



بررسی تاثیر اضافه نمودن نانوذرات تیتانیا به ماده تغییر فاز دهنده سیستم ترکیبی خنک کاری باتری با شار حرارتی ثابت

محسن ملکی پور^۱، مجید سبزو شانی^{۱*}، احسان هوشفر^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹-۰۵-۱۵

بازنگری: ۱۳۹۹-۰۹-۱۶

پذیرش: ۱۳۹۹-۱۰-۰۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹-۱۱-۱۱

کلمات کلیدی:

انتقال حرارت

نانوپارافین

باتری های لیتیوم-یونی

روش تجربی

خلاصه: افزایش دمای باتری های لیتیوم-یون به عنوان یک چالش شناخته شده است. در این تحقیق، با تکمیل سیستم مدیریت حرارتی ترکیبی، تاثیر اضافه نمودن ذرات نانوتیتانیا به ماده تغییر فاز دهنده پارافین روی عملکرد خنک کاری باتری در دو حالت توان حرارتی ثابت ۴/۵ و ۱۴ وات بررسی شده است. سیستم ترکیبی شامل نانوپارافین و فوم فلزی به همراه دو نوع سیال عامل آب و هوا است. برای سیال عامل هوا، در حالت های پارافین خالص و نانوپارافین با چهار درصد حجمی نانوذرات ۱، ۲، ۳ و ۴، دمای باتری به ترتیب برابر $56/2^{\circ}\text{C}$ ، $51/8^{\circ}\text{C}$ ، $50/7^{\circ}\text{C}$ ، $49/3^{\circ}\text{C}$ و 48°C بدست آمده است. از بین موارد بررسی شده، حالت نانوپارافین ۴ درصد حجمی بیشترین کاهش دمای باتری داشته که نسبت به حالت پارافین خالص، حدودا ۱۷٪ است. در سیستم با سیال عامل آب و در عدد رینولدزهای ۴۲۰، ۶۰۰ و ۷۲۰، با استفاده از فوم مسی و نانوپارافین، باتری به دمای پایدار به ترتیب 48°C ؛ 46°C و 44°C رسیده که در مقایسه با حالت پارافین خالص، باعث کاهش دما به مقدار ۱۱٪، ۱۲٪ و ۱۲/۵٪ شده است. لذا با توجه به کم بودن ضریب هدایت حرارتی پارافین، افزودن نانوذرات باعث افزایش نرخ انتقال حرارت شده و گزینه مناسبی برای سیستم ترکیبی می باشد.

۱- مقدمه

را در محدوده مناسب داشته باشد، بلکه باید بتواند بیشینه اختلاف دما درون هر سلول باتری را در حداقل مقدار خود نگه دارد تا از تخریب سلول جلوگیری کند [۲].

عملکرد مطلوب باتری های لیتیوم-یون، محدود به شرایط دمایی باتری می باشد. با توجه به توصیه های تولیدکنندگان این نوع از باتری ها، دمای مطلوب محیط کارکرد باتری در حین تولید انرژی بین ۰ تا ۴۵ درجه سلسیوس است و در هر صورت نباید از محدوده ایمن ۶۰ درجه سلسیوس فراتر رود. بر این اساس محققان تلاش کرده اند تا با ارائه سیستم های متنوع برای خنک کاری این نوع باتریها به این مشکل مهم غلبه کنند. به منظور برآورده کردن این شرایط مدیریت حرارتی و قراردادن باتری در شرایط ایمن، از استراتژی های گوناگونی

باتری های لیتیوم-یونی، به خاطر بالا بودن ظرفیت حرارتی، چرخه عمر طولانی و نرخ تخلیه خودبه خودی پایین، به طور گسترده ای در صنایع و بخصوص در خودروهای الکتریکی به کار گرفته شده اند. اما موضوع پایداری حرارتی شامل چالش هایی نظیر ظرفیت تخریب، فرار حرارتی و حتی انفجار بر اثر گرمای بیش از حد و توزیع حرارتی غیریکنواخت باعث بروز مشکلات متعددی در استفاده از آنها شده است. لذا استفاده از سیستم مدیریت حرارتی باتری مناسب که قادر به برآورده کردن شرایط لازم باشد از نکات ضروری در طراحی این نوع باتری می باشد [۱]. با توجه به موارد ذکر شده، سیستم انتقال حرارت و خنک کاری باتری نه تنها باید توانایی نگهداری دمای مجموعه باتری ها

* نویسنده عهده دار مکاتبات: spooshan@kashanu.ac.ir



از قبیل خنک‌کاری با هوا [۳]، خنک‌کاری با مایع [۴]، لوله حرارتی^۱ [۵] و استفاده از مواد تغییرفازدهنده^۲ [۶] استفاده شده‌است.

سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری به دو نوع فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شوند. در سیستم فعال، از جریان اجباری سیال خنک‌کننده مانند هوا، آب و یا نانو سیال و در سیستم غیرفعال از محیط پیرامون برای خنک‌کاری استفاده می‌شود. هوا، مایعات، مواد تغییرفازدهنده و یا ترکیبی از آن‌ها می‌توانند به عنوان واسط انتقال حرارت در سیستم غیرفعال استفاده شوند. هر کدام از این موارد نقاط قوت و ضعف خود را داشته و از آنجایی که بر روی وزن، اندازه و هزینه تمام شده سیستم تأثیر می‌گذارند، باید مطابق با نیازهای وسیله الکتریکی مورد استفاده قرار گیرند. سیستم خنک‌کاری بر پایه هوا معمولاً ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر از سیستم بر پایه مایعات بوده ولی اثربخشی آن نیز کم‌تر است.

برای بهبود انتقال حرارت و خنک‌کاری باتریهای لیتیوم-یون در سیستم غیرفعال باتری، استفاده از مواد تغییرفازدهنده و نیز فومهای فلزی^۳ و ترکیب آنها توسط برخی از محققان پیشنهاد شده‌است [۷-۸]. مواد تغییرفازدهنده با دارا بودن گرمای نهان بالا می‌توانند گرما را در حین تغییر فاز جذب کرده و افزایش دما را به تأخیر انداخته و یا شیب آن را کاهش دهند. از این رو این مواد برای استفاده در سیستم‌های مدیریت حرارتی توجه زیادی را به سمت خود جلب کرده‌اند. پارافین یکی از متداول‌ترین مواد تغییرفازدهنده می‌باشد که از جمله ویژگی‌های آن عملکرد حرارتی پایدار، گرمای نهان بالا، بازه دمای ذوب گسترده و غیرسمی بودن است که این ماده را تبدیل به گزینه مناسب برای سیستم مدیریت گرمایی غیرفعال باتری‌های لیتیوم-یون کرده‌است [۹]. با این حال، ضریب هدایت حرارتی کم یک اشکال عمده است که باعث کاهش سرعت ذخیره‌سازی گرما و بازیابی در طی فرآیند ذوب و تبلور می‌شود. با توجه به پایین بودن ضریب هدایت حرارتی مواد تغییرفازدهنده، مواد خالص تغییرفازدهنده به تنهایی توانایی کنترل دما در سیستم مدیریت حرارتی را دارا نمی‌باشند. محققان نشان دادند که کاهش مقاومت حرارتی جابجایی و افزایش ضریب هدایت حرارتی مواد تغییرفازدهنده باعث کاهش دمای باتری می‌شود [۱۰]. یکی از روش‌های جدید برای افزایش هدایت

1 Heat pipe
2 Phase change materials
3 Metal foam

حرارتی مواد تغییرفازدهنده، افزودن نانوذرات به این مواد می‌باشد. به عنوان نمونه، الجافی و لعدی [۱۱] در مطالعه‌ای به بررسی افزودن ذرات نانو فیبر کربنی به مواد تغییرفازدهنده پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش درصد حجمی نانوذرات، ظرفیت گرمایی کاهش و نرخ خنک‌کاری افزایش می‌یابد. در تحقیقی دیگر، بحیرایی و همکاران [۱۲] به افزایش هدایت حرارتی مواد تغییرفازدهنده خالص با استفاده از افزودن نانوذرات به این مواد پرداختند. روفوس و همکاران [۱۳] نیز در مطالعه‌ای تجربی به بررسی تأثیر افزودن نانوذرات به مواد تغییرفازدهنده با استفاده از سه نوع نانو ذره شامل CuO , TiO_2 در سیستم تقطیر خورشیدی پرداخته و عملکرد مثبت استفاده از این نوع مواد را گزارش کردند. ونگ و همکاران [۱۴] عملکرد مواد تغییرفازدهنده را برای باتری لیتیوم-یون بررسی کردند و کاهش ۲۰ درصدی در بیشینه دمای باتری را در شرایط تخلیه شارژ مشاهده نمودند. محمود و پارک [۱۵] سیستم خنک‌کاری باتری لیتیوم-یون با جریان هوای رفت و برگشتی را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که سیستم رفت و برگشتی، توزیع دمای یکنواخت‌تری را در مقایسه با سیستم یک‌طرفه فراهم می‌آورد. پارک [۱۶] سیستم خنک‌کاری مجموعه‌ای از باتری‌ها شامل ۳۶ باتری مستطیلی و ۳۷ مسیر خنک‌کاری با جریان اجباری هوا را به صورت عددی مطالعه کرد و به این نتیجه رسید که استفاده از سیستم تهویه مطبوع می‌تواند توان مورد نیاز فن‌ها را کاهش دهد، هر چند به دی جریان زیادی از هوا برای خنک‌کاری باتری‌ها نیاز می‌باشد.

سیستم‌های خنک‌کاری باتری بر پایه هوا به شدت به دمای هوای پیرامون وابسته بوده و در شرایط کاری شدید با دمای بالا و نرخ تخلیه شارژ بالا این سیستم‌ها قادر به کنترل مناسب دمای باتری نمی‌باشند [۱۷]. همچنین باتوجه به پایین بودن ظرفیت حرارتی سیستم‌های بر پایه هوا، از نظر ایجاد توزیع دمای یکنواخت روی سطح باتری و یا میان سلول‌های باتری نیز عملکرد مناسبی ندارند [۱۸]. لذا برخی از محققان به استفاده از سیستم‌های بر پایه مایعات پرداخته‌اند.

