Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38:2 (2023) 1105-1116

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University
Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Numerical investigation of lithium-ion battery thermal management using fins embedded in phase change materials

Göker Türkakar*, İsmail Hoş
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Zonguldak Bulent Ecevit University, Zonguldak, 67100, Türkiye

Highlights:

- Effect of natural convection and number of fin on the battery temperature
- Increasing thermal conductivity by placing copper fin into PCM
- Passive cooling of lithium-ion batteries with PCM

Keywords:

- Passive cooling of lithium-on batteries
- Melting of phase change material

Fluent thermal analysis

- Natural convection effect in the PCM
- Electric and hybrid electric vehicle
-

Article Info:

Research Article
Received: 01.07.2020
Accepted: 19.05.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.762563

Correspondence:

Author: Göker Türkakar
e-mail: turkakar@beun.edu.tr
phone: +90 372 291 1135

Graphical/Tabular Abstract

Phase Change Materials, PCMs are used in the thermal management of the battery systems. As can be seen from Figure A (a), the fin-added battery is surrounded by the PCM. The system is cooled by stagnant air in the ambient. A parametric analysis has been presented. These parameters are the discharge rates, the number of fins, and the PCM type.

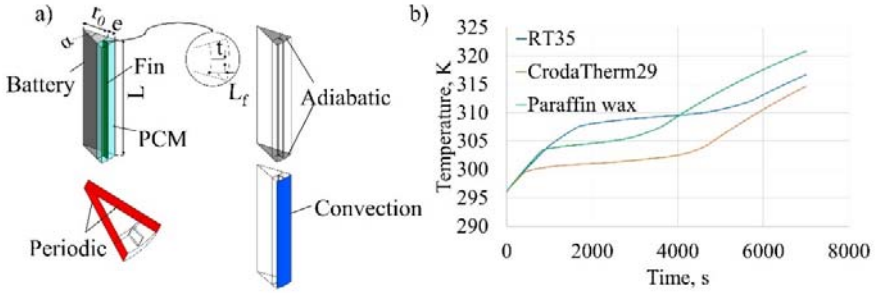


Figure A. The geometry and the results. a) the geometry and boundary conditions, b) comparison of various PCMs (12 fins, 1.43 W heat generation)

Purpose: The study aims to understand the effect of the use of fins in the PCM region on the thermal characteristics of the system. This study has two objectives. It is desired to reduce the temperature of the battery and, at the same time, to provide more uniform temperature distribution in the cell, thanks to the appropriate arrangement of the fins.

Theory and Methods: The Enthalpy method is employed to solve the energy equation in the PCM region. This region is handled with the assumption of stationary PCM for some analyses. This assumption means that only thermal conduction is taken into consideration. Besides the conduction, natural convection inside the PCM is put into account to understand the importance of the convection inside the PCM. Transient numerical simulations are conducted via ANSYS/Fluent software. The periodic boundary condition is applied, and only a slice of the battery has been modeled to reduce the computational effort. The boundary conditions are presented in Figure A (a) Three different geometry are examined. These are without-fin, 6-fin and 12-fin cases. The analyses have been carried out for 1.43 W and 2.75W heat generations corresponding to the lithium-ion discharge rates of 2C and 3C. PCM types, CrodaTherm29, Paraffin-wax, and RT35 are examined in the study.

Results: Natural convection effect should be considered, especially for 12-fins geometry, as the battery temperature at 6000 s (1.43 W heat generation) difference between two models is found as 7.9 K (2.5% difference). For the 2.75 W heat generation case, 6 and 12 fin geometries have reduced the average battery temperature 9.4 K (2.6%) and 15.18 K (4.2%), respectively at 6000th s. The use of fins not only reduces the average battery temperature but also provides more homogenous battery temperature. Simulations performed for 1.43 W heat generation show that the temperature difference between the lower and upper surfaces of the battery at the end of 5000th s are 5.9°C, 3.2°C, and 1.9°C for without fin, 6 fin, and 12 fin cases, respectively. Figure A (a) shows by using 12 fins for 1.43 W heat generation, all PCMs have successfully kept the battery temperature below the critical value of 50°C for 7000 s period.

Conclusion: Present study proves that the use of fins is very effective in terms of ensuring cooler and more uniform temperature distribution in the cell. Putting into account the convection effects in PCM is a must if the fins are present in the system.

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38:2 (2023) 1105-1116

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Lityum iyon pillerin faz değişim maddesi ile ısıl yönetiminde kanat kullanımının sayısal incelenmesi

Göker Türkakar*, İsmail Hoş
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 67100 İncivez, Zonguldak, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Pil sıcaklığına kanat sayısının ve doğal taşınımın etkisi
- FDM içerisine bakır kanat koyarak ısıl iletkenliği artırma
- Lityum iyon pillerde FDM ile pasif soğutma

Makale Bilgileri
Araştırma Makalesi
Geliş: 01.07.2020
Kabul: 19.05.2022

DOI:
10.17341/gazimmfd.762563

Anahtar Kelimeler:
Lityum iyon pil,
faz değişim malzemeleri,
ısıl analiz,
pasif soğutma,
elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar

ÖZ

Pil sistemleri için en önemli sorunlar pil sıcaklığını güvenli sınırlar içinde tutulabilmek ve pildeki sıcaklık dağılımını mümkün olduğunca homojen hale getirebilmektir. Bu yüzden, yüksek miktarda gizli ısı depolamasıyla pasif soğutma sistemlerinde umut vadeden yöntemler arasında olan Faz Değişim Malzemelerinden, FDM, yararlanılmıştır. FDM bölgesinde yalnızca ısı iletimi; ayrıca, ısı iletim ile doğal taşınımın da hesaba katılıp ANSYS/FLUENT yazılımı vasıtasıyla, pildeki ortalama sıcaklık ve sıcaklık dağılımı farklı parametreler için sayısal yöntem kullanılarak incelenmiştir. Bahsedilen parametreler FDM içerisine konulan kanat sayısı, FDM tipi ve pildeki ısı üretimi değeridir (Lityum iyon 26650, $LiFePO_4$/C 2C ve 3C deşarja tekabül eden 1,43 W ve 2,75 W). FDM içerisine yerleştirilen kanatların pili istenilen çalışma sıcaklığı aralığında tutmada ve pilde düzgün dağılımlı sıcaklık sağlamada etkili olduğu anlaşılmıştır. En iyi sonuç 12 kanat yerleştirildiği durum için elde edilmiştir. 2,75 W ısıl yük için, 12 adet kanat kullanımı sayesinde pildeki ortalama sıcaklık 6000 s sonunda yaklaşık 15°C düşmüştür. Pildeki ısı üretiminin 1,43 W olduğu durumda; 5000. s'de kanatsız geometri için pilin alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı 5,9°C iken, 12 kanat kullanımı durumunda ise sıcaklık farkı 1,9°C'ye düşmüştür.

Numerical investigation of lithium-ion battery thermal management using fins embedded in phase change materials

HIGHLIGHTS

- The effect of natural convection and the number of the fin on the battery temperature
- Increasing thermal conductivity by placing copper fin into PCM
- Passive cooling of lithium-ion batteries with PCM

Article Info
Research Article
Received: 01.07.2020
Accepted: 19.05.2022

DOI:
10.17341/gazimmfd.762563

Keywords:
Lithium-ion battery,
phase change materials,
thermal analysis,
passive cooling,
electric and hybrid electric vehicles

ABSTRACT

Two critical problems in battery packs are keeping the battery temperature within safe limits and providing the battery's temperature distribution as homogenous as possible. Therefore, Phase Change Materials, PCMs, one of the most promising ones among the passive cooling techniques thanks to its high latent heat storage capacity, are employed. Utilizing a thermal model that puts into account only thermal conduction and conduction+natural convection, the average temperature and its distribution in the battery are sought for various parameters using ANSYS/FLUENT software. These parameters are the number of fins placed in the PCM, type of PCM, and the discharge rates (Lithium ion 26650, LiFePO4 / C 2C, and 3C corresponding to 1.43 W and 2.75 W). It is understood that the fins placed in PCM made it possible to keep the battery within the desired operating temperature range and effectively provide uniform distribution of temperature in the battery. The best results are obtained when 12 fins are placed in the PCM. As a result of a simulation performed at 3C discharge (2.75 W), the average battery temperature 15°C lower at 6000^{th} s thanks to the use of 12 fins. While the temperature difference between the upper and lower surfaces of the battery at 5000^{th} s (2C discharge, 1.43 W) 5.9°C for a geometry without fins, it is decreased to 1.9°C with the use of 12 fins.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *turkakar@beun.edu.tr, ismaill.hoss@gmail.com / Tel: +90 372 291 1135

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte sera gazı emisyonlarını azaltma ve enerji krizi çözümlerinden biri olarak yaygınlaşmaya başlayan elektrikli araçlar (EA) ve hibrit elektrikli araçlara (HEA) olan talep her geçen gün artmaktadır [1]. Dolayısıyla elektrikli araçların tasarımında en önemli parametrelerden biri olan pil sistemleri üzerindeki çalışmalar da yoğunluk kazanmıştır.

Literatürde nikel bazlı, kurşun asit (Pb-asit), sodyum bazlı ve lityum iyon (Li-ion) piller gibi çeşitli güç pilleri önerilmektedir. Diğer pillerle karşılaştırıldığında Lityum iyon piller yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç, uzun çevrim ömrü ve düşük deşarj oranları gibi üstün özellikleri bakımından EA'lar ve HEA'ların gelecekteki kullanımı için araştırma konularının odak noktası haline gelmiştir [2]. Fakat pil sistemlerinin çalışmasında bazı sıcaklık sınırlamaları mevcuttur. Pesaran [3] lityum iyon pillerin en iyi çalışma aralıklarının 25-40°C arasında olduğu ve tek bir pil hücresi ile diğer pil hücreleri arasında en fazla 5°C'lik sıcaklık farkı olması gerektiğini belirtmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak lityum iyon pillerin performansı üzerinde yapılan çeşitli çalışmalarda 50°C üzerinde sıcaklıklarda şarj verimliliği ve çevrim ömrünün düşeceği belirtilmiştir [4, 5]. Pilin uygun çalışma koşulları dışında kullanılmaması halinde, çevrim ömrünün kısalması, sızıntı, patlama ve yanma riskleri ortaya çıkmaktadır. Bunlara bağlı olarak da güvenlik sorunlarını meydana getirmektedir. Lityum-iyon piller yüksek akımda, şarj ve özellikle deşarj durumlarında çok fazla ısı üretirler [6]. Üretilen bu ısı uzaklaştırılamadıkça, zaman içinde pilde ısının depo edilmesine neden olur. Bu nedenle pil paketi gerekli sınırlar çerçevesinde uygun sıcaklık aralığında tutulmalıdır. Tüm bu durumlar, araştırmacıları pil sistemlerinin tasarımı üzerinde çeşitli optimizasyon çalışmaları yapmaya yöneltmiştir.

