



دانشگاه صنعتی سهند
دانشکده مهندسی مکانیک



جلسه دفاع از رساله دکتری

عنوان:

بررسی عددی سیستم مدیریت حرارتی پکیج باتری‌های لیتیوم-یونی خودروهای الکتریکی بر پایه خنک‌کاری هیبریدی مبتنی بر محیط متخلخل، مواد تغییر فاز دهنده و خنک‌کاری با مایع

Numerical investigation on thermal management system of lithium-ion battery pack of electric vehicles based on hybrid cooling of porous media, phase change materials, and liquid cooling

دانشجو: سالار زینالی

استاد راهنما: دکتر الهه نشاط (دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی سهند)

هیئت داوران:

دکتر محمد گوهرخواه (دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی سهند تبریز)
دکتر اردلان شفیعی (دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی سهند تبریز)
دکتر مصطفی اسماعیلی (دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه خوارزمی)

چکیده:

این مطالعه، به بررسی عددی یک سیستم مدیریت حرارتی ترکیبی باتری (HBTMS) طراحی شده برای بسته‌های باتری لیتیوم-یونی در خودروهای الکتریکی می‌پردازد که مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، فوم فلزی، خنک‌کاری مایع و لایه‌های متخلخل را با هم تلفیق کرده است. هدف HBTMS بهبود عملکرد حرارتی، بهبود اتلاف گرما، مدیریت نرخ تخلیه بالا، یکنواختی دما و تضمین ایمنی باتری از طریق کمینه کردن خطرات فرار حرارتی است. برای تحلیل تأثیرات پیکربندی‌ها و ضخامت‌های مختلف PCM و لایه‌های متخلخل بر شاخص‌های کلیدی حرارتی مانند دمای سطح حداکثر، درصد مایع PCM، یکنواختی دما و بازده انتقال حرارت، از مدل سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای شبیه‌سازی یک ماژول باتری متشکل از دوازده سلول لیتیوم-یون NCM ۱۸۶۵۰ استفاده شد. نتایج نشان داد که؛ سیستم HBTMS کاملاً یکپارچه شده با PCM، فوم فلزی و خنک‌کاری مایع، دمای سطح حداکثر را در نرخ تخلیه 5C به حدود ۳۰۱ کلوین کاهش داده و پروفیل حرارتی پایدار را حفظ می‌کند. در مقایسه با PCM خالص، افزودن فوم فلزی و خنک‌کاری مایع باعث تأخیر در تغییر فاز PCM شده، از اشباع سریع جلوگیری نموده و امکان جذب مستمر حرارت را فراهم می‌کند. همچنین افزایش ضخامت PCM، توزیع حرارت را بهبود بخشیده و اختلاف دمای حداکثر را کاهش داده و یکنواختی دما در سراسر بسته باتری را تضمین می‌کند. حضور لایه متخلخل، انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش داده و وابستگی سیستم به گرمای نهان PCM را کاهش می‌دهد. تحلیل عدد ناسلت و پارامتر PEC بهترین عملکرد در حذف حرارت و مدیریت فشار بهینه را در HBTMS، به‌ویژه با ضخامت ۳ میلی‌متری لایه متخلخل، تأیید کرد. از دیگر پارامترهای کلیدی بررسی شده، می‌توان به دبی جرمی خنک‌کننده مایع، دمای محیط، دمای مایع خنک‌کننده ورودی، تخلخل لایه متخلخل و چگالی منافذ و نیز ویژگی‌های فوم مسی اشاره کرد. تأثیر این پارامترها بر دمای سطح باتری، کسر ذوب PCM و راندمان انتقال حرارت به‌صورت سیستماتیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد؛ کاهش دمای مایع خنک‌کننده ورودی به ۲۹۳/۱۵ کلوین و بهینه‌سازی دبی خنک‌کننده به ۰/۰۰۱ کیلوگرم بر ثانیه، به‌طور قابل توجهی حداکثر دمای باتری را کاهش می‌دهد و کسر مایع PCM را تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد و در نتیجه جذب گرمای نهان را طولانی می‌کند. علاوه بر این، لایه‌های متخلخل با تخلخل بالا (۰/۹) و ۳۰ PPI انتقال حرارت همرفتی را افزایش می‌دهند و گرادیان‌های حرارتی را کاهش می‌دهند. پیکربندی بهینه فوم مس (تخلخل ۰/۹، ۳۰ PPI) با تسریع تغییر فاز PCM و اطمینان از توزیع بهتر حرارت، عملکرد حرارتی را بیشتر بهبود می‌بخشد. اعتبارسنجی مدل در برابر داده‌های تجربی منتشر شده، استحکام رویکرد عددی را تأیید می‌کند. این کار، پتانسیل معماری‌های یکپارچه HBTMS را در پیشبرد ایمنی حرارتی و کارایی باتری‌های لیتیوم-یونی در کاربردهای پرمصرف برجسته می‌کند. مطابق با شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده، مشاهده می‌شود که؛ سیستم HBTMS عملکرد به‌مراتب بهتری نسبت به سیستم‌های BTMS نشان می‌دهد و کنترل دما و پایداری بهبود یافته‌ای را ارائه می‌کند که برای طول عمر طولانی‌تر و عملکرد ایمن باتری حیاتی است. یافته‌ها پتانسیل HBTMS را برای کاربردهایی که نیازمند مدیریت حرارتی قوی هستند، برجسته می‌سازد.

مقالات مستخرج از رساله:

1. Zeinali, S. and E. Neshat, Numerical investigation on thermal management system of lithium-ion battery pack of electric vehicles based on hybrid cooling of porous media, phase change materials, and liquid cooling. Case Studies in Thermal Engineering, 2025: p. 106732.