

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

مطالعه پژوهش عددی در مورد تاثیرات گرمایش و گرم کردن باتری در آب و هوای سرد

مهدی مسجیدی (نویسنده مسئول)^۱، مصطفی امیدوی بیدگلی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خودرو، گرایش قوای محرکه دانشگاه آزاد واحد شهرضا، شهرضا mm25547495@gmail.com

^۲ عضو هیئت علمی و استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی بادرود، بادرود mostafaomidibidgoli@gmail.com

چکیده

عملکرد و بازدهی باتری در دمای پایین، تا حد زیادی کاهش می‌یابد. بنابراین سیستم مدیریت گرمایی باتری (BTMS) برای گرمایش (گرم کردن) و حفظ دما در دامنه مناسب در زمانی حائز اهمیت است که باتری های وسایل الکتریکی در آب و هوای سرد کار می کنند. هدف این تحقیق، بررسی تاثیرات پارامترهای گرمایش بر عملکرد و بازده گرمایی BTMS بر مبنای متد صفحه سرد و گرم است. مدل سه بعدی شش پیل باتری و صفحه سرد و گرم در نرم افزار COMSOL ساخته شده است. این تحقیق، اثر سه پارامتر را تحت آب و هوای سرد ۲۰- درجه سانتی گراد در نظر گرفته است. این تاثیرات عبارتند از: نرخ تخلیه باتری، نرخ جریان (دبی) جرمی ورودی واسطه و محیط گرمایش و دمای ورودی.

بر طبق این نتایج، باتری ها را نمی توان تا دامنه دمایی عملیاتی مناسب و تنها توسط در نظر گرفتن نرخ های تخلیه باتری گرم نمود. علاوه بر این نرخ های تخلیه نیز تاثیرات ناچیزی بر افزایش دما در مقایسه با منبع گرمایش خارجی دارد. با منبع گرمایش خارجی و نرخ جریان جرمی بالاتر، می توان به بازده گرمایی بهتری دست یافت. اما زمانی محدود می شود که نرخ جریان جرمی بیشتر از ۰/۰۶۵ Kg/s شود که افزایش دمای ورودی محیط و رسانه گرمایش می تواند به سرعت باتری ها را گرم کند. اما هم چنین می تواند باعث افزایش دمای حداکثری باتری ها تا ۴۰ درجه سانتی گراد شود. دمای ورودی حدود ۴۵ درجه سانتی گراد در میان دماهای محاسبه شده، می تواند یک دمای منطقی برای گرمایش باتری BTMS مبتنی بر صفحه سرد و گرم باشد.

واژه های کلیدی

مدیریت گرمایی باتری، آب و هوای سرد، صفحات سرد و گرم، شبیه سازی CFD گرمایش، باتری های یون- لیتیوم

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

۱-مقدمه

در حال حاضر، وسایل الکتریکی^۱، توجه زیادی را در جامعه ما به خود اختصاص داده‌اند. باتری منبع انرژی اصلی وسایل الکترونیکی است و تاثیر مهمی بر دامنه حرکت و کارایی پایایی و موضوعات ایمنی دارد [1,2]. باتری یون-لیتیومی در میان انواع مختلف باتری‌ها به دلیل چگالی انرژی، کارایی و بازدهی بالا، نداشتن عوارض جانبی بر حافظه، طول عمر و دوام بالا و نرخ خود تخلیه‌ای پایین به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند [3,4]؛ اگرچه عملکرد و بازدهی LIB نسبت به دمای عملیاتی آن حساس و آسیب پذیر است. دامنه دمایی عملیاتی و کارایی مناسب باتری یون-لیتیومی بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد است [5,6]. وقتی دما به زیر ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، آنگاه بازدهی به دلیل افزایش غلظت و چسبندگی الکترولیت و افزایش مقاومت درونی کاهش می‌یابد [7,8]. به طور خاص ظرفیت تخلیه تا حدود ۷۸/۶ درصد شرایط عملیاتی و کاری نرمال و تحت دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد افت می‌کند [9]. بنابراین متدهای حفظ دما و گرمایش این باتری‌ها برای آب و هوای سرد، موضوعات بسیار مهمی می‌باشند؛ در این راستا آقای یان و همکارانش^۲ [10] یک استراتژی گرمایشی را مطرح نمودند که بر مبنای آن، باتری‌های تنها از طریق مقاومت درونی شان گرم می‌شوند. هلاج و سلامن^۳ [11] مطرح نمودند که می‌توان از گرمای ذخیره شده در ماده تغییر فاز^۴ برای حفظ گرمای باتری‌های یون-لیتیومی در آب و هوای سرد استفاده کرد. لی [12]^۵ از لایه فلزی خط گسترده برای گرم کردن باتری استفاده کرد. زیانگ و همکارانش^۶ [13] یک استراتژی گرمایشی پلکانی را به منظور پیش گرمایش درونی باتری با جریان متناوب^۷ توسعه دادند. اگرچه کاربرد صفحه سرد و گرم برای گرم و سرد کردن باتری‌های مذکور در مدیریت گرمایی باتری، یکی از رایج-ترین متدهای مدیریت گرمایی در وسایل الکتریکی می‌باشد [14,15]؛ بیشتر تحقیقات از جنبه صفحه سرد و گرم، بیشتر بر فاکتورهایی همانند فرم قرارگیری و آرایش صفحه سرد و گرم، ساختار هندسی کانال‌ها [17-20] و شرایط عملیاتی و کاری تمرکز کرده‌اند [21-23]. تانگ و همکاران^۸ [16] دریافته‌اند که بازده سرمایشی صفحات سرد با افزایش تعداد باتری میان صفحات، کاهش می‌یابد.

چین و همکاران^۹ [17] برای ساختار کانال‌ها دریافته‌اند که یک صفحه سرد مایع ریز کانالی مورب مناسب است و لذا آن را توسعه دادند. نتایج عددی نشان می‌دهند که کانال مورب منجر به افزایش ضریب انتقال گرما نسبت به کانال مستقیم معمولی می‌شود. کیم و جارت^{۱۰} [18] نیز یک صفحه سردی را با کانال‌های مارپیچ طراحی نمودند و از شبیه‌سازی CFD به منظور بهینه‌سازی مدل مبتنی بر افت میانگین فشار، یکنواختی میانگین دما و یکنواختی دما استفاده نمودند.

دنگ و همکاران^{۱۱} [19] صفحه سردی را با کانال‌هایی شبیه به برگ طراحی نمودند. بهینه‌سازی پارامتر برای کانال‌ها با حمایت CFD و بر مبنای بهینه‌سازی دما و یکنواختی دما اجرا شده است. شن و همکاران^{۱۲} [20] دریافته‌اند که افزایش تعداد کانال‌ها و عریض‌تر

¹ EVs

² Yan et al.

³ Hallaj and Selamn

⁴ PCM

⁵ Lei

⁶ Xiong et al.

⁷ AC

⁸ Tong et al.

⁹ Jin et al.

¹⁰ Jarrett and Kim

¹¹ Deng et al.

¹² Zhen et al.