Literatürde lityum-iyon pillerin ısıl performans çalışmalarında aktif soğutma ve pasif soğutma olmak üzere kendi içerisinde çeşitlere ayrılan soğutma sistemleri mevcuttur. Bu sistemler sıvı soğutma, hava soğutma, ısı borularıyla soğutma ve faz değişim malzemesi (FDM) ile soğutma gibi çeşitli soğutma sistemleridir. Aktif soğutma sistemlerindeki fan, pompa gücü, basınç düşüşleri, gibi yüksek maliyetler gerektiren karmaşık yapılara kıyasla FDM kullanılarak tasarlanan pasif soğutma sistemlerine ilgi her geçen gün artarak üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar yoğunluk kazanmaktadır. Literatürde FDM ile soğutma ve diğer soğutma yöntemlerinin değerlendirmesini yapılmış ve değerlendirmeler göz önüne alındığında FDM kullanılan sistemlerin birçok açıdan yararlı olabileceği sonucuna varılmıştır [7, 8]. Böylece kullanım alanlarına göre birçok çeşide sahip olan parafin gibi organik FDM türleri yüksek gizli ısısı, düşük maliyeti ve özellikle uygun sıcaklık aralığı gibi avantajları nedeniyle pil ısıl sistemlerinin gelecekteki tasarımları için umut vadetmektedir. Saf parafin ve diğer organik FDM türleri katı halden sıvı hale geçtikleri faz değişimi sırasında atılan enerjiyi neredeyse sabit sıcaklıkta gizli ısı olarak depo eder. Bu da uygun sıcaklık aralığında seçildiği zaman FDM'lerin pildeki sıcaklık değerinin artmasını engelleyeceğini ortaya koyar. Fakat FDM'lerin avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da mevcuttur. Saf parafin ve diğer FDM türleri düşük bir termal iletkenliğe sahip olduğu için tek başına yeterli olmamaktadır. Ayrıca ısı iletim katsayısının düşük olması nedeniyle ergime süreci tamamlandıktan sonra FDM pil etrafında yalıtım katmanı görevi görmekte ve pildeki sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Bu da kullanımları sırasında önemli dezavantaj oluşturur. Literatürde FDM ile soğutma sitemlerinin kullanıldığı birçok çalışma ve bununla birlikte ısıl iletkenliği arttırmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Kızılel vd. [9] FDM ile soğutma ve hava soğutma sistemlerinin kıyaslamasını yapmış ve FDM ile soğutma sisteminin pil sıcaklığını düşürmekte ve sıcaklık dağılımını homojen hale getirmekte etkili olduğu sonucuna varmıştır. Karimi vd. [10] lityum iyon pillerin ısıl yönetiminde karbon fiber- FDM kompozit yapısını kullanarak pil benzeri bir simülatörün ısıl performans incelemesini yapmışlardır. Elde edilen sonuçlarda hem karbon fiberin kütle oranının hem de kanat uzunluğunun optimizasyonlar sonucunda ısıl performansı iyileştirmede önemli rol oynadığı saptanmıştır. Li vd. [11] pil etrafına yerleştirilmiş bakır köpük ile birlikte FDM kullanarak pil sıcaklığını istenilen çalışma aralıklarında tutmayı amaçlamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre FDM kullanılmadığı sadece doğal hava taşınımına kıyasla FDM-bakır köpük içeren sistem pil sıcaklığını düşürerek pilde homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır. Fakat yapılan çalışmada pilin üst yüzey ve alt yüzeyinde meydana gelebilecek sıcaklık farklarına değinilmemiştir. Doğal taşınım ile birlikte FDM ergime sürecinde pilde meydana gelebilecek sıcaklık farkları üzerinde bir optimizasyon çalışması yapılabilir. Ling vd. [12] silindirik pil etrafına yerleştirilen FDM ile birlikte zorlanmış hava taşınımınıda içeren hibrit bir soğutma sistemi tasarlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre hibrit sistem pildeki sıcaklık artışını etkin bir şekilde önlemiştir. Fakat hibrit soğutma sisteminde kullanılan zorlanmış hava taşınımında fan gücü gibi bir parametre yüksek maliyetler içereceğinden ve daha karmaşık bir yapı oluşturacağından pasif soğutma sistemleri üzerinde aktif soğutma sistemleri kullanmadan verimliliği arttırmak için yenilikçi optimizasyon çalışmaları yapılabilir. Lazrak vd. [13] önerdikleri FDM-bakır tel kullanımına dayalı pil soğutma sistemini, sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada uygun sıcaklık aralığına ve iletim katsayısına sahip FDM seçiminin önemini ve ısıl iletkenliğin nasıl arttırılacağına dayanan bir tasarım konsepti sunmuşlardır. Sonuçlara göre pil etrafına bakır tel yerleştirilmiş sistemin pilde üretilen ısıyı FDM'ye daha iyi aktarmada etkili olduğunu ve FDM içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı sağladığını göstermiştir. Rao vd. [14] pil etrafına yerleştirilen FDM'nin içerisinden mini kanallar yardımıyla akışkan geçirerek pil soğutması sağlayacak hibrit bir sistem önermişlerdir. Elde edilen sonuçlarda pil istenilen çalışma sıcaklığında tutulmuştur. Fakat FDM ile beraberinde eklenen mini kanal sistemi hacim artışı, ağırlık ve basınç düşümü gibi ek sorunlara neden olacağından tasarım için daha az karmaşık ve ek problem yaratmayacak pasif soğutma sistemleri avantajlı durumdadır.

Bu çalışmanın amacı, ısı geçişini arttırmak amacıyla yüksek ısıl iletkenliğe sahip (FDM içerisine farklı açılarda yerleştirilmiş) kanatların pil içerisindeki sıcaklık dağılımına ve FDM'nin ergime karakteristiğine nasıl etki gösterdiğini incelemektir. Önerilen tasarımda öncelikle 1,43 W ısı üreten pil için yalnızca iletim ile ısı transferi ve iletim + doğal taşınım durumu kıyaslanarak doğal taşınımın ısı transferi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonrasında FDM içerisine yerleştirilen kanatların FDM ergime süresine ve pil içerisindeki sıcaklık dağılımına nasıl etki ettiği ve kanat sayısının pil ısıl performansı üzerinde etkili olup olmadığı tartışılmıştır. Pilden üretilen ısı miktarının FDM ergime sürecinde nasıl etki gösterdiğini belirlemek amacıyla 1,43 W ısı atan pil sistemi (2C, Lityum iyon 26650, $LiFePO_4$/C) için yapılan analizlerin tamamı 2,75 W ısı atan pil sistemi (3C, Lityum iyon 26650, $LiFePO_4$/C) için de tekrarlanmıştır. Pilin düzgün dağılımlı ve sabit ısı üretim değerleri literatürdeki çalışmalarından alınmıştır [13, 15]. Bununla birlikte pil ile FDM arasındaki ısıl dirençlerin pil sıcaklığının artmasında etkili olup olmadığını belirlemek amacıyla iletim + doğal taşınım koşulunda kanatsız durum için inceleme yapılmıştır. Ayrıca sistemde farklı termofiziksel özelliklere sahip FDM kullanımının istenilen optimum pil çalışma sıcaklığı aralığı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. Metot (Method)

Geliştirilen model, ısı üretimini temsil eden pil ve onun etrafını yerleştirilen içine belirli açılarla kanat eklenmiş FDM geometrisini

