



مطالعه تجربی ترکیب روش‌های خنک‌سازی هوا و ترموالکتریک برای افزایش زمان کارکرد و کاهش

دمای باتری لیتیوم یونی

احمد نجفی^۱، امیرمحمد جدیدی^{۲*}، سامان رشیدی^۳^۱ کارشناس ارشد، مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران^{۲*} استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران^۳ استادیار، دانشکده انرژی، پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

چکیده

باتری‌های شارژی نقش جدانشدنی در زندگی امروزی دارند. نگهداری و افزایش طول عمر آنها از چالش‌های بشر بوده‌است. در این مقاله با ترکیب روش خنک‌سازی با هوا و ماژول‌های ترموالکتریک، سعی در انتقال بهتر حرارت باتری برای کاهش دمای سطح آن شده‌است. تاثیر دما و نرخ تخلیه‌های متفاوت در این مقاله بررسی شده‌است. مجموعه باتری ساخته شده از جنس بلوک آلومینیومی به ابعاد ۳۰*۱۰*۶ سانتیمتر بوده‌است. نحوه‌ی قرارگیری این سلول‌ها به شکل ۴ ردیف ۱۲ تایی بوده‌است. با توجه به ظرفیت ۲۲۰۰ میلی آمپر ساعتی و ولتاژ ۳/۷ ولتی، حداکثر توان مجموعه ۳۹۰ وات ساعت بیان شده‌است. در حالت استفاده از فن و ماژول ترموالکتریک مدت زمان کارکرد مجموعه ۱۷/۱ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از فن و ماژول ترموالکتریک افزایش داشته است و از ۱۹۰۰ ثانیه به ۲۳۰۰ ثانیه رسیده‌است. دمای سطح مجموعه در حالت استفاده همزمان از فن و ماژول ۲ درجه کاهش پیدا کرده‌است. میزان انتقال حرارت بوسیله سیستم خنک‌کاری فن و ماژول ترموالکتریک ۱۵/۲ درصد نسبت به حالت بدون فن و ماژول بهبود پیدا کرده‌است. با مقایسه نتایج آزمایشات، مناسب بودن این روش خنک‌سازی در جهت انتقال حرارت بهتر مجموعه تایید شده‌است.

کلمات کلیدی: باتری لیتیوم یونی؛ عدد ناسلت؛ جریان هوای اجباری؛ خنک‌سازی؛ ماژول ترموالکتریک.

Experimental study of combination of air and thermoelectric cooling methods to increase the operating time and reduce the temperature of the lithium ion battery

Ahmad Najafi¹, Amir Mohammad Jadidi^{2,*}, Saman Rashidi³¹ MSc. Student, Energy System. Eng, Semnan Univ, Semnan, Iran^{2,*} Assist. Prof., Faculty of Mechanical Engineering, Semnan Univ, Semnan, Iran³ Assist. Prof., Faculty of Energy, Compus of New Sciences and Technologies, Semnan Univ, Semnan, Iran

Abstract

Rechargeable batteries have an inseparable role in today's life, maintaining and increasing their lifespan has been one of the challenges. In this article, by combining air cooling and thermoelectric modules, we have tried to transfer battery heat better to reduce its surface temperature. The effect of temperature and different discharge rates is investigated in this article. The battery pack was made of aluminum block with dimensions of 30x10x6 cm. The arrangement of these cells was in the form of 4 rows in 12 columns. Considering the capacity of 2200 mAh and the voltage of 3.7 volts, the maximum power of the set is 390 Wh. By using simultaneously the fan and the thermoelectric, the operating time has increased by 17.1% compared to the mode without the fan and the thermoelectric, and has reached 1900 seconds to 2300 seconds. The surface temperature of the set has decreased by 2 degrees using the fan and the module. The heat transfers by fan cooling system and thermoelectric has improved by 15.2% compared to the case without fan and module. By comparing the results obtained from the tests, the suitability of this cooling method for better heat transfer of the set has been confirmed.

Keywords: Li-ion battery, Nusselt number; Forced air convection; Cooling; Thermo Electric.

۱- مقدمه

در دنیای امروز باتری‌ها نقش اساسی و مهمی در زندگی ما ایفا می‌کنند و از طرفی سالم نگه داشتن باتری‌ها برای افزایش طول عمر آنها، وجود سیستم‌های مدیریت حرارتی را ضروری کرده است. بخش بزرگی از زندگی روزانه بشر از حمل و نقل گرفته تا وسایل خانگی و رفاهی وابسته به این باتری‌ها و سالم نگه داشتن آنها است. در این مقاله به بررسی روش خنک‌کاری با هوا و ماژول‌های ترموالکتریک برای باتری لیتیوم یونی ساخته شده، در جهت بهبود انتقال حرارت آن و در نتیجه خنک‌سازی بهتر آن پرداخته شده است.

گرم شدن کره زمین یکی از بزرگترین تهدیدهایی است که دنیای مدرن با آن مواجه است و بخش حمل و نقل ۲۴,۳ درصد از کل انتشار گاز کربن دی اکسید جهان را تشکیل می‌دهد [۱] که وسایل نقلیه موتوری سهم بزرگی از آن را تشکیل می‌دهند؛ بنابراین، استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی پتانسیل زیادی برای کاهش شدید انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد [۲]. باتری‌ها یکی از اجزای ضروری خودروهای برقی محسوب می‌شوند. باتری‌های لیتیوم یونی به دلیل چگالی انرژی بالا، طول عمر طولانی و سازگاری با محیط زیست در خودروهای الکتریکی رایج هستند [۳]. با این حال، باتری‌های لیتیوم یونی هنگام شارژ و تخلیه گرما تولید می‌کنند.

با توجه به تغییرات دمای محیط در مناطق مختلف جهان، باتری‌های لیتیوم یونی معمولاً بین ۲۰- تا ۶۰ درجه سانتیگراد کار می‌کنند [۴]. از سوی دیگر، دمای عملیاتی بهینه برای آنها بین ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتیگراد بوده است [۵]. باتری‌های لیتیوم یونی به صورت سری و موازی به هم متصل می‌شوند تا یک مجموعه را تشکیل دهند تا توان مورد نیاز برای یک وسایل نقلیه الکتریکی را برآورده سازند؛ بنابراین، یکنواختی دمای سلول در بسته باتری باید تا حد امکان حفظ شود و نباید از ۵ درجه سانتیگراد تجاوز کند [۶].

تا به امروز، استراتژی‌های مختلفی برای مدیریت حرارتی مجموعه باتری برای اطمینان از حفظ دمای عملیاتی بهینه در زمان کار مجموعه، مانند سرمایش/گرمایش هوا، خنک‌کننده/گرمایش مایع، مواد تغییر فازدهنده، لوله‌های حرارتی، ماژول‌های ترموالکتریک و ترکیبی از این موارد اجرا شده است [۷]. موضوع اصلی این مقاله نیز دو روش مدیریت حرارتی به کمک هوا و ماژول‌های ترموالکتریک بوده است.

خنک‌کننده مایع دارای ضریب انتقال حرارت بالایی است که آن را به یک محیط خنک‌کننده کارآمد و فشرده تبدیل می‌کند. با این حال، یک سیستم خنک‌کننده مایع معمولی دارای ساختار عظیم و پیچیده‌ای است که نیاز به هزینه‌های سرمایه‌گذاری و مصرف برق بالایی دارد [۸]. در مقابل، خنک‌کننده هوا و مواد تعبیر فاز دهنده هر دو ظرفیت گرمایی ویژه و رسانایی حرارتی کمتری نسبت به سیستم مایع دارند که در نتیجه فرآیند انتقال حرارت ناکارآمد است. اصلی‌ترین عیب خنک‌کاری با لوله حرارتی مقاومت حرارتی پایین آن بوده است که آن را در همه شرایط مناسب نمی‌سازد. در این روش نیز خطر نشستی مایع تهدید بزرگی برای سیستم بوده است [۹].

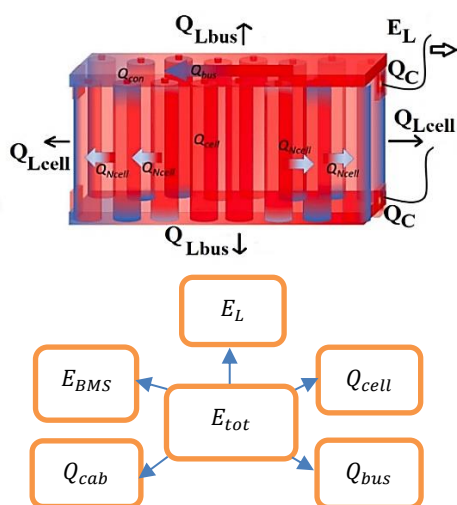
از سوی دیگر، سیستم‌های خنک‌کننده هوا عمدتاً در وسایل نقلیه الکتریکی سبک با مجموعه‌های باتری کوچک استفاده می‌شوند [۱۰]. با توجه به ساختار و پیکربندی ساده، هزینه اولیه و نگهداری پایین، یکپارچگی ساده و بدون خطر نشستی، در مقایسه با سایر روش‌های خنک‌کاری از محبوبیت بیشتری برخوردار بوده است [۱۱]. علاوه بر این، سیستم‌های خنک‌کننده هوا می‌توانند به طور قابل توجهی هزینه تولید باتری را کاهش دهند، بنابراین به طور مستقیم بر روی قیمت وسایل نقلیه برقی تأثیرگذارند [۱۲]، [۱۳]. با این حال، علیرغم مزایای آن، ضریب انتقال حرارت همرفتی ضعیف هوا اغلب نمی‌تواند نیاز اتلاف گرما را برای خودروهای الکتریکی سنگین برآورده کند. همچنین، با مشکل عدم یکنواختی قابل توجه دما در مجموعه باتری همراه است [۱۴].

