شده ترمو-الکتروشیمیایی شبیه سازی می گردد. این مدل از ترکیب دو مدل فیزیکی-شیمیایی تشکیل شده است. مدل اول برای شبیه سازی واکنش های الکتروشیمیایی سلول بر اساس مدل شبه دوبعدی است. این مدل شبه دو-بعدی اولین بار توسط دوپل و نیومن [۱۴،۱۵] معرفی شده و در حال حاضر یکی از پرکاربردترین مدل های باتری لیتیومی است. مدل دوم یک مدل دوبعدی برای شبیه سازی انتقال حرارت و جریان سیال (هوا) می باشد. مدل سازی، حل عددی معادلات حاکم و شبیه سازی مجموعه در نرم افزار کامسول انجام شده است.

خواص شیمیایی الکترودها در جدول (۱) ذکر شده است. در مدل شبه دوبعدی فرض می شود که قطر ذرات فعال هر کدام از الکترودها ثابت و برابر باشند. جدول (۲) نیز خواص ترمو-فیزیکی هر کدام از اجزای تشکیل دهنده باتری ۱۸۶۵۰ را نشان می دهد. استفاده از باتری های لیتیوم-یون با قابلیت شارژ و تخلیه سریع در خودروهای الکتریکی و هیبریدی متداول است. در این پژوهش شدت جریان شارژ و تخلیه برابر $7/5C$ منظور شده است که شدت جریان بالایی است [۱]. به ازای شدت جریان شارژ یا تخلیه $1C$ ، باتری در مدت زمان ۱ ساعت به ترتیب کاملاً شارژ یا تخلیه می شود [۱۳]؛ بنابراین اگر شدت جریان برابر $7/5C$ باشد، باتری می تواند در مدت زمان $480s$ کاملاً شارژ یا تخلیه شود. شبیه سازی مجموعه باتری تحت سه چرخه کاری 600 ثانیه ای انجام شده است. در هر چرخه مطابق پژوهش الضریر و همکاران [۱]، ابتدا باتری ها با جریان الکتریکی ثابت $7/5C$ یا $90 A/m^2$ به مدت 300 ثانیه شارژ و سپس به مدت 300 ثانیه با همین شدت جریان تخلیه می شوند.

جدول ۱- خواص شیمیایی الکترودها (مطابق [۱،۱۳])

خواص	الکتروده مثبت ($Li_yMn_2O_4$)	الکتروده منفی (Li_xC_6)
شعاع ذرات فعال (R_1)	$1/7 (\mu m)$	$2/5 (\mu m)$
کسر حجمی مواد فعال (ϵ_1)	$0/43$	$0/384$
کسر حجمی فاز الکترولیت (ϵ_2)	$0/4$	$0/444$
چگالی جریان تبدیلی مرجع ($i_{0,ref}$)	$0/08 (mA/m^3)$	$0/11 (mA/m^3)$
غلظت اولیه لیتیوم در فاز جامد ($C_{0,1}$)	$20/925 (M)$	$2/205 (M)$
حداکثر غلظت لیتیوم در فاز جامد ($C_{max,1}$)	$22/86 (M)$	$26/39 (M)$
رسانایی الکتریکی فاز جامد (σ_1)	$3/8 (S/m)$	$100 (S/m)$
ضریب نفوذ لیتیوم در ذرات فعال (D_1)	10×10^{-9}	$3/9 \times 10^{-10}$

¹ Doyle & Newman

² Comsol Multiphysics 5.5

جدول ۲- خواص ترمو-فیزیکی اجزای باتری ۱۸۶۵۰ (مطابق [۹،۱۳])

اجزاء	ضخامت هر لایه (μm)	چگالی (kg/m^3)	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$)	رسانایی حرارتی ($\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$)
الکتروود مثبت	۵۵	۲۳۲۸/۵	۱۲۶۹/۲۱	۱/۵۸
الکتروود منفی	۵۵	۱۳۴۷/۳۳	۱۴۳۷/۴	۱/۰۴
جدا کننده	۳۰	۱۰۰۸/۹۸	۱۹۷۸/۱۶	۰/۳۴۴
جمع کننده جریان (Cu)	۷	۸۹۳۳	۳۸۵	۳۹۸
جمع کننده جریان (Al)	۱۰	۲۷۷۰	۸۷۵	۱۷۰
میله نایلونی	-	۱۱۵۰	۱۷۰۰	۰/۲۶
پوسته فلزی (Steel AISI 4340)	-	۷۸۵۰	۴۷۵	۴۴/۵

با توجه به شکل (۴)، ۵ مقدار مختلف برای فاصله بین باتری‌ها (d) در نظر گرفته می‌شود. این فاصله شعاعی با جابه‌جایی باتری‌ها در جهت جریان هوا (محور y) تغییر می‌کند. طول بخش ورودی و خروجی هوا در بخش شبیه‌سازی شده (شکل (۴))، ثابت و برابر $12/728\text{mm}$ ($\sqrt{2}$ برابر شعاع باتری) فرض شده است.

در پژوهش‌ها و همکاران [۱۶]، ۸ مقدار متفاوت بین ۰ تا 8m/s برای سرعت هوا در ورودی ماژول باتری مورد مطالعه، در نظر گرفته شده است. طبق این پژوهش به ازای سرعت 0m/s دمای متوسط مجموعه باتری به شدت بالا می‌رود و با افزایش سرعت هوای ورودی متوسط دما کاهش می‌یابد. بر اساس این پژوهش، با افزایش سرعت بیش از 2m/s ، اثر افزایش سرعت کاهش یافته و کاهش دمای کم‌تری داریم؛ بنابراین، با افزایش بیش از اندازه سرعت تنها توان مورد نیاز مجموعه زیاد می‌شود. در پژوهش یانگ و همکاران [۹] سرعت هوای ورودی برابر $2/5\text{m/s}$ فرض شده است که به ازای این سرعت دمای سلول‌ها در محدوده مطلوب و بهینه حفظ شده است.

در مطالعه حاضر، سرعت هوا در ورودی مطابق پژوهش یانگ و همکاران [۹] برابر $2/5\text{m/s}$ در نظر گرفته می‌شود و برای محاسبه میدان سرعت هوا از مدل جریان متلاطم $k-\epsilon$ استفاده می‌گردد. دمای اولیه و دمای محیط نیز ثابت و برابر 25°C فرض می‌شود.

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مدل یک‌بعدی (مدل شبه دو بعدی) بر اساس پژوهش دوپیل و همکاران [۱۴،۱۵] بیان می‌شود. معادله توصیف کننده حرکت یون‌های لیتیوم (پایستاری جرم) در فاز β ، یعنی بخش جداکننده و فاز مایع الکترودهای متخلخل، در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$\epsilon_{\beta} \frac{\partial c_{\beta}}{\partial t} = \nabla(D_{\beta} \nabla c_{\beta}) - \frac{\mathbf{i}_{\beta} \cdot \nabla t_{+}^0}{F} + a j_n (1 - t_{+}^0) \quad (1)$$

در این رابطه ϵ_β کسر حجمی فاز β و c_β و D_β نیز به ترتیب غلظت و ضریب نفوذ یون لیتیوم در فاز β هستند. t زمان، i_β چگالی جریان یونی در فاز β ، F عدد فارادی، t_+^0 عدد انتقال، j_n شار یونی روی سطح ذرات فعال و a مساحت سطح ویژه است. مقادیر i_β و j_n به ترتیب به کمک روابط (۲) و (۳) محاسبه می گردند.

$$i_\beta = -\sigma_\beta \nabla \phi_\beta + \frac{2\sigma_\beta RT}{F} \left(1 + \frac{\partial \ln f_\pm}{\partial \ln c_\beta} \right) (1 - t_+^0) \nabla \ln c_\beta \quad (2)$$

$$aj_n = \frac{1}{F} \nabla i_\beta \quad (3)$$

σ_β رسانایی یونی فاز β ، ϕ_β پتانسیل الکتریکی در فاز β ، R ثابت جهانی گازها، T دما و f_\pm ضریب فعالیت نمک الکترولیت است. مقادیر ϵ_β و a مربوط به بخش های جداکننده و فاز مایع الکترودها به ترتیب در روابط (۴) و (۵) ارائه شده است.

در بخش جداکننده هیچ گونه ذرات فعال جامدی وجود ندارد؛ بنابراین، مقدار j_n برابر صفر است.

$$\text{Separator: } \epsilon_\beta = 1, a = 0 \quad (4)$$

$$\text{Electrolyte phase (electrodes): } \epsilon_\beta = \epsilon_2, a = \frac{3\epsilon_1}{R_1} \quad (5)$$

در طی فرایند شارژ یا تخلیه، ذرات لیتیوم جذب ذرات فعال الکترودها شده و یا از آن ها جدا می شوند. ذرات فعال جامد، کروی و قطر ثابت فرض شده اند. معادلات توصیف کننده این فرایند در فاز جامد الکترودها در روابط (۶) و (۷) بیان شده اند. رابطه (۶)، قانون دوم فیک در مختصات کروی و رابطه (۷) توصیف کننده قانون اهم است.