مطالعات زیادی بر روی سیستم‌های خنک‌کاری باتری بر پایه مایعات انجام شده‌است. فنگ و همکاران [۱۸] با ترکیب کردن سیستم خنک‌کاری با جریان اجباری هوا و سیستم تبخیر آب، روند خنک‌کاری باتری‌های استوانه‌ای را به صورت تجربی بررسی کردند و موفق شدند دمای باتری را در دمای کم‌تر از ۶۰ درجه سلسیوس نگه‌دارند. لیان

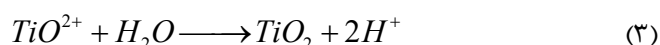
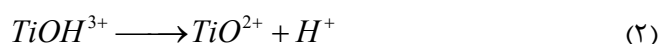
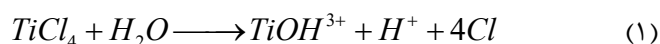
و همکاران [۱۹] با انجام تحقیقات عددی و تجربی، عملکرد سیستم خنک‌کاری باتری‌های لیتیوم-یون منشوری را با استفاده از آب و کانال‌های کوچک خنک‌کننده مطالعه کردند. نتایج این کار تحقیقاتی در دماهای مختلف و نرخ‌های تخلیه شارژ متفاوت نشان داد که نواحی اطراف الکترودها، دمای بیشتری نسبت به نواحی مرکزی باتری دارند. تأثیر استفاده از سیستم‌های مختلف در خنک‌کاری باتری لیتیوم-یون توسط لیانگ و همکاران [۲۰] مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها اثر دما و دبی سیال خنک‌کننده، دمای محیط پیرامون و عملکرد گذرای سیستم خنک‌کاری لوله گرمایی را بررسی کردند و نشان دادند که روش خنک‌کاری متناوب می‌تواند با مصرف انرژی کم‌تر، عملکرد حرارتی مشابه با حالت خنک‌کاری به‌صورت پیوسته را ایجاد نماید و از این‌رو جایگزین مناسبی برای روش‌های خنک‌کاری پیوسته می‌باشد. همچنین آن‌ها دریافتند که دبی سیال خنک‌کننده دارای حد بیشینه در خنک‌کاری باتری می‌باشد [۲۰]. برخی از محققان برای افزایش نرخ انتقال حرارت در بخش فعال سیستم مدیریت حرارتی به جای سیال آب، از نانوسیال بر پایه آب استفاده کردند و نشان دادند که در حالت کلی استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل، می‌تواند باتری را در مقایسه با سیال پایه آب خنک‌تر نماید، هرچند که افزایش توان پمپ به عنوان نقطه ضعف این روش شناخته می‌شود [۲۱-۲۲]. کیانی و همکاران [۲۱] در مطالعه‌ای تجربی و عددی به طراحی سیستم ترکیبی مدیریت حرارتی پرداختند. سیستم طراحی‌شده شامل ترکیب پارافین به عنوان ماده تغییرفازدهنده، فوم مسی به عنوان سیستم غیرفعال و استفاده از نانوسیال آلومینا به عنوان سیال عامل در بخش سیستم فعال می‌باشد. نتایج آنها در عددهای رینولدز و توان‌های حرارتی مختلف نشان داد که استفاده از نانوسیال آلومینا در مقایسه با آب، باعث کاهش دمای باتری و نیز به تأخیر افتادن محدوده زمانی ذوب پارافین شده‌است. همچنین مشایخی و همکاران [۲۲] برای بخش فعال سیستم ترکیبی، نانوسیال و برای بخش غیرفعال آن، پارافین و فوم مسی را در میکروکانال‌های تعبیه‌شده بکاربردند و تأثیر مثبت این سیستم ترکیبی در مدیریت حرارتی باتری را گزارش کردند. به‌رحال علی‌رغم این که سیستم‌های خنک‌کاری با مایع از سیستم‌های بر پایه هوا کارآمدتر می‌باشند، این سیستم‌ها عموماً سنگین‌تر و پرهزینه‌تر نیز می‌باشند و همچنین هزینه‌های

نگهداری بیش‌تری نیز به مصرف‌کننده تحمیل می‌کنند. یکی از ویژگی‌های منفی پارافین، ضریب هدایت حرارتی پایین آن است که محققان را به سمت استفاده از موادی با هدایت حرارتی بالا همچون فوم‌های فلزی و نانوذرات به همراه پارافین ترغیب کرده‌است تا بتوانند هدایت حرارتی کل ماده را بالا ببرند [۲۳]. با توجه به تکنولوژیهای در دسترس برای خنک‌کاری باتریهای لیتیوم-یون، استفاده از سیستمهای ترکیبی به عنوان یک گزینه جدید مورد توجه قرار گرفته‌است. محرابی و همکاران [۲۴] سیستم ترکیبی فوم فلزی مسی با ماده تغییرفازدهنده را برای بخش غیرفعال و جریان جابجایی اجباری با سیال عامل هوا برای بخش فعال سیستم بکار بردند و نشان دادند که استفاده از سیستم فوم مسی با ماده تغییرفازدهنده می‌تواند دمای سطح باتری را نسبت به حالت عدم استفاده از آن، بیشتر کاهش دهد. رنجبران و همکاران [۲۵] تأثیر استفاده از فوم‌های مسی با درصد‌های مختلف بر روی خنک‌کاری باتری را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که استفاده از فوم مسی هدایت حرارتی ترکیب متشکل از ماده تغییرفازدهنده و فوم فلزی را افزایش داده‌است، اما استفاده از فوم فلزی با درصد بالا تأثیر منفی بر روی روند خنک‌کاری می‌گذارد. در مطالعه‌ای تجربی توسط ژانگ و همکاران [۲۶] سیستم خنک‌کاری باتری با استفاده از ترکیب گرافیت گسترده و پارافین بدون سیستم خنک‌کاری فعال مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج کار آن‌ها برای شرایط عملکردی متفاوت نشان داد که این سیستم می‌تواند افزایش دمای باتری در حین تخلیه شارژ را در محدوده ایمن نگه‌دارد ولی موجب بیشینه اختلاف دمای ۵ درجه سلسیوسی میان سلول‌های باتری می‌شود. اگرچه گرمای نهان ذوب بالای پارافین ویژگی مهمی برای سیستم خنک‌کاری غیرفعال است ولی فاز مایع پارافین، اثر خنک‌کاری کارآمدی نداشته و قابلیت کنترل دمای باتری به‌خصوص در نرخ‌های تخلیه زیاد را ندارد. بنابراین برای کارکرد با نرخ تخلیه بالا و برای طولانی مدت، باید از ترکیب سیستم‌های فعال و غیرفعال برای کنترل افزایش دمای باتری استفاده کرد. لینگ و همکاران [۲۷] سیستم خنک‌کاری با جابجایی اجباری هوا را با سیستم غیرفعال شامل مواد تغییرفازدهنده ترکیب کردند تا بتوانند مشکل گرم‌شدن بیش از حد ایمن در باتری‌های استوانه‌ای لیتیوم-یون را حل کنند. نتایج عددی و تجربی آن‌ها نشان داد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده، به تنهایی پاسخگوی کنترل دمای باتری در

۲-۱- آماده‌سازی کامپوزیت ماده تغییرفازدهنده با فوم مسی

پارافین به‌کاررفته در این آزمایش از نوع بلوکی با دمای ذوب ۴۲ تا ۴۴ درجه سلسیوس با چگالی ۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، گرمای نهان ذوب ۲۴۹ کیلوژول بر کیلوگرم، با ترکیب شیمیایی مخلوط نمک و هیدروکربن اشباع‌شده، رنگ سفید مات، بدون بو، با اسیدیته خنثی، غیرقابل حل در آب و غیرسمی می‌باشد که از شرکت مرک^۱ آلمان خریداری شده‌است.

برای تهیه ناذرات تیتانیا و با روش واکنش هیدرولیز، ۱ میلی‌لیتر $TiCl_4$ به ۲۰ میلی‌لیتر محلول هیدروژن کلراید چکیده می‌شود و در یک حمام آب یخ، بهم زده می‌شود. سپس ۲ میلی‌لیتر محلول آمونیاک برای مصرف بیشتر هیدروژن کلراید به مخلوط اضافه می‌شود و مخلوط به مدت سی دقیقه در دمای اتاق هم‌زده می‌شود. پس از آن، درجه حرارت مخلوط به ۹۰ درجه سلسیوس افزایش یافته و به مدت ۶۰ دقیقه هم‌زده می‌شود. محلول آمونیاک به داخل مخلوط چکیده می‌شود تا مقدار پی‌اچ آن به ۶ برسد. بدون هم‌زدن و گرم کردن، این مخلوط به طور طبیعی در حدود ۸ ساعت در دمای اتاق خنک می‌شود. مخلوط پس از واکنش توسط آب مقطر رقیق شده، فیلتر شده و به طور مکرر شسته می‌شود تا زمانی که شستشوها حضور Cl^- را نشان ندهد. جامد تمیزشده جمع‌آوری و در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت خشک می‌شود که پودر خشک شده، شامل نانوذرات TiO_2 می‌باشد. واکنش‌های شیمیایی آن به صورت زیر می‌باشند:



نانوذرات توزیع‌شده در پارافین، نانوذرات اکسید تیتانیوم با میانگین اندازه ۲۰ nm می‌باشد. نانوذرات ساخته‌شده به پارافین اضافه شده و این مخلوط به مدت سی دقیقه در دمای ۶۵ درجه سلسیوس بطور کامل هم زده شده و به تدریج خنک می‌شود تا توزیع یکنواخت نانوذرات در پارافین حاصل شود.

از دستگاه KD2 با دقت اندازه‌گیری $W/(mK) \pm 0.1$ برای

محدوده ایمن نمی‌باشد ولی با استفاده از سیستم ترکیبی، خنک‌کاری باتری بهبود یافته و باتری قادر است در محدوده دمایی مجاز عمل کند. ژائو و همکاران [۲۸] خنک‌کاری باتری استوانه‌ای لیتیوم-یون را با استفاده از مواد تغییرفازدهنده و فوم مسی به همراه سیستم خنک‌کاری فعال به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند و کاهش ۱۴ درجه سلسیوسی در کاهش دمای بیشینه باتری را با استفاده از سیستم ترکیبی مشاهده کردند.

مرور مطالب بالا نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های ترکیبی فعال و غیرفعال می‌تواند در مدیریت حرارتی باتریهای لیتیوم-یون موفق عمل کند. با این وجود، اضافه‌نمودن نانوذرات به مواد تغییرفازدهنده و تاثیر آن روی کاهش دمای باتری در این سیستم‌های ترکیبی تحقیقی انجام نشده‌است. لذا در این پژوهش یک سیستم ترکیبی مدیریت حرارتی شامل نانوذرات اضافه‌شده به پارافین (نانوپارافین) برای خنک‌کاری باتری لیتیوم-یون که توسط مراجع [۲۱-۲۲ و ۲۴] معرفی شده، توسعه داده شده‌است. در مطالعه حاضر، سیستم خنک‌کاری ترکیبی با استفاده از تلفیق سیستم خنک‌کاری فعال (با دو نوع سیال عامل هوا و آب) و سیستم غیرفعال (شامل نانو-پارافین و فوم مسی) به‌صورت تجربی بررسی شده‌است تا اثر نانوپارافین روی عملکرد سیستم ترکیبی مشخص شود. برای تهیه نانوپارافین، نانو ذرات تیتانیا در درصدهای حجمی مختلف در پارافین بطور کاملاً یکنواخت توزیع شده‌است. به منظور مشخص نمودن تاثیر نانوپارافین تهیه‌شده، سیستم ترکیبی در شرایط مختلف عملکردی شامل چندین عدد مختلف رینولدز جریان سیال عامل در کانال، دو توان حرارتی مختلف و ثابت و نیز درصدهای مختلف حجمی نانوذرات توزیعی در پارافین بررسی می‌شود.

