نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۱، شماره ۴، سال ۱۳۹۸، صفحات ۱ تا ۱۰
DOI:

بررسی تجربی عملکرد یک سیستم مدیریت حرارتی هیبرید آب–خنک و ماده تغییر فاز دهنده در یک ماژول باتری لیتیومی مورد استفاده در یک خودرو الکتریکی

شهریار حکمت، غلامرضا مولایی منش*

دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده: عملکرد باتری‌ها لیتیومی مورد استفاده در خودروهای الکتریکی به شدت به دما وابسته است. بنابراین استفاده از یک سیستم مدیریت حرارتی، امری مهم و ضروری در استفاده از این نوع باتری‌ها تلقی می‌شود. با توجه به این مسئله، در پژوهش ارائه شده، ابتدا طراحی و ساخت یک ماژول باتری و سیستم مدیریت حرارتی هیبرید، به وسیلهی لولههای آب–خنک و مواد تغییر فاز دهنده انجام گردید و با استفاده از روش تجربی، دمای هر سلول با استفاده از روش‌های خنک‌کاری فعال و غیرفعال، اندازه‌گیری و نقش هر یک از حالتهای خنک‌کاری، با یکدیگر مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد، دمای باتری بدون سیستم خنک‌کاری در دشارژ بالا به مرز ۵۷ درجه سانتی‌گراد رسیده است و در حالت دوم آزمایش که توسط مواد تغییرفازدهنده انجام گرفته، دمای سلول‌ها کاهش چشمگیری داشته و نسبت به حالت اول آزمایش، ۲۶ درجه سانتی‌گراد دمای باتری‌ها کاهش یافته و به ۳۲ درجه سانتی‌گراد رسیده است. در حالت سوم آزمایش، خنک‌کاری به صورت هیبرید توسط مواد تغییرفازدهنده و لوله‌های آب–خنک صورت گرفته است و نتایج نشان می‌دهد که دمای میانگین باتری‌ها با ۱/۵ درجه کاهش، به دمای بهینه ۳۰/۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است.

تاریخچه داوری:
دریافت:
بازنگری:
پذیرش:
ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:
خودروی الکتریکی
باتری لیتیومی
مدیریت حرارتی هیبرید
مواد تغییرفازدهنده
خنک کاری آب–خنک

۱- مقدمه

امروزه عرضه انرژی یکی از چالش‌های بزرگ اجتماعی در قرن بیست و یکم در سطح جهانی محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر کمبود انرژی، معضل آلودگی هوا، کمبود منابع سوخت‌های فسیلی و گرمایش زمین یکی از مشکلات بحرانی بشر است که در سراسر کشورها با آن روبه‌رو هستند [۱]. این مشکلات، پژوهشگران جهان را برآن داشت تا بیشتر از انرژی‌های سبز و غیر آلاینده در خودروهای الکتریکی برای رفع این موضوع کمک بگیرند. مسئله‌ی مهم و اساسی در این نوع خودروها پایین بودن ظرفیت انرژی در باتری آن‌ها می‌باشد. بنابراین می‌بایست تا حد امکان از ظرفیت موجود در باتری این نوع خودروها استفاده نمود. امروزه باتری‌های لیتیومی[1] به دلیل مزایایی از جمله انرژی مخصوص بالا، چگالی انرژی بالا و میزان خود دشارژی پایین، در مقایسه با سایر باتری‌ها در جایگاه قابل توجهی قرار دارند و گزینه بسیار مناسبی برای استفاده در خودروهای هیبریدی و برقی به نظر می‌رسند [۲]. با این وجود، برای تجاری‌سازی این نوع باتری و استفاده آن برای خودروهای الکتریکی می‌بایست برخی موانع عملکردی این باتری‌ها، مانند ایمنی، هزینه، زمان شارژ و قابلیت بازیافت آن، رفع گردد. یک محدودیت اصلی در تکنولوژی این نوع باتری‌ها، وابستگی شدید آن‌ها به دما می‌باشند. در صورتی که دمای باتری بیش از اندازه بالا رود و یا بیش از اندازه کاهش یابد، موجب می‌شود راندمان و عمر باتری نیز به شدت افت نماید [۳]. بنابراین وجود یک سیستم مدیریت حرارتی[2] جهت کنترل دما سلول‌های باتری، بخصوص خنک‌کاری آن‌ها در دماهای بالا امری مهم و ضروری بوده و می‌بایست مورد بررسی و تحقیق بیشتری قرار گیرد.

به طور کلی خنک‌کاری باتری‌ها سه روش عمده انجام می‌گیرد. اگر خنک‌کاری از انرژی خارجی جهت به گردش درآوردن سیال مصرف شود به آن اصطلاحاً روش فعال گفته می‌شود. در این روش معمولاً از هوا یا آب به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود و برای به حرکت در آوردن آنها معمولاً از پمپ و فن که انرژی مصرف می‌کند، استفاده می‌شود. در روش دوم برای خنک‌کاری نیازی به مصرف انرژی وجود ندارد یعنی در این حالت می‌توان از موادی مانند مواد تغییر فاز دهنده جهت خنک‌کاری استفاده کرد. در حالت سوم خنک‌کاری بنا بر شرایط مختلف از هر دو روش یاد شده با هدف بهره مندی از مزایای هر دو روش استفاده شده و اصطلاحاً به آن روش هیبرید[3] گفته می‌شود [۴].

اگر چه که پژوهش‌های مختلفی بر روی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در خنک کاری باتری‌ها صورت گرفته است، لیکن تاکنون روش خنک‌کاری

1 Lithium

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: molaeimanesh@iust.ac.ir

2 Termal management system
3 Hybrid

UNCORRECTED PROOF

هیبرید آب–خنک و مواد تغییرفازدهنده به ندرت مورد مطالعه و پژوهش قرار گرفته است. در این پژوهش یک سیستم مدیریت حرارتی هیبرید به وسیلهی سیستم آب–خنک[1] و مواد تغییر فاز دهنده برای یک ماژول باتری مورد استفاده در خودروهای الکتریکی، طراحی گردیده و پس از ساخت با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری تجربی، نقش برخی عوامل اثرگذار، در خنک‌کاری سلول‌های باتری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- اهمیت مدیریت حرارتی در باتری‌های لیتیومی و پیشینه تحقیق

از آن‌جا که یک سلول باتری لیتیوم–یون به تنهایی نمی‌تواند انرژی مورد نیاز جهت حرکت یک خودروی هیبریدی و الکتریکی را فراهم کند، تعداد بسیار زیادی از این سلول‌ها می‌بایست به صورت سری و موازی در کنار هم قرار گیرند. قرار گرفتن تعداد زیاد سلول‌ها و نرخ شارژ و دشارژهای زیاد در این مجموعه از باتری‌ها باعث افزایش دمای ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی و عبور الکترون‌ها شده و افزایش دمای شدید در کل مجموعه‌ی باتری را در پی خواهد داشت که در صورت عدم کنترل، موجب کوتاه شدن طول عمر، کاهش ظرفیت و یا حتی در موارد حادتر، انفجار باتری را به دنبال خواهد داشت [۱]. با توجه به این موضوع دمای میانگین در کل مجموعه باتری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرف دیگر مجموعه‌ی متشکل از سلول‌های باتری نیز می‌بایست در دمای تقریباً یکسانی نسبت به یکدیگر کار کنند، چرا که در صورت عدم رعایت این مسئله، باعث شارژ و دشارژ غیر یکنواخت سلول‌ها خواهد شد و در نتیجه عمر باتری را نیز کاهش می‌دهد [۲]. در نتیجه استفاده از یک سیستم مدیریت حرارتی مناسب جهت خنثی کردن و از بین بردن این مشکلات در مجموعه باتری، بسیار حائز اهمیت بوده و می‌بایست هم دمای میانگین و هم دمای هر سلول در محدوده مشخص کنترل شود.

