

SİLİNDİRİK KOORDİNATLARDA FAZ DEĞİŞİMLİ ISIL ENERJİ DEPOLAMA: BİR BOYUTLU SAYISAL İNCELEME

(THERMAL ENERGY STORAGE WITH PHASE CHANGE IN CYLINDRICAL COORDINATES: ONE DIMENSIONAL NUMERICAL INVESTIGATION)

Muhammet ÖZDOĞAN¹, Mehmet Akif EZAN², Aytunç EREK³

ÖZ

Bu çalışmada, boru-kovan tipi bir ısı değiştiricisi şeklinde tasarlanan faz değişimli gizli ısı enerji depolama sistemi için bir-boyutlu matematiksel bir model oluşturulmuştur. Modelin doğruluğunu kontrol etmek için basitleştirilmiş analitik çözüm ile karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Değişen ısı transfer akışkanı sıcaklığı ve boru malzemeleri için zamana bağlı ara-yüzey ilerlemeleri ve yerel sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sonuç olarak, PE-32 gibi düşük ısı iletim katsayısına sahip boru malzemelerinin kullanılması durumunda depolanan enerji miktarının önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Faz değişimi, Isıl enerji depolama, Silindirik koordinatlar, Sıcaklık dönüşüm metodu

ABSTRACT

In this study, a one-dimensional mathematical model is developed for a latent heat thermal energy storage system that is designed as a shell-and-tube heat exchanger. In order to reveal the validity of the model, comparisons are conducted with a simplified analytical solution. Time-wise variation of interface position and the local temperature distributions are obtained for various heat transfer fluid temperatures and pipe materials. As a result, it is obtained that the performance of the heat storage system considerably reduces by using pipe materials with lower thermal conductivity, such as PE-32.

Keywords: Phase change, Thermal energy storage, Cylindrical coordinates, Temperature transforming method

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, SAMSUN, muhammet.ozdogan@omu.edu.tr (Sorumlu Yazar)

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İZMİR, mehmet.ezan@deu.edu.tr

³ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İZMİR, aytunc.erek@deu.edu.tr

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun ve yaşam standartlarının yükselmesine paralel olarak tüketilen toplam enerji miktarı önemli ölçüde artmaktadır. Enerji üretiminde yüksek oranda kullanılan fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve bu tür yakıtların kullanımı sonucu açığa çıkan atıkların çevreye verdiği olumsuz ve geri dönüşü mümkün olmayan etkilerden dolayı yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması ve mevcut enerji kaynaklarının verimli olarak kullanılması gerekmektedir. Enerji depolama uygulamaları enerjinin verimli kullanımının önünü açtığından, fosil yakıt tüketimini azaltmakta ve böylece yenilenebilir enerji kaynakları bulmak kadar katkı sağlayabilmektedir. Farklı enerji depolama stratejilerinin uygulanmasıyla birlikte arz talep dengesizliği ortadan kaldırılabılır, mevcut bir sistemin enerji verimliliği iyileştirilebilir ve enerji tüketiminde azalma elde edilebilir.

Enerji mekanik, elektriksel veya ısı gibi farklı formlarda depolanabilmektedir. Uygulamadaki kolaylığından dolayı ısı enerji depolama yaygın olarak kullanılan bir enerji depolama yöntemidir. Bir sistemin sahip olduğu ısı enerjisi, duyulur, gizli ve kimyasal olmak üzere üç şekilde depolanabilir (veya geri kullanılabilir). Duyulur ve gizli ısı enerji depolama yöntemleri uygulamada en çok tercih edilen ısı enerji depolama yöntemleridir. Duyulur ısı enerji depolama uygulamalarında sistemin iç enerji değişimi sadece sıcaklık değişimiyle sağlanmaktadır. Gizli ısı enerji depolama uygulamalarında ise sıcaklık değişiminin yanı sıra faz değişim gizli ısılarından yararlanılmaktadır. Gizli ısı enerji depolama uygulamalarında kullanılan depolama malzemesinin faz değiştirmesinden dolayı depolama ortamı faz değişim malzemesi (FDM) olarak isimlendirilir. Mühendislik uygulamalarında FDM küçük kapsüller içerisinde veya içinde ısı değiştirgeci barındıran sürekli hacimler içerisinde bulunabilir. FDM'nin küçük kapsüllere doldurulması durumunda kullanılan kapsüllerin cidarları, faz değişim işleminde meydana gelecek hacim değişimlerinde etkilenmemesi için ince ve esnek olarak imal edilmektedir. Kapsüller küre, silindir veya küp şeklinde farklı geometrilere üretilmektedir. Kapsüllerin kullanılması sonucunda faz ayrışması sorunu önemli oranda azalmaktadır. Ayrıca kapsüllü enerji depolama sistemleri tekrarlanan depolama ve geri kullanım çevrimlerine oldukça uygundur. Sıralanan tüm bu avantajlarına rağmen yüksek maliyetlerinden dolayı kapsül uygulamaları sınırlıdır. FDM'nin sürekli hacim içerisinde bulunması durumunda ise kullanılan ısı değiştiricisinin tasarımı ve çalışma parametreleri önem arz etmektedir. Sürekli hacim uygulamalarında FDM'nin hacmi optimum kullanılmalı, faz değişim işlemi homojen olarak gerçekleşmeli ve sistemin çalışma parametreleri istenilen sıcaklıkta ve yükte olmalıdır. Bu koşulların sağlanması için ısı değiştiricisinde, genişletilmiş yüzeylerin kullanımı, boru çapının veya boru malzemesinin değiştirilmesi gibi iyileştirmeler yapılabilmektedir.

Gizli ısı enerji depolama, soğutma amaçlı kullanılmak üzere, soğu depolama ve ısıtma amaçlı kullanılmak üzere ısı depolama diye iki şekilde gerçekleşebilir. Koca vd. ısıtma amaçlı gizli ısı depolama sistemini incelemiştir [1]. Güneş kolektörü içerisinde bulunan ve erime sıcaklığı 29 °C olan FDM, gündüz güneşten almış olduğu ısı ile eriyerek bu ısıyı depolamaktadır. Akşam saatlerinde ise depolanan ısı enerjinin geri kullanılması amacıyla kolektör içindeki ısı değiştirgecinden 29°C'den daha düşük bir sıcaklıkta geçirilen ısı transferi akışkanı (ITA) ile FDM tekrar katılaştırılmaktadır. Bu süre zarfında ITA'ya geçen ısı, ısıtma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Isı, güneş kolektörlerine ilave ısı değiştiricileri yardımıyla doğrudan depolanabilmektedir, öte yandan soğu enerjisinin depolanabilmesi için genellikle soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. MacPhee ve Dinçer ise soğu depolama uygulaması olarak erime sıcaklığı ortam sıcaklığından daha düşük olan FDM kullanmışlardır

[2]. Soğutma sisteminden $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de çıkan ITA faz değişim sıcaklığı $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan suyun içerisindeki ısı değiştiricisinden geçirilerek suyun katılaşması sağlanmakta ve böylelikle soğu enerjisi buz olarak depolanmaktadır.

