نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۹، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص: ۱- ۲۱

J. Energy Conversion
Volume: 9, Issue: 3, 2022: 1-21

DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6

طراحی حرارتی و شبیه سازی صفحه سرد مینی کانال برای باتری لیتیوم یون منشوری با اندازه بزرگ آب خنک

علی معتضدیان [۱]، مصطفی امیدی بیدگلی [۲و*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی خودرو، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران.
alimotazedyan@gmail.com
۲*- استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد بادرود، دانشگاه آزاد اسلامی، بادرود، ایران. mostafaomidibidgoli@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۸، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۲

چکیده

برقی‌سازی خودروها به‌عنوان یک جایگزین بالقوه برای کاهش شدت کربن در حمل‌ونقل ترویج می‌شود. باتری‌های لیتیوم یونی برای وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی (HEV) و وسایل نقلیه الکتریکی خالص (EVs) مناسب هستند و کنترل دما در باتری‌های لیتیومی برای عملکرد و دوام طولانی‌مدت حیاتی است. متاسفانه، مدیریت حرارتی باتری (BTM) تا حدی به دلیل درک ضعیف رفتار حرارتی باتری مورد توجه قرار نگرفته است. عملکرد سلول به طور چشمگیری با دما تغییر می کند، اما اگر یک پنجره دمای عملیاتی مناسب حفظ شود، با دما بهبود می یابد. این مقاله مروری بر دو جنبه ارائه می‌کند که عبارتند از توسعه مدل حرارتی باتری و استراتژی‌های مدیریت حرارتی. اثرات حرارتی باتری‌های لیتیوم یونی از نظر فرار حرارتی و پاسخ در دماهای سرد مورد مطالعه قرار می‌گیرد و روش‌های تولید گرما با هدف انجام تحلیل حرارتی باتری دقیق مورد بحث قرار می‌گیرد. علاوه بر این، استراتژی‌های فعلی BTM که توسط تامین‌کنندگان خودرو استفاده می‌شود، برای شناسایی چالش‌های تحمیلی و شکاف‌های مهم بین تحقیق و عمل بازنگری خواهد شد. بهینه سازی BTM های موجود و کاوش فناوری های جدید برای کاهش اثرات حرارتی باتری مورد نیاز است، و تلاش ها در اولویت بندی BTM باید برای بهبود یکنواختی دما در سراسر بسته باتری، افزایش طول عمر باتری و افزایش ایمنی بسته های بزرگ انجام شود. بر اساس مدل جفت شده یک مدل حرارتی سه بعدی ، رفتارهای حرارتی باتری لیتیوم-یونی تحت چرخه دشارژ-شارژ با جریان های مختلف بررسی شده است.

* **عهده‌دار مکاتبات:** mostafaomidibidgoli@gmail.com

کلمات کلیدی: شبیه سازی حرارتی ، صفحه سرد مینی کانال، باتری لیتیوم.

۱- مقدمه

باتری‌های لیتیوم یون[1] به دلیل راندمان بالا، هزینه کم، ظرفیت بالا، کمبود اثر حافظه و عمر چرخه طولانی، به وسیله اصلی ذخیره‌سازی انرژی برای محصولات خورشیدی خارج از شبکه تبدیل شده‌اند. لیتیوم یون یک فناوری در حال تکامل است که

[1] Li-ion

نحوه استناد به این مقاله: علی معتضدیان، مصطفی امیدی بیدگلی. طراحی حرارتی و شبیه سازی صفحه سرد مینی کانال برای باتری لیتیوم یون منشوری با اندازه بزرگ آب خنک. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۱; ۹ (۳) : ۱-۲۱.
DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

اولین بار در اوایل دهه ۱۹۹۰ به بازار عرضه شد و کار تحقیق و توسعه برای بهبود ایمنی، افزایش عملکرد و افزایش طول عمر ادامه دارد. باتری های لیتیوم یون دارای ویژگی های بسیاری هستند که برای استفاده در برنامه های خارج از شبکه بسیار مناسب هستند. آنها عمر چرخه ای طولانی دارند و از سرعت تخلیه خود و اثر حافظه بالای باتری های نیکل کادمیوم و نیکل فلز هیدرید رنج نمی برند. راندمان شارژ باتری های لیتیوم یون تا ۹۹٪ است.

سیستم های لیتیوم یونی باید به درستی طراحی شوند تا عملکرد خوبی داشته باشند و از خطرات ایمنی جدی که می تواند ناشی از سوء استفاده از سلول باتری و عملکرد نامناسب باشد جلوگیری شود. شارژ بیش از حد، گرم شدن بیش از حد، اتصال کوتاه یا آسیب رساندن به باتری لیتیوم یون شارژ شده می تواند منجر به آتش سوزی یا انفجار شود. طراحی و آزمایش مناسب می تواند از این خطرات جلوگیری کند و ایمنی، عملکرد بالا و عملکرد طولانی مدت محصولات خارج از شبکه را تضمین کند.

در مقایسه با سایر باتری‌های رایج، باتری‌های لیتیوم یون دارای چگالی انرژی بالا، چگالی توان بالا، عمر طولانی و سازگاری با محیط زیست هستند و بنابراین کاربرد گسترده‌ای در زمینه لوازم الکترونیکی مصرفی پیدا کرده‌اند. با این حال، باتری‌های لیتیوم یونی برای وسایل نقلیه دارای ظرفیت بالا و اعداد سریال موازی زیادی هستند که همراه با مشکلاتی مانند ایمنی، دوام، یکنواختی و هزینه، محدودیت‌هایی را بر کاربرد گسترده باتری‌های لیتیوم یونی در خودرو تحمیل می‌کند. منطقه باریکی که در آن باتری‌های لیتیوم یونی با ایمنی و قابلیت اطمینان کار می‌کنند، کنترل و مدیریت مؤثر سیستم مدیریت باتری را ضروری می‌سازد. این مقاله حاضر، از طریق تجزیه و تحلیل ادبیات و در ترکیب با تجربیات عملی ما، به معرفی مختصری از ترکیب سیستم مدیریت باتری (BMS) و مسائل کلیدی آن مانند اندازه‌گیری ولتاژ سلول باتری، تخمین وضعیت باتری، یکنواختی باتری و یکسان سازی، تشخیص عیب باتری و غیره، به امید ارائه برخی الهامات برای طراحی و تحقیق سیستم مدیریت باتری.

۱-۱ اصول باتری لیتیوم یون

تمام سلول‌های باتری دارای پایانه‌های مثبت و منفی هستند و اینها به الکترودهای داخلی (ساختارهای شیمیایی فیزیکی) متصل می‌شوند که انرژی الکتروشیمیایی را ذخیره و آزاد می‌کنند که برای هدایت بار الکتریکی خارجی استفاده می‌شود. باتری‌های لیتیوم یونی از فرآیندی به نام درون یابی استفاده می‌کنند که در آن یون‌های لیتیوم در ساختار مواد الکترود گنجانده می‌شوند. در داخل سلول، یون های لیتیوم در هنگام شارژ از الکترود مثبت به الکترود منفی و با تخلیه باتری از الکترود منفی به مثبت حرکت می کنند. الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی در همان جهتی حرکت می‌کنند که یون‌های لیتیوم توسط یک شارژر خارجی (هنگام شارژ) یا توسط انرژی شیمیایی بالقوه ذخیره‌شده (قابل انتقال بار) در هنگام تخلیه باتری هدایت می‌شوند.

اصطلاح "باتری لیتیوم یون" به یک خانواده بزرگ و متنوع از ترکیبات شیمیایی مختلف باتری، عوامل شکل، اندازه ها و ساختار سلولی اشاره دارد. در سطح پایه، تمام سلول های باتری لیتیوم یون دارای سه لایه کاربردی هستند: الکترود مثبت (کاتد)، الکترود منفی (آند)، و جداکننده. جداکننده معمولاً یک غشای پلیمری اشباع شده با یک الکترولیت مایع است که انتقال یون لیتیوم را امکان پذیر می کند اما از تماس مستقیم بین الکترودها جلوگیری می کند. این لایه‌های نازک یا نورد می‌شوند یا روی هم چیده می‌شوند تا سطح مؤثر ذخیره‌سازی انرژی را افزایش دهند، و سپس در محفظه سلول بیرونی بسته‌بندی می‌شوند .

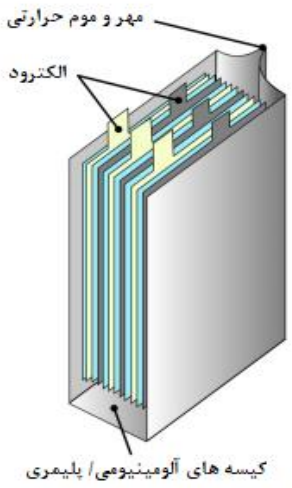
- **سلول های منشوری**

سلول های منشوری از یک محفظه مستطیلی مسطح برای کاهش ضخامت کلی سلول استفاده می کنند(شکل۱). مجموعه الکترود/جداکننده می‌تواند مانند سلول‌های استوانه‌ای نورد شود، یا می‌تواند یک پشته مستطیلی از الکترودهای منفرد (شبیه به یک دسته کارت) باشد. پایانه های باتری را می توان به عنوان پدهای تماسی در قسمت بالایی یا کناری محفظه قرار داد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

فاکتور شکل نازک سلول منشوری برای استفاده در لوازم الکترونیکی مصرفی مناسب است، به ویژه زمانی که سهولت تعویض باتری مطلوب است.



شکل ۱ : سلول منشوری

افزایش آگاهی از کیفیت هوا و علاقه به وسایل نقلیه نوآورانه باعث تحریک فعالیت های تحقیقاتی برای بهبود سیستم های محرکه با کاهش انتشار گازهای گلخانه ای می شود. وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی[۱] به عنوان نزدیکترین گام اول اجباری برای کاهش آلاینده ها و همچنین مصرف سوخت ظاهر می شوند. در واقع وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی سهم عادلانه خود را از توجه خودروسازان در سراسر جهان و غیره به خود جلب کرده اند . وسیله نقلیه الکتریکی هیبریدی وسیله نقلیه ای است که دارای دو یا چند منبع انرژی است، اما در استفاده رایج وسیله نقلیه الکتریکی هیبریدی به این معنی است که وسیله نقلیه دارای یک نیروی محرکه به دلیل یک موتور احتراق داخلی[۲] و یک ماشین الکتریکی است، در حالی که منبع انرژی سوخت و باتری است. وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی می توانند با ترکیب مواد احتراق با چگالی انرژی بالا و راندمان بالای سیستم های محرک الکتریکی به عملکرد بالایی دست یابند. علاوه بر این، گشتاور تولید شده توسط موتور الکتریکی خودرو را می توان به طور مناسب کنترل کرد تا پایداری و ایمنی خودرو تا حد زیادی بهبود یابد.

