



Araştırma Makalesi / Research Article

Faz değişim malzemesi ile çift borulu gizli ısı depolamada kanat yerleşim düzeninin erime performansı üzerine etkisi

Effect of fin layout on melting performance in double pipe latent heat storage with phase change material

Orçun Altınok¹ , Burak Kurşun^{1*}

¹ Amasya University, Department of Mechanical Engineering, Amasya, Türkiye

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: burak.kursun@amasya.edu.tr

Makale Bilgileri / Article Info

Anahtar Kelimeler

Çift borulu
Gizli ısı
Faz değişim malzemesi
Erime

Keywords

Double pipe
Latent heat
Phase change material
Melting

Makale tarihçesi / Article history

Geliş / Received: 20.01.2025
Düzeltilme / Revised: 03.02.2025
Kabul / Accepted: 14.02.2025

Öz

Enerji depolama teknolojileri, enerji kaynaklarının verimli kullanımı ve sürdürülebilirlik açısından giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu bağlamda, faz değişim malzemeleri (FDM'ler), yüksek enerji yoğunlukları ve sabit sıcaklıklarda enerji depolama kapasiteleriyle öne çıkmaktadır. FDM'lerin düşük ısı iletkenlikleri, bu malzemelerin pratik uygulamalarda ve ticari kullanımlarda karşılaştığı en büyük zorluklardan biridir. Bu nedenle, FDM ile enerji depolama sistemlerinde ısı iletkenliği artırmak amacıyla kanat kullanımı, nano partikül eklenmesi ve metal köpük uygulamaları gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada da kanat kullanımı tercih edilmiş ancak literatür çalışmalarından farklı olarak kanatçıklar FDM haznesinin alt ve üst bölgelerinde farklı oranlarda yoğunlaştırılmış ve bu düzensiz kanat dağılım oranlarının doğal konveksiyon akışına ve şarj süresine etkileri birlikte incelenmiştir. Bu doğrultuda beş farklı kanat yerleşim konfigürasyonu modellenmiştir. Modeller için sayısal analizler iki boyutlu ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Erime analizlerinin gerçekleştirilmesinde entalpi-porozite yöntemi kullanılmıştır. Parametrik analizler sonucunda, kanatların tümünün alt bölgeye yoğunlaştırıldığı konfigürasyonun en iyi erime performansı gösterdiği ve şarj süresini temel duruma göre %27,2 oranında kısalttığı belirlenmiştir.

Abstract

Energy storage technologies are becoming increasingly important for the efficient use of energy resources and sustainability. In this context, phase change materials (PCMs) stand out due to their high energy densities and capabilities to store energy at constant temperatures. However, the low thermal conductivity of PCMs presents a significant challenge in practical applications and commercial use. To address this issue, various methods such as fin utilization, the addition of nanoparticles, and the use of metal foams have been developed to enhance the thermal conductivity of PCMs in energy storage systems. In this study, fin utilization was adopted, but unlike previous literature, the fins were concentrated at different ratios in the upper and lower regions of the PCM container, and the effects of these uneven fin distributions on natural convection flow and charging time were simultaneously investigated. Five different fin layout configurations were modeled, and numerical analyses were performed in a two-dimensional and time-dependent manner. The enthalpy-porosity method was used for melting analyses. Parametric analysis results indicated that the configuration with fins concentrated entirely in the lower region exhibited the best melting performance, reducing the charging time by 27.2% compared to the baseline configuration.

1. Giriş

Enerji depolama, enerji talebi ve arzı arasındaki dengesizlikleri gidermek, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu artırmak ve enerji arz güvenliğini sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Faz değişim

malzemeleri (FDM'ler), yüksek enerji depolama yoğunlukları ve sabit sıcaklıkta enerji depolama yetenekleri nedeniyle termal enerji depolama sistemlerinde kullanıma potansiyeli yüksek olan malzemelerdir. FDM'ler, enerji depolama ve geri kazanım süreçlerinde etkin rol oynayarak,



enerji verimliliğini artırmakta ve sürdürülebilir enerji çözümlerine katkıda bulunmaktadır.