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

شدن آنها می تواند یک تاثیر سرمایه‌ش بهتری را در برداشته باشد و اختلاف دما در پک باطری را کاهش دهد. آنتوی جارت¹³ [21] در مورد شرایط عملیاتی دریافت که یکنواختی دما نسبت به شرایط عملیاتی حساس است. پانچال و همکاران¹⁴ [22] دریافتند که یک نرخ تخلیه تقویت شده و دمای عملیاتی، باعث افزایش دمای صفحه سرد می شود. همچنین هیو و همکاران¹⁵ [23] دریافتند که افزایش نرخ جریان جرمی ورودی، می تواند دمای بیشینه باطری را کاهش دهد. این محققان بر بهره‌وری و بازدهی صفحه سرد تمرکز کرده‌اند [16-23] و مطرح نموده‌اند که بازده سرمایه‌ش تحت تاثیر شیوه قرارگیری، ساختارهای هندسی کانال‌ها و شرایط عملیاتی قرار دارد. اگرچه برخی از محققان در مورد بازده سرمایه‌ش صفحه سرد و گرم در شرایط سرما نگران هستند و به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. فاکتورهای تاثیرگذار بر بازده گرمایشی صفحه سرد و گرم باید به منظور اجتناب از کاهش شدید بازده باطری در شرایط سرما مورد بررسی بیشتر قرار بگیرند تا نیاز به حفظ دما و گرمایش سریع در محیطی با دمای پایین تامین شود. هدف این تحقیق بررسی تاثیر شرایط عملیاتی بر گرمایش و بازده حفظ دمای صفحه سرد و گرم برای گرمایش سیال باطری می باشد. یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی ۳ بعدی از صفحه سرد و گرم طراحی شده است و ۳ شرط عملیاتی و کاری از جمله نرخ تخلیه، نرخ جرمی سیال و دمای ورودی به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته است تا یک دستورالعمل در طراحی سیستم گرمایش باطری برای وسایل الکتریکی فراهم شود.

۲- مدل سازی

A. ۱-۲ شرح و توصیف مدل

در متد صفحه سرد و گرم مبتنی بر سرمایه‌ش و گرما سیال، چندین پیل باطری قائم‌الزاویه بر روی صفحه سرد و گرم قرار داده شده‌اند که حاوی تعدادی کانال مستطیلی می‌شود و مایع از طریق کانال‌ها جریان می‌یابد تا باطری‌ها را گرم یا سرد کند. در این تحقیق یک مدل CFD سه بعدی از ۶ باطری و BTMS مبتنی بر صفحه سرد و گرم با چندین کانال مستطیلی قائم‌الزاویه در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. مدل عددی طراحی شده و در نرم افزار COMSOL محاسبه شده است.

¹³ Anthoy Jarrett

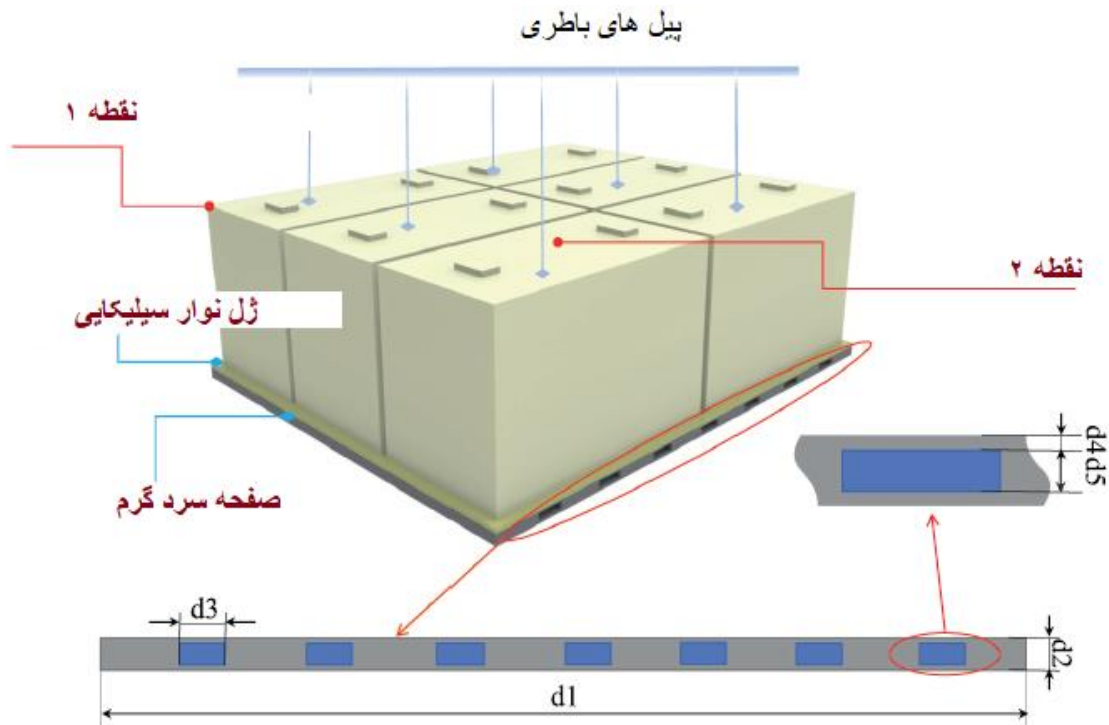
¹⁴ Panchal et al.

¹⁵ Huo et al.

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir



شکل شماره ۱: طرح نموداری صفحه گرم و سرد برای مدول های باطری

۶ پیل باطری در ۲ ردیف و ۳ ستون با فاصله فضایی ۵ میلی متر در مدل عددی قرار گرفته اند. باطری ها از شرکت تکنولوژی سیستم های انرژی می باشند و ویژگی های آن ها در جدول شماره ۲ نشان داده شده اند.

یک لایه ژل سیلیکا با ضخامت ۲ میلی متر در میان باطری ها و صفحه سرد و گرم قرار داده شده است تا عایق بندی و میرایی تنظیم رطوبت تأمین شود. صفحه سرد و گرم از آلومینیوم با ۷ کانال ساخته شده است که در طول پهنای صفحه سرد و گرم توزیع شده اند. اندازه این

صفحه در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. جدول شماره ۱: اندازه صفحه سرد و گرم

	d^5	d^4	d^3	d^2	d^1	واحد: میلی متر
	۴	۱/۲۵	۱۵	۶/۵	۳۱۱	

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

جدول شماره ۲: ویژگی پیل باطری

پارامترها	مقدار
اندازه و سائز (میلی متر در میلی متر در میلی متر)	79 × × 148 × × 95
ظرفیت (Ah)	150
دامنه دمای عملیاتی و کاری (°C)	-20 ~ 55
بهترین دامنه عملیاتی SOC	5% ~ 95%
چگالی ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2756
ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1100
ضریب رسانایی گرمایی ($\text{w}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	6/18/11 (x/y/z)

در کانال‌های این صفحه از ترکیب آب-اتیلن-گلیکول (۵۰/۵۰) به عنوان یک محیط و رسانه گرمایشی استفاده شده است. ویژگی‌های ترموفیزیکی لایه ژل سیلیکا و آلومینیوم و گلیکول آب اتیلن در جدول شماره ۳ نشان داده شده‌اند که از تحقیق‌های انجام شده و نرم افزار COMSOL برگرفته شده‌اند.

جزئیات مش بندی و شبکه بندی حوزه‌های محاسباتی نیز در شکل شماره ۲ نشان داده شده‌اند. شبکه حوزه جامد به طور مناسب توسط جدول شماره ۱: ویژگی‌های گرمایی مواد

ماده	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	C_p ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	k ($\text{w}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	μ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)
محیط و رسانه گرمایشی	1064	3358	0.399	2.26

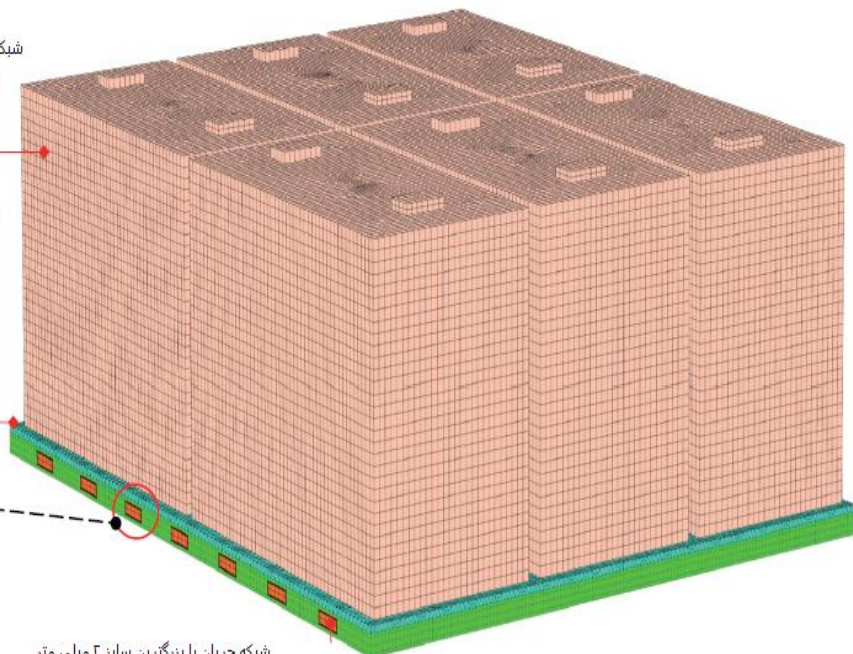
شبکه باطری با بزرگترین اندازه ۱۲ میلی متر و کوچکترین اندازه ۴ میلی متر

