مدیریت گرما در باتری‌های یون لیتیوم خودروهای الکتریکی

غلامرضا کریمی [۱*]، علیرضا دهقان بیدختی [۲]

۱- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز
۲- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز
*پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghkarimi@shirazu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۸ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۲۸

چکیده

امروزه به دلیل مزایای ویژه‌ی باتری‌های یون لیتیوم، استفاده از آن‌ها برای مصارف خودروهای الکتریکی به‌شدت موردتوجه قرار گرفته است. هرچند استفاده از این باتری‌ها به‌طور گسترده برای مصارف پایین انرژی مانند تلفن‌های همراه، لپ تاب و دوربین‌های عکاسی و فیلم‌برداری بسیار متداول می‌باشد اما یکی از مشکلات عمده بر سر راه استفاده‌ی تجاری از آن‌ها برای مصارف بالای انرژی مانند خودروهای الکتریکی، مشکلات گرمایی مربوط به این باتری‌هاست. در این مقاله یک مجموعه باتری، مشابه نمونه‌های تجاری مورد استفاده در خودروهای الکتریکی با استفاده از معادلات اساسی انتقال حرارت و مومنتم مورد بررسی قرار گرفته است. با مدل‌سازی پدیده‌ی انتقال حرارت موجود در این باتری‌ها و استفاده از شبکه‌ی توزیع مناسب برای سیال خنک‌کننده، راهکاری در جهت کنترل دمای آن‌ها در یک بازه‌ی مناسب ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از یک سیال با ظرفیت گرمایی و ویسکوزیته‌ی مناسب مانند آب در کنار آرایش جریانی با یک ورودی و دو خروجی به‌صورت متقارن، می‌تواند انحراف معیار دما، حداکثر دمای به وجود آمده و افت فشار ایجاد شده در داخل مجموعه باتری را تا حد قابل قبولی کاهش دهد.

کلید واژگان: باتری‌های یون لیتیوم، مدل‌سازی، انتقال حرارت، شبکه‌ی توزیع سیال

Thermal Management of Lithium-Ion Batteries in Automotive Electrical

Gholamreza Karimi [1*], Alireza Dehghan Bidakhti[2]

1- Associate Professor of Chemical Engineering, Shiraz University, Iran
2- M.Sc. in Chemical Engineering, Shiraz University, Iran
*Corresponding author, E-mail address: ghkarimi@shirazu.ac.ir

Received: 17.06.2016 Accepted: 17.04.2017

Abstract

Because of increasing demand on new reliable power source for hybrid electric vehicles, lithium-ion (Li-ion) batteries have received much attention in the last decade. Problem free Li-ion batteries are already in use for low power demand applications such as cell phone and laptop battery packs, however; for high power applications such as in automotive propulsion drives, there are serious issues which need to be addressed. Among various issues that high power application lithium-ion (Li-ion) batteries are encountered, thermal issues have received more attention because of their potential to degrade battery performance. In this work, a lumped capacitance heat transfer model is developed in conjunction with a flow network approach to study performance of a commercial-size Lithium-ion battery pack, under various design and operating conditions of a thermal management system. Air, silicon oil and water are chosen as cooling media in the battery pack. Different flow configurations are considered and temperature dispersion, cell-averaged voltage and resistance distributions, and parasitic losses due to the fan/pump power demand are calculated. It is found that application of a coolant with an appropriate viscosity and heat capacity, such as water, in conjunction with a Y-type flow configuration will result in uniform temperature and voltage distributions in the battery pack while keeping the power requirement at low, acceptable levels.

Keywords: Lithium ion battery, Modeling, Heat transfer, Fluid distribution network

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-08]

۱- مقدمه

امروزه استفاده از خودروهای الکتریکی به‌طور گسترده‌ای رو به افزایش است. از یک طرف افزایش چشمگیر قیمت حامل‌های انرژی و استهلاک بالای خودروهای احتراق داخلی باعث به وجود آمدن یک اقبال عمومی در بین مصرف‌کنندگان شده است و از سوی دیگر استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی و منابع رو به پایان سوخت‌های فسیلی تولیدکنندگان را بر آن داشته است که به دنبال منابع جایگزین انرژی برای محصولات خود باشند. در چند سال اخیر، یکی از مشکلات عمده در راه تولید انبوه خودروهای الکتریکی وجود یک منبع انرژی قابل‌اعتماد و مقرون‌به‌صرفه بوده است. هرچند باتری‌های یون لیتیوم، در بین گزینه‌های مختلف با توجه به قیمت تمام شده‌ی پایین‌تر، طول عمر بالاتر و چگالی انرژی بیشتر، موردتوجه و استفاده‌ی بیشتری قرار گرفته‌اند اما مشکلات گرمایی مربوط به این باتری‌ها استفاده از آن‌ها برای مصارف بالای انرژی را با محدودیت‌هایی روبرو کرده است. از آنجا که یک سل از این باتری‌ها به‌تنهایی انرژی زیادی فراهم نمی‌کند، برای مصارف بالای انرژی مانند خودروهای الکتریکی تعداد بسیار زیادی از این سل‌ها باید به‌صورت سری و موازی در کنار هم قرار گیرند تا انرژی موردنیاز برای حرکت خودرو را فراهم کنند. افزایش دمای ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی و عبور الکترون‌ها در این سل‌ها به هنگام دشارژ و قرار گرفتن تعداد زیادی از آن‌ها در کنار هم در یک مجموعه، افزایش دمای شدید کل مجموعه‌ی باتری را در پی خواهد داشت که اگر کنترل نشود کوتاه شدن طول عمر، کاهش ظرفیت و یا حتی در موارد شدیدتر، انفجار باتری را موجب خواهد شد. هرچند در حال حاضر باتری‌های یون لیتیوم به‌طور گسترده برای مصارف پایین انرژی مثل لپ تاب و گوشی‌های تلفن همراه مورد استفاده قرار می‌گیرند اما برای استفاده‌ی تجاری از آن‌ها به‌منظور مصارف بالای انرژی باید مشکلات گرمایی مربوطه را برطرف نمود چرا که افزایش دما در سل‌ها، به‌شدت عملکرد مجموعه‌ی باتری را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

