

Faz Değiştiren Malzeme İçeren Silindirik Bir Isıl Enerji Deposunda Kanatçık Sayısı, Kalınlığı ve Üniform Olmayan Kanatçık Dağılımının Isıl Enerji Depolama Karakteristiği Üzerindeki Etkileri

Çiğdem SUSANTEZ*, Kamil KAHVECİ*, Erhan AKYOL*

*Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 22030 Edirne
cigdemsusantez@trakya.edu.tr

(Geliş/Received: 04.04.2018; Kabul/Accepted:07.08.2018)

Özet

Faz değiştiren malzemeler yüksek ısı depolama özellikleri nedeniyle ısı enerji depolamada sıklıkla kullanılır. Fakat bunların ısı iletkenliklerinin düşük olması söz konusu uygulamalarda dezavantajdır ve birim zamanda depolanan ısı enerji miktarını arttırabilmek için ısı iletkenliği yüksek kanatçıklar kullanılır. Bu çalışmada faz değiştiren malzeme içeren silindirik bir ısı enerji deposunda üniform olmayan kanatçık dağılımının, kanatçık sayısı ve kalınlığının ısı enerji depolama karakteristiği üzerindeki etkileri Comsol sonlu elemanlar modelleme ve simülasyon programı vasıtasıyla incelenmiştir. Sistemin on iki saatlik yükleme süresi sonunda, üniform kanatçık dağılımında olduğu gibi üniform olmayan kanatçık dağılımında da sistemde depolanan enerjinin kanatçık sayısı ile önemli miktarda arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren malzemeler, Isıl depolama, Kanatçık, Üniform olmayan kanatçık dağılımı

Effects of the Number, Thickness and Non-uniform Distribution of Fins on the Heat Storage Characteristics in a Cylindrical Thermal Energy Storage with Phase Change Material

Abstract

Phase change materials are commonly used in thermal energy storage due to their high thermal storage properties. However, their low thermal conductivities are disadvantageous for practical applications and fins with high thermal conductivity are used in order to increase the amount of energy stored. In this study, effects of the non-uniform distribution, number and thickness of fins on the heat storage characteristics in a cylindrical thermal energy storage system with phase change material have been investigated by Comsol Multiphysics finite element modeling and simulation software. It has been observed that at the end of the twelve-hour charging period, stored energy in the system increased considerably with the number of fins for the non-uniform fin distribution as in uniform fin distribution.

Keywords: Phase change materials, Thermal storage, Fin, Non-uniform fin distribution

1. Giriş

Faz değiştiren malzeme (FDM) ler yüksek ısı depolama özellikleri nedeniyle güneş enerjisinin depolanması, biyoiklimsel binalarda pasif soğutma, yiyeceklerin ve elektronik aletlerin korunması, araçların ısı konforu, motorların soğutulması, uzay araçlarının termal sistemleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. [1] Isıl enerji depolama sistemleri yükleme, boşalma ve bekleme olmak üzere üç evrede çalışmaktadır. Yükleme evresi güneş enerjisinin depo edildiği gündüz vakti olup, bu evrede akışkan sisteme FDM'nin erime sıcaklığından daha yüksek bir

sıcaklıkta girmektedir. Bu esnada eriyen FDM enerjinin bir bölümünü depo etmektedir. Böylece FDM'nin yüksek erime ısısı nedeniyle FDM'li ısı enerji depolama sisteminde, bir malzemenin ısıtılmasına dayanan sisteme nazaran aynı hacimde daha fazla enerji depo edilebilmektedir [2]. Bilindiği üzere faz değiştiren malzemelerin ısı iletkenliği bağlı olarak düşüktür. Dolayısıyla FDM'ye olan ısı transferini arttırabilmek için ısı iletkenliği yüksek malzemelerle kullanılma yoluna gidilir.

Ogoh ve Groulx [2], üniform kanatçık dağılımlı silindirik bir ısı enerji depolama sisteminde farklı kanatçık sayılarının sistemin

depolama özellikleri üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu sistemde kullanılan faz değıştiren malzemenin ısı iletkenliğı 0.21 W/mK olup, sistemin ısı iletkenliğini dolayısıyla birim zamanda sistemde depolanan duyulur ve gizli ısı formundaki toplam enerjiyi arttırmak için sisteme ısı iletkenliğı yüksek bakır kanatçıklar ilave etmişlerdir. Faz değıştiren malzemenin erimesi sırasında depolanan büyük miktardaki gizli enerjiyi hesaba katmak için efektif ısı kapasite metodunu kullanmışlardır. Analizlerini sıcak suyun 0.05 ve 0.5 m/s giriş hızları için ve 0 ila 27 kanatçık durumu için yapmışlar, birim zamanda faz değıştiren malzemeye olan toplam ısı transferinin kanatçık sayısındaki artış ile önemli miktarlarda arttığını gözlemlemişlerdir. Analizlerini 12 saatlik yükleme süresi için gerçekleştiren Ogoh ve Groulx [2], sistemde depolanan toplam enerjinin 12 kanatçığa kadar lineer bir artış gösterdiğı sonucuna varmışlardır. Shatikian [3] ısı depolama sisteminde faz değıştiren malzemenin erime ve katılaşmasını nümerik olarak incelemiştir. İncelediğı sistemde alüminyum kanatçıklar arasındaki faz değıştiren malzemede taşınım mekanizmasını ve faz değışimini sırasında FDM'deki hacim değışimini hesaba katarak ısı transferinin, erime hızının ve erime cephesinin geometriden nasıl etkilendiğini belirlemiştir. Augspurger ve Udaykumar [4], NaNO₃ ve KNO₃ karışımı faz değıştiren malzeme içeren ve alüminyum kanatçıkların kullanıldığı bir ısı enerji deposunun ısı performansını dört farklı kanatçık tasarımı için nümerik olarak incelemişlerdir. Güneş ocağı olarak kullanılan bu ısı enerji deposunun dört farklı tasarımını ısıyı eşit ve hızlı yayma kabiliyeti ve pişirmede cihazdan çekilebilecek ısı miktarı baz alınarak karşılaştırmışlardır. Isıyı absorbe etme ve verme kabiliyetleri açısından en iyi tasarımın en fazla kanatçık sayısına sahip olan tasarım olduğunu görmüşlerdir. Groulx ve Ogoh [5], bakır boru içerisinde sıcak suyun aktığı, FDM olarak parafinin kullanıldığı silindirik bir ısı enerji deposundaki sıcaklık dağılımını farklı kanatçık sayılarında ve farklı su giriş hızlarında nümerik olarak incelemişlerdir. Kanatçık sayısının ısı enerji deposunun depoladığı ısı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ve ısı transferinin sıcak suyun girişinde önemli mertebelerde daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Abdulateef ve diğ.