Erime ve katılaşma problemlerinin incelendiği çalışmalar, iki alt grupta değerlendirilebilir. Birinci grup çalışmalar, küresel veya silindirik geometriler içerisindeki ısı transferi sürecinin mikro düzeyde deneysel veya sayısal incelendiği ve doğal taşınım etkilerinin detaylarıyla ortaya konulduğu araştırmalar yer almaktadır [3–12]. Tan vd. küresel kapsül içerisindeki doğal taşınımlı faz değişim problemini FLUENT paket programı yardımıyla sayısal olarak incelemiş ve zamana bağlı ara-yüzey profili değişimlerini, gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar ile doğrulamışlardır [3]. Elde edilen sonuçlar ışığında, küre içerisinde iletim ve taşınımın baskın olduğu iki farklı ısı transfer bölgelerinin oluştuğu görülmüştür. Esapour vd. çok tüplü ısı değiştiricisindeki erime sürecini nümerik olarak incelemişlerdir [4]. İç tüpün toplam kesit alanını sabit tutacak şekilde değişen boru sayısının faz değişimi ve doğal taşınım etkisini incelemişlerdir. Ek olarak giriş sıcaklığının ve akışkan debisinin ısı transferine etkilerini de araştırmışlardır. Sonuçlara bakıldığında, akışkan debisinin giriş sıcaklığının ve içerdeki boru sayısının artması ile erime süresinin kısaldığı görülmüştür. İsmail ve Silva, yatay bir silindir çevresindeki erime sürecini sabit yüzey sıcaklığı için sayısal olarak modellemişlerdir [5, 6]. Erimenin ilk süreçlerinde, iletimin baskın olduğu simetrik bir ısı transferi söz konusuysen, ilerleyen zamanlarda, taşınım etkilerinin artmasıyla asimetrik bir buz profili ve açığa bağlı değişen Nusselt dağılımının olduğu gözlenmiştir. Agyenim vd. deneysel çalışmada düz boru ile dairesel ve boyuna kanatlı borular için, erime periyodu boyunca meydana gelen radyal, açısız ve aksel sıcaklık dağılımlarının farklılaşmasını incelemişlerdir [7]. Hosseini vd. FDM olarak parafinin kullanıldığı boru-kovan tipi gizli enerji depolama sisteminde, ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığının etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir [8]. Sonuç olarak, erime ve katılaşma süreçlerinde, ısı transfer akışkanının farklı giriş sıcaklıkları için parafinin sıcaklığının ve faz ara yüzeyinin konumunun zamana göre değişimini vermişlerdir. Khodadadi ve Zhang ise küre içerisindeki erime sürecini farklı Rayleigh, Stefan ve Prandtl sayıları için sayısal olarak incelemişlerdir [9]. Sayısal sonuçların doğrulanması amacıyla da buz profillerini fotoğrafla karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre, Rayleigh sayısının artması ile buzun asimetrik eridiği, Prandtl sayısının artması ile de erimenin simetrik yapıda gerçekleştiği gözlenmiştir. Seddegh vd. boru-kovan tipi gizli ısı depolama sisteminin yatay ve dikey konumlandırılmasında doğal taşınım etkilerini gözlemlemek için sayısal bir model geliştirmişlerdir [10]. Geliştirilen modelle depolama ve geri kullanım süreçlerindeki faz ve sıcaklık dağılımının zamanla değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, yatay durumda sistemin daha etkin olduğu görülmektedir. Christenson ve Incropera $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ şeffaf FDM'nin farklı konsantrasyon oranları için boru-kovan tipi ısı değiştiricisi içerisindeki katılaşma sürecini deneysel olarak incelemişlerdir [11]. Boru çevresindeki radyal ve açısız sıcaklık değişimlerini tespit etmek amacıyla 45° açıyla üç hat boyunca 12° 'şer ısı çift kullanılmıştır. Buz profillerinin elde edilmesi için gölgeli çekim (*shadowgraph*) ve fotoğraflama yöntemleri kullanılmıştır. Burada ikili kompozisyondan dolayı oluşan ısı tabakalaşma ve doğal taşınım bölgeleri görsel olarak çözümlenmiştir. Webb vd. silindirik kapalı hacim içerisindeki buzun dıştan erimesini farklı yüzey sıcaklıkları için deneysel olarak incelemişlerdir [12]. Burada buz sabitlenmemiş ve erime boyunca kaldırma kuvveti etkisiyle oluşan buz hareketi ve iç doğal taşınım oluşumları görsel olarak elde edilmiştir.

İkinci grup çalışmalarda ise, depolama sisteminin genelde bir bütün olarak alındığı ve iç değişimlerden çok belli başlı çalışma ve tasarım parametrelerin makro düzeyde depolama ve