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = D_1 \left[\frac{\partial^2 c_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c_1}{\partial r} \right] \quad (6)$$

$$i_1 = -\sigma_1 \nabla \phi_1 \quad (7)$$

D_1 و c_1 به ترتیب غلظت و ضریب نفوذ لیتیوم در فاز جامد، r مختصه شعاعی ذرات کروی فعال و i_1 و σ_1 و ϕ_1 به ترتیب چگالی جریان، رسانایی و پتانسیل الکتریکی در فاز جامد الکترودها هستند. شرایط مرزی معادله (۶) در مرکز و سطح ذرات جامد به ترتیب در روابط (۸) و (۹) ارائه شده است.

¹ Transference number

$$\frac{\partial c_1}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

$$-D_1 \frac{\partial c_1}{\partial r} = j_n \quad (9)$$

در بخش الکترودهای متخلخل مقدار j_n به کمک معادله باتلر-ولمر^۱ محاسبه می‌شود:

$$Fj_n = i_0 \left\{ \exp\left(\frac{F}{2RT}\right) \eta_{op} - \exp\left(\frac{-F}{2RT}\right) \eta_{op} \right\} \quad (10)$$

i_0 چگالی جریان تبدالی است و به کمک رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. η_{op} نیز در رابطه (۱۲) تعریف شده است.

$$i_0 = Fk_{re}c_2^{0.5}(c_t - c_1)^{0.5}c_1^{0.5} \quad (11)$$

$$\eta_{op} = \phi_1 - \phi_2 - E_{eq} \quad (12)$$

k_{re} متغیر مربوط به سرعت واکنش، c_t حداکثر غلظت نمک در فاز مایع الکترودها و c_2 و ϕ_2 به ترتیب غلظت لیتیوم و پتانسیل الکتریکی در فاز مایع الکترودها است. E_{eq} پتانسیل تعادلی الکتروود است و تنها تابع وضعیت شارژ^۲ (SOC) و دما می‌باشد. ارتباط E_{eq} و دما (T) با بسط تیلور حول دمای مرجع در رابطه (۱۳) بیان شده است.

$$E_{eq} = E_{eq,ref} + (T - T_{ref}) \frac{\partial E_{eq}}{\partial T} \quad (13)$$

T_{ref} دمای مرجع و $E_{eq,ref}$ پتانسیل تعادلی در دمای مرجع است. معادله انرژی در بخش اصلی باتری به صورت کلی در رابطه (۱۴) بیان شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{gen} \quad (14)$$

¹ Butler-Volmer

² State of charge

ρ ، c_p و k به ترتیب معرف چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت گرمایی هستند و T و Q_{gen} نیز به ترتیب نماد دما و شدت تولید حرارت می باشند. در مسئله دوبعدی مورد بررسی، معادله (۱۴) در جهت شعاعی حل می شود. در جهت شعاعی، بخش اصلی باتری از چندین لایه متفاوت تشکیل شده است و ضریب هدایت حرارتی در جهت شعاع همسانگرد نیست؛ اما به عنوان یک تقریب مناسب، در رابطه (۱۴) از متوسط مقادیر ضریب هدایت حرارتی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه استفاده می گردد. این تقریب در بسیاری از پژوهش های مشابه نیز به کار رفته و منجر به نتایج قابل قبولی شده است [۱،۱۳،۱۷،۱۸]. ضریب هدایت به کمک رابطه (۱۵) محاسبه می شود.

$$k_r = \frac{\sum L_i}{\sum \frac{L_i}{k_i}} \quad (15)$$

L_i و k_i به ترتیب ضخامت و ضریب هدایت حرارتی هر لایه است. متوسط چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه بخش اصلی به کمک روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می شود.

$$\rho = \frac{\sum L_i \rho_i}{\sum L_i} \quad (16)$$

$$c_p = \frac{\sum L_i c_{p,i}}{\sum L_i} \quad (17)$$

ρ_i چگالی و $c_{p,i}$ ظرفیت گرمایی ویژه هر لایه است. معادلات انرژی مربوط به بخش های میله نایلونی و پوسته فلزی نیز به شکل رابطه (۱۴) است؛ با این تفاوت که مقدار Q_{gen} برابر صفر و مقادیر ρ ، c_p و k نیز ثابت اند. Q_{gen} از سه بخش تولید حرارت برگشت پذیر، برگشت ناپذیر و اختلاط^۱ تشکیل شده است [۱۹،۲۰].

$$Q_{gen} = Q_{rev} + Q_{irev} + Q_{mix} \quad (18)$$

شدت تولید حرارت برگشت پذیر به کمک رابطه (۱۹) محاسبه می گردد. شدت تولید حرارت برگشت ناپذیر شامل دو بخش تولید حرارت واکنش و تولید حرارت اهمی است که توسط رابطه (۲۰) محاسبه می شود.

$$Q_{rev} = T \frac{\partial E_{eq}}{\partial T} \nabla i_2 \quad (19)$$

^۱ Mixing

$$Q_{irev} = \eta_{op} \nabla \mathbf{i}_2 - (\mathbf{i}_1 \nabla \phi_1 + \mathbf{i}_2 \nabla \phi_2) \quad (20)$$

تولید حرارت اختلاط با تولید و یا توقف تغییرات غلظت یون های لیتیوم در الکترولیت که به ترتیب در اثر عبور و قطع جریان باتری رخ می دهد، مرتبط است و می تواند مقدار منفی نیز داشته باشد؛ یعنی تولید گرمایش و یا سرمایش کند [۱۹]. مقدار تولید حرارت اختلاط به کمک روابط (۲۱) و (۲۲) محاسبه می شود.

$$Q_{mix} = F j_n \frac{\partial E_{eq,therm}}{\partial c_1} \nabla c_1 \quad (21)$$

$$E_{eq,therm} = E_{eq} - T \frac{\partial E_{eq}}{\partial T} \quad (22)$$

معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی برای هوا به ترتیب در روابط (۲۳) تا (۲۵) بیان شده است [۱].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \cdot \vec{u}) = -\nabla p + \rho g \quad (24)$$

$$\frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (25)$$

بردار u معرف میدان سرعت سیال است. توان ایده آل مورد نیاز برای سامانه خنک کاری هوا را می توان با محاسبه دبی حجمی و فشار کل ورودی تخمین زد [۹]. این متغیر در بخش (۲-۴) بررسی می شود.

$$P_W = \left(p_{in} + \frac{\rho_{in} U_{in}^2}{2} \right) Q_{v,in} \quad (26)$$

p_{in} و ρ_{in} به ترتیب متوسط فشار و چگالی در ورودی هوا و U_{in} و $Q_{v,in}$ نیز به ترتیب متوسط سرعت و دبی حجمی هوا در ورودی می باشند. برای بررسی تأثیر افزایش فاصله بین سلول ها بر افزایش حجم سامانه، می توان متغیر بی بعدی به نام حجم نسبی سامانه تعریف کرد. این متغیر در بخش (۲-۴) مورد بررسی قرار می گیرد. حجم نسبی سامانه به کمک رابطه (۲۷) محاسبه می گردد.

$$Rv = \frac{V}{V_0} \quad (27)$$

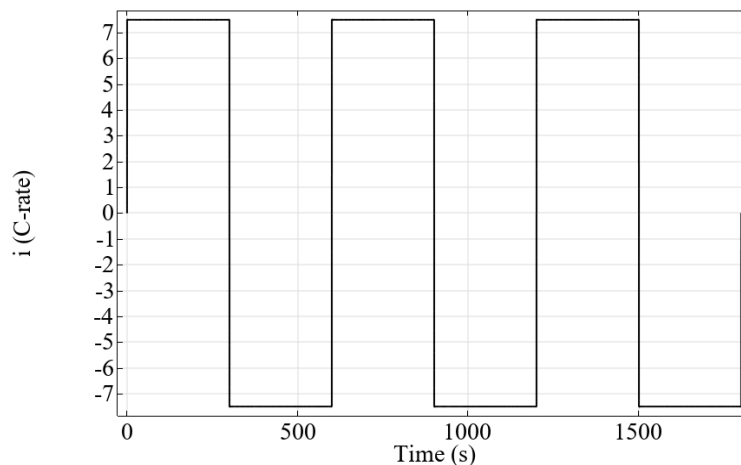
V حجم مجموعه باتری و V_0 حجم مجموعه به ازای $d=0$ است، یعنی شرایطی که فاصله‌ای بین باتری‌ها وجود ندارد. بازده خنک کاری متغیر بی‌بعدی است که به صورت نسبت مجموع گرمای دفع شده از باتری‌ها توسط جریان هوا به مجموع انرژی مصرف شده برای ایجاد جریان هوا مطابق رابطه (۲۸) تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{Q_{remo}}{\int P_W dt} \quad (28)$$

Q_{remo} مجموع گرمای دفع شده از باتری‌ها در طول فرایند و $\int P_W dt$ کل انرژی مصرف شده برای ایجاد جریان هوا در طول فرایند را نشان می‌دهد. تغییرات بازده خنک کاری در بخش‌های (۲-۴) و (۴-۴) مطالعه می‌شود.

