

استفاده از مواد با تغییر فاز جهت مدیریت حرارتی باتری خودروهای هیبریدی

سید مهدی دژکام^۱، سید علی آقا میرجلیلی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

sdejkam@yahoo.com

^۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

saa_mirjalily@iauyazd.ac.ir

چکیده: یکی از پرکاربردترین اجزا و در حقیقت قلب یک خودرو هیبریدی، باتری آن می باشد که از نوع لیتیوم-یونی است. مسئله حیاتی در این باتری ها، خنک کاری کافی آن ها است؛ زیرا در این باتری ها، حرارت زیادی تولید می شود و در صورتی که مدیریت حرارتی مناسبی روی این باتری ها صورت نگیرد، عمر آن ها به طور تصاعدی کاهش می یابد. مواد با تغییر فاز به دلیل اینکه در هنگام ذوب شدن، گرمای نهان ذوب خود را جذب می کنند، خنک کاری زیادی را در مدت زمان کوتاهی فراهم می کنند. لذا در این مقاله به بررسی استفاده از ماده با تغییر فاز و اثر استفاده هم زمان از پره جهت خنک کاری این باتری ها پرداخته می شود. در واقع هدف یافتن ابعاد بهینه پره به گونه ای است که ماکزیمم دمای باتری در هنگام دشارژ حداقل شود. نتایج نشان داد که باتری با ۶ پره که ارتفاع پره در آن ۱۱/۶۷mm می باشد، بهترین عملکرد را دارد.

واژه های کلیدی: باتری، ماده با تغییر فاز، پره، خنک کاری، مدیریت حرارتی.

۱. مقدمه

این تحقیق، یک مدل ریاضی بر مبنای فرمولاسیون آنتالپی به دست آمد. الحلاج و سلمان [۷] یک نمونه از سیستم خنک‌کن توسط مواد با تغییر فاز برای خنک‌کاری باتری لیتیوم-یونی را ساختند و مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سیستم خنک‌کن با مواد تغییر فاز دهنده، جایگزین مناسبی برای سیستم‌های رایج خنک‌کاری است. در کار دیگری که توسط این محققان انجام شد، دیده شد که استفاده از مواد با تغییر فاز باعث یکنواختی درجه حرارت در باتری هنگام دشارژ می‌شود [۸].

ساساگوچی و همکاران [۹ و ۱۰] به صورت عددی و تحلیلی اثر شکل لوله بهره‌دار را روی پارامترهای انتقال حرارت سیستم ذخیره انرژی که از انرژی نهان بهره می‌برد مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مجموعه‌ها با ساختارهای کاملاً متفاوت که سطح تبادل حرارت یکسانی دارد، اغلب عملکرد یکسانی دارد.

کیزیلل و همکاران [۱۱] از مواد با قابلیت تغییر فاز به منظور خنک‌کاری باتری‌های لیتیوم-یونی در شرایط استرس‌زا و غیر نرمال استفاده نموده و نتایج حاصل را با خنک‌کاری هوایی مقایسه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که سیستم مورد مطالعه، اتلاف حرارتی در مرحله تخلیه را نسبت به سیستم خنک‌کاری فعال تسریع بخشیده و دمای مجموعه به منظور افزایش طول عمر باتری تقریباً یکنواخت باقی می‌ماند.

دوان و همکاران [۱۲] مدیریت حرارتی سیستم با استفاده از ماده با قابلیت تغییر فاز را به روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از یک هیتر الکتریکی به عنوان منبع حرارتی باتری استفاده کردند. همچنین آن‌ها دو طرح مختلف، اولی با سیلندر ماده با قابلیت تغییر فاز اطراف هیتر و دومی با پوشش ماده با قابلیت تغییر فاز اطراف هیتر را مورد بررسی قرار دادند. از طرفی آن‌ها بر روی عملکرد حرارتی سیستم در نرخ‌های متفاوت ذوب و دمای محیط متفاوت بحث کرده و اثر نیروی شناوری را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند هر دو ساختار عملکرد خوبی را از خود نشان دادند و هیتر را در رنج دمایی مطلوب نگه داشتند. سبح و همکاران [۱۳] اثر خنک‌کاری فعال (به کمک هوا) را با خنک‌کاری غیرفعال (با استفاده از ماده با قابلیت تغییر فاز) را مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی عددی برای نرخ‌های تخلیه، دمای کارکرد و دمای محیط متفاوت بسته باتری لیتیوم-یون انجام و با نتایج تجربی مقایسه گردید. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سیستم خنک‌کاری با هوا بدون استفاده از فن قادر به نگهداری سیستم در دمای مطلوب نیست ولی سیستم خنک‌کاری غیرفعال بدون استفاده از فن قادر به نگهداری سیستم در رنج دمایی مطلوب می‌باشد. خطیب و همکاران [۱۴] از ماده با قابلیت تغییر فاز به منظور خنک‌کاری باتری اسکوتر