سیستم‌های مبتنی بر المان‌های ترموالکتریک، که از اثر پلنتیه برای انتقال حرارت استفاده می‌کنند، کنترل دقیق دما را فراهم می‌کنند، اگرچه اغلب با هزینه‌های اجرای بالاتر همراه است. دو نوع کلی ماژول ترموالکتریک وجود دارد که شامل، تولیدکننده و خنک‌کننده بوده است [۱۵]. یک مجموعه ترموالکتریک از یک ژنراتور ترموالکتریک و خنک‌کننده ترموالکتریک تشکیل شده است. ژنراتور ترموالکتریک با دریافت و تبدیل گرمای مجموعه باتری به الکتریسیته از طریق اثر سبیک نسبت به خنک‌کاری دمای مجموعه باتری عمل می‌کند. نمای این در حالی است که خنک‌کننده ترموالکتریک، الکتریسیته را از طریق اثر پلنتیه به گرما تبدیل می‌کند تا بسته باتری در صورت نیاز گرم شود [۱۶].

شدن مجموعه باتری اختصاص داده تا اطلاعات ثبت شده در یک زمان یکسان باشند و نتایج بدست آمده از آنها قابل قبول باشند.

۲- روابط حاکم

در شکل ۱ کل انرژی انباشته شده در مجموعه باتری نشان داده شده است. در ادامه انرژی‌های خروجی از مجموعه باتری و انرژی درونی هر سلول نشان داده شده است.



شکل ۱- کل انرژی انباشته شده در مجموعه باتری

مهمترین هدف باتری‌های قابل شارژ، ذخیره انرژی و تغذیه بارهای الکتریکی بوده است که این وظیفه در قالب دو فرآیند شارژ و تخلیه بیان شده است [۲۱]. برای تعیین تعادل انرژی، ابتدا باید میزان انرژی انباشته شده در بسته باتری تعیین شود. فرمول مقدار انرژی کل E_{tot} در یک بسته باتری با تعداد b سلول در معادله ۱ نشان داده شده است [۲۲]:

$$E_{tot} = b \times V_n \times C \quad (1)$$

که در آن b تعداد سلول‌های یک بسته باتری، V_n ولتاژ نامی سلول، C ظرفیت نامی سلول بوده است. معادله ۲ مربوط به گرمای تولید شده در سلول بوده است، که در ادامه بیان شده است [۲۳]:

ژنراتورهای ترموالکتریک فرصتی برای تولید انرژی الکتریکی از انرژی گرمایی بدون نیاز به قطعات متحرک مانند توربین‌ها را فراهم می‌کنند که هزینه‌های ناشی از تعمیر و نگهداری و جایگزینی توربین‌ها را حذف می‌کند [۱۷]. ژنراتورهای ترموالکتریک از نظر زیست محیطی مطلوب هستند؛ زیرا بدون آلودگی صوتی کار می‌کنند. از معایب این روش نیز می‌توان به راندمان تبدیل انرژی پایین ژنراتورهای ترموالکتریکی اشاره داشت و علاوه بر آن، مازول‌ها به منبع حرارت نسبتاً ثابتی نیاز دارند [۱۸].

از جمله چالش‌های این کار می‌توان به طراحی و ساخت مجموعه باتری اشاره داشت که برای اولین بار به این شکل و از یک بلوک آلومینیومی استفاده شده است. نوآوری این مقاله در ترکیب دو روش خنک‌سازی با هوا و مازول‌های ترموالکتریک به همراه هیت‌سینک و نیز تاثیر دماهای محیطی مختلف با نرخ‌های تخلیه متفاوت بر روی عملکرد باتری و دمای سطح آن بوده است. ترکیب دو روش در مقالات پژوهشی گذشته نسبت به روش‌های دیگر کمتر به آن پرداخته شده است.

نقض پژوهش‌های گذشته، عدم توجه به تاثیر دماهای مختلف محیطی روی عملکرد تخلیه باتری و دمای سطح آن بوده است. عدم انجام آزمایشات در دماهای محیطی مختلف و انجام آزمایشات با یک یا دو نرخ تخلیه نیز از جمله نقض‌های کارهای پژوهشی گذشته بوده است.

روش انجام آزمایشات به این صورت بوده است که برای هر یک از آزمایشات با توجه به روش خنک‌کاری ابتدا موارد مورد نیاز برای خنک‌کاری آماده‌سازی شده است. این موارد شامل استفاده از فن یا مازول‌های ترموالکتریک بوده است. پس از انجام این مرحله، باتری‌های مورد نیاز نمایشگر ولتاژ و آمپر را در محل مورد نظر آن قرار داده شده و نمایشگر را روشن آماده شده است. بعد از رسیدن به ولتاژ پایان کار که برابر با $12/6$ ولت بوده است، ابتدا دور موتور فن موتور برانشلس را با کمک سنسور تعیین سرعت آن به صفر رسانده و برنامه ثبت دما را همزمان با خاموش کردن مجموعه متوقف ساخته‌ایم. اطلاعات مربوط به دما ثبت شده است.

برای آزمایش بعدی نیز همین موارد رعایت شده است تا نتایج بدست آمده تحت شرایط آزمایشی یکسان ثبت شده باشند. بعد از به پایان رساندن هر آزمایش زمانی را به خنک

لازم بذکر است که در معادله فوق، برای محاسبه عدد ناسلت با توجه به رژیم جریان و هندسه از روابط مرجع [۲۹] استفاده شده‌است که به منظور اختصار از آوردن آنها اجتناب شده‌است. علت بیان این معادلات در کار آزمایشگاهی این بوده است که در ادامه و در روند تعیین بعضی پارامترها از جمله عدد ناسلت و نمودارهای مربوط به آن از این معادلات استفاده شده است که لزوم اشاره به آن را ضروری کرده است.

۳- نحوه ساخت و شیوه آزمایش

معمولا مجموعه‌های باتری از پیش ساخته شده موجود در بازار، از جنس پلاستیک بوده‌است، اما برای ساخت مجموعه باتری مورد نیاز این مقاله، از یک بلوک آلومینیومی با ابعاد $30 \times 6 \text{ cm}$ استفاده شده‌است که برای اولین بار به این شکل طراحی و ساخته شده‌است. بر روی آن ۴۸ محل قرارگیری سلول باتری به کمک تراشکاری CNC تعبیه شده‌است. عمق محل قرارگیری باتری‌ها ۲.۶ سانتیمتر است که با توجه به ابعاد فیزیکی سلول‌ها انتخاب شده‌است. دلیل انتخاب آلومینیوم بجای پلاستیک انتقال حرارت بهتر آن بوده است، چراکه در این مطالعه انتقال حرارت بخش اصلی کار بوده‌است و پلاستیک توان انتقال حرارت مورد نیاز برای بررسی در این مطالعه را نداشته است. دلیل انتخاب مجموعه باتری به شکل مستطیل نیز جایگیری تعداد بیشتر سلول باتری درون آن نسبت به بقیه اشکال، استحکام آن در برابر ضربه و افتادن، عدم نیاز به غالب-گیری و هزینه‌های بالای آن و در اختیار قرار دادن سطح بیشتر برای استفاده از روش‌های مدیریت حرارتی مختلف در آینده بر روی مجموعه بوده است.

شکل ۲، بلوک آلومینیومی را قبل و بعد از تراشکاری و تعیین محل قرارگیری سلول‌ها بر روی آن نشان داده است. بلوک مجموعه باتری بصورت مکعب مستطیل است. این بلوک دارای شش وجه بوده است که وجه پایینی به سطح چسبیده و سطح بالایی نیز محل ورود سلول‌های باتری از بالای بلوک باتری بوده است.

لذا بلوک باتری ۲ سطح بزرگ و ۲ سطح کوچک دارد و با توجه به ارتفاع سلول‌ها ارتفاع مجموعه باتری تعیین شده است تا سلول‌ها بصورت دقیق هم اندازه با ارتفاع مجموعه باتری باشند.

$$Q_{cell} = R_{cw} i_{cell}^2 - i_{cell} T \frac{\Delta S}{n_e F} \quad (2)$$

در معادله ۲، R_{cw} برابر با مقاومت داخلی سلول‌های باتری، i_{cell} برابر با جریان یک سلول، n_e تعداد الکترون‌های شرکت‌کننده در واکنش، F ثابت فارادی و ΔS تغییرات آنتروپی را بیان کرده‌اند [۲۴]. در معادله ۲، ΔS تغییرات آنتروپی است که از طریق معادله ۳ بیان شده‌است [۲۵].

$$\Delta S = nF \frac{\partial E_0}{\partial t} \quad (3)$$

که در آن، E_0 ولتاژ مدار بسته، t زمان، F ثابت فارادی و n تعداد الکترون‌های شرکت‌کننده در واکنش است. نرخ گرمای انباشته شده در مجموعه باتری با تعداد b سلول را می‌توان از طریق معادله ۴ محاسبه کرد [۲۶]:

$$\dot{Q} = b\dot{Q}_{cell} + \dot{Q}_{bus} + \dot{Q}_{cab} - (b\dot{Q}_{Lcell} + \dot{Q}_{Lbus}) \quad (4)$$

گرمای تولید شده در مجموعه باتری را می‌توان از معادله (۵) بیان کرد [۲۷] [۲۸]:

$$\dot{Q}_{GEN} = \dot{Q}_{cell} + \dot{Q}_{bus} + \dot{Q}_{cab} \quad (5)$$

در معادله فوق \dot{Q}_{cab} نرخ گرمای تولید شده در کابل‌ها بوده است که مقدار آن به طول کابل و ضخامت آن بستگی دارد که در مجموعه مورد استفاده طول کابل کمتر از ۱ متر بوده و ضخامت آن نسبتا بالا بوده‌است که در نتیجه گرمای تولیدی ناچیز بوده که در محاسبات از آن صرف نظر شده‌است. در معادله ۵، عبارت \dot{Q}_{bus} مربوط به گرمای انتقال یافته از طریق شین‌ها به محیط است که در مجموعه باتری طراحی شده از شین استفاده نشده‌است که در نتیجه مقدار آن برابر با صفر بوده است.

