



**RADYAL KANATLI BORU ÇEVRESİNDE  
FAZ DEĞİŞİMİ İLE ENERJİ DEPOLANMASI**

*(ENERGY STORAGE BY PHASE CHANGE  
AROUND RADIALLY FINNED TUBES)*

**Aytunç EREK\* , Mehmet Ali ACAR\***

**ÖZET / ABSTRACT**

Bu çalışmada, iç yüzeyi sabit sıcaklıkta olan radyal kanatlı bir boru çevresinde faz değişimi ile enerji depolanması sayısal olarak incelenmiştir. Sistemin çözümü, ısı transfer akışkanı (ITA), boru duvarı & kanat, ve faz değişim malzemesi (FDM) için elde edilen eşitliklerin bir bütün olarak çözülmesini içerir. Bu eşitliklerin çözülmesinde kontrol hacmi sonlu farklar yaklaşımı ve yarı kapalı çözücü (SIS algoritması) kullanılmıştır. Farklı kanat parametreleri ( kanat aralığı, kanat kalınlığı, kanat çapı ) ve farklı yüzey sıcaklığı için sayısal çözümler elde edilmiştir. Her bir değişkenin depolanan enerjiye, katılma miktarına olan etkileri grafik olarak gösterilmiş ve bunlarla ilgili bağıntılar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların kullanımı ile, enerji depolama açısından en uygun sistem tasarımı yapılabilmektedir.

*In this study, energy storage by phase change around a radially finned tube with a constant wall temperature is investigated numerically. The solution of the system includes the solution of the governing equations for the heat transfer fluid (HTF), pipe wall & fins and the phase change material (PCM). Control volume finite difference approach and semi implicit scheme are used to discretize the system of equations. Numerical simulations are performed to investigate the effect of several fin parameters (fin spacing, fin thickness, fin diameter) and tube wall temperature. The effect of each variable to energy storage and amount of solidification are presented graphically and related equations are given. Optimum system design for the most effective energy storage may be obtained with the use of given results.*

**ANAHTAR KELİMELER / KEY WORDS**

Isıl enerji depolama, Kanatlı boru, Faz değişimi  
*Thermal energy storage, Finned tube, Phase change*

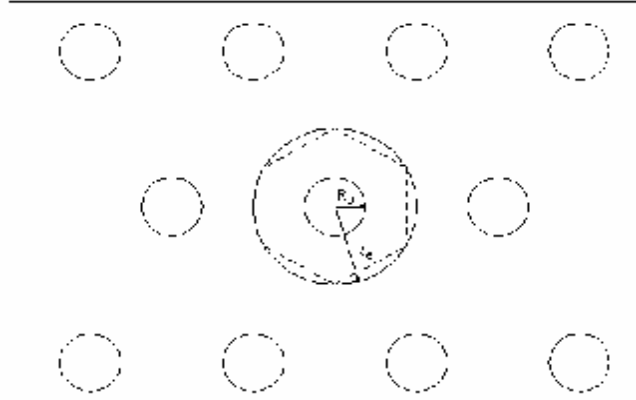
## 1. GİRİŞ

Dünyadaki fosil yakıt kaynaklarının gelecek kırk–elli yıl içinde tükeneceği tahmin edilmektedir. Bu sebeple, konuyla ilgili mühendisler ve araştırmacılar yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını bulmaya ve ekonomik olarak kullanmaya yönelmişlerdir. Bunun yanında, varolan enerjinin ucuz ve verimli bir şekilde depolanması da araştırmaların önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Enerji depolama sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan yöntem enerjinin gizli olarak depolandığı sistemlerdir. Bu sistemlerin duyulur ısı depolama sistemlerine göre en büyük avantajları enerji depolamanın dar bir sıcaklık bandında gerçekleşmesi ve depolanacak birim enerji başına gerekli hacmin küçük olmasıdır.

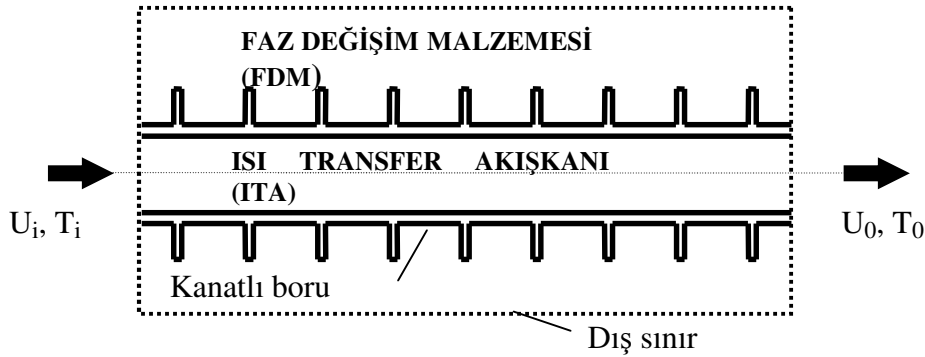
Bir gizli ısı depolama sistemi tasarımında, belli bir faz değişim malzemesinin erime ve katılaşma periyotları bilinmelidir. İlave olarak, faz değişimi esnasında ısı transfer katsayılarının tahmini için, çalışma koşulları ve depolama biçimi bilinmelidir. Literatürde iki ayrı model üzerinde çalışılmıştır. Bunlardan biri faz değişim malzemesinin kovanın içine yerleştirildiği ve ısı transfer akışkanının boruların içinden geçtiği boru-kovan tipi ısı değiştirgecidir. Bu düzenek ile ilgili çalışmalar değişik araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. (İsmail ve Alves, 1986; Cao ve Faghri, 1991; Zhang ve Faghri, 1996a; Bellecci ve Conti., 1993; Lacroix, 1993). İkinci model ise, içine faz değişim malzemesinin yerleştirildiği rijit bir kapsül ve bu kapsülün etrafındaki borudan ısı transfer akışkanının geçtiği modeldir. Boru –kovan tipi ısı değiştirgeci minimum hacim için yüksek verim sağlayan bir gizli ısı depolama düzeneği olarak kabul edilmiştir.

