



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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

Faz değiştiren malzemelerle termal enerji depolayan bir ısı değiştiricisinin sayısal analizi

Numerical analysis of a heat exchanger that stores thermal energy with phase change materials

Yazar(lar) (Author(s)): Meltem KOŐAN¹, Mustafa AKTAŐ²

ORCID¹: 0000-0001-7311-9342

ORCID²: 0000-0003-1187-5120

Bu makaleye řu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Koşan M. ve AktaŐ M., “Faz değiştiren malzemelerle termal enerji depolayan bir ısı değiştiricisinin sayısal analizi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 403-409, (2018).

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

DOI: 10.2339/politeknik.389594

Faz Değiştiren Malzemelerle Termal Enerji Depolayan Bir Isı Değiştiricisinin Sayısal Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Meltem KOŞAN^{1*}, Mustafa AKTAŞ¹

¹Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

ÖZ

Bu çalışmada, termal enerji depolama (TED) sistemlerinde kullanılan bir iç içe borulu ısı değiştiricisinde faz değiştiren malzemenin (FDM) erime sürecindeki ısıl davranışı, kanatçıklı ve kanatçıksız modeller ile sayısal analizi yapılarak incelenmiştir. Sayısal analizler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımını kullanan ANSYS Fluent ticari programı ile iki boyutlu ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle literatürde mevcut deneysel bir çalışma referans alınarak sayısal analiz kanatçıksız model için doğrulanmıştır. Bu modelde ısı transfer akışkanı (ITA)'nın sıcaklıkları 50 °C, 60 °C ve 70 °C alınarak ITA sıcaklığının FDM erime süresine etkisi değerlendirilmiştir. Daha sonra bu modele 6, 9, 12 ve 15 adet kanatçıklar eklenip, kanatçık sayısının da FDM'nin erime süresine etkisi araştırılmıştır. Yapılan sayısal çalışmada elde edilen sonuçlar, ITA sıcaklığı ve kanat sayısı arttıkça FDM'nin erime süresinin azaldığını, böylece FDM'nin daha hızlı bir şekilde ITA'dan ısıyı depoladığını göstermektedir. Kanat etkenlikleri sırasıyla 2,66, 3,49, 4,32 ve 5,15 olan 6, 9, 12 ve 15 kanatçıklı modellerin kanatçıksız modele göre erime süresini %72,5, %76,7, %78,4 ve %80 azalttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termal enerji depolama, faz değiştiren malzemeler, erime süresi.

Numerical Analysis of a Heat Exchanger That Stores Thermal Energy with Phase Change Materials

ABSTRACT

In this study, the thermal behavior of the phase change material (PCM) during melting process inside a shell-and-tube heat exchanger used in thermal energy storage (TES) systems has been investigated by numerical analysis with fin and without fin models. Two dimensional transient numerical analyzes have been carried out with the ANSYS Fluent commercial program using the computational fluid dynamics (HAD) approach. The study has been first validated for the without fin model with reference to an experimental study available in the literature. In this model, the effect of temperature of heat transfer fluid (HTF) on PCM melting time has evaluated by taking HTF's temperatures 50 °C, 60 °C and 70 °C. Then, 6, 9, 12 and 15 fins have been added to this model and the effect of the number of fins on the PCM melting time has been investigated. The results obtained in the numerical study show that as the HTF temperature and number of fins increase, the melting time of PCM decreases, so that PCM stores more rapidly the heat from HTF. It has been determined that the fin models with 6, 9, 12 and 15 which are 2,66, 3,49, 4,32 and 5,15 of fin effectiveness reduce the melting time by 72,5%, 76,7%, 78,4% and 80% respectively, according to without fin model.

Keywords: Thermal energy storage, phase change materials, melting time

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan küresel enerji talebiyle enerji şartları günden güne kötüye gitmektedir. Fosil yakıtlarının hem yetersiz olması hem de çevreye verdiği zararlar nedeniyle alternatif enerji kaynaklarının önemi giderek artmaktadır. Ancak güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları sürekli bir enerji kaynağı değildir. Termal enerji depolama (TED) ile güneş ışınının olduğu zamanlarda bu enerjiyi depolayan, enerji talebi ile arzı arasındaki uyumsuzluk ortadan kalkmaktadır.

Güneş enerjisini depolamanın en yaygın yöntemi duyulur enerji depolamadır. Fakat son yıllarda, istenilen sıcaklık aralığında eriyip katılaştıran faz değiştiren malzemeler ile gizli ısıyı depolayan bir yöntem olan gizli ısı depolama alternatif bir yöntem olmuştur. Duyulur

enerji depolama, sistemin korozyona uğrama ve sızıntı yapma, yüksek basınç, yalıtım gereksinimi ve yüksek ısı depolama boyutlarına ihtiyaç duyulmasından dolayı maliyetli olması gibi dezavantajları nedeniyle yerini yavaş yavaş gizli ısı depolamaya bırakmaktadır. Gizli ısı depolama, daha küçük sıcaklık aralıklarında ve daha küçük hacimlerde daha fazla ısı depolama kapasitesine sahip olduğundan güneş enerjisinden sıcak su eldesi ve mahal ısıtmasında maksimum seviyede faydalanmak için en uygun termal depolama yöntemidir [1].

Gizli ısı depolamada kullanılan FDM organik, inorganik ve ötektik olarak sınıflandırılmaktadır. Çizelge 1'de bu FDM'lerin avantaj ve dezavantajları özetlenmiştir.