۲- مجموعه آزمایشگاهی

سیستم ترکیبی مورد استفاده در این تحقیق توسعه یافته سیستم ترکیبی معرفی‌شده توسط مراجع [۲۱-۲۲] می‌باشد. این تحقیق در آزمایشگاه نانوسیالات دانشگاه تهران انجام شده‌است. نحوه ترکیب فوم مسی با پارافین خالص مشابه مراجع [۲۱-۲۲] می‌باشد که از این روش برای توزیع نانوپارافین در فوم مسی نیز استفاده شده‌است. چگونگی توزیع ناذرات آلومینا در پارافین نیز در ادامه توضیح داده شده‌است.



شکل ۱. حمام حرارتی

Fig. 1. Thermal Bath



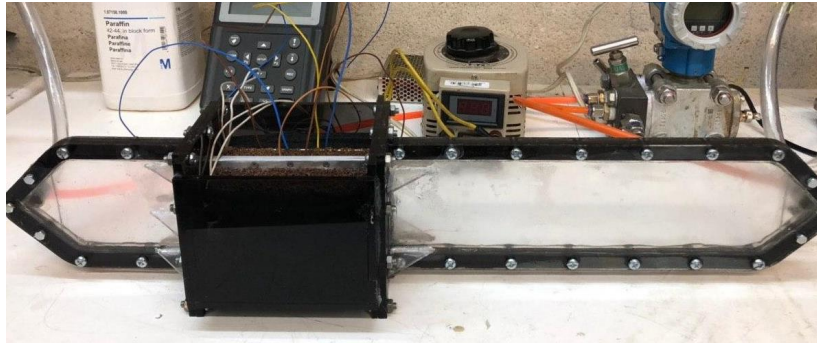
شکل ۲. نمایی از گرمکن کتابی مورد استفاده در آزمایش

Fig. 2. Schematic of plate heater using in the experiment

اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی استفاده شده‌است. روش کار این دستگاه به این صورت می‌باشد که با عبور جریان الکتریکی از یک سیم نازک و ایجاد حرارت و آنالیز دمایی نمونه، ضریب هدایت حرارتی نمونه بدست می‌آید. ضریب هدایت حرارتی پارافین در فاز جامد و مایع به ترتیب برابر 0.2 و 0.317 وات بر متر بر کلون بدست آمده‌است که مطابق نتایج مراجع قبلی از جمله نتایج مشایخی و همکاران [۲۲] می‌باشد. طبق دستورالعمل گفته‌شده برای این محصول، در هنگام ذوب‌کردن و تزریق آن درون مجموعه، نباید دمای آن از 80 درجه سلسیوس تجاوز کند. برای این منظور از حمام آب گرم مطابق شکل ۱ در دمای 70 درجه سلسیوس استفاده شده‌است. از حمام دما ثابت برای ثابت‌نگه‌داشتن دمای سیال ورودی، دستیابی به دمای مختلف از 20 تا 90 درجه سلسیوس برای کالیبره‌کردن ترموکوپل‌ها و همچنین ذوب‌کردن پارافین در دمای 70 درجه سلسیوس استفاده شده‌است. دقت این دستگاه در کاتالوگ شرکت سازنده مقدار ± 0.5 درجه سلسیوس ذکر شده‌است.

مس و آلومینیوم از جمله مواد رایج برای ساخت فوم‌های فلزی

مس و آلومینیوم از جمله مواد رایج برای ساخت فوم‌های فلزی



شکل ۳. مجموعه سیستم مدیریت حرارتی به همراه گرمکن

Fig. 3. Set up of thermal management system with plate heater

جدول ۱. مقادیر عدم قطعیت برای پارامترهای مورد نظر در آزمایش

Table 1. Uncertainty values for the desired parameters in the experiment

پارامتر	میزان عدم قطعیت
دمای هیتر (دمای مجاز)	٪۱/۲
دبی سیال (۷۰۰ ml/min)	٪۱/۴
مقاومت هیتر	٪۰/۹
اختلاف فشار	٪۰/۷۵
توان مصرفی پمپ	٪۱/۵

باتری‌ها نگرانی زیادی را به وجود می‌آورد. این موضوعات ایمن‌سازی را عمدتاً فرار حرارتی می‌نامند. این پدیده باعث یک افزایش ناگهانی در دما تحت شرایط کاری می‌باشد. فرار حرارتی یک واکنش حرارتی غیرقابل کنترل می‌باشد که ممکن است باعث انفجار یا آتش‌سوزی در باتری شود. بنابراین، تست باتری اصلی تحت این شرایط کاری، نسبتاً خطرناک و پرهزینه می‌باشد. لذا بجای استفاده از باتری اصلی، از گرمکن حرارتی کتابی در آزمایشات استفاده شده‌است برای ساخت گرمکن حرارتی، از صفحات میکا و صفحه آلومینیومی با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر استفاده شده‌اند. ماده میکا از تماس الکتریکی جلوگیری می‌کند. در شکل ۲ نمایی از گرمکن کتابی نشان داده شده‌است.

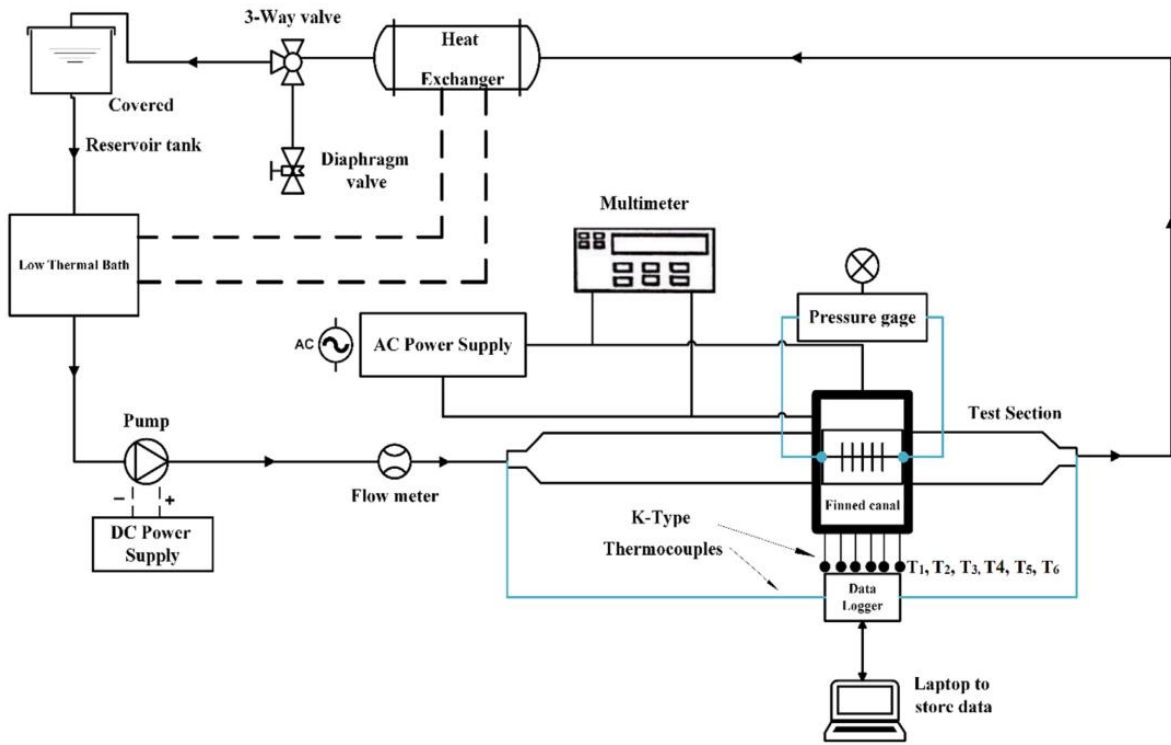
۲-۳- مجموعه دستگاه آزمایش

سیستم مدیریت حرارتی به همراه گرم‌کن‌های کتابی داخل جعبه‌ای تحت فشار نصب شده‌است تا سطح تماس میان اجزا افزایش یابد و در شکل ۳ نشان داده شده‌است. فوم مسی با ابعاد ۱۳۰*۸۰*۳۲

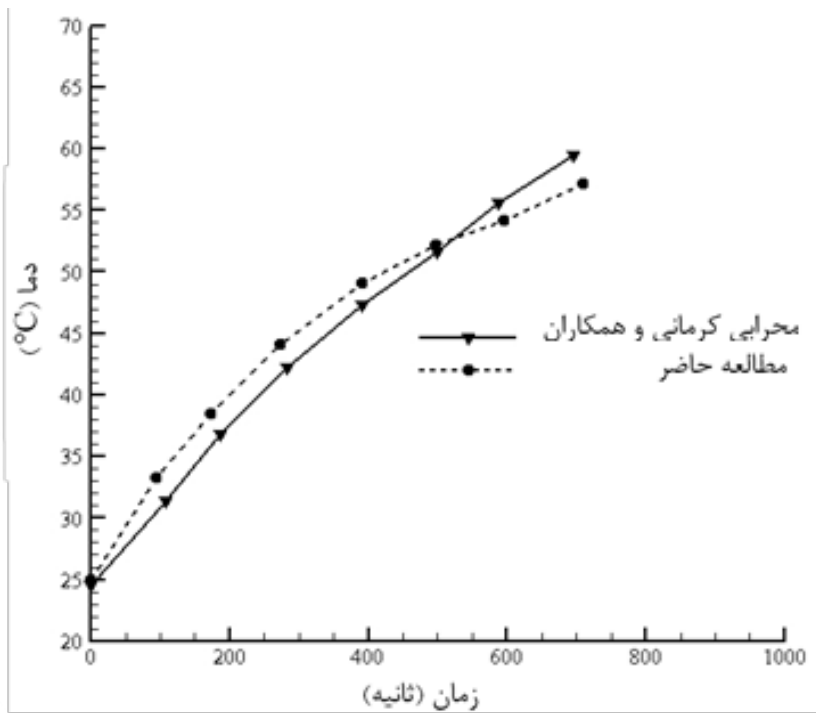
می‌باشند ولی مس خواص حرارتی بهتری نسبت به سایر مواد دارد [۲۲-۲۱ و ۲۴] که به همین علت در این مطالعه از فوم مسی استفاده شده‌است. در مطالعه حاضر از فوم مسی با تخلخل ۹۰٪ و با تعداد حفره در اینچ برابر با ۲۰، ارتفاع ۸۰ میلی‌متر، عرض ۳۲ میلی‌متر و طول ۱۳۰ میلی‌متر استفاده شده‌است. این فوم فلزی از شرکت تحقیقاتی و صنعتی نانوپوشش فلز که یکی از شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در زمینه تولید محصولات با تکنولوژی بالا در حوزه نانو تکنولوژی است و در پارک علم و فناوری دانشگاه تهران مستقر می‌باشد، تهیه شده‌است که توسط مراجع قبلی نیز [۲۱] مورد استفاده قرار گرفته‌است. از مزایای این فوم فلزی می‌توان به سبک‌بودن و بالابودن ضریب رسانش آن اشاره کرد.