با توجه به ساختار شیمیایی و مواد تشکیل‌دهنده، باتری‌های یون لیتیوم در یک بازه‌ی دمایی بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد بهترین کارایی را از خود نشان می‌دهند. افزایش دمای باتری بیشتر از این مقدار علاوه بر ملاحظات ایمنی، طول عمر باتری را کاهش داده و در نتیجه هزینه‌ی استفاده از آن‌ها را به‌شدت بالا خواهد برد [۱]. مشکل دیگری که در این راستا به وجود می‌آید آن است که برای تأمین مصارف بالای انرژی تعداد زیادی از این سل‌ها باید به‌صورت سری و یا موازی در کنار هم و در یک مجموعه قرار بگیرند. توزیع دمای به وجود آمده در این مجموعه باعث می‌شود که سل‌های مختلف در داخل مجموعه، دماهای متفاوتی را تجربه کنند و در نتیجه ولتاژ خروجی از هر سل متناسب با دمای آن و متفاوت از سایر سل‌ها خواهد بود. این امر باعث افت ولتاژ خروجی کل مجموعه و کاهش طول عمر سل‌ها خواهد شد. با توجه به مشکلات ذکر شده، استفاده از یک سیستم مدیریت گرما[1] برای کنترل دمای عملیاتی در یک مجموعه از این باتری‌ها الزامی خواهد بود. چنین سیستمی باید بتواند علاوه بر کاهش دمای کل مجموعه، توزیع دمای یکنواخت و یکسانی در داخل سل‌های مختلف ایجاد کند [۲].

در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی به‌منظور دستیابی به یک سیستم مدیریت گرمای مناسب برای این باتری‌ها انجام شده است، اما تأثیر توزیع جریان در داخل کانال‌های حاوی سیال خنک‌کننده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. یی و همکاران یک مدل الکتروشیمیایی برای بررسی عملکرد سل‌ها در شرایط دمایی مختلف ارائه کرده‌اند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که اختلاف غلظت یون‌های لیتیوم در داخل آند و کاتد به‌شدت به دمای عملیاتی وابسته است و با کاهش دما اختلاف غلظت افزایش می‌یابد. این پدیده باعث کاهش ظرفیت و توان باتری در صورت استفاده‌ی بلندمدت در دماهای پایین خواهد شد. نتایج آن‌ها همچنین نشان می‌دهد که در نرخ دشارژ پایین، گرمای تولیدشده عموماً از نوع برگشت‌پذیر است، در حالی که برای نرخ‌های بالای دشارژ حرارت تولید شده برگشت‌ناپذیر بوده و استفاده از یک سیستم سردسازی مناسب برای کنترل دمای باتری اجتناب‌ناپذیر است [۳]. رائو و نیومن با استفاده از قوانین موازنه انرژی و تغییرات آنتالپی سیستم، مقدار گرمای تولیدشده در داخل سل‌ها را محاسبه کرده‌اند [۴]. ساتو با ارائه‌ی یک مدل ترمودینامیکی و مقایسه نتایج آن با مطالعات آزمایشگاهی به بررسی مقدار گرمای تولید شده در یک باتری پرداخته است [۵]. کیزیلل و همکاران عملکرد دو سیستم مدیریت گرمایی مختلف را با استفاده از مدل‌سازی CFD مقایسه کرده‌اند. در یکی از سیستم‌ها، از یک ماده‌ی در حال تغییر فاز (PCM) به‌عنوان سیال خنک‌کننده استفاده‌شده در حالی که در دیگری هوا به‌صورت جابجایی اجباری و آزاد مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که برای مصارف بالای انرژی ماده‌ی در حال تغییر فاز عملکرد بهتری نسبت به هوا از خود نشان می‌دهد و علاوه بر کنترل

[1] Battery thermal management system

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-08]

مناسب دمای مجموعه، توزیع دمای یکنواخت و یکسانی در داخل سل‌ها ایجاد می‌کند [۶]. بوت و همکارانش اثرات طراحی بر عملکرد حرارتی باتری‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. مدل ریاضی ارائه شده توسط آن‌ها با در نظر گرفتن اثر واکنش‌های آندی، برای بررسی عملکرد حرارتی باتری در مصارف متوسط و بالای انرژی مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. نلسون و همکاران مدلی از یک سیستم مدیریت گرمایی برای کنترل دما در یک مجموعه از باتری‌های یون لیتیوم ارائه کرده‌اند. آن‌ها با در نظر گرفتن بدترین شرایط عملیاتی از نظر نرخ دشارژ و توان مصرفی نشان داده‌اند که استفاده از یک سیال دی‌الکتریک به‌عنوان خنک‌کننده برای کنترل دمای باتری به‌مراتب بهتر از استفاده از هوا خواهد بود. نتایج همچنین نشان می‌دهند که عایق‌کاری محفظه باتری به‌خصوص در تابستان، نرخ افزایش دمای باتری را به‌شدت کاهش خواهد داد [۸]. میلز و حلاج به شبیه‌سازی و مطالعه‌ی آزمایشگاهی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به‌منظور کنترل دمای باتری‌ها پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از یک باتری لپ تاب مقدار حرارت تولیدشده در یک باتری را برای نرخ‌های دشارژ مختلف محاسبه کرده و سپس به شبیه‌سازی یک مجموعه‌ی شش‌تایی از این باتری‌ها پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که اگر حجم مجموعه را به‌منظور استفاده از ماده‌ی تغییر فاز دهنده‌ی بیشتر، به دو برابر افزایش دهیم حاصل کار حتی برای نرخ‌های دشارژ بسیار بالا، رضایت‌بخش خواهد بود [۹]. کریمی و لی با ارائه‌ی یک مدل ریاضی به بررسی عملکرد سیستم‌های مختلف در مدیریت گرمای این باتری‌ها پرداخته‌اند. نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که استفاده از جابجایی اجباری هوا به‌عنوان سیال خنک‌کننده به همراه طراحی مناسب آرایش کانال‌های سردساز می‌تواند سیستمی کارآمد و کم‌هزینه در کنترل دمای یک مجموعه باتری باشد [۱۰].

در این مقاله، در ادامه‌ی کار انجام‌شده توسط کریمی ولی [۲] با استفاده از یک مدل توده‌ای برای محاسبات مربوط به انتقال حرارت، عملکرد سیستم موردبررسی قرار گرفته و به‌منظور نشان دادن اثر توزیع جریان در داخل کانال‌های سردساز از تحلیل شبکه جریانی (روش هاردی کراس) استفاده شده است [۱۱]. سه آرایش جریان مختلف در نظر گرفته شده و برای هر مورد افت فشار سیال در مجموعه و توان فن یا پمپ موردنیاز برای به حرکت درآوردن سیال محاسبه شده است. از این نتایج می‌توان برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم با توجه به توان موردنیاز برای سیستم مدیریت گرمای باتری، در شرایط مختلف استفاده کرد.