Depolanan enerjiyi artırmak için kullanılan metodlardan biri kanatlı yüzeyler kullanarak ısı transfer yüzey alanını artırmaktır. Kanatlı yüzeye sahip ısı depolama sisteminin ısı tranfer analizine ilişkin ilk temel çalışma Humpries ve Griggs tarafından gerçekleştirilmiştir (Humpries ve Griggs., 1977). Abhat, ısı depolama sisteminde ısı transfer elemanı olarak kanatlı yüzeye sahip ısı borusunun kullanılmasını incelemiştir (Abhat, 1978; Abhat, 1980). Dikdörtgen kesitteki kanatların erime ve katılaşma üzerine etkileri bir çok sayısal ve deneysel çalışmada incelenmiştir. Bathelt ve Viskanta, yatay duran kanatlı boru etrafındaki katılaşma problemini, Sparrow ve arkadaşları ise dik duran kanatlı boru etrafındaki katılaşma problemini deneysel olarak incelemişlerdir (Bathelt ve Viskanta, 1981; Sparrow vd., 1981). Yapılan tüm çalışmalarda, faz değişimi aynı çalışma şartlarında düz kanatsız boru kullanılmasıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Eksenel kanatlara sahip eş merkezli iki silindir arasındaki katılaşma problemi teorik olarak incelenmiş ve katılaşma miktarı için kanat kalınlığı, kanat yüksekliği, kanat sayısı, Stefan ve Fourier sayısı cinsinden bir ifade bulunmuştur (Padmanabhan ve Khrishna., 1989). Diğer taraftan Sasaguchi ve Sakamoto aynı geometri için doğal taşınım etkisindeki erime problemini teorik olarak incelemişlerdir (Sasaguchi vd., 1988). Faz değişim malzemesinin kovan içinde ve ısı tranfer akışkanının kanatlı boru içinden aktığı boru-kovan tipi ısı depolama sisteminin ısı analizi Lacroix tarafından gerçekleştirilmiştir (Lacroix, 1993). Zhang ve Faghri ise kanatların boru içinde olduğu gizli ısı depolama sistemindeki ısı transferini incelemişlerdir (Zhang ve Faghri., 1996b).



Şekil 1. Kanatlı boruların gizli ısı depolama sisteminde yerleşimi

Bu çalışmada, sabit yüzey sıcaklığına sahip radyal kanatlı boru çevresindeki katılaşma problemi sayısal olarak incelenmiştir. Şekil 1’de kanatlı boruların enerji depolama sisteminde yerleşimi ve simetri çemberi gösterilmektedir. Bu simetri çemberi bir sınır oluşturduğundan, sadece bir boru içeren bir model oluşturmak yeterli olacaktır. Bu kabullere göre elde edilen model Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Gizli ısı depolama sisteminin şematik gösterimi

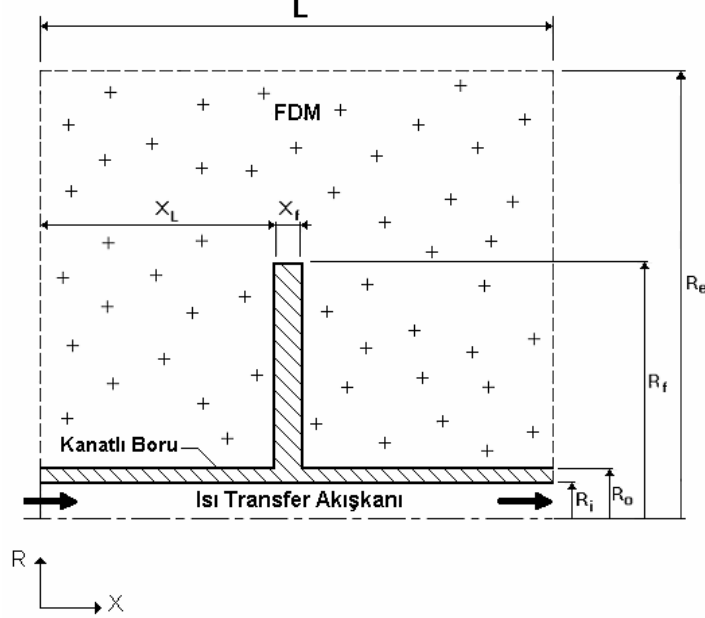
Ele alınan faz değişimi problemi katılaşma problemi olduğundan faz değişim malzemesi içindeki doğal taşınım etkileri ihmal edilmiş ve ısı transferinin sadece iletimle olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca, enerji eşitliğinin çözümünde, Cao ve Faghri tarafından geliştirilen sıcaklık dönüşüm modeli kullanılmıştır (Cao ve Faghri, 1990). Eşitliklerin çözümünde ise yarı kapalı çözücü kullanılmıştır (Lee, 1989).