۲-۲- باتری لیتیوم-یون کتابی

تولید حرارت در حین عملیات شارژ و تخلیه حرارتی به دو عامل اصلی بازگشت‌پذیری و غیرقابل بازگشت‌پذیری آن بستگی دارد. علی‌رغم فواید زیاد باتری‌های لیتیوم-یونی، دغدغه ایمن‌سازی این دسته از



(الف)



(ب)

شکل ۴. الف) طرحواره مجموعه آزمایش (ب) اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی حاضر با نتایج تجربی محرابی و همکاران [۲۲]

Fig. 4. a) Schematic of experimental set up b) Validation of the present experimental results with the experimental results of Mehrabi et al [22].

و گمانی است که درباره نتیجه هر اندازه‌گیری پدید می‌آید. ممکن است تصور شود که یک وسیله اندازه‌گیری کاملاً قابل اعتماد است و نتیجه درستی از اندازه‌گیری ارائه می‌دهد، ولی همیشه در تجهیزات اندازه‌گیری حتی دقیق‌ترین آن‌ها شک وجود دارد. معمولاً آنالیز عدم قطعیت با دو نوع خطا مواجه می‌شود. یک خطای سیستماتیک دستگاه اندازه‌گیری که با هر بار تکرار از بین نمی‌رود که به آن خطای بایس^۱ گفته می‌شود. در این روند، اندازه‌گیری خطای سیستماتیک همان دقت اندازه‌گیری دستگاه‌ها می‌باشد که در نحوه ساخت دستگاه وجود دارد و جزء محدودیت‌های دستگاه بوده و در واقع اجتناب‌ناپذیر است. خطایی دیگر، خطایی است که در تکرارپذیری اندازه‌گیری رخ می‌دهد و برای حالتی پیش می‌آید که مقادیر اندازه‌گیری شده، مقادیر یکسانی را نشان ندهند. این خطا، خطای رندوم^۲ نامیده می‌شود که بیشتر به شرایط محیطی و آزمایشگاهی مربوط بوده و به محدودیت‌های دستگاه ارتباطی پیدا نمی‌کند. در پژوهش حاضر و انجام آزمایش، مقادیر اندازه‌گیری شده را در حالتی که نسبت به تغییرات خود به حالت پایدار رسیده بودند، اندازه گرفته شده‌است. در جدول ۱ مقادیر عدم قطعیت برای پارامترهای مورد نظر در آزمایش نشان داده شده‌است.

۳- اعتبارسنجی نتایج تجربی

اکثر بخشهای سیستم ترکیبی حاضر منطبق بر سیستم ترکیبی معرفی شده توسط مراجع [۲۱-۲۲] است که طرحواره کل سیستم در شکل ۴-الف نشان داده شده‌است. با توجه به تغییرات انجام شده در سیستم حاضر و برای اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی این پژوهش، از کار تحقیقاتی انجام شده توسط محرابی و همکاران [۲۴] استفاده شده‌است. آن‌ها از گرم‌کن‌های کتابی با چاه حرارتی پین‌دار به همراه پارافین برای خنک‌کاری باتری استفاده کردند درحالی‌که در سیستم حاضر چاه حرارتی پین‌دار حذف شده‌است. در شکل ۴-ب تغییرات دمایی به دست آمده در پژوهش حاضر با پارافین خالص با نتایج مرجع [۲۴] مقایسه شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روند تغییرات دمایی هر دو کار مشابه می‌باشد. البته اختلافاتی که وجود دارد به دلیل تفاوت در اعمال شار حرارتی، تفاوت در نوع و مشخصات پارافین‌های استفاده شده و همچنین تفاوت در ابعاد گرم‌کن‌ها می‌باشد.

میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته و گرم‌کن‌ها در کنار آنها تعبیه شده‌است. گرم‌کن‌ها به عنوان جایگزین باتری کنار این فوم مسی قرار می‌گیرند. شکل کلی سیستم در مرجع [۲۱ و ۲۲] داده شده‌است که از بیان مجدد آن در اینجا خودداری می‌شود.

برای سنجش تأثیر تفاوت بین دی‌های ورودی مختلف، از عدد بدون بعد رینولدز در بخش سیال عامل آب خالص استفاده شده‌است که برای محاسبه آن از معادلات (۴) تا (۶) استفاده می‌شود.

$$Re = \frac{UD_h}{\nu} \quad (4)$$

$$U = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

$$D_h = \frac{4A}{p} \quad (6)$$

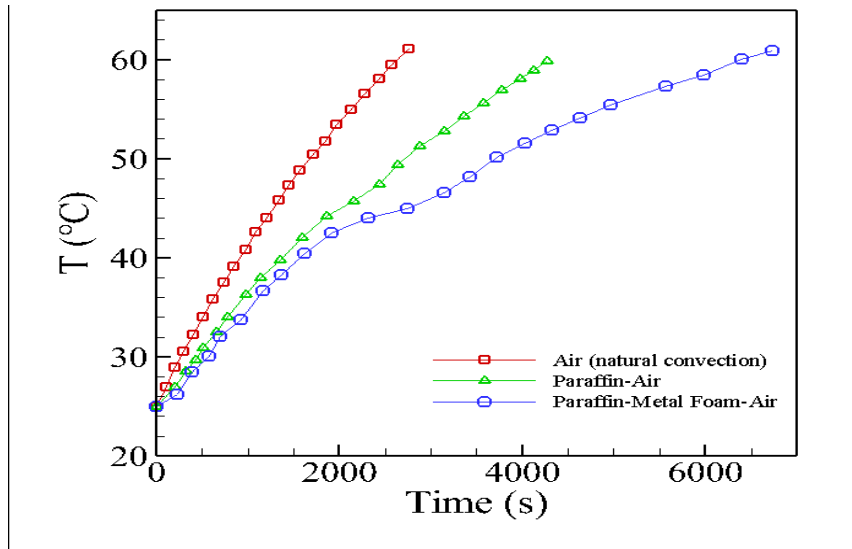
که در آن Re عدد بدون بعد رینولدز، U سرعت متوسط سیال ورودی به کانال D_h (m/s)، قطر هیدرولیکی معادل (m) ، ν ویسکوزیته سینماتیکی سیال در دمای ورودی به کانال (s/m^2) ، Q دبی حجمی سیال ورودی به کانال (s/m^3) ، A سطح مقطع کانال (m^2) و p محیط تر شده کانال (m) می‌باشند.

برای اندازه‌گیری دما در طول آزمایش از ترموکوپل نوع K استفاده شده‌است. جهت اتصال ترموکوپل‌ها به بدنه گرم‌کن‌ها یک شیار به عمق ۱/۵ میلی‌متر روی سطح هر گرم‌کن تعبیه شده و ترموکوپل‌ها با فشار درون آن قرار داده شده‌اند. جهت چسباندن ترموکوپل درون سوراخ ایجاد شده در سطح گرم‌کن، از چسب سیلیکون حرارتی استفاده شده‌است. هفت ترموکوپل نوع K برای اندازه‌گیری دما مورد استفاده قرار گرفته‌است. دو ترموکوپل به صورت موازی با گرم‌کن‌های کتابی در فصل مشترک فوم فلزی و یا ماده تغییرفازدهنده و کانال آلومینیومی قرار داده می‌شوند. یک ترموکوپل نیز در مسیر جریان ورودی به کانال آلومینیومی و یک ترموکوپل دیگر در مسیر خروج جریان از کانال آلومینیومی قرار می‌گیرد.

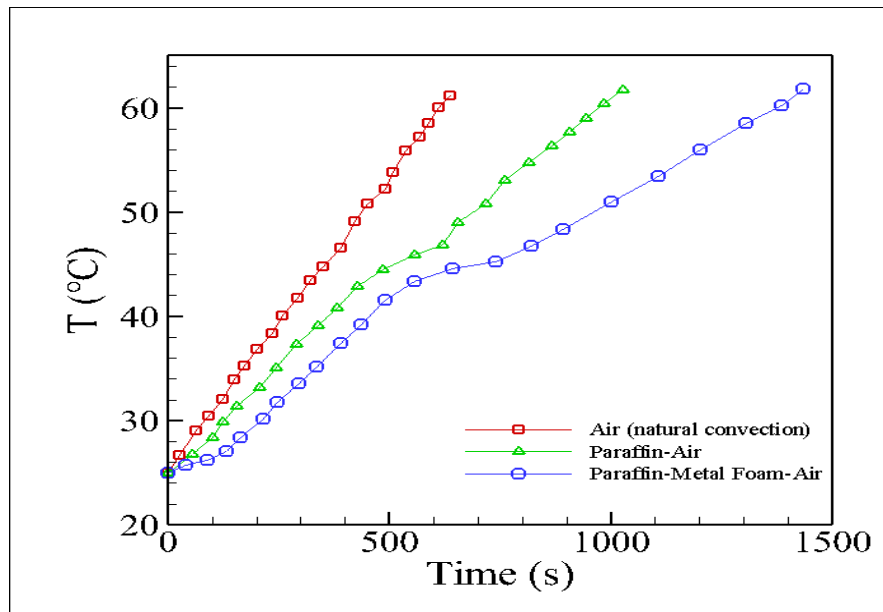
۳-۳- تحلیل عدم قطعیت نتایج

عدم قطعیت اندازه‌گیری، اطلاعاتی راجع به کیفیت نتایج حاصل از اندازه‌گیری را بیان می‌کند. در حقیقت عدم قطعیت شک

1 Bias
2 Random



(الف)



(ب)

شکل ۵. تغییرات دمای سطح باتری در توان های حرارتی ۴/۵ وات (الف) و ۱۴ وات (ب) با استفاده از سیال عامل هوا در بخش فعال سیستم ترکیبی و سه حالت برای بخش غیرفعال شامل جریان طبیعی هوا؛ هوا - پارافین و هوا-پارافین-فوم فلزی

Fig. 5. Variations of temprature battery surface at heating powers (a) 4.5 Watts and (b) 14. Watts using of air as working fluid in the active section of system

۴- نتایج

چندین مرتبه تکرار شده تا از صحت نتایج اطمینان حاصل گردد. در این فرایند زمان رسیدن به بیشینه دمای مجاز 60°C یا دمای پایا اندازه گیری شده است. نتایج در دو بخش شامل سیستم خنک کاری با سیال عامل هوا و سیستم خنک کاری با سیال عامل آب ارائه شده است و در هر بخش تاثیر اضافه نمودن نانوپارافین روی عملکرد سیستم ارائه شده است.

