

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۵

بهبود خنک کاری مجموعه باتری لیتیوم-یون استوانه‌ای با استفاده از نانوسیال در کانال‌های موجی و پلکانی و غلاف مسی

احسان دعاخوان^۱، قنبرعلی شیخ‌زاده^{۲*}

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

edoakhan@gmail.com

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

sheikhz@kashanu.ac.ir

چکیده: به منظور بهبود سیستم مدیریت حرارتی برای خنک کاری یک مجموعه باتری خودروهای برقی، عملکرد حرارتی مجموعه باتری‌ها در دو حالت شارژ و تخلیه شارژ در شرایط کاری مختلف با به کارگیری غلاف مسی در اطراف باتری‌ها و صفحه مسی و نیز یک کانال پلکانی در بالای مجموعه باتری و استفاده از نانوسیال به عنوان سیال خنک کاری. با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل حرارتی برای مجموعه باتری با تعداد ۷۱ عدد باتری لیتیوم-یون استوانه‌ای مدل ۱۸۶۵۰ بررسی و رفتار حرارتی مجموعه باتری مطالعه شده است؛ همچنین اثر متغیرهایی نظیر نرخ جریان الکتریکی در دو فرایند شارژ و تخلیه شارژ، دبی جریان سیال، اضافه کردن نانو ذرات اکسید مس به سیال پایه آب، تغییر سطح تماس میان باتری‌های همسایه و ایجاد کانال موجی برای باتری‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی عددی اثر مفید سیستم خنک کاری را تأیید می‌کند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که افزایش نرخ جریان الکتریکی باعث افزایش دما و کاهش یکنواختی توزیع دما در مجموعه باتری می‌شود. بدین منظور برخی تغییرات صورت گرفته است تا عملکرد حرارتی باتری بهبود یابد. افزایش درصد حجمی نانو ذرات باعث پایین آمدن دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری شده و منجر به بهبود عملکرد حرارتی سیستم خنک کاری می‌شود. همچنین افزایش دبی جریان سیال باعث کاهش بیشینه دما و بهبود یکنواختی دما در مجموعه باتری می‌شود. با افزایش دبی ورودی سیال خنک‌کن، به ترتیب ۷/۷ و ۱۲/۵ درصد کاهش در بیشینه دما و اختلاف دما در فرایند تخلیه شارژ در مجموعه باتری مشاهده می‌شود. در نهایت افزایش سطح تماس میان باتری‌ها و کانال موجی از ۳۷ درجه به ۵۷ درجه می‌تواند به میزان ۵/۲ و ۵۲/۳ درصد به ترتیب بر کاهش اختلاف دما و دمای بیشینه در مجموعه باتری تأثیر بگذارد، ولی بر یکنواختی دما در مجموعه اثر نامطلوب دارد.

واژه‌های کلیدی: باتری لیتیوم-یون، خنک کاری مایع، سیستم مدیریت حرارتی، نانوسیال، غلاف مسی.

۱. مقدمه

باتری‌های لیتیوم-یون به دلیل داشتن ظرفیت بالای تولید جریان الکتریسته، طول عمر طولانی و پایین بودن نرخ جریان الکتریکی در تخلیه شارژ [۱ و ۲] به طور گسترده در خودروهای برقی کاربرد دارند [۳]. مشکلاتی نظیر پتانسیل پایداری حرارتی، کاهش ظرفیت باتری [۴]، فرار حرارتی [۵-۷] و حتی انفجار [۸ و ۹] به دلیل افزایش دمای بیش از حد یا غیریکنواختی دمایی بین باتری‌ها [۱۰] می‌تواند باعث پیشگیری از گسترش تجاری خودروهای برقی شوند [۱۱]. از این رو نیاز به یک سیستم مدیریت حرارتی باتری مناسب که ضریب عملکرد و طول عمر باتری را بهبود دهد، ضروری به نظر می‌رسد [۱۲ و ۱۳].

مجموعه باتری باید با کارایی بالا در بازه مصرف خود کار کند و مقدار کافی انرژی در حالت‌های مختلف حرکت خودرو تولید کند. بدین منظور بازه دمایی کارکرد باتری‌ها باید بین ۲۹۸ تا ۳۱۳ کلوین حفظ شود و نیز اختلاف دما بین باتری‌ها هم باید به کمترین میزان خود برسد [۱۴]. برای کاهش خطرات و برآوردن نیازهای سیستم مدیریت حرارتی، راهکارهای مناسبی نظیر خنک‌کاری با هوا [۱۵ و ۱۶]، خنک‌کاری با مایع [۱۷ و ۱۸]، لوله‌های حرارتی [۱۹ و ۲۰] و مواد تغییر فازدهنده [۲۱ و ۲۲] به کار برده شده است. خنک‌کاری با هوا به عنوان ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش شناخته شده است؛ هرچند به خاطر پایین بودن هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی هوا، این روش برای مجموعه باتری‌هایی با ظرفیت بالا کاربرد ندارد [۲۳] و [۲۴]. اضافه کردن مواد تغییر فازدهنده یک روش کارآمد و قابل ملاحظه است؛ هرچند موجب اشغال فضای بیشتری خواهد شد. لوله‌های حرارتی به عنوان سیستمی غیرفعال به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته، ولی هزینه بالایی دارند و ممکن است عملکرد آن‌ها تحت اثر گرانش قرار گیرد. این به معنی محدود شدن عملکرد انتقال حرارت در شرایط ارتفاعی مختلف کارکرد خودرو است [۲۵]. خنک‌کاری با مایع به دلیل بالا بودن هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی نسبت به هوا، بسیار کارآمد عمل کرده است [۲۶] و موجب کم‌حجم شدن سیستم خنک‌کاری می‌شود. در ادامه برخی مطالعات مرتبط در این زمینه مرور می‌شود.

تاکرمن و پیس [۲۷] اولین بار خنک‌کاری با مایع به وسیله کانال‌ها را برای مدیریت حرارتی قطعات الکترونیکی پیشنهاد دادند. در ادامه، خنک‌کاری غیرمستقیم مایع به وسیله انواع مختلف کانال، برای مجموعه باتری‌های لیتیوم نیز پیشنهاد شده است. صفحات

خنک حاوی کانال‌های داخلی با مایع خنک‌کن، وظیفه انتقال حرارت از باتری را به عهده داشتند. هو و همکاران [۲۸] در تحقیقی یافتند که صفحات خنک با کانال‌های داخلی مستقیم دارای قابلیت مؤثر انتقال حرارت‌اند. آن‌ها نشان دادند انتقال حرارت به پخش مناسب مایع و ضخامت لایه مرزی بستگی دارد. این محققان همچنین به بررسی تأثیر کانال‌های چندگانه، تعداد کانال‌ها، برای حرکت جریان، دبی جریان و دمای محیط بر انتقال حرارت باتری پرداختند و دریافتند که افزایش تعداد کانال‌ها و دبی جریان باعث بهبود چشمگیر عملکرد باتری‌های لیتیوم-یون خواهد شد. لی و همکاران [۲۰] نشان دادند که استفاده همزمان از کانال صفحه‌ای به همراه لوله‌های حرارتی، باعث بهبود قابل توجه عملکرد خنک‌کاری باتری‌های مستطیلی لیتیوم-یون می‌شود. دنگ و همکاران [۲۹] کانال صفحه‌ای با مجاری داخلی به شکل مارپیچ را پیشنهاد دادند؛ نتایج آن‌ها نشان داد که کانال‌های صفحه‌ای توانایی کنترل افزایش دمای باتری‌ها را دارند، ولی اختلاف دما بین باتری‌ها را به خوبی کنترل نمی‌کنند. کانال‌های صفحه‌ای با مجاری داخلی موجی شکل نیز پیشنهاد و مطالعه شده است [۳۰-۳۲]. برای باتری‌های استوانه‌ای، کانال‌های صفحه‌ای مناسب نیستند، چون سطح تماس بین کانال صفحه‌ای با سطح مقطع مستطیلی و باتری استوانه‌ای شکل اندک است؛ به همین منظور ساختاری منعطف باید مورد استفاده قرار گیرد. در میان تحقیقات انجام‌شده، مشاهده می‌شود که قرار دادن باتری استوانه‌ای لیتیوم-یون در داخل غلاف فلزی برای بهبود خنک‌کاری، پیشنهاد شده است [۳۳]. برای نمونه، باسو و همکاران [۳۴] یک سیستم مدیریت حرارتی بر پایه خنک‌کاری با مایع برای مجموعه باتری‌های استوانه‌ای نوع ۱۸۶۵۰ گزارش کردند. آن‌ها یک مجموعه ۳۰ عددی باتری را که در ۶ ردیف ۵ عددی قرار گرفته‌اند، بررسی کرده و غلاف فلزی را به صورت یک ورقه در دو طرف هر ردیف در نظر گرفتند. کانال خنک‌کاری به شکل مستقیم است و حرارت تولیدشده باتری‌ها به وسیله غلاف آلومینیومی به کانال منتقل می‌شود. نتایج عددی این تحقیق نشان داد که افزایش دمای بیشینه مجموعه باتری‌ها به کمتر از ۷ کلوین در نرخ تخلیه شارژ $2/7C$ کاهش می‌یابد. برخی محققان استفاده از فوم فلزی در کنار مجموعه باتری را به عنوان مبدل حرارتی برای سیستم‌های مدیریت حرارتی پیشنهاد کردند [۳۵ و ۳۶] که می‌تواند راهکاری مناسب برای مدیریت سیستم‌های حرارتی مجموعه باتری‌ها باشد. اگرچه پیشرفت قابل توجهی در زمینه خنک‌کاری با مایع انجام شده است، همچنان نمی‌توان سیستم‌های مدیریت حرارتی پیشنهادشده با مایع را به دلیل تعداد زیاد باتری‌ها به

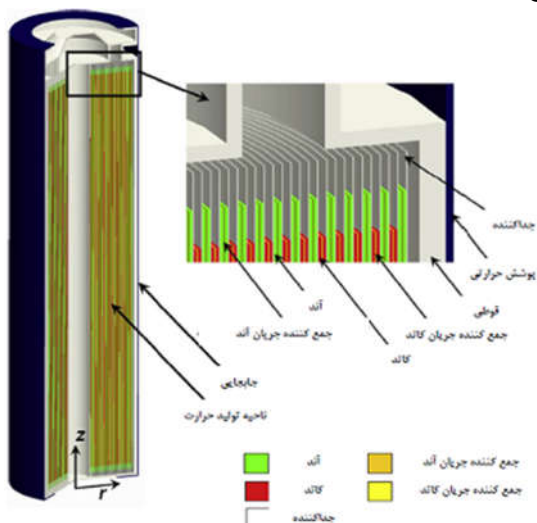
باتری‌ها در دو حالت شارژ و تخلیه شارژ در شرایط کاری مختلف با استفاده از راهکارهای فوق است. در این مدل، فرایند پیچیده الکتروشیمیایی شبیه‌سازی نخواهد شد، ولی با در نظر گرفتن اثرات حرارتی واکنش‌ها به صورت یک چشمه حرارتی در معادلات حاکم، بررسی تأثیر حرارت تولیدی در دو حالت شارژ و تخلیه شارژ امکان‌پذیر می‌شود.

۲. مدل هندسی و ریاضی

با الگو گرفتن از مطالعه ژائو و همکاران [۴۵]، یک مجموعه باتری لیتیوم-یون از نوع ۱۸۶۵۰ به تعداد ۷۱ عدد باتری و یک کانال موجی شکل در بین ردیف باتری‌ها در نظر گرفته می‌شود. یک کانال پلکانی نیز بالای باتری‌ها با جریان نانوسیال اکسید مس به کار گرفته می‌شود تا مجموعه باتری را در دو حالت شارژ و تخلیه شارژ خنک کند. همچنین صفحاتی از جنس مس در دو حالت غلاف به دور باتری‌ها و ورق بر روی باتری‌ها با کاربرد پخش حرارت و انتقال آن به کانال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل حرارتی توسعه یافته برای تحقیق درباره عملکرد حرارتی مجموعه باتری تحت شرایط مختلف نظیر مقادیر مختلف نرخ شارژ و تخلیه شارژ، مقادیر مختلف دبی ورودی نانوسیال در کانال‌ها، سطوح مختلف تماس بین دو باتری و نیز تماس بین باتری و کانال موجی شکل در شبیه‌سازی عددی مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد.

۱.۲. مشخصات حرارتی و هندسی برای تک‌باتری

باتری‌های تجاری لیتیوم-یون ۱۸۶۵۰ که کاتد آن‌ها از جنس نیکل-منگنز-کبالت می‌باشد، در این تحقیق مد نظر قرار گرفته است. طرحواره جزئیات ساختار باتری در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): طرح‌واره هندسه باتری لیتیوم-یون ۱۸۶۵۰

صورت تجاری استفاده کرد. مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی حرارتی مجموعه باتری‌های لیتیوم-یون، همچنان در حال گسترش‌اند [۳۷-۴۰].