Bu çalışmada amaç, bir enerji depolama sisteminde kanat parametrelerinin depolanan enerjiye olan etkilerini ortaya çıkarmak ve depolanan enerji için kanat yüksekliği, kanat aralığı, kanat kalınlığı, simetri çemberi ve yüzey sıcaklığına bağlı bir ifade bulmaktır.

## 2. MATEMATİKSEL MODEL

Problemin fiziksel modeli Şekil 3’de gösterilmiştir. Faz değişim malzemesi (FDM) dış yarıçapı  $R_o$  olan kanatlı boru etrafındaki halkasal boşlukta bulunmakta ve boru iç yüzey sıcaklığı  $T_w$  sıcaklığında sabit tutulmaktadır. Simetriden dolayı yan yüzeyler ve  $R_e$  yarıçapındaki üst yüzey izole yüzeyler olarak alınmıştır. Problemi çözmek için aşağıdaki kabüller yapılmıştır.

- FDM ve kanatlı borunun ısıl özellikleri sıcaklıktan bağımsızdır. Fakat, FDM'nin özellikleri fazın katı ve sıvı olmasına göre değişebilir.
- FDM homojen ve isotropiktir.
- Borunun iç yüzey sıcaklığı sabittir.
- FDM'nin katılaşması bir sıcaklık aralığında meydana gelmektedir. ( $T_m^0 - \delta T_m^0$  ile  $T_m^0 + \delta T_m^0$ )
- Sıvı FDM içindeki doğal taşınım etkileri ihmal edilmiştir.



Şekil 3. Çözümü yapılan model

FDM'deki ısı iletimi Cao ve Faghri tarafından geliştirilmiş olan sıcaklık dönüşüm modeli kullanılarak çözülmüştür (Cao ve Faghri, 1990). Bu modelde faz değişiminin tek bir sıcaklıkta değil, belli bir sıcaklık aralığında meydana geldiği kabul edilmiştir. Çözüm sırasında oluşan osilasyonları azaltmak için, bu modelde bazı düzeltmeler yapılmıştır. FDM için boyutsuz enerji eşitliği

$$\frac{\partial (CT)}{\partial \tau} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( KR \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial X} \left( K \frac{\partial T}{\partial X} \right) - \frac{\partial S}{\partial \tau} \quad (1)$$

Burada; C özgül ısı, S kaynak terimi, K ısı iletim katsayısı,  $\delta T$  faz değişim sıcaklık aralığı ve Ste Stefan sayısı olmak üzere

$$C = C(T) = \begin{cases} C_{sl} & T < -\delta T & \text{katı faz} \\ \frac{1}{2}(1 + C_{sl}) & -\delta T \leq T \leq \delta T & \text{ara faz} \\ 1 & T > \delta T & \text{sıvı faz} \end{cases} \quad (2)$$

$$S = S(T) = \begin{cases} C_{sl} \delta T & T < -\delta T & \text{katı faz} \\ \frac{1}{2Ste} T + \frac{1+C_{sl}}{2} \delta T + \frac{1}{2Ste} & -\delta T \leq T \leq \delta T & \text{ara faz} \\ C_{sl} \delta T + \frac{1}{Ste} & T > \delta T & \text{sıvı faz} \end{cases} \quad (3)$$

$$K = K(T) = \begin{cases} K_{sl} & T < -\delta T & \text{katı faz} \\ K_{sl} + (1 - K_{sl})(T + \delta T) / 2\delta T & -\delta T \leq T \leq \delta T & \text{ara faz} \\ 1 & T > \delta T & \text{sıvı faz} \end{cases} \quad (4)$$

Kanatlı boru için boyutsuz enerji eşitliği

$$\frac{\partial (C_w T)}{\partial \tau} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (K_w R \frac{\partial T}{\partial R}) + \frac{\partial}{\partial X} (K_w \frac{\partial T}{\partial X}) \quad (5)$$

Problemin başlangıç ve sınır şartları

$$T = T_i \quad 0 \leq X \leq L, \quad Ri \leq R \leq Re \quad (6)$$

$$T = T_w \quad R = Ri \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial R} = 0 \quad R = R_e \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X} = 0 \quad X = 0, L \quad (9)$$

Buradaki  $R_i$  ve  $R_e$  sırasıyla borunun iç yarıçapı ve simetri çemberi yarıçapının boyutsuz ifadeleridir.

