



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Kanatçıklı dikey silindirik bir tüp içerisinde faz değiştiren malzemenin erime analizi

Melting analysis of phase change material in a vertical cylindrical tube with fin

Yazar(lar) (Author(s)): Burak İZGİ

ORCID: 0000-0001-9491-8653

To cite to this article: İzgi B., “Kanatçıklı dikey silindirik bir tüp içerisinde faz değiştiren malzemenin erime analizi”, *Journal of Polytechnic*, 27(2): 629-638, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: İzgi B., “Kanatçıklı dikey silindirik bir tüp içerisinde faz değiştiren malzemenin erime analizi”, *Politeknik Dergisi*, 27(2): 629-638, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1056857

Kanatçıklı Dikey Silindirik Bir Tüp İçerisinde Faz Değişiren Malzemenin Erime Analizi

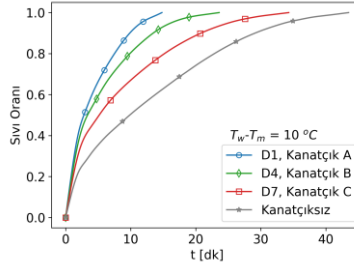
Melting Analysis of Phase Change Material in A Vertical Cylindrical Tube With Fin

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Silindirik olarak kapsüllenmiş ve içerisinde kanatçık bulunan faz değişiren malzemenin erime süreci incelenmiştir. / The melting process of the cylindrically encapsulated phase change material with fin was investigated.
- ❖ Kanatçıklar, erime süresini önemli ölçüde kısaltır. / Fins are significantly shortened the melting time.
- ❖ Kanatçık genişliğinin ve dış yüzey sıcaklığının artması erime süresini düşürür. / Increasing the fin width and outer surface temperature decreases the melting time.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Silindirik olarak kapsüllenmiş FDM'nin içerisine kanatçık yerleştirilmesi erime süresini önemli oranda kısaltmaktadır. / Placing fins inside the cylindrically encapsulated PCM significantly reduces the melting time.



Şekil. Kanatçıkların erime süresine etkisi /Figure. Effect of fins on melting time

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı içerisine kanatçıklar yerleştirilmiş dikey silindirik bir tüp içerisindeki FDM'nin erime sürecinin sayısal olarak incelenmesidir. / The aim of this study is to numerically investigate the melting process of PCM in a vertical cylindrical tube with fins.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kanatçıklı silindirik bir tüp içerisinde FDM'nin erimesini araştırmak için üç boyutlu, zaman bağlı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeli geliştirilmiştir. / A three dimensional, unsteady computational fluid dynamics (CFD) model was developed to investigate the melting of PCM inside a finned cylindrical tube.

Özgünlük (Originality)

Silindirik olarak kapsüllenmiş FDM'deki kanatçıkların erime süreci üzerindeki etkilerinin incelenmesi. / Investigation of the effects of fins in cylindrically encapsulated PCM on the melting process.

Bulgular (Findings)

Referans duruma göre erime süresindeki maksimum azalma %194 olarak kanatçık A durumunda ve sıcaklık farkının 10 °C olduğu durumda bulunmuştur. / Compared to the reference case, the maximum decrease in melting time was found as 194% in Fin A case and a temperature difference of 10 °C.

Sonuç (Conclusion)

FDM'ye yerleştirilen kanatçıklar, erime süreci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. FDM'ye yerleştirilen kanatçıkların genişliği arttıkça erime süresi kısaltılmaktadır. / The fins placed in the PCM have a significant effect on the melting process. As the width of the fins placed in the PCM increases, the melting time becomes shorter.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Kanatçıklı Dikey Silindirik Bir Tüp İçerisinde Faz Değiştiren Malzemenin Erime Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Burak İZGİ

Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Türkiye
(Geliş/Received : 12.01.2022 ; Kabul/Accepted : 28.10.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 11.12.2022)

ÖZ

Bu çalışmada, ısı enerji depolama sistemlerinde kullanılan silindirik olarak kapsüllenmiş faz değiştiren malzemenin erime süreci ve silindir içerisine kanatçık yerleştirilmesinin etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Analizler için üç boyutlu, zamana bağlı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği modeli oluşturulmuş ve oluşturulan model literatürdeki deneysel ve sayısal veriler ile doğrulanmıştır. Kanatçıkların erime sürecine etkilerini incelemek amacıyla 6, 9 ve 12 mm olmak üzere üç farklı kanatçık genişliği seçilmiştir. Kanatçıkların etkileri, faz değiştiren malzeme erime sıcaklığı ile silindirin dış duvar sıcaklığı arasındaki farkın 10, 20 ve 30 °C olduğu durumlarda analiz edilmiştir. Faz değiştiren malzeme içerisine yerleştirilen kanatçıkların erime sürecine önemli ölçüde etki ettiği, kanatçık genişliği arttıkça erime süresinin kısaldığı görülmüştür. Kanatçık etkisi ile erime süresindeki en büyük düşüş, 10 °C sıcaklık farkında 12 mm kanatçık genişliğinde elde edilmiştir. Bu durumda erime süresi 14.8 dakika iken kanatçiksız faz değiştiren malzemenin erime süresi 43.5 dakikadır.

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren malzeme, erime, ısı transferi, kanatçık, sayısal analiz.

Melting Analysis Of Phase Change Material in A Vertical Cylindrical Tube With Fin

ABSTRACT

In this study, the melting process of the cylindrically encapsulated Phase Change Material (PCM) used in thermal energy storage systems and the effects of fin placement in the cylinder were numerically investigated. For the analysis, a three-dimensional, transient Computational Fluid Dynamics (CFD) model was developed and the model was validated with experimental and numerical data in the literature. In order to examine the effects of the fins on the melting process, three different fin widths, 6, 9, and 12 millimeters, were selected. The effects of the fins were analyzed when the difference between the FDM melting temperature and the outer wall temperature of the cylinder was 10, 20, and 30°C. It has been observed that the fins placed in the PCM have a significant effect on the melting process, and the melting time becomes shorter as the fin width increases. The maximum decrease in melting time due to the fin effect was obtained with a fin width of 12 mm at a temperature difference of 10 °C. In this case, while the melting time is 14.8 minutes, the melting time of FDM without fins is 43.5 minutes.