سرینواسان و وانگ [۴۱] به مطالعه رفتار حرارتی باتری لیتیوم-یون با استفاده از مدل دوبعدی پرداخته و تأثیر دما بر عملکرد حرارتی و الکتریکی باتری را بررسی کرده‌اند؛ نتایج نشان داد که استفاده از مدل ظرفیت فشرده می‌تواند مشابه مدل الکتروشیمیایی حرارتی دوبعدی عمل کند. چن و همکاران [۴۲] نیز به بررسی عددی مدل حرارتی سه‌بعدی یک تک‌باتری لیتیوم-یون پرداخته و توزیع دما در باتری را به دست آوردند؛ نتایج آن‌ها نیز نشان می‌دهد که تغییرات دما در داخل باتری قابل ملاحظه نیست. همچنین ساو و همکاران [۴۳] با استفاده از یک مدل دوبعدی به بررسی عددی رفتار حرارتی یک تک‌باتری لیتیوم-فسفات آهن پرداختند و نشان دادند که حرارت تولیدی واکنش‌های شیمیایی داخل باتری عامل اصلی تولید حرارت است. فن و همکاران [۴۴] با استفاده از مدل گذرای سه‌بعدی حرارتی به بررسی تأثیر خنک‌کاری هوا برای مجموعه باتری لیتیوم-یون تحت شرایط رانندگی شدید پرداختند و نشان دادند که کاهش فاصله بین باتری‌ها و افزایش سرعت ورودی هوا باعث کاهش دمای بیشینه مجموعه باتری خواهد شد. ژائو و همکاران [۴۵] در مطالعه‌ای عددی به بررسی رفتار حرارتی مجموعه باتری لیتیوم-یون با استفاده از خنک‌کاری با آب در کانال موجی شکل بین باتری‌ها پرداخته‌اند. در مدل حرارتی آن‌ها از مدل ظرفیت فشرده برای باتری‌ها (و لحاظ نرخ حرارت تولیدی در آن‌ها با توجه به نتایج تجربی قبلی) استفاده شده است؛ نتایج آن‌ها نشان داد که خنک‌کاری با مایع با سرعت مناسب باعث بهبود عملکرد حرارتی مجموعه باتری می‌شود.

با توجه به مرور کارهای قبلی، مشاهده می‌شود که مطالعه و تحقیق در زمینه خنک‌کاری مجموعه باتری‌ها از اهمیت خاصی برخوردار بوده و همچنان مورد توجه محققان است. اگرچه به‌کارگیری روش خنک‌کاری با مایع، بهبود خنک‌کاری این سیستم را به‌همراه داشته، همچنان برای بهبود و اطمینان از عملکرد آن نیاز به مطالعه و تحقیق بیشتر در مورد مفید بودن ایده‌های جدید در این زمینه است. در این راستا، در کار حاضر با هدف بهبود عملکرد خنک‌کاری، غلافی از جنس مس در اطراف باتری‌ها و صفحاتی از جنس مس و نیز یک کانال پلکانی در بالای مجموعه باتری و استفاده از نانوسیال به‌عنوان سیال خنک‌کاری در نظر گرفته شده است. هدف از تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عملکرد حرارتی مجموعه

باتری شامل یک جمع‌کننده جریان آند از جنس فویل مسی،

$$\rho_{cp} = \frac{\sum_i \rho_i C_{p,i} V_i}{\sum_i V_i} \quad (1)$$

یک الکتروود آند، یک جداکننده، یک الکتروود کاتد و یک جمع‌کننده جریان کاتد ساخته شده از فویل آلومینیوم است. تمام قطعات باتری به صورت لایه‌ای پیچیده می‌شود و داخل قوطی استوانه‌ای باتری قرار می‌گیرد. الکتروود آند، کاتد و همچنین جداکننده به صورت متخلخل اند و الکتروولیت نیز حفره‌ها را پر می‌کند. باتری نیز به صورت جسمی همگن با خواص ترموفیزیکی معادل در نظر گرفته می‌شود [۴۲-۴۳] که با روش جمع وزنی خواص اجزای داخل باتری به دست می‌آید. برای مثال ظرفیت گرمایی (ρ_{cp}) معادل در باتری به صورت زیر محاسبه می‌شود

مشخصات ترموفیزیکی باتری به همراه ویژگی‌های هندسی قطعات داخل باتری در جدول (۱) آورده شده است.

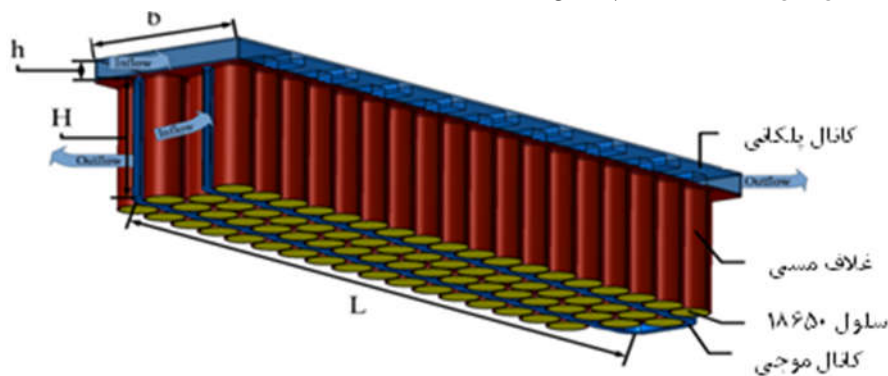
جدول (۱): مشخصات ترموفیزیکی قطعات و ابعاد هندسی باتری [۴۶-۴۸]

متغیرها	قوطی باتری	الکتروولیت	آند (فویل مسی)	الکتروود آند	جداکننده	کاتد	کاتد (فویل آلومینیوم)
ضخامت (μm)	۳۰۰		۱۰	۸۷	۲۲	۹۲	۱۰
ارتفاع (mm)	۶۵		۵۷	۵۳	۵۹	۵۳	۵۵
تخلخل				۰/۵۹	۰/۴۲	۰/۵۴	
چگالی (kg m^{-3})	۷۸۰۰	۱۲۹۰	۸۹۳۳	۲۶۶۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰	۲۷۰۲
هدایت حرارتی ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۱۶/۸	۰/۴۵	۳۹۸	۵	۱	۵	۲۳۸
ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۴۷۸	۱۳۳/۹	۳۸۵	۱۴۳۷/۴	۷۰۰	۷۰۰	۹۰۳

۲.۲. مدل فیزیکی مجموعه باتری

اضافه شده است. اضافه شدن کانال پلکانی به منظور خنک‌کاری سطح بالایی سلول‌های باتری است؛ چراکه با توجه به تحقیقات صورت گرفته [۴۹]، قطب مثبت باتری (سطح بالایی باتری) به دلیل ساختار داخلی و مقاومت داخلی آن‌ها، دمای بالاتری نسبت به قطب منفی دارند که باعث افزایش دمای کلی باتری‌ها می‌شود. شایان ذکر است از طرف دیگر با توجه به اینکه در تحقیقات گذشته [۵۱-۵۰] به برتری کانال‌های خنک‌کاری ناهموار و زبر یا دارای فین در مقایسه با کانال‌های صاف و مستقیم از نظر انتقال حرارت اشاره شده، این نوع از کانال در این تحقیق نیز استفاده شده است.

مجموعه باتری خودروی تسلا مدل S که در تحقیق حاضر بررسی می‌شود، شامل ۷۱۰۴ باتری لیتیوم-یون از نوع ۱۸۶۵۰ است. کل مجموعه شامل ۱۶ صفحه به صورت سری است که هر صفحه نیز شامل ۶ ماژول با اتصال سری است و هر ماژول دارای ۷۴ باتری به صورت اتصال موازی می‌باشد. برای هر ماژول نیز یک شاخه کانال خنک‌کاری طراحی شده است. مجموعه باتری قابلیت ذخیره ۸۵ kWh الکتریسیته را دارد و ولتاژ نامی ۴۰۰ V به صورت جریان مستقیم تولید می‌کند [۴۵]. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، به مجموعه باتری مورد نظر، با هدف بهبود عملکرد، صفحاتی از جنس مس و نیز یک کانال پلکانی در بالا



شکل (۲): طرح‌واره هندسه مجموعه باتری لیتیوم-یون شبیه‌سازی شده

معادلات حاکم برای بخش جامد به دلیل ایجاد گرمای وابسته به زمان در باتری در حالت گذرا اعمال می‌شود. معادله بقای انرژی در باتری‌ها، کانال موجی، کانال پلکانی و صفحات مسی حل می‌شود که در باتری به صورت معادله (۲) و در سایر بخش‌ها به صورت معادله (۳) است [۵۳].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \dot{Q} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

که در آن، T ، t و ρ به ترتیب دما، زمان و چگالی هستند. k و c_p نیز به ترتیب گرمای ویژه و هدایت حرارتی هستند. با استفاده از مدل ظرفیت فشرده، و روش جمع وزنی خواص ترموفیزیکی هر تک‌باتری مانند ρ ، c_p و k به ترتیب $284/5 \text{ kg/m}^3$ ، $1098/2$ و $2/586 \text{ W/m.K}$ محاسبه شده است [۵۵]. نیز نرخ گرمای تولیدی باتری‌ها در واحد حجم است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{gen}/V_b \quad (4)$$

که V_b حجم و \dot{Q}_{gen} نرخ گرمای تولیدی هر تک‌باتری است. هنگامی که باتری در حالت تخلیه شارژ است، دمای باتری به دلیل گرمای تولیدی افزایش می‌یابد. در کل، گرمای تولیدی باتری لیتیوم-یون به حرارت تولیدی واکنش‌ها، حرارت ژول، حرارت قطبی و حرارت واکنش‌های جانبی بستگی دارد. برناردی و همکاران [۵۶] با استفاده از مدل ظرفیت فشرده برای گرمای تولیدی سلول باتری معادله زیر را معرفی کردند.

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{ir} + \dot{Q}_{re} = I(U_{OCV} - U) - IT \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T} \quad (5)$$

که در آن \dot{Q}_{gen} ، گرمای تولیدی تک‌باتری، \dot{Q}_{ir} و \dot{Q}_{re} به ترتیب گرمای برگشت‌ناپذیر و برگشت‌پذیر است. I جریان تک‌باتری در دو حالت شارژ و تخلیه شارژ است. U_{OCV} ولتاژ جریان آزاد و U ولتاژ تک‌باتری هستند. T دمای باتری و $\partial U_{OCV}/\partial T$ ضریب دمای ولتاژ جریان آزاد هستند. در طول فرایند تخلیه شارژ، ولتاژ تک‌باتری بدین صورت خواهد بود.

$$U = U_{OCV} - IR \quad (6)$$

که در آن، R مقاومت معادل داخلی که شامل مقاومت اهمی و مقاومت معادل قطبی است. با ترکیب معادله (۵) و (۶) نتیجه می‌شود که:

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{ir} + \dot{Q}_{re} = I^2 R - IT \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T} \quad (7)$$

ورق‌های مسی با ضخامت ۱ میلی‌متر به صورت غلافی به دور هر باتری و صفحه‌های بر روی سطح بالای باتری‌ها با کاربرد پخش حرارت و انتقال آن به کانال‌ها اضافه شده‌اند. یک کانال موجی شکل نیز در فضای بین باتری‌ها ایجاد شده است. هر دو کانال موجی شکل و پلکانی از جنس آلیاژ آلومینیوم‌اند. ضخامت ورق هر دو کانال ۱ میلی‌متر و دیگر ابعاد در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مشخصات ترموفیزیکی و ابعاد هندسه مواد و قطعات سیستم مدیریت حرارتی [۵۲]

متغیرها	کانال موجی	کانال پلکانی	ورق (آلیاژ آلومینیوم)	مسی
طول (mm)	L=۳۷۵	۳۷۵	۳۷۵	۳۷۵
عرض (mm)	۵	b=۸۳	۸۳	۸۳
ارتفاع (mm)	H=۶۶	h=۱۰	۱	۱
چگالی (kg m^{-3})	۲۷۰۲	۲۷۰۲	۲۷۰۲	۸۹۳۳
هدایت حرارتی ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۲۳۸	۲۳۸	۲۳۸	۳۹۸
ظرفیت گرمای ویژه ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۹۰۳	۹۰۳	۹۰۳	۳۸۵

۳.۲. مدل ریاضی

در این بخش با توجه به فرضیات و ساده‌سازی‌های انجام‌شده، معادلات حاکم و شرایط مرزی و اولیه بیان می‌شود.

۱.۳.۲. معادلات حاکم

شبهه‌سازی انجام‌شده شامل چهار بخش اصلی است: مجموعه باتری‌ها، کانال‌های آلومینیومی (موجی و پلکانی)، ورق مسی بالای باتری‌ها و غلاف مسی دور باتری‌ها، و سیال خنک‌کاری (آب-اکسید مس (CuO) با درصدهای حجمی ۰، ۱ و ۲ درصد). شایان ذکر است از آنجا که ظرفیت حرارتی و ضریب حرارت هدایتی اکسید مس نسبت به بسیاری از نانوذرات معمول دیگر بالاتر است، در این تحقیق از نانوذرات اکسید مس استفاده شده است.