[6] kanatçıkların kullanıldığı FDM'li ısı enerji depolama sistemleri üzerine yapılan çalışmaları incelemişlerdir. En iyi ısı performansın silindirik ısı enerji deposunda boyuna kanatçıkların olduğı sistemlerde görüldüğü, FDM'ye etkin bir şekilde temas eden dairesel kanatçıkların ise pim şeklindeki kanatçıklardan sistemin ısı performansı açısından daha etkin olduğı sonucuna varmışlardır. Genel olarak kanatçık sayısı ve boyutu arttıkça kanatçık ve FDM arası ısı transferi yüzey alanı arttığından ısı performansın arttığını vurgulamışlardır. Paria ve diğ. [7] içerisinden damıtık suyun aktığı, dairesel kanatçıklı ve FDM'li silindirik bir ısı enerji deposunda FDM'nin erime ve katılaşması üzerine yaptıkları deneysel ve nümerik çalışmada Reynolds sayısının 1000'den 2000'e çıkmasının erime süresini %58 azalttığını ve Reynolds sayısındaki artışın erime evresinde sıcaklıktaki dalgalanmayı azalttığını, teorik verimi ise arttırdığını belirlemişlerdir. Murray ve Groulx [8] ele aldıkları iki boyutlu kare şeklindeki bir alan içerisinde FDM'nin erime davranışını iletimin yanında taşınım mekanizmasını da hesaba katarak modellemişlerdir. Ele alınan geometrinin alt ve üst yüzeyleri yalıtımlı iken, sol yüzeyi sıcak, sağı yüzeyi ise aynı zamanda başlangıç sıcaklığı olan faz değışim sıcaklığındadır. Analizlerinde eriyen FDM'nin sirkülasyon oluşturarak katı sıvı ara yüzeyini hareket ettirdiğı görülmüştür. Murray ve Groulx [8] bu çalışmada aynı zamanda sisteme kanatçık eklendiğinde erimenin daha fazla olduğunu görmüşlerdir. Rozenfeld ve diğ. [9] içerisinde sıcak suyun akmasına izin verilen ve üzerinde üç adet boyuna kanatçık olan silindirik bir boru ihtiva eden, FDM'li silindirik bir ısı enerji deposunda sistemin dış kısmından ısı vererek yakın temas erime mekanizmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu şekilde erime süresinin 2.5 kat azaldığını gözlemlemişlerdir. Rozenfeld ve diğ. [9] geliştirdikleri teorik modeli deneysel sonuçlarla doğrularak erime oranının Fourier ve Stefan sayılarına bağılı olduğı sonucuna ulaşmışlardır. Arena ve diğ. [10] FDM'li silindirik bir ısı enerji deposunun faz değışimini deneysel ve geliştirdikleri iki boyutlu bir eksenel simetrik model kullanarak nümerik olarak incelemişlerdir. Konveksiyonla olan ısı transferinin etkisini nümerik modellerinde hesaba katmışlar ve sonuçları momentum denkleminde

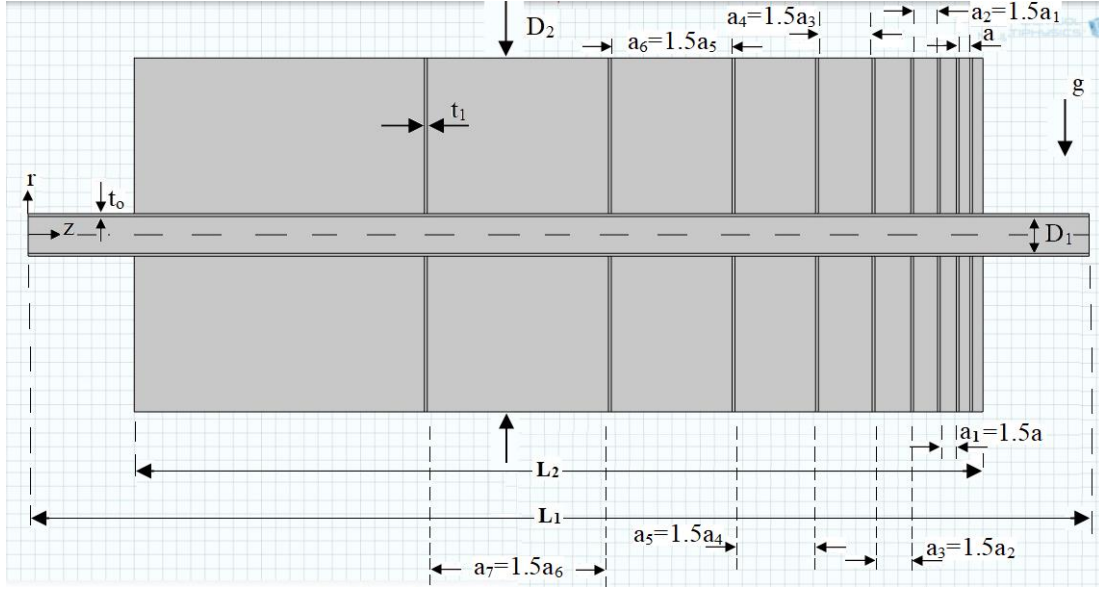
yer alan erimiş bölge katsayısı A_{mush} 'ın $10^4, 10^6$ ve 10^8 değerleri için elde etmişlerdir. Yükleme evresi süresince, bu katsayının 10^4 değeri için faz değişim cephesinin aşağı doğru bir eğri oluşturduğu, boşalma evresi süresince ise erimiş bölge katsayısının farklı değerlerinde faz değişim cephesinin geometrisinin değişmediği sonucuna varmışlardır. Kazemi ve diğ. [11] boyuna kanatçıklı, FDM'li bir ısı enerji depolama sisteminde iki ve üç kanatçıklı düzenlemelerde kanatçık açılarının faz değiştiren malzemenin erime davranışı üzerindeki etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında FDM içinde taşınım mekanizmasını hesaba katan Kazemi ve diğ. [11], üç kanatçıklı durum için kanatçık açılarını 60° 'den 120° 'ye çıkarmanın toplam erime süresini kısalttığı, iki kanatçıklı durum için ise açı değerini 150° 'den 45° 'ye düşürmenin erime süresini kısalttığı sonucuna varmışlardır. Üçlü ve ikili kanatçıklar arasında en iyi durumun basit bir sisteme göre erime sürelerini sırasıyla %22.5 ve %62 azalttığını görmüşlerdir. Liu ve Groulx [12] kanatçıklı ısı enerji depolama sisteminde erimeyi farklı kanatçık sayı ve uzunlukları için nümerik olarak incelemişlerdir. Sıvı fazındaki doğal konveksiyonu Boussinesq yaklaşımını uygulayarak hesaba kattıkları çalışmalarında, kanatçık uzunluğu ve konumunun ısı transfer miktarı üzerinde, doğal konveksiyonun ise sıvı-katı ara yüzeyinin konumu üzerinde önemli etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Rudonja ve diğ. [13] boyuna dikdörtgen kanatçıklar ve merkezinde aksel olarak yerleştirilmiş ısı kaynağı ihtiva eden dikey silindirik FDM'li bir ısı enerji deposu üzerinde deneysel ve nümerik bir çalışma yapmışlardır. FDM'nin sıvı fazındaki doğal taşınımı Boussinesq yaklaşımıyla