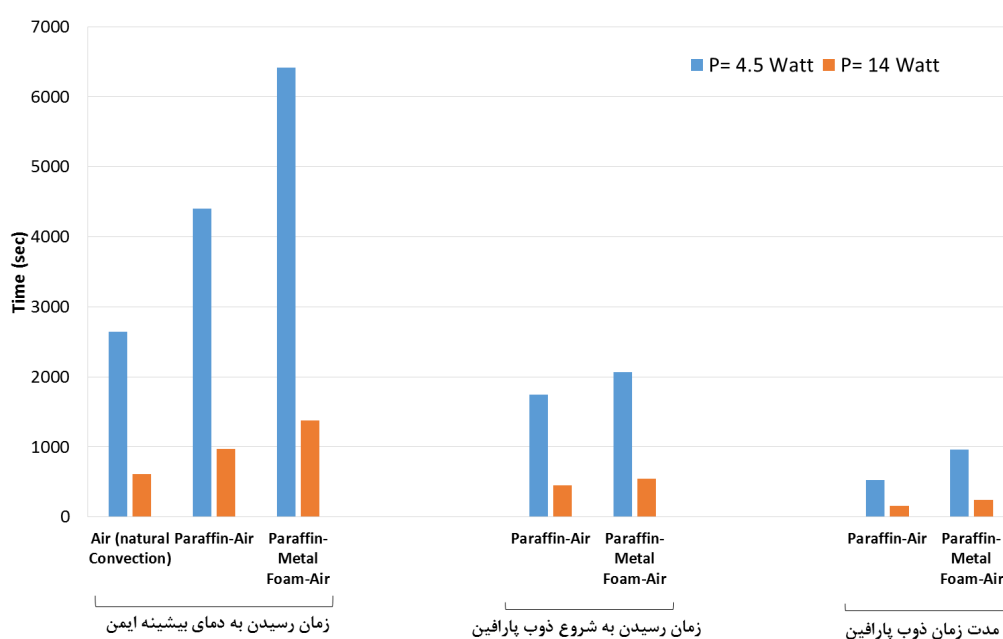
در حین انجام آزمایش ها، دمای محیط اطراف ثابت و دمای سیال ورودی به کانال برابر با 25°C درجه سلسیوس بوده است. تغییرات دمای سطح جایگزین باتری (گرمکن) تا رسیدن به شرایط کارکرد پایا یا رسیدن به بیشینه دمای مجاز 60°C ثبت شده است. آزمایش ها

۴-۱- سیستم خنک کاری با سیال عامل هوا

با توجه به اینکه استفاده از سیال هوا در بخش فعال سیستم ترکیبی خنک کاری به خاطر هزینه‌های کمتر پیشنهاد داده شده است، در این بخش عملکرد این سیستم بررسی می‌شود. با توجه به بیشینه دمای ایمن ۶۰ درجه سلسیوس، آزمایش‌ها تا جایی که دمای سطح باتری‌ها (که در این پژوهش به شکل گرمکن‌های کتابی است) به ۶۰ درجه سلسیوس برسد ادامه یافته است. در ابتدا برای نشان دادن تاثیر بخش غیرفعال سیستم ترکیبی خنک کاری برای سه حالت جریان هوای جابجایی آزاد (در بخش غیرفعال)، وجود پارافین و ترکیب پارافین و فوم مسی در دو توان حرارتی ثابت ۴/۵ و ۱۴ وات انجام شده و در شکل ۵ داده شده است.

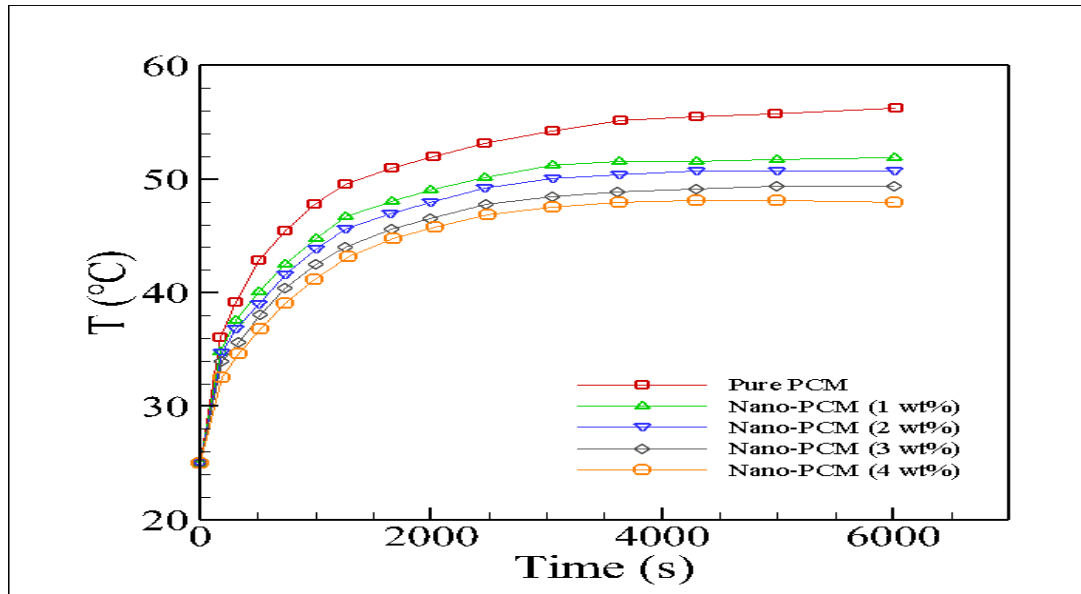
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۵-الف، در حالت خنک کاری بدون پارافین (جابجایی آزاد هوا) در توان حرارتی ۴/۵ وات دمای سطح گرمکن در مدت زمان ۴۴ دقیقه و ۵ ثانیه (۲۶۴۵ ثانیه) از دمای بیشینه ۶۰ درجه سلسیوس عبور می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که در حالت از استفاده از پارافین و بدون فوم مسی به همراه جابجایی آزاد هوا، بیشینه دمای سطح گرمکن (جایگزین باتری در آزمایش) در مدت زمان ۴۳۹۸ ثانیه به دمای ۶۰ درجه سلسیوس رسیده است.

در نتیجه فقط با اضافه کردن پارافین، حدود ۶۶٪ مدت زمان رسیدن به دمای بیشینه ایمن نسبت به حالت خنک کاری با جابجایی آزاد هوا افزایش یافته است. همچنین زمانی که دمای سطح باتری در خنک کاری با جابجایی آزاد هوا به ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد (حدود ۲۶۴۵ ثانیه)، دمای سطح باتری در همین زمان با خنک کاری با استفاده از پارافین به ۴۸/۹ درجه سلسیوس می‌رسد که کاهش حدود ۱۹٪ در دمای سطح باتری نسبت به حالت بدون پارافین را نشان می‌دهد. در نمودار شکل ۵-الف تغییرات دمای سطح باتری با پارافین، ناحیه‌ای با شیب کم وجود دارد که در زمان ۱۷۵۰ تا ۲۲۸۰ ثانیه، رشد اندک دما نسبت به زمان را نشان می‌دهد. این ناحیه نقطه شروع ذوب شدن پارافین را تا زمانی که کل آن تبدیل به مایع می‌گردد نمایان می‌سازد. پس از گذشت تقریباً ۱۸۸۰ ثانیه پارافین جامد که در تماس با گرمکن‌های کتابی قرار دارد به دمای نقطه ذوب خود (۴۲-۴۴ درجه سلسیوس) می‌رسد و در مدت زمان ۵۳۰ ثانیه به طور کامل ذوب می‌شود. در طول این مدت پارافین گرما را به صورت گرمای نهان در خود ذخیره کرده و نرخ افزایش دمای سطح باتری را کاهش می‌دهد. پس از ذوب کامل، پارافین دیگر قادر به ذخیره‌ی گرما به صورت گرمای نهان نبوده و نرخ افزایش دمای سطح باتری افزایش



شکل ۶. خلاصه نتایج در سیستم خنک کاری غیرفعال جابجایی آزاد هوا؛ هوا-پارافین و نیز هوا-پارافین-فوم مسی با بخش فعال شامل جریان سیال عامل هوا

Fig. 6. Summary of results in passive cooling system with free convection air; air-paraffin as well as air-paraffin-copper foam with active part including air flow fluid



شکل ۷. مقایسه تغییرات دمایی باتری‌های کتابی با نانوذره و بدون نانوذره با جریان سیال عامل هوا

Fig. 7. Comparison temperature variations of plates batteries between nano-PCM and pure PCM with air as working fluid

۲۲٪ را نشان می‌دهد. در توان ۱۴ وات، نمودار تغییرات دما برای خنک‌کاری با جریان هوا حالت خطی‌تری نسبت به توان ۴/۵ وات دارد. پس از تقریباً ۴۵۰ ثانیه پارافین شروع به ذوب شدن می‌کند و پس از ۱۶۰ ثانیه کاملاً ذوب شده و نرخ افزایش دما مجدداً افزایش می‌یابد.

ایراد انتقال حرارت با پارافین تنها، پایین بودن ضریب هدایت حرارتی آن است. با توجه به پایین بودن ضریب هدایت حرارتی پارافین، گرمای منتقل شده در آن جمع شده و موجب ذوب کامل آن می‌گردد و در نتیجه پارافین مزیت اصلی خود که گرمای نهان بالا است را از دست می‌دهد و از ظرفی قادر به انتقال مناسب گرما از دیواره باتری به سمت کانال سیال خنک‌کننده نمی‌باشد. از این رو با توجه پیشنهاد مراجعی نظیر [۲۱-۲۲ و ۲۴] فوم مسی را داخل پارافین قرار داده و آزمایش‌های با پارافین-فوم مسی انجام شده است. لازم بذکر است که در شکل (۵-الف و ب)، نتایج برای توان‌های ۴/۵ و ۱۴ وات و با اضافه نمودن فوم مسی نیز داده شده‌اند. با اضافه کردن فوم مسی، مشاهده شده که مدت زمان ۶۷۳۱ ثانیه طول می‌کشد تا دمای سطح باتری از ۲۵ درجه سلسیوس محیط پیرامون به ۶۰ درجه سلسیوس برسد که در مقایسه با پارافین خالص (۴۲۷۴ ثانیه) افزایش ۵۷٪ را نشان می‌دهد. زمانی که دمای باتری در حالت خنک‌کاری با هوای

یافته و باتری به بیشینه دمای ایمن می‌رسد. همچنین شیب تغییرات دما بعد از ذوب کامل پارافین تقریباً ۴۰٪ نسبت به قبل از شروع ذوب شدن پارافین کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در هنگام ذوب پارافین، حرارت باید از پارافین جامد که ضریب انتقال حرارت کمتری نسبت به پارافین مایع دارد عبور کند و یا به عبارتی، مقاومت حرارتی پارافین جامد از پارافین مایع بیشتر است و لذا این پدیده قابل توجیه می‌باشد. در مجموع استفاده از پارافین حتی بدون فوم مسی خنک‌کاری باتری را بهبود می‌بخشد در حالی که خنک‌کاری تنها با جریان جابجایی آزاد هوا کارکرد مطلوبی نداشته و در مدت نسبتاً کوتاهی باتری از بیشینه دمای ۶۰ درجه تجاوز کرده و عمر و ایمنی آن به خطر می‌افتد.

