



Original Research

Numerical investigation on improvement of cooling system based on heat pipe for LCO battery by using NTGK model

Naiemeh Nikroo, Ali Qasemian*, Mohammad Ghaedi Kachooee

School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Thermal Management System
Battery
Heat Pipe
NTGK Electrochemical Model
Lithium-ion Battery

ABSTRACT

Nowadays, due to environmental concerns and the hope of limiting the phenomenon of pollution in mega-cities, the development of electric vehicles is one of the priorities of the modern industrial world. Lithium batteries are the main type of batteries used in electric cars. Temperature is one of the most effective parameters on the performance of these batteries because it can change their chemical behavior. Due to the necessity of battery operation in a suitable temperature range and with uniform temperature distribution, it is necessary to adopt a suitable and optimal cooling method with efficiency and reliability at all three levels of cell, module, and battery pack. One of the passive methods for thermal management in batteries is the use of a heat pipe. The purpose of this research is to use a new arrangement for the heat pipe in a battery module and study its temperature effects with the help of 3D thermal model simulation and an electrochemical model (NTGK) to simulate this system. The results of this study indicate that this new arrangement can improve the temperature uniformity distribution of the battery module by 4.1%.



© 2024 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: qasemian@iust.ac.ir (A. Qasemian)

Received 28 Mar 2024; Accepted 21 Apr 2024

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Nikroo N, Qasemian A, Ghaedi Kachooee M. Numerical investigation on improvement of cooling system based on heat pipe for LCO battery by using NTGK model. The Journal of Engine Research. 2024 Jun 21;71(2):69-90. doi: [10.22034/ER.2024.2025010.1033](https://doi.org/10.22034/ER.2024.2025010.1033)

بررسی عددی بهبود سامانه خنک‌کاری بر مبنای لوله حرارتی برای انباره LCO با استفاده از الگوی NTGK

نعیمه نیک‌رو، علی قاسمیان*، محمد قائدی کچوئی

دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

امروزه با توجه به دغدغه‌های محیط زیستی و با امید به محدود کردن پدیده آلاینده‌گی در کلان‌شهرها، توسعه خودروهای برقی از جمله اولویت‌های جهان صنعتی مدرن است. انباره لیتیومی اصلی‌ترین نوع انباره مورد استفاده در خودروی الکتریکی است. دما، یکی از فراسنج‌های بسیار مؤثر بر عملکرد این انباره‌ها است، به دلیل اینکه قادر به ایجاد تغییر رفتار شیمیایی در آن‌ها است. نظر به لزوم عملکرد انباره در بازه دمایی مناسب و با توزیع دمایی یکنواخت، اتخاذ یک روش مناسب و بهینه خنک‌کاری با راندمان و قابلیت اطمینان در هر سه سطح واحد ساختاری، پودمان و مجموعه انباره ضروری است. یکی از روش‌های غیرفعال برای مدیریت حرارتی در انباره‌ها استفاده از لوله حرارتی است. هدف این پژوهش استفاده از یک چپش جدید برای لوله حرارتی در یک پودمان انباره و مطالعه اثرات دمایی آن به کمک شبیه‌سازی الگوی حرارتی سه‌بعدی و یک الگوی الکتروشیمیایی (NTGK) برای شبیه‌سازی این مجموعه است. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که این چپش جدید می‌تواند بهبودی به مقدار ۴٫۱٪ را در توزیع یکنواخت دمای پودمان انباره حاصل نماید.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

سامانه مدیریت حرارتی
انباره
لوله حرارتی
الگوی الکتروشیمیایی NTGK
انباره لیتیوم یونی



© 2024 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

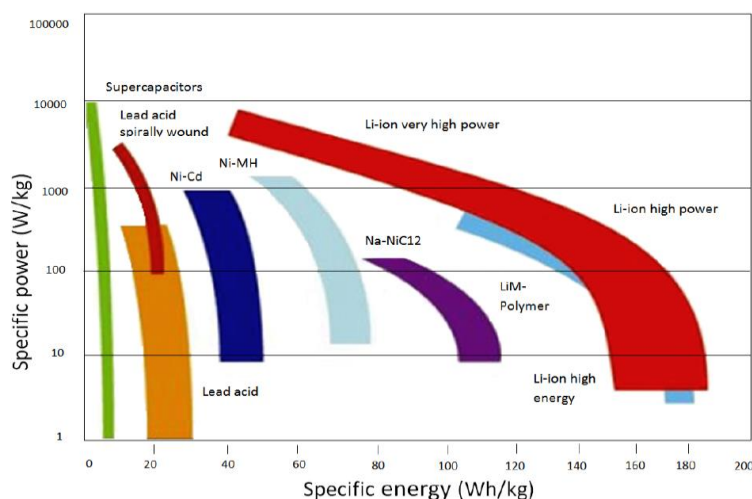
پست الکترونیکی: qasemian@iust.ac.ir (علی قاسمیان)

دریافت ۹ فروردین ۱۴۰۳؛ پذیرش ۲ اردیبهشت ۱۴۰۳
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Nikroo N, Qasemian A, Ghaedi Kachooee M. Numerical investigation on improvement of cooling system based on heat pipe for LCO battery by using NTGK model. The Journal of Engine Research. 2024 Jun 21;71(2):69-90. doi: 10.22034/ER.2024.2025010.1033

۱- مقدمه

امروزه باتوجه به رویکردی که کشورهای مختلف در راستای توافقنامه پاریس^۱، در جهت حرکت به سمت انتشار صفر کربن دی‌اکسید^۲ و کند کردن روند گرمایش زمین^۳ به‌وسیله کاهش اثر گازهای گلخانه‌ای^۴ در پیش گرفته‌اند و از طرفی استفاده بی‌رویه از سوخت‌های سنگواره‌ای، موجب کاهش این منابع شده است، توسعه خودروی برقی و دورگه یکی از گزینه‌هایی است که مورد توجه مراکز تحقیقاتی و صنعتی قرار گرفته است [۱-۳]. خودروهای برقی برای تأمین انرژی قوای محرکه خود از انباره استفاده می‌کنند. یکی از بخش‌های چالش برانگیزی که می‌تواند عامل محدودکننده رشد و توسعه این خودروها باشد، رفتار حرارتی منبع ذخیره‌سازی انرژی آن‌هاست. این عامل، روی عملکرد کلی خودرو و طول عمر انباره به‌خصوص در نرخ تخلیه‌های بالا اثر زیادی دارد [۴]. در حال حاضر، انباره لیتیوم یونی^۵ باتوجه به ویژگی‌های همچون انرژی مخصوص و توان مخصوص بالاتر، چگالی انرژی بالاتر، قابلیت تغذیه سریع، نرخ کند خود تخلیه بودن و عمر طولانی در قیاس با سایر انواع انباره‌ها، در خودروهای برقی به‌طور عمده به‌کار می‌رود (شکل ۱) [۵، ۶].



شکل ۱ توان و انرژی مخصوص برای انواع متفاوت انباره [۶]

دما، یکی از مهم‌ترین فراسنج‌هایی^۶ است که بر عملکرد انباره‌های لیتیوم یون تأثیر می‌گذارد، زیرا رفتار شیمیایی آن‌ها را تغییر می‌دهد. طبق قانون آرنیوس^۷، سرعت واکنش به طور تصاعدی با افزایش دما افزایش می‌یابد که منجر به افزایش سرعت پیری^۸ در واحد ساختاری^۹ انباره می‌شود [۴]. مشخص است که هر چه نرخ تغذیه و تخلیه بیشتر باشد، دما بیش‌تر افزایش می‌یابد. دمای بالا (حدود ۵۰°C) روی واحد ساختاری انباره باعث حل شدن لایه مرزی جامد^{۱۰} و خوردگی سطح آند توسط الکترولیت می‌شود. در نتیجه آن، نفوذپذیری لایه مرزی جامد انباره لیتیوم یونی کم می‌شود و روند میان‌لایش^{۱۱} را محدود می‌کند و در نتیجه ظرفیت توان تولیدی کاهش می‌یابد [۷، ۸]. یک سامانه مدیریت حرارتی^{۱۲}

1 PARIS Agreement, 2015
 2 Moving Toward Zero Emission
 3 Global Warming
 4 Greenhouse Gases (GHG) Emissions
 5 Lithium-ion Battery
 6 Parameters
 7 Arrhenius
 8 Aging
 9 Cell
 10 Solid Electrolyte Interface (SEI)
 11 Intercalation
 12 Thermal Management System (TMS)

خوب، سامانه‌ای است که دمای بیشینه واحد ساختاری‌های انباره را در یک بازه مناسب نگه دارد و اختلاف دما در سطح پودمان^۱ را کاهش دهد. در حالت کلی، دمای بسیار بالا و یا بسیار پایین و اختلاف دمایی زیاد منجر به بروز ناپایداری و نارتزایی بین مقاومت‌های داخل انباره و ظرفیت آن‌ها می‌شود. این موضوع سبب ایجاد خطا در تخمین شرایط انباره با فراسنجهای قابل تنظیم همچون وضعیت تغذیه^۲ و وضعیت سلامت^۳ آن می‌باشد. بهینه‌ترین بازه دمایی کاری برای انباره لیتیومی بین ۴۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد است و اختلاف دما در پودمان انباره نیز باید کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد باشد [۹].

موضوع خنک‌کاری و مدیریت حرارتی از دیرباز در موتورهای احتراق داخلی مورد توجه پژوهشگران بوده است [۱۰]. امروزه با گسترش خودروهای برقی نیز این موضوع اهمیت دوچندانی یافته است. از سامانه مدیریت حرارتی انباره در خودروهای برقی با هدف مدیریت رفتار حرارتی انباره در سطوح واحد ساختاری، پودمان و مجموعه انباره استفاده می‌شود [۴]. البته باید توجه داشت که این سامانه هم‌زمان بتواند بین عملکرد مناسب و کمترین وزن و ابعاد ممکن برای مفهوم کوچک‌سازی^۴ در وسایل برقی و کمترین هزینه، تعادل و مصالحه^۵ برقرار کند. انواع سامانه‌های خنک‌کاری قابل استفاده در خودروهای برقی شامل سامانه‌های فعال^۶ و غیرفعال^۷ و سامانه مدیریت حرارتی ترکیبی^۸ است [۴].

در بین انواع سامانه‌های متداول خنک‌کاری، لوله‌های حرارتی مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. از جمله مزایای لوله حرارتی، وزن اندک، مقدار بسیار اندک مقاومت حرارتی و در نتیجه اختلاف دمای ناچیز در طول لوله حرارتی و ذاتاً غیرفعال بودن آن‌ها که منجر به عملکردشان بدون نیاز به منبع توان می‌شود، می‌توان اشاره نمود. کاربرد خودرویی لوله حرارتی همچنان محل تحقیق و توسعه است، اما این تجهیزات در بازه وسیعی از وسایل برقی و فضایی به کار می‌روند. لوله‌های حرارتی برای اولین بار توسط گوگلر^۹ در سال ۱۹۴۲ معرفی شده‌اند [۱۱].