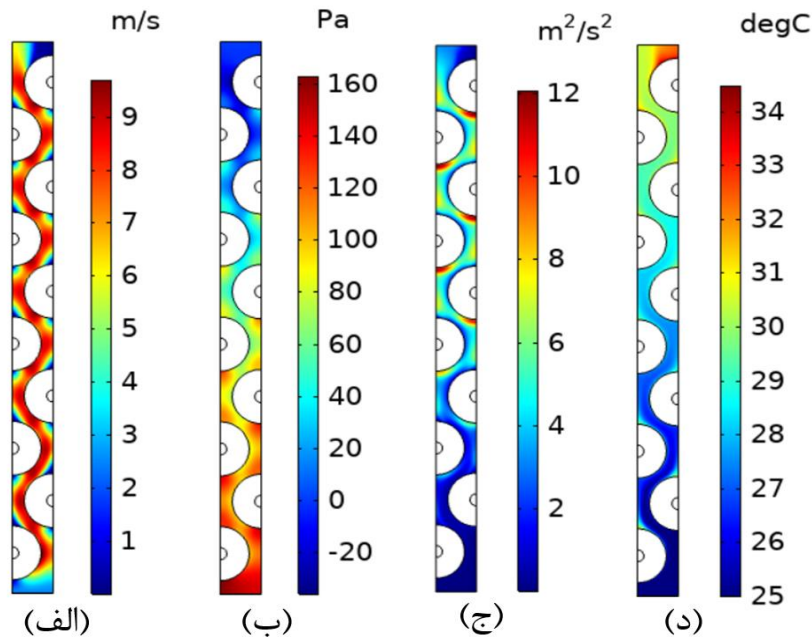
۴- روش بهینه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی

بهینه‌سازی با استفاده از معادلات به کار رفته در مسئله حاضر و مشابه آن بسیار پیچیده بوده و معمولاً از طریق روش‌های ریاضی دنبال نمی‌شود. در ادبیات مرسوم است که با مقایسه حالت‌های ممکن، شرایط بهینه استخراج می‌گردد. به عنوان نمونه در مقاله پنگ و همکاران [۲۱]، با مقایسه ۳ پیکره‌بندی متفاوت برای یک مجموعه بیست‌سلولی، پیکره‌بندی مناسب استخراج شده و سپس با مقایسه ۲۶ حالت مختلف، شرایط بهینه از نظر جایگاه و تعداد ورودی و خروجی هوا استخراج شده است. به طور کلی بهینه‌سازی سامانه‌های خنک‌کننده باتری که مبتنی بر جریان اجباری هوا هستند، می‌تواند به سه شیوه‌ی تغییر آرایش و پیکره‌بندی سلول‌ها، تغییر و بهینه کردن کانال جریان هوا و تغییر جایگاه ورودی و خروجی هوا یا جایگاه دمنده صورت گیرد [۲۲، ۲۳]. به عنوان مثال در پژوهش‌های جی و همکاران [۲۴] و یانگ و همکاران [۹]، دو پیکره‌بندی مختلف برای مجموعه باتری در نظر گرفته شده و با تغییر فاصله‌ی بین سلول‌ها و بررسی چند حالت مختلف، به بهینه‌سازی آرایش باتری‌ها پرداخته شده است. بنابراین منظور از بهینه‌سازی در پژوهش حاضر مقایسه چند حالت مختلف و انتخاب شرایط بهینه با توجه به حداکثر دمای سلول‌ها، توزیع دما، حجم نسبی و بازده خنک کاری سامانه است. با انجام این پژوهش، تأثیر متغیرهای طراحی بر عملکرد خنک کاری سامانه هواخنک مجموعه باتری بررسی شده، و از آن‌جا حالت بهینه برای فاصله و تعداد سلول‌ها استخراج می‌گردد. پ

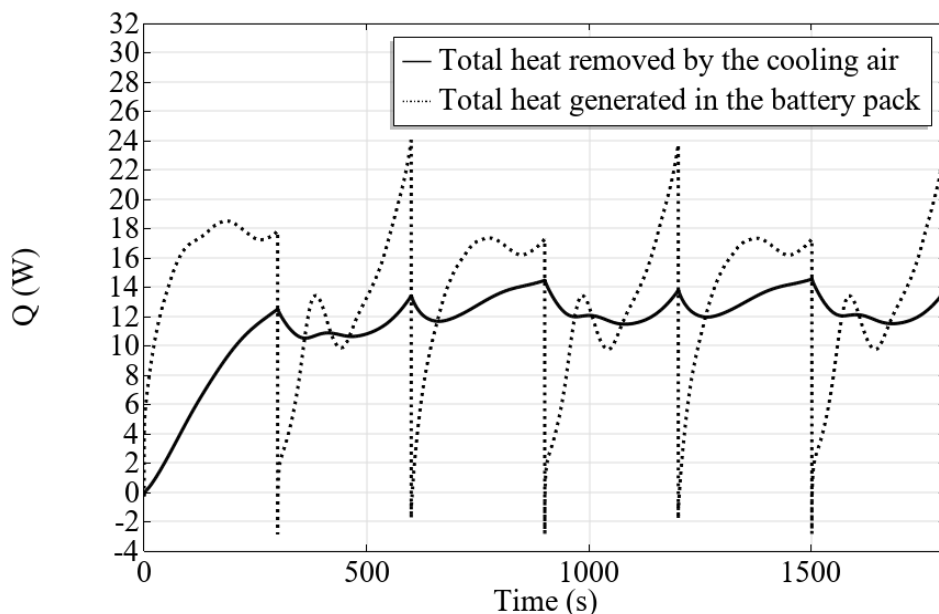


شکل ۵- شدت جریان عبوری از باتری‌ها

شکل (۵)، شدت جریان عبوری از باتری های مجموعه را بر حسب زمان تا لحظه پایان فرایند شبیه سازی (۱۸۰۰s)، نشان می دهد. مجموعه ۱۰ سلولی در شکل (۴) نشان داده شده است. در این پژوهش مطابق رابطه (۲۹)، ۵ مقدار متفاوت برای فاصله بین مراکز سلول ها (d) فرض شده است. در این بخش و بخش (۱-۴) یکی از این مقادیر برای مثال، حالتی که فاصله بین مراکز سلول های استوانه ای $2/4$ برابر شعاع سلول هاست، مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۶- توزیع متغیرهای مربوط به جریان هوا: (الف) سرعت، (ب) فشار، (ج) انرژی جنبشی تلاطمی و (د) دما در لحظه ۱۸۰۰s و به ازای شرایطی که d مساوی $2/4$ برابر شعاع سلول هاست.



شکل ۷- مجموع گرمای دفع شده از مجموعه باتری و تولید شده در آن در هر لحظه به ازای شرایطی که d مساوی $2/4$ برابر شعاع سلول هاست.

شکل (۶) توزیع متغیرهای مربوط به جریان هوا یعنی، سرعت (m/s)، فشار (Pa)، انرژی جنبشی تلاطمی^۱ (m^2/s^2) و دما ($^{\circ}C$) را در پایان فرایند و در این حالت ($d=2/4R_{batt}$) نشان می دهد. به صورت کلی مطابق شکل (۶)، در جهت عبور جریان هوای خنک کننده، فشار کاهش و انرژی جنبشی تلاطمی و دما افزایش می یابد. افزایش انرژی جنبشی تلاطمی باعث افزایش ضریب انتقال گرمای جابه جایی می گردد؛ اما با این حال تبادل حرارت بین سلول ها و جریان هوا در جهت عبور هوا می تواند کاهش یابد؛ زیرا با حرکت در جهت جریان هوا، اختلاف دمای بین سلول ها و جریان هوا (به دلیل افزایش دمای هوا) کم می شود [۹]. این موارد در بخش (۳-۴) نشان داده شده است. شکل (۷) نمودار مجموع گرمای تولید شده توسط سلول ها و مجموع گرمای دفع شده از آن ها توسط جریان هوا را در هر لحظه برای این حالت نشان می دهد.

۴-۱- وضعیت استقلال از شبکه بندی

در این بخش حساسیت به شبکه بندی نتایج به دست آمده برای دمای مجموعه سلول ها تجزیه و تحلیل می شود. برای این کار شبیه سازی در شرایط $d=2/4R_{batt}$ با تعداد المان های کم تر و بیش تر از حالت پیش فرض یعنی، ۲۸۴۴۴ المان، انجام شده و تغییرات حداکثر دما مورد بررسی قرار می گیرد. جزئیات کامل این مطالعه در فایل ((مطالب کمکی)) به نام Supplementary-data گنجانده شده است. در این بخش و در جدول (۳) خلاصه این مطالعه ارائه می شود. بر طبق نتایج جدول (۳)، اختلاف بیشینه دمای محاسبه شده در مجموعه بین درشت ترین (۱۲۴۲۸ المان) و ریزترین (۱۷۷۲۴۴ المان) مش برابر 0.525% است که با توجه به محدوده مجاز خطای $\pm 1.0\%$ برای حل های دینامیک سیالات محاسباتی [۲۵،۲۶]، کاملاً قابل قبول است. بنابراین، نتایج حل عددی (شبیه سازی) مستقل از نوع شبکه بندی بوده و مش پیش فرض کاملاً مناسب است.