رژیم جریان سیال داخل کانال‌ها آرام در نظر گرفته می‌شود. خواص ترموفیزیکی نانوذرات و آب در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۳): خواص ترموفیزیکی اکسید مس و آب در دمای ۲۹۸ K [۵۳]

خواص	اکسید مس	آب
چگالی (kgm^{-3})	۶۵۰۰	۹۹۷/۱
ظرفیت گرمای ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۵۴۰	۴۱۷۹
هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	۱۸	۰/۶۱۳
لزجت دینامیکی (Pa.s)	-	1.0×10^{-4}

۲.۳.۲. شرایط مرزی و اولیه

دمای اولیه باتری‌ها، سیال خنک‌کاری، کانال‌ها، دیواره کانال‌ها و دمای محیط ۲۹۸ K است. در ابتدا باتری‌ها در حالت شارژ کامل قرار دارند و برای شبیه‌سازی حالت شارژ نیز، باتری‌ها در حالت تخلیه کامل قرار دارند. شرط مرزی ورودی کانال‌ها به صورت سرعت ثابت و شرط مرزی خروجی کانال‌ها به صورت فشار نسبی صفر در نظر گرفته شده است. دیواره‌های داخلی کانال‌ها با فرض عدم لغزش در نظر گرفته شده‌اند. شرط مرزی حرارتی بین باتری‌ها و دیواره کانال‌ها و دیواره داخلی کانال و سیال به صورت پیوستگی دما و برابری شار حرارتی و مرزهای خارجی به جز ورودی و خروجی سیال به صورت آدیاباتیک حرارتی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق از انتقال حرارت تشعشعی نیز صرف نظر شده است [۵۸]. شرط اولیه و شرایط مرزی در ورودی و خروجی کانال خنک‌کاری به ترتیب عبارت‌اند از:

$$t = 0, T = T_0 \quad (۱۶)$$

$$x = 0 : u = V_{in}, T = T_0 \quad (۱۷)$$

$$x = 375 \text{ mm}, P = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (۱۸)$$

۴.۲. روش عددی

معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود در نرم‌افزار FLUENT حل می‌شوند. گسسته‌سازی به صورت ضمنی و با استفاده از روش بالادست مرتبه دوم انجام شده است. پیوند فشار و سرعت با استفاده از الگوریتم SIMPLE برقرار شده است. شبکه عددی در شکل (۳) نشان داده شده است.

المان‌ها در شبیه‌سازی عددی به صورت هرمی با اندازه ضلع متوسط ۳ تا ۹ میلی‌متر انتخاب شده است. برای تعیین تعداد سلول‌ها، آزمایش استقلال حل از شبکه و گام زمانی برای بررسی میزان وابستگی نتایج به شبکه محاسباتی انجام شده است. بدین منظور تغییر دمای سیال خروجی از کانال موجی در پنج شبکه با تعداد سلول ۱/۷۱، ۲/۳۴، ۴/۹۱، ۷/۷۹، ۱۳/۹۸ و ۱۹/۶۳ میلیون و استقلال از زمان در سه گام زمانی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. برای نرخ‌های جریان ۱C، ۳C و ۵C به ترتیب طی طول زمان ۷۲۰۰، ۳۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۷۲۰ ثانیه شبیه‌سازی انجام شده است. نرخ جریان معیاری برای اندازه‌گیری میزان تخلیه یا شارژ باتری با توجه به حداکثر ظرفیت آن باتری است. نرخ ۱C بدین معناست که تخلیه جریان باتری در مدت زمان ۱ ساعت انجام می‌شود. با توجه به شکل (۴) و نتایج

\dot{Q}_{re} می‌تواند مثبت یا منفی باشد که بستگی به حالت شارژ یا تخلیه شارژ باتری دارد.

در این تحقیق مدل مخلوط برای نانو سیال به کار گرفته شده است. سرعت نانو ذرات معادل سرعت سیال پایه در نظر گرفته می‌شود. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای مدل مخلوط به ترتیب عبارت‌اند از [۵۷ و ۵۸]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{V}_m) = 0 \quad (۸)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{V}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{V}_m \mathbf{V}_m) \\ = -\nabla P_m \\ + \nabla \cdot (\mu_m (\nabla \mathbf{V}_m + \nabla \mathbf{V}_m^T)) \\ + \rho_m \mathbf{g} \end{aligned} \quad (۹)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m h_m) + \nabla \cdot (\rho_m h_m \mathbf{V}_m) + \nabla \\ \cdot (P \mathbf{V}_m) = \nabla \cdot (k_m \nabla T) \end{aligned} \quad (۱۰)$$

که در آن، \mathbf{V}_m بردار سرعت متوسط مخلوط و P فشار است. ρ_m ، μ_m و k_m به ترتیب چگالی، لزجت و هدایت حرارتی مخلوط هستند. در مدل مخلوط تمام خواص مخلوط با جمع وزنی خواص اجزا محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \rho_m = \sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i, \quad \mu_m = \sum_{i=1}^n \phi_i \mu_i, \\ \rho_m h_m = \sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i h_i, \quad k_m = \sum_{i=1}^n \phi_i k_i \end{aligned} \quad (۱۱)$$

که در آن، ϕ کسر حجمی فاز i و اندیس‌های m و i نیز به ترتیب معرف مخلوط و شاخص جمع هستند. شایان ذکر است با توجه به اینکه لزجت برای ذرات صفر است، مقدار لزجت مربوط در مدل، همان مقدار لزجت معادل لحاظ می‌شود؛ قابل ذکر است که این فرض در کسر حجمی‌های پایین خطای زیادی ندارد.

خواص ترموفیزیکی نانو سیال شامل دانسیته، گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آیند [۵۷]:

$$\rho_m = \phi \rho_{np} + (1 - \phi) \rho_f \quad (۱۲)$$

$$(\rho c_p)_m = \phi (\rho c_p)_{np} + (1 - \phi) (\rho c_p)_f \quad (۱۳)$$

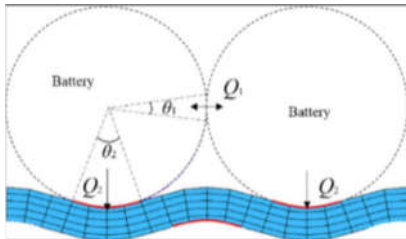
$$\begin{aligned} \frac{k_m}{k_f} \\ = 1 \\ + 64.7 \phi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_{np}} \right)^{0.369} \left(\frac{k_{np}}{k_f} \right)^{0.7476} Pr^{0.9955} Re^{1.2321} \end{aligned} \quad (۱۴)$$

$$\mu_{eff} = (123 \phi^2 + 7.3 \phi + 1) \mu_f \quad (۱۵)$$

که در آن، $Re' = \frac{\rho_f K_B T}{3 \pi \mu_f^2 l_f}$ عدد رینولدز براونی و $Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f}$ عدد پرنتل و l_f مسیر آزاد متوسط سیال (برای آب برابر nm ۰/۱۷) است.

مقادیر ۴۳۸، ۱۰۹۴ و ۲۱۹۹ می‌باشد؛ از این‌رو جریان داخل هر دو کانال به صورت آرام در نظر گرفته شده است. برای بررسی اثر سطح تماس بین باتری‌ها و همچنین بین باتری‌ها و کانال موجی، به ترتیب دو زاویه θ_1 و θ_2 انتخاب و در شکل (۵) نشان داده شده است. تمامی باتری‌ها در مجموعه باتری نیز به صورت فشرده قرار گرفته شده‌اند. زوایای مذکور مقدار زاویه قطع تماس به ترتیب بین باتری‌ها و باتری و کانال را مشخص می‌کنند.

با استفاده از نوار چسب هدایت حرارتی که بین باتری‌ها اضافه شده، سطح تماس بین باتری‌ها از یک خط به یک سطح افزایش یافته است. از آنجا که نوار چسب اضافه شده بین باتری‌ها نیز نازک است، مقاومت حرارتی ایجاد نمی‌کند و دارای هدایت حرارتی بالا هستند.



شکل (۵): طرح‌واره سطح تماس بین باتری‌ها و سطح تماس بین کانال موجی و باتری‌ها [۴۵]: معرفی زوایای θ_1 و θ_2

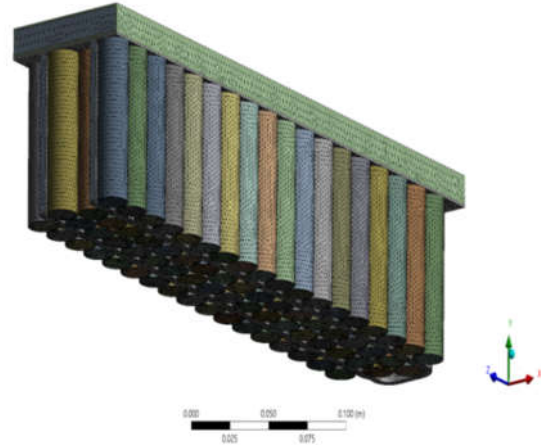
۱.۳. صحت‌سنجی شبیه‌سازی

برای صحت‌سنجی کار حاضر از کانال خنک‌کاری موجی به همراه مجموعه باتری همانند تحقیق ژائو و همکاران [۴۵] استفاده شده است. تعداد باتری‌ها ۷۱ عدد همانند تحقیق ژائو و همکاران استفاده شده است. دمای سیال ورودی و محیط نیز ۲۹۸ کلوین و نرخ جریان در دو حالت شارژ و تخلیه شارژ نیز ۵C در نظر گرفته شده است. سرعت سیال ورودی نیز ۰/۱ متر بر ثانیه فرض شده است. همچنین زاویه تماس دو باتری ۸ درجه و زاویه تماس باتری‌ها و کانال موجی نیز ۵۷ درجه است. در شکل (۶) تغییرات دمای بیشینه و اختلاف دما برای حالت‌های شارژ (SOC) و تخلیه شارژ (DOD) با نتایج ژائو و همکاران [۴۵] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج از تطابق خوبی برخوردار است و اختلاف نتایج کمتر از ۵٪ است.

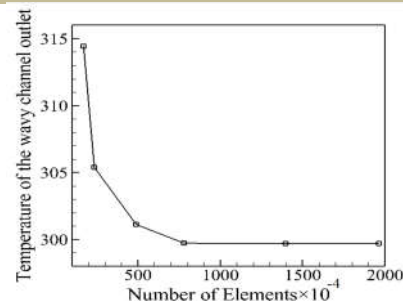
۲.۳. بررسی تأثیر نرخ جریان شارژ و تخلیه شارژ

نرخ‌های جریان شارژ و تخلیه شارژ ۰/۵C، ۱C، ۳C و ۵C انتخاب

آزمایش استقلال حل از شبکه، تعداد سلول ۷/۷۹ میلیون انتخاب شده است؛ همچنین پس از بررسی استقلال از گام زمانی، مقدار آن ۱ ثانیه تعیین شد. خطای مجاز برای دقت و همگرایی نتایج عددی طوری تنظیم شده است که دمای باتری‌ها با خطای عددی کمتر از ۰/۰۴ K محاسبه شده است.



شکل (۳): شبکه عددی ایجاد شده برای میدان حل



شکل (۴): دمای سیال خروجی کانال موجی برای شبکه‌های مختلف؛ استقلال حل از شبکه

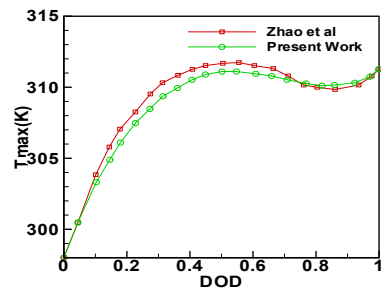
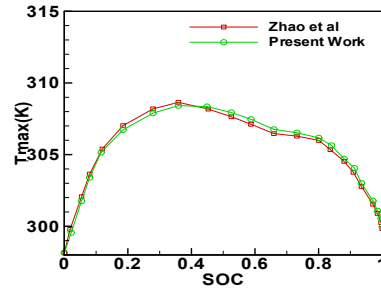
۳. نتایج و بحث

عملکرد حرارتی مجموعه باتری تحت تأثیر نرخ جریان شارژ و تخلیه و دبی جریان سیال است. در این تحقیق به شبیه‌سازی حرارتی مجموعه باتری مورد نظر در مقادیر مختلف نرخ جریان شارژ و تخلیه شارژ و همچنین مقادیر مختلف دبی جریان سیال خنک‌کاری پرداخته می‌شود. سیال خنک‌کاری نیز آب و نانوذرات اکسید مس با دو مقدار کسر حجمی ۱ و ۲ در نظر گرفته شده است. مقدار سرعت جریان سیال در ورودی کانال‌ها نیز ۰/۱ m/s، ۰/۲۵ و ۰/۵ انتخاب شده است. عدد رینولدز جریان با توجه به رابطه $Re = \frac{\rho V D_h}{\mu}$ و مقادیر دانسیته، سرعت و لزجت سیال و قطر هیدرولیکی ($D_h = \frac{4A}{P}$) محاسبه می‌شود. A مساحت مقطع کانال و P محیط مقطع کانال است. مقادیر عدد رینولدز به ترتیب در کانال موجی، ۴۳۵، ۱۰۸۷ و ۲۱۷۳ و در کانال پلکانی نیز

حالت شارژ، این مقدار برابر با ۹/۰۸ کلون است. دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری نیز دو مشخصه مهم برای بررسی عملکرد سیستم مدیریت حرارتی است. مشخصه اختلاف دما با توجه به اختلاف بالاترین دما و کمترین دما در مجموعه باتری تعریف می شود. در شکل (۹) و (۱۰)، دو مشخصه دمای بیشینه و اختلاف دما در دو حالت تخلیه شارژ و شارژ نشان داده شده است. در شکل (۹-الف) نمودار دمای بیشینه در زمان فرایند تخلیه شارژ برای نانوسیال آب-اکسید مس با درصد حجمی صفر، یک و دو درصد نمایش داده شده است. این شکل بیانگر افزایش دما با افزایش نرخ جریان است. همه نمودارها روند مشابهی را نشان می دهند. تغییرات شیب نمودارها نیز به دلیل تجمع حرارت در باتری ها ناشی از حرارت تولیدی در آنهاست. برای مثال، طی فرایند تخلیه شارژ با نرخ جریان ۵C، باتری دارای دمای بیشینه در نزدیکی خروجی قرار دارد. پس از گذشت زمان، مقدار حرارت تولیدی و میزان خنک کاری به تعادل خواهند رسید و دمای باتری ثابت می شود؛ هرچند این تعادل به دلیل کاهش حرارت تولیدی باتری به هم خورده و باعث کاهش دما در باتری خواهد شد. در انتهای دوره تخلیه شارژ، نرخ حرارت تولیدشده نیز دوباره افزایش می یابد. شکل (۹-ب) روند تغییرات اختلاف دما در فرایند تخلیه شارژ را نشان می دهد. تغییرات روندی مشابه با نمودار دمای بیشینه را نمایش می دهد.