۲- ساختمان مجموعه باتری

مجموعه باتری مورداستفاده در این مقاله از ۲۰ باتری منفرد[1] تشکیل شده است که به‌صورت سری در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. هر باتری منفرد متشکل از ۱۰ سل است که به‌صورت موازی با هم مرتبط هستند (شکل ۱). یک سل[2] به‌تنهایی ۲۳ Cm ارتفاع، ۱۶ Cm عرض و ۰/۷۳ mm ضخامت دارد و از هفت لایه تشکیل شده است. جزئیات مربوط به لایه‌های مختلف هر سل در جدول ۱ آمده است. واکنش‌های آندی و کاتدی در هر سل به‌صورت زیر انجام می‌شوند:

نیم واکنش قطب مثبت:

$$CoO_2 + Li^+ + e^- \longleftrightarrow LiCoO_2 \quad (۱)$$

نیم‌واکنش قطب منفی:

$$LiC_6 \longleftrightarrow C_6 + Li^+ + e^- \quad (۲)$$

واکنش کلی:

$$CoO_2 + LiC_6 \longleftrightarrow LiCoO_2 + C_6 \quad (۳)$$

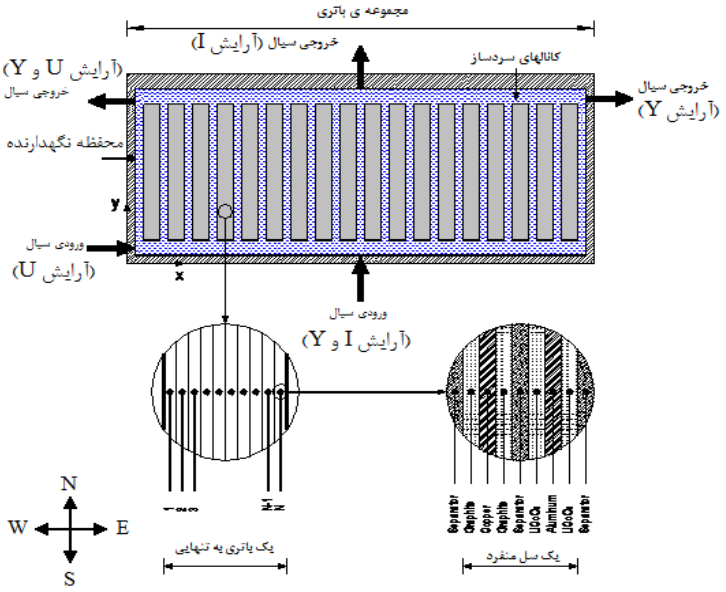
ولتاژ خروجی هر سل چیزی حدود ۳/۶ V است اما ولتاژ خروجی مجموعه‌ی باتری وابسته به نحوه‌ی چیدمان سل‌ها در داخل مجموعه و درصد شارژ باقیمانده‌ی هر سل تغییر می‌کند. در مجموعه‌ی در نظر گرفته شده، ولتاژ خروجی در حالت شارژ کامل حدود ۷۲ V خواهد بود که طبیعتاً با کاهش مقدار شارژ سل‌ها این مقدار نیز کاهش خواهد یافت.

سایر خصوصیات مربوط به مجموعه باتری در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

فرض شده است که مجموعه باتری‌ها از طریق یک جداره[3] با محیط اطراف در تبادل حرارت باشند و ضرایب انتقال حرارت به‌صورت $U_n=U_w=U_e=$ ۲ (W/m ^{2}.°C) و $U_s=$ ۵ (W/m ^{2}.°C) در نظر گرفته شده‌اند.

[1] Unit battery
[2] Unit cell
[3] Container

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-08]



شکل ۱- نمایی از یک مجموعه باتری یون لیتیوم معمولی به همراه کانال‌های سردساز و محل خروج سیال برای دو آرایش جریانی مختلف

جدول ۱- جزئیات مربوط به لایه‌های مختلف هر سل

خصوصیت	Separator	Al	$LiCoO_2$	Electrolyte	Graphite	Cu
k [W/m. °C]	۰/۳۵	۲۳۷	۴	۰/۵۹	۱/۰۴	۳۹۸
ρ[Kg/m³]	۱۴۰۰	۲۷۱۰	۲۷۰۰	۱۲۲۳	۱۳۴۷	۸۹۳۰
C [J/Kg. °C]	۱۵۵۱	۹۰۲	۷۱۵	۱۳۷۵	۱۴۳۷	۳۸۶
ضخامت لایه‌های مختلف [µm]:						
Graphite			۱۲۰			
Cu			۲۰			
Graphite			۱۲۰			
Electrolyte			۴۰			
$LiCoO_2$			۱۸۰			
Al			۲۰			
$LiCoO_2$			۱۸۰			
Separator			۵۰			
مجموع ضخامت لایه‌ها در یک سل منفرد [µm]:			۷۳۰			

موقعیت‌های مختلف شمال، جنوب، شرق و غرب روی شکل ۱ نشان داده شده‌اند. کانال‌های در نظر گرفته شده برای عبور سیال سردساز[1] عرضی در حدود ۷/۳ میلی‌متر دارند و بسته به محل ورود و خروج سیال دبی عبوری از هر کانال متفاوت است. از آنجا که برای بررسی عملکرد سیال‌های مختلف به‌عنوان سیال کاری سیستم، آب هم به‌عنوان یکی از گزینه‌ها موردبررسی قرار گرفته است، به علت جلوگیری از نشت رطوبت و آب به داخل سل‌ها و تخریب آن‌ها، فرض شده است که آب و باتری‌ها به‌صورت غیرمستقیم و از طریق یک‌لایه‌ی جداکننده به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر از جنس مس در تماس با یکدیگر باشند.