modelledikleri nümerik çalışmalarında ısı enerji deposunun dış yüzeylerini erime süresince termal izolasyonlu kabul etmişler ve merkezdeki aksel ısı kaynağından ısı akısını deneysel verilerinden elde ettikleri bir eşitlikle ifade etmişlerdir. Nümerik model ve deneysel çalışma sonuçlarının örtüşüğünü gören Rudonja ve diğ. [13], ısı enerji deposu içerisindeki FDM'nin erime süresinin kanatçık yüzey alanındaki artış ile üssel olarak azaldığı sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada da Ogoh ve Groulx'un [2] çalışmasında olduğu gibi FDM'li silindirik bir ısı enerji deposunun yükleme evresi çalışılmıştır. Farklı olarak bu çalışmada üniform olmayan kanatçık dağılımında kanatçık sayısı ve kalınlığının ısı enerji depolama karakteristiği üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada geometrisi Şekil 1.'de verilen, içerisinden sıcak su akan ısı enerji depolama sistemi 12 saatlik yükleme süresi boyunca analiz edilmiştir. Silindirik yapıda olan sistemin içinde yer alan borudan sıcak su akmaktadır, dışı ise faz değiştiren malzeme ile doludur. Bilindiği üzere faz değiştiren malzemelerin ısı iletkenlikleri bağıl olarak düşüktür. Sisteme giren sıcak sudan FDM'ye olan ısı transferini arttırabilmek amacıyla ısı iletkenliği yüksek bakır kanatçıklar kullanılmıştır. İçerisinden sıcak suyun aktığı boru malzemesi bakır kabul edilmiş, böylelikle borudan kanatçıklara ve sıcak boruya temaslı FDM'ye etkin bir ısı transferi amaçlanmıştır. Geometrik ölçüler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Geometri ve koordinat sistemi

Tablo 1. Geometrik ölçüler

İç boru uzunluğu	$L_1=1.5\text{m}$
Depo uzunluğu	$L_2=1.2\text{m}$
İç boru çapı	$D_1=52\text{mm}$
Depo çapı	$D_2=500\text{mm}$
Boru et kalınlığı	$t_0=4\text{mm}$
Kanatçık kalınlığı	$t_1=2\text{mm}, 4\text{mm}, 8\text{mm}$

Kanatçıkların daha sık olduğu uç kısımda, kanatçık ile ısı deposu arasındaki uzaklık,

en dar kanatçık mesafesi a (15mm) kadar olup, diğer kanatçıklar arasındaki mesafe bir önceki mesafenin 1.5 katı olacak şekilde bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Maksimum kanatçık sayısı 9 alınmıştır. Suyun giriş hızı $u_0 = 0.02\text{m/s}$ seçilmiştir. Su ve bakırın termofiziksel özellikleri ile birlikte ele alınan FDM'nin termofiziksel özellikleri sıvılaştırma ve katılaştırma sıcaklıkları da dahil olmak üzere Tablo 2 de yer almaktadır.

Tablo 2. Materyallerin termofiziksel özellikleri

Madde	ρ (kg/m ³)	c (J/kgK)	k (W/mK)	μ (kg/ms)	Ref.
Su	997.1	4180	0.609	0.00089	[14]
Bakır	8960	385	398		[14]
PCM (RT 44HC) $T_s = 41^\circ\text{C}, T_l = 44^\circ\text{C}$ $L=220000\text{J/kg}$	750	2000	0.2		[15]

Çalışmada termofiziksel özellikler sabit, akışkan sıkıştırılmaz ve Newtonien kabul edilmiştir. Yerçekimi etkileri ihmal edilmiştir ve tüm dış yüzeyler yalıtımlı varsayılmıştır. İki

boyutlu eksenek simetrik akışa ait yönetici denklemler ve sınır şartları aşağıda verilmiştir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_{su} \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu_{su} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho_{su} \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{su} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho_{su} c_{su} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_{su} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \phi \quad (4)$$

$$\Phi = \mu_{su} \left(2 \left(\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 \right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_z(r, z = 0, t) &= u_o = 0.02m/s \\ v_r(r, z = 0, t) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_z(r = r_p, z, t) &= 0 \quad \text{duvarlarda} \\ v_r(r = r_p, z, t) &= 0 \quad \text{kaymama şartı} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial v_z}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad \begin{array}{l} \text{eksenel} \\ \text{simetri} \end{array} \quad (8)$$

$$T(r, z = 0, t) = T_{in} = 85^\circ C \quad (9)$$

$$P(r, z = L_1, t) = 0 \quad (10)$$

$$-\vec{n} \cdot (-k_{su} \vec{\nabla} T) \Big|_{r,z=L_1,t} = 0 \quad (11)$$

Çalışmada yer alan katı kısımlar (FDM hariç) için ise denklem ve sınır şartları aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} &= \\ k_i \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) & \quad (12) \end{aligned}$$

i=kanatçık, boru

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot (\vec{q}_1 - \vec{q}_2) &= 0 \\ T_1 &= T_2 \end{aligned} \quad (13)$$

Su-boru, boru-FDM,
boru-kanatçık,
kanatçık-FDM temas yüzeylerinde

FDM için yönetici denklem aşağıda verilmiştir. FDM için konveksiyonla olan ısı transferi, söz konusu hacimler küçük ve viskoz etkiler yüksek olduğu için ihmal edilmiştir.

$$\rho_{FDM} c_{FDM} \frac{\partial T}{\partial t} = \quad (14)$$

$$k_{FDM} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_H$$

$$S_H = -\rho_{FDM} L \frac{\partial \beta}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (15)$$

Erime oranı β aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} 0 & \quad T \leq T_s \\ \beta &= \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad T_s < T < T_l \\ 1 & \quad T \geq T_l \end{aligned} \quad (16)$$

Başlangıç şartları:

$$\begin{aligned} v_z(r, z, t = 0) &= u_o, \\ v_r(r, z, t = 0) &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$T(r, z, t = 0) = T_o = 20^\circ C \quad (18)$$

$$P(r, z, t = 0) = 0 \quad (19)$$

Tüm sistem dış yüzeyleri yalıtımlı olup \vec{n} yüzey normali olmak üzere buralarda aşağıdaki sınır şartı geçerlidir.

$$\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0 \quad (20)$$

Isıl enerji deposunda depo edilen toplam, duyulur ve gizli ısılar aşağıdaki gibi formüle edilmiştir. Burada Ogoh ve Groulx [2]'un çalışmasında olduğu gibi yalnızca FDM'de depo edilen enerjiler hesaba alınmış, ince olduklarından, ısı depolama kabiliyetleri düşük olduğundan kanatçıklarda depo edilen ısı hesaba alınmamıştır. Ogoh ve Groulx [2]'u çalışmasında verilen toplam enerji formülü bu çalışmada aşağıdaki gibi modifiye edilmiştir.