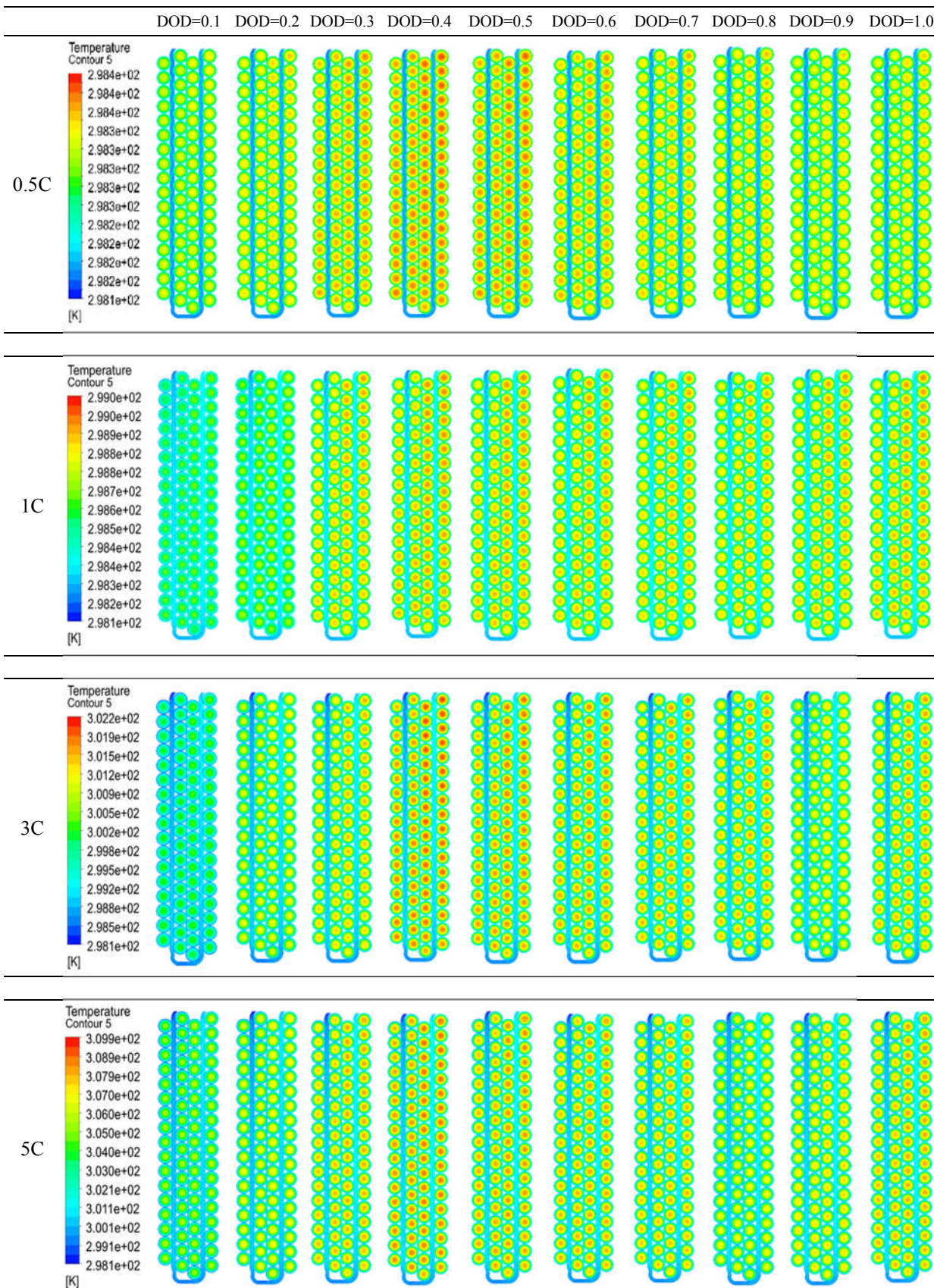
شکل (۱۰-الف) و (۱۰-ب) به ترتیب نرخ تغییرات دمای بیشینه و اختلاف دما را برای فرایند شارژ نشان می دهد. برای دو نرخ جریان بالا (۳C و ۵C)، با توجه به شکل (۱۰-الف)، دمای بیشینه در ابتدای فرایند با افزایش SOC تا ۰/۲ به سرعت افزایش می یابد و سپس در یک دوره نسبتاً طولانی تا ۰/۸ با تغییرات نسبتاً کمی در دمای بیشینه باقی می ماند و سرانجام کاهش می یابد. برای دو نرخ جریان پایین تر (۰/۵ C و ۱ C)، در حین فاز شارژ در جریان ثابت طولانی، حرارت تولیدشده نیز بسیار کم است، درحالی که در حین دوره شارژ، حرارت تولیدشده نیز به تدریج افزایش می یابد و سپس بعد از تغییر در حالت شارژ شروع به کاهش می کند. درحالی که با توجه به شکل (۱۰-الف)، برای این دو نرخ جریان پایین در فرایند شارژ، نمودار تغییرات به صورت خطی با تغییرات بسیار کوچک می باشد که مربوط به تغییرات حرارت تولیدشده در باتری است. برای نرخ جریان ۰/۵C، دمای بیشینه می تواند کوچک تر از دمای محیط باشد. همچنین، نمودار نشان داده شده در شکل (۹-ب)، نتایج مشابه با نمودار شکل (۹-الف) دارد.

شده است. در شبیه سازی های صورت گرفته در این بخش مقدار سرعت سیال ۰/۱ m/s و زاویه تماس دو باتری ۸ درجه و زاویه تماس باتری ها و کانال موجی نیز ۵۷ درجه در نظر گرفته شده است. کانتور دما در مقطع بالایی مجموعه باتری ها در شکل (۷) و (۸) برای حالت های شارژ و تخلیه شارژ نشان داده شده است.

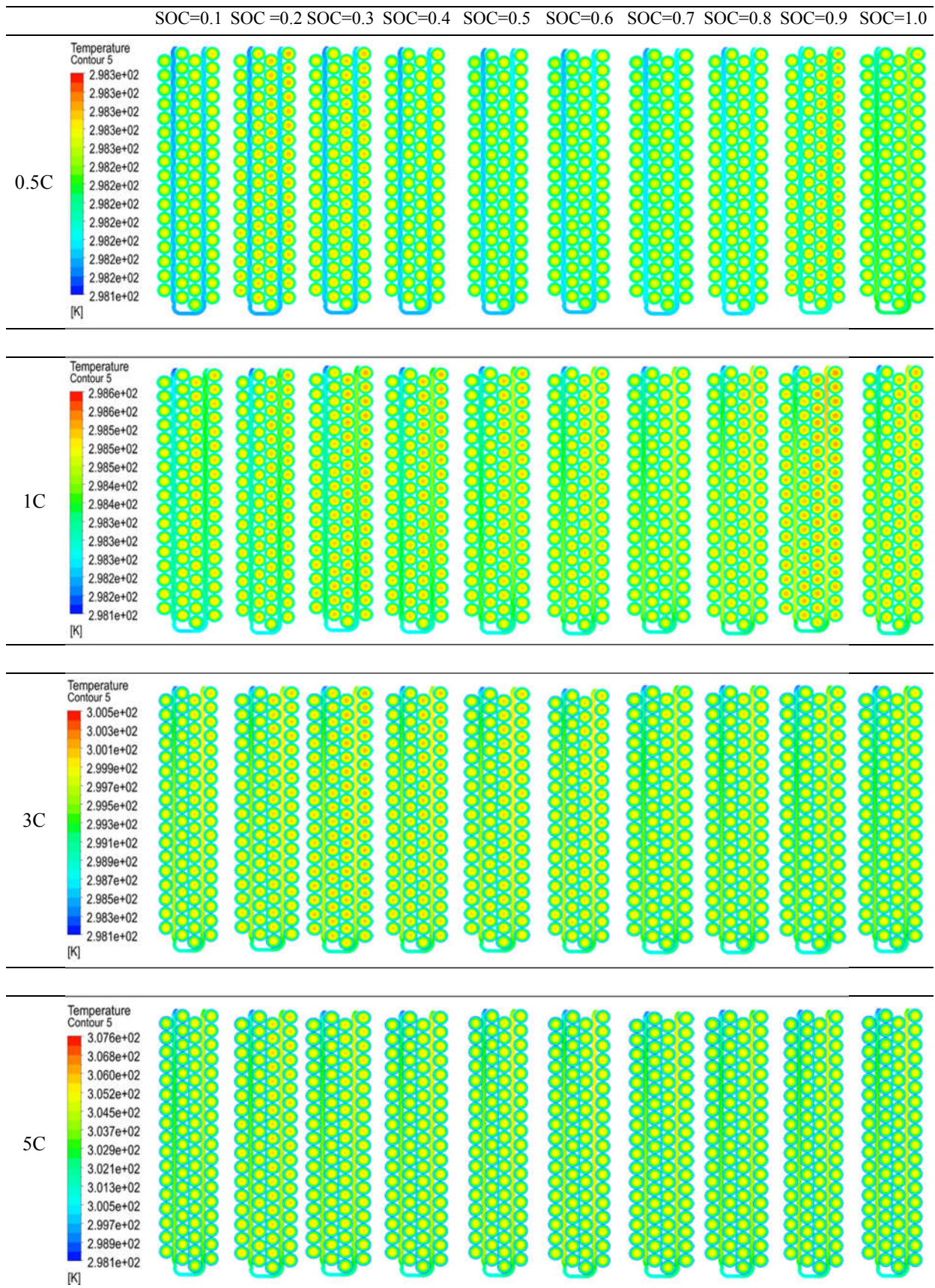


شکل (۶): مقایسه دمای بیشینه و اختلاف دما در فرایند شارژ و تخلیه شارژ با نتایج ژائو و همکاران [۴۵]

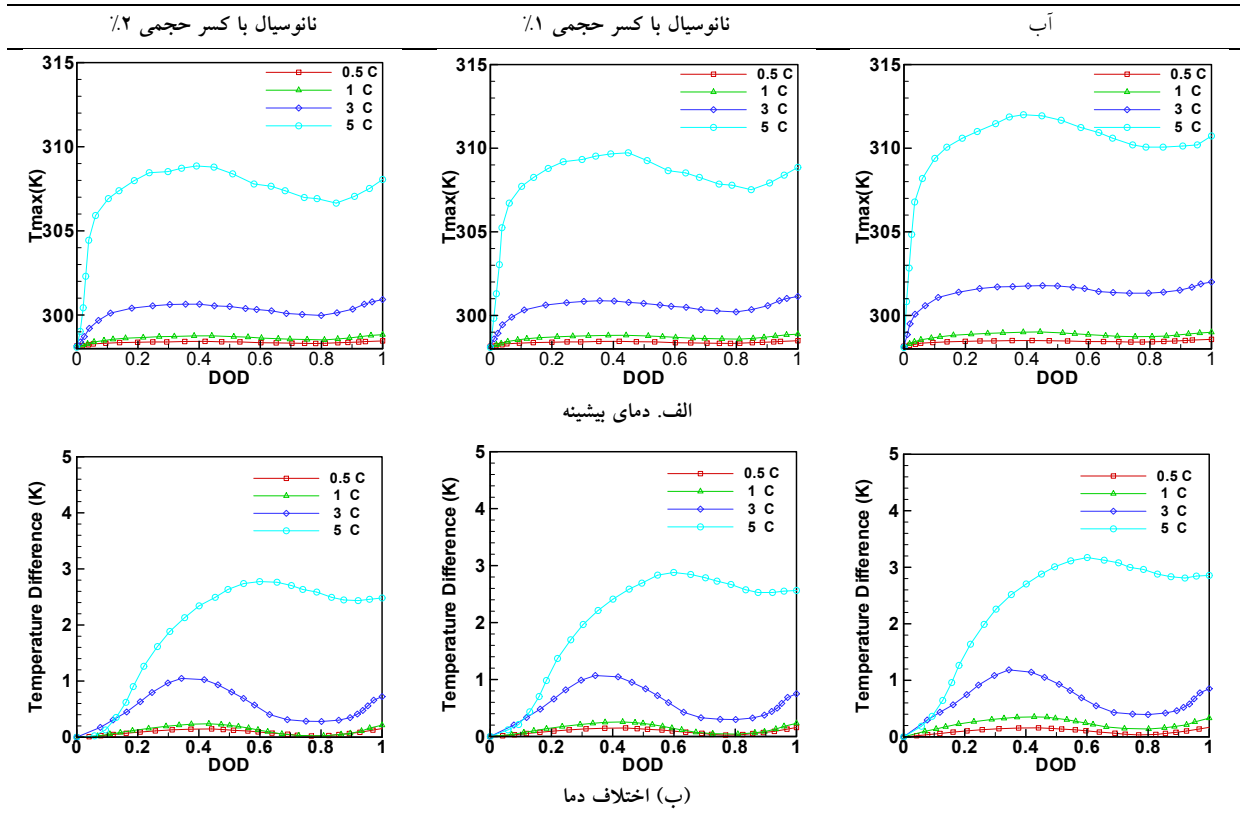
شکل (۷) نتایج حالت تخلیه شارژ را نشان می دهد. حرارت تولیدی باتری در آن ذخیره یا به محیط بیرون منتقل می شود. حرارت منتقل شده به بیرون، به باتری مجاور خنک تر یا به جریان سیال خنک کن منتقل می شود. به دلیل انتقال حرارت از باتری ها به جریان سیال خنک کن، دمای سیال در راستای حرکت در کانال افزایش می یابد. با توجه به شکل (۷) اولین باتری از سمت ورودی کانال، کمترین دما و آخرین باتری از سمت خروجی بالاترین دما را نشان می دهد. شکل (۸) نیز که برای حالت شارژ می باشد، همین پدیده را نشان می دهد. انتقال حرارت از باتری ها به سیال خنک کن، باعث کاهش محسوسی در دمای باتری ها می شود. برای مثال، در بازه فرایند تخلیه شارژ در نرخ جریان ۵C، دمای کلی مجموعه باتری در محدوده ۰/۱ تا ۰/۴ افزایش می یابد، ولی در ادامه تا ۰/۸ کاهش و سپس دوباره افزایش می یابد. افزایش دمای کلی به دلیل تجمع پیوسته حرارت در باتری و کاهش دما به دلیل کاهش حرارت تولیدی است. به همین دلیل، مقادیر مختلف نرخ جریان شارژ و تخلیه شارژ نیز تأثیر چشمگیری بر دمای کلی مجموعه باتری دارند. دمای بیشینه در مجموعه باتری در نرخ تخلیه شارژ ۵C نیز در حدود ۱۱/۵۸ کلون بالاتر از نرخ جریان ۰/۵C می باشد که در