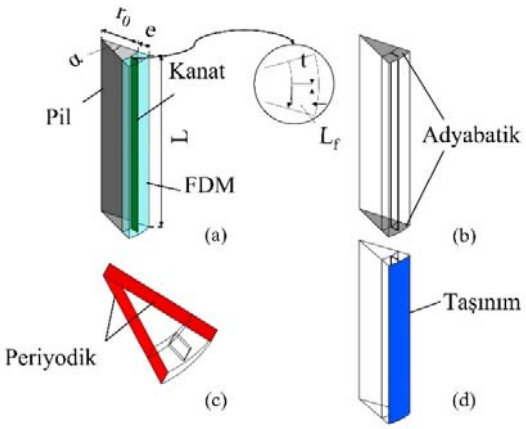
ifade etmektedir. Bu çalışmada sistemin analiz süreci için sınır koşulları göz önüne alındığında benzer özellikler sergileneceği için yalnızca tek bir pil sistemi ele alınmıştır. Pili temsil eden geometri Lazrak vd. [13] tarafından yapılan çalışmadan alındığı gibi 1,43 W sabit ısı atmaktadır. Analizler için ANSYS FLUENT 2019 R2 öğrenci versiyonundan yararlanılmış olup modellenen pil, ısı depolama ünitesi, içerisine yerleştirilen kanat yapısının tasarım geometrisi ve sınır koşulları detaylı olarak Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekil 1a'da görüldüğü üzere r_0 = 13 mm yarıçapında L = 65 mm uzunluğunda 3 boyutlu silindirik bir pil modeli tasarlanmıştır. Bu silindirik modelin etrafına e = 4 mm et kalınlığına aynı L uzunluğuna sahip FDM yerleştirilmiştir. Kanat tasarımında saf bakır malzeme kullanılmış olup literatürdeki bakır kanat kalınlıkları [16, 17] da incelenerek bu çalışmada t = 0.3 mm'lik bir kanat kalınlığı tercih edilmiştir. Kanat uzunluğu için ise L_f =3 mm olarak yine aynı L boyuna sahip dikdörtgen biçiminde bir yapı kullanılmıştır. Sistemin üst ve alt yüzeyi Şekil 1b'de gösterildiği gibi adyabatik sınır koşuluna sahiptir. Analiz kolaylığı açısından θ – yönünde periyodik sınır koşulu uygulanıp geometrinin silindirik dilimi belirlenen α açı değerlerinde ele alınmıştır (Şekil 1c). Yerleştirilen FDM, kanat ve pilin başlangıç sıcaklıkları ve ortam sıcaklığı eşit kabul edilmiş olup $T_{başlangıç} = T_\infty$ = 296 K sıcaklığındadır. Şekil 1d'de FDM dış yüzeyi h = 5 W m^{-2} K^{-1} [13] taşınım katsayısına sahiptir. Zamana bağlı analizler için zaman aralığı yalnızca iletim durumu için 0,5 s, iletim + doğal taşınım durumunda ise 0,1 s olarak alınmıştır. Yalnızca iletim modelinde literatürdeki çalışma ile tam eşleşme sağlanmış olup, 0,1 s için analiz yapıldığında sıcaklık değişimi 0.1 K altındadır [13]. İletim + doğal taşınım modeli için zaman adımı olarak 0,4, 0,1 ve 0,05 s durumları incelenmiştir. 0,4 ve 0,1 s arasında toplam ergime süresindeki fark %10 iken 0,1 s ve 0,05 s durumları kıyaslandığında toplam ergime zamanı farkı yaklaşık %1,2'ye düşmüştür. Ergime sonunda (~5400. s) en büyük (0,4 s) ve ortanca (0,1 s) zaman adımları için sıcaklık farkı yaklaşık 2,5 K iken ortanca ve en küçük zaman adımı arasındaki pil sıcaklık farkı yaklaşık 0,5 K'e düşmüştür. Dolayısıyla zaman adımı 0,1 s zaman adımının yeterli olduğu görülmüştür. Tam silindir haldeki geometride kanatsız N_f = 6 ve N_f = 12 adet kanat için periyodik sınır koşulu uygulandığında silindirik geometrinin sırasıyla 30°, 60° ve 30°'lik dilimleri Şekil 2'deki gibi modellenmiştir.

Kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

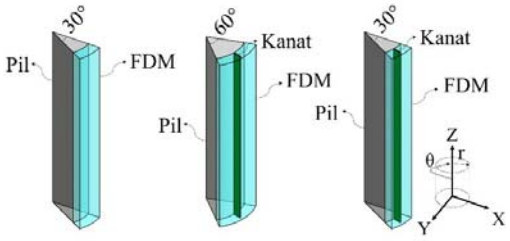
2.1. Nümerik Modelleme (Numerical Modeling)

Zamana bağlı ısıl analiz Ansys/Fluent ortamında gerçekleştirilmiştir. FDM bölgesinde enerji denklemi Voller metodu ile çözülmüştür [13, 19]. Bu bölgede katılaşma/ergime modeli kullanılmıştır. Ansys/Fluent ortamında gerçekleştirilen analizlerde yapılan kabuller şunlardır;

- Pil içerisinde ısı üretimi düzgün dağılımlı ve sabittir.
- θ – yönünde periyodik sınır koşulları uygulanmıştır.
- İçerisine FDM konulmuş kabın iletim ısıl direnci ihmal edilmiştir (Sadece bir durumda etkisi araştırılmıştır).
- FDM ile pil arasında temas direnci ihmal edilmiştir.
- FDM'nin r yönünde dış yüzeyi taşınıma maruz kalmaktadır (h = 5 W m^{-2} K^{-1}).



Şekil 1. Tasarım geometrisi ve sınır koşulları (a) Modellenen geometri ve boyutları (b) Alt ve üst yüzeyde adyabatik sınır koşulu (c) Yan yüzeylerde periyodik sınır koşulu (d) FDM dış yüzeyinde taşınım sınır koşulu
(Design geometry and boundary conditions (a) Modeled geometry and dimensions (b) Adiabatic boundary condition on the top and bottom surface (c) Periodic boundary condition on side surfaces (d) Convection boundary condition on PCM outer surface)



Şekil 2. Periyodik sınır koşulu uygulanan analiz geometrileri (a) Kanatsız durumda analiz edilen geometri (b) N_f = 6 adet kanat olması durumunda analiz edilen geometri (c) N_f = 12 adet kanat olması durumunda analiz edilen geometri
(Periodic boundary condition applied analysis geometries (a) The geometry analyzed in the without-fin case (b) the analyzed geometry in the case of N_f = 6 fins (c) the analyzed geometry in the case of N_f = 12 fins)

Tablo 1. Pil, Kanat, Isıtıcı ve FDM'lerin Termofiziksel Özellikleri (Thermophysical Properties of the Battery, Fin and PCMs)

Parametreler	RT35, [18], [19]	RT35, [13], Literatür Doğrulaması	CRODA Therm 29, [20]	Parafin Mumu, [21]	Pil, [13]	Fişek Isıtıcı	Saf Bakır	Bor Cam
ρ [kg m^{-3}]	880 (katı) 760 (sıvı)	820	917 (katı) 851 (sıvı)	800	2047	3436,8	8933	2300
C_P [J kg^{-1} K^{-1}]	1800 (katı) 2400 (sıvı)	2100	2300 (katı) 1400 (sıvı)	1250	1075	450	386,2	800
k [W $m^{-1}K^{-1}$]	0,2	0,2	0,22 (katı) 0,15 (sıvı)	0,2	3,91 [22]	3,91 [22]	400,2	0,31
L_{FDM} [J kg^{-1}]	157000	157000	207000	125000	-	-	-	-
T_{ergime} [°C]	34-36	35	26-29	30-31	-	-	-	-
μ [kg m^{-1} s^{-1}]	0,002706	0,002706	0,00734	0,0008	-	-	-	-
β [K^{-1}]	0,001	0,001	0,078	0,002	-	-	-	-

Süreklilik denklemi ise Eş. 1'de verilmiştir [23].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\, \vec{u}) = 0 \tag{1}$$

FDM bölgesinde momentum denklemi ise Eş. 2'de verilmiştir.

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho\, \beta\, \vec{g}\, (T - T_{ref}) + \vec{S} \tag{2}$$

Burada $\vec{S}$ momentum kaynak terimi, β ısıl genleşme katsayısı, $\vec{g}$ ise yerçekimi ivmesi, T_{ref} ise referans sıcaklığıdır.

FDM bölgesinde genel enerji denklemi Eş. 3'de verilmiştir [13, 23],

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla(\vec{u}\, H) = -\nabla \cdot \vec{q} \tag{3}$$

burada H toplam entalpiyi, $\vec{u}$ sıvı FDM hız, $\vec{q}$ ise ısı akısı vektörünü ifade etmektedir.

$$H(T) = \Delta H(T) + h_s(T) \tag{4}$$

$$\Delta H(T) = \rho\, f(T)\, L_{FDM} \tag{5}$$

h_s FDM'nin entalpi değeri, f ise ergime oranıdır.

$$h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^{T} \rho_{FDM}\, C_{FDM}\, dT \tag{6}$$

$$f = \begin{Bmatrix} 0, & T < T_s \\ 1 & T > T_l \\ ]0,1[& T_s < T < T_l \end{Bmatrix} \tag{7}$$

FDM bölgesinde yalnızca iletim modeli için akışkan hareketi ihmal edilip toplam entalpi h_s cinsinden yazıldığında [24]

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q} - \rho\, L_{FDM} \frac{\partial f}{\partial t} \tag{8}$$

FDM dış yüzeyinde hava ile taşınım ısı transferi meydana gelmektedir. Sınır koşulu Eş. 9'da verilmiştir.

$$-k_{FDM} \left(\frac{\partial T_{FDM}}{\partial r}\Big|_{r=r_o+e} \right) = h\, (T_{FDM} - T_\infty) \tag{9}$$

Pil bölgesinde ise enerji denklemi olarak silindirik koordinatlarda ısı yayılım denklemi kullanılmıştır (Eş. 10).

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot k_{pil}\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(k_{pil}\frac{\partial T}{\partial \theta}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{pil}\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q}_g''' = \rho_{pil} C_{pil} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{10}$$

Pil ve FDM arasındaki yüzeyde iletim ısı transferi meydana gelmektedir. İlgili sınır koşulu Eş. 11'de verilmiştir.

$$-k_{pil} \left(\frac{\partial T_{pil}}{\partial r}\Big|_{r=r_o} \right) = -k_{FDM} \left(\frac{\partial T_{FDM}}{\partial r}\Big|_{r=r_o} \right) \tag{11}$$

Çözüm metotlarında ise basınç-hız çifti, SIMPLE, PRESTO ayarları kullanılmıştır. Momentum ve enerji denklemleri ikinci derece ileri fark denklemleri kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Zamana bağlı ise koşulsuz yakınsak örtülü (implicit) çözüm kullanılmıştır. Hücre ağı sayısı sonuçların doğruluğu bakımından önemlidir. Bu nedenle Şekil 2a'daki geometride 38.080 olan hücre ağı sayısı iki katına çıkarılmıştır. Sonuç olarak hücre ağı sayısının iki katına çıkarıldığı durumda ergime süresi %1,4'ün altındadır. 6000. saniyedeki pil sıcaklık değerleri arasındaki fark ise 1,2°C'nin altındadır. Böylece hücre ağı sayısının sonuçlardan bağımsız olduğu ispatlanmıştır. Matematiksel model ise bazı varsayımlara dayanarak belirlenmiştir. FDM bölgesinde iletim + doğal taşınım modeli kullanıldığında, doğal taşınım Boussinesq yaklaşımıyla hesaba katılmıştır. FDM için yoğunluk değeri, Boussinesq yaklaşımıyla katı ve sıvı faz için ortalama değer şeklinde sabit olarak alınmıştır. Bazı FDM türlerinde termofiziksel özellikler sabit olarak verilirken bazılarında bu değerler katı-sıvı faz ve ergime aralığında sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Termofiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değişen FDM'ler için katı, sıvı ve ergime fazlarında sıcaklığa bağlı olarak tanımlanan parçalı polinom fonksiyon kullanılmıştır. Kullanılan parçalı fonksiyon aşağıdaki Eş. 12' de örnek olarak gösterilmektedir.