در معادله ۶ نحوه محاسبه عدد ناسلت بیان شده‌است که در آن h ضریب انتقال حرارت همرفتی، L طول مشخصه و K رسانایی گرمایی است [۲۹]:

$$Nu = \frac{hL}{K} \quad (6)$$

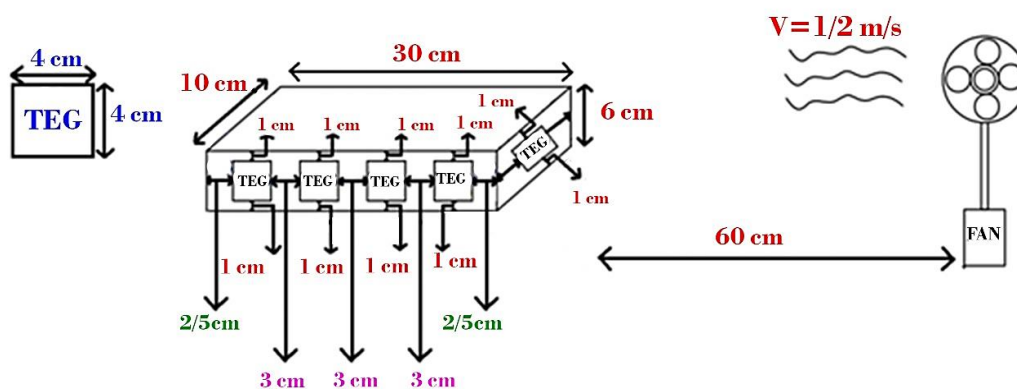
از فن و شکل قرارگیری ماژول‌های ترموالکتریک بر روی باتری بصورت سانتیمتر نشان داده شده‌است. حسگرهای اندازه‌گیری دما در راستای تقارن سطح در نظر گرفته شده‌است تا دمای متوسط سطح هم بصورت افقی و هم بصورت عمودی اندازه‌گیری شود؛ زیرا برای جریان آزاد دمای سطح عمودی مورد نیاز است و در جریان آشفته دمای سطح افقی مورد نیاز است. از این داده‌های دمایی برای اندازه‌گیری عدد ناسلت و مقدار گرمای انتقال یافته نیز استفاده شده است.

برای حفظ ایمنی در زمان آزمایش از اتصال ماژول‌ها در قسمت بالایی بلوک خودداری شده‌است. در سطح بزرگ بلوک باتری ۴ ماژول قرار داده شده‌است که فاصله آنها از لبه بلوک ۲/۵ سانتی‌متر و از یکدیگر ۳ سانتی‌متر و از ارتفاع بلوک ۱ سانتی‌متر بوده‌است. در سطح کوچک بلوک باتری ماژول ترموالکتریک ۳ سانتی‌متر از لبه بلوک و از ارتفاع بلوک ۱ سانتی‌متر فاصله دارد ضخامت دیواره‌ها بین نزدیک‌ترین سلول باتری با ماژول ترموالکتریک ۲ میلی‌متر بوده‌است. در شکل ۳، محل قرارگیری ماژول‌های ترموالکتریک بر روی مجموعه باتری نشان داده شده‌است. فاصله مجموعه



شکل ۲- بلوک آلومینیومی قبل و بعد از تراشکاری CNC و محل قرارگیری سلول‌ها

Battery Pack



شکل ۳- شماتیک مجموعه و محل قرارگیری فن و ماژول‌های ترموالکتریک بر روی مجموعه باتری

اند که آنها را گزینه‌ای مناسب برای انتخاب در راستای خنک سازی مجموعه باتری و بهبود انتقال حرارت آن کرده‌است.

از طرف دیگر این نقاط را با کمک دماسنج لیزری اندازه‌گیری کرده و دماهای نزدیک به هم و بیشتر از کناره‌ها را ثبت کرده

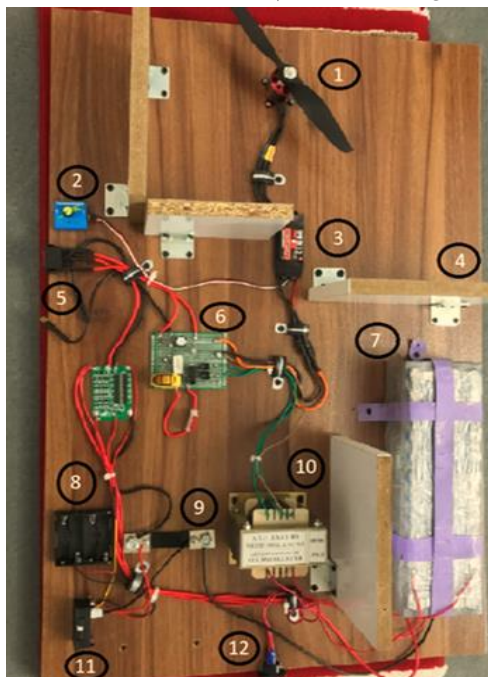
شکل ۵ مجموعه نصب شده به همراه بردها و اجزای کلی سیستم بر روی تخته را نشان داده‌است. برای درک بهتر هر کدام از اجزای مجموعه، می‌توان به جدول ۱ مراجعه نمود که راهنمای اجزای مجموعه بوده‌است.

برای مقایسه میزان انتقال حرارت در سناریوهای مختلف از جمله بدون فن با ماژول ترموالکتریک، با فن بدون ماژول ترموالکتریک و با فن و ماژول ترموالکتریک عدد ناسلت یک پارامتر بسیار مهم است.

در جریان آرام که بدون استفاده از فن و با کمک همرفت طبیعی هوا اقدام به خنک‌کاری مجموعه باتری شده‌است با کمک عدد رایلی و پرانتل نسبت به تعیین عدد ناسلت اقدام شده‌است.

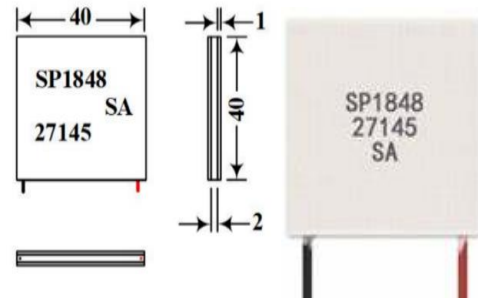
در جریان آشفته که در زمان استفاده از فن برای خنک‌کاری بر مجموعه حاکم بوده است، همرفت اجباری هوا برای خنک‌کاری استفاده شده‌است.

در رژیم جریان آشفته با استفاده از عدد رینولدز و پرانتل نسبت به تعیین عدد ناسلت اقدام شده‌است.



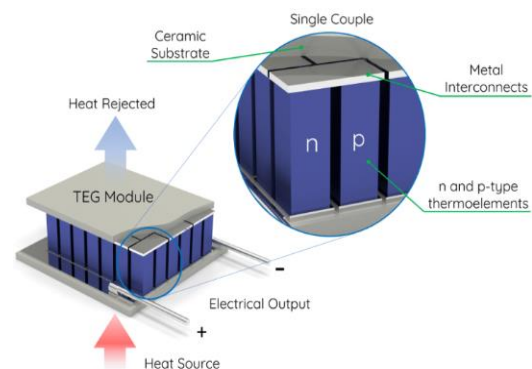
شکل ۵- مجموعه نصب شده بر روی تخته

نمای بیرونی و ابعاد فیزیکی ماژول‌های ترموالکتریک استفاده شده در این مطالعه در شکل ۴-الف- نشان داده شده است



شکل ۴-الف- نمای بیرونی و ابعاد فیزیکی ماژول TE

ابعاد این ماژول ترموالکتریک ۴*۴ سانتی‌متر بوده است و لایه بیرونی آن از جنس سرامیک بوده‌است. نمای داخلی ماژول ترموالکتریک در شکل ۴-ب- نشان داده شده‌است بلوک اصلی سازنده یک ژنراتور ترموالکتریک یک ترموکوپل است. ترموکوپل از یک نیمه هادی نوع p و یک نیمه هادی نوع n تشکیل شده‌است. نیمه هادی‌ها توسط یک نوار فلزی به هم متصل می‌شوند که آنها را به صورت الکتریکی به صورت سری و از نظر گرمایی به صورت موازی به هم متصل می‌نماید. اساس کار ماژول ترموالکتریک تولید کننده بر اساس اثر سیبک بوده است و اساس کار ماژول خنک‌کننده بر اساس اثر پلتیر بوده است.