geri kullanım performanslarına etkilerinin incelendiği araştırmalar yer almaktadır [2, 13–24]. Medrona vd. ise yaygın olarak kullanılan beş farklı ısı değiştiricisi tasarımı için katılma ve erime süreçlerini deneysel olarak incelemişlerdir [13]. Tasarımın yanı sıra, ikincil akışkanın giriş sıcaklığı ve debisi gibi çalışma parametrelerinin de depolama/erime süresine ve depolanan/geri kullanılan enerjiye etkileri de ortaya konulmuştur. Ereğ ve Dinçer ise tek borulu ısı enerji depolama sisteminin enerji ve ekserji analizini katılma süreci için sayısal olarak incelemişlerdir [14]. İkincil akışkanın farklı giriş sıcaklığı ve debisi ile birlikte boru uzunluğu ve kovan çapının da farklı değerleri için boyutsuz hesaplamalar gerçekleştirilerek, depolanan enerjinin ve enerji-ekserji verimlerinin değişimlerini incelenmişlerdir. Burada, ısı transferi açısından ikincil akışkanın giriş sıcaklığının Re sayısına göre daha etkin olduğu ve kovan çapı ile boru uzunluğunun azalmasıyla birlikte boyutsuz ısı transferinin azaldığı gözlenmiştir. Entropi üretiminin ise kovan çapının artmasıyla yükseldiği, ancak boru uzunluğu ve Re sayısına göre etkilenmediği ortaya konulmuştur. Habeebullah yatay 6,4 m ve 12,3 m uzunluktaki iki ayrı tek borulu sistem ile gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarda farklı akışkan debileri için aksel sıcaklık değişimini ve buz oluşumunu incelemiştir [15]. Elde ettiği sonuçlara göre, yüksek akışkan debileri için boru eksen boyunca buz kalınlığı çok az değişmekle birlikte, dirsek geçişlerinde akışın türbülans etkileri nedeniyle buz kalınlığında bölgesel artış olmaktadır. Ayrıca düşük akışkan debilerinde de aksel yönde buz kalınlığı önemli biçimde azalmakta ve dirsek geçişlerindeki bölgesel buz kalınlığı artışları daha etkin olmaktadır. Wang vd. boru-kovan tipi gizli enerji depolama sisteminde kullanılan dairesel kanatçıkların yapısının etkisini nümerik olarak incelemişlerdir [16]. Parametre olarak, kanatçıkların yüksekliğini, kanatçıklar arasındaki mesafeyi, kanatçık kalınlığını, kovan çapını ve uzunluğunu, Reynolds sayısının ve akışkan sıcaklığının etkilerini incelemişlerdir. MacPhee ve Dinçer silindirik, küresel ve prizmatik kapsüllerde, giriş sıcaklığının ısı geri kullanımına etkisini sayısal olarak incelenmiş ve sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslayarak doğrulamıştır [2]. Sonuçlara göre, giriş sıcaklığının artması enerji verimini artırırken ekserji verimini azaltmıştır. Silindirik kapsüllerin enerji verimi en düşük, prizmatik kapsüllerin enerji verimi en yüksek çıkmasına karşın prizmatik kapsüllerin ekserjitik verimleri ise en düşük çıkmıştır. Ereğ ve Ezan serpantinli soğuk depolama sisteminin depolama performansına ikincil akışkanın giriş sıcaklığının ve debisinin etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir [17]. İkincil akışkan debisinin giriş sıcaklığına nazaran depolanan enerji üzerine çok daha etkili olduğu ortaya konulmuştur. Li vd. yapmış oldukları çalışmada, boru-kovan tipi gizli ısı depolama sistemindeki FDM'nin bulunduğu hacmi, yatay olarak üç hacme bölüp iki-boyutlu olarak modellemişlerdir [18]. Bölünmüş hacimlerin her birine erime noktaları birbirinden farklı ve yüksek olan üç farklı FDM yerleştirilerek çalışma koşullarının ve geometrik parametrelerinin sistemin performansına etkilerini incelemişlerdir. Trp, dikey boru-kovan tipi enerji depolama sisteminde ikincil akışkanın sıcaklığı ve debisiyle birlikte boru uzunluğu ve kovan çapının depolanan ve geri kullanılan enerjilere etkisini sayısal olarak incelemişlerdir [19]. Giriş sıcaklığındaki değişimin hem katılma hem de erime etkili olduğu saptanmıştır. Ancak ikincil akışkan debisinde meydana gelen değişimlerin sadece katılma için kayda değer bir değişime yol açtığı gözlenmiştir. Bunun yanında boru uzunluğunun/kovan çapının artırılmasıyla, depolanan/geri kullanılan enerjinin de arttığı ortaya konulmuştur. Ereğ vd. tarafından gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalarda ise yatay düz boru ile birlikte çeşitli çap, sayı ve aralıklara sahip kanatlı boruların depolama davranışına etkisi incelenmiştir [20]. Farklı geometrilerin yanında giriş sıcaklığı ve Re sayısının farklı değerleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçta kanat aralığının ve çapının artmasıyla depolanan enerjinin arttığı, bunun yanında artan Re ve Stefan sayılarının da depolanan enerjiyi olumlu etkilediği bulunmuştur. Lacroix dikey olarak yerleştirilmiş boru-kovan tipi enerji deposu içerisindeki parafinin erime sürecini deneysel ve sayısal olarak farklı akış koşulları ve geometrileri için

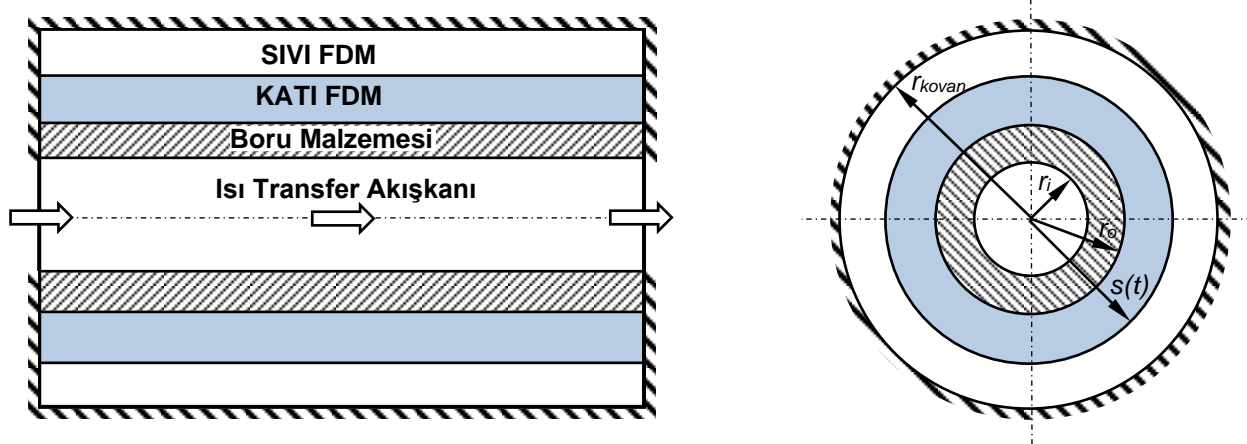
incelemiştir [21]. Erime sırasında meydana gelen doğal taşınım etkilerini eşdeğer ısı iletim katsayısı kabulü yaparak hesaplamalarına dâhil etmiştir. Abhat kanatlı ısı borusu şeklindeki enerji deposunun depolama ve erime davranışını incelemek için prototip sistem üzerinde araştırmalarda bulunmuştur [22]. Burada borunun akış yönünde ve çevresinde oluşan farklılaşmaları incelemek için üç kesitte toplam 86 ısı çift kanatlar üzerine yerleştirilmiş ve böylece değişimler incelenmiştir. Augspurger ve Udaykumar ise karmaşık geometrilere sahip gizli ısı enerji depolama sistemleri için dinamik ağ yapısına sahip yeni bir yöntem geliştirmiştir [23]. Yöntemde doğal taşınım etkilerinin hassas belirlenmesi için katı yüzeyler üzerindeki kontrol hacmi sayısı dinamik olarak değiştirilmekte ve geometrik olarak karmaşık sistemlerin modellenmesine imkan sağlanmaktadır. Fan vd. erime sıcaklığı 22 °C olan C₁₂H₂₆O (dodekanol) içerisine grafit nano-plakalar dağıtarak nano-katkılı FDM'nin küresel kapsül içerisindeki erime davranışını deneysel olarak incelemiştir [24]. Elde edilen sonuçlara göre nano-katkısı ile FDM'nin ısı iletim katsayısının % 50'ye varan oranda yükseltiği ve malzemenin ısı özelliklerinde meydana gelen değişimlerin kapsül içerisindeki ısı transferi davranışını önemli ölçüde değiştirdiği belirlenmiştir. Artan ısı iletim katsayısına rağmen, yüksek oranlarda katkı malzemesi kullanılmasıyla viskozitenin de arttırdığı ve bu nedenle doğal taşınım etkilerinin yavaşladığı saptanmıştır.