FDM'de depolanan toplam enerji:

$$E_T = m_{FDM} \frac{\iiint (c_{FDM}(T - T_o) + L \frac{\partial \beta}{\partial T} (T_l - T_s)) r dr d\theta dz}{\iiint r dr d\theta dz} \Big|_{T_s < T < T_l} \quad (21)$$

FDM'de depolanan duyulur enerji:

$$E_{duyulur} = m_{FDM} \frac{\iiint c_{FDM}(T - T_o) r dr d\theta dz}{\iiint r dr d\theta dz} \quad (22)$$

FDM’de depolanan gizli enerji:

$$E_{gizli} = m_{FDM} \frac{\iiint L \frac{\partial \beta}{\partial T} (T_l - T_s) \Big|_{T_s < T < T_l} r dr d\theta dz}{\iiint r dr d\theta dz} \quad (23)$$

(21) ve (23) denklemlerinde yer alan $L \frac{\partial \beta}{\partial T} (T_l - T_s)$ terimi sıcaklık FDM’nin faz değişim aralığında ise aktif olmakta, değil ise sıfır değerini almaktadır.

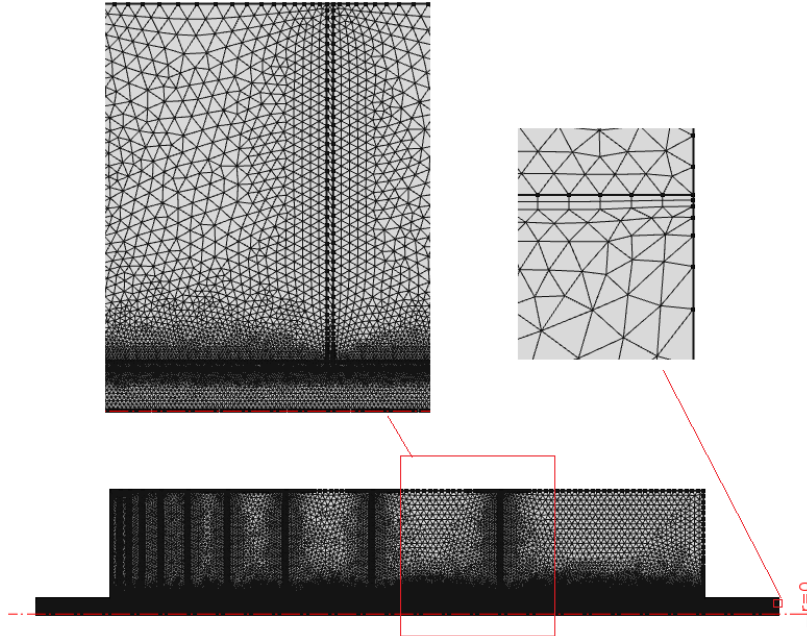
FDM’de depo edilebilecek maksimum enerji E_{max} ve ısıl enerji deposunun verimi aşağıdaki şekilde gibi ifade edilmiştir.

$$E_{max} = m_{FDM} \frac{\iiint (c_{FDM}(T_{in} - T_o) + L) r dr d\theta dz}{\iiint r dr d\theta dz} \quad (24)$$

$$\eta = \frac{E_T}{E_{max}} \quad (25)$$

FDM’de depo edilebilecek maksimum enerji, FDM’nin sıcaklığı sıcak suyun giriş sıcaklığına ulaştığı ve FDM’nin tamamen eridiği durum göz önüne alınarak modellenir. Bir diğer ifadeyle FDM’de depo edilecek gizli ve duyulur ısıların maksimum olduğu duruma karşılık gelir.

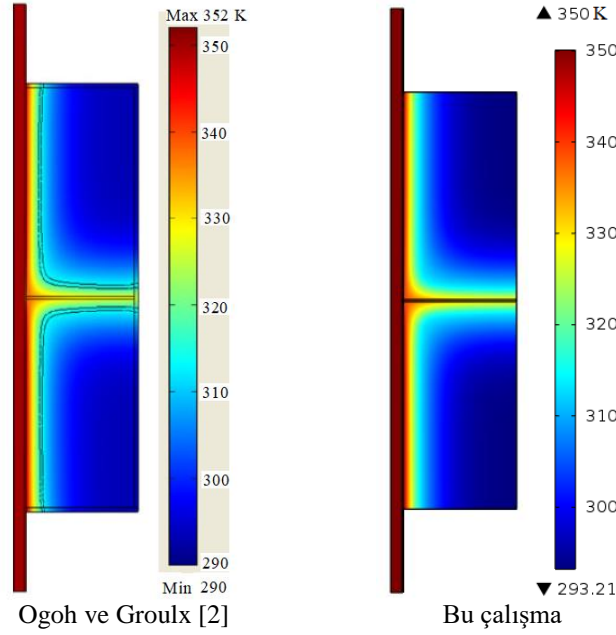
Çalışmada meshe bağımlılık analizi yapılmış ve uygun mesh değeri maksimum eleman boyutu $1.2 \cdot 10^{-2}m$, minimum eleman boyutu $2.4 \cdot 10^{-5}m$ olarak tespit edilmiştir. Çalışmada üçgen mesh tipi ağırlıklı olarak kullanılmış olup, hız sınır tabakanın oluşacağı borunun cidara yakın i kısımları dikdörtgen mesh ile meshlenmiştir. Bu durum, şekil 2’de büyütölmüş kısımlarda da detaylıca görölmektedir. şekil 2’den de göröldüğu gibi kenar ve köşelerde daha sıkı mesh kullanılmıştır. Diğer yandan eleman sayısı farklı kanatçık sayıları ve kalınlıkları için değişmektedir. En fazla eleman sayısı $t_1=4mm$ kanatçık kalınlığı ve 9 kanatçıklı durum için olup 62360’dır. Kanatçıksız durum için ise eleman sayısı 58909’dur.



şekil 2. Meshli geometri

Ogoh ve Groulx [2] ısıl enerji deposunun üzerinde 10 mm kalınlığında yalıtım tabakası olduğunu varsaymıştır. Bu çalışmada etkisi ihmal edilebilir mertebede olduğundan yalıtım malzemesi hesaba katılmayarak sistem dış yüzeyi

adyabatik alınmıştır. Su giriş hızı 0.05m/s için elde edilen sonuçlar şekil 3’de de göröldüğu gibi Ogoh ve Groulx [2]’un çalışması ile karşılaştırma yapılarak doğrulanmıştır.

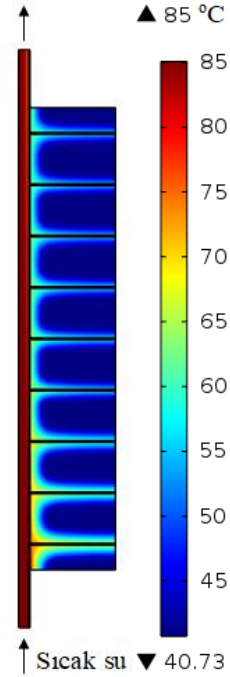


Şekil 3. 12 saat sonunda tek kanatçıklı bir ısı enerjisi deposunda sıcaklık dağılımı

Bu çalışmada üniform olmayan kanatçık dağılımına sahip ve silindirik bir FDM ısı enerjisi deposu için 12 saatlik yükleme evresi süresince, farklı kanatçık sayısı ve kalınlıklarının ısı enerjisi depolama karakteristiği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İncelenen geometride üniform olmayan kanatçık dağılımlı silindirik ısı enerjisi deposunda sıcak suyun çıkışında kanatçık sıklığı daha fazladır.

