

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN
TASARIMI VE ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

Muhammet ÖZDOĞAN

Temmuz, 2010

İZMİR

**BİR ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN
TASARIMI VE ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makina Mühendisliği Bölümü, Termodinamik Anabilim Dalı**

Muhammet ÖZDOĞAN

**Temmuz, 2010
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MUHAMMET ÖZDOĞAN tarafından DOÇ. DR. AYTUNÇ EREK yönetiminde hazırlanan “BİR ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN TASARIMI VE ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Aytunç EREK

Yönetici

Doç.Dr. Serhan KÜÇÜKA

Jüri Üyesi

Yard. Doç. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŐEKKÖR

Tecrübesi ve bilgisini benimle paylaşıp, çalıőmalarımda beni yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Aytunç Erek'e vermiş olduğu desteklerden ve bana kazandırmış olduğu deneyimlerden dolayı teőekkörü bir borç bilirim.

Deney düzeneğin kurulumunu ve deneyleri birlikte yaptığım Arő. Gör. Mehmet Akif Ezan'a ve deney düzeneğinin kurulumuna yardım eden Tek. Alim Zorluol'a yardımlarından dolayı teőekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasındaki deneysel alıőmalar 106M418 Nolu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir.

Son olarak, her türlü maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme minnettarlığımı belirtirim.

Muhammet ÖZDOĞAN

BİR ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN TASARIMI VE ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZ

Bu tez çalışmasında, boru-kovan tipi ısı enerjisi depolama sisteminin çalışma parametrelerinin depolama (*katılaşma*) ve geri kullanım (*erime*) periyotlarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir ve depolama için elde edilen deneysel sonuçlar, geliştirilen sayısal yöntem sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Depolama deneylerinde, kovan çapının, boru malzemesinin, ısı transfer akışkanının debisinin ve giriş sıcaklığının etkileri, geri kullanım deneylerinde ise ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığının ve debisinin etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmada amaçlanan, deneysel sonuçlardan ve geliştirilen sayısal yöntemden yararlanılarak boru-kovan tipi ısı enerjisi depolama sisteminin için optimum çalışma parametrelerinin belirlenmesidir. Yapılan analizler sonucunda, sıcaklık dönüşüm modeli ile geliştirilen sayısal kodun sonuçlarının, deneysel sonuçlarla örtüştüğü gözlemlenmiştir. Çalışma parametrelerinin etkisi incelendiğinde ise, ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı, boru malzemesi ve kovan çapı değişimlerinin depolanan enerjiyi önemli biçimde etkilediği görülürken, ısı transferi akışkanının debisinin etkisinin diğer parametrelere göre daha az olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Soğu depolama, Faz değişimi, Enerji depolama, Deneysel ve sayısal inceleme, Ekserji analizi

DESIGN OF THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS AND EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF ITS WORKING PARAMETERS

ABSTRACT

In this study, effects of working parameters of shell-and-tube type thermal energy storage system on charging (*solidification*) and discharging (*melting*) periods was investigated experimentally, and the obtained experimental results for storage were compared with the results of the evaluated numerical method. In the charging experiments, the effects of shell diameter, material of the tube, flow rate and the inlet temperature of the heat transfer fluid, and in the discharging experiments the effects of the inlet temperature and the flow rate of the heat transfer fluid were investigated.

The aim of this study is determining the optimum working parameters of shell-and-tube type thermal energy storage system with the use of experimental results and evaluated numerical method. At the end of the analysis, the results of numerical code evaluated by temperature based method were observed compatible with experimental results. Investigation of the effect of the working parameters showed that while the change of the inlet temperature of the heat transfer fluid, material of tube and shell diameter affects deeply the storage energy, the rate of the heat transfer fluid has a minor effect than the other parameters.

Keywords: Cool storage, Phase change, Energy storage, Numerical and experimental investigation, Exergy analysis

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

1.1 Giriş.....	1
1.1.1 Duyulur Isı Depolama.....	1
1.1.2 Gizli Isı Depolama	2

BÖLÜM İKİ – DENEYSEL ÇALIŞMA..... 10

2.1 Deney Düzeneği ve Deneylerin Yapılışı	10
2.1.1 Deney Düzeneği.....	10
2.1.2 Deneylerin Yapılışı	13
2.2 Ölçüm Yöntemi	14
2.3 Enerji ve Ekserji Analizi	18
2.3.1 Enerji Analizi	19
2.3.2 Ekserji Analizi	20
2.4 Deneysel Sonuçlar ve Sonuçların Değerlendirilmesi.....	21
2.4.1 Depolama Periyodu İçin Parametrik Sonuçlar.....	23
2.4.1.1 Depolama Periyodu İçin Enerji Verimleri	23
2.4.1.2 Depolama Periyodu İçin Ekserji Verimleri.....	26
2.4.2 Geri Kullanım Periyodu İçin Parametrik Sonuçlar.....	28
2.4.2.1 Geri Kullanımın Periyodu İçin Enerji Verimi.....	28
2.4.2.2 Geri Kullanımın Periyodu İçin Ekserji Verimi	29

BÖLÜM ÜÇ – MATEMATİKSEL MODELLEME 32

3.1 Giriş.....	32
3.2 Yarı Sonsuz Silindirdeki Tek Boyutlu Faz Değişimi.....	32
3.2.1 Problemin Analitik Olarak İncelenmesi	33
3.2.2 Problemin Sayısal Olarak İncelenmesi.....	35
3.2.2.1 Sonlu Hacim Yöntemi.....	35
3.2.2.2 Korunum Denklemi.....	40
3.2.2.3 Korunum Denklemine Boyutsuzlaştırılması.....	45
3.2.2.4 Korunum Denklemine Ayrıştırılması	46
3.2.2.5 Enerji Dengesinin Kontrolü	50
3.2.3 Sonuçlar	51
3.3 Boru Etrafındaki Yarı Sonsuz Ortamda Tek Boyutlu Faz Değişimi.....	53
3.3.1 Korunum Denklemleri	54
3.3.1.1 Boru Cıdarı Bölgesi İçin Korunum Denklemi	54
3.3.1.2 FDM Bölgesi İçin Korunum Denklemi	55
3.3.2 Korunum Denklemlerinin Boyutsuzlaştırılması	55
3.3.2.1 Boru Cıdarı Bölgesi İçin Korunum Denklemine Boyutsuzlaştırılması	55
3.3.2.2 FDM Bölgesi İçin Korunum Denklemine Boyutsuzlaştırılması.....	56
3.3.3 Korunum Denklemlerinin Ayrıştırılması.....	57
3.3.3.1 Boru Cıdarı Bölgesi İçin Korunum Denklemine Ayrıştırılması.....	57
3.3.3.2 FDM Bölgesi İçin Korunum Denklemine Ayrıştırılması	59
3.3.3.3 Enerji Dengesi.....	61
3.3.4 Sonuçlar	61
3.4 İki Boyutlu Faz Değişimi	64
3.4.1 Korunum Denklemleri	65
3.4.1.1 İTA Bölgesi İçin Korunum Denklemi.....	65
3.4.1.2 Boru Cıdarı Bölgesi İçin Korunum Denklemi	67

3.4.1.3 FDM Bölgesi İçin Korunum Denklemi	69
3.4.2 Korunum Denklemlerinin Boyutsuzlaştırılması	69
3.4.2.1 ITA Bölgesi İçin Korunum Denklemine Boyutsuzlaştırılması	69
3.4.2.2 Boru Cıdarı Bölgesi İçin Korunum Denklemine Boyutsuzlaştırılması	71
3.4.2.3 FDM Bölgesi İçin Korunum Denklemine Boyutsuzlaştırılması.....	72
3.4.3 Korunum Denklemlerinin Ayrıştırılması.....	72
3.4.3.1 ITA Bölgesi İçin Korunum Denklemine Ayrıştırılması	74
3.4.3.2 Boru Cıdarı Bölgesi İçin Korunum Denklemine Ayrıştırılması.....	76
3.4.3.3 FDM Bölgesi İçin Korunum Denklemine Ayrıştırılması	79
3.4.3.4 FDM Bölgesi İçin Korunum Denklemine Ayrıştırılması	82
3.4.4 Sonuçlar	83
BÖLÜM DÖRT – SONUÇ	88
KAYNAKÇA	91
EK-A. FAZ DEĞİŞİM PROBLEMİ İÇİN BİLGİSAYAR PROGRAM KODU	966
EK-B SEMBOLLER	105
EK-C TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ	108

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Giriş

Dünya nüfusunun ve yaşam standartlarının yükselmesi paralelinde, enerji tüketimi de aynı oranda artmaktadır. Bu artış sonucu, enerji üretiminde en çok paya sahip olan fosil yakıtların sınırlı olması ve bunların kullanımı sonucu oluşan atıklardaki artış, ekonomik ve çevresel birçok sorunu da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle konuyla ilgilenen araştırmacılar, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları bulmaya ve enerji kaynaklarını verimli olarak kullanmaya yönlenmişlerdir. Enerjinin verimli olarak kullanılabilmesi için kullanılan enerji depolama yöntemleri, fosil yakıtların tüketiminin azalmasına, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları bulmak kadar katkı sağlayabilir. Arz talep dengesinin sağlanması, enerji sisteminin verimliliğinin artması, enerjide tasarrufun sağlanması, enerji depolamanın katkılarından bazılarıdır.

Enerjinin depolanabilmesi için birçok yöntem bulunmasına rağmen, uygulamadaki kolaylığından dolayı ısı enerjisi depolama yaygın olarak kullanılan bir enerji depolama yöntemidir. Isı enerjisi, duyulur ısı, gizli ısı ve kimyasal olmak üzere üç şekilde depolanabilir. Bunlardan ısı enerjisinin duyulur ve gizli şekilde depolanması yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Duyulur ısı enerjisi depolamada enerji, sıcaklık değişiminden yararlanılarak, gizli ısı enerjisi depolamada ise enerji, faz değişiminden yararlanılarak depolanır.

1.1.1 Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama, ısı depolama malzemesinin sıcaklığının değişmesi sonucu ısının veya soğğun depolanması olarak tanımlanır. Duyulur ısı depolamada kullanılan ısı depolama malzemesi, yüksek ısı kapasitesine sahip, uzun ömürlü, çevreye duyarlı ve ekonomik olmalıdır. Gazlardaki yüksek basınç güvenlik açısından sorun teşkil ettiğinden, kullanılan duyulur ısı depolama malzemesi sıvı veya katı olmalıdır.

Sıvı malzemeler içerisinde su, ucuz ve bol miktarda bulunduğu için duyulur ısı depolamasında yaygın olarak kullanılır. Suyun, ısı depolama kapasitesinin yüksek olması tercih edilmesinde diğer bir etkidir. 100°C 'nin üstündeki sıcaklıklarda, suyun buhar basıncının aşırı yükselmesi depolama ünitesinin maliyetini yükselteceğinden, yüksek sıcaklık uygulamalarında su tercih edilmemektedir. 100°C 'nin üstündeki sıcaklıklarda organik yağlar, eriyik tuzlar ve sıvı metaller faz değişim malzemesi (FDM) olarak kullanılmaktadır.

FDM olarak su veya diğer sıvıların kullanılması durumunda, suyun buhar basıncı ve diğer sıvılardan etkin olarak yararlanılmasına ilişkin bazı güçlüklerle karşılaşmaktadır. Isı depolama için katı malzemelerin kullanılması durumunda bu tür sorunlarla karşılaşmamaktadır. Bununla birlikte, katı malzemelerin ısı depolama kapasiteleri genellikle daha düşük olduğundan, sıvı malzemelere oranla daha fazla katı malzeme kullanılması gerekmektedir. Katı malzemelerde donma ve kaynama durumlarıyla karşılaşmadığından, bu malzemelerde yüksek sıcaklıklarda olduğu gibi düşük sıcaklıklarda da ısı depolanabilir.

Duyulur ısı depolamada, depolama süresince, depolama sıcaklığı sürekli olarak yükseldiğinden çok fazla ısı kaybı olmakta, geri kullanım sırasında ise depolama sıcaklığı sürekli olarak azaldığından, sistemin ısıl etkinliği azalmaktadır. Depolama, ortam sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiğinden, ısı deposunun yalıtım gereksimi nedeni ile sistemin maliyeti artmaktadır.

1.1.2 Gizli Isı Depolama

Gizli ısı depolama, ısı depolama malzemesinin faz değiştirmesi sonucu ısının veya soğunun depolanması olarak tanımlanır. Bir malzemede faz değişimi, *katı-katı*, *katı-sıvı*, *katı-buhar*, *sıvı-buhar* olmak üzere dört şekilde gerçekleşmektedir.

Katı durumdaki bir malzeme kristalleşerek diğer bir katı faza döndüğünde (*katı-katı faz değişimi*), kristalleşme ısısı şeklinde ısı depolanır. Sıvı-buhar şeklinde gerçekleşen faz değişiminde, katı-sıvı veya katı-katı faz değişimlerinden daha yüksek

oranda gizli ısı açığa çıkar. Ancak uygulamada gaz fazının depolamasında ortaya çıkan güçlükler, sıvı-buhar ve katı-buhar değişiminde açığa çıkan gizli ısının depolamasını sınırlandırır. Pratikteki uygulamalarda, sadece katı-sıvı faz değişimine uğrayan FDM'lerden yararlanır. Katı-sıvı faz değişimi gerçekleştiren FDM'ler, büyük hacim değişimi olmaksızın, dar sıcaklık aralığında, kısmen fazla miktarda ısı depolayabilirler.

Gizli ısı depolama yönteminin diğer ısı depolama yöntemlerine göre birçok üstünlüğü vardır. Bu üstünlükleri, Öztürk (2008) aşağıdaki gibi sıralamıştır.

- Duyulur ısı depolamaya kıyasla, ısı depolama kapasitesi yüksektir.
- Daha az FDM kullanıldığından, gerekli ısı deposu hacmi daha azdır.
- FDM birim kütlelerinin ısı depolama kapasitesi yüksektir.
- FDM'lerin faz değiştirme sıcaklıkları, sabit sıcaklıkta ısı depolama ve geri kullanım için uygundur.
- Sabit sıcaklıkta ısı gerektiren uygulamalar için yeterince uygundur.
- Büyük boyutlu sistemlerde ekonomik olarak uygulanabilir.

Gizli ısı depolama, soğutma amaçlı kullanılmak üzere, soğu depolama ve ısıtma amaçlı kullanılmak üzere ısı depolama diye iki şekilde gerçekleştirilebilir. Koca ve ark. (2008)'nin çalışmasındaki gibi ısıtma amaçlı ısı depolamada ısı, erime sıcaklığı ortam sıcaklığından daha yüksek olan FDM kullanılarak depolanmaktadır. Güneş kolektörü içerisinde bulunan, erime sıcaklığı 29°C olan FDM, gündüz güneşten almış olduğu ısı ile eriyerek bu ısıyı depolamakta, akşam ise, havanın soğuması ile birlikte kolektörün içindeki ısı değiştirgecinden 29°C 'den daha düşük bir sıcaklıkta geçirilen ısı transferi akışkanı (ITA) ile, FDM tekrar katılaştırılmaktadır ve 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. Soğu depolamada MacPhee ve Dinçer (2009a)'in çalışmasında da kullandıkları gibi erime sıcaklığı ortam sıcaklığından daha düşük olan FDM kullanılmaktadır. Erime sıcaklığı 0°C olan suyun içerisindeki ısı değiştirgecinden,

soğutma sisteminden -10°C 'de çıkan ITA geçirilerek su dondurulmakta ve böylelikle soğu enerjisi, buz olarak depolanmaktadır.

Gizli ısı depolama uygulamalarında FDM genellikle, küçük kapsüller içerisinde veya içinde ısı değiştirgeci barındıran sürekli hacimler içerisinde bulunurlar. 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 geometrilerde üretilmektedir. Kapsüllerin kullanılması sonucunda faz ayrışması sorunu önemli oranda azalmaktadır. Ayrıca kapsüllü depolama sistemleri tekrarlanan depolama ve geri kullanım çevrimlerine oldukça uygundur. Bazı iyileştirmelerle ısı geçiş katsayısı artırılabilir. Tüm bu avantajların yanında, kapsüllerin pahalı olması, depolamada kapsüllerin kullanılması için büyük bir engel teşkil etmektedir. FDM'nin sürekli hacim içerisinde bulunması durumunda ise kullanılan ısı değiştirgecinin tasarımı ve çalışma parametreleri önem arz etmektedir. Sürekli hacim içerisinde, FDM'nin hacmi optimum kullanılmalı ve faz değişiminin homojen olarak gerçekleşmeli ve sistemin çalışma parametreleri istenilen sıcaklıkta ve yükte olmalıdır. Bu koşulların sağlanması için ısı değiştirgecinde, kanat takma, aralıklarla oynama, boru çapının değişimi gibi iyileştirmeler yapılabilmektedir.

Gizli ısı depolamada, ASHRAE (1999) ve Sharma ve ark. (2009)'nın çalışmalarında belirttiği gibi, FDM'nin seçimi için dikkat edilmesi gereken bir takım özellikler vardır. FDM'nin erime noktası, istenilen çalışma sıcaklığı sınırlarında olmalıdır. Daha küçük hacimlerde büyük miktarda enerji depolayabilmek için, FDM'nin yoğunluğunun, birim kütlelerinin erime ısısının ve özgül ısısının yüksek olması gerekir. Depolamanın veya geri kullanımının kısa sürede gerçekleşebilmesi için FDM'nin ısı iletkenliği yüksek olmalıdır. FDM'nin erime sıcaklığı sabit olmalı ve faz değişimi sırasında hacimsel değişimi düşük olmalıdır. Faz değişimi sırasında faz ayrışmasının gerçekleşmesi, istenmeyen bir durumdur. Sistemin uzun ömürlü olabilmesi için FDM'nin kimyasal özelliği değişmemeli ve depo için uygun olmalıdır. Tüm bunların yanında FDM kolay temin edilebilmeli, tehlikeli olmamalı ve ucuz olmalıdır.