Bu çalışmada, aşağıdaki boyutsuz parametreler kullanılmıştır.

$$R = \frac{r}{D}, \quad X = \frac{x}{D}, \quad \tau = \frac{\alpha_1 t}{D^2},$$

$$C = \frac{C^0}{\rho_1 c_1}, \quad C_{sl} = \frac{C_s}{C_1}, \quad K = \frac{k}{k_1}, \quad S = \frac{S^0}{\rho_1 c_1 (T_m^0 - T_w^0)},$$

$$Ste = \frac{c_1 (T_m^0 - T_w^0)}{\Delta H}, \quad \delta T = \frac{\delta T^0}{(T_m^0 - T_w^0)}, \quad T = \frac{T^0 - T_m^0}{T_m^0 - T_w^0}, \quad Q = \frac{Q^0}{\rho_1 c_1 (T_m^0 - T_w^0)}$$

Burada,  $D$  borunun iç çapı,  $\alpha$  ısı geçirenlik katsayısı,  $t$  zaman,  $\rho$  yoğunluk,  $k$  ısı iletim katsayısı,  $H$  entalpi,  $Q$  depolanan enerji terimleri olup,  $l$  indisi sıvı faz için kullanılmıştır.

### 3. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Çözümü yapılan katılma problemi matematiksel olarak Eşitlik 1–9 ile belirtilmiştir. Bu eşitliklerin çözümünde Patankar tarafından tanımlanan kontrol hacmi ve sonlu farklar yaklaşımı kullanılmıştır (Patankar, 1980). FDM ile kanat ara yüzeyinde, ısı iletim katsayısı için harmonik ortalama kullanılmıştır. Elde edilen eşitlikler yarı kapalı çözücü kullanılarak çözülmüştür. Bilindiği gibi Thomas algoritmasında eşitlik sisteminde yer alan katsayılar matrisinde köşegen üzerinde üç eleman bulunmaktadır. Fakat bu problemin çözümü için elde edilen matriste köşegen üzerindeki eleman sayısı üçten fazladır. Bu sebeple, yapılan çalışmada Lee tarafından geliştirilen yarı kapalı çözücü (Semi Implicit Solver – SIS) kullanılmıştır (Lee, 1989). FDM için yazılan enerji eşitliğinden de görüldüğü gibi,  $C$  ve  $S$  terimlerinin sabit olmamasından dolayı aynı zaman adımında iterasyonlara gerek vardır. Burada yakınsama

kriteri olarak  $\left| \left( T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k \right) \right| \leq 1E-5$  seçilmiştir. Ayrıca çözümün grid sayısından ve zaman adımından bağımsız olması için, uygun değerler seçilmiştir.

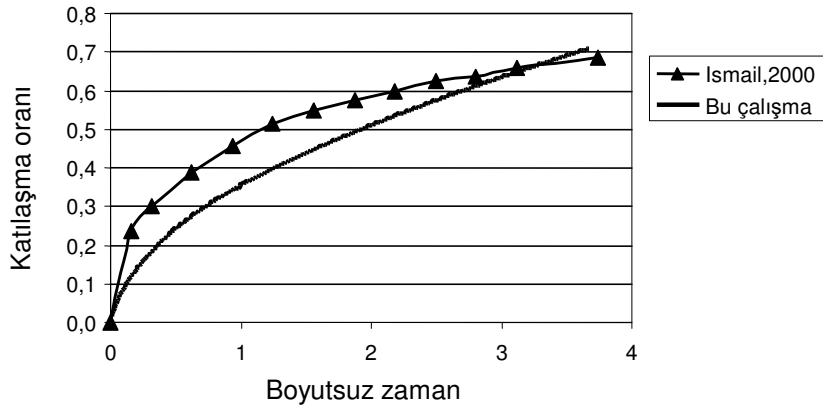
#### 4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Ele alınan problem Ismail ve arkadaşları tarafından çözülmüş ve değişik kanat parametrelerinin katılma miktarına ve depolanan enerjiye olan etkileri gösterilmiştir (Ismail vd., 2000). Yapılan bu çalışma ile Ismail tarafından yapılan çalışma arasındaki temel farklılıklar kısaca şöyle özetlenebilir.

Ismail tarafından yapılan çalışmada ısı kapasitesi metodu kullanılmıştır. Bu metod ilgili kaynakta ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Bu çalışmada ise sıcaklık dönüşüm metodu kullanılmaktadır. Bu yöntemde entalpi  $H$ ,  $H(T) = C(T) * T + S(T)$  şeklinde ifade edilmektedir. Faz değişim probleminin yapısından kaynaklanan osilasyonları azaltmak için  $C$  ve  $S$  terimleri düzeltilmiş ve önceki bölümde belirtilen değerler alınmıştır.