یکی از اولین تحقیقاتی که کاربرد لوله‌های حرارتی در سامانه مدیریت حرارتی خودروی برقی را پیش‌بینی نموده است، پژوهش NREL^{۱۰} ایالات متحده در سال ۲۰۰۲ است [۱۲]. علی‌رغم اینکه در این پژوهش، لوله حرارتی به طور خاص برای خودروهای برقی در نظر گرفته نشده است، اما به طور تجربی پتانسیل استفاده از آن‌ها در تجهیزات مورد استفاده در خودروی برقی، با هدف کاهش مصرف بار جانبی، مصرف سوخت و آلاینده‌گی را بررسی نموده است. در این پژوهش مشخص شد که در آب و هوای گرم، لوله‌های حرارتی باعث کاهش دمای سطح صاف تجهیزات تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد و همچنین کاهش دمای کابین به مقدار ۱۰-۴ درجه سانتی‌گراد در هنگام توقف طولانی مدت خودرو می‌شود. ام.اس.وو^{۱۱} و همکارانش [۱۳]، در سال ۲۰۰۲، اولین پژوهش مرتبط با استفاده از لوله حرارتی در سامانه مدیریت حرارتی خودروی برقی را با توسعه یک الگوی دوبعدی برای ارزیابی توزیع دمای مجموعه انباره در جهات مختلف نسبت به عمق تخلیه^{۱۲} انباره انجام دادند. در این پژوهش، از لوله‌های حرارتی برای بهبود حذف گرما استفاده شد و همچنین برای اولین بار پیچیدگی و دشواری خنک‌کاری یکنواخت واحد ساختاری انباره مشاهده شد.

گرکو^{۱۳} و همکاران [۱۴]، با توسعه یک الگوی عددی یک‌بعدی، یک سامانه مدیریت حرارتی انباره با ۱۸ عدد لوله حرارتی استوانه‌ای که با استفاده از آمونیاک به سطح واحد ساختاری منشوری^{۱۴} سخت فشرده شده بود، را شبیه‌سازی

1 Module

2 State of Charge (SOC)

3 State of Health (SOH)

4 Miniaturization

5 Compromising

6 Active

7 Passive

8 Hybrid Battery Thermal Management (HBTMS)

9 Gaugler

10 National Renewable Energy Laboratory (NREL)

11 M.S. Wu

12 Depth of Discharge (DOD)

13 Greco

14 Prismatic Cell

نموده‌اند. این الگو تنها از طریق نتایج CFD اعتبارسنجی شد. نتایج در مقایسه با انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری بیشینه کاهش دما را ۲۳٫۹ درجه سانتی‌گراد نشان داد.

واروود^۱ و همکاران [۱۵]، در پژوهشی، با توجه به خواص هدایت حرارتی بسیار ناهمسان‌گرد^۲ واحد ساختاری‌های استوانه‌ای، یک سامانه مدیریت حرارتی با تمرکز بر خنک‌کاری تب‌های واحد ساختاری انباره، پیشنهاد کردند که در آن یک لوله حرارتی با قطر ۳ میلی‌متر در داخل یک واحد ساختاری انباره استوانه‌ای قرار دارد و بخارکننده و چگالنده لوله حرارتی به یک صفحه ۲ میلی‌متری پخش‌کننده حرارت آلومینیومی متصل شده است. این سامانه، وزن واحد ساختاری را ۱۱٫۷٪ افزایش داد. کلینر^۳ و همکاران [۱۶]، یک الگوی برقی-گرمایی سه‌بعدی که به صورت تجربی اعتبارسنجی شده است، توسعه داده‌اند. برای تحلیل مقدار خنک‌کاری لوله حرارتی در این سامانه، لوله حرارتی بر روی تب‌های انباره که دمای انتهای آن‌ها روی ۳۰°C ثابت شده است، متصل شده‌اند. این سامانه منجر به کاهش دمای ناحیه فعال واحد ساختاری به مقدار ۴٫۳°C و همچنین کاهش غیریکنواختی حرارتی شد.

پاچرا^۴ و همکاران [۱۷]، در پژوهشی واحد ساختاری انباره لیتیوم کبالت را مورد بررسی عددی و همچنین تجربی قرار دادند تا بتوان رفتار حرارتی آن را با استفاده از الگوی مناسب پیش‌بینی نمود و روشی برای توصیف پدیده‌های برقی-حرارتی انباره ارائه نمود. در این راستا سه رویکرد عددی اتخاذ شده است، یک الگوی ظرفیت فشرده حرارتی^۵، یک الگوی دینامیک سیالات محاسباتی سه‌بعدی، و یک الگوی الکتروشیمیایی مبتنی بر معادلات نیومن^۶، تایدمن^۷، گو^۸ و کیم^۹ (NTGK). در ادامه نتایج شبیه‌سازی‌های این پژوهش با آزمایش‌های تجربی مربوط به دمای سطح واحد ساختاری در تخلیه با جریان ثابت و تحت یک چرخه رانندگی بزرگراه تأیید و اعتبارسنجی شدند. نتایج این پژوهش مؤید آن است که هر سه الگوی به کار رفته با اندازه‌گیری‌های دمایی تجربی سازگار هستند و روش الکتروشیمیایی در الگوی NTGK خطای کمتری در حد ۰٫۵°C دارد.

شتی^{۱۰} و همکاران [۱۸]، در پژوهشی، یک واحد ساختاری ۲۶۶۵۰ بر اساس الگوی NTGK برای ارزیابی بیشینه دمای واحد ساختاری بررسی کرده‌اند. علاوه بر این، یک سامانه مدیریت حرارتی انباره با استفاده از یک صفحه خنک‌کننده مایع شامل سه مسیر طراحی شده است که با سطح واحد ساختاری در تماس است. بیشینه دمای واحد ساختاری در سه نرخ تخلیه متفاوت بررسی شده است که نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد، استفاده از این سامانه جدید موجب کاهش چشمگیر بیشینه دمای واحد ساختاری نسبت به یک واحد ساختاری بدون سامانه می‌گردد.

وانگ^{۱۱} و همکاران [۱۹]، در پژوهشی، با استفاده از روش‌های آماری و تجزیه و تحلیل حساسیت، فراسنج‌های مؤثر بر عملکرد یک سامانه مدیریت حرارتی شامل ۳ عدد انباره استوانه‌ای و ۶ عدد لوله حرارتی به همراه یک محفظه سیال را بررسی نموده‌اند. چهار فراسنج مؤثر بر عملکرد حرارتی این سامانه شامل فاصله انباره‌ها، ضخامت جزء اتصال انباره و لوله حرارتی، زاویه محیطی بین انباره و جزء اتصال و ارتفاع جزء اتصال بررسی شده است که در این میان فراسنج ارتفاع جزء اتصال بیشترین اثر را روی عملکرد حرارتی سامانه دارد. براساس طراحی سامانه با فراسنج‌های بهینه به دست آمده، بیشینه دمای واحد ساختاری و اختلاف دمای پودمان انباره به ترتیب ۲۷٫۶۲°C و ۱٫۰۸°C به دست آمده است.

1 Worwood

2 Anisotropic

3 Kleiner

4 Paccha-Herrera

5 Thermal Lumped Model

6 Newman

7 Tiedemann

8 Gu

9 Kim

10 Shetty

11 Wang

گان^۱ و همکاران [۲۰]، با استفاده از یک الگوی مدار معادل حرارتی^۲، یک سامانه مدیریت حرارتی شامل ۳ انباره و ۶ لوله حرارتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. این سامانه طراحی شده، می‌تواند در مقایسه با یک سامانه خنک‌کاری طبیعی، دمای انباره را در حدود ۱۴ °C، در نرخ تخلیه ۵C کاهش دهد. الگوی توسعه داده شده با مقادیر تجربی اعتبارسنجی شده است و نتایج مؤید این نکته است که این الگو با خطای زیر ۵٪ تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد.

با بررسی مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه مشاهده می‌شود که اثر جانمایی و تغییرات هندسی از جمله طول چگالنده لوله حرارتی بر روی توزیع دمایی واحد ساختاری‌های انباره در یک پودمان انباره مورد مطالعه دقیقی قرار نگرفته است. در این پژوهش، با توجه به مطالعات پیشین در این حوزه، یک سامانه مدیریت حرارتی بر مبنای لوله حرارتی برای یک پودمان انباره استوانه‌ای، با استفاده از یک الگوی حرارتی نیمه‌تجربی^۳ NTGK بررسی شده است. دما برای یک واحد ساختاری در نرخ تخلیه ۱,۵C و جریان ثابت ۶ آمپر محاسبه گردیده است. پس از اعتبارسنجی الگوی حرارتی برای یک واحد ساختاری، این واحد ساختاری در یک پودمان ۱۲ عددی به همراه سامانه خنک‌کاری با لوله حرارتی نیز بررسی شده است و دو چینش متفاوت برای قسمت چگالنده لوله حرارتی برای بهبود سامانه خنک‌کاری طراحی گردیده است. همچنین در پژوهش‌های پیشین، این سامانه برای سه عدد انباره طراحی شده بود که در این پژوهش، برای ۱۲ عدد واحد ساختاری شبیه‌سازی انجام شده تا اثر خنک‌کاری تغییرات چگالنده لوله‌های حرارتی بهتر مشاهده شود. برای اعتبارسنجی این سامانه نیز از نتایج آزمون‌های تجربی و عددی پژوهش‌های پیشین استفاده گردیده است. در نتیجه این پژوهش، نمودارهای دمایی پودمان برای هر سه چیدمان استخراج گردیده و مطالعه قیاسی صورت گرفته و سامانه بهینه انتخاب شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- هندسه واحد ساختاری انباره

هندسه مورد استفاده برای انباره لیتیوم یونی از پژوهش مرجع [۱۷] استخراج شده است. در شکل ۲ تجهیزات آزمون تجربی مرجع [۱۷] نمایش داده شده است. این واحد ساختاری، یک انباره لیتیوم کبالت (LCO) ۲۶۶۵۰ است. برای بررسی این واحد ساختاری از نرم‌افزار Ansys Fluent 2021 استفاده شده است. مقادیر مربوط به ضخامت اجزای آند و کاتد و ناحیه فعال باتری که از مفروضات مورد نیاز برای استفاده از الگوی NTGK است از پژوهش [۱۸] استخراج گردیده است (شکل ۳ و ۴)