شبکه لایه ژل سیلیکا با بزرگترین اندازه ۱۰ میلی متر و کوچکترین اندازه ۲ میلی متر

شبکه صفحه سرد و گرم با بزرگترین اندازه ۶ میلی متر و کوچکترین اندازه ۱ میلی متر

شبکه لایه مرزی: ۵ لایه با مجموع ۰/۷۴ میلی متر

شبکه جریان با بزرگترین سائز ۲ میلی متر و کوچکترین اندازه ۰/۵ میلی متر



یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

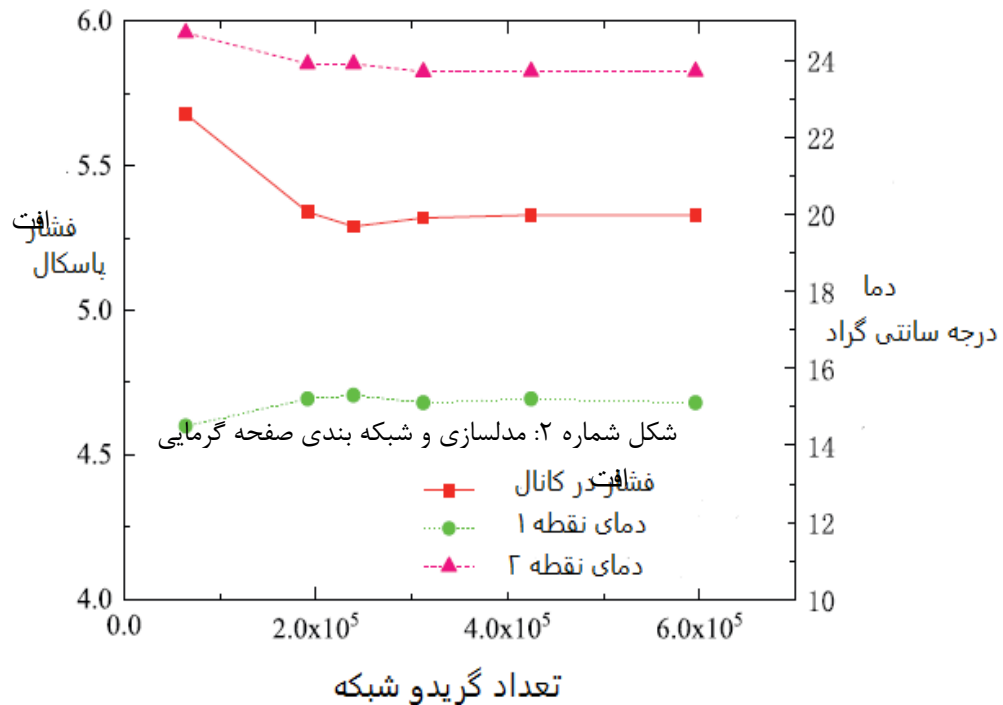
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

در نظر گرفتن زمان شبیه‌سازی بیان شده است؛ در حالیکه شبکه حوزه جریان به دلیل تاثیر مهم و پیچیده بر بازده انتقال گرمایی همرفتی به اصلاح بیشتر نیاز دارد. شبکه لایه مرزی در ناحیه رابط جامد و مایع ساخته شده است.

همانطور که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است، یک شبکه مرزی ۵ لایه‌ای با مجموع ضخامت ۰/۷۴ میلی‌متر در این تحقیق تولید شده‌است. مجموع تعداد این مدل برابر با ۳۱۲۰۳۹ و تعداد گره برابر ۲۳۹۴۱۸ است.

تست حساسیت و آسیب‌پذیری سائز گرید شبکه قبل از محاسبه انجام شده است. افت فشار در کانال‌ها و دمای نقاط ۱ و ۲ در شکل شماره ۱ نشان داده شده‌اند و از آن‌ها برای آنالیز انحرافات استفاده شده است. ۶ بخش شبکه‌ای متفاوت اعم از ۶۴۴۷۱، ۱۹۱۵۵۵، ۲۳۹۴۱۸، ۳۱۲۰۳۹، ۴۲۴۴۱۴ و ۵۹۵۹۹۶ برای این مدل تولید شده‌اند و نتایج حاصل را می‌توان در شکل شماره ۳ مشاهده نمود. مشاهده می‌شود که انحرافات این ۳ شاخه کمتر از ۱/۵ درصد می‌باشد و نتایج در صورتی مستقل از تعداد گرید و شبکه می‌باشد که تعداد گریدها بیشتر از ۲۳۹۴۱۸ باشد.



شکل شماره ۳: تست مستقل تعداد گرید و شبکه

B. ۲-۲ شرایط مرزی و معادلات حاکم

دامنه دمایی عملیاتی و کاری پیل باطری بر طبق جدول شماره ۲ می‌تواند بین ۲۰- تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد باشد. بنابراین دمایی محیط و دمایی اولیه باطری‌ها برای شبیه‌سازی به عنوان ۲۰- درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده‌اند. وقتی باطری در آب و هوای سرد کار می‌کند، آنگاه منبع گرمایی باطری‌ها شامل گرمای درونی و گرمای بیرونی می‌شود. گرمای درونی به معنای گرمای تولید شده حاصل از

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

انتقال الکترون و مقاومت در واکنش الکتروشیمیایی در داخل باتری یون-لیتیومی می باشد. مجموع تولید گرمای درونی^{۱۶} در یک پیل الکتریکی را می توان به ۳ بخش تقسیم کرد: گرما یا حرارت واکنش^{۱۷}، گرمای قطبیت^{۱۸} و گرمای ژول^{۱۹}. هر بخش از تولید گرما را می توان به صورت فرمول محاسبه کرد (جدول شماره ۴).

جدول شماره ۴: تولید گرمای باتری ها

تولید گرما	فرمول $Q_g = Q_r + Q_p + Q_z$	توضیحات
مجموع گرما		Q_g : تولید گرما Q_r : گرمای واکنش Q_p : گرمای قطبی Q_z : گرمای ژول
گرمای واکنش	$Q_r = -IT_b \frac{dE_{oc}}{dT_b}$	I : جریان T_b : دمای باتری
گرمای قطبیت	$Q_p = I^2 R_p = I^2 (R_t - R_e)$	E_{oc} : ولتاژ مدار باز باتری Q_p : مقاومت قطبیت R_t : مقاومت کل R_e : مقاومت خالص
گرمای ژول	$Q_z = I^2 R_e$	R_e : مقاومت خالص

فرض بر این است که گرمای تولید شده باتری ها به طور یکنواخت توزیع شده است تا تأثیر آن بر بازده گرمایی صفحه سرد و گرم، مورد بررسی دقیق قرار بگیرد. با این وجود گرمای واکنش تنها برای یک بخش کوچک در نظر گرفته می شود و در حین آنالیز رفتارهای گرمایی باتری ها قابل نادیده گرفتن و حذف شدن می باشد. باتری ها به عنوان یک منبع گرمایی یک دست در نظر گرفته شده اند و نرخ تولید گرما در حجم واحد Q_g در نظر گرفته می شود و به صورت رابطه زیر محاسبه می گردد:

رابطه شماره ۱

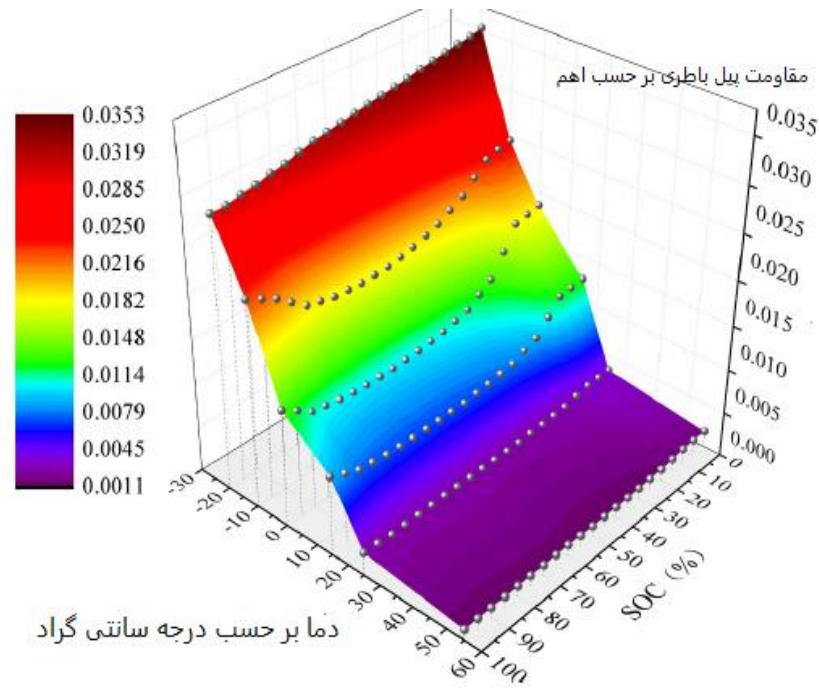
I برابر با جریان بر حسب آمپر، V برابر حجم پیل باتری بر حسب m^3 است. R_t نیز برابر با مقاومت مجموع پیل با باتری بر حسب اهم است که تحت تأثیر دما و SOC قرار دارد. نتایج آزمایشگاهی مقاومت پیل باتری در نقاط خاکستری شکل شماره ۴ نشان داده شده اند.

¹⁶ Q_g
¹⁷ Q_r
¹⁸ Q_p
¹⁹ Q_z

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir



شکل شماره ۴: نتیجه آزمایشگاهی و درون یابی مقاومت داخلی باطری از متد درون یابی به منظور کاهش هزینه محاسباتی استفاده شده است تا داده‌های جا افتاده کامل شوند و طرح مقاومت باطری در نرم افزار COMSOL محاسبه شود. همانطور که در جدول شماره ۲ بیان شده است، بهترین دامنه عملیاتی SOC میان ۵ و ۹۵ درصد است. بنابراین SOC اولیه باطری‌ها به عنوان ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است. در طی فرآیند تخلیه، می‌توان SOC را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$SOC = 1 - t.C$$

رابطه شماره ۲

در این جا t برابر با مدت زمان تخلیه بر حسب ساعت و C برابر با نرخ و سرعت

تخلیه می‌باشد. دامنه و محدود نرخ تخلیه پیل باطری در جدول شماره ۵ نشان داده شده است. در این جدول T برابر با دمای پیل باطری و C_{max} برابر با نرخ تخلیه بیشینه می‌باشد.

جدول شماره ۵: دامنه و محدوده جریان تخلیه باطری‌ها

$T(^{\circ}C)$	-20	-15	-10	-5	0	5	15	20	25
C_{max}	0.1	0.15	0.2	0.26	0.33	0.53	0.73	1.2	1.2

منبع گرمای خارجی از طریق محیط و رسانه گرمایشی جاری در کانال‌های صفحه سرد و گرم تحقق می‌یابد. وقتی محدوده بالایی دمای عملیاتی بهینه باطری ۴۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود؛ آنگاه دمای ورودی محیط و رسانه گرمایش در دمای ۴۰ درجه سانتی-گراد و در طی فرآیند گرمایش ثابت نگه داشته می‌شود. نرخ جریان جرمی ورودی و فشار خروجی (صفر پاسکال) به عنوان شرایط مرزی

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

ورودی و خروجی به کار گرفته شده اند. ۶ نرخ جریان جرمی ورودی متفاوت برای گرمایش باطری های در فرآیند شبیه سازی انتخاب شده-
اند که عبارتند از:

۰/۰۰۵ و ۰/۰۱۵ ، ۰/۰۳۵ ، ۰/۰۶۵ ، ۰/۱۰۵ ، ۰/۱۵۵ kg/s

همه نرخ های جریان جرمی، مجموع جریان جرمی صفحه سرد و گرم می باشند که به طور یک دست در ۷ کانال جریان توزیع شده اند. از
عدد رینولدز به منظور تعیین حالت جریان آرام یا آشفته استفاده شده است و

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

می توان آن را از

طریق رابطه زیر به

دست آورد:

رابطه شماره ۳

Re برابر با عدد رینولدز است (عدد بدون بعد). ρ برابر با چگالی (kg.m^{-3})، V برابر با سرعت (m.s^{-1}) و d برابر با طول ویژگی و μ
برابر با ویسکوزیته دینامیکی است. عدد Re تحت نرخ های جریان جرمی ورودی متفاوت در جدول شماره ۶ نشان داده شده است.

جدول شماره ۶: عدد رینولدز تحت نرخ های جریان جرمی متفاوت

نرخ جریان جرمی (kg.s^{-1})	0.005	0.015	0.035	0.065	0.105	0.155
عدد رینولدز	33.2	99.5	232.2	431.2	696.6	1028.3

عدد رینولدز کمتر از ۲۳۰۰ است. بنابراین مدل آرام در شبیه سازی در نظر گرفته شده است. از شرایط مرزی بدون لغزش و دیواره ثابت
برای سطح کانال ها استفاده شده است. معادله بقای جرم و معادلات بقای انرژی و معادلات بقا و پایداری انرژی در جدول شماره ۷ به
طور خلاصه ارائه شده اند.

جدول شماره ۷: معادلات بقا و پایداری

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

معادلات بقا و پایداری	توضیحات
بقای جرم رسانا و محیط گرمایش $\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v}) = 0$	چگالی محیط و رسانه گرمایش: ρ_c بردار سرعت مایع و سیال: \vec{v} زمان: t
بقای گشتاور و رسانا و محیط گرمایش $\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v}$	فشار استاتیکی محیط گرمایش: P گرانروی دینامیکی: μ
بقای انرژی محیط گرمایش $\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c c_{pc} T_c) + \nabla \cdot (\rho_c c_{pc} \vec{v} T_c) = \nabla \cdot (k_c \nabla T_c)$	ظرفیت گرمایی رسانه و محیط گرمایش: c_{pc} دمای رسانه ی گرمایش: T_c رسانایی گرمایی رسانه و محیط گرمایش: k_c
بقای انرژی صفحه سرد و گرم $\frac{\partial}{\partial t} (\rho_h c_{ph} T_h) = \nabla \cdot (k_h \nabla T_h)$	چگالی صفحه سرد و گرم: ρ_c ظرفیت گرمایی صفحه سرد و گرم: c_{ph} رسانایی گرمایی صفحه سرد و گرم: k_h دمای صفحه سرد و گرم: T_h
بقای انرژی زل لایه سیلیکا $\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s c_{ps} T_s) = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s)$	چگالی لایه و درزگیر زل سیلیکا: ρ_s ظرفیت گرمایی لایه زل سیلیکا: c_{ps} رسانایی گرمایی لایه زل سیلیکا: k_s دمای لایه زل سیلیکا: T_s
بقا و بايستاری انرژی باطری $\frac{\partial}{\partial t} (\rho_b c_{pb} T_b) = \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) + q_g$	چگالی باطری: ρ_b ظرفیت گرمایی باطری: c_{pb} رسانایی گرمایی باطری: k_b دمای باطری: T_b منبع گرمایی باطری: q_g

علاوه بر این، شرایط مرزی همرفتی در دیوارهای بیرونی باطریها و صفحه سرد و گرم در نظر گرفته شده اند و آن از طریق قانون

سرمایش نیوتن قابل

$$q_a = h_a (T_s - T_e)$$

محاسبه است:

رابطه شماره ۴

در این رابطه h_a برابر با ضریب انتقال گرمای همرفتی با مقدار $5 \text{ (w.m}^{-2}\text{.k}^{-1}\text{)}$ است. T_s برابر با دمای سطح باطریها و T_e برابر با دمای محیط است.