مشابه با آزمایشی که برای گرمکن‌های کتابی ۴/۵ وات انجام شد، آزمایش برای توان ۱۴ وات نیز انجام شده است و نتایج آن در شکل (۵-ب) نشان داده شده است. در حالت خنک‌کاری با جریان جابجایی آزاد هوا، دمای سطح باتری در مدت زمان ۶۱۵ ثانیه به بیشینه دمای ایمن ۶۰ درجه سلسیوس رسیده است. در حالت خنک‌کاری با پارافین خالص، ۹۷۵ ثانیه طول کشیده تا دمای سطح باتری به ۶۰ درجه سلسیوس برسد. همچنین زمانی که دمای باتری خنک‌شده با جریان آزاد هوا به ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد دمای سطح باتری خنک‌شده با پارافین خالص به ۴۶/۸ درجه سلسیوس رسیده که کاهش حدود

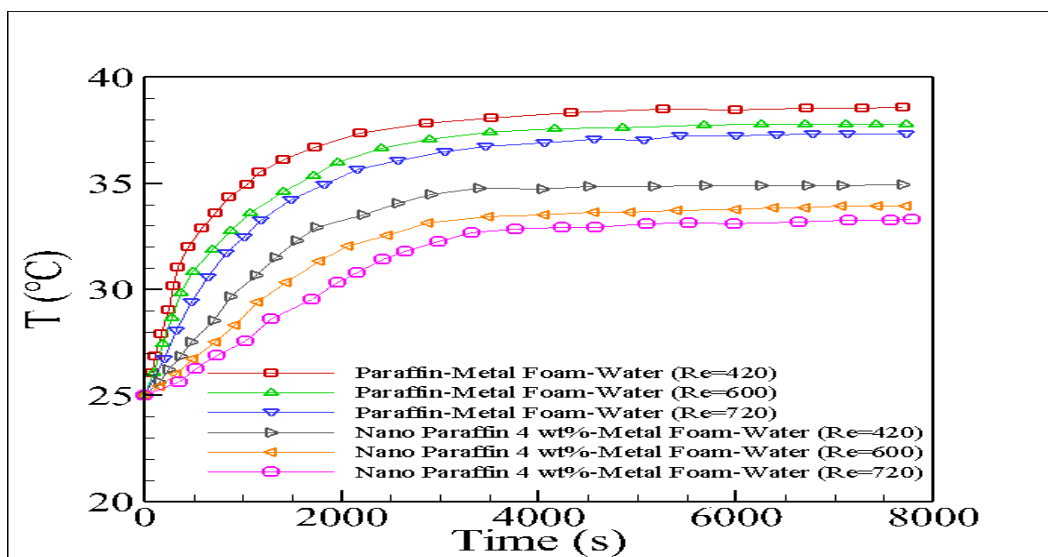
آزاد به ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد، دمای باتری خنک‌کاری شده با پارافین خالص ۴۸/۹ درجه سلسیوس شده‌است (۱۹٪ کاهش). همچنین زمانی که دمای کارکرد باتری با پارافین خالص به ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد، دمای باتری خنک‌کاری شده با پارافین و فوم مسی به ۵۲/۸ درجه سلسیوس رسیده که کاهش حدود ۱۳ درصدی در کاهش دما را نسبت به پارافین خالص فراهم می‌آورد. این کاهش مشخصاً به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی مجموعه پارافین و فوم مسی نسبت به پارافین تنها می‌باشد. با اضافه‌کردن فوم مسی، انتقال گرما از دیواره‌ی باتری به محیط پیرامون بهتر انجام شده و تجمع گرمای کم‌تری در باتری صورت گرفته و در نتیجه سیستم مدیریت گرمایی عملکرد بهتری خواهد داشت. با توجه به شکل (۵-الف) مشاهده می‌شود که با اضافه‌شدن فوم مسی، نه تنها نقطه شروع‌شدن فرآیند ذوب‌شدن پارافین به تاخیر افتاده‌است، بلکه مدت زمان ذوب‌شدن پارافین نیز از ۵۳۰ ثانیه در حالت پارافین خالص به ۹۶۶ ثانیه در حالت اضافه‌شدن فوم مسی افزایش یافته‌است. با وجود اینکه اضافه‌کردن فوم مسی انتقال حرارت در داخل باتری را سرعت می‌بخشد، به دلیل پایین‌بودن ضریب جابجایی هوا در اطراف جعبه باتری، خروج گرما از باتری به درستی صورت نمی‌گیرد. با توجه به نتایج برای شار حرارتی ۱۴ وات در شکل ۵-ب مشاهده می‌شود که باتری خنک‌کاری شده با پارافین و فوم مسی تقریباً ۱۳۷۷ ثانیه طول می‌کشد که به بیشینه دمای کارکرد ایمن برسد. این مدت ۴۰۲ ثانیه کمتر از مدت زمان مربوط به باتری با پارافین خالص می‌باشد. در نتیجه ۴۱٪ بهبود در زمان رسیدن باتری به مرز ۶۰ درجه سلسیوس با استفاده از فوم مسی حاصل شده‌است. زمانی که دمای کارکرد باتری با پارافین خالص به ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد، دمای باتری خنک‌کاری شده با پارافین و فوم مسی به ۵۰/۹ درجه سلسیوس رسیده که کاهش ۱۵/۲ درصدی در کاهش دما را نسبت به پارافین خالص فراهم می‌آورد. در نتیجه مشاهده می‌شود که در توان حرارتی بالاتر، فوم مسی تاثیر بیشتری در مقایسه با توان حرارتی پایین‌تر در کاهش دمای باتری داشته‌است. لازم بذکر است که در حالت کلی، رفتار حرارتی سیستم بررسی شده در این بخش در توافق با نتایج گزارش شده توسط مراجع [۲۱-۲۴] نیز می‌باشد. اگرچه با توجه به تفاوت در نوع پارافین و یا سیال عامل و نیز شرایط مختلف توان حرارتی، از لحاظ کمی نتایج متفاوت می‌باشند.

برای درک بهتر اثر سیستم‌های مختلف حرارتی در خنک‌کاری باتری خلاصه‌ای از نتایج در شکل ۶ نشان داده شده‌است.

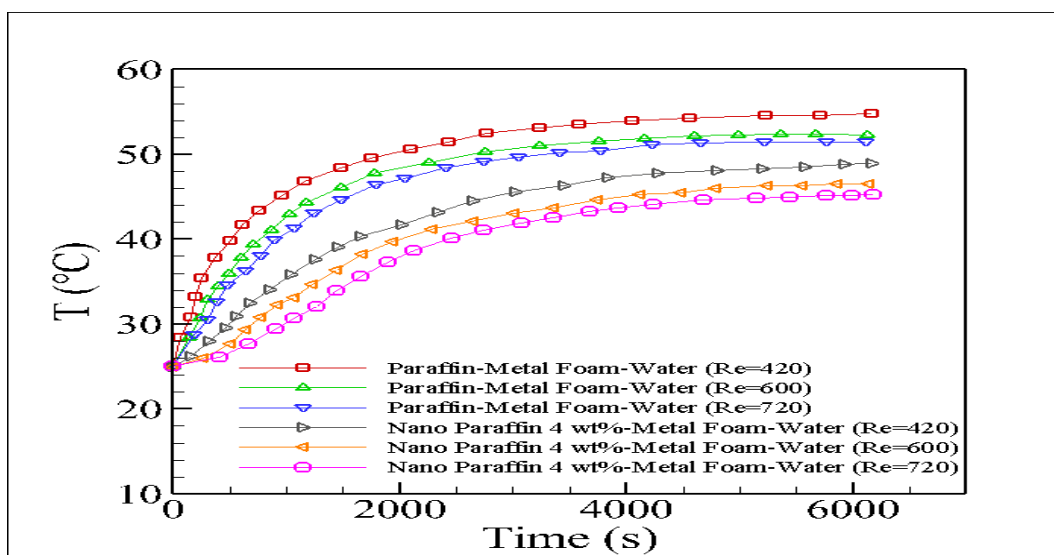
به منظور بررسی اثر اضافه‌کردن نانو ذرات تیتانیوم به ماده تغییرفازدهنده، به مقایسه‌ی نتایج حاصل از نانو پارافین آماده‌شده در درصد‌های حجمی مختلف با حالت پارافین بدون نانو ذرات پرداخته شده‌است. در شکل ۷، نتایج تجربی حاصل برای تغییرات دمای بیشینه گرمکن برحسب زمان در پنج حالت مختلف پارافین خالص و نانوپارافین در چهار درصد حجمی مختلف داده شده‌است. با توجه به این شکل می‌توان مشاهده نمود که در همه حالت‌های سیستم ترکیبی با پارافین خالص و نانو پارافین رفتاری مشابه دارند. با توجه به شکل ۷، میزان عملکرد خنک‌کاری سیستم به ازای اضافه‌کردن نانوذرات به پارافین، افزایش چشمگیری در مقایسه با حالت پارافین خالص داشته‌است. دمای ذوب پارافین ۴۲ تا ۴۴ درجه سلسیوس می‌باشد. با توجه به نتایج، اضافه‌کردن نانو ذرات به میزان ۴ درصد حجمی باعث به تاخیرانداختن زمان ذوب‌شدن پارافین به میزان ۱۲۹۱ ثانیه شده که باعث افزایش عملکرد خنک‌کاری ماده تغییرفازدهنده شده‌است. پس از گذشت یک ساعت و ۴۰ دقیقه از زمان شروع آزمایش، دمای باتری (گرمکن کتابی) در حالت‌های پارافین خالص، و نانوپارافین ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد حجمی به ترتیب برابر $56/2^{\circ}C$ ، $51/8^{\circ}C$ ، $50/7^{\circ}C$ و $49/3^{\circ}C$ می‌باشد. با مقایسه دو حالت پارافین خالص و نانوپارافین ۴ درصد حجمی، مقدار تقریبی ۱۷٪ کاهش دما در اثر اضافه‌نمودن نانوذرات به پارافین بدست آمده‌است که بیانگر تاثیر مهم استفاده از نانوذرات در سیستم ترکیبی پیشنهادی می‌باشد.

