

Faz Değişirme ile Isı Depolamada Kullanılan Parafin-Grafit, Parafin-Kanatçık ve Saf Parafinli Yapıların Performans Analizi

Mohammad AZARİFAR¹, S. Kazım SÖMEK², Nazlı DÖNMEZER^{*3}

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara

²Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mikro Nano Teknoloji Bölümü, Ankara

³Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Geliş tarihi: 11.01.2017

Kabul tarihi: 25.09.2017

Öz

Isıl enerjiyi depolamada Faz Değiştiren Maddelerin (FDM) kullanımı en verimli yöntemlerden biridir. Değişken aralıklı erime/katılma sıcaklığına ve ortalama ısı depolama yoğunluğuna sahip ticari parafin ısı enerji depolamada en çok incelenen FDM'lerin başında gelir. Parafin FDM'ler yüksek ısı depolama kapasitelerine rağmen düşük ısı iletkenliklerinden dolayı sistemlerin ısı şarj/deşarj hızını belirgin olarak sınırlamaktadır. Parafinin ısı iletkenliğini iyileştirme amaçlı kanatçık ve parafin-grafit yapılar kullanılmaktadır. Bu çalışmada ısı iletkenlikleri geliştirilmiş parafin-grafit, parafin-kanatçık ile saf parafinli iki boyutlu yapılar ısı deşarj anında modellenerek ısı performansları bakımından birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada yapıların zamana bağlı sıcaklık dağılımları, deşarj ettikleri toplam ısı miktarı ve faz deşirme hızları belirleyici faktörler olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, parafin-kanatçık yapıların ısı performanslarının, yüksek ısı deşarj hızı ve ısı depolama kapasiteleri birlikte düşünüldüğünde, parafin-grafit ve saf parafin yapılarla karşılaştırıldığında daha gelişmiş olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Parafin, Grafit, Metal kanatçık, Faz deşiren madde (FDM)

Performance Analysis of Paraffin-Graphite, Paraffin-Fin and Pure Paraffin Structures Used in Phase Change Energy Storage

Abstract

Usage of Phase Change Materials (PCM) for storage of thermal energy is one of the most efficient methods to store thermal energy. The commercial paraffin, with a wide range of melting and solidification temperatures as well as moderate thermal storage densities, has been one of the most studied PCMs for thermal energy storage. Although the thermal storage capacity of paraffin PCMs are high, their low thermal conductivity limits the thermal charging/discharging rates considerably. The thermal conductivity of paraffin is enhanced by finned and paraffin-graphite structures. In this study, pure paraffin and thermally enhanced paraffin-graphite and paraffin-fin two-dimensional structures during thermal discharge are modeled. After modeling their thermal responses are compared with each other. The transient temperature distribution, total energy discharged and the rate of phase change are used as indicators in this comparison. The results show, considering both the thermal discharge rate and the

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Nazlı DÖNMEZER, nazli.donmezer@boun.edu.tr

storage capacities, that the thermal performance of paraffin-fin structures are superior to paraffin-graphite and the pure-paraffin structures.

Keywords: Paraffin, Graphite, Metal fin, Phase change material (PCM)

1. GİRİŞ

Güneş, rüzgâr, vb. pek çok enerji kaynağı mevsimsel, günlük ve yıllık değişimlerden ötürü düzenli bir şekilde enerji üretememektedir. Enerjinin düzenli olarak üretilebildiği durumlarda ise enerjinin tüketiminde düzensizlikler görülebilmektedir. Düzenli enerji üretiminin ve tüketiminin problem olduğu uygulamalarda enerji depolama enerji kullanımı düzenleyerek kayıpları en aza indirdiğinden ötürü oldukça önem taşımaktadır. Bazı uygulamalar için bir kaç saat gibi kısa süreli enerji depolama yeterli olurken başka uygulamalarda birkaç aylık depolama gerekebilir [1]. Isıl enerji depolama artan enerjinin depolanmasında kullanılan yöntemlerden biridir ve ısı bu uygulamalarda duyulur ve/veya gizil ısı formunda depolanır. Duyulur ve gizil ısının ısı enerji depolama için birlikte kullanılmasında faz değişim malzemeleri (FDM) kullanımı 1940'larda başlasa da, bu malzemelerin popülerliği 1970'lerin sonlarında petrol ambargosu ile başlayan enerji krizi ile artmıştır [2]. Öncelikli olarak güneş enerjisinin depolanmasında kullanılan FDM'ler sonraları enerji dağıtım şebekelerinin performans ve güvenilirliğini artırmış ve enerji tasarrufuna katkı yapmıştır [3].