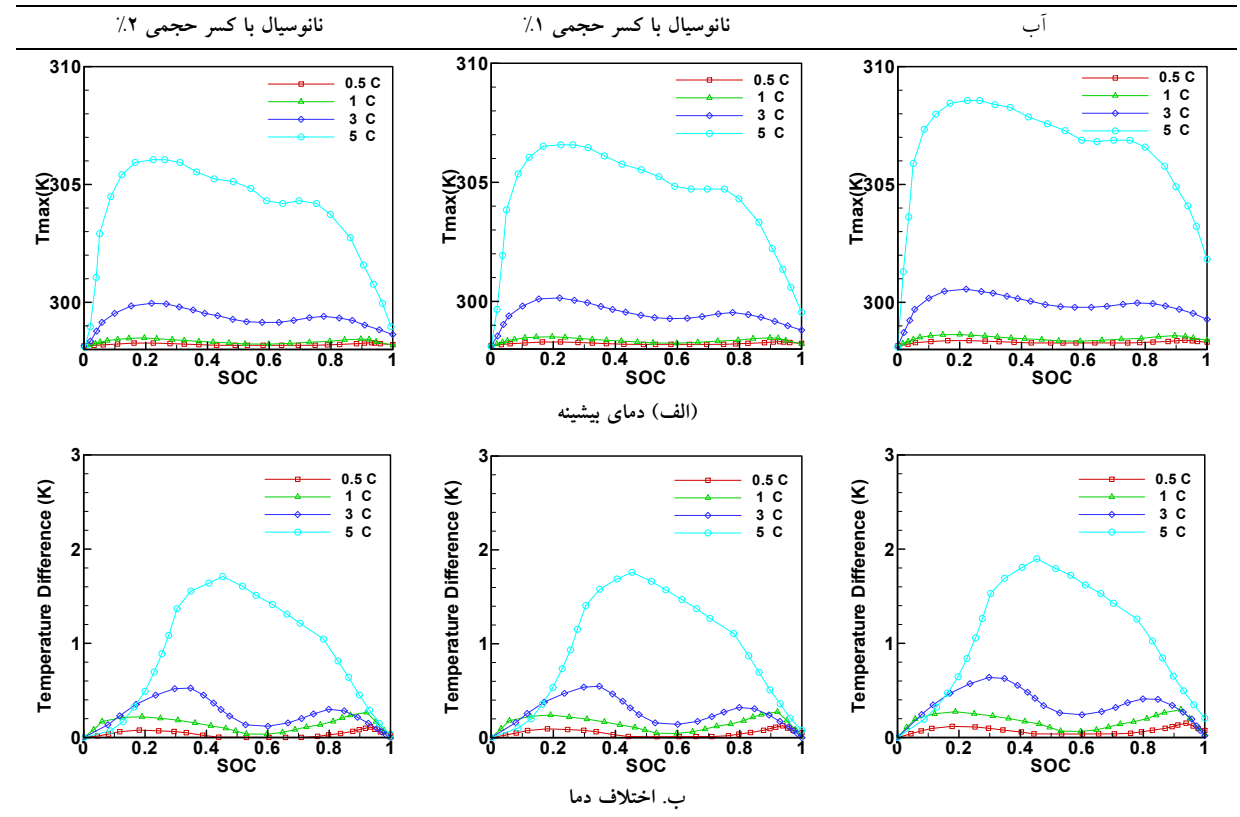
شکل (۷): توزیع دما در مجموعه باتری در فرایند تخلیه شارژ در نرخهای جریان مختلف



شکل (۸): توزیع دما در مجموعه باتری در فرایند شارژ در نرخ های جریان مختلف



شکل (۹): نمودار دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری در فرایند تخلیه شارژ



شکل (۱۰): نمودار دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری در فرایند شارژ

با توجه به شکل‌های (۹-الف) و (۱۰-الف)، دمای بیشینه می‌تواند به دمای ۳۰۹/۹۵ کلوین و ۳۰۷/۶۱ کلوین برای نرخ جریان ۵C در جریان نانوسیال ۲٪ به ترتیب در حالت تخلیه شارژ و شارژ برسد. همچنین با توجه به شکل‌های (۹-ب) و (۱۰-ب)، اختلاف

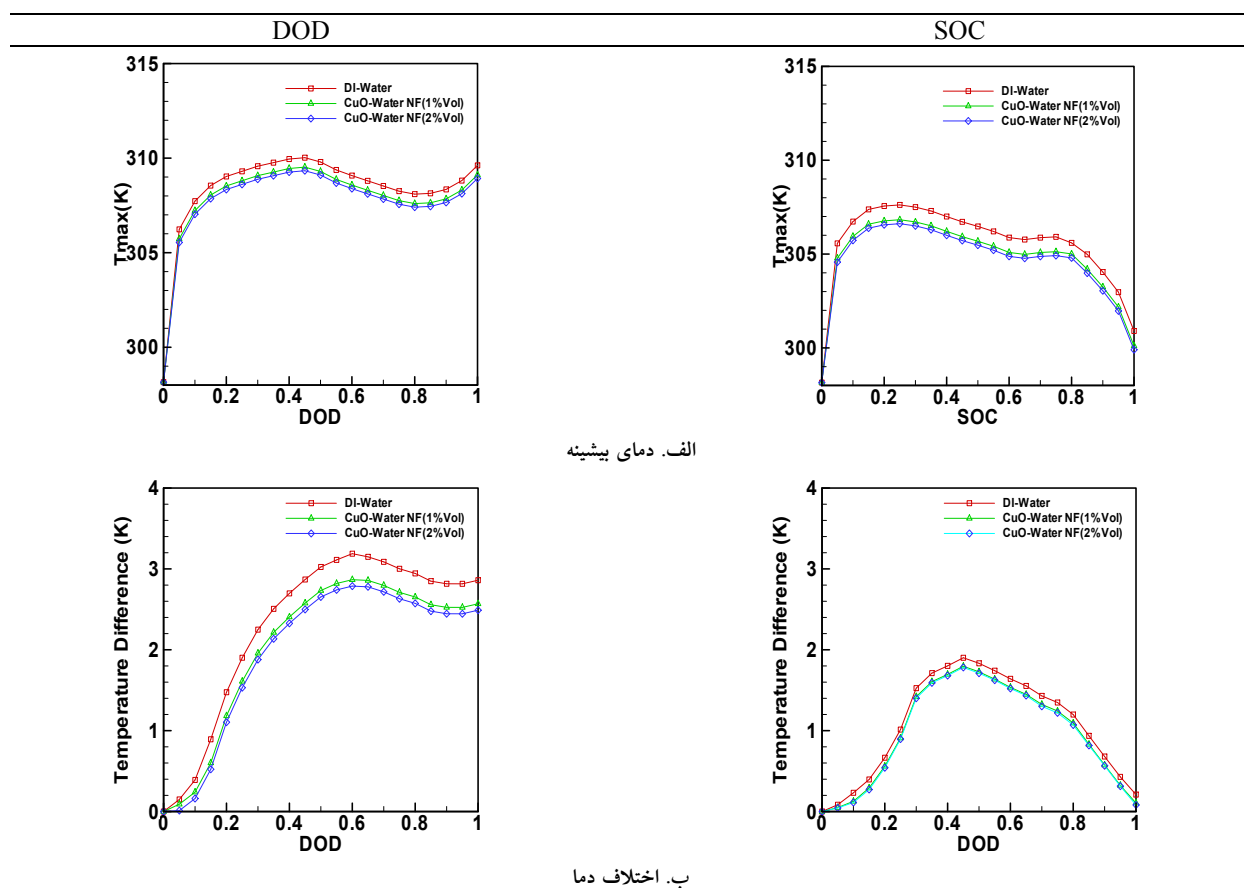
شکل (۱۱-الف) نمودار دمای بیشینه در دو درصد حجمی مختلف در دو فرایند تخلیه شارژ و شارژ را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج نمودار شکل (۱۱-الف)، دمای بیشینه در فرایند شارژ، با استفاده از سیال آب، نانوسیال ۱٪ و ۲٪ به ترتیب، ۳۰۸/۵۶، ۳۰۶/۵ و ۳۰۶/۰۱ کلوین است.

با توجه به این نتایج، با مقایسه میان سیال آب و نانوسیال دو درصد حجمی، میزان ۲/۵ کلوین کاهش دما مشاهده می‌شود که به معنی بهبود انتقال حرارت است. همچنین در فرایند تخلیه شارژ نیز این میزان کاهش دما ۳/۱۵ کلوین است. با توجه به نتایج شکل (۱۱-ب)، با افزایش درصد حجمی نانوذرات اکسید مس، میزان کاهش دما در نمودار اختلاف دما در مجموعه باتری افزایش می‌یابد. در فرایند شارژ و تخلیه شارژ این مقدار کاهش دما برای نانوسیال دو درصد حجمی در مقایسه با آب به ترتیب، ۰/۱۷ و ۰/۴ کلوین کمتر است.

دما در دو حالت شارژ و تخلیه شارژ برای نرخ جریان ۵C می‌تواند به دمای ۱/۷ کلوین و ۲/۷ کلوین برسد. عملکرد سیستم خنک‌کاری نیز به‌طور کافی برای نرخ‌های جریان بالا در دو حالت تخلیه شارژ و شارژ مناسب نیست، چون دماهای گزارش شده هنوز بالا هستند.

۳.۳. تأثیر اضافه کردن نانوذرات اکسید مس

در این بخش به بررسی تأثیر استفاده از نانوسیال و همچنین تأثیر مقادیر مختلف درصد حجمی نانوذرات بر خنک‌کاری مجموعه باتری پرداخته شده است. در این شبیه‌سازی، نرخ جریان ۵C برای مجموعه باتری و سرعت جریان سیال ۰/۱ m/s انتخاب شده است. برای بررسی اثر نانوذرات بر خنک‌کاری سیستم، دو درصد حجمی (۱٪ و ۲٪) انتخاب شده است. شکل (۱۰) اثر اضافه کردن نانوذرات اکسید مس با مقادیر مختلف درصد حجمی بر دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری در دو فرایند تخلیه شارژ و شارژ را نشان می‌دهد.



الف. دمای بیشینه

ب. اختلاف دما

شکل (۱۱): تأثیر اضافه کردن نانوذرات اکسید مس و انواع درصد حجمی بر دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری در دو فرایند شارژ و تخلیه شارژ

نشان می‌دهد. افزایش ضریب انتقال حرارت در سیال به دلیل حضور ذرات با خاصیت هدایت حرارتی بالا باعث تقویت انتقال حرارت

شکل (۱۱) بهبود قابل توجه عملکرد حرارتی سیستم خنک‌کاری را به دلیل تقویت تأثیر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری

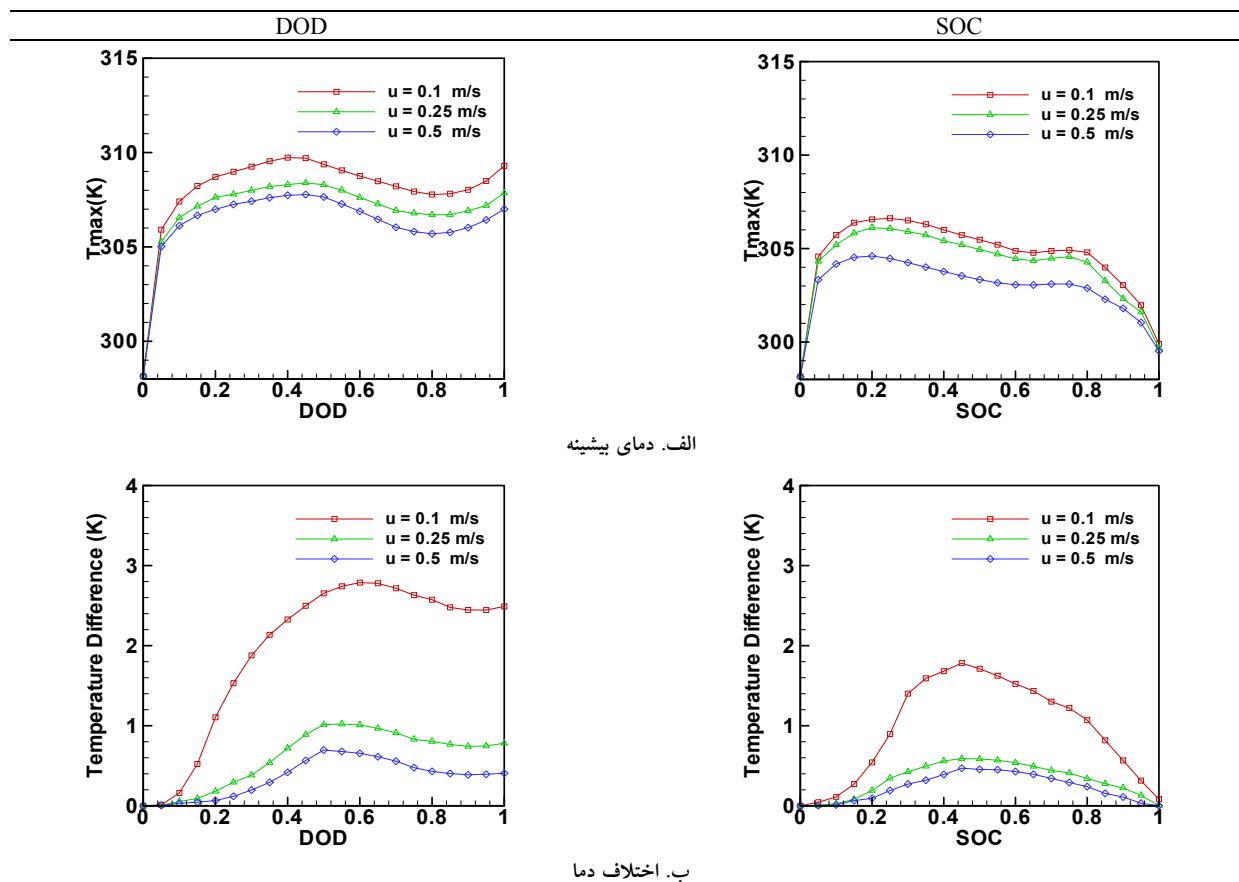
برای هر دو حالت فرایند شارژ و تخلیه شارژ، دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری به طور قابل توجهی با افزایش دبی جریان، کاهش یافته‌اند.

با توجه به شکل (۱۲-الف)، اختلاف دمای بیشینه در هر سرعت جریان در بازه ۰ تا ۲/۱۹ کلوین و ۰ تا ۰/۹۵ کلوین به ترتیب در حالت تخلیه شارژ و شارژ است. همچنین با توجه به شکل (۱۲-ب)، تفاوت اختلاف دما در هر سرعت جریان ورودی در دو حالت تخلیه شارژ و شارژ به ترتیب حداکثر تا ۲/۰۹ کلوین و ۰/۰۷ کلوین است. در نمودارهای دمای بیشینه در حالت تخلیه شارژ، اختلاف بین نمودارها در قسمت اول نمودار بسیار کوچک می‌باشد و به تدریج افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که برای فرایند شارژ، اختلاف بین نمودارهای مختلف در راستای نمودارها یکسان است، به جز در قسمت پایانی نمودار که اختلاف افزایش می‌یابد. تغییر حالت شارژ یک عامل مهم این افزایش بین مقادیر مختلف سرعت است.

شده و این امر باعث افزایش تأثیر سیستم خنک‌کاری با نانوسیال شده است. در نتیجه افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه باعث بهبود خنک‌کاری نانوسیال می‌شود.

۴.۳. تأثیر دبی جریان سیال

همان‌طور که از شکل‌های (۹) تا (۱۱) مشاهده می‌شود، مجموعه باتری در نرخ‌های جریان بالا در دو حالت شارژ و تخلیه شارژ ممکن است دارای دمای بیشینه و اختلاف دمای بالا باشد. برای حالت‌های شارژ و تخلیه شارژ در نرخ جریان ۵C، مقادیر مختلف سرعت جریان ورودی ۰/۱ m/s، ۰/۲۵ m/s و ۰/۵ m/s شبیه‌سازی شده و همچنین دیگر متغیرها مانند θ_1 و θ_2 مانند بخش ۱.۳ در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی سیال خنک‌کاری در دو کانال موجی و پلکانی، نانوسیال اکسید مس با درصد حجمی ۲ انتخاب شده است. در شکل (۱۲) نتایج دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری نشان داده شده است. در شکل (۱۲-الف) و (۱۲-ب) تأثیر چشمگیر دبی ورودی سیال بر عملکرد خنک‌کاری (به ترتیب کاهش دمای بیشینه و اختلاف دما) نشان داده شده است.



الف. دمای بیشینه

ب. اختلاف دما

شکل (۱۲): تأثیر دبی جریان سیال بر تغییرات دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری در فرایندهای شارژ و تخلیه شارژ

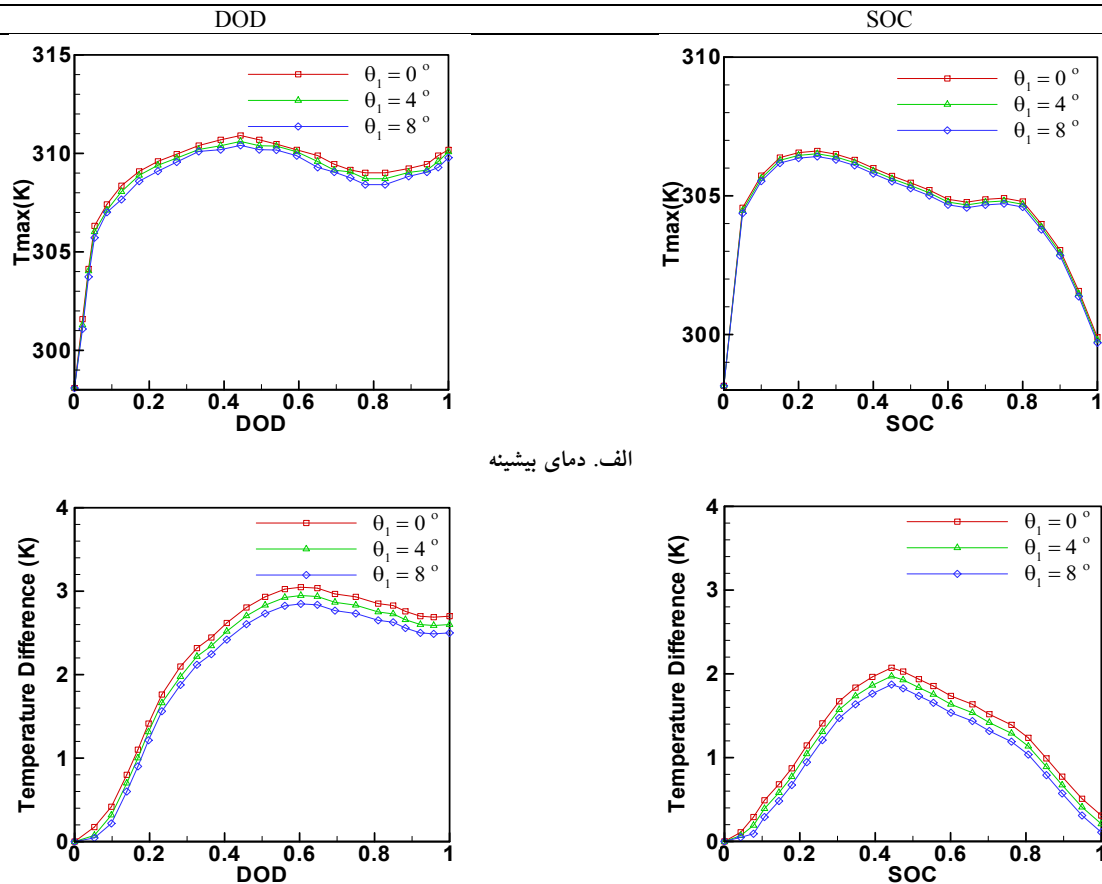
در این بخش با تغییر سطح تماس بین باتری‌ها یعنی زاویه θ_1 ، اثر این پارامتر بررسی می‌شود. در این شبیه‌سازی، زاویه تماس بین باتری‌ها و کانال موجی (θ_2) ۵۷ درجه، فرایند شارژ و تخلیه شارژ در نرخ جریان ۵ C در نظر گرفته شده و زاویه‌های تماس بین باتری‌ها ۰، ۴ و ۸ درجه بررسی شده است. سرعت سیال در کانال موجی و کانال پلکانی ۰/۵ m/s می‌باشد و نوع سیال خنک‌کاری نیز نانوسیال با دو درصد حجمی انتخاب شده است. زاویه تماس صفر درجه بدین معناست که تماس بین باتری‌ها فقط یک خط می‌باشد و انتقال حرارتی بین آن‌ها اتفاق نمی‌افتد. افزایش مقدار θ_1 باعث افزایش سطح تماس بین باتری‌ها می‌شود. در شکل (۱۳)، نمودارهای دمای بیشینه و اختلاف دما را نشان می‌دهد.

شکل (۱۳- الف) نمودار دمای بیشینه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اختلاف بین سه نمودار در دو حالت شارژ و تخلیه شارژ بسیار کم است و با افزایش سطح تماس، مقدار دمای بیشینه کاهش می‌یابد؛ با این حال مقدار این کاهش دما در هر دو فرایند شارژ و تخلیه شارژ در مجموعه باتری کم است.

با توجه به شکل (۱۲) در حالت تخلیه شارژ و سرعت جریان ورودی نانوسیال ۰/۵ m/s، دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری نیز به ترتیب به مقدار ۳۰۷ کلوین و ۰/۴ کلوین است و برای فرایند شارژ نیز به ترتیب ۲۹۹/۴۷ کلوین و ۰/۰۱ کلوین می‌باشد که همگی بهبود عملکرد سیستم را نشان می‌دهند. از این رو افزایش سرعت ورودی جریان در دو کانال موجی و پلکانی باعث بهبود عملکرد سیستم خنک‌کاری مجموعه باتری می‌شود. از سوی دیگر، سیستم خنک‌کاری در حالت تخلیه شارژ نیز در مقایسه با حالت شارژ عملکرد بهتری را نشان داده است. از دلایل این بهبود عملکرد می‌توان به تفاوت میزان حرارت تولیدی باتری‌ها و همچنین تفاوت لحظه به لحظه حرارت تولیدی در فرایندهای تخلیه شارژ و شارژ عنوان کرد.

۵.۳. تأثیر سطح تماس بین باتری‌های همسایه

در مجموعه باتری، با اضافه کردن چسب هدایت حرارتی بین باتری‌ها، تماس مناسب برای انتقال حرارت بهتر بین آن‌ها برقرار می‌شود. سؤال اصلی این است که چگونه انتقال حرارت بین باتری‌های همسایه باعث بهبود عملکرد مجموعه باتری می‌شود.



الف. دمای بیشینه

ب. اختلاف دما

شکل (۱۳): تأثیر زاویه تماس باتری‌های همسایه بر دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری طی فرایندهای شارژ و تخلیه شارژ

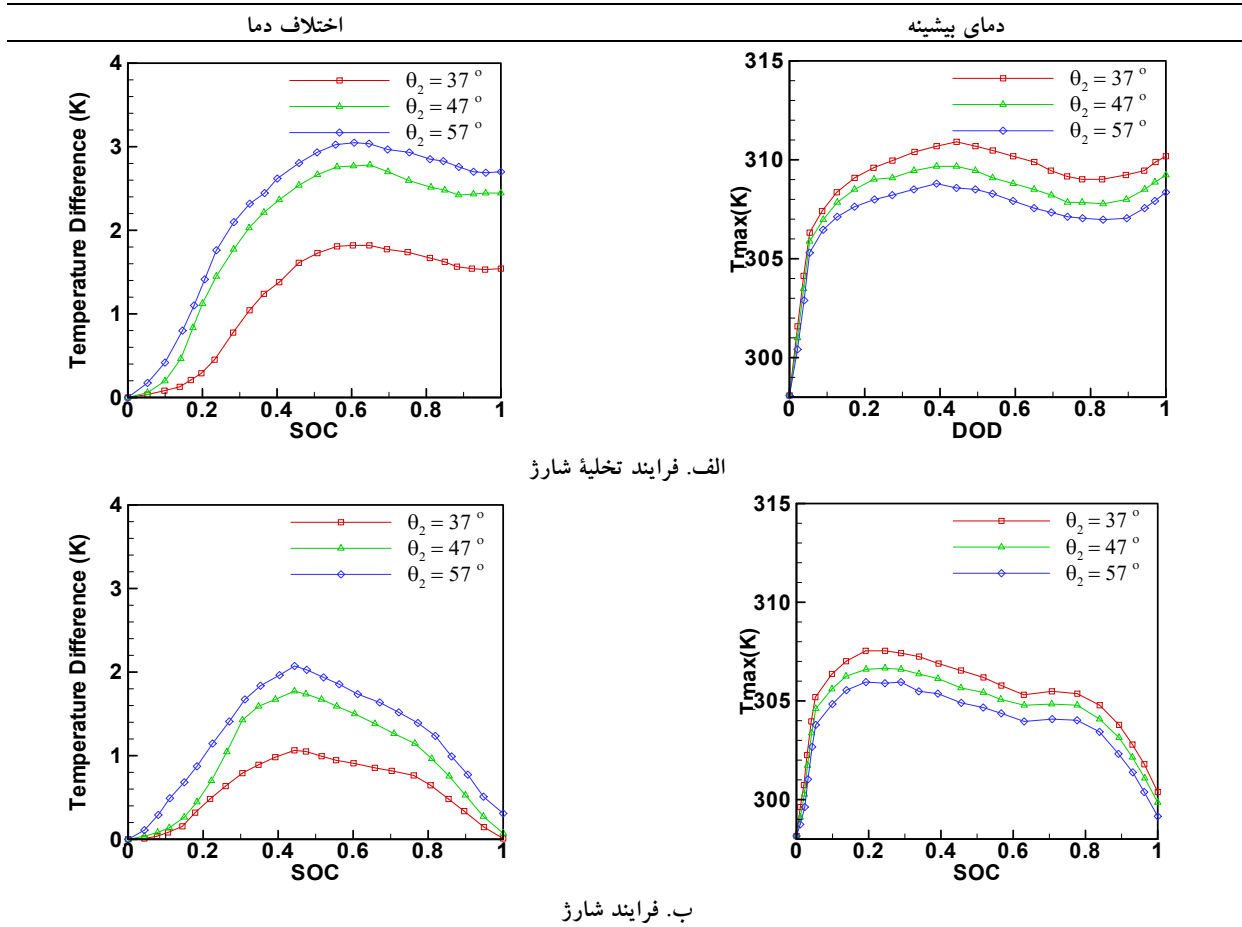
درجه بین باتری و کانال موجی در نظر گرفته شده است. شکل (۱۴-الف) نمودار مقایسه دمای بیشینه و اختلاف دما برای زوایای مختلف در فرایند تخلیه شارژ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که دمای بیشینه با افزایش زاویه تماس کاهش می‌یابد. دمای بیشینه در حالت زاویه ۵۷ درجه به میزان ۱/۸۲ کلوین در مقایسه با زاویه ۳۷ درجه کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش θ_2 برخلاف نتایج گذشته، اختلاف دما در مجموعه باتری افزایش می‌یابد. میزان اختلاف دما در زاویه ۵۷ درجه نسبت به زاویه ۳۷ درجه تا ۱/۳۲ کلوین افزایش می‌یابد.