3. Bulgular ve Değerlendirme

Yapılan analizlerde Şekil 4'den de görüldüğü üzere sıcak suyun girişinde ısı enerjisi deposuna daha fazla ısı geçişi olmaktadır. Ogoh ve Groulx [2] ise çalışmalarında bu konuya değinmişler ve çıkışa yakın kısımlarda kanatçık sıklığı aratacak şekilde bir tasarımın uygun olacağını vurgulamışlardır. Bu çalışmada ele alınan tasarım bu şekilde bir tasarımdır. Sayısal hesaplamalar Comsol sonlu elemanlar modelleme ve simülasyon programı kullanılarak elde edilmiştir.

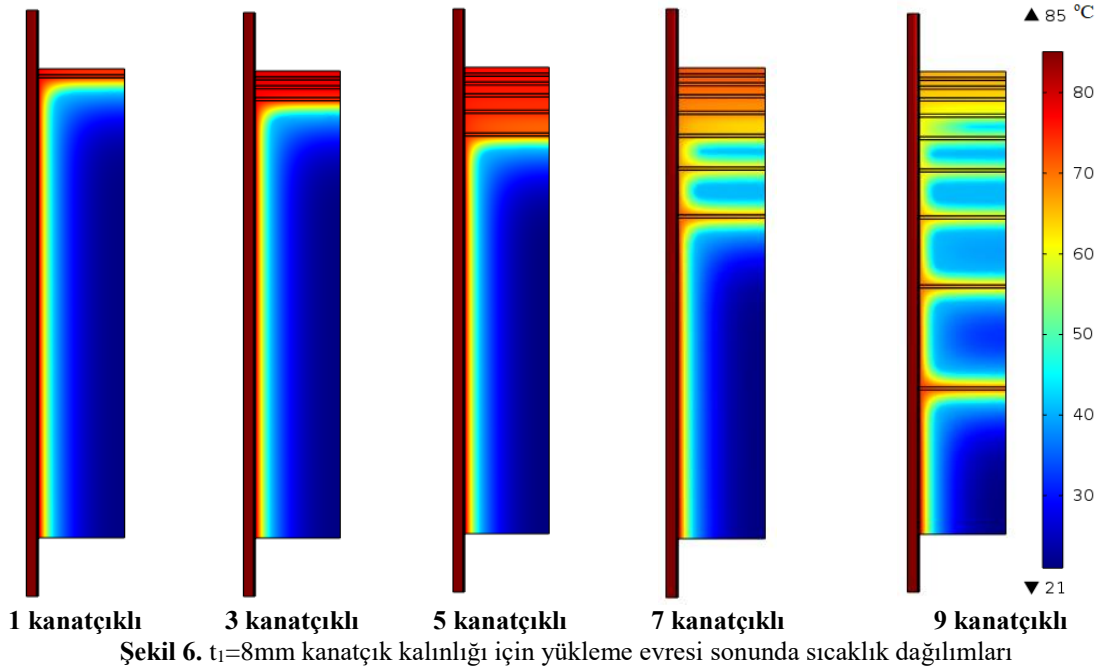
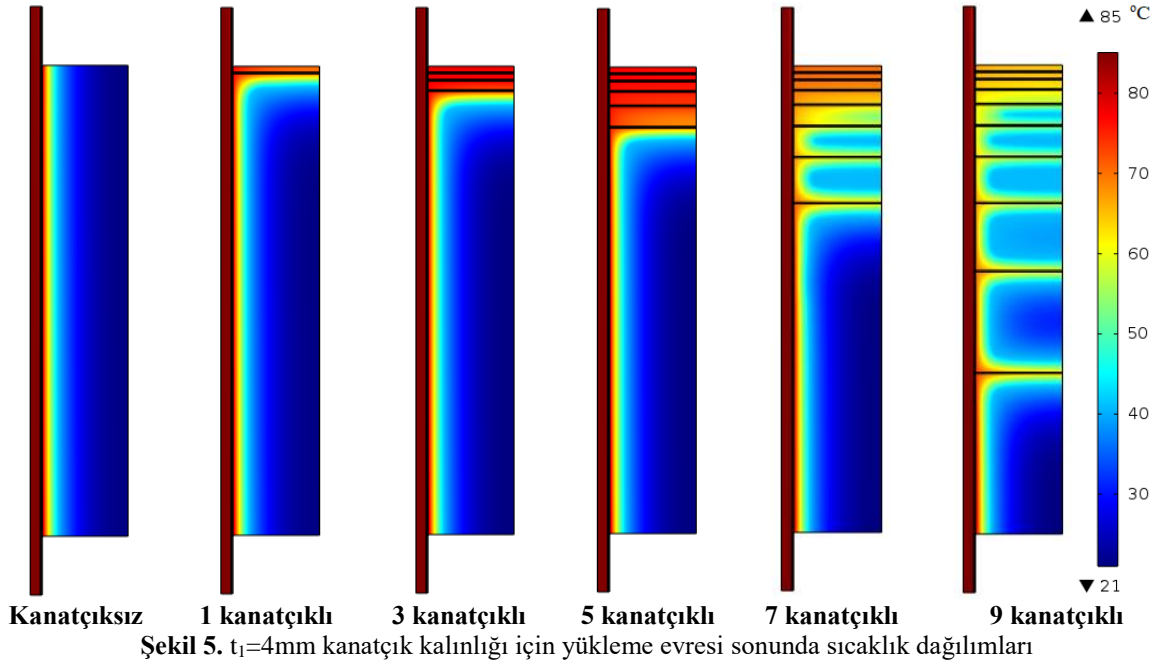


Şekil 4. Yükleme evresi sonunda üniform 9 kanatçıklı bir ısı enerjisi deposunda sıcaklık dağılımı ($t_1=4\text{mm}$)

Şekil 5 ve 6'da sırasıyla $t_1=4\text{mm}$ ve $t_1=8\text{mm}$ kanatçık kalınlıkları için 12 saatlik yükleme süresi sonunda üniform olmayan kanatçık dağılımına sahip ısı enerjisi deposunda sıcaklık dağılımları görülmektedir. Sisteme sıcak su 85°C 'de girmekte olup, suyun çıkışında kanatçık