Tablo 1.1’de suyla beraber gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan bazı FDM’lerin ısı özellikler verilmektedir. Buradan görüldüğü gibi suyun erime ısı ve buzun ısı iletim katsayısı diğer malzemelere göre oldukça yüksek ve faz değişim sıcaklığı da soğu depolama uygulamaları için uygundur. Bunlardan dolayı soğu depolamaları sistemleri için su, FDM olarak yaygın kullanılmaktadır. Suyun, ucuz, çevre dostu ve kararlı oluşu, FDM olarak kullanılmasının diğer etmenlerindedir.

FDM’nin yanı sıra, gizli ısı depolamada, sistemin etkinliğini etkileyen birçok etmen vardır, Bu etmenleri Öztürk (2008) aşağıdaki gibi belirtmiştir.

- FDM’nin termo-fiziksel özellikleri
- Erime/katılma süresince ısı geçişi
- Isı değiştirici tasarımı
- Isı taşıyıcı akışkanın (ITA’nın) debisi
- Isı taşıyıcı akışkanın termo-fiziksel özellikleri
- Sıcaklık, ısı geçişi ve depolanan ısı zamanla değişimi
- FDM ve ITA arasındaki düşük sıcaklık farkıyla, depolanan ısı uygun olarak taşınması
- Isı deposunun ortalama sıcaklığı
- Isı depolama ve ısı geri kullanım süreleri
- Isı deposunun yalıtımı ve ısı deposundan olan ısı kaybı
- Sistemin kaplamış olduğu hacim

Birim miktarda depolanan enerji başına daha az hacim gerektirmesi ve faz değişimli ısı geçişi sırasında meydana gelen dar sıcaklık aralığı sebebiyle, gizli enerji depolama sistemleri birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Gizli ısı depolama sistemleri konusunda gerçekleştirilmiş çalışmaları özetleyen referans yayınlar, bu sistemleri ve inceleme alanlarını çok iyi sınıflandırmaktadır (Baker, 2008; Dinçer ve Rosen, 2002; Eckert ve ark., 1997; Sharma ve ark.,2009; Kakaç ve ark., 1985; Zalba ve ark., 2003).

Tablo 1.1 Bazı FDM'lerin sıvı ve katı fazları için özellikleri (Farid ve ark., 2005)

Malzeme	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Isısı (kJ/kg)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
H ₂ O	0	334	0,612 (Sıvı, 20 °C) 2,2 (Katı, 0 °C)	998 (Sıvı, 20 °C) 917 (Katı, 0 °C)
<i>İnorganik</i>				
MgCl ₂ • 6H ₂ O	117	168,6	0,570 (Sıvı, 120 °C) 0,694 (Katı, 90 °C)	1450 (Sıvı, 120 °C) 1569 (Katı, 20 °C)
Mg(NO ₃) ₂ • 6H ₂ O	89	162,8	0,490 (Sıvı, 95 °C) 0,611 (Katı, 37 °C)	1550 (Sıvı, 94 °C) 1636 (Katı, 25 °C)
Ba(OH) ₂ • 8H ₂ O	48	265,7	0,653 (Sıvı, 85,7 °C) 1,225 (Katı, 23 °C)	1937 (Sıvı, 84 °C) 2070 (Katı, 24 °C)
CaCl ₂ • 6H ₂ O	29	190,8	0,540 (Sıvı, 38,7 °C) 1,088 (Katı, 23 °C)	1567 (Sıvı, 32 °C) 1802 (Katı, 24 °C)
<i>Organik</i>				
Parafin	64	173,6	0,167 (Sıvı, 63,5 °C) 0,346 (Katı, 33,6 °C)	790 (Sıvı, 65 °C) 916 (Katı, 24 °C)
Polyglcol E600	22	127,2	0,189 (Sıvı, 38,6 °C)	1126 (Sıvı, 25 °C) 1232 (Katı, 4 °C)
<i>Yağ Asidleri</i>				
Palmitik Asid	64	185,4	0,162 (Sıvı, 68,4 °C)	850 (Sıvı, 65 °C) 989 (Katı, 24 °C)
Kaprik Asid	32	152,7	0,153 (Sıvı, 38,5 °C)	878 (Sıvı, 45 °C) 1004 (Katı, 24 °C)
Kaparilik Asid	16	148,5	0,149 (Sıvı, 38,6 °C)	901 (Sıvı, 30 °C) 981 (Katı, 13 °C)
<i>Aromalı</i>				
Naftalin	80	147,7	0,132 (Sıvı, 83,8 °C) 0,341 (Sıvı, 49,9 °C)	976 (Sıvı, 84 °C) 1145 (Katı, 20 °C)

Erime ve katılaşma problemlerinin incelendiği çalışmalar, iki alt grupta değerlendirilebilir. Birinci grup çalışmalarda, küresel veya silindirik geometriler içindeki sürecin daha mikro düzeyde deneysel veya sayısal incelendiği ve doğal taşınım etkilerinin detaylarıyla ortaya konulduğu araştırmalar yer almaktadır (Tan ve ark., 2009; İsmail ve Silva, 2003a; İsmail ve Silva, 2003b; Agyenim ve ark., (2009); Khodadadi ve Zhang, 2001; Christenson ve Incropera, 1989; Webb ve ark., 1987; Ho ve Chen, 1986; Kakaç ve ark., 1985). 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 (Medrona ve ark.,2009; Erek ve Dinçer, 2008; Habeebullah, 2007; MacPhe ve Dinçer, 2009b; Erek ve Ezan, 2007; Trp ve ark. 2006; Erek ve ark., 2005; Rosen ve ark., 1999; Lacroix, 1993; Abhat, 1979).

Tan ve ark. (2009) küre içi doğal taşınım etkilerini FLUENT paket programı yardımıyla sayısal olarak incelemiş ve zamana bağlı buz profili değişimlerini, gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar ile doğrulamışlardır. Elde edilen çalışma ışığında, küre içerisinde ayrı ayrı iletim ve taşınımın baskın olduğu iki farklı ısı transferi bölgesi olduğu görülmüştür. İsmail ve Silva (2003a ve 2003b) yatay bir silindir çevresindeki erime sürecini sabit yüzey sıcaklığı için sayısal olarak modellemişlerdir. Erimenin ilk süreçlerinde, iletimin baskın olduğu simetrik bir ısı transferi söz konusuyken, ilerleyen zamanlarda, taşınım etkilerinin artmasıyla asimetrik bir buz profili ve açığa bağlı değişen Nusselt dağılımının olduğu gözlenmiştir. Agyenim ve ark., (2009) yaptıkları deneysel çalışmada düz boru ile dairesel ve boyuna kanatlı borular için, erime periyodu boyunca meydana gelen radyal, açısız ve aksel sıcaklık dağılımlarının farklılaşmasını incelemişlerdir. Khodadadi ve Zhang (2001) ise küre içerisindeki erime sürecini farklı Rayleigh, Stefan ve Prandtl sayıları için sayısal olarak incelemişlerdir. 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. Christenson ve Incropera (1989) $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ şeffaf faz değişim malzemesinin farklı konsantrasyon oranları için boru-kovan tipi ısı değiştiricisi içerisindeki katılaşma sürecini deneysel olarak incelemişlerdir. 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 ve fotoğraf yöntemleri kullanılmıştır. Burada ikili kompozisyondan dolayı oluşan ısı tabakalanma ve doğal taşınım bölgeleri görsel olarak çözümlenmiştir. Webb ve ark., (1987) silindirik kapalı hacim içerisindeki buzun dıştan erimesi işlemine farklı yüzey sıcaklıkları için deneysel olarak incelemişlerdir. Burada buz sabitlenmemiş ve erime boyunca kaldırma kuvveti etkisiyle oluşan buz hareketi ve iç doğal taşınım oluşumları görsel olarak

elde edilmiştir. Ho ve Chen, (1986) silindirik boru etrafındaki içten erime problemini sayısal olarak modellemişlerdir. Farklı yüzey sıcaklıkları için elde ettikleri sıcaklık ve hız dağılımlarını mevcut deneysel çalışmalarla doğrulamışlardır. Boru yüzey sıcaklığına bağlı olarak doğal taşınım değişimleri ve boru çevresi meydana gelen Nusselt sayısı değişimleri detaylarıyla sunulmuştur. Kakaç ve ark., (1985) ise o döneme kadar gerçekleştirilmiş katılaşma/erime araştırmalarını çok geniş bir biçimde derleyerek doğal taşınım etkisinin erime ve katılaşma üzerine etkilerini detaylarıyla sunmaktadır.

Medrona ve ark. (2009) ise yaygın olarak kullanılan beş farklı eşanjör konstrüksiyonu için katılaşma ve erime süreçlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Burada depolama/erime süresine ve depolanan/geri kullanılan enerjiye konstrüksiyonların yanı sıra, ikincil akışkanın giriş sıcaklığı ve debisinin etkileri de ortaya konulmuştur. Erek ve Dinçer (2008) ise tek borulu ısı enerjisi depolama sisteminin enerji ve ekserji analizini katılaşma süreci için sayısal olarak incelemişlerdir. İkincil akışkanın farkı 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 incelenmiştir. 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 (2007) 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. Elde ettiği sonuçlara göre, yüksek akışkan debileri için boru akseni 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. MacPhee ve Dinçer (2009b) tarafından silindirik, küresel ve prizmatik kapsüllerde, giriş sıcaklığının ısı geri kullanıma etkisini sayısal olarak incelenmiş ve sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanarak

doğrulanmıştır. Sonuçlara göre, giriş sıcaklığının artması enerji verimini arttırırken 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. Erek ve Ezan (2007) serpantinli soğu depolama sisteminin depolama performansına ikincil akışkanın giriş sıcaklığının ve debisinin etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Depolanan enerjinin değişimine ikincil akışkan debisinin giriş sıcaklığına nazaran çok daha etkili olduğu ortaya koyulmuştur. Trp ve ark. (2006) düşey 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 incelemiştir. Sıcaklık değişiminin hem katılaşmada hem de erimede, debi değişiminin ise katılaşmada etkin olmasına rağmen erimede kayda değer bir değişime yol açmadığı gözlenmiştir. Bunun yanında boru uzunluğunun/kovan çapının arttırılmasıyla, depolanan/geri kullanılan enerjinin de arttığı ortaya konulmuştur. Erek ve ark. (2005) tarafından gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalarda ise yatay düz boru ile birlikte çeşitli çap, sayı ve aralıklara sahip kanatlı boruların depolama davranışına etkisi incelenmiştir. 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. Rosen ve ark. (1999) enerji ve ekserji analizi yaparak, soğu enerjisi depolama sisteminin termodinamik performansını incelemiştir. Sonuç olarak, sistemin performansının belirlenmesinde ekserji veriminin kıyaslanmasının, enerji veriminin kıyaslanmasına nazaran daha gerçekçi olduğu görülmektedir. Lacroix (1993) düşey olarak yerleştirilmiş boru-kovan tipi enerji deposu içerisindeki parafinin erime sürecini deneysel ve sayısal olarak farklı akış koşulları ve geometrileri için incelemiştir. Erime sırasında meydana gelen doğal taşınım etkilerini eşdeğer ısı iletim katsayısı kabulü yaparak hesaplamalarına dahil etmiştir. Abhat (1979) kanatlı ısı borusu şeklindeki enerji deposunun depolama ve erime davranışını incelemek için prototip sistem üzerinde araştırmalarda bulunmuştur. Burada borunun akış yönünde ve çevresinde oluşan farklılaşmaları incelemek için üç kesitte toplam 86 ısı çift kanatlar üzerine yerleştirilmiş ve böylece değişimler incelenmiştir.

BÖLÜM İKİ

DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1 Deney Düzeneği ve Deneylerin Yapılışı

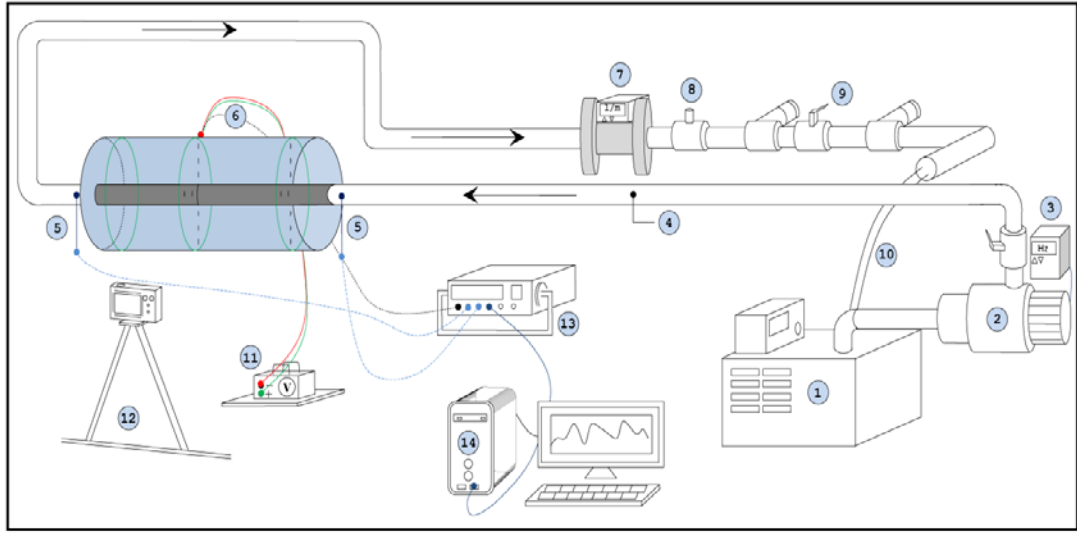
2.1.1 Deney Düzeneği

Tek borulu gizli ısı depolama sistemine ait deney düzeneği, Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Deney düzeneğini kısaca açıklamak gerekirse, POLYSCIENCE sabit sıcaklık banyosunda (1) sıcaklığı ayarlanan ısı transferi akışkanı (*Hacimce %40 etilen glikol-su karışımı*), WILO dolaşım pompası (2) ve DELTA motor hız kontrol elemanı (3) ile istenen debiye uygun frekans ayarlanarak, paslanmaz çelik boru hattı (4) üzerinden enerji deposuna ulaşmaktadır. Soğutucu akışkanın enerji deposuna giriş ve çıkış sıcaklıkları ELİMKO Pt-100 sıcaklıkölçerleri (5) ile ölçülmektedir. Enerji deposunun boru-kovan arasındaki halkasal bölgesinde yer alan faz değişim malzemesi (*su*), zamanla katılaşarak/eriyerek soğu enerjisinin depolanması/geri kullanılması gerçekleşmektedir. Depo içerisindeki zamana ve konuma bağlı faz değişim miktarının tespit edilmesi ve halkasal bölgedeki su/buz sıcaklık dağılımlarının elde edilmesi için faz değişim malzemesi içerisine ölçüm kartları (6) yerleştirilmiştir. Soğutucu akışkanın hacimsel debisi ise, geri dönüş hattı üzerine yerleştirilen BÜRKERT elektromanyetik debi ölçer ile izlenmekte ve tüm ölçümler bilgisayar ortamına aktarılmaktadır (7).

Suyun katı-sıvı fazları arasındaki yoğunluk farkından dolayı, suyun buz fazına geçmesiyle aynı kütle için hacmi artmaktadır. Bu nedenle, faz değişim uygulamalarında suyun tahliyesine imkân veren taşıma bağlantıları oluşturulmaktadır. Hem sistemden fazla suyu tahliye etmek, hem de katılaşma deneyleri öncesi faz değişim malzemesini dolaşım yaparak soğutmak amacıyla, yanal sabit kapaklar üzerine vanalı bağlantılar oluşturulmuştur.

Dış ortamdan ısı kazançlarını azaltmak amacıyla, kovan ve kapaklar üzerine iki kat yalıtım malzemesi uygulanmıştır. 15 mm kalınlığındaki esnek armaflex yalıtım

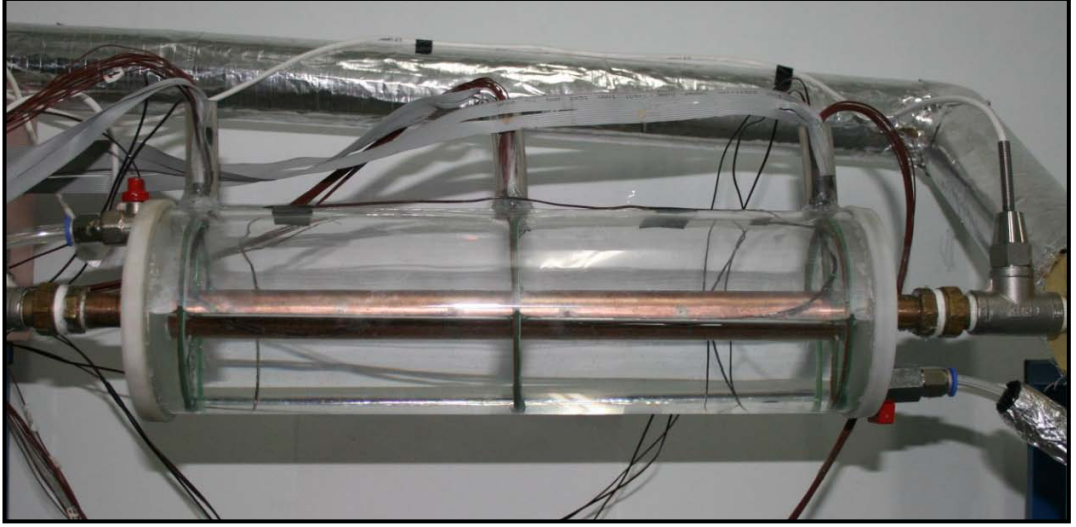
malzemesi üzerine 30 mm kalınlığındaki sert cam yünü sarılmıştır. Kovanın akış yönüne göre orta kısmında ise fotoğraf çekim anlarında açmak amacıyla, karşılıklı kapaklar oluşturulmuştur. Boru-kovan tipi gizli ısı deposu izolasyonlu ve izolasyonsuz olarak Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Fotoğraflarda su/buz ara-yüzeyini daha iyi gözlemleyebilmek için de kovanın altına harici bir ışık kaynağı yerleştirilmiştir.