اکثر مطالعات نشان می‌دهد که اتلافات گرما نمی‌تواند توسط گردش هوای طبیعی یا گردش اجباری به ویژه در باتری‌های بزرگ، به طور قابل توجهی دفع گردد [۲]. روش خنک‌کاری فعال مؤثرتر از روش خنک‌کاری غیر فعال می‌باشد، به ویژه در باتری‌هایی که نرخ شارژ و دشارژ بالایی در آنها صورت می‌گیرد؛ به دلیل اینکه مایع به طور مدام در حال گردش بوده و در منبع خنک‌کن (رادیاتور) گرما را دفع کرده و دوباره به سیستم برگشته و باتری را خنک می‌کند[۴].

در سیستم مدیریت حرارتی، خنک‌کاری مایع به روش فعال در بسیاری از مطالعات با تمرکزهای مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. ژائو و همکاران[2] [۶]، از روش خنک‌کاری مایع برای باتری‌های استوانه‌ای به صورت سیلندر آب–خنک استفاده کردند. هدف از روش آن‌ها نگهداری حداکثر دمای بسته باتری در محدوده ۲۵ درجه سانتی‌گراد و اطمینان از اختلاف دما در سلول‌ها بود. متغیرهایی که آن‌ها در مطالعه خود بررسی کردند، نرخ جریان سیال، مسیر جریان سیال و اندازه ورودی دستگاه تخلیه گرما بود. آن‌ها به طور موفقیت‌آمیزی توانستند دمای باتری‌های استوآن‌های را به زیر ۴۰ درجه سانتی گراد با سرعت جریان سیال ۰/۰۰۱ کیلوگرم بر ثانیه کنترل کنند. بر اساس این نتایج، محققان، مزایای پیکربندی سیستم خنک‌کاری مایع را، به طور مثال در مقایسه با سیستم جابه‌جایی طبیعی هوا را نشان دادند.

سیستم مدیریت حرارتی باتری به کمک مواد تغییرفازدهنده ابتدا توسط الهالج و سلمان[3] [۷] و جانکواسکی و همکاران[4] [۸]، ۷۴۰ نوع مواد تغییرفازدهنده از توزیع انتقال حرارت بر اساس نوع مواد را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند و آن‌ها را طبقه بندی کردند. میلز و الهلاج[5] [۹]، یک سیستم مدیریت حرارتی با مواد تغییرفازدهنده طراحی کردند و با استفاده از ضریب آنتروپی باتری بسته لپ‌تاپ آن را شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مواد تغییرفازدهنده به طور قابل توجهی عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد و دمای عملیاتی را در ۵۵ درجه سانتی گراد، حتی در نرخ‌های شارژ و دشارژ بالا حفظ می‌کند.

الهالج و سلمان [۷]، نتایج آزمایشگاهی خود را از یک باتری لیتیوم–یون طراحی شده برای کاربردهای اسکوتر الکتریکی، با چهار حالت مختلف از گرمازدایی گزارش دادند:

۱) استفاده از گردش هوای طبیعی
۲) استفاده از فوم آلومنیومی برای انتقال حرارت
۳) استفاده از مواد تغییرفاز دهنده
۴) ترکیبی از فوم آلومنیوم و مواد تغییرفازدهنده

آزمایش آن‌ها نشان داد که روش چهارم بهترین تأثیر در خنک‌کاری باتری‌ها نسبت به سه موارد دیگر را داشت.

کنیسرین[6] [۱۰]، منحصراً به بررسی و تحقیقات در رابطه با توسعه مواد تغییرفازدهنده با اعمال درجه حرارت‌های بالا بررسی کرد. تقریباً تمام محققان موافقند که استفاده از یک سیستم ذخیره ساز گرمای نهان[7] با استفاده از مواد تغییرفازدهنده، یک راه مؤثر برای ذخیره سازی انرژی حرارتی است. در زمان پایین بودن دما، مواد تغییرفازدهنده‌ها می‌توانند به عنوان مواد گرمایشی نیز استفاده شوند. در واقع اگر دمای باتری‌ها زیر نقطه ذوب مواد تغییرفازدهنده باشند.

در ابتدا، انتخاب یک مواد تغییرفازدهنده مناسب برای مدیریت حرارتی باتری، نیاز به محدوده‌ی دمای ذوب مناسب آن می‌باشد. با توجه به عوامل ذکر شده، بهترین درجه حرارت برای باتری‌های سرب–اسید، نیکل–هیدرید فلز و لیتیوم–یون بین دمای ۲۵ تا ۴۰ درجه سانتیگراد است. اگینیم و همکاران [۱۱]، خواص ترموفیزیکی مواد تغییرفازدهنده را برای کاربردهای

1 Water cooling pipe
2 Zhao et al
3 Al-Hallaj and Salman
4 Jankowski et al
5 Mills and Al-Hallaj
6 Kenisarin
7 Latent heat

UNCORRECTED PROOF

مختلف مورد بررسی قرار دادند، محدوده‌ی دماهای آن‌ها بین ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتیگرد استخراج شده است.

صباح و همکاران[1] [۱۲]، در مقایسه اثربخشی مواد تغییرفازدهنده خنک شده توسط گردش هوای اجباری، به وسیله شبیه‌سازی عددی و آزمایش نشان دادند که خنک‌کاری توسط مواد تغییرفازدهنده می‌تواند درجه حرارت را زیر ۵۵ درجه سانتی‌گراد در نرخ دشارژ ۶/۶۷ سی[2] (باتری با ظرفیت ۱۰ آمپر) ثابت نگه دارد.

از آنجایی که اثر خنک‌کاری به وسیله‌ی مواد تغییرفازدهنده تا حد زیادی به توانایی جذب حرارتی پنهان ماده فازی متکی است، بنابراین، عملکرد کنترل دما از مواد تغییرفازدهنده، به طور قابل ملاحظه‌ای پس از این که تمام مواد به مایع تبدیل شد، کاهش خواهد یافت. درنتیجه، برای عملیات شارژ و دشارژ با نرخ‌های بالا و در دراز مدت، نیاز به یک خنک‌کننده دیگر جهت کمک به خنک‌کاری مواد تغییرفازدهنده خواهد بود.