$$\emptyset(T) = \begin{Bmatrix} C_1, & T < T_s \\ a + b\,T & T_s < T < T_l \\ C_2 & T_l < T \end{Bmatrix} \tag{12}$$

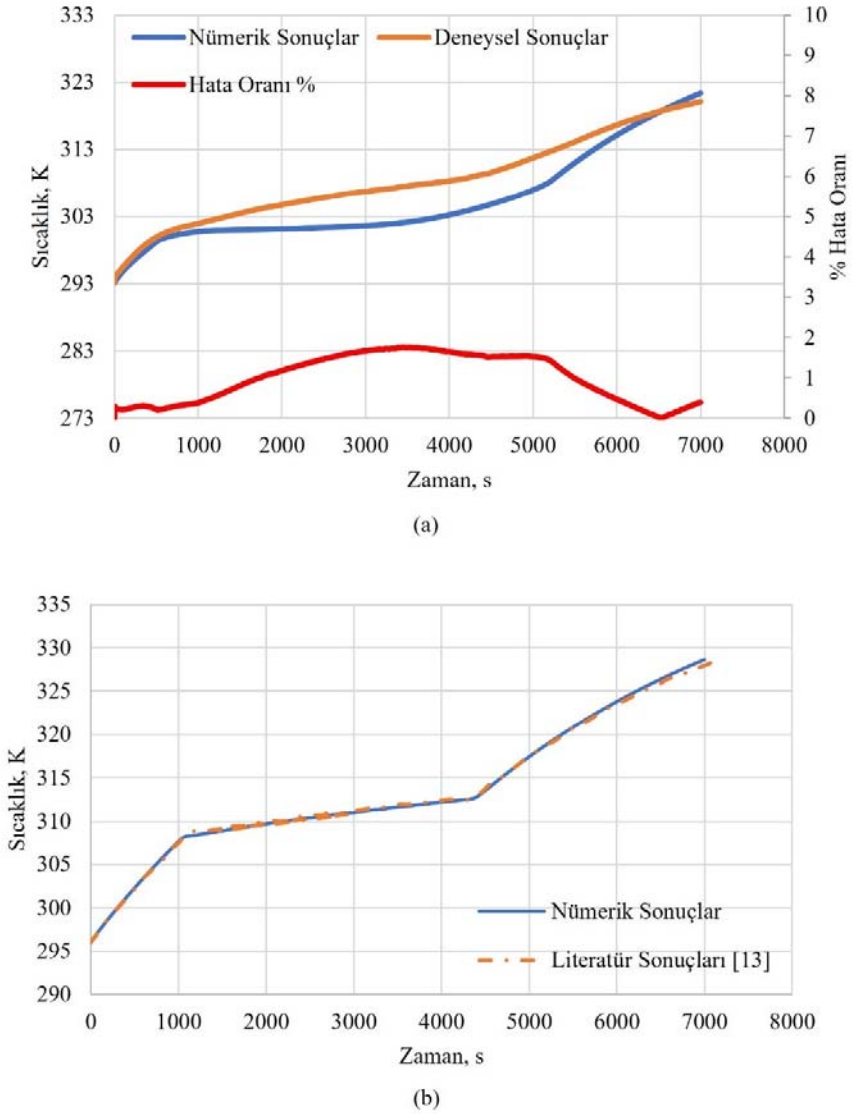
Eş. 12'de Ø değeri FDM'nin termofiziksel özelliklerini temsil etmekte olup bu yaklaşım özgül ısı ve ısı iletim katsayısı için kullanılmıştır.

2.2. Simülasyon Sonuçlarının Deneysel ve Teorik Çalışma ile Doğrulanması
(Verification of the Simulations Results with an Experimental and Theoretical Study)

ANSYS FLUENT ortamında oluşturulan modelin doğrulaması Lazrak vd. [13]'nin FDM olarak RT35 malzemesini kullandıkları, 1,43 W sabit ısı üreten pil sisteminin yalnızca iletim ile ısı transferi sonucu pildeki zamana bağlı sıcaklık değişimini inceledikleri çalışma ile sağlanmıştır. Lazrak vd. [13] analizini mevcut çalışmada olduğu gibi ANSYS'de yürütmüştür. Ayrıca FDM ortamında doğal taşınım etkisini de hesaba katan sayısal modelin doğrulaması deneysel olarak paralel yürütülen çalışmalar sonucu sağlanmıştır [25].

Deneysel doğrulama sırasında kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Deneysel doğrulamada fişek ısıtıcının termofiziksel özellikleri kullanılmış olup (Şekil 3a), sayısal modelleme doğrulaması için Lazrak vd. [13]'un çalışmasında ele alınan termofiziksel özellikler ele alınmıştır. Pil-FDM sisteminin dış yüzeyinde her iki durum için de hava ile doğal taşınım (h = 5 W m^{-2} K^{-1}) ile ısı transferinin gerçekleştiği modellenmiştir. Sayısal modelin deneysel sonuçlar ile doğrulanması sırasında başlangıç sıcaklığı T_∞ = $T_{başlangıç}$ = 293,15 K, olan pili temsilen 1,439 W ısı üreten fişek ısıtıcı, CrodaTherm 29 FDM ile kaplanmıştır. FDM ve pil, bor camdan oluşan ($t_{bor\ cam}$ = 1 mm et kalınlığında) silindirik bir yapının içerisine yerleştirildiği için sayısal analizde cam ısıl direnç olarak modellenmiştir. Şekil 3a ve Şekil 3b'de sırasıyla sonuçların deneysel olarak ve literatür ile doğrulanması verilmiştir.

Şekil 3a'da verilen sonuçlar incelendiğinde, deneysel çalışma ile nümerik analizin maksimum %2 fark (Kelvin cinsinden) ile uyuştuğu görülmektedir. Gerçekleşen farkın nedeni olarak sayısal modelde hava tarafında doğal taşınım katsayısının sabit olarak alınması ancak gerçekte doğal taşınım katsayısının yüzey ve hava arasındaki sıcaklık farkı arttıkça doğal taşınım katsayısının da beraberinde artmasıdır. Bu nedenle, pil sıcaklığı ergime başlangıcında sayısal analiz için daha düşük iken zaman ilerledikçe pil sıcaklığının zamana göre artışı deney için azalmaktadır. Şekil 3b yorumlanacak olursa, Lazrak vd. [13] elde



Şekil 3. Nümerik ve Deneysel Doğrulama (a) Deneysel Doğrulama (b) Sayısal Doğrulama
(Numerical and experimental validation (a) Experimental Validation (b) Numerical Validation)

ettikleri sonuçlarda FDM'nin ergime sıcaklığına varıncaya kadar geçen sürenin 1050 s olduğunu ve pil sıcaklığının FDM ergime sıcaklığına ulaşana kadar yaklaşık 11°C arttığını belirtmiştir. Bu çalışmada yapılan doğrulamada da FDM ergime sıcaklığına ulaşana kadar pil sıcaklığı yaklaşık olarak 11°C artmış ve FDM ergimeye başlayana kadar geçen süre 1043 s olmuştur.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Silindirik yapıda pil geometrisi sabit olarak 1,43 W ısı üretmekte ve kullanılan FDM RT35 olup FDM bölgesinde yalnızca iletimin ve iletim + doğal taşınım modellerinin simülasyonu sonucunda her iki durumda zamana bağlı pil sıcaklığı Şekil 4'de gösterilmektedir.

Doğal taşınımın pildeki sıcaklık artışına etkisini incelemek için yalnızca iletim ile ısı transferi analizindeki tüm parametreler sabit tutularak analiz geçekleştirilmiştir. Şekil 4'de yalnızca iletim ve iletim + doğal taşınım koşullarının FDM içerisine kanat eklenmediği durumundaki zamana bağlı pil sıcaklık grafiği verilmiştir.

Şekil 4'de görüldüğü üzere FDM katı haldeyken pil sıcaklığı 970 saniye boyunca neredeyse doğrusal bir şekilde yaklaşık olarak 11°C artar. Bu sıcaklık artışının ardından FDM ergime sıcaklığına ulaşır. Neredeyse sabit sıcaklıkta gerçekleşen ergime süreci boyunca pilden atılan enerjinin büyük bir kısmı FDM'yi ergitmek için kullanılır ve geriye kalan kısım pil içerisinde depo edilmeye devam eder. Pildeki sıcaklık artışı FDM tamamen eriyene kadar (yani yaklaşık 3650 saniye boyunca) 5,7°C artış gösterir. Böylece ergime süresi boyunca pil sıcaklığı her iki durumda da 40°C'nin altında kalmıştır. Yalnızca iletim ile ısı transferinde FDM'nin ergimesini tamamlandığı süre 4616 s iken bu değer doğal taşınım da modellendiği durumda 5469 s olmaktadır. FDM bölgesinde doğal taşınımın hesaba katılması FDM bölgesindeki ısıl direnci düşürerek ergime sürecinde pilin daha uzun süre güvenli sıcaklıkta kalmasını sağlamıştır. Ayrıca Şekil 4'de görüldüğü üzere FDM tamamen sıvı faza geldikten sonra pildeki sıcaklığın zamana göre artışı katı faz esnasındaki duyulur ısı kazanımı bölgesine kıyasla yavaştır. Bu durum sıvı FDM'deki taşınım hareketinden ziyade sıvı bölgede duyulur ısı kazanımı sürecinde FDM ile ortam arasındaki sıcaklık farkının daha fazla olmasıyla