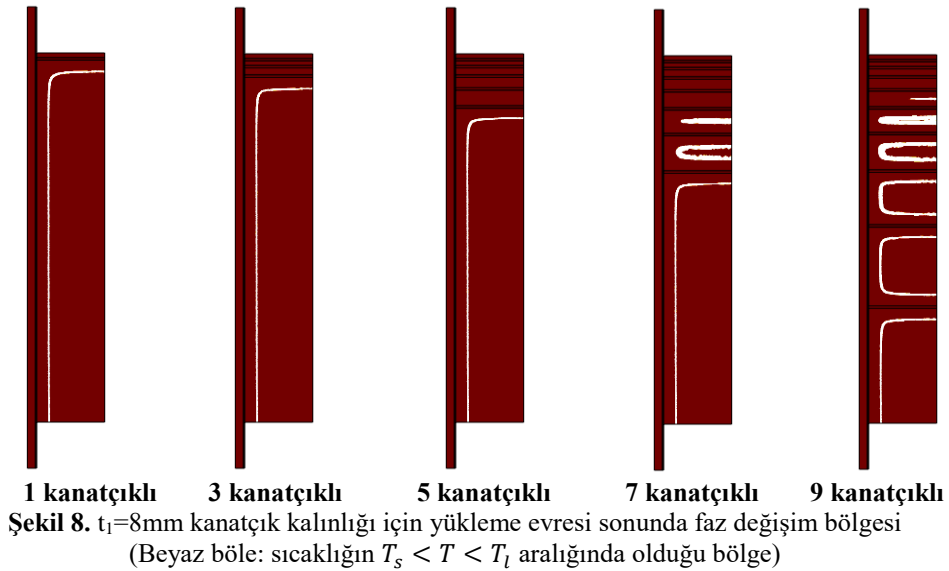
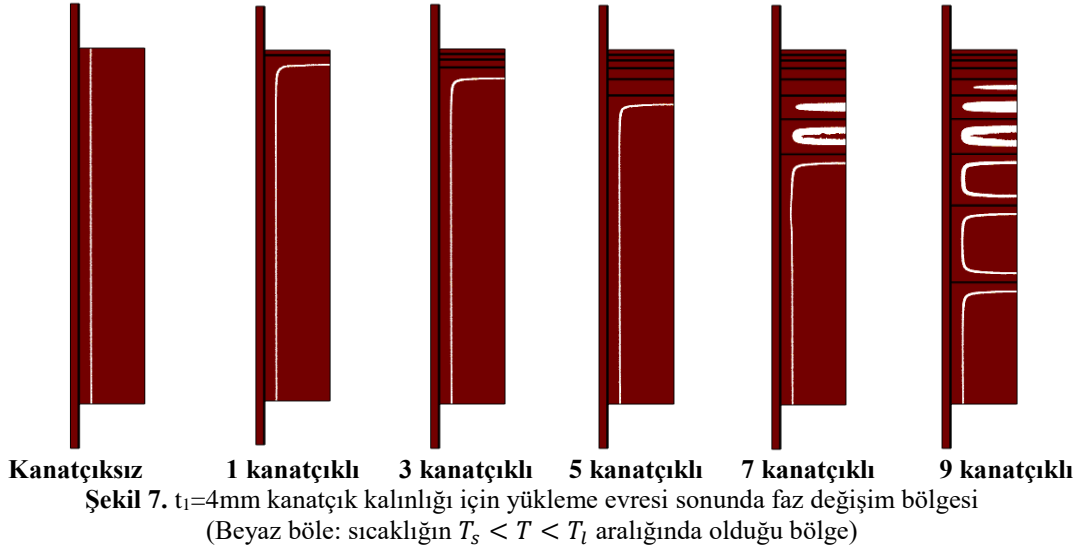
sıklığı daha fazladır. Isıl iletkenliğı yüksek bakır kanatçıkların kullanılmasının FDM'ye olan ısı geçişini arttırdığı görülmüştür. 3 ve 5 kanatçık kullanılması durumunda ısıl enerji depolama sisteminde sıcak suyun çıkış bölgesinde FDM'de daha yüksek sıcaklıklar elde edilmiştir. Kanatçık sayısı daha da artırıldığında sıcak suyun taşıdığı enerji FDM de daha homojen bir yapıda yer almaktadır. Kanatçık kalınlığının artırılması ile

FDM'ye olan ısı geçişi de artmaktadır. şekil 5 ve 6 göstermektedir ki üniform olmayan kanatçık dağılımında kanatçık sayısı arttığında, Ogoğ ve Groulx [2]'un çalışmasında olduğı ve şekil 4'de de analiz edilen üniform kanatçık dağılımlı ısıl enerji deposundaki gibi sıcak suyun girişine yakın olan kanatçıklardan ısıl enerji deposuna ısı geçişi daha fazla olmaktadır.



Bu çalışmada faz değişimi FDM sıcaklığı $41^{\circ}C < T < 44^{\circ}C$ olduğu bölgede gerçekleşmektedir. Yükleme süresi sonunda faz değişiminin olduğu bölgeler Şekil 7 ve 8’de beyaz renkte gösterilmiştir. Faz değişim bölgesi 5 kanatçığa kadar $t_1=4\text{mm}$ ve $t_1=8\text{mm}$ durumları için neredeyse aynı büyüklükte olup, 5 kanatçıktan sonra $t_1=4\text{mm}$ olması durumunda daha geniş bir alan kaplamaktadır. Şekil 9’da

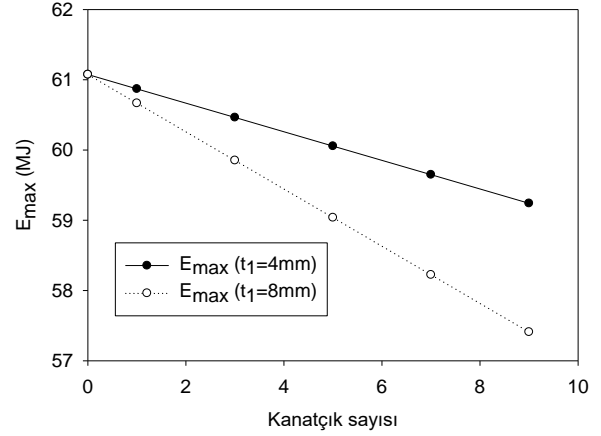
yükleme süresi sonunda FDM’de depolanan gizli ısı değerinin 5 kanatçıktan sonra $t_1=4\text{mm}$ kanatçık kalınlığında daha fazla olması bu sonucu doğrular bir durumdur. Şekil 7 ve 8 göstermektedir ki üniform olmayan kanatçık dağılımına sahip bu sistemde özellikle 5 kanatçıktan sonra, Ogoh ve Groulx [2]’un çalışmasında olduğu gibi kanatçık sayısı ile eriyen FDM miktarında artış görülmektedir.



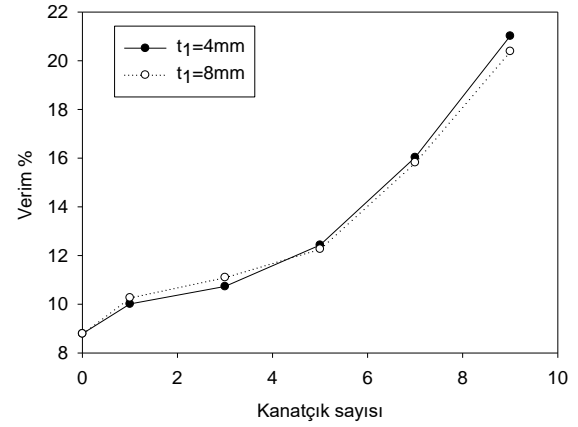
Şekil 9’dan yükleme süresi sonunda 5 kanatçıktan sonra gizli ısı değerinde kanatçık sayısı ile birlikte artış olduğu görülebilir. Yine Şekil 9’dan FDM’de depolanan duyulur ısının da kanatçık sayısı ile neredeyse lineer bir artış

gösterdiği, fakat kanatçık kalınlığındaki değişimin depolanan duyulur ısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılabilir. FDM’de depolanan toplam enerji de kanatçık sayısı ile artış göstermekte olup 5 kanatçıktan