FDM'lerin düşük ısı iletkenlikleri pratikte uygulanabilirliğinin ve ticarileşmesinin önündeki en önemli engel olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle FDM ile enerji depolamada kanat kullanımı, nano partikül ve metal köpük ilavesi gibi yöntemler uygulanarak ısı iletkenliğinin artırılması hedeflenmiştir [1,2]. Kanatçık kullanımı pratik olarak uygulanabilirliğinin yüksek olması ve düşük maliyeti nedeniyle ısı iletkenliği artırma yöntemleri arasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Kanat kullanımı ile FDM ve boru arasındaki ısı transfer yüzey alanı artırılmakta ve erime/katılma performansı iyileşme sağlanmaktadır. FDM ile enerji depolamada kanat kullanımına ilişkin birçok deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir [3]. Abdulateef vd. düz ve üçgen geometri kanat kullanımının FDM'nin erime performansına etkilerini incelemişler ve üçgen kanat geometrisi için daha kısa şarj süresi elde etmişlerdir [4]. Sarani vd. ise yaptıkları çalışmada hem iç hem de dış boru yüzeyine kanat yerleşimi yaparak katılma performansında önemli ölçüde artış meydana getirmişlerdir [5]. Mahdi vd. tarafından yapılan benzer bir çalışmada da hem iç hem de dış boru üzerine kanat yerleşimi yapılmış ancak bu çalışmada farklı olarak erime analizi için iç boru üzerinde birbirinden farklı kanat boyları kullanılmıştır [6]. Hajizadeh vd. ise V ve Y şekilli kanat kullanımı ile FDM'nin katılma performansının iyileştirilebildiğini tespit etmişlerdir [7]. Düz kanatlı iç borunun eksantrik yerleşimi neticesinde şarj süresinde %27.63 iyileşme meydana geldiği Patel vd. tarafından aktarılmıştır [8]. Rozenfeld vd. ise helisel kanat kullanımının FDM'nin hem erime hem de katılma performansını iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır [9]. FDM ile eksenel kanatlı çoklu borulu gizli ısı depolama sisteminin geleneksel çoklu borulu enerji depolama sistemi ile kıyaslanması Anish vd. tarafından araştırılmıştır [10]. Çalışmada ısı transferini etkileyen en önemli faktörün boru sayısı ve kanat uzunluğu olduğu ortaya konulmuştur. Huang vd. ise iç boru yüzeyinde ağaç şekilli inovatif bir kanat geometrisi kullanmış ve FDM'nin erime ve katılma performansını incelemişlerdir [11]. Ağaç şekilli kanat geometrisi ile şarj vedeşarj süresi sırasıyla %29.4 ve %22.8 oranında kısalmıştır. Nie vd. taç yaprak şekilli 16 kanat konfigürasyonu yerleşiminin FDM'nin katılma etkisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır [21]. Taç yaprak konfigürasyonları ile %4.1 ile %23.6 arasında katılma süresinde kısalma elde etmişlerdir. Tang vd. ise gövde-boru tipi bir gizli ısı depolama ünitesinde yekpare eksenel kanat kullanımı yerine kesintili kanat kullanımı tercih etmiş ve kanat geometrisinin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir [22]. Optimizasyon neticesinde %100 erime süresinde yekpare kanat tasarımına göre %21 oranında düşüş elde etmişlerdir. Uniform kanat dağılımına sahip bir gövde-boru tipi gizli ısı depolama ünitesinde veri odaklı topoloji tasarımı ile uygun kanat sayılarının ve kanatların birbirine göre boyutlarının ve geometrilerinin erime ve katılma performansına etkileri de Luo vd. tarafından aktarılmıştır [23]. Topoloji tasarımı ile erime ve katılma süresinde sırasıyla %21 ve %9 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Balık kılıcı şekilli biyonomik kanat tasarımlarının erime performansına etkilerinin incelendiği çalışmalarda mevcuttur [24,25]. Bu çalışmalarda biyonomik kanat tasarımları ile geleneksel düz kanat yapısına göre şarj süresinde %47.1 ve %23.08 oranında kısalma sağlanmıştır. Tao ve He'nin yaptığı çalışmada farklı sayıda kanatlar tamamen dış borunun alt bölgesine yoğunlaştırılmış ve bu yoğunlaştırmanın doğal konveksiyon akışını artırdığı

gözlenmiştir [12]. Ayrıca alt bölgedeki optimum kanat sayısının yedi olması gerektiği aktarılmıştır. Bu çalışmalar haricinde kanat boyutları, optimizasyonu ve geometrisi ile ilgili birçok çalışma literatürde mevcuttur.