Ismail tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, çözümde bir takım osilasyonlar görülmüştür. Fakat bu çalışmadan elde edilen sonuçlardan, osilasyonların olmadığı görülmüştür.

Şekil 4 'de katılma oranının (katılan hacmin toplam hacme oranı) zamanla değişimi için, bu çalışma ile Ismail tarafından yapılan çalışma karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmayla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Katılma oranının zamanla değişimi

Karşılaştırma işleminden sonra, kanat yüksekliği  $R_f$ , kanat aralığı  $X_L$ , kanat kalınlığı  $X_f$ , simetri çemberi  $R_e$  ve yüzey sıcaklığının  $T_w$ 'nin katılma oranına olan etkilerini belirleyebilmek için 29 adet sayısal deney yapılmıştır. Bu sayısal deney şartları Çizelge 1 'de özetlenmiştir. Yapılan tüm çalışmalarda borunun iç yarıçapı  $R_i=0.5$ , dış yarıçapı  $R_o=0.6$ , sistemin başlangıç sıcaklığı faz değişim sıcaklığının üzerinde alınmıştır. Faz değişim malzemesi su ve kanatlı boru malzemesi bakırdır. Depolanan enerjinin farklı kanat yükseklikleri için zamanla değişimi Şekil 5 'de verilmiştir.

Bu grafikten görüldüğü gibi depolanan enerji kanat yüksekliği arttıkça artmaktadır. Kanat yüksekliğinin ve boyutsuz zamanın depolanan enerji ile ilişkisini veren bir eşitlik elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan diğer boyutsuz parametreler Çizelge 1'de verilmiştir. Bu parametrelere göre oluşturulan eşitlik;

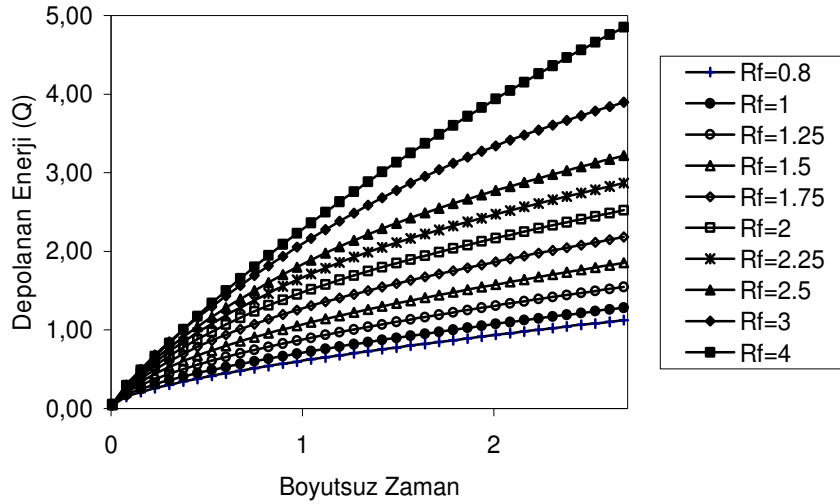
$$Q = 0.733845 R_f^{0.89785} \tau^{0.6608} \quad (10)$$

Benzer eşitlik katılma oranı için de elde edilmiştir.

$$r = 0.67695 R_f^{0.93699} \tau^{0.66464} \quad (11)$$

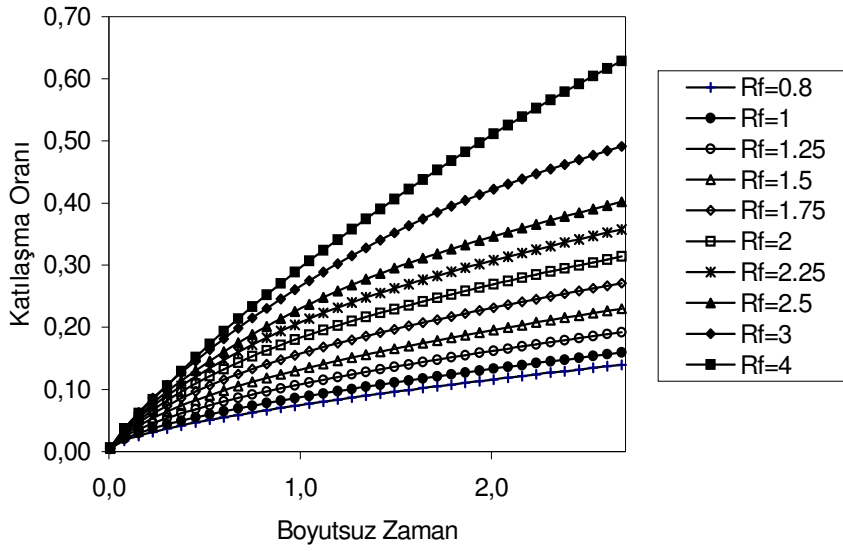
Çizelge 1. Yapılan sayısal deneylerin özeti

