



Original Research

## Impact of pressure on thermal efficiency of phase change material-based BTMS for electric powertrain

Ali Shafiei Fini, Ayat Gharehghani\*

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

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Phase Change Material  
Battery Thermal Management  
Polyethylene Glycol 1000  
Pressure  
Lithium ion Battery

### ABSTRACT

To efficiently control high temperatures in lithium-ion batteries, a Battery Thermal Management System (BTMS) is employed. Among various thermal management techniques, the one based on Phase Change Materials (PCMs) is considered to strike the best balance between cost, integration, efficiency, and lifespan. To enhance the performance of PCMs in thermal management systems, it is crucial to improve their thermal conductivity and energy storage capacity. This research aims to utilize pressure as a method to boost the energy storage capability of PEG1000 for better battery thermal management. The study considers two input factors: pressure (100-500 kPa) and discharge rate (1-7 C). The investigation examines the impact of these variables on the maximum temperature, depth of discharge, and discharge energy during the discharge process of a 18650 cylindrical cell. A safe maximum temperature of 63 degrees Celsius was established. Results showed that at a discharge rate of 7 C, a pressure of 500 kPa nearly doubled the battery's discharge time compared to atmospheric pressure. Additionally, increasing the pressure from 100 to 500 kPa doubled the energy extracted from the battery cell.



© 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: [Ayat\\_gharehghani@iust.ac.ir](mailto:Ayat_gharehghani@iust.ac.ir) (A. Gharehghani)

Received 2 May 2024; Accepted 8 October 2024

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

**Cite this article:** Shafiei Fini A. Gharehghani A. Impact of pressure on thermal efficiency of phase change material-based BTMS for electric powertrain. The Journal of Engine Research. 2024 Nov 21;71(3):16-31. doi: [10.22034/ER.2024.2025584.1043](https://doi.org/10.22034/ER.2024.2025584.1043)

## تأثیر فشار بر بازده حرارتی سامانه مدیریت گرمایی انباره مبتنی بر ماده تغییر حالت‌دهنده برای قوای محرکه برقی

علی شفیعی فینی، آیت قره‌قانی\*

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

### چکیده

برای محدود کردن حداکثر دما در انباره‌های لیتیوم یونی، از سامانه مدیریت گرمایی انباره استفاده می‌شود. مدیریت گرمایی مبتنی بر ماده تغییر حالت‌دهنده بهترین مصالحه بین هزینه، یکپارچگی، کارایی و چرخه عمر است. برای افزایش عملکرد مواد تغییر حالت‌دهنده در سامانه‌های مدیریت گرمایی، لازم است خواص هدایت گرمایی آنها بهبود یافته و ظرفیت ذخیره انرژی آنها نیز افزایش یابد. هدف از این تحقیق معرفی فشار به عنوان ابزاری برای افزایش قابلیت ذخیره انرژی در چند اتیلن گلیکول-هزار برای دستیابی به مدیریت گرمایی کارآمدتر انباره است. آزمایش‌ها با در نظر گرفتن متغیرهای ورودی، فشار ۱۰۰ الی ۵۰۰ کیلو پاسکال (کیپ)، و نرخ تخلیه ۱ تا ۷ انجام شد. اثرات متغیرهای ورودی بر روی حداکثر دما، عمق تخلیه و انرژی تخلیه در طول فرآیند تخلیه یک خانه استوانه‌ای لیتیوم یونی ۱۸۶۵۰ بررسی می‌شود. دمای خانه، ۶۳ درجه سانتیگراد (دس) به عنوان حداکثر دمای ایمن در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد برای نرخ تخلیه ۷، فشار ۵۰۰ کیپ تقریباً زمان تخلیه انباره را نسبت به فشار متعارفی تا دو برابر افزایش می‌دهد. علاوه بر این، افزایش فشار از ۱۰۰ به ۵۰۰ کیپ انرژی استخراج شده از خانه انباره را دو برابر کرد.

### اطلاعات مقاله

#### کلیدواژه‌ها:

ماده تغییر حالت‌دهنده  
سامانه مدیریت گرمایی انباره  
چند اتیلن گلیکول هزار  
فشار  
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: [Ayat\\_gharehghani@iust.ac.ir](mailto:Ayat_gharehghani@iust.ac.ir) (آیت قره‌قانی)

دریافت ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ پذیرش ۱۷ مهر ۱۴۰۳  
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Shafiei Fini A. Gharehghani A. Impact of pressure on thermal efficiency of phase change material-based BTMS for electric powertrain. The Journal of Engine Research. 2024 Nov 21;71(3):16-31. doi: 10.22034/ER.2024.2025584.1043

## ۱- مقدمه

همواره نیاز به سامانه‌های ذخیره انرژی کارآمد پر رنگ‌تر می‌شود [۱]. انباره لیتیوم یونی به دلیل انرژی ویژه زیاد و نرخ خود تخلیه شونده کمی، به طور گسترده در خودروهای برقی استفاده می‌شود [۲-۴]. با این حال، افزایش دما تا فراتر از حد کارکرد ایمن آنها، یک نگرانی است. زیرا انباره می‌تواند بیش از حد گرم شده و در نتیجه ناپایدار شود که منجر به فرار حرارتی می‌شود [۱، ۳، ۵]. مدیریت گرمایی در کنترل دمای انباره و اطمینان از ایمنی بسیار مهم است [۳، ۵] و اتخاذ یک روش مناسب و بهینه خنک‌کاری با راندمان و قابلیت اطمینان در هر سه سطح خانه، ماژول و پک انباره ضروری است [۶]. انباره‌های لیتیوم یونی همچنین با مسائلی مانند تخریب حرارتی در دماهای شدید مواجه هستند [۷، ۸]. برای رفع این مسائل می‌توان از روش‌های خنک‌کاری مختلف استفاده کرد [۷، ۸]. ماده تغییر حالت‌دهنده می‌تواند جایگزینی جذاب برای روش‌های خنک‌کاری متداولی مثل استفاده از جریان هوا باشد [۹]. این مواد بسته به دمای ذوب، طیف وسیعی از کاربردها را دارند. به عنوان مثال، این مواد می‌توانند در گرمایش از کف ساختمان‌های مسکونی استفاده شده [۱۰] و یا برای ذخیره انرژی گرمایی در گل‌خانه‌های خورشیدی به کار روند [۱۱]. در بین کاربردهای مختلف، مدیریت گرمایی انباره یک سامانه قوای محرکه برقی، یکی از مهمترین کاربردهای مواد تغییر حالت‌دهنده است [۷]. آنها دارای ظرفیت گرمایی نهان بالا و دارای پتانسیل افزایش بازده انرژی برای انباره هستند [۱۲]. سامانه‌های مدیریت گرمایی مبتنی بر مواد تغییر حالت‌دهنده، مقرون به صرفه، کارآمد و سازگار با محیط زیست هستند [۲]. همچنین هدایت حرارتی پایین مواد تغییر حالت‌دهنده را می‌توان با فناوری نانو و مواد تغییر حالت مرکب بهبود بخشید [۱، ۵]. آنها، دما و گرادیان دما را کاهش می‌دهند [۲، ۷، ۱۳] و دما را در محیط‌های سرد و گرم تثبیت می‌کنند [۲، ۱۳، ۱۴].

برخی تحقیقات تجربی برای بهبود عملکرد مدیریت گرمایی با استفاده از مواد تغییر حالت‌دهنده انجام شده است. لی و همکاران [۱۵] سامانه‌های مدیریت گرمایی غیرفعال را برای انباره‌های لیتیوم یونی با استفاده از فوم فلزی متخلخل اشباع شده با مواد تغییر حالت‌دهنده، مورد مطالعه قرار دادند. هم‌ری و همکاران [۱۶] عملکرد یک سامانه مدیریت گرمایی انباره را با استفاده از مواد تغییر حالت‌دهنده افزایش دادند. اگرچه استفاده از مواد تغییر حالت‌دهنده مزایای بی شماری در مدیریت گرمایی دارد، اما محدودیت اصلی این است که ضریب انتقال حرارتی ذاتی پایینی دارند. لذا، تحقیقات برای افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی آنها همچنان ادامه دارد.