افزایش شکاف بین عرضه و تقاضای جهانی انرژی به یک تهدید عمده تبدیل شده و یک چالش بزرگ برای جامعه مهندسی، پاسخ‌گویی به نیازهای انرژی جامعه است. از این رو بسیاری از انجمن‌ها و گروه‌های مدیریت انرژی با تأکید بر ذخیره‌سازی انرژی در هر دو بخش صنعتی و خانگی شکل گرفته‌اند. هم‌زمان با رشد سریع فناوری در زمینه خودروهای هیبریدی و نیاز مبرم به ذخیره و استفاده بهینه از انرژی، کنترل گرمایی و طراحی نسل جدید باتری‌های این خودروها اهمیت روزافزونی پیدا کرده است. در طراحی کنترل گرمایی این چنین وسایلی، انتخاب ماده مناسب بسیار حائز اهمیت است. ماده مورد استفاده باید گرمای ویژه بالایی داشته باشد. همچنین ضریب هدایت بالا به منظور جذب و یا دفع سریع گرما نیز لازمه این مواد است. هدف اولیه طراحی گرمایی، تأمین وسیله‌ای مناسب برای دفع گرما از باتری است. این هدف را می‌توان به وسیله سیستم‌های خنک‌کاری فعال که در آن هوا یا جریان مایع برای انتقال و دفع حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد انجام داد یا به وسیله سیستم خنک‌کاری غیرفعال که انتقال و یا دفع گرما به وسیله هدایت، تشعشع و یا جابه‌جایی آزاد هوا و یا مایع صورت می‌گیرد. استفاده از خنک‌کاری فعال و یا استفاده از سیال خنک‌کننده برای جذب گرمای دفع‌شده، باعث مصرف انرژی بیشتر و پیچیدگی سیستم خواهد شد. استفاده از مواد با قابلیت تغییر فاز که احتیاجی به مصرف توان برای خنک‌کاری ندارند، به‌عنوان خنک‌کننده غیرفعال، امروزه مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است.

روش‌های مختلفی برای مدیریت حرارتی تاکنون مورد مطالعه قرار گرفته است. از آن میان می‌توان به کار علمی میراحمد و همکاران [۱] اشاره کرد که به مطالعه عددی عملکرد یک مبدل حرارتی پر شده با ماده تغییر فاز برای سامانه تهویه مطبوع یک ساختمان مسکونی پرداختند. همچنین ردهاکریشن و بالاکریشن [۲] به بررسی اثر حضور ماده با قابلیت تغییر فاز در یک لوله پرداختند که در فضای دور لوله سیال انتقال حرارت جریان داشت. در کاری که کورکلو و همکاران [۳] انجام دادند، یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی عملکرد حرارتی یک لوله حاوی پلی پروپیلن توسعه داده شد. دومانسکی و فلاح [۴] ارزیابی قانون دومی از عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی که از مواد با تغییر فاز بهره می‌برند انجام دادند.

مطالعه جامعی روی استفاده از مواد با تغییر فاز جهت مدیریت حرارتی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی توسط کورکلو [۵] انجام شد. زیوکویچ و فوجی [۶] یک مدل محاسباتی ساده برای بررسی تغییر فاز مواد با تغییر فاز در کپسول‌هایی واقع در یک ظرف را توسعه دادند. در

Solidification & Melting استفاده می‌شود.

مشقات زمانی با استفاده از تقریب پیشرو مرتبه اول و مشتقات مکانی با استفاده از تقریب پیشرو مرتبه دوم گسسته‌سازی شده است. به منظور ساده‌سازی حل، شرایط جابه‌جایی آزاد اطراف باتری با استفاده از مقادیر ضریب ثابت جابه‌جایی آزاد در مراجع مختلف که بین $\frac{W}{m^2K}$ ۵-۲۵ می‌باشد، مدل می‌شود [۱۹]. در این پروژه، به خنک‌کاری باتری استوانه‌ای شکل LiPF₆ که مشخصات هندسی و حرارتی آن در جدول (۱) آورده شده است، پرداخته می‌شود [۲۰].

۲۶	قطر باتری (mm)
۶۵	ارتفاع باتری (mm)
34.5×10^{-6}	حجم باتری (m ³)
۳	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
۲۶۷۰	چگالی (kg/m ³)
۸۹۰	گرمای ویژه (J/kg.K)

حرارت تولیدی در باتری به سه شکل عمده قابل بررسی است:

- حرارت اهمی؛
- حرارت تولیدی بر اثر ایجاد دوقطبی؛
- حرارت حاصل از واکنش‌های شیمیایی.

ماکزیمم حرارت تولیدی در این باتری برحسب نرخ دشارژ

مختلف در جدول (۲) آورده شده است [۲۰].

جدول (۲): حرارت تولیدی در باتری برحسب نرخ دشارژ مختلف

حرارت تولیدی (W/m ³)	انرژی تولیدی (W)				نرخ دشارژ
	Total	A.P.Heat	R.Heat	O.Heat	
۴۳۴۶/۵۲	۰/۱۵	۰/۰۲۵	۰/۰۷۵	۰/۰۵	۰/۵C
۱۴۷۸۲/۶۱	۰/۵۱	۰/۰۷۵	۰/۱۷۵	۰/۲۶	۱C
۳۶۹۵۶/۵۲	۱/۲۷۵	۰/۲۲۵	۰/۳	۰/۷۵	۱/۷C

از آنجا که هدف خنک‌کاری باتری برای شرایط دمایی تابستان در نظر گرفته می‌شود، باید ماده انتخابی بر مبنای دمای محیط در تابستان که حدود ۴۰ °C یا تقریباً ۳۱۳K است، تغییر فاز ندهد. از طرفی دمای ذوب ماده نباید خارج از محدوده مناسب برای کارکرد مطلوب باتری باشد. با توجه به موارد گفته‌شده، برای خنک‌کاری باتری پارافین واکس انتخاب گردید؛ که مشخصات ترموفیزیکی آن در جدول (۳) آورده شده است [۲۱].