Literatürde FDM ile gizli ısı depolamada kanat kullanımı ve kanat yerleşim düzenine ilişkin çalışmalar mevcut fakat kanatların FDM haznesinin alt ve üst bölgesinde yoğunlaştırma seviyelerinin erime performansına etkilerinin birlikte incelendiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada kanatçıklar FDM haznesinin alt ve üst bölgelerinde farklı oranlarda yoğunlaştırılmış ve bu düzensiz kanat dağılım oranlarının doğal konveksiyon akışına ve şarj süresine etkileri birlikte incelenmiştir. Böylece fiziksel olgulara dayanarak düzensiz kanat yerleşiminde dikkat edilmesi gereken hususlar konusunda literatüre katkı sağlanmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda beş farklı kanat dağılım konfigürasyonu için sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular sıvı fraksiyonu ve şarj süresi açısından değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metod

Bu bölümde gizli ısı depolama için tasarlanan fiziksel modeller ve sayısal çözümleme için kullanılan matematiksel ve sayısal modellere yer verilmiştir.

2.1. Fiziksel Model

Bu çalışmada beş farklı kanat yerleşim düzeni için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı kanat yerleşim düzenleri için oluşturulan modeller Şekil 1'de görülmektedir. Şekil 1'de iç ve dış boru çapları sırasıyla 20 mm ve 40 mm'dir. Uniform olmayan kanat yerleşim düzenlerinde kanatların yoğun olduğu bölgelerde kanatlar arasındaki boşluk açıları doğal konveksiyona engel olmaması açısından 45° olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Kanat yerleşim düzenleri

2.2. Matematiksel Model

FDM'nin erime analizinin gerçekleştirilmesinde entalpi-porozite yönteminden faydalanılmış ve aşağıdaki varsayımlar sayısal çözümde uygulanmıştır [13,14]:

- Hesaplama alanı iki boyutlu olarak ele alınmıştır.
- Akış zamana bağlı bir süreç olarak kabul edilmiştir.
- Akışkan sıkıştırılamaz ve Newton tipi bir akışkan olarak varsayılmıştır.
- Doğal konveksiyon akışları için Boussinesq yaklaşımı kullanılmıştır.
- Dış borunun dış yüzeyinden ısı transferinin olmadığı kabul edilmiştir (Adyabatik sınır koşulu).

Matematiksel model için kullanılan kütle ve x ve y yönlerindeki momentumun korunumu denklemleri sırasıyla Denklem 1, 2 ve 3 ile verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + uA \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + vA + \rho g \beta (T - T_m) \quad (3)$$

Denklemlerde, ρ yoğunluğu, g yer çekimi ivmesini (9.81 m/s^2), μ dinamik viskoziteyi, β termal genleşme katsayısını ve T sıcaklığı temsil etmektedir. Denklemlerde u ve v , sırasıyla x ve y yönlerindeki akışkan hız bileşenlerini ifade eder. Denklem 3'ün sağ tarafında yer alan son terim, Boussinesq yaklaşımı çerçevesinde kaldırma kuvveti etkisini temsil eder. A değeri, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır [15]:

$$A = -A_{mush} \frac{(1 - \lambda)^2}{\lambda^3 + \varepsilon} \quad (4)$$

Denklemlerde λ sıvı fraksiyonudur ve aşağıdaki şekilde belirlenir [11].

$$\lambda = \begin{cases} 0 & ; T < T_s \\ (T - T_s)/(T_l - T_s) & ; T_s < T < T_l \\ 1 & ; T > T_l \end{cases} \quad (5)$$

Denklemlerde l ve s alt simgeleri, sırasıyla sıvı ve katı fazları temsil eder. A_{mush} , katılaşma sırasında akışkan hızının azaltılması için peltemsi bölgeyi tanımlayan katsayıdır ve bu çalışmada $A_{mush}=10^5$ olarak kabul edilmiştir. ε , sıfıra bölünmeyi engellemek amacıyla kullanılan küçük bir değer olup, bu çalışmada $\varepsilon=0.001$ olarak alınmıştır [15].