Keywords: Phase change material, melting, heat transfer, fins, numerical analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

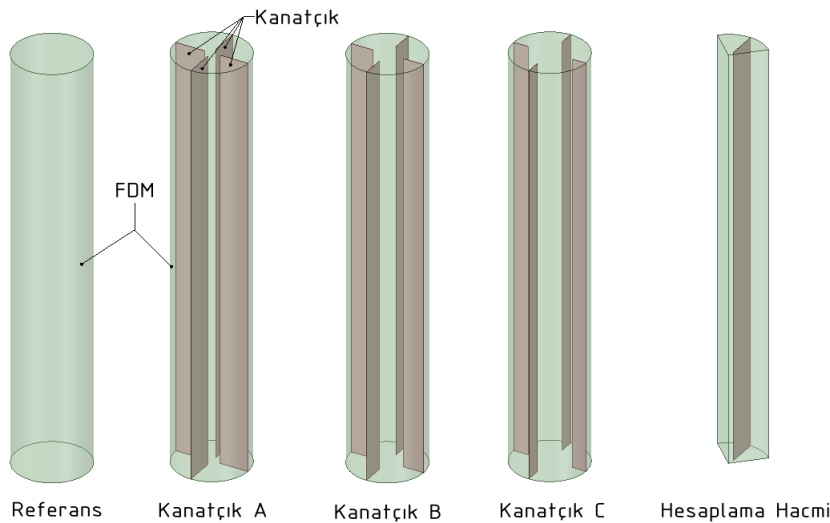
Enerji kullanımında yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırmak ve fosil kaynaklardan elde edilen enerjiyi daha verimli kullanmak, sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir. Isıl enerji depolama, yenilenebilir enerji kaynaklarındaki üretim sürekliliği problemlerine bir çözüm getirirken, aynı zamanda atık ısının depolanarak fosil kaynaklardan elde edilen enerjinin verimliliğini artırması açısından son derece önemli bir çalışma alanıdır [1, 2]. Isıl enerji depolama sistemlerinde, sistemin verimliliğini artırmak amacıyla Faz Değiştiren Malzemeler (FDM) kullanılmaya yönelik çalışmalar oldukça yaygındır [3–5]. Silindirik ve küresel olarak kapsüllenmiş FDM'ler uygun hacim yüzey alanı oranı sebebiyle ısı enerji depolama uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir [6, 7]. Isıl sistemlerde FDM kullanımı, yüksek depolama kapasitesi, sabit çalışma sıcaklığı gibi

pek çok avantaj sağlarken, FDM'lerin en önemli kusuru, erime süresini artıran ve enerji depolama sisteminin verimliliğini olumsuz etkileyen düşük ısı transfer katsayılarıdır [8]. Bu dezavantajı gidermek amacıyla kanatçık kullanımı, FDM içerisine yüksek ısı iletkenliğine sahip nano partiküller eklenmesi, FDM/Metal köpük yapılarının kullanımı gibi yöntemler üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır [9–11]. FDM içeren ısı enerji sistemlerinde farklı kanatçık türlerinin kullanımı, basit kurulum, düşük maliyet ve yüksek ısı iletkenlik nedeni ile oldukça popülerdir. Kanatçık kullanımının FDM'nin erime sürecine etkisini inceleyen pek çok çalışma yapılmıştır. Siva vd. [12] silindirik ve küresel olarak kapsüllenmiş FDM içerisine kanatçık yerleştirilmesinin etkilerini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Aynı miktarda FDM'nin küresel yerine silindirik olarak kapsülendiği durumda, silindirin yüzey alanının küreye göre %38 daha fazla olmasından dolayı silindirik kapsülleme durumunda faz değişim süresinin daha kısa sürdüğünü belirtmişlerdir. Kanatçık

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : burak.izgi@bozok.edu.tr

bulunmayan durumda silindirik kapsüllemenin küresel kapsüllemeye göre toplam katılma süresini %47 düşürdüğünü bildirmişlerdir. İçerisine kanatçık yerleştirilmiş silindir durumunda, kanatçık bulunmayan duruma göre FDM'nin erime süresinin %51, katılma süresinin ise %72 daha kısa olduğunu göstermişlerdir. Shaker vd. [13] silindirik olarak kapsüllemiş FDM içerisine kanatçık yerleştirilmesinin FDM'nin erime sürecine etkilerini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. FDM olarak parafin wax ve lauric asit kullandıkları çalışmada silindir içerisine farklı sayıda kanatçık yerleştirilerek çeşitli su giriş sıcaklıklarında FDM'nin erime ve katılma sürecini incelemişlerdir. Silindir içerisine 12 adet kanatçık yerleştirildiğinde, kanatçiksız duruma göre erime süresinde FDM olarak parafin wax kullanıldığında %41, lauric asit kullanıldığında %37'lik bir düşüş gözlemlendiğini bildirmişlerdir. Ayrıca sisteme giren su sıcaklığının 55°C'den 70°C'ye çıkarıldığında toplam erime süresinin %46 düştüğünü aktarmışlardır. Abdi vd. [14] düz dikey kanatçıkların, dikdörtgen geometride kapsüllemiş FDM içeren bir ısı enerji depolama sisteminin ısı transfer hızı ve enerji depolama kapasitesi üzerindeki etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. FDM'nin erime süreci üzerinde, kanatçıkların uzunluğunu arttırmanın, kanatçık sayısını arttırmaktan daha iyi etkileri olduğu sonucuna varmışlardır. Dikdörtgen geometride kapsüllemiş FDM ile ilgili bir diğer çalışma Oliveski vd. [15] tarafından yapılmıştır. Yaptıkları çalışmada FDM içerisine kanatçık eklenmesinin erime sürecine etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Analizlerde FDM kütlesini ve kanatçık yüzey alanını sabit tutarak kanatçığın en/boy oranının etkilerini incelemişlerdir. Kanatçığın en/boy oranı azaldığında erime sürecinin hızlandığını aktarmışlardır. Joshi vd. [16] dikdörtgen kesitli bir geometride kapsüllemiş FDM'nin erime sürecini, üç adet kanatçık eklenmiş durum için araştırmışlardır. Kanatçıkların farklı genişlik ve dikey konumları için yaptıkları sayısal çalışma sonucunda, en üst konumda bulunan kanatçığın genişliğinin azaltılmasının erime sürecini etkilemediği

ancak sistemin ısı enerji depolama kapasitesini artırdığını gözlemlemişlerdir. Ji vd. [17] toplam uzunluğu sabit olan iki adet kanatçığın, dikdörtgen kesitli FDM sistemine farklı yüksekliklerde ve farklı uzunluklarda yerleştirilmesinin erime sürecine etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. İki kanatçığın da eşit uzunlukta yerleştirilmesi durumu ile karşılaştırıldığında, daha kısa kanatçığın daha üstte, daha uzun kanatçığın daha alta yerleştirilmesinin toplam erime süresini azalttığını bildirmişlerdir. Bhagat vd. [18] düz kanatçıklarla donatılmış, çok borulu ısı değiştirici tipindeki FDM'li ısı enerji depolama sisteminin termal performansını sayısal olarak araştırmışlardır. Kanatçık sayısı ve kalınlığı artırıldığında FDM'deki ısı transferinin artması nedeni ile ısı enerji depolama sisteminin termal performansının iyileştiğini bildirmişlerdir. Sheikholeslami vd. [19] nano parçacık ve düz kanatçıkların, iç içe borulu ısı değiştirici şeklindeki gizli ısı depolama sisteminin deşarj sırasındaki performansına etkilerini araştırmışlardır. Kanatçık uzunluğu arttıkça FDM'nin katılma süresinin hızlandığını gözlemlemişlerdir. Kazemi vd. [20] borulu ısı değiştirici şeklindeki FDM'li ısı enerji depolama sistemine, boru boyunca kanatçıklar eklenmesinin erime sürecine etkisini araştırmışlardır. FDM olarak RT35 kullandıkları çalışmada, çeşitli açılarda yerleştirilmiş ikili ve üçlü kanatçık durumlarının erime süresi boyunca etkilerini incelemişler ve kanatçık bulunmayan durum ile karşılaştırmışlardır. Üçlü kanatçık durumunda, kanatçıklar arasındaki açının 60°'den 120°'ye çıkarılmasının toplam erime süresini azalttığını bildirmişlerdir. Pu vd. [21] borulu ısı değiştirici tipindeki FDM'li sisteme radyal kanatçıklar eklenmesinin erime sürecine ve sistemin ısı enerji depolama kapasitesine etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. FDM'nin toplam erime süresinin, kanatçık eklenen sistemde kanatçık bulunmayan sisteme göre %44 daha kısa olduğunu bildirmişlerdir. Koşan ve Aktaş [22] borulu ısı değiştiricisi şeklindeki FDM'li ısı enerji depolama sistemine kanatçık eklenmesinin etkilerini sayısal olarak