Avantajlarından dolayı en çok tercih edilen FDM'ler organik FDM'lerdir. Bu organik FDM'leri parafinler ve yağ asitleri oluşturmaktadır. Parafinler kimyasal olarak kararlı, uzun ömürlü (~2000 döngüden sonra kararlı özelliklere sahip), erime gizli ısı yüksek, sabit

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mltmkosan@gmail.com

Çizelge 1. FDM'lerin karşılaştırılması [1,2,3]

FDMler	Avantajları	Dezavantajları
Organik FDM	İyi ısı kararlılık Aşırı soğuma olmadan donma Düşük buhar basıncı Özgün çekirdekleşme özelliği Reaktif ve zehirli değil Uyumlu eriyebilme Düşük hacim değişiklikleri Geleneksel yapı malzemeleri ile uyumluluk Geniş çalışma sıcaklık aralığı	Sıvı FDM'nin sızması Düşük termal iletkenliği (yaklaşık 0.2 W/mK) Yanıcı
İnorganik FDM	Yüksek hacimli gizli ısı depolama kapasitesi Yanıcı değil Düzensiz faz değişimi Yüksek termal ısı iletkenlik	Aşırı soğumaya eğilimli Ayrışma Uyumlu eriyememe Yüksek hacim değişiklikleri Metalle korozif olma Tekrarlanan faz döngüleri üzerinde faz ayrılma
Ötektik FDM	Keskin erime noktaları Özellikleri özel isteklere göre yapılabilir	Yüksek maliyetli Termalfiziksel özelliklerinin sınırlı veriler

sıcaklıkta yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahip, faz değişimi boyunca istikrarlı, korozif ve toksik olmayan, hızlı bir şekilde faz değiştirmeyen, düşük maliyetli, bol miktarda bulunan ve kolay erişilebilen FDM olduklarından yaygın kullanılmaktadırlar [1,2,3].

Parafinlerin TED sistemlerindeki kullanımında en önemli problemi düşük termal (ısı) iletkenlik katsayısına sahip olmalarıdır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için literatürde pek çok çalışmalar mevcuttur. Isı transferinin iyileştirilmesi amacıyla hem deneysel hem de nümerik olarak Chow vd. [4], Velraj vd. [5] ve Marin vd. [6] çalışmalarında çözüm önerileri vermişlerdir. Bunlar; FDM'ye metal gömülerek, FDM'den daha yüksek ısı iletkenliğine sahip metal parçacıklar FDM'ye ekleyerek, FDM'yi mikro ve makro kapsülleyerek, grafit kompozit malzeme ile FDM'yi birlikte kullanarak yada diğer FDM kompozit malzemelerle kullanarak ve farklı tasarımlarda kanatçıklı ısı değiştiricisi kullanarak ısı transferinin iyileştirilebileceğidir.

Osterman vd. [7] binalardaki enerji tüketimini azaltmak için ısı depolamada FDM'leri bir çözüm olarak görmüşler ve çalışmalarında termal enerjiyi depolayarak hem ısıtma hem de soğutma sistemlerinde incelemişlerdir. Nümerik analizlerin sonuçlarını doğrulamak için parafin RT22 ile dolu 30 kanatçıklı plaka içeren termal depolama ünitesini deneysel olarak incelemişlerdir. Nümerik hesaplamalarda bir ticari HAD yazılımı olan FLUENT programı kullanarak iki boyutlu modelin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu ve 4mx3mx2,8m boyutlarındaki bir ofisin yıllık enerji tüketimini kışın ısıtma için % 8, yazın da soğutma için % 15 azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Tay vd. [8] TED sisteminin etkinliğinin artırılması için pimli-kanatçıklı ve düz bakır borulu ısı değiştiricilerinin nümerik analizlerini yapmışlardır. Pimli-kanatçıklı model ile düz bakır borulu ısı değiştiricilerinin tüp hacimleri aynı aralıkta kabul edilmiş ve pimli-kanatçıklı modelin ısı transfer alanı daha büyük olduğundan daha yüksek ısı transferi sağladığı, akışa bağlı olarak ortalama

etkinliğinin % 20-40 daha iyi ve faz değişim zamanının da % 25 daha kısa olduğunu gözlemlenmiştir.

Mat vd. [9] üç borulu tüplü (iç içe geçmiş üç tüp) ısı değiştiricisinde RT82 FDM kullanarak erime süresini ticari bir HAD yazılımı olan Fluent programında iki boyutlu nümerik modelde incelemişlerdir. Erime sürecinde ısı transferini üç borulu tüplü ısı değiştiricisinde içten kanatçıklı, dıştan kanatçıklı ve hem içten hem de dıştan kanatçıklı olarak üç modelde inceleyerek FDM erime oranlarında önemli bir fark olmadığını ve erime zamanının içten ve dıştan kanatçıklı üç borulu tüplü ısı değiştiricisi kullanarak erime süresinin % 43 azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Medrano vd. [10] TED sistemlerindeki FDM'lerin düşük termal iletkenlikleri yüzünden pratik uygulanabilirliğinin sınırlı olması gibi olumsuz özelliğini iyileştirebilmek için beş farklı küçük ısı değiştiricisi kullanarak, FDM'lerin erime ve katılma sırasında ısı transfer işlemini deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuçlar, bir grafit matris içine yerleştirilmiş FDM'ye sahip çift borulu ısı değiştiricisinin, ısı transfer katsayısı bakımından en yüksek değere sahip olduğunu göstermiştir.