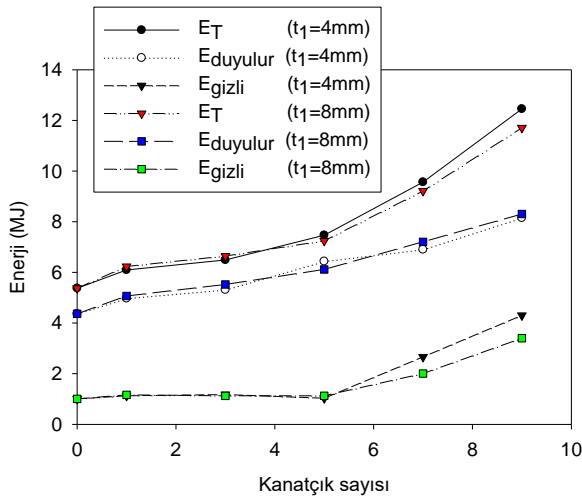
sonra kanatçık kalınlığı $t_1=4\text{mm}$ iken bu artış, gizli ısının fazla olması nedeniyle daha fazladır. Kanatçık kalınlığının artması FDM'ye olan ısı geçişini artırıcı bir etkiye sahip olsa da, kanatçık kalınlığındaki artış ile beraber FDM kütlesi azaldığından bu beklenen bir sonuçtur. Şekil 10'da yükleme süresi sonunda FDM'de depolanabilecek maksimum ısılar yer almaktadır. FDM'de depo edilecek toplam enerji de FDM kütlesiyle orantılı olduğundan kanatçık kalınlığı ve sayısı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Şekil 11'de ise ısıl enerji deposu veriminin kanatçık sayısı ile değişimi görülmektedir. FDM'de yükleme süresi sonunda depolanabilecek maksimum enerji FDM'nin kapladığı hacim daha büyükken daha fazladır ($t_1=4\text{mm}$ için). Şekil 9'dan FDM'de depolanan toplam enerjinin 5 kanatçığa kadar her iki kanatçık kalınlığında hemen hemen aynı olduğu görülebilir. Bu durumda Şekil 11'de ilk 5 kanatçığa kadar verimin $t_1=8\text{mm}$ kanatçık kalınlığında daha fazla olması beklenen bir sonuçtur. Diğer yandan 5 kanatçıktan sonra FDM'de depolanan toplam enerjinin $t_1=4\text{mm}$ kanatçık kalınlığı için daha fazla olması, FDM'de depo edilebilecek maksimum enerjinin daha fazla olmasına rağmen, verim üzerinde olumlu bir etki oluşturmakta ve böylece $t_1=4\text{mm}$ kanatçık kalınlığında 5 kanatçıktan sonra daha yüksek verimler elde edilebilmektedir.



Şekil 10. Yükleme süresi sonunda FDM'de depolanabilecek maksimum ısılar



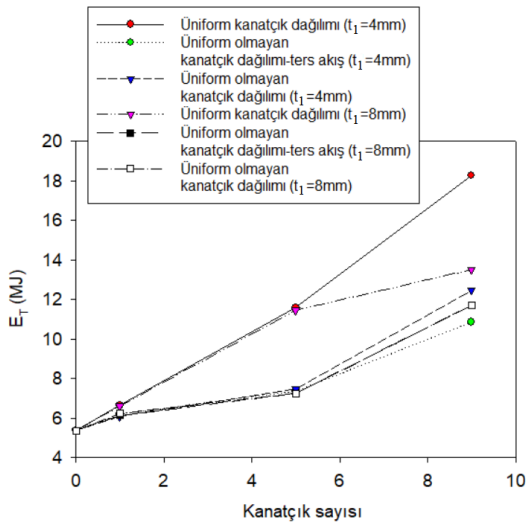
Şekil 11. Yükleme süresi sonunda ısıl enerji deposunun veriminin kanatçık sayısı ile değişimi



Şekil 9. Yükleme süresi sonunda FDM'de depolanan toplam, duyulur ve gizli ısılar

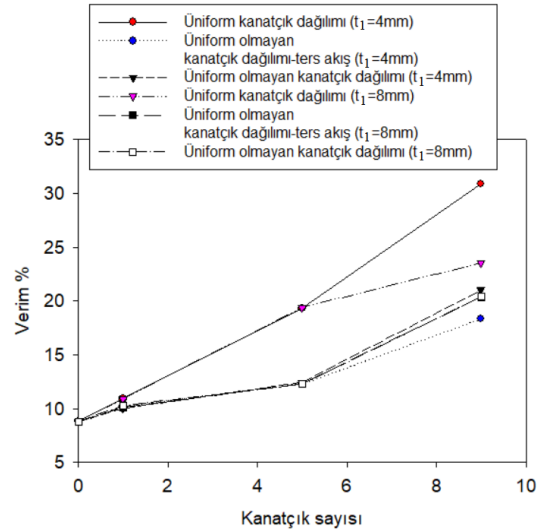
Bu çalışmada ayrıca üniform kanatçık dağılımı durumu ve kanatçıkların sıcak akışkanın çıkışında ve girişinde yoğunlaştığı (ters akış) durumları arasında bir karşılaştırma da yapılmıştır. Şekil 12-13'de farklı kanatçık kalınlıkları için 1, 5 ve 9 kanatçıklı düzenlemelere ait sonuçlar yer almaktadır. Şekil 12'den görülebileceği üzere her iki kanatçık kalınlığı için de FDM'de depolanan maksimum enerji üniform kanatçık durumu için elde edilmiştir. Bunun nedeni üniform kanatçık tasarımında kanatçıklardan FDM'ye daha homojen ısı geçişinin olmasıdır. Diğer yandan üniform kanatçık düzeninde $t_1=4\text{mm}$ ve $t_1=8\text{mm}$ kanatçık kalınlıkları için FDM'de depo edilen toplam enerji, düşük kanatçık sayılarında

birbirlerine çok yakın iken, kanatçık sayısı 9'a yükseldiğinde $t_1=4\text{mm}$ kanatçık kalınlıklı sistemde depo edilen toplam enerji daha fazla olmaktadır. Fazla kanatçık sayılarında kalınlığı fazla olan kanatçıkların kapladığı hacim fazla olduğundan sistemde kullanılan FDM hacimi dolayısıyla da kütlesi azalmakta, bunun sonucu olarak da sistemde duyulur ve gizli olarak depolanan toplam enerji düşük olmaktadır. Üniorm olmayan kanatçık düzenlemelerinde FDM'de depo edilen toplam enerji değerleri her iki kanatçık kalınlığı için birbirlerine yakındır. Üniorm olmayan kanatçık düzenlemeleri arasında depo edilen maksimum toplam enerji değeri kanatçık sıklığının çıkışta fazla olduğu, $t_1=4\text{mm}$ ve 9 kanatçık durumu için elde edilmiştir. Buradan üniorm olmayan kanatçık düzenlemeleri ve kanatçık sıklığının çıkışta fazla