اکنون امیدوارکننده‌ترین فناوری باتری برای تامین انرژی این خودروها باتری لیتیوم یونی است، اگرچه نیکل متال هیدرید[۳] بیشترین استفاده را در کاربردهای تجاری دارد اما هزینه بالای آن هنوز یک نقطه ضعف است.

برای کاهش مسائل زیست محیطی، صنعت خودرو مجبور شده است به سمت وسایل نقلیه پایدار مانند وسایل نقلیه الکتریکی[۴]، وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی، خودروهای الکتریکی هیبریدی پلاگین[۵] و خودروهای سلول سوختی[۶] حرکت کند. در روزگار کنونی، باتری‌های لیتیوم یونی پیشرفته‌ترین فناوری باتری هستند که در تولید خودروهای الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند[۳۹] . کاربرد گسترده آنها به دلیل موارد زیر است: (۱) چگالی انرژی و توان ویژه بالا[۴۱-۴۰] ; (۲) ولتاژ اسمی بالا و نرخ خود تخلیه پایین[۴۲] و (۳) چرخه عمر طولانی و بدون اثر حافظه برای افزایش عمر[۴۳] .

---

۲ HEVs
۳ ICE
۴ NiMH
۵ EVs
۶ PHEVs
۷ FCVs

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

باطری‌ها، در هنگام تخلیه و شارژ باید اقدامات احتیاطی انجام شود، زیرا بیش از حد مجاز ولتاژ، جریان یا قدرت ممکن است منجر به آسیب سلول باتری شود. احتمال فرار حرارتی نیز در صورت عدم مراقبت مناسب رخ می دهد [۴۴]. علاوه بر این، باتری‌های پلیمری لیتیوم یون باید به دقت کنترل و مدیریت شوند (الکتریکی و حرارتی) تا از مسائل مربوط به ایمنی و عملکرد جلوگیری شود[۴۴و۴۷].

عملکرد بهینه باتری‌های لیتیوم یون، هم از نظر کارایی و هم از نظر عمر، به شدت به مدیریت حرارتی آنها بستگی دارد.

این مقاله یک مطالعه مقایسه ای از توزیع دما و سرعت در صفحات سرد مینی کانال قرار داده شده بر روی یک سلول باتری لیتیوم یون منشوری با استفاده از تجربی و عددی ارائه کرده است. تکنیک این مطالعه[۳۰-۲۹] برای روش‌های خنک‌سازی آب در نرخ‌های تخلیه ۱ و ۲ درجه سانتی‌گراد و دماهای عملیاتی مختلف ۵ درجه سانتی‌گراد، ۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در مجموع از نوزده ترموکوپل برای این کار آزمایشی استفاده شد و به طور هدفمند در مکان‌های مختلف قرار گرفتند. از ۱۹ عدد، ده ترموکوپل نوع T بر روی سطح اصلی باتری قرار داده شد و چهار ترموکوپل نوع K استفاده شد. برای اندازه گیری دمای ورودی و خروجی آب از نظر محاسباتی از مدل k-ε درنرم افزار انسیس فلوئنت[۱] استفاده شد.

برای شبیه‌سازی جریان در یک صفحه سرد مینی کانال، و داده‌ها با داده‌های تجربی برای پروفایل‌های دما اعتبارسنجی شدند. نتایج حاضر نشان می دهد که افزایش نرخ تخلیه و افزایش دمای عملیاتی منجر به افزایش دمای صفحات سرد می شود. علاوه بر این، سنسورهای ترموکوپل نزدیک به الکترودها (آند و کاتد) دمای بالاتری را نسبت به سنسورهای واقع در مرکز سطح باتری اندازه‌گیری کردند.

یک سیستم مدیریت حرارتی باتری[۲] به منظور تضمین عملکرد مطلوب یک باتری یا بسته باتری در یک محیط با دمای پایین و طول عمر مطلوب در یک محیط با دمای بالا مورد نیاز اس . علاوه بر این، دما، که یک عامل مهم است، [۵-۴] بر چندین جنبه از باتری لیتیوم یون، از جمله رفتارهای حرارتی و الکتروشیمیایی، و در نهایت عملکرد و هزینه عمر چرخه تأثیر می گذارد . محدوده معمول دما بین ۲۰ درجه سانتیگراد و۴۰ درجه سانتیگراد ، و یک محدوده طولانی بین ۱۰ درجه سانتیگراد و۵۰+ درجه سانتیگراد برای عملکرد مجاز برای باتری های لیتیوم یون. روش های مختلفی برای مدیریت حرارتی باتری وجود دارد که عبارتند از: (۱) خنک کننده هوا، (۲) خنک کننده آب، و (۳) مواد تغییر فاز[۳]. خنک کننده هوا به دلیل سادگی و وزن کم، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. [۲-۱] خنک‌سازی با آب به دلیل توانایی آن در جذب گرمای بیشتر در مقایسه با خنک‌کننده هوا، روش کارآمدتر است و حجم کمتری را اشغال می‌کند، اما پیچیدگی‌های بیشتر و همچنین هزینه و وزن بالا را به همراه دارد . علاوه بر این، به دلیل هدایت حرارتی کم هوا ، سرعت هوای بالاتری برای تأمین خنک‌سازی کافی باتری‌های لیتیوم یونی با استفاده از روش‌های خنک‌سازی فعال مورد نیاز است[۳] . از سوی دیگر، خنک کننده مایع به دلیل رسانایی حرارتی بالا، خنک کننده بهتری نسبت به خنک کننده هوا می دهد.

در این تحقیق جریان داخل صفحات سرد متلاطم بوده و بنابراین برای مدل آشفتگی از نرم افزار انسیس فلوئنت استفاده شده است. عدد رینولدز برای تعیین رژیم جریان (آهسته یا آشفته) استفاده می شود و همانطور که در معادله (۱) نشان داده شده است تعریف شده است [۳۹].

$$R_{e=}\frac{v_s L}{\nu} \qquad (۱)$$

جایی که v_s میانگین سرعت سیال (m/s)، L بعد مشخصه (m)، m ویسکوزیته سیال سینماتیکی (m^2/s) است که به صورت μ/ρ نیز تعریف می‌شود، و ρ چگالی سیال است (kg/m^3). در این مطالعه، Re = 8.7 103 و بنابراین جریان آشفته در نظر گرفته می شود.

[۸] ANSYS Fluent
[۹] BTMS
[۱۰] PCM

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر میانگین رینولدز ناویر استوکس[۱] که مقادیر جریان را برای طیف وسیعی از مقیاس‌های تلاطم مدل‌سازی شده میانگین می‌دهد، استفاده شد. دو مدل‌های اصلی آشفتگی مبتنی بر رینولدز ناویر استوکس در فلوئنت موجود هستند: ۱- K-Epsilon و ۲- K-Omega.

- مدل K-Epsilon گسترده ترین مدل تلاطم مورد استفاده است زیرا استحکام و سادگی می دهد. تغییرات اصلی از مدل $k-\epsilon$ موجود در فلوئنت شامل $k-\epsilon$ استاندارد، مدل های Relizable و RNG[۲] است.

تضادهای اصلی بین این سه مدل به شرح زیر است:

(۱) اعداد پراندتل آشفته که نشان دهنده انتشار آشفته k و ϵ هستند،

(۲) شرایط تولید و تخریب در معادله ϵ (۳) تکنیک محاسبه ویسکوزیته آشفته.

مدل آشفتگی K-Omega نیز دارای دو تغییر است:

- مدل استاندارد K-Omega، و مدل انتقال تنش برشی (SST) که توسط منتر ایجاد شده است. هر دوی این مدل ها از معادلات حمل و نقل یکسانی برای ϵ -k استفاده می کنند. با این حال، مدل SST متفاوت است.

از مدل استاندارد به شرح زیر است:

(۱) یک تغییر آهسته در ناحیه داخلی لایه مرزی به قسمت خارجی لایه مرزی از مدل استاندارد k-omega به مدل k-epsilon وجود دارد و

(۲) اثرات انتقال تنش برشی آشفته اصلی.

مقالات مختلفی در ادبیات باز برای مدل‌سازی حرارتی باتری، با استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی وجود دارد .

برای مثال، ژائو و همکاران[۱۲] استراتژی خنک‌کننده دیگری برای باتری‌های استوانه‌ای مبتنی بر سیلندر خنک‌شونده مایع با کانال کوچک[۳] برای حفظ حداکثر دما و اختلاف دمای محلی در محدوده مناسب پیشنهاد کرد. عملکرد اتلاف حرارت به صورت عددی با تغییر اثرات کمیت کانال، سرعت جریان جرمی، جهت جریان و اندازه ورودی مورد بررسی قرار گرفت.

نتیجه آنها نشان داد که شدیدترین دما است و می توان در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد برای ۴۲۱۱۰ باتری استوانه ای کنترل کرد. دبی جرمی ورودی $1\times10^{-3}\,kg/s$ است و تعداد کانال های کوچک نیز به چهار کانال محدود شده است. آنها علاوه بر این دریافتند که سبک خنک‌کننده توسط یک سیلندر خنک شونده مایع با کانال کوچک می‌تواند شرایط مطلوبی را نشان دهد که برخلاف خنک‌کننده همرفت آزاد، درست زمانی که شماره کانال بالاتر از هشت است. با استفاده از شبیه‌سازی حالت پایدار، عملکرد حرارتی بسته باتری با نرخ‌های جریان جرمی مختلف هوای خنک‌کننده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. استراتژی آنها یک رویکرد اساسی برای تخمین عملکرد حرارتی یک بسته باتری ارائه می دهد، زمانی که بسته باتری بزرگ است و شبیه سازی گذرا کامل امکان پذیر نیست.