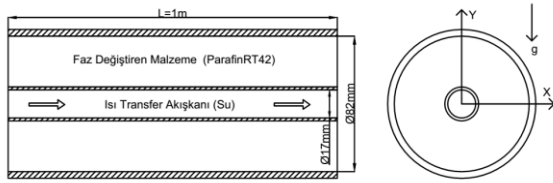
Hosseini vd. [11] çalışmalarında çift borulu ısı değiştiricisinde ticari bir parafinin termal davranışını ve ITA'nın giriş sıcaklığının ısı transferi üzerindeki etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. ITA giriş sıcaklığı 70 °C'den 80 °C'ye artırıldığında toplam erime süresinin de % 19'dan % 37'ye kadar azaltılabileceğini göstermişlerdir. Böylelikle erime süresini kısaltarak daha çok enerji depolama kapasitesi de artırılmış olmaktadır.

Li ve Kong [12] gövde borulu ısı depolama ünitesinde ITA olarak hava ve su kullanarak birbirleri ile kıyaslamışlar ve faz değişiminin termal performansını nümerik olarak incelemişlerdir. FDM olarak erime sıcaklığı 41 °C, gizli ısı 140 kJ/kg olan parafin kullanmıştır. Termal depolama ünitesi faz değişimi esnasında ITA olarak hava kullanıldığında ergime işleminin son aşamalarında; ısı transferinin çok düşük olduğu, istenilen hava sıcaklığı ve hızının yeterli

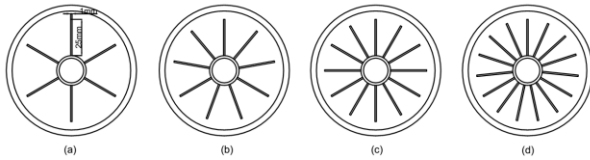
olmadığını gözlemlemişlerdir. Aynı şekilde ITA olarak su kullanıldığında suyun yoğunluğu ve özgül ısı kapasitesi büyük olduğundan ergime işleminin hızla artarak havaya göre çok kısa sürede gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Jmal va Baccar [13] iklimlendirme sistemleri için kanatçıklı ısı değiştiricisi içindeki FDM'nin katılaşma sürecini ve ısı transferi gelişiminde kanatçık sayısının etkilerini nümerik olarak çalışmışlardır. Kanatçıklı yapının olması ITA'ya FDM'den enerji aktarımını hızlandırdığı, deşarj zamanının azaldığı ve akışkanın çıkış sıcaklığının arttığını gözlemlemişlerdir.

Yukarıda verilen çalışmalar değerlendirildiğinde ve FDM'nin düşük ısı iletkenliği dikkate alındığında, FDM'nin ITA'dan kısa sürede ısı enerjisini alıp depolayabilmesi etkin bir TED sistemi için önemlidir. Bu çalışmadaki amaç, deneysel çalışılmış bir literatür çalışması referans alınarak Şekil 1'deki kanatçiksiz modelde nümerik çalışmayı doğrulamak, ITA'dan FDM'ye olan ısı transferinin etkisini farklı ITA sıcaklıkları için gözlemek ve tasarladığımız kanatçıklı modelde FDM'nin ısı davranışını ve erime süresine etkisini araştırmaktır.



Şekil 1.a. TED sistemlerinde kullanılan iç içe borulu ısı değiştiricisinin iki boyutlu fiziksel modeli



Şekil 1.b. TED sistemlerinde kullanılan iç içe borulu ısı değiştiricisinin iki boyutlu kanatçıklı fiziksel modelleri. (a) 6 kanatçık, (b) 9 kanatçık, (c) 12 kanatçık, (d) 15 kanatçık

2. SİSTEMİN TANITIMI (SYSTEM DESCRIPTION)

Fiziksel modelin şematik görünümü Şekil 1.a'da gösterilmektedir. Isı depolama ünitesi eş merkezli iki silindirik borudan oluşmaktadır. İçteki borudan ısı transfer akışkanı geçmekte, dıştaki boru ise FDM ile doludur. Paslanmaz çelikten yapılmış içteki borunun çapı 17 mm ve kalınlığı 3,5 mm, demirden yapılmış dıştaki borunun çapı 82 mm ve kalınlığı 8 mm'dir. İç borudan akan ısı transfer akışkanı olarak su, FDM olarak ise Çizelge 2'de özellikleri verilen Parafin RT42 seçilmiştir. Sayısal modeli doğrulamak için, sistemin boyutları ve malzemeler Cano vd. [14] tarafından deneysel olarak incelenen yatay gövde-borulu ısı değiştirici ile aynı

olacak şekilde seçilmiştir. FDM'nin erime sürecinde kanat sayısının ısı transferine etkisini incelemek için içteki boruya Şekil 1.b'de gösterildiği gibi 6, 9, 12 ve 15 adet ve kanat etkenlikleri sırasıyla 2,66, 3,49, 4,32 ve 5,15 olan 25 mm uzunluğunda ve 1 mm kalınlığında kanatçıklar eklenerek sayısal çalışmalar yapılmıştır.