[1] Coolant fluid

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-08]

جدول ۲- خصوصیات ساختمانی مجموعه باتری‌های مورد استفاده

باتری	مقدار
تعداد واحدهای باتری در یک مجموعه	۲۰
تعداد سل‌ها در یک واحد باتری	۱۰
سطح مقطع هر سل [Cm^2]	۳۶۸
ظرفیت هر واحد باتری [$A.h$]	۲۰
ولتاژ مدار باز هر سل [V]	۳/۶
حداقل شارژ باتری در هنگام قطع کردن	۲۰
دمای اولیه‌ی مجموعه [$^\circ C$]	۲۰
کل ضخامت هر سل [μm]	۷۳۰
نرخ دشارژ	۵ C
سیستم مدیریت گرما بر اساس هوا، آب و روغن سیلیکون:	
دمای محیط [$^\circ C$]	۲۰
دمای ورودی سیال سردساز [$^\circ C$]	۲۰
سرعت ورودی سیال سردساز [m/s]	۱ -۱۰

جدول ۳- نتایج حاصل از عملکرد سیستم‌های مختلف برای مدیریت گرمای مجموعه باتری

		دبی ورودی (m^3/s)	توان مصرفی (W)	انحراف معیار دما ($^\circ C$)	حداکثر دمای موجود ($^\circ C$)
آرایش	هوا	۰/۰۱۱۶۸	۰/۰۳۸۷	۱۳/۲۰۸۶	۱۱۷/۶
جریان	روغن سیلیکون	۰/۰۰۲۳۳۶	۳/۷۸۲۰	۱۵/۵۵۰۰	۷۳/۶۰
I شکل	آب	۰/۰۰۱۱۶۸	۱/۲۶۶۴	۳/۱۸۴۸	۳۱/۸۰
آرایش	هوا	۰/۰۱۱۶۸	۰/۱۴۵۲	۸/۷۱۰۴	۱۱۵/۴
جریان	روغن سیلیکون	۰/۰۰۲۳۳۶	۴/۴۳۳۸	۸/۲۴۶۹	۵۵/۴۹
Y شکل	آب	۰/۰۰۱۱۶۸	۱/۳۵۹۹	۱/۷۱۶۹	۲۹/۷۱
آرایش	هوا	۰/۰۱۱۶۸	۰/۲۴۵۵	۱۷/۰۵۲۶	۱۲۳/۸
جریان	روغن سیلیکون	۰/۰۰۲۳۳۶	۶/۶۵۶۴	۲۸/۷۱۱۶	۱۱۰/۳
U شکل	آب	۰/۰۰۱۱۶۸	۲/۰۸۲۴	۱۱/۵۹۱۰	۵۸/۳۵

به غیر از آب، دو سیال هوا و روغن سیلیکون هم موردبررسی قرار گرفتند که به دلیل دی‌الکتریک بودن آن‌ها، مستقیماً در تماس با باتری هستند. سه آرایش جریان مختلف به‌منظور مطالعه‌ی سیستم در نظر گرفته شده است. در دو آرایش I و Y شکل، محل ورود سیال یکسان است ولی در حالت اول سیال فقط یک خروجی، آن هم در مرکز مجموعه دارد، در صورتی که در حالت دوم، دو عدد خروجی در طرفین مجموعه باتری در نظر گرفته شده است. حالت سوم توزیع U شکل نامیده می‌شود و دارای یک ورودی و یک خروجی در قسمت غربی مجموعه است. جزئیات بیشتر درباره‌ی آرایش جریان‌ها و محل ورود و خروج سیال، در شکل ۱ نشان داده شده است. با استفاده از روش هاردی-کراس[۱۰]. توزیع جریان و افت فشار در کانال‌های مختلف محاسبه شده و از این مقادیر برای محاسبه‌ی توان فن و یا پمپ موردنیاز برای جابجایی سیال، استفاده گردیده است.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-08]

۳- مدل حرارتی

برای مدل‌سازی توزیع دما در داخل محفظه، با توجه به کوچک بودن عدد بیو[1] در اطراف باتری‌ها (چیزی در حدود ۰/۱)، از توزیع دما در جهت عرض باتری‌ها (x) صرف‌نظر شده و تغییرات دما در داخل هر باتری فقط در جهت y محاسبه شده است. گرمای تولیدشده در داخل باتری‌ها که ناشی از مقاومت درونی سل و هم‌چنین تغییرات آنتروپی ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی است، با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شده است [۲]:

$$\dot{q} = R_i i^2 - T\Delta S \frac{i}{F} \qquad (۴)$$

که در این رابطه $\dot{q}$ نرخ انرژی تولیدی در واحد حجم، R_i مقاومت درونی معادل هر سل، i نرخ جریان خروجی (نرخ دشارژ) در واحد حجم سل، ΔS تغییر آنتروپی ناشی از واکنش الکتروشیمیایی و F ثابت فارادی[2] است. مقاومت درونی باتری به‌شدت وابسته به میزان شارژ و دمای آن است و به‌صورت آزمایشگاهی تعیین می‌گردد [۲ و ۱۱].

شکل ۲ جزئیات مربوط به یک واحد باتری و کانال‌های سردساز اطراف آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، با توجه به پایین بودن مقادیر عدد بیو، تغییرات دما فقط در راستای طول باتری در نظر گرفته شده است. پس از نوشتن موازنه‌ی انرژی و ساده‌سازی‌های مربوطه، معادله‌ی نهایی به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{Up}{kA}(T - T_C) + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (۵)$$

که در این معادله U، ضریب کلی انتقال حرارت بین باتری و محیط خنک‌کننده‌ی اطراف آن است. از آنجا که برای هوا و روغن سیلیکون به‌عنوان سیال سردساز، با توجه به دی‌الکتریک بودن آن‌ها فرض شده است که بین باتری‌ها و سیال ارتباط مستقیم وجود دارد، مقدار ضریب کلی انتقال حرارت برابر با h خواهد بود. مقادیر h نیز با توجه به شرایط هر کانال و اعداد رینولدز[3] و پراندتل[4] مربوطه، از روابط موجود به دست می‌آیند. در صورتی که از آب به‌عنوان سیال سردساز استفاده شود، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده‌شده یک لایه‌ی محافظ فلزی بین باتری و سیال در نظر گرفته شده است و مقدار U باید با توجه به مقادیر سایر مقاومت‌های حرارتی موجود محاسبه شود.

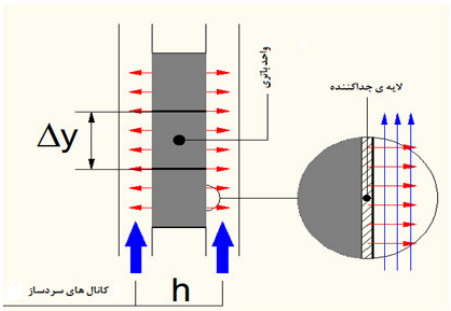
پارامترهای P و A محیط و سطح مقطع هر باتری هستند. ضریب هدایت حرارتی متوسط و ضریب نفوذ حرارتی متوسط باتری‌ها هم با k و α نمایش داده شده‌اند. دمای متوسط سیال سردساز در هر نقطه از کانال با T_c نمایش داده شده است که بسته به شرایط محل تغییر می‌کند. به‌طور کلی برای استخراج و حل معادلات مربوط به توزیع دما در داخل مجموعه باتری فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به کوچک بودن عدد بیو در اطراف باتری‌ها، از توزیع دما در جهت عرض باتری‌ها (x) صرف‌نظر شده و تغییرات دما صرفاً در جهت ارتفاع باتری‌ها (y) بررسی شده است. باتری‌ها با مکانیسم انتقال حرارت جابجایی و به کمک جریان سیال سردساز داخل کانال‌های اطراف خنک می‌شوند. کل مجموعه از طریق یک محفظه‌ی نگه‌دارنده: شکل ۱ و با ضرایب کلی انتقال حرارت که قبلاً ذکر شد، با محیط در دمای ۲۰ °C در تبادل حرارت است. تمامی مجموعه شامل باتری و سیال موجود در کانال‌های سردساز، ابتدا در دمای محیط قرار دارند.