چند اتیلن گلیکول به دلیل خواص حرارتی مناسب و اشتعال‌پذیری کم به عنوان یک ماده امیدوارکننده برای ذخیره انرژی حرارتی در سامانه‌های مدیریت گرمایی مورد توجه قرار گرفته است [۱۷]. چند اتیلن گلیکول، همچنین مزایایی مانند گرمایی نهان بالا، ساختارهای قابل تغییر، دامنه وسیع دمای تغییر حالت و سازگاری با سلامت انسان را ارائه می‌دهد [۱۸]. همچنین چند اتیلن گلیکول، ویسکوزیته بالاتر از پارافین و اسیدهای چرب دارد [۱۹]. با این وجود، با در نظر گرفتن کارایی انتقال حرارت و توانایی ذخیره انرژی در خانه حجم، چند اتیلن گلیکول عملکرد بهتری از پارافین و اسید چرب دارد [۱۹]. اخیراً یک ماده تغییر حالت‌دهنده بر پایه چند اتیلن گلیکول/فلز مایع/نیتريد بور توسعه یافته است که قادر به مدیریت گرمایی دو حالتی انباره لیتیوم یونی از طریق اثر فتوترمال و هدایت حرارتی غیرفعال است [۲۰].

مطالعه حاضر به اثرات فشار بر عملکرد گرمایی سامانه‌های مدیریت گرمایی انباره، مبتنی بر چند اتیلن گلیکول متمرکز است. هدایت حرارتی ذاتی پایین و جلوی مذاب متحرک مواد تغییر حالت‌دهنده، منجر به کاهش چگالی ذخیره انرژی می‌شود [۲۱]. حتی با راه‌حلی‌هایی که عملکرد را بهبود داده است، مواد تغییر حالت‌دهنده به دلیل مقاومت حرارتی ذاتی‌شان همچنان با محدودیت‌هایی مواجه هستند [۲۱]. فو و همکاران ذوب تماس نزدیک تقویت‌شده با فشار را برای کنترل فضایی مکان جلوی مذاب مواد تغییر حالت‌دهنده پیشنهاد کردند و دریافتند که اعمال فشار می‌تواند جریان تخلیه مایع فوق‌گرم در ناحیه ذوب را تسریع کند [۲۲]. مطالعاتی فرآیند ذوب تماس نزدیک و اثرات فشار اعمال شده بر مقاومت حرارتی را از جنبه کاربردی مورد بررسی قرار داده است [۲۳]. به این روش، با اعمال فشار، کاهش قابل توجهی در مقاومت حرارتی نشان داده شد [۲۳].

هدف از این مطالعه بررسی تجربی اثربخشی استفاده از فشار به عنوان ابزاری برای افزایش قابلیت ذخیره انرژی در چند اتیلن گلیکول هزار است. بر اساس دانش نویسندگان، تأثیر فشار شدید بر عملکرد گرمایی سامانه‌های مدیریت گرمایی انباره لیتیوم یون مبتنی بر مواد تغییر حالت‌دهنده به ندرت بررسی شده است. لازم به ذکر است که وجود محفظه فشار مانعی برای تعویض پک انباره نیست. فشار می‌تواند به همراه ماده تغییر حالت‌دهنده بر روی هر خانه به طور مجزا اعمال شود و بعد خانه‌های انباره به صورت مجموعه درآیند. مضافاً اینکه فشار لزوماً با هوای فشرده اعمال نمی‌شود و می‌تواند به روش مکانیکی اعمال شود. لازم به ذکر است که مطالب ارائه شده در پژوهش حاضر در حیطه تفسیر و تحلیل نتایج به موضوعات جدید و یافته‌های نوینی اشاره دارد. متغیرهای مختلفی از جمله حداکثر دمای خانه، عمق تخلیه و انرژی تخلیه به عنوان متغیرهای مربوط به عملکرد گرمایی در نظر گرفته شدند. این مطالعه به بررسی اثرات فشار و نرخ تخلیه بر عملکرد گرمایی یک سامانه مدیریت گرمایی مبتنی بر ماده تغییر حالت‌دهنده، پرداخته است. در این مطالعه تغییرات در دمای خانه با زمان نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. یک خانه انباره استوانه‌ای ۱۸۶۵۰ استفاده شده و آزمایش تحت فرآیند تخلیه بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

در این تحقیق تجربی از چند اتیلن گلیکول هزار به عنوان ماده تغییر حالت‌دهنده استفاده شد. نتیجه اسکن کالریمتری دیفرانسیلی (DSC)، برای چند اتیلن گلیکول هزار توسط بیگی و صدرآملی [۲۴] ارائه شده است. خواص فیزیکی و حرارتی چند اتیلن گلیکول هزار در جدول ۱ قرار دارد. رسانایی حرارتی برای این ماده بین ۰,۱۵۸ تا ۰,۲۳ وات بر متر کلون در ۲۹۸ کلون است [۲۵، ۲۶].

جدول ۱ خواص فیزیکی و حرارتی چند اتیلن گلیکول هزار در فشار ۱۰۰ کیپ

مقدار	خواص
Kg/l ۱,۰۹۲۷	چگالی در حالت مایع [۲۴]
Kg/l ۱,۰۹۲۷	چگالی در حالت جامد [۲۴]
W/m.K ۰,۲۳۰ ~ ۰,۱۵۸	ضریب هدایت حرارتی [۲۶، ۲۵]
۴۰- ۳۸ °C	دمای ذوب [۲۴]
KJ/Kg ۱۵۹,۰	آنتالپی ذوب [۲۴]
K/(kg/cm <sup>2</sup> ) ۰,۰۱۴۵	مقدار تغییر دمای ذوب با فشار [۲۴]

یک تحلیلگر انباره برای تغذیه و تخلیه خانه با نرخ ثابت و نظارت بر جریان، ولتاژ و ظرفیت خانه استفاده گردید. تحلیلگر می‌تواند حداکثر ولتاژ ۶۰ ولت و حداکثر جریان برق ۱۰۰ آمپر را پشتیبانی کند. همچنین از آزمونگر کمکی برای مشاهده دمای خانه انباره و برای داده برداری در هر ثانیه استفاده می‌شود. از دو دماسنج نوع تی برای تشخیص دمای خانه انباره و دمای ماده تغییر حالت‌دهنده استفاده شد که برای محدوده دمایی ۲۰۰ - تا ۲۶۰ دس با دقت  $\pm 0,5$  دس مناسب است.

تحقیق فعلی از یک خانه انباره قابل تغذیه لیتیومی با نوع INR18650/25P استفاده می‌کند که قادر به تحمل جریان‌های تخلیه با نرخ بالا و تحمل دمایی وسیع است و حالت استاندارد تخلیه آن دارای ظرفیت اسمی ۲۵۰۰ میلی آمپر ساعت است. انباره می‌تواند در محدوده دمایی ۲۰- تا ۶۰ دس تخلیه شود. جدول ۲ مشخصات مورد نیاز در خصوص خانه انباره را ارائه می‌دهد.

جدول ۲ شاخص‌های مهم مربوط به انباره استوانه ای ۱۸۶۵۰

مقادیر	شاخص‌های مهم
mAh2500	ظرفیت نامی
۳۶ ولت	ولتاژ اسمی
۱,۲۵ (آمپر) CC* تغذیه تا ۴,۲۰ ولت، CV* تا ۱۰۰ میلی آمپر	حالت تغذیه استاندارد
V ۲,۵ / V ۴,۲	حداکثر ولتاژ تغذیه/تخلیه
A ۳۰ / A ۴	حداکثر جریان تغذیه/خالی شدن
۰,۱۵ ± ۶۵,۰۰ میلی متر	ارتفاع انباره
۰,۱۰ ± ۱۸,۳۵ میلی متر	قطر انباره
۴۸ گرم	وزن انباره
۶۵ درجه سانتی‌گراد	حداکثر دمای قطع تخلیه