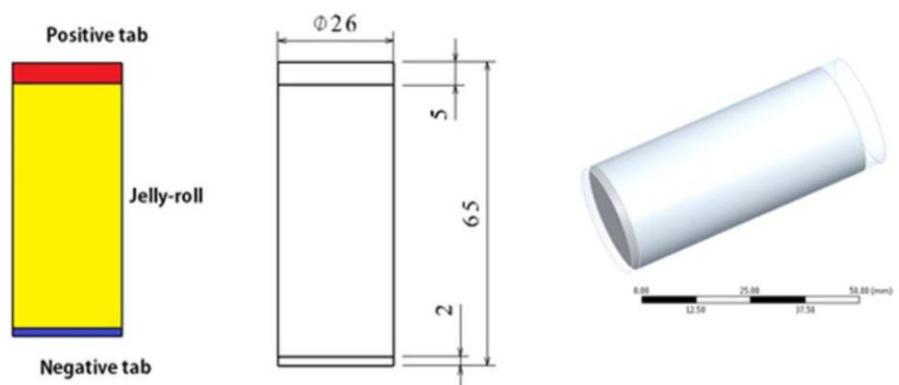


شکل ۲ تجهیزات آزمون انباره پژوهش [۱۷]

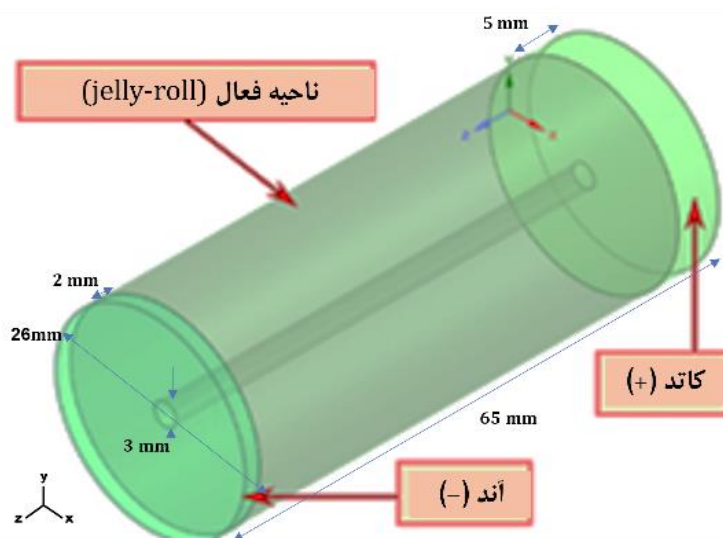
¹ Gan

² Thermal-Electrical Equivalent Circuit Model (TECM)

³ Semi-Empirical Electrochemical Model



شکل ۳ واحد ساختاری ۲۶۶۵۰ مورد بررسی در پژوهش [۱۸]



شکل ۴ هندسه واحد ساختاری انباره مورد استفاده [۱۷، ۱۸]

۲-۲- الکوسازی انباره

الگوی حرارتی انباره

الگوی حرارتی مورد استفاده در این انباره، یک الگوی سه‌بعدی CFD است که معادله حاکم آن، معادله انرژی انباره است [۱۷].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_e) + \nabla \cdot (v \rho h_e) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (1)$$

$$h_e = \int c_p dT \quad (2)$$

که ρ چگالی، h_e آنتالپی، c_p ظرفیت گرمایی ویژه، k ضریب هدایت حرارتی، T دما، S_h چشمه تولید حرارت داخلی انباره و v سرعت سیال است. در این مطالعه، به‌جای حل معادلات سیال، یک ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی تجربی با مقدار $12.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ، مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوی حرارتی با مقادیر اولیه و حل معادله انرژی، توزیع دما در انباره محاسبه می‌شود [۱۷].

در ادامه یک الگوی NTGK بر اساس پژوهش پیشین [۱۷]، برای شبیه‌سازی حرارت تولیدی داخل انباره روی این واحد ساختاری پیاده‌سازی شد. این الگو بر مبنای چارچوب مقیاس‌ها و دامنه‌های چندگانه^۱ میدان جریان برقی و حرارتی

¹ Multi-Scale Multi-Domain (MSMD)

در یک انباره را محاسبه می‌کند. به این معنی که یک واحد ساختاری انباره لیتیوم یونی، مقیاس‌هایی با مرتبه نانومتری برای دامنه‌هایی که درگیر حل معادلات واکنش‌های شیمیایی انباره هستند، تا مقیاس‌های چند میلی‌متری در دامنه‌هایی که مختص حل معادلات انتقال حرارتی، سیالاتی و یا برقی هستند را، شامل می‌شود [۲۱].

الگوی NTGK در ابتدا با پژوهش تایدمن و نیومان که توسعه الگویی یک‌بعدی بود، شروع شد [۲۲]. در ادامه گو و همکاران [۲۳]، این الگو را بهبود و سپس کیم و همکاران [۲۴]، آن را به صورت دوبعدی توسعه داده‌اند. برای استفاده از این الگو، واحد ساختاری انباره به سه جزء تقسیم می‌شود: آند (تب منفی)، کاتد (تب مثبت) و ناحیه فعال انباره که بین این دو قسمت قرار دارد (جدول ۱).

جدول ۱ مشخصات انباره لیتیوم کبات ۲۶۶۵۰ با رویکرد MSMD [۱۷]

ویژگی	ناحیه فعال	قطب مثبت	قطب منفی
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۲۲۲۶	۲۷۱۹	۸۰۳۰
ظرفیت حرارتی ویژه (ژول بر کیلوگرم کلونین)	۱۱۹۷	۸۷۱	۵۰۲,۴۸
ضریب رسانایی حرارتی (وات بر متر کلونین) شعاعی، مماسی، محوری	۰.۸ و ۲۷ و ۲۸	۲۰۲,۴	۱۶,۲۷
رسانایی برقی (زیمنس بر متر)	.	۳۵۴۱۰۰۰۰	۸۳۳۰۰۰۰

در الگوی NTGK معادله حاکم بر انباره به شرح زیر است [۱۷]:

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} - \nabla \cdot (k_c \nabla T) = \sigma_{pos} |\nabla \phi_{pos}|^2 + \sigma_{neg} |\nabla \phi_{neg}|^2 + q_{ech} \quad (۳)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{pos} \nabla \phi_{pos}) = -j \quad (۴)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{neg} \nabla \phi_{neg}) = j \quad (۵)$$

که در آن σ رسانایی برقی، ϕ پتانسیل برقی، pos و neg به ترتیب نماد الکتروود مثبت و منفی می‌باشند. در این رابطه، j بیانگر نرخ انتقال حجمی جریان است که از معادله ۶ به دست می‌آید که در آن Vol حجم ناحیه فعال، C_{ref} ظرفیت انباره است که برای به دست آوردن ضرایب U و Y به کار می‌رود. این ضرایب با استفاده از ابزار تخمین فرانسج^۱ در نرم‌افزار فلوئنت با استفاده از آزمایش تخلیه کردن انباره به دست می‌آیند. با استفاده از فرانسج عمق تخلیه (DOD)، این توابع با روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند. ثوابت C_1 و C_2 برای هر انباره متفاوت هستند که از مقادیر پیش فرض نرم‌افزار استفاده شده است (برای C_1 مقدار ۱۸۰۰ و برای C_2 مقدار $(-۰,۰۰۰۹۵)$ و T_{ref} دمای مرجع است. در نهایت نیز حرارت مربوط به واکنش الکتروشیمیایی با استفاده از رابطه ۹ محاسبه می‌شود [۲۵، ۲۶].

$$j = \frac{C_N}{C_{ref} Vol} Y [U - (\phi_{pos} - \phi_{neg})] \quad (۶)$$

$$U = \left(\sum_0^5 a_n (DOD)^n \right) - C_2 (T - T_{ref}) \quad (۷)$$

$$Y = \left(\sum_0^5 b_n (DOD)^n \right) \exp \left[-C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (۸)$$

$$q_{ec} = j \left[U - (\phi_{pos} - \phi_{neg}) - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (۹)$$

در جدول ۲ مقادیر مورد استفاده الگوی NTGK در این پژوهش بیان شده است [۱۷].

¹ Parameter estimation tool in Fluent

جدول ۲ ضرایب مورد استفاده در الگوی NTGK [۱۷]

توابع	ضرایب					
U	a0	a1	a2	a3	a4	a5
	۴,۰۶۸۲	-۱,۲۶۶۹	-۰,۹۰۷۲	۳,۷۵۵۰	-۲,۳۱۰۸	-۰,۱۷۰۱
Y	b0	b1	b2	b3	b4	b5
	۱۶,۵۰۶۶	-۲۷,۰۳۶۷	۳۳۷,۳۲۹۷	-۶۳۲,۶۰۳	۷۲۵,۰۸۲۵	-۳۰۹,۸۷۶۰

مقادیر مربوط به مشخصات هندسی و برقی انباره به کار رفته در آزمایش تجربی مقاله [۱۷]، در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳ مشخصات هندسی و برقی انباره در آزمایش تجربی [۱۷]

مقدار	مشخصه
۲۶ میلی‌متر	قطر
۶۵ میلی‌متر	ارتفاع
۰,۰۸۸ کیلوگرم	وزن (اندازه گیری شده)
LiCoO ₂	ماده کاتد
گرافیت	ماده آند
۴ آمپرساعت	ظرفیت اسمی
۴,۳ آمپرساعت	ظرفیت آزموده شده
۳,۷ ولت	ولتاژ اسمی
۲,۷۵ ولت	ولتاژ قطع
۴,۲ ولت	ولتاژ حد تغذیه
۱C	بیشینه جریان تغذیه
۲C	بیشینه جریان تخلیه
۰,۸	توانایی تابش