Faz değişim malzemeleri organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üç ana gruba ayrılır [3]. Kullanım alanına göre FDM'lerin avantaj ve dezavantajları vardır. Organik bir FDM türü olan parafin, gizil ısı miktarının istenilen aralıkta olması, kimyasal kararlılığı, faz ayrımının olmaması ve ticari olarak bulunurluğu sebebiyle enerji depolamada kullanılan FDM'lerin başında gelmektedir [1,4,5]. Bütün bu olumlu özelliklerin yanı sıra parafin; ısı enerji depolamada etkinliği azaltacak düşük ısı iletkenliğine sahiptir [1]. Parafinin düşük ısı iletkenliği, ısı depolamada kullanılan parafinli sistemlerin ısı şarj/deşarj hızını belirgin olarak sınırlamaktadır. Parafinin ısı iletkenliğini artırmak için parafinin metal köpükler

ve kanatçık [6,7] gibi yapılarla beraber kullanılması önerilmiştir.

Bir başka iyileştirme yöntemi ise parafin ile ısı iletkenliği yüksek malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen kompozit malzemelerin parafin yerine kullanılmasıdır [8-15]. Parafin-grafit kompozit yapılar ısı iletkenliği iyileştirilmiş kompozit FDM'lere örnek olarak gösterilebilir. Daha önce farklı grafit yoğunluğu kullanılarak oluşturulan malzemelerin ısı iletkenliklerinin saf parafinden 28-40 kat fazla olduğu deneysel ve modelleme yöntemleri ile kanıtlanmıştır [12-14].

Parafin-grafit kompozit malzemeler geliştirilebilir grafit malzemelerin geliştirilmesi sonucu oluşan mikron boyutlu hava boşluklarına sahip köpük yapının içerisine eritilmiş parafin zerk ederek hazırlanır. Hazırlanması sırasında grafit yoğunluğu malzemenin özelliklerini değiştirmek üzere değiştirilebilir. Geliştirilmiş grafit soğuk sıkıştırma tekniği kullanılarak baryum hidroksit gibi inorganik FDM'ler ile birleştirildiğinde parafin-grafit yapılardan daha yüksek ısı depolayabilse de hem yüksek sıcaklıklardaki dayanıksızlığı hem de düşük ısı iletkenliği nedeniyle tercih edilmemektedir [12].

Isı iletkenliğini arttırmada parafin-grafit yapıların kullanımı uygun yapıda grafit üreten firmaların artışı ve bu tür malzeme oluşturmada yapılan araştırmalar ile yaygınlaşmaktadır. Buna rağmen kullanımı daha eskiye dayanan metal kanatçık uygulamaları da daha verimli kanatçık yapıların geliştirilmesi ve sistemlere dâhil edilmesinde yapılan geliştirmeler sayesinde halen popülerliğini korumaktadır. Daha önceki çalışmalarda parafin ve parafin-grafit [12-14] ile parafin ve parafin-kanatçık yapılar kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Isıl iletkenlikte parafin-grafit ve parafin-kanatçık yapıların saf parafinden iyi olduğu kanıtlanırsa da bu iki yöntemi birbirleriyle ve saf parafinle karşılaştırılması üzerine bir çalışma

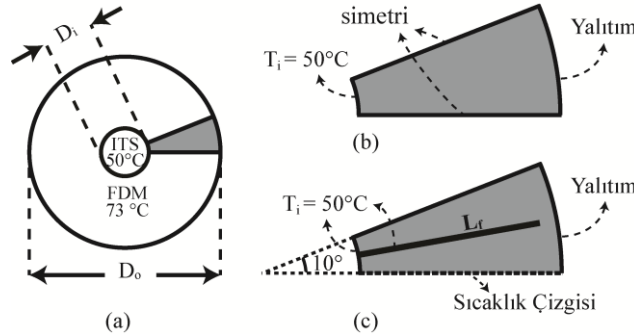
gözlenmemiştir. Literatürdeki bu eksiği doldurmak dolayısıyla parafin-grafitin parafin-kanatçık yapılara göre performansını anlamak ileride tasarlanacak enerji depolama sistemlerinde kullanılacak malzemelerin belirlenebilmesi için gereklidir.

Bu çalışmada saf parafin, parafin-grafit ve kanatçık ile iyileştirilmiş parafin çözümlerin karşılaştırmalı olarak performans analizinin faz değişiminin dâhil edildiği zamana bağlı ısı benzetimler aracılığıyla yapılması hedeflenmiştir. Isıl analizler sonucunda saf parafin, parafin-kanatçık ve parafin-grafit yapıların zamana bağlı sıcaklık dağılımları, toplam enerjilerindeki değişimleri ve faz değiştirme oranları elde edilerek, karşılaştırmaları yapılmıştır.