در مطالعه دیگری، جین و همکاران[۱۳]. یک صفحه سرد باله ای مورب برای خنک کردن باتری های یک EV تشکیل داد. در طرح کلی آنها، یک پیکربندی اساسی از برش های مورب در سراسر باله های مستقیم یک طرح کانال مستقیم معمولی ایجاد شد تا عملکرد کانال معمولی را با کمترین جریمه فشار افزایش دهد. این برش‌های مورب در سراسر باله‌های مستقیم، یک آرایه باله‌های مورب را تشکیل می‌دادند. صفحه سرد مایع تشکیل شده حاوی این باله های مورب ساده با زاویه و عرض بهینه است. این تقسیم‌بندی باله پیوسته به بخش‌های مورب منجر به شروع مجدد لایه‌های مرزی شد و پاسخی برای دماهای بالا داد.

محمدیان و همکاران [۱۴] روش‌های خنک‌کننده داخلی و خارجی را برای مدیریت حرارتی بسته‌های باتری لیتیوم یونی با استفاده از تجزیه و تحلیل حرارتی گذرا دوبعدی و سه بعدی بررسی کرد. برای این منظور از آب و الکترولیت مایع به عنوان

---

[۱] RANS

[۲] گروه عادی سازی مجدد

[۳] LCC

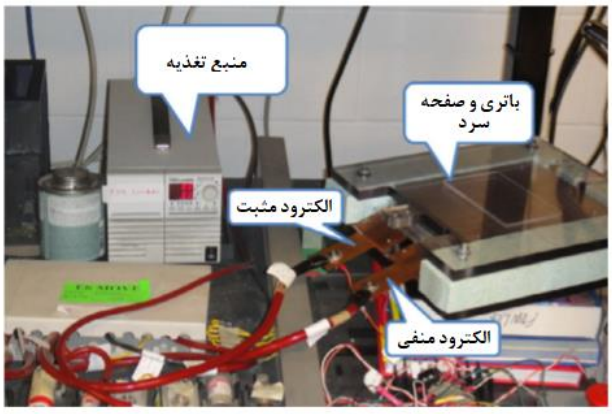
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

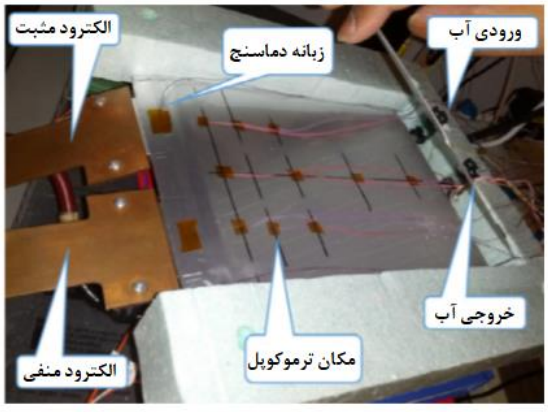
خنک کننده برای خنک کننده خارجی و داخلی استفاده شده است. نتایج آنها نشان داد که در همان قدرت پمپاژ، استفاده از خنک کننده داخلی نه تنها دمای داخلی باتری را بیش از خنک کننده خارجی کاهش می دهد، بلکه انحراف استاندارد میدان دمای داخل باتری را نیز به طور قابل توجهی کاهش می دهد. در نتیجه، استفاده از خنک کننده داخلی باعث کاهش زاویه تقاطع بین بردار سرعت و گرادیان دما شد که با توجه به اصل هم افزایی میدانی[۱] ، باعث افزایش انتقال حرارت همرفتی شد.
نویسندگان دریافتند که شدیدترین دمای باتری با افزایش تعداد کانال‌ها و سرعت جریان جرم ورودی کاهش می‌یابد. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که اثر جهت جریان بر عملکرد سرمایش پس از افزایش دبی جرمی کمتر بود و با افزایش دبی جرمی ورودی، اجرای خنک‌سازی بهبود یافت اما روند افزایشی کوچک‌تر شد و جرم دبی $5\times10^{-4}\,kg/s$ بهینه بود.
در این مقاله، یک مدیریت حرارتی باتری بر پایه صفحه سرد مینی کانال برای خنک کردن آب طراحی شده است. یک تحقیق و شبیه سازی جامع بر روی باتری لیتیوم یونی با استفاده از صفحه سرد انجام شده است. از این رو عملکرد تحت تخلیه جریان ثابت مختلف نرخ C۱ و C۲ و شرایط مرزی ۵ درجه سانتیگراد، ۱۵ درجه سانتیگراد و ۲۵ درجه سانتیگراد با جزئیات ارزیابی می شود. در اینجا، جزئیات آزمایشی از طریق راه‌اندازی آزمایشی، راه‌اندازی صفحه سرد به همراه باتری، مکان‌های ترموکوپل و طرح و روش آزمایشی ارائه می‌شود.

۲-۱ راه اندازی آزمایشی

تنظیم آزمایشی در شکل ۲(الف) نشان داده شده است. دو صفحه سرد تجاری موجود برای این کار آزمایشی برای حذف گرمای تولید شده از باتری لیتیوم یون در هنگام تخلیه استفاده شد. یک صفحه سرد در سطح بالایی باتری و صفحه سرد دیگر در سطح پایین باتری قرار می گیرد. یک سلول باتری لیتیوم یونی با ظرفیت ۲۰Ah برای اندازه‌گیری‌های آزمایشی و اعتبارسنجی مدل بعدی استفاده شد. جدول ۱ مشخصات سلول را نشان می دهد. در مجموع ۱۹ ترموکوپل برای این کار آزمایشی به کار گرفته شد. از ۱۹ عدد، ۱۰ ترموکوپل نوع T بر روی سطح اصلی باتری قرار داده شد که در شکل ۲(ب) نشان داده شده است. ۳ ترموکوپل نیز روی سطح دیگری از باتری چسبانده شد، اول در نزدیکی کاتد، دوم در نزدیکی آند، و سوم در نزدیکی بدنه میانی. از ۲ جفت حرارتی برای اندازه گیری مقادیر دمای زبانه (الکترود یا کلکتور جریان) در طول نرخ های تخلیه مختلف در شرایط مرزی مختلف استفاده شد. در نهایت از ۴ ترموکوپل نوع K برای اندازه گیری دمای ورودی و خروجی آب صفحات سرد بالا و پایین استفاده شد.



(الف) : تنظیم آب خنک کننده



(ب) : مکان های ترموکوپل

شکل ۲: تنظیم آزمایشی

[۱۴] FSP

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

جدول ۱: مشخصات سلول های کیسه ای لیتیوم یونی

مقدار	مشخصات فنی
LiFePO4	مواد کاتدی
گرافیت	مواد آند
بر پایه کربنات	الکترولیت
۲۰,۰Ah	ظرفیت اسمی
۳,۳v	ولتاژ اسمی
۷,۲۵mm ×۲۲۷ mm× ۱۶۰mm	ابعاد

۲- رویه آزمایش

در کار آزمایش، سه دمای مختلف خنک‌کننده - دمای عملیاتی برای روش خنک‌کننده آب انتخاب می‌شوند: ۵ درجه سانتی‌گراد، ۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۲۵ درجه سانتی‌گراد. دو نرخ تخلیه متفاوت (جریان ثابت) انتخاب می شوند: 1C و 2C. نرخ شارژ (جریان ثابت- ولتاژ ثابت) 1C است. طرح آزمایشی در جدول ۲ نشان داده شده است.

۲-۱ تولید گرما در باتری لیتیوم یون

درک میزان تولید و اتلاف گرما در داخل سلول لیتیوم یون مهم است زیرا عملکرد باتری لیتیوم یون به شدت به دما بستگی دارد. تولید گرما در داخل باتری یک فرآیند پیچیده است و به سرعت واکنش الکتروشیمیایی بستگی دارد. همچنین با زمان و دما تغییر می کند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مواد فعال در هر دو الکترود (الکترود مثبت و منفی) مانند یک عنصر مهم برای محتوای لیتیوم باتری در یک سلول لیتیوم یونی رفتار می کنند. یون‌های لیتیوم را می‌توان از ذرات ماده فعال حذف کرد یا بدون تغییرات قابل توجهی در ساختار عنصر وارد کرد. این فرآیند به نام فرآیند تبادل، اساس باتری های لیتیوم یونی است. در طول فرآیند شارژ، لیتیوم یون از سمت فعال در الکترود مثبت برداشته می شود و به الکترود منفی وارد می شود [۲۶و۲۷] .

در شکل۲، $LiMO_2$ یک ماده اکسید فلزی است که در الکترود مثبت استفاده می شود و C یک ماده کربنی است که در الکترود منفی استفاده می شود. در فرآیند تخلیه، لیتیوم یون از طریق الکترولیت به سمت الکترود مثبت حرکت می کند. واکنش الکتروشیمیایی برای الکترودهای مثبت و منفی، و واکنش کلی توسط درک میزان تولید و اتلاف گرما در داخل سلول لیتیوم یون مهم است زیرا عملکرد باتری لیتیوم یون به شدت به دما بستگی دارد. تولید گرما در داخل باتری یک فرآیند پیچیده است و به سرعت واکنش الکتروشیمیایی بستگی دارد. همچنین با زمان و دما تغییر می کند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مواد فعال در هر دو الکترود (الکترود مثبت و منفی) مانند یک عنصر مهم برای محتوای لیتیوم باتری در یک سلول لیتیوم یونی رفتار می کنند. یون‌های لیتیوم را می‌توان از ذرات ماده فعال حذف کرد یا بدون تغییرات قابل توجهی در ساختار عنصر وارد کرد. این فرآیند به نام فرآیند تبادل، اساس باتری های لیتیوم یونی است. در طول فرآیند شارژ، یون لیتیوم از سمت فعال در الکترود مثبت برداشته می شود و به الکترود منفی وارد می شود . در فرآیند تخلیه، لیتیوم یون از طریق الکترولیت به سمت الکترود مثبت حرکت می کند. واکنش الکتروشیمیایی برای الکترودهای مثبت و منفی و واکنش کلی توسط الکترود مثبت داده می شود:

جدول ۲ طرح آزمایشی.