۲-۳- الکوسازی سامانه مدیریت حرارتی پودمان انباره

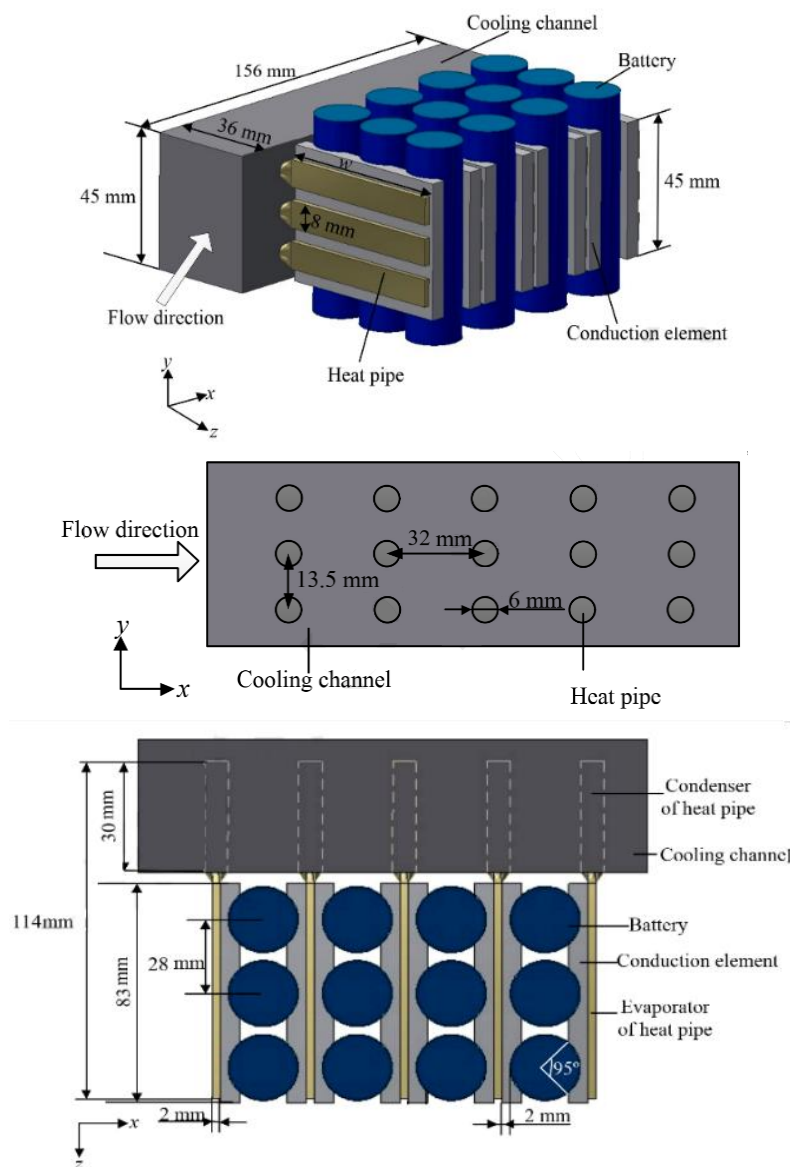
در ادامه به منظور تعمیم نتایج برای یک پودمان انباره، یک سامانه خنک‌کاری شامل ۱۲ عدد واحد ساختاری استونه‌ای و به همراه ۱۵ عدد لوله حرارتی که در قسمت تبخیرکننده نورد شده‌اند و با استفاده از ۸ عدد جزء اتصال‌دهنده با انباره در ارتباط هستند، در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۵ قسمت چگالنده لوله‌های حرارتی در یک مسیر سیال قرار داده می‌شود [۱۹، ۲۰]. مشخصات هندسی این سامانه در شکل ۵ و مشخصات فیزیکی اجزای سامانه در جدول ۴ تشریح شده است. نحوه کارکرد لوله حرارتی به این شکل است که حرکت سیال با ترکیبی از اختلاف فشار و موینگی و گرانش ایجاد می‌شود و گرما با استفاده از تغییر حالت مایع به بخار دفع می‌شود. لوله‌های حرارتی تقریباً توخالی هستند و ساختار متخلخل فتیله‌ای^۱ در دیواره داخلی آن‌ها تعبیه شده است. گرما به انتهای بخارکننده^۲ اعمال می‌شود و سیال عامل به بخار تبدیل می‌شود و این بخار به سمت دیگر یعنی چگالنده^۳ جریان می‌یابد که این بخش در تماس با یک منبع سرد است. در نتیجه گرما دفع می‌شود و

¹ Weak

² Evaporator

³ Condenser

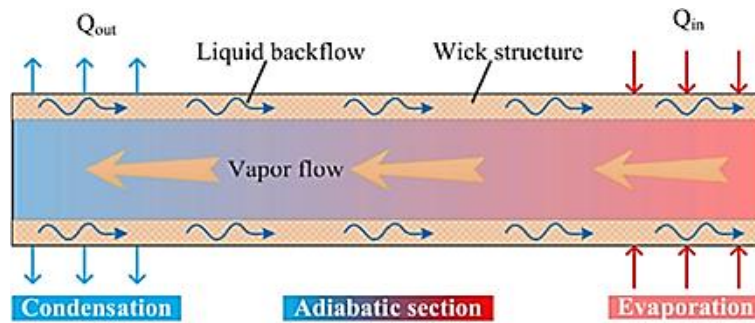
چگالش رخ می‌دهد (شکل ۶) [۲۷]. یکی از مهم‌ترین مزایای رقابتی که لوله حرارتی در مقایسه با دیگر روش‌های خنک‌کاری دارد، برخوردار بودن از ضریب انتقال حرارت بسیار بالا و درعین حال وزن کم است. در پژوهش حاضر، به دلیل اجتناب از پیچیدگی و مشابه دیگر پژوهش‌های کاربردی انجام شده مانند [۱۹، ۲۰]، لوله حرارتی به‌عنوان یک جزء جامد با ضریب هدایت حرارتی معادل^۱ بسیار بالا در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، بررسی و مطالعه پدیده‌های داخل لوله حرارتی موضوع تحقیق نیست؛ بلکه صرفاً اثر خنک‌کاری و انتقال حرارت آن، در همین شرایط عملکردی تشریح شده، ملاک است [۱۹].



شکل ۵ مشخصات هندسی سامانه خنک‌کاری مورد بررسی [۱۹، ۲۰]

در جدول ۴ مقدار ضریب رسانایی حرارتی معادل برای لوله‌های حرارتی بیان شده است. همچنین در شکل ۷ شمای کلی آن قابل مشاهده است. این اطلاعات طبق پژوهش تجربی و عددی انجام شده در مرجع [۱۹] استفاده شده است.

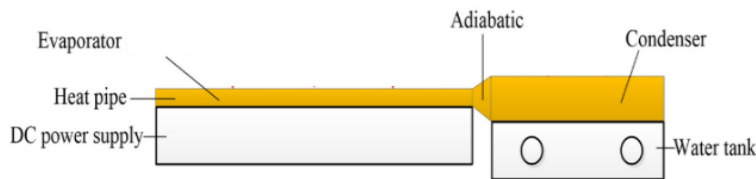
¹ Equivalent Thermal Conductivity



شکل ۶ شماتیک عملکرد لوله حرارتی [۲۷]

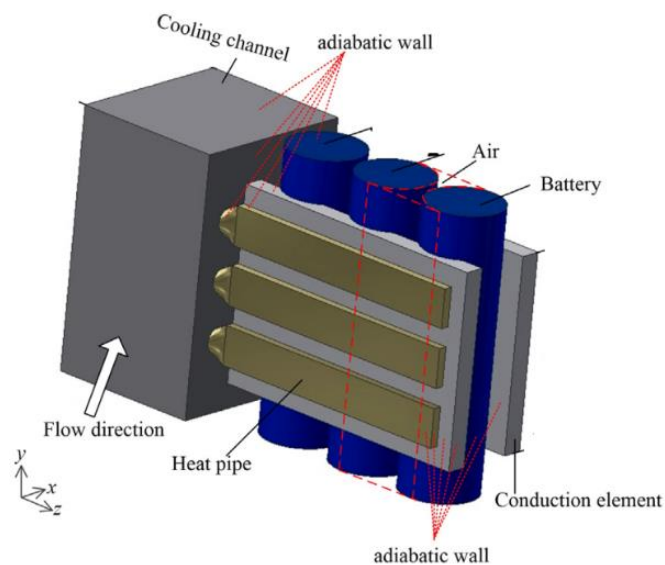
جدول ۴ مشخصات اجزا به کاررفته در سامانه خنک‌کاری [۱۹]

ماده	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر کیلوگرم کلوین)	ضریب رسانایی حرارتی (وات بر متر کلوین)
جزء اتصال بین انباره و لوله حرارتی	۲۷۱۹	۸۷۱	۲۰۲,۴
لوله حرارتی	۴۰۰۰	۴۰۰	۹۲۱۶
آب	۹۹۸,۲	۴۱۲۸	۰,۶



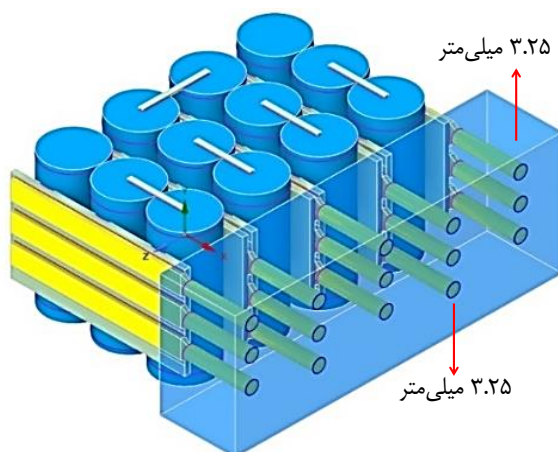
شکل ۷ تصویر کلی لوله حرارتی مورد استفاده [۱۹]

شرایط مرزی حاکم بر این مسئله، در شکل ۸ قابل مشاهده است. ضمناً شار حجمی سیال ورودی ۲ لیتر در دقیقه و دمای محیط ۲۵ درجه است [۱۹].



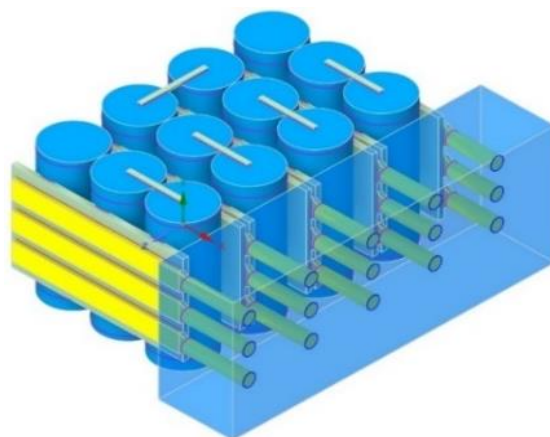
شکل ۸ شرایط مرزی حاکم بر مسئله [۱۹]

در ادامه دو نوآوری برای بهبود در مقدار دمای بیشینه و توزیع دمایی در پودمان انباره مطرح شد و اثر خنک‌کاری سیال عبوری از مسیر سیال و لوله‌های حرارتی بررسی شد. در نوآوری جابه‌جایی لوله حرارتی باتوجه به این که در پشت لوله‌های حرارتی سرعت سیال کم می‌شود و در نتیجه آن سیال با سرعت کمتری به لوله‌های حرارتی بعدی برخورد می‌کند و خنک‌کاری در آن‌ها کمتر خواهد بود، موقعیت این لوله‌ها یکی در میان عوض شده است. با جابه‌جایی این لوله‌های حرارتی و با توجه به چیدمان آن‌ها سیال با سرعت بیشتری به لوله‌های حرارتی بعدی برخورد می‌کند و خنک‌کاری در آن‌ها بهبود می‌یابد (شکل ۹). توزیع دما نیز در انباره‌ها یکنواخت‌تر می‌شود. لوله‌های حرارتی در ستون‌های فرد، به مقدار ۳٫۲۵ میلی‌متر به سمت بالا و در ستون‌های زوج، ۳٫۲۵ میلی‌متر به سمت پایین جابجا شده‌اند.