شکل ۴-ب- نمای داخلی ماژول TE

خطای اندازه‌گیری دمایی ثبت شده در آزمایشات برابر با ۰/۰۳ درجه سانتیگراد محاسبه شده است. میزان سرعت باد در سناریوی با فن و مازول ترموالکتریک به کمک دستگاه مولتی فانکشن محیطی LUTRON مدل 8000 با دقت اندازه‌گیری 0/02% اندازه‌گیری شده است. برای اطمینان از صحت اطلاعات ثبت شده با دماسنج تماسی از یک دماسنج لیزری ساخت شرکت TESTO از سری مدل T1 بوده است که قادر به ثبت دما با دقت 0.1 درجه سانتیگراد نیز استفاده شده است. افت ولتاژ و آمپر به کمک نمایشگر افت ولتاژ و آمپر موجود در مجموعه ثبت شده است. عدم قطعیت ایجاد شده در داده‌های ثبت شده با کمک رابطه کلین و مک کلینگتون برای پارامترهای مورد بحث این مقاله در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲- عدم قطعیت پارامترهای مورد بحث

پارامتر	عدم قطعیت	پارامتر	عدم قطعیت
عدد رینولدز	±0/09%	گرمای استخراج شده	±2/80%
عدد ناسلت	±1/12%	عدد ناسلت جابجایی اجباری	±4/71%
مقاومت الکتریکی	±1/40%	دما	±0/03%

مشخصات سلول باتری مجموعه باتری ساخته شده، در جدول ۳ بیان شده است.

جدول ۳- مشخصات سلول باتری مجموعه

شرکت سازنده	سانی بت
نوع باتری	لیتیوم-یونی
مدل	۱۸۶۵۰
ظرفیت (mAh)	۲۲۰۰
ولتاژ (V)	۳/۷
عرض سلول (mm)	۱۸
طول سلول (mm)	۶۵

جدول ۱- راهنمای مجموعه

شماره اجزا	نام اجزا	شماره اجزا	نام اجزا
۱	موتور براشلس	۲	کنترل کننده سرعت موتور براشلس
۳	راه‌انداز موتور براشلس	۴	دیواره جداکننده
۵	کلید روشن/خاموش	۶	راه‌انداز شارژ
۷	مجموعه باتری	۸	محفظه باتری نمایشگر ولتاژ و آمپر
۹	سنت	۱۰	ترانس
۱۱	نمایشگر ولتاژ و آمپر	۱۲	درگاه شارژ مجموعه باتری

در شکل شماره ۴ شکل شماره ۱ ملخ متصل به موتور براشلس بوده است و موتور با چرخاندن آن انرژی درون باتری را تخلیه می‌کند و در واقع این فن نقش تخلیه انرژی درون مجموعه باتری را دارد. دیواره نزدیک به باتری، برای اینکه در زمان شارژ مجموعه گرمای حاصل از ترانس بر روی مجموعه باتری تاثیر نداشته باشد قرار داده شده است. دیواره‌های اطراف موتور براشلس به منظور ایمنی در زمان استفاده از مجموعه و در هنگام رخ دادن موارد خاص مثل در رفتن ملخ در نرخ‌های تخلیه بالا برای ایمنی دانشجو قرار داده شده است. این شکل در واقع نشان از قابل حمل بودن مجموعه باتری می‌دهد فن ذکر شده در شکل قابل مشاهده نیست و در فاصله ۶۰ سانتیمتری از آن قرار دارد.

به منظور ایمنی در زمان کار و حفظ سلامت باتری و پیشگیری از وقوع حوادثی چون انفجار یا تغییر شکل فیزیکی سلول باتری و نیز عدم کارکردن مجموعه در فشار حداکثری از یک برد کنترل کننده ولتاژ در مجموعه استفاده شده است. ولتاژ پایان کار برای آزمایشات ۱۲/۶ ولت در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد با اضافه کردن جریان هوای فعال و مازول‌های ترموالکتریک به مجموعه باتری و انجام مجدد آزمایش در شرایط یکسان، دما ثبت شده است.

با توجه به گفته سازنده دماسنج، دماسنج استفاده شده برای ثبت دماهای آزمایشات، دارای خطای اندازه‌گیری بسیار پایینی (۰/۰۶) بوده است. با استفاده از روابط کلین و مک کلینگتون عدم قطعیت و خطای اندازه‌گیری کار محاسبه شده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، آزمایشات در نرخ‌های تخلیه ۱۵،۱۲،۹ و ۱۸ آمپر و در محیط با دمای ۳۰،۲۵،۲۰ و ۳۵ درجه سانتیگراد ابتدا بدون فن و مازول ترموالکتریک که در این حالت خنک‌کاری با همرفت طبیعی و رژیم جریان آرام حاکم بر مجموعه بوده است. سپس، با فن و مازول ترموالکتریک که در این حالت خنک‌کاری با همرفت اجباری و رژیم جریان آشفته بر مجموعه حاکم بوده است و نهایتاً با مازول ترموالکتریک و بدون فن انجام شده است که خنک‌کاری با همرفت طبیعی و رژیم جریان آرام بر مجموعه حاکم بوده است. تمامی آزمایشات در یک محیط بسته انجام شده است. دمای این محیط بوسیله‌ی یک سیستم سرمایش/گرمایش تهویه تراکمی در دست کنترل بوده است. این سیستم گرمایش/سرمایش، در طول آزمایشات دمای مورد نیاز محیطی را فراهم آورده است.

شکل به دو قسمت الف و ب تقسیم شده است و در واقع، مدت زمان کار سیستم بر حسب ثانیه با ترکیب سیستم خنک‌سازی فن و مازول ترموالکتریک در نرخ‌های تخلیه متفاوت را نشان داده است. در نرخ تخلیه ۹ آمپر و در محیط با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد مدت زمان کارکرد سیستم از ۲۲۰۰ ثانیه در حالت بدون استفاده از فن و مازول ترموالکتریک به ۲۶۴۰ ثانیه در حالت استفاده همزمان و ترکیبی از فن و مازول ترموالکتریک بوده است.

نمودار به دو قسمت الف و ب تقسیم شده است که در قسمت الف در دمای محیطی ۲۰ و ۲۵ درجه سانتیگراد با نرخ‌های تخلیه ۱۵،۱۲،۹ و ۱۸ آمپر رسم شده است و در قسمت دوم نمودار با دماهای محیطی ۳۰ و ۳۵ درجه سانتیگراد در نرخ‌های تخلیه مشابه رسم شده است که حالت مقایسه‌ای داشته باشند با مشاهده نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید که روش ترکیبی فن و مازول ترموالکتریک توانسته است با مدیریت حرارتی مناسب باتری مدت زمان کارکرد مجموعه را نسبت به حالت بدون خنک‌کاری افزایش دهد.

در واقع در روش خنک‌کاری ترکیبی پیشنهادی، مدت زمان کارکرد سیستم به میزان ۱۲ درصد افزایش داشته است که نشان‌دهنده موثر بودن استفاده از فن و ترموالکتریک در افزایش زمان نگهداری شارژ باتری است. در نرخ تخلیه ۱۸ آمپر مدت زمان کارکرد سیستم در حالت بدون فن و مازول ترموالکتریک ۱۲۸۰ ثانیه بوده است که با کمک سیستم خنک‌

کاری ترکیبی به ۱۶۳۰ ثانیه رسیده است که در واقع نشان از افزایش زمان کارکرد سیستم به میزان ۲۵ درصد داشته است که به کارایی بهتر این روش ترکیبی در نرخ‌های تخلیه بالاتر اشاره دارد.

در سناریوی خنک‌کاری بدون کمک فن و تنها با استفاده از مازول‌های ترموالکتریک که رژیم جریان حاکم بر مجموعه رژیم جریان آرام بوده و همرفت طبیعی برای خنک‌کاری مجموعه استفاده شده است، در نرخ تخلیه ۹ آمپر میزان افزایش زمان کارکرد سیستم نسبت به حالت پایه یعنی بدون استفاده از فن و مازول ترموالکتریک ۷ درصد افزایش داشته است. در نرخ تخلیه ۱۸ آمپر این افزایش مدت زمان به میزان ۱۳ درصد بوده است.

در شکل ۷، نرخ افت ولتاژ بر حسب زمان کارکرد سیستم در دمای محیطی ۳۵ درجه سانتیگراد و در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر نشان داده شده است. همانطور که مشخص است این شکل روند کاهشی داشته است و سرعت این افت ولتاژ در نرخ‌های تخلیه بالاتر بیشتر است به عبارت دیگر شیب شکل افت ولتاژ در نرخ‌های تخلیه بالاتر نسبت به نرخ‌های تخلیه پایین‌تر، بیشتر است.

شکل ۸، نرخ افت آمپر سیستم در محیط با ۳۵ درجه سانتیگراد و در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر و با روش خنک‌سازی به همراه فن و مازول ترموالکتریک را نشان داده است. با گذشت زمان و کار مجموعه، باتری با افت آمپر مواجه شده است علت این اتفاق نیز، افت توان باتری پس از کارکرد آن بوده است.

نکته قابل توجه در این فرآیند تاثیر آمپر اولیه مجموعه در سرعت افت آمپر مجموعه باتری است که مشاهده می‌شود با افزایش نرخ تخلیه از ۹ آمپر به ۱۸ آمپر در دمای محیطی ۳۵ درجه سانتیگراد باعث افزایش شیب افت آمپر مجموعه تا ۲۴ درصد شده است در واقع باتری با سرعت بیشتری در حال تخلیه انرژی ذخیره شده خود بوده است.

شکل ۹، دمای سطح باتری را نسبت به زمان با نرخ تخلیه ۱۵ آمپر و در محیط با دمای ۳۵ درجه سانتیگراد با روش خنک‌کاری با مازول ترموالکتریک و بدون فن را نشان داده است. همانطور که مشاهده شده است با گذشت زمان و کار مجموعه دمای آن افزایش داشته است.