۴-۲- تأثیر فاصله شعاعی بین سلول ها

در ادامه ۵ فاصله مختلف بین باتری ها (d) مطابق رابطه (۲۹) در نظر گرفته شده است. این فاصله شعاعی با جابه جایی باتری ها در راستای محور y تغییر می کند.

$$d = (2 + 0.1j)R_{batt}, j = 2, 3, \dots, 6 \quad (29)$$

جدول ۳- مطالعه استقلال از شبکه بندی

تعداد المان های شبکه	حداکثر دمای مجموعه در لحظه پایان آخرین فرایند شارژ (۱۵۰۰s) ($^{\circ}C$)	درصد تغییرات حداکثر دما (%)
۱۲۴۲۸	۴۱/۳۱۹	مش پایه
۱۸۴۲۰	۴۱/۲۵۳	-۰/۱۶
۲۸۴۴۴ (پیش فرض)	۴۱/۱۹۲	-۰/۱۵
۷۱۱۵۰	۴۱/۱۳۲	-۰/۱۴
۱۷۷۲۴۴	۴۱/۱۰۲	-۰/۰۷

^۱ Turbulence kinetic energy

R_{batt} شعاع باتری ۱۸۶۵۰ است که مقداری برابر ۹mm دارد. در شکل (۸)، نمودار متوسط دمای (بخش اصلی) مجموعه سلول ها به ازای ۵ مقدار d در هر لحظه رسم شده است. طبق شکل (۸)، در سیکل اول فرایند دمای سلول ها تا لحظه پایان فرایند شارژ پیوسته افزایش می یابد. این افزایش دما تا لحظه ۲۰۰S بسیار سریع (تقریباً خطی) است و پس از آن سرعت افزایش دما تا لحظه ۳۰۰S کاهش می یابد؛ زیرا مطابق شکل (۷) از لحظه ۲۰۰S تا لحظه پایان اولین فرایند شارژ، تولید حرارت در مجموعه باتری کاهش می یابد، در حالی که سامانه خنک کننده همواره فعال است. به عنوان مثال به ازای $d=2/4 R_{batt}$ دمای متوسط بخش اصلی سلول ها در لحظه ۲۰۰S برابر $33/29^{\circ}C$ و در لحظه ۳۰۰S برابر $35/64^{\circ}C$ محاسبه شده است.

در اولین فرایند تخلیه دمای متوسط سلول ها ابتدا کاهش می یابد و تا لحظه ۵۰۰S افزایش محسوسی ندارد. پس از لحظه ۵۰۰S این دما با شیب زیادی افزایش می یابد؛ زیرا مطابق شکل (۷)، از لحظه ۵۰۰S، تولید حرارت داخل مجموعه به شدت زیاد می گردد. این پدیده یعنی، کاهش و سپس افزایش دمای سلول ها، در دو فرایند تخلیه بعدی نیز رخ می دهد. به ازای $d=2/4 R_{batt}$ دمای متوسط بخش اصلی سلول ها در لحظه ۵۰۰S مساوی $34/25^{\circ}C$ و در لحظه ۶۰۰S برابر $36/43^{\circ}C$ است. در فرایندهای شارژ پس از تخلیه نیز دمای سلول پس از یک کاهش شدید (که به علت افت شدید تولید حرارت مجموعه رخ می دهد)، به صورت پیوسته زیاد می شود. در پژوهش الضریب و همکاران [۱]، در یک سیکل شارژ و تخلیه ۶۰۰S، دما و رفتار حرارتی یک باتری لیتیوم-یون ۱۸۶۵۰ که با سامانه مبتنی بر جوشش پروپان خنک می شود، مطالعه شده است.

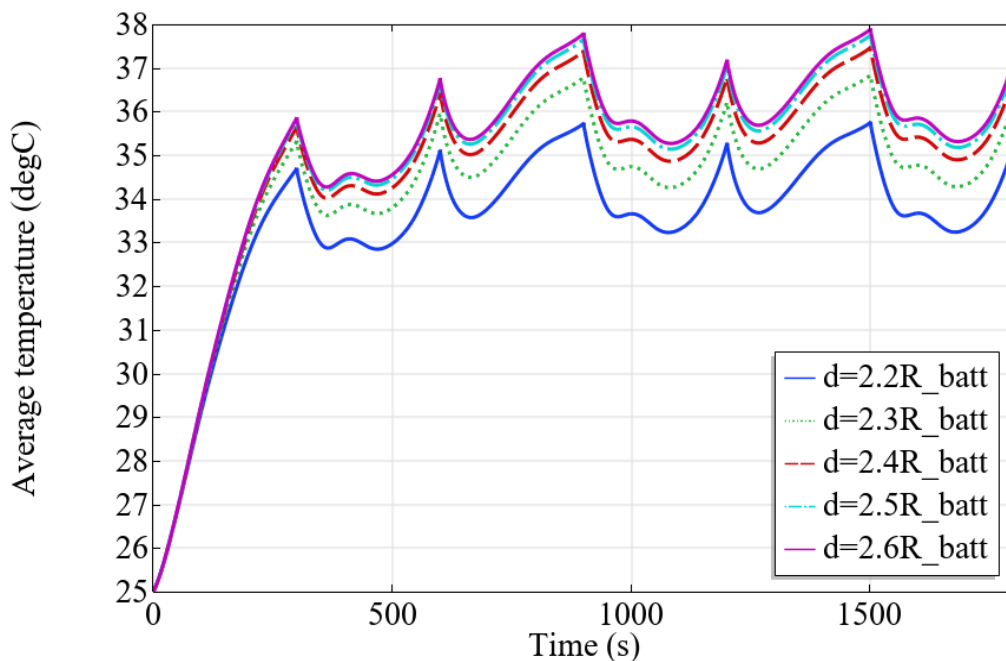
در این پژوهش نیز دمای اولیه مجموعه برابر $25^{\circ}C$ بود و دمای سلول ها تا لحظه پایان فرایند شارژ به طور پیوسته افزایش می یافت. سرعت این افزایش دما بعد از لحظه ۲۰۰S کم می شد. به عنوان مثال، در شرایطی که فشار سامانه برابر ۸/۵bar بود و ۵٪ از ارتفاع باتری داخل پروپان مایع بود، حداکثر دمای باتری در لحظه ۲۰۰S تقریباً برابر $34/1^{\circ}C$ و در لحظه ۳۰۰S برابر $37/4^{\circ}C$ محاسبه شده بود. در فرایند تخلیه نیز دمای سلول ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت. دمای این باتری در لحظه پایان فرایند تخلیه (۶۰۰S) برابر $38/9^{\circ}C$ محاسبه شده بود.

با توجه به شکل (۸)، بیشینه دما به ازای هر فاصله در لحظه پایان آخرین فرایند شارژ، یعنی در لحظه ۱۵۰۰S، رخ می دهد. شکل (۹) متوسط دمای بخش اصلی هر سلول را در لحظه ۱۵۰۰S نشان می دهد. مطابق شکل های (۸) و (۹)، با کاهش فاصله شعاعی بین باتری ها تا $d=2/2 R_{batt}$ ، متوسط دمای مجموعه باتری ها و متوسط دمای هر سلول، به جز احتمالاً سلول آخر، کاهش می یابد. برای مثال به ازای فاصله $d=2/2 R_{batt}$ بین سلول ها، متوسط دمای باتری ها در لحظه ۱۵۰۰S برابر $35/75^{\circ}C$ است و به ازای $d=2/6 R_{batt}$ در همین لحظه این مقدار برابر $37/88^{\circ}C$ می باشد. به ازای فاصله $d=2/2 R_{batt}$ و در لحظه ۱۵۰۰S دمای متوسط سلول شماره (۲) برابر $34/45^{\circ}C$ و به ازای $d=2/6 R_{batt}$ برابر $38/73^{\circ}C$ است.

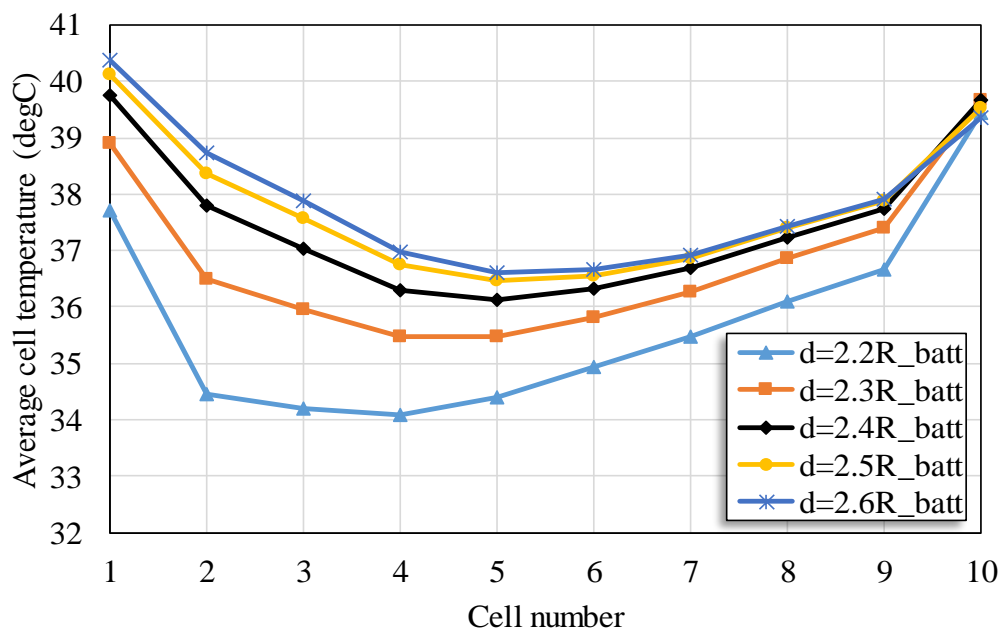
در پژوهش یانگ و همکاران [۹] یک مجموعه شش تایی از باتری های ۲۶۶۵۰ با آرایش پلکانی بررسی شده است. در آن پژوهش نیز (در فاصله شعاعی بین ۳۰mm تا ۳۸mm) با کاهش فاصله شعاعی بین باتری ها، متوسط دمای هر سلول به جز احتمالاً سلول آخر کاهش می یافت.