Şekil 1. Kanatçiksız ve kanatçık eklenmiş FDM tüpleri (FDM tubes with and without fins)

incelemişlerdir ve kanatçık bulunmayan durum ile karşılaştırmışlardır. Kanatçık sayısı arttıkça FDM'nin erime süresinin kısaldığını aktarmışlardır.

FDM'nin faz değişim sürecinin iyileştirilmesi amacı ile kanatçık kullanılmasına yönelik çalışmalar incelendiğinde, yapılan çalışmaların büyük bir kısmının borulu ısı değiştirici şeklindeki FDM sistemlerine ve FDM'nin dikdörtgen bir geometride erimesine yoğunlaştığı görülmektedir. Kanatçıkların dikey silindirik olarak kapsüllenmiş FDM içerisine yerleştirilmesinin etkilerini inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı, içerisine kanatçıklar yerleştirilmiş dikey silindirik bir tüp içerisindeki FDM'nin erime sürecini sayısal olarak incelemek ve yerleştirilen kanatçıkların etkilerini araştırmaktır. Bunun için öncelikle sistemin 3 boyutlu, zamana bağlı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model literatürdeki deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Daha sonra kanatçık boyutunun ve silindirin dış yüzey sıcaklığının erime sürecine etkileri analiz edilmiştir.

2. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL (PROBLEM DESCRIPTION AND MATHEMATICAL MODEL)

Şekil 1'de sayısal analiz için kullanılan sistemin şematik çizimi verilmiştir. Referans sistem, başlangıçta içerisinde katı halde FDM bulunan dikey silindirik bir tüpten oluşmaktadır. Silindirin çapı 30 mm, yüksekliği 170 mm ve cidar kalınlığı 1 mm'dir. Kanatçıkların etkilerini incelemek amacı ile silindirik olarak kapsüllenmiş FDM'nin içerisine 170 mm yüksekliğinde, 1 mm cidar kalınlığında, 3 farklı genişlikte dikdörtgen kanatçık yerleştirilmiştir. A, B ve C tipi kanatçıkların genişlikleri sırası ile 12, 9 ve 6 mm'dir. Şekilde görüldüğü gibi kanatçıklar birbirlerine 90° açı ile yerleştirilmiştir. Sistemin simetrik yapısı göz önüne alınarak, hesaplama zamanını azaltmak amacı ile silindirin 1/4 'i hesaplama hacmi olarak modellenmiştir. FDM olarak analizlerde kullanılan parafin wax (RT27) 'ın özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Burada ρ yoğunluk, T_m ve T_s sırası ile erime ve katılaşma sıcaklıkları, k ısı iletim katsayısı, C_p özgül ısı, μ dinamik viskozite ve L faz değiştirme gizli ısısıdır.

Tablo 1. FDM (RT27)'nin fiziksel özellikleri (Physical properties of FDM (RT27)) [23, 24]

Özellik	Değer	Birim
ρ	877 @299 K 781.5 @301 K 750 @350 K	kg/m ³
T_m	301	K
T_s	299	K
k	0.15 (sıvı) 0.24 (katı)	W/mK
C_p	2500	J/kgK
μ	0.00392	kg/ms
L	179000	J/kg

Sayısal model oluşturulurken yapılan kabuller şunlardır:

- Sıvı fazdaki akış laminer, simetrik ve zamana bağlıdır.
- FDM'nin yoğunluğu sıcaklığa bağlı olarak değişirken, yoğunluk haricindeki özellikler sıcaklıktan bağımsızdır.
- FDM'nin başlangıçtaki yoğunluğu, katı ve sıvı faz yoğunluklarının ortalaması olarak alınarak hacim değişimi ihmal edilmiştir.
- Viskoz kayma gerilmesi etkileri ihmal edilmiştir.

Yapılan kabullere dayanarak süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [25]:

Süreklilik:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

Momentum:

$$\frac{D(\rho \vec{V})}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (2)$$

Enerji:

$$\frac{D(\rho h)}{Dt} = k \nabla^2 T \quad (3)$$

Erime sırasında katı-sıvı arayüzünü takip etmek için entalpi-gözeneklilik metodu [26, 27] kullanılmıştır. Bu yöntemde momentum denkleminde eklenen (\vec{S}) terimi ile katı bölgedeki hız değerlerinin sıfır olması sağlanır ve bu terim aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\vec{S} = A \frac{(1 - \varphi)^2}{\varphi^3 + \epsilon} \vec{V} \quad (4)$$

Burada, ϵ sıfıra bölüm hatasını önlemek için seçilen küçük bir sayı ($\epsilon = 10^{-3}$), A mushy sabiti ($A = 10^5$), ve φ faz değişimi sırasındaki sıvı oranıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

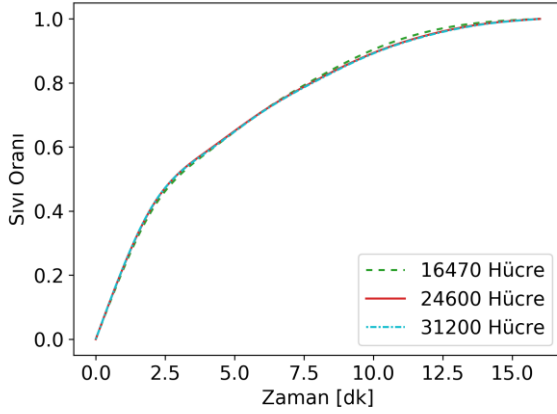
$$\varphi = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_m - T_s} & T_s < T < T_m \\ 1 & T > T_m \end{cases} \quad (5)$$

Toplam entalpi, duyulur ve gizli entalpilerin toplamı olarak yazılabilir.

$$h = h_l + h_s \quad (6)$$

$$h_l = \varphi L \quad (7)$$

$$h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (8)$$



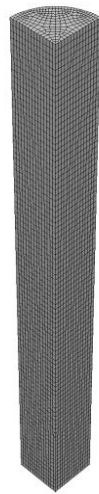
Şekil 2. Ağ bağımsızlığı testi. Hücre sayısının sıvı oranına etkisi (Mesh independence test. Effect of cell number on the liquid fraction)

burada ϕ sıvı oranı ve L FDM'nin faz değiştirme gizli ısıdır.