Grup No	Değişmeyen parametreler	Değişen parametre	Sayısal deneyleme sayısı
1	$R_i=0.5, R_o=0.6$ $R_e=5.0, X_f=0.1$ $X_L=0.8, T_w=-10$	$R_f=0.8; 1.0; 1.25;$ $1.50; 1.75; 2.0; 2.50;$ $3.0; 4.0$	<b>9</b>
2	$R_i=0.5, R_o=0.6$ $R_f=2.5, X_f=0.1,$ $X_L=0.8, T_w=-10$	$R_e= 5.0; 7.0; 10.0$	<b>3</b>
3	$R_i=0.5, R_o=0.6$ $R_f=2.5, R_e=5.0$ $X_L=0.8, T_w=-10$	$X_f=0.05; 0.1; 0.15;$ $0.2; 0.25$	<b>5</b>
4	$R_i=0.5, R_o=0.6$ $R_f=2.5, R_e=5.0$ $X_f=0.1, T_w=-10$	$X_L=0.1; 0.2; 0.3;$ $0.4; 0.6; 0.8; 1.0; 1.2$	<b>8</b>
5	$R_i=0.5, R_o=0.6$ $R_f=2.5, R_e=5.0$ $X_f=0.1, X_L=0.8$	$T_w=-5; -10; -15; -20$	<b>4</b>



Şekil 5. Kanat yüksekliğinin depolanan enerjiye etkisi

Şekil 6'da ise farklı kanat yükseklikleri için katılma oranının zamanla değişimi verilmektedir. Katılma oranı sistem içinde katılma hacminin toplam hacme oranı şeklinde ifade edilmektedir.



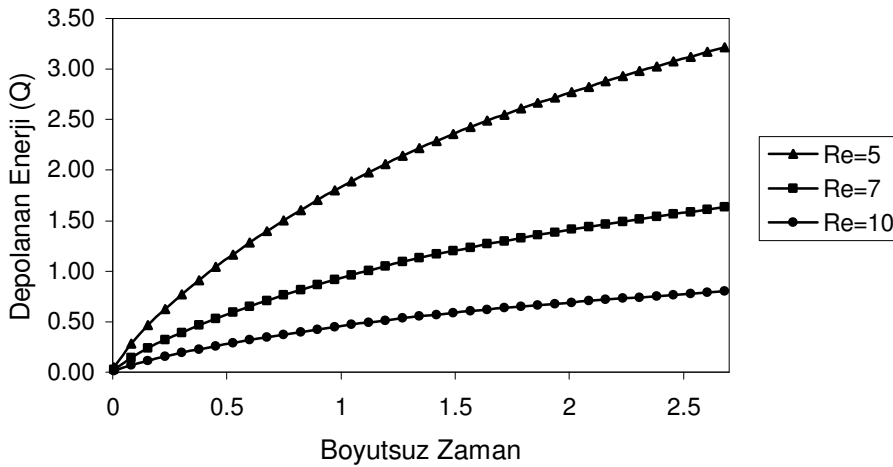
Şekil 6. Kanat yüksekliğinin katılma oranına etkisi

Şekil 7’de ise farklı simetri çemberi yarıçapları için depolanan enerjinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Yapılan tüm çalışmalarda depolanan enerji, birim hacimde depolanan enerji olarak hesaplanmıştır. Şekil 8’de ise katılma oranının zamanla değişimi gösterilmektedir. Simetri çemberi yarıçapı ve boyutsuz zamanın, depolanan enerji ve katılma oranı ile ilişkisini veren eşitlikler elde edilmiştir. Bu eşitlikler;

$$Q = 45.15459 R_e^{-2.005} \tau^{0.6205} \quad (12)$$

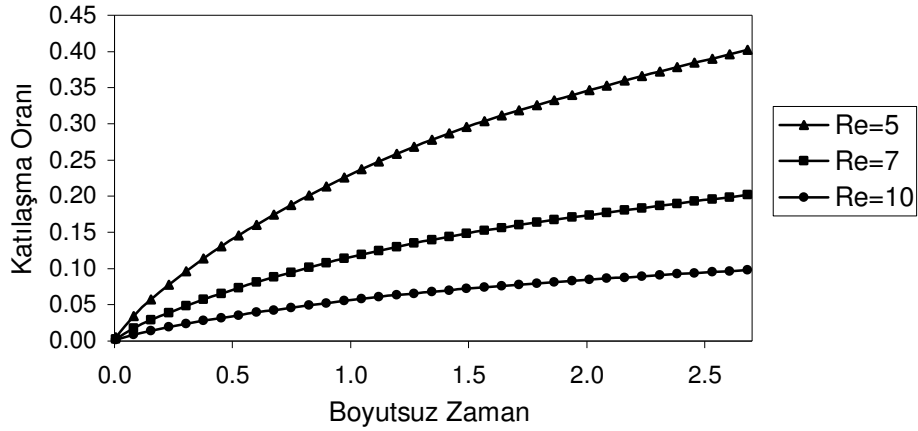
$$r = 5.9663 R_e^{-2.0387} \tau^{0.6188} \quad (13)$$

şeklinde bulunmuştur.