شکل ۹ نوآوری جابه‌جایی لوله‌های حرارتی

در نوآوری کوتاه‌کردن لوله حرارتی (شکل ۱۰) برای افزایش یکنواختی دما در انباره‌ها، لوله‌های حرارتی نزدیک به ورودی آب که در تماس با سیال تازه‌تر قرار دارند، کوتاه‌تر می‌شوند. با این کار سیال تازه ورودی بدون کاهش سرعت زیاد در تمامی ناحیه پشت، به لوله‌های حرارتی پشتی برخورد می‌کند. در نتیجه این سیال تازه و خنک امکان تماس بیشتر با لوله‌های حرارتی پشتی را پیدا می‌کند. در این نوآوری طول چگالنده لوله حرارتی در تماس با سیال با حرکت از سمت خروجی به سمت ورودی هر ردیف لوله حرارتی ۲ سانتی‌متر نسبت به ردیف پیشین کوتاه‌تر شده است. در این پژوهش تلاش شده است که این دو نوآوری به بوتله نقد و بررسی گذاشته شده و حالت بهینه آن‌ها انتخاب گردد.

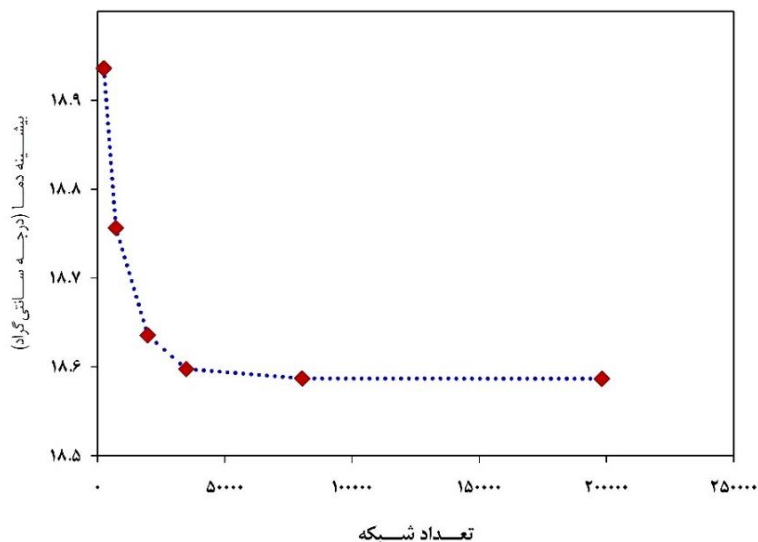


شکل ۱۰ نوآوری کوتاه نمودن لوله‌های حرارتی

۳- نتایج و بحث

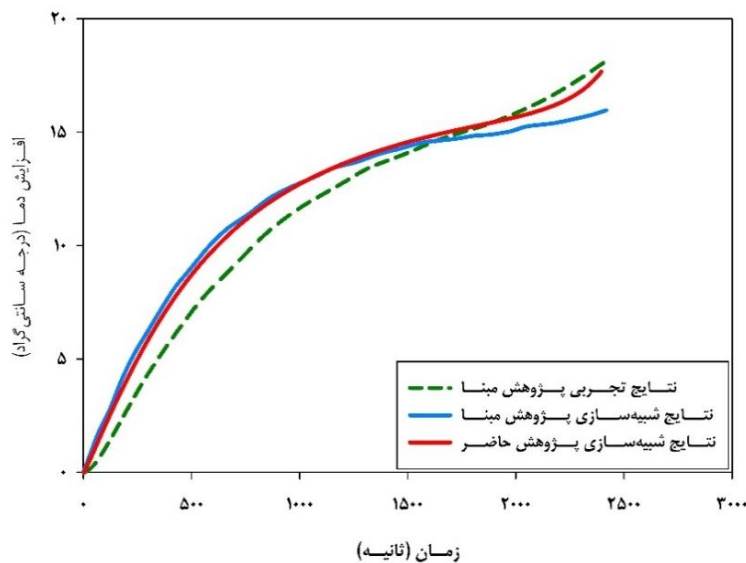
۳-۱- بررسی استقلال از شبکه و اعتبارسنجی واحد ساختاری انباره

بررسی استقلال از شبکه برای این یک واحد ساختاری مطابق شکل ۱۱ انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که از تعداد شبکه ۳۵۰۰۰ به بعد، نتایج فراسنج بیشینه دما، تقریباً ثابت می‌گردد و در نتیجه این تعداد شبکه برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی این واحد ساختاری با استفاده از الگوی NTGK مناسب است. شبکه مورد استفاده در این واحد ساختاری از نوع چندوجهی^۱ است.



شکل ۱۱ بررسی استقلال از شبکه برای یک واحد ساختاری انباره

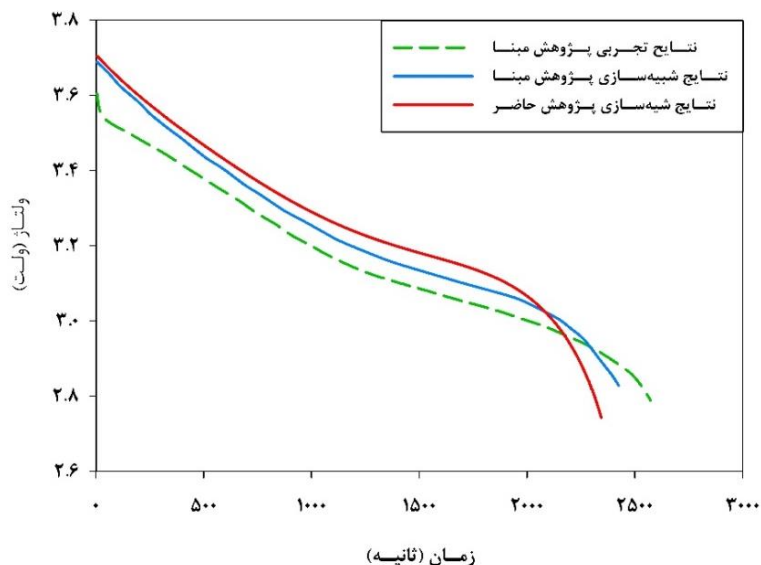
سپس مقدار افزایش دمای یک واحد ساختاری با نتایج تجربی و شبیه‌سازی مقاله مینای مرجع [۱۷] به‌عنوان اعتبارسنجی شبیه‌سازی پژوهش حاضر مقایسه شده است. شکل ۱۲ مؤید این نکته است.



شکل ۱۲ مقایسه مقدار افزایش دمای نتایج تجربی و شبیه‌سازی‌ها در نرخ تخلیه ثابت C ۱٫۵ و جریان ثابت ۶ آمپر

¹ Polyhedral

برای داشتن یک فراسنج مقایسه‌ای دیگر، رفتار برقی سامانه با استفاده از نمودار ولتاژ برحسب زمان تخلیه مطالعه گردید (شکل ۱۳). همانطور که مشاهده می‌شود نتایج تطابق خوبی با نتایج تجربی و الگوی شبیه‌سازی شده مرجع [۱۷] دارد.

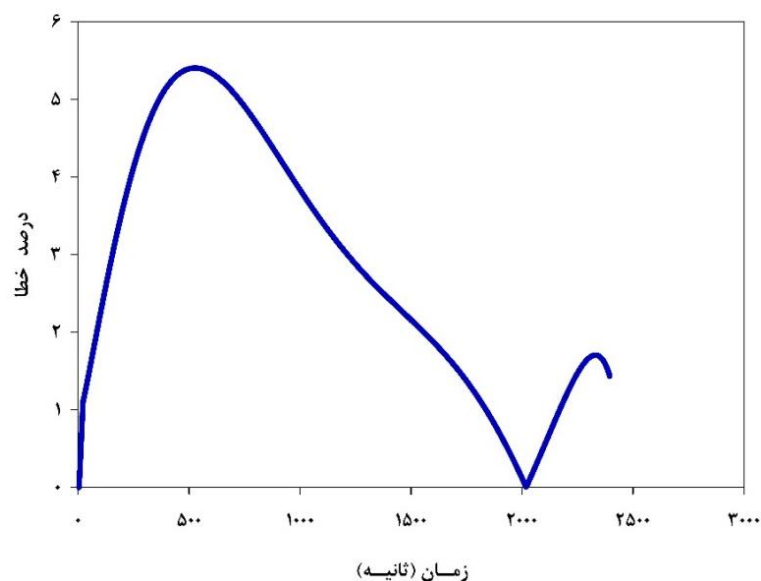


شکل ۱۳ مقایسه مقدار تغییرات ولتاژ نتایج تجربی و شبیه‌سازی‌ها در نرخ تخلیه ثابت ۱,۵ C و جریان ثابت ۶ آمپر

برای اطمینان بیشتر نسبت به شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از این الگو، خطای شبیه‌سازی بر مبنای افزایش دما مطابق رابطه ۱۰ محاسبه و گزارش شده است. بر این مبنای، مقدار خطای فراسنج افزایش دمای شبیه‌سازی نسبت به آزمایش تجربی، در طول زمان انجام شبیه‌سازی در بازه $[-۵,۴]$ درصد (مطابق شکل ۱۴) است. همانطور که در شکل ۱۴ مشخص است، نتایج با دقت مناسبی به نتایج تجربی نزدیک‌اند.