جدول (۳): خواص ترموفیزیکی پارافین واکس

۳۱۵/۲	نقطه ذوب (K)
۱۹۵۰۰۰	گرمای نهان ذوب (J/kg)
۹۰۰	چگالی (kg/m ³)
۰/۲۴۲	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
۱۷۷۰	گرمای ویژه (J/kg.K)

الکتریکی استفاده کردند تا دمای باتری را در شرایط مناسب بدون استفاده از فن و... نگهداری کنند. آن‌ها همچنین از پره و فوم آلومینیومی برای غلبه بر کوچک بودن ضریب هدایت حرارتی استفاده نمودند و شرایط را برای زمستان و تابستان بررسی کرده و با خنک‌کاری هوا مقایسه کردند. نتایج آن‌ها موفقیت استفاده از ماده با قابلیت تغییر فاز به‌عنوان یک کاندیدای فعال برای حل مشکل خنک‌کاری اسکوترهای الکتریکی^۱ و در نتیجه سایر کاربردهای ماشین‌های الکتریکی نشان می‌داد. محفوظ و همکاران [۱۵] به آنالیز اگزرتیک سیستم تولید توان خورشیدی که از ماده با قابلیت تغییر فاز جهت ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌کرد پرداختند و نشان دادند که مواد با تغییر فاز اثر چشمگیری در بهبود عملکرد این سیستم‌ها دارد. جوانی و همکاران [۱۶] به تحلیل مدیریت حرارتی خودروهای هیبریدی با استفاده از ماده با قابلیت تغییر فاز در بین سلول‌های باتری پرداختند و نشان دادند که با این کار می‌توان حداکثر دمای باتری را تا ۷ درجه سانتی‌گراد کاهش داد. در مطالعه دیگری، وانگ و همکاران [۱۷] به بررسی آزمایشگاهی رفتار حرارتی باتری‌های استوانه‌ای که از پارافین به‌عنوان ماده با قابلیت تغییر فاز به همراه پره استفاده می‌کنند پرداختند و بهبود قابل توجهی را مشاهده کردند. همچنین جیلتی و همکاران [۱۸] نشان دادند که ماده با قابلیت تغییر فاز در اطراف هر سلول به دفع بهتر گرما از باتری کمک می‌کند.

در این مطالعه، برای نخستین بار به بررسی خنک‌کاری غیرفعال توسط مواد با قابلیت تغییر فاز جهت خنک‌کاری باتری خودروهای هیبریدی پرداخته می‌شود. مزیت مواد با قابلیت تغییر فاز بالا بودن گرمای ویژه و گرمای نهان آن است. با وجود این، پایین بودن ضریب انتقال حرارت هدایتی از معایب مواد با قابلیت تغییر فاز به شمار می‌رود. پایین بودن ضریب هدایت مواد با قابلیت تغییر فاز باعث افزایش زمان پاسخ می‌شود. همچنین هنگامی که سطح مشترک بین جامد و مایع از سطح دریافت‌کننده شار گرمایی دور می‌شود، دما ناگهان افزایش خواهد یافت.

۲. روش عددی و سیستم مورد بررسی

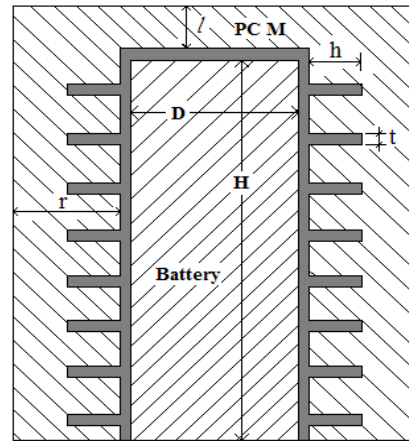
هدف از این پژوهش، بررسی و شبیه‌سازی خنک‌کاری باتری‌های لیتیم-یون با استفاده از مواد با قابلیت تغییر فاز می‌باشد. بدین منظور به بررسی خنک‌کاری باتری با استفاده از پره فولادی و شرط مرزی جابه‌جایی آزاد و عایق پرداخته شده است.

برای شبیه‌سازی عددی مسئله از نرم‌افزار انسیس فلونت^۲ استفاده شده است که به‌منظور بررسی شرایط تغییر فاز از بخش

۳. مطالعه شبکه حل

همان گونه که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود، با تغییر گام مکانی از 0.2mm به 0.1mm یا به عبارت دیگر با افزایش چهار برابری تعداد المان‌ها، دمای ماکزیمم باتری در طول بازه زمانی دو ساعت تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. در نتیجه اندازه شبکه مورد استفاده در ادامه حل 0.2mm انتخاب می‌شود.

پارامترهای هندسی باتری مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است. در این شکل، ارتفاع باتری، D قطر باتری، h ارتفاع پره، ضخامت پره، n تعداد پره، ضخامت لایه ماده با قابلیت تغییر فاز در وجه جانبی و l ضخامت ماده با قابلیت تغییر فاز در وجه فوقانی باتری است.