۳- روش پژوهش

از مطالعه پژوهش‌های صورت می‌توان به این نتیجه رسید که سیستم خنک‌کاری ترکیبی فعال و غیرفعال یکی از بهترین و قابل اعتمادترین روش‌های مدیریت حرارتی در باتری‌های لیتیومی خودروهای الکتریکی می‌باشند. بنابراین با توجه به این مهم، در این پژوهش به بررسی تجربی این نوع از سیستم مدیریت حرارتی پرداخته خواهد شد. همچنین در این پژوهش اثرات هر یک از اجزای خنک‌کاری اعم از مواد تغییرفازدهنده و لوله‌های خنک‌کننده، مورد بررسی و آزمایش قرار می‌گیرد و از نتایج حاصل از آن، یک نتیجه جامع در خصوص نقش عملکرد هر یک از اجزای تشکیل دهنده در این نوع سیستم مدیریت حرارتی به دست آید.

۳- ۱- اجزای دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش، یک دستگاه خنک‌کننده ترکیبی می‌باشد که با استفاده از لوله‌های آب-خنک که در درون محفظه باتری قرار دارد، موجب خنک‌کاری سلول‌ها می‌شود؛ که برای به گردش درآوردن آب و خنک‌کاری آن نیاز به اجزایی همچون پمپ، رادیاتور و فن می‌باشد. همچنین دستگاه ارائه شده، از بخش‌های مختلف دیگری نیز تشکیل شده و به شرح زیر است:

۳- ۱- ۱- باتری‌ها

باتری‌های مورد آزمایش، باتری‌های لیتیوم-پلیمر مدل منشوری با ولتاژ و ظرفیت ۳/۸ ولت و ۵۵۰۰ میلی‌آمپر و ابعاد آن ۳×۱۲۸×۱۳۵ می‌باشد. ۵ عدد از باتری‌ها به منظور تشکیل یک ماژول، به صورت سری کنار یکدیگر قرار گرفته شده و در نتیجه مجموع ولتاژ کل مجموعه باتری‌ها ۱۹ ولت می‌باشد.

۳- ۱- ۲- محفظه باتری

به منظور قرار دادن سلول‌ها با فاصله معین، یک جعبه شیشه‌ای مانند، از جنس پلی‌گلس[3] به صورت آب بند در نظر گرفته شده تا جهت استفاده از مواد تغییرفازدهنده هیچ گونه نشتی اتفاق نیافتد. همچنین شیارهایی در آن تعبیه شده تا سلول‌ها به صورت کشویی در داخل آن به صورت عمودی و با فاصله یکسان از یکدیگر قرار گیرند، فاصله این شیارها یا سلول‌ها نسبت به یکدیگر ۱۴ میلی‌متر می‌باشند.

۳- ۱- ۳- پمپ

جهت به گردش در آوردن آب در لوله‌های خنک‌کننده می‌بایست از یک پمپ استفاده شود. پمپ مورد آزمایش، یک نوع پمپ آب کوچک با محرک براشلس سیرکولار ۱۲ ولت و با قدرت ۳۵۰ لیتر بر ساعت است.

۳- ۱- ۴- رادیاتور کوچک

یکی از پرکاربردترین راه‌ها برای خنک‌کاری آب، استفاده از رادیاتور می‌باشد. برای خنک‌کاری آب در حال جریان به یک رادیاتور کوچک که نقش یک مبدل حرارتی را ایفا کند، استفاده شده است که آب در حال چرخش به رادیاتور رسانده و توسط یک فن کوچک، خنک نماید و دوباره آب خنک شده را به محفظه باتری رسانده و باعث خنک شدن سلول‌ها شود.

۳- ۱- ۵- فن خنک کننده

فن‌های خنک‌کننده استاندارد در جهت خنک‌کاری رادیاتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین نکته مهم و حیاتی در عملکرد نهایی فن‌های خنک کننده، بزرگی و میزان سرعت چرخش آن‌ها است. معمولاً هر چقدر اندازه قاب فن بزرگتر باشد، به همان میزان نیز از سرعت چرخش و البته نویز آن کاسته می‌شود. فن استفاده شده شده یک فن ۱۲ سانتی متری با حداکثر سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه، دارای ۹ پره ضخیم و پهن برای بیشترین جابه‌جایی هوا، نویز و صدای اندک، ساخته شده از پلاستیک مستحکم می‌باشد. دامنه ولتاژ برای عملکرد ۱۰/۸ تا ۱۳/۲ ولت (۲/۴ وات مصرف انرژی) و حداکثر قابلیت جابه‌جایی هوای آن برابر با ۶۵/۱۶ فوت مکعب بر دقیقه می‌باشد.

۳- ۱- ۶- کنترلر آردوینو[4]

میکرو کنترلر آردوینو نسل جدید کنترلرهایی است که به منظور ایجاد راهی ارزان و ساده برای برنامه‌نویسی و کنترل مدارها، سنسورها، موتورها و... به بازار معرفی، به همراه این کنترلر یک نرم افزار ساده و کارآمد نیز ارائه شده است که توسط رایانه می‌توان این برد کنترلر را برنامه ریزی نمود. برای کنترل سیستم خنک‌کاری، در اینجا از برد آردوینو Mega۲۵۶۰ نظر گرفته شده است. برای شروع، تنها با یک کابل یو اس بی، به سادگی برد به

1 Sabba et al
2 C-rate
3 Poly glass
4 Arduino

UNCORRECTED PROOF

کامپیوتر وصل می‌شود و توسط برنامه IDE-Arduino کنترل می‌شود. جهت ارسال داده‌ها از جمله دمای باتری‌ها، سرعت جریان آب در حال گردش و همچنین جهت فرمان روشن و خاموش شدن فن و پمپ آب، این مدار فرمان بسیار مفید و کارآمد خواهد بود.

۳- ۱- ۷- دما سنج

با توجه به اینکه برای مقایسه عملکرد سیستم خنک‌کاری می‌بایست دمای بدنه باتری‌ها را مورد بررسی قرار گیرد، بنابراین انتخاب نوع سنسور دما بسیار حائز اهمیت است. سنسورهای استفاده شده، یک سنسور تماسی با ابعاد بسیار کوچک ۴/۵×۴/۵×۲/۵ که دارای دقتی برابر با ۰/۰۶۲۵ درجه سانتی‌گراد و محدوده اندازه‌گیری بین دماهای ۵۵- تا ۱۲۵+ با پاسخگویی ۷۵۰ میلی‌ثانیه را دارا می‌باشد.

۳- ۱- ۸- سنسور جریان آب

جهت اندازه‌گیری میزان جریان آبی که در لوله‌های آلومنیومی در گردش است، از یک فلومتر کوچک که جهت کنترل به برد آردونیو متصل می‌شود، در نظر گرفته شده است. بازه عملکرد این دبی سنج بین ۱ تا ۳۰ لیتر در دقیقه می‌باشد.