دمای محیط در افزایش دمای سطح باتری تاثیرگذار بوده است. به عنوان مثال در محیط با دمای ۳۵ درجه سانتیگراد و

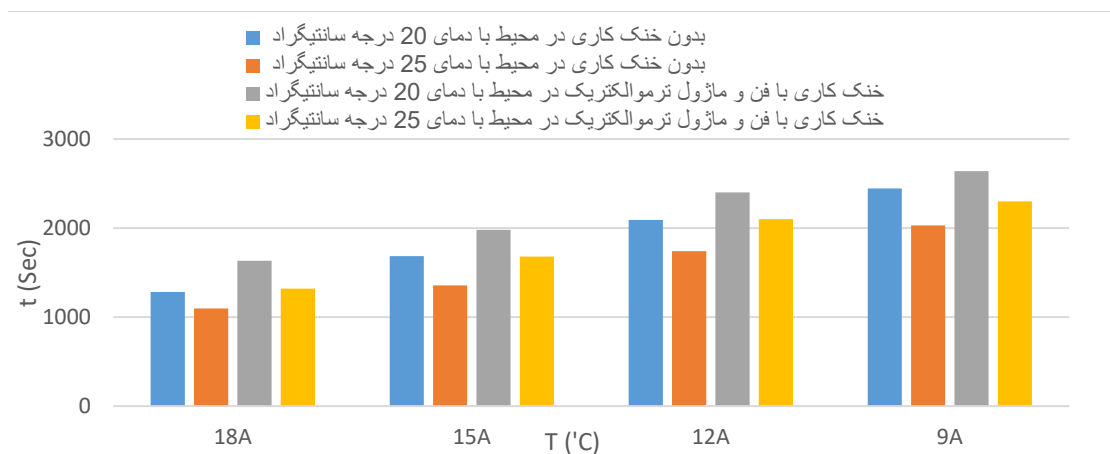
تخلیه ۱۵ آمپر و در محیط با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نشان داده‌است.

همان‌طور که مشخص است در این سناریو با تغییر نرخ جریان از ۱۸ آمپر به ۹ آمپر دمای سطح مجموعه باتری از ۲۸/۱ درجه سانتیگراد به ۳۱/۹ افزایش داشته است.

دلیل این افزایش دمای مجموعه، مربوط به مدت زمان کارکرد آن است که در نرخ تخلیه ۱۸ آمپری مدت زمان کارکرد سیستم ۱۲۰۰ ثانیه بوده است که در نرخ تخلیه ۹ آمپری مقدار آن به ۲۲۰۰ ثانیه افزایش داشته است.

با نرخ تخلیه ۱۵ آمپر، دمای سطح ۳۸/۴ درجه سانتیگراد بوده است، در حالی که در نرخ تخلیه یکسان و سیستم خنک‌کاری مشابه، ولی در محیط با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، دمای سطح مجموعه باتری ۲۸/۱ درجه سانتیگراد بوده است. در واقع با افزایش دمای محیط از ۲۵ درجه سانتیگراد به ۳۵ درجه سانتیگراد دمای سطح مجموعه به میزان ۲۹ درصد افزایش داشته است.

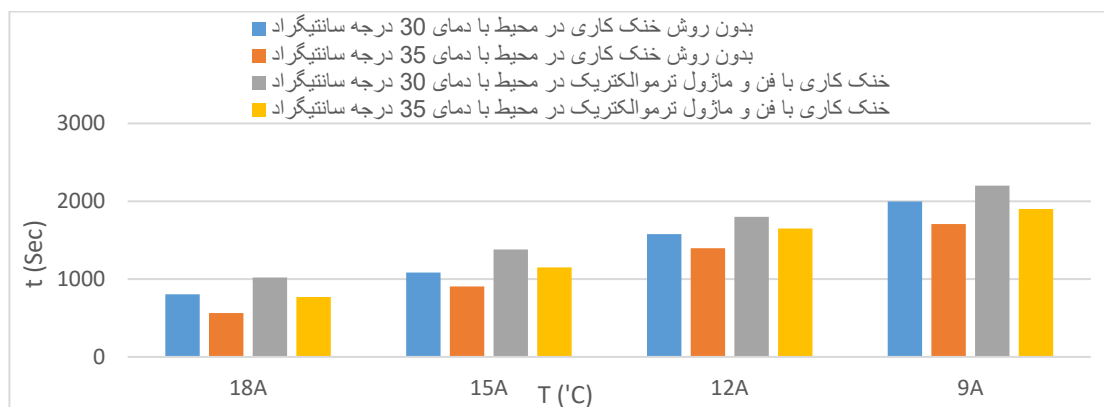
شکل ۱۰، دمای سطح مجموعه باتری را نسبت به زمان با سیستم خنک‌کاری ماژول ترموالکتریک و بدون فن و در نرخ



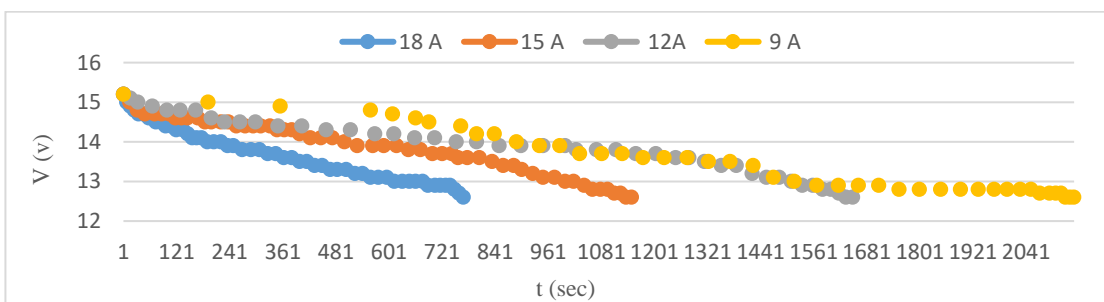
شکل ۶-الف - نمودار مدت زمان کارکرد مجموعه در دماهای محیطی ۲۰ و ۲۵ درجه سانتیگراد بدون روش خنک‌کاری و با ترکیب روش خنک‌کاری با فن و ماژول ترموالکتریک

این امر موجب می‌گردد که واکنش‌های درون باتری که باعث افزایش دمای مجموعه باتری و کاهش مدت زمان کارکرد آن می‌شوند با سرعت بالاتری و تعداد بیشتری انجام شوند که سبب می‌گردد باتری با سرعت بیشتری روند تخلیه انرژی ذخیره‌شده درون خود را طی کند و مدت زمان کارکرد آن کاهش یابد.

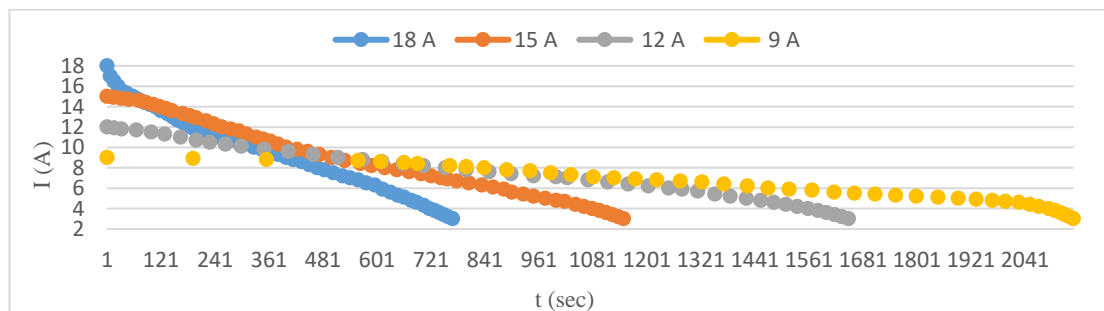
این کاهش مدت زمان استفاده می‌تواند ناشی از جنس، کیفیت باتری و نیز میزان جریان مصرف کننده باشد از طرفی دیگر افزایش دما باعث افزایش مقاومت الکتریکی شده که این امر موجب مصرف انرژی ذخیره شده درون مجموعه باتری می‌گردد که منجر به کاهش مدت زمان کارکرد مجموعه باتری می‌شود. با افزایش دمای محیط دمای سطح مجموعه باتری نیز با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد



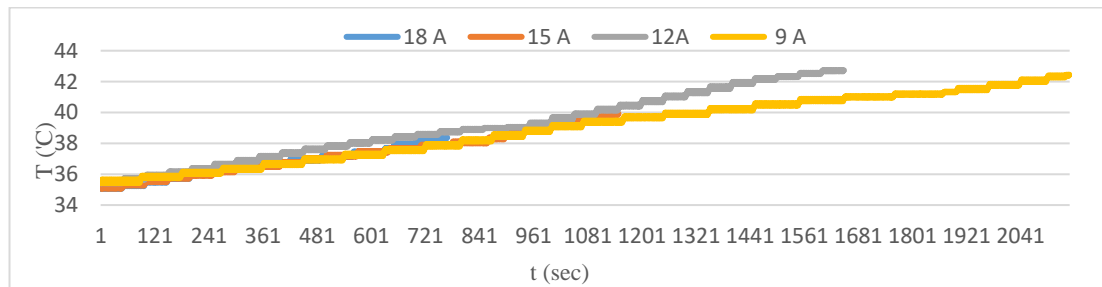
شکل ۶-ب - نمودار مدت زمان کارکرد مجموعه در دماهای محیطی ۳۰ و ۳۵ درجه سانتیگراد بدون روش خنک کاری و با ترکیب روش خنک کاری با فن و ماژول ترموالکتریک