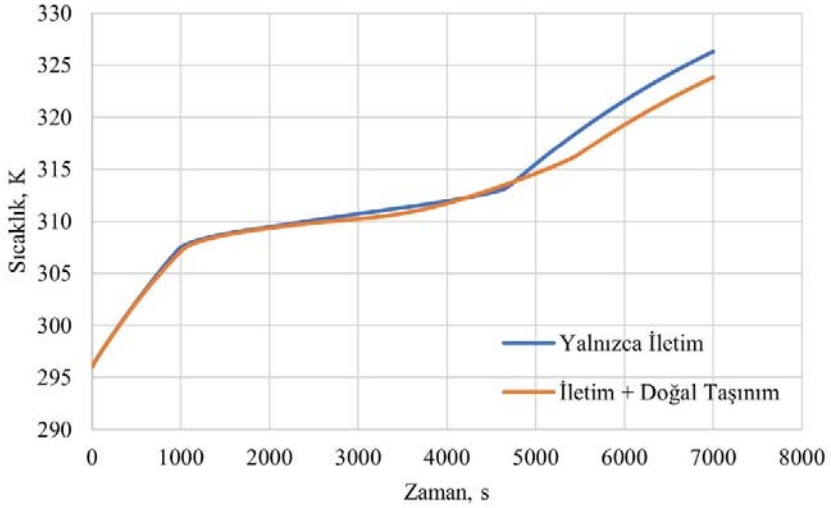
açıklanabilir. Çünkü aynı durum yalnızca iletim modelinde de gözlemlenmiştir. Yalnızca ısı iletiminin modellendiği durumda katı faz sırasında pildeki sıcaklık artışı başlangıçtan 970 s sonra yaklaşık 11°C iken, FDM tamamen sıvı faza geçtikten 970 s sonra bu artış yaklaşık 6,2°C'dir. Böylece ortam sıcaklığı ile pil sıcaklığı arasındaki farkın ısı transferi üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Pil sıcaklığı 6000s sonunda yalnızca iletim ile ısı transferinde 48,4°C civarındayken iletim + doğal taşınım durumunda aynı sürede bu değer 46,1°C'dir. FDM bölgesinde doğal taşınım yalnızca sıvı fazda sınırlı bir etki yaratmıştır. Ancak kanat kullanımı durumunda doğal taşınımın çok daha etkin olduğu Bölüm 3.2'de vurgulanmıştır.

3.1. Yalnızca İletim Modelinde Kanat Kullanımının Isıl Etkisi
(Thermal Effect of the Use of Fin for the Conduction Model)

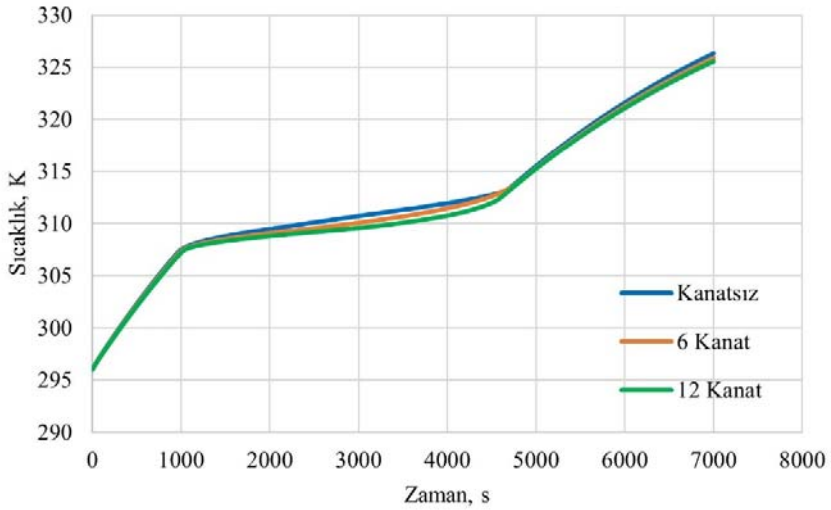
1,43 W sabit ısı üreten pil sistemi ve FDM olarak RT35'in kullandığı sistemde FDM içerisine belirlenen sayılarda kanatlar yerleştirilmiştir. Kanatsız durumda ve belirli sayılarda kanat eklenmesi halinde yalnızca iletim durumunda pildeki zamana bağlı sıcaklık değişimini veren grafik Şekil 5'de gösterilmektedir.

FDM ile pasif metot ile pil soğutma esnasında kanat kullanımı Şekil 5'de görüleceği üzere FDM çözüm bölgesinde yalnızca ısı iletiminin hesaba katıldığı durumda pil sıcaklığını düşürmekte kayda değer bir fayda sağlamadığı görülmüştür. Kanat kullanımı, pil ile FDM'nin temas ettiği yüzey alanını arttıracağından, doğal taşınım modelinin de hesaba katılıp sonuçların incelenmesi gerekir. FDM bölgesinde yalnızca ısıl iletim modelinin kullanımı Şekil 6'daki sonuçlar değerlendirildiğinde gerçek durumu yansıtmakta başarısız olmuştur. Şekil 6'da yalnızla iletim ile gerçekleşen ısı transferi sonucu zamana bağlı pil sıcaklıkları ve ergime oranları gösterilmektedir.

Şekil 6a ve Şekil 6b'den de görüleceği üzere FDM bölgesinde doğal taşınım etkisi hesaba katılmadığından y yönünde sıcaklık farkı gözlemlenmemiştir. Bu durum doğal taşınımın hesaba katılmasının gerekliliğini bir kez daha ortaya koymaktadır. Her üç durum için de



Şekil 4. Yalnızca iletim ve iletim + doğal taşınım modelleri için zamana bağlı pil sıcaklıkları karşılaştırması
(Comparison of transient temperature variation of the battery for conduction and conduction + natural convection models)



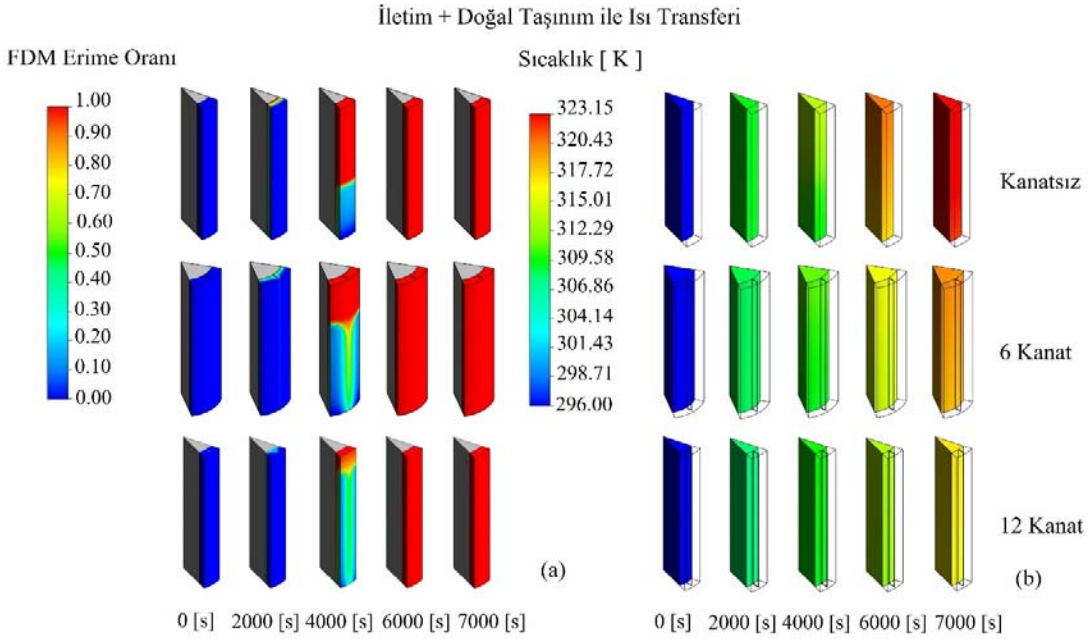
Şekil 5. Yalnızca iletim ile ısı transferi modeli için kanatsız, 6 kanat ve 12 kanat kullanımı durumlarında zamana bağlı pil sıcaklıkları
(Transient battery temperatures of without-fin, 6-fin, and 12-fin geometries with the use of conduction model)

pil sıcaklığı 6000 s boyunca kritik sıcaklık olan 50°C'nin altında tutulmuştur. Bu modelde kanat kullanımının, pil sıcaklığının düşümüne önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

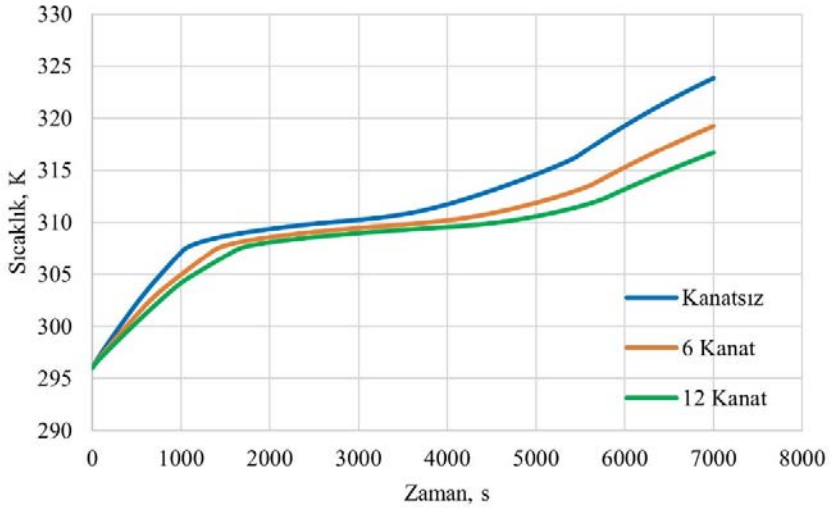
3.2. İletim + Doğal Taşınım Modelinde Kanat Kullanımını
(Fin Use with Conduction + Natural Convection Model)

1,43 W sabit ısı üreten pil sistemi ve FDM olarak RT35'in kullandığı sistemde FDM içerisine belirlenen sayılarda kanatlar yerleştirilmiştir. Kanatsız durumda ve kanat eklenmesi halinde iletim + doğal taşınım durumu için pildeki zamana bağlı sıcaklık değişimini veren grafik Şekil 7'de gösterilmektedir. FDM içerisine yerleştirilen kanatların ısı transferi yüzey alanını arttırması doğal taşınım ile ısı transferinin etkisini arttırdığı gözlemlenmiştir. Şekil 7'den görüleceği üzere kanat kullanımı sonucu ergimeye başlanan zaman uzamış hem de sıvı fazda (duyulur ısı kazanımı) sıcaklığın zamana göre artışı azalmıştır. Kanat kullanımı nedeniyle sistemde kullanılan FDM'nin azalması FDM'de depolanabilecek ısı kapasitesinin azalmasına neden olsa da kanat kullanımının getirdiği ısı transferi avantajı ağır basmıştır. Böylelikle 12 kanat kullanımı 6000s sonunda yaklaşık 6°C, 6 kanat kullanımı ise kanatsız duruma kıyasla sıcaklıkta 4°C düşüş sağlamıştır. Şekil 8'de iletim + doğal taşınım modeli kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonun zamana bağlı ortalama pil sıcaklıkları ve ergime oranları gösterilmektedir.