۳- ۱- ۹- لوله‌های آلومنیومی

با توجه به جهت بالابردن میزان خنک‌کاری سیستم از لوله‌های آلومنیومی به علت انتقال حرارت بالا، استفاده خواهد شد. قطر این لوله‌ها ۷ و ضخامت آن ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین این لوله‌ها قابلیت انعطاف بالایی دارند و به راحتی می‌توان آن‌ها را خم و تغییر حالت داد. این لوله با آرایش دو خم ۹۰ درجه که دو بار طول هر سلول را طی می‌کند، جهت آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳- ۱- ۱۰- مواد تغییرفازدهنده

در بخشی از این آزمایش از مواد تغییرفازدهنده جهت مشاهده تأثیر این مواد بر خنک‌کاری سلول‌ها استفاده خواهد شد. موادهای تغییرفازدهنده آلی را می‌توان به گروه پارافین‌ها (آلکان‌ها) و غیرپارافین ها مانند استرها، اسیدهای چرب، الکل‌ها و گیلکولیک اسیدها تقسیم‌بندی نمود. دی هیدرات، سولفات سدیم، هگزاهیدرات کلرایدکلسیم و پارافین جز مهمترین موادهای تغییرفازدهنده محسوب می‌شوند. موادهای تغییرفازدهنده همچنین در نقطه ذوب‌های مشخصی وجود دارند که با توجه به نیازهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه نیاز است دمای باتری‌ها را در محدوده‌ی ۲۰ تا ۴۰ درجه تنظیم شوند، بنابراین می‌بایست از موادهای تغییرفازدهنده ای استفاده نمود که دمای ذوب آن پایین‌تر از ۴۰ درجه سانتی گراد باشد. به دلیل اینکه مواد تغییرفازدهنده تا محدوده‌ی دمای ذوب قادر به خنک نگه داشتن سلول‌های باتری می‌باشد و اگر این مواد از فاز جامد به فاز کاملاً مایع تبدیل شود خواص خنک‌کاری خود را از دست داده و از آن به بعد با نرخ بالاتری شروع به گرم شدن می‌نماید.

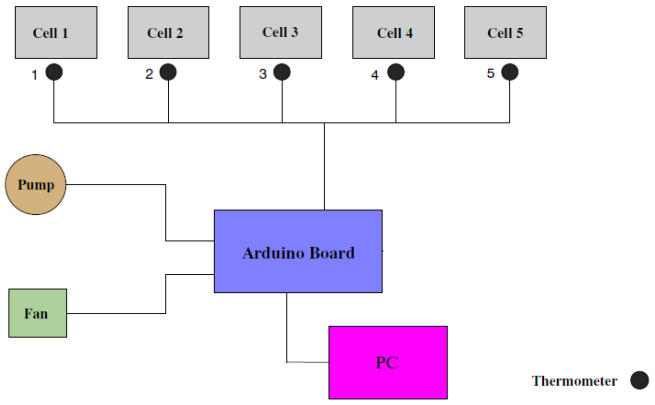
در این آزمایش از مواد تغییرفازدهنده پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ [1] استفاده می‌شود. از مشخصات این ماده می‌توان به چگالی ۱۱۰۰ گرم بر متر معکب، محدوده‌ی دمای ذوب ۳۵ تا ۴۰ درجه سانتی گراد و شفاف بودن آن در حالت ذوب را اشاره کرد. در این آزمایش ۱۵۰۰ گرم از این مواد استفاده می‌شود.

۳- ۱- ۱۱- مدار فرمان

مدار فرمان شامل برد آردوینو و اجزای قطعات الکترونیکی دیگری مانند ترانزیستورها، خازن‌ها و مقاومت‌ها است که جهت کنترل اجزایی ازجمله سنسورهای دما، فن و پمپ به کار رفته است، همچنین این مدار فرمان از تعدادی ورودی و خروجی تشکیل شده که به اختصار می‌توان گفت ورودی‌ها ۵ عدد سنسور اندازه‌گیری دما و دبی سنج می‌باشد. خروجی‌ها نیز شامل پمپ و فن است که انرژی آن توسط یک منبع تغذیه ۱۲ ولتی تأمین می‌گردد. همچنین این مدار فرمان به وسیله یو اس بی به کامپیوتر متصل شده و با استفاده از نرم افزار آردوینو نتایج به دست آمده از تغییرات دما و دبی آب در آن مشاهده و ذخیره می‌شود.

۳- ۲- طرح مفهومی از کنترل سیستم خنک‌کاری و موقعیت قرارگیری دماسنج‌ها

ابتدا یک طرح شماتیکی که مشخص نماید ماژول‌های سیستم خنک‌کننده به چه صورت کنار یکدیگر قرار می‌گیرد، ترسیم می‌گردد. همانطور که در شکل۱ چیدمان طرح سیستم خنک‌کاری مشاهده می‌شود، ۵ سلول باتری در نظر گرفته شده که روی سطح هر کدام یک سنسور دما تعبیه شده، در صورت دشارژ بالا، باتری شروع با گرم شدن می‌کند و این سنسورها در هر لحظه دمای سلول‌ها را دریافت کرده و به مدار فرمان انتقال داده و سپس اطلاعات دمای هر سلول توسط مدار فرمان به رایانه در هر



شکل ۱: طراحی مفهومی از سیستم خنک‌کاری

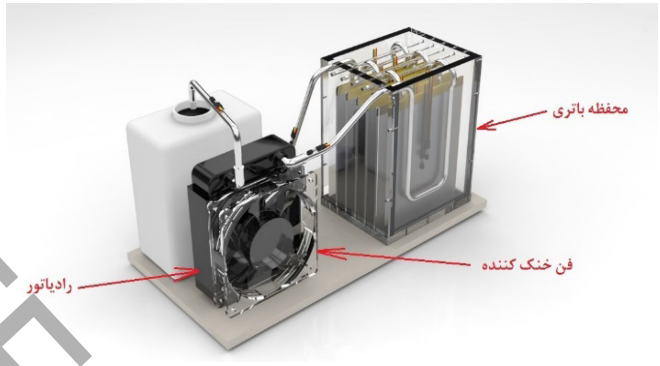
1 Poly Ethylene Glycol 1000 (PEG)

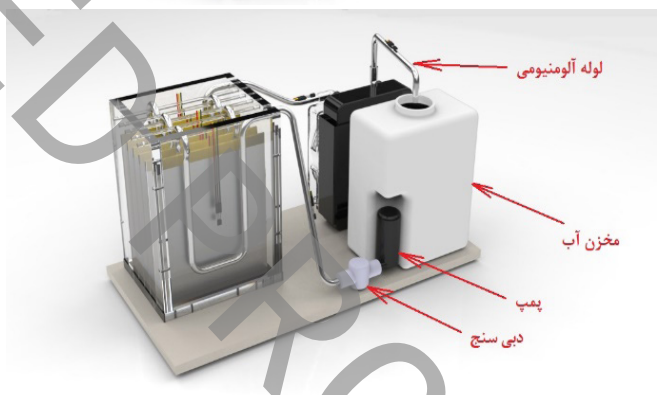
UNCORRECTED PROOF

لحظه گزارش می‌شود.