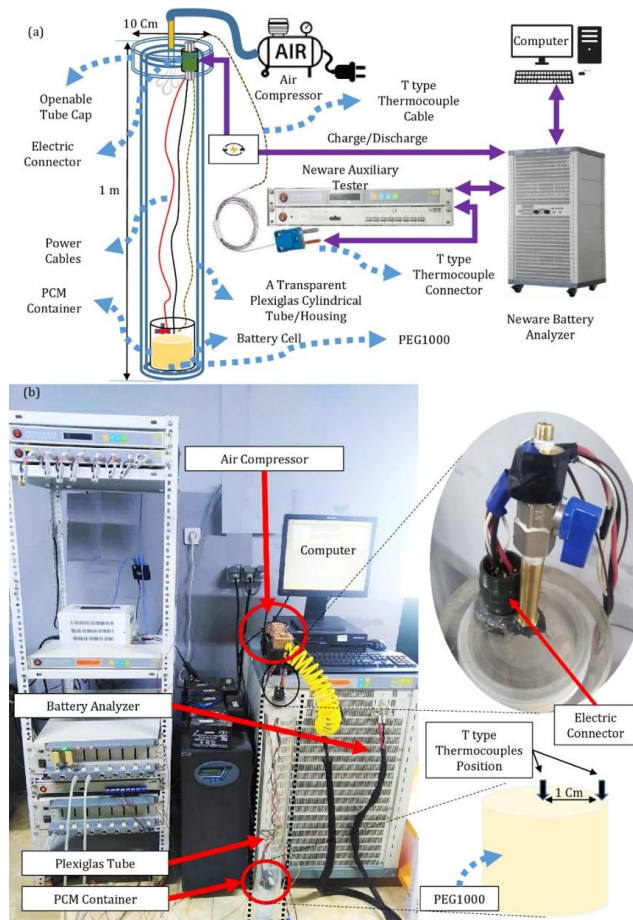
\* CC: تغذیه جریان ثابت. CV: تغذیه ولتاژ ثابت.

مطابق شکل ۱-الف یک لوله استوانه‌ای پلکسی شفاف با قطر ۰,۱ متر و طول یک متر، به عنوان محفظه فشار استفاده شده تا بتوان فشار محیطی ماده تغییر حالت‌دهنده را مدیریت کرد. از کمپرسور هوا برای افزایش فشار داخل لوله استفاده می‌شود. یک اتصال‌دهنده برقی ۱۷ شاخه در مرکز درپوش بالایی محفظه شفاف استوانه‌ای تعبیه شده است که به سیم‌های برق انباره و دماسنج اجازه می‌دهد به داخل محفظه متصل شوند و امکان انتقال ۱۵ آمپر جریان برق در هر شاخه را با آب بندی کافی فراهم می‌کند. عایق بندی مناسبی برای افزایش فشار انجام گردید. دو سیم جداگانه برای ثبت ولتاژ خانه استفاده می‌شود. از یک رایانه برای جمع‌آوری و انتقال داده‌های تحلیل‌گر انباره استفاده شد. یک محفظه پلاستیکی با ضخامت ۱ میلی‌متر برای ریختن ماده تغییر حالت‌دهنده و پر کردن اطراف خانه انباره استفاده شد. دقت و محدوده اندازه‌گیری تجهیزات و مشخصات اتصال دهنده برقی در جدول ۳ نشان داده شده است.

در شکل ۱-ب، توضیحی در مورد هر جزء آزمون داده شده است. بر این اساس، خانه انباره پوشیده شده با ماده تغییر حالت‌دهنده، در یک محفظه پلکسی قرار می‌گیرد. سپس محفظه بسته می‌شود. خانه انباره قبلاً توسط یک لایه چند اتیلن گلیکول (با جرم ۱,۰ ± ۱۴۰ گرم) احاطه گردید. مقدار مشخصی هوا می‌تواند از طریق محفظه پلکسی وارد شود. موقعیت دماسنج‌های نوع تی در این شکل نشان داده شده است که یکی از آنها روی قطب مثبت انباره قرار می‌گیرد و تغییرات دما را برای خانه انباره گزارش می‌کند. دماسنج دوم مطابق شکل در فاصله یک سانتیمتری از انباره در داخل ماده تغییر حالت‌دهنده قرار می‌گیرد. متغیرهای خروجی شامل حداکثر دما، عمق تخلیه (DOD) و انرژی تخلیه بوده است. دماسنج روی انباره با استفاده از نوع مخصوصی چسب نواری به انباره چسبانده شد. بنابراین تشخیص حداکثر دمای خانه انباره به واسطه دماسنج نصب شده روی انباره انجام می‌شود. دقت اندازه‌گیری دماسنج‌ها نیز برای اندازه‌گیری دما در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری و اتصال برقی مورد استفاده در آزمایش

تجهیز	سازنده	نوع	بازه اندازه‌گیری / توانمندی	دقت
دماسنج	PerfectPrime	نوع تی	۲۰۰-۲۶۰ °C	±۰,۵ °C
گیج فشار	Matex	خلاء هیدرولیکی	۰-۱۲ bar	±۰,۱ bar
تحلیل‌گر انباره	Neware	BTS4000-60V100A-2CH	۰,۵-۱۰۰ آمپر / ۶۰-۰,۳ ولت	±۰,۱ %
آزمون‌گر کمکی	Neware	---	۲۰۰-۲۶۰ °C	±۰,۱ % °C
اتصال دهنده برقی	Kukdong	KD3106A20-29S	۱۵ آمپر در هر شاخه	---



شکل ۱ الف) طرح آزمایش برای خنک‌سازی غیرفعال و تحت فشار انباره، ب) تجهیزات راه اندازی آزمون و محل دماسنج

## ۲-۲- روش انجام آزمون

آزمایش‌ها برای یک خانه در محیط چنداتیلین گلیکول با ضخامت ۱ سانتی‌متر انجام شد. در آزمایش‌ها مخزن حاوی انباره و ماده تغییر حالت‌دهنده به صورت کاملاً عمودی قرار داشته‌اند. زاویه قرارگیری مخزن، بر فرآیند ذوب ماده تغییر حالت‌دهنده و بر ساختار جریان جابجایی آزاد در حالت مایع، تأثیر می‌گذارد و موجب تغییر شکل سطح مشترک جامد و مایع می‌شود. لذا این پدیده می‌تواند زمان ذوب ماده تغییر حالت‌دهنده را تغییر دهد [۲۷].

## راه اندازی آزمایش

تاریخچه دما در رایانه ثبت می‌شود. متراکم‌کننده هوا در صورت نیاز به فشار، هوای داخل محفظه را فشرده می‌کند. حسگر فشار مقادیر فشار داخل محفظه را اندازه‌گیری می‌کند. در هر آزمایش، فشار تنظیم می‌شود و تاریخچه دمای انباره در طول فرآیند تخلیه ثبت می‌گردد. تحلیل‌گر انباره برای ثبت جریان برق و ولتاژ استفاده شد. قبل از هر آزمایش، انباره‌ها در حالت گالوانوستاتیک به طور کامل تغذیه می‌شوند و قبل از شروع آزمایش زمان دارند تا خنک شوند و به دمای اولیه مطلوب برسند. در حین تغذیه، ابتدا هر خانه با محدودیت سقف ولتاژ ۴٫۲ ولت تغذیه شد و به دنبال آن در حالت پتانسیواستاتیک، تغذیه ادامه یافت تا جریان به ۰٫۲۶ میلی‌آمپر کاهش یابد. در طول فرآیند تخلیه، انباره تا زمانی که ولتاژ به ولتاژ قطع (۲٫۵ ولت) کاهش یابد، تخلیه گردید، مگر اینکه حداکثر دمای مجاز (۶۳ دس) اجازه ندهد به ولتاژ قطع برسد. تحلیل‌گر به طور خودکار وقتی دما از دمای مجاز تعریف شده عبور کند، آزمایش را متوقف می‌کند. قبل از انجام آزمایش از تنظیم بودن تجهیزات آزمون نیز اطمینان حاصل شد.

## روش تجربی انجام آزمون

جدول ۴ متغیرهای ورودی و سطوح مربوط به آنها را در طراحی آزمایش به همراه پاسخ‌های خروجی مربوطه نشان می‌دهد.

