



بررسی خنک کاری انباره‌های لیتیوم-یون با نانوسیال‌های گوناگون

علی میرمحمدی^{۱*}، محمدرضا خواجه کولکی^۲

^۱ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، a.mirmohammadi@sru.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، mrkhajekoolaki@gmail.com

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۰ آذر ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

باتری

خنک سازی

تخلیه

نانوسیال

چکیده

در این مقاله، داغ شدن انباره‌های لیتیوم-یون در هنگام تخلیه به صورت تجربی و با شبیه‌سازی عددی بررسی شد و نحوه خنک کاری آنها با استفاده از نانوسیال‌های آب-آلومینا، آب-اکسید مس و آب-طلا با کمک شبیه‌سازی عددی مطالعه گردید. انباره مورد نظر با روش CFD شبیه‌سازی و خنک کاری آن با نانوسیالات در مقایسه با سیال آب و هوا انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از نانوسیال‌ها تأثیر بسیار زیادی در خنک کاری انباره‌ها دارد، به نحوی که در شرایط یکسان دمای مجموعه انباره‌ها با نرخ تخلیه ۵C و با استفاده از نانو سیال آب-آلومینا پس از ۳۰۰ ثانیه تخلیه به ۳۰۵,۳۱ کلوین رسید. همچنین دمای متوسط انباره‌ها در خنک کاری با نانوسیال آب-اکسید مس به ۳۰۷,۹ کلوین و نانو سیال آب-طلا به ۳۰۱,۱۴ کلوین رسید. درحالی که با استفاده از سیال هوا برای خنک کاری، دمای مجموعه حدود ۳۶۰ کلوین و با استفاده از سیال آب برای خنک کاری دمای متوسط انباره‌ها حدود ۳۱۳ کلوین محاسبه شد. نتایج این مقاله تأیید می‌کند که انباره‌های لیتیوم-یونی در دمای گرمتر از ۶۰ درجه سلسیوس خود به خود تخلیه می‌شوند. نتایج نشان داد که در روش خنک کاری با هوا، مقدار تخلیه انباره‌ها به ۶۱,۵٪ رسید و این در حالی است که با استفاده از سایر خنک‌کننده‌ها (آب، آب - اکسید مس و آب - آلومینا) این مقدار به ۵۷٪ و تحت خنک کاری با نوسیال آب-طلا به ۵۳٪ رسید.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

دمای مجموعه، توزیع دمای یکنواخت و یکسانی در داخل شبکه ایجاد می‌کند [۶].
در این پژوهش نیز استفاده از نانوسیال‌ها برای خنک‌کاری انباره‌های لیتیوم-یون مطالعه شده است.

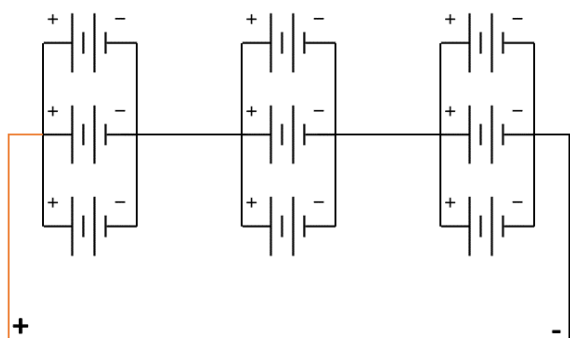
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ساختمان مجموعه انباره

مجموعه انباره نشان داده شده در شکل ۱ در این مقاله به صورت اندازه‌گیری تجربی و شبیه‌سازی عددی مطالعه می‌شود. این مجموعه از ۹ انباره یکسان تشکیل شده که در آن هر سه انباره با هم موازی و مجموعه با هم سری شده‌اند (شکل ۲). قسمت آبی رنگ نیز محل عبور سیال خنک‌کننده است.



شکل ۱: مجموعه انباره‌های بررسی شده



شکل ۲: شمای مجموعه انباره

ظرفیت هر کدام از انباره‌ها ۲۲۰۰mAh و ولتاژ آن ۳٫۷V است.

۲-۲- بررسی تجربی دمای انباره

برای اعتبار سنجی شبیه‌سازی، دمای یک نمونه انباره در حین تخلیه برای مدت ۳۰۰ ثانیه اندازه‌گیری شد (شکل ۳). برای اندازه‌گیری دما،

انباره‌های با فن‌آوری پیشرفته یک عنصر کلیدی در بسیاری از کاربردها مانند وسایل برقی، وسایل نقلیه برقی، سامانه‌های ماهواره، سامانه‌های قدرت و ربات‌ها هستند. انباره‌های لیتیوم-یون، در بین گزینه‌های مختلف با توجه به قیمت تمام شده ارزان‌تر، عمر طولانی‌تر و چگالی انرژی بیشتر، مورد توجه و استفاده بیشتری قرار گرفته‌اند، اما مشکلات گرمایی مربوط به این انباره‌ها استفاده از آن‌ها برای مصارف زیاد انرژی را با محدودیت‌هایی روبرو کرده است. استفاده از سامانه‌های خنک‌کننده مؤثر با کارایی خوب برای مدیریت گرمایی انباره‌ها از جمله بهترین راهکارهای مورد بررسی، مدنظر قرار گرفته است. روش‌های دیگری مانند استفاده از مواد تغییر دهنده حالت^۱ نیز می‌تواند مدیریت گرمایی انباره‌ها را انجام دهد و نتایج نشان می‌دهند که این مواد باعث کاهش وزن و هزینه این سامانه‌ها می‌شوند [۱].

نانوسیالات، سوسپانسیون‌هایی متشکل از نانو ذرات کروی یا لوله‌ای، در اندازه ۱-۱۰۰nm، در سیال‌های خنک‌کننده‌اند. بسته به نوع کاربرد، نانوذرات مختلفی مانند اکسیدهای سرامیکی (Al_2O_3, CuO)، نیتريدی‌های سرامیکی (ALN, NiN)، کاربیدهای سرامیکی (SiC, TiC)، نیمه هادی‌ها (TiO_2) و غیره ساخته می‌شوند [۲].

مفهوم نانو سیال به شکل جدیدی از محیط انتقال گرما اشاره دارد که از طریق معلق ساختن ذرات فلزی و غیر فلزی در مقیاس نانو در سیال پایه تولید می‌شوند. این ذرات به وسیله حرکت براونی پراکنده می‌شوند و زمانی که هیچ جریانی وجود نداشته باشد ذرات نانو از طریق تعادل بین حرکت شناوری و تلاطم گرمایی (حرکت براونی) پراکنده می‌شوند. سیالات حاوی ذرات جامد معلق فلزی یا اکسید فلزی دارای هدایت گرمایی بیشتری نسبت به سیالات خالص‌اند [۳].