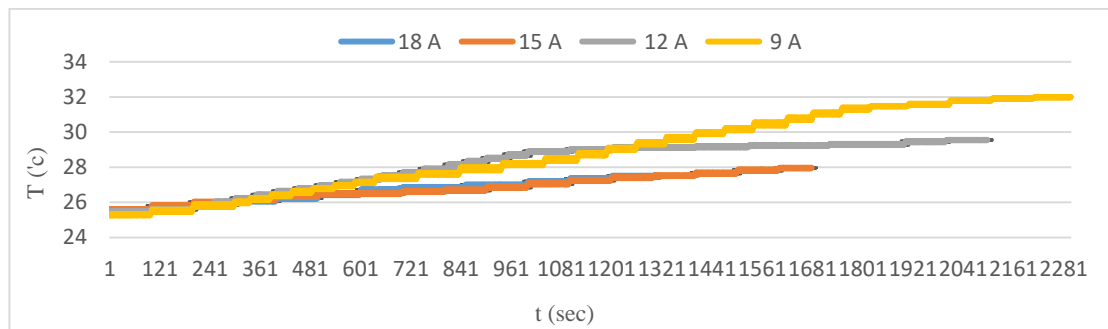
شکل ۷- تغییرات ولتاژ به زمان در طول فرآیند تخلیه در محیط با دمای ۳۵ درجه سانتیگراد در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر



شکل ۸- تغییرات آمپر به زمان در طول فرآیند تخلیه در محیط با دمای ۳۵ درجه سانتیگراد در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر



شکل ۹- تغییرات دمای سطح باتری به زمان در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر و در محیط با دمای ۳۵ درجه سانتیگراد با ماژول ترموالکتریک و بدون فن



شکل ۱۰- تغییرات دمای سطح باتری به زمان در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر با دمای محیطی ۲۵ درجه سانتیگراد با ماژول ترموالکتریک و بدون فن

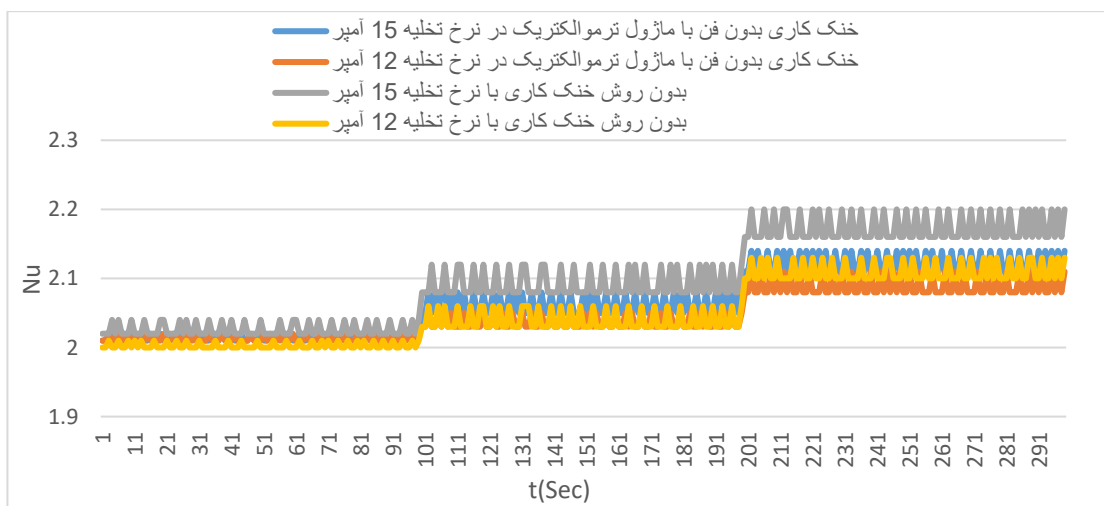
در شکل (۱۱- الف)، با استفاده از معادلات اشاره شده در بخش روابط حاکم و با توجه به داده‌های ثبت شده، نسبت به تعیین عدد ناسلت در نرخ تخلیه ۱۲ و ۱۵ آمپر در ستاریوهای مختلف اقدام شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، عدد ناسلت نسبت به زمان حالت افزایشی دارد که دلیل آن افزایش دمای سطح باتری در پروسه تخلیه و در نتیجه افزایش میزان انتقال حرارت و ضریب انتقال حرارت جابجایی با گذر زمان است. در شکل (۱۱- ب)، تغییرات عدد ناسلت در دماهای محیطی مختلف به وسیله‌ی خنک‌کاری با فن و ماژول ترموالکتریک نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، در نرخ‌های تخلیه بالاتر سرعت رشد عدد ناسلت سریع‌تر بوده است که دلیل آن افزایش سریع‌تر دمای سطح باتری بدلیل تعداد واکنش‌های بیشتر در نرخ تخلیه بالاتر در باتری و در نتیجه آن افزایش سریع‌تر عدد ناسلت بوده است.

در جدول ۳ مقایسه‌ای از سناریوهای مختلف خنک‌کاری مجموعه باتری در دمای محیطی ۲۰ درجه سانتی‌گراد آورده شده است. با استفاده از فن و ترموالکتریک کاهش دمای سطح مجموعه به میزان ۲،۲۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به حالت بدون خنک‌کاری حاصل می‌گردد که باعث افزایش زمان نگهداری شارژ ۲۲،۲٪ شده است. استفاده از ترموالکتریک به تنهایی باعث افزایش زمان نگهداری شارژ ۸،۶٪ با کاهش دمای ۰،۸ سانتی‌گراد نسبت به حالت بدون خنک‌کاری می‌گردد. بدلیل اختصار از آوردن سایر نتایج اجتناب شده است.

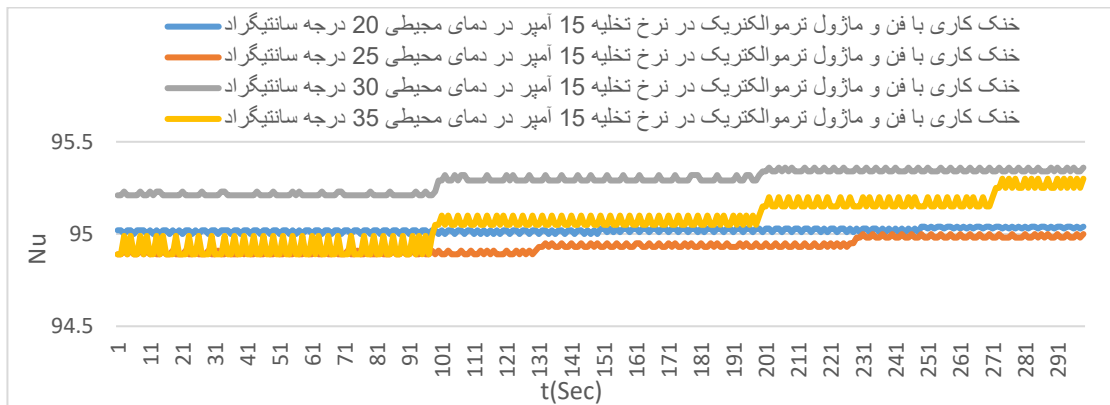
در شکل (۱۱- ج) تغییرات عدد ناسلت در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر در دماهای محیطی مختلف با روش خنک‌کاری بدون فن با ماژول ترموالکتریک نشان داده شده است. شکل (۱۱- د)

جدول ۳- مقایسه روش‌های مدیریت بیان شده در محیط با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر

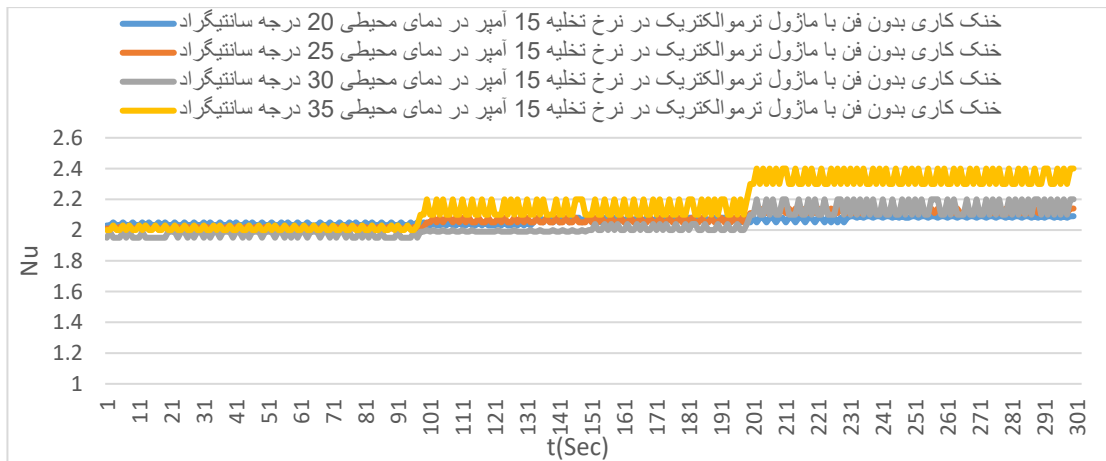
سناریو	زمان کارکرد مجموعه باتری (sec)	دمای سطح مجموعه باتری (°C)	عدد ناسلت	افت ولتاژ (ولت)	افت آمپر	نتیجه‌گیری
خنک‌کاری با ماژول ترمو الکتریک و فن	۱۹۸۰	۳۰/۵۴	-۱۲۰ ۱۸۸	-۲/۶ ۱۵/۱۲	۳-۱۸	بیشترین مدت زمان کارکرد - پایین‌ترین دمای سطح - عدد ناسلت روند افزایشی داشته - کمترین نرخ افت ولتاژ و آمپر
خنک‌کاری با ماژول ترمو الکتریک و بدون فن	۱۷۶۰	۳۱/۹۴	۱۰-۳	-۲/۶ ۱۵/۱۲	۳-۱۸	زمان کارکرد قابل قبول - دمای سطح کمتر از حالت بدون روش خنک‌کاری - نرخ افت ولتاژ و آمپر بالاتر از حالت با فن و ماژول ترموالکتریک
بدون روش خنک‌کاری	۱۶۲۰	۳۲/۷۸	_____	_____	_____	پایین‌ترین مدت زمان کارکرد - بالاترین دمای سطح - بالاترین نرخ تخلیه