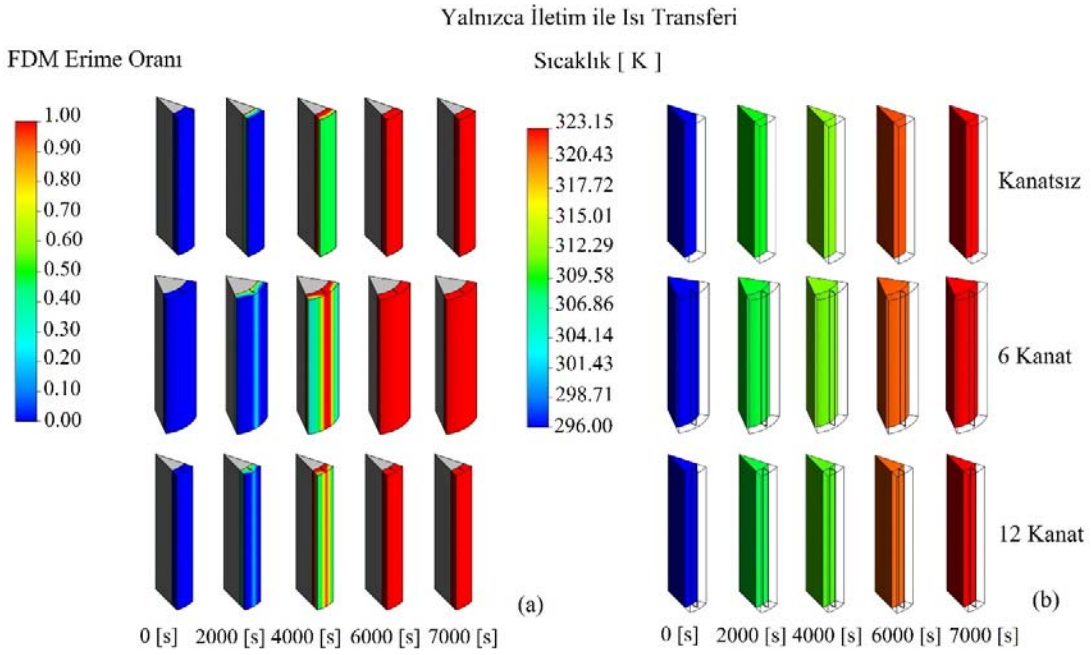
Şekil 8a'da 4000.s'deki ergime oranı incelendiğinde diğer durumlara kıyasla 12 kanat olan sistem için FDM'nin çok az bir kısmı erimiştir. Bu da pilin ergime fazında daha uzun süre kalacağını gösterir. Kanat



Şekil 6. Kanat kullanımının pil sıcaklığına ve ergime oranına etkisinin yalnızca iletim modeli için incelenmesi (a) ergime oranı (b) pil sıcaklıkları
(Investigation of the effect of the use of fins on battery temperatures and melt rates for only conduction model (a) melt rate (b) temperatures)



Şekil 7. İletim+ doğal taşınım modeli için kanat kullanımının zamana bağlı pil sıcaklığına etkisi
(The effect of fin use on transient battery temperatures for conduction + natural convection model)



Şekil 8. Kanat kullanımının pil sıcaklığına etkisinin yalnızca iletim ve iletim + doğal taşınım modeli için incelenmesi (a) yalnızca iletim modeli (b) iletim + doğal taşınım modeli
(Investigation of the use of fins on battery temperatures (a) conduction model (b) conduction + natural convection model)

sayısı hem pilden atılan ısıyı daha arttırmış hem de FDM'nin ergimesini geciktirmiştir. Şekil 8b incelendiğinde kanat kullanımının pil ve FDM'nin sıcaklık dağılımını daha düzgün dağılımlı hale getirdiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni kanattan dikey eksende (z – yönü) eksenel ısı iletiminin gerçekleşmesidir. Böylece lityum iyon pillerde büyük sorun arz eden bölgesel sıcaklık farkı kanat kullanımı sayesinde önlenebilmiştir. Şekil 8a'dan görüleceği üzere FDM doğal taşınım etkisi ile üst kısımlardan başlayarak (-z) yönünde ergimektedir. Doğal taşınımın doğası gereği kaldırma kuvvetleri sürtünme kuvvetlerini yenip ısınan akışkan yükseleceğinden dolayı pilde z – yönünde sıcaklık farklılıkları meydana gelmesi doğaldır. Pildeki bu sıcaklık değişimini ve kanat varlığının bu duruma etkisini incelemek için pilin alt yüzey (z = 0 mm) ve üst yüzey (z = 65 mm) kısımlarında merkezinden yarıçapı boyunca (r – yönünde) meydana gelen sıcaklık değişiminin ortalaması alınmış ve 7000 s boyunca gösterdikleri zamana bağlı sıcaklık değişimleri elde edilmiştir. Pilin z = 0 mm ve z = 65 mm konumlarındaki alan ağırlıklı pil sıcaklıkları için elde edilen grafikler Şekil 9a, Şekil 9b ve Şekil 9c'deki gibidir.

Şekil 9'da görüleceği üzere FDM içerisine yerleştirilen kanatların pilin üst yüzeyi ve alt yüzeyi arasında meydana gelen sıcaklık farkını azaltmada etkili olduğu görülmektedir. Böylece kanat kullanımı pilde düzgün dağılımlı bir sıcaklık dağılımı elde edilmesine katkı sağlamıştır.

3.3. İletim + Doğal Taşınım Modelinde 2,75 W Isı Üretimi
(2.75 W heat generation for the conduction + natural convection model)

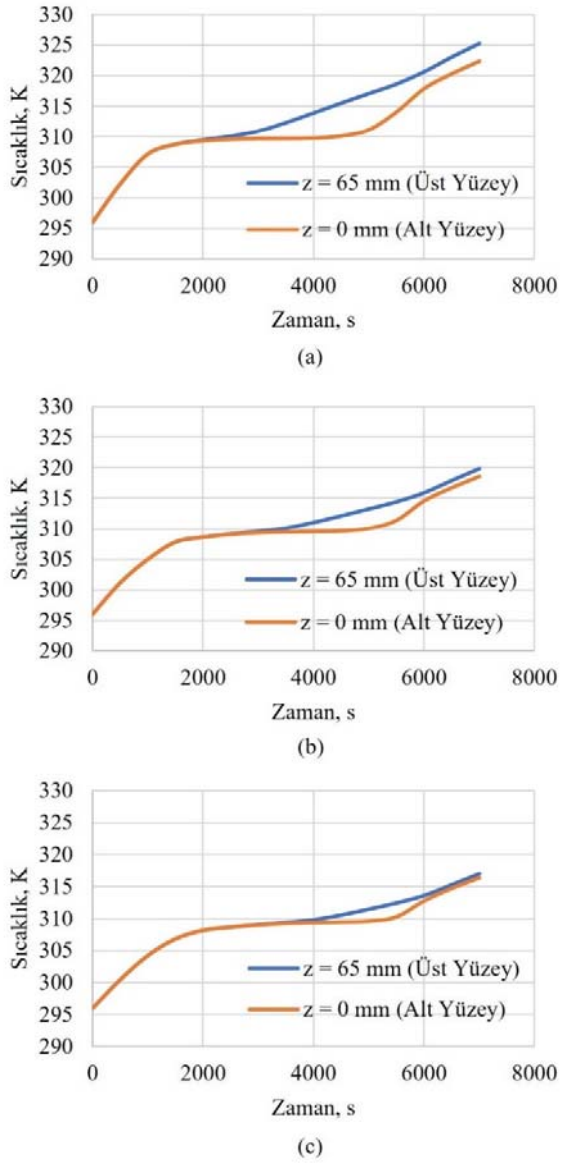
Pilde 2,75 W ısı üretilmesi durumunda 1,43 W ısı üretimine kıyasla pil içerisinde daha fazla ısı depolanması meydana geleceğinden tasarlanan FDM-kanat sisteminin ne kadar etkili olacağı iletim + doğal taşınım durumu için incelenmiştir. İncelenen durumdaki tüm parametreler 1,43 W ısı üreten pil – FDM sistemi ile aynıdır. Şekil 10'da zamana bağlı pil sıcaklıkları gösterilmektedir.

Şekil 10 incelendiğinde, pilden atılan ısı miktarı arttığı zaman FDM ergime sıcaklığına daha erken bir sürede ulaşır. Aynı zamanda faz değişimi bölgesinde 1,43 W ısı atıldığı duruma kıyasla daha kısa süre geçirilmiştir. Kanat eklenerek ısı iletim katsayısının arttırılmasıyla birlikte faz değişimi bölgesindeki sıcaklığın zamana göre artışı yatay ile daha küçük bir eğim ile gerçekleşmiştir. Fakat pilde üretilen ısı daha fazla olacağından FDM hızlı bir şekilde ergimekte ve pili istenilen çalışma sıcaklığı aralığında tutabildiği süre, pildeki ısı üretiminin 1,43 W olduğu duruma kıyasla daha kısadır. Ayrıca 7000 s sonunda pil sıcaklıklarındaki farka bakıldığında iletim + doğal taşınım modelinde 1,43 W ısı atımı için yapılan analize kıyasla sistemdeki kanat varlığının pil sıcaklığını düşürmede daha etkili olduğu gözlemlenmektedir. Pilde ısı üretiminin 2,75 W olması durumunda ve 1,43 W ısı üretilen yalnızca iletim ve iletim + doğal taşınım durumları için elde edilen sıcaklık ve ergime aralığı verileri Tablo 2'te özetlenmiştir. Tablo 2 incelendiğinde yüksek ısı iletim katsayısına sahip kanat kullanımının sistemdeki toplam ısıl direnci düşürdüğü ve böylece zamana bağlı sıcaklık artışı daha yavaş olmaktadır. Dolayısıyla FDM ergime sıcaklığına daha geç süre sonunda gelmektedir. Ayrıca 1,43 W ısı üretimi için FDM bölgesi ısıl analizinde doğal taşınımın hesaba katılması; kanat kullanılmayan durumda yalnızca ısı iletiminin modellendiği durumda 6000s sonunda 2,3 K farka neden olurken, 12 kanat kullanımı için 7,9 K fark oluşmaktadır. Bu durum kanat kullanımı durumunda doğal taşınım modelinin mutlaka hesaba katılması gerektiğini göstermektedir. Pilde 3C/2.75 W ısı üretimi için 3700. s sonunda 12 kanat kullanımı sonucu 50°C sıcaklığa erişilirken kanat kullanılmadığı durumda sıcaklık yaklaşık 11°C daha yüksek olmuştur. Kanat kullanımının pil sıcaklığını düşürmekte ne derece etkili olduğunu bu durumda net bir şekilde görmekteyiz.