جدول ۴ متغیرهای ورودی و پاسخ‌های خروجی برای سامانه مدیریت گرمایی انباره

متغیرهای ورودی	نماد	متغیر	خانه	سطوح	
				پایین (-۱)	متوسط (صفر)
متغیرهای ورودی	A	فشار	kPa	۱۰۰±۱	۳۰۰±۱
	B	نرخ خالی شدن	C	۳	۵
پاسخ‌های خروجی	نماد	متغیر	خانه	پاسخ مطلوب	
	T max	حداکثر دمای خانه	°C	کمترین مقدار ممکن	
	DOD	عمق تخلیه	%	بیشترین مقدار ممکن	
	--	انرژی تخلیه	WH	بیشترین مقدار ممکن	

خانه انباره در شرایط مختلفی برای ارزیابی تأثیر متغیرهای ورودی بر متغیرهای خروجی آزمایش می‌شود. جدول ۵ آزمون‌های انجام شده و نتایج متناظر آنها برای سه عامل ورودی است. متغیرهای ورودی شامل فشار هوا ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیپا، و نرخ تخلیه جریان مستقیم ۳ تا ۷ است. ضریب C یا همان نرخ تخلیه در انباره‌ها یک معیار مهم برای اندازه‌گیری سرعت تخلیه یا تخلیه انرژی از انباره است. این ضریب نمایانگر توان تخلیه انباره در مقایسه با ظرفیت آن در خانه زمان است. در واقع نرخ تخلیه عددی است که ضرب در مقدار ظرفیت آمپر ساعتی انباره می‌شود و جریان برق تخلیه انباره را مشخص می‌کند. با افزایش نرخ تخلیه، به دلیل افزایش شدت جریان تخلیه و واکنش‌های الکتروشیمیایی، شیب افزایش تولید گرمای واکنش نیز بیشتر می‌شود [۲۸].

جدول ۵ آزمون‌ها و پاسخ‌های متناظر بطور تجربی برای انباره تک خانه پوشیده شده با چند اتیلن گلیکول

ردیف	متغیرهای ورودی		پاسخ‌های خروجی	
	دمای اولیه خانه (°C)	فشار (kPa)	نرخ تخلیه (C)	حداکثر دما (°C)
۱	۳۰	۱۰۰	۵	۵۹٫۶
۲	۳۷	۱۰۰	۵	۶۳٫۱
۳	۳۰	۵۰۰	۵	۵۷٫۰
۴	۳۷	۵۰۰	۵	۶۳٫۱
۵	۳۰	۳۰۰	۳	۳۹٫۲
۶	۳۷	۳۰۰	۳	۴۷٫۴
۷	۳۰	۳۰۰	۷	۶۳٫۱
۸	۳۷	۳۰۰	۷	۶۳٫۰
۹	۳۳٫۵	۱۰۰	۳	۴۶٫۷
۱۰	۳۳٫۵	۵۰۰	۳	۴۶٫۵
۱۱	۳۳٫۵	۱۰۰	۷	۶۳٫۱
۱۲	۳۳٫۵	۵۰۰	۷	۶۳٫۱

لازم به ذکر است که حداکثر فشار هوای ۵۰۰ کیپ برای بازه آزمون طی مشاهدات تجربی انتخاب شد که در آن تأثیر فشار به طور محسوس مشاهده گردید. از طرفی فشار شدیدتر خود می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد انباره داشته باشد. فشار بیش از حد (بیشتر از ۱۰۰۰ کیپ) باعث می‌شود که جداکننده‌های انباره منافذ خود را ببندند، که چگالی غلیظ جریان محلی و زوال سریع را ایجاد می‌کنند. خانه‌ها می‌توانند با فشار خارجی مناسب، ایمن‌تر باشند و طول عمر بیشتری داشته باشند [۲۹]. نرخ‌های تخلیه ۳ تا ۷ به این دلیل انتخاب شدند که معمولاً بسیار رایج هستند. به عنوان مثال فرایند شتابگیری خودروهای برقی یا زیردریایی‌های برقی نمونه‌ای از کاربردهای آن است [۳۰].

علاوه بر موارد ذکر شده، تأثیر دمای اولیه خانه نیز در طراحی آزمون لحاظ گردید. پاسخ‌های متناظر خروجی شامل حداکثر دما، عمق تخلیه، و انرژی برقی خارج شده از انباره است. حد بالایی دمای خانه انباره برای جلوگیری از فرار حرارتی انباره روی ۶۳ دس تنظیم شده است. همچنین داده برداری دمای دماستج‌ها با فرکانس یک داده بر ثانیه انجام شده است.

### ۳- نتایج و بحث

در این مطالعه، رفتار حرارتی خانه انباره لیتیوم یونی در طول آزمون تخلیه با نرخ شدید، توسط مدیریت گرمایی مبتنی بر ماده تغییر حالت‌دهنده تحت فشار بررسی شد. حداکثر دما، عمق تخلیه و انرژی تخلیه، برای درک تأثیر فشار و نرخ تخلیه بر عملکرد گرمایی خانه با استفاده از چند اتیلن گلیکول به عنوان ماده تغییر حالت‌دهنده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در این بخش همچنین نتایج جدول ۵ مورد نقد و بررسی قرار می‌گیرد.

بخش‌های ۳-۱ تا ۳-۵ تأثیر فشار بر پاسخ‌های خروجی در طول فرآیند تخلیه خانه انباره خنک‌شده با ماده تغییر حالت‌دهنده را شرح می‌دهند. نقاط طراحی و پاسخ‌های خروجی در جدول ۵ فهرست شده است. بر اساس داده‌های به دست آمده، دمای خانه از ۳۹ دس تا ۶۳ دس، عمق تخلیه از ۱۰،۷۷٪ تا ۹۵،۲٪، و انرژی تخلیه از ۱،۳۰ تا ۸،۱۹ وات ساعت متغیر بود.

#### ۳-۱- تأثیر فشار بر نرخ تغییرات دما

تخلیه انباره محاط شده با چند اتیلن گلیکول در فشارها و نرخ‌های تخلیه مختلف انجام شده است. برای درک عملکرد گرمایی خانه انباره در حین تخلیه، بررسی تأثیر فردی هر متغیر ورودی مهم است. با ثابت نگه داشتن متغیر دیگر و با تغییر تنها یک متغیر، می‌توان تأثیر متغیرهای مورد نظر را بر عملکرد گرمایی انباره مشاهده کرد. اینکه چگونه فشار و نرخ تخلیه بر نرخ افزایش دما در خانه، در طول زمان تخلیه تأثیر می‌گذارند، در این بخش بررسی می‌شود.

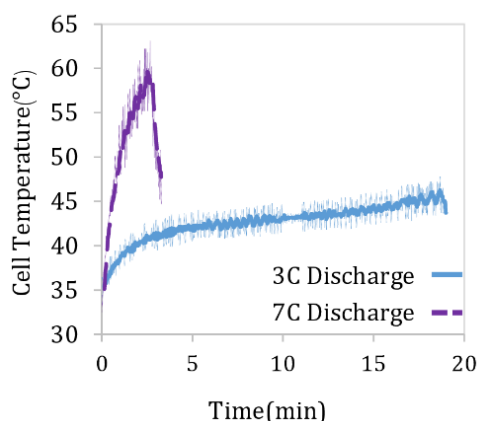
در جدول ۵، ۱۲ آزمون بر اساس طراحی آزمایش تعریف شده است. تنها تفاوت موارد ۱۰ و ۱۲ در این جدول در مقدار نرخ تخلیه است. موارد ۱۰ و ۱۲ هر دو در فشار ۵۰۰ کیپ انجام شده و خانه انباره در هر دو مورد دمای اولیه یکسانی داشت. موارد ۱۱ و ۱۲ فقط از نظر فشار با هم تفاوت دارند. مورد ۱۱ در فشار ۱۰۰ و مورد ۱۲ در فشار ۵۰۰ کیپ انجام شد. لازم است مقایسه بین موارد ۱۰ و ۱۱، ۱۲ و ۱۱، ۱۲ در نظر گرفته شود. زیرا شکل‌های ۲ و ۳ به این مقایسه اختصاص دارد. در این مقایسه‌ها هر بار یک متغیر تغییر کرده و متغیر دیگر ثابت می‌ماند.

در شکل‌های ۲ و ۳، از یک میانگین متحرک ده نقطه‌ای برای تجزیه و تحلیل الگوها و روندها در داده‌های زمانی دما به منظور افزایش دقت و پایداری استفاده شد. نوسانات دما در تحقیقات تجربی حرارتی انباره مشاهده می‌شود [۳۱]. نوسان دما به دلیل جریان موضعی چند اتیلن گلیکول ذوب شده در مناطق خاص است و به دلیل قرارگیری نامناسب دماستج نیست. هنگامی که رفتار حرارتی خانه توسط همرفت طبیعی در هوا بدون استفاده از ماده تغییر حالت‌دهنده بررسی می‌شود، هیچ نوسانی برای افزایش دمای خانه در طول زمان مشاهده نگردید. در این پژوهش نوسانات دمای واقعی با استفاده از نقطه چین ترسیم شده است.