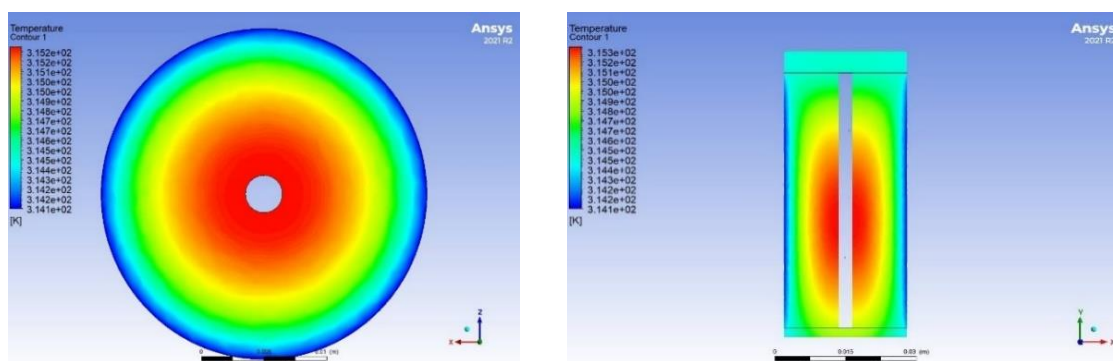
$$error = \frac{|T(t)_{inc}^{sim} - T(t)_{inc}^{exp}|}{T(t)_{inc}^{exp}} \times 100 \quad (10)$$

که در آن: $T(t)_{inc}^{sim}$ مقدار افزایش دما برحسب زمان در شبیه‌سازی و $T(t)_{inc}^{exp}$ مقدار افزایش دما برحسب زمان در آزمایش تجربی است.



شکل ۱۴ نمودار درصد خطا بر حسب زمان به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی

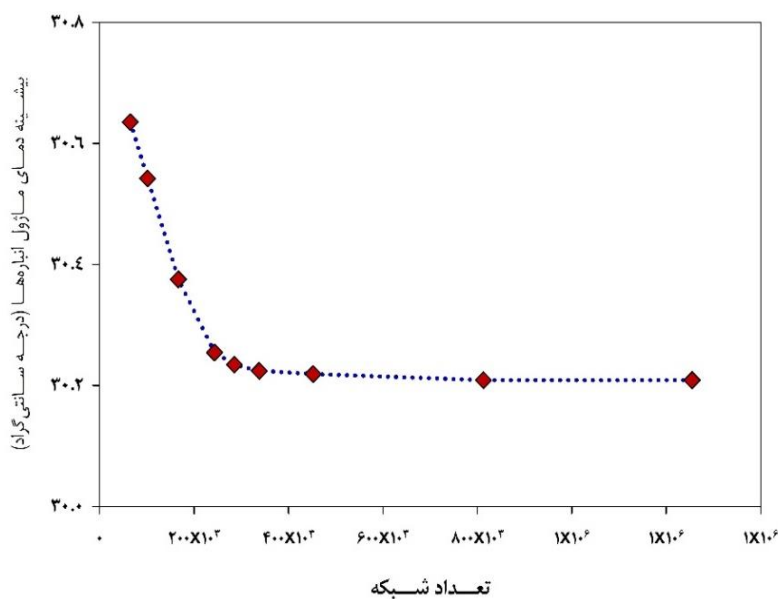
در شکل ۱۵، نمای کانتورهای توزیع دما روی واحد ساختاری مورد بررسی، نمایش داده شده است. باتوجه به اینکه برای یک واحد ساختاری استوانه‌ای، ضریب رسانایی حرارتی (k)، در سه راستای شعاعی، مماسی و محوری متفاوت است و این ضرایب روی توزیع دما در جهات مختلف اثرگذار است، تعریف درست این فراسنج به‌ویژه وقتی چندین واحد ساختاری در یک پودمان قرار دارند، اهمیت زیادی دارد. در یک واحد ساختاری استوانه‌ای، به دلیل نحوه قرارگیری مواد تشکیل‌دهنده مختلف انباره (ماده کاتد و آند و ماده الکترولیت) در کنار هم به صورت رولی، ضریب رسانایی حرارتی در راستای محوری و مماسی، اغلب بزرگ است، اما در راستای شعاعی مقدار کمی دارد، به‌طوری‌که در خیلی از موارد، قابل چشم‌پوشی است. در نتیجه در راستای شعاعی مقدار گرادیان دما بیشتر است.



شکل ۱۵ کانتورهای توزیع دما روی واحد ساختاری مورد بررسی

۳-۲- بررسی استقلال از شبکه سامانه مدیریت حرارتی پودمان انباره

برای این سامانه، آزمون استقلال از شبکه انجام شد. با توجه شکل ۱۶ و آزمون استقلال از شبکه، نتایج حاکی از آن بود که از تعداد ۸۰۰۰۰۰ شبکه به بعد، نتایج مربوط به فراسنج بیشینه دما، تقریباً ثابت می‌گردد و در نتیجه این تعداد شبکه برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی این پودمان مناسب است. شبکه مورد استفاده در این واحد ساختاری از نوع چندوجهی است.

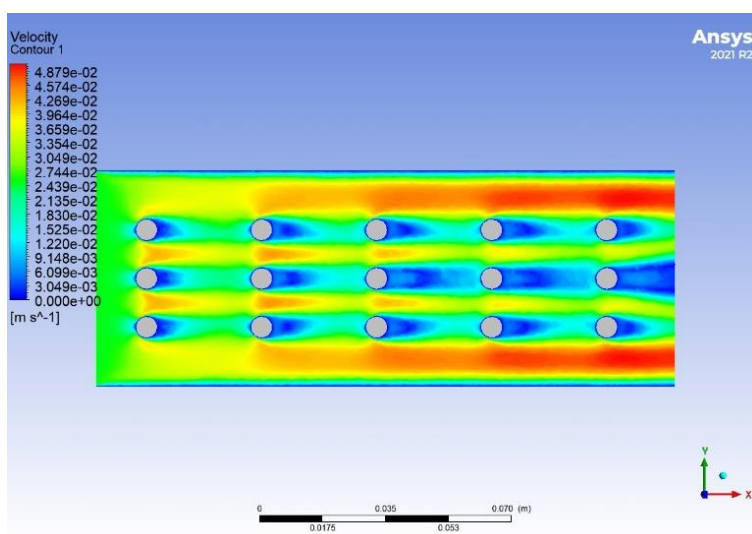


شکل ۱۶ بررسی استقلال از شبکه سامانه خنک کاری

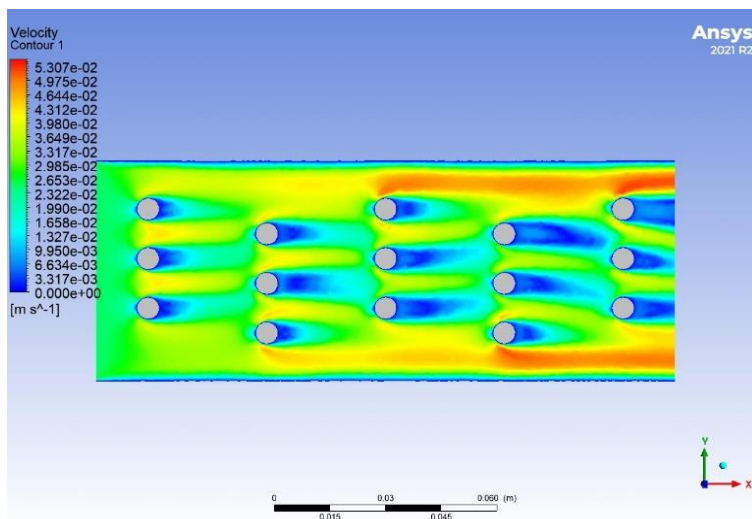
۳-۳- بررسی سرعت سیال در سامانه مدیریت حرارتی پودمان انباره

با اعمال الگوی NTGK روی این سامانه، رفتار حرارتی سامانه برای هر نوآوری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در شکل ۱۷ کانتورهای سرعت سیال در مسیر عبور سیال مشاهده می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طرح پایه (شکل ۱۷-الف) علی‌رغم وجود سیال با سرعت زیاد، به دلیل عدم برخورد این سیال خنک و تازه با لوله‌های حرارتی پشتی عملاً کارایی برای خنک‌کاری کم می‌شود. در نوآوری جابه‌جایی لوله حرارتی (شکل ۱۷-ب) با توجه به نحوه چیدمان، لوله‌های حرارتی بیشتر در مسیر عبور سیال خنک با سرعت زیاد قرار می‌گیرند و در نتیجه خنک‌کاری بهبود می‌یابد. در نوآوری کوتاه نمودن طول لوله‌های حرارتی نزدیک به ورودی سیال (شکل ۱۷-ج)، با اینکه سیال با سرعت بیشتری در جریان است اما سطح تماس کمتری بین سیال و لوله‌های حرارتی وجود دارد که این خود منجر به کاهش خنک‌کاری می‌گردد.

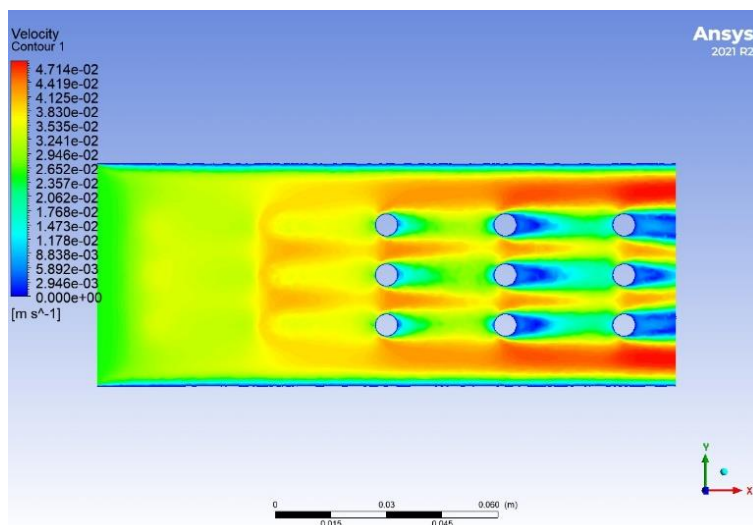


(الف)



(ب)

شکل ۱۷ کانتور سرعت سیال در سه نوآوری مختلف، (الف) طرح پایه مقاله مینا، (ب) نوآوری جابه‌جایی لوله‌های حرارتی، (ج) نوآوری کوتاه نمودن لوله‌های حرارتی



(ج)

ادامه شکل ۱۷ کانتور سرعت سیال در سه نوآوری مختلف، الف) طرح پایه مقاله مینا، ب) نوآوری جابه‌جایی لوله‌های حرارتی، ج) نوآوری کوتاه نمودن لوله‌های حرارتی