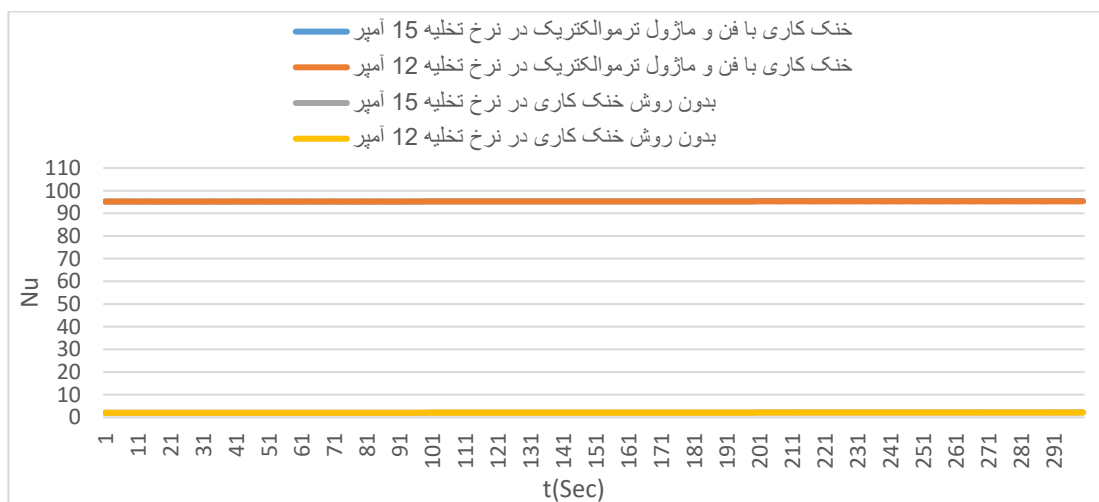
شکل ۱۱ الف - تغییرات عدد ناسلت به زمان در نرخ تخلیه ۱۲ و ۱۵ آمپر در سناریوهای خنک‌کاری مختلف



شکل ۱۱ ب- تغییرات عدد ناسلت در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر در دماهای محیطی مختلف به وسیله‌ی خنک کاری با فن و ماژول ترموالکتریک



شکل ۱۱ ج- تغییرات عدد ناسلت در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر در دماهای محیطی مختلف با روش خنک کاری بدون فن با ماژول ترموالکتریک



شکل ۱۱- د تغییرات عدد ناسلت در رژیم جریان آشفته و آرام در نرخ‌های تخلیه ۱۵ و ۱۲ آمپر با خنک‌کاری با فن و ماژول ترموالکتریک و بدون روش خنک‌کاری

در جدول ۴ در نرخ‌های تخلیه ۱۲ و ۱۵ آمپر مقدار ناسلت بدون فن با ماژول ترموالکتریک و بدون فن و ماژول میانگین با روش‌های خنک‌کاری با فن و ماژول ترموالکتریک، ترموالکتریک در دماهای محیطی مختلف بیان شده‌است.

جدول ۴ الف- ناسلت میانگین در روش‌های خنک‌کاری مختلف در نرخ تخلیه ۱۲ و ۱۵ آمپر در دمای محیطی ۲۰ درجه سانتیگراد

نرخ تخلیه / سناریو	بدون فن و ترموالکتریک	بدون فن با ترموالکتریک	با فن و ترموالکتریک
۱۲ آمپر	۵/۵۷	۵/۳۲	۱۰۷/۸۵
۱۵ آمپر	۵/۲۵	۵/۱۴	۱۰۷/۵۵

جدول ۴ ب- ناسلت میانگین در روش‌های خنک‌کاری مختلف در نرخ تخلیه ۱۲ و ۱۵ آمپر در دمای محیطی ۲۵ درجه سانتیگراد

نرخ تخلیه / سناریو	بدون فن و ترموالکتریک	بدون فن با ترموالکتریک	با فن و ترموالکتریک
۱۲ آمپر	۵/۱۹	۵/۰۳	۱۰۷/۹۱
۱۵ آمپر	۵/۰۱	۴/۶۸	۱۰۸/۲۳

جدول ۴ ج- ناسلت میانگین در روش‌های خنک‌کاری مختلف در نرخ تخلیه ۱۲ و ۱۵ آمپر در دمای محیطی ۳۰ درجه سانتیگراد

نرخ تخلیه / سناریو	بدون فن و ترموالکتریک	بدون فن با ترموالکتریک	با فن و ترموالکتریک
۱۲ آمپر	۵/۲۶	۵/۱۲	۱۰۸/۷۳
۱۵ آمپر	۵/۱۰	۴/۸۳	۱۰۸/۵۹

جدول ۴ د- ناسلت میانگین در روش‌های خنک‌کاری مختلف در نرخ تخلیه ۱۲ و ۱۵ آمپر در دمای محیطی ۳۵ درجه

سانتیگراد			
نرخ تخلیه / سناریو	بدون فن و ترموالکتریک	بدون فن با ترموالکتریک	با فن و ترموالکتریک
۱۲ آمپر	۵/۴۳	۵/۲۱	۱۱۰/۸۸
۱۵ آمپر	۵/۱۵	۵/۰۲	۱۰۸/۷۸

۵- نتیجه‌گیری

تهدید اصلی برای باتری‌ها، دمای فعالیت آنها است. بگونه‌ای که اگر دمای سطح آنها از محدوده استاندارد خارج شود، منجر به وقوع حوادث برگشت ناپذیر مثل انفجار و یا تغییر حالت فیزیکی آنها می‌گردد؛ بنابراین لزوم استفاده

از یک مجموعه مدیریت حرارتی برای باتری‌ها امری حیاتی است. در این مقاله با ترکیب روش خنک‌سازی و مدیریت حرارتی فن و ماژول ترموالکتریک سعی بر بهبود عملکرد خنک‌کاری برای مجموعه باتری شده‌است. با توجه به آزمایشات و اطلاعات بدست آمده از آنها می‌توان نتیجه‌گیری کلی این مقاله را بصورت زیر بیان کرد:

- در دماهای محیط ۳۵ درجه سانتیگراد و در نرخ تخلیه ۱۸ آمپر روش خنک‌سازی با فن، به میزان ۱۲ درصد زمان کارکرد بیشتر نسبت به روش خنک‌کاری بدون فن با ماژول ترموالکتریک داشته است و همینطور ۲۵ درصد زمان کارکرد بالاتر نسبت به حالت پایه یعنی بدون روش خنک‌کاری را نشان داده است.
- در دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد و در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر و با روش خنک‌سازی با فن و ماژول ترموالکتریک نسبت به حالت بدون سیستم خنک‌کاری، افزایش زمان کارکرد ۲۴ درصدی داشته است. برای حالت خنک‌کاری بدون فن با ماژول ترموالکتریک نیز نسبت به حالت بدون سیستم خنک‌کاری افزایش ۱۱ درصدی داشته است.
- دمای محیط اطراف مجموعه باتری بر روی آن تاثیر- گذار بوده است با افزایش دمای محیط از ۲۵ درجه سانتیگراد به ۳۵ درجه سانتیگراد با نرخ تخلیه ۱۵ آمپر و روش خنک‌کاری بدون فن با ماژول‌های ترموالکتریک، دمای سطح مجموعه باتری به میزان ۲۹/۱ درصد افزایش داشته است. نرخ افزایش دمای سطح باتری با افزایش دمای محیط رابطه مستقیم داشته است؛ یعنی با افزایش دمای محیط دمای سطح با سرعت بیشتری رشد کرده است.

با توجه به رژیم جریان نسبت به محاسبه ناسلت میانگین اقدام شده‌است. از آنجایی که در شرایط همرفت طبیعی و بدون استفاده از فن با استفاده از عدد رایلی نسبت به تعیین عدد ناسلت اقدام شده‌است و در محاسبه عدد رایلی اصلی‌ترین عامل در تغییر مقدار آن اختلاف دما در لحظه‌های مختلف مجموعه باتری با محیط بوده‌است با تغییر این اختلاف دما بر اثر گذر زمان و کارکرد مجموعه باتری، مقدار عدد رایلی نیز تغییر کرده است که به موجب آن باعث تغییر در مقدار عدد ناسلت در لحظه شده‌است.

در سناریو بدون روش خنک‌کاری در دماهای محیطی یکسان، بر اثر مدت زمان کارکرد بیشتر در نرخ تخلیه ۱۲ آمپر نسبت به نرخ تخلیه ۱۵ آمپر، چون دمای سطح باتری در نرخ تخلیه ۱۲ آمپر نسبت به نرخ تخلیه ۱۵ آمپر بیشتر بوده است، اختلاف دمای آن با محیط بیشتر بوده و در نتیجه عدد ناسلت آن بزرگتر بوده است. در حالتی خنک‌کاری بدون فن با ماژول ترموالکتریک، در نرخ تخلیه ۱۲ آمپر مدت زمان کارکرد مجموعه نسبت به حالت خنک‌کاری مشابه با نرخ تخلیه ۱۵ آمپر بیشتر بوده‌است و این مدت زمان بیشتر باعث افزایش دمای بیشتر نسبت به نرخ تخلیه ۱۵ آمپر شده است در نتیجه عدد ناسلت در نرخ تخلیه ۱۲ آمپر در شرایط یکسان با نرخ تخلیه ۱۵ آمپر بزرگتر بوده است.