شکل (۱۴-ب) نمودار دمای بیشینه و اختلاف دما برای مجموعه باتری در فرایند شارژ است. دمای بیشینه در مجموعه باتری در زاویه ۳۷ درجه به مقدار ۱/۲۳ کلوین در مقایسه با زاویه ۵۷ درجه کاهش می‌یابد و برعکس در نمودار اختلاف دما مقدار ۱/۰۵ کلوین در زاویه ۵۷ درجه در مقایسه با زاویه ۳۷ درجه افزایش می‌یابد.

با توجه به نمودارهای اختلاف دما در فرایندهای شارژ و تخلیه شارژ در شکل (۱۳-ب)، میزان اختلاف دما بین باتری‌ها با افزایش سطح تماس بین باتری‌های همسایه کاهش می‌یابد. میزان کاهش اختلاف دما در دو حالت شارژ و تخلیه شارژ به ترتیب در زاویه تماس ۸ درجه نسبت به صفر درجه ۰/۲۱ و ۰/۲ کلوین می‌باشد. قابل ذکر است که تأثیر تغییر سطح تماس بین باتری‌ها بر عملکرد حرارتی خنک‌کاری با مایع مجموعه باتری ناچیز است.

۶.۳. تأثیر سطح تماس بین باتری‌ها و کانال موجی

برای بررسی تأثیر سطح تماس میان باتری‌ها و کانال موجی که قبلاً با θ_2 نشان داده شد، زاویه تماس دو باتری (θ_1) ۸ درجه و نرخ جریان ۵C برای فرایند شارژ و تخلیه شارژ انتخاب شده و همچنین سرعت سیال در کانال موجی و کانال پلکانی ۰/۵ m/s است. نوع سیال خنک‌کاری نیز نانوسیال با دو درصد حجمی انتخاب شده است. برای بررسی این تأثیر زوایای ۳۷، ۴۷ و ۵۷



شکل (۱۴): تأثیر زاویه تماس باتری‌ها و کانال موجی بر نمودار دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری طی فرایندهای تخلیه شارژ و شارژ

باتری در دو فرایند شارژ و تخلیه شارژ می‌شود. با تقویت خنک‌کاری سیستم، حرارت بیشتری از باتری‌ها جذب نانوسیال

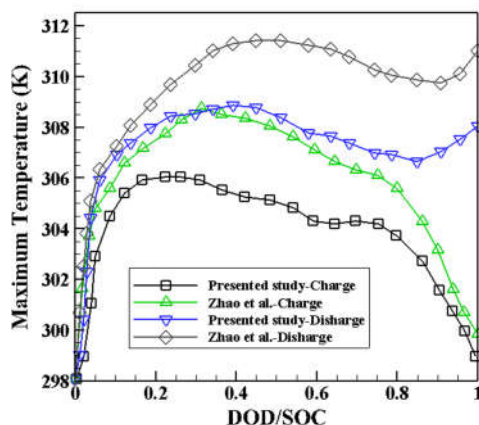
افزایش θ_2 باعث تقویت در خنک‌کاری سیستم با استفاده از جریان نانوسیال می‌شود که باعث کاهش دمای بیشینه در مجموعه

آب، افت فشار بیشتری در کانال‌های خنک‌کاری ایجاد می‌کند. همان‌طور که از شکل (۱۵-الف) مشخص است، برای نمونه در عدد رینولدز ۵۰۰ در کانال موجی، نانوسیال با درصد حجمی ۱٪ و ۲٪، به ترتیب ۹۸ و ۱۱۱ پاسکال افت فشار ایجاد می‌کنند که ۵۹ و ۶۴٪ از افت فشار ایجادشده جریان آب بالاترند. قابل ذکر است که با افزایش عدد رینولدز، درصد افزایش افت فشار در نتیجه به‌کارگیری نانوسیال کاهش می‌یابد.

شکل (۱۵-ب) نیز افت فشار ایجادشده در اعداد رینولدز متفاوت را در کانال پلکانی برای جریان آب و نانوسیال با درصد حجمی متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اولاً میزان افت فشار در کانال پلکانی نسبت به کانال مستقیم بیشتر بوده و ثانیاً در کانال پلکانی نیز افت فشار ناشی از به‌کارگیری جریان نانوسیال نسبت به جریان آب افزایش یافته و درصد این افزایش افت فشار، با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد.

۸.۳. بهبود ناشی از سیستم خنک‌کاری پیشنهادی

در این بخش به‌منظور بررسی عملکرد سیستم خنک‌کاری پیشنهادی و بهبود ناشی از آن، یک نمونه مقایسه بین نتایج حاضر و نتایج حاصل از سیستم خنک‌کاری در مطالعه ژائو و همکاران [۴۵] انجام شده است. در شکل (۱۶) تغییرات دمای بیشینه برای نرخ جریان ۵C در دو فرایند شارژ و تخلیه شارژ با نتایج ژائو و همکاران [۴۵] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سیستم پیشنهادی با استفاده از نانوسیال ۲٪، ماکزیمم دما در مجموعه باتری در هر دو فرایند نسبت به سیستم قبلی کاهش می‌یابد و کاهش دمای ماکزیمم تا ۲/۷ و ۲/۶۳ کلوین به ترتیب برای دو فرایند شارژ و تخلیه شارژ حاصل می‌شود که بیانگر بهبود مناسبی در عملکرد سیستم خنک‌کاری پیشنهادی است.



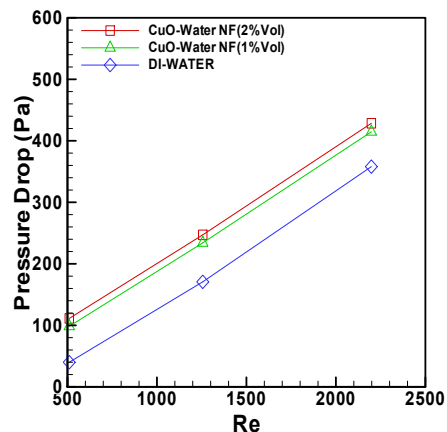
شکل (۱۶): مقایسه نتایج بیشینه دمای تحقیق حاضر و ژائو و همکاران در دو فرایند شارژ و تخلیه شارژ

شده و در نهایت اختلاف دما بین سیال و مجموعه باتری کاهش یافته، اما اختلاف دما میان باتری‌ها نیز افزایش می‌یابد.

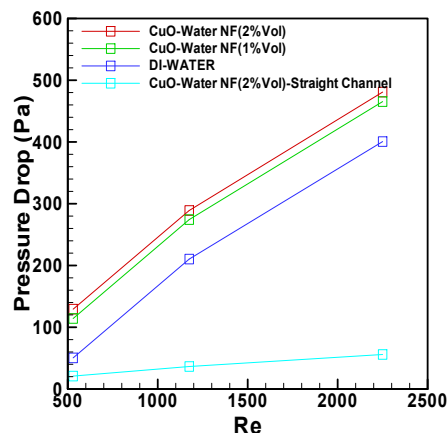
پیشنهاد می‌شود به‌منظور بهبود خنک‌کاری از تقویت انتقال حرارت بین جریان سیال و باتری‌های پایین دست کانال و به‌ویژه باتری‌های نزدیک به خروجی کانال استفاده شود. همچنین، ایده استفاده از کانال‌هایی با چندین ورودی و خروجی به‌جای یک کانال طولانی نیز راهکاری مناسب است.

۷.۳. بررسی افت فشار

با افزایش افت فشار، توان مصرفی پمپ نیز افزایش می‌یابد و باعث افزایش هزینه پمپاژ در سیستم خنک‌کاری مجموعه باتری می‌شود. این مسئله اهمیت مطالعه افت فشار را هنگامی که از سیستم فعال خنک‌کاری استفاده می‌شود، بیان می‌کند. در این بخش، تأثیر به‌کارگیری نانوسیال بر تغییرات افت فشار بررسی شده است. نتایج افت فشار برحسب عدد رینولدز در دو کانال موجی و پلکانی به ترتیب در شکل (۱۵-الف) و (۱۵-ب) نشان داده شده است.



الف. کانال موجی



ب. کانال پلکانی-مستقیم

شکل (۱۵): افت فشار در کانال‌های خنک‌کاری برحسب عدد رینولدز

با توجه به نمودارها مشخص است که نانوسیال در مقایسه با

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برای شبیه‌سازی مجموعه باتری خودروی برقی با ظرفیت بالا با استفاده از سیستم مدیریت حرارتی خنک‌کاری با مایع، مدل حرارتی برای مجموعه باتری با تعداد ۷۱ باتری لیتیوم-یون استوانه‌ای مدل ۱۸۶۵۰ در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن کانال‌های موجی و پلکانی، انتقال حرارت میان باتری‌ها و دیواره خارجی این کانال‌ها و هدایت حرارت بین باتری‌های همسایه در شبیه‌سازی وارد شده است. نتایج شبیه‌سازی قابلیت فهم مناسبی از رفتار حرارتی مجموعه باتری با سیستم مدیریت حرارتی خنک‌کاری با مایع را می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، موارد ذیل قابل ذکر است:

- نرخ جریان در فرایندهای شارژ و تخلیه شارژ تأثیر چشمگیری بر عملکرد حرارتی مجموعه باتری دارد. با افزایش نرخ جریان، نرخ تولید حرارت در باتری‌ها افزایش و دمای باتری‌ها نیز افزایش یافته و یکنواختی دمایی در مجموعه باتری کاهش می‌یابد.

- دمای بیشینه در فرایند شارژ، با استفاده از سیال آب، نانوسیال ۱٪ و ۲٪ به ترتیب، ۳۰۸/۵۶، ۳۰۶/۵ و ۳۰۶/۱ کلوین است. با توجه به این نتایج، با مقایسه میان سیال آب و نانوسیال دو درصد حجمی، حدود ۲/۵ کلوین کاهش دما مشاهده می‌شود. همچنین در فرایند تخلیه شارژ نیز این میزان کاهش دما ۳/۱۵ کلوین است. با افزایش درصد حجمی نانوذرات اکسید مس، میزان کاهش دما در مجموعه باتری افزایش می‌یابد.

- افزایش دبی جریان سیال در دو کانال موجی و پلکانی تأثیر چشمگیری بر کاهش دما و بهبود یکنواختی دما در مجموعه باتری‌ها دارد. در حالت تخلیه شارژ و سرعت جریان ورودی نانو سیال ۰/۵ m/s، دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری نیز به ترتیب به مقدار ۳۰۷ کلوین و ۰/۴ کلوین هستند. برای فرایند شارژ این مقادیر به ترتیب ۲۹۹/۴۷ کلوین و ۰/۱ کلوین هستند که همگی بهبود عملکرد سیستم را نشان می‌دهند.
- افزایش سطح تماس بین باتری‌ها در جهت تقویت هدایت حرارت و بهبود عملکرد حرارتی مجموعه باتری می‌تواند انجام شود؛ البته تأثیر آن در این بررسی بسیار ناچیز ارزیابی شد.

- افزایش سطح تماس میان باتری‌ها و کانال موجی نیز می‌تواند باعث کاهش دمای بیشینه در مجموعه باتری شود، اما اختلاف دما در مجموعه باتری را افزایش می‌دهد. دمای بیشینه در حالت زاویه ۵۷ درجه به میزان ۱/۸۲ کلوین در مقایسه با زاویه ۳۷ درجه کاهش می‌یابد. دمای بیشینه در مجموعه باتری در زاویه

۳۷ درجه نیز به مقدار ۱/۲۳ کلوین در مقایسه با زاویه ۵۷ درجه کاهش می‌یابد و برعکس در نمودار اختلاف دما مقدار ۱/۰۵ کلوین در زاویه ۵۷ درجه در مقایسه با زاویه ۳۷ درجه افزایش می‌یابد.