Analitik yöntem faz değişimi problemlerinde gerçek çözümü sağlamasına karşın karmaşık geometriler veya sınır koşulları için uygulanması mümkün değildir. Analitik yöntemin kısıtlarından dolayı, farklı geometrilerin veya birleştirilmiş sınır koşullarının etkisini incelemek için sayısal yöntemler uygulanmaktadır. Literatür incelendiğinde faz değişim problemlerinin çözümünde sabit grid ve değişken grid yaklaşımlarının yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir [25-27]. Bu çalışmada diferansiyel denklemin çözümü sabit grid yaklaşımı uygulanmıştır. Faz değişimi probleminin çözümünde ise entalpi denklemi sıcaklık dönüşüm yöntemi uygulanarak doğrusallaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Problemin Tanımı

Çalışmada boru kovan tipi bir ısı değiştiricisi içerisindeki zamana bağlı faz değişimi (*katılaşma*) problemi sayısal olarak incelenmiştir. Boru içerisinden ITA geçerken, boru ile kovan arasında kalan halkasal bölgede ise faz değişim malzemesi bulunmaktadır. FDM ve boru malzemesinin başlangıç sıcaklığının faz değişim sıcaklığının üzerinde olduğu ($T_i > T_m$) kabul edilmiştir. Boru içerisinden ise faz değişim sıcaklığından düşük ($T_{ITA} < T_m$) ITA geçirilmektedir. Çalışma kapsamında boru iç yüzey ile ısı transfer akışkanı arasındaki ısı direnç ihmal edilerek, akışkan sıcaklığı boru iç yüzey sıcaklığına eşit alınmıştır. Bu problemde, ısı geçişinin sadece radyal yönde olduğu kabul edilmiş ve kovanın dış yüzeyindeki ısı geçişleri ihmal edilmiştir. Çözümü kolaylaştırmak için ısı transfer akışkanının homojen ve sabit sıcaklıkta olduğu kabul edilmiştir. Boru-kovan tipi ısı değiştiricisi içerisindeki faz değişim problemi Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Boru etrafında faz değişimine ait parametreler

Boru iç ve dış yarıçapları sırasıyla $r_i = 0,045$ m ve $r_o = 0,05$ m olarak belirlenmiştir. Kovan çapı ise $r_{kovan} = 0,4$ m olarak tanımlanmıştır. Çalışmada FDM olarak su kullanılırken boru malzemesi olarak bakır, çelik ve PE-32 olmak üzere üç farklı malzeme test edilmiştir. İncelenen malzemelere ait özellikler Çizelge 1’de verilmektedir.

Çizelge 1. FDM ve boru malzemelerinin özellikleri

Malzeme	Yoğunluk ρ [kg/m ³]	Özgül Isı c [J/kgK]	Isı İletim Katsayısı k [W/mK]	Isı Yayımlım Katsayısı α [m/s ²]	Faz Değişim Gizli Isısı L [J/kg]
Bakır	8933	385	401	117×10^{-6}	-
Çelik	8055	480	15,1	$3,9 \times 10^{-6}$	-
Pe-32	938	2300	0,38	$1,761 \times 10^{-7}$	-
Su	999,8	4210	0,567	$1,347 \times 10^{-7}$	333400
Buz	916,8	2040	2,2	$1,176 \times 10^{-7}$	-

2.2. Çözüm Yöntemi

FDM’nin başlangıç sıcaklığı faz değişim sıcaklığına yakın seçildiğinden halkasal bölge içerisindeki doğal taşınım hareketi ihmal edilmiştir. Sistem içerisindeki doğal taşınım etkisi ihmal edildiğinden, model içerisindeki ısı transferi bir-boyutlu ısı iletimi problemine indirgenebilir. Silindirik koordinatlardaki ısı iletimi denklemi boru cidarı bölgesi için aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

FDM içerisindeki bir boyutlu ısı transferi ise entalpi cinsinden tanımlanmaktadır.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Cao ve Faghri tarafından önerilen sıcaklık dönüşüm modeli uygulanarak entalpi ile sıcaklık arasındaki ilişki doğrusal bir eşitliğe indirgenmiştir [28].

$$H = CT + S \quad (3)$$

burada $C (= \rho c)$ malzemenin ısı kapasiteni, S ise kaynak terimini ifade etmektedir. Enerji denklemi yeniden düzenlenerek FDM bölgesi için korunum denklemi aşağıdaki şekilde elde edilir,

$$\frac{\partial}{\partial t}(CT) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial t}(S) \quad (4)$$

Faz değişim gizli ısıısının kaynak terim cinsinden diferansiyel denklem içerisine tanımlanması sayısal olarak çözüm zorlukları yaratmakta ve çözümün iraksamasına neden olabilmektedir. Sayısal çözümün kararlılığını arttırmak için faz değişiminin sabit bir sıcaklık yerine, bir sıcaklık bandında gerçekleştiği kabul edilerek, kaynak terimin lineerleştirilmesi sağlanmaktadır. Bu modelde faz değişimi bölgesi (*ara faz*), $T_m - \delta T_m$ ile $T_m + \delta T_m$ sıcaklıkları arasında tanımlanmıştır. Denklemlerin çözümünde değişken sayısını azaltmak ve parametrik hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından boyutsuzlaştırma gerçekleştirilmiştir. Denklemlerin boyutsuzlaştırılmasında kullanılan boyutsuz parametreler aşağıda verilmektedir:

$$\begin{aligned} R &= \frac{r}{D_i}, \quad \Delta R = \frac{\Delta r}{D_i}, \quad C^* = \frac{C}{C_l}, \quad k^* = \frac{k}{k_l}, \quad S^* = \frac{S}{C_l(T_i - T_m)} \\ \tau &= \frac{\alpha_l t}{D_i^2}, \quad \alpha = \frac{k}{\rho c}, \quad Ste = \frac{C_l(T_i - T_m)}{\rho L}, \quad q^{*'} = \frac{q'}{k_l(T_i - T_m)}, \quad \theta = \frac{T - T_m}{T_i - T_m} \end{aligned} \quad (5)$$