در شکل ۲ فشار محیط انباره ۵۰۰ کیپ و دمای اولیه در موارد مورد مقایسه یکسان است. شکل ۲، تغییرات دمای خانه انباره تحت فشار را نشان می‌دهد که توسط چند اتیلن گلیکول احاطه شده است و نرخ خالی شدن ۳ و ۷ را مقایسه می‌کند. شکل ۲ متعلق به مقایسه موارد ۱۰ و ۱۲ است. هنگام تخلیه با نرخ ۷، دمای انباره در عرض ۴ دقیقه از ۶۰ دس فراتر می‌رود و منجر به پایان فرآیند تخلیه می‌شود. این باعث می‌شود که عمق تخلیه به حداکثر مقدار ۳۰،۸۸٪ در فرآیند تخلیه با نرخ ۷ برای خانه با چند اتیلن گلیکول تحت فشار برسد. با این وجود، زمانی که انباره با نرخ ۳ (مصدق مورد ۱۰) تخلیه شد، دمای انباره زیر ۵۰ دس باقی ماند و در نتیجه، توانست تخلیه تقریباً کامل با عمق تخلیه ۹۴،۱۲٪ را تجربه کند و به ولتاژ قطع ۲،۵ ولت برسد. مقدار عمق تخلیه بر اساس ظرفیت اسمی آمپر ساعت انباره که ۲۵۰۰ میلی‌آمپر ساعت است محاسبه می‌شود. بنابراین با توجه به اتلاف انرژی حرارتی انباره، اگرچه مقدار ولتاژ برای تخلیه با نرخ تخلیه ۳ به ۲،۵ ولت رسیده و تخلیه کامل شده است، اما ظرفیت اسمی بدست آمده از انباره کمتر از مقدار اسمی آن است و بنابراین، مقدار عمق تخلیه به ۱۰۰٪ نرسیده است. عمق تخلیه به صورت زیر بدست می‌آید [۳۲]:

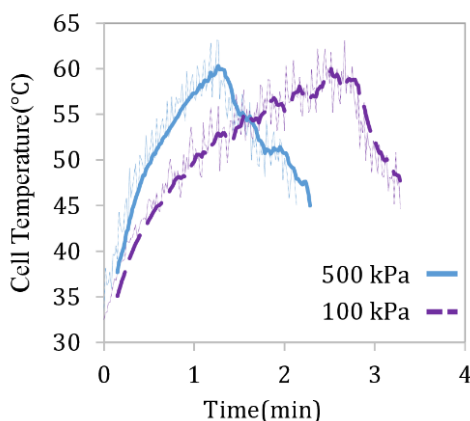
$$DOD = \frac{Q_d}{Q} \quad (1)$$

که  $Q_d$  ظرفیت جریانی-زمانی انباره و  $Q$  ظرفیت اسمی انباره است. قبل از هر آزمایش، انباره و چند اتیلن گلیکول در اتاقی با دمای ۲۵ دس خنک می‌شوند تا زمانی که خانه به دمای اولیه مطلوب برای آزمایش برسد.



شکل ۲ تغییر دمای خانه با زمان در فرآیند تخلیه با نرخ‌های مختلف. مقایسه مورد ۱۰ و مورد ۱۲. (فشار = ۵۰۰ کیپ)

شکل ۲، تأثیر نرخ تخلیه را بر تغییرات دمای خانه نشان داد. اما در شکل ۳ به تأثیر فشار پی برده می‌شود. در مقایسه مورد ۱۱ و ۱۲ در شکل ۳، هر دو آزمایش دارای نرخ تخلیه ۷ و دمای اولیه یکسان هستند. این نمودار نشان می‌دهد که چگونه فرآیند افزایش دمای یک انباره پوشیده با ماده تغییر حالت‌دهنده، تحت تأثیر متغیر فشار محیطی قرار می‌گیرد. فشارهای ۵۰۰ و ۱۰۰ کیپ در این شکل مقایسه شده‌اند. در حالی که نرخ تخلیه و دمای اولیه در این دو حالت مقایسه یکسان است. اگرچه هر دو مورد به توقف فرآیند تخلیه به دلیل افزایش بیش از حد دما انجامید، در فشار ۵۰۰ کیپ در مقایسه با فشار اتمسفر، انباره تقریباً دو برابر بیشتر تخلیه شد. بنابراین، فشار باعث شد که سرعت افزایش دمای انباره به طور قابل قبولی کندتر شود. داده‌های ارائه شده شکل ۳ نشان می‌دهد که افزایش فشار می‌تواند به طور قابل توجهی، لحظه‌ای را که انباره از حداکثر محدودیت دمای مورد نظر فراتر می‌رود به تعویق بیندازد. نتیجه مشاهده شده در شکل ۳ ممکن است به دلیل افزایش ظرفیت گرمایی و قابلیت ذخیره انرژی با فشار باشد. مشاهده می‌شود که در کمتر از یک دقیقه دمای خانه انباره در فشار ۱۰۰ کیپ به حداکثر مجاز یعنی ۶۳ دس می‌رسد ولی در فشار ۵۰۰ کیپ این زمان به حدود ۳ دقیقه افزایش داشته است.



شکل ۳ تغییر دمای خانه با زمان در فرآیند تخلیه. مقایسه مورد ۱۱ و مورد ۱۲. (فشار ۱۰۰ کیپ در مقابل ۵۰۰ کیپ، نرخ تخلیه: ۷)

کاهش دمای خانه پس از افزایش در شکل‌های ۲ و ۳ به دلیل توقف فرآیند تخلیه و دادن فرصت به انباره برای خنک شدن است. طبق نتایج، فشار می‌تواند در تغییر رفتار هر سامانه مدیریت گرمایی که از ماده تغییر حالت‌دهنده استفاده می‌کند، موثر باشد. پیشنهادی وجود دارد که اعمال فشار خارجی می‌تواند عملکرد انباره‌ها را با جلوگیری از فاصله بین لایه‌های آن افزایش دهد. به طور معمول، عملکرد بهینه خانه‌ها را می‌توان در محدوده فشار ۲۰ تا ۲۰۰ کیپ به دست آورد. انباره با مقدار مناسب فشار خارجی ایمن‌تر است [۳۳].

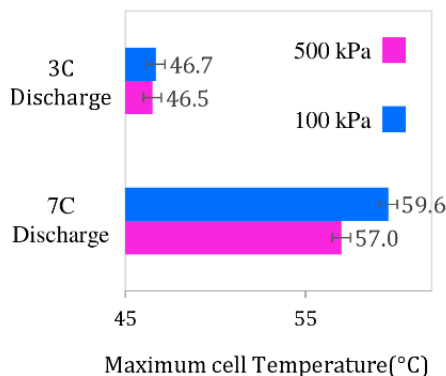
### ۳-۲- تأثیر فشار بر حداکثر دما

حتی کوچکترین کاهش درجه حرارت در زمینه مدیریت گرمایی انباره، بین جوامع تحقیقاتی قابل توجه است. فشار شدید برای ماده تغییر حالت‌دهنده می‌تواند عبور از دمای مجاز را به تعویق بیندازد. اما همواره احتمال تجاوز از حداکثر دمای مجاز تا قبل از تکمیل فرآیند تخلیه وجود دارد. در نرخ‌های تخلیه بالا، دمای انباره از حد مجاز عبور می‌کند. در مواردی که دما از حد مجاز عبور کرده است، امکان مشاهده اثر فشار بر حداکثر دما وجود ندارد. لذا برای بررسی اثر فشار بر حداکثر دما بهتر است مواردی مقایسه شوند که به حداکثر دما نرسیده‌اند. مورد ۱ و ۳ در جدول ۵ از جمله مواردی هستند که در آن‌ها دما به سقف مجاز نرسیده است.

شکل ۴ تأثیر فشار بر حداکثر دمای خانه را در فشارهای ۵۰۰ و ۱۰۰ کیپ و در نرخ‌های تخلیه ۳ و ۵ نشان می‌دهد. اگر مورد ۱ و ۳ مورد مقایسه قرار گیرد، تنها تفاوت بین این دو مورد فشار است. فشار در مورد ۱ برابر ۱۰۰ و در مورد ۳ برابر ۵۰۰ کیپ است. در هر دو مورد ۱ و ۳، دمای اولیه خانه یکسان و نرخ تخلیه برابر ۵ بوده است. با مقایسه نتایج این دو مورد در جدول ۵، این نتیجه حاصل می‌شود که حداکثر دما ۲٫۶ دس در فشار ۵۰۰ کیپ به نسبت تخلیه خانه در فشار ۱۰۰ کیپ کاهش داشته است.