رائو و نیومن با استفاده از قوانین برابری انرژی و تغییر آنتالپی سامانه، مقدار گرمای تولید شده در داخل شبکه‌ها را محاسبه کرده‌اند [۴]. ساتو با شبیه‌سازی ترمودینامیکی و مقایسه نتایج آن با مطالعات آزمایشگاهی به بررسی مقدار گرمای تولید شده در یک انباره پرداخته است [۵].

کیزیل و همکاران عملکرد دو سامانه مدیریت گرمایی مختلف را با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی^۲ مقایسه کرده‌اند. در یکی از سامانه‌ها، از یک ماده درحال تغییر حالت به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شده است در حالی که در دیگری هوا به صورت جابجایی اجباری و آزاد مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آنها نشان می‌دهد که برای مصارف زیاد انرژی ماده در حال تغییر حالت عملکرد بهتری نسبت به هوا نشان می‌دهد و علاوه بر مهار مناسب

¹ Phase Change Materials (PCM)

²Computational fluid dynamics

مطابق شکل ۵ پس از گذشت ۳۰۰ ثانیه دمای باتری از ۲۱٫۵۱ درجه سلسیوس به ۲۷٫۸۶ درجه سلسیوس می‌رسد.

۲-۳- معادلات حاکم

برای تحلیل عددی مجموعه انباره‌ها و خنک‌کننده باید معادلات پیوستگی، تکانه^۱، معادلات حاکم بر انباره [۷]، معادلات حاکم بر نانوسیال و معادله انرژی حل شوند.

۲-۳-۱- معادلات حاکم بر انباره

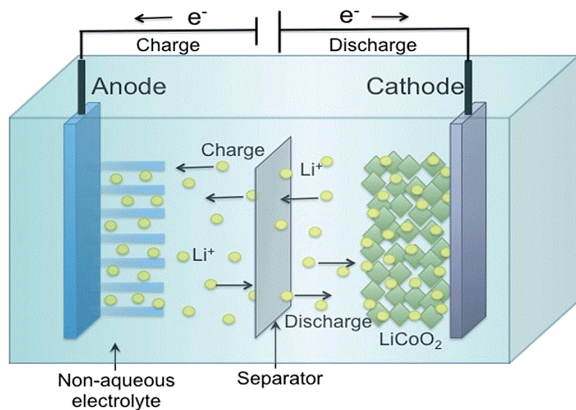
معادله ۱ معادله دیفرانسیلی انتقال گرمای هدایت سه بعدی است:

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{q} \quad (1)$$

که در آن λ ضریب انتقال گرمای هدایتی، C_p گرمای ویژه در فشار ثابت و ρ چگالی است. \dot{q} نیز نرخ گرمای تولید شده توسط انباره است که از معادله ۲ محاسبه می‌شود.

$$\dot{q} = \sigma_p |\nabla V_p|^2 + \sigma_n |\nabla V_n|^2 + \dot{q}_{ech} + \dot{q}_{short} \quad (2)$$

σ_p و σ_n به ترتیب رسانندگی برقی ($S \cdot m^{-1}$) الکترودهای مثبت و منفی انباره و V_p و V_n پتانسیل برقی (V) الکترودهای مثبت و منفی انباره است. جمله‌های اول و دوم معادله ۲ بیانگر گرمای ایجاد شده در دو الکتروده انباره و جمله‌های سوم و چهارم به ترتیب بیانگر گرمای ایجاد شده در اثر واکنش شیمیایی انباره و جریان اتصال کوتاه داخل انباره است. در حالت عادی یک انباره، الکترودهای مثبت و منفی توسط یک جداساز^۲ از هم تفکیک شده‌اند (شکل ۶). اگر به هر دلیلی جداساز آسیب ببیند موجب به وجود آمدن یک جریان اتصال کوتاه داخلی درون انباره می‌شود.



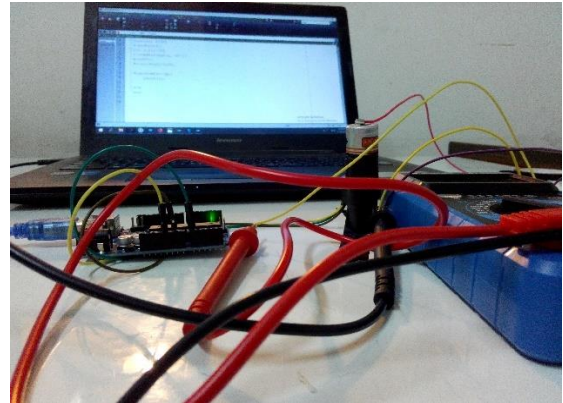
شکل ۶: شمای ساختار انباره لیتیوم-یون

مقدار چگالی جریان از معادله ۳ بدست می‌آید:

$$j_{short} = \frac{\alpha(V_p - V_n)}{r_c} \quad (3)$$

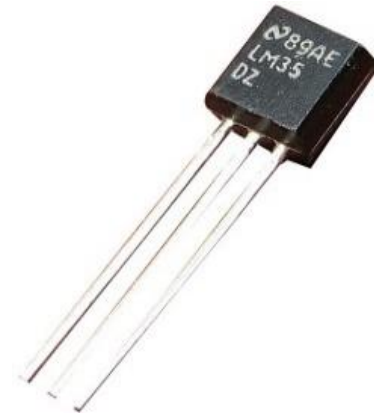
^۲Separator

از حسگر LM35 (شکل ۴) استفاده گردید و دمای انباره به صورت لحظه‌ای توسط نرم افزار متلب ثبت شد.



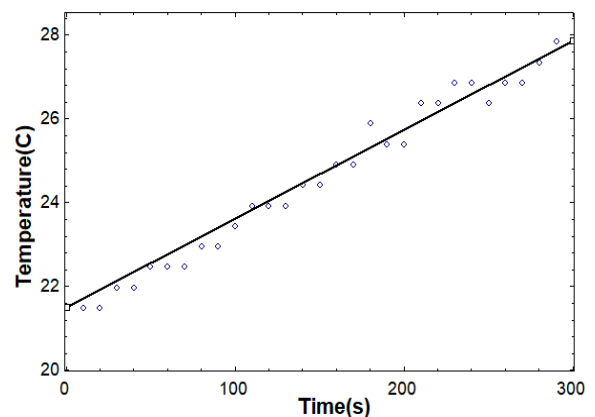
شکل ۳: اندازه‌گیری تجربی دمای انباره

از یک مقاومت ضعیف استفاده گردید تا جریان بیشتری از انباره تخلیه شود.