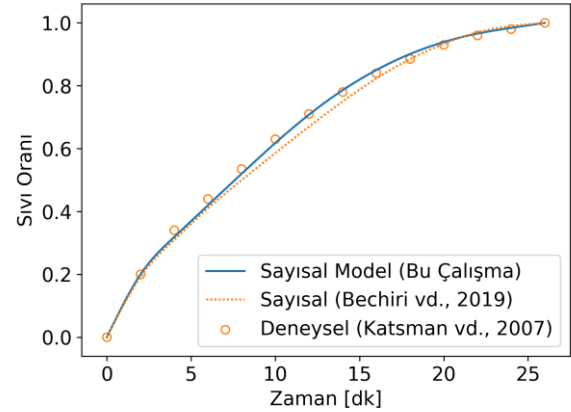
Başlangıçta hız değerleri sıfırdır ve sıcaklık başlangıç sıcaklığındadır (T_0). Simetri yüzeylerine simetri sınır şartı, silindirin yan ve üst duvarlarına sabit sıcaklık (T_w) sınır şartı, silindirin alt duvarına ise sıfır ısı akısı sınır şartı uygulanmıştır.

3. HESAPLAMA METODU (COMPUTATIONAL METHODOLOGY)

Oluşturulan sayısal modelin çözümü için sonlu hacimler metodu kullanılmıştır. Çözüm algoritması olarak SIMPLE seçilmiştir. Enerji ve momentum denklemleri için "second order upwind" şeması, basınç için ise PRESTO şeması kullanılmıştır. Çözümler ANSYS-Fluent yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Yakınsama kriterleri enerji için 10^{-6} momentum ve süreklilik için 10^{-4} seçilmiştir. Seçilen 0.1 saniye zaman aralığında 10-20 iterasyonda yakınsama elde edilmiştir.



Şekil 3. Çözümlerde kullanılan ağ yapısı (Mesh structure used in analysis)



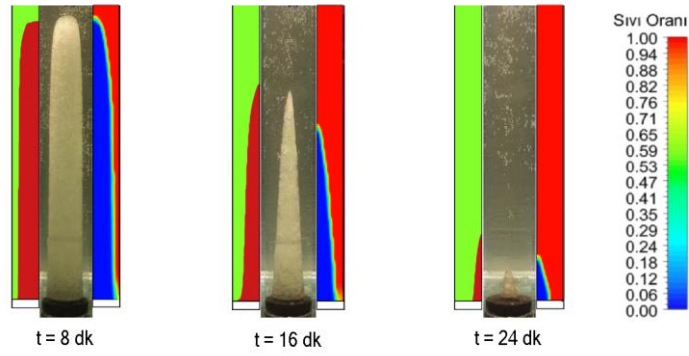
Şekil 4. Modelin doğrulanması. Sıvı oranının zamanla değişimi (Validation of the model. Variation of the liquid fraction over time)

3.1. Ağ Bağımsızlığı Testi (Grid Independency Tests)

Yapılan çözümlerin seçilen ağ yapısından bağımsızlığını test etmek amacı ile üç farklı hücre sayısında analizler yapılmıştır ve hücre sayısının sıvı oranına etkisi incelenmiştir. Şekil 2'de erime süreci boyunca sıvı oranının değişimi farklı hücre sayıları için verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi hücre sayısının 16470'den 31200'e yükseltilmesi erime oranında önemli bir etkiye neden olmamaktadır. Ancak erime sürecinin başında ve sonunda küçük farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu nedenle hesaplamalar için 24600 hücre sayısı seçilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan, hexahedral hücrelerden oluşan ağ yapısı Şekil 3'de sunulmuştur.

3.2. Sayısal Modelin Doğrulanması (Numerical Model Validation)

Oluşturulan sayısal model, literatürdeki deneysel ve sayısal çalışmalar ile doğrulanmıştır. Katsman vd. [24] tarafından yapılan deneysel çalışma ve aynı deney koşullarında Bechiri vd. [28] tarafından yapılan sayısal çalışma, oluşturulan modelin doğrulanmasında kullanılmıştır. Katsman vd. [24] yaptıkları deneysel çalışmada, 170 mm yüksekliğindeki silindirik bir tüp içerisine doldurulmuş parafin RT27'nin erime sürecini incelemişlerdir. Alt yüzeyi yalıtılmış, üst yüzeyi açık olan silindirik bir tüpün yan yüzeyi sabit sıcaklıkta tutularak yapılan çalışmada, çeşitli tüp çapları ve yan yüzey sıcaklıklarının erime süresine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada oluşturulan modelin doğrulanmasında 3 cm çapındaki tüp ve 320 K sıcaklığındaki yan yüzey sıcaklığında yapılan deney sonuçları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4 ve Şekil 5'de sunulmuştur. Şekil 4'de sıvı oranının erime süresince değişimi karşılaştırılmıştır. Şekil 5'de ise katı şeklinin erime sürecindeki değişimi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilde, sol yarı sayısal çalışmadan, orta kısım deneysel çalışmadan, sağ yarı ise bu çalışmadan elde edilen sonuçları göstermektedir. Her iki şekilde de görüldüğü gibi bu çalışmada oluşturulan modelden elde edilen veriler ile literatürdeki deneysel ve sayısal sonuçlar genel olarak uyum içerisindedir.

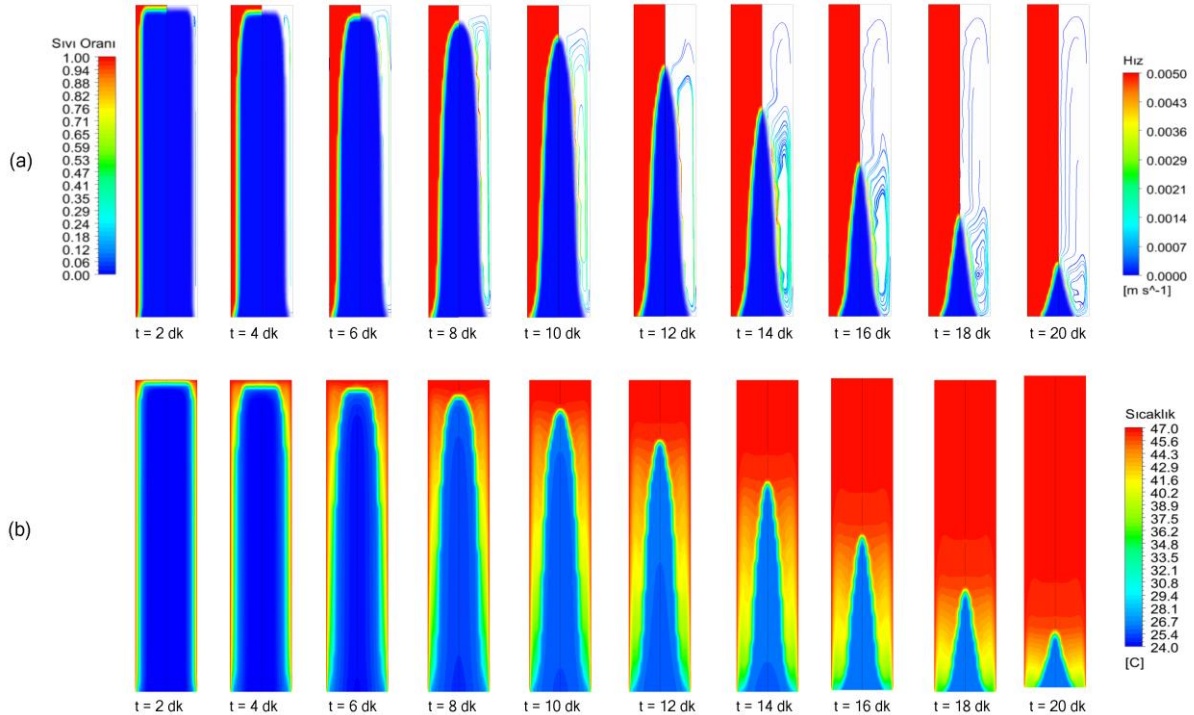


Şekil 5. Modelin doğrulanması. Katı şeklinin erime süresinde değişiminin deneysel [24] ve sayısal [28] çalışmalar ile karşılaştırılması (Validation of the model. Comparison of the change of solid shape in melting time with experimental [24] and numerical [28] studies)

4. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, içerisine kanatçık yerleştirilmiş dikey silindirik bir tüp içerisinde FDM'nin erime süreci çeşitli parametreler için analiz edilmiştir. İncelenen parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Durum 1-3, Durum 4-6 ve Durum 7-9'da sabit kanatçık genişliğinde dış duvar sıcaklığının erime sürecine etkisi 12, 9 ve 6 mm olmak üzere üç farklı kanatçık genişliği için incelenmiştir. Sabit dış duvar sıcaklığı altında kanatçık genişliğinin etkileri ise üç farklı duvar sıcaklığı için Durum 1, 4, 7; Durum 2, 5, 8 ve Durum 3, 6, 9'da analiz edilmiştir. Sonuçlar referans durum olan, içeriside kanatçık bulunmayan tüp içerisindeki FDM'nin erimesi ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

FDM'nin erime oranı ve hız dağılımı ile sıcaklık dağılımının erime süreci boyunca değişimi içerisinde kanatçık bulunmayan, $T_w - T_m = 20$ °C olduğu durum için Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6a'da her bir figürde, erime oranı sol yarıda, hız dağılımı ise sağ yarıda gösterilmiştir. Erimenin başlangıç anında FDM'nin tamamı katı haldedir. Dış yüzey sıcaklığı artırıldığı andan itibaren, yüzeyden gelen ısı FDM'nin sıcaklığını artırmakta ve sıcaklık erime sıcaklığına eriştiğinde faz değişimi başlamaktadır. Bu aşamada, silindirin iç yüzeyinde ince dikey bir sıvı tabakası oluşmaktadır. İnce sıvı tabakası içerisindeki viskoz kuvvetlerin kaldırma kuvvetinden baskın olması nedeni ile sıvı tabaka hareketsiz durumdadır. Erimenin bu ilk evrelerinde dominant ısı aktarım mekanizması ısı iletimidir. FDM'ye olan ısı aktarımı devam ettikçe cidardaki sıvı tabakası giderek



Şekil 6. Kanatçiksız referans durum için erime sürecinin gelişimi. (a) Sıvı oranı ve hız dağılımları (b) sıcaklık dağılımı. (The evolution of the melting process for the reference case (without fins). (a) liquid fraction contours, (b) temperature contour)

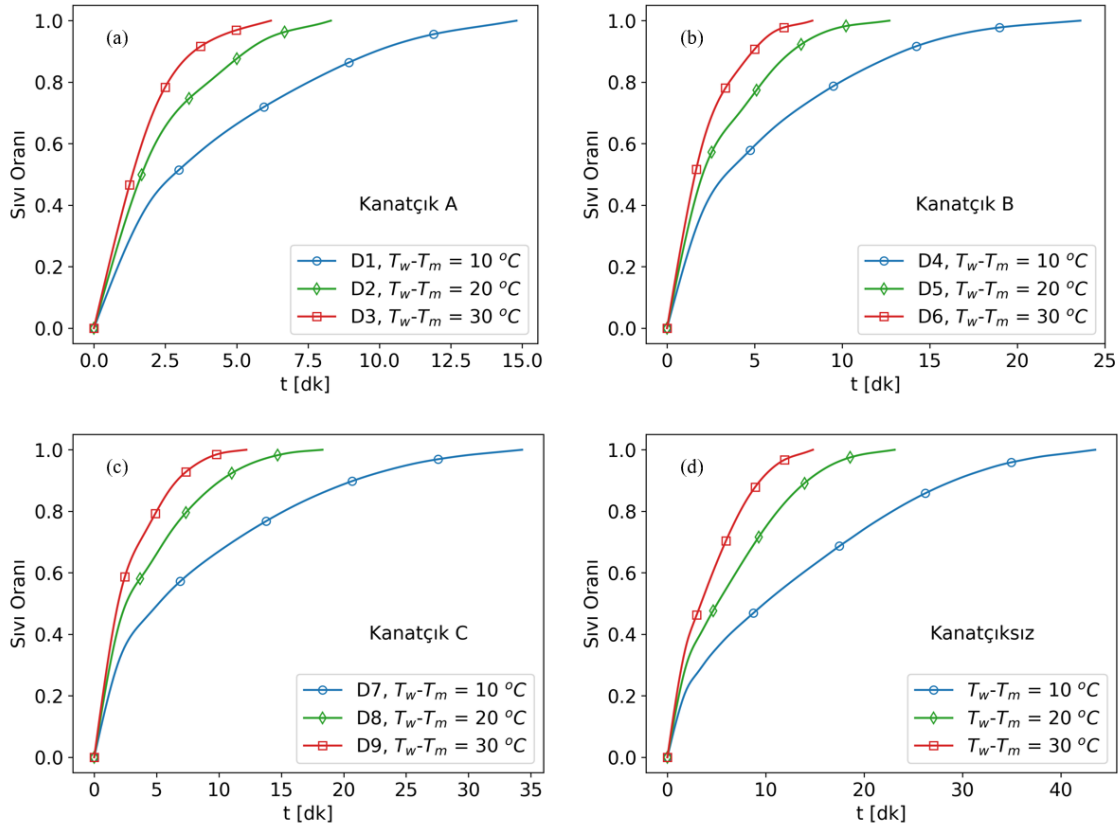
genişlemekte ve sıvı faz içerisindeki sıcaklık farkından kaynaklanan yoğunluk değişimi kaldırma kuvveti oluşturmaktadır. Oluşan kaldırma kuvveti sıvı içerisindeki viskoz kuvvetlere baskın geldiğinde silindir içerisinde akış hareketleri başlamakta ve doğal taşınımın etkileri ortaya çıkmaktadır. Cidara yakın bölgede yer alan sıvı fazdaki FDM yoğunluk farkı ile birlikte oluşan kaldırma kuvvetinin etkisi ile yukarı doğru hareket etmektedir. Silindirin üst bölgelerine ulaşan sıvı iç kısımdaki daha soğuk olan FDM'ye ısıyı aktararak soğumakta ve sıvı-katı ara yüzeyinden aşağıya doğru inmektedir. Bunun sonucunda silindir içerisinde bir sirkülasyon akışı oluşmaktadır. Sirkülasyon akışının direkt bir sonucu olarak silindirin üst bölgesindeki FDM daha hızlı erimektedir. FDM'nin erime sürecinde koni şeklini almasının nedeni oluşan bu sirkülasyon akışıdır.