Enerji denklemi ise aşağıda verildiği gibidir,

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (6)$$

Denklemlerde k iletimle ısı transfer katsayısını ve h entalpiyi göstermektedir. h Denklem 7 ile hesaplanmıştır [16].

$$h = \begin{cases} \int_{T_{ref}}^T c_p dT & ; T < T_s \\ \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \lambda H & ; T_s < T < T_l \\ \int_{T_{ref}}^{T_s} c_p dT + \int_{T_l}^T c_p dT & ; T > T_l \end{cases} \quad (7)$$

Denklemlerde C_p özgül ısı kapasitesini, H gizli ısıyı ve T_{ref} referans sıcaklığı ifade etmektedir ($T_{ref} = 298.15 \text{ K}$). T , Denklem 8 ile hesaplanabilir [17].

$$T = \lambda(T_l - T_s) + T_s \quad (8)$$

Hem ticari olarak kolay ulaşılabilir olması, hem de düşük sıcaklıklı enerji depolamaya uygun olması sebebiyle FDM olarak N-eikosan tercih edilmiştir. N-eikosan'ın termofiziksel özellikleri için Tablo 1 incelenebilir.

Tablo 1. N-eikosan özellikleri [18]

Özellik ve Birim	Değer
Özgül Isı Kapasitesi (J/kgK)	2460
Sıvı Yoğunluğu (kg/m ³)	770
Isıl İletkenlik (W/mK)	0.1505
Dinamik Viskozite (kg/ms)	0.00385
Gizli Isı (J/kg)	247600
Termal Genleşme Katsayısı (1/K)	0,0009
Katılaşma Sıcaklığı (K)	308.15
Sıvılaşma Sıcaklığı (K)	310.15

İç borudaki konveksiyonel ısı transfer katsayısı (h_{conv}), Dittus-Boelter korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem (9)) [19].

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (9)$$

h_{conv} , Nusselt sayısı (Nu) ve Reynolds sayısının (Re) hesaplanmasında aşağıdaki denklemler kullanılmıştır:

$$Re = \frac{\rho V D_H}{\mu} \quad (10)$$

$$D_H = \frac{4A_c}{p} \quad (11)$$

$$Nu = \frac{h_{konv} D_H}{k} \quad (12)$$

Denklemlerde, ρ ve V sırasıyla yoğunluğu ve ortalama akış hızını göstermektedir. μ ise akışkanın dinamik viskozitesini temsil eder. Denklem 11'de, D_H hidrolik çapı ifade eder. Hidrolik çap hesabında, A_c FDM'nin yüzey alanını (878.34 mm^2), p ise akışkanın temas ettiği ıslak çevre uzunluğunu gösterir.

2.3. Sınır Şartları

Sayısal çözümlemelerde FDM'nin erime sıcaklığı ortalama 309.15 K olarak alınmıştır. Ayrıca, FDM'nin erime periyodu başlangıcındaki ($t=0 \text{ s}$) sıcaklığı erime sıcaklığının 1°C altındadır (Denklem 15). Dış borunun dış yüzeyine adyabatik sınır koşulu uygulanmıştır (Denklem (13)). İç borunun iç yüzeyine ise taşınım ile ısı transfer sınır koşulu atanmıştır. Ek olarak erime periyodu boyunca iç boru içerisindeki akışkanın ortalama sıcaklığının 329.15 K olduğu varsayılmıştır.

$$|\dot{q}_{iletim}|_{OS} = 0, t(s) = t \quad (13)$$

$$|\dot{q}_{iletim}|_{IS} = h_{konv}(T_{mf} - T_w), t(s) = t \quad (14)$$

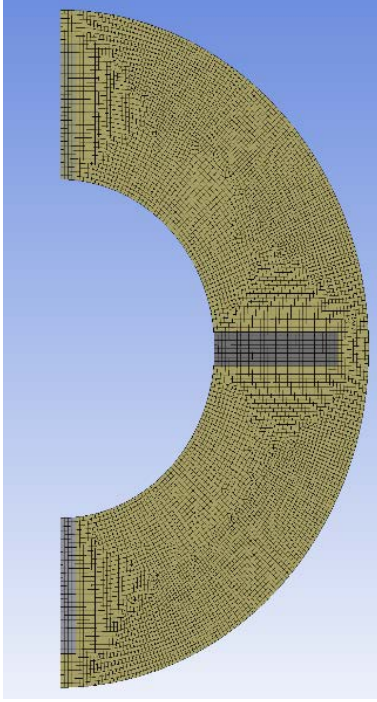
$$[T_{PCM} = 308.15 \text{ K}, t(s) = 0] \quad (15)$$

Denklemlerde, T_w duvarın sıcaklığını, $T_{m,f}$ ise ortalama akışkan sıcaklığını temsil etmektedir. h_{konv} ise konveksiyon yolu ile gerçekleşen ısı transferinin katsayısıdır. IS iç yüzeyi, OS ise dış yüzeyi ifade etmektedir.