3.4. Isıl Direnç Etkileri (Thermal Resistance Effects)

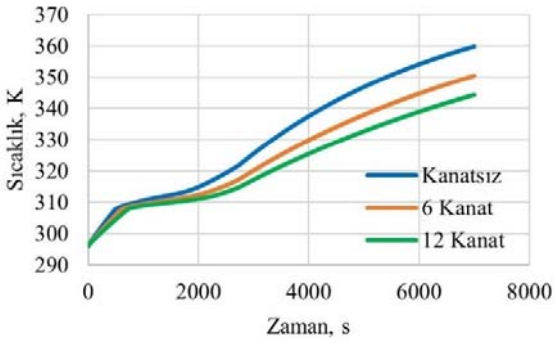
Yapılan analizlerde pil ile FDM arasında bir temas direncinin olmadığı ve FDM'in konduğu kabın et kalınlığı ve iletim direnci ihmal edildi. Bu kabın ısıl iletim ve pil-FDM arasındaki temas direncinin, pil ısıl sistemi üzerindeki nasıl etki ettiğini incelemek için pil ile FDM arasında ve FDM dış yüzeyinde $t_{bor\ cam}$ = 2 mm et kalınlığına sahip silindirik bor cam yerleştirildiği durum için analiz

yapılmıştır. Ayrıca pil ile FDM'nin konulduğu kap (bor cam) arasında ısıl direnç etkisini azaltmak amacıyla $R'' = 0{,}00071\ m^2\ K\ W^{-1}$ [26] direnç değerine sahip termal macun yerleştirildiği varsayılmıştır. Yapılan analizde bor cam et kalınlığı FDM miktarını etkilememiş ve diğer tüm analizlerdeki gibi sabit tutulmuştur. Yapılan analiz kanatsız durum için iletim + doğal taşınım ile ısı transferi süreci üzerinden incelenmiştir. Şekil 11'de ısıl direnç etkisini gözlemlemek için yerleştirilen bor cam katmanı ve bu katmanın olmadığı durum için pildeki zamana bağlı sıcaklık değerleri verilmiştir.

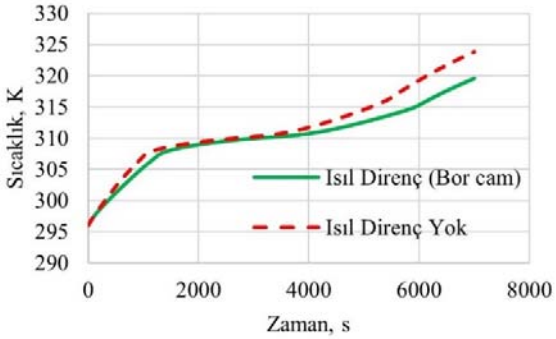


Şekil 9. Pilin alt ve üst yüzeylerinde zamana bağlı ortalama pil sıcaklığı (1.43 W için), (a) Kanatsız durum, (b) 6 kanat, (c) 12 kanat
(Transient top and bottom surface average battery temperatures (1.43 W) (a) without-fin (b) 6-fins (c) 12-fins)

Şekil 11'de de görüleceği üzere zamana bağlı bir analiz gerçekleştiği için zaman içerisinde pilden atılan ısının bir kısmı bor cam içerisinde depo edilecek ve bu yüzden FDM ergime sıcaklığına daha geç ulaşacaktır. Cam kullanımı sonucu artan dış yüzey alanı nedeniyle taşınım ısıl direncindeki azalış meydana gelmiştir. Aynı nedenle, ilave bir iletim direnci oluşmuştur. Sistemde taşınım direncinin belirleyici olmasından dolayı FDM sıvı faza geçtikten sonra pil sıcaklığı diğer duruma kıyasla düşük çıkmıştır. Ancak bu durum, kompakt bir pil paketinin oluşturulmasını olumsuz yönde etkilemektedir. FDM' nin yerleştirildiği bor cam haznesi sistemin termal karakteristiğinde 5000. s'ye kadar önemli bir değişikliğe neden olmamıştır.



Şekil 10. 2.75 W ısı üretimi için kanat kullanımının zamana bağlı pil sıcaklığına etkisinin iletim + doğal taşınım modeli için incelenmesi
(The effect of fin use on transient battery temperature with conduction + natural convection model for 2.75 W heat generation)



Şekil 11. Isıl direnç etkisinin incelenmesi (1.43 W deşarj)
(Investigation of the effect of themal resistance)

3.5. Farklı Termofiziksel Özelliklerdeki FDM'lerin Kıyaslanması
(Comparison of Various PCMs with Different Thermophysical Properties)

FDM'lerde termofiziksel özellikler (ergime sıcaklığı aralığı, ısı iletim katsayısı, gizli ısı kapasitesi, özgül ısı kapasitesi vb.) pilin ısıl davranışı açısından kritik öneme sahiptir. Bu durumu incelemek için FDM içerisine 12 kanat yerleştirilen geometri ve 1,43 W ısı üreten pil sistemi için 3 farklı FDM türünün zamana bağlı sıcaklık değişimlerinin analizleri yapılmıştır. Şekil 12'de analiz sonucunda farklı termofiziksel özelliklere sahip FDM türlerinin zamana bağlı pil sıcaklığı değişimindeki etkilerinin karşılaştırması verilmektedir. Şekil 12'den de görüleceği üzere CrodaTherm 29, yüksek gizli ısı kapasitesi, özgül ısı değeri gibi nedenlerden dolayı ergime sıcaklığı aralığı diğerlerine göre düşük olmasına rağmen katı-sıvı faz geçiş aralığında RT35 ve parafin mumuna kıyasla daha uzun süre kalmıştır. Dolayısıyla pilden atılan ısıyı daha uzun süre depo ederek, düşük ergime sıcaklığı sayesinde pil sıcaklığını düşük seviyelerde tutmuştur. Parafin mumu RT35'e kıyasla ergime sıcaklığı aralığı düşük olduğu için daha erken ergime sıcaklığına ulaşıp ergime tamamlanana kadar pildeki sıcaklık artışını yavaşlatsa da tamamen sıvı faza geçtikten sonra pilde sıcaklık artışını hızla artmıştır. Sonuç olarak her üç FDM'de 12 kanat yerleştirildiği durumda analiz yapılan 7000 s boyunca pili kritik sıcaklık olan 50°C'nin altında tutmuştur. Tablo 3'

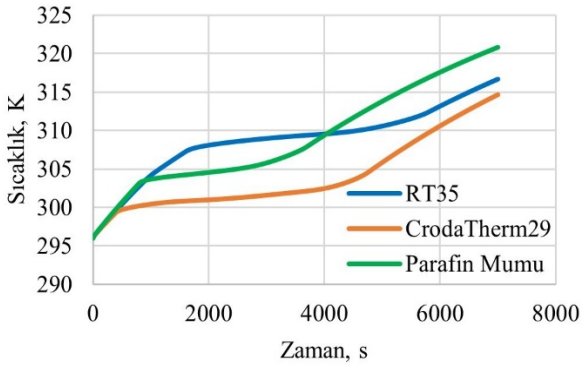
Tablo 2. Çeşitli durumlar için FDM ergime zaman aralığı ve pil sıcaklığı (PCM two phase time interval and battery temperature for various cases)

Geometri	FDM Ergime Aralığı, s	Pil Sıcaklığı, K
Yalnızca iletim ile Isı Transferi (1,43 W)		*6000. s*
Kanatsız	969,6-4616,5	321,6
6 Kanat	987.2-4715,5	321,3
12 Kanat	1004,1-4549,0	321,1
İletim + Doğal Taşınım ile Isı Transferi (1,43 W)		*6000. s*
Kanatsız	1019,3-5468,7	319,3
6 Kanat	1362,7-5667,2	315,3
12 Kanat	1607,1-5790,1	313,2
İletim + Doğal Taşınım ile Isı Transferi (2,75 W)		*3700. s*
Kanatsız	473,5-2749,2	334.2
6 Kanat	585,2-2768,3	327.1
12 Kanat	690,8-2771,6	323.1

Tablo 3. Pil sıcaklıklarının kritik mertebelere erişme süreleri (The duration for the batteries reaching the critical levels)

	40°C				50°C			
	2C / 1,43W		3C / 2,75W		2C / 1,43W		3C / 2,75W	
	Süre, s	% artış	Süre, s	% artış	Süre, s	% artış	Süre, s	% artış
RT35 (Kanatsız)	4533		1709		6833		2826	
RT35 (6 Kanat)	5490	21,1	2145	25,5	-	-	3289	16,4
RT35 (12 Kanat)	5993	32,2	2475	44,8	-	-	3700	30,9
CrodaTherm29 (12 Kanat)	6607	45,7	Analiz yok	Analiz yok	-	-	Analiz yok	Analiz yok
Parafin Mumu (12 Kanat)	4842	6,8	Analiz yok	Analiz yok	-	-	Analiz yok	Analiz yok

de pil sıcaklıklarının kritik bölgelere erişme zamanları farklı durumlar için özetlenmiştir.