Şekil 7. Simetri çemberinin depolanan enerjiye etkisi



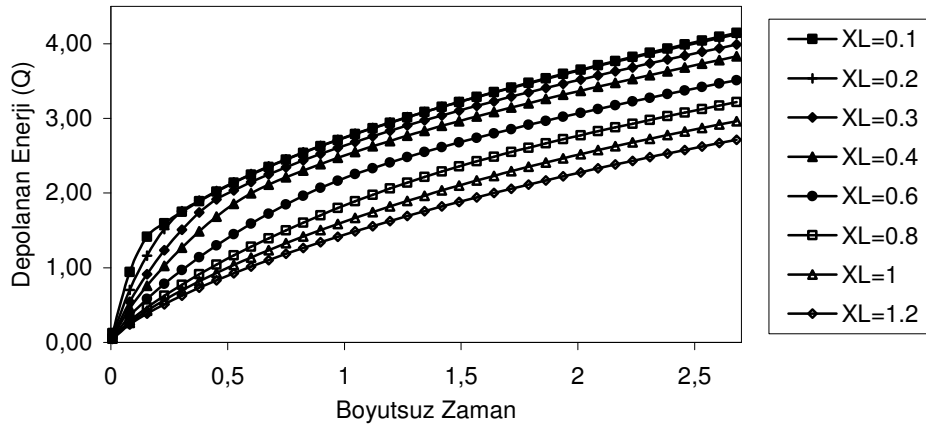


Şekil 8. Simetri çemberinin katılma oranına etkisi

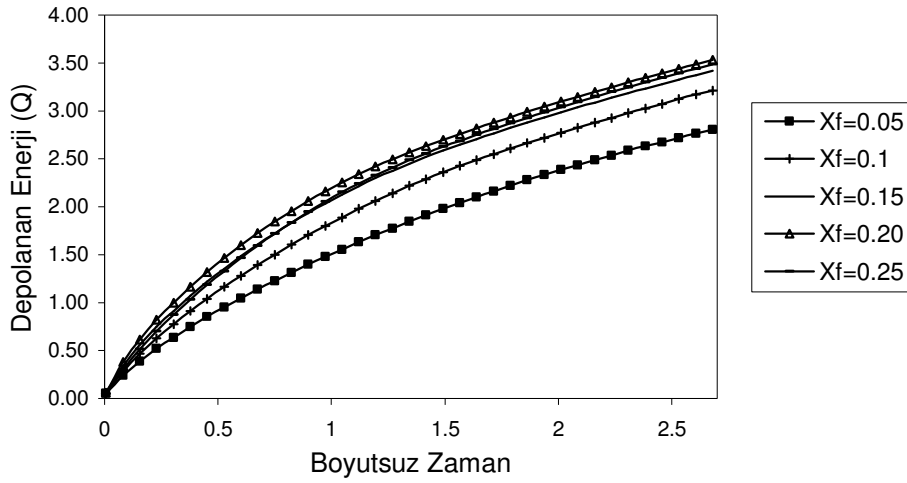
Farklı kanat aralıkları için depolanan enerjinin zamanla değişimi Şekil 9'da gösterilmektedir. Grafikten görüldüğü gibi, kanat aralığı arttıkça depolanan enerji azalmaktadır. Kanat aralığı ve boyutsuz zamanın depolanan enerji ile ilişkisini veren eşitlik;

$$Q = 1.8565 X_L^{-0.1906} \tau^{0.49397} \quad (14)$$

Farklı kanat kalınlıkları için depolanan enerjinin zamanla değişimi Şekil 10'da gösterilmektedir. Kanat kalınlığı arttıkça depolanan enerji artmakta, ancak bu artış belli kanat kalınlığı değerine kadar olmaktadır. Bu sayısal çalışmaya göre, optimum kanat kalınlığı  $X_f=0.15$ 'dir. Bu değer üzerindeki kanat kalınlıkları için depolanan enerji azalmaktadır.