2.4. Sayısal Çözümleme

Sayısal analizler, sonlu hacimler yöntemi kullanılarak ANSYS-Fluent 2022 R1 yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Basınç-hız çiftleri arasındaki ilişkiyi çözmek için PISO algoritması uygulanmış, basınç düzeltme işlemleri için PRESTO! yöntemi tercih edilmiştir. Momentum ve enerji denklemlerinin ayrıştırılmasında QUICK şeması kullanılmış, zamana bağlı denklemler için birinci dereceden geçiş formülü uygulanmıştır. Kalıntı değerleri kütle ve momentum korunum denklemleri için 10^{-6} , enerji denklemi için ise 10^{-8} olana kadar analizler

sürdürülmüştür. Şekil 2’de görüldüğü gibi kanat yüzeyleri ve FDM bölgesine hegzahedral hücre yapısı uygulanmıştır.



Şekil 2. Kanat yüzeyi ve FDM bölgesindeki hücre yapısı ve dağılımı

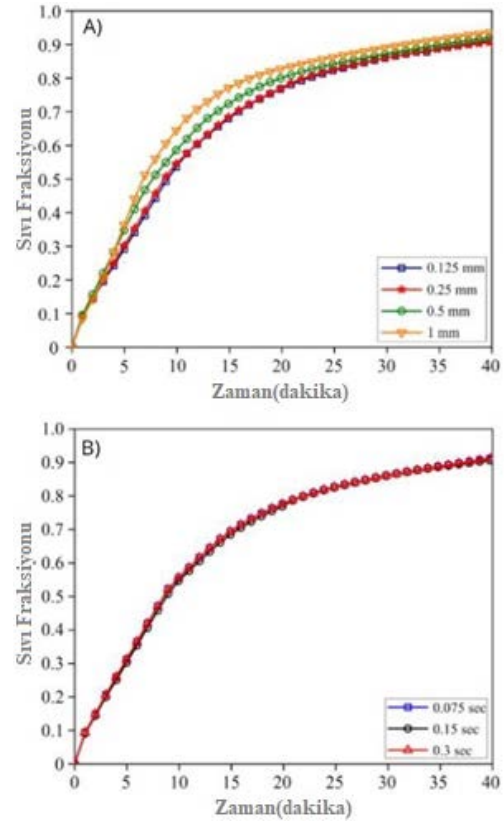
3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada uygulanan matematiksel ve sayısal modelin doğruluğunun tespit edilmesi için öncelikle hücre sayısından ve zaman adımından bağımsızlık testleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise parametrik çalışma yapılarak bulgular sıvı fraksiyonu ve şarj süresi açısından değerlendirilmiştir.

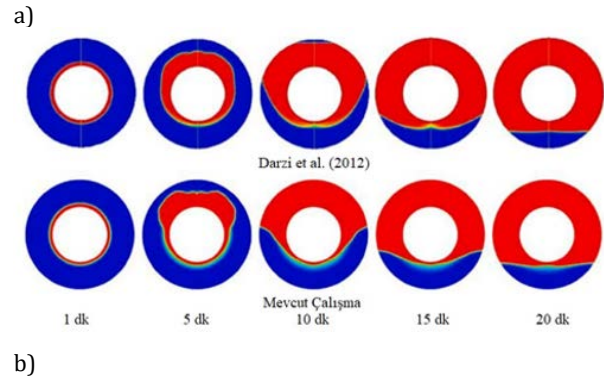
3.1. Doğrulama

Doğrulama işlemleri kapsamında ilk olarak hücre boyutu ve zaman adımından bağımsızlık testleri gerçekleştirilmiştir. Görüldüğü üzere, 0.25 mm’den küçük ızgara boyutu ve 0.15 saniyeden kısa zaman adımları için sıvı fraksiyonundaki değişim ihmal edilebilir seviyededir. Bu nedenle, parametrik analizler için 0.25 mm’lik ızgara boyutu ve 0.15 saniyelik zaman adımı tercih edilmiştir (Şekil 3).