۳- ۳- روش صحه‌گذاری

با توجه به تجربی بودن پژوهش، لازم است ابتدا صحت و سلامت سنسورهای دما و دبی‌سنج مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به این موضوع ابتدا برای صحت عملکرد سنسورهای دما، همه این سنسورها را هم به صورت همزمان و هم به صورت جداگانه در ظرف‌های پر شده از آب با دماهای مختلف گذاشته (یک ظرف مخلوط آب و یخ، یک ظرف آب جوش و یک ظرف آب ۵۰ درجه سانتی گراد) و با یک دماسنج دیجیتالی مورد مقایسه قرار گرفته و پس از مشاهده نتایج، مشخص شد دماها مطابق با دماسنج دیجیتالی بوده و علاوه بر آن در بروشور این سنسورها میزان دقتشان برابر با ۰/۰۶۲۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. علاوه بر آن، جهت بررسی صحت سنسور دبی سنج، یک مخزن بیست لیتری تهیه گردید و پس از روشن کردن پمپ، دبی آب را با در نظر گرفتن زمان پرشدن مخزن مورد بررسی قرار داده و پس از مشاهده نتایج اطمینان حاصل گردید که میزان دقت این دبی‌سنج قابل قبول می‌باشد.

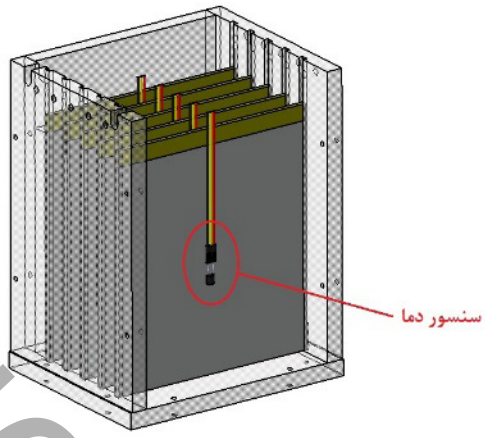




شکل ۲: معرفی اجزای تشکیل دهنده سیستم خنک کننده

۳- ۴- طراحی فیزیکی سیستم خنک‌کاری

در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ۵ عدد سلول در داخل یک محفظه با فاصله‌ای معین کنار یکدیگر قرار گرفته و بین فاصله سلول‌ها از مواد



شکل ۳: نمایش قرار گیری سنسورهای دما روی باتری‌ها

تغییرفازدهنده پر شده است و همچنین لوله‌های آب-خنک با یک آرایش خاص درون مواد تغییرفازدهنده قرار گرفته‌اند و به کمک پمپ، آب در درون لوله‌ها به صورت چرخشی به درون رادیاتور کوچک که فن خنک‌کننده روی آن قرار دارد، هدایت و سپس دوباره به داخل محفظه‌ی باتری‌ها می‌رسد. این عمل تا انتهای آزمایش همچنان تکرار می‌شود تا محفظه باتری‌ها به مقدار مناسب خنک شده و اجازه ندهد دمای سلول‌های باتری بالا رود. جهت معرفی اجزای تشکیل دهنده سیستم خنک‌کاری به ترتیب شکل زیر می‌باشد:

شکل ۳ نشان می‌دهد، روی مرکز سطح هر باتری یک سنسور قرار گرفته که دمای هر سلول از باتری را به طور جداگانه اندازه‌گیری می‌کند و هر کدام از این دماها به مدار فرمان ارسال شده و مدار فرمان علاوه بر نشان دادن میزان دمای هر سلول، در هر لحظه میانگین ۵ دما را به دست آورده و در کامپیوتر گزارش می‌کند.

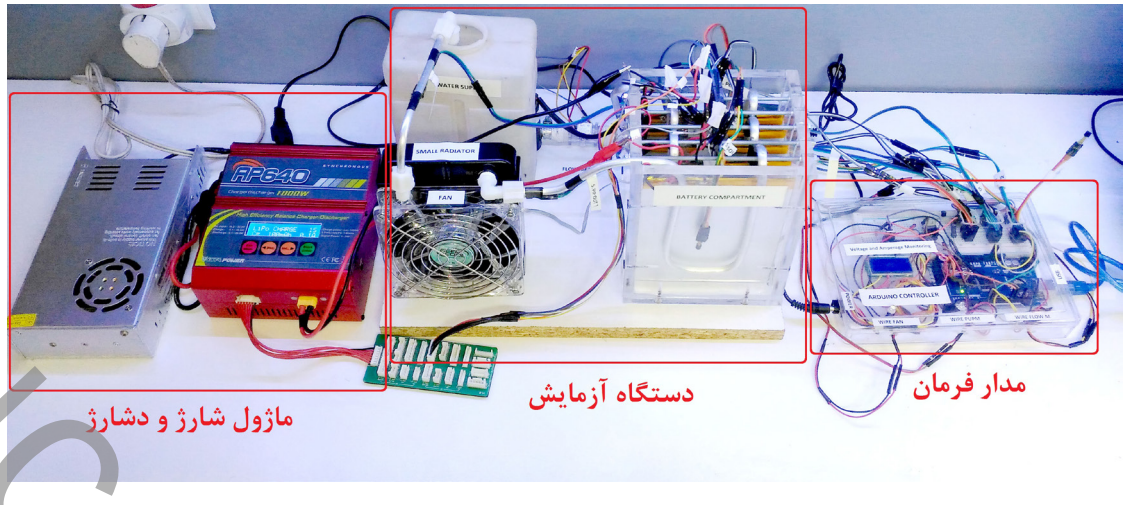
۳- ۵- ماژول شارژ و دشارژ

جهت شارژ و تخلیه بار باتری‌ها از دستگاه شارژ/ دشارژ Vista power AP۶۴۰ استفاده شده است. این دستگاه علاوه بر سایز کوچک خود، دارای توان شارژ و دشارژ بالایی است و همچنین قابلیت شارژ و دشارژ تا ۶ سلول را دارا می‌باشد. علاوه بر آن، این دستگاه مجهز به حالت توازن می‌باشد که قادر است در هنگام شارژ، ولتاژهای هر سلول نسبت به یکدیگر را به حالت توازن در آورد. جهت تغذیه، ولتاژ ورودی این دستگاه ۱۱ تا ۳۲ ولت و منبع تغذیه آن ۲۴ ولت ۲۰ آمپری است.

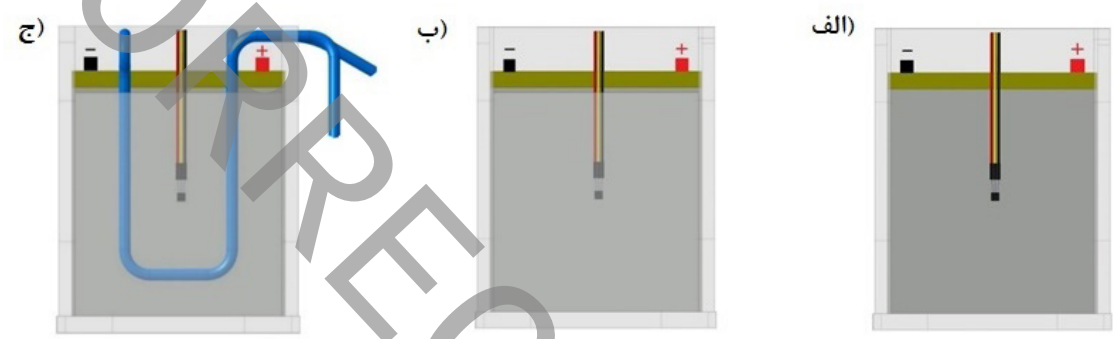
٤- انواع حالت‌های در نظر گرفته شده جهت تست و آزمایش