۴-۲- سیستم ترکیبی خنک‌کاری با سیال عامل آب خالص

برای خنک‌کاری با سیال عامل آب خالص، دمای جریان ورودی ثابت و برابر ۲۴ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده‌است. آزمایش در دو توان حرارتی مختلف ۴/۵ و ۱۴ وات و در سه عدد رینولدز جریان برابر ۴۲۰ و ۶۰۰ و ۷۲۰ انجام شده تا اثر خنک‌کاری با آب در کنترل دمای باتری بررسی شود. با توجه به نتایج بدست آمده از بخش قبل، سیستم خنک‌کاری با وجود فوم مسی و پارافین در بخش غیرفعال سیستم ترکیبی در نظر گرفته شده و نانوذرات در کسر حجمی ۴ درصد به پارافین اضافه شده‌است. در شکل ۸ نتایج تجربی بدست آمده برای تغییرات دمای بیشینه باتری (گرمکن کتابی) برحسب زمان و در



(الف)



(ب)

شکل ۸. تاثیر عدد رینولدز جریان آب خالص در سیستم ترکیبی با بخش فعال سیال عامل آب خالص و دو حالت بخش غیرفعال شامل پارافین-فوم فلزی و نانوپارافین ۴ درصد- فوم فلزی در خنک کاری سیستم در توان‌های (الف) ۴/۵ وات و (ب) ۱۴ وات

Fig. 8. The effect of Reynolds number of pure water flow in a combined system with the active part of the pure water as working fluid and two cases in the passive part, including paraffin-metal foam and 4% nano-paraffin-metal foam in the cooling system at (a) 4.5 Watts and (b) 14 Watts

نکرده‌است. همچنین در عدد رینولدز ۶۰۰، دمای گرمکن در حالت استفاده از سیستم ترکیبی پارافین خالص-فوم مسی-جریان سیال عامل آب، پس از ۲۸۹۲ ثانیه به مقدار پایدار ۳۷ درجه سلسیوس رسیده‌است که همانند حالت قبل از دمای ۶۰ درجه سلسیوس تجاوز نکرده‌است. با مقایسه این دو مقدار عدد رینولدز نتیجه می‌شود که

حالت‌های مختلف ارائه شده‌است. باتوجه به شکل ۸-الف و برای توان حرارتی ۴/۵، مشاهده می‌شود که در عدد رینولدز ۴۲۰، دمای گرمکن کتابی در حالت استفاده از سیستم ترکیبی پارافین خالص-فوم مسی-جریان سیال عامل آب، پس از تقریباً ۳۵۱۶ ثانیه به مقدار پایدار ۳۸/۱ درجه سلسیوس رسیده و از بیشینه دما ۶۰ درجه سلسیوس تجاوز

توجهی در کنترل دمای باتری داشته و نه تنها از ذوب شدن پارافین جلوگیری کرده بلکه دمای باتری را نیز پایدار نگه داشته است. با توجه به شکل ۸-الف، افزودن نانو ذرات به پارافین خالص با ترکیب فوم مسی و جریان آب، باعث کاهش چشمگیر دمای گرمکن شده است. نتایج حاصل نشان می دهند که در جریان سیال عامل آب با عدد رینولدز ۴۲۰، مقدار دمای گرمکن پس از ۲۵۶۳ ثانیه به دمای پایدار ۳۴ درجه سلسیوس رسیده که در مقایسه با حالت پارافین خالص، در همین زمان حدودا ۳ درجه سلسیوس کاهش دما داشته است. همچنین در عدد رینولدز جریان برابر با ۶۰۰، مقدار دمای گرمکن بعد از ۲۸۷۵ ثانیه به دمای پایدار ۳۳ و در عدد رینولدز برابر با ۷۲۰، مقدار دمای گرمکن بعد از ۴۲۴۴ ثانیه به دمای پایدار ۳۲/۵ درجه سلسیوس رسیده که در مقایسه با حالت پارافین خالص به ترتیب مقدار ۴ و ۴/۶ درجه سلسیوس کاهش دما را نشان می دهند.

با افزایش توان گرمکن کتاتی به ۱۴ وات، مطابق شکل (۸-ب) مشاهده می شود که در هر سه عدد رینولدز جریان سیال آب در بخش فعال سیستم ترکیبی، سیستم مدیریت گرمایی قادر است تا دمای پایدار باتری را در کمتر از ۶۰ درجه سلسیوس نگه دارد. در عدد رینولدز ۴۲۰ و در حالت استفاده از فوم مسی و پارافین خالص، پس

استفاده از فوم مسی و جریان سیال عامل آب خالص، موجب کاهش به ترتیب ۴۰٪ و ۴۱/۵٪ در دمای باتری شده است. در عدد رینولدز ۷۲۰ دمای باتری به دمای پایدار ۳۷/۱ درجه سلسیوس رسیده که نسبت به حالت بدون فوم مسی، موجب کاهش ۴۱/۲٪ در بیشینه دمای باتری شده است. البته باید به این نکته توجه کرد که در حالت بدون فوم مسی، دمای باتری اصلا به میزان پایدار نرسیده است. همچنین در عددهای رینولدز ۶۰۰ و ۷۶۰، زمان رسیدن دمای باتری به حالت پایدار به ترتیب ۲۸۹۲ و ۴۵۶۴ ثانیه می باشد. با افزایش عدد رینولدز مشاهده می شود که نمودار تغییرات دمای باتری به هم نزدیک تر می شوند که گویای این مطلب می باشد که تاثیر افزایش عدد رینولدز در توان های پایین در کاهش دمای باتری، دارای حد بالایی بوده و بیشتر از آن مقدار، افزایش دبی جریان تاثیری بر خنک کاری باتری ندارد. بنابراین در توان ۴/۵ وات و با وجود فوم مسی، در هیچ عدد رینولدزی دمای سطح باتری به بیشینه ۶۰ درجه سلسیوس نرسیده و لذا می توان از سیستم خنک کاری آب به همراه پارافین و فوم مسی، به خوبی در توان های حرارتی پایین استفاده کرد و نیازی به استفاده از نانو پارافین وجود ندارد. در مقایسه با خنک کاری باتری با پارافین بدون فوم مسی مشاهده می شود که اضافه کردن فوم مسی نقش قابل

جدول ۲. نتایج بدست آمده در سیستم ترکیبی خنک کاری با نانو پارافین-فوم مسی و جریان سیال عامل آب در سه عدد رینولدز و دو توان حرارتی متفاوت

Table 2. Results obtained in a combined cooling system with nano-paraffin-copper foam and water as working fluid flow in three Reynolds numbers and two different thermal powers

Re=720		Re=600		Re=420		
P=14 (W)	P=4.5 (W)	P=14 (W)	P=4.5 (W)	P=14 (W)	P=4.5 (W)	
✓	✓	✓	✓	✓	✓	رسیدن به دمای پایدار
۴۴	۳۲،۵	۴۶،۵	۳۳،۹	۴۸،۹	۳۴،۹	دمای نهایی سطح باتری
۶۲۳۴	۷۸۲۳	۶۱۳۹	۷۷۲۳	۶۱۶۷	۷۶۹۲	زمان رسیدن به دمای نهایی
۱۸۲۶	-	۱۹۲۷	-	۱۶۷۴	-	زمان شروع ذوب شدن پارافین
۱۲۱۵	-	۱۲۹۳	-	۱۱۵۸	-	مدت زمان ذوب شدن پارافین

محققین قبلی، تاثیر افزودن نانوذرات به پارافین در سیستم ترکیبی شامل فوم مسی بطور تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم خنک کاری ترکیبی شامل دو بخش فعال و غیرفعال می باشد. تاثیر افزودن نانوذرات برای دو نوع سیال عامل هوا و آب خالص در بخش فعال مورد توجه قرار گرفته است. همچنین عملکرد سیستم حرارتی ترکیبی با دو توان حرارتی ۴/۵ و ۱۴ وات در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل در حالت استفاده از سیال عامل هوا برای بخش فعال سیستم خنک کاری نشان داد که اولاً وجود بخش غیرفعال با پارافین، پارافین-فوم مسی و نانو پارافین-فوم مسی برای نگه داشتن دمای باتری در محدوده ایمن ۶۰ درجه سلسیوس و مخصوصاً در حالت کارکرد با توانهای حرارتی بالا (در این تحقیق ۱۴ وات) ضروری می باشد. این مطلب نشان داد که در صورت استفاده از سیال عامل هوا در بخش فعال سیستم، لزوماً باید بخش غیرفعال سیستم بصورت ترکیب نانو پارافین-فوم مسی طراحی شود تا دمای باتری از دمای ایمن فراتر نرود. نتایج بدست آمده مشخص نمودند که با افزایش درصد حجمی نانوذرات اکسید تیتانیوم به پارافین در بخش غیرفعال سیستم ترکیبی، مقدار بیشینه دمای باتری به خوبی کاهش یافته است. به عنوان نمونه با استفاده از سیال عامل هوا در بخش فعال و در توان حرارتی ۴/۵ وات، میزان عملکرد خنک کاری سیستم به ازای اضافه کردن نانوذرات به پارافین، افزایش چشمگیری در مقایسه با حالت پارافین خالص داشته است بطوریکه اضافه کردن نانو ذرات در مقدار ۴ درصد حجمی، باعث به تاخیر انداختن زمان ذوب شدن پارافین به میزان ۱۲۹۱ ثانیه شده و لذا باعث افزایش عملکرد خنک کاری ماده تغییر فاز دهنده شده است. در حالت استفاده از سیال عامل هوا در بخش فعال و پس از گذشت یک ساعت و ۴۰ دقیقه از زمان شروع آزمایش، دمای باتری (گرمکن کتابی) در حالت های استفاده از پارافین خالص، نانو پارافین ۱ تا ۴ درصد حجمی به ترتیب برابر $56/2^{\circ}C$ ، $51/8^{\circ}C$ ، $50/7^{\circ}C$ ، $49/3^{\circ}C$ و $48^{\circ}C$ بوده است. با مقایسه دو حالت پارافین خالص و نانو پارافین ۴ درصد حجمی، مقدار تقریبی ۱۷٪ کاهش دما مشاهده شده است. بنابراین افزودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی، افزایش زمان ذوب شدن پارافین و نیز باعث کاهش دمای باتری و پخش گرمای یکنواخت باتری شده است.