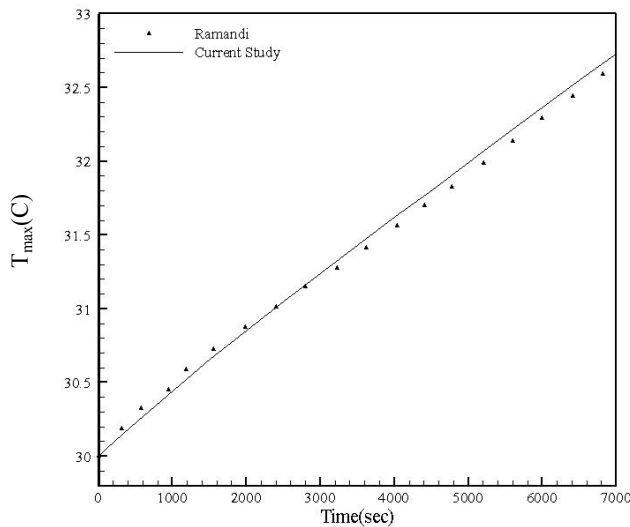


شکل (۱): طرح‌واره باتری مورد مطالعه در این پژوهش

۴. صحت‌سنجی نتایج

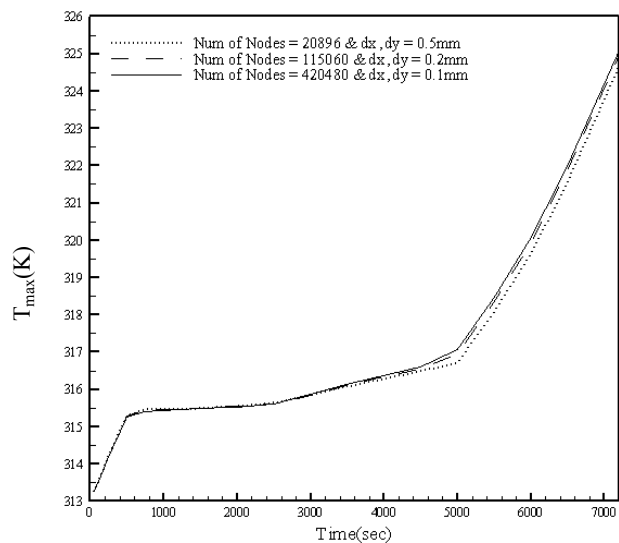
در پژوهش حاضر، از مقاله راماندی و همکاران [۲۱] به‌عنوان مرجع صحت‌سنجی نتایج برای تخمین فرایند ذوب در ماده با قابلیت تغییر فاز استفاده می‌شود.

شکل (۳) نتایج حاصل از روش به کار گرفته‌شده در پژوهش حاضر و نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه راماندی را برای دمای ماکزیمم باتری نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج دمایی حاصل از روش به کار گرفته‌شده در تحقیق حاضر و نتایج حاصل از تحقیقات راماندی وجود دارد که نشان‌دهنده صحت روش انتخابی برای حل مسائل تغییر فاز در این پروژه است.



شکل (۳): مقایسه دمای بیشینه حاصل از مطالعه راماندی [۲۱] و پژوهش حاضر

به‌منظور بررسی استقلال نتایج از اندازه شبکه مورد استفاده (تعداد المان‌ها)، باید نتایج را برای اندازه‌های مختلف شبکه مورد مطالعه قرار داد. در این راستا خنک‌کاری باتری با تعداد المان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و به مقایسه نتایج پرداخته شده است. از آنجا که هدف، خنک‌کاری باتری برای مدت‌زمان معین می‌باشد، پارامتر تأثیرگذار در طراحی سیستم، دمای ماکزیمم باتری محسوب می‌شود. از این رو، میزان بیشینه دمای باتری برای شبکه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۲) دمای ماکزیمم باتری برای شبکه‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۲): بیشینه دما برای سه اندازه المان متفاوت برای مدت‌زمان ۲hr

۵. بحث و نتیجه‌گیری

۱.۵. مقایسه خنک‌کاری با استفاده از مواد با قابلیت تغییر فاز با خنک‌کاری هوایی

در این بخش به مقایسه خنک‌کاری باتری با استفاده از مواد با قابلیت تغییر فاز و خنک‌کاری هوایی پرداخته شده است. در این قسمت، حجم ماده با قابلیت تغییر فاز اطراف باتری برای رسیدن به هدف خنک‌کاری باتری، برای دو ساعت تغییر داده شده تا به حجم مناسب برسد.

پارامترهای هندسی مورد استفاده در این بخش که پیش از این در شکل (۱) به آن اشاره گردید، در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): مشخصات هندسی باتری به منظور تعیین ضخامت مناسب

Case	ℓ (mm)	r (mm)	n	t (mm)	h (mm)	D (mm)	H (mm)
۱	-	-	۲۵	۰/۲	۳/۵	۲۳	۶۵
۲	۳	۶	۲۵	۰/۲	۳/۵	۲۳	۶۵
۳	۶	۱۰	۲۵	۰/۲	۳/۵	۲۳	۶۵
۴	۱۰	۱۳	۲۵	۰/۲	۳/۵	۲۳	۶۵

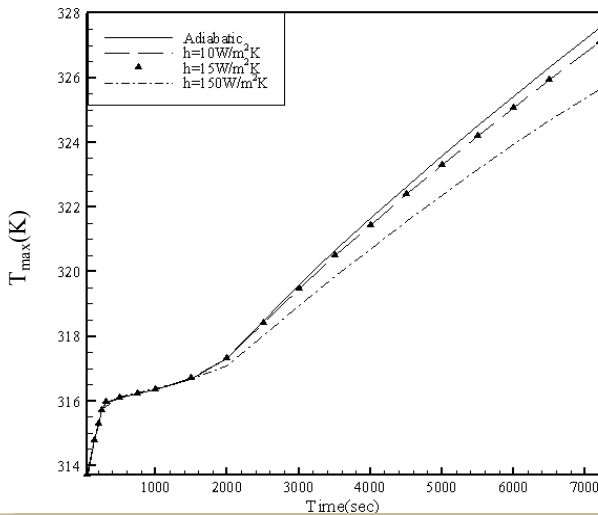
ماده با قابلیت تغییر فاز

از آنجا که هدف خنک‌کاری باتری برای بازه زمانی دو ساعت می‌باشد، حجمی از ماده با قابلیت تغییر فاز که در وجه جانبی باتری ۱۳mm ضخامت و در حجم فوقانی آن ۱۰mm ضخامت دارد، انتخاب شده است.