شکل ۴: حسگر دمای LM35

شکل ۵ نمودار دمای اندازه‌گیری شده به صورت تجربی بر حسب زمان را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمودار دمای اندازه‌گیری شده بر حسب زمان

^۱ Momentum

به سیال پایه را دارند. در این صورت، معادله پیوستگی به صورت معادله ۱۱ است.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (11)$$

که \vec{v}_m بردار سرعت نانو سیال بوده و از معادله ۱۲ بدست می آید:

$$\vec{v}_m = \sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k \vec{v}_k / \rho_m \quad (12)$$

زیر نویس k بیانگر جز k ام بوده و φ_k نیز غلظت حجمی حالت k ام است. همچنین ρ_m چگالی مخلوط بوده و از معادله ۱۳ بدست می آید:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k \quad (13)$$

ρ_k چگالی حالت k ام است.

معادله تکانه به صورت معادله ۱۴ است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \\ + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

μ_m گرانیوی مخلوط بوده و از معادله ۱۵ بدست می آید:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \varphi_k \mu_k \quad (15)$$

و $\vec{v}_{dr,k}$ بیانگر اختلاف سرعت حالت k ام از سرعت کل مخلوط است.

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (16)$$

معادله انرژی نیز به صورت معادله ۱۷ است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k E_k + \nabla \cdot \left[\sum_{k=1}^n \varphi_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p) \right] \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \end{aligned} \quad (17)$$

که در آن S_E گرمای تولیدی سامانه و k_{eff} ، ضریب انتقال گرمای هدایتی مؤثر است که از معادله ۱۸ به دست می آید:

$$k_{eff} = \sum_{k=1}^n \varphi_k (k_k + k_t) \quad (18)$$

k_t ، ضریب انتقال گرمای هدایتی در حالت آشفته است و E_k به صورت معادله ۱۹ است:

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (19)$$

که در آن α مساحت ویژه (m^2/m^3) ورقه الکتروود انباره و r_c مقاومت تماس سطح ($\Omega \cdot m^2$) است.

مقدار گرمای تولیدی با استفاده از معادله ۴ بدست می آید:

$$\dot{q}_{short} = \frac{\alpha (V_p - V_n)^2}{r_c} \quad (4)$$

همچنین برای گرمای تولید شده در اثر واکنش شیمیایی معادلات ۵ و ۶ ارائه شده است:

$$\dot{q}_{ech} = j_{ech} \left[U - (V_p - V_n) - T \frac{dU}{dt} \right] \quad (5)$$

$$j_{ech} = \alpha Y (U - V_p - V_n) \quad (6)$$

که U, Y از معادلات ۷، ۸ و ۹ به دست می آیند:

$$Y = \left[\sum_{i=0}^n a_i (DOD)^i \right] \exp \left[-c_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (7)$$

$$U = \left[\sum_{i=0}^n b_i (DOD)^i \right] - c_2 (T - T_{ref}) \quad (8)$$

$$DOD = \frac{VOL}{3600 Q_{Ah}} \left(\int_0^t j dt \right) \quad (9)$$

ضرایب معادلات Y, U در جدول ۱ آمده اند.

جدول ۱: ضرایب مورد نیاز معادلات Y, U

i	۰	۱	۲	۳
a_i	۴,۱۲	-۰,۸۰۴	۱,۰۷۵	-۱,۱۷۷
b_i	۱۱۶۸,۵۹	-۸۹۲۸	۵۲۵,۰۴۶	-۱۳۶۲۳۱
c_i	--	۱۸۰۰	-۰,۰۰۰۹۵	--
i	۴	۵		
a_i	.	.		
b_i	۱۵۸۵۳۱,۷	-۶۷۵۷۸,۵		

DOD مقدار تخلیه شدن انباره است (بطور مثال اگر انباره دارای ۷۰٪ شارژ باشد مقدار تخلیه آن برابر ۳۰٪ است).

$$DOD = 1 - SOC \quad (10)$$

SOC: مقدار شارژ انباره^۱.

DOD: مقدار تخلیه انباره^۲.

۲-۳-۲- معادلات حاکم بر نانو سیال

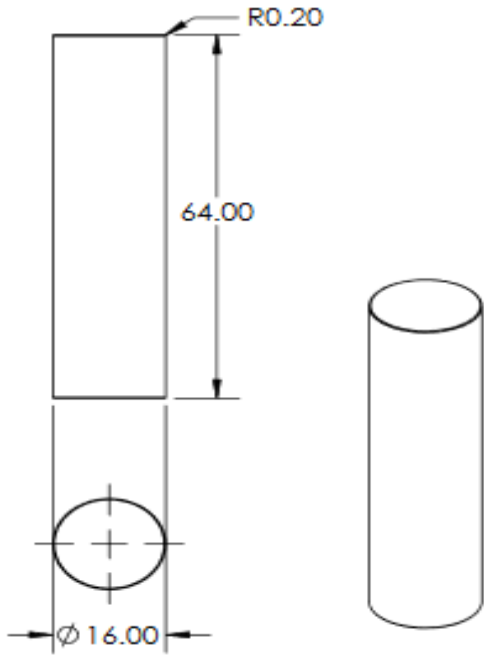
نانو سیال به عنوان یک سیال دوحالتی (مایع و جامد) فرض شده و در این حالت نانوذرات در اثر نیروهای وارد بر آن ها امکان لغزش نسبت

²Depth of Discharge

¹State of charge

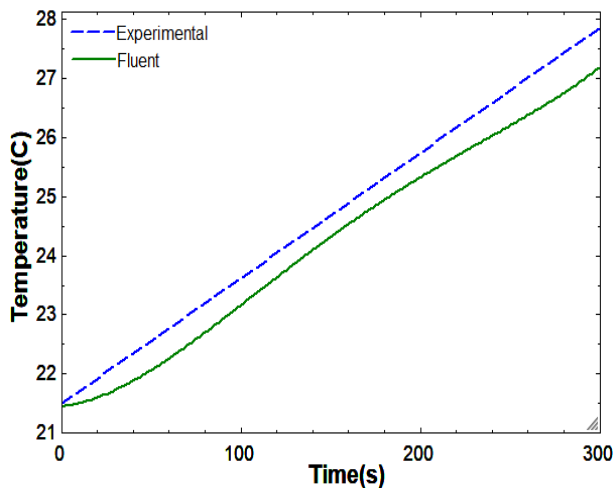
۲-۴- شبیه‌سازی انباره

برای شبیه‌سازی انباره مورد نظر، ابعاد انباره اندازه‌گیری و در نرم افزار سالدورکس طراحی و مونتاژ شد. شکل ۷ و ۸ به ترتیب قطب‌های مثبت و منفی انباره و شکل ۹ شمای بدنه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است ابعاد در واحد میلی‌متر است.