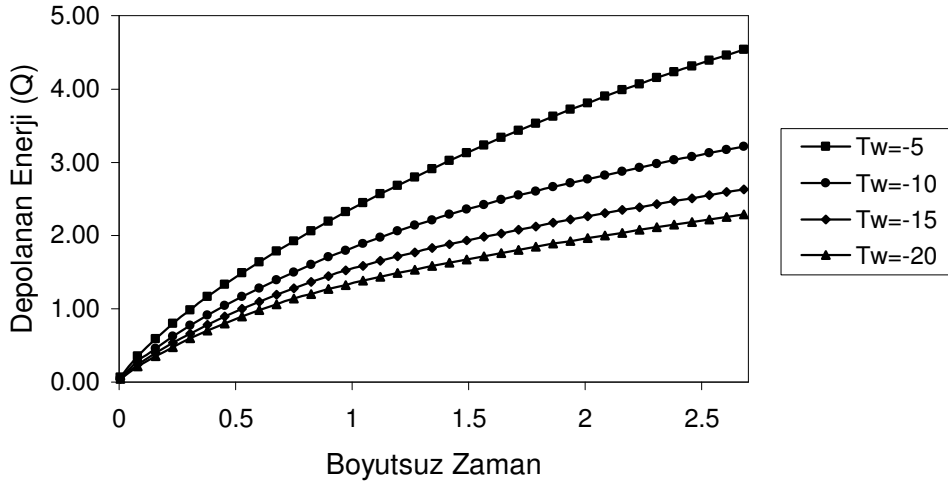


Şekil 9. Kanat aralığının depolanan enerjiye etkisi



Şekil 10. Kanat kalınlığının depolanan enerjiye etkisi

Şekil 11'de ise boyutsuz yüzey sıcaklıkları için depolanan enerjinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Borunun yüzey sıcaklığı azaldıkça depolanan enerji artmaktadır.



Şekil 11. Yüzey sıcaklığının depolanan enerjiye etkisi

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada oluşturulan model ile kanatlı boru etrafındaki katılma problemi farklı kanat parametreleri ve yüzey sıcaklıkları için incelenmiş ve bu model için her bir parametrenin depolanan enerjiye olan etkisi ortaya konulmuştur. Elde edilen eşitliklerin kullanılmasıyla, farklı parametre değerleri için, benzer sistemin ısıl performansı hesaplanabilecektir.

**KAYNAKLAR**

- Abhat A. (1978): "Performance Studies of a Finned Heat Pipe Latent Thermal Energy Storage System", New Delhi, India, International Solar Energy Congress.
- Abhat A. (1980): "Application of Heat Pipes to Thermal Energy Storage Systems", Snowmass, Colorado, USA, AIAA 15<sup>th</sup> Thermophysics Conference, July 14-16.
- Bathelt A.G, Viskanta R. (1981): "Heat Transfer and Interface Motion during Melting and Solidification around a Finned Horizontal Sink/Source", J.Heat Transfer, 103, 720-726.
- Bellecci C., Conti M. (1993): "Phase Change Thermal Storage: Transient Behaviour Analysis of a Solar Receiver/Storage Module using the Enthalpy Method", Int.J.Heat Mass Transfer, 36, 2157-2163.
- Cao Y., Faghri A. (1990): "A Numerical Analysis AO Phase-Change Problems Including Natural Convection", Journal of Heat Transfer, 112, 812-816
- Cao Y., Faghri A. (1991): "Performance Characteristics of a Thermal Energy Storage Module: a Transient PCM/Forced Convection Conjugate Analysis", Int.J.Heat Mass Transfer, 34, 93-101
- Humphries W.R., Griggs E.I. (1977): "A Design Handbook of Phase Change Thermal Control and Energy Storage Devices", Washington, DC, Technical Paper 1074, NASA
- Ismail K.A.R, Alves C.L.F. (1986): "Analysis of the Shell-and-tube PCM Storage System" Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference, 1781-1786
- Ismail K.A.R, Alves C.L.F. (2000): "Ice Formation Around Isothermal Radial Finned Tubes", Energy Conversion & Management, 41, 585-605
- Lacroix M. (1993): "Study of the Heat Transfer Behaviour of a Latent Heat Thermal Energy Storage Unit With a Finned Tube", Int.J.Heat Mass Transfer, 36, 2083-2092.
- Lacroix M. (1993): "Numerical Simulation of Melting and Resolidification of a Phase Change Material around Two Cylindrical Heat Exchangers", Numerical Heat Transfer (A), 24, 143-160.
- Lee S.L. (1989): "A Strongly Implicit Solver for Two-Dimensional Elliptic Differential Equations", Numerical Heat Transfer (B), 16, 161-178
- Padmanabhan P.V., M.V. Khrishna M.V. (1989): "Outward Phase Change in a Cylindrical Annulus with Axial Fins on the Inner Tube", Int.J.Heat Mass Transfer, 29, 1855-1868.
- Patankar S.V. (1980): "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", New York, McGraw-Hill
- Sasaguchi K., Yoshida, H., Nakashima S. (1988): "Heat Transfer Characteristics of a Latent Heat Thermal Energy Storage Unit with a Finned Tube (Effects of fin configuration)", Trans.JSME, 54(504), 2136-2143.
- Sparrow E.M., Larson E.D., Ramsey J.M. (1981): "Freezing on a Finned Tube for Either Conduction-Controlled or Natural Convection-Controlled Heat Transfer", Int.J.Heat Mass Transfer, 24, 273-284.
- Zhang Y., Faghri A. (1996)a: "Analytical Solution of Thermal Energy Storage System with Conjugate Laminar Forced Convection", Int.J.Heat Mass Transfer, 39, 717-724.
- Zhang Y., Faghri A.(1996)b: "Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Energy Storage Systems by using the internally Finned Tube", Int.J.Heat Mass Transfer, 39, 3165-3173.