Boru cidarı ve FDM bölgeleri için enerji denklemleri boyutsuz olarak aşağıda sunulmuştur,

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(C^* \theta) = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(k^* R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(C^* \theta) = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R k^* \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) - \frac{\partial}{\partial \tau}(S^*) \quad (7)$$

Boyutsuz ısı kapasitesi (C^*), kaynak terim (S^*) ve ısı iletim katsayısı (k^*) katı, sıvı ve ara faz bölgeleri için aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$C^*(\theta) = \begin{cases} C_{sl} & \theta < -\delta\theta_m \\ \frac{C_{sl} + 1}{2} + \frac{1}{2Ste\delta\theta_m} & -\delta\theta_m \leq \theta \leq \delta\theta_m \\ 1 & \delta\theta_m < \theta \end{cases} \quad (8)$$

$$S^*(\theta) = \begin{cases} C_{sl} \delta \theta_m & \theta < -\delta \theta_m \\ \frac{C_{sl} + 1}{2} \delta \theta_m + \frac{1}{2Ste} & -\delta \theta_m \leq \theta \leq \delta \theta_m \\ C_{sl} \delta \theta_m + \frac{1}{Ste} & \delta \theta_m < \theta \end{cases} \quad (9)$$

$$k^*(\theta) = \begin{cases} k_{sl} & \theta < -\delta \theta_m \\ k_{sl} + \frac{1 - k_{sl}}{2\delta \theta_m} (\theta + \delta \theta_m) & -\delta \theta_m \leq \theta \leq \delta \theta_m \\ 1 & \delta \theta_m < \theta \end{cases} \quad (10)$$

Problemde kullanılan başlangıç ve sınır koşulları aşağıda tanımlanmıştır:

$$\theta = \theta_i = 1 \quad \tau = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = 0 \quad R = R_{kovan} \quad (12)$$

$$\theta = \theta_s \quad R = R_i \quad (13)$$

Boyutsuz diferansiyel denklemlerin zamana bağlı sayısal olarak çözümlenmesi için sonlu hacimler yöntemi uygulanmıştır [29]. Ayrıştırılmış denklem sistemlerinin çözümlenmesinde TDMA (*Thomas*) matris çözüm algoritması uygulanmıştır. Boru malzemesi/FDM ara-yüzeyi veya FDM'nin katı/sıvı ara-yüzeyi gibi, kontrol yüzeyinin iki farklı ısı iletim katsayısına sahip kontrol hacimleriyle komşu olması durumunda, *ara-yüzey ısı iletim katsayısı* tanımlanmalıdır. Ara-yüzey ısı iletim katsayısı hesaplamalarında Patankar tarafından önerilen harmonik ortalama yöntemi uygulanmıştır [29]. Yapılan ön analizler sonunda kontrol hacmi sayısı 210, zaman adımı ise 1 s olarak belirlenmiştir. Sayısal belirsizliklerin azaltılması için yakınsama kriteri olarak takip eden iki iterasyon arasındaki farkın 1E-8 değerinin altına inmesi sağlanmıştır.

2.3. Çözüm Yönteminin Doğrulanması

İncelenen problemin analitik bir çözümü bulunmadığından, geliştirilen sayısal modelin doğruluğunu kontrol edilebilmek için sayısal model, analitik çözümü olan modele uyarlanarak elde edilen sonuçlar analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yarı sonsuz silindir çevresindeki bir boyutlu faz değişimi problemi için analitik çözüm Özişik tarafından verilmektedir [30]. Bu modelde silindirik koordinatlarda çizgisel ısı yutucu etrafındaki faz değişimi incelenmiştir.

Uyarlamanın ilk adımı olarak oluşturulan modelde borunun iç yüzeyine sabit yüzey sıcaklığı sınır koşulu yerine $q' = 94,5 \text{ W/m}$ değerinde sabit ısı akısı sınır koşulu tanımlanmıştır. Analitik çözümde boru malzemesi ihmal edildiğinden sayısal modelde buna göre düzenlemeler yapılmıştır. Boru et kalınlığı çok ince alınırken ısı yayılım katsayısı ise çok yüksek tanımlanmıştır. Böylece analitik çözüm ile sayısal model benzeştirilmiştir.

Analitik çözüm sonucunda FDM'nin katı ve sıvı bölgeleri için zamana ve konuma bağlı sıcaklık dağılımları aşağıdaki şekilde elde edilmektedir [28].

$$T_s = \frac{q'}{4\pi k_s} \left[Ei(-\eta^2) - Ei(-\eta_{sl}^2) \right] + T_m \quad 0 < \eta < \eta_{sl} \quad (14)$$

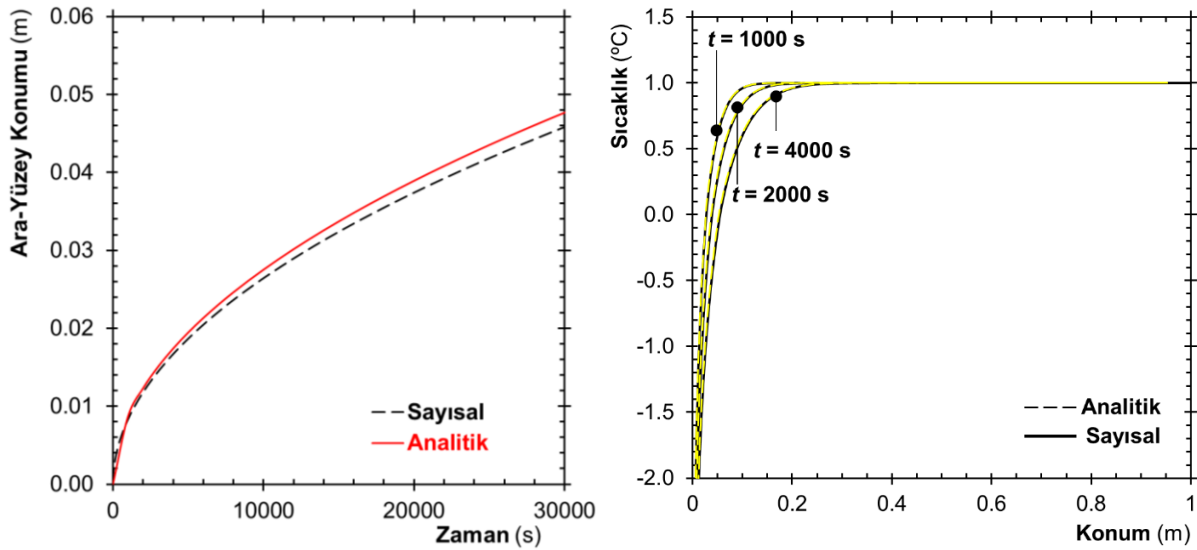
$$T_l = T_i - \frac{T_i - T_m}{Ei(-\eta_{sl}^2 \alpha_s / \alpha_l)} Ei(-\eta^2) \quad \eta_{sl} < \eta < \infty \quad (15)$$

$$\frac{q'}{4\pi} e^{-\eta_{sl}^2} + \frac{k_l (T_i - T_m)}{Ei[-\eta_{sl}^2 \alpha_s / \alpha_l]} e^{-\eta_{sl}^2 \alpha_s / \alpha_l} - \alpha_s \rho_s L \eta_{sl}^2 = 0 \quad (16)$$