شکل ۹: جزئیات هندسی بدنه انباره

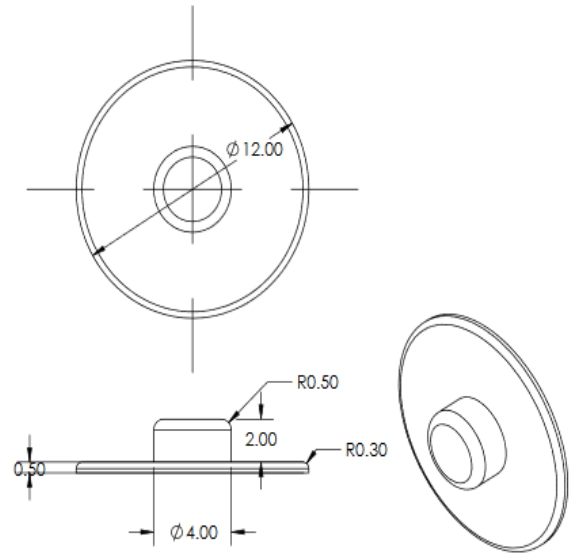
پس از طراحی انباره شبیه‌سازی آن در افزار فلونت انجام شد. مقدار شارژ اولیه انباره برابر ۸۰٪ در نظر گرفته شد و مقدار مرجع^۱ روی ۱۰۰ تنظیم گردید و تحت جریان ۳A انباره شروع به تخلیه شدن کرد. مقدار ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی بین انباره و محیط $5 \frac{W}{m^2k}$ در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۱۰ با حداکثر خطای ۱ درجه، شبیه‌سازی انباره در نرم افزار فلونت صورت گرفته است.



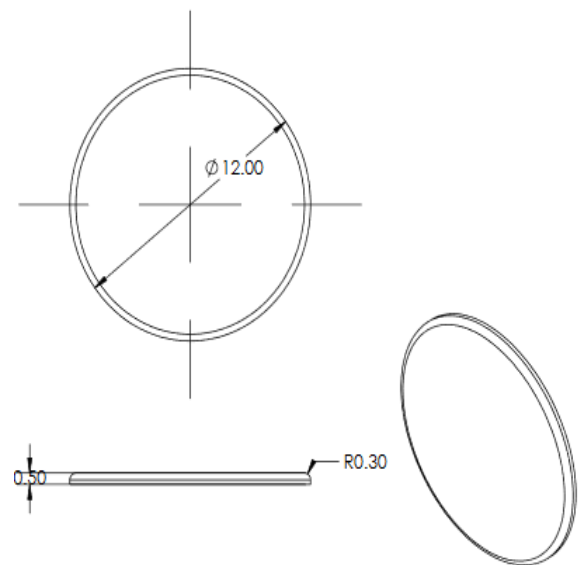
شکل ۱۰: نمودار مقایسه دمای اندازه‌گیری شده و دمای حاصل از شبیه‌سازی

۲-۵- شبیه‌سازی مجموعه انباره

مجموعه انباره شکل ۱۱ در نرم افزار فلونت شبیه‌سازی شد.



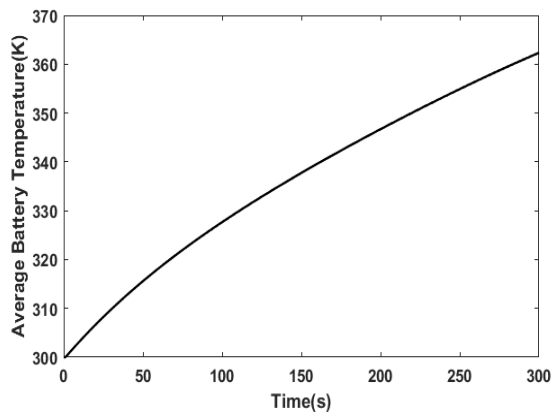
شکل ۷: جزئیات هندسی قطب مثبت انباره



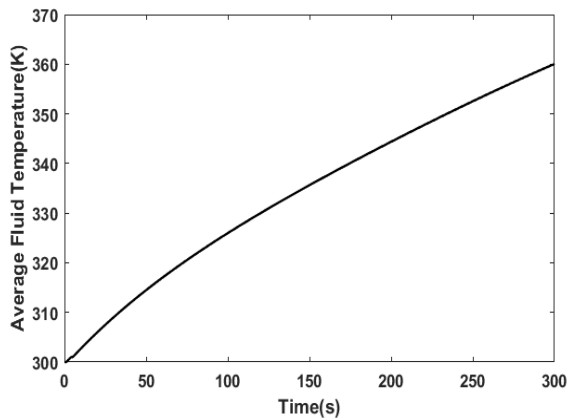
شکل ۸: جزئیات هندسی قطب منفی انباره

^۱ Reference Value

دمای سیال خروجی (هوا) در حدود ۶۰ درجه افزایش یافت.

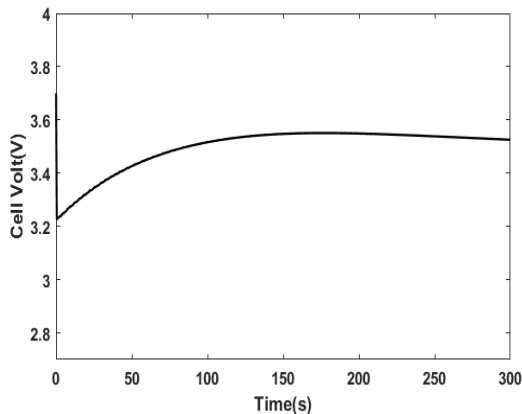


شکل ۱۳: نمودار دمای متوسط انبارها بر حسب زمان



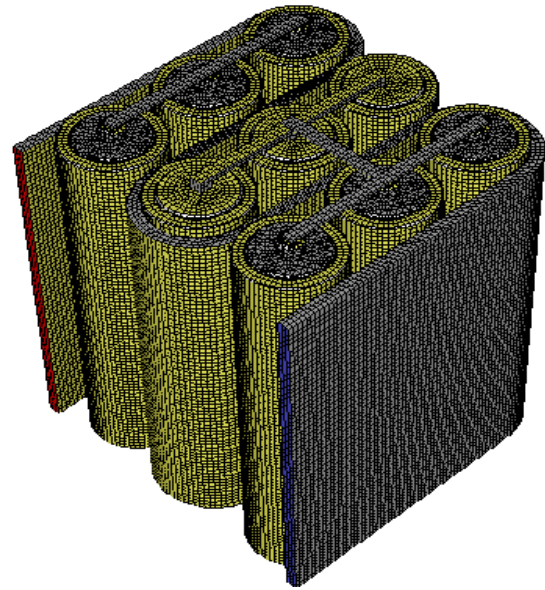
شکل ۱۴: دمای متوسط سیال خروجی (هوا) بر حسب زمان

شکل ۱۵ متوسط ولتاژ انبارها را در مدت تحلیل نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در ابتدا ولتاژ انبار کاهش یافته سپس افزایش می‌یابد و تقریباً در مقدار ۳٫۵۵ V ثابت می‌ماند. (ولتاژ نامی انبارها ۳٫۷ ولت در نظر گرفته شد.)