۴- شبکه‌ی توزیع سیال

کانال‌های محل عبور سیال خنک‌کننده به همراه مجاری اصلی پخش‌کننده و جمع‌کننده‌ی سیال را می‌توان به‌عنوان یک شبکه‌ی توزیع سیال در نظر گرفت. با استفاده از قوانین بقای جرم و انرژی، می‌توان دبی عبوری سیال از کانال‌های مختلف را به دست آورد. بر اساس قانون موازنه‌ی جرم، جرم ورودی به محل تقاطع چند کانال (هر گره) برابر جرم خروجی است:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \qquad (۶)$$



شکل ۲- نمایی از یک واحد باتری به همراه کانال‌های سرساز و لایه‌ی جداکننده‌ی مربوطه

و بر اساس قانون موازنه‌ی انرژی، مجموع افت فشارها در هر حلقه‌ی بسته برابر صفر خواهد بود:

$$\sum \Delta p_{LOOP} = 0 \qquad (۷)$$

برای محاسبه‌ی افت فشار اصطکاکی در هر شاخه، از رابطه‌ی دارسی-ویسباخ استفاده شده است:

[1] Biot number
[2] Faraday constant
[3] Reynolds number
[4] Prandtl number

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-08]

$$\Delta p = C_f \frac{L}{D_h} \frac{\rho v^2}{2} \quad (۸)$$

که در این رابطه L و D_h نمایانگر مقادیر طول و قطر هیدرولیک هستند. دانسیته‌ی متوسط سیال با ρ و سرعت متوسط سیال در هر شاخه از جریان با v نشان داده شده است. مقدار C_f یا همان ضریب اصطکاک هم از روابط موجود به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_f = \begin{cases} \frac{16}{\mathrm{Re}} & \mathrm{Re} \le 2000 \\ \frac{0.079}{\mathrm{Re}^{0.25}} & \mathrm{Re} \ge 4000 \end{cases} \quad (۹)$$

برای تخمین مقادیر C_f در ناحیه‌ی گذار از میانیابی خطی استفاده شده است. برای به دست آوردن توزیع جریان در کانال‌های مختلف و حل معادلات ذکر شده از روش هاردی کراس استفاده شده است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

فرآیند تخلیه‌ی مجموعه باتری با این فرض آغاز می‌شود که در ابتدای کار تمام باتری‌ها در حالت شارژ[1] کامل ($SOC_0 = ۱$) قرار گرفته‌اند. برای محاسبه‌ی تغییرات میزان شارژ در باتری‌های مختلف از رابطه‌ی انتگرالی زیر استفاده شده است:

$$SOC_t = 1 - \frac{\int_0^t VI\ dt}{E_{OC} C} \quad (۱۰)$$

در این رابطه SOC_t، میزان شارژ باتری در لحظه‌ی t را نشان می‌دهد. E_{OC} ولتاژ مدارباز باتری و C نرخ دشارژ است. V و I به ترتیب نمایانگر تغییرات ولتاژ و آمپراژ باتری در طول زمان هستند. انتگرال‌گیری به‌صورت عددی و با استفاده از روش ذوزنقه انجام گرفته است. دشارژ باتری تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که شارژ یکی از باتری‌ها به کمتر از ۲۰٪ مقدار اولیه برسد.

برای حل عددی معادلات و به دست آوردن توزیع دما و افت فشار در داخل مجموعه، کل محفظه با دقت $dy = ۰/۰۱\ m$ شبکه‌بندی و معادلات با استفاده از روش ADI[2] حل شده‌اند. تغییرات خواص فیزیکی مواد با دما در نظر گرفته شده است. در تمام موارد و برای تمام سیال‌ها، نرخ دشارژ، بسیار بالا و برابر 5C قرار داده شده تا تفاوت عملکرد سیال‌های مختلف در آرایش‌های متفاوت جریان به‌خوبی مشاهده شود. توزیع دما و افت فشار در پایان عملیات، معیار نتیجه‌گیری‌های بعدی بوده است. نتایج مربوط به توزیع دما در داخل مجموعه برای سه حالت مختلف توزیع جریان در پایان فرآیند تخلیه‌ی باتری در شکل‌های ۳ تا ۵ ارائه شده‌اند. در هر حالت به‌منظور مقایسه‌ی راحت‌تر، نتایج با سه سیال سردساز متفاوت در کنار هم قرار گرفته‌اند.

شکل ۳ توزیع دمای مربوط به آرایش جریان I شکل یا توزیع سیال با یک ورودی و یک خروجی در مرکز مجموعه را نشان می‌دهد. مسیر حرکت سیال در داخل مجموعه با فلش‌های سفیدرنگ نشان داده شده است.