میزان تخلیه	نرخ شارژ	شرایط مرزی [°C]	نوع خنک کننده
۲ c۱و1C	۱C	۵	خنک کننده آب
۲ c۱و1C	۱C	۱۵	
۲ c۱و1C	۱C	۲۵	

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

(۲) الکترود مثبت :

$$LiMO_2 \underset{Discharge}{\overrightarrow{Charge}} Li_{1-x}MO_2 + xLi^+ + xe^-$$

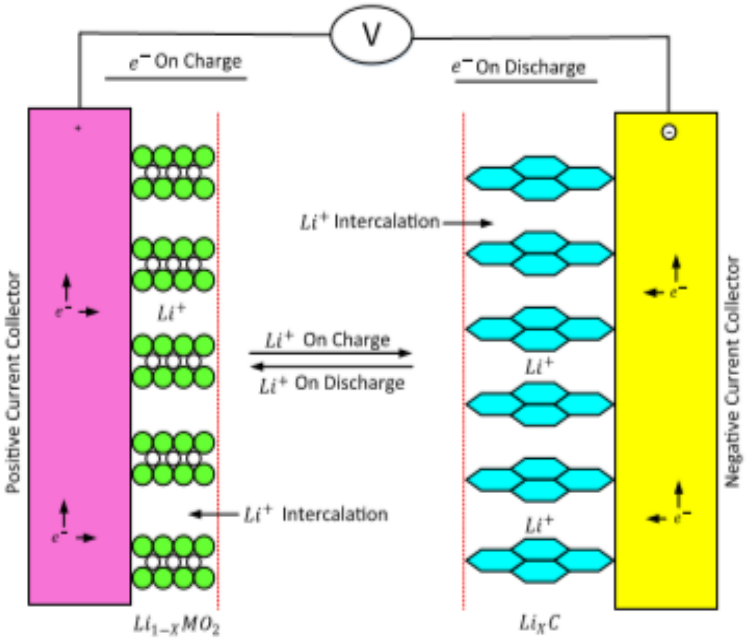
(۳) الکترود منفی :

$$C + xLi^+ + xe^- + LiMO_2 \underset{Discharge}{\overrightarrow{Charge}} Li_xC$$

(۴) به طورکلی :

$$LiMO_2 + C \underset{Discharge}{\overrightarrow{Charge}} Li_xC + Li_{1-x}MO_2$$

تولید گرما در سلول باتری دو منبع اصلی دارد:
(الف) تغییر در آنتروپی به دلیل واکنش های الکتروشیمیایی و (ب) گرمایش ژول یا گرمایش اهمی.



شکل ۳ : مکانیسم شارژ و تخلیه در باتری لیتیوم یون

بر اساس جفت الکترودها، گرمای واکنش می تواند دو نوع باشد. گرمازا برای تخلیه و گرمازا برای شارژ. بخش ژول یا اهمی گرمایش به دلیل تبادل جریان در مقاومت های داخلی است [۲۰-۱۸] . نرخ تولید گرما را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\dot{Q} = I(E-c)^{-1}\left[T\left(\frac{dE}{dT}\right)\right] \qquad (۵)$$

که در آن اصطلاح اولیه، $I(E-C)$ ، تولید گرمای ژول یا اهمی و سایر اثرات غیرقابل برگشت در سلول باتری است [۲۱] . اصطلاح ثانویه، $I\left[T\left(\frac{dE}{dT}\right)\right]$ گرمای تولید یا مصرف شده در پرتو تغییر آنتروپی برگشت پذیر است که به دلیل واکنش های

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

الکتروشیمیایی در داخل سلول باتری است. در نرخ‌های جریان عملی HEV و EV ، عبارت ثانویه در بیشتر موارد در تضاد با اصطلاح اولیه ناچیز است[۲۲] . در اینجا، نرخ تولید گرما توسط فتح آبادی مجدداً فرموله شده و توسط آن ارائه شده است :

$$\dot{Q} = I^2R - T\Delta S\left[\frac{I}{nf}\right] \quad (۶)$$

جایی که $\mathbf{I}$ جریان است برای تخلیه $I > 0$، و برای شارژ $I < 0$ ، برای دشارژ (یعنی مقدار V+ برای تخلیه و مقدار V- برای شارژ گرفته می شود)، R مقاومت است، $\boldsymbol{\Delta S}$ تغییر در آنتروپی است. n تعداد جریان الکترون و f ثابت فارادی (۹۶۴۸۵ کلمب/مول) است.

۲-۲ مدل سازی عددی

همانطور که قبلا ذکر شد، جریان در این مطالعه آشفته است و بنابراین توسط معادلات ناویر-استوکس میانگین رینولدز مدل‌سازی شد. در این مقاله، هدف این مطالعه CFD به دست آوردن نتایجی است که بتوان با اندازه‌گیری‌های تجربی اعتبارسنجی کرد. علاوه بر این، از آنجایی که روش تجربی تنها داده‌های نقطه‌ای را به دست می‌آورد، تکنیک CFD کل میدان و داده‌های جامع را برای تکمیل داده‌های تجربی فراهم می‌کند. از آنجایی که میدان دما نیز مورد توجه است، معادله انرژی نیز حل شده است. معادلات حاکم عبارتند از:

$$\nabla * \bar{V} = 0 \quad (۷)$$

$$\rho\left[\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\vec{V}.\nabla\bar{V})\right] = -\nabla\bar{P} + (\mu\nabla^2\bar{V} - \bar{\lambda}) \quad (۸)$$

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \nabla * [\rho\bar{V}T] = \nabla * \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t}\right)\nabla T\right] \quad (۹)$$

که در آن ∇ عملگر گرادیان، $\bar{V}$ سرعت متوسط (m/s)، V سرعت (m/s)، P فشار (Pa)، $\boldsymbol{\lambda}$ تنش رینولدز، Pr عدد پراندتل و Pr_t عدد پراندتل آشفته است. از آنجایی که جریان در مسئله آشفته فرض می شود، یک مدل آشفتگی مناسب مورد نیاز است. در این مطالعه از مدل استاندارد تلاطم k-$\boldsymbol{\varepsilon}$ با توجه به استحکام مدل، دقت معقول برای طیف وسیعی از جریان ها و قابلیت اثبات شده آن در انتقال حرارت و تحلیل جریان استفاده شد [۴۸].

معادلات انسیس فلوئنت برای انرژی جنبشی آشفته و ویسکوزیته گردابی به شرح زیر است :

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla * [\rho\bar{V}k] = \nabla * \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma k}\right)\nabla k\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_m + S_k \quad (۱۰)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla * [\rho\bar{V}k] = \nabla * \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma k}\right)\nabla\varepsilon\right] C_1\frac{\varepsilon}{k}(G_K + C_3G_b) - C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (۱۱)$$

که در آن C1، C2 و C3 ثابت های مدل هستند، σ_k و ε_k اعداد پراندتل آشفته برای K و $\boldsymbol{\varepsilon}$ هستند. G_k تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از گرادیان‌های میانگین سرعت را نشان می‌دهد، G_b تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از شناوری است. Y_Mسهم اتساع نوسانی در آشفتگی تراکم پذیر را در نرخ اتلاف کلی نشان می دهد. S_K و S_ε اصطلاحات منبع تعریف شده توسط کاربر هستند. ترکیب k و $\boldsymbol{\varepsilon}$ به صورت زیر:

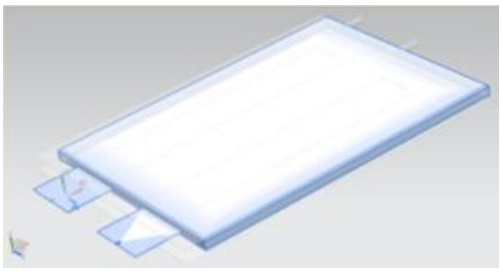
$$\mu_t = C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۱۲)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

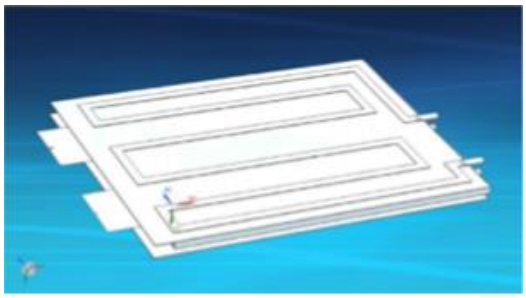
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

که در آن C_μ یک ثابت است. همانطور که قبلا گفته شد نرم افزار تجاری انسیس فلوئنت به دلیل انعطاف پذیری و در دسترس بودن آن در این مطالعه استفاده می شود. با شروع از یک شرایط اولیه، راه حل به یک حالت ثابت همگرا می شود. همگرایی بر اساس تداوم نرمال شده، تکانه و انرژی باقیمانده قضاوت می شود و زمانی همگرا در نظر گرفته می شود که این باقیمانده ها به 1×10^{-6} کاهش یابد.

شبکه محاسباتی از ۲۰ میلیون عنصر تشکیل شده است. یک شرایط مرزی ورودی سرعت جریان آزاد یکنواخت برای جریان تراکم ناپذیر در بالادست پله اعمال می شود. سرعت متوسط در ورودی با استفاده از یک رابطه مشتق شده معتبر برای جریان کانال اعمال می شود. شرایط مرزی ورودی و خروجی بر اساس مقیاس شدت آشفتگی و طول آشفته تنظیم شد. از شدت آشفتگی ۵٪ برای سازگاری با مقدار بدست آمده توسط مطالعه تجربی استفاده شده است. سرعت $0.5784\,m/s$ است. شرایط مرزی خروجی فشار در طرح خروجی اعمال شد که بسیار پایین دست پله قرار دارد تا تأثیر شرایط خروجی را کاهش دهد و در تمام سطوح دیگر شرایط مرزی بدون لغزش اعمال می‌شود. درمان دیوار افزایش یافته ($y^+ = 1$) به عنوان تابع دیوار نزدیک اعمال می شود.حل تمام ویژگی های جریان مورد علاقه وضوح مش در مکان های مختلف در هندسه در شکل ۴ (الف و ب) نشان داده شده است. این شبکه در ورودی و کانال خروجی مکان های صفحه سرد در بالا و پایین سلول باتری لیتیوم یون قرار دارد.