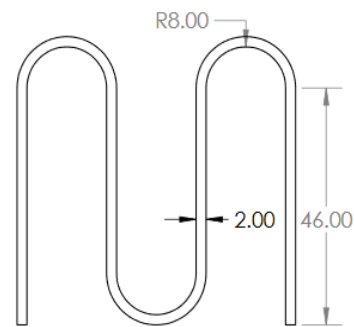
شکل ۱۵: متوسط ولتاژ انبارها بر حسب زمان

شکل ۱۶ توزیع دما را در لحظه ۳۰۰ ثانیه تحت سیال خنک‌کننده هوا نشان می‌دهد. بیشترین دما در این توزیع ۳۸۰ کلون است که



شکل ۱۱: هندسه شبکه‌بندی شده برای تحلیل

در این شبیه‌سازی از پنج سیال هوا، آب، نانوسیال آب-آلومینا، نانوسیال آب-اکسید مس و نانوسیال آب-طلا برای خنک‌کاری انبارها استفاده شده است. جریان سیال با سرعت ۰٫۱۵ متر در ثانیه و دمای ۳۰۰ درجه کلون وارد شده و به محیط (فشار نسبی صفر) تخلیه می‌گردد. هر کدام از انبارها با نرخ ۵C شروع به تخلیه می‌کنند. مقدار شارژ اولیه انبارها ۸۰ درصد در نظر گرفته شده و تحلیل برای مدت ۳۰۰ ثانیه صورت می‌گیرد. شکل ۱۲ نمای بالای مسیر عبور سیال خنک‌کننده را نشان می‌دهد.

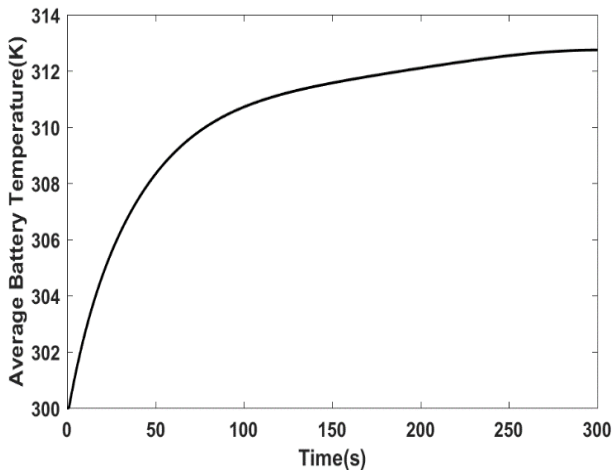


شکل ۱۲: نمای بالا از مسیر سیال خنک‌کننده (سیال از لوله‌ای با مقطع مستطیل در ابعاد ۶۰×۲ mm عبور می‌کند.)

۳- نتایج و بحث

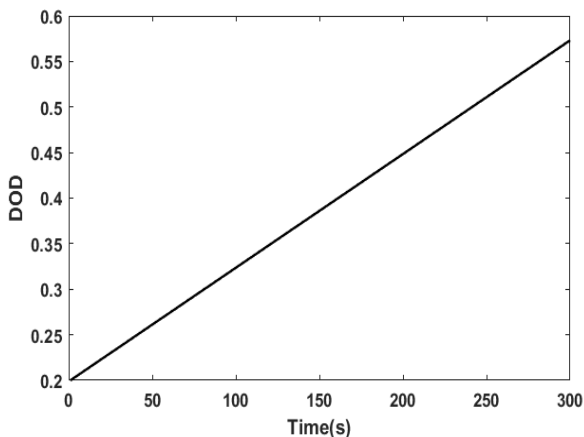
ابتدا وضعیت انبارها با سیال خنک‌کننده هوا بررسی می‌شود. مطابق شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از سیال خنک‌کننده هوا، میانگین دمای انبارها به شدت افزایش یافته به طوری که تنها پس از ۳۰۰ ثانیه، متوسط دما بیش از ۶۲ درجه افزایش می‌یابد. (بیشترین دمای انبار در این حالت ۳۷۲ کلون است.) همچنین شکل ۱۴ نشان می‌دهد

تحت سیال خنک کننده آب، بیشترین دمای انباره‌ها به ۳۲۱٫۷۹ کلوین می‌رسد.



شکل ۱۹: دمای متوسط انباره با سیال خنک کننده آب

شکل ۲۰ مقدار تخلیه انباره‌ها را تحت سیال خنک کننده آب نشان می‌دهد. نکته حائز اهمیت این است که در این حالت مقدار تخلیه انباره‌ها ۵۷٪ خواهد بود که نسبت سیال خنک کننده هوا ۴٫۵٪ ذخیره انرژی را در پی خواهد داشت. (دلیل مقدار تخلیه بیش از حد انباره‌ها تحت سیال خنک هوا این است که انباره‌های لیتیوم-یون در دمای بیش از ۶۰ درجه سلسیوس خودبه‌خود تخلیه می‌شوند.)