- با استفاده از سیستم مدیریت حرارتی خنک‌کاری با مایع با دبی جریان و نوع سیال مناسب، دمای بیشینه و اختلاف دما در مجموعه باتری در فرایند تخلیه شارژ می‌تواند به ترتیب به کمتر از ۳۰۸/۸۵ و ۲/۷۷ کلوین برسد.

با توجه به ارزیابی‌های کمی در این مطالعه، استفاده از سیستم مدیریت حرارتی خنک‌کاری نانوسیال با کانال موجی شکل برای مجموعه‌های باتری با ظرفیت بالا پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مایل‌اند از پژوهشکده انرژی و معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان به سبب حمایت از این تحقیق تقدیر و تشکر کنند.

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
d	قطر، m
K_B	ثابت بولتزمن = $1.38066 \times 10^{-23} JK^{-1}$
K	هدایت حرارتی، $W m^{-1} K^{-1}$
I	جریان، A
P	فشار، Pa
Q	حرارت، W
\dot{Q}	حرارت تولیدی باتری‌ها برحسب حجم $W m^{-3}$
T	دما، K
t	زمان، s
U	ولتاژ، V
V	حجم، m^3
VF	درصد حجمی

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
μ	ویسکوزیته دینامیکی، $kg m^{-1} s^{-1}$
θ_1	زاویه محیطی سطح تماس بین باتری‌های همسایه $^\circ$
θ_2	زاویه محیطی سطح تماس بین باتری‌ها و کانال موجی $^\circ$
f	سیال پایه

زیرنویس

بیشینه	max	مؤثر	eff
نانوذرات	p	نقطه انجماد	fr

مراجع

- [1] Liu, X., Chen, Z., Zhang, C., and Wu, J., "A novel temperature-compensated model for power Li-ion batteries with dual-particle-filter state of charge estimation", *Applied Energy*, Vol. 123, pp. 263-272, 2014.
- [2] Omar, N., Monem, M.A., Firouz, Y., Salminen, J., Smekens, J., Hegazy, O., Gaulous, H., Mulder, G., Van den Bossche, P., and Coosemans, T., "Lithium iron phosphate based battery-Assessment of the aging parameters and development of cycle life model", *Applied Energy*, Vol. 113, pp. 1575-1585, 2014.
- [3] Manzetti, S., and Mariasiu, F., "Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, pp. 1004-1012, 2015.
- [4] Zhang, Y., Wang, C.-Y., and Tang, X., "Cycling degradation of an automotive LiFePO₄ lithium-ion battery", *Journal of power sources*, Vol. 196, pp. 1513-1520, 2011.
- [5] Shah, K., Chalise, D., and Jain, A., "Experimental and theoretical analysis of a method to predict thermal runaway in Li-ion cells", *Journal of power sources*, Vol. 330, pp. 167-174, 2016.
- [6] Wilke, S., Schweitzer, B., Khatee, b S., and Al-Hallaj, S., "Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material": an experimental study, *Journal of Power Sources*, Vol. 340, pp. 51-59, 2017.
- [7] Wang, H., Lara-Curzio, E., Rule, E.T., and Winchester, C.S., "Mechanical abuse simulation and thermal runaway risks of large-format Li-ion batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 342, pp. 913-920, 2017.
- [8] Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., and Chen, C., "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery", *Journal of power sources*, Vol. 208, pp. 210-224, 2012.
- [9] Nikowitz, M. "Advanced hybrid and electric vehicles, System Optimization and Vehicle Integration", Springer, 2016.
- [10] Pesaran A.A., "Battery thermal models for hybrid vehicle simulations", *Journal of power sources*, Vol. 110, pp. 377-382, 2002.
- [11] Wang, Q., Jiang, B., Li, B., and Yan, Y., "A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 64, pp. 106-128, 2016.
- [12] Klein M., Tong S., and Park J., "In-plane nonuniform temperature effects on the performance of a large-format lithium-ion pouch cell", *Applied Energy*, Vol. 165, pp. 639-647, 2016.
- [13] Liu, H., Wei, Z., He, W., and Zhao, J., "Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review", *Energy conversion and management*, Vol. 150, pp. 304-330, 2017.
- [14] Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., and Ouyang M., "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles", *Journal of power sources*, Vol. 226, pp. 272-288, 2013.
- [15] Wang, T., Tseng, K., and Zhao, J., "Development of efficient air-cooling strategies for lithium-ion battery module based on empirical heat source model", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 90, pp. 521-529, 2015.
- [16] Chen, K., Wu, W., Yuan, F., Chen, L., and Wang, S., "Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern", *Energy*, Vol. 167, pp. 781-790, 2019.
- [17] Zhang, T., Gao, Q., Wang, G., Gu, Y., Wang, Y., Bao, W., and Zhang, D., "Investigation on the promotion of temperature uniformity for the designed battery pack with liquid flow in cooling process", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 116, pp. 655-662, 2017.
- [18] Tousi, M., Sarchami, A., Kiani, M., Najafi, M., and Houshfar, E., "Numerical study of novel liquid-cooled thermal management system for cylindrical Li-ion battery packs under high discharge rate based on AgO nanofluid and copper sheath", *Journal of Energy Storage*, Vol. 41, pp. 102910, 2021.
- [19] Behi, H., Karimi, D., Behi, M., Ghanbarpour, M., Jaguemont, J., Sokkeh, M.A., Gandoman, F.H., Berecibar, M., and Van Mierlo, J., "A new concept of thermal management system in Li-ion battery using air cooling and heat pipe for electric vehicles", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 174,

- pp. 115280, 2020.
- [20] Li, Y., Guo, H., Qi, F., Guo, Z., Li, M., and Tjernberg, L.B., "Investigation on liquid cold plate thermal management system with heat pipes for LiFePO₄ battery pack in electric vehicles", Applied Thermal Engineering, Vol. 185, pp. 116382, 2021.
- [21] Mashayekhi, M., Houshfar, E., and Ashjaee, M., "Development of hybrid cooling method with PCM and Al₂O₃ nanofluid in aluminium minichannels using heat source model of Li-ion batteries", Applied Thermal Engineering, Vol. 178, pp. 115543, 2020.
- [22] El Idi, M.M., Karkri, M., and Tankari, M.A., "A passive thermal management system of Li-ion batteries using PCM composites: Experimental and numerical investigations", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 169, pp. 120894, 2021.
- [23] Rao Z., and Wang S., "A review of power battery thermal energy management", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 9, pp. 4554-4571, 2011.
- [24] Bibin C., Vijayaram M., Suriya V., Ganesh R.S., and Soundarraj S., "A review on thermal issues in Li-ion battery and recent advancements in battery thermal management system", Materials Today: Proceedings, Vol.33, pp. 116-128, 2020.
- [25] Chen, D., Jiang, J., Kim, G.-H., Yang, C., and Pesaran, A., "Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells", Applied Thermal Engineering, Vol. 94, pp. 846-854, 2016.
- [26] Zhang, T., Gao, C., Gao, Q., Wang, G., Liu, M., Guo, Y., Xiao, C., and Yan, Y., "Status and development of electric vehicle integrated thermal management from BTM to HVAC", Applied Thermal Engineering, Vol. 88, pp. 398-409, 2015.
- [27] Tuckerman, D.B., and Pease, R.F.W., "High-performance heat sinking for VLSI, IEEE Electron device letters", Vol. 2, pp. 126-129, 1981.
- [28] Huo, Y., Rao, Z., Liu, X., and Zhao, J., "Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate", Energy Conversion and Management, Vol. 89, pp. 387-395, 2015.
- [29] Deng, T., Zhang, G., and Ran, Y., "Study on thermal management of rectangular Li-ion battery with serpentine-channel cold plate", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 125, pp. 143-152, 2018.
- [30] Sui, Y., Teo, C., Lee, P.S., Chew, Y., and Shu, C., "Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 2760-2772, 2010.
- [31] Ghule, K., and Soni, M., "Numerical heat transfer analysis of wavy micro channels with different cross sections", Energy Procedia, Vol. 109, pp. 471-478, 2017.
- [32] Rostami, J., Abbassi, A., and Saffar-Avval, M., "Optimization of conjugate heat transfer in wavy walls microchannels", Applied Thermal Engineering, Vol. 82, pp. 318-328, 2015.
- [33] Zhao, J., Rao, Z., and Li, Y., "Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery", Energy conversion and management, Vol. 103, pp. 157-165, 2015.
- [34] Basu, S., Hariharan, K.S., Kolake, S.M., Song, T., Sohn, D.K., and Yeo, T., "Coupled electrochemical thermal modelling of a novel Li-ion battery pack thermal management system", Applied Energy, Vol. 181, pp. 1-13, 2016.
- [35] Boyd, B., and Hooman, K., "Air-cooled micro-porous heat exchangers for thermal management of fuel cells", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 39, No. 3, pp. 363-367, 2012.
- [36] Kiani, M., Ansari, M., Arshadi, A.A., Houshfar, E., and Ashjaee, M., "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, Vol. 181, pp. 1-13, 2020.
- [37] Siddique, A.R.M., Mahmud, S., and Van Heyst, B., "A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations", Journal of Power Sources, Vol. 401, pp.224-237, 2018.
- [38] Jiang, L., Zhang, H., Li, J., Xia, P., "Thermal performance of a cylindrical battery module impregnated with PCM composite based on thermoelectric cooling", Energy, Vol. 188, pp. 116048, 2019.
- [39] Song, M., Hu, Y., Choe, S.-Y., and Garrick, T.R., "Analysis of the Heat Generation Rate of Lithium-Ion Battery Using an Electrochemical Thermal Model", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 167, pp. 120503, 2020.
- [40] Waldmann, T., Scurtu, R.-G., Richter, K., and Wohlfahrt-Mehrens, M., "18650 vs. 21700 Li-ion cells—A direct comparison of electrochemical, thermal, and geometrical properties", Journal of Power Sources, Vol. 472, pp. 228614, 2020.

- [41] Srinivasan, V., Wang, C., "Analysis of electrochemical and thermal behavior of Li-ion cells", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 150, A98, 2002.
- [42] Chen, S., Wan, C., and Wang, Y., "Thermal analysis of lithium-ion batteries", Journal of power sources, Vol. 140, pp. 111-124, 2005.
- [43] Saw, L., Ye, Y., and Tay, A., "Electrochemical-thermal analysis of 18650 Lithium Iron Phosphate cell", Energy Conversion and Management, Vol. 75, pp. 162-174, 2013.
- [44] Fan, L., Khodadadi, J., and Pesaran, A., "A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles", Journal of Power Sources, Vol. 238, pp. 301-312, 2013.
- [45] Zhao, C., Cao, W., Dong, T., and Jiang, F., "Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow", International journal of heat and mass transfer, Vol. 120, pp. 751-762, 2018.
- [46] Fang, W., Kwon, O.J., Wang, C.Y., "Electrochemical-thermal modeling of automotive Li-ion batteries and experimental validation using a three electrode cell", International journal of energy research, Vol. 34, pp. 107-115, 2010.
- [47] Jeon, D.H., and Baek, S.M., "Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle", Energy Conversion and Management, Vol. 52, pp. 2973-2981, 2011.
- [48] Chen, M., Sun, Q., Li, Y., Wu, K., Liu, B., Peng, P., and Wang, Q., "A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module", Energies, Vol. 8, pp. 490-500, 2015.
- [49] Malley, R., Liu, L., and Depcik, C., "Comparative study of various cathodes for lithium ion batteries using an enhanced Peukert capacity model", Journal of Power Sources, Vol. 396, pp. 621-631, 2018.
- [50] Kirsch, K.L., and Thole, K.A., "Pressure loss and heat transfer performance for additively and conventionally manufactured pin fin arrays", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 108, pp. 2502-2513, 2017.
- [51] Moraveji, M.K., and Ardehali, R.M., "CFD modeling (comparing single and two-phase approaches) on thermal performance of Al₂O₃/water nanofluid in mini-channel heat sink", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 157-164, 2013.
- [52] Gathers, G., "Thermophysical properties of liquid copper and aluminum", International journal of Thermophysics, Vol. 4, pp. 209-226, 1983.
- [53] Shah, J., Ranjan, M., Sooraj, K., Sonvane, Y., and Gupta, S.K., "Surfactant prevented growth and enhanced thermophysical properties of CuO nanofluid", Journal of Molecular Liquids, Vol. 283, pp. 550-557, 2019.
- [54] Cao, W., Zhao, C., Wang, Y., Dong, T., and Jiang, F., "Thermal modeling of full-size-scale cylindrical battery pack cooled by channeled liquid flow", International journal of heat and mass transfer, Vol. 138, pp. 1178-1187, 2019.
- [55] Lee, K.-J., Smith, K., Pesaran, A., and Kim, G.-H., "Three dimensional thermal-, electrical-, and electrochemical-coupled model for cylindrical wound large format lithium-ion batteries", Journal of Power Sources, Vol. 241, pp. 20-32, 2013.
- [56] Bernardi, D., Pawlikowski, E., and Newman, J., "A general energy balance for battery systems", Journal of the electrochemical society, Vol. 132, pp. 5-12, 1985.
- [57] Akbari, O.A., Safaei, M.R., Goodarzi, M., Akbar, N.S., Zarringhalam, M., Shabani, G.A.S., and Dahari, M., "A modified two-phase mixture model of nanofluid flow and heat transfer in a 3-D curved microtube", Advanced Powder Technology, Vol. 27, pp. 2175-2185, 2016.
- [58] Neubauer, J., "Battery lifetime analysis and simulation tool (BLAST) documentation", National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2014.