۲.۵. بررسی شرایط جابه‌جایی آزاد اطراف باتری

به منظور ساده‌سازی شرایط جابه‌جایی آزاد اطراف باتری مقدار آن ثابت فرض می‌شود. از آنجا که ابعاد باتری کوچک است، فرض در نظر گرفته شده دور از واقعیت نیست.

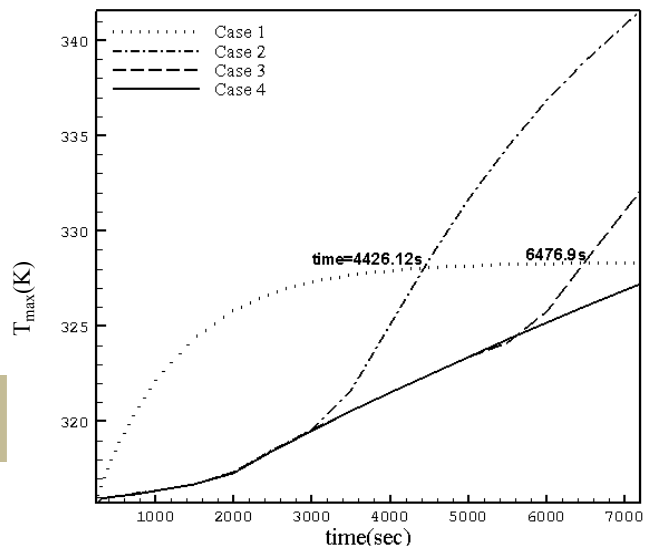
در شکل (۵)، نمودار دمای ماکزیمم باتری در طول دو ساعت برای ضرایب مختلف جابه‌جایی آزاد و اجباری آورده شده است. همان گونه که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود، با تغییر ضریب جابه‌جایی در محدوده جابه‌جایی آزاد تغییر در دمای ماکزیمم باتری مشاهده نمی‌شود و این نتیجه فرض در نظر گرفته شده برای شرط جابه‌جایی را تأیید می‌کند؛ زیرا تغییر شرط جابه‌جایی آزاد از ۱۰ به ۱۵ تأثیری در دمای ماکزیمم باتری ندارد. همچنین با تغییر ضریب جابه‌جایی و در نظر گرفتن جابه‌جایی اجباری کاهش دودرجه‌ای در دمای ماکزیمم باتری اتفاق می‌افتد که این نتیجه نشان می‌دهد استفاده از فن و ایجاد اغتشاش در هوای اطراف باتری تأثیر بسزایی در خنک‌کاری باتری دارد و عملکرد خنک‌کاری را بهبود می‌بخشد.



شکل (۵): دمای ماکزیمم باتری در بازه زمانی ۲hr برای ضرایب جابه‌جایی متفاوت

کسر جرمی مایع پارامتری است که نشان‌دهنده جرم ماده با قابلیت تغییر فاز تغییر فاز داده به جرم کل ماده با قابلیت تغییر فاز موجود در محفظه است. بر مبنای این تعریف، در ابتدای فرایند انتقال حرارت که تمامی ماده با قابلیت تغییر فاز موجود اطراف باتری در فاز جامد است، کسر جرمی مایع برابر صفر و در انتها که کل ماده با قابلیت تغییر فاز موجود اطراف باتری ذوب می‌شود، مقدار آن برابر یک می‌باشد.