در شکل ۴ مقایسه موارد ۹ و ۱۰ نیز مشاهده می‌شود، مورد ۹ و ۱۰ هم از دیگر مواردی است که در آن‌ها دما به حداکثر مجاز نرسیده است. تنها تفاوت بین مورد ۹ و ۱۰، فشار است. در هر دو مورد نرخ تخلیه برابر ۳ بوده و دمای اولیه نیز یکسان است. اما در مورد ۱۰، فشار ۵۰۰ کیپ است. در حالی که در مورد ۹، فشار ۱۰۰ کیپ است. مشاهده می‌شود که حداکثر دما در مورد ۱۰ برابر ۴۶٫۵ و در مورد ۹ برابر ۴۶٫۷ دس است. یعنی تفاوت بین آن‌ها ۰٫۲ دس است. یعنی در نرخ تخلیه ۳ حداکثر دما ۰٫۲ دس با اعمال فشار کاهش یافته است. بنابراین با مقایسه نتایج موارد ۹ و ۱۰ با موارد ۱ و ۳، یافت می‌شود که فشار شدید در نرخ‌های تخلیه پایین تأثیر کمتری بر حداکثر دما دارد. بنابراین فشار تأثیر خود را زمانی نشان می‌دهد که نرخ انتقال حرارت بالا باشد و گرمای قابل توجهی تولید شود. اگر نرخ تخلیه ۷ باشد نیز با توجه به محدودیت تعریف شده، حداکثر دما همواره ۶۳ دس

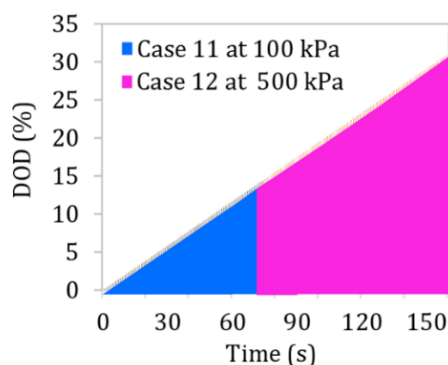
است و فشار فقط زمان رسیدن به حداکثر دما را به تعویق می‌اندازد. افزایش نرخ تخلیه از ۳ به ۷، حداکثر دمای انباره را از کمتر از ۵۰ به بیش از ۶۰ دس افزایش داده است که با مقایسه نتایج موارد ۵ و ۷ قابل مشاهده است.



شکل ۴ تأثیر فشار بر حداکثر دمای خانه در فشارهای مختلف بر حسب نرخ تخلیه خانه

### ۳-۳- تأثیر فشار بر عمق تخلیه

عمق تخلیه یا (DOD)، یک معیار رایج برای ارزیابی عملکرد انباره است. این نشانگر، درصد تغذیه خارج شده از انباره نسبت به ظرفیت کل ذخیره سازی آن است که به تعیین مقدار انرژی مصرف شده و مقدار باقی مانده در انباره کمک می‌کند [۳۴]. دستگاه تحلیل‌گر انباره مقدار انرژی برقی خارج شده از انباره را اندازه‌گیری می‌کند. ظرفیت کل انباره نیز طبق اطلاعات سازنده انباره موجود است. به این ترتیب عمق تخلیه انباره طبق معادله ۱ اندازه‌گیری شد. با نگاهی به جدول ۵، موارد ۱۱ و ۱۲، مشخص می‌شود که افزایش فشار از ۱۰۰ به ۵۰۰ کیپ، در نرخ تخلیه ۷، باعث افزایش DOD از ۱۴,۲۵٪ به ۳۰,۸۸٪ می‌شود. شکل ۵ مقایسه بین مورد ۱۱ و ۱۲ را بر حسب زمان تخلیه نشان داده است. در این شکل محور افقی زمان تخلیه و محور عمودی درصد عمق تخلیه است. طبق این شکل، فشار ۵۰۰ کیپ، درصد عمق تخلیه را بیش از ۱۶ خانه در نرخ تخلیه بالا، افزایش داده است. بنابراین، فشار تأثیر قابل توجهی بر DOD به عنوان یک متغیر حیاتی در ارزیابی عملکرد سامانه مدیریت گرمایی دارد. افزایش DOD با افزایش فشار به این دلیل است که فشار شدید، سرعت افزایش دمای انباره را کاهش می‌دهد و خانه قبل از عبور از حداکثر دمای ایمن، زمان بیشتری برای تخلیه دارد. لذا انرژی بیشتری از سامانه قبل از قطع جریان استخراج می‌شود. بنابراین استفاده از فشار در سامانه‌های تامین توان که نیاز به جریان برق بالا در مدت زمان کوتاهی دارند موثر است. کاهش نرخ افزایش دما با فشار می‌تواند ناشی از افزایش ظرفیت حرارتی ماده تغییر حالت‌دهنده باشد.

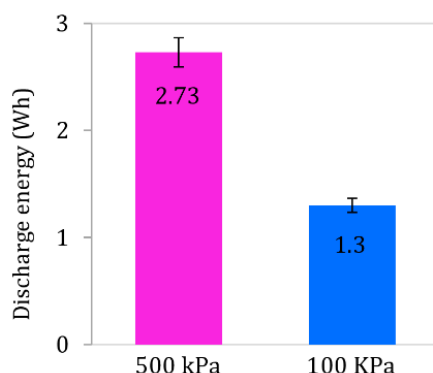


شکل ۵ درصد عمق تخلیه خانه در نرخ تخلیه ۷ در فشارهای ۱۰۰ و ۵۰۰ کیپ (در دمای اولیه ۳۳,۵ دس)

افزایش فشار زمانی بر عمق تخلیه موثر است که دما از حداکثر مجاز عبور کرده باشد. به عنوان مثال در موارد ۱ و ۳، عمق تخلیه یکسان است. زیرا در هر دو مورد فرصت تخلیه کامل وجود داشته است. در موارد ۱ و ۳ فقط متغیر فشار متفاوت بوده است. اما در مقایسه موارد ۲ و ۴، فشار بر عمق تخلیه موثر بوده است. در موارد ۲ و ۴ نیز تنها تفاوت، متغیر فشار است، اما دما به حداکثر مجاز قبل از تخلیه کامل رسیده است. لذا مشاهده می‌شود که در مقایسه موارد ۲ و ۴، فشار بر عمق تخلیه موثر بوده است. مقایسه مشابهی را می‌توان برای موارد ۹ و ۱۰ انجام داد. بدیهی است که DOD با افزایش نرخ تخلیه کاهش می‌یابد. زیرا گرما با نرخ بیشتری تولید می‌شود و فرصت تخلیه کامل، زودتر صلب می‌گردد. هنگامی که نرخ تخلیه از ۷ به ۳، در دمای اولیه یکسان کاهش می‌یابد، DOD از حدود ۱۴٪ به تقریباً ۹۴٪ در فشار ۱۰۰ کیپ افزایش می‌یابد. این موضوع با مقایسه موارد ۱۱ و ۹ قابل مشاهده است.

### ۳-۴- تأثیر فشار بر انرژی تخلیه

انرژی تخلیه مقدار انرژی برقی است که هنگام استفاده از انباره از آن آزاد می‌شود. افزایش فشار تأثیر مثبتی بر مقدار انرژی تخلیه دارد. با مقایسه موارد ۱۱ و ۱۲، انرژی استخراج شده از انباره در نرخ خالی شدن ۷، با افزایش فشار از ۱۰۰ به ۵۰۰ کیپ، بیش از دو برابر می‌شود. شکل ۶ این مقایسه را نشان داده است. در دو مورد نامبرده، دمای اولیه خانه یکسان بوده است. در واقع انرژی به دست آمده از انباره از ۱،۳ وات ساعت به بیش از ۲،۷۳ وات ساعت، با افزایش فشار ارتقا یافته است. این اثر قابل توجه، تنها در نرخ تخلیه بالا (۷) مشاهده می‌شود. بیشترین انرژی از انباره در مورد ۶ (طبق جدول ۵) دریافت شده است که برابر ۸،۳ وات ساعت است. با افزایش نرخ تخلیه، کاهش متناظری در انرژی تخلیه وجود دارد و فشار به شدت بر انرژی قابل دریافت از انباره تأثیر می‌گذارد.