Şekil 12. Yükleme süresi sonunda farklı tasarımlarda FDM'de depolanan toplam ısılar

olduğu durumlar için, FDM'de depolanan toplam enerjinin düşük kanatçık kalınlıklarında ve fazla kanatçık sayılarında daha fazla olacağı sonucu çıkarılabilir. Şekil 13'de farklı tasarımlarda ısı enerji deposunun verim değerinin kanatçık sayısı ile değişimi verilmiş ve bu eğrilerin FDM'de depo edilen toplam enerjiler ile benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Şekil 12 ve 13'te $t_1=8\text{mm}$ kanatçık kalınlığı için üniorm olmayan kanatçık dağılımlı durumlara ait eğriler üst üste çakışmıştır. Buradan $t_1=8\text{mm}$ kanatçık kalınlığı için üniorm olmayan düzenlemelerde, kanatçıkların sıcak akışkanın girişinde veya çıkışında yoğunlaşmasının yükleme süresi sonunda FDM'de depolanan toplam ısı ve ısı enerji deposunun verimi üzerinde farklı bir etki yapmadığı sonucu çıkarılabilir.



Şekil 13. Yükleme süresi sonunda farklı tasarımlarda ısı enerji deposunun verimi

4. Sonuçlar

Faz değiştiren malzeme içeren ısı enerji depolama sistemlerinde birim zamanda depolanan ısı enerji miktarını arttırmak için ısı iletkenliği yüksek kanatçıklar kullanılır. Bu çalışmada üniorm olmayan kanatçık düzenlemesinin ısı enerji deposunun performansı üzerindeki etkileri farklı kanatçık sayıları ve kalınlıkları için nümerik olarak incelenmiştir. Çalışma $41-44^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında faz değiştiren (RT 44HC) malzeme için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar ısı performans için

birinci derecede etkili parametrenin kanatçık sayısı olduğunu ve yüksek kanatçık sayılarında daha yüksek verim elde edileceğini göstermiştir. Sıcak su çıkışında sık kanatçık kullanımı durumu için verim üniorm kanatçık durumuna göre daha düşüktür. Ayrıca kanatçık kalınlığının artırılması FDM'ye olan ısı geçişini arttırmakta ise de FDM'de depo edilen toplam enerji FDM kütlesi ile orantılı olduğundan, özellikle yüksek kanatçık sayılarında FDM'de depolanan toplam enerjiyi azaltıcı bir etki oluşturmaktadır. Bu çalışmada kanatçıklar arasındaki mesafe bir önceki mesafenin 1.5 katı olacak şekilde bir dizayn

yapılmıştır. Daha farklı homejen olmayan yapılar için de yapılacak bir çalışma bu çalışmanın sonuçlarını bir adım ileri götürme potansiyeline sahiptir.

Simgeler

a: En dar kanatçık mesafesi [mm]
c: Özgül ısı [J/kgK]
D₁: İç boru çapı [mm]
D₂: Depo çapı [mm]
E: Enerji [MJ]
k: Isı iletim katsayısı [W/mK]
L=Faz değişim ısısı [J/kg]
L₁: İç boru uzunluğu [m]
L₂: Depo uzunluğu [m]
m: Kütle [kg]
 \vec{n} : Birim normal vektör
P: Basınç [Pa]
 \vec{q} : Isı akısı [W/m²]
r, z: Radyal ve aksel koordinatlar
r_p: Borunun iç yarıçapı D₁/2 [m]
S_H: Kaynak terimi (W/m³)
T₀: Başlangıç sıcaklığı [°C]
t₀: Boru et kalınlığı [mm]

5. Kaynaklar

1. Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, **23**:251–283.
2. Ogoh, W., Groulx, D. (2012). Effects of the number and distribution of fins on the storage characteristics of a cylindrical latent heat energy storage system: a numerical study. *Heat Mass Transfer*, **48**:1825–1835.
3. Shatikian, V. (2004). Melting and solidification of a phase-change material with internal fins. M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Sciences, Ben-Gurion University of the Negev, Israil, 129s.
4. Augspurger, M., Udaykumar, H.S. (2017). Transient multi-day simulations of thermal storage and heat extraction for a finned solar thermal storage device. *Solar Energy*, **151**: 48-60.
5. Groulx, D., Ogoh, W. (2009). Solid-liquid phase change simulation applied to a cylindrical latent heat energy storage system. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2009*, Boston.

t₁: Kanatçık kalınlığı [mm]
u₀: Suyun giriş hızı [m/s]
v_r, v_z: Radyal ve aksel hız bileşenleri [m/s]
T: Sıcaklık [°C]
t: Zaman [s]

Yunanca semboller

β: Erime oranı
η: Verim
∅: Viskoz yayılım [W/m³]
μ: Dinamik viskozite [kg/ms]
ρ: Yoğunluk [kg/m³]
θ: Açısal koordinat

Alt indisler

1,2: Sınır şartının uygulandığı bitişik yüzeyleri gösteren indisler
FDM: Faz değıştiren malzeme
i=kanatçık, boru duvarı
in: Giriş
l: Sıvı
max: Maksimum
s: Katı
T: Toplam

6. Abdulateef, A.M., Mat, S., Abdulateef, J., Sopian, K., Al-Abidi, A.A. (2018). Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**: 1620-1635.
7. Paria, S., Sarhan, A.A.D., Goodarzi, M.S., Baradaran, S., Rahmanian, B., Yarmand, H., Alavi, M.A., Kazi, S.N., Metselaar, H.S.C. (2015). Indoor solar thermal energy saving time with phase change material in a horizontal shell and finned-tube heat exchanger. *The Scientific World Journal*, **2015**:1-7.
8. Murray, R.E., Groulx D. (2011). Modeling convection during melting of a phase change material. *Excerpt from the Proceedings of the 2011 COMSOL Conference*, Boston.
9. Rozenfeld, T., Kozak, Y., Hayat, R., Ziskind, G. (2015). Close-contact melting in a horizontal cylindrical enclosure with longitudinal plate fins: demonstration, modeling and application to thermal storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **86**: 465-477.
10. Arena, S., Casti, E., Gasia, J., Cabeza, L.F., Cau, G. (2017). Numerical simulation of a finned-tube LHTES system: influence of the mushy zone constant on the phase change behaviour. *Energy Procedia*, **126**: 517-524.

11. Kazemi, M., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A., Bahrampoury, R. (2018). Improvement of longitudinal fins configuration in latent heat storage systems. *Renewable Energy*, **116**: 447-457.
12. Liu, C., Groulx, D. (2011). Numerical study of the effect of fins on the natural convection driven melting of phase change material. *Excerpt from the Proceedings of the 2011 COMSOL Conference*, Boston.
13. Rudonja, N.R., Komatina, M.S., Antonijević, D.L., Živković, G.S. (2016). Numerical simulation of latent heat storage with conductance enhancing fins. *Bulgarian Chemical Communications*, **48**: 199-205.
14. Naterer, G.F. (2003). *Heat Transfer in Single and Multiphase Systems*. CRC Press, United States of America, 603s.
15. https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT44HC_EN_31052016.PDF