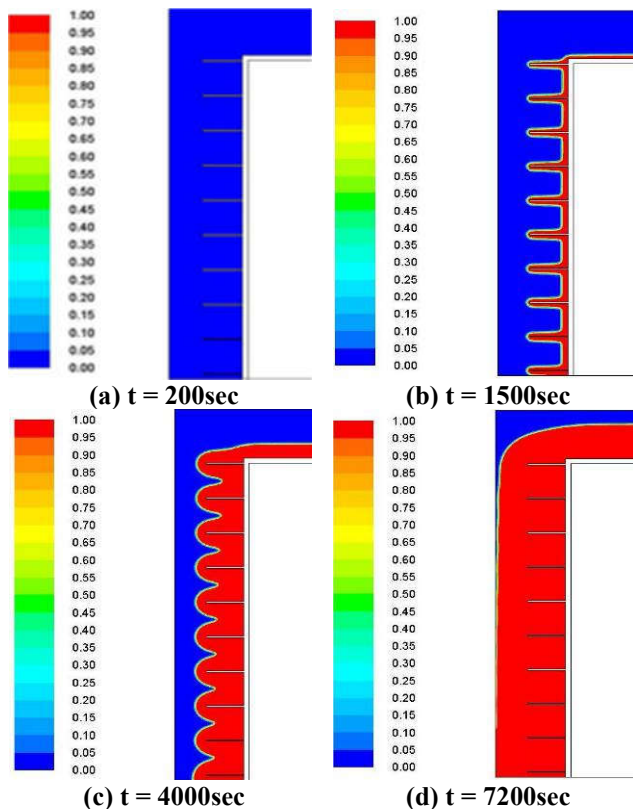
همان گونه که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود، در خنک‌کاری هوایی دمای باتری در ابتدا با شیب زیادی افزایش پیدا می‌کند. با وجود این، با گذشت یک ساعت انتقال حرارت در باتری به حالت تعادل می‌رسد و دمای آن تقریباً ثابت می‌ماند. ولی در خنک‌کاری غیرفعال افزایش دما سه مرحله متفاوت را تجربه می‌کند. تا قبل از ۲۰۰۰ ثانیه دمای باتری تقریباً ثابت است. در این حالت، ماده با قابلیت تغییر فاز بین پره‌ها در حال ذوب شدن می‌باشد. پس از ذوب کامل ماده با قابلیت تغییر فاز فضای میانی پره‌ها، شیب افزایش دما بیشتر می‌شود، با وجود این در مقایسه با خنک‌کاری هوایی روند افزایش دما کندتر است که به واسطه ذوب شدن باقیمانده ماده با قابلیت تغییر فاز موجود اطراف باتری توجیه است. در نهایت هنگامی که تمامی ماده با قابلیت تغییر فاز اطراف باتری ذوب می‌شود، روند افزایش دمای باتری شدت می‌گیرد و در صورتی که ماده با قابلیت تغییر فاز اطراف باتری کم باشد، پس از گذشت دو ساعت دمای باتری نسبت به خنک‌کاری هوایی بیشتر می‌شود.



شکل (۴): مقایسه خنک‌کاری با استفاده از مواد با قابلیت تغییر فاز و خنک‌کاری هوایی

استفاده از مواد با تغییر فاز جهت مدیریت حرارتی باتری خودروهای هیبریدی ۶۵

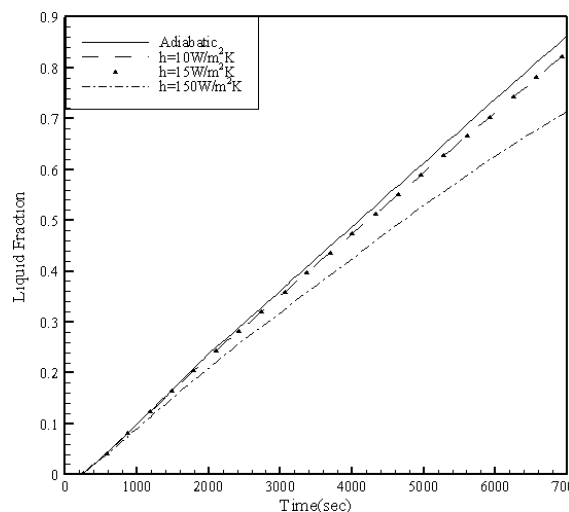
ضخامت پره برابر 0.2mm و ثابت فرض شده و ارتفاع بهینه پره به دست آورده شده است. به منظور بررسی و بهینه‌سازی ارتفاع پره اطراف باتری، شرط مرزی جابه‌جایی آزاد با ضریب جابه‌جایی اطراف باتری در نظر گرفته شده است [۱۹].



شکل (۷): روند ذوب ماده با قابلیت تغییر فاز در بازه دو ساعت برای باتری با ۱۰ پره فولادی

شکل (۸) دمای ماکزیمم باتری برحسب زمان در بازه زمانی دو ساعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، باتری با ۶ پره که ارتفاع پره در آن $11/67\text{mm}$ است، بهترین عملکرد را دارد. همچنین نمودار دمایی شکل (۸) بهبود عملکرد خنک‌کاری باتری با استفاده از پره را نسبت به حالت بدون پره نشان می‌دهد. علاوه بر این، ماکزیمم دما در باتری سه مرحله مختلف را طی می‌کند که با استفاده از کانتور کسر جرمی مایع قابل توجیه است.

شکل (۶) نشان‌دهنده کسر جرمی مایع اطراف باتری در طول دو ساعت برای ضرایب مختلف جابه‌جایی آزاد و اجباری است. همان‌گونه که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، با تغییر نوع شرط مرزی از حالت عایق حرارتی به جابه‌جایی (آزاد و اجباری) کسر مایع کاهش می‌یابد. این پدیده از آنجا ناشی می‌شود که در حالت شرط مرزی عایق امکان خروج حرارت تولیدی از مجموعه باتری وجود نداشته و کل حرارت تولیدی در باتری صرف تغییر فاز ماده با قابلیت تغییر فاز از جامد به مایع می‌شود و در نتیجه کسر جرمی مایع افزایش می‌یابد. از طرفی با تغییر نوع شرط مرزی از جابه‌جایی آزاد به اجباری نیز پدیده‌ای مشابه اتفاق می‌افتد که از تغییر فاز ماده با قابلیت تغییر فاز ناشی می‌شود.