FDM'nin erime süreci doğrudan dış yüzey sıcaklığına bağlıdır. Dış yüzey sıcaklığının erime süreci üzerindeki etkisi Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de, silindirin dış yüzeyinin FDM'nin erime sıcaklığının 10, 20 ve 30 °C üzerinde tutulması durumunda erime süresi boyunca sıvı oranının değişimi farklı kanatçık genişlikleri ve kanatçiksız durum için sunulmuştur. Beklendiği gibi, FDM'nin erime sıcaklığı ile dış duvar sıcaklığı arasındaki fark arttıkça erime süresi kısalmaktadır. Kanatçık genişliğinin 12 mm olduğu Kanatçık A durumunda dış duvar sıcaklığının etkisi Şekil 7a'da

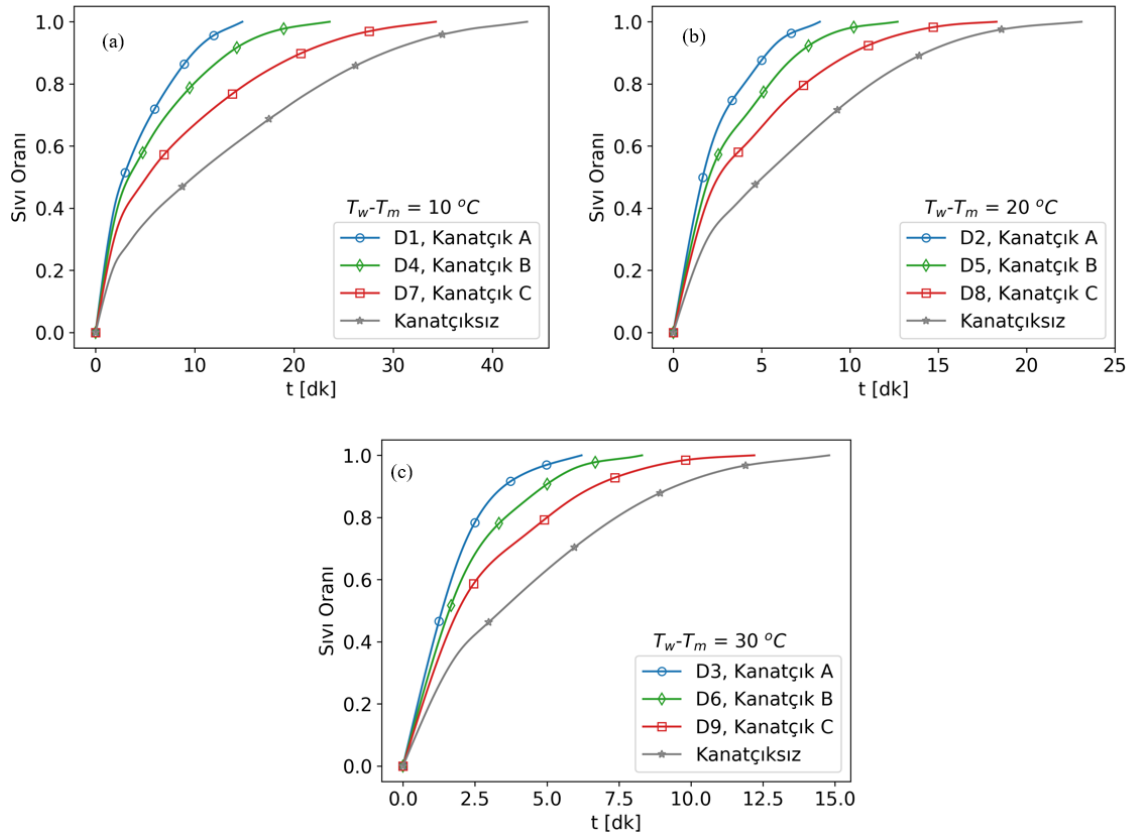
Tablo 2. İncelenen parametreler (Investigated parameters)

Durum	Kanatçık	w_k [mm]	w_k/r	T_w-T_m [°C]
1	A	12	0.8	10
2	A	12	0.8	20
3	A	12	0.8	30
4	B	9	0.6	10
5	B	9	0.6	20
6	B	9	0.6	30
7	C	6	0.4	10
8	C	6	0.4	20
9	C	6	0.4	30

görülmektedir. Kanatçık A durumunda sıcaklık farkı 10, 20 ve 30 °C olduğunda toplam erime süresi sırası ile 14.8, 8.3 ve 6.2 dakika olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık farkının 10 °C'den 30 °C'ye çıkarılması erime süresini 8.6 dakika kısaltmıştır. Şekil 7b'de kanatçık genişliği 9 mm olan Kanatçık B durumunda dış yüzey sıcaklığının etkisi verilmiştir. Sıcaklık farkı 10 °C olduğunda toplam erime süresi 23.6 dakika sürerken, sıcaklık farkı 20 °C olduğunda 12.7 dakika, 30 °C olduğunda ise 8.3 dakika sürmektedir. Sıcaklık farkı 30 °C'ye çıkarıldığında erime süresi 10 °C sıcaklık farkına göre 15.3 dakika azalmıştır. 6 mm kanatçık genişliğine sahip olan Kanatçık C durumunda sıcaklık farkının etkisi Şekil 7c'de



Şekil 7. Dış yüzey sıcaklığının erime süresine etkisi. (a) kanatçık A durumu, (b) kanatçık B durumu, (c) kanatçık C durumu, (d) kanatçiksız durum (Effect of outer surface temperature on melting time. (a) fin A case, (b) fin B case, (c) fin C case, (d) without fin case)