2. METOT

Saf parafin, parafin-kanatçık ve parafin-grafit içeren yapıların ısı performans analizini yapmak üzere uzun silindirik bir su ısıtma/soğutma

ünitesindeki ısı iletimi COMSOL Multiphysics kullanılarak modellenmiştir. Kullanılan silindirik ısı depolama ünitesinin kesiti Şekil 1(a)'da gösterilmektedir. Ünite iç içe geçmiş eş merkezli iki borudan oluşmaktadır. Yüze sıcaklığı $T_i = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ve çapı $D_i = 60\text{ mm}$ olan iç ısı transferi borusu çapı $D_o = 230\text{ mm}$ olan yalıtılmış ısı depolama borusunun içerisine yerleştirilmiştir. Isı depolamada kullanılan geometri daha önce yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ısısının depolanması ve su ısıtmada kullanılmasının araştırıldığı çalışmadan alınmıştır [9]. Isı depolama borusunun iç kısımları Şekil 1(a)'da gösterildiği gibi saf parafin veya parafin temelli FDM ile doldurulmuştur. Bu çalışma için seçilen parafin çeşidi yüksek ısı depolama kapasitesi ve uygun erime sıcaklığından dolayı Rubitherm RT65'dir. Çalışmada FDM olarak saf RT65 parafinin yanı sıra ısı iletkenliği bakımından geliştirilmiş parafin-grafit yapı da kullanılmıştır. Son olarak ısı depolama borusu yine ısı iletkenliği artırmak üzere kanatçık yapılar ile zenginleştirilmiştir.



Şekil 1. (a) Isı depolama ünitesinin kesiti. (Gri alan simetri koşulları göze alınarak modellenmesi yeterli bulunan örnek alanı temsil eder) (b) Saf parafin ve parafin-grafit (c) parafin-kanatçık yapıların analizinde kullanılan örnek alanlar

Parafin-kanatçık yapıda ısı transfer yüzeyini arttırmak üzere 10° aralıklarla toplam $N_f = 36$ adet $L_f = 80\text{ mm}$ uzunluğa sahip ince, uzunlamasına kanatçık yerleştirilmiştir geri kalan kısımlar ise RT65 saf parafin ile doldurulmuştur. Kullanılan kanatçıkların kalınlıkları ihmal edilebilir düzeyde olduğundan ısı depolama borusu içinde parafin hacmi ve kütlesi sabit tutulmuştur. Yine aynı nedenden ötürü kanatçıklar içindeki ısı iletimi ihmal edilmiş, kanatçık sıcaklığı ısı depolama

borusunun iç çeper sıcaklığına ($T_i = 50\text{ }^\circ\text{C}$) eşit sayılmıştır. Ayrıca, ısı depolama ünitesinin uzunluğu kesitine göre büyük olduğu için ünitenin uzunluğu boyunca oluşan ısı transferi ihmal edilmiş ve iki boyutlu benzetimler kullanılmıştır. Son olarak problemin kesit simetrisi de kullanılarak, problem Şekil 1(b) ve (c)'de gösterilen küçük ve analizi kolay örnek hacimlere indirgenmiştir.

Parafin-grafit yapı için geometrik bir değişiklik yapılmayıp Şekil 1(b)'de kullanılan yapı hem saf parafin hem de parafin-grafit yapıların analizi için kullanılmıştır. Şekil 1(c)'de gösterilen yapı ise parafin-kanatçık yapının analizinde kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan saf parafin (RT65) ve parafin-grafit malzemelerin malzeme özellikleri sırasıyla üretici verileri ve RT65 tabanlı parafin-grafit malzemenin araştırıldığı çalışma [12] temel alınarak elde edilmiş, Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Saf parafin ve grafit-parafin malzemenin özellikleri

	Erime Sıcaklığı T_M (°C)	Erime Aralığı ΔT_M (°C)	Isı İletkenlik Katsayısı k (W/(m·K))	Öz Isı Kapasitesi c_p (J/(kg·K))	Gizil Isı l_f (J/kg)	Öz kütle ρ (kg/m ³)
Saf Parafin (RT65*)	65	11	0,2	2000	155000	780 (sıvı) 880 (katı)
Parafin-Grafit [12]	65	4	15	1800	150000	590 (sıvı) 610 (katı)