(الف) باطری



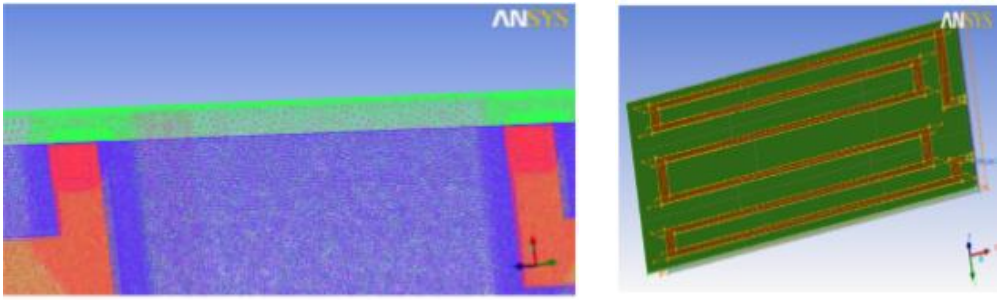
(ب) صفحه سرد با باطری

شکل ۴ : صفحه سرد بالا و پایین با باتری لیتیوم یون

مش بندی کلی تولید شده در مجموعه در شکل ۵ (الف و ب) نشان داده شده است. جریان در امتداد سطوح مختلف در فضا با استفاده از اندازه مش ریزتر در اطراف آن موانع حل می شود در حالی که لایه های مرزی در امتداد تمام سطوح با خوشه بندی ۳ لایه از عناصر منشوری در نزدیکی دیوارها حل می شوند. لایه های منشوری نیز طوری تنظیم می شوند که گره اول ۰,۱ میلی متر از دیوار فاصله داشته باشد. این فاصله گره دیوار، فاصله دیوار بدون بعد $y^+ \sim 1$ را ایجاد می کند، که در آن y^+ 5, انتخاب می شود. این مقدار با مقدار توصیه شده برای جریان های نزدیک دیوار سازگار است در حالی که به مقادیر قابل قبول برای مدل تلاطم $k-\varepsilon$ استاندارد نزدیک تر است. وضوح فوق‌العاده را با مقادیy^+ پایین‌تر عوض می‌کند، اما همچنان مقداری تقریب لایه مرزی را حفظ می‌کند. استفاده از مقادیر توصیه شده $y^+ \geq 30$ منجر به این شد که ضخامت لایه اول بزرگتر از ارتفاع کانال باشد، بنابراین مصالحه ای ضروری است. تعداد کل عناصر مورد استفاده برای مش تقریباً ۲۰ میلیون است. با انجام آزمون‌های استقلال شبکه اطمینان حاصل شد که نتایج عددی مستقل از شبکه هستند. اثر ناچیز در نقاط اتصال مجدد برای عناصر مش بیش از ۱۰ میلیون مشاهده می شود. اطمینان حاصل شد که باقیمانده های عددی در مرتبه قدر 10^{-6} هستند و با رسیدن باقیمانده های عددی به معیارهای همگرایی، راه حل همگرا در نظر گرفته می شود. راه حل پس از دستیابی به این معیار تغییر چندانی نکرد.

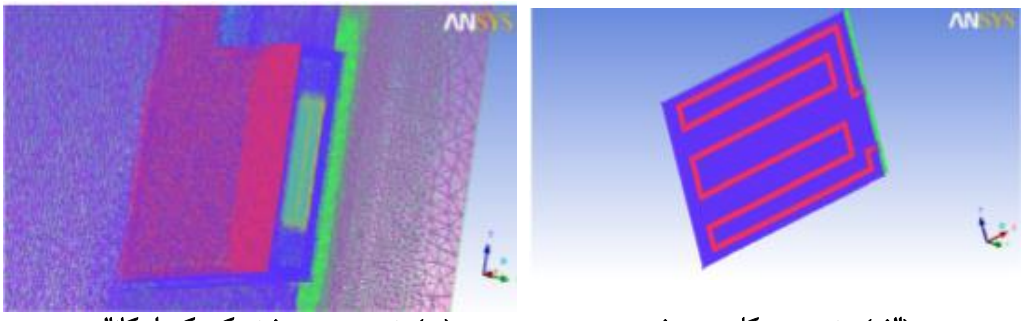
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]



(الف) کانال در صفحه سرد (ب) بخش بزرگ شده مش بندی در ورودی و خروجی

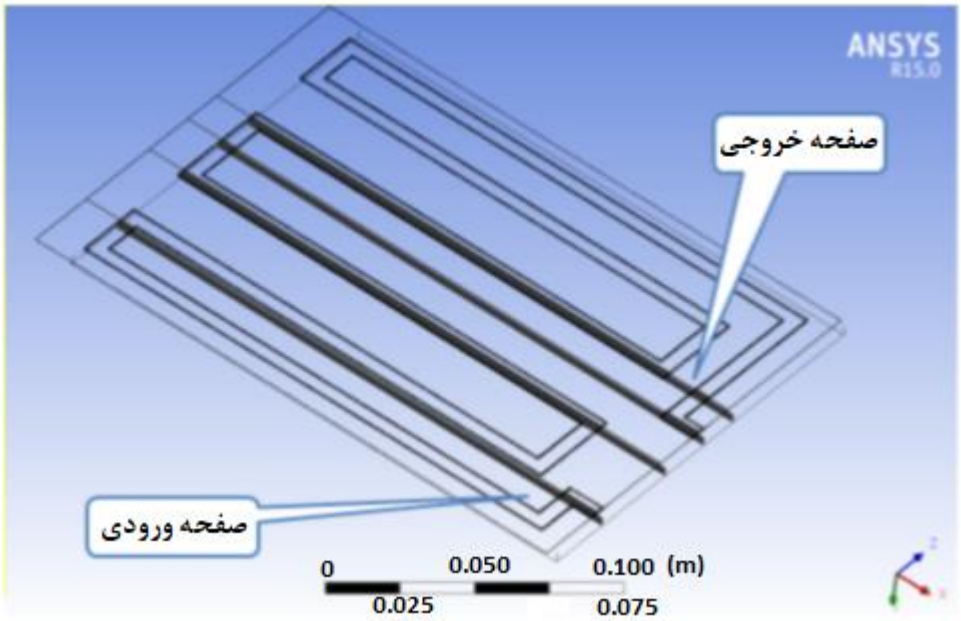
شکل ۴. کانال ورودی و خروجی با مش بندی مدل صفحه سرد در ICEM-CFD



(الف) مش بندی کلی در صفحه سرد (ب)مش بندی در بخش کوچکی از کانال

شکل ۵. مش بندی در ICEM-CFD

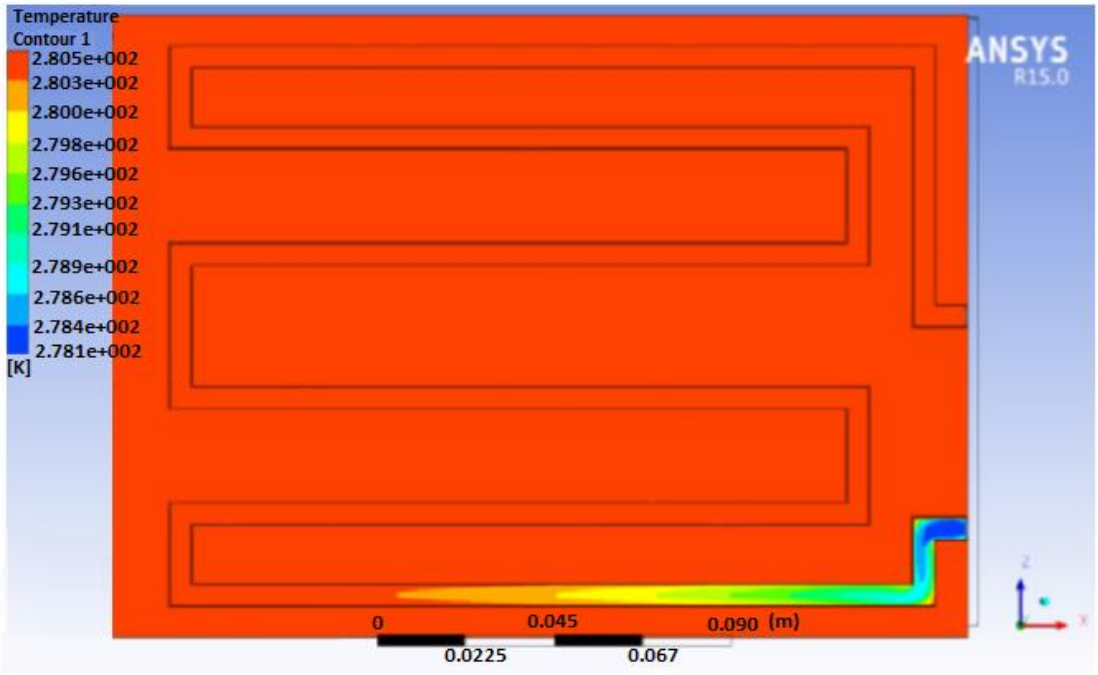
تجزیه و تحلیل همچنین در سطوح مختلف در کانال انجام می شود. شکل ۶ سطوح عمودی درون صفحات سرد را برای آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی نشان می دهد، که در آن ۱ ورودی به صفحه سرد و ۴ خروجی از صفحه سرد است.