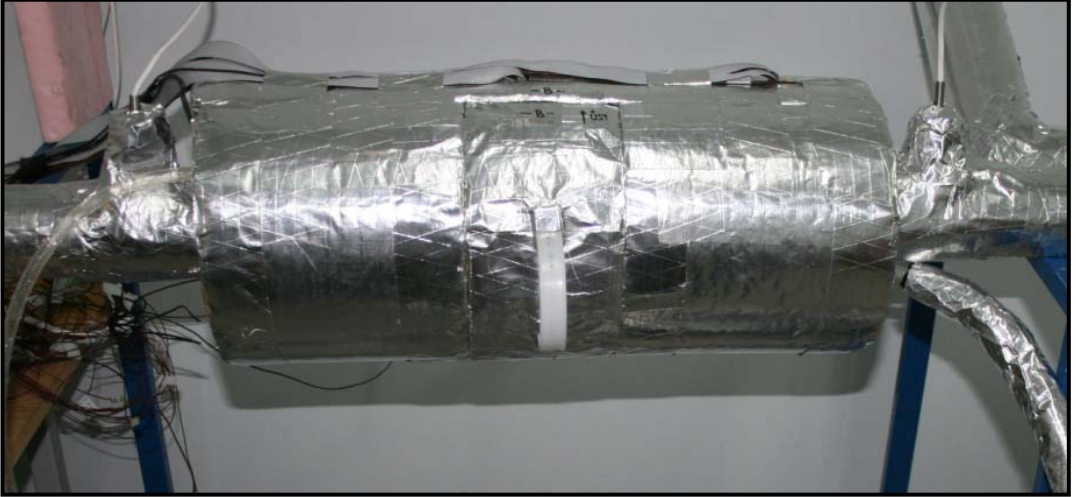
(1) Sabit sıcaklık banyosu, (2) Pompa, (3) Motor hız kontrol ünitesi, (4) Boru hattı, (5) Pt-100 Sıcaklık ölçer, (6) Sıcaklık ve buz ölçüm kartı, (7) Elektromanyetik akış ölçer, (8) Elektronik vana, (9) By-pass hattı, (10) Geri dönüş bağlantısı, (11) Elektronik devre, (12) Fotoğraf makinası, (13) Veri toplama cihazı, (14) Bilgisayar

Şekil 2.1 Tek borulu enerji depolama sistemi

Deneylerde, iç ve dış çapı sırasıyla $D_{iç} = 15 \text{ mm}$ ve $D_{dış} = 25 \text{ mm}$ olarak imal edilmiş $l = 400 \text{ mm}$ uzunluğunda, bakır, çelik ve PE-32 malzemeden borular kullanılmıştır. $D_{kovan} = 114 \text{ mm}$ ve $D_{kovan} = 190 \text{ mm}$ olmak üzere iki farklı çaplı kovan için deneyler tekrarlanmış ve kovan çapının depolamaya etkisi incelenmiştir. Kovan malzemesi olarak, şeffaf olması nedeniyle Plexiglass (akrilik) tüp kullanılmıştır. Kovan tüpü ve iç boru, polyamid malzemeden imal edilmiş 30 mm kalınlığındaki kapaklarla sıkılarak suyun bulunduğu halkasal silindirik tüp oluşturulmuştur. Suyun halkasal bölgedeki sızdırmazlığını sağlamak için ise yanıl kapaklar üzerine o-ring kauçuklar yataklanmıştır.



(a) Yalıtımsız



(b) Yalıtımlı

Şekil 2.2 Boru-kovan tipi depolama tankı

Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir. Tablo oluşturulurken hesaplamalar için gerekli olan özellikler göz önüne alınmıştır. Boru malzemesinin, suyun ve buzun özelliklerinin sıcaklığa göre değişmediği kabul edilmiştir. ITA’nın özellikleri, depoya giriş sıcaklıkları için bulunmuştur.

Tablo 2.1 ITA, FDM ve boru malzemelerinin ısı özellikleri

Malzeme	ρ (kg / m^3)	c_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	k ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	α ($m^2.s^{-1}$)	μ ($mPa.s$)	L ($J.kg^{-1}$)
ITA (-5 °C)*	1066,80	3401	0,389	1,072x10 ⁻⁷	7,18	-
ITA (-10 °C)*	1068,28	3384	0,383	1,059x10 ⁻⁷	9,06	-
ITA (-15 °C)*	1069,63	3367	0,377	1,047x10 ⁻⁷	11,74	-
Bakır	8933	385	401	117x10 ⁻⁶	-	-
Çelik	8055	480	15,1	3,9x10 ⁻⁶	-	-
Pe-32	938	2300	0,38	1,761x10 ⁻⁷	-	-
Su	999,8	4210	0,567	1,347x10 ⁻⁷	-	333400
Buz	916,8	2040	2,2	1,176x10 ⁻⁷	-	-

*Kaynak: ASHRAE Fundamentals 1997

2.1.2 Deneylerin Yapılışı

Katılma deneylerine başlamadan önce öncelikle faz değişim malzemesi (*su*) ve ısı transferi akışkanı (*%40 etilen glikol-su karışımı*) deney için uygun sıcaklıklara getirilmektedir. İkincil akışkanın sıcaklığı sabit sıcaklık banyosu ile şartlandırılmaktadır. Halkasal bölgedeki suyun sıcaklığının, faz değişim sıcaklığına yakın sıcaklığa düşürülmesi için de basit bir soğutma hattı kurulmuştur. Yalıtılmış ayrı bir kap içindeki buz-su karışımı, küçük bir dolaşım pompası yardımıyla yanıl kapaklar üzerindeki giriş-çıkış bağlantılarından devir daim yaptırılmakta ve böylelikle kovan içerisindeki suyun (FDM) sıcaklığı düşürülmektedir. Kartlar üzerindeki sıcaklık değerleri yardımıyla suyun ortalama sıcaklığının yaklaşık olarak 0,5°C'nin altına düştüğü anda, su dolaşımı kesilmekte ve sistemin iç dengesi için kısa bir süre beklenmektedir. Deney için tüm şartlar uygun olduğunda, ikincil akışkan pompa yardımıyla deney için istenen sıcaklık ve debide hatta gönderilmektedir.

Deney süresince tüm sıcaklık ve debi ölçümleri, AGILENT 34970A veri alma cihazı ile birer dakika arayla taranmakta ve bilgisayar ortamında kaydedilmektedir. Boru çevresindeki su/buz ara-yüzeyini elde etmek amacıyla, üç ayrı kesite yerleştirilen kartlar üzerindeki toplam 45/81 elektrot değerleri de yine birer dakika arayla özel olarak imal ettirilen cihaz yardımıyla taranmaktadır. Ayrıca ölçüm

yönteminin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla, belirli zaman aralıklarıyla, yalıtım üzerinde oluşturulan kapaklar açılarak su/buz ara-yüzeyinin fotoğrafı Şekil 2.3'te görüldüğü gibi çekilmektedir.

Katılma deneyleri halkasal bölgedeki suyun tamamen buz fazına geçmesiyle sonlandırılmakta ve erime deneyleri katılma deneylerinin devamında gerçekleştirilmektedir. Erime deneyi için, sabit sıcaklık banyosunda ikincil akışkan sıcaklığı ayarlandıktan sonra, boru hattına yine istenen debi ve giriş sıcaklığında gönderilmekte ve deney başlatılmaktadır.

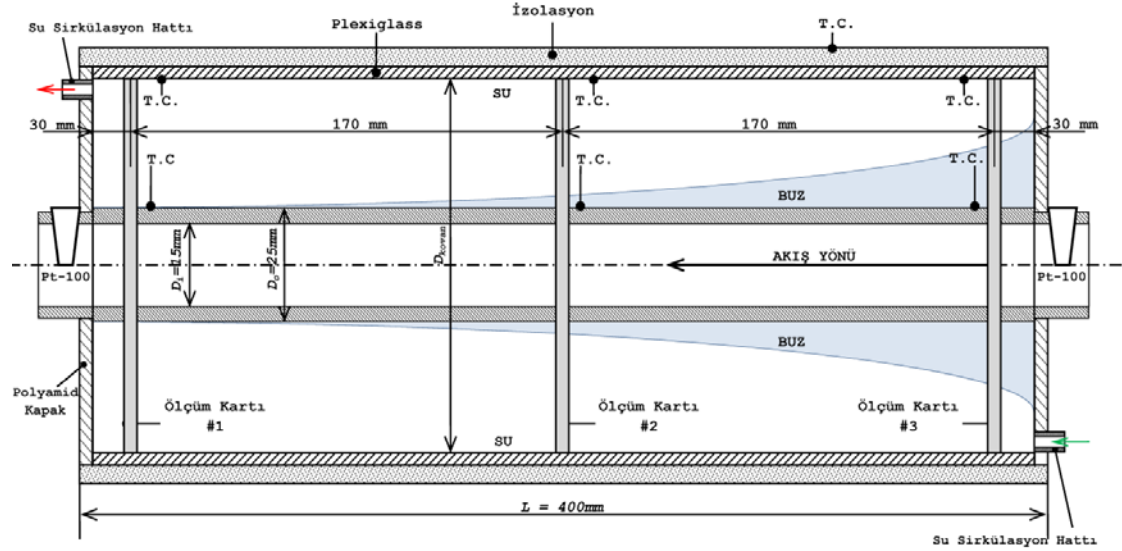


Şekil 2.3 Fotoğraf çekimi

2.2 Ölçüm Yöntemi

Oluşturulan boru-kovan tipi gizli enerji deposuna ait geometrik parametreler; ölçüm kartlarının konumu; boru üzeri, kovan ve yalıtım üzeri sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Isı transferi akışkanının enerji deposuna giriş ve çıkış sıcaklıkları Pt-100 sıcaklık ölçer ile okunmaktadır. Bunun yanında boru yüzeyi, yalıtım malzemesinin iç ve dış yüzeyleri ile ölçüm kartları üzerindeki ısı çiftleriyle birlikte, toplamda 54 noktadan birer dakika arayla deney boyunca sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmektedir. Boru ve kovan üzerinde 24-Gauge T-tipi ısı çifti kullanılırken, kartlar üzerinde daha küçük çaplı 30-Gauge T-tipi ısı çiftleri tercih edilmiştir.

Sistemdeki akışkan debisi ise, yine birer dakika arayla elektromanyetik debi ölçerden sinyal olarak alınmakta ve bilgisayarda depolanmaktadır.

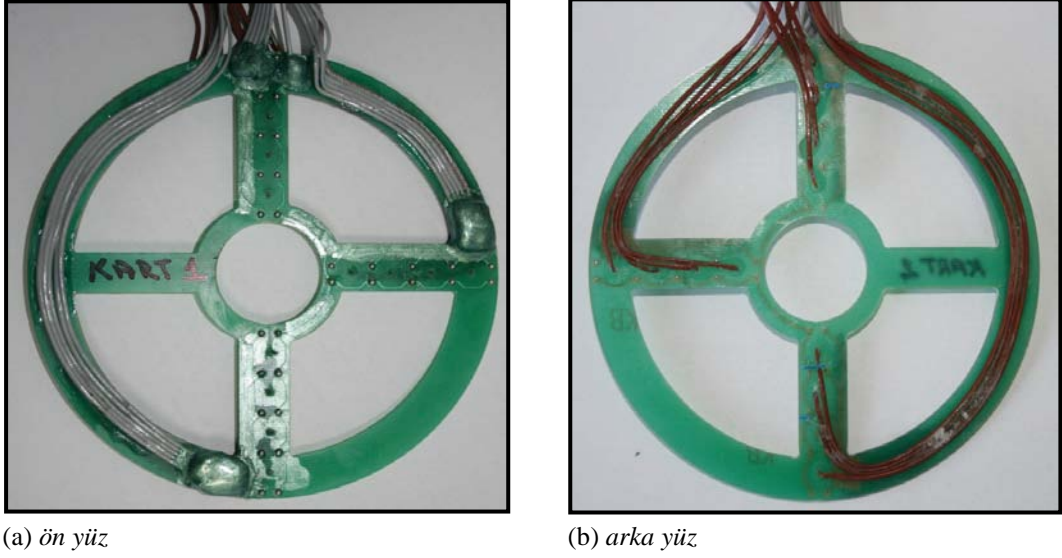


Şekil 2.4 Boru ve kovan geometrisi

Deneylerde su-buz ara yüzeyinin ve depo içi sıcaklığın zamana, kesite ve yöne bağlı değişimini tespit etmek amacıyla kovan içerisinde 3 ayrı kesite ölçüm kartları yerleştirilmiştir. Şekil 2.5'te de görüldüğü gibi, her bir kart üzerinde alt ($\beta = -90^\circ$), üst ($\beta = 90^\circ$) yan ($\beta = 0^\circ$) olmak üzere üç yönde elektrot çiftleri ve ısıl çiftler yerleştirilmiştir. Suyun katı ve sıvı fazları arasındaki elektriksel iletkenlik farkını temel alan yöntemle, elektrotların bulunduğu konumdaki buzlaşma anları elektronik olarak tespit edilebilmektedir. Zamana ve yöne bağlı ara yüzey değişimlerini elde etmek amacıyla kovan çapına bağlı olarak her bir kartta 15/27 elektrot çifti kullanılmıştır.

Faz değişimli enerji depolama sistemlerinde ara-yüzeyin tespit edilmesi için kullanılan en yaygın yöntem, belirli zaman aralıklarıyla faz değişim malzemesinin fotoğrafının çekilmesi ve bu görüntü üzerinden ölçekleme gerçekleştirilmesidir (Erek ve ark., 2005; Khodadadi ve Zhang, 2001; Christenson ve Incropera, 1989; Ho ve Chen, 1986). Bu nedenle enerji deposu üzerinde oluşturulan kapaklar belirli zamanlarda açılarak fotoğraf çekimleri yapılmıştır. Deneylerde borunun alt ve üst kısmında simetrik bir buz oluşmadığından, hem elektrotlar için, hem de

fotoğraflardan alt ve üst yarıçaplar ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Alt ve üst yönler için buz yarıçapı değerlerini hesaplamak için, boru çapı referans alınarak, fotoğraf üzerinden ölçükleme yapılmaktadır (Şekil 2.6).



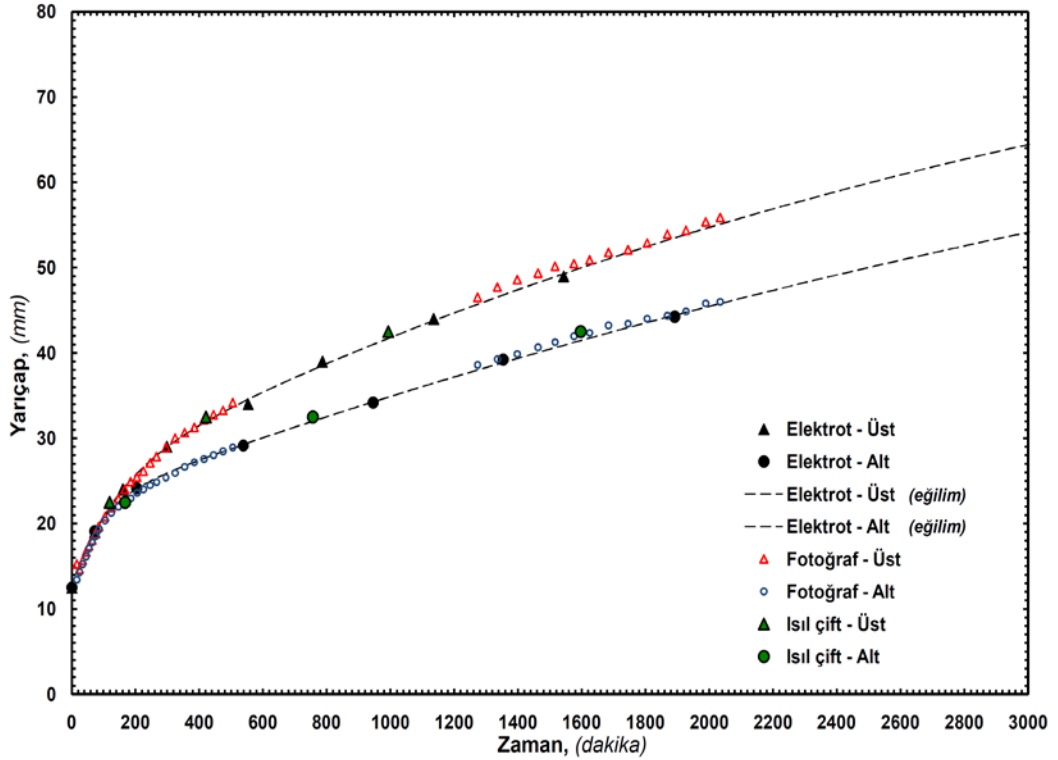
Şekil 2.5 Ölçüm kartı üzerinde elektrot ve ısı çift yerleşimi



Şekil 2.6 Fotoğraf üzerinden ölçükleme

Ölçüm kartlarındaki, elektrot çiftlerin ve ısı çiftlerin yapmış olduğu ölçümün doğruluğunu kontrol etmek amacıyla, fotoğraf çekimi ile elde edilen buz yarıçapı değerleri, ısı çift ve elektrot çifti ölçümleriyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Durum #4 için $T_{giriş} = -10^{\circ}C$, $\dot{V} = 2 l / dk$ deneyi için

gerçekleştirilen karşılaştırma grafikleri Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7 Isıl çiftlerin ve elektrot çiftlerin ölçümünün doğrulanması

Deneylerde boru malzemesi ve kovan çapının etkilerini incelemek için toplamda dört ayrı durum incelenmiştir. Bunlara ait bilgiler Tablo 2.2’de verilmektedir. Burada, her bir durum için kullanılan boru malzemesi, kovanın çapı (D_{kovan}), ölçüm kartı üzerindeki ilk elektrotun konumu (r_e), radyal yöndeki elektrotlar arası mesafe (Δr_e), kart üzerindeki toplam elektrot sayısı (n_e) ve ısıl çiftler arası mesafe (r_i) parametrik olarak verilmiştir.