Burada, Ei , çözümü bilinen üstel integral fonksiyonudur. Mevcut sınır koşulları ve parametreler için $\eta_{sl} = 0.0161$ olarak bulunmuştur. Sonuç olarak katı/sıvı ara-yüzeyinin zamana göre değişimini veren aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir.

$$s(t) = \sqrt{0.0161(4\alpha_s t)} \quad (17)$$

Analitik ve sayısal yöntemler için elde edilen zamana bağlı ara-yüzey ilerlemeleri ve konuma bağlı sıcaklık değişimleri sırasıyla Şekil 2a ve Şekil 2b'de verilmektedir. Sayısal yaklaşım ile elde edilen sonuçların analitik çözüm ile oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ara-yüzey konumu için maksimum fark % 4,3 olarak tespit edilmiştir. Konuma bağlı sıcaklık değişimleri karşılaştırıldığında ise fark % 1'in altındadır. Karşılaştırmalı sonuçlara göre oluşturulan sayısal kod silindirik koordinatlardaki faz değişim problemini yüksek doğrulukta çözümleyebilmektedir.



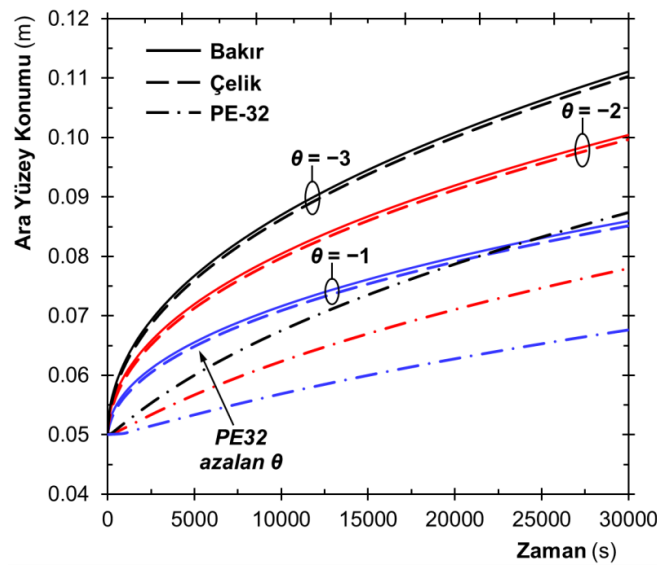
(a) Ara-yüzey değişimi

(b) Sıcaklık değişimi

Şekil 2. Analitik ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

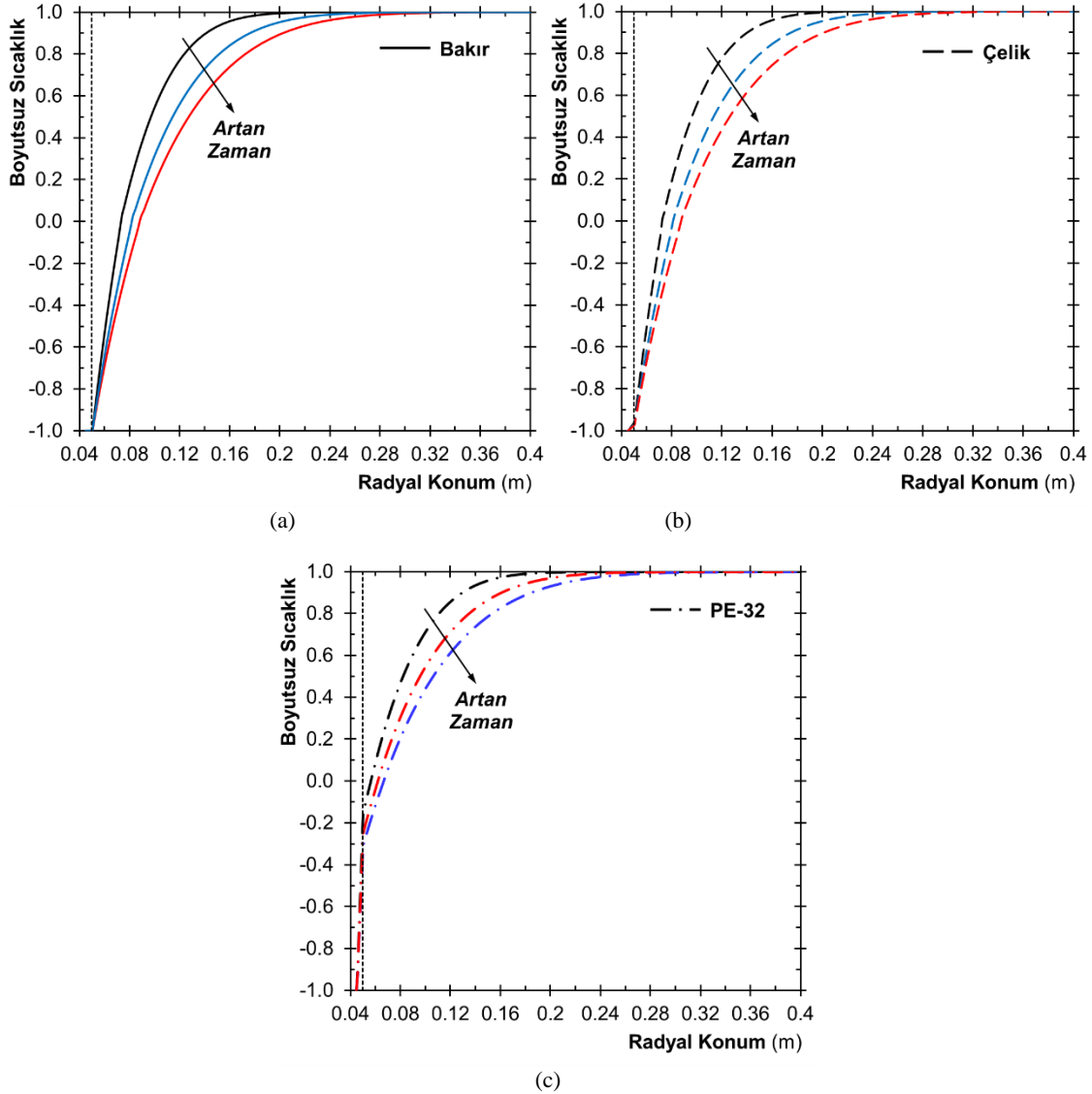
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3'te farklı boru malzemeleri ve boyutsuz yüzey sıcaklıkları için zamana bağlı ara-yüzey ilerlemesi verilmektedir. Burada düz ve kesikli çizgiler sırasıyla bakır ve çelik boru malzemeleri temsil ederken, kesikli-noktalı çizgiler ise polietilen-32 (PE-32) boru malzemesine karşılık gelmektedir. Tüm boru malzemeleri için boyutsuz yüzey sıcaklığının $\theta = -1$ değerinden $\theta = -2$ ve $\theta = -3$ değerine doğru azaltılmasıyla birlikte ısı transferi hızının arttığı görülmektedir. Değişen boru malzemeleri için yüzey sıcaklığındaki azalma ile oransal olarak benzer bir değişim sağlanmaktadır. Metal borular için (bakır ve çelik) yüzey sıcaklığının $\theta = -1$ değerinden $\theta = -3$ değerine düşürülmesiyle birlikte $t = 3000$ saniye için ara-yüzey konumunun yaklaşık olarak % 28 arttığı görülmektedir. Benzer şekilde PE-32 boru malzemesi için sıcaklığın en yüksek değerinden en düşük değerine düşürülmesiyle birlikte ara-yüzey ilerleme hızı % 30 oranında artmaktadır.