* Rubitherm RT65 üretici verisi

COMSOL Multiphysics ısı benzetimleri kullanılarak modellenen Şekil 1(b) ve (c)'deki örnek alanların iç yüzeyi (iç boruda bulunan ısı taşıyıcı akışkanı temsilen) ve Şekil 1(c)'deki kanatçık yüzeyi sabit $T_i = 50$ °C, dış ve yan yüzeyleri ise yalıtılmış/simetri yüzeyleri olarak tanımlanmıştır. FDM ilk olarak sıvı halde $T_0 = 73$ °C'de bulunmaktadır. FDM sıcaklığı daha düşük olan ısı taşıyıcı akışkan ile etkileşime geçerek önce sıcaklık değişimi daha sonra donma daha sonra tekrar sıcaklık değişimi aşamalarından geçer. Isıl benzetimde bu üç farklı aşamayı temsil etmek ve FDM'nin faz değişimi sırasında gizil ısı depolamasını tanımlamak üzere farklı aşamalarda Eşitlik 1'deki öz ısı kapasiteleri, c_p , kullanılmıştır. Burada kullanılan varsayım malzemenin donma öncesi ve sonrasında öz ısı kapasitesini koruduğudur. Donma esnasında gizil ısının depolanması için bir erime aralığı, ΔT_M , tanımlamak kullanılan bir yöntemdir.

Bu modele göre öz ısı kapasitesi erime aralığında faz değişiminde gizil ısı ile depolanan enerji kadar artırılır. Eşitlik 1'deki öz ısı kapasiteleri aynı zamanda sistemin toplam enerji seviyesinin hesabı için de kullanılmaktadır.

Aynı zamanda donmanın ne oranda gerçekleştiğini anlamak için de katı ve sıvı fazlara Eşitlik 2'deki gibi farklı öz kütleler tanımlamak yeterli olmaktadır. Saf-parafin için katı ve sıvı öz kütleleri değişiklik göstermektedir ve üretici verisi kullanılarak modellenmiştir. Parafin-grafit yapıda erime sırasında daha az bir öz kütle değişimi olmaktadır. Bunun nedeni grafit yapının faz değiştirmemesi sadece parafinin donmasıdır. Buna rağmen donma oranını tanımlamak üzere katı ve sıvı için Çizelge 1'deki değerler tanımlanmıştır. Donma öncesinde ve sonrasında öz kütle Eşitlik 2'deki gibidir.

$$c_p = \begin{cases} c_p & T < (T_M - \frac{\Delta T_M}{2}) \\ c_p + l_f / \Delta T_M & (T_M - \frac{\Delta T_M}{2}) < T < (T_M + \frac{\Delta T_M}{2}) \\ c_p & (T_M + \frac{\Delta T_M}{2}) < T \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho = \begin{cases} \rho_l & T \leq T_M \\ \rho_s & T_M < T \end{cases} \quad (2)$$

İstenilen anda sistemin ortalama öz kütlesi bulunarak ve Eşitlik 2'deki öz kütleler kullanılarak sistemde donma miktarı bulunabilmektedir. Isıl benzetimler örnek hacimde sabit sıcaklığa gelinene kadar devam ettirilmiştir. Benzetimler sonucunda

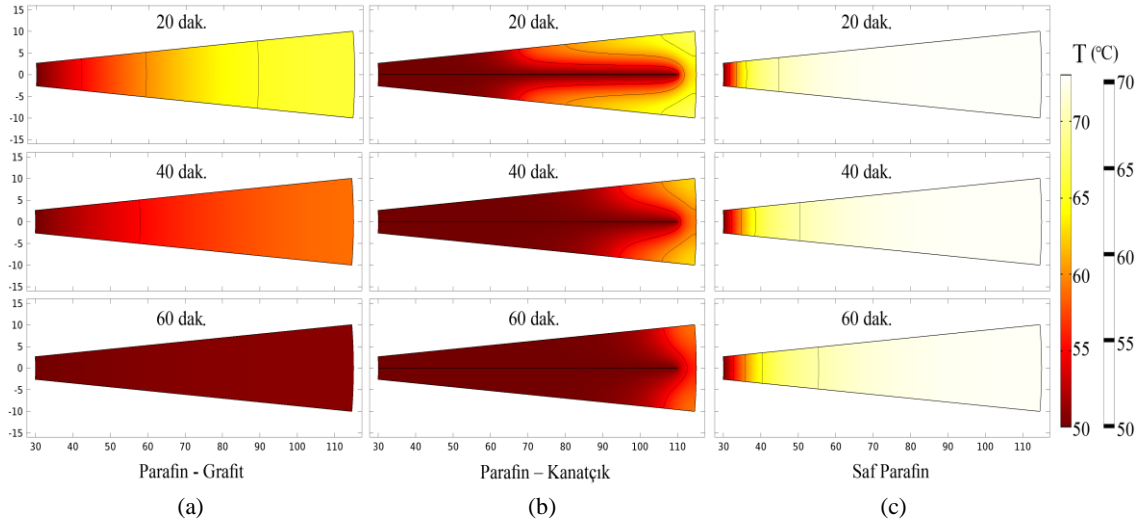
elde edilen sonuçlar bir sonraki kısımda gösterilmektedir.