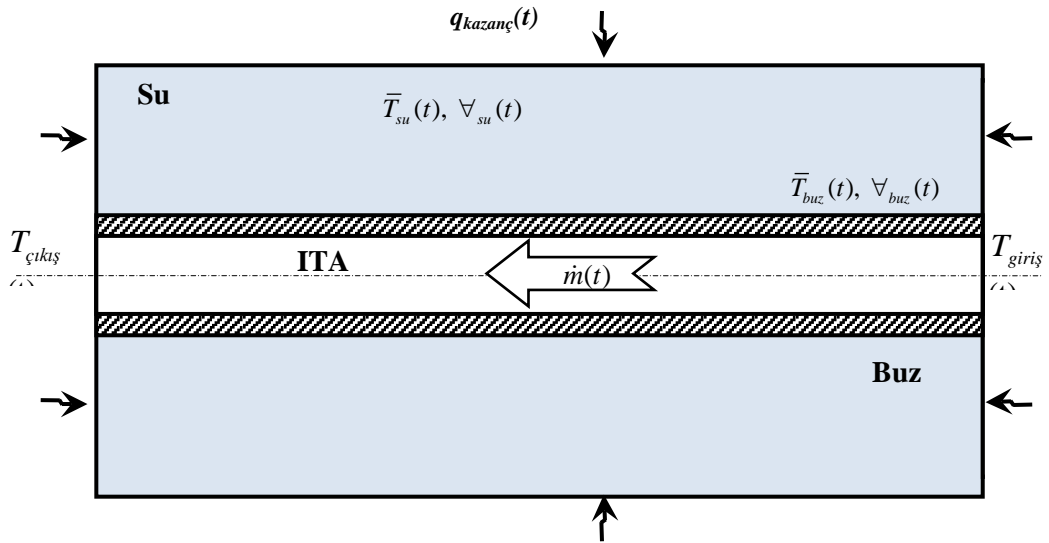
Boru malzemesi ve kovan çapı değişimi gibi yapısal değişimlerle ölçüm hassasiyetinin etkilenmemesi için her montaj öncesi yeni ölçüm kartları hazırlanmış ve ısıl çiftler de tekrar kart üzerine yerleştirilerek veri ölçüm cihazıyla birlikte kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Tüm ısıl çiftler için kalibrasyonlar -20°C ile $+25^{\circ}\text{C}$ aralığında sabit sıcaklık banyosu ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.2 Geometrik parametreler

Parametre	Durum #1	Durum #2	Durum #3	Durum #4
Boru Malzemesi	Çelik	Bakır	PE-32	PE-32
D_{kovan}		114 mm		190 mm
r_{el}		15 mm		20 mm
Δr_{el}		10 mm		5 mm
Δr_t		10 mm		
n_{el}		15 nokta		27 nokta
n_t		12 ısı çifti		

2.3 Enerji ve Ekserji Analizi

Depolama ve geri kullanım periyotları için sistemin enerjistik ve ekserjistik performansı deneysel olarak incelenmiştir. Hesaplamalar, anlık hacimsel ortalama sıcaklık ve buz hacmi değerleri için gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.8 hesaplamalarda kullanılan hacimler ve hesaplama parametrelerini göstermektedir. Burada, $T_{giriş}(t)$, $T_{çıkış}(t)$, $\dot{m}(t)$ sırası ile ısı transfer akışkanının giriş ve çıkış sıcaklıklarının ve kütleli debisinin zamana göre değişimleridir. $\bar{T}_{su}(t)$, $\bar{T}_{buz}(t)$, $\forall_{su}(t)$ ve $\forall_{buz}(t)$ sırası ile suyun ve buzun ortalama sıcaklıkları ile hacimlerinin zamana göre değişimleridir.



Şekil 2.8 Deneysel hesaplama parametreleri

Gerek depolama gerekse geri kullanım sırasında, hal değişimi kararlı olmadığından dolayı, enerji ve ekserji verimleri zamana bağlı değişmektedir. Bu durum göz önüne alınarak verimlerin hesabında aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

2.3.1 Enerji Analizi

Depolama periyodu boyunca enerji verimi, 2.1 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\eta_{depolama}(t) = \frac{E_{FDM}(t) - E_{FDM,i}}{E_{ITA}(t)} \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1 deki, $\eta(t)$ enerji veriminin zamana göre değişimini, $E_{FDM}(t)$ FDM'nin iç enerjisinin zamana göre değişimini, $E_{FDM,i}$ FDM'nin başlangıç anındaki enerjisini ve $E_{ITA}(t)$ ise deneyin başladığı andan itibaren, ITA ile sistemden çekilen toplam enerjinin zamana bağlı olarak değişimini ifade etmektedir. Hesaplanan enerji verimi, ITA'dan çekilen enerjinin yüzde olarak ne kadarının FDM'de depolandığını göstermektedir. Bu terimleri açık olarak ifade etmek gerekirse,

$$E_{FDM}(t) - E_{FDM,i} = \left\{ m_{su}(t) c_{p,su} \bar{T}_{su}(t) + m_{buz}(t) \left[c_{p,buz} (\bar{T}_{buz}(t) - 273) - L \right] \right\} - \left\{ m_{su,i} c_{p,su} \bar{T}_{su,i} \right\} \quad (2.2)$$

$$E_{ITA}(t) = \int_{t=0}^t \dot{m}(t) c_{p,ITA} \left[T_{giri}(t) - T_{çıkış}(t) \right] dt \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.2 ve 2.3'teki, $m_{su}(t)$ kovan içindeki su kütesinin zamana göre değişimini, c_p suyun ve buzun ısınma ısılarını, $\bar{T}(t)$ hacimsel ortalama sıcaklığının zamana göre değişimini, L ise buzun birim kütesinin erime ısını göstermektedir. i , giriş ve çıkış alt indisleri ise sırasıyla, deneyin başlangıç durumunu, ITA'nın depolama ünitesine giriş ve çıkış durumlarını belirtmektedir.

Geri kullanım periyodu için ise enerji verimi, FDM'deki enerji değişiminin yüzde olarak ne kadarının ITA'ya aktarıldığını ifade ettiğinden, enerji verimi aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$\eta_{geri\ kullanm}(t) = \frac{E_{ITA}(t)}{E_{FDM}(t) - E_{FDM,i}} \quad (2.4)$$

Buradaki enerji değişimi terimleri açık olarak 2.2 ve 2.3 numaralı eşitliklerde verilmektedir.

2.3.2 Ekserji Analizi

Depolama periyodu için ekserji verimi, aşağıdaki şekilde tanımlanabilir,

$$\psi_{depolama}(t) = \frac{Ex_{FDM}(t) - Ex_{FDM,i}}{Ex_{ITA}(t)} \quad (2.5)$$

Burada, $\psi(t)$ ekserji veriminin zamana göre değişimini, $Ex_{FDM}(t)$ FDM'nin toplam ekserjisinin zamana göre değişimini, $Ex_{FDM,i}$ FDM'nin başlangıç anındaki ekserjisini ve $Ex_{ITA}(t)$ ise deney başladığı andan itibaren, ITA'daki ekserji değişiminin toplamının zamana bağlı olarak değişimini ifade etmektedir. Hesaplanan ekserji verimi, ITA'daki ekserji değişiminin yüzde olarak ne kadarının FDM'de ekserji değişimine neden olduğunu gösterir. Eşitliğin payı ve paydası 2.6 ve 2.7 eşitliklerinde açık bir şekilde yazılmıştır.

$$Ex_{ITA}(t) = \int_{t=0}^t \dot{m}(t) c_{p,ITA} \left\{ \left[T_{giriş}(t) - T_{çıkış}(t) \right] - T_{\infty}(t) \ln \left(\frac{T_{giriş}(t)}{T_{çıkış}(t)} \right) \right\} dt \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned}
Ex_{FDM}(t) - Ex_{FDM,i} = & c_{p,buz} \left\{ m_{buz}(t) \left[(T_{buz}(t) - 273) \beta - T_{\infty}(t) \ln \frac{\bar{T}_{buz}(t)}{273} \right] \right\} \\
& + c_{p,su} \left\{ m_{su}(t) \left[(\bar{T}_{su}(t) - T_{su,i}) - T_{\infty}(t) \ln \frac{\bar{T}_{su}(t)}{\bar{T}_{su,i}} \right] \right. \\
& \left. + m_{buz}(t) \left[(273 - \bar{T}_{su,i}) - T_{\infty}(t) \ln \frac{273}{\bar{T}_{su,i}} \right] \right\} \\
& + m_{buz}(t) \left\{ -L + T_{\infty}(t) \frac{L}{273} \right\}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Eşitliklerdeki $T_{\infty}(t)$, zamana bağlı ortam sıcaklığını belirtmektedir. Geri kullanım periyodundaki ekserji verimi aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\psi_{geri\ kullanim}(t) = \frac{Ex_{ITA}(t)}{Ex_{FDM}(t) - Ex_{FDM,i}} \tag{2.8}$$

Eşitlik 2.8'deki $Ex_{ITA}(t)$ değeri Eşitlik 2.6'dan ve $Ex_{FDM}(t) - Ex_{FDM,i}$ değeri ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

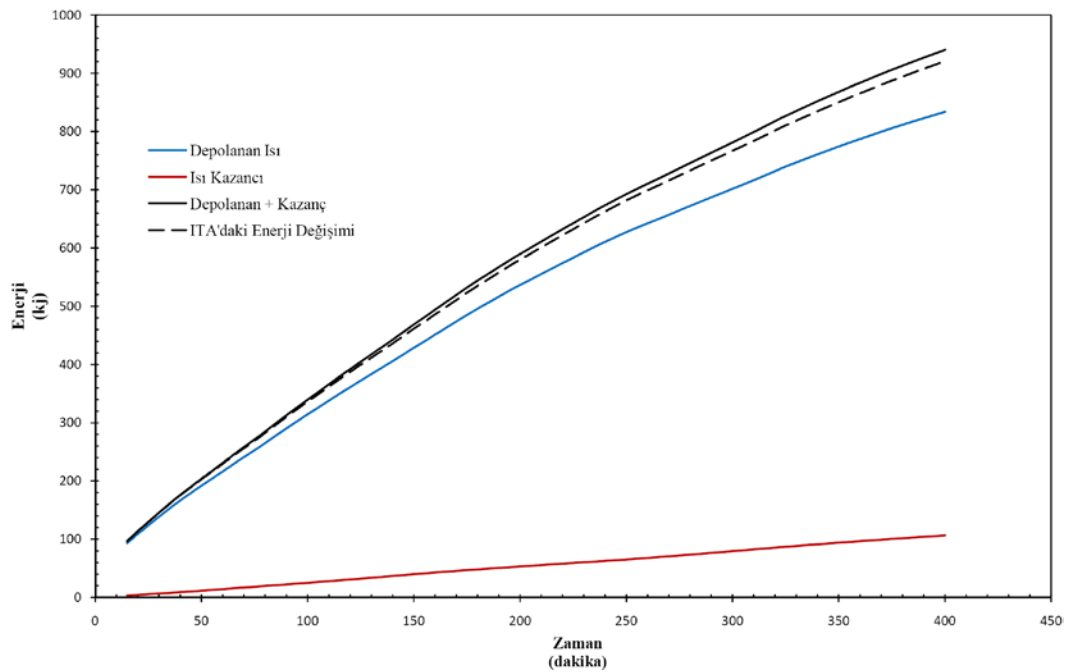
$$\begin{aligned}
Ex_{FDM}(t) - Ex_{FDM,i} = & c_{p,su} \left\{ m_{su}(t) \left[(T_{su}(t) - 273) \beta - T_{\infty}(t) \ln \frac{\bar{T}_{su}(t)}{273} \right] \right\} \\
& + c_{p,buz} \left\{ m_{buz}(t) \left[(\bar{T}_{buz}(t) - T_{buz,i}) - T_{\infty}(t) \ln \frac{\bar{T}_{buz}(t)}{\bar{T}_{buz,i}} \right] \right. \\
& \left. + m_{su}(t) \left[(273 - \bar{T}_{buz,i}) - T_{\infty}(t) \ln \frac{273}{\bar{T}_{buz,i}} \right] \right\} \\
& + m_{su}(t) \left\{ -L + T_{\infty}(t) \frac{L}{273} \right\}
\end{aligned} \tag{2.9}$$

2.4 Deneysel Sonuçlar ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, boru-kovan tipi ısı enerjisi depolama sisteminin depolama ve geri kullanım periyotları deneysel olarak incelenmiştir. Sistemin enerji ve ekserji verimlerine, ITA'nın debisinin ve giriş sıcaklığının, boru malzemesinin ve kovan

çapının etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, 18 tanesi depolama, 4'ü ise geri kullanım olmak üzere toplam 22 adet parametrik deney yapılmıştır. Depolama periyodu için, ITA'nın giriş sıcaklığı ile debisinin değişiminin yanı sıra, farklı boru malzemesi ve kovan çapının değişen ITA debileri için enerji ve ekserji verimleri üzerine etkileri incelenmiştir. Geri kullanım periyodu içinse, sadece ITA'nın giriş sıcaklığı ile debisinin enerji ve ekserji verimlerine olan etkileri incelenmiştir.

Deney boyunca yapılan ölçümlerin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla, deneysel olarak bulunan değerlerin, enerji dengesini ifade eden Eşitlik 2.10'u sağlayıp sağlamadığı incelenmiştir. Borunun bakır, ITA'nın giriş sıcaklığının 10°C ve debisinin 4 l/dk olduğu durum için; toplam ısı kazancının, depolanan toplam enerjinin ve bunların toplamının zamana göre değişimleri ile ITA'dan çekilen toplam enerjinin zamana göre değişimi Şekil 2.9'da verilmiştir. Şekilde ITA'dan çekilen toplam enerjinin ve depolanan toplam enerjinin toplam ısı kazancıyla toplamının zamana göre değişim eğrilerine bakıldığında, enerji dengesinde kabul edilebilir düzeyde bir fark olduğu söylenebilir. Bu fark, yapılan kabullerden ve ölçüm hassasiyetlerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.9 Enerji dengesinin kontrolü

2.4.1 Depolama Periyodu İçin Parametrik Sonuçlar

Depolama periyodu için, ITA'nın giriş sıcaklığı ve debisi sırası ile $T_{giriş} = -5^{\circ}C$, $T_{giriş} = -10^{\circ}C$, $T_{giriş} = -15^{\circ}C$, $\dot{V} = 2 l / dk$, $\dot{V} = 4 l / dk$, $\dot{V} = 8 l / dk$ olarak değiştirilmiştir. Boru malzemesinin depolamaya etkisini incelemek için, bakır, çelik ve PE-32 borular, kovan çapının etkisini gözlemlemek için ise $D_{kovan} = 114 mm$ ve $D_{kovan} = 190 mm$ çaplarında kovanlar kullanılmıştır.

Boru malzemesinin etkisinin incelenmesi için, her boru için 30, 60, 120 ve 240'ncü dakikalardaki katılma oranları ve ITA, boru ve FDM bölgesi için ısı dirençler hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 2.3'te verilmiştir. Bakır ve çelik boruların ısı direnci buzun ısı direnciyle kıyaslandığında ihmal edilebilir düzeyde, Pe-32 borunun ısı direnci ise buzun ısı direncinden yüksektir. Pe-32'nin ısı direncinin yüksek olmasından dolayı aynı süre için, Pe-32 borunun kullanıldığı ısı enerjisi depolama (IED) sisteminde depolanan enerji diğer boruların kullanıldığı IED sistemlerinden daha az olmaktadır.