با توجه به شکل (۹)، با حرکت در جهت جریان هوا (از باتری شماره ۱ تا ۱۰) متوسط دمای سلول ها ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. برای نمونه در لحظه ۱۵۰۰S و به ازای $d=2/4 R_{batt}$ ، متوسط دمای باتری

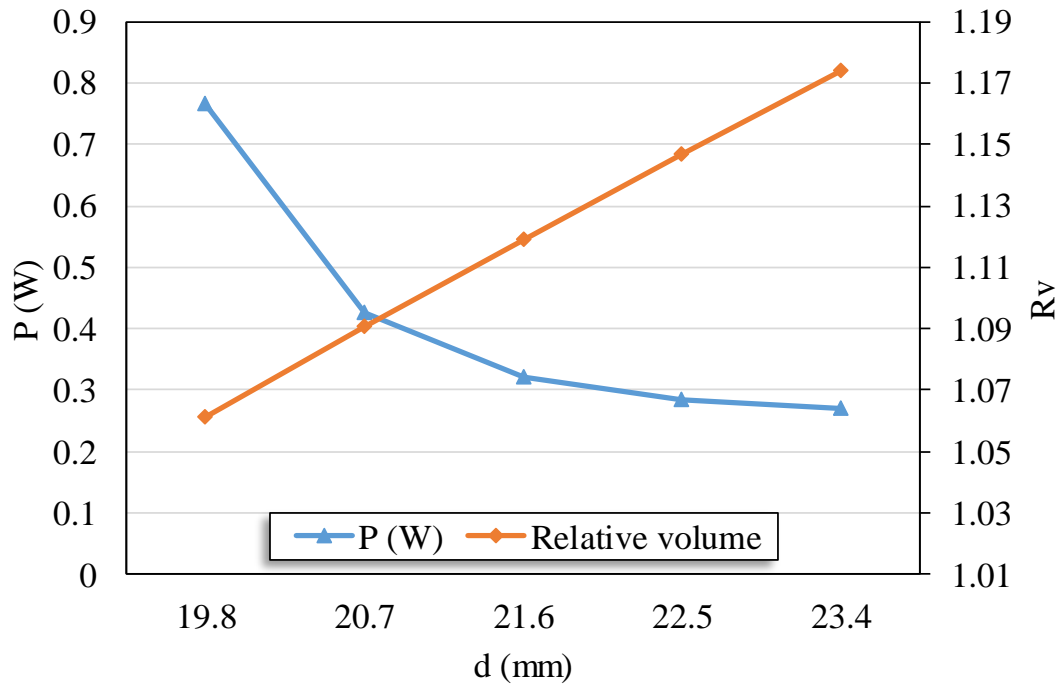
شماره (۱) برابر $39/74^{\circ}\text{C}$ ، متوسط دمای باتری شماره (۵) برابر $36/12^{\circ}\text{C}$ و متوسط دمای باتری شماره (۱۰) مساوی $39/67^{\circ}\text{C}$ محاسبه شده است. در مقاله یانگ و همکاران [۹] نیز با حرکت در جهت عبور هوا، متوسط دمای سلول ها ابتدا کاهش و سپس افزایش می یافت. در مجموعه شش سلولی آن مقاله، به ازای فاصله شعاعی 34mm و در لحظه پایان فرایند شبیه سازی، دمای سلول های شماره (۱) و (۳) و (۶) به ترتیب برابر 34°C ، $33/3^{\circ}\text{C}$ و $34/3^{\circ}\text{C}$ محاسبه شده بود.



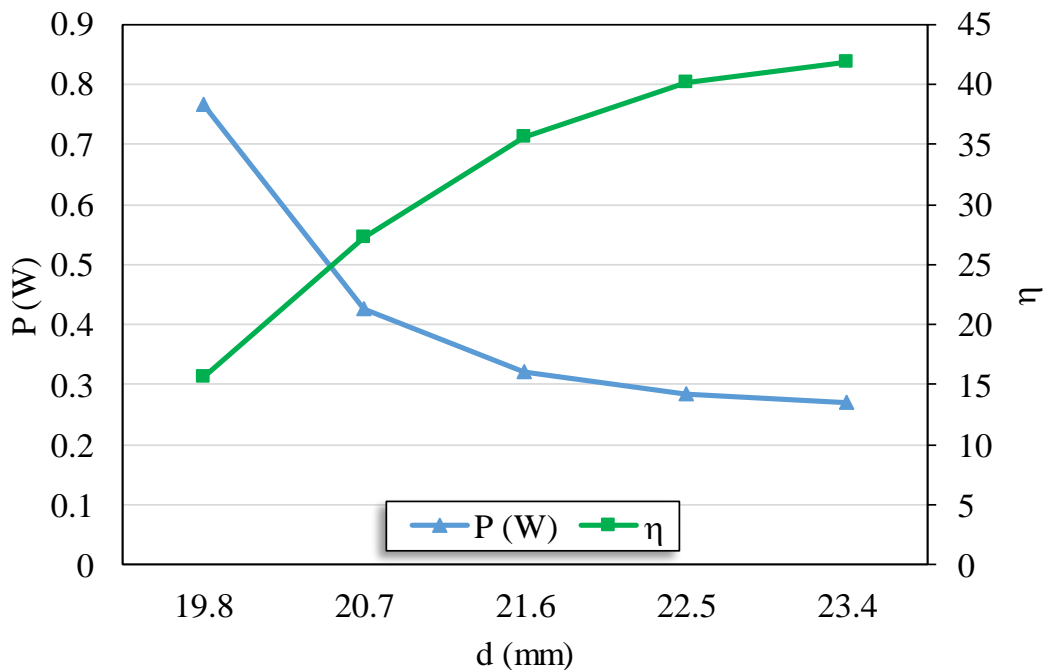
شکل ۸- متوسط دمای بخش اصلی مجموعه باتری ها در هر لحظه



شکل ۹- متوسط دمای بخش اصلی هر سلول باتری در پایان آخرین فرایند شارژ



شکل ۱۰- توان مورد نیاز برای سامانه هواخنک و حجم نسبی سامانه بر حسب d



شکل ۱۱- توان مورد نیاز برای سامانه هواخنک و بازده خنک کاری بر حسب d

هر چند که مطابق شکل های (۸) و (۹) متوسط دمای هر سلول و مجموعه باتری ها با کاهش فاصله بین سلول ها کم می شود اما با کاهش این فاصله، فشار در ورودی هوا زیاد می شود. شکل های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب تغییرات

توان مورد نیاز سامانه هوا خنک را برحسب d در مقایسه با تغییرات حجم نسبی مجموعه و بازده خنک کاری نشان می‌دهند. طبق رابطه (۲۶) افزایش فشار در ورودی هوا باعث افزایش توان مورد نیاز سامانه هوا خنک می‌گردد. برای مثال به ازای $d=2/6R_{batt}$ ، توان مورد نیاز برابر $0/2709W$ و به ازای $d=2/2R_{batt}$ برابر $0/7654W$ است. در پژوهش یانگ و همکاران [۹] نیز نشان داده شده است که با کاهش فاصله شعاعی بین سلول‌ها، توان مورد نیاز خنک کاری افزایش می‌یابد.

مطابق شکل (۱۰)، هرچند با افزایش فاصله بین باتری‌ها توان مصرفی کاهش می‌یابد اما این افزایش فاصله باعث افزایش حجم سامانه می‌شود که یک مورد منفی به شمار می‌رود. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که افزایش فاصله بین باتری‌ها و کاهش توان مصرفی باعث افزایش بازده خنک کاری مجموعه باتری‌ها می‌گردد.

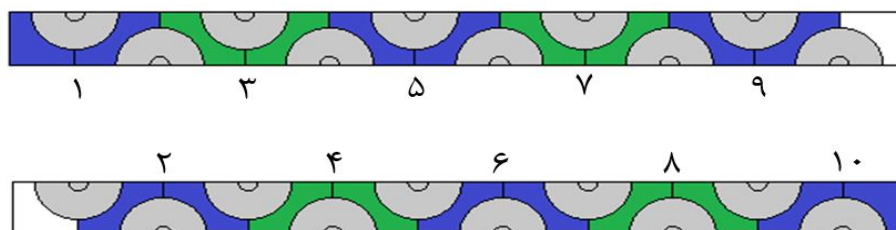
محدوده بهینه برای دمای کاری باتری‌های لیتیوم-یون بین ۲۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد است و همچنین اختلاف دما در یک مجموعه باتری نباید از $5^{\circ}C$ بیش‌تر باشد [۳]. با توجه به شکل (۹) در پایان آخرین فرایند شارژ، تنها دمای سلول ۱ به ازای $d=2/6R_{batt}$ اندکی بیش از $40^{\circ}C$ است و در دیگر شرایط، متوسط دمای بخش اصلی باتری‌ها همواره کمتر از $40^{\circ}C$ و کاملاً در محدوده بهینه است. طبق شکل (۹)، به جز در شرایطی که $d=2/2R_{batt}$ است، اختلاف بین متوسط دمای سلول‌ها کمتر از $5^{\circ}C$ است؛ بنابراین برای این که اختلاف بین متوسط دمای سلول‌ها کمتر از $5^{\circ}C$ شود، باید d بزرگتر از $2/2R_{batt}$ باشد.