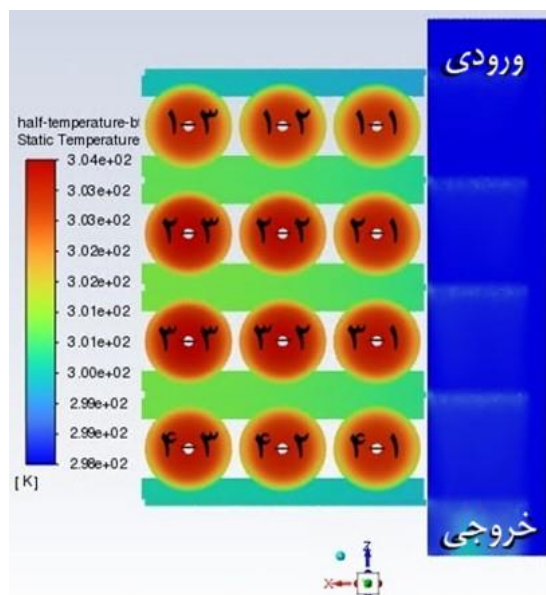
۳-۴- بررسی دما

در شکل ۱۸ نمادگذاری انباره‌ها و نتیجه حاصل از شبیه‌سازی طرح پایه قابل مشاهده است. در این شکل توزیع دما در ۱۲ واحد ساختاری با نمای برش از وسط، مشاهده می‌گردد. همانطور که انتظار می‌رفت، ردیف ابتدا و انتهای لوله‌های حرارتی در محل نزدیک به نواحی ورودی و خروجی سامانه به دلیل اینکه تنها در تماس با سه واحد ساختاری انباره هستند و گرمای همان سه واحد ساختاری را دفع می‌کنند، دمای کمتری دارند اما ردیف‌های میانی لوله‌های حرارتی به دلیل اینکه با شش واحد ساختاری انباره در تماس هستند و گرمای شش انباره را دفع می‌کنند، دمای بیشتری دارند. در داخل مسیر سیال نیز لوله‌های حرارتی نزدیکتر به ورودی سیال به دلیل تماس با سیال تازه و خنک به نسبت لوله‌های حرارتی نزدیک به خروجی دمای کمتری دارند. نکته قابل توجه در این سامانه، توزیع دمایی روی ۱۲ واحد ساختاری انباره است که نمایانگر تعریف درست ضرایب رسانایی متفاوتی متفاوت در جهت متفاوت هر واحد ساختاری انباره است. انباره‌های ردیف اول و آخر نیز خنک‌تر هستند چون با لوله حرارتی‌هایی در تماس اند که خنک‌تر می‌باشند. هرچقدر انباره‌ها از مسیر سیال دورتر باشند، حرارت بیشتری نیز خواهند داشت.

در ادامه دمای بیشینه، دمای کمینه، اختلاف دمای بیشینه و کمینه همه واحد ساختاری‌ها و بیشینه اختلاف دمای هر واحد ساختاری در جدول ۵ مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۵ مقایسه معیارهای دمایی سه ایده مختلف

نوع مشخصه	طرح پایه	نوآوری جابه‌جایی لوله‌های حرارتی	نوآوری کاهش طول لوله‌های حرارتی
بیشینه دما همه واحد ساختاری‌ها	۳۱،۱۳	۳۰،۹۱	۳۱،۷۵
کمینه دما همه واحد ساختاری‌ها	۲۶،۷۲	۲۶،۶۷	۲۷،۲۴
اختلاف دمای بیشینه و کمینه همه واحد ساختاری‌ها	۴،۴۱	۴،۲۳	۴،۵۰
بیشینه اختلاف دمای هر واحد ساختاری	۰،۸۲	۰،۷۰	۰،۹۳

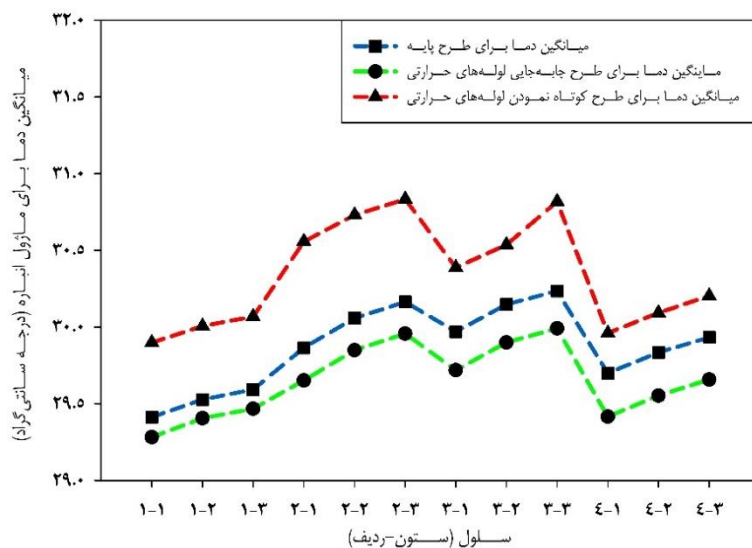


شکل ۱۸ نمادگذاری مورد استفاده برای واحد ساختاری‌های انباره در نمای برش از وسط

با توجه به نتایج جدول ۵، نوآوری جابه‌جایی لوله‌های حرارتی بیشینه و کمینه دمای واحد ساختاری‌ها را نسبت به طرح پایه کاهش داده است در حالی که نوآوری کوتاه کردن لوله‌های حرارتی این دو مقدار را نسبت به طرح پایه افزایش داده است. همچنین مشخص است که نوآوری جابه‌جایی لوله‌های حرارتی چه در سطح یک واحد ساختاری انباره و چه در سطح پودمان انباره، توزیع دمای یکنواخت‌تری دارد، در حالی که نوآوری کوتاه کردن لوله‌های حرارتی توزیع غیریکنواخت‌تری را در هر دو سطح مورد بررسی نشان می‌دهد. بهبود یکنواختی توزیع دما حاصل از نوآوری جابه‌جایی لوله‌های حرارتی ۴,۱٪ محاسبه شده است.

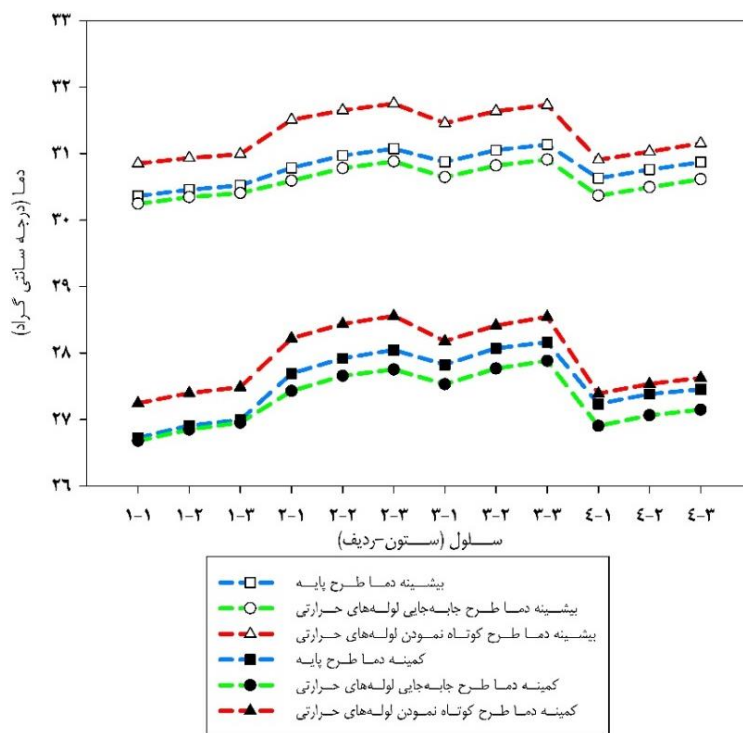
در شکل ۱۹ نمودار دمای میانگین هر یک از ۱۲ واحد ساختاری برای هر سه نوآوری با یکدیگر مقایسه شده اند. همان‌گونه که مشخص است نوآوری جابه‌جایی لوله حرارتی کمترین دمای هر واحد ساختاری را دارد و بهترین گزینه موجود است. طبق نمودار مقایسه میانگین دمای سه نوآوری در شکل ۱۹، واضح است که میانگین دمای پودمان انباره در حالت نوآوری جابه‌جایی لوله‌های حرارتی به‌طور کلی نسبت به طرح پایه و نوآوری کوتاه نمودن طول لوله‌ها کمتر شده است. سه نقطه اول هر نمودار بیانگر سه انباره سطر اول می‌باشند که همانطور که بحث شده، هرچه انباره از منبع سیال خنک دور می‌شود، انتقال حرارت پایین‌تر و دمای واحد ساختاری انباره بالاتر می‌رود. سه واحد ساختاری اول در نوآوری کوتاه نمودن لوله حرارتی دقیقاً به علت همین کوتاه بودن و سطح تماس کمتر دمای داغتری نسبت به دو نوآوری دیگر دارند. در مورد واحد ساختاری‌های موجود در سطر دوم، همانطور که بحث شد، دمای هر واحد ساختاری گرم‌تر می‌شود برای اینکه لوله‌های حرارتی به‌جای سه واحد ساختاری، شش واحد ساختاری جانبی خود را خنک می‌کنند و توان خنک‌کاری آن‌ها کمتر می‌شود. واحد ساختاری‌های سطر چهارم که از ناحیه ورودی دور شده‌اند و سیالی که با لوله حرارتی آن‌ها در تماس است، گرم‌تر شده، مشخصاً دماهای بیشتری را تجربه خواهند نمود.

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد برای ردیف دوم و سوم در طرح کوتاه نمودن لوله‌های حرارتی، یکنواختی دمایی بیشتری حاصل شده است که نمایانگر توانایی این طرح برای دستیابی به یکنواختی دمای پودمان انباره‌ها است، اگرچه نیازمند بهینه‌سازی است. در واقع می‌توان امیدوار بود که در گذر بهینه‌سازی این طرح بتوان واحد ساختاری‌های میانی پودمان که معمولاً دمای بیشتری دارند به دمای یکنواخت‌تری برسند.



شکل ۱۹ مقایسه میانگین دمای هر سه نوآوری برای پودمان انباره

در شکل ۲۰، نمودار دمای بیشینه و کمینه هر یک از ۱۲ واحد ساختاری برای هر سه نوآوری با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان گونه که مشخص است نوآوری جابه‌جایی لوله حرارتی بهترین نتایج برای بیشینه و کمینه دمای هر واحد ساختاری را دارد و بهترین گزینه موجود است.