Tablo 2.3 Farklı boru malzemeleri için katılma oranları ve ısı dirençler

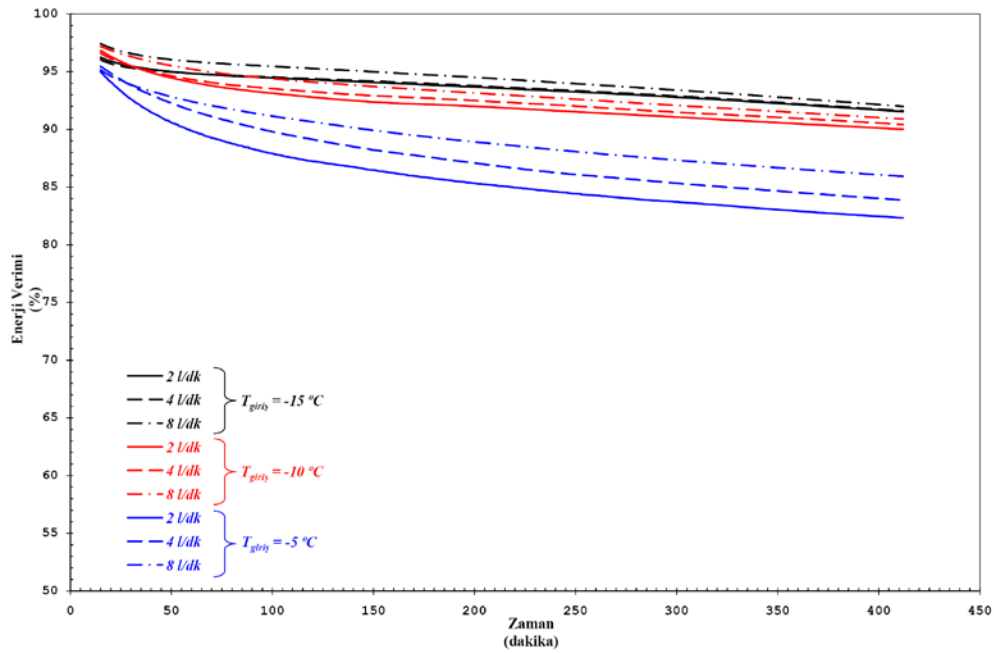
Deney	Süre (dakika)	Katılma Oranı (%)	R_{ITA} (W/K)	R_{Boru} (W/K)	R_{Buz} (W/K)
Bakır 4l/dk -10°C	30	14	0,086	$2,85 \cdot 10^{-4}$	0,195
	60	21			0,228
	120	34			0,269
	240	55			0,311
Çelik 4l/dk -10°C	30	13	0,086	$7,58 \cdot 10^{-3}$	0,189
	60	20			0,224
	120	32			0,264
	240	48			0,3
Pe-32 4l/dk -10°C	30	4	0,086	0,30	0,105
	60	7			0,142
	120	11			0,176
	240	17			0,211

2.4.1.1 Depolama Periyodu İçin Enerji Verimleri

Giriş sıcaklığının ve debinin enerji verimine etkisi Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Burada giriş sıcaklığının ve ITA'nın debisinin etkisi Durum #2 için incelenmiştir.

Grafikten de görüldüğü gibi, sistemin enerji verimi, sıcaklığın artması ile azalmakta, debinin artması ile artmaktadır. Enerji verimi debinin değişimine nazaran sıcaklığın değişiminden daha çok etkilenmiştir. Giriş sıcaklığı ile FDM'nin erime sıcaklığı arasındaki farkın azalması debinin enerji verimine olan etkisini belirginleştirmektedir.

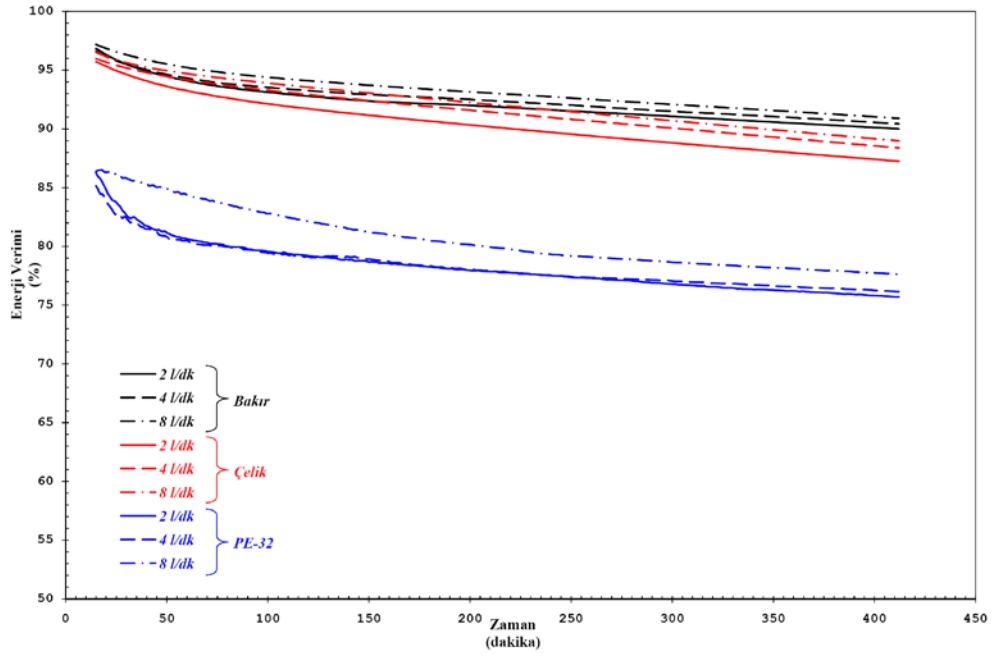
Şekil 2.11'de -10°C giriş sıcaklığı ve 114 mm kovan çapı için, boru malzemesinin ve ITA'nın debisinin enerji verimine etkileri gösterilmektedir. Grafikten de görüldüğü üzere, borunun ısıl iletkenliği ve ITA'nın debisi arttıkça sistemin enerji verimi de artmaktadır. Boru malzemesinin değişimi, debinin değişimine oranla enerji verimi üzerinde daha belirgin bir etkiye sahiptir. Debinin etkisi düşük ısı iletim katsayısına sahip olan borularda belirginleşmektedir.



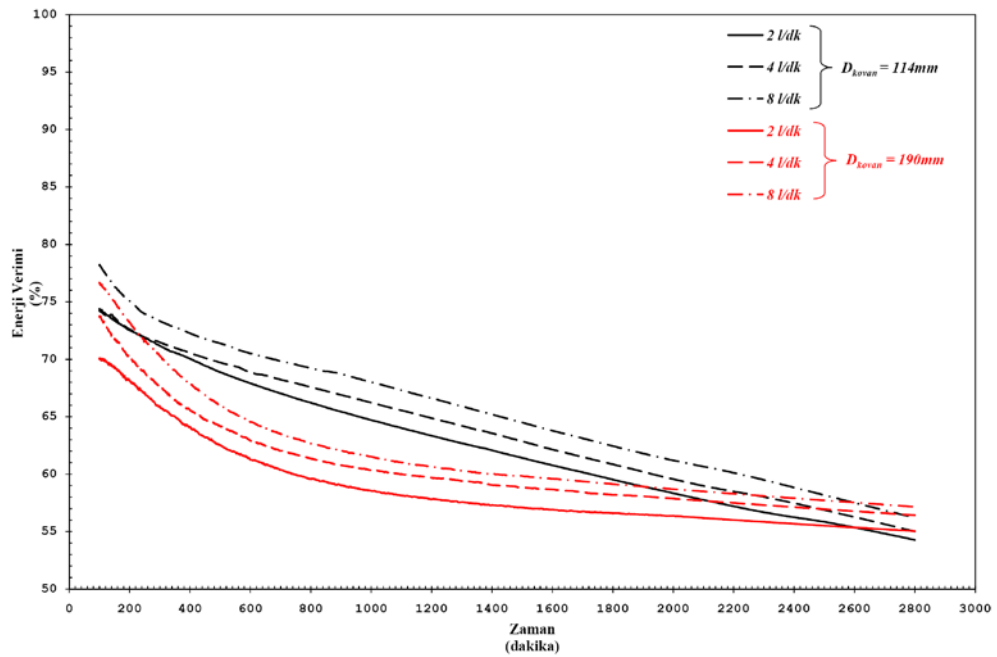
Şekil 2.10 ITA'nın giriş sıcaklığının ve debisinin enerji verimine etkisi (Depolama periyodu)

ITA'nın giriş sıcaklığının -10°C ve borunun da PE-32 olduğu durum için kovan çapının ve ITA'nın debisinin enerji verimine etkileri Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Buradan görüldüğü üzere, kovan çapının büyük olması enerji verimini azaltmaktadır. Deneyin başlarında, kovan çapının farklılığından oluşan verim farkı artmakta, sonlara doğru ise azalmaktadır. Deneyin başlarındaki farkın artışı beklenen bir

durumdur. Fakat sonlara doğru farkın kapanması, 114 mm kovan çapına sahip sistemin katılma oranının 190 mm kovan çapına sahip sistemin katılma oranından büyük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.11 Boru malzemesinin ve ITA'nın debisinin enerji verimine etkisi (Depolama periyodu)

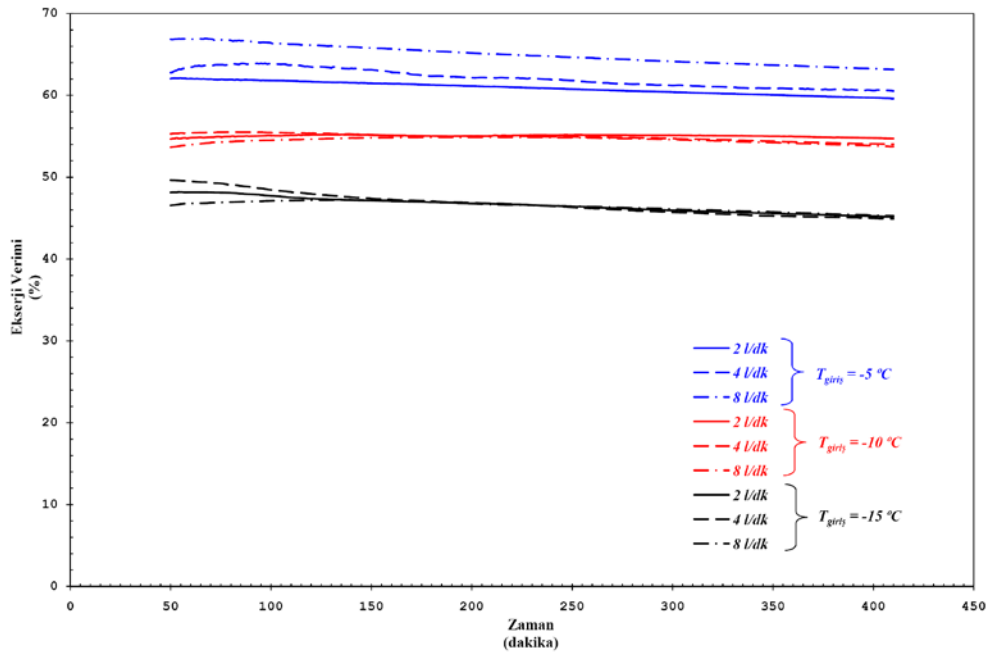


Şekil 2.12 Kovan çapının ve ITA'nın debisinin enerji verimine etkisi (Depolama periyodu)

Şekil 2.12’de vurgulanması gereken bir diğer nokta da, PE-32 boru malzemesinin ısı iletim katsayısının bakır ve çelik boru malzemelere göre düşük olmasından dolayı PE-32’nin kullanıldığı deneyler oldukça uzun sürmektedir. Deneylerin uzun sürmesi, debinin enerji verimine etkisini daha belirginleştirmiştir.

2.4.1.2 Depolama Periyodu İçin Ekserji Verimleri

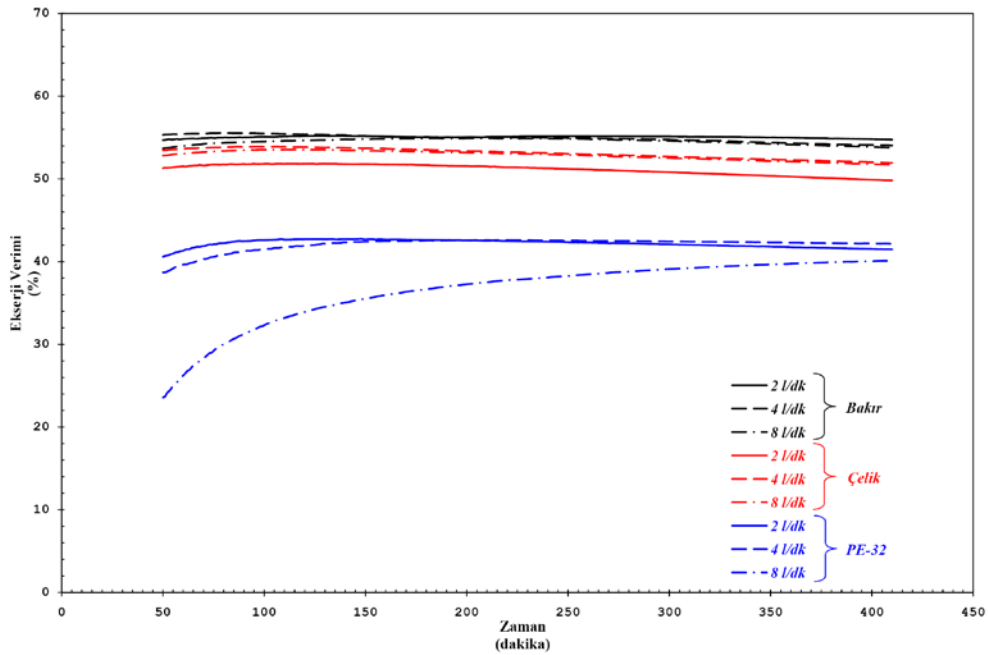
Durum #2 için, giriş sıcaklığının ve debinin ekserji verimine etkileri, zaman bağılı olarak Şekil 2.13’te gösterilmiştir. Sistemin ekserji verimi, giriş sıcaklığının ve debinin artması ile artmaktadır. Ekserji verimi enerjide olduğu gibi, giriş sıcaklığının değişiminden daha çok etkilenmiştir. Debinin ekserji verimine etkisi -5°C gibi yüksek sıcaklıklarda ancak belirginleşmektedir.



Şekil 2.13 ITA'nın giriş sıcaklığının ve debisinin ekserji verimine etkisi (Depolama periyodu)

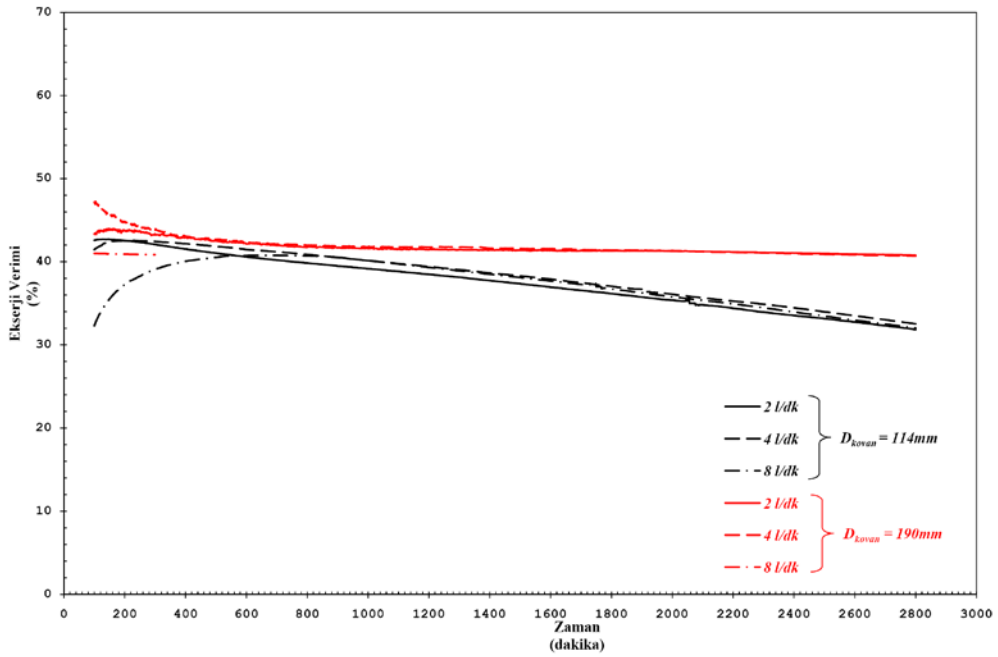
ITA'nın giriş sıcaklığının -10°C olduğu durumu için, debinin ve boru malzemesinin ekserji verimine etkileri Şekil 2.14’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi boru malzemesinin ısı iletkenliği arttıkça sistemin enerji verimi de artmaktadır. Boru malzemesi debiye göre depolama performansını daha fazla

etkilemektedir. *PE-32*'nin ekserji veriminin eğrileri, bakır ve çeliğin eğrilerine göre farklı eğilim göstermektedir. Bunun nedeni, *PE-32* deneylerinin diğer deneylere göre çok uzun sürmesinden dolayıdır. Grafikte *PE-32* deneylerinin ancak başlangıç kısımları görülebilmektedir. Bu durum, Şekil 2.14 incelendiğinde daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 2.14 Boru malzemesinin ve ITA'nın debisinin ekserji verimine etkisi (Depolama periyodu)

Şekil 2.15'de boru malzemesinin *PE-32*, ITA'nın giriş sıcaklığının ise -10°C olduğu durumda, kovan çapının ve debinin ekserji verimine etkilerinin zamana göre değişimini veren altı eğri mevcuttur. Enerji veriminin aksine ekserji veriminde kovan çapının artması ekserji verimini arttırmaktadır. Deney ilerledikçe, kovan çapının farklılığından dolayı oluşan verim farkı artmaktadır. Bu artışın nedeni, küçük kovana sahip düzeneğin katılma oranının daha yüksek olmasıdır.