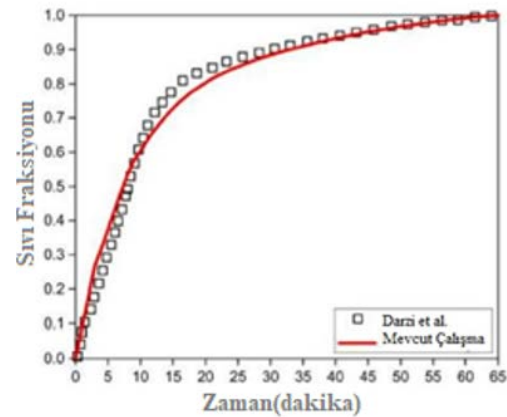
Sıvı fraksiyonunun konturları Şekil 4a’da sunulmuştur. 65 dakikalık erime süresi boyunca sıvı fraksiyon eğrilerinin karşılaştırması ise Şekil 4b’de yer almaktadır. Şekil 4b’de, iki analiz arasındaki en büyük farkın %6.5 olduğu tespit edilmiştir. Bu hata oranı, kullanılan sayısal modelin belirli bir erime periyodu için kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Bağımsızlık testleri a) Hücre sayısından bağımsızlık, b) Zaman adımından bağımsızlık



b)



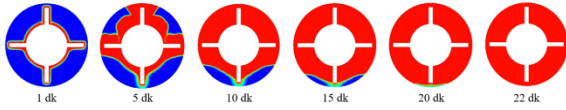
Şekil 4. Literatür çalışması [20] ile karşılaştırma a) Sıvı fraksiyonu konturları, b) Zamana bağlı sıvı fraksiyonu eğrileri

3.2. Parametrik Çalışma Bulguları

Bu bölümde beş farklı kanat yerleşim konfigürasyonu için sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve bulgular sıvı fraksiyonu konturları ve %100 erime süreleri açısından değerlendirilmiştir. Uniform kanat dağılımının olduğu Model 1, temel durum olarak kabul edilmiştir. Şekil 5’de tüm kanat yerleşim konfigürasyonları için zamana bağlı sıvı fraksiyonu konturları verilmiştir.

Tüm modellerde farklı şarj sürelerinin oluşmasındaki temel fiziksel mekanizma erimiş FDM’deki doğal konveksiyon akışı olmuştur. Eriyen sıcak akışkan kaldırma kuvveti etkisi ile FDM haznesinin üst bölgesine doğru hareket ederek o bölgedeki FDM’nin de erimesini sağlamıştır. Doğal konveksiyon akışının en yüksek olduğu modelde en düşük şarj süresi elde edilmiştir. Kanatların FDM haznesinin alt bölgesinde yoğunlaştırılması alt bölgedeki FDM’nin daha hızlı erimesini ve doğal konveksiyonla ısı transferinin de daha etkin olmasını sağlamıştır. Böylece en düşük şarj süresi Model 5 ile elde edilmiştir (16 dk). Model 3’de ise FDM haznesinin alt bölgesindeki FDM’nin daha yavaş erimesi doğal konveksiyon etkisini azaltmış ve en yüksek şarj süresine ulaşılmıştır. Model 2’de de alt bölgede kanatlar yoğunlaştırılmış ancak Model 5’e göre şarj süresi 3 dk daha uzun olmuştur. Uniform kanat dağılımına sahip Model 1 ve Model 4’de ise aynı şarj süreleri elde edilmiştir (22 dk). Sıvı fraksiyonu bulguları kanatların tümünün alt bölgeye konumlandırılmasının şarj süresi açısından daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

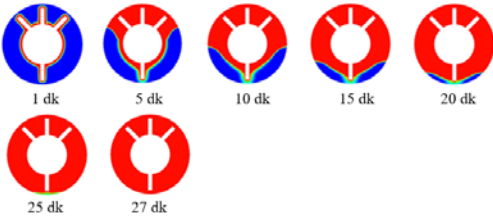
Model 1



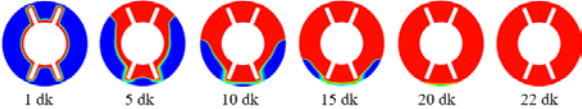
Model 2



Model 3



Model 4



Model 5



Şekil 5. Tüm modeller için sıvı fraksiyonu konturları ve %100 erime süreleri

Tablo 2’de ise tüm modeller için %100 erime süreleri (şarj süresi) ve uygulanan kanat yerleşim konfigürasyonlarıyla temel duruma göre şarj sürelerindeki artış ve azalma sunulmuştur. Kanatların üst bölgede yoğunlaştırıldığı Model 3 ile temel duruma göre şarj süresi %22.7 artarken Model 2 ve 5 ile temel duruma göre şarj sürelerinde düşüş meydana gelmiştir. Şarj süresindeki en yüksek düşüş %27.2 ile Model 5 kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 2. Şarj süreleri ve temel duruma göre şarj sürelerindeki artma ve azalma