با توجه با پارامترهای اثرگذار سیستم خنک‌کننده، این آزمایش به سه بخش مختلف انجام خواهد شد. هر یک از این بخش‌ها در نرخ دشارژهای ۰/۹سی مورد بررسی و آزمایش قرار خواهد گرفت و نمودارهای حاصل از دما در زمان هر یک از سلول‌ها نسبت به یکدیگر در نتایج حاصل از آزمایش تجربی به دست خواهد آمد. حالت‌هایی که قرار است آزمایش انجام گیرد به قرار زیر است:

UNCORRECTED PROOF



شکل ٤: معرفی بخش‌های اصلی مربوط به آزمایش تجربی



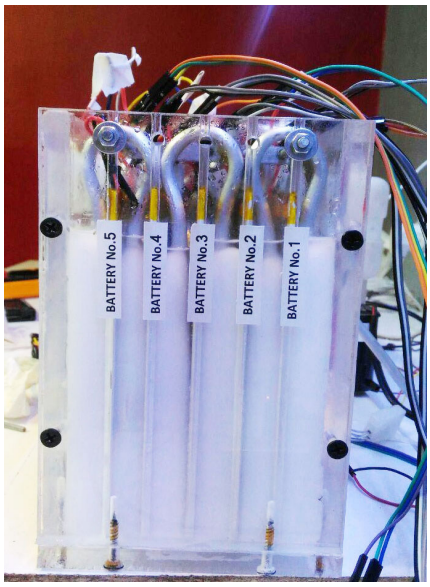
شکل ٥: الف) ماژول باتری بدون سیستم خنک‌کننده ب) ماژول باتری خنک‌کاری توسط مواد تغییرفازدهنده ج) ماژول باتری خنک‌کاری هیبرید توسط مواد تغییرفازدهنده و لوله آب–خنک

۴– ۱– حالت اول: اندازه‌گیری دمای سلول‌ها در محفظه باتری بدون در نظر گرفتن سیستم خنک‌کاری

در ابتدا می‌بایست دمای سلول‌ها را بدون سیستم خنک‌کاری اندازه‌گیری نمود تا پس از انجام حالت‌های خنک‌کاری، مشخص گردد استفاده از سیستم خنک‌کاری به چه میزان تاثیرگذار خواهد بود. در واقع، این حالت معیار مقایسه نتایج، با سایر حالت‌های خنک‌کاری می‌باشد.

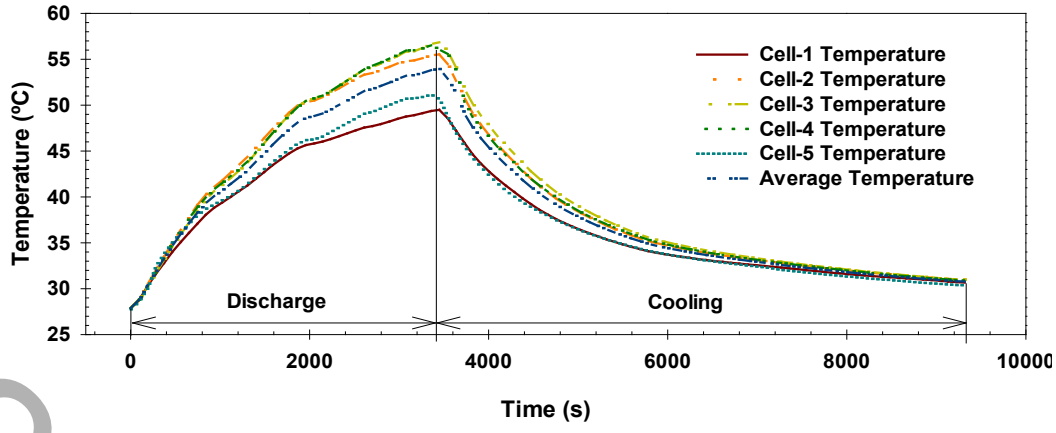
۴– ۲– حالت دوم: استفاده از مواد تغییرفازدهنده

در این حالت با استفاده از مواد تغییرفازدهنده که قابلیت ذخیره انرژی گرمایی توسط جسم به صورت نهان به هنگام تغییر فاز جسم از حالت جامد به مایع را دارد، جهت انجام آزمایشات در نظر گرفته شده است. در این آزمایش، این مواد را بدون لوله‌های خنک‌کننده در داخل محفظه باتری قرار داده به طوری که این مواد به ضخامت ۱۴ میلی‌متر کنار هر سلول از باتری قرار می‌گیرند و پس از سری شدن سلول‌ها، عملیات دشارژ روی باتری را انجام می‌گیرد. این آزمایش نشان می‌دهد مواد تغییرفازدهنده به تنهایی چه میزان در خنک‌کاری باتری‌ها می‌تواند نقش داشته باشند.



شکل ٦: نمای جانبی از محفظه باتری پر شد از مواد تغییرفازدهنده

UNCORRECTED PROOF



شکل ۷: خنک‌کاری سلول‌ها در محفظه باتری توسط گردش هوای طبیعی و بدون سیستم خنک‌کننده

۴- ۳- حالت سوم: استفاده از مواد تغییرفازدهنده و لوله‌های آب-خنک

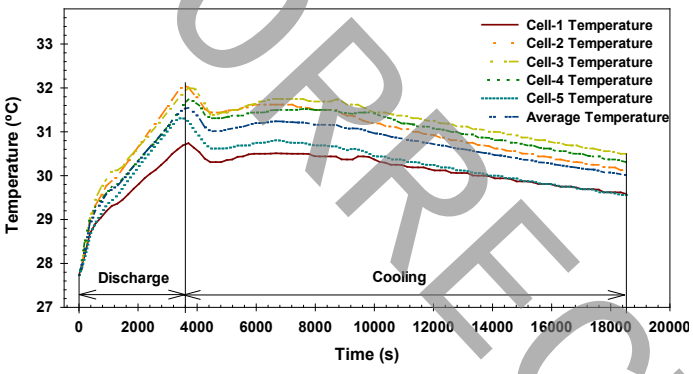
با توجه به شکل ۵ قسمت (ج)، در این آزمایش آرایش لوله با دو خم ۹۰ درجه به صورتی که لوله دو بار طول هر سلول را طی می‌کند، در درون هر یک از محفظه‌های بین سلول‌ها قرار گرفته و از ابتدای شروع آزمایش، آب در درون لوله با نرخ ۱۳۳ لیتر بر ساعت در گردش است و نقش دفع دما از مواد تغییرفازدهنده را ایفا می‌کند.