3. SONUÇLAR

3.1. Sıcaklık Analizi

Parafin-grafit, parafin-kanatçık ve saf parafin FDM kullanılan Şekil 1(b) ve (c)'de gösterilen örnek alanlar modellenerek zamana bağlı sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Şekil 2'de bu yapılarda 20, 40 ve 60. dakikalarda oluşan sıcaklık dağılımları verilmektedir. Bu dağılımlara bakıldığında Şekil 2(a) ve (b)'deki kanatçık

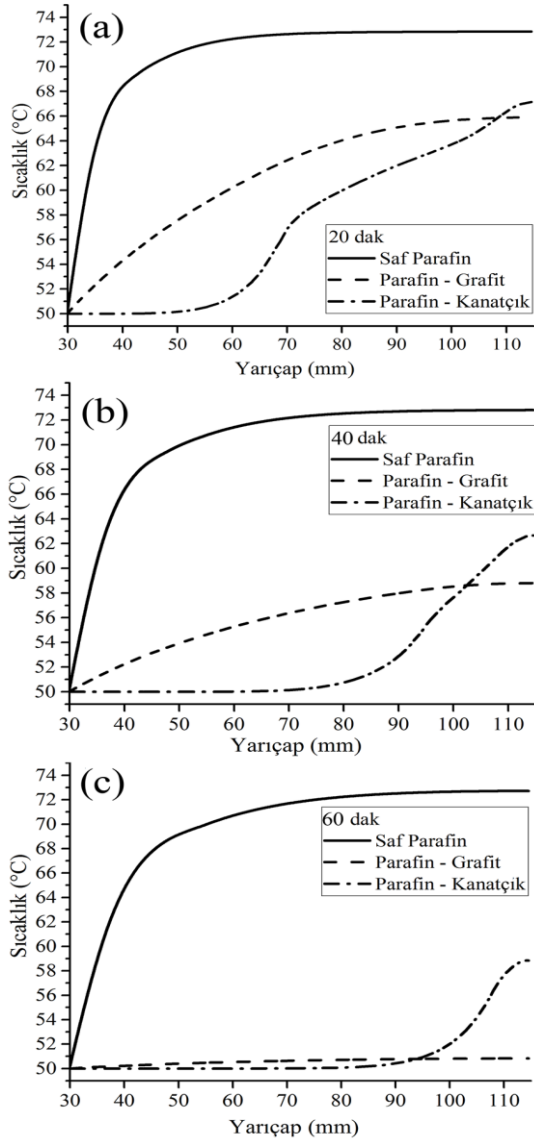
olmayan yapılarda, ısı dağılımı dolayısıyla da faz değişimi iç çeperden dış çepere doğru düzenli bir şekilde olmaktadır. Buna rağmen Şekil 2(b)'de gösterilen, kanatçık kullanılan yapıda sıcaklık dağılımı ve faz değişimi sadece iç çeperden dış çepere doğru olmamakta, kanatçık yüzeylerinden dışarıya doğru da olmaktadır. Bunda kanatçık yapının çok ince ve yüksek ısı transferi katsayısına sahip olduğunu varsaymaktan doğan sabit sıcaklık sınır koşulu büyük rol oynamaktadır. Kanatçığın doğrudan temasta bulunduğu FDM'nin sıcaklığını değiştirmesi ve faz değişimini başlatması kanatçıkla yapıların faz değiştirme hızını arttırmakta başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. (a) Parafin-Grafit (b) Parafin-Kanatçık ve (c) Saf Parafin ısı depolama ünitelerindeki 20, 40 ve 60 dakikalardaki sıcaklık grafikleri

Ayrıca Şekil 2'de 40. dakikada farklı yapıların sıcaklık dağılımlarına bakıldığında parafin-grafit ve parafin-kanatçık yapıların neredeyse tamamının sıcaklığının erime/donma sıcaklığı olan $T_M=65$ °C altına düştüğü fakat saf-parafinli yapının büyük kısmının sıcaklığının erime sıcaklığının üstünde olduğu görülebilmektedir. Bu saf-parafinli yapının büyük kısmının henüz donmasını tamamlayamadığını göstermektedir. Bunun nedeni, Çizelge 1'de verilen saf parafinin, parafin-grafit malzemeden neredeyse 30 kat düşük ısı iletim katsayısıdır. Düşük ısı iletim katsayısı ısının parafin içerisinde verimli bir şekilde dağılmasını