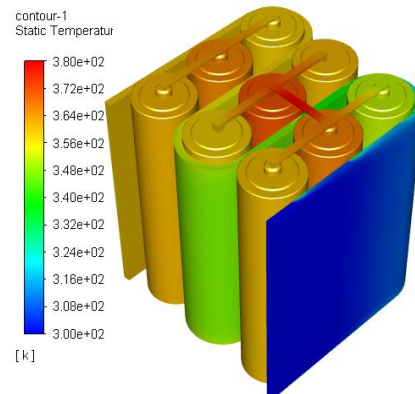


شکل ۲۰: مقدار تخلیه انباره بر حسب زمان

۳-۲- خنک کاری با نانو سیال

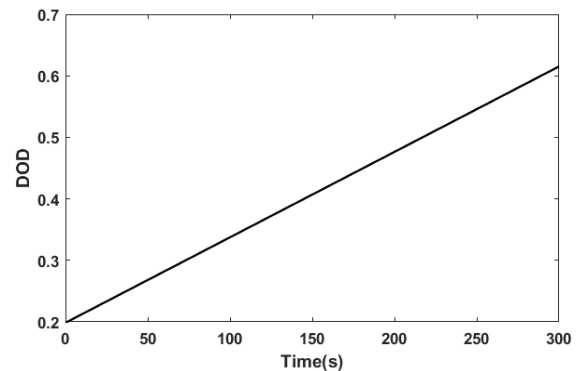
پس از بررسی خنک کاری انباره‌ها با آب و هوا، اثرات نانوسیال‌های آب-آلومینا، آب-اکسید مس و آب-طلا بررسی می‌شود. خواص نانوذرات ذکر شده در جدول ۲ آمده است.

مربوط به اتصالات بین انباره‌هاست.



شکل ۱۶: توزیع دما با سیال خنک کننده هوا

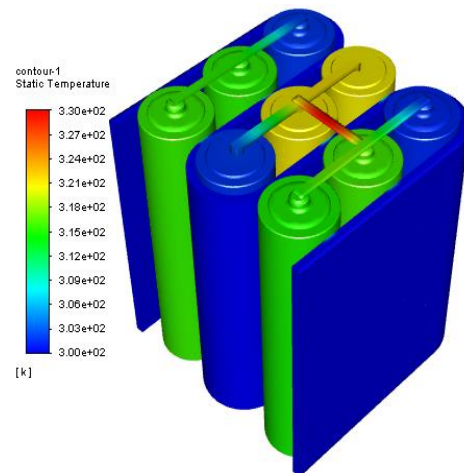
شکل ۱۷ مقدار تخلیه انباره‌ها را در مدت زمان تحلیل نشان می‌دهد. پس از ۳۰۰ ثانیه مقدار تخلیه انباره به ۶۱٫۵٪ می‌رسد.



شکل ۱۷: مقدار تخلیه انباره بر حسب زمان

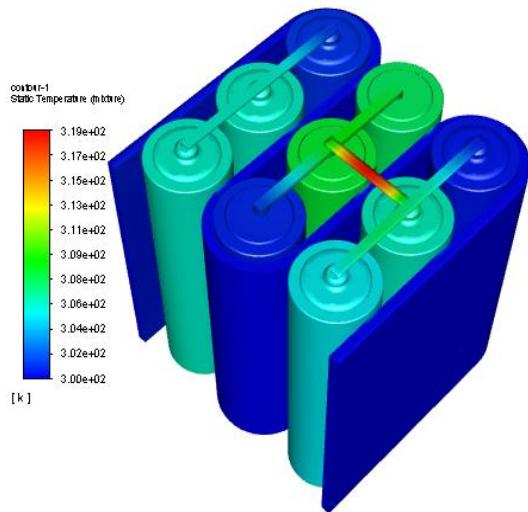
۳-۱- خنک کاری با آب

در ادامه سیال خنک کننده آب بررسی می‌شود. توزیع دما و همچنین دمای متوسط انباره‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که دمای متوسط انباره‌ها پس از ۳۰۰ ثانیه به ۳۱۲٫۷۴ کلوین می‌رسد.



شکل ۱۸: توزیع دما با سیال خنک کننده آب

آب-آلومینا در لحظه ۳۰۰ ثانیه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیشترین دما ۳۱۹ کلوین بوده و این دما مربوط به اتصالات بین انباره‌هاست (به علت جریان بالایی که از اتصالات بین انباره‌ها عبور می‌کند دمای آنها بیشتر از سایر نقاط افزایش یافته است).

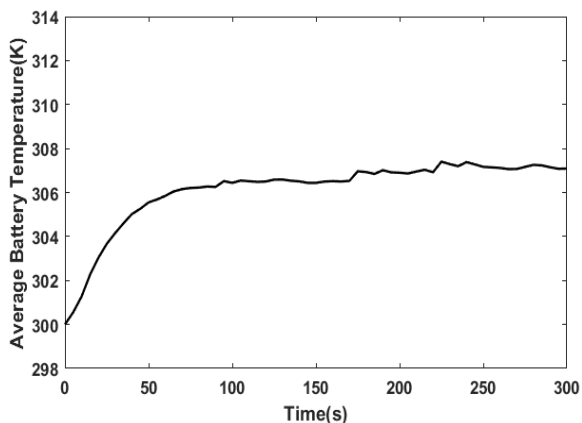


شکل ۲۳: توزیع دما با نانوسیال خنک‌کننده آب-آلومینا

ب) آب-اکسید مس (CuO)

پس از بررسی نانوسیال آب-آلومینا، نانوسیال آب-اکسید مس بررسی می‌شود. شرایط حاکم همانند حالت قبل است. (نانوسیال با سرعت ۰,۱۵ m/s و غلظت حجمی ۵٪ با دمای اولیه ۳۰۰ کلوین وارد می‌شود).

شکل ۲۴ نمودار تغییرات دمای انباره‌ها در گذر زمان تحت خنک‌کاری توسط آب-اکسید مس را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر این است که متوسط دمای انباره‌ها به ۳۰۷,۰۹ K می‌رسد.



شکل ۲۴: دمای متوسط مجموعه انباره‌ها تحت نانو سیال خنک‌کننده آب-اکسیدمس

شکل ۲۵ مقدار تخلیه انباره‌ها را تحت نانو سیال خنک‌کننده آب-اکسید مس نشان می‌دهد. در این حالت مقدار تخلیه انباره‌ها به ۵۷٪ رسید.

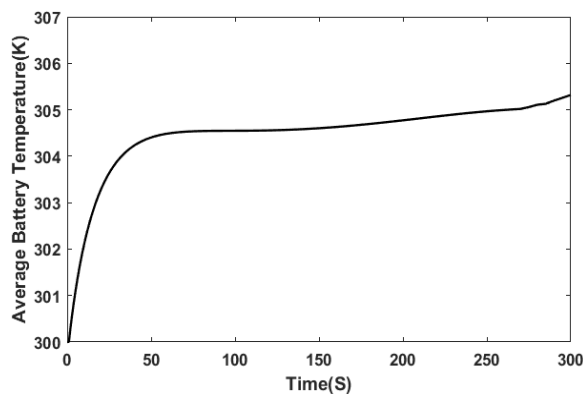
جدول ۲: خواص نانوذرات مورد استفاده

سیال/جامد	$K \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	$C_p \left(\frac{J}{Kg \cdot K} \right)$	$\mu \left(\frac{Kg}{m \cdot s} \right)$	$\rho \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$
Al_2O_3	۳۰	۸۵۰	---	۳۹۶۰
CuO	۱۸	۵۴۰	---	۳۹۶۰
Au	۲۹۷,۷۳	۱۲۹,۸۱	---	۱۹۳۲۰
$Water$	۶	۴۱۸۲	۰,۰۰۱۰۰۳	۹۹۸,۲

قطر نانو ذرات ۴۰nm در نظر گرفته شده و غلظت حجمی آنها ۵٪ انتخاب شده است.