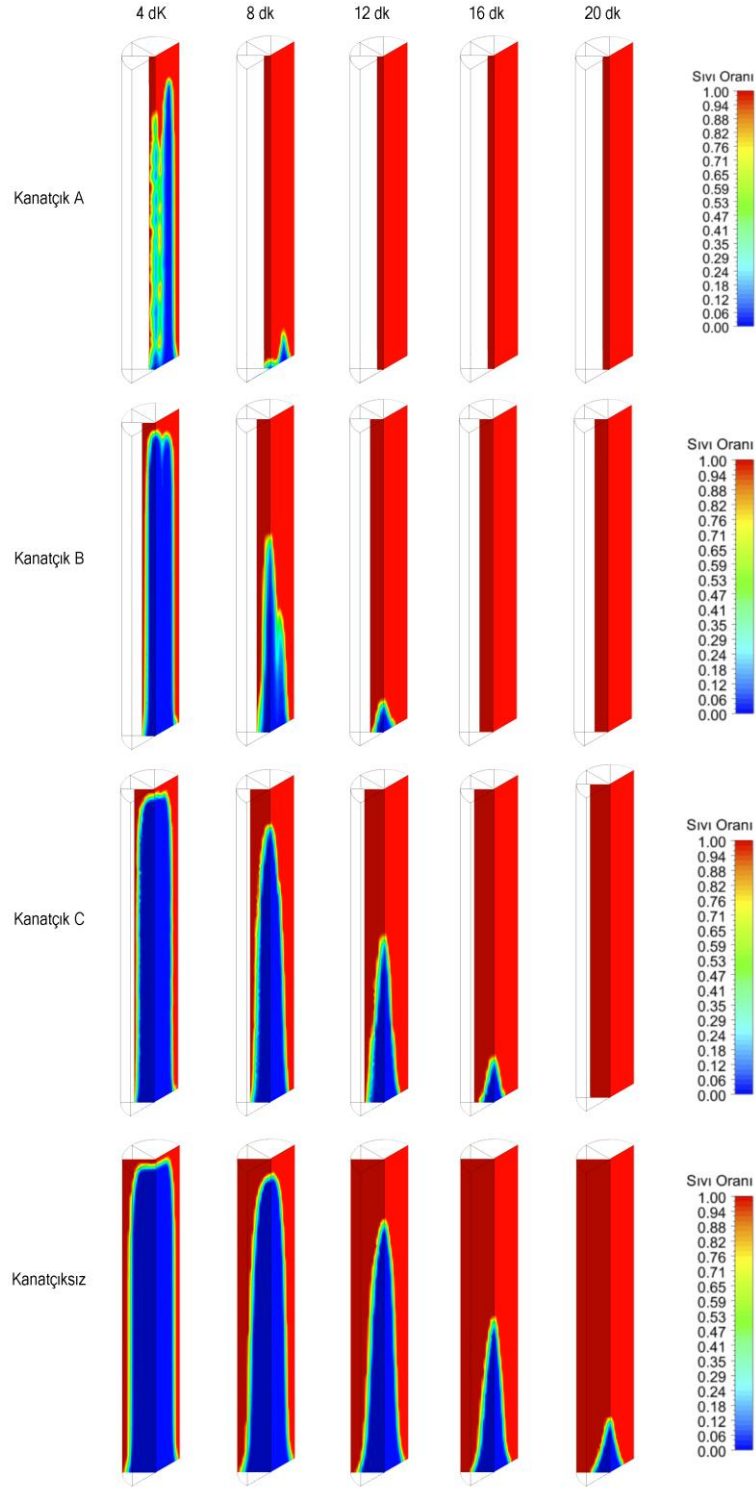
Şekil 8. Dış Kanatçık genişliğinin erime süresine etkisi. (a) $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$, (b) $T_w - T_m = 20^\circ\text{C}$, (c) $T_w - T_m = 30^\circ\text{C}$ (Effect of fin width on melting time. (a) $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$, (b) $T_w - T_m = 20^\circ\text{C}$, (c) $T_w - T_m = 30^\circ\text{C}$)

sunulmuştur. 10, 20 ve 30°C sıcaklık farklarında erime süreleri sırası ile 34.3, 18.3 ve 12.2 dakika olarak bulunmuştur. Sıcaklık farkı 10°C 'den 30°C 'ye yükseltildiğinde erime süresi 22.1 dakika kısalmıştır. Referans durum olan içerisinde kanatçık bulunmayan FDM durumunda dış yüzey sıcaklığının etkisi Şekil 7'de görülmektedir. Sıcaklık farkı 10°C olduğunda toplam erime süresi 43.5 dakika sürerken, sıcaklık farkı 20°C olduğunda 23.1 dakika, 30°C olduğunda ise 14.8 dakika sürmektedir. 10°C 'den 30°C 'ye artırılan dış yüzey sıcaklığı erime süresini 28.7 dakika kısaltmaktadır.

Şekil 8'de kanatçık genişliğinin erime sürecine etkisi farklı duvar sıcaklıkları için kanatçiksız durum ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü gibi FDM içerisinde kanatçık yerleştirilmesi erime süresini önemli ölçüde etkilemekte, kanatçık genişliği arttıkça erime süresi kısalmaktadır. FDM içerisinde kanatçık eklendiğinde ısı transferi yüzey alanı artmakta, böylece FDM'ye olan ısı akışı artmaktadır. Bu nedenle erime süreci hızlanmaktadır. Silindirin dış yüzey sıcaklığı ile FDM'nin erime sıcaklığı arasındaki farkın 10°C olduğu durumda kanatçık genişliğinin etkisi Şekil 8a'da verilmiştir. Toplam erime süresi Kanatçık A durumunda 14.8 dakika sürerken, Kanatçık B durumunda 23.6 dakika, Kanatçık C durumunda 34.3 dakika sürmektedir. Referans durum olan kanatçiksız durumda ise erime 43.5 dakikada tamamlanmaktadır. Kanatçık A, B ve C erime süresini sırası ile 28.7, 19.9 ve 9.2 dakika

kısaltmıştır. Erime süresindeki düşüş A, B ve C kanatçıkları için sırası ile %194, %84 ve %27 olarak hesaplanmıştır. Şekil 8b'de kanatçıkların etkisi sıcaklık farkının 20°C olduğu durum için verilmiştir. 20°C sıcaklık farkında Kanatçık A, B ve C durumlarında toplam erime süresi sırası ile 8.3, 12.7 ve 18.3 dakika olarak bulunmuştur. Aynı sıcaklık farkında referans durum için toplam erime süresi 23.1 dakika olarak hesaplanmıştır. Bu durumda kanatçık A, B ve C'nin toplam erime zamanını azaltma süreleri sırası ile 14.8, 10.4 ve 4.8 dakikadır. Erime süresindeki düşüş A, B ve C kanatçıkları için sırası ile %178, %82 ve %26 olmaktadır. Sıcaklık farkının 30°C olduğu durumda kanatçıkların etkisi Şekil 8c'de görülmektedir. 30°C sıcaklık farkında Kanatçık A durumunda toplam erime süresi 6.2 dakika, Kanatçık B durumunda 8.3 dakika ve Kanatçık C durumunda 12.2 dakika olarak bulunmuştur. Aynı sıcaklık farkında kanatçiksız referans durumdaki toplam erime süresi ise 14.8 dakikadır. Kanatçık A, B ve C toplam erime süresini referans duruma göre sırası ile 8.6, 6.5 ve 2.6 dakika kısaltmıştır. Erime süresindeki düşüş A, B ve C kanatçıkları için sırası ile %139, %78 ve %26 olmaktadır.