engelleyerek soğumayı yavaşlatır. Isı transferi modülündeki sıcaklık değişimini daha iyi anlamak için ısı depolama alanı içerisinde ısı transferi sıvısını olduğu iç çeperden yalıtılmış dış yüzeye kadar olan sıcaklık dağılımları Şekil 1'de gösterilen sıcaklık çizgisi boyunca farklı zamanlarda elde edilmiştir. Elde edilen çizgisel sıcaklık dağılımları Şekil 3'de verilmiştir. Sıcaklık çizgisi kanatçık yapıda komşu kanatçıkların tam ortasından geçecek şekilde konumlandırıldığı için kanatçık yapılarda ısı transferinin en yavaş olduğu bölgelere denk gelmektedir.



Şekil 3. (a) 20 (b) 40 ve (c) 60'inci dakikalarda saf-parafin, parafin-grafit ve parafin-kanatçık FDM kullanılan ısı transfer modülünde yarıçap boyunca sıcaklık çizgisi üzerindeki sıcaklık değişimi

Şekil 3'de görüldüğü üzere saf parafinli yapıda sıcaklık çoğu bölgede uzun süre sabit kalmaktadır ve çok yavaş azalmaktadır. Buna rağmen Şekil 3(c)'de görüldüğü üzere, parafin-grafit yapıda birinci saatin sonuna gelindiğinde mümkün olan sıcaklık değişiminin neredeyse tamamı

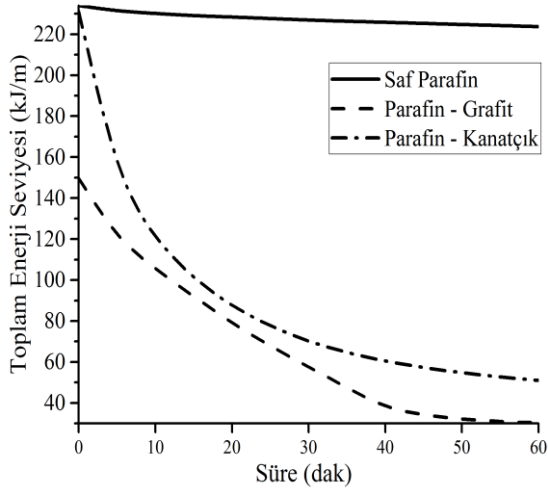
geçirilmiş tüm parafin-grafit yapı ITS'nin sıcaklığına (50°C) ulaşmıştır.

Kanatçık yapıda ise kanatçıklardan gelen ısı iletimi etkisiyle daha karmaşık bir sıcaklık dağılımı görülmektedir. Aslında ilk 40 dakikada parafin-kanatçık yapının sıcaklık değişimi, Şekil 3(b) ve (c)'den de anlaşılacağı gibi çok hızlı olsa da bir saate yaklaşıldığında kanatçık etkisi azalır ve ısının kanatçıklardan uzak olan köşe noktalarından transferi önem taşımaya başlar. Bunun sonucunda ısı transferi yavaşlamaya başlar. Parafin-grafit yapıda ısı iletkenliği her yerde yüksek olduğu için zamanla ısı transferinin yavaşlaması parafin-kanatçık yapıdaki kadar fazla olmaz ve bir süre sonra parafin-grafit yapı parafin-kanatçık yapı ile aynı performansa ulaşır ve onu geçer. Bunun sonucu olarak, ortalama bir saat gibi bir sürede parafin-grafit yapının katılması tamamlansa da parafin-kanatçık yapı bu sırada hala donmasını tamamen tamamlayamamış olur.

3.2. Enerji Analizi

Isı depolama ünitesinin soğuma ve donma ile enerjisi ITS'na aktarma hızını, bir başka değişle deşarj hızını anlamak üzere ısı depolama modülünün toplam enerji seviyesinin zamana bağlı değişimleri Eşitlik 1'de verilen öz ısı kapasiteleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 4'de gösterilmektedir.

Şekil 4'de gösterildiği üzere saf parafinin toplam enerji seviyesinde ilk bir saatlik dilimde ciddi bir düşüş görülmemektedir. Bu saf-parafinin bir saatlik süre içerisinde enerji deşarjının yeterli seviyede olmadığını ve saf parafinli yapıda depolanan enerjinin deşarjı için daha fazla beklenilmesi gerektiğini gösterir. Buna rağmen, bir saatin sonunda parafin-kanatçık ve parafin-grafit yapılarında tatmin edici bir ısı deşarjı olduğu görülmektedir. Parafin-kanatçık yapının toplam enerji seviyesindeki azalmaya bakıldığında, deşarj hızının ilk başlarda çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç kanatçıkların başlarda daha etkin olduğunu destekler niteliktedir. Parafin-grafit yapı ise 50 dakika sonunda maksimum deşarj seviyesine ulaşmıştır ve görevini tamamlamıştır.