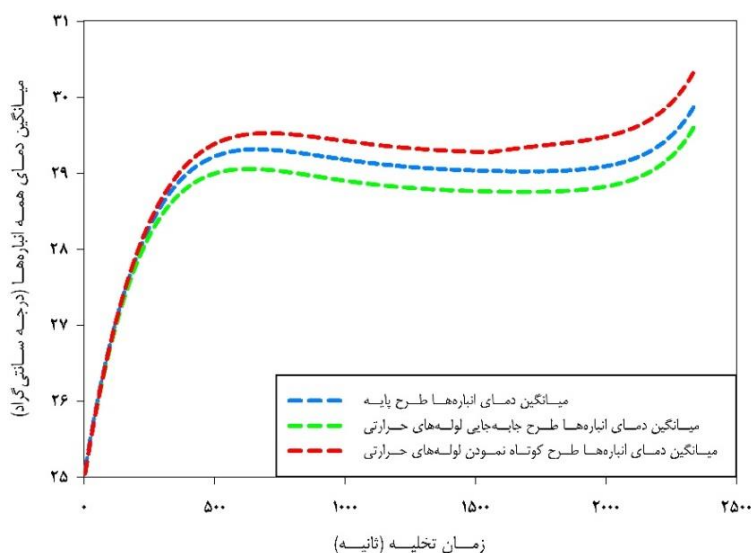


شکل ۲۰ مقایسه دمای بیشینه و کمینه برای هر سه نوآوری

مطابق شکل ۲۰ مشخص است که انباره ۳-۳ و با اختلاف بسیار کمی پس از آن انباره ۲-۳ بیشترین دماها را در پودمان خنک‌کاری دارند. علت این امر این است که لوله‌های حرارتی ابتدا و انتها، تنها خنک‌کاری انباره‌های

یک ردیف شامل سه انباره را بر عهده دارند و از یک جهت با هیچ منبع حرارتی دیگری در ارتباط نیستند. اما سایر لوله‌هایی حرارتی خنک‌کاری انباره‌های دو ردیف شامل شش انباره را بر عهده دارند. در نتیجه انباره‌های موجود در ردیف‌های میانی نسبت به ردیف‌های اول و آخر دمای بیشتری دارند. در ردیف‌های میانی انباره‌هایی که از سیال خنک‌کننده دورتر هستند بدلیل مقاومت در برابر انتقال حرارت بیشتری که ناشی از مسیر طولانی‌تر تا سیال خنک‌کننده است، دمای بیشتری دارند. از بین انباره ۳-۳ و ۲-۳ مشخص است که انباره ۳-۳ با اختلاف بسیار کمی دما بیشتری دارد و علت آن این است که سالی که با لوله‌های حرارتی در ارتباط با ردیف سوم انباره‌ها قرار دارند نسبت به لوله‌های حرارتی در ارتباط با ردیف دوم انباره‌ها با سیال تازه‌تری که دمای کمتری دارد در تماس اند و در نتیجه آن، انتقال حرارت در ردیف سوم انباره‌ها نسبت به ردیف دوم انباره‌ها کمتر است.

در شکل ۲۱ نیز نمودار دمای میانگین همه انباره‌ها برای هر نوآوری در طول مدت زمان ۲۴۰۰ ثانیه که در واقع طول زمان تخلیه انباره در نرخ تخلیه ۱،۵C است، با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا رفتار انباره‌ها در حالت ناپایا نیز بررسی شود. همانگونه که مشخص است نوآوری جابه‌جایی لوله حرارتی کمترین دما را در تمام طول مدت تخلیه دارد.



شکل ۲۱ مقایسه دمای میانگین برای هر سه نوآوری برای پودمان انباره

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش دو حالت متفاوت طراحی لوله‌های حرارتی شامل جابه‌جایی و تغییر طول چگالنده آن‌ها از منظر رفتار دمایی پودمان انباره مورد بررسی قرار واقع شدند. نوآوری جابه‌جایی لوله‌های حرارتی علاوه بر کاهش دمای میانگین انباره‌ها، به بهبودی در حدود ۴،۱٪ در یکنواختی توزیع دمای پودمان انباره منجر شد. باید به این نکته نیز توجه داشت که تمام فرآیندها در شبیه‌سازی‌ها ثابت بودند و این مقدار بهبود تنها با تغییر در چینش لوله‌های حرارتی صورت گرفت. از طرفی نوآوری کوتاهی طول چگالنده لوله‌های حرارتی همچنان می‌تواند بهینه شود. این نوآوری قابلیت ایجاد توزیع دمایی یکنواخت‌تر در کل پودمان به‌ویژه در واحد ساختاری‌های میانی را دارد.

References

- [1] Chitsaz I, Salehi M, Alizadenia S, Rajabali M. Battery and generator sizing of series hybrid electric vehicle based on experimental data and standard cycles simulation. The Journal of Engine Research. 2020;58(58):3-9. [In Persian]

- [2] Shafique M, Luo X. Environmental life cycle assessment of battery electric vehicles from the current and future energy mix perspective. *J Environ Manage.* 2022;303:114050. doi: [10.1016/j.jenvman.2021.114050](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114050)
- [3] Faria R, Marques P, Moura P, Freire F, Delgado J, de Almeida AT. Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2013;24:271–87. doi: [10.1016/j.rser.2013.03.063](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.063)
- [4] Bernagozzi M, Georgoulas A, Miché N, Marengo M. Heat pipes in battery thermal management systems for electric vehicles: A critical review. *Appl Therm Eng.* 2023;219:119495. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2022.119495](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119495)
- [5] Bayati Nezhad MA, Mohammadi A. Numerical investigation of the parameters of a prismatic lithium ion battery under load for electrical vehicle. *The Journal of Engine Research.* 2022;59(59):45–62. [In Persian]
- [6] Pruteanu A, Florean B V, Moraru GM, Ciobanu RC. Development of a thermal simulation and testing model for a superior lithium-ion-polymer battery. In: 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). 2012. p. 947–52. doi: [10.1109/OPTIM.2012.6231870](https://doi.org/10.1109/OPTIM.2012.6231870)
- [7] Ramadass P, Haran B, White R, Popov BN. Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures: Part I. Cycling performance. *J Power Sources.* 2002;112(2):606–13. doi: [10.1016/S0378-7753\(02\)00474-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00474-3)
- [8] Ramadass P, Haran B, White R, Popov BN. Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures: Part II. Capacity fade analysis. *J Power Sources.* 2002;112(2):614–20. doi: [10.1016/S0378-7753\(02\)00473-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00473-1)
- [9] Lin J, Liu X, Li S, Zhang C, Yang S. A review on recent progress, challenges and perspective of battery thermal management system. *Int J Heat Mass Transf.* 2021;167:120834. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120834](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120834)
- [10] Shakeri A, Keshavarz A, Qasemian A, Moradi F. Simulation of Subcooled Flow Boiling Occurring in Internal Combustion Engine Water Jacket by Numerical Modeling in a Channel with Hot Spot. *The Journal of Engine Research.* 2019;53(53):23–32. [In Persian]
- [11] Arora S. Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies. *J Power Sources.* 2018;400:621–40. doi: [10.1016/j.jpowsour.2018.08.020](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.020)
- [12] Hendricks TJ. Heat Pipe/Two-Phase Flow Systems for Vehicle Passenger Cabin Cooling. Downloaded from SAE International by Univ of Nottingham-Kings Meadow Campus.
- [13] Wu MS, Liu KH, Wang YY, Wan CC. Heat dissipation design for lithium-ion batteries. *J Power Sources.* 2002;109(1):160–6. doi: [10.1016/S0378-7753\(02\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00048-4)
- [14] Greco A, Cao D, Jiang X, Yang H. A theoretical and computational study of lithium-ion battery thermal management for electric vehicles using heat pipes. *J Power Sources.* 2014;257:344–55. doi: [10.1016/j.jpowsour.2014.02.004](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.004)
- [15] Worwood D, Kellner Q, Wojtala M, Widanage WD, MGlen R, Greenwood D, et al. A new approach to the internal thermal management of cylindrical battery cells for automotive applications. *J Power Sources.* 2017;346:151–66. doi: [10.1016/j.jpowsour.2017.02.023](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.02.023)
- [16] Kleiner J, Singh R, Schmid M, Komsiyiska L, Elger G, Endisch C. Influence of heat pipe assisted terminal cooling on the thermal behavior of a large prismatic lithium-ion cell during fast charging in electric vehicles. *Appl Therm Eng.* 2021;188:116328. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2020.116328](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116328)
- [17] Paccha-Herrera E, Calderón-Muñoz WR, Orchard M, Jaramillo F, Medjaher K. Thermal modeling approaches for a licoo2 lithium-ion battery—a comparative study with experimental validation. *Batteries.* 2020 Sep 1;6(3):1–23. doi: [10.3390/batteries7030043](https://doi.org/10.3390/batteries7030043)
- [18] Divya D Shetty, Mahamad Sulthan, Mohammad Zuber, Irfan Anjum Badruddin, Chandrakant R Kini. Computational Design and Analysis of a Novel Battery Thermal Management System of a Single 26650 Li-Ion Battery Cell for Electric Vehicle Application. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences.* 2022 Mar 20;93(2):61–75. doi: [10.37934/arfmts.93.2.6175](https://doi.org/10.37934/arfmts.93.2.6175)
- [19] Wang J, Gan Y, Liang J, Tan M, Li Y. Sensitivity analysis of factors influencing a heat pipe-based thermal management system for a battery module with cylindrical cells. *Appl Therm Eng.* 2019;151:475–85. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2019.02.036](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.036)

- [20] Gan Y, Wang J, Liang J, Huang Z, Hu M. Development of thermal equivalent circuit model of heat pipe-based thermal management system for a battery module with cylindrical cells. *Appl Therm Eng.* 2020;164:114523. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2019.114523](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114523)
- [21] Jithin K V, Rajesh PK. Numerical analysis of single-phase liquid immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using different dielectric fluids. *Int J Heat Mass Transf.* 2022;188:122608. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122608](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122608)
- [22] Serp J, Allibert M, Terrier A, Malmbeck R, Ougier M, Rebizant J, et al. Electrodeposition of Actinides from Lanthanides on Solid Aluminum Electrode in LiCl-KCl Eutectic Melts. *J Electrochem Soc.* 2005 Mar 1;152:C167-72. doi: [10.1149/1.1859812](https://doi.org/10.1149/1.1859812)
- [23] Gu H. Mathematical Analysis of a Zn / NiOOH Cell. *J Electrochem Soc.* 1983;130(7):1459. doi: [10.1149/1.2120009](https://doi.org/10.1149/1.2120009)
- [24] Kim US, Shin CB, Kim CS. Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery. *J Power Sources.* 2008;180(2):909-16. doi: [10.1016/j.jpowsour.2007.09.054](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.09.054)
- [25] Kwon KH, Shin CB, Kang TH, Kim CS. A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery. *J Power Sources.* 2006;163(1):151-7. doi: [10.1016/j.jpowsour.2006.03.012](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.03.012)
- [26] ANSYS Inc. ANSYS Fluent Theory Guide (Release 18.0); ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2017.
- [27] Wu W, Wang S, Wu W, Chen K, Hong S, Lai Y. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Convers Manag.* 2019;182:262-81. doi: [10.1016/j.enconman.2018.12.051](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051)