Çizelge 2. Parafin RT42'nin Termofiziksel Özellikleri [14]

Özellikler	FDM
Erime sıcaklığı	38 - 42 [°C]
Yoğunluk (katı)	880 [kg/m ³]
Yoğunluk (sıvı)	760 [kg/m ³]
Özgül ısı	2000 [J/kg.K]
Isıl iletkenliği	0.2 [W/m.K]
Gizli ısı	165 [kJ/kg]
Hacimsel genleşme	12,5 [%]

3. MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

3.1. Sayısal Yaklaşım (Numerical Approach)

Isı değiştiricisinde faz değişiminin sayısal analizi entalpi-gözeneklilik metoduna dayanmaktadır. Bu methoda FDM'nin katı-sıvı arayüz değişiminin her zaman adımında izlenmesine gerek yoktur ve yönetici denklemler tek fazlı denklemlere benzediğinden çok boyutlu problemlere kolaylıkla uygulanabilir. Ayrıca faz değişiminin hem sabit sıcaklıkta hem de bir sıcaklık aralığında meydana geldiği problemlerde yaygın kullanılmaktadır. Sayısal analizlerde sonlu hacimler yöntemini kullanan ANSYS Fluent programı, faz değişim problemlerinde entalpi-gözeneklilik metoduna göre çözümleri yapmaktadır [15]. Bu çalışmada sayısal analizi basitleştirmek için bazı kabuller yapılmıştır ve referans alınan deneysel çalışma [14] ile örtüşmektedir. Bunlar:

- FDM homojen ve izotropik yapıdadır.
- FDM'nin termofiziksel özellikleri katı ve sıvı faz için farklıdır fakat sıcaklıktan bağımsızdır.
- FDM'de faz değişim süreci izotermal kabul edilmiştir.
- Hem iletim hem de doğal taşınım ile ısı transferi olmaktadır.
- Sıvı durumunda FDM'nin hareketi laminar, süresiz ve sıkıştırılmazdır.

Bu kabullere göre iki boyutlu zamana bağlı laminar akış için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıda ifade edilmiştir.

Süreklilik Denklemi:

$$\Delta \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

Momentum Denklemi:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \frac{1}{\rho} \left(-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \beta (T - T_{ref}) \right) + \vec{S} \quad (2)$$

Enerji Denklemi:

$$\frac{\partial h_{duy}}{\partial t} + \frac{\partial h_{gizli}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} h_{duy}) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho c_p} \nabla h_{duy} \right) \quad (3)$$

Malzemenin entalpisi duyulur, h_{duy} , ve gizli ısı, h_{gizli} , entalpisinin toplamıdır [15]:

$$h_{top} = h_{duy} + h_{gizli} \quad (4)$$

burada,

$$h_{duy} = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (5)$$

çarpım durumundaki sabit olan c_p , integralden ayrılır. Gizli ısı içeriği malzemenin gizli ısısı cinsinden yazılabilir, L :

$$h_{gizli} = \sum_{i=1}^n \lambda_i L \quad (6)$$

burada h_{gizli} sıfır (katı hal için) ile L (sıvı hal için) arasında değişebilir. Toplam sembolü, toplam gizli ısının, her zaman adımında incelenen alana dahil edilen her hücrenin gizli ısısının bir toplamı yoluyla hesaplandığını ima eder. Sıvı oranı, λ , aşağıdaki gibi tarif edilir [15]:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{h_{gizli}}{L} = 0 & \text{ise } T < T_{katı} \\ \frac{h_{gizli}}{L} = 1 & \text{ise } T > T_{sıvı} \\ \frac{h_{gizli}}{L} = \frac{T - T_{katı}}{T_{sıvı} - T_{katı}} & \text{ise } T_{katı} < T < T_{sıvı} \end{cases} \quad (7)$$

Eşitlik 2'deki \vec{S} , aşağıdaki eşitlikte tanımlanan kaynak terimidir. Bu parametre, konvektif ısı transferinde faz değişim etkilerini eklemek için momentum denklemine eklenir.

$$\vec{S} = \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3} A_{lapa} \vec{V} \quad (8)$$

Bu eşitlikteki A_{lapa} katsayısı lapa bölge sabitidir. Bu sabit genellikle 10^4 ile 10^7 arasında bir değer alır [16]. Bu çalışmada 10^6 alınmıştır.

Yönetici denklemler, ANSYS Fluent yazılımında süreksiz çözücüsünde (unsteady solver) sonlu hacim yöntemi ile ayrık hale getirilir. Erime/katılaşma modeli, entalpi-gözeneklilik tekniği kullanılarak laminer akış için Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesi ile incelenmektedir. ITA ve FDM için yönetici denklemler, Fluent'in çözücü ayarındaki Coupled (Birleşik) algoritmasıyla tüm hesaplama alanlarında aynı anda çözülür. Bu çalışmada, doğal taşınım için tavsiye edilen PRESTO (Pressure Staggering Option) basınç için ayrıklaştırma yöntemi olarak uygulanmıştır. Momentum ve enerji denklemlerini çözmek için ise Second Order Upwind (İkinci derece Upwind) metodu kullanılmıştır.

3. 2. Başlangıç ve Sınır Şartları (Initial and Boundary Conditions)

Başlangıçta FDM katı haldedir ve FDM başlangıç sıcaklığı $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Isı transfer akışkanının geçtiği iç borunun tüm yüzeyi ise $60 \text{ }^\circ\text{C}$ sabit sıcaklıktadır. Başlangıç ve sınır şartları şu şekilde yazılabilir:

$$t = 0 \rightarrow T = T_i \quad (9)$$

$$r = r_i \rightarrow T = T_{ITA} \quad (10)$$

$$r = r_o \rightarrow \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

burada t , zaman, T , herhangi bir andaki sıcaklık, T_i , başlangıç sıcaklığı, T_{ITA} , ısı transfer akışkanının

sıcaklığı, r , yarıçap, r_i , ısı değiştiricisinin içteki borunun yarıçapı, r_o , dıştaki borunun yarıçapıdır [17].