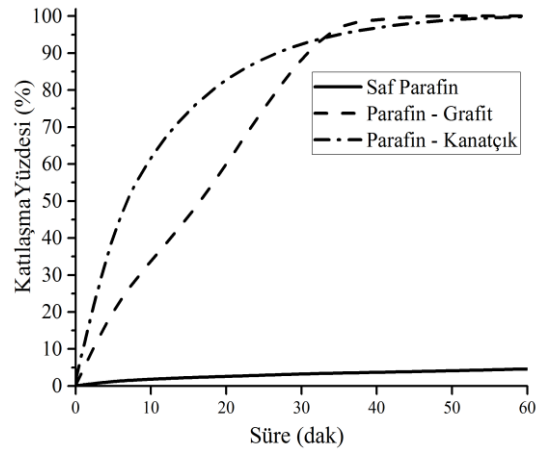
Şekil 4. Farklı sürelerde ısı depolama modülü içerisinde depolanan toplam enerji seviyesi

Burada önemli nokta Şekil 4'de görüldüğü üzere, saf-parafin ve parafin-kanatçık yapıların başlangıç enerji seviyesinin parafin-grafite göre daha fazla olmasıdır. Bu farklılığın nedeni aynı hacme sahip parafin-grafit yapının içerdiği parafin kütlesinin saf parafin içeren yapınınkinden az oluşudur. Parafin-grafit yapının bir kısmı ısıyı depolama özelliği ile bilinen parafinden oluşsa da bir kısmı grafit malzeme ile dolu olduğundan malzemenin hacimsel öz ısı kapasitesi Çizelge 1'de görüldüğü üzere saf parafinden düşüktür. Bu nedenden ötürü bütün yapılarda modellemeye FDM'nin başlangıçta sabit sıcaklıkta ($T_0 = 73 \text{ }^\circ\text{C}$) olduğu varsayımı ile başlandığında, yapıların başlangıçta depoladıkları ısıl enerji farklılaşmaktadır. Depolanan ısı miktarını artırmak için daha büyük hacimli yapılar kullanılması da ısı iletiminin olumlu etkilerini azaltacaktır. Parafin-kanatçık yapıda kanatçıkların ihmal edilebilir incelikte olduğu varsayımından dolayı aynı hacimdeki parafin miktarı değişmediğinden bu sorun görülmemektedir.

Özetle parafin-grafit yapılar en hızlı deşarj süresine sahip olsa da aynı sıcaklıkta hacim başına depolayabildiği enerji saf parafin ve parafin-kanatçık yapılardan daha düşük olacaktır. Bu da parafin-kanatçık yapıların özellikle son etapta performansının yavaşlamasına rağmen

depolayabildiği ısı miktarı ve hızlı deşarj özellikleri açısından en uygun yapı olduğunu göstermektedir.

Son olarak saf parafin, parafin-grafit ve parafin-kanatçık yapılar bulunduran ısı depolama ünitelerinde zamana bağlı katılma yüzdeleri Şekil 5'de gösterilmektedir. Katılma yüzdesinin hesaplanması daha öncede bahsedildiği üzere Eşitlik 2'deki öz kütle değişimleri kullanılarak gerçekleştirilir. Şekil 5'de görüldüğü üzere parafin-kanatçık yapılarda toplam katılma yüzdesi ilk zamanlarda oldukça yüksektir. Bir süre sonra kanatçıkların etkisinin azalmasıyla kanatçıklara uzak köşe noktalarda donma zorlaşır ve parafin-grafit yapıdaki katılma yüzdesi parafin-kanatçık yapınıninkine 30 dakikadan sonra yaklaşır. Daha önce bahsedildiği üzere ısıl modellemeye gizil ısının etkisini erime aralığı (ΔT_M) tanımlayarak modele dâhil ettiğimiz için katılma saf parafinli ve parafin-kanatçık yapılar için $\Delta T_M=11^\circ\text{C}$ 'lik bir aralıkta sabit artışlı gerçekleşmektedir. Bu varsayımlar nedeniyle gerçek katılma yüzdesi Şekil 5'de verilen değerlerden farklılık gösterebilse de Şekil 5 katılma yüzdesinin değişimi ile ilgili yeterli bilgiyi vermektedir.