شکل ۶ مقایسه انرژی تخلیه شده از خانه انباره در نرخ تخلیه ۷ در فشارهای ۱۰۰ و ۵۰۰ کیپ

### ۳-۵- صفحه همبستگی حداقل مربعات: اثر فشار، نرخ تخلیه، و دمای اولیه بر عمق تخلیه خانه

در این بخش، هدف یافتن صفحه پاسخی است که مجموع اختلاف مربعات بین نقاط داده واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده را به حداقل برساند. روش سطح پاسخ در پژوهش‌های انباره استفاده می‌شود [۳۵]. در پژوهش حاضر با استفاده از نرم افزار بهترین صفحه‌ای که با حداقل مربعات از نقاط پاسخ آزمایشات تجربی، برای پیش‌بینی عمق تخلیه با توجه به متغیر فشار و دمای اولیه بدست می‌آید، طبق معادله ۲ یک همبستگی خطی است:

$$DOD = 305.63464 - 4.82107(I) + 1.56563(P) - 17.17875(C) \quad (2)$$

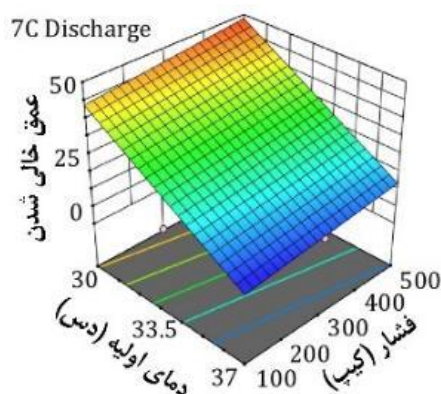
که DOD درصد عمق تخلیه، I دمای اولیه خانه بر حسب دس، و C نرخ تخلیه است. بهترین نوع وابستگی که بتوان برای نتایج عمق تخلیه در این آزمایش لحاظ نمود، وابستگی خطی است. جدول ۶ مقایسه‌ای از همبستگی‌های مختلف را نسبت به عمق تخلیه بر اساس نتایج آزمایش تجربی نشان می‌دهد. با توجه به تحلیل نرم افزاری، هیچ همبستگی

محسوسی در بین متغیرهای ورودی نسبت به عمق تخلیه وجود ندارد. لذا متغیرهای ورودی به صورت مستقل بر روی عمق تخلیه اثر می‌گذارند. اگر چه همبستگی برای حداکثر دما مشاهده گردید. مربع باقیمانده ( $R^2$ ) پیش‌بینی شده و مربع باقیمانده تعدیل شده، متغیرهای آماری هستند که در زمینه بهینه‌سازی سطح پاسخ استفاده می‌شوند. بهترین الگوی همبستگی، روشی است که مقدار مربع هر دو نوع باقیمانده را حداکثر کند.

جدول ۶ مربع باقیمانده پیش‌بینی شده و تعدیل شده در همبستگی خطی و درجه دوم

نوع همبستگی	مربع باقیمانده پیش‌بینی شده $R^2$	مربع باقیمانده تعدیل شده $R^2$
خطی با حداقل مربعات	۰,۷۶۳۴	۰,۸۴۶۰
درجه دوم	۰,۰۹۵۱	۰,۸۱۰۸

شکل ۷ بر اساس همبستگی خطی نتایج عمق تخلیه ترسیم شده است. آنچه در این شکل مشاهده می‌شود، صفحه ای است که درصد عمق تخلیه خانه انباره را بر اساس فشار و دمای اولیه خانه در نرخ تخلیه ۷ ترسیم کرده است و تغییرات عمق تخلیه را از صفر تا ۵۰٪ نشان می‌دهد.



شکل ۷ اثر فشار و دمای اولیه بر عمق تخلیه خانه در نرخ تخلیه ۷

#### ۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی تجربی عملکرد سامانه مدیریت گرمایی انباره، با استفاده از چند اتیلن گلیکول-هزار تحت فشار به عنوان ماده تغییر حالت‌دهنده در فرآیند تخلیه انجام شد. هدف اصلی بررسی چگونگی تأثیر فشار بر عملکرد ماده تغییر حالت‌دهنده بوده است. در نتیجه، عملکرد گرمایی خانه انباره استوانه‌ای ۱۸۶۵۰، که با ماده تغییر حالت‌دهنده پوشانده شده بود، به طور تجربی تحت فشارهای ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیپ مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، این مطالعه تأثیر نرخ تخلیه را نیز بررسی کرد. در نتیجه، تأثیر نرخ تخلیه در محدوده ۳ الی ۷ بر روی رفتار حرارتی خانه بررسی شد. این مطالعه با هدف تعیین تأثیر عوامل ورودی بر چندین متغیر خروجی از جمله دمای حداکثر، عمق تخلیه و انرژی تخلیه انجام شد. نتایج و مشارکت‌های قابل توجه این مطالعه به شرح زیر است:

استفاده از فشار شدید به طور قابل توجهی عملکرد کلی سامانه مدیریت گرمایی مبتنی بر ماده تغییر حالت‌دهنده را برای انباره‌های لیتیوم یونی بهبود می‌بخشد. افزایش فشار می‌تواند به طور قابل توجهی لحظه‌ای را که انباره از حداکثر محدودیت دمای مورد نظر فراتر می‌رود به تعویق بیندازد به طوری که:

- با افزایش فشار از ۱۰۰ به ۵۰۰ کیپ، انرژی استخراج شده از انباره با نرخ خالی شدن ۷ بیش از دو برابر می‌شود.

- هنگامی که نرخ خالی شدن ۷ باشد، و فشار ۵۰۰ کیپ باشد، انباره قبل از عبور از دمای ایمن، در مقایسه با فشار اتمسفر، تقریباً دو برابر بیشتر تخلیه می‌شود.
  - زمانی که نرخ تخلیه ۵ است، افزایش فشار از ۱۰۰ به ۵۰۰ کیپ می‌تواند حداکثر دمای خانه را تا ۲٫۶ دس کاهش دهد.
  - در نرخهای تخلیه بالاتر، فشار تأثیر بیشتری بر کاهش حداکثر دما دارد.
  - فشار ۵۰۰ کیپ عمق تخلیه را تا بیش از ۱۶ درصد در نرخ تخلیه بالا افزایش داده است.
  - متغیرهای ورودی به صورت مستقل بر عمق تخلیه اثر می‌گذارند و برهمکنشی بین آنها وجود ندارد.
- این تحقیق کاربردهای بالقوه استفاده از مواد تغییر حالت‌دهنده را برای مدیریت گرمایی انباره در محیط‌های پرفشار، مانند بدنه زیردریایی‌های بدون سرنشین، برجسته می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که این رویکرد ممکن است در حفظ دمای انباره پایدار و بهبود عملکرد انباره در شرایط فشار شدید موثر باشد. علاوه بر این، این فناوری ممکن است کاربردهای مختلفی داشته باشد که در آن منابع تغذیه با نرخ تخلیه بالا و در فشار شدید مورد نیاز است.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) اعلام می‌دارند.