3. 3. Isı Değiştiricisinde Kanat Etkenliği (Fin Efficiency in Heat Exchanger)

Bir ısı değiştiricisinde, ısı transferini iyileştirme yöntemlerinden biri olan etkin yüzey alanını arttıran kanatçıklar kullanılabilir. Kanatçıkların performansını, kanat etkenliği olarak adlandırılan, kanatçıklı halde olan ısı geçişinin kanatsız halde olan ısı geçişine olan oranı belirler. Etkin bir kanat tasarımı için gerekli kriter kanat etkenliğinin $\varepsilon \geq 2$ olması gereklidir [17]. Kanat etkenliği formülü aşağıda verilen eşitlik (12) ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{h A_c \Delta T} \quad (12)$$

Burada q_f , kanat ucundan akışkana toplam ısı geçişi, h , ısı taşınım katsayısı, A_c , alanı ve ΔT , sıcak ve soğuk akışkan arasındaki sıcaklık farkıdır. Kanat olması durumunda akışkana geçen ısı miktarı eşitlik (13)'de gösterilmiştir.

$$q_f = \sqrt{h P k A_c \Delta T} \frac{\sinh(mL) - h/k m \cosh(mL)}{\cosh(mL) + h/k m \sinh(mL)} \quad (13)$$

m katsayısı, P , kanadın çevre uzunluğu ve A_c , alanı ise aşağıda verilen eşitlik (14), (15) ve (16) ile hesaplanmaktadır.

$$m^2 = \frac{h P}{k A_c} \quad (14)$$

$$P = 2(t + z) \quad (15)$$

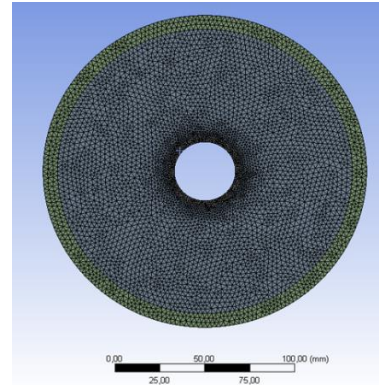
$$A_c = z * t \quad (16)$$

burada z , kanadın genişliği, t , kanadın kalınlığıdır [18].

3. 4. Eleman Sayısı ve Zaman Adımından

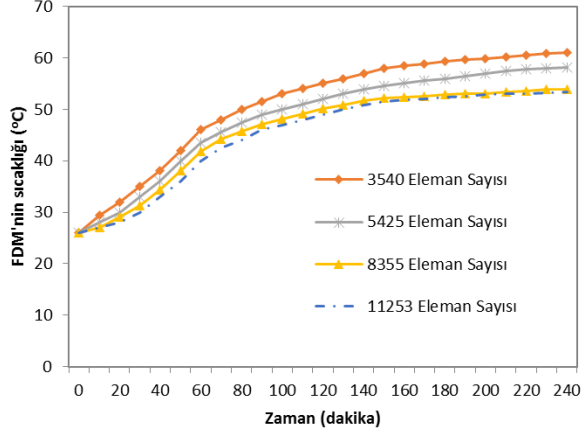
Bağımsızlık (Independence of Mesh and Time Step)

HAD analizlerinde hesaplama yapılacak bölge çok sayıda küçük elemanlara (hücrelere) bölünerek, her bir küçük eleman için yönetici denklemler uygulanır. Bu küçük elemanlar ne kadar küçük olursa çözüm hassasiyetide o kadar iyi olmaktadır. Fakat analizi yapılan modelin geometrisi ve boyutuna göre uygun bir ağ yapısı seçilmezse, HAD analizi ya gereğinden fazla uzun sürebilir ya da daha yüksek kapasiteli bilgisayar kullanımını gerektirir. Zamana bağlı çözümlerinde zaman adımı küçüldükçe de hesaplama maliyeti artmaktadır [19]. Şekil 2'de 8355 elemandan oluşan iki boyutlu modelin ağ yapısı (mesh) gösterilmektedir.



Şekil 2. 8355 elemanlı oluşturulan ağ yapısı

İki boyutlu zamana bağlı yapılan bu çalışmada kanatçiksız model için dört farklı 3540, 5425, 8355 ve 11253 eleman sayısı (mesh); üç farklı 0,2, 0,1 ve 0,05 zaman adımı çalışılmıştır. Şekil 4’de eleman sayılarının FDM sıcaklık-zaman grafiği gösterilmektedir. 0,1 saniyelik zaman adımı ve 8355 eleman sayısı bu çalışma için yeterli bulunmuştur. Şekil 3’de de görüldüğü gibi 8355 eleman sayısından sonra eleman sayısı arttıkça önemli bir değişiklik olmamaktadır.