۳- نتایج و مباحث

به منظور ارزیابی بازده گرمایشی صفحه سرد و گرم، پارامترهای دمای میانگین باطریها^{۲۰}، نرخ افزایش دمای میانگین (U_t)، اختلاف دمای سطوح بالای باطریهای با افت فشار در کانالها در طی فرآیند گرمایش مورد بررسی قرار گرفته است. U_t بیانگر ظرفیت گرمایش صفحه سرد و گرم می باشد. اختلاف دما یا همان ΔT بر سطوح بالایی باطریها بیانگر یکنواختی توزیع دمای پیل های باطری است و باید زیر 5 K حفظ شود. از فرمولهای جدول شماره ۸ می توان برای محاسبه پارامترها استفاده کرد. تأثیر نرخ و سرعت تخلیه، نرخ جریان جرمی ورودی و دمای ورودی بر عملکرد و بازده گرمایی صفحه سرد و گرم مورد آنالیز قرار گرفته است. جدول شماره ۸: سنسورها برای سنجیدن عملکرد گرمایی

پارامتر	فرمول	توضیحات
دمای میانگین باطری	$T_{avg} = \frac{\int V_b T_b dV}{\int V_b dV}$	T_b : دما V_b : ناحیه باطری
نرخ برانگیختگی دمای میانگین ²⁰	$U_t = \frac{\Delta T_{avg}}{t}$	ΔT_{avg} : برانگیختگی دمای میانگین t : زمان
تغییرات دما	$\Delta T = T_{max} - T_{min}$	T_{max} : دمای پیشینه T_{min} : دمای کمینه
افت فشار	$\Delta p = P_{inlet} - P_{outlet}$	P_{inlet} : فشار میانگین دهانه ورودی P_{outlet} : فشار میانگین دهانه خروجی

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

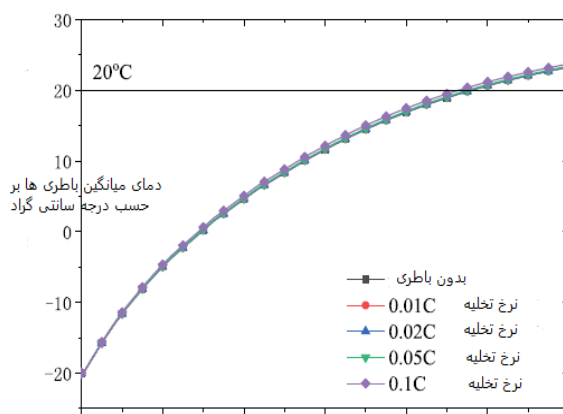
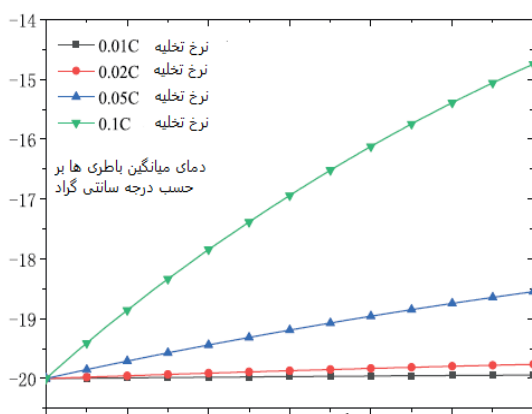
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

۱-۳ تأثیرات نرخ تخلیه متفاوت

همانطور که در بالا به آن اشاره شده است، نرخ تخلیه بیشینه این باتری برابر با 0.10C در دمای 20°C درجه سانتی گراد می باشد. بنابراین نرخ تخلیه به منظور بررسی تأثیر آن ها بر افزایش دمای باتری ها انتخاب شده اند. این نتایج در شکل شماره ۵ نشان داده شده است.

در شکل شماره ۵a، تنوع دمای میانگین در طی فرآیند تخلیه بدون منبع گرمای بیرونی را نشان می دهد. واضح است که منبع گرمای



شکل شماره ۵a: تنوع دمای میانگین باتری ها در طی فرآیند تخلیه بدون منبع گرمای بیرونی و شکل شماره ۵b: تنوع دمای میانگین باتری ها در طی فرآیند تخلیه با منبع گرمای بیرونی و

درونی و داخلی قادر به فراهم کردن شرایط مورد نیاز کارآیی باتری ها در دامنه بهینه نمی باشد؛ علی رغم اینکه تولید گرمای باتری ها با نرخ تخلیه افزایش می یابد. وقتی باتری ها با نرخ تخلیه بیشینه عمل می کنند، بعد از تخلیه برای 3600 ثانیه، دمای نهایی تنها تا $14/8 -$ درجه سانتی گراد افزایش می یابد. بنابراین وقتی باتری ها در آب و هوای سرد کار می کنند، منابع گرمای خارجی و بیرونی مورد نیاز می باشند.

شکل شماره ۵b، نشان دهنده دمای میانگین در طی فرآیند تخلیه با یک منبع گرمای بیرونی می باشد. نرخ جریان جرمی ورودی برابر با 0.05 kg/s در نظر گرفته شده است؛ درحالی که دمای ورودی برابر با 40°C درجه سانتی گراد می باشد. نتایج نشان می دهند که منبع گرمای بیرونی می تواند پیل های باتری را تا دامنه مناسبی و به طور موفقیت آمیزی گرم کند. علاوه بر این از شکل شماره ۵b می توان دریافت که وقتی نرخ تخلیه باتری ها از 0.1 تا 0.1 سانتی گراد افزایش می یابد، زمان مورد نیاز برای گرم کردن باتری تا دمای 20°C درجه سانتی گراد تنها در حدود 90 ثانیه کاهش می یابد و این بدین معنی است که نرخ و سرعت تخلیه تأثیر ناچیزی بر افزایش دما در مقایسه با مشارکت و سهم منبع گرمایش بیرونی دارد.