افزایش فاصله بین مراکز سلول‌ها بیش از $d=2/4R_{batt}$ تنها باعث افزایش حجم سامانه می‌شود و اثر زیادی در کاهش توان مصرفی و افزایش بازده خنک کاری سامانه ندارد. با توجه به این که به ازای این مقدار دمای سلول‌ها نیز در محدوده بهینه قرار می‌گیرد، مقدار $d=2/4R_{batt}$ را می‌توان به عنوان فاصله شعاعی بهینه در نظر گرفت.

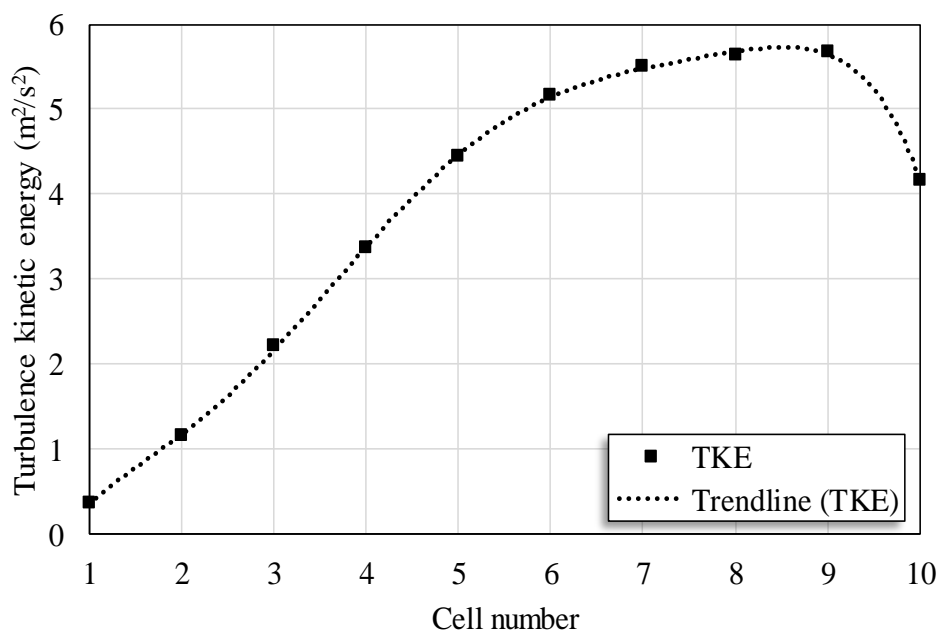
۳-۴- تغییرات دما در جهت عبور هوا

در جهت عبور هوا، دمای متوسط سلول‌ها ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در این بخش به مطالعه علت این پدیده پرداخته می‌شود. شکل (۱۲) محدوده هوای در نظر گرفته شده حول هر سلول را نشان می‌دهد. در این بخش فاصله بین مراکز سلول‌ها برابر مقدار بهینه ($d=2/4R_{batt}$) فرض شده است.

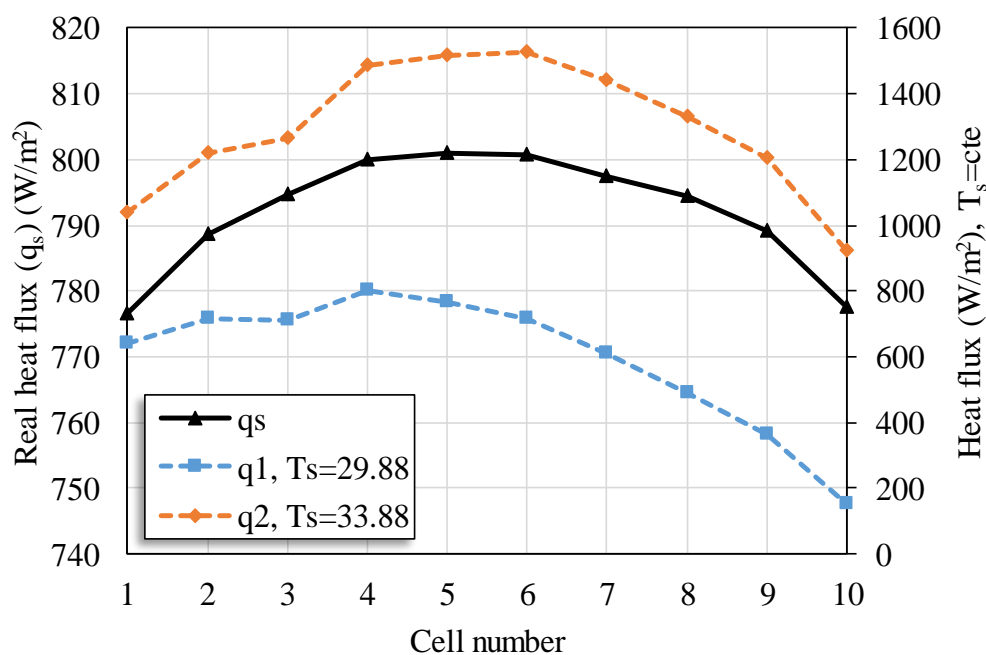
شکل (۱۳) مقادیر متوسط انرژی جنبشی تلاطمی حول هر سلول را در طی فرایند نشان می‌دهد. با توجه به خط روند این نمودار، در جهت عبور هوا، مقدار انرژی جنبشی تلاطمی هوای حول هر سلول تا سلول شماره (۹) افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. تغییرات انرژی جنبشی تلاطمی تأثیر مستقیمی بر شار حرارتی سطح سلول‌ها و دمای آن‌ها دارد که در ادامه بیان می‌شود.



شکل ۱۲- محدوده هوای منظور شده حول هر سلول



شکل ۱۳- متوسط انرژی جنبشی تلاطمی هوای حول هر سلول



شکل ۱۴- شار حرارتی واقعی و شار حرارتی محاسبه شده به ازای دو دمای سطح ثابت روی سطح سلول ها در لحظه ۱۵۰۰s

منحنی سیاه‌رنگ در شکل (۱۴) شار حرارتی واقعی خارج شده از سطح هر سلول (q_s) را در لحظه ۱۵۰۰s نشان می‌دهد. منحنی‌های آبی و نارنجی نیز شار حرارتی محاسبه شده به ازای دو دمای ثابت $29/88^\circ\text{C}$ و $33/88^\circ\text{C}$ را نشان می‌دهند. کمترین دمای متوسط سطح در این لحظه در سلول شماره (۴) رخ می‌دهد که مقداری برابر با $29/88^\circ\text{C}$ دارد و بیش‌ترین دمای متوسط سطح در سلول شماره (۱۰) که مقداری برابر با $33/88^\circ\text{C}$ دارد.

شکل (۱۵) ضریب انتقال حرارت روی سطح هر سلول (h) و دمای متوسط هوای حول هر سلول (T_{air}) را در لحظه ۱۵۰۰s مشخص می کند. مقدار h در هر لحظه به کمک رابطه (۳۰) محاسبه می شود که در آن، T_s متوسط دمای سطح سلول و q شار حرارتی سطح است.

$$h = \frac{q}{T_s - T_{air}} \quad (30)$$

به کمک رابطه (۳۰) و با جایگذاری مقادیر h و T_{air} حول هر سلول در لحظه ۱۵۰۰s و ثابت قرار دادن T_s (برابر با $28/99^\circ\text{C}$ و $33/88^\circ\text{C}$)، می توان منحنی های آبی و نارنجی شکل (۱۴) را رسم کرد. بر اساس این شکل در هر سه منحنی ابتدا افزایش و سپس کاهش مقدار شار حرارتی سطح رخ می دهد و مطابق منحنی q_s ، مقدار شار تا سلول شماره (۵) افزایش یافته و سپس کاهش می یابد. همان طور که در بخش (۲-۴) نیز بیان شد، مطابق شکل (۹) در جهت عبور هوا دمای سلول ها ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. معادله مربوط به موازنه انرژی در هر سلول می تواند به صورت رابطه (۳۱) نوشته شود.

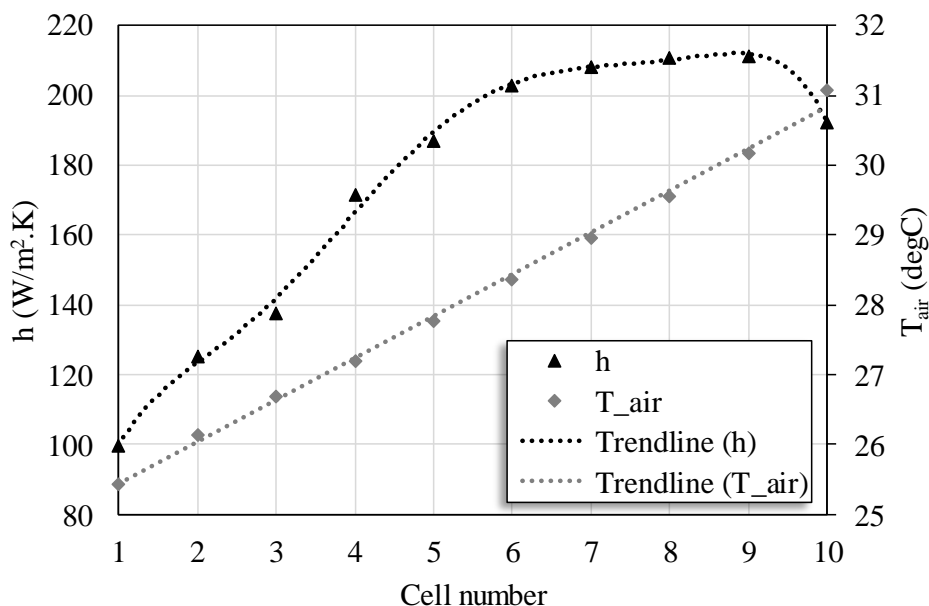
$$Q_{cell}\pi(R_{batt} - R_{mand})^2 H_{batt} - 2q_s\pi R_{batt} H_{batt} = \frac{dE}{dt} \quad (31)$$

Q_{cell} شدت تولید حرارت به ازای واحد حجم در بخش اصلی سلول، R_{mand} شعاع میله نایلونی، H_{batt} ارتفاع باتری و E انرژی درونی سلول است. چون در باتری ها تغییر فازی صورت نمی گیرد، انرژی درونی هر سلول با متوسط دمای آن رابطه مستقیم دارد.