۵- نتایج و بحث

در این پژوهش سه حالت جهت آزمایش در نظر گرفته شده و هر یک از این سه حالت در شرایط یکسان از جمله دمای محیط ۲۸ درجه سانتی‌گراد، نرخ دشارژ ثابت ۰/۹ سی در مدت زمان ۵۷ دقیقه مورد آزمایش قرار گرفته است که در هر حالت به بررسی تغییرات دما در هر سلول، میانگین دمای آن‌ها و همچنین اختلاف دماهای بین سلول‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل ۷ که حالت اول آزمایش را بیان می‌کند، باتری‌ها در این حالت، بدون سیستم خنک‌کاری، توسط گردش هوای طبیعی به مدت ۵۷ دقیقه دشارژ، دمایشان تا ۵۸ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و پس از دشارژ در همان حالت، شروع به خنک شدن خودبه‌خودی می‌کند و پس از ۹۸ دقیقه سلول‌ها دمایشان به ۳۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و خنک می‌شوند. در این حالت مشاهده می‌شود که دمای سلول‌ها بسیار افزایش یافته و می‌تواند در دراز مدت صدمات جدی به باتری وارد نماید.

شکل ۸ نتایج دمای سلول‌ها در حالتی که محفظه باتری تنها از مواد تغییرفازدهنده پر شده است را نشان می‌دهد. شکل ۸ نشان می‌دهد دمای سلول‌ها نسبت به حال قبل بسیار کمتر بوده و حداکثر دمای آن به ۳۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد؛ درحالی که در حالت آزمایش قبل، بدون سیستم خنک‌کاری، دمای سلول‌ها تا ۵۸ درجه سانتی‌گراد رسیده است. بنابراین با اضافه نمودن مواد تغییرفازدهنده، ۲۶ درجه سانتی‌گراد دمای سلول‌ها کاهش یافته است. پس از مرحله‌ی دشارژ، سلول‌ها و مواد تغییر فازدهنده در معرض خنک شدن به صورت گردش هوای طبیعی قرار می‌گیرند تا دمای آن‌ها

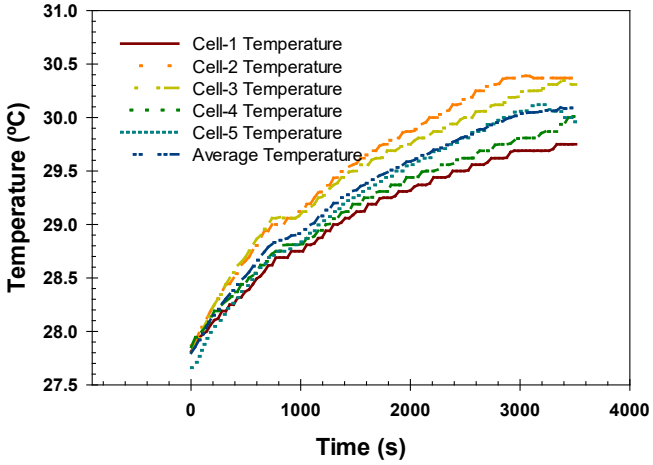


شکل ۸: خنک‌کاری سلول‌ها با استفاده از مواد تغییرفازدهنده

حدوداً به ۳۰ درجه سانتی‌گراد برسد. شکل ۸ نشان می‌دهد که زمان خنک شدن مواد تغییرفازدهنده ۲۴۸ دقیقه بوده و این زمان بسیار طولانی‌تر از حالت اول که بدون سیستم خنک‌کاری انجام گرفت، می‌باشد؛ این درحالی است که در این آزمایش دمای سلول‌ها تنها به ۳۲ درجه سانتی‌گراد رسیده است. این امر نشان می‌دهد گرمای تولیدی از سمت سلول‌ها به مواد تغییرفازدهنده رسیده و این مواد گرمای تولید شده از باتری را در خود جذب می‌نماید که اصطلاحاً به آن گرمای نهان گفته می‌شود و در نتیجه این گرمای نهان به دلیل کم بودن سطح تماس با محیط، به کندی دفع شده و در نتیجه، زمان خنک‌کاری را افزایش می‌دهد.

شکل ۹ نمودار دمای سلول‌ها در حالت خنک‌کاری به صورت هیبریدی توسط مواد تغییرفازدهنده و لوله آب-خنک استفاده شده است را نشان می‌دهد. در این حالت لوله‌های آب-خنک درون مواد تغییرفازدهنده قرار گرفته است و آب با نرخ ۱۳۳ لیتر بر ساعت از ابتدای شروع دشارژ در جریان بوده و موجب خنک‌کاری مواد تغییرفازدهنده، همزمان با گرم شدن این مواد توسط سلول‌های باتری می‌شود. همانطور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، دمای سلول‌ها در حالت دشارژ، حداکثر تا ۳۰/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و با مقایسه با حالت آزمایش قبل که تنها از مواد تغییرفازدهنده

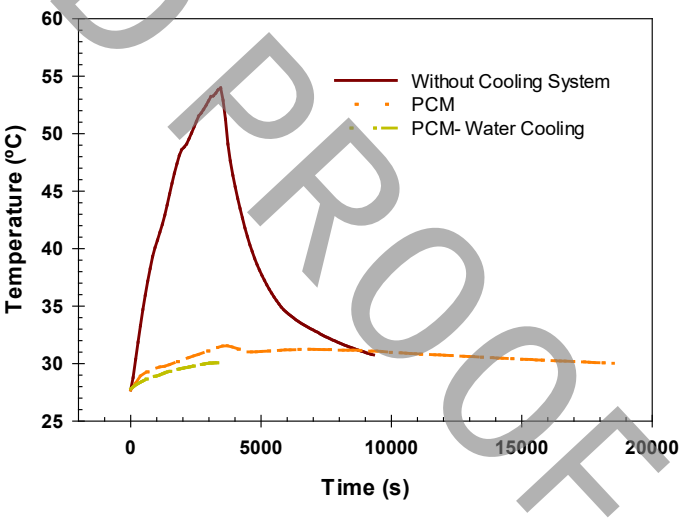
UNCORRECTED PROOF



شکل ۹: دمای سلول‌ها و استفاده از مواد تغییرفازدهنده و لوله‌های آب–خنک

جهت خنک‌کاری استفاد شده بود، ۱/۵ درجه سانتی‌گراد شاهد کاهش دما می‌باشیم. این امر نشان می‌دهد لوله‌های آب خنک می‌تواند جهت خنک نمودن مواد تغییرفازدهنده تأثیر مثبتی داشته باشند. در این آزمایش به دلیل پایین بودن دما، لزومی به خنک نمودن سلول‌ها پس از دشارژ نبوده و از خنک‌کاری پس از دشارژ، صرف نظر شده است.