## فهرست علائم

$I$	دمای اولیه خانه انباره °C (درجه سانتی‌گراد = دس)
$P$	فشار Kpa (کیلو پاسکال = کیپ)
$C$	نرخ خالی شدن (تخلیه)
$DOD$	عمق تخلیه انباره
$Q$	ظرفیت اسمی انباره
$Q_d$	ظرفیت جریانی - زمانی انباره
$R^2$	مربع باقیمانده

## References

- [1] Bhutto YA, Pandey AK, Saidur R, Sharma K, Tyagi VV. Critical insights and recent updates on passive battery thermal management system integrated with nano-enhanced phase change materials. *Materials Today Sustainability*. 2023 Sep 1;23:100443. doi: 10.1016/j.mtsust.2023.100443
- [2] Khan MM, Alkhedher M, Ramadan M, Ghazal M. Hybrid PCM-based thermal management for lithium-ion batteries: Trends and challenges. *Journal of Energy Storage*. 2023 Dec 1;73:108775. doi: 10.1016/j.est.2023.108775
- [3] Maknikar SK, Pawar AM. Application of phase change material (PCM) in battery thermal management system (BTMS): A critical review. *Materials Today: Proceedings*. 2023 Aug 31. doi: 10.1016/j.matpr.2023.08.329
- [4] Mahmud M, Rahman KS, Rokouzzaman M, Habib AA, Islam MR, Motakabber SM, Channumsin S, Chowdhury S. Lithium-ion battery thermal management for electric vehicles using phase change material: A review. *Results in Engineering*. 2023 Sep 16:101424. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101424
- [5] Cai S, Zhang X, Ji J. Recent advances in phase change materials-based battery thermal management systems for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2023 Nov 30;72:108750. doi: 10.1016/j.est.2023.108750

- [6] 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 [In Persian]
- [7] Nasajpour-Esfahani N, Garmestani H, Rozati M, Smaism GF. The role of phase change materials in lithium-ion batteries: A brief review on current materials, thermal management systems, numerical methods, and experimental models. Journal of Energy Storage. 2023 Jul 1;63:107061. doi: 10.1016/j.est.2023.107061
- [8] Shi H, Cheng M, Feng Y, Qiu C, Song C, Yuan N, Kang C, Yang K, Yuan J, Li Y. Thermal management techniques for lithium-ion batteries based on phase change materials: a systematic review and prospective recommendations. Energies. 2023 Jan 12;16(2):876. doi: 10.3390/en16020876
- [9] Tete PR, Gupta MM, Joshi SS. Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review. Journal of Energy Storage. 2021 Mar 1;35:102255. doi: 10.1016/j.est.2021.102255
- [10] Jamshidi N, Sadafi N. The effect of Nano-phase change materials on hydronic floor heating system in temperate and humid climate. Modares Mechanical Engineering. 2017 Mar 10;16(13):87-91. [In Persian]
- [11] Alipoor A, Nasiri R. Experimental investigation of temperature gradient in a greenhouse bed soil containing phase change material. Modares Mechanical Engineering. 2017 Mar 10;16(13):113-8. [In Persian]
- [12] Yadav M, Pasarkar N, Naikwadi A, Mahanwar P. A review on microencapsulation, thermal energy storage applications, thermal conductivity and modification of polymeric phase change material for thermal energy storage applications. Polymer Bulletin. 2023 Jun;80(6):5897-927. doi: 10.1007/s00289-022-04369-x
- [13] Landini SJ, Leworthy J, O'Donovan TS. A review of phase change materials for the thermal management and isothermalisation of lithium-ion cells. Journal of Energy Storage. 2019 Oct 1;25:100887. doi: 10.1016/j.est.2019.100887
- [14] Yang J, Yu Q, Chen S, Luo M, Du W, Yu Y, Wu Y, Zhou W, Zhou Z. Effect of mechanical vibration on thermal performance of PCM-fin structure Li-ion battery thermal management system under high-rate discharge and high-temperature environment. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023 Dec 15;217:124722. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124722
- [15] Li WQ, Qu ZG, He YL, Tao YB. Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials. Journal of power sources. 2014 Jun 1;255:9-15. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.006
- [16] Hémercy CV, Pra F, Robin JF, Marty P. Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material. Journal of Power Sources. 2014 Dec 15;270:349-58. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.147
- [17] Safdari M, Ahmadi R, Sadeghzadeh S. Numerical and experimental investigation on electric vehicles battery thermal management under New European Driving Cycle. Applied Energy. 2022 Jun 1;315:119026. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119026
- [18] Yang W, Lin R, Li X, Li C, Wu Y, Zhang G, Liu X, Li S, Wang Y. High thermal conductive and anti-leakage composite phase change material with halloysite nanotube for battery thermal management system. Journal of Energy Storage. 2023 Aug 30;66:107372. doi: 10.1016/j.est.2023.107372
- [19] Zheng X, Bao Y, Huang A, Yu L, Qin G. Temperature dependence of thermophysical properties of polyethylene glycol in solid/liquid phase change region. The Journal of Chemical Thermodynamics. 2023 May 1;180:107022. doi: 10.1016/j.jct.2023.107022
- [20] Guo C, He L, Yao Y, Lin W, Zhang Y, Zhang Q, Wu K, Fu Q. Bifunctional liquid metals allow electrical insulating phase change materials to dual-mode thermal manage the Li-ion batteries. Nano-Micro Letters. 2022 Dec;14(1):202. doi: 10.1007/s40820-022-00947-w
- [21] Chen X, Liu P, Gao Y, Wang G. Advanced pressure-upgraded dynamic phase change materials. Joule. 2022 May 18;6(5):953-5.
- [22] Fu W, Yan X, Gurumukhi Y, Garimella VS, King WP, Miljkovic N. High power and energy density dynamic phase change materials using pressure-enhanced close contact melting. Nature Energy. 2022 Mar;7(3):270-80. doi: 10.1038/s41560-022-00986-y
- [23] He J, Chu W, Wang Q. Experimental study on pressure-enhanced close contact melting with PCMs for stable temperature control of high heat flux electronic devices. Applied Thermal Engineering. 2023 Jul 25;230:120707. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120707

- [24] Baygi SM, Sadrameli SM. Thermal management of photovoltaic solar cells using polyethylene glycol 1000 (PEG1000) as a phase change material. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018 Mar 1;5:405-11. doi: [10.1016/j.tsep.2018.01.012](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.01.012)
- [25] Paberit R, Rilby E, Gohl J, Swenson J, Refaa Z, Johansson P, Jansson H. Cycling stability of poly (ethylene glycol) of six molecular weights: Influence of thermal conditions for energy applications. *ACS Applied Energy Materials*. 2020 Nov 4;3(11):10578-89. doi: [10.1021/acsaem.0c01621](https://doi.org/10.1021/acsaem.0c01621)
- [26] Minea AA. State of the art in PEG-based heat transfer fluids and their suspensions with nanoparticles. *Nanomaterials*. 2021 Jan 3;11(1):86. doi: [10.3390/nano11010086](https://doi.org/10.3390/nano11010086)
- [27] Vahabi M. Experimental investigation and numerical simulation of thermal energy storage in phase change material under different tilt angles of the enclosure. *Modares Mechanical Engineering*. 2018 Jan 10;17(11):133-43. [In Persian]
- [28] 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 Nov 27;59(59):45-62. [In Persian]
- [29] Li R, Li W, Singh A, Ren D, Hou Z, Ouyang M. Effect of external pressure and internal stress on battery performance and lifespan. *Energy Storage Materials*. 2022 Nov 1;52:395-429. doi: [10.1016/j.ensm.2022.07.034](https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.07.034)
- [30] Li W, Klemeš JJ, Wang Q, Zeng M. Efficient thermal management strategy of Li-ion battery pack based on sorption heat storage. *Energy Conversion and Management*. 2022 Mar 15;256:115383. doi: [10.1016/j.enconman.2022.115383](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115383)
- [31] Van Gils RW, Danilov D, Notten PH, Speetjens MF, Nijmeijer H. Battery thermal management by boiling heat-transfer. *Energy Conversion and Management*. 2014 Mar 1;79:9-17. doi: [10.1016/j.enconman.2013.12.006](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.006)
- [32] Qiao M, Li XF. Research on the Method of Satellite Energy Real-Time Dispatching. In *Signal and Information Processing, Networking and Computers: Proceedings of the 8th International Conference on Signal and Information Processing, Networking and Computers (ICSINC) 2022 Jul 2* (pp. 682-687). Singapore: Springer Nature Singapore. doi: [10.1007/978-981-19-3387-5\\_80](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3387-5_80)
- [33] Li R, Li W, Singh A, Ren D, Hou Z, Ouyang M. Effect of external pressure and internal stress on battery performance and lifespan. *Energy Storage Materials*. 2022 Nov 1;52:395-429. doi: [10.1016/j.ensm.2022.07.034](https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.07.034)
- [34] Bharathraj S, Kaushik A, Adiga SP, Kolake SM, Song T, Sung Y. Accessing the current limits in lithium ion batteries: Analysis of propensity for unexpected power loss as a function of depth of discharge, temperature and pulse duration. *Journal of Power Sources*. 2021 May 15;494:229723. doi: [10.1016/j.jpowsour.2021.229723](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229723)
- [35] Nazghelichi T, Torabi F, Esfahanian V. Optimization of geometrical parameters in a lead-acid battery using response surface method to access of maximum capacity, minimum charge-time and minimum temperature rise. *Modares Mechanical Engineering*. 2018 Aug 10;18(4):1-0. [In Persian]