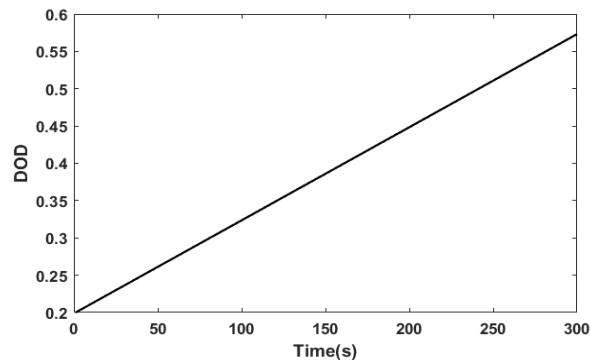
الف) آب-آلومینا (Al_2O_3)

نمودار شکل ۲۱ دمای متوسط انباره‌ها را در گذر زمان نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که متوسط دمای انباره‌ها به ۳۰۵,۳۲ کلوین می‌رسد. مشاهده می‌شود، بیشترین دمای انباره‌ها به ۳۰۹,۳۵ کلوین رسیده است.



شکل ۲۱: دمای متوسط مجموعه انباره‌ها تحت خنک‌کننده نانو سیال آب-آلومینا

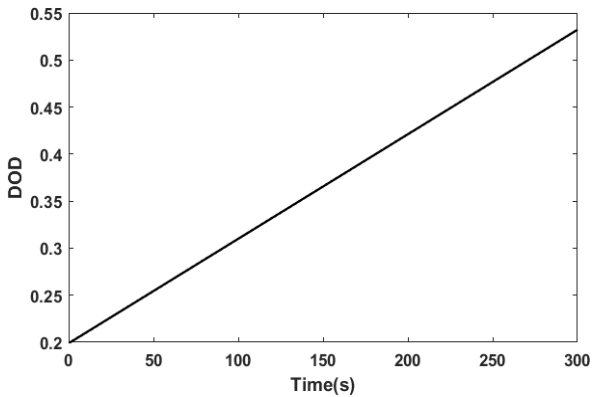
شکل ۲۲ مقدار تخلیه انباره‌ها را تحت نانو سیال خنک‌کننده آب-آلومینا نشان می‌دهد. در این حالت مقدار تخلیه انباره‌ها به ۵۷٪ رسید.



شکل ۲۲: مقدار تخلیه انباره بر حسب زمان

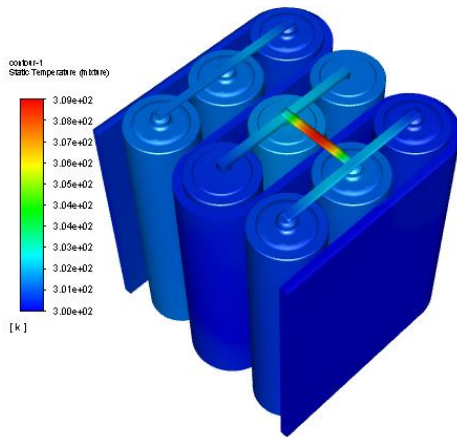
شکل ۲۳ توزیع دمای مجموعه انباره‌ها را تحت نانو سیال خنک‌کننده

شکل ۲۸ مقدار تخلیه انبارها در گذر زمان را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود مقدار تخلیه انبارها در این حالت ۵۳٪ است.

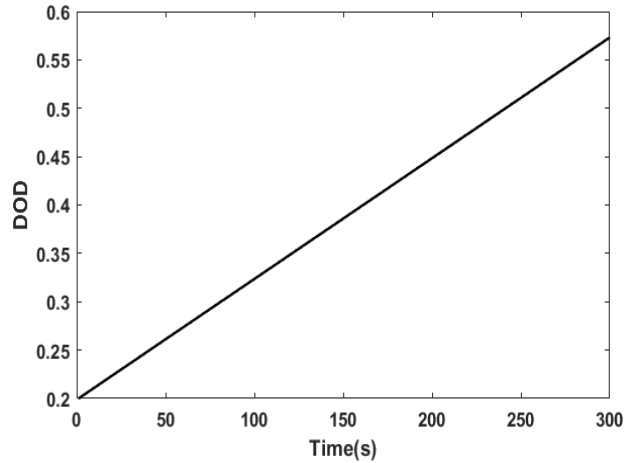


شکل ۲۸: مقدار تخلیه انبار بر حسب زمان

شکل ۲۹ توزیع دمای مجموعه انبارها را تحت سیال خنک کننده آب- طلا در لحظه ۳۰۰ ثانیه نشان می دهد. مشاهده می شود که بیشترین دما ۳۰۱٫۹ کلوین است و این دما مربوط به اتصالات بین انبارهاست.

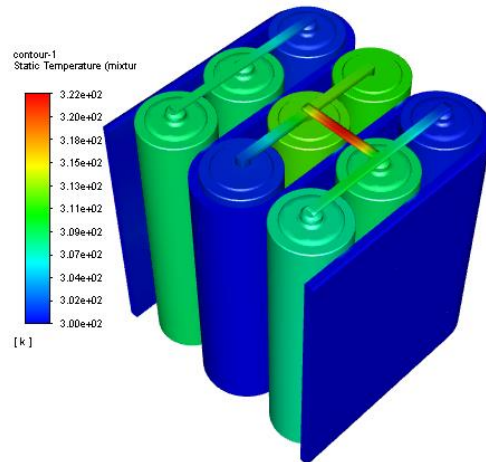


شکل ۲۹: توزیع دما با نانوسیال آب-طلا



شکل ۲۵: مقدار تخلیه انبار بر حسب زمان

شکل ۲۶ توزیع دمای مجموعه انبارها را تحت سیال خنک کننده آب-اکسید مس در لحظه ۳۰۰ ثانیه نشان می دهد. مشاهده می شود که بیشترین دما ۳۱۲٫۸ کلوین بوده و این دما مربوط به اتصالات بین انبارهاست.