Şekil 5. Saf parafin, parafin-grafit ve parafin-kanatçık yapılarda zamana bağlı katılma yüzdesi

Sonuç olarak aynı hacme sahip ısı depolama alanı için saf-parafin, parafin-grafit, parafin-kanatçık

yapıların üçünün de birlikte karşılaştırıldığı bu çalışma ile:

- Parafin-kanatçık yapının ısı transferini iyileştirerek donma ve deşarj hızının artmasını sağladığı,
- Benzer bir iyileştirme parafin-grafit yapıda görülse de parafin-kanatçık yapının aynı hacimde daha fazla ısı depolayabildiği,

anlaşılmıştır. Bu nedenle çalışmada kullanılan şekilde parafin-kanatçık yapının depolama amaçlı kullanılmada en uygun seçenek olduğu görülmektedir. Farklı uygulamalar için kanatçık sayısını ve uzunluğunu değiştirmek ile benzer performanslar elde etmek mümkün olacaktır. Öte yandan parafin-grafit yapıların ısıl özelliklerini değiştirmek grafit öz kütlelerini değiştirmek ile mümkün olsa da bu konuda yapılacak değişiklikler daha sınırlıdır.

4. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başında parafin-grafit yapılar ile ilgili bilgiler ve yardımlarından ötürü Anne Mallow'a teşekkürlerimizi sunarız.

5. KAYNAKLAR

1. Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack, S.A.K., Al-Hallaj., S., 2004. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications, Energy Conversion and Management, vol. 45, no. 9–10, 1597–1615.
2. Sharma, S.D., Kitano, H., Sagara, K., 2004. Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal Applications, Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ., vol. 29, 31–64.
3. Rathod, M.K., Banerjee, J., 2013. Thermal Stability of Phase Change Materials Used in Latent Heat Energy Storage Systems: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 18, 246–258.
4. Sari, A., Karaipekli, A., 2008. Preparation, Thermal Properties and Thermal Reliability of Capric Acid/expanded Perlite Composite for Thermal Energy Storage, Mater. Chem. Phys., vol. 109, no. 2–3, 459–464.
5. Zalba, B., 2003. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications, Appl. Therm. Eng., vol. 23, no. 3, 251–283.
6. Sciacovelli, A., Guelpa, E., Verda, V., 2014. Second Law Optimization of a PCM Based Latent Heat Thermal Energy Storage System with Tree Shaped Fins, Int. J. Thermodyn., vol. 17, no. 3, 127–136.
7. Sciacovelli, A., Gagliardi, F., and Verda, V., 2015. Maximization of Performance of a PCM Latent Heat Storage System with Innovative Fins, Appl. Energy, vol. 137, 707–715.
8. Nallusamy, N., Sampath, S., Velraj, R., 2006. Study on Performance of a Packed Bed Latent Heat Thermal Energy Storage Unit Integrated with Solar Water Heating System, J. Zhejiang Univ. Sci. A, vol. 7, no. 8, 1422–1430.
9. Singh, D., Zhao, W., Yu, W., France, D.M., Kim, T., 2015. Analysis of a Graphite Foam–NaCl Latent Heat Storage System for Supercritical CO₂ Power Cycles for Concentrated Solar Power, Sol. Energy, vol. 118, 232–242.
10. Kim, T., France, D.M., Yu, W., Zhao, W., Singh, D., 2014. Heat Transfer Analysis of a Latent Heat Thermal Energy Storage System using Graphite Foam for Concentrated Solar Power, Sol. Energy, vol. 103, 438–447.
11. Moeini Sedeh, M., Khodadadi, J.M., 2013. Thermal Conductivity Improvement of Phase Change Materials/graphite Foam Composites, Carbon N. Y., vol. 60, 117–128.
12. Haillot, D., Py, X., Goetz, V., Benabdelkarim, M., 2008. Storage Composites for the Optimisation of Solar Water Heating Systems, Chem. Eng. Res. Des., vol. 86, no. 6, 612–617.
13. Haillot, D., Nepveu, F., Goetz, V., Py, X., Benabdelkarim, M., 2012. High Performance Storage Composite for the Enhancement of Solar Domestic Hot Water Systems. Part 2: Numerical System Analysis, Sol. Energy, vol. 86, no. 1, 64–77.
14. Haillot, D., Goetz, V., Py, X., Benabdelkarim, M., 2011. High Performance Storage Composite for the Enhancement of Solar Domestic Hot Water Systems. Part 1: Storage Material Investigation, Sol. Energy, vol. 85, no. 5, 1021–1027.

15. Mills, A., Farid, M., Selman, J.R., Al-Hallaj, S., 2006. Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Materials Using a Graphite Matrix, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 14–15, 1652–1661.