بررسی تاثیر نانو پارافین در سیستم ترکیبی با سیال عامل آب

از ۱۶۷۴ ثانیه پارافین شروع به ذوب شدن می کند و پس از مدت زمان ۱۱۵۸ ثانیه دیگر، کاملاً ذوب می شود. در طی مدت ذوب شدن، پارافین که ضریب هدایت حرارتی آن با اضافه شدن فوم مسی افزایش یافته است، حرارت را در خود جذب کرده و شیب افزایش دما در گرمکن کتابی را کاهش می دهد. در نهایت پس از ۳۲۲۹ ثانیه دیگر (حدود ۶۱۰۰ ثانیه از شروع ذوب شدن)، باتری به دمای پایدار ۵۳ درجه سلسیوس می رسد. در عددهای رینولدز ۶۰۰ و ۷۶۰، دمای پایدار گرمکن به ترتیب بعد از ۳۲۴۵ و ۴۲۲۲ ثانیه، به دمای ۵۱ و ۵۰/۶ درجه سلسیوس رسیده است. لذا مشاهده می شود که با افزایش عدد رینولدز از ۴۲۰ به ۶۰۰ و ۷۲۰، به ترتیب کاهش ۴٪ و ۴/۶٪ در دمای نهایی باتری اتفاق افتاده است. همچنین با افزایش عدد رینولدز، شروع ذوب شدن پارافین به تاخیر افتاده و از ۱۶۷۴ ثانیه در عدد رینولدز ۴۲۰، به ۱۸۲۶ ثانیه در عدد رینولدز ۶۰۰ و ۱۹۲۷ ثانیه در عدد رینولدز ۷۲۰ افزایش یافته است. نتایج حاصل مشخص نمودند که در توان حرارتی ۱۴ وات برای سیستم حاضر، اگرچه افزایش عدد رینولدز موجب کاهش دمای باتری شده ولی این بهبود چندان قابل توجه نمی باشد. بنابراین پیش بینی می شود که اضافه شدن نانو ذرات به پارافین خالص و فوم مسی نقش بیشتری در کنترل دمای باتری داشته باشند.

باتوجه به شکل ۸-ب و برای توان حرارتی ۱۴ وات، افزودن نانوذرات به پارافین خالص باعث کاهش قابل توجهی در دمای گرم کن شده است. در عدد رینولدز ۴۲۰ و با استفاده از فوم مسی و نانو پارافین، پس از ۴۸۰۰ ثانیه به دمای پایدار ۴۸ درجه سلسیوس رسیده است و همچنین در عددهای رینولدز ۶۰۰ و ۷۲۰ پس از همین مدت زمان، به دمای پایدار ۴۶ و ۴۴ درجه سلسیوس رسیده است که تاثیر افزایش عدد رینولدز مشخص است. با توجه به نتایج این حالت در مقایسه با حالت پارافین خالص، افزودن نانوذرات به پارافین باعث کاهش دما به میزان ۱۱٪، ۱۲٪ و ۱۲/۵٪ در گرم کن شده است که تاثیر مثبت نانو پارافین بر سیستم ترکیبی مورد استفاده را نشان می دهد.

جهت درک بهتر اثر سیستم های مختلف حرارتی در خنک کاری باتری، خلاصه نتایج برای سیستم خنک کاری با نانو پارافین در جدول ۲ داده شده است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش بر اساس یک سیستم ترکیبی معرفی شده توسط

- Zhang, Investigation on the promotion of temperature uniformity for the designed battery pack with liquid flow in cooling process, *Applied Thermal Engineering*, 116 662-655 (2017).
- [5] R. Zhao, J. Gu, J. Liu, An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries, *Journal of power sources*, (2015) 273 1097-1089.
- [6] B. Coleman, J. Ostanek, J. Heinzl, Reducing cell-to-cell spacing for large-format lithium ion battery modules with aluminum or PCM heat sinks under failure conditions, *Applied energy*, 26-14 (2016) 180.
- [7] D.-w. Yoo, Y.K. Joshi, Energy efficient thermal management of electronic components using solid-liquid phase change materials, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 649-641 (2004) (4)4.
- [8] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied thermal engineering*, 283-251 (2003) (3)23.
- [9] P. Arndt, J. Dunn, R. Willix, Organic compounds as candidate phase change materials in thermal energy storage, *Thermochimica acta*, 68-55 (1984) 79.
- [10] S. Shi, Y. Xie, M. Li, Y. Yuan, J. Yu, H. Wu, B. Liu, N. Liu, Non-steady experimental investigation on an integrated thermal management system for power battery with phase change materials, *Energy Conversion and Management*, 96-84 (2017) 138.
- [11] A. Elgafy, K. Lafdi, Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials, *Carbon*, 3074-3067 (2005) (15)43.
- [12] F. Bahiraei, A. Fartaj, G.-A. Nazri, Experimental and numerical investigation on the performance of carbon-based nanoenhanced phase change materials for thermal management applications, *Energy Conversion and Management*, 128-115 (2017) 153.
- [13] D.D.W. Rufuss, L. Suganthi, S. Iniyan, P. Davies, Effects of nanoparticle-enhanced phase change material (NPCM) on solar still productivity, *Journal of Cleaner Production*, 29-9 (2018) 192.
- نیز انجام شده و نتایج حاصل نشان‌دهنده تشابه روند کلی تاثیر اضافه‌نمودن نانو ذره به پارافین در سیستم با سیال عامل هوا است. تاثیر افزایش عدد رینولدز جریان سیال عامل آب خالص در محدوده مورد بررسی حاضر از ۴۲۰ تا ۷۲۰ و در توانهای حرارتی ۴/۵ و ۱۴ وات است. نتایج نشان دادند که در هر دو حالت استفاده از نانوپارافین و پارافین خالص، با افزایش عدد رینولدز اولاً دمای پایدار باتری کاهش می‌یابد و ثانیاً اختلاف دمای بیشینه باتری بین دو عدد رینولدز ۴۲۰ و ۶۰۰ در مقایسه با دو عدد رینولدز ۶۰۰ و ۷۲۰ و در یک زمان مشخص؛ کمتر می‌شود. هرچند که در حالت کلی دمای باتری در حالت استفاده از نانوپارافین حدوداً ۴ درجه سلسیوس کمتر از حالت پارافین خالص است. لذا مقایسه نتایج بدست‌آمده در توان حرارتی ۴/۵ و ۱۴ وات بیانگر تاثیر زیاد افزایش رینولدز در توانهای حرارتی کم بوده است. در نهایت نتایج حاضر مشخص نمودند که اگر توان حرارتی باتری زیاد و عدد رینولدز جریان سیال عامل کم باشد، استفاده از نانوپارافین در سیستم ترکیبی براحتی می‌تواند دمای باتری را کنترل نموده و در محدوده ایمن طراحی شده نگه دارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از مسئولین محترم آزمایشگاه نانوسیالات دانشگاه تهران و نیز مهندس مهرداد کیانی که در انجام این تحقیق کمک شایانی نمودند تشکر و قدردانی می‌کنند. همچنین از پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان برای حمایت از این تحقیق تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] X.T.Liu, Z.H. Chen, C.B. Zhang, J. Wu, A novel temperature-compensated model for power Li-ion batteries with dual-particle-filter state of charge estimation, *Appl. Energy* 123 (2014) 272-263.
- [2] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, M. Ouyang, A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles, *Journal of power sources*, 288-272 (2013) 226.
- [3] T. Wang, K. Tseng, J. Zhao, Development of efficient air-cooling strategies for lithium-ion battery module based on empirical heat source model, *Applied Thermal Engineering*, 529-521 (2015) 90.
- [4] T. Zhang, Q. Gao, G. Wang, Y. Gu, Y. Wang, W. Bao, D.

- (13-1 (2020.
- [22] M. Mashayekhi, E. Houshfar, M. Ashjaee, Development of hybrid cooling method with PCM and Al₂O₃ nanofluid in aluminium minichannels using heat source model of Li-ion batteries, Applied thermal engineering, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115543>
- [23] A. Hussain, I.H. Abidi, C.Y. Tso, K.C. Chan, Z. Luo, C.Y. Chao, Thermal management of lithium ion batteries using graphene coated nickel foam saturated with phase change materials, International journal of thermal sciences, 124 35-23 (2018).
- [24] M. Mehrabi-Kermani, E. Houshfar, M. Ashjaee, A novel hybrid thermal management for Li-ion batteries using phase change materials embedded in copper foams combined with forced-air convection, International Journal of Thermal Sciences, 61-47 (2019) 141.
- [25] Y.S. Ranjbaran, S.J. Haghparast, M. Shojaeefard, G. Molaeimanesh, Numerical evaluation of a thermal management system consisting PCM and porous metal foam for Li-ion batteries, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (23-1 (2019).
- [26] J. Zhang, X. Li, F. He, J. He, Z. Zhong, G. Zhang, Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery module with paraffin/expanded graphite composite phase change material, International Journal of Photoenergy, 2017) 2017).
- [27] Z. Ling, F. Wang, X. Fang, X. Gao, Z. Zhang, A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling, Applied energy, 409-403 (2015) 148.
- [28] Y. Zhao, B. Zou, C. Li, Y. Ding, Active cooling based battery thermal management using composite phase change materials, Energy Procedia, 4940-4933 (2019) 158.
- [14] Z. Wang, X. Li, G. Zhang, Y. Lv, C. Wang, F. He, C. Yang, C. Yang, Thermal management investigation for lithium-ion battery module with different phase change materials, RSC advances, 42918-42909 (2017) (68)7.
- [15] R. Mahamud, C. Park, Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity, Journal of Power Sources, (2011) (13)196 5696-5685.
- [16] H. Park, A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles, Journal of power sources, 36-30 (2013) 239.
- [17] T.-H. Tran, S. Harmand, B. Sahut, Experimental investigation on heat pipe cooling for Hybrid Electric Vehicle and Electric Vehicle lithium-ion battery, Journal of power sources, 272-262 (2014) 265.
- [18] G. Fang, Y. Huang, W. Yuan, Y. Yang, Y. Tang, W. Ju, F. Chu, Z. Zhao, Thermal management for a tube-shell Li-ion battery pack using water evaporation coupled with forced air cooling, RSC advances, 9961-9951 (2019) (18)9.
- [19] C. Lian, Y. Wang, Q. Li, H. Li, X. He, Numerical investigation on the performance of microencapsulated phase change material suspension applied to liquid cold plates, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 358-342 (2019) (5)75.
- [20] J. Liang, Y. Gan, Y. Li, Investigation on the thermal performance of a battery thermal management system using heat pipe under different ambient temperatures, Energy Conversion and Management, 9-1 (2018) 155.
- [21] M. Kiani, M. Ansari, A.A. Arshadi, E. Houshfar, M. Ashjaee, Hybrid thermal management of lithium-ion batteries using nanofluid, metal foam, and phase change material: an integrated numerical-experimental approach, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Malekipour, M. Sabzpooshani, E. Houshfar, Investigation on the effect of addition of nano-titanium oxide particles to phase change material in a hybrid system for battery cooling under constant heat flux, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021): ***-17.

DOI: [10.22060/mej.2021.18825.6897](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18825.6897)