FDM sıvı oranının erime süresince değişimi farklı kanatçık genişlikleri için Şekil 9'da görsel olarak



Şekil 9. FDM sıvı oranının erime süresince değişimi (Variation of PCM liquid fraction during melting process)

sunulmuştur. Erime sürecinin 4, 8, 12, 16 ve 20 dakikalarındaki sıvı oranları karşılaştırıldığında kanatçıkların etkisi net olarak ortaya çıkmaktadır. Kanatçiksız referans durumda 20 dakika sonunda erime süreci halen devam ederken, FDM içerisine A, B ve C kanatçıklarının eklendiği her üç durumda da erime sürecinin tamamlandığı görülmektedir. En hızlı erime, en

büyük kanatçık genişliğine sahip olan Kanatçık A durumunda elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, içerisine kanatçıklar yerleştirilmiş dikey silindirik bir tüp içerisindeki FDM'nin erime sürecini

sayısal olarak incelenmiş ve yerleştirilen kanatçıkların erime sürecine olan etkileri analiz edilmiştir. Bunun için öncelikle sistemin 3 boyutlu, zamana bağlı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model literatürdeki deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Daha sonra kanatçık boyutunun ve silindirin dış yüzey sıcaklığının erime sürecine etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucu elde edilen veriler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- FDM'nin erime süresi dış duvar sıcaklığı ile doğrudan ilgilidir. FDM'nin erime sıcaklığı ile silindirin dış yüzey sıcaklığı arasındaki fark arttıkça erime süresi kısalmaktadır. Sıcaklık farkı 10 °C olduğu durumda kanatçıksız tüpteki FDM 43.5 dakikada erirken, sıcaklık farkı 30 °C olduğunda erime süreci 14.8 dakikada tamamlanmıştır.
- FDM içerisine yerleştirilen kanatçıklar erime sürecine önemli ölçüde etki etmektedir. Sıcaklık farkının 20 °C olduğu durumda kanatçıksız FDM 23.1 dakikada erirken, Kanatçık A eklendiğinde erime süresi 8.3 dakikaya düşmektedir.
- En kısa erime süresi, sıcaklık farkının 30 °C olduğu ve kanatçık olarak 12 mm genişliğindeki A kanatçığı kullanıldığında elde edilmiştir. Bu durumda erime 6.2 dakikada tamamlanmıştır.
- Kanatçıksız duruma göre erime süresindeki en büyük düşüş, 10 °C sıcaklık farkında Kanatçık A durumunda elde edilmiştir. Bu durumda erime süresi 14.8 dakika olarak bulunmuştur. Bu da kanatçıksız durumdaki erime süresi olan 43.5 dakikaya göre %194'lük bir düşüş anlamına gelmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Burak İZGİ: Sayısal modelin oluşturulması, çözülmesi ve elde edilen verilerin analizi ile makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kousksou T., Bruel P., Jamil A., El Rhafiki T., Zeraouli Y., "Energy storage: Applications and challenges," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 120: 59–80, (2014).
- [2] Aneke M., Wang M., "Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review," *Appl. Energy*, 179: 350–377, (2016).
- [3] Sharif M. K. A., Al-Abidi A. A., Mat S., Sopian K., Ruslan M. H., Sulaiman M. Y., Rosli M. A. M., "Review of the application of phase change material for heating and domestic hot water systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 42: 557–568, (2015).
- [4] Nazir H., Batoool M., Bolivar Osorio F. J., Isaza-Ruiz M., Xu X., Vignarooban K., Phelan P., Inamuddin, Kannan A. M., "Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 129: 491–523, (2019).
- [5] Abokersh M. H., Osman M., El-Baz O., El-Morsi M., Sharaf O., "Review of the phase change material (PCM) usage for solar domestic water heating systems (SDWHS)," *Int. J. Energy Res.*, 33: 23–40, (2017).
- [6] Zhang H., Baeyens J., Cáceres G., Degrève J., Lv Y., "Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects," *Prog. Energy Combust. Sci.*, 53: 1–40, (2016).
- [7] Sarbu I., "A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage," *Sustainability*, 10: 191, (2018).
- [8] Nakhchi M. E., Esfahani J. A., "Improving the melting performance of PCM thermal energy storage with novel stepped fins," *J. Energy Storage*, 30: 101424, (2020).
- [9] Rehman T. ur, Ali H. M., Janjua M. M., Sajjad U., Yan W. M., "A critical review on heat transfer augmentation of phase change materials embedded with porous materials/foams," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 135: 649–673, (2019).
- [10] Rostami S., Afrand M., Shahsavari A., Sheikholeslami M., "A review of melting and freezing processes of PCM / nano-PCM and their application in energy storage," *Energy*, 211: 118698, (2020).
- [11] Yang L., Huang J., Zhou F., "Thermophysical properties and applications of nano-enhanced PCMs: An update review," *Energy Convers. Manag.*, 214: 112876, (2020).
- [12] Siva K., Lawrence M. X., Kumares G. R., Rajagopalan P., Santhanam H., "Experimental and numerical investigation of phase change materials with finned encapsulation for energy-efficient buildings," *J. Build. Perform. Simul.*, 3: 245–254, (2010).
- [13] Shaker M. Y., Sultan A. A., El Negiry E. A., Radwan A., "Melting and solidification characteristics of cylindrical encapsulated phase change materials," *J. Energy Storage*, 43: 103104, (2021).
- [14] Abdi A., Martin V., Chiu J. N. W., "Numerical investigation of melting in a cavity with vertically oriented fins," *Appl. Energy*, 235: 1027–1040, (2019).
- [15] De Césaró Oliveski R., Becker F., Rocha L. A. O., Biserni C., Eberhardt G. E. S., "Design of fin structures for phase change material (PCM) melting process in rectangular cavities," *J. Energy Storage*, 35, (2021).
- [16] Joshi V., Rathod M. K., "Constructal enhancement of thermal transport in latent heat storage systems assisted with fins," *Int. J. Therm. Sci.*, 145: 105984, (2019).
- [17] Ji C., Qin Z., Dubey S., Choo F. H., Duan F., "Simulation on PCM melting enhancement with double-fin length arrangements in a rectangular enclosure induced by natural convection," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 127: 255–265, (2018).
- [18] Bhagat K., Prabhakar M., Saha S. K., "Estimation of thermal performance and design optimization of finned

- multitube latent heat thermal energy storage,” *J. Energy Storage*, 19: 135–144, (2018).
- [19] Sheikholeslami M., Haq R. ul, Shafee A., Li Z., Elaraki Y. G., Tlili I., “Heat transfer simulation of heat storage unit with nanoparticles and fins through a heat exchanger,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 135: 470–478, (2019).
- [20] Kazemi M., Hosseini M. J., Ranjbar A. A., Bahrampoury R., “Improvement of longitudinal fins configuration in latent heat storage systems,” *Renew. Energy*, 116: 447–457, (2018).
- [21] Pu L., Zhang S., Xu L., Li Y., “Thermal performance optimization and evaluation of a radial finned shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit,” *Appl. Therm. Eng.*, 166: 114753, (2020).
- [22] Koşan M., Aktaş M., “Faz Değiştiren Malzemelerle Termal Enerji Depolayan Bir Isı Değiştiricisinin Sayısal Analizi,” *J. Polytech.*, 0900: 403–409, (2018).
- [23] Shmueli H., Ziskind G., Letan R., “Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 53: 4082–4091, (2010).
- [24] Katsman L., V. Dubovsky, Ziskind G., Letan R., “Experimental Investigation Of Solid-Liquid Phase Change In Cylindrical Geometry,” in *ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference*, 2007, 1–6, 1–6.
- [25] Cengel Y., Cimbala J., *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications: Third Edition*. McGraw-Hill Higher Education, 2013.
- [26] Brent A. D., Voller V. R., Reid K. J., “Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal,” *Numer. Heat Transf.*, 13: 297–318, (1988).
- [27] Voller V. R., Prakash C., “A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 30: 1709–1719, (1987).
- [28] Bechiri M., Mansouri K., “Study of heat and fluid flow during melting of PCM inside vertical cylindrical tube,” *Int. J. Therm. Sci.*, 135: 235–246, (2019).