Şekil 3. Farklı boru malzemeleri ve yüzey sıcaklıkları için ara-yüzey konumunun zamana bağlı değişimi

Seçilen üç an için, $t = 10000$ s, $t = 20000$ s ve $t = 30000$ s, boru yüzeyinden itibaren halkasal bölge boyunca konuma bağlı sıcaklık dağılımları Şekil 4'te sunulmaktadır. Bakır boru malzemesi için, Şekil 4a, boru malzemesi içerisinde sıcaklık değişiminin oldukça düşük olduğu ve boru iç/dış yüzey sıcaklıklarının yaklaşık olarak aynı değerde olduğu görülmektedir. Çelik boru malzemesi için ise, Şekil 4b, iç ve dış yüzeyler arasında parabolik bir sıcaklık dağılımı gözlenmektedir. En düşük ısı iletim katsayısına sahip PE-32 için ise, Şekil 4(c), boru et kalınlığı boyunca boyutsuz sıcaklığın $\theta = -1$ ila $-0,1$ arasında değiştiği görülmektedir. Düşük ısı iletim katsayısı ısı transferi prosesini önemli derece etkilemektedir. FDM içerisindeki sıcaklık değişimleri kıyaslandığında ise, bakır ve çelik boru malzemelerinin kullanılması durumunda yerel sıcaklık değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. PE-32 boru malzemesi için ise, ısı transferi hızı diğer iki boruya göre yavaş olduğu için, sıcaklık daha yüksek değerlerde elde edilmiştir. $t = 10000$ s için $r = 0.08$ m pozisyonundaki sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında, metal boru malzemesinin kullanılması durumunda sıcaklığın PE-32'e oranla iki kat daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Sıcaklığın konuma bağlı değişimi (a. bakır, b. çelik, c. PE-32)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada silindirik koordinatlarda bir boyutlu faz değişimli ısı transferi problemi sayısal olarak incelenmiştir. Geliştirilen matematiksel yöntemin doğrulanması amacıyla indirgenmiş sınır koşulları için analitik sonuçlarla karşılaştırmalar sunulmuştur. Daha sonra boru malzemesi ısı iletim katsayısının ve iç yüzey sıcaklığının değişen değerleri için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, boru malzemesi ısı iletim katsayısının faz değişimli ısı enerji depolama sistemleri açısından oldukça önemli olduğu görülmüştür. Düşük ısı iletim katsayısına sahip boru malzemeleri için oluşan ısı dirençleri nedeniyle sistemin depolama süresi ve performansı önemli ölçüde düşmektedir. Sistem ısı performansının optimize edilmesi için benzer çalışmaların geniş çalışma ve tasarım parametreleri için gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Koca A, Öztop HF, Koyun, Varol Y. Energy and Exergy Analysis of a Latent Heat

- Storage System with Phase Change Material for a Solar Collector, *Renewable Energy*, Cilt. 33, No. 4, 2008, s.567–574.
- [2] MacPhee D, Dinçer I. Performance Assessment of Some Ice TES Systems, *International Journal of Thermal Sciences*, Cilt. 48, No. 12, 2009, s.2288–2299.
- [3] Tan FL, Hosseinizadeh SF, Khodadadi JM, Fan L. Experimental and Computational Study of Constrained Melting of Phase Change Materials (PCM) inside a Spherical Capsule, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Cilt. 52, No. 15–16, 2009, s.3464–3472.
- [4] Esapour M, Hosseini ML, Ranjbar AA, Pahamli Y, Bahrapoury R. Phase Change in Multi-Tube Heat Exchangers, *Renewable Energy*, Cilt. 85, 2016, s.1017-1025.
- [5] İsmail KAR, Das Graças E. da Silva M. Melting of PCM Around a Horizontal Cylinder with Constant Surface Temperature, *International Journal of Thermal Sciences*, Cilt. 42, No. 12, 2003, s.1145–1152.
- [6] İsmail KAR, da Silva MDGE. Numerical Solution of the Phase Change Problem Around a Horizontal Cylinder in the Presence of Natural Convection in the Melt Region, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Cilt. 46, No. 10, 2003, s.1791–1799.
- [7] Agyenim F, Eames P, Smyth M. A Comparison of Heat Transfer Enhancement in a Medium Temperature Thermal Energy Storage Heat Exchanger Using Fins, *Solar Energy*, Cilt. 83, No. 9, 2009, s.1509–1520.
- [8] Hosseini MJ, Rahimi M, Bahrapoury R. Experimental and Computational Evolution of Shell and Tube Heat Exchanger as a PCM Thermal Storage System, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Cilt 50, 2014, s.128-136.
- [9] Khodadadi JM, Zhang Y. Effects of Buoyancy-Driven Convection on Melting within Spherical Containers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Cilt. 44, No. 8, 2001, s.605–1618.
- [10] Seddegh S, Wang X, Henderson AD. A Comparative Study of Thermal Behavior of a Horizontal and Vertical Shell-and-Tube Energy Storage Using Phase Change Materials, *Applied Thermal Engineering*, Cilt. 93, 2016, s.348-358.
- [11] Christenson MS, Incropera FP. Solidification of an Aqueous Ammonium Chloride Solution in a Rectangular Cavity—I. Experimental Study, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Cilt. 32, No. 1, 1989, s.47–68,
- [12] Webb BW, Moallemi MK, Viskanta R. Experiments on Melting of Unfixed Ice in a Horizontal Cylindrical Capsule, *Journal of Heat Transfer*, Cilt. 109, No. 2, 1987, s.454–459.
- [13] Medrano M, Yilmaz MO, Nogués M, Martorell I, Roca J , Cabeza LF. Experimental Evaluation of Commercial Heat Exchangers for use as PCM Thermal Storage Systems, *Applied Energy*, Cilt. 86, No. 10, 2009, s.2047–2055.
- [14] Ereğ A, I. Dinçer I. An Approach to Entropy Analysis of a Latent Heat Storage Module, *International Journal of Thermal Sciences*, Cilt. 47, 2008, s.1077–1085.
- [15] Habeebullah BA. An Experimental Study on Ice Formation Around Horizontal Long Tubes, *International Journal of Refrigeration*, Cilt. 30, No. 5, 2007, s.789–797.
- [16] Wang WW, Wang LB, He YL. Parameter Effect of a Phase Change Thermal Energy Storage Unit with One Shell and One Finned Tube on its Energy Efficiency Ratio and Heat Storage Rate, *Applied Thermal Engineering*, Cilt. 93, 2016, s.50-60.
- [17] Ereğ A, Ezan MA. Experimental and Numerical Study on Charging Processes of an Ice-on-Coil Thermal Energy Storage System, *International Journal of Energy Research*, Cilt. 31, No. 2, 2007, s.158–176.
- [18] Li YQ, He YL, Song HJ, Xu C, Wang WW, Numerical Analysis and Parameters