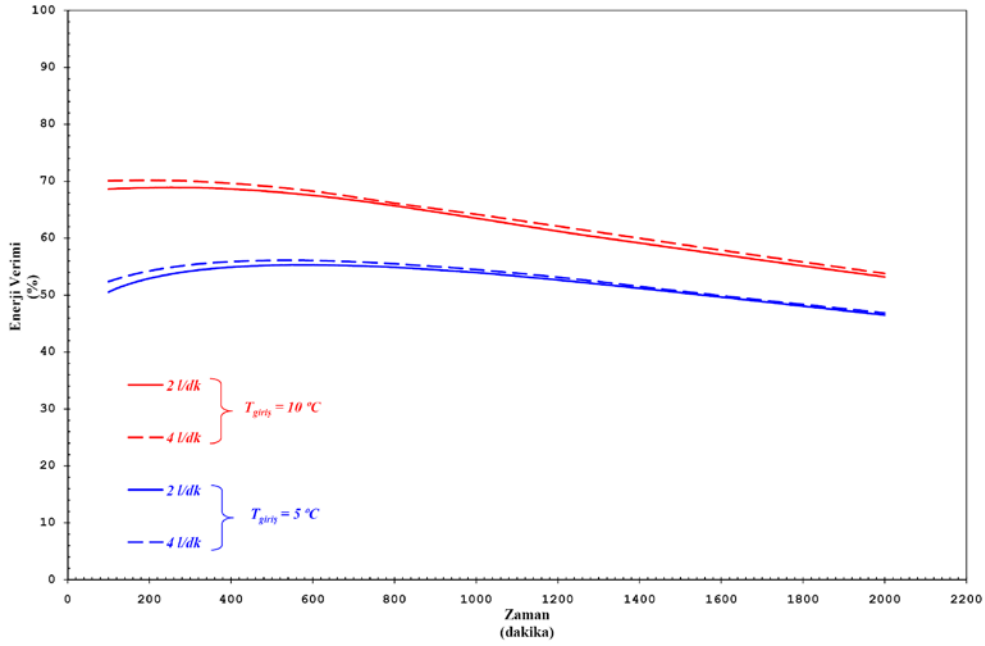
Şekil 2.15 Kovan çapının ve ITA'nın debinin ekserji verimine etkisi (Depolama periyodu)

2.4.2 Geri Kullanım Periyodu İçin Parametrik Sonuçlar

Geri kullanım periyodu için sistemin enerji ve ekserji performansları Durum #4 için incelenmiştir. Deneylede parametre olarak, ITA'nın giriş sıcaklığı ve debisi kullanılmıştır. ITA'nın giriş sıcaklığı ve debisi sırayla $T_{giriş} = 5^{\circ}C$, $T_{giriş} = 10^{\circ}C$ ve $\dot{V} = 2 l/dk$, $\dot{V} = 4 l/dk$ olarak belirlenmiştir.

2.4.2.1 Geri Kullanımın Periyodu İçin Enerji Verimi

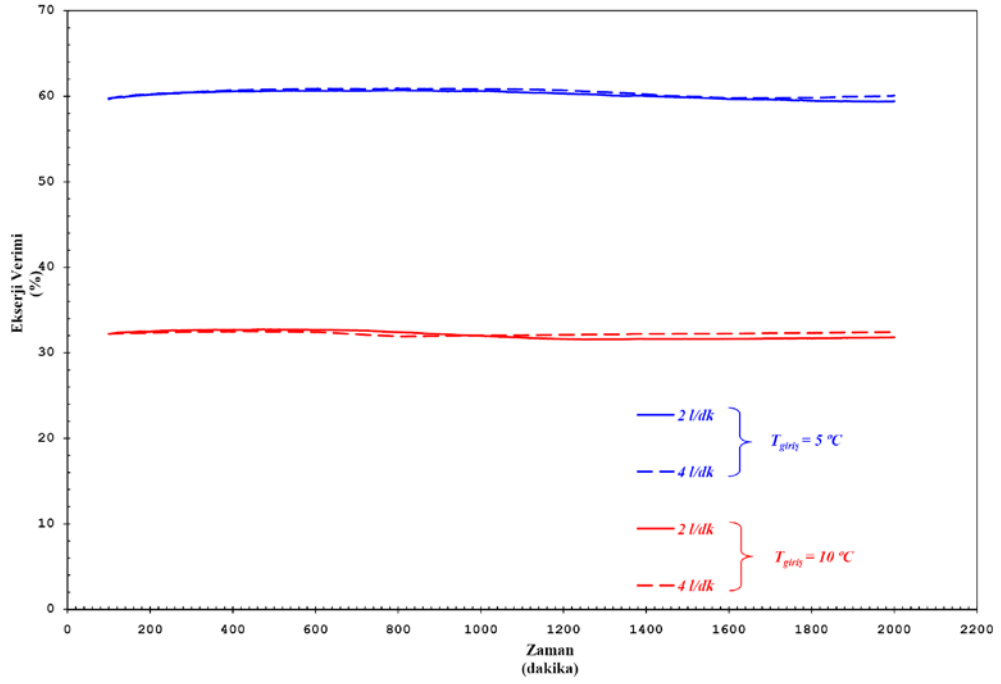
Giriş sıcaklığının ve debinin geri kullanım periyodu için enerji verimine etkileri Şekil 2.16'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sıcaklığın düşmesi ile enerji verimi de azalmakta, debinin yükselmesiyle ise enerji verimi arttırmaktadır. Depolama deneylerinde olduğu gibi giriş sıcaklığının verim üzerindeki etkisi debinin etkisinden daha fazladır, fakat deneyin ilerleyen zamanlarında bu fark azalmaktadır.



Şekil 2.16 ITA'nın giriş sıcaklığının ve debisinin enerji verimine etkisi (Geri kullanım periyodu)

2.4.2.2 Geri Kullanımın Periyodu İçin Ekserji Verimi

Şekil 2.17'de giriş sıcaklığının ve debinin ekserji verimine etkileri, geri kullanım periyodu için grafiksel olarak gösterilmiştir. ITA'nın giriş sıcaklığı ile FDM'nin erime sıcaklığı arasındaki farkın artması, tersinmezliği arttırdığından dolayı ekserji verimi -5°C için daha yüksektir. Grafik üzerinden çok belirgin olmamasına rağmen, debinin artması, verimi arttırmıştır.



Şekil 2.17 ITA'nın giriş sıcaklığının ve debisinin ekserji verimine etkisi (Geri kullanım periyodu)

Kolay karşılaştırma yapılabilmesi için tüm parametreler Tablo 2.3'te bir arada verilmektedir. Bu tabloda hesaplanan değerler belirli bir referans durumu için verilmiştir ve bu referans durum faz değiştiren hacim oranının, depolama için 0,4 ve geri kullanım için 0,25 olması durumudur. Enerji depolama sistemi için, *verim*, *süre*, *depolanan enerji miktarı* ve *hacim* önemli kriterlerdir. Faz değişimi istenilen orana geldiği andaki bu değerler Tablo 2.3'te verilmiştir

Tablo 2.3 Parametrik sonuçlar

Durum	Kovan Çapı	Boru Malzemesi	Giriş Sıcaklığı	Debi	Zaman	Depolanan/Geri Kullanılan Enerji	Enerji Verimi	Ekserji Verimi	
	(mm)		(°C)	(l/dk)	(dk)	(kJ)	(%)	(%)	
Donma	114	Bakır	-5	2	497	474,41	81,44	58,85	
				4	420	472,62	83,80	60,48	
				8	323	471,58	87,03	63,94	
			-10	2	189	478,31	92,08	54,95	
				4	173	480,55	92,74	54,92	
				8	148	482,38	93,74	54,71	
		-15	2	138	484,58	94,17	47,05		
			4	135	484,06	94,28	47,47		
			8	108	486,03	95,39	47,11		
		Çelik	-10	2	255	471,51	89,47	50,96	
				4	199	476,57	91,67	52,39	
				8	170	471,97	92,73	53,14	
		PE-32	-10	2	853	478,34	65,79	39,66	
				4	782	477,79	67,69	40,92	
				8	711	478,56	69,77	40,76	
		190	PE32	-10	2	2779	1410,3	43,01	40,79
					4	2589	1408,5	56,79	40,83
					8	2523	1422,8	57,67	41,18
Erime	190	PE32	5	2	2663	842,98	41,75	59,24	
				4	2637	854,48	42,32	60,21	
			10	2	2303	840,28	50,42	31,85	
				4	2260	855,55	51,34	32,46	

Bu tablodaki veriler ışığında, depolama periyodu için, depolama süresi, enerji verimi ve ekserji verimi açısından, kovan çapının 114 mm debinin 8 l/dk ve borunun bakır olması durumunda optimum çalışma koşullarının olduğu söylenebilir. Giriş sıcaklığının artması ekserji verimini olumlu etkilemesine karşın depolama süresini ve enerji verimini olumsuz etkilemektedir.

Geri kullanım periyodunda ise, geri kullanım süresi ve enerji verimi açısından debinin 4 l/dk ve giriş sıcaklığının 10°C olduğu durum, ekserji verimi açısından ise debinin 4 l/dk ve giriş sıcaklığının 5°C olduğu durum optimum çalışma koşullarını gösterdiği anlaşılabilir.

BÖLÜM ÜÇ

MATEMATİKSEL MODELLEME

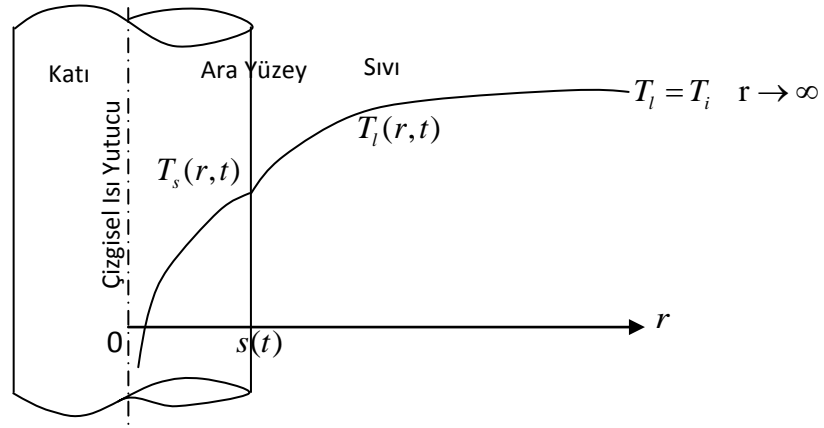
3.1 Giriş

Analitik yöntem, faz değişimi problemlerinde gerçek çözümü sağlamasına karşın, karmaşık geometriler için bu yöntemin çözümü zor olmaktadır. Analitik yöntemlerin çözümü zor olduğundan çözümü daha kolay olan sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Literatürde kullanılan sayısal modellerden, sabit grid yöntemleri, değişken grid yöntemleri, ön sabitleme yöntemi, adaptif grid oluşturma yöntemi ve entalpi yöntemi yaygın olarak kullanılanlardır. Yapılan sayısal çalışmalarda, sabit grid yöntemlerinden olan, sıcaklık dönüşüm modeli kullanılmıştır.

Sayısal çalışma kapsamında üç farklı model ele alınmıştır. Öncelikle, sabit ısı akısına sahip silindirik koordinatlarda bir boyutlu faz değişim problemi modellenmiş, daha sonra, borunun etkisi de göz önüne alınarak, problem yine silindirik koordinatlarda bir boyutlu olarak modellenmiştir. Bu modellerden elde edilen sayısal sonuçların analitik sonuçlarla analitik sonuçlarla doğrulanması yapıldıktan sonra, FDM, boru malzemesi ve ITA'dan oluşan sistemin iki boyutlu analizi gerçekleştirilmiştir.

3.2 Yarı Sonsuz Silindirdeki Tek Boyutlu Faz Değişimi

Problem, hayali bir çizgisel ısı yutucu etrafındaki, başlangıçtaki sıcaklığı T_i , erime sıcaklığı T_m 'den yüksek olan suyun, eksenden simetrik ve yarı sonsuz kabul edilerek, bir boyutlu faz değiştirmesi şeklinde, Şekil 3.1'deki gibi modellenmiştir. Bu problem sayısal ve analitik olarak olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Problemin analitik olarak çözümünde, Özışık (1980) tarafından geliştirilen yöntem kullanılmıştır.



Şekil 3.1 Çizgisel ısı yutucu etrafındaki faz değişimi

Şekil 3.1'deki $s(t)$ terimi su-buz ara-yüzeyinin konumunun zamana göre değişimidir. Çizgisel ısı yutucunun kapasitesi $q' = 94,5 \text{ W / m}$ olarak alınmıştır.

3.2.1 Problemin Analitik Olarak İncelenmesi

Problemin enerji dengesini veren eşitlikler, Eşitlik 3.1a ve Eşitlik 3.1b'de katı ve sıvı faz için ayrı ayrı olarak verilmiştir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s(r,t)}{\partial t} \quad 0 < r < s(t) \text{ ve } t > 0 \quad (3.1a)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_l} \frac{\partial T_l(r,t)}{\partial t} \quad s(t) < r < \infty \text{ ve } t > 0 \quad (3.1b)$$

Problem için tanımlanan başlangıç ve sınır koşulları Eşitlik 3.2'lerde verilmektedir,

$$T_l(r,t) \rightarrow T_i \quad r \rightarrow \infty \text{ ve } t > 0 \quad (3.2a)$$

$$T_l(r,t) = T_i \quad r > 0 \text{ ve } t = 0 \quad (3.2b)$$

$$T_s(r,t) = T_l(r,t) = T_m \quad r = s(t) \text{ ve } t > 0 \quad (3.2c)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left(2\pi r k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) = q' \quad r = 0 \quad (3.2d)$$

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial r} = \rho L \frac{ds(t)}{dt} \quad r = s(t) \text{ ve } t > 0 \quad (3.2e)$$

Eşitlikler, $\eta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha_s t}}$ ve $\eta_{sl} = \frac{s(t)}{2\sqrt{\alpha_s t}}$ değişkenleri kullanılarak sadeleştirilip,

Eşitlik 3.2c ile Eşitlik 3.2e'deki sınır koşulları için çözülmüştür. Yapılan analitik çözümle katı bölge için sıcaklık dağılımını veren Eşitlik 3.3 ve sıvı bölge için sıcaklık dağılımını veren Eşitlik 3.4 elde edilmiştir (Özışık, 1980) .

$$T_s = \frac{q'}{4\pi k_s} \left[Ei(-\eta^2) - Ei(-\eta_{sl}^2) \right] + T_m \quad 0 < \eta < \eta_{sl} \quad (3.3)$$

$$T_l = T_i - \frac{T_i - T_m}{Ei(-\eta_{sl}^2 \alpha_s / \alpha_l)} Ei(-\eta^2) \quad \eta_{sl} < \eta < \infty \quad (3.4)$$

Buradaki Ei , çözümlü bilinen üstel integral fonksiyonudur. Eşitliklerdeki η_{sl} değeri Eşitlik 3.5 çözümlenerek bulunur.

$$\frac{q'}{4\pi} e^{-\eta_{sl}^2} + \frac{k_l (T_i - T_m)}{Ei[-\eta_{sl}^2 \alpha_s / \alpha_l]} e^{-\eta_{sl}^2 \alpha_s / \alpha_l} - \alpha_s \rho_s L \eta_{sl}^2 = 0 \quad (3.5)$$

η_{sl} 'nin değeri, Ei hata fonksiyonunun tanımlı olduğu Matlab 7.0 programı kullanılarak ikiye bölme yöntemi ile mevcut sınır koşulları ve parametreler için $\eta_{sl} = 0.0161$ olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak su/buz ara-yüzeyinin zamana göre değişimi, Eşitlik 3.6'daki gibi elde edilmiştir,

$$s(t) = \sqrt{0.0161(4\alpha_s t)} \quad (3.6)$$

3.2.2 Problemin Sayısal Olarak İncelenmesi

Mühendislik uygulamalarındaki diferansiyel denklemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan yöntemler, *sonlu farklar*, *sonlu elemanlar* ve *sonlu hacimler* yöntemleridir. Bu yöntemlerde amaçlanan, diferansiyel denklem şeklinde ifade edilen problemlerin, özel bir takım kabuller altında, doğrusal denklem sistemlerine dönüştürülmesidir. Bu çalışmada diferansiyel denklemlerin ayrıştırılmasında, sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır.

3.2.2.1 Sonlu Hacim Yöntemi

Bu yöntemde çözüm bölgesi, birbiri ile sınırlandırılmış sonlu sayıda kontrol hacimlerine ayrılır ve diferansiyel denklemler her bir kontrol hacmi için ayrıştırılarak sonuç olarak cebirsel çözümlenmeye uygun, doğrusal denklem sistemi elde edilir.

Örnek olarak, iki boyutlu içinde ısı üretimi olan silindirik koordinatlardaki bir sistem için ısı iletim denklemi yazılacak olursa,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) + S = 0 \quad (3.7)$$

Burada T sıcaklık, k ısı iletim katsayısı ve S birim hacim için üretilen ısıdır. Seçilen çözüm bölgesi için örnek bir kontrol hacminin gösterimi Şekil 3.2’de verilmektedir. Burada, bölge içinde herhangi bir P düğüm noktasına ve bu noktanın komşu noktalarına ait kontrol hacimleri ve düğüm noktaları gösterilmiştir. P noktası hesaplama yapılan kontrol hacminin merkez düğüm noktası, E , W , N ve S ise komşu kontrol hacimlerinin merkez düğüm noktalarıdır. Küçük harflerle sembolize edilen e , w , n , s ise kontrol yüzeylerindeki düğüm noktalarıdır (Versteeg ve Malalasekera, 1995).