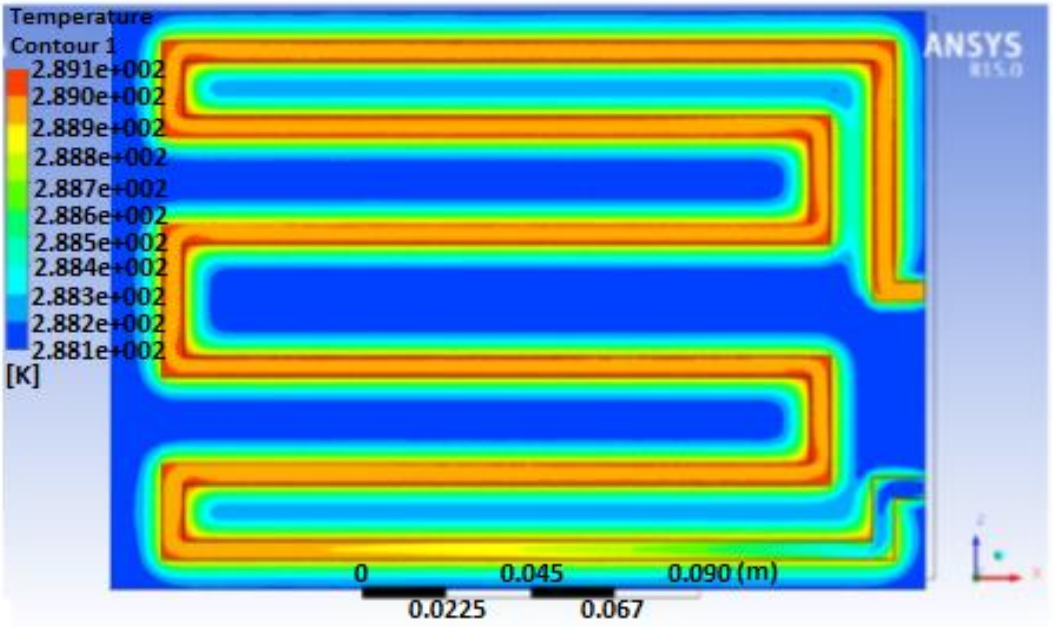
شکل ۶ : صفحات عمودی ۱، ۲، ۳ و ۴ (۱ ورودی و ۴ خروجی است) در صفحات سرد مینی کانال

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]



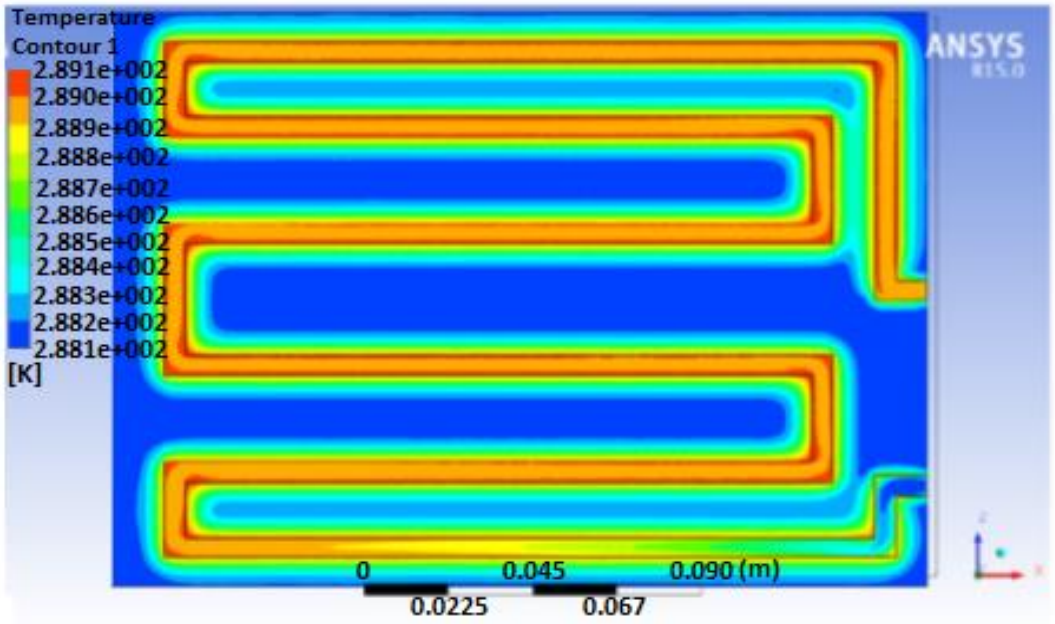
(الف) حد فاصل دما از 1°C تا 5°C



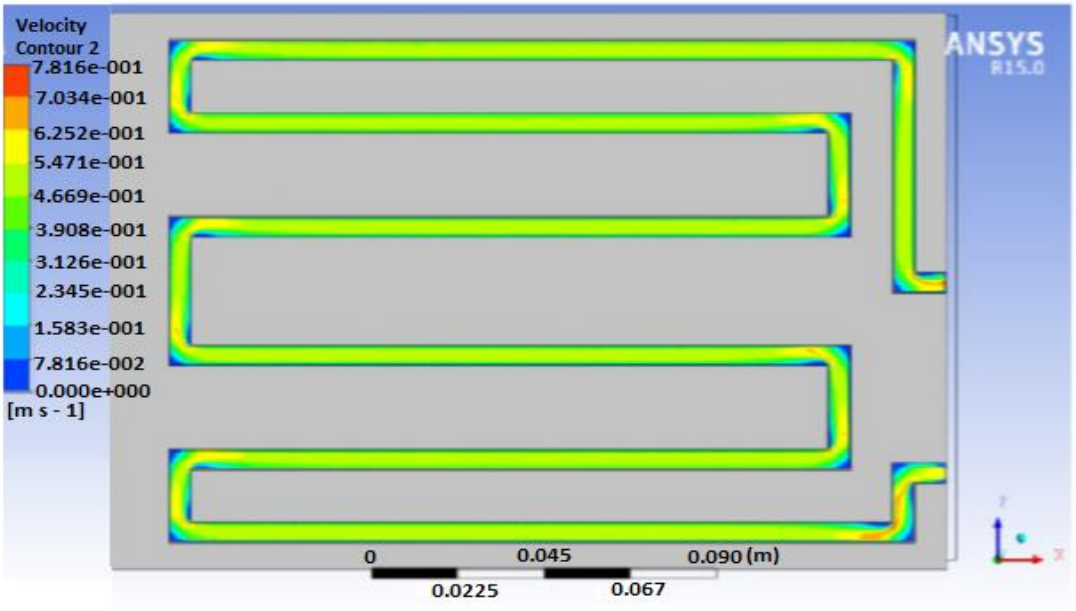
(ب) حد فاصل دما از1°C تا 15°C

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]



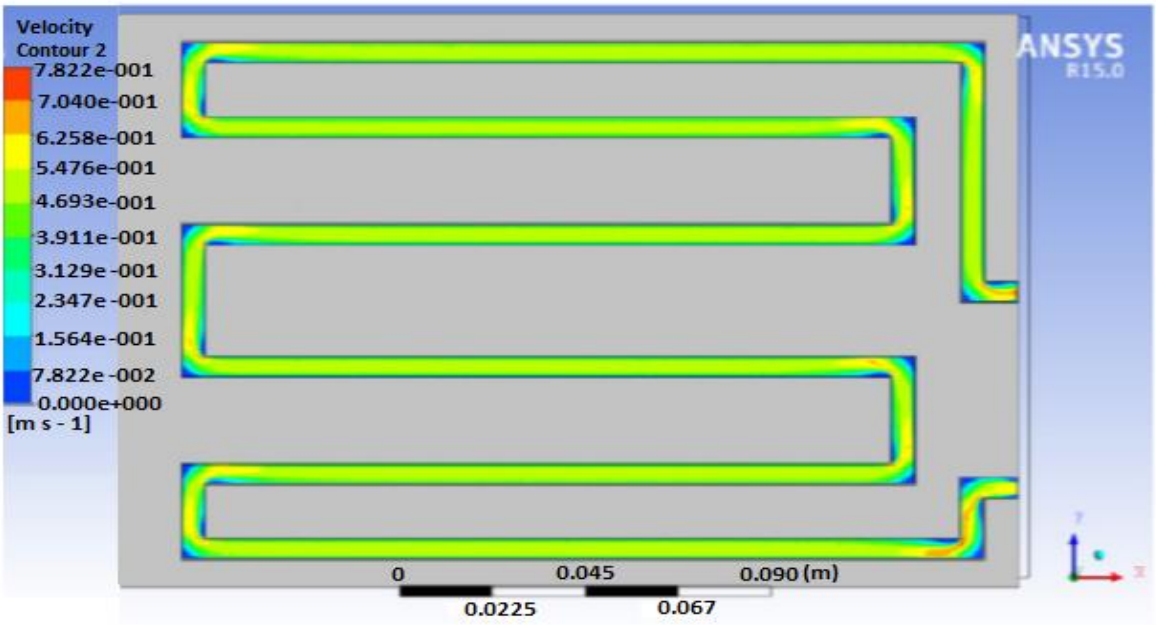
(پ)حدفاصل دما از1°C تا 25°C



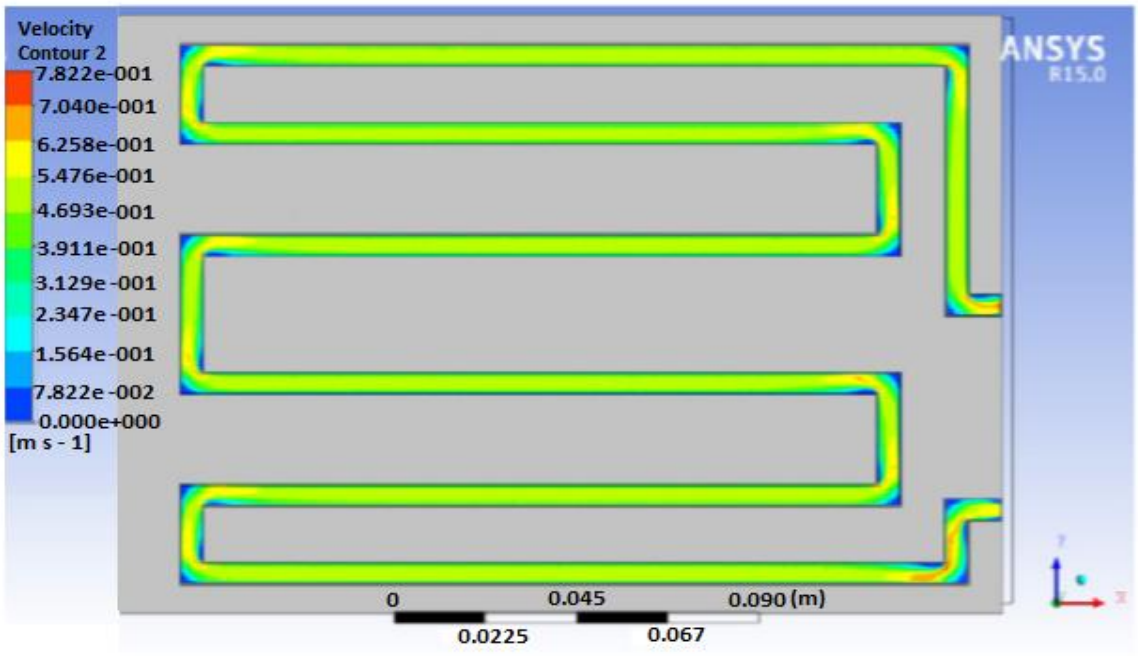
(ت) حدفاصل سرعت از 1°C تا 5°C

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]



(ث) حدفاصل سرعت از 1℃ تا 15℃



(ج)حد فاصل سرعت از **1℃** تا **25℃**

شکل ۷ : کانتورهای دما و سرعت در نرخ تخلیه ۱ درجه سانتیگراد و دمای عملیاتی ۵ درجه سانتیگراد، ۱۵ درجه سانتیگراد و ۲۵ درجه سانتیگراد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

جدول ۳ : خلاصه دمای ورودی و خروجی آب در دبی ۱ و ۲ درجه سانتی گراد و شرایط مرزی مختلف

دمای ورودی و خروجی آب [K]					شرایط مرزی [C]	نوع خنک کننده
۲ C		۱ C				
خروجی	ورودی	خروجی	ورودی			
۲۸۱,۵۵	۲۷۸,۱۵	۲۸۰,۹۴	۲۷۸,۱۵		۵	خنک کننده آب
۲۸۹,۹۳	۲۸۸,۴۲	۲۸۹,۳۳	۲۸۸,۴۲		۱۵	
۲۹۹,۲۲	۲۹۸,۱۵	۲۹۸,۴۵	۲۹۷,۴۵		۲۵	

۳-نتایج و بحث

این بخش نتایج به‌دست‌آمده برای یک باتری لیتیوم یونی منشوری خاص را برای نرخ‌های دشارژ متفاوت ۱C و ۲C با خنک‌کردن آب در شرایط عملیاتی ۵ درجه سانتی‌گراد، ۱۵ درجه سانتی‌گراد و۲۵ درجه سانتی گراد.