Model	Şarj Süresi	Şarj Süresindeki Azalma/Artma (%)
Model 1	22 dk	-
Model 2	19 dk	13.6 ↓
Model 3	27 dk	22.7 ↑
Model 4	22 dk	-
Model 5	16 dk	27.2 ↓

4. Sonuçlar

Bu çalışmada FDM ile çift borulu gizli ısı depolama işleminde ısı iletkenliği artırmada yaygın olarak tercih edilen kanat kullanımının sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Kanat yerleşim düzeninin değiştirilerek doğal konveksiyonla olan ısı transferinin artırılması ve şarj süresinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Kanat yerleşim düzeninin doğal konveksiyon akışına ve şarj süresine etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Sayısal analiz bulguları doğal konveksiyon akışındaki artışın şarj süresini düşürdüğünü göstermiştir.
- Kanat dağılımının FDM haznesinin alt bölgesinde yoğunlaşacak şekilde gerçekleştirilmesi alt bölgedeki erimiş FDM miktarını ve doğal konveksiyon akışını artırarak şarj süresini düşürmüştür. Model 2 ve Model 5’deki sıvı fraksiyonları kıyaslandığında kanatların tümünün alt bölgede yoğunlaştırılmasının şarj süresi açısından daha iyi sonuç verdiğini ortaya çıkmıştır.
- Uniform kanat yerleşim düzenine sahip Model 1 ve Model 4’de kanatlar arası açılar farklı olsada aynı şarj süreleri elde edilmiştir. Bu durum uniform kanat dağılımı için kanatlar arası açının şarj süresini etkilemediğini ortaya koymuştur.
- Kanat dağılımının üst bölgede yoğunlaşacak şekilde gerçekleştirilmesi ise FDM haznesinin alt bölgesindeki FDM’nin daha geç erimesine ve doğal konveksiyonun yalnızca haznenin üst bölgesinde etkili olmasına neden olmuştur. Böylece en yüksek şarj süresi Model 3 ile elde edilmiştir.

Sayısal analiz sonuçları kanat yerleşim düzeninin şarj süresinin değişiminde önemli rol oynadığını göstermiş ve uniform olmayan kanat dağılımı ile daha düşük şarj süreleri elde edilmiştir. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda düzensiz kanat dağılımı ve kanatlar arası açılar için optimizasyon çalışması yapılarak şarj süresinin daha da düşürülmesi mümkün olabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

Fonlama Bilgileri: Bu çalışma herhangi bir fonla desteklenmemiştir.

Yazar katkısı: Yazarlar, çalışmanın tasarlanması, verilerin toplanması, sonuçların analizi ve yorumlanması ve

makalenin hazırlanması ile ilgili sorumluluklarını onaylamaktadır.

Veri Kullanılabilirlik Beyanı: Bu çalışma sırasında üretilen ve/veya analiz edilen veriler kamuya açık değildir; ancak veriler makul bir talep üzerine ilgili yazar tarafından sağlanabilir.