بر اساس رابطه (۳۱)، به دلیل این که شدت تولید حرارت در سلول ها تقریباً یکسان است، اختلاف بین دما و انرژی درونی سلول ها تنها به علت اختلاف در شار گرمای دفع شده از آن ها رخ می دهد. دما و انرژی درونی هر سلول با شار گرمای دفع شده از آن رابطه معکوس دارد. به این ترتیب پدیده کاهش و سپس افزایش دمای سلول ها در جهت جریان هوا توجیه می شود.

افزایش انرژی جنبشی تلاطمی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می گردد [۹]. در شکل (۱۵) با حرکت در جهت عبور هوا، مقدار ضریب انتقال حرارت جابه جایی حول هر سلول، مشابه با انرژی جنبشی تلاطمی، تا سلول شماره (۹) افزایش و پس از آن کاهش می یابد؛ بنابراین، بین انرژی جنبشی تلاطمی و ضریب h رابطه مستقیم وجود دارد. افزایش مقدار h باعث افزایش مقدار شار حرارتی سطح می شود.

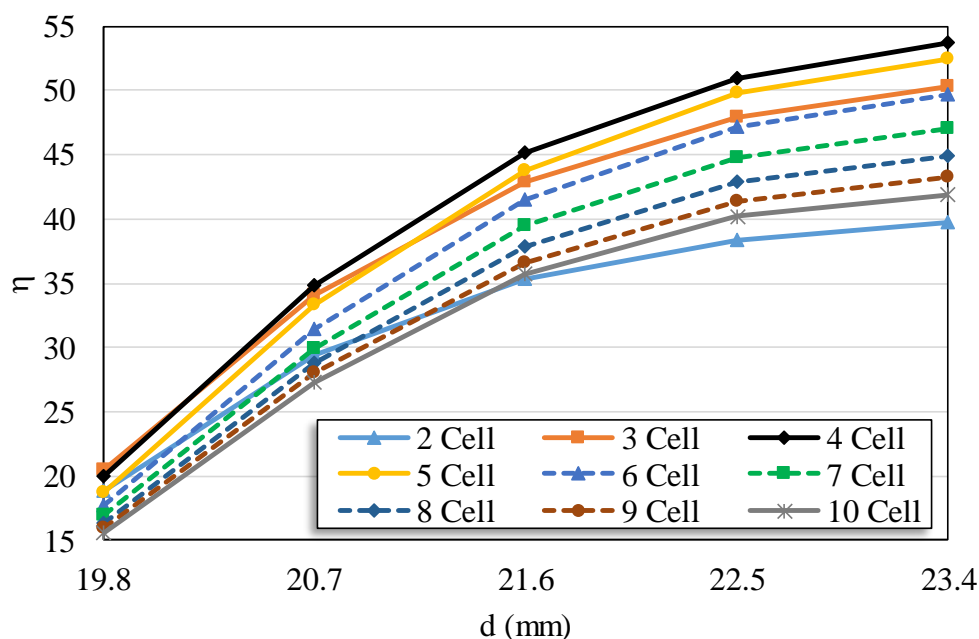
مطابق شکل (۱۵) با حرکت در جهت جریان هوا، دمای متوسط هوای حول هر سلول زیاد می شود که این افزایش دما باعث کاهش شار حرارتی سطح می گردد. بر اساس این شکل در جهت جریان هوا، مقدار دمای متوسط هوای حول سلول ها (T_{air}) با شیب تقریباً ثابتی افزایش می یابد اما افزایش مقدار ضریب h ابتدا با شدت زیادی رخ می دهد و پس از آن شیب این افزایش کم می شود. شار حرارتی سطح ابتدا به دلیل افزایش شدید مقدار h ، زیاد می شود و پس از آن با کاهش شیب نمودار h ، اثر افزایش T_{air} غالب می گردد و شار حرارتی سطح کاهش می یابد.



شکل ۱۵- ضریب انتقال حرارت جابه جایی سطح و دمای هوای حول هر سلول در لحظه ۱۵۰۰s

۴-۴- تأثیر تعداد سلول های مجموعه

حال شرایطی را بررسی می کنیم که به جای ۱۰ سلول، تعداد کمتری سلول پشت سر هم داشته باشیم؛ یعنی مجموعه را به چند قسمت کوچک تر تقسیم کنیم. برای مثال می توان مجموعه را به دو قسمت مساوی ۵ سلولی تقسیم کرد. بازده خنک کاری مجموعه به ازای تعداد سلول ها و فواصل مختلف بین باتری ها (d)، مطابق رابطه (۲۸) محاسبه شده و در شکل (۱۶) رسم شده است.



شکل ۱۶- بازده خنک کاری بر حسب d و تعداد سلول های مجموعه

با توجه به شکل (۱۶) با افزایش تعداد سلول ها در مجموعه، بازده خنک کاری سامانه ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. در شرایطی که فاصله شعاعی بین سلول ها برابر $19/8\text{mm}$ ($d=2/2R_{batt}$) است، بیشترین بازده به ازای تعداد ۳ سلول در مجموعه رخ می دهد و به ازای ۴ مقدار دیگر d ، بیشینه مقدار بازده خنک کاری و حالت بهینه به ازای ۴ سلول موجود در مجموعه محاسبه شده است. افزایش بیش از حد تعداد سلول های پشت سر هم در یک مجموعه باتری باعث طولانی تر شدن مسیر عبور هوا و کاهش بازده خنک کاری می گردد. در مقاله پنگ و همکاران [۲۱] نیز نشان داده شده است که با افزایش تعداد سلول ها در یک مسیر مستقیم، دمای هوای خروجی شدیداً افزایش یافته و در نتیجه، باتری های نزدیک بخش خروجی به خوبی خنک نمی گردد.

۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، مدیریت حرارتی با روش هواخنک در یک بسته باتری لیتیومی در ثبت اختراع شرکت تسلا با استفاده از تغییر در چیدمان سلول ها بهینه سازی شد. مدل سازی مجموعه باتری ها شامل رفتار ترمو-الکتروشیمیایی سلول ها بوده و عملکرد آن ها تحت شرایط کاری در مصارف معمول حمل و نقل شبیه سازی گردید.

بر طبق نتایج بدست آمده، با کاهش فاصله بین باتری ها در یک مسیر سری از چیدمان سلول ها، ضریب انتقال حرارت جابه جایی افزایش یافته و منجر به کاهش دما می شود اما این کاهش فاصله باعث کاهش راندمان خنک کاری و افزایش اختلاف دمای بین سلول ها می گردد و می تواند منجر به محدودیت در ابعاد ماژول باتری شود. از سوی دیگر، افزایش فاصله سلول ها بیش از یک حد معین، تنها باعث ازدیاد حجم مجموعه می گردد و تاثیر زیادی بر افزایش راندمان خنک کاری ندارد.

افزایش تعداد سلول های مجموعه نیز ابتدا باعث افزایش راندمان خنک کاری می گردد اما بعد از یک حد معین، منجر به کاهش این راندمان می شود. روش سیستماتیک و نتایج جامع این مقاله، شامل استفاده از راندمان خنک کاری با در نظر گرفتن شرایط کار یک بسته باتری می تواند علاوه بر کاربردهای مستقیم، در مطالعات مشابه مدیریت حرارتی باتری ها نیز بسیار مفید باشد.

مراجع

[1] Al-Zareer, M., Dincer, I., and Rosen, M.A., "Novel Thermal Management System using Boiling Cooling for High-powered Lithium-ion Battery Packs for Hybrid Electric Vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 363, pp. 291-303, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.07.067>, (2017).

[2] Chung, Y., and Kim, M.S., "Thermal Analysis and Pack Level Design of Battery Thermal Management System with Liquid Cooling for Electric Vehicles", *Energy Conversion and Management*, Vol. 196, pp. 105-116, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.083>, (2019).

[3] Ping, P., Peng, R., Kong, D., Chen, G., and Wen, J., "Investigation on Thermal Management Performance of PCM-fin Structure for Li-ion Battery Module in High-temperature

Environment”, Energy Conversion and Management, Vol. 176, pp. 131-146, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.025>, (2018).

[4] Zhang, H., Wu, X., Wu, Q., and Xu, S., “Experimental Investigation of Thermal Performance of Large-sized Battery Module using Hybrid PCM and Bottom Liquid Cooling Configuration”, Applied Thermal Engineering, Vol. 159, pp. 1-11, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113968>, (2019).