۲-۳ تأثیر جریان جرمی رسانه و محیط گرمایشی

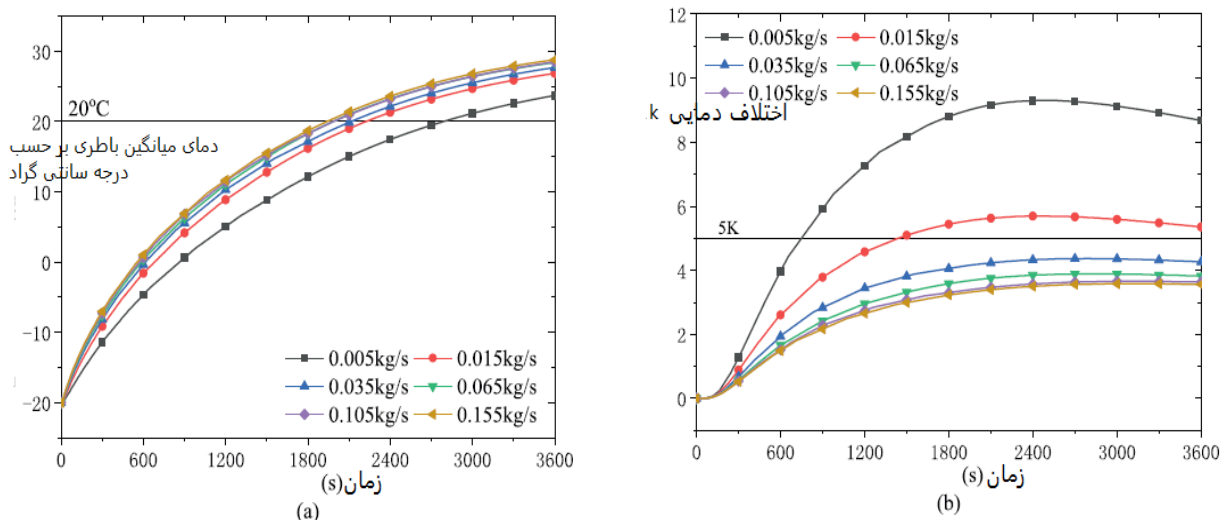
یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

همانطور که قبلاً بیان شده است، ۶ نوع جریان گرمی ورودی از ۰/۰۰۵ تا ۰/۱۵۵ متفاوت هستند و لذا به منظور بررسی تأثیر نرخ جریان گرمی ورودی بر بازده گرمایشی انتخاب شده‌اند. نرخ تخلیه برابر با ۱ C در نظر گرفته شده است که نرخ تخلیه بیشینه در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد است. نتایج شبیه‌سازی در شکل شماره ۶ نشان داده شده‌اند.

در شکل شماره ۶، میانگین دمای باطری‌ها را در برابر زمان تحت نرخ‌های جریان گرمی متفاوت رسانه گرمایشی نشان می‌دهد. مشخص شده است که در طی فرآیند گرمایش، یک نرخ جریان گرمی بالاتر منجر به U_1 بالاتر باطری‌ها خواهد شد. وقتی نرخ جریان گرمی ورودی



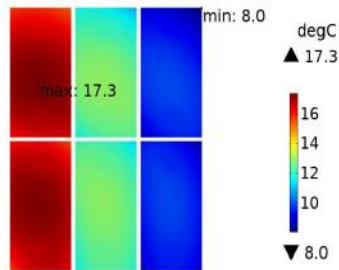
شکل شماره ۶: دمای میانگین باطری‌ها (a) اختلاف دمای سطوح بالای باطری‌ها و (b) تحت نرخ‌های جریان گرمی برابر با ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شود، آن‌گاه بعد از گرمایش به مدت ۳۰۰ ثانیه، دمای میانگین به ۲۳/۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد؛ همانطور که نرخ جریان گرمی تا ۰/۱۵۵ Kg/s افزایش می‌یابد، دمای میانگین نیز تا ۲۸/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. این نتایج بیانگر این مطلب هستند که نرخ انتقال گرمای صفحه سرد و گرم، با افزایش نرخ جریان گرمی ارتقا می‌یابد که با آثار تحقیقاتی مربوطه تطابق دارد. توضیح این پدیده، به صورت زیر است:

تقویت و تشدید نرخ جریان گرمی به معنی داشتن سرعت جریان بالاتر در کانال‌ها می‌باشد که باعث افزایش ضرایب انتقال گرما می‌شود. بنابراین بازده گرمایشی با افزایش نرخ جریان گرمی ارتقا می‌یابد، علاوه بر نرخ افزایش دمای میانگین باطری‌ها، بر گرادیان دمای سطح تمرکز شده است. شکل شماره ۶ b، نشان‌دهنده تنوع ΔT بر سطوح بالای باطری‌ها در طی فرآیند گرمایش می‌باشد. وقتی نرخ جریان گرمی برابر با ۰/۰۰۵ Kg/s باشد، آنگاه ماکسیمم ΔT بر سطح بالای باطری‌ها برابر با ۹/۳ K می‌باشد که راضی‌کننده نمی‌باشد، حائز اهمیت است که متذکر شویم ΔT با افزایش نرخ جریان گرمی، کاهش می‌یابد. وقتی نرخ جریان گرمی بیشتر از Kg/s ۰/۰۳۵ باشد، آنگاه اختلاف دما کمتر از میزان ۵ K قابل قبول می‌باشد. شکل شماره ۷، طرح و نماهای دمای سطوح بالای باطری‌ها را در زمانی نشان می‌دهد که ΔT یک مقدار حداکثری باشد. بدین ترتیب مشخص می‌گردد که دمای بالا در وضعیت مرکزی باطری‌های نزدیک به ورودی رسانه گرمایشی ظاهر می‌شود. دمای پایین در وضعیت یال و لبه باطری‌هایی ظاهر می‌شود که دورتر از ورودی رسانه گرمایشی قرار دارند.

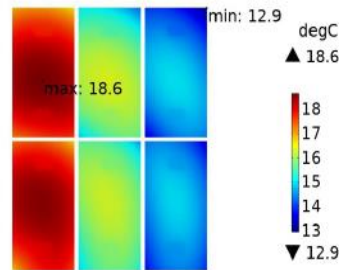
یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

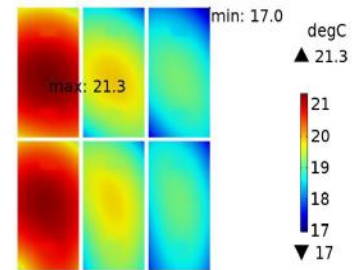
senaconf.ir



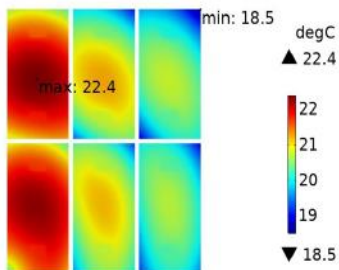
(a) 0.005kg/s



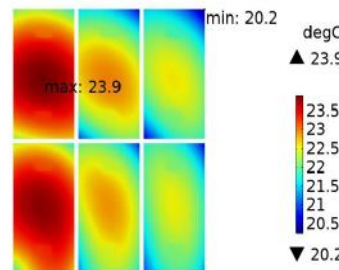
(b) 0.015kg/s



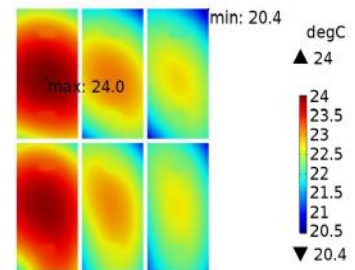
(c) 0.035kg/s



(d) 0.065kg/s



(e) 0.105kg/s



(f) 0.155kg/s

شکل شماره ۷: طرح و نماهای دمای سطوح بالایی باطری‌ها تحت نرخ جریان های جرمی متفاوت
دلیل این مساله این است که رسانای گرمایشی، گرما را در طی فرآیند جاری شدن در کانال‌ها آزاد می‌سازد و منجر به کاهش دما در طول
جهت جریان می‌شود. همانطور که در بالا به آن اشاره شده است، بازده گرما با افزایش نرخ جریان جرمی ورودی افزایش می‌یابد. اگرچه بر
طبق جدول شماره ۹، Δp در کانال‌ها با افزایش نرخ جریان جرمی افزایش می‌یابد. وقتی نرخ جریان جرمی از 0.065 Kg/s تا 0.155 Kg/s
افزایش می‌یابد، افت فشار نیز از 79.5 تا 219.5 پاسکال افزایش می‌یابد.