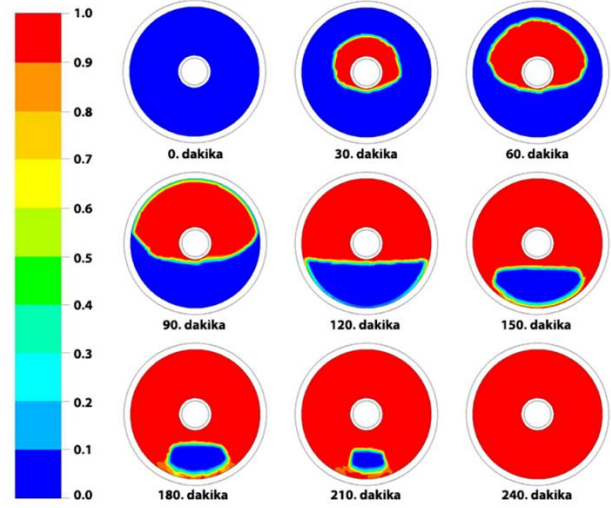
Şekil 3. FDM'nin sıcaklığına ve zamana bağlı sayısal çalışmanın eleman sayısından bağımsızlığı

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Cano vd. [14] dört farklı FDM ve üç farklı ITA akış oranlarıyla bir termal enerji depolayan ısı değiştiricisinin performansını incelemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Akış oranı 0,4 l/dk ve sıcaklığı 60 °C olan ısı transfer akışkanıyla FDM (Parafin RT42)'yi 240 dakikada eritmişlerdir. Bu çalışma ile aynı sınır şartları kullanılarak FDM'nin erime sürecindeki zamanla değişen sıcaklığa göre gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarının % 7,8 oranında bir farkla aynı sonuçlar elde edilmiştir ve bu çalışma referans olarak kullanılmıştır. Bu ısı değiştiricisinde ısı transfer akışkanının sıcaklığı ile eriyen (enerjiyi depolayan) FDM'nin ısıl davranışı zamana bağlı olarak ANSYS Fluent programında iki boyutlu modellenmiştir.

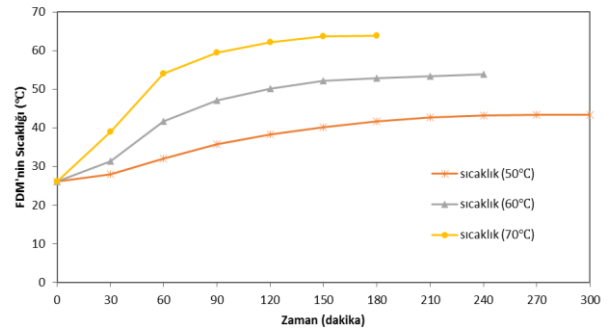
Şekil 4’de ITA sıcaklığı 60 °C olan iç içe borulu ısı değiştiricisindeki FDM'nin erime (şarj olma) sürecinde zamanla değişen sıvı oranları (liquid fraction) gösterilmektedir. Burada mavi renk (sıvı oranının 0 olduğu bölge) katı halde olan FDM miktarını, kırmızı renkte (sıvı oranının 1 olduğu bölge) sıvı halde olan FDM miktarını belirtmektedir. İki faz birbirinden ayıran katı-sıvı arayüzüne lapa bölge (mushy zone) denilmektedir. Katı-sıvı faz arasında oluşan yeşil-sarı renk ise (sıvı oranının 0 ile 1 arasında olduğu bölge) lapa bölgesini göstermektedir. Erime işleminin başlamasıyla, içteki sıcak duvardan katı FDM'ye olan ısı transferi, FDM'nin erimesine neden olur. Başlangıçta tüm bölgelerde iletim ile ısı transferi olmaktadır. Daha sonra FDM'nin erimesiyle doğal taşınım etkisini göstermeye

başlamaktadır. Isı, doğal taşınımın etkisiyle FDM ile dolu ısı değiştiricisinin üst bölgesine doğru yükselir ve eriyen sıvı FDM, yoğunluğu daha düşük olduğundan üst kısımlarda kalmaktadır. Başlangıçta erime oranı çok hızlıdır fakat zamanla yavaşlamaya başlamaktadır. FDM ısıyı, ITA'dan alır ve erimenin başlamasıyla depolar. FDM tamamen 240 dakika içerisinde erimektedir.



Şekil 4. Erime (şarj olma) sırasında ısı değiştiricisindeki FDM'nin zamanla değişen sıvı oranı

Erime süreci ısı transfer akışkanının sıcaklığına ve akış oranına (akışkanın debisine) bağlıdır. İki boyutlu kanatçiksız modelde ITA sıcaklığı 50 °C, 60 °C ve 70 °C ile yapılan çalışmanın grafiği Şekil 5’de verilmiştir. ITA sıcaklığı 50 °C iken FDM 300 dakikada, 60 °C iken 240 dakikada ve 70 °C iken ise 180 dakikada erimektedir. ITA sıcaklığı arttıkça akışın entalpiside arttığından ısı transferi daha hızlı gerçekleşmektedir ve FDM'nin erime süresi de önemli derecede azalmaktadır.



Şekil 5. ITA sıcaklıkları 50 °C, 60 °C ve 70°C olan ısı değiştiricisindeki FDM'lerin sıcaklık-zaman grafiği

FDM'nin erime süresi çok önemlidir ve bu konuda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu bu yöndedir. Erime süresinin azaltılmasının bir diğer yöntemi ise etkin bir ısı değiştiricisi tasarımıdır. Basitliği, kolay üretilmesi ve düşük maliyetli olmasından dolayı FDM'deki ısı transferini artırmanın en iyi yolu kanatçık kullanımındır [20]. Ayrıca FDM'nin düşük termal iletkenliğinden

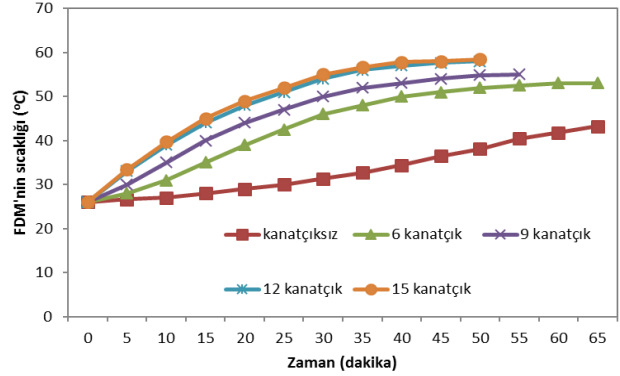
dolaylı, ısı değiştiricisinde kanatçık kullanımı ısı transferini büyük oranda iyileştirmektedir.