شکل ۲۶: توزیع دما با نانوسیال خنک کننده آب-اکسید مس

۴- نتیجه گیری

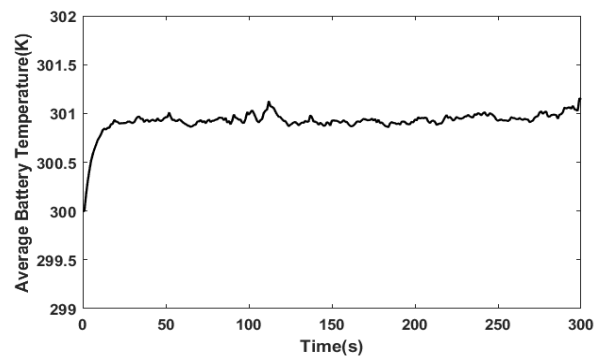
خنک کاری انبارهای لیتیوم- یون با استفاده از نانوسیالات مختلف و همچنین مقایسه دمای انبارها با حالتی که انبارها توسط آب و یا هوا خنک کاری شوند، انجام شد. جمع بندی نتایج تحلیل در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: نتایج

نام سیال خنک کننده	دما متوسط انبار	بیشینه دمای انبار
هوا	۳۶۰٫۵۳۸	۳۷۱٫۸۹۷۸
آب	۳۱۲٫۷۴۱۵	۳۲۱٫۷۸۸۶
نانو سیال آلومینا	۳۰۵٫۳۱۷۱	۳۰۹٫۱۵۱۱
نانوسیال اکسید مس	۳۰۷٫۰۹	۳۱۲٫۸۰۴۴
نانوسیال طلا	۳۰۱٫۱۴۴۲	۳۰۱٫۹۷۹۶

ج) آب-طلا (Au)

شکل ۲۷ نمودار خنک کاری انبارها با نانوسیال آب-طلا را نشان می دهد. مشاهده می شود که با استفاده از این نانو سیال دمای مجموعه انبارها پس از ۳۰۰ ثانیه به ۳۰۱٫۱۴ کلوین رسیده است.



شکل ۲۷: متوسط دمای مجموعه انبار تحت نانو سیال آب-طلا

- [4] L. Rao and J. Newman, "Heat-Generation Rate and General Energy Balance for Insertion Battery Systems," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 144, pp. 2697-2704, 1997.
- [5] N. Sato, "Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles," *Journal of power sources*, vol. 99, pp. 70-77, 2001.
- [6] R. Kizilel, R. Sabbah, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs," *Journal of Power Sources*, vol. 194, pp. 1105-1112, 2009.
- [7] Zheng, Jieqing, et al. "Transient Thermal Behavior of Internal Short-circuit in Lithium Iron Phosphate Battery." *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTROCHEMICAL SCIENCE* 13. 12 (2018): 11620-11635.
- [8] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, pp. 146-175, Clarendon press, 1881.
- [9] B. C. Pak, Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer an International Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, 1998
- [10] A. Einstein, Eine neue bestimmung der moleküldimensionen, *Annalen derPhysi k*, Vol. 324, No. 2, pp. 289-306, 1906.
- [11] Zoubida Haddad, Hakan F. Oztop, Eiyad Abu-Nada, Amina Mataoui, A review on natural convective heat transfer of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012, Volume 12, Issue 7, pp 5363-53.

خنک کاری انبارها علاوه بر اینکه عمر بهینه انبار را افزایش می دهد، از تخلیه خود به خودی انبار نیز جلوگیری می کند. زمانی که انبارها توسط هوا خنک می شوند مقدار تخلیه آنها به ۶۱٫۵٪ می رسد این در حالی است که با استفاده از نانوسیال آلومینا، اکسید مس و حتی آب این مقدار تخلیه به ۵۷٪ خواهد رسید و با استفاده از نانوسیال طلا این مقدار به ۵۳٪ خواهد رسید. بنابراین با استفاده از نانوسیال آب-طلا بیش از ۸٪ انرژی انبار ذخیره شده و از اتلاف آن جلوگیری می شود.

نانوسیالها به علت داشتن ضریب انتقال گرمای بالا، گزینه بسیار مناسبی برای خنک کاری انبارهای لیتیوم-یون هستند. نتایج این مقاله نشان داد که نانو سیالها علاوه بر اینکه دمای مجموعه را تا حد زیادی پایین نگه می دارند، دمای خودشان نیز به مقدار ناچیز افزایش می باید (به علت بالا بودن گرمای ویژه سیال پایه). لذا از نظر مقدار انتقال گرما، برتری نانوسیالها بر سایر سیالهای خنک کننده مشهود است.

مراجع و منابع

- [1] Z. Bin, Voltage Characteristics of Li-Ion Power Battery for EVs, *Chinese Battery Industry*, Vol. 11, No. 2, 7889, pp. 890-18127889.
- [2] Lazarus Godson. B. Raja, D. Mohan Lal, and S. Wongwises, "Enhancement of heat transfer using nanofluids An overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 629-641, 2010.
- [3] Y. Xuan and Q. Li. "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids" *Journal of Heat Transfer*. Vol. 125. pp. 151-155. 2003.



Studying lithium-ion battery packs cooling system using water-nanofluids composition

A. Mirmohammadi^{1*}, M. Khajekoolaki²

¹ Faculty of Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, a.mirmohammadi@sru.ac.ir

² BSc Candidate, Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, mrkhajekoolaki@gmail.com

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 01 December 2019

Accepted: 18 February 2020

Keywords:

Battery

Cooling

Discharge

Nanofluids

ABSTRACT

In this study, the Li-ion batteries temperature increase during the discharge process was measured empirically and evaluated using numerical simulation. Moreover, the battery packs cooling using the water, air and water-nano composition fluids such as water-alumina, water-copper oxide, and water-gold was studied through numerical simulation. Accordingly, the battery cooling was simulated by CFD method and the results were compared with water and air coolants. The results indicated the significant effect of nanofluid on the battery packs cooling under the same conditions. The batteries mean temperature with 5C discharge rate with the cooling process with water-alumina was decreased to 305.31 K after 300-sec discharge (Initial temperature: 300 K). The mean temperature of batteries under the cooling process with water-copper oxide and water-gold nanofluid was decreased to 307.09 and 301.14 K, respectively. However, the temperature of the battery packs was respectively decreased to 362 and 313 K using air and water-fluid cooling. Another important point is that lithium-ion batteries are subject to spontaneous discharge at 60%, which confirms the results of the present research. In air cooling method, the discharge rate of batteries reached 61.5%, while other nanofluids (water, water-copper oxide, and water-alumina) decreased the discharge rate by 57% and water-gold nanofluid dropped the discharge rate to 53%.