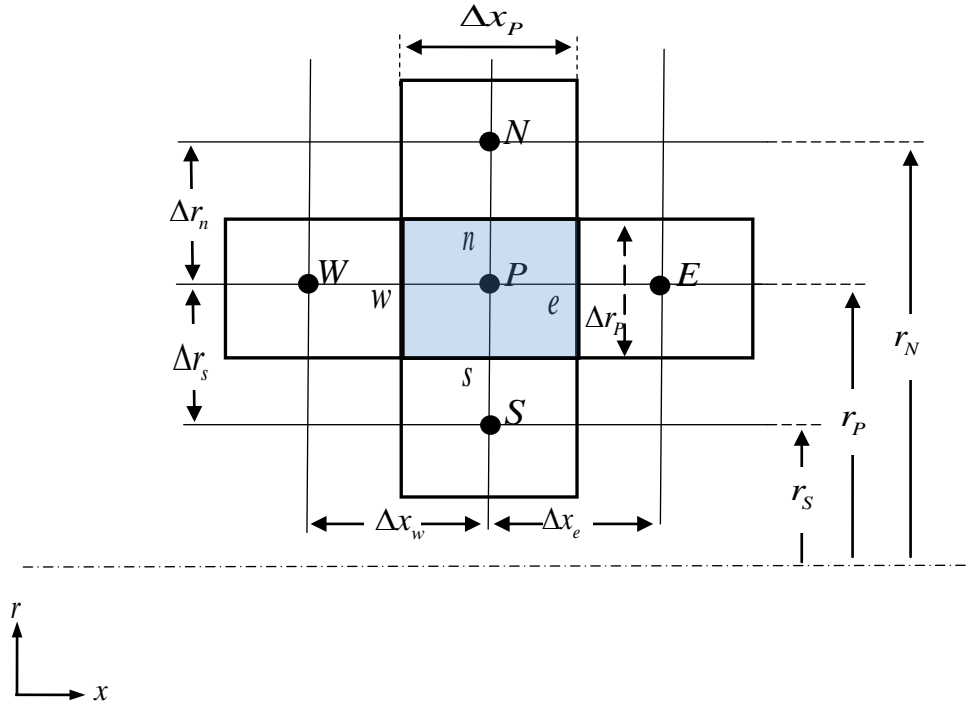
Eşitlik 3.7, merkez düğüm noktası “P” olan kontrol hacmi boyunca integre edilirse,

$$\iiint_{\forall} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{dT}{dx} \right) d\forall + \iiint_{\forall} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) d\forall + \iiint_{\forall} S d\forall = 0 \quad (3.8)$$

Buradaki diferansiyel hacim,

$$d\forall = 2\pi r dr dx \quad (3.8a)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Buna göre Eşitlik 3.8 yeniden düzenlenirse,



Şekil 3.2 İki boyutlu silindir için kontrol hacim ve düğüm noktaları

$$\iiint_{\forall} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{dT}{dx} \right) r dr dx + \iiint_{\forall} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) r dr dx + \iiint_{\forall} S r dr dx = 0 \quad (3.9)$$

$$\left[\left(k \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(k \frac{dT}{dx} \right)_w \right] r_p \Delta r_p + \left[\left(kr \frac{dT}{dr} \right)_n - \left(kr \frac{dT}{dr} \right)_s \right] \Delta x + \bar{S} \Delta \forall = 0 \quad (3.10)$$

eşitliği elde edilir. Burada \bar{S} terimi, kontrol hacimdeki ortalama ısı üretimini belirtmektedir. Kontrol hacminin yüzeyleri e, w, n ve s için sıcaklık gradyanları açık olarak yazılacak olursa,

$$\left(k \frac{dT}{dx} \right)_e = k_e \left(\frac{T_E - T_P}{\Delta x_e} \right) \quad (3.10a)$$

$$\left(k \frac{dT}{dx} \right)_w = k_w \left(\frac{T_P - T_W}{\Delta x_w} \right) \quad (3.10b)$$

$$\left(kr \frac{dT}{dr} \right)_n = k_n r_n \left(\frac{T_N - T_P}{\Delta r_n} \right) \quad (3.10c)$$

$$\left(kr \frac{dT}{dr} \right)_s = k_s r_s \left(\frac{T_P - T_S}{\Delta r_s} \right) \quad (3.10d)$$

$$\bar{S} \Delta \forall = S_u + S_p \theta_p \quad (3.10e)$$

elde edilir. Eşitlik 3.10a-3.10e Eşitlik 3.10 içerisinde yeniden düzenlenebilir,

$$\left[k_e \left(\frac{T_E - T_P}{\Delta x_e} \right) - k_w \left(\frac{T_P - T_W}{\Delta x_w} \right) \right] r_p \Delta r_p + \left[k_n r_n \left(\frac{T_N - T_P}{\Delta r_n} \right) - k_s r_s \left(\frac{T_P - T_S}{\Delta r_s} \right) \right] \Delta x_p + S_u + S_p \theta_p = 0 \quad (3.11)$$

Burada,

$$r_p = \frac{r_n + r_s}{2}$$

P noktasının radyal konumunu belirtmektedir. Eşitlik 3.11'in ayrıştırılmış hali aşağıdaki matris formunda ifade edilebilir.

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (3.12)$$

Burada a_P , P düğüm noktasının katsayısını belirtirken a_E , a_W , a_N ve a_S ise komşu kontrol hacimlerinin katsayılarını simgelemektedir. b ise denklem sabitlerini ifade etmektedir. Eşitlik 3.12 için katsayılar aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$a_E = \frac{k_e r_p' \Delta r_p}{\Delta x_e} \quad (3.12a)$$

$$a_W = \frac{k_w r_p' \Delta r_p}{\Delta x_w} \quad (3.12b)$$

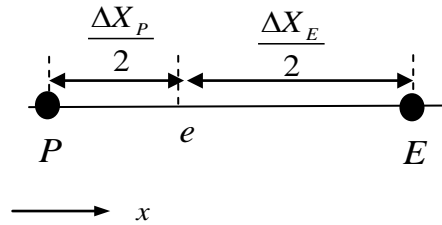
$$a_N = \frac{k_n r_n \Delta x_p}{\Delta r_n} \quad (3.12c)$$

$$a_S = \frac{k_s r_s \Delta x_p}{\Delta r_s} \quad (3.12d)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S - S_P \quad (3.12e)$$

$$b = S_u \quad (3.12f)$$

Burada dikkat edilmesi gereken, ısı iletim katsayılarının, kontrol hacimlerinin yüzeylerindeki düğüm noktalarında tanımlanmış olmasıdır. 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 yaygın olarak Patankar (1980)'in geliştirdiği yöntem kullanılmaktadır. Buna göre ara-yüzey ısı iletim katsayısı, merkez düğüm noktalarındaki ısı iletim katsayıları kullanılarak bulunmaktadır,



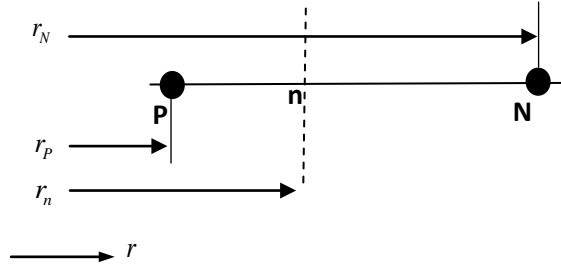
Şekil 3.3 Ara yüzeyin konumu
(Kartezyen koordinat)

Kartezyen koordinatlarda ara yüzeyin Şekil 3.3'teki gibi olması durumunda,

$ddx = \frac{\Delta X_E}{\Delta X_P}$ olmak üzere, ara yüzeydeki ısı iletim katsayısı, şu şekilde tanımlanır,

$$k_e^* = \frac{k_p^* k_E^*}{ddx^* k_p^* + (1 - ddx) k_E^*} \quad (3.13)$$

Silindirik koordinatlarda, ara yüzeylerdeki ısı iletim katsayısı hesaplanırken (Erek, 1999) tarafından da kullanılmış olan eşitlikler kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Ara yüzeyin konumu (Silindirik koordinat)

Silindirik koordinatlarda ara yüzeyin Şekil 3.4'deki gibi olması durumunda, ara yüzeydeki ısı iletim katsayısı;

$$k_n^* = \frac{\ln(r_N / r_p)}{\frac{\ln(r_n / r_p)}{k_p} + \frac{\ln(r_N / r_n)}{k_N}} \quad (3.14)$$

Matris çözümlerinde Jacobi ve Gaus-Seidel gibi iteratif çözüm yöntemleri sıklıkla uygulanmaktadır. Büyük boyutlu matrislerde ve zamana bağlı çözümlerlerde ise, bu yöntemlerle yapılan çözümlerin çok uzun sürmesinden dolayı, bu yöntemler tercih edilmemektedir. Büyük boyutlu üçlü köşegen matrislerin çözümü için, Thomas (1949) tarafından çözüm süresini kısaltan tri-diagonal matrix algoritması (TDMA) geliştirilmiştir. TDMA, tek boyutlu ısı transferi problemlerinde kullanılan Eşitlik

3.15'in çözümünde uygulanabilen direkt çözüm yöntemidir (Versteeg ve Malalasekera, 1995).

$$-a_S T_S + a_P T_P - a_N T_N = b \quad (3.15)$$

TDMA, iki boyutlu ısı transferi problemlerinde in-direkt bir çözüm yöntemi olarak da kullanılabilir. Mevcut iki boyutlu ısı transferi için elde edilen Eşitlik 3.16'nın çözümünde, eşitliğin sol tarafındaki ikinci boyutun etkisinden gelen parametreler, sabit olarak kabul edilerek eşitliğin sağ tarafına taşınmaktadır. Elde edilen 3.17 Eşitliği çözüm bölgesindeki tüm düğüm noktaları için TDMA ile çözülmektedir. Sıralanan bu işlemler, yeterli yakınsama sağlanıncaya kadar tekrarlanmaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 1995).

$$-a_W T_W - a_S T_S + a_P T_P - a_E T_E - a_N T_N = b \quad (3.16)$$

$$-a_S T_S + a_P T_P - a_N T_N = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (3.17)$$

Analitik çözüm yarı sonsuz kabulü altında yapıldığından, sayısal model oluşturulurken de benzer bir model kurulmuştur. Sayısal model için yarı sonsuz çözüm bölgesinin belirlenmesi için ilk önce farklı boyutlar için denemeler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre $t=40000$ saniye çözüm zamanı için, çözüm bölgesinin içerisinde $r=1$ m konumundan sonraki bölgede sıcaklığın değişmediği görülmüştür. Buna göre $r_{kovan}=1$ m yarıçapındaki silindirik FDM bölgesi, sayısal çözümler için yarı sonsuz olarak ele alınmıştır.

3.2.2.2 Korunum Denklemi

Başlangıç anındaki FDM'nin sıcaklığı faz değişim sıcaklığına yakın olduğundan FDM'deki doğal taşınımın etkisi ihmal edilerek çözümde kolaylık sağlanmıştır. Doğal taşınımın etkisi ihmal edildiğinden, FDM'deki ısı iletimi, Cao ve Faghri (1990) tarafından geliştirilmiş olan sıcaklık dönüşüm modeli kullanılarak çözülmüştür. Bu modelde, faz değişiminin sabit bir sıcaklıkta değil, $T_m - \delta T_m$

sıcaklığı ile $T_m + \delta T_m$ sıcaklığı arasında gerçekleştiği kabul edilmiştir. FDM için enerji korunum denklemini yazmak gerekirse,

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.18)$$

Bir malzemenin toplam entalpisi, Eşitlik 3.19'daki gibi duyulur entalpi h ve gizli entalpi L 'nin toplamı olarak ifade edilir.

$$H = h + f(\rho L) \quad (3.19)$$

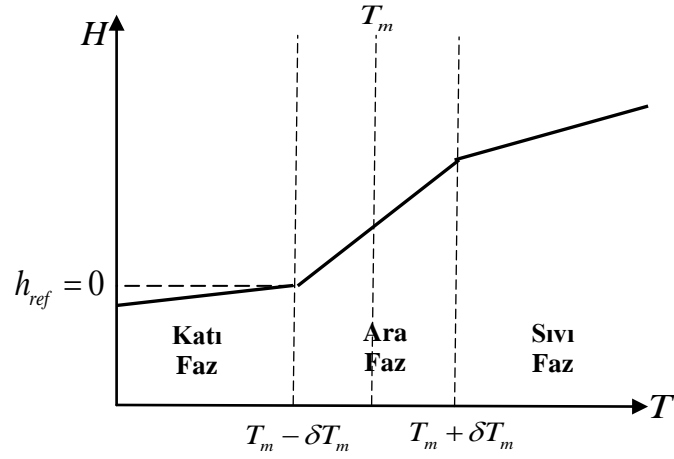
Burada f hacmin katılaşma oranını belirtmektedir. Duyulur entalpiyi açık olarak ifade etmek gerekirse,

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T \rho c_p dT \quad (3.20)$$

Eşitlik 3.20'den yararlanılarak, Eşitlik 3.19 yeniden düzenlenirse, birim hacim için toplam entalpi değişimini veren Eşitlik 3.21 elde edilir.

$$H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T \rho c_p dT + f(\rho L) \quad (3.21)$$

Burada h_{ref} referans entalpisidir ve Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi FDM için referans entalpisi olarak, erime başlangıç sıcaklığı olan $T_m - \delta T_m$ sıcaklığındaki entalpi alınmıştır. Katı ve sıvı bölgedeki entalpi değişimi, sıcaklığın değişimi sonucu doğrusal ve duyulur olarak gerçekleşmektedir. FDM'nin katı ve sıvı fazındaki özgül ısılar farklı olduğundan, katı ve sıvı bölgesindeki entalpinin sıcaklığa göre değişim eğilimleri farklılık göstermektedir. Ara bölgede, entalpi değişim eğimi, sıvı ve katı bölgesinin eğimlerinin ortalaması ile gizli ısıdan kaynaklanan entalpi değişiminin, faz değişimi sıcaklık aralığına bölümünün toplamına eşittir.



Şekil 3.5 Entalpinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi

Entalpi, FDM'nin her bir fazı için açık olarak ifade edilirse;

Katı Faz, ($T < T_m - \delta T_m$)

$$H(T) = 0 + \int_{T_m - \delta T_m}^T \rho_s c_{p,s} dT + 0 \quad (3.22)$$

$$H(T) = \rho_s c_{p,s} [T - (T_m - \delta T_m)] \quad (3.23)$$

Ara Faz, ($T_m - \delta T_m < T < T_m + \delta T_m$)

Ara fazdaki entalpi, sıcaklığa bağlı doğrusal olarak Eşitlik 3.24'teki gibi değişmektedir. Eşitlik 3.24'teki a ve b sabitleri sınır koşulları kullanılarak bulunur.

$$H(T) = aT + b \quad (3.24)$$

$T = T_m - \delta T_m$ olması durumunda,

$$H(T) = 0 \quad (3.25)$$

$$0 = (T_m - \delta T_m)a + b \quad (3.26)$$

$T = T_m + \delta T_m$ olması durumunda,

$$H(T) = (\rho_s c_{p,s} + \rho_l c_{p,l}) \delta T_m + L \quad (3.27)$$

$$(\rho_s c_{p,s} + \rho_l c_{p,l}) \delta T_m + \rho L = (T_m + \delta T_m) a + b \quad (3.28)$$

Eşitlik 3.26 ve Eşitlik 3.28 kullanılarak, Eşitlik 3.24'teki a ve b sabitleri bulunur.

$$a = \frac{\rho_s c_{p,s} + \rho_l c_{p,l}}{2} + \frac{\rho L}{2 \delta T_m} \quad (3.29a)$$

$$b = \left(\frac{\rho_s c_{p,s} + \rho_l c_{p,l}}{2} + \frac{\rho L}{2 \delta T_m} \right) (\delta T_m - T_m) \quad (3.29b)$$

Bulunan a ve b sabitlerine göre Eşitlik 3.24 yeniden düzenlenerek, ara bölgedeki entalpinin sıcaklığa göre değişimini veren ifade,

$$H(T) = \left(\frac{\rho_s c_{p,s} + \rho_l c_{p,l}}{2} + \frac{\rho L}{2 \delta T_m} \right) T + \left(\frac{\rho_s c_{p,s} + \rho_l c_{p,l}}{2} + \frac{\rho L}{2 \delta T_m} \right) (\delta T_m - T_m) \quad (3.30)$$

Sıvı Faz, ($T_m + \delta T_m < T$)

$$H(T) = 0 + \int_{T_m - \delta T_m}^T \rho c_p dT + \rho L \quad (3.31)$$

$$H(T) = \int_{T_m - \delta T_m}^{T_m + \delta T_m} \rho c_p dT + \int_{T_m + \delta T_m}^T \rho c_p dT + \rho L \quad (3.32)$$

$$H(T) = \frac{(\rho_s c_{p,s} + \rho_l c_{p,l})}{2} 2 \delta T_m + \rho_l c_{p,l} T - \rho_l c_{p,l} (T_m + \delta T_m) + \rho L \quad (3.33)$$

$$H(T) = \rho_s c_{p,s} \delta T_m + \rho_l c_{p,l} (T - T_m) + \rho L \quad (3.34)$$

Eşitlikleri sadeleştirmek için $T^* = T - T_m$ ve $C = \rho c_p$ eşitlikleri kullanılmış ve entalpinin sıcaklığa göre değişimi parçalı fonksiyon olarak Eşitlik 3.35 halini almıştır.

$$H(T^*) = \begin{cases} C_s T^* + C_s \delta T_m & T^* < -\delta T_m \\ \left(\frac{C_s + C_l}{2} + \frac{\rho L}{2\delta T_m} \right) (T^* + \delta T_m) & -\delta T_m < T^* < \delta T_m \\ C_l T^* + C_s \delta T_m + \rho L & \delta T_m < T^* \end{cases} \quad (3.35)$$