جدول شماره ۹: افت فشار در نرخ جریان های مختلف

جرمیان جرمی (kg/s)	0.005	0.015	0.035	0.065	0.105	0.155
افت فشار (Pa)	5.3	16.7	40.5	79.5	137.6	219.5

اگرچه دمای میانگین در انتهای فرآیند گرمایش تنها از 28.4 به 28.8 درجه سانتی‌گراد می‌رسد و ΔT بیشینه در طی فرآیند گرمایش
تنها از $3/9 \text{ K}$ به $3/6 \text{ K}$ کاهش می‌یابد و این بدین معنی است که یک آستانه خاص به دست آمده است و ارتقا و بهبود بازده گرمایی از
طریق افزایش نرخ جریان جرمی مشکل می‌باشد. این پدیده مشابه با روند و شیوه باطری‌های سرد شده توسط صفحه سرد در مرجع
شماره ۳۷ می‌باشد. افزایش جریان جرمی به معنی مصرف بالای انرژی است. با در نظر گرفتن بازده گرمایی و مصرف انرژی، مقدار 0.065 Kg/s
به عنوان نرخ جریان جرمی بهینه انتخاب شده است.

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

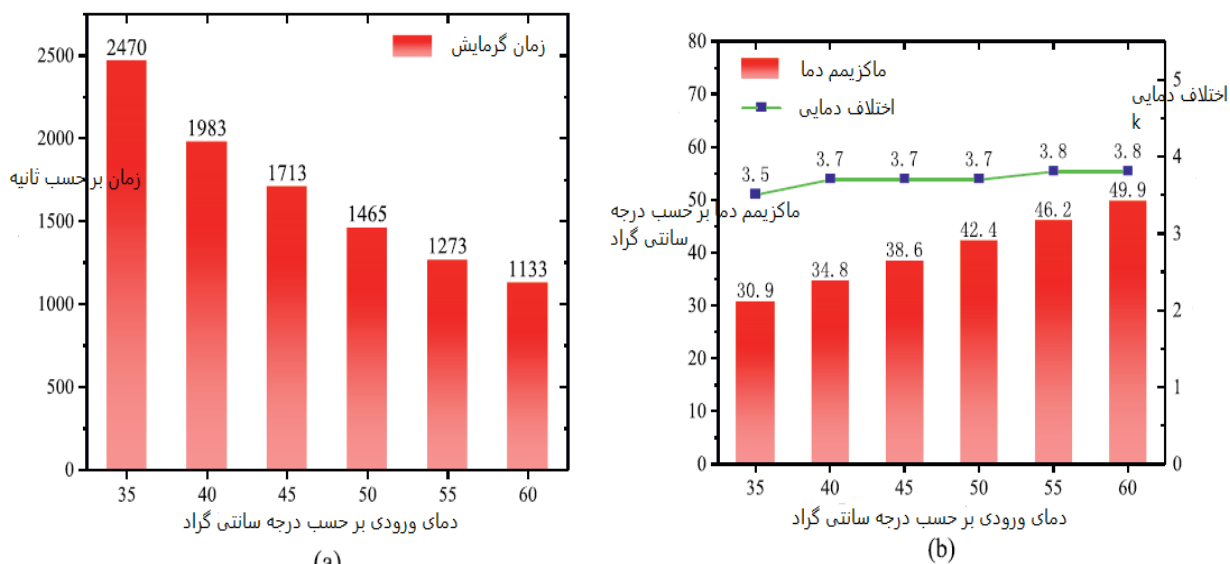
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

C. ۳-۳ تأثیر دمای محیط یا رسانای گرمایشی

در این بخش، ۶ نمونه متفاوت از دمای ۳۵ درجه تا ۶۰ درجه سانتی گراد انتخاب شده است تا تأثیر آن‌ها بر بازده گرمایی مورد بررسی قرار بگیرد. نرخ تخلیه باطری به عنوان C ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود. نرخ جریان جرمی میانگین گرمایشی نیز برابر با ۰/۰۶۵ Kg/s در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا به عنوان مناسب‌ترین مقدار انتخاب شده است، نتایج شبیه‌سازی در شکل شماره ۸ نشان داده شده‌اند.

در حد و دامنه پایینی باطری‌ها بهترین دامنه عملیاتی در حدود ۲۰ درجه سانتی گراد است. بنابراین دمای میانگین باطری‌ها تا ۲۰ درجه



شکل شماره ۸: زمان گرمایش a. دمای بیشینه باطری‌ها و اختلاف دما در سطوح بالایی باطری‌ها b. تحت دمای ورودی سانتی گراد می‌رسد، شکل شماره ۸ نشان می‌دهد که زمان صرف شده برای گرم کردن باطری‌ها تا بیش از ۲۰ درجه سانتی گراد، حائز

اهمیت می‌باشد. می‌توان مشاهده نمود که افزایش دمای ورودی تأثیر مثبتی بر نرخ افزایش دمای میانگین باطری‌ها دارد.

وقتی دمای رسانای گرمایشی ۳۵ درجه سانتی گراد است. باطری‌ها تا ۲۰ درجه سانتی گراد در ۲۴۷۰ ثانیه حرارت داده می‌شوند. وقتی دمای رسانای گرمایشی تا ۶۰ درجه سانتی گراد افزایش می‌یابد، این مقدار تا ۱۱۳۳ ثانیه طول می‌کشد. دلیل این پدیده با تئوری افزایش انتقال گرما توضیح داده شده است. افزایش دمای رسانای گرمایشی باعث افزایش اختلاف دما میان رسانای گرمایشی و صفحه سرد و گرم می‌شود که منجر می‌شود تا تبادل گرمایی مجموع افزایش یابد.

دمای ورودی باید به منظور تأمین نیاز گرمایش سریع افزایش یابد. اگرچه، وقتی دمای ورودی رسانای گرمایشی بیشتر از ۴۰ درجه سانتی گراد است، دمای بیشینه باطری‌ها می‌تواند از دمای عملیاتی بهینه آن در طی فرآیند گرمایش بالاتر رود که نامطلوب و ناخواسته است. وقتی دمای میانگین باطری‌ها به ۲۰ درجه می‌رسد، دمای بیشینه آن‌ها در شکل شماره ۸ b نشان داده شده است. در اینجا مشخص می‌گردد که دمای بیشینه باطری‌ها با دمای ورودی افزایش می‌یابد. دمای بیشینه باطری‌ها در زمانی از ۴۰ درجه سانتی گراد فراتر خواهد رفت که دمای ورودی بالاتر از ۴۵ درجه سانتی گراد باشد و این بدین معنی است که در حین گرم شدن باطری‌ها، دمای مایع ورودی نباید بیشتر از ۴۵ درجه سانتی گراد باشد. علاوه بر این خط سبز در شکل شماره ۸ b، ΔT در سطوح بالایی باطری‌ها را نشان می‌دهد. حائز

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

اهمیت است که متذکر شویم دمای ورودی، تأثیر ناچیزی بر ΔT دارد. وقتی دمای ورودی بین ۳۵ تا ۶۰ درجه سانتی گراد باشد، آنگاه ΔT هر ۲ مورد در حدود ۳/۷ K حفظ می شود که قابل قبول و پذیرش می باشد.

۴- نتیجه گیری

تأثیرات نرخ تخلیه، نرخ جریان جرمی ورودی و دمای مایع ورودی بر عملکرد و بازده گرمایی توسط شبیه سازیهای CFD در دمای محیط ۲۰- درجه سانتی گراد است؛ نتایج نشان می دهد که گرم کردن باتری ها تا دامنه دمای عملیاتی مناسب توسط گرمای تولیدی درونی به تنهایی تحت نرخ های تخلیه متفاوت، مشکل می باشد. با وجود گرمای بیرونی، نرخ تخلیه تقریباً تأثیر ناچیزی بر افزایش دما در مقایسه با توزیع منبع گرمایش بیرونی مشخص شده است که افزایش نرخ جریان جرمی ورودی می تواند باتری ها را به طور کارآمدتر گرم کند. اگرچه بازده گرمایش در زمانی محدود شده است که نرخ جریان جرمی بیشتر از ۰/۰۶۵ Kg/s می شود. برای دمای مایع ورودی، دمای مایع ورودی بالاتر می تواند به یک بازده گرمایشی بهتر دست یابد. وقتی دمای رسانای گرمایش بالاتر از ۵۰ درجه سانتی گراد باشد؛ آنگاه دمای بیشینه باتری ها می تواند بیشتر از ۴۰ درجه سانتی گراد باشد. در میان دماهای ورودی محاسبه شده، دمای ورودی حدود ۴۵ درجه سانتی گراد می تواند یک دمای منطقی برای گرمایش باتری BTMS مبتنی بر صفحه سرد و گرم باشد. این نتایج در طراحی سیستم گرمایش باتری در وسایل الکتریکی حائز اهمیت می باشند.