شکل ۱۰ جهت مقایسه بهتر عملکرد هر یک از سه حالت‌های آزمایش ارائه شده را نشان می‌دهد. در این شکل، میانگین دماهای هر سه حالت با یکدیگر مورد مقایسه دقیق‌تری قرار گرفته شده است. نمودار حالت اول نشان می‌دهد دمای میانگین سلول‌ها بدون سیستم خنک‌کاری به ۵۵ درجه سانتی‌گراد نزدیک شده است و نمودار حالت دوم نشان می‌دهد مواد تغییرفازدهنده به تنهایی تا حد زیادی از افزایش دمای باتری‌ها جلوگیری کرده است و دمای میانگین باتری‌ها در این حالت به ۳۲ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۰: مقایسه میانگین تغیرات دمای سلول‌ها در سه حالت آزمایش‌های انجام شده

رسیده است، همچنین می‌توان گفت، مواد تغییرفازدهنده تا حد زیادی توانسته حرارت تولید شده از باتری را در درون خود جذب نماید؛ البته جذب دما در این مواد که در دشارژهای دراز مدت و طولانی که با تشدید افزایش دمای باتری اتفاق می‌افتد، با ذوب شدن و تغییر فاز آن مواجه خواهد بود که در این صورت پس از ذوب شدن بخش اعظم این مواد، عملکرد خنک‌کاری آن از بین می‌رود و دمای آن با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد و بنابراین وجود یک سیستم خنک‌کاری دیگر جهت دفع گرمای نهان مواد تغییرفازدهنده، لازم و حیاتی است. در نمودار سوم شکل ۱۰ که از روش هیبرید آب خنک و مواد تغییرفازدهنده استفاده شده، مشاهده می‌شود که میانگین دمای باتری‌ها تنها به ۳۰/۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است، البته این به منزله‌ی آن نیست که تأثیر خنک‌کاری شبکه‌های آب خنک نسبت به حالت قبل تنها ۱/۵ درجه سانتی‌گراد است، بلکه آب خنک توانسته علاوه بر کاهش دمای باتری‌ها، گرمای نهان مواد تغییرفازدهنده را نیز دفع کند. در این نمودار حالت سوم ملاحضه می‌شود که به دلیل پایین بودن دما نیازی به خنک‌کاری پس از دشارژ نبوده است. در جدول ۲ مقایسه بین پارامترهای مختلف در سه حالت آزمایش‌های انجام گرفته را توصیف می‌کند.

٦- جمع بندی و نتیجه گیری

از نتایج حاصل می‌توان به این نتیجه رسید که باتری‌های لیتیومی در دشارژهای بالا و بدون هیچ‌گونه خنک‌کاری تا چه اندازه می‌توانند از خودشان حرارت تولید کنند و این مسئله در عملکرد باتری‌ها در دراز مدت می‌تواند بسیار تاثیرگذار بوده و موجب کوتاه شدن عمر و دیگر عوامل مخرب در این نوع باتری‌ها گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که اختلاف دمای بین سلول‌ها، مخصوصاً در حالت اول یعنی بدون درنظر گرفتن سیستم خنک‌کننده، بسیار زیاد بوده ولی با اضافه نمودن سیستم خنک‌کننده این اختلاف دما به حداقل رسیده است.

در آزمایش دیگری که توسط مواد تغییرفازدهنده صورت گرفت، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده بدون هیچ‌گونه مصرف انرژی می‌تواند گرمای تولیدی توسط باتری‌ها را، تا حد زیادی در خود حفظ کرده و همچنین اختلاف دماهای سلول‌ها نسبت به یکدیگر را نیز به خوبی کنترل کند. همچنین پس از دشارژ کامل، روند خنک شدن مواد تغییرفازدهنده در حالت گردش هوای طبیعی به مراتب بسیار پایین‌تر بوده و این به دلیل گرمای نهان مواد تغییرفازدهنده می‌باشد؛ در این صورت وجود یک سیستم خنک‌کننده فعال جهت کنترل دمای مواد تغییرفازدهنده بسیار حائز اهمیت می‌تواند باشد.

در آزمایش‌های دیگری که به صورت ترکیبی از مواد تغییرفازدهنده و لوله‌های آب–خنک استفاده شد، می‌توان نتیجه گرفت که لوله‌های آب–خنک حداقل در ابتدای کار، نمی‌توانند تأثیر زیادی داشته باشند، ولی در دراز مدت و در طی افزایش دمای مواد تغییرفازدهنده، استفاده از لوله‌های آب–خنک می‌تواند گزینه مناسبی جهت دفع حرارت از مواد تغییرفازدهنده باشند.

UNCORRECTED PROOF

جدول ۱: مقایسه عددی میانگین تغییرات دمای سلول‌ها (با عدم قطعیت ۰/۰۷ درجه سانتی‌گراد) در سه حالت آزمایش‌های انجام شده

پارامتر	بدون خنک‌کاری	موادتغییرفازدهنده	مواد تغییرفازدهنده – لوله آب–خنک
دمای اولیه محیط	۲۸	۲۸	۲۸
نرخ دشارژ	۰/۹ C	۰/۹ C	۰/۹ C
زمان آزمایش	۵۷ دقیقه	۵۷ دقیقه	۵۷ دقیقه
ماکزیمم دمای باتری در طول شارژ	۵۷ (C°)	۳۲ (C°)	۳۰/۴ (C°)
ماکزیمم دمای میانگین باتری در طول شارژ	۵۴ (C°)	۳۱/۵ (C°)	۳۰ (C°)
زمان خنک کاری پس از دشارژ	۹۸ دقیقه	۲۴۸ دقیقه	–
میزان جریان مصرفی جهت خنک کاری	–	–	۱/۲–۱/۴ (Ah)
ماکزیمم میزان انرژی مصرفی جهت خنک کاری	–	–	۱۶/۸ (W)
سرعت جریان آب در لوله	–	–	۱۳۳ (لیتر بر ساعت)
بالاترین اختلاف دمای بین سلول‌ها	۷ (C°)	۱/۴ (C°)	۱ (C°)

مراجع

[1] K.T. Chau, Y.S Wong, C.C Chan, "An overview of energy sources for electric vehicles" In Energy Conversion and Management, vol. 40, pp. 1021-1039, 1999.

[2] M. Ehsani, Y. Gao, A. Emadi, Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles, CRC press, 2009.

[3] J. Jaguemont, L. Boulon, Y. Dubé, "A Comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures," In Applied Energy, vol. 164, no. 0306-2619, pp. 99-114, 2016.

[4] Z. Rao, S. Wang, "A review of power battery thermal energy managemen," In Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 4554-4571, 2011.

[5] R. Zhao, S. Zhang, Jie Liu, Junjie Gu, "A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system," In Journal of Power Sources, vol. 299, no. 0378-7753, pp. 557-577, 2015.

[6] J. Zhao, Z. Rao, Y. Li, "Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery," In Energy Conversion and Management, vol. 103, pp. 157-165, 2015.

[7] S. Al-Hallaj, J. Selman "Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications," In Journal of Power Sources, vol. 110, no. 2, pp. 341-348, 2002.

[8] N. Jankowski, F. Patrick McCluskey, "A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering," In Applied Energy, vol. 113, pp. 1525-1561, 2014.

[9] A. Mills, S. Al-Hallaj, "Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs," Journal of Power Sources, vol. 141, no. 2, pp. 307-315. 1 2005.

[10] M. Kenisarin, "High-temperature phase change materials for thermal energy storage," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 3, pp. 955-970, 2010.

[11] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 2, pp. 615-628, 2010.

[12] R. Sabba, R. Kizilel, J.R. Selman, S. Al-Hallaj, "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," Power Sources, vol. 182, no. 2, pp. 630-638, 2008

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. Hekmat, G.R. Molaeimanesh, Experimental Investigation on the Performance of Hybrid Thermal Management System Based on Water Cooling and Phase Change Material for a Lithium Battery Module of an Electric Vehicle, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(4) (2019) 1-10.

DOI:

UNCORRECTED PROOF

UNCORRECTED PROOF