در روش خنک‌کاری با فن و ماژول ترموالکتریک اختلاف دمای سطح باتری با محیط اطراف آن باعث گردید تا عدد ناسلت در نرخ‌های تخلیه مختلف متفاوت باشد. دلیل این موضوع این است که در دماهای بالاتر واکنش‌های درون باتری با سرعت بیشتری انجام شده و تعداد این واکنش‌های انجام شده نیز در دماهای بالاتر نسبت به دماهای پایین‌تر بیشتر بوده که باعث شده تا دمای سطح باتری نسبت به دماهای محیطی پایین‌تر با سرعت بیشتری رشد کند و در نتیجه اختلاف دمای سطح با محیط نیز بیشتر گردد که منجر به این شده تا عدد ناسلت در دمای محیطی ۳۵ درجه سانتیگراد نسبت به دمای محیطی ۲۰ درجه سانتیگراد بزرگتر باشد.

R_{cw} (Ω)	مقاومت داخلی سلول
Ra	عدد رایلی
Re	عدد رینولدز
S_{BP} (m^2)	سطح مجموعه باتری
T_{off} (sec)	زمان تخلیه باتری
T_A ($^{\circ}C$)	دمای محیط اطراف باتری
T_C ($^{\circ}C$)	دمای سلول باتری
V (v)	ولتاژ
علائم یونانی	
β (1/K)	ضریب انبساط
μ (kg/m.s)	ویسکوزیته دینامیکی
ν (m^2/s)	ویسکوزیته سینماتیکی
ΔS (kJ/kg.K)	تغییرات آنتروپی
ΔT ($^{\circ}C$)	تغییرات دما

- استفاده همزمان از ماژول ترموالکتریک و فن نسبت به حالت بدون روش خنک کاری در نرخ تخلیه ۱۵ آمپر و در دمای محیطی ۲۰ درجه سانتیگراد، دمای مجموعه باتری را به میزان ۲,۲۴ درجه سانتیگراد کاهش داده است که باعث افزایش زمان نگهداری شارژ ۲۲,۲٪ شده است.
- روش خنک کاری با فن و ماژول ترموالکتریک موجب کاهش دمای سطح مجموعه باطری، افزایش زمان کارکرد و بهبود عملکرد حرارتی آن شده است. دلیل این امر متلاطم کردن جریان هوا توسط فن بوده است که به موجب آن اختلاف دمای بین دو سطح ماژول ترموالکتریک از حالت بدون فن بیشتر شده و خنک سازی به وسیله ماژول ها با افزایش اختلاف دمای بین دو سطح بهتر شده و باعث افزایش چشمگیر نرخ انتقال حرارت توسط مجموعه باطری شده است.

۷- منابع

- [1] Zhao G, Wang X, Negnevitsky M, Zhang H, (2021), A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles J. Power Sources
- [2] Mansir I.B, Sinaga N, Farouk N, Alqsair U.F, Diyoke C, Nguyen D.D, (2022) Assessment of the effect of distance between lithium-ion batteries with a number of triangular blades, on the thermal management of the battery pack in a chamber full of phase change material J. Storage Mater., 51, Article 104391
- [3] Youssef R, Hosen M.S, He J, Jaguemont J, Akbarzadeh M, De Sutter L, Van Mierlo J, Berecibar M, (2021), Experimental and numerical study on the thermal behavior of a large lithium-ion prismatic cell with natural air convection IEEE Trans. Ind. Appl., 57 (6), pp. 6475-6482
- [4] University B, (2021), BU-502: Discharging at high and low temperatures Batter Portable World, 1
- [5] Luo M, Cao J, Liu N, Zhang Z, Fang X, (2022), Experimental and simulative investigations on a water immersion cooling system for cylindrical battery cells Front. Energy Res, 10
- [6] Öztop M, Şahinaslan A, (2022), Control of temperature distribution for Li-ion battery modules via longitudinal fins J. Storage Mater, 52, Article 104760.
- [7] Gao Q, Wang G, Yan Y, Wang Y, (2020), Thermal management optimization of a lithium-ion battery module with graphite sheet fins and liquid cold plates Autom. Innov, 3 (4), pp. 336-346.

فهرست علائم

A (a)	جریان
b	تعداد سلول های مجموعه باتری
C_p (J/kg.K)	ظرفیت گرمای ویژه
C_{pc} (J/kg.K)	گرمای ویژه یک سلول
C (mAh)	ظرفیت یک سلول
E_{tot} (J)	انرژی کل
F (C/mol)	ثابت فارادی
g (m/s^2)	شتاب گرانش
Gr	عدد گرافش
h (W/m^2K)	ضریب انتقال حرارت
i_{cell} (A)	جریان تخلیه یا شارژ یک سلول
k ($W/m.K$)	رسانایی حرارتی
L (m^2)	طول مشخصه
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرانتل
\dot{Q} (W)	انتقال حرارت مجموعه باتری
Q_{Acell} (J)	گرمای ذخیره شده در یک سلول
Q_{cell} (J)	گرمای تولید شده در مجموعه سلول
Q_{GEN} (J)	گرمای تولید شده در کل مجموعه باتری

- [19] Arora Sh, (2018) Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: a review of existing and emerging technologies, *J. Power Sources* 400: 621–640.
- [20] Sun H, Dixon R, (2014) Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack, *J. Power Sources* 272: 404–414.
- [21] Lithium-Ion Battery Inventor Introduces New Technology for Fast-Charging, Noncombustible Batteries, University of Texas at Austin. University of Texas. 28 February 2017. Retrieved 15 March 2017.
- [22] Dubarry M, Baure G, Pastor-Fernandez C, Fai YT, Dhammika WW, Marco J. (2019) Battery energy storage system modeling: A combined comprehensive approach, *J. Storage Mater* 21:172–85.
- [23] Karimi G, Li X. (2013) Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Int J Energy Res* 37: 13–24.
- [24] Inui Y, Kabaysahi Y, Watanabe Y, Watase Y, Kitamura Y. (2007) Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries. *Energy Convers Manage* 48:2103–9.
- [25] Hosseinzadeh E, Genieser R, Worwood D, Barai A, Marco J, Jennings P. (2018) A systematic approach for electrochemical-thermal modelling of a large format lithium-ion battery for electric vehicle application. *J Power Sources* 382: 77–94.
- [26] Chung Y, Kim MS. (2019) Thermal analysis and pack level design of battery thermal management system with liquid cooling for electric vehicles. *Energy Convers Manage* 196:105–116h.
- [27] Liu H, Wei Z, He W, Zhao J. (2017) Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Convers Manage* 150:304–30.
- [28] Dubarry M, Baure G, Pastor-Fernandez C, Fai YT, Dhammika WW, Marco J. (2019) Battery energy storage system modeling: A combined comprehensive approach, *J. Storage Mater* 21:172–85.
- [29] Holman J.P, (1985) Heat Transfer, Fifth Edition, Chapter 6, Natural-convection Heat transfer, Page287
- [8] Behi H, Karimi D, Jaguemont J, Gandoman F, Kalogiannis T, Berecibar M, Van Mierlo J, (2021), Novel thermal management methods to improve the performance of the Li-ion batteries in high discharge current applications *Energy*, Article 120165.
- [9] Sun Z, Guo Y, Zhang Ch, Xu H, Zhou Q, Wang Ch, (2023), A Novel Hybrid Battery Thermal Management System for Prevention of Thermal Runaway Propagation, *IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION*, VOL. 9, NO. 4, DECEMBER.
- [10] Chen W, Hou S, Shi J, Han P, Liu B, Wu B, Lin X, (2022), Numerical analysis of novel air-based Li-ion battery thermal management *Batteries*, 8 (9), p. 17.
- [11] Xu Y, Zhang H, Xu X, Wang X, (2021), Numerical Analysis and surrogate model optimization of air-cooled battery modules using double-layer heat spreading plates *Int. J. Heat Mass Transf*, Article 121380.
- [12] Widyantara R, Naufal M, Sambegoro P, Nurprasetyo I, Triawan F, Djamari D, Nandiyanto A, Budiman B, Aziz M, (2021), Low-cost air-cooling system optimization on battery pack of Electric Vehicle *Energies*, 14, p. 7954.
- [13] Qin P, Sun J, Yang X, Wang Q, (2021), Battery thermal management system based on the forced-air convection: A review *e-Transportation*, 7, Article 100097.
- [14] Thakur A.K, Prabakaran R, Elkadeem M, Sharshir S, Arıcı M, Wang C, Zhao W, Hwang Y, Saidur R, (2020), A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles *J. Storage Mater.*, 32, Article 101771.
- [15] Weng J, Ouyang D, Yang X, Chen M, Zhang G, Wang J, (2020), Optimization of the internal fin in a phase-change-material module for battery thermal management *Appl Therm Eng*, 167, Article 114698.
- [16] Kim J, Oh J, Lee H, (2020), Review on battery thermal management system for electric vehicles *Appl Therm Eng*, 149, pp. 192-212.
- [17] Enescu D, (2020), thermoelectric energy harvesting: basic principles and applications *IntechOpen*, 1, pp. 1-37, 10.5772/intechopen.83495.
- [18] Luo D, Wang R, Yu W, Zhou W, (2020), A novel optimization method for thermoelectric module used in waste heat recovery *Energy Convers. Manage*, 10.1016/j.enconman.2020.112645.