خطوط دمایی به دست آمده از دینامیک سیالات محاسباتی در نرخ تخلیه ۱ درجه سانتی گراد و دمای عملیاتی ۵ درجه سانتی گراد، ۱۵ درجه سانتی گراد و ۲۵ درجه سانتی گراد (خنک کننده آب) در شکل ۷ (الف ،ب و پ) نشان داده شده است. این خطوط در سطح میانی صفحه خنک کننده به دست می آیند. برای یادآوری خوانندگان، ده ترموکوپل روی سطح اصلی باتری قرار دارند: یکی در نزدیکی الکترود یا کاتد مثبت، دومی نزدیک الکترود یا آند منفی و سومی در وسط سلول قرار دارد. (وسط بدن) در امتداد ارتفاع سلول. یعنی سه تا در نزدیکی الکترودها، سه تا در مرکز باتری، دو تا بین بالا و وسط باتری ، یکی در پایین باتری و یکی بین مرکز و باتری قرار می‌گیرند. پایین باتری مشاهده شده است که تأثیر زیادی دمای کار بر عملکرد باتری و صفحات سرد وجود دارد و مشاهده می شود که با افزایش دمای کار بین۵ درجه سانتیگراد تا ۲۵ درجه سانتیگراد برای سرعت تخلیه خاص ۱ درجه سانتیگراد، مقادیر کانتور نیز افزایش می یابد. الگوهای خنک کنندگی کلی یکسان است و در زمانی که آب سردترین است، اختلاف دمای بیشتری را در ورودی صفحه خنک کننده نشان می دهد با شرایط مرزی دمای ورودی، اما الگوی کلی تقریباً یکسان باقی می‌ماند. الگوهای خنک کننده از آنچه در باتری ها به طور تجربی دیده می شود پیروی می کند، با دمای خروجی بالاتر از ورودی خطوط سرعت در همه موارد یکسان است، این انتظار می رود، با توجه به دماهای پایین درگیر در شبیه سازی ها که تأثیر کمی بر چگالی آب خواهد داشت. این نتایج ممکن است تحت تأثیر مقدار کم y^+ ، توابع دیوار و مدل آشفتگی مورد استفاده قرار گیرد. جدول ۳ خلاصه ای از ورودی و خروجی آب را نشان می دهد.

علاوه بر این مطالعه، تأثیر میزان تخلیه بر عملکرد باتری نیز مورد مطالعه قرار گرفته و مشخص شد که هم نرخ C و هم دمای کارکرد بر عملکرد باتری تأثیر زیادی دارد. در تخلیه پایین تر با افزایش نرخ، ظرفیت باتری به مشخصات سازنده نزدیک‌تر می‌شود، اما با افزایش نرخ C، ظرفیت تخلیه کاهش می‌یابد. حتی زمانی که شرایط مرزی از۲۵ درجه سانتیگراد تا ۵ درجه سانتیگراد، کاهش بیشتری در ظرفیت تخلیه وجود دارد. به طور کلی، اشاره شده است که افزایش نرخ C و کاهش شرایط مرزی منجر به کاهش ظرفیت تخلیه می شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

۴-نتیجه گیری

این مقاله یک مطالعه مقایسه ای از توزیع دما و سرعت در صفحات سرد مینی کانال قرار داده شده بر روی یک سلول باتری لیتیوم یون منشوری با استفاده از تکنیک های تجربی و عددی برای روش های خنک کننده آب ارائه کرده است. در نرخ‌های تخلیه ۱ و ۲ درجه سانتی‌گراد و دماهای عملیاتی متفاوت ۵ درجه سانتی‌گراد، ۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۲۵ درجه سانتی‌گراد. سپس برخی از نکات پایانی به شرح زیر بیان می شود:

(۱) توزیع دما در صفحات سرد مینی کانال با افزایش نرخ C افزایش می یابد.

(۲) افزایش دادن نرخ تخلیه (بین ۱ درجه سانتیگراد و ۲ درجه سانتیگراد) باعث افزایش دماهای اندازه گیری شده در ده مکان توزیع شده روی سطح باتری شد.

(۳) سنسورهای ترموکوپل نزدیک به الکترودها دمای بالاتری نسبت به سنسورهای ترموکوپل خط مرکزی ارائه می دهند. الگوهای خنک‌کننده از شبیه‌سازی‌ها با الگوهای به‌دست‌آمده تجربی مطابقت دارد. این نتایج بینش هایی را در مورد طراحی و بهینه سازی سیستم های باتری ارائه می دهد و با توجه به حفاظت از محیط زیست، استفاده از منابع انرژی و تخلیه منابع، به عنوان نوعی از امکانات ارتباطی مدرن، وسایل نقلیه الکتریکی در سراسر جهان به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته اند. با توجه به اینکه اخیراً خودروسازان برنامه های خود را برای تولید این وسایل نقلیه راه اندازی کرده اند، پس به نظر می رسد آینده وسایل نقلیه هیبریدی قطعاً با استفاده از دستگاه PM همراه است. در نهایت وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی می‌توانند در آینده بیشتر به انرژی الکتریکی وابسته باشند و به لطف پیشرفت‌های بعدی در فناوری سیستم ذخیره‌سازی انرژی، تمام وسایل نقلیه الکتریکی را در حد نا محدودی قرار دهند.

فهرست علائم

تخلیه	dis	ولتاژ سلول یا پتانسیل سلول [V]	C
منفی	n	ثابت های مدل	C_1
مثبت	p	ثابت های مدل	C_2
شبیه سازی شده	sim	ثابت های مدل	C_3
		مقدار ثابت	C_μ
بالا نوشته ها		ثابت فارادی (۹۶،۴۸۵ Columb/mol)	F
درجه	0	تولید انرژی جنبشی آشفتگی به دلیل گرادیان های سرعت متوسط	G_k
وابسته به رفتار جدار	+	تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از شناوری	G_b
باطری وسیله نقلیه برقی	BEV	جریان[A]	I
شرایط مرزی	BC	انرژی جنبشی آشفته (J)	k
سیستم مدیریت حرارتی باتری	BTMS	بعد مشخصه (m)	L

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

ظرفیت	C	تعداد جریان الکترون	n
دینامیک سیالات محاسباتی	CFD	فشار (Pa)	P
وسیله نقلیه الکتریکی	EV	شماره پراندتل	Pr
وسیله نقلیه پیل سوختی	FCV	نرخ تولید حرارت [W]	$\dot{Q}$
روش المان محدود	FEM	مقاومت (Ω)	R
اصل هم افزایی میدانی	FSP	عدد رینولدز	Re
خودروی الکتریکی هیبریدی	HEV	اصطلاحات منبع تعریف شده توسط کاربر	S_k
بسته نرم افزاری اختصاصی که برای تولید CAD و مش استفاده می شود	ICEM-CFD	اصطلاحات منبع تعریف شده توسط کاربر	S_ϵ
		تغییر در آنتروپی (J/K)	ΔS
سیلندر خنک شده با مایع	LCC	دما [C یا K]	T
		زمان [s]	t
میز کار مهندسی ابزار مجازی آزمایشگاهی	LabVIEW	سرعت (m/s)	V
لیتیوم اکسید منگنز	LiMO2	میانگین سرعت سیال (m/s)	v_s
فسفات آهن لیتیوم	LiFePO4	سرعت متوسط (m/s)	$\bar{V}$
سیلندر خنک شده با مایع	LCC	ضریب دما [V/C]	dE/dT
صفحه مایع سرد	LCP	فرکانس گردابی آشفته ($1/s$)	ω
پارامتر مدل یکپارچه	LPM	رفتار جدار تقویت شده	y^+
پارامتر خطی متغیر است	LPV	سهم اتساع نوسانی در تلاطم قابل تراکم در نرخ اتلاف کلی	Y_M
		نمادهای یونانی	
گروه عادی سازی مجدد	RNG	عملگر گرادیان	∇
رینولدز-میانگین ناویر-استوکس	RANS	چگالی (kg/m3)	ρ
انتقال تنش برشی	SST	ویسکوزیته سیال سینماتیک (m2/s)	ν
نرخ اتلاف آشفته	TDR	ویسکوزیته سیال دینامیکی (Ns/m2)	μ
انرژی جنبشی متلاطم	TKE	فشار رینولدز	λ
دو بعدی	D2	اعداد پراندتل آشفته برای k	σ_k

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

سه بعدی	D3	اعداد پراندتل آشفته برای ε	ϵ_k

مراجع

[1] H. Park, A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles, J. Power Sources 239 (2013) 30–36.

[2] L. Fan, J.M. Khodadadi, A.A. Pesaran, A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles, J. Power Sources 238 (2013) 301–312.

[3] Z. Rao, S. Wang, A review of power battery thermal energy management, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (9) (2011) 4554–4571.

[4] C. Lin, S. Xu, G. Chang, J. Liu, Experiment and simulation of a LiFePO4 battery pack with a passive thermal management system using composite phase change material and graphite sheets, J. Power Sources 275 (2015) 742–749.