Şekil 12. Farklı FDM'lerin 12 kanatlı geometride iletim + doğal taşınım modeli ve 1,43 W ısı üretimi durumu için zamana bağlı pil sıcaklıklarına etkisinin incelenmesi
(Investigation of the effect of various PCMs on transient temperature of the battery for 12 fin geometry and 1.43 W heat generation with conduction + natural convection model)

Tablo 3' te verilen sonuçlara göre; RT35 için 12 kanat kullanımı pilin 40°C'ye erişme süresini %3,2 CrodaTherm29 kullanımı ise kanatsız RT35 durumuna göre bu süreyi %45,7 artırmıştır.

4. Simgeler (Symbols)

C_1 : Sabit sayı
C_2 : Sabit sayı
C_p : Özgül ısı [J kg^{-1} K^{-1}]
C_{pil} : Pil özgül ısısı [J kg^{-1} K^{-1}]
e : FDM et kalınlığı [mm]
f : Ergime oranı
h : Taşınım katsayısı [W m^{-2} K^{-1}]
h_s : FDM entalpi değ. [J m^{-3}]
H : Toplam entalpi [J m^{-3}]
k : Isı iletim katsayısı [W m^{-1} K^{-1}]
k_{FDM} : FDM ısı iletim katsayısı [W m^{-1} K^{-1}]
k_{pil} : Pil ısı iletim katsayısı [W m^{-1} K^{-1}]
L : Uzunluk [mm]
L_f : Kanat uzunluğu [mm]
L_{FDM} : FDM gizli ısısı [J]
N_f : Kanat sayısı
$\vec{q}$: Isı akısı vektörü [W m^{-2}]
$\dot{q}_g'''$: Hacimsel ısı üretimi [W m^{-3}]
R" : Temas direnci [m^2 K W^{-1}]
r_0 : Yarıçap
$\vec{S}$: Momentum kay. T.
T : Sıcaklık
t : et kalınlığı, zaman

4.1. Alt İndisler (Subscripts)

FDM : Faz değ. malz.
likidüs : Sıvılık
ref : referans
solidüs : Katılık

4.2. Yunan Harfleri (Greek Letters)

α : Periyodik geometri açısı
β : Hacimsel genleşme katsayısı [K^{-1}]
Ø : Termofiziksel öz.
ρ : Yoğunluk [kg m^{-3}]
ρ_{pil} : Pil yoğunluğu [kg m^{-3}]
μ : Dinamik viskoz [kg m^{-1} s^{-1}]

4.3. Kısaltmalar (Abbreviations)

EA : Elektrikli araç
HEA : Hibrit elektrikli araç
FDM : Faz değişim malzemesi

5. Sonuçlar (Conclusion)

Bu çalışmada sabit ısı üretimi (2C/1,43W ve 3C/2,75 W) durumunda lityum iyon pilin FDM ile pasif şekilde soğutulması durumunda pildeki sıcaklık değişimi zamana bağlı olarak incelenmiştir. FDM bölgesinde ısıl modelleme yalnızca ısı iletimi ve iletim + doğal taşınım modelleri kullanılarak; FDM malzemesi, farklı kanat sayısı, pil ısı üretim değeri gibi parametrelerin zamana bağlı pil sıcaklığı ve FDM ergime karakteristiğine olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca pil paketleri için büyük sorun teşkil eden homojen olmayan sıcaklık dağılımı probleminde kanat kullanımının etkisi incelendi.

FDM bölgesinde doğal taşınım modelinin özellikle 12 kanat kullanımı durumunda hesaba katılması gerektiği anlaşılmıştır. Yalnızca ısı iletimi modelinin kullanıldığı duruma göre 12 kanatlı geometride doğal taşınım hesaba katıldığında, 6000.s'deki (1.43W ısı üretimi) pil sıcaklığı 7,9 K (%2,5 fark) daha düşük hesaplanmıştır. Pilde 2,75 W ısı üretildiği durumda; 6000.s sonunda, 6 kanat kullanımı kanatsız duruma göre pildeki ortalama sıcaklığı 9,4 K (%2,6), 12 kanat kullanımı ise 15,18 K (%4,2) düşürmüştür. Lityum iyon pil soğutmada kanat kullanımının ortalama pil sıcaklığını düşürmenin yanı sıra pilin sıcaklığının homojen olmasına etkisinin olduğu anlaşılmıştır. Pildeki ısı üretiminin 1,43 W olduğu durumda; 5000. s'de kanatsız durumda pilin alt ve üst yüzeyleri (sırasıyla z = 0 mm ve z = 65 mm konumları) arasındaki sıcaklık farkı 5,9℃ iken 6 kanat kullanımı durumunda 3,2℃, 12 kanat kullanımı durumunda ise sıcaklık farkı 1,9℃'ye düşmüştür. Pilden atılan ısı miktarı 1,43 W değerinden 2,75 W değerine çıktığında FDM daha kısa sürede erimiş ve pil sıcaklığı istenilen çalışma aralıklarında daha kısa süre kalmıştır. FDM'nin içine konacağı kabın iletim ısıl direnci, pil ile kap arasındaki termal macun ve kabın ısıl ataletinin etkisi analiz edildiğinde bu parametrelerin etkisisin ihmal edilebileceği ve kayda değer bir sıcaklık farkına yol açmadığı anlaşılmıştır. İncelenen üç farklı FDM'den CrodaTherm 29 yüksek gizli ısı ve düşük ergime sıcaklığı sayesinde, pili en uzun süre en düşük sıcaklıkta tutabilen FDM olmuştur. Pillerde 2C/1.43 W ısı üretimi durumunda 12 kanata sahip tüm FDM'ler 7000s boyunca pili kritik sıcaklık olan 50℃'nin altında tutmayı başarabilmişlerdir. Pilde 3C/2.75 W ısı üretimi için 3700. s sonunda 12 kanat kullanımı sonucu 50℃ sıcaklığa erişilirken kanat kullanılmadığı durumda bu andaki sıcaklık yaklaşık 11℃ daha yüksek olmuştur.

Kaynaklar (References)

1. Tie S.F., Tan C.W., A review of energy sources and energy management system in electric vehicles, Renewable Sustainable Energy Rev., 20, 82-102, 2013.
2. Deng Y., Feng C., E. J., Zhu H., Chen J., Wen M., Yin H., Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review, Appl. Therm. Eng., 142, 10-29, 2018.
3. Pesaran A.A., Battery thermal models for hybrid vehicle simulations, J. Power Sources, 110 (2), 377-382, 2002.
4. Sato N., Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles, J. Power Sorces, 99 (1-2), 70-77, 2001.
5. Ramadass P., Haran B., White R., Popov B.N., Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures: Part II. Capacity fade analysis, J. Power Sources, 112 (2), 614-620, 2002.
6. Jeon D.H., Baek S.M., Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle, Energy Convers. Manage., 52 (8-9), 2973-2981, 2011.
7. Rao Z., Wang S., A review of power battery thermal energy management, Renewable Sustainable Energy Rev., 15 (9), 4554-4571, 2011.
8. Qu Z.G., Li W.Q., Tao W.Q., Numerical model of the passive thermal management system for high-power lithium ion battery by using porous metal foam saturated with phase change material, Int. J. Hydrogen Energy, 39 (8), 3904-3913, 2014.
9. Kizilel R., Sabbah R., Selman J.R., Al-Hallaj S., An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs, J. Power Sources, 194 (2), 1105-1112, 2009.
10. Babapoor A., Azizi M., Karimi G., Thermal management of a Li-ion battery using carbon fiber-PCM composites, Appl. Therm. Eng., 82, 281-290, 2015.
11. Li W.Q., Qu Z.G., He Y.L., Tao Y.B., Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials, J. Power Sources, 255, 9-15, 2014.
12. Ling Z., Wang F., Fang X., Gao X., Zhang Z., A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling, Appl. Energy, 148, 403-409, 2015.
13. Lazrak A., Fourmigué J-F., Robin J-F., An innovative practical battery thermal management system based on phase change materials: Numerical and experimental investigations, Appl. Therm. Eng., 128, 20-32, 2018.
14. Rao Z., Wang Q., Huang C., Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system, Appl. Energy, 164, 659–669, 2016.
15. Hémery C-V., Pra F., Robin J-F., Marty P., Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material, J. Power Sources, 270, 349-358, 2014.
16. Briggs A., Rose J.W., Effect of fin efficiency on a model for condensation heat transfer on a horizontal, integral-fin tube, Int. J. Heat Mass Transfer, 37, 457-463, 1994.
17. Khoshvaght-Aliabadi M., Hormozi F., Zamzamian A., Experimental analysis of thermal–hydraulic performance of copper–water nanofluid flow in different plate-fin channels, Exp. Therm Fluid Sci., 52, 248–258, 2014.
18. Ebadi S., Al-Jethelah M., Tasnim S.H., Mahmud S., An investigation of the melting process of RT-35 filled circular thermal energy storage system, Open Physics, 16 (1), 574–580, 2018.
19. Longeon M., Soupart A., Fourmigué J-F., Bruch A., Marty P., Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection, Appl. Energy, 112, 175-184, 2013.
20. Croda Kimya Tic. Ltd. Sti. Phase change material data sheet. Retrieved from https://www.crodatherm.com/en-gb/products-and-applications/product-finder/product/981/Crodatherm_1_29. 2020.
21. Lorente S., Bejan A., Niu J.L., Phase change heat storage in an enclosure with vertical pipe in the center
22. Int. J. Heat Mass Transfer, 72, 329-335, 2014.
23. Zhao J., Rao Z., Huo Y., Liu X., Li Y., Thermal management of cylindrical power battery modüle for extending the life of new energy electric vehicles, Appl. Therm. Eng., 85, 33-43, 2015.
24. Temel, U. N. Passive thermal management of a simulated battery pack at different climate conditions. Applied Thermal Engineering, 158 (April), 113796., 2019
25. Türkakar, G., Thermal Analysis and Parametric Investigation of Phase Change Material-Air Cooled Lithium Ion Battery Pack. Journal of Heat Transfer, 143 (12), 1–10, 2021
26. Tekin S., Türkakar G., Experimental Investigation of Cooling a Cylinder with Battery-like Thermal Conditions with Phase Change Material, Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences, 8 (2), 132-148, 2022.
27. MG Chemicals Company. Thermal pastes catalogue. Retrieved from: www.mgchemicals.com. 2020