Entalpinin sıcaklığa göre değişimi, ısı kapasitesiyle sıcaklığın çarpımının, S sabit terimiyle toplamı şeklinde doğrusal bir denklem formunda Eşitlik 3.36'da ifade edilmiştir.

$$H = C(T^*)T^* + S(T^*) \quad (3.36)$$

Buradaki C ısı kapasitesi ve S denklem sabiti, Eşitlik 3.35 göz önüne alınarak sıcaklığın fonksiyonu olarak katı, ara ve sıvı bölgeler için ifade edilebilir,

$$C(T^*) = \begin{cases} C_s & T^* < -\delta T_m \\ \frac{C_s + C_l}{2} + \frac{\rho L}{2\delta T_m} & -\delta T_m < T^* < \delta T_m \\ C_l & \delta T_m < T^* \end{cases} \quad (3.37)$$

$$S(T^*) = \begin{cases} C_s \delta T_m & T^* < -\delta T_m \\ \frac{C_s + C_l}{2} \delta T_m + \frac{\rho L}{2} & -\delta T_m < T^* < \delta T_m \\ C_s \delta T_m + \rho L & \delta T_m < T^* \end{cases} \quad (3.38)$$

FDM'nin katı ve sıvı fazının ısı iletim katsayıları farklı olduğu ve faz değişiminin belirli bir sıcaklık aralığında gerçekleştiği göz önüne alınarak, ısı iletim katsayısı sıcaklığın fonksiyonu olarak ifade edilmiştir.

$$k(T^*) = \begin{cases} k_s & T^* < -\delta T_m \\ k_s + \frac{k_l - k_s}{2\delta T_m} (T^* + \delta T_m) & -\delta T_m < T^* < \delta T_m \\ k_l & \delta T_m < T^* \end{cases} \quad (3.39)$$

3.2.2.3 Korunum Denkleminin Boyutsuzlaştırılması

Denklemlerin çözümünde değişken sayısını azaltmak ve parametrik hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından boyutsuzlaştırma gerçekleştirilmiştir. Denklemlerin boyutsuzlaştırılmasında kullanılan boyutsuz parametreler aşağıda verilmektedir.

$$\alpha = k / \rho c_p, \quad H = \rho h, \quad S^* = \frac{S}{C_l(T_i - T_m)}, \quad C = \rho c_p, \quad C^* = C / C_l, \quad C_{sl} = C_s / C_l$$

$$k_{sl} = k_s / k_l, \quad k^* = k / k_l, \quad \theta = \frac{T - T_m}{T_i - T_m}, \quad q^* = \frac{q'}{k_l(T_i - T_m)}, \quad Ste = \frac{C_l(T_i - T_m)}{\rho L}$$

$$\tau' = \alpha_l t / r_{kovan}^2, \quad R' = r / r_{kovan}, \quad \Delta R' = \frac{\Delta r}{r_{kovan}}$$

FDM için enerji dengesini ifade eden Eşitlik 3.13, boyutsuz parametreler kullanılarak yeniden ifade edilirse,

$$\frac{\partial(CT)}{\partial \tau'} \frac{\partial \tau'}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial \tau'} \frac{\partial \tau'}{\partial t} = \frac{1}{R'D_{kovan}} \frac{\partial}{\partial R'} \left(kR'D_{kovan} \frac{\partial T}{\partial R'} \frac{\partial R'}{\partial r} \right) \frac{\partial R'}{\partial r} \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial(CT)}{\partial \tau'} \frac{\alpha_l}{D_{kovan}^2} = \frac{1}{R'D_{kovan}} \frac{\partial}{\partial R'} \left(kR'D_{kovan} \frac{\partial T}{\partial R'} \frac{1}{D_{kovan}} \right) \frac{1}{D_{kovan}} - \frac{\partial S}{\partial \tau'} \frac{\alpha_l}{D_{kovan}^2}$$

$$\frac{\partial(CT)}{\partial \tau'} \frac{k_l}{C_l} = \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} \left(kR' \frac{\partial T}{\partial R'} \right) - \frac{\partial S}{\partial \tau'} \alpha_l$$

$$\frac{\partial(C^*\theta)}{\partial \tau'} = \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} \left(R'k^* \frac{\partial \theta}{\partial R'} \right) - \frac{\partial S}{\partial \tau'} \frac{1}{C_l(T_i - T_m)}$$

FDM için enerji dengesi boyutsuz olarak,

$$\frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau'} = \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} \left(R'k^* \frac{\partial\theta}{\partial R'} \right) - \frac{\partial S^*}{\partial\tau'} \quad (3.41)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitliklerdeki C^* , S^* ve k^* sırası ile Eşitlik 3.37, Eşitlik 3.38 ve Eşitlik 3.39'daki C , S ve k fonksiyonlarının boyutsuz halleridir. C^* , S^* ve k^* fonksiyonları boyutsuz sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$C^*(\theta) = \begin{cases} C_{sl} & \theta < -\delta\theta_m \\ \frac{C_{sl}+1}{2} + \frac{1}{2Ste\delta\theta_m} & -\delta\theta_m < \theta < \delta\theta_m \\ 1 & \delta\theta_m < \theta \end{cases} \quad (3.42)$$

$$S^*(\theta) = \begin{cases} C_{sl}\delta\theta_m & \theta < -\delta\theta_m \\ \frac{C_{sl}+1}{2}\delta\theta_m + \frac{1}{2Ste} & -\delta\theta_m < \theta < \delta\theta_m \\ C_{sl}\delta\theta_m + \frac{1}{Ste} & \delta\theta_m < \theta \end{cases} \quad (3.43)$$

$$k^*(\theta) = \begin{cases} k_{sl} & \theta < -\delta\theta_m \\ k_{sl} + \frac{1-k_{sl}}{2\delta\theta_m}(\theta + \delta\theta_m) & -\delta\theta_m < \theta < \delta\theta_m \\ 1 & \delta\theta_m < \theta \end{cases} \quad (3.44)$$

3.2.2.4 Korunum Denkleminin Ayrıştırılması

Problemin korunum denkleminin ayrıştırılabilmesi için problemin başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilen probleme ilişkin başlangıç ve sınır koşulları şu şekildedir,

$$\theta = \theta_i = 1 \quad \tau' = 0 \quad (3.45a)$$

$$\frac{d\theta}{dR'} = 0 \quad R' \rightarrow 1 \quad (3.45b)$$

$$\frac{d\theta}{dR'} = -\frac{q^{*r}}{k^* 2\pi R'} \quad R' = 0 \quad (3.45c)$$

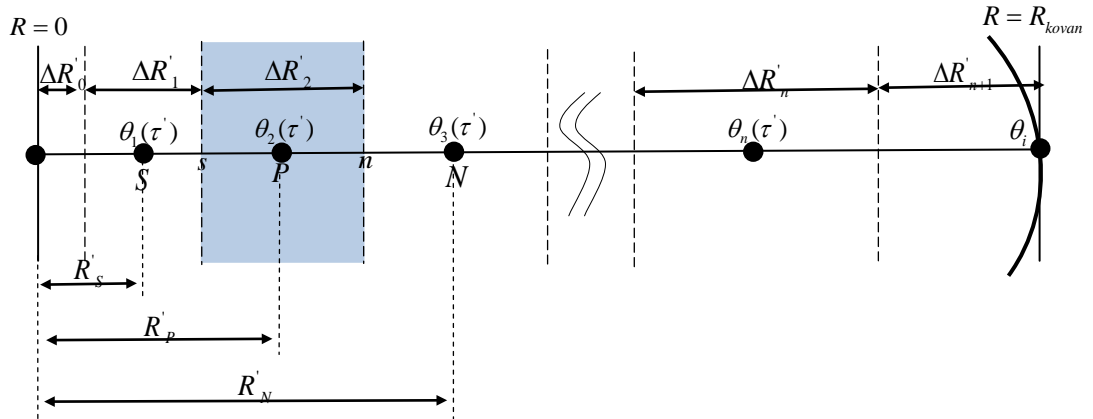
Kontrol hacmi yaklaşımında hesaplama bölgesindeki kontrol hacimlerinin sayısının fazla alınması çözüm hassasiyetini artırırken, hesaplama süresini de olumsuz etkilemektedir. Az sayıda kontrol hacmi kullanarak sıcaklık dağılımı ve arayüzey ilerlemesini iyi bir şekilde elde etmek için silindirin dış yüzeyinden merkezine doğru kontrol hacimleri sıklaştırılmıştır (Şekil 3.6). Sonlu hacimlerin boyutlarının yarıçap boyunca değişimleri Eşitlik 3.46a ile Eşitlik 3.43d'de verilmiştir.

$$ddR' = \frac{\Delta R'_2}{\Delta R'_1} \quad (3.46a)$$

$$\Delta R'_0 = R'_1 \quad (3.46b)$$

$$\Delta R'_i = (2R'_1)^{i-1} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (3.46c)$$

$$\Delta R'_{n+1} = \frac{(2R'_1)^n}{2} \quad (3.46d)$$



Şekil 3.6 Silindirik koordinatlarda faz değişiminde sayısal modelin düğüm noktaları

Ayrıştırma için bir boyutlu silindirik faz değişiminde enerji dengesini boyutsuz olarak ifade eden Eşitlik 3.41, kontrol hacmi boyunca integre edilir,

$$\int_s^n \int_{\tau'}^{\tau'+\Delta\tau'} \frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau'} R' d\tau' dR = \int_{\tau'}^{\tau'+\Delta\tau'} \int_s^n \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R'k^* \frac{\partial\theta}{\partial R'} \right) R' dR d\tau' - \int_w^e \int_{\tau'}^{\tau'+\Delta\tau'} \frac{\partial S^*}{\partial\tau'} R' d\tau' dR \quad (3.47)$$

Burada her bir terim aşağıdaki şekilde ayrıştırılmaktadır,

$$\int_s^n \int_{\tau'}^{\tau'+\Delta\tau'} \frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau'} R' d\tau' dR' = R'_p \Delta R'_p (C_p^* \theta_p - C_p^{*0} \theta_p^0) \quad (3.47a)$$

$$\int_s^n \int_{\tau'}^{\tau'+\Delta\tau'} \frac{1}{R'} \frac{\partial}{\partial R'} \left(R' k^* \frac{\partial\theta}{\partial R'} \right) R' dR d\tau' = \left[R'_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_p}{\Delta R'_n} - R'_s k_s^* \frac{\theta_p - \theta_s}{\Delta R'_s} \right] \Delta\tau' \quad (3.47b)$$

$$\int_s^n \int_{\tau'}^{\tau'+\Delta\tau'} \frac{\partial S^*}{\partial\tau'} R' d\tau' dR' = (S_p^* - S_p^{*0}) R'_p \Delta R'_p \quad (3.47c)$$

Eşitlik 3.47a ile Eşitlik 3.47c kullanılarak Eşitlik 3.47 yeniden düzenlenir. Enerji dengesini ifade eden Eşitlik 3.41'in ara noktalar için sonlu hacimlerde ayrıştırılmış hali Eşitlik 3.48'de ifade edilmektedir.

$$\frac{\Delta R'_p}{\Delta\tau'} R'_p (C_p^* \theta_p - C_p^{*0} \theta_p^0) = R'_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_p}{\Delta R'_n} - R'_s k_s^* \frac{\theta_p - \theta_s}{\Delta R'_s} - \frac{\Delta R'_p}{\Delta\tau'} R'_p (S_p^* - S_p^{*0}) \quad (3.48)$$

Eşitliklerdeki $\Delta R'_n$ ve $\Delta R'_s$ Eşitlik 3.49a ile Eşitlik 3.49b'de verilmiştir. Burada ayrıca, ⁰ üst indisi bir önceki zaman adımındaki özellikleri belirtmektedir.

$$\Delta R'_n = (\Delta R'_p + \Delta R'_{p+1}) / 2 \quad (3.49a)$$

$$\Delta R'_s = (\Delta R'_p + \Delta R'_{p-1}) / 2 \quad (3.49b)$$

Eşitlik 3.48'i genel katsayılar matrisi cinsinden ifade etmek gerekirse;

$$a_p \theta_p = a_N \theta_N + a_s \theta_s + b \quad (3.50)$$

Burada katsayılar aşağıdaki gibi elde edilir,

$$a_N = \frac{k_n^*}{\Delta R'_n} R'_n \quad (3.50a)$$

$$a_s = \frac{k_s^*}{\Delta R'_s} R'_s \quad (3.50b)$$

$$a_p^0 = C_p^{*0} \frac{\Delta R'_p}{\Delta \tau'} R'_p \quad (3.50c)$$

$$a_p^1 = C_p^* \frac{\Delta R'_p}{\Delta \tau'} R'_p \quad (3.50d)$$

$$b = -\frac{\Delta R'_p}{\Delta \tau'} R'_p (S_p^* - S_p^{*0}) + a_p^0 \theta_p^0 \quad (3.50f)$$

$$a_p = a_N + a_s + a_p^1 \quad (3.50g)$$

Eşitlik 3.45c'deki sınır koşulu için $\left(\frac{d\theta}{dR'}\right)_s = \frac{\theta_p - \theta_s}{\Delta R'_s} = -\frac{q^{*'}}{k^* 2\pi R'}$ olduğundan,

Eşitlik 3.48'de $\frac{\theta_p - \theta_s}{\Delta R'_s}$ ifadesi yerine $-\frac{q^{*'}}{k^* 2\pi R'}$ ifadesi yazılabilir, Bu durumda, 1

numaralı düğüm noktası için enerji dengesinin sonlu hacimlerde ayrıştırılmış hali aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\Delta R'_p}{\Delta \tau'} R'_p (C_p^* \theta_p - C_p^{*0} \theta_p^0) = R'_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_p}{\Delta R'_n} + \frac{q^{*'}}{2\pi} - \frac{\Delta R'_p}{\Delta \tau'} R'_p (S_p^* - S_p^{*0}) \quad (3.51)$$

Burada, Eşitlik 3.50'dekinden farklı olan katsayılar,

$$a_s = 0 \quad (3.52a)$$

$$b = -\frac{\Delta R'_p}{\Delta \tau'} (S_p^* - S_p^{*0}) + a_p^0 \theta_p^0 + \frac{q^{*'}}{2\pi} \quad (3.52b)$$

Eşitlik 3.45b'deki sınır koşulu için $\left(\frac{d\theta}{dR'}\right)_n = \frac{\theta_N - \theta_p}{\Delta R'_n} = 0$ olduğu göz önüne

alınarak, Eşitlik 3.48'de $\frac{\theta_N - \theta_p}{\Delta R'_n}$ ifadesi yerine 0 değeri yazılabildiğinden, n

numaralı düğüm noktası için enerji dengesinin sonlu hacimlerde ayrıştırılmış hali Eşitlik 3.53'teki gibidir.

$$\frac{\Delta R'_P}{\Delta \tau'} R'_P (C_P^* \theta_P - C_P^{*0} \theta_P^0) = 0 - R'_s k_s^* \frac{\theta_P - \theta_S}{\Delta R'_s} - \frac{\Delta R'_P}{\Delta \tau'} R'_P (S_P^* - S_P^{*0}) \quad (3.53)$$

Burada Eşitlik 3.50'dekinden farklı olan katsayılar,

$$a_N = 0 \quad (3.54)$$

3.2.2.5 Enerji Dengesinin Kontrolü

Oluşturulan sayısal modelin doğruluğunu kontrol etmek için, modelin enerji dengesi yazılabilir. Modelin, Eşitlik 3.55'i sağlaması, enerji dengesini sağladığının göstergesidir.

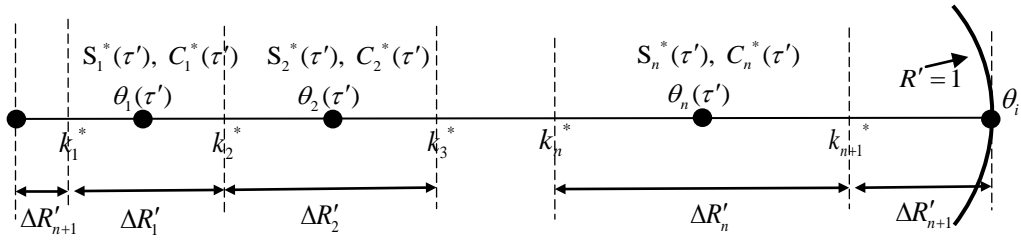
$$Q^{*f}(\tau') = E^{*f}(\tau') - E^{*f}(0) \quad (3.55)$$

Burada $Q^{*f}(\tau')$, ısı yutucunun τ' süre sonunda birim uzunlukta yuttuğu toplam boyutsuz ısı miktarını, $E^{*f}(\tau')$, τ' süre sonunda FDM'nin birim uzunluğundaki toplam boyutsuz enerjisini, $E^{*f}(0)$ ise FDM'nin başlangıç anında birim uzunluğundaki toplam boyutsuz enerjisini göstermektedir. Bu parametreleri açık olarak yazmak gerekirse;

$$Q^{*f}(\tau') = \sum_{i=0}^{\tau'} q^{*f}(i) \Delta \tau' \quad (3.56a)$$

$$E^{*f}(\tau') = \sum_{i=1}^n [C_i(\tau') \theta_i(\tau') + S_i(\tau')] 2\pi R'_i \Delta R'_i \quad (3.56b)$$

Eşitlik 3.56a ile eşitlik 3.56b kullanılarak Eşitlik 3.55 yeniden düzenlenirse, enerji dengesini ifade eden Eşitlik 3.57 elde edilir. Bu eşitliklerde kullanılan parametreler Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Silindirdeki faz değişiminde enerji dengesi için parametreler