Kaynaklar

- [1] Chebli, F., and Mechighel, F. (2025) *Phase change materials: classification, use, phase transitions, and heat transfer enhancement techniques: a comprehensive review*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1-59.
- [2] Wu, S., Yan, T., Kuai, Z., and Pan, W. (2020) *Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review*, Energy Storage Materials, 25: 251-295.
- [3] Choure, B. K., Alam, T., and Kumar, R. (2023) *A review on heat transfer enhancement techniques for PCM based thermal energy storage system*, Journal of Energy Storage, 72, 108161.
- [4] Abdulateef, A. M., Mat, S., Sopian, K., Abdulateef, J., and Gitan, A. A. (2017) *Experimental and computational study of melting phase-change material in a triplex tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins*, Solar Energy, 155: 142-153.
- [5] Sarani, I., Payan, S., Nada, S. A., and Payan, A. (2020) *Numerical investigation of an innovative discontinuous distribution of fins for solidification rate enhancement in PCM with and without nanoparticles*, Applied Thermal Engineering, 176: 115017.
- [6] Mahdi, J. M., Lohrasbi, S., Ganji, D. D., and Nsofor, E. C. (2018) *Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 124: 663-676.
- [7] Hajizadeh, M. R., Keshteli, A. N., and Bach, Q. V. (2020) *Solidification of PCM within a tank with longitudinal-Y shape fins and CuO nanoparticle*, Journal of Molecular Liquids, 317: 114188.
- [8] Patel, J. R., Rathod, M. K., and Sheremet, M. (2022) *Heat transfer augmentation of triplex type latent heat thermal energy storage using combined eccentricity and longitudinal fin*, Journal of Energy Storage, 50: 104167.
- [9] Rozenfeld, A., Kozak, Y., Rozenfeld, T., and Ziskind, G. (2017) *Experimental demonstration, modeling and analysis of a novel latent-heat thermal energy storage unit with a helical fin*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 110: 692-709.
- [10] Anish, R., Joybari, M. M., Seddegh, S., Mariappan, V., Haghighat, F., and Yuan, Y. (2021) *Sensitivity analysis of design parameters for erythritol melting in a horizontal shell and multi-finned tube system: Numerical investigation*, Renewable Energy, 163: 423-436.
- [11] Huang, Y., Song, L., Wu, S., and Liu, X. (2022) *Investigation on the thermal performance of a multi-tube finned latent heat thermal storage pool*, Applied Thermal Engineering, 200: 117658.
- [12] Tao, Y. B., and He, Y. L. (2015) *Effects of natural convection on latent heat storage performance of salt in a horizontal concentric tube*. Applied Energy, 143, 38-46.
- [13] Mahdi, M. S., Mahood, H. B., Mahdi, J. M., Khadom, A. A., and Campbell, A. N. (2020) *Improved PCM melting in a thermal energy storage system of double-pipe helical-coil tube*, Energy Conversion and Management, 203: 112238.
- [14] Alnakeeb, M. A., Salam, M. A. A., and Hassab, M. A. (2021) *Eccentricity optimization of an inner flat-tube double-pipe latent-heat thermal energy storage unit*, Case Studies in Thermal Engineering, 25: 100969.
- [15] Kadivar, M. R., Moghimi, M. A., Sapin, P., and Markides, C. N. (2019) *Annulus eccentricity optimisation of a phase-change material (PCM) horizontal double-pipe thermal energy store*, Journal of Energy Storage, 26: 101030.
- [16] Yan, P., Fan, W., Yang, Y., Ding, H., Arshad, A., and Wen, C. (2022) *Performance enhancement of phase change materials in triplex-tube latent heat energy storage system using novel fin configurations*, Applied Energy, 327: 120064.
- [17] Yang, X. H., Tan, S. C., and Liu, J. (2016) *Numerical investigation of the phase change process of low melting point metal*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 100: 899-907.
- [18] Seddegh, S., Wang, X., and Henderson, A. D. (2015) *Numerical investigation of heat transfer mechanism in a vertical shell and tube latent heat energy storage system*, Applied thermal engineering, 87: 698-706.
- [19] Dittus, F. W., and Boelter, L. M. K. (1985) *Heat transfer in automobile radiators of the tubular type*, International communications in heat and mass transfer, 12(1): 3-22.
- [20] Darzi, A. R., Farhadi, M., and Sedighi, K. (2012) *Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus*, Applied Mathematical Modelling, 36(9): 4080-4086.
- [21] Nie, C., Chen, Z., Li, H., Liu, X., Liu, J., and Rao, Z. (2025) *Petal-shaped fin configurations for enhancing phase change material solidification in a horizontal shell and tube thermal energy storage unit*, Journal of Energy Storage, 113: 115685.
- [22] Tang, S., Song, Y., Liu, P., Wu, X., Xu, Y., Zhou, J., and Li, X. (2025) *Design and optimization of a vertical shell-and-tube latent heat thermal energy storage system via discontinuous fins*, Renewable Energy, 122568.
- [23] Luo, J. W., Yaji, K., Chen, L., and Tao, W. Q. (2025) *Data-driven multi-fidelity topology design of fin structures for latent heat thermal energy storage*, Applied Energy, 377: 124596.
- [24] Fang, Z., and Zhao, C. (2025) *Thermal performance analysis of novel bionic fins in a concentric three-tube latent heat storage system*, Renewable Energy, 122607.
- [25] Wang, C., Yao, S., Chen, X., and Yan, X. (2025) *Thermal performance analysis of new bionic "fishbone" fins in a triplex-tube latent heat storage system with single cycle process*, Applied Thermal Engineering, 259: 124902.