تقدیر و تشکر

این اثر تا حدی توسط موسسه نوآوری های فنی و پژوهش های کاربردی در چانگ کویینگ و برنامه حمایت از نوآوری و ابداع، برنامه تحقیق و توسعه ملی، بنیاد علوم طبیعی ملی چین، برنامه تحقیقاتی چانگ کویینگ بنیاد تکنولوژی پیشرفته و صندوق های تحقیقات بنیادی در دانشگاه های مرکزی مورد حمایت واقع شده است. مرکز محاسبات پکن نیز از این اثر حمایت فراوان نموده است.

یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

مراجع

- [1] L. Feng, S. Zhou, Y. Li, W. Yao, Z. Qiang, C. Luo, et al., Experimental investigation of thermal and strain management for lithium-ion battery pack in heat pipe cooling, *J. Energy Storage* 16 (2018) 84–92.
- [2] H. Liu, Z. Wei, W. He, J. Zhao, Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: a review, *Energy Convers. Manage.* 150 (2017) 304–330.
- [3] C. Zhao, W. Cao, T. Dong, F. Jiang, Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow, *Int. J. Heat Mass Transf.* 120 (2018) 751–762.
- [4] X. Zhang, X. Chang, Y. Shen, X. Yong, Electrochemical-electrical-thermal modeling of a pouch-type lithium ion battery: an application to optimize temperature distribution, *J. Energy Storage* 11 (2017) 249–257.
- [5] L.H. Saw, C.Y. Ming, K.Y. Ming, T.C. Wen, Numerical analyses on aluminum foams cooling plate for lithium-ion batteries, *Energy Procedia* 105 (2017) 4751–4756.
- [6] Q. Wang, B. Jiang, Q.F. Xue, H.L. Sun, B. Li, H.M. Zou, et al., Experimental investigation on EV battery cooling and heating by heat pipes, *Appl. Therm. Eng.* 88 (2015) 54–60.
- [7] S.S. Zhang, K. Xu, T.R. Jow, The low temperature performance of Li-ion batteries, *J. Power Sources* 115 (1) (2003) 137–140.
- [8] Z. Lei, Y. Zhang, X. Lei, Improving temperature uniformity of a lithium-ion battery by intermittent heating method in cold climate, *Int. J. Heat Mass Transf.* 121 (2018) 275–281.
- [9] Z. Lei, Y. Zhang, X. Lei, Improving temperature uniformity of a lithium-ion battery by intermittent heating method in cold climate, *Int. J. Heat Mass Transf.* 121 (2018) 275–281.
- [10] Y. Ji, C.Y. Wang, Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures, *Electrochim. Acta* 107 (2013) 664–674.
- [11] S. Al Hallaj, J. Selman, A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material, *J. Electrochem. Soc.* 147 (9) (2000) 3231–3236.
- [12] Z.G. Lei, Y.W. Zhang, X.G. Lei, Temperature uniformity of a heated lithium-ion battery cell in cold climate, *Appl. Therm. Eng.* 129 (2018) 148–154.
- [13] S. Guo, R. Xiong, K. Wang, et al., A novel echelon internal heating strategy of cold batteries for all-climate electric vehicles application, *Appl. Energy* 219 (2018) 256–263.
- [14] Z. An, L. Jia, Y. Ding, C. Dang, X. Li, A review on lithium-ion power battery thermal management technologies and thermal safety, *J. Therm. Sci.* 26 (5) (2017) 391–412.
- [15] R. Zhao, S. Zhang, J. Liu, J. Gu, A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: electrode modification and thermal management system, *J. Power Sources* 299 (2015) 557–577.
- [16] W. Tong, K. Somasundaram, E. Birgersson, A.S. Mujumdar, C. Yap, Numerical investigation of water cooling for a lithium-ion bipolar battery pack, *Int. J. Therm.*
- [17] L.W. Jin, P.S. Lee, X.X. Kong, Y. Fan, S.K. Chou, Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management, *Appl. Energy* 113 (2014) 1786–1794.
- [18] A. Jarrett, I.Y. Kim, Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance, *J. Power Sources* 196 (23) (2011) 10359–10368.
- [19] T. Deng, Y. Ran, G. Zhang, Y. Yin, Novel leaf-like channels for cooling rectangular lithium ion batteries, *Appl. Therm. Eng.* 150 (2019) 1186–1196.
- [20] Q. Zhen, Y. Li, Z. Rao, Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling, *Energy Convers. Manage.* 126 (2016) 622–631.
- [21] Anthony JARRETT, I.Y. Kim, Influence of operating conditions on the optimum design of electric vehicle battery cooling plates, *J. Power Sources* 245 (2014) 644–655.
- [22] S. Panchal, R. Khasow, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, M. Fowler, Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery, *Appl. Therm. Eng.* 122 (2017) 80–90.
- [23] Y. Huo, Z. Rao, X. Liu, J. Zhao, Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate, *Energy Convers. Manage.* 89 (2015) 387–395.
- [24] C.R. Pals, Thermal modeling of the lithium/polymer battery, *J. Electrochem. Soc.* 142 (1994) 3274–3281.

یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- [25] J. Xun, R. Liu, K. Jiao, Numerical and analytical modeling of lithium ion battery thermal behaviors with different cooling designs, *J. Power Sources* 233 (2013) 47–61.
- [26] Y. Chen, J.W. Evans, Three-dimensional thermal modeling of lithium-polymer batteries under galvanostatic discharge and dynamic power profile, *J. Electrochem.*
- [27] U.S. Kim, C.B. Shin, C.S Kim, Modeling for the scale-up of a lithium-ion polymer battery, *J. Power Sources* 189 (1) (2009) 841–846.
- [28] A.A. Pesaran, M. Keyser, Thermal characteristics of selected EV and HEV batteries, *Conference on Applications & Advances*, 2001.
- [29] S.C. Chen, C.C. Wan, Y.Y Wang, Thermal analysis of lithium-ion batteries, *J. Power Sources* 140 (1996) 111–124.
- [30] Saw L.H., Poon H.M., Hui S.T., Cai Z., Chong W.T., Pambudi N.A., et al. Novel thermal management system using mist cooling for lithium-ion battery packs. 2018;223:146–58.
- [31] R.K. Shah, A.L. London, Laminar flow forced convection in ducts, *J. Fluids Eng.* 102 (2) (1978) 431–455.
- [32] Jiménez J.J., ARo F.M. Turbulent flows over rough walls. 2004;36:173–96.
- [33] A.A. Pesaran, M. Keyser, S.D Burch, An Approach for Designing Thermal Management Systems for Electric and Hybrid Vehicle Battery Packs, Office of Scientific Technical Information Technical Reports, 1999.
- [34] C. Zhu, L.I. Xinghu, L. Song, L Xiang, Development of a theoretically based thermal model for lithium ion battery pack, *J. Power Sources* 223 (2013) 155–164.
- [35] J.K. Min, C.H. Lee, Numerical study on the thermal management system of a molten sodium-sulfur battery module, *J. Power Sources* 210 (2012) 101–109.
- [36] Z. An, L. Jia, X. Li, Y Ding, Experimental investigation on lithium-ion battery thermal management based on flow boiling in mini-channel, *Appl. Therm. Eng.* 117 (2017) 534–543.
- [37] W. Tao, K.J. Tseng, J Zhao, Development of efficient air-cooling strategies for lithium- ion battery module based on empirical heat source model, *Appl. Therm. Eng.*