Isı değiştiricilerinin kanat etkenliği bölüm 3.3'de verilen eşitlikler ile hesaplanmaktadır. 6, 9, 12 ve 15 adet kanatçık için yapılan hesaplara göre kanat etkenlikleri sırasıyla 2,66, 3,49, 4,32 ve 5,15 bulunmuştur. Kanat etkenlikleri 2'nin üzerinde olduğu için bu tasarımlar uygun görülmüştür.

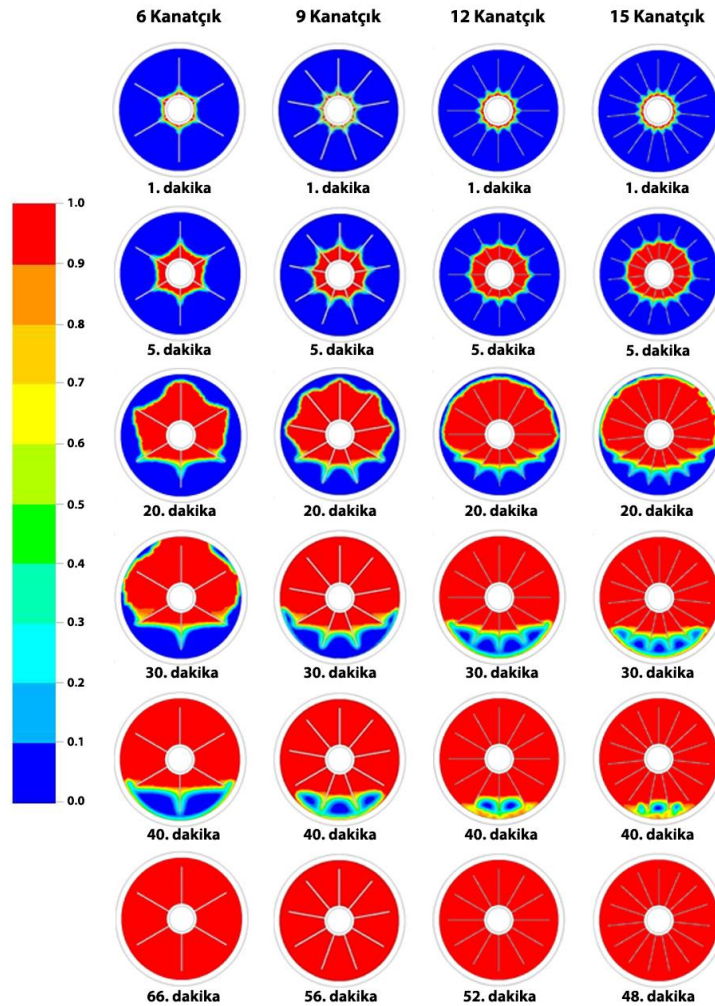
6, 9, 12 ve 15 adet kanatçık kullanılarak yapılan çalışmanın FDM sıcaklık-zaman grafiği Şekil 6'da, sıvı oranları ise Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekil 7'de de görüldüğü gibi kanatçık sayısı arttıkça ısı transfer hızında önemli ölçüde artmıştır. Bu kanatçıklı modellerde kanatçiksiz modele göre yüzey alanı arttığından iletimle olan ısı transferi daha fazladır. Kanatçıklardan iletimle olan ısı transferi FDM'yi daha hızlı bir şekilde eritmeye başlamıştır. Ayrıca FDM'nin erimeye başlamasıyla doğal taşınım ile olan ısı transferi, ısı değiştiricisinin hem üst hem de alt taraflarında kanatçiksiz modele göre daha hızlı olmaktadır ve erime süresi oldukça kısalmıştır.

6 kanatçıklı modelin sıvı oranına bakıldığında 9, 12 ve 15 kanatçıklı modele göre FDM'nin biraz daha yavaş eridiği anlaşılmaktadır. Kanatçık sayısı arttıkça FDM daha hızlı

bir şekilde erimiştir. Fakat 12 ve 15 kanatçıklı modeller arasında sıvı oranları ve erime süreleri için büyük bir fark görülmemektedir. Şekil 7'de de görüldüğü gibi FDM, 6 adet kanatçıklı modelde 66 dakikada, 9 adet kanatçıklı modelde 56 dakikada, 12 adet kanatçıklı modelde 52 dakikada ve 15 adet kanatçıklı modelde ise 48 dakikada tamamen erimektedir. Kanatçiksiz modele göre erime süreleri sırasıyla %72.5, %76.7, %78.4 ve %80 oranlarında azalmıştır.