[5] Qanbarlo, M., Masih-Tehrani, M., and Molaeimanesh, G.R., “Introduction to Thermal Management Systems of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles”, Mechanical Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 35-41, DOI: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.16059719.1398.28.1.4.0>, (2019). (in Persian)

[6] Al-Hallaj, S., Kizilel, R., Lateef, A., Sabbah, R., Farid, M., and Selman, J.R., “Passive Thermal Management using Phase Change Material (PCM) for EV and HEV Li-ion Batteries”, 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 7, Chicago, IL, USA, pp. 376-380, DOI: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2005.1554585>, (2005).

[7] Sabbah, R., Kizilel, R., Selman, J.R., and Al-Hallaj, S., “Active (Air-cooled) VS. Passive (Phase Change Material) Thermal Management of High Power Lithium-ion Packs: Limitation of Temperature Rise and Uniformity of Temperature Distribution”, Journal of Power Sources, Vol. 182, No. 2, pp. 630-638, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.082>, (2008).

[8] Fathabadi, H., “A Novel Design Including Cooling Media for Lithium-ion Batteries Pack Used in Hybrid and Electric Vehicles”, Journal of Power Sources, Vol. 245, pp. 495-500, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.160>, (2014).

[9] Yang, N., Zhang, X., Li, G., and Hua, D., “Assessment of the Forced Air-cooling Performance for Cylindrical Lithium-ion Battery Packs: A Comparative Analysis between Aligned and Staggered Cell Arrangements”, Applied Thermal Engineering, Vol. 80, pp. 55-65, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.049>, (2015).

[10] Kong, D., Peng, R., Ping, P., Du, J., Chen, G., and Wen, J., “A Novel Battery Thermal Management System Coupling with PCM and Optimized Controllable Liquid Cooling for Different Ambient Temperatures”, Energy Conversion and Management, Vol. 204, pp. 1-17, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112280>, (2020).

[11] Safdari, M., Ahmadi, R., and Sadeghzadeh, S., “Numerical Investigation on PCM Encapsulation Shape Used in the Passive-active Battery Thermal Management”, Energy, Vol. 193, pp. 1-23, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116840>, (2020).

[12] Matthews, K.C., (Reno, NV, US), “Aggregated Battery System”, Tesla, Inc. (Palo Alto, CA, US), US2019/0312251A1, October 10, United States, DOI: <https://www.freepatentsonline.com/y2019/0312251.html>, (2019).

[13] Al-Zareer, M., Dincer, I., and Rosen, M.A., “Heat and Mass Transfer Modeling and Assessment of a New Battery Cooling System”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 126, pp. 765-778, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.157>, (2018).

- [14] Doyle, M., and Newman, J., "The Use of Mathematical Modeling in the Design of Lithium/Polymer Battery Systems", *Electrochimica Acta*, Vol. 40, No. 13-14, pp. 2191-2196, DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(95\)00162-8](https://doi.org/10.1016/0013-4686(95)00162-8), (1995).
- [15] Doyle, M., Newman, J., Gozdz, A.S., Schmutz, C.N., and Tarascon, J.M., "Comparison of Modeling Predictions with Experimental Data from Plastic Lithium Ion Cells", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 143, No. 6, pp. 1890-1903, DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1836921>, (1996).
- [16] Chen, F., Huang, R., Wang, C., Yu, X., Liu, H., Wu, Q., Qian, K., and Bhagat, R., "Air and PCM Cooling for Battery Thermal Management Considering Battery Cycle Life", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 173, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115154>, (2020).
- [17] Saw, L.H., Ye, Y., and Tay, A.A.O., "Electrochemical-thermal Analysis of 18650 Lithium Iron Phosphate Cell", *Energy Conversion and Management*, Vol. 75, pp. 162-174, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.040>, (2013).
- [18] Nie, P., Zhang, S.W., Ran, A., Yang, C., Chen, S., Li, Z., Zhang, X., Deng, W., Liu, T., Kang, F., and Wei, G., "Full-cycle Electrochemical-thermal Coupling Analysis for Commercial Lithium-ion Batteries", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 184, pp. 1-10, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116258>, (2021).
- [19] Sacchetti, L., and Santarelli, M., "Electrochemical-thermal Analysis of High Capacity Li-ion Pouch Cell for Automotive Applications", Master Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Polytechnic University of Turin, Turin, Italy, DOI: <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/15672>, (2020).
- [20] Cai, L., and White, R.E., "Mathematical Modeling of a Lithium Ion Battery with Thermal Effects in COMSOL Inc. Multiphysics (MP) Software", *Journal of Power Sources*, Vol. 196, No. 14, pp. 5985-5989, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.03.017>, (2011).
- [21] Peng, X., Cui, X., Liao, X., and Garg, A., "A Thermal Investigation and Optimization of an Air-cooled Lithium-ion Battery Pack", *Energies*, Vol. 13, No. 11, pp. 1-20, DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112956>, (2020).
- [22] Akinlabi, A.A.H., and Solyali, D., "Configuration, Design, and Optimization of Air-cooled Battery Thermal Management System for Electric Vehicles: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 125, pp. 1-14, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109815>, (2020).
- [23] Muddasar, M., "Optimization, Modelling and Analysis of Air-cooled Battery Thermal Management System for Electric Vehicles", *Preprints 2022*, 2022010051, DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202201.0051.v1>, (2022).
- [24] Ji, C., Wang, B., Wang, S., Pan, S., Wang, D., Qi, P., and Zhang, K., "Optimization on Uniformity of Lithium-ion Cylindrical Battery Module by Different Arrangement Strategy", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 157, pp. 1-12, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.093>, (2019).

[25] Karniadakis, G., and Sherwin, S., “*Spectral/HP Element Methods for Computational Fluid Dynamics*”, 2nd Edition, Oxford University Press, New York, USA, DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198528692.001.0001>, (2005).

[26] Panchal, S., Khasow, R., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., and Fowler, M., “Numerical Modeling and Experimental Investigation of a Prismatic Battery Subjected to Water Cooling”, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 71, No. 6, pp. 626-637, DOI: <https://doi.org/10.1080/10407782.2016.1277938>, (2017).

فهرست نمادهای انگلیسی

a	مساحت سطح ویژه
c	غلظت یون لیتیوم
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه
c_t	حداکثر غلظت نمک
d	فاصله شعاعی بین مراکز سلول ها
D	ضریب نفوذ یون لیتیوم
E	انرژی درونی سلول
E_{eq}	پتانسیل تعادلی الکتروود
f_{\pm}	ضریب فعالیت نمک الکتروولیت
F	ثابت فارادی
h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی
H_{batt}	ارتفاع باتری
i	چگالی جریان یونی
i_0	چگالی جریان تبادلی
j_n	شار یونی روی سطح ذرات فعال
k	ضریب هدایت حرارتی
k_{re}	ثابت سرعت واکنش
L	طول
p	فشار
P_w	توان
q	شار حرارتی
Q	شدت تولید حرارت
Q_{cell}	شدت تولید حرارت در بخش اصلی سلول

Q_{remo}	کل گرمای دفع شده
Q_v	دبی حجمی هوا
r	مختصه شعاعی در ذرات فعال جامد
R	ثابت جهانی گازها
R_{batt}	شعاع باتری
R_{mand}	شعاع میله نایلونی
R_v	حجم نسبی
t	زمان
t_+^0	عدد انتقال
T	دما
u	سرعت هوا
U	متوسط سرعت هوا
V	حجم مجموعه
V_0	حجم مجموعه به ازای فاصله شعاعی صفر بین مراکز سلول ها

نمادهای یونانی

ε	کسر حجمی
η	بازده سامانه خنک کاری
η_{op}	پتانسیل اضافی (Over potential)
ρ	چگالی
σ	رسانایی الکتریکی
ϕ	پتانسیل الکتریکی

زیرنویس ها

1	فاز جامد
2	فاز محلول (مایع)
air	هوا
gen	کل مقدار تولیدی
i	لایه های باتری
in	ورودی
irev	برگشت ناپذیر
mix	اختلاط
r	جهت شعاعی

مرجع	ref
برگشت پذیر	rev
سطح	s
حرارتی	therm
فاز β	β

Optimization of 18650 Cells Arrangement in a Commercial Lithium-ion Battery Pack with an Air-cooling Thermal Management System

Ali Reza Shamekhi

M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology
alirezashamekhi76@gmail.com

*Corresponding author: **Masoud Aryanpour**

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology
aryanpour@sharif.edu

Abstract

In this paper, we optimize the arrangement of cells in a Lithium-ion battery pack using an air-cooling thermal management system under operating conditions in transportation applications. The thermal and electrochemical behavior of battery cells is modeled using the quasi-two-dimensional approach by Newman's method. The effects of inter-cellular distance on the maximum temperature, and on the temperature distribution in the pack as the target variables are thoroughly investigated. A suitable range for the above distances are then determined in order to reduce the overall cooling power and the expected thermal performance of the pack. According to this study, by reducing the distance between the batteries, the temperature of the cells decreases. However, this reduction in the distance also reduces the battery pack's temperature uniformity and cooling efficiency. The results of the temperature distribution are investigated, analyzed, and discussed. Finally, by examining the effect of the number of pack cells on the cooling efficiency, it is shown that increasing the number of cells initially increases the cooling efficiency; however, after a certain limit, it leads to a decrease in the cooling efficiency.

Keywords: Lithium-ion batteries, Battery Management System, Air-cooling, Optimization, Newman's model