[5] Q. Wang, B. Jiang, B. Li, Y. Yan, A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles, Renew. Sustain. Energy Rev. 64 (2016) 106–128.

[6] R. Khasow, Aerodynamic and Thermal Analysis of a Heat Source at the Underside of a Passenger Vehicle, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, 2016.

[7] A. Samba, N. Omar, H. Gualous, Y. Firouz, P.V.d. Bossche, J.V. Mierlo, T.I. Boubekeur, Development of an advanced two-dimensional thermal model for large size lithium-ion pouch cells, Electrochim. Acta 117 (2015) 246–254.

[8] G. Li, S. Li, Physics-based CFD simulation of lithium-ion battery under the FUDS driving cycle, ECS Trans. 64 (33) (2015) 1–14.

[9] P. Vyroubal, T. Kazda, J. Maxa, J. Vondrák, Analysis of temperature field in lithium-ion battery by discharging, ECS Trans. 70 (1) (2015) 269–273.

[10] K. Yeow, M. Thelliez, H. Teng, E. Tan, Thermal analysis of a Li-ion battery system with indirect liquid cooling using finite element analysis approach, SAE Int. J. 1 (1) (2012) 65–78.

[11] A. Jarrett, I.Y. Kim, Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance, J. Power Sources 196 (23) (2011) 10359– 10368.

[12] J. Zhao, Z. Rao, Y. Li, Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery, Energy Convers. Manage. 103 (2015) 157–165.

[13] L.H. Saw, Y. Ye, A.A. Tay, W.T. Chong, S.H. Kuan, M.C. Yew, Computational fluid dynamic and thermal analysis of lithium-ion battery pack with air cooling, Appl. Energy 177 (2016) 783–792.

[14] S. Mohammadian, Y.L. He, Y. Zhang, Internal cooling of a lithium-ion battery using electrolyte as coolant through microchannels embedded inside the electrodes, J. Power Sources 293 (2015) 458–466.

[15] 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.

[16] S. Panchal, S. Mathewson, R. Fraser, R. Culham, M. Fowler, ‘‘Experimental Measurements of Thermal Characteristics of LiFePO4 Battery,” SAE Technical Paper, Vols. 2015, doi:10.4271/2015-01-1189, pp. 1-11.

[17] S. Panchal, S. Mathewson, R. Fraser, R. Culham, M. Fowler, Measurement of Temperature Gradient (dT/Dy) and Temperature Response (dT/Dt) of a Prismatic Lithium-Ion Pouch Cell With LiFePO4 Cathode Material, SAE International, 2017, pp. 1–9, http://dx.doi.org/10.4271/2017-01-1207.

[18] C.R. Pals, J. Newman, Thermal modeling of the lithium/polymer battery, J. Electrochem. Soc. 142 (10) (1995) 3274–3281.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

[19] Y. Chen, J.W. Evans, Three-dimensional thermal modeling of lithium-polymer batteries under galvanostatic discharge and dynamic power profile, J. Electrochem. Soc. 141 (11) (1994) 2947–2952. [20] G. Wierschem, B. McKinney, E. Nrotek, Thermal management of lead-acid batteries for electric vehicles, in: Research and Development Testing, Detroit, 1993.

[21] A.A. Pesaran, A. Vlahinos, S.D. Burch, Thermal Performance of EV and HEV Battery Modules and Packs, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 1997.

[22] K. Smith, C.-Y. Wang, Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles, J. Power Sources 160 (1) (2006) 662– 673. [50] H. Fathabadi, A novel design including cooling media for Lithium-ion batteries pack used in hybrid and electric vehicles, J. Power Sources 245 (2014) 495–500

[23] S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, M. Fowler, Transient electrochemical heat transfer modeling and experimental validation of a large sized LiFePO4/graphite battery, Int. J. Heat Mass Transf. 109 (2017) 1239–1251.

[24] C. Alaoui, Solid-state thermal management for lithium-ion EV batteries, Vehicular Technol., IEEE Trans. 62 (1) (2013) 98–107.

[25] Z. Rao, Y. Huo, X. Liu, Experimental study of an OHP-cooled thermal management system for electric vehicle power battery, Exp. Thermal Fluid Sci. 57 (2014) 20–26.

[26] S. Panchal, S. Mathewson, R. Fraser, R. Culham, M. Fowler, Thermal management of lithium-ion pouch cell with indirect liquid cooling using dual cold plates approach, SAE Int. 4 (2) (2015) 1–15.

[27] S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, M. Fowler, Experimental and theoretical investigation of temperature distributions in a prismatic lithiumion battery, Int. J. Therm. Sci. 99 (2016) 204–212.

[28] S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, M. Fowler, Thermal modeling and validation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at different discharge rates and varying boundary conditions, Appl. Therm. Eng. 96 (2016) 190–199.

[29] C.H. Wang, T. Lin, J.T. Huang, Z.H. Rao, Temperature response of a high power lithium-ion battery subjected to high current discharge, Mater. Res. Innovat. 19 (2015) 156–160.

[30] Z. Rao, S. Wang, M. Wu, Z. Lin, F. Li, Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe, Energy Convers. Manage. 65 (2013) 92–97.

[31] S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, M. Fowler, R. Fraser, Uneven temperature and voltage distributions due to rapid discharge rates and different boundary conditions for series-connected LiFePO4 batteries, Int. Commun. Heat Mass Transfer 81 (2017) 210–217.

[32] H. Teng, Y. Ma, K. Yeow, M. Thelliez, An analysis of a lithium-ion battery system with indirect air cooling and warm-up, SAE Int. J. Passenger Cars – Mech. Syst. 4 (3) (2011) 1343–1357.

[33] F. He, L. Ma, Thermal management in hybrid power systems using cylindrical and prismatic battery cells, Heat Transfer Eng. 37 (6) (2016) 581–590.

[34] I. Bayraktar, Computational simulation methods for vehicle thermal management, Appl. Therm. Eng. 36 (2012) 325–329.

[35] M.R. Giuliano, A.K. Prasad, S.G. Advani, Experimental study of an air-cooled thermal management system for high capacity lithium–titanate batteries, J. Power Sources 216 (2012) 345–352.

[36] G.-H. Kim, A. Pesaran, R. Spotnitz, A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells, J. Power Sources 170 (2) (2007) 476–489.

[37] M.R. Giuliano, S.G. Advani, A.K. Prasad, Thermal analysis and management of lithium–titanate batteries, J. Power Sources 196 (15) (2011) 6517–6524.

[38] 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

[39] Q. Wang, Q. Sun, P. Ping, X. Zhao, J. Sun, Z. Lin, Heat transfer in the dynamic cycling of lithium–titanate batteries, Int. J. Heat Mass Transf. (93) (2016) 896– 905.

[40] Z. Ling, F. Wang, X. Fang, X. Gao, Z. Zhang, A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling, Appl. Energy (148) (2015) 403–409.

[41] H. Ge, J. Huang, J. Zhang, Z. Li, Temperature-adaptive alternating current preheating of lithium-ion batteries with lithium deposition prevention, J. Electrochem. Soc. 163 (2) (2016) A290–A299.

[42] A. Ritchie, W. Howard, Recent developments and likely advances in lithiumion batteries, J. Power Sources 162 (2006) 809–812.

[43] Y. Ye, L.H. Saw, Y. Shi, A.A. Tay, Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging, Appl. Therm. Eng. 86 (2015) 281–291.

[44] M.J Isaacson, R.P Hollandsworth, P.J Giampaoli, F.A Linkowsky, A. Salim, V.L Teofilo, Advanced Lithium-ion battery charger, in: Battery Conference on Applications and Advances, 2000, pp. 193–198. [45] J. McDowall, P. Biensan, M. Broussely, Industrial Lithium-ion battery safetyWhat are the tradeoffs?, in: Telecommunications Energy Conference, 2007

[46] Y. Xing, Q. Miao, K.-L. Tsui, M. Pecht, Prognostics and health monitoring for lithium-ion battery, in: IEEE International Conference on, 2011.

[47] X. Feng, M. Fang, X. He, M. Ouyang, L. Lu, H. Wang, M. Zhang, Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry, J. Power Sources (2014), pp. 255: 294–301.

[48] ANSYS, ‘‘ANSYS Fluent Advanced Add-On Modules,” ANSYS, Inc., November 2013.

[Online]. Available: <http://www.ansys.com>. [Accessed November 2013].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

چکیده انگلیسی

Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water-cooled large size prismatic Li-ion battery

Ali Motazedian[1], Mostafa Omidi Bidgoli[2*]

[1]Department of Mechanical Engineering, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran
[*2]Department of Mechanical Engineering, Badroud Branch, Islamic Azad University, Badroud, Iran

Received: 2021.11.29 Accepted: 2022.06.12

Abstract

Car electrification is being promoted as a potential alternative to reducing carbon intensity in transportation. Lithium-ion batteries are suitable for hybrid electric vehicles (HEVs) and pure electric vehicles (EVs), and temperature control in lithium batteries is critical for long-term performance and durability. Unfortunately, battery thermal management (BTM) has not received much attention due to poor understanding of battery thermal behavior. Cell performance changes dramatically with temperature, but improves with temperature if a proper operating temperature window is maintained. This article provides an overview of two aspects that are the development of battery thermal model and thermal management strategies. The thermal effects of lithium ion batteries in terms of heat escape and response at cold temperatures are studied and heat generation methods are discussed with the aim of accurate thermal analysis of the battery. In addition, current BTM strategies used by automotive suppliers will be reviewed to identify imposing challenges and significant gaps between research and practice. Optimizing existing BTMs and exploring new technologies are needed to reduce the thermal effects of the battery, and efforts to prioritize BTMs should be made to improve temperature uniformity throughout the battery pack, increase battery life, and increase the safety of large packages. Based on the paired model of a three-dimensional thermal model, the thermal behaviors of lithium-ion batteries under discharge-charge cycle with different currents are investigated.

Key words: Thermal simulation, mini-channel cold plate, lithium battery

*corresponding author: mostafaomidibidgoli@gmail.com

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6]

Cite this article as: Ali Motazedian, Mostafa Omidi Bidgoli.. Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water-cooled large size prismatic Li-ion battery, 2022, 9(3), 1-21.
DOR**:** 20.1001.1.20089813.1401.9.3.1.6