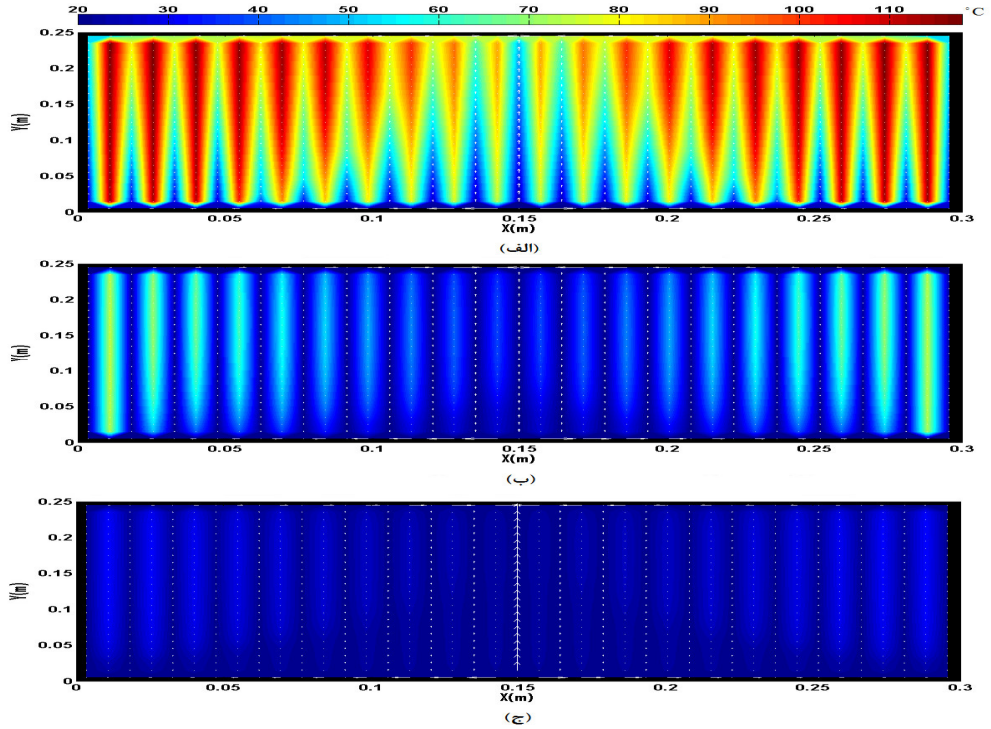
همان‌طور که مشاهده می‌شود باتری‌های نزدیک به نواحی مرکزی به دلیل نزدیکی به مجرای ورودی و دبی بالاتر و دمای پایین‌تر سیال مجاور، حرارت تولیدی خود را به‌خوبی تخلیه کرده‌اند، درحالی‌که باتری‌های کناری حتی با سیالی مثل روغن سیلیکون هم به‌خوبی تخلیه‌ی حرارتی نشده‌اند، چرا که سیال سردساز اطراف این باتری‌ها در وهله‌ی اول دبی پایین‌تری نسبت به سیال اطراف باتری‌های مرکزی دارد و در وهله‌ی دوم به دلیل تبادل حرارتی با باتری‌های مرکزی دمای بالاتری پیدا کرده است.

شکل ۴ توزیع دمای مربوط به آرایش جریان Y شکل با یک ورودی و دو خروجی است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در این حالت هم باتری‌های مرکزی و هم باتری‌های کناری به دلیل دبی مناسب سیال عبوری به‌خوبی حرارت خود را تخلیه کرده‌اند، البته هنوز مشکل افزایش دمای سیال در نواحی کناری و نزدیک به خروجی‌ها وجود دارد که می‌توان با استفاده از سیالی با ظرفیت گرمایی مناسب مثل آب، این مشکل را مرتفع کرد.

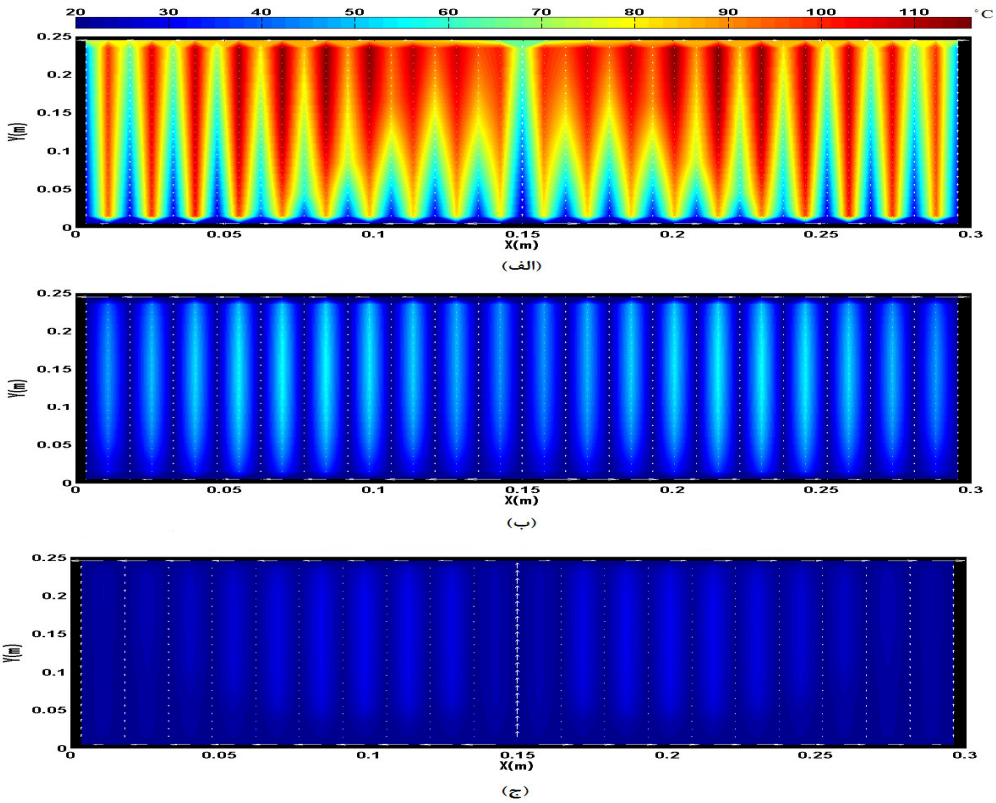
شکل ۵ نتایج مربوط به توزیع سیال U شکل است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد و نتایج هم نشان می‌دهند در این حالت حرارت تولیدی باتری‌های انتهایی، هم به دلیل دبی پایین و هم به دلیل دمای بالای سیال سردساز در اطراف آن‌ها به‌خوبی مدیریت نشده است و این امر باعث به وجود آمدن اختلاف دمای بسیار بالا بین نقاط مختلف باتری و درنتیجه‌ی آن

[1] State of charge (SOC)
[2] Alternating direction implicit method

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-08]



شکل ۳- توزیع دما در مجموعه‌ی باتری با توزیع جریان I شکل برای: الف) هوا، ب) روغن سیلیکون، ج) آب