شکل (۶): کسر حجمی مایع در بازه زمانی ۲hr برای ضرایب جابه‌جایی متفاوت

۳.۵. اثر پره‌ها

کانتور کسر جرمی مایع برای باتری با ۱۰ پره در زمان‌های مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تا قبل از ۲۰۰ ثانیه ماده با قابلیت تغییر فاز موجود به صورت جامد است که در این بازه زمانی به دلیل کم بودن ضریب هدایت حرارتی ماده با قابلیت تغییر فاز دمای باتری با شیب زیادی افزایش می‌یابد که نتایج ارائه شده در شکل (۸) گواهی بر این ادعاست. پس از شروع ذوب ماده با قابلیت تغییر فاز افزایش دمای باتری دو مرحله را طی می‌کند. نخست مربوط به حالتی است که ماده با قابلیت تغییر فاز موجود بین پره در حال ذوب شدن است که این مرحله برای باتری با ۱۰ پره تا زمان ۴۰۰۰ ثانیه ادامه دارد و مرحله دوم پس از ذوب کامل ماده با قابلیت تغییر فاز فضای بین پره‌ها اتفاق می‌افتد که در این بخش بقیه مواد با قابلیت تغییر فاز موجود اطراف باتری ذوب می‌شود. با توجه به شکل (۸) روند افزایش دمای باتری در حالتی که ماده با قابلیت تغییر فاز موجود در فضای بین پره‌ها به صورت کامل ذوب نشده، کمتر از حالتی است که ذوب کامل اتفاق افتاده است.

۶. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به منظور بهبود عملکرد خنک کاری باتری با استفاده از ماده با قابلیت تغییر فاز از پره برای افزایش ضریب هدایت حرارتی در طول خنک کاری استفاده شده است. از مطالعه حاضر نتایج زیر حاصل شد:

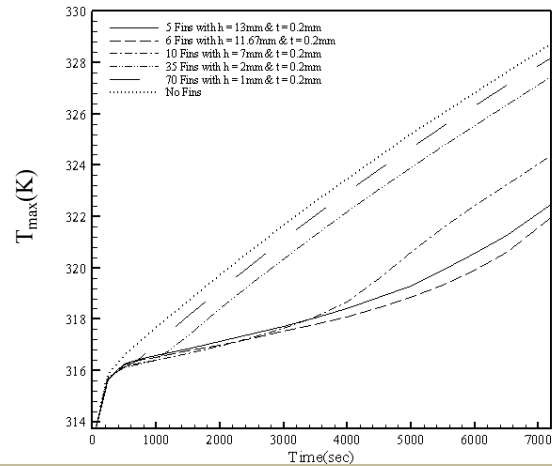
۱. در خنک کاری هوایی، دمای باتری در ابتدا با شیب زیادی افزایش پیدا می کند اما پس از گذشت یک ساعت انتقال حرارت در باتری به حالت تعادل می رسد و دمای آن تقریباً ثابت می ماند. ولی در خنک کاری غیرفعال، افزایش دما با شیب های متفاوتی دنبال می شود.

۲. خنک کاری با استفاده از ماده با قابلیت تغییر فاز، مادامی که کل ماده با قابلیت تغییر فاز موجود ذوب نشود، نسبت به خنک کاری هوایی بهتر است.

۳. با تغییر ضریب جابه جایی در محدوده جابه جایی آزاد، تغییر محسوسی در دمای ماکزیمم باتری مشاهده نمی شود. ولی با تغییر نوع جابه جایی و در نظر گرفتن جابه جایی اجباری کاهش نسبتاً زیادی در دمای ماکزیمم باتری اتفاق می افتد؛ این نتیجه نشان می دهد استفاده از فن و ایجاد اغتشاش در هوای اطراف باتری تأثیر بسزایی در خنک کاری باتری داشته و عملکرد خنک کاری را بهبود می بخشد.

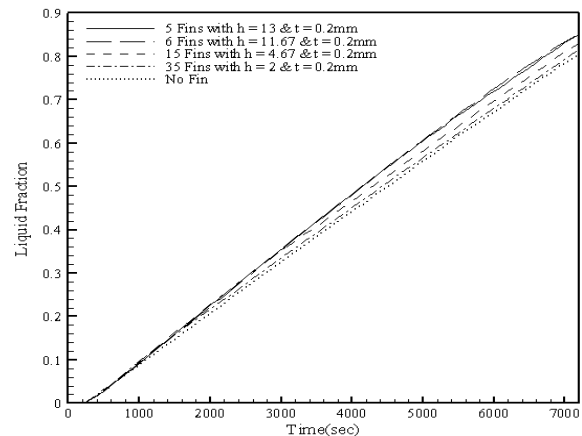
۴. خنک کاری غیرفعال باتری با استفاده از پره در تمامی حالات مختلف چیدمان پره نسبت به خنک کاری غیرفعال بدون پره دارای عملکرد بهتری است.

۵. در حالتی که از پره جهت خنک کاری باتری استفاده می شود، افزایش ارتفاع پره باعث بهبود عملکرد خنک کاری می گردد. به بیان دیگر، هرچه ارتفاع پره افزایش یابد، دمای ماکزیمم در باتری کاهش پیدا می کند.



شکل (۸): روند تغییرات دمای ماکزیمم برای پره فولادی با ارتفاع متفاوت برحسب زمان

در شکل (۹)، نمودار میانگین کسر جرمی مایع برحسب زمان در بازه زمانی دو ساعت نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل ملاحظه می شود، باتری با ۶ پره ماکزیمم مقدار کسر جرمی مایع در کل بازه زمانی خنک کاری را دارا می باشد. این پدیده نشان دهنده عملکرد مطلوب این تعداد پره برای انتقال حرارت تولیدی در باتری به ماده با قابلیت تغییر فاز است.