- Optimization of shell-and-Tube Heat Storage Unit Using Three Phase Change Materials, *Renewable Energy*, Cilt59, 2013, s.92-99.
- [19] Trp A. An Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer During Technical Grade Paraffin Melting and Solidification in a Shell-and-Tube Latent Thermal Energy Storage Unit, *Solar Energy*, Cilt. 79, No. 6, 2005, s.648–660.
- [20] Ereğ A, İlken Z, Acar MA. Experimental and Numerical Investigation of Thermal Energy Storage with a Finned Tube, *International Journal of Energy Research.*, Cilt. 29, No. 4, 2005, s.283–301.
- [21] Lacroix M. Numerical Simulation of a Shell-and-Tube Latent Heat Thermal Energy Storage Unit, *Solar Energy*, Cilt. 50, No. 4, 1993, s.357–367.
- [22] Abhat A. Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials, *Solar Energy*, Cilt. 30, No. 4, 1983, s.313–332.
- [23] Agyenim F, Hewitt N, Eames P, Smyth M. A Review of Materials, Heat Transfer and Phase Change Problem Formulation for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt. 14, No. 2, 2010, s.615–628.
- [24] Augspurger M, Udaykumar HS, A Cartesian Grid Solver for Simulation of a Phase-Change Material (PCM) Solar Thermal Storage Device, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, Cilt. 69, No. 3, 2016, s.1-18.
- [25] Fan LW, Zhu ZQ, Zeng Y, Ding Q, Liu MJ, Unconstrained Melting Heat Transfer in a Spherical Container Revisited in the Presence of Nano-Enhanced Phase Change Materials (NePCM), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Cilt. 95, 2016, s.1057-1069.
- [26] Voller VR, Swaminathan CR, Thomas BG. Fixed Grid Techniques for Phase Change Problems: A Review, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Cilt. 30, No. 4, 1990, s.875–898.
- [27] Lacroix M, Voller VR. Finite Difference Solutions of Solidification Phase Change Problems: Transformed Versus Fixed Grids, *Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals: An International Journal of Computation and Methodology*, Cilt. 17, No. 1, 1990, s.25–41.
- [28] Cao Y, Faghri A. A Numerical Analysis of Phase-Change Problems Including Natural Convection, *Journal of Heat Transfer*, Cilt. 112, No. 3, 1990, s.812–816.
- [29] S. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, *Series in computational methods in mechanics and thermal sciences*, 1980, s.1–197.
- [30] M. N. Özışık, *Heat conduction*, John Wiley & Sons, 1993.

ÖZGEÇMİŞ/CV

Muhammet ÖZDOĞAN; Araş. Gör. (Research Assist.)

Lisans derecesini 2007’de Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden, Yüksek Lisans derecesini 2010’da Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden aldı. Halen Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde doktora çalışmasını sürdürmektedir. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. Temel çalışma alanları: Enerji Depolama, Yakıt Pilleri, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Isı Transferi.

He received bachelors’ degree in the Department of Mechanical Engineering at Bulent Ecevit University, Zonguldak/Turkey in 2007, his master degree in the Department of Mechanical Engineering at Dokuz Eylul University, Izmir/Turkey in 2010. Currently he is PhD student in the Department of Mechanical Engineering at Ondokuz Mayis University, Samsun/Turkey. He is working as a research assistant at the Department of Mechanical Engineering at Ondokuz Mayis University. His major areas of interests are: Energy Storage, Fuel Cells, Computational Fluid Dynamics, Heat Transfer.

Mehmet Akif EZAN; Yrd. Doç. Dr. (Assist. Prof.)

Doktora derecesini 2011 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden aldı. Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Temel çalışma alanları hesaplamalı akışlanlar dinamiği, ısı transferi uygulamaları, FDM, ısı enerji depolamadır.

He received PhD degree 2011 from Dokuz Eylül University, Department of Mechanical Engineering. Currently he is working as Assist. Prof. in the same department. His main research interests are Computational Fluid Dynamics, Heat Transfer Applications, Phase Change Materials, Thermal Energy Storage.

Aytunç EREK; Prof. Dr. (Prof.)

Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Bölümünde Profesör olarak çalışmaktadır. Termodinamik alanında Doktora derecesini 1999 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi'nden almıştır. Başlıca araştırma alanları, ısı değiştiricilerinin HAD analizleri ve ısı enerji depolama sistemleridir. Türk Tesisat Mühendisleri Derneği ve Makine Mühendisleri Odası üyesidir. Isıl enerji depolama sistemleri konusunda hakemli dergi ve konferanslarda yayınlanmış çok sayıda bilimsel çalışması bulunmaktadır.

He is a full professor in Department of Mechanical Engineering at Dokuz Eylül University in Izmir, Turkey. He received his PhD in the area of thermodynamics from Dokuz Eylül University in 1999. His main research interests include CFD analysis of heat exchangers and thermal energy storage systems. He is a member of the Turkish Association of HVAC Engineers and the Chamber of Mechanical Engineers. He has published several refereed journal and conference papers in the area of thermal energy storage systems.