Şekil 6. Kanatçiksiz ve kanatçıklı ısı değiştiricisindeki FDM'lerin sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 7. Erime (şarj olma) sırasında 6, 9, 12 ve 15 kanatçıklı ısı değiştiricisindeki FDM'nin zamanla değişen sıvı oranları

5. BULGULAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada FDM olarak kullanılan Parafin RT42 için erime sürecinin, hem kanatçısız hemde kanatçıklı modelde sayısal çalışması yapılmıştır ve kanatçısız model literatürdeki deneysel bir çalışma ile doğrulanmıştır. Sayısal çalışmalar iki boyutlu, zamana bağlı olup ANSYS Fluent ticari yazılım paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen veriler kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- FDM ile dolu iç içe borulu ısı değiştiricisinin ITA sıcaklıkları 50 °C, 60 °C ve 70 °C olduğundaki termal davranışı ve FDM'nin erime süreci incelenmiştir. Isı transfer akışkanının sıcaklığı arttıkça FDM'ye olan ısı arttığı için daha kısa sürede erimekte ve yani daha hızlı ısıyı depolamaktadır (şarj olmaktadır).
- Isı değiştiricisinde kanat etkenliği 2,66, 3,49, 4,32 ve 5,15 olan 6, 9, 12 ve 15 adet kanatçık kullanılmasıyla ısı transfer alanı artırılmış ve iletimle olan ısı transferi de arttığı için FDM ciddi oranda hızla erimekte.
- Termal enerji depolama ünitesindeki ısı değiştiricisi tasarımlarında erime süresini %80'lere kadar azaltan kanatçıklı bir tasarım yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.
- Bu sayısal çalışmanın deneysel çalışması da yapılarak uygulanabilirliği detaylı olarak analiz edilebilir.
- Parafin dışındaki organik FDM'ler kullanılarak sayısal analizleri yapılabilir ve TED sistemindeki ısı davranışları incelenebilir.
- Bu çalışmadaki tasarım parametrelerinden farklı olarak FDM ile uyumlu yeni kanatçık tasarımları yapılarak FDM'nin erime ve katılma süreçleri incelenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Iten, M. and Liu, S., "A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air- TES systems", *Energy Conversion and Management*, 77: 608-627, (2014).
- [2] Khadiran, T., Hussein, M.Z., Zainal, Z. and Rusli, R., "Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57: 916-928, (2016).
- [3] Rathod, M.K. and Banerjee, J., "Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18: 246-258, (2013).
- [4] Chow, L.C., Zhong, J.K. and Beam, J.E., "Thermal conductivity enhancement for phase change storage media", *Heat and Mass Transfer*, 23: 91-100, (1996).
- [5] Velraj, R., Seeniraj, R.V., Hafner, B., Faber, C. and Schwarzer, K., "Heat transfer enhancement in a latent heat storage system", *Solar Energy*, 65: 171-180, (1999).
- [6] Marin, J.M., Zalba, B., Cabeza, L.F. and Mehling, H., "Improvement of a thermal energy storage using plates with paraffin-graphite composite", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48: 2561-2570, (2005).
- [7] Osterman, E., Butala, V. and Stritih, U., "PCM thermal storage system for 'free' heating and cooling of buildings", *Energy and Buildings*, 106: 125-133, (2015).
- [8] Tay, N.H.S., Bruno, F. and Belusko, M., "Comparison of pinned and finned tubes in a phase change thermal energy storage system using CFD", *Applied Energy*, 104: 79-86, (2013).
- [9] Mat, S., Al-Abidi, A.A., Sopian, K., Sulaiman, M.Y. and Mohammad, A.Y., "Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins", *Energy Conversion and Management*, 74: 223-236, (2013).
- [10] Medrano, M., Yilmaz, M.O., Nogués, M., Martorell, I., Roca, J. and Cabeza, L.F., "Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems", *Applied Energy*, 86: 2047-2055, (2009).
- [11] Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A., Sedighi, K. and Rahimi, M., "A combined experimental and computational study on the melting behavior of a medium temperature phase change storage material inside shell and tube heat exchanger", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39: 1416-1424, (2012).
- [12] Li, W. and Kong, C., "Numerical study on the thermal performance of a shell and tube phase change heat storage unit during melting process", *Advances in Mechanical Engineering*, 6: 1-7, (2014).
- [13] Jmal, I. and Baccar, M., "Numerical study of PCM solidification in a finned tube thermal storage including natural convection", *Applied Thermal Engineering*, 84: 320-330, (2015).
- [14] Cano, D., Funéz, C., Rodriguez, L., Valverde, J.L. and Sanchez-Silva, L., "Experimental investigation of a thermal storage system using phase change materials", *Applied Thermal Engineering*, 107: 264-270, (2016).
- [15] ANSYS, Inc. Fluent Theory Guide, USA, November 28, Chp:21.1-14, (2008).
- [16] Pahamli, Y., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A. and Bahrampoury, R., "Analysis of the effect of eccentricity and operational parameters in PCM-filled single-pass shell and tube heat exchangers", *Renewable Energy*, 97: 344-357, (2016).
- [17] Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*", John Wiley Sons, New York, 303-577, (2003).
- [18] Halıcı, F. and Gündüz, M., "Örneklerle ısı geçişi", Birsan Yayınevi, İstanbul, 126-168, (2007).
- [19] Çengel, Y. A. and Cimbala, J. M. "Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları" (çev.T. Engin, H. R. Öz, H. Küçük ve Ş. Çeşmeci), Güven Bilimsel Yayınevi, İzmir, 818-830, (2006).
- [20] Eslamnezhad, H. and Rahimi, A.B., "Enhance heat transfer for phase-change materials in triplex tube heat exchanger with selected arrangements of fins", *Applied Thermal Engineering*, 113: 813-821, (2017).