شکل (۹): کسر جرمی مایع برای پره های فولادی با ارتفاع مختلف برحسب زمان

مراجع

[۱] میراحمد، علی، صدرعاملی، سید مجتبی، «مطالعه عددی و شبیه سازی عملکرد یک مبدل حرارتی پر شده با ماده تغییر فاز برای سامانه تهویه مطبوع یک منزل مسکونی در مناطق گرم و خشک ایران»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی دانشگاه کاشان، سال پنجم، شماره ۲، صفحه ۴۲-۵۱، ۱۳۹۴.

[2] Radhakrishnan, K.B. and Balakrishnan, A.R., "Heat Transfer Analysis of Thermal Energy Storage using Phase Change Materials", Heat Recovery Systems and

CHP, Vol. 12, pp. 427-435, 1990.

[3] Kurklu, A., et al., "Mathematical Modelling of the Thermal Performance of a Phase-Change Material (PCM) Store: Cooling Cycle", Applied Thermal Engineering, Vol. 16, pp. 613-623, 1996.

[4] Domanski, R. and Fellah, G., "Exergy Analysis for the Evaluation of a Thermal Storage System Employing PCMS with Different Melting Temperatures", Applied Thermal Engineering, Vol. 16, pp. 907-919, 1996.

[5] Kurklu, A., "Energy Storage Applications in Greenhouses by Means of Phase Change Materials (PCMs): A

- Review", Renewable Energy, Vol. 13, pp. 89-103, 1998.
- [6] Zivkovic, B. and Fujii, I., "An Analysis of Isothermal Phase Change of Phase Change Material within Rectangular and Cylindrical Containers", Solar Energy, Vol. 70, pp. 51-61, 2001.
- [7] Al-Hallaj, S. and Selman, J.R., "Thermal Modeling of Secondary Lithium Batteries for Electric Vehicle/Hybrid Electric Vehicle Applications", Journal of Power Sources, Vol. 110, pp. 341-348, 2002.
- [8] Al-Hallaj, S. and Selman, J.R., "A Novel Thermal Management System for Electric Vehicle Batteries Using Phase-Change Material", Journal Electrochemical Society, Vol. 147, pp. 3231-3236, 2000.
- [9] Sasaguchi, K., Yoshida, M. and Nakashima, S., "Heat Transfer Characteristics of a Latent Heat Thermal Energy Storage Unit with a Finned Tube: Effect of Fin Configuration", Heat Transfer - Japanese Research; (USA), Vol. 19, pp. 11-27, 1990.
- [10] Sasaguchi, K., "Heat-Transfer Characteristics of a Latent Heat Thermal Energy Storage Unit with a Finned Tube", Heat Transfer - Japanese Research; (USA), Vol. 19, pp. 619-637, 1990.
- [11] Kizilel, R., Rami, S.J. and Robert Selman, Said A., "An Alternative Cooling System to Enhance the Safety of Li-ion Battery Packs", Journal of Power Sources, Vol. 194, pp.1105-1112, 2009.
- [12] Duan, X. and Naterer, G.F., "Heat Transfer in Phase Change Materials for Thermal Management of Electric Vehicle Battery Modules", Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 5176-5182, 2010.
- [13] Sabbah, R., Kizilel, R., Selman, J.R. and Al-Hallaj, S., "Active (Air-Cooled) vs. Passive (Phase Change Material) Thermal Management of High Power Lithium-ion Packs: Limitation of Temperature Rise and Uniformity of Temperature Distribution", Journal of Power Sources, Vol.182, pp. 630-638, 2008.
- [14] Khateeb, S., Farid, M., Selman J.R. and Al-Hallaj, S., "Design and Simulation of a Lithium-ion Battery with a Phase Change Material Thermal Management System for an Electric Scooter", Journal of Power Sources, Vol. 128, pp. 292-307, 2004.
- [15] Mahfuz, M.H. and et al., "Exergetic Analysis of a Solar Thermal Power System with PCM Storage", Energy Conversion and Management, Vol. 78, pp. 486-492, 2014.
- [16] Javani, N., Dincer, I., Naterer, G.F. and Rohrauer, G.L., "Modeling of Passive Thermal Management for Electric Vehicle Battery Packs with PCM Between Cells", Applied Thermal Engineering, Vol. 73, pp. 307-316, 2014.
- [17] Wang, Z., Zhang, H. and Xia, X., "Experimental Investigation on the Thermal Behavior of Cylindrical Battery with Composite Paraffin and Fin Structure", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 109, pp. 958-970, 2017.
- [18] Jiltea, R.D., Kumara, R., Ahmadi, M.H. and Chenc, L., "Battery Thermal Management System Employing Phase Change Material with Cell-to-Cell Air Cooling", Applied Thermal Engineering, Vol. 161, 2019.
- [19] Alawadhi, E.M., *Thermal Analysis of a PCM Thermal Control Unit for Portable Electronic Devices: Experimental and Numerical Studies*, Ph.D. Dissertation, Pittsburg, USA, 2001.
- [20] Xiongwen, Z., "Thermal Analysis of a Cylindrical Lithium-ion Battery", Electrochimica Acta, Vol. 56, pp. 1246-1255, 2011.
- [21] Ramandi, M.Y., Dincer. I. and Naterer, G.F., "Heat Transfer and Thermal Management of Electric Vehicle Batteries with Phase Change Materials", Heat Mass Transfer, Vol. 47, pp. 777-788, 2011.