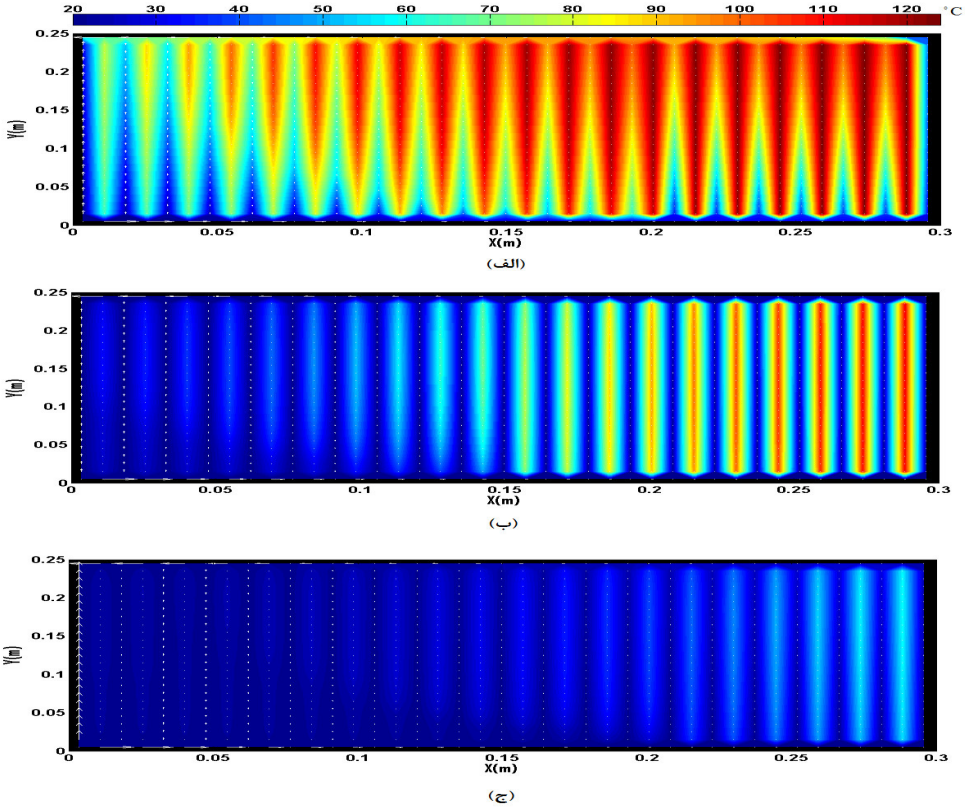
شکل ۴- توزیع دما در مجموعه‌ی باتری با توزیع جریان Y شکل برای: الف) هوا، ب) روغن سیلیکون، ج) آب

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-08]

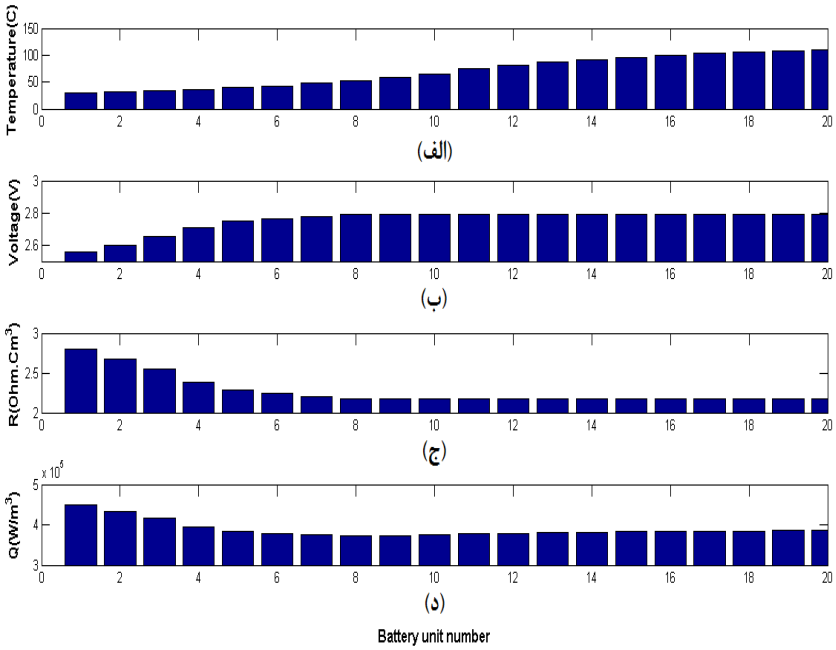
مقادیر بالای انحراف معیار دما گردیده که اصلاً مناسب نخواهد بود. برای بررسی بیشتر تأثیر افزایش انحراف معیار دما بر عملکرد مجموعه‌ی باتری، نتایج مربوط به توزیع سیال U شکل برای روغن سیلیکون و در پایان فرآیند تخلیه در شکل ۶ گزارش شده‌اند. شکل ۶-الف مقادیر متوسط دما در هر واحد باتری را نشان می‌دهد. شکل ۶-ب مربوط به ولتاژ متوسط خروجی از هر واحد باتری است و به‌خوبی نشان می‌دهد که تفاوت دما در باتری‌های مختلف چگونه باعث تفاوت ولتاژ خروجی آن‌ها شده است. این تفاوت ولتاژ باعث کاهش ولتاژ خروجی کل مجموعه و کاهش طول عمر باتری‌ها خواهد شد، چرا که با این توزیع ولتاژ، باتری‌های مختلف مقدار شارژ باقیمانده‌ی متفاوتی خواهند داشت و از آنجا که با به پایان رسیدن شارژ یکی از باتری‌ها فرآیند تخلیه متوقف می‌شود، در نتیجه در پایان فرآیند هنوز بعضی از باتری‌ها به‌طور کامل تخلیه نشده‌اند. تکرار این فرآیند برای طول عمر باتری و توان خروجی آن به‌شدت مضر خواهد بود. شکل ۶-ج توزیع مقاومت درونی متوسط باتری‌های مختلف را نشان می‌دهد که این توزیع مقاومت منجر به توزیع نرخ حرارت تولیدی ۶-د شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نقاط با دمای پایین‌تر، مقاومت درونی و در نتیجه نرخ حرارت تولیدی بیشتر بوده است که این امر برای شروع به کار باتری در دماهای پایین مشکل‌ساز خواهد بود. برای بررسی دقیق‌تر تأثیر آرایش‌های مختلف جریان و مقایسه‌ی حالت‌های مختلف، حداکثر دمای ایجادشده‌ی یک باتری در هر حالت، انحراف معیار دما در باتری‌های مختلف به‌منظور بررسی یکنواختی توزیع دما در محفظه و هم‌چنین توان مصرفی فن و یا پمپ برای جابجایی سیال خنک‌کننده، به‌عنوان معیار مقایسه انتخاب شده‌اند. نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود اگرچه استفاده از هوا به‌عنوان سیال خنک‌کننده، با توجه به ویسکوزیته‌ی پایین این سیال حتی برای دبی‌های بیشتر، افت فشار کمتری در پی دارد و هزینه‌های مربوط به فن را به‌شدت کاهش می‌دهد، اما با توجه به ظرفیت گرمایی پایین این سیال حتی با دبی‌های زیاد هم نتایج رضایت‌بخش نخواهند بود و همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر دمای ایجادشده و انحراف معیار دما در هر سه حالت بسیار بالاتر از حد مجاز هستند. روغن سیلیکون به‌عنوان دیگر سیال دی‌الکتریک مورداستفاده با توجه به ظرفیت گرمایی بالاتر نسبت به هوا در دبی‌های بسیار کمتر نتایج قابل‌قبول‌تری از لحاظ حداکثر دمای به وجود آمده ارائه می‌دهد، البته هزینه‌های مربوط به افت فشار و توان مصرفی به‌شدت بالاتر از هوا است و انحراف معیار دما هم همچنان مقادیر غیرقابل قبولی به خود اختصاص داده است. مقادیر بالای افت فشار و انحراف معیار دما را می‌توان با ویسکوزیته بالا و ضریب نفوذ حرارتی پایین روغن سیلیکون توجیه کرد. تنها سیالی که برای نرخ بالای دشارژ 5C، نتایج قابل قبولی چه از نظر حداکثر دمای ایجاد شده و انحراف معیار دما و چه ازنظر هزینه‌ی پمپاژ ارائه داده است، آب است. البته همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود برای آب به‌عنوان سیال کاری و با آرایش U شکل توزیع جریان، حداکثر دمای ایجادشده و انحراف معیار دما نسبت به دو حالت دیگر توزیع جریان، بیشتر است که ریشه‌ی این امر را می‌توان در ناکارآمدی این آرایش توزیع سیال جستجو کرد.

در بین دو آرایش باقیمانده، اگرچه اعداد و ارقام برای آب، بسیار نزدیک هم هستند ولی نتایج مربوط به آرایش Y با یک ورودی و دو خروجی از لحاظ حداکثر دما و انحراف معیار دما، کمی مناسب‌تر به نظر می‌رسد و با توجه به اینکه در این آرایش جریان، سیال خنک‌کننده متناسب با محل خروجی‌های تعبیه‌شده، بیشتر در لابه‌لای باتری‌ها پخش می‌شود، این نتیجه دور از انتظار هم نخواهد بود.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-08]



شکل ۵- توزیع دما در مجموعه‌ی باتری با توزیع جریان U شکل برای: الف) هوا، ب) روغن سیلیکون، ج) آب



شکل ۶- مقادیر متوسط پارامترهای مختلف در باتری‌ها برای روغن سیلیکون و با توزیع سیال U شکل: الف) دما، ب) ولتاژ، ج) مقاومت درونی، د) نرخ حرارت تولیدی

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-08]

۶- نتیجه‌گیری

به‌منظور پیش‌بینی رفتار گرمایی باتری و بهبود طراحی سیستم مدیریت گرما، یک مدل‌سازی مناسب می‌تواند بسیار مؤثر باشد. در حقیقت مدل‌سازی ارزان‌ترین روش برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مانند نوع سیال خنک‌کننده، مکانیسم انتقال حرارت، ژئومتری سیستم و موارد دیگر از این دست، بر عملکرد سیستم است. در این پژوهش یک مجموعه باتری یون لیتیوم مشابه با نمونه‌های تجاری موجود برای بررسی انتخاب شده است. به‌منظور بهینه‌سازی سیستم مدیریت گرمای مجموعه باتری، عملکرد آب، روغن سیلیکون و هوا به‌عنوان سیال کاری در سه آرایش جریان I، Y و U شکل موردبررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی‌ها به‌صورت زیر است:

هوا اگرچه توان زیادی برای جابجا شدن در داخل مجموعه نیاز ندارد اما حتی در دبی‌های بالا قادر به خنک کردن باتری‌ها نخواهد بود. روغن سیلیکون دیگر سیال مورداستفاده به دلیل ویسکوزیته‌ی بالا، افت فشار زیادی در داخل مجموعه پیدا می‌کند و از این لحاظ مناسب به نظر نمی‌رسد هرچند در کنترل دمای مجموعه بهتر از هوا عمل می‌کند. در بین آرایش‌های مختلف جریان نیز دو آرایش I و U به دلیل عدم توزیع یکنواخت در داخل مجموعه و احتمال پدید آمدن نقاط داغ در برخی باتری‌های مجموعه، مشکل‌ساز خواهند بود. و می‌تواند انتخاب مناسبی برای مدیریت گرمای مجموعه باشد.

منابع

[1] http://www.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/program/fc_fuel_partnership_plan.pdf, last accessed08/06/2007.

[2] G. Karimi, X. Li, Thermal management of lithium-ion batteries for electric Vehicles, *International Journal of Energy Research*, Vol. 37, No, 1, pp. 13-24, 2013.

[3] R. Kizilel, R. Sabbah, J. R. Selman, S. Al-Hallaj, An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs, *Journal of Power Sources*, Vol. 194, No. 2, pp. 1105-1112, 2009.

[4] Y. Ye, Y. Shi, N. Cai, J. Lee, X. He, Electro-thermal modeling and experimental validation for lithium ion battery, *Journal Power Sources*, Vol. 199, pp. 227–238, 2012.

[5] L. Rao, J. Newman, Heat generation rate and general energy balance for insertion battery systems, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 144, No. 8, pp. 2697-2704, 1997.

[6] G. G. Botte, B. A. Johnson, R. E. White, Influence of some design variables on the thermal behavior of a lithium-ion cell, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 146, No. 3, pp. 914-923, 1999.

[7] P. Nelson, D. Dees, K. Amine, G. Henriksen, Modeling thermal management of lithium-ion PNGV batteries, *Journal of Power Sources*, Vol. 110, No. 2, pp. 349-356, 2002.

[8] A. Mills, S. Al-Hallaj, Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs, *Journal of Power Sources*, Vol. 141, No. 2, pp. 307-315, 2005.

[9] N. Sato, Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles, *Journal of Power Sources*, Vol. 99, No. 1, pp. 70-77, 2001.

[10] G. Karimi, J. J. Baschuk, X. Li, Performance analysis and optimization of PEM fuel cell stacks using flow network approach, Journal of Power Sources, Vol. 147, No. 1, pp. 162-177, 2005.

[11] Y. Inui, Y. Kobayashi, Y. Watanabe, Y. Watase, Y. Kitamura, Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries, *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No. 7, pp. 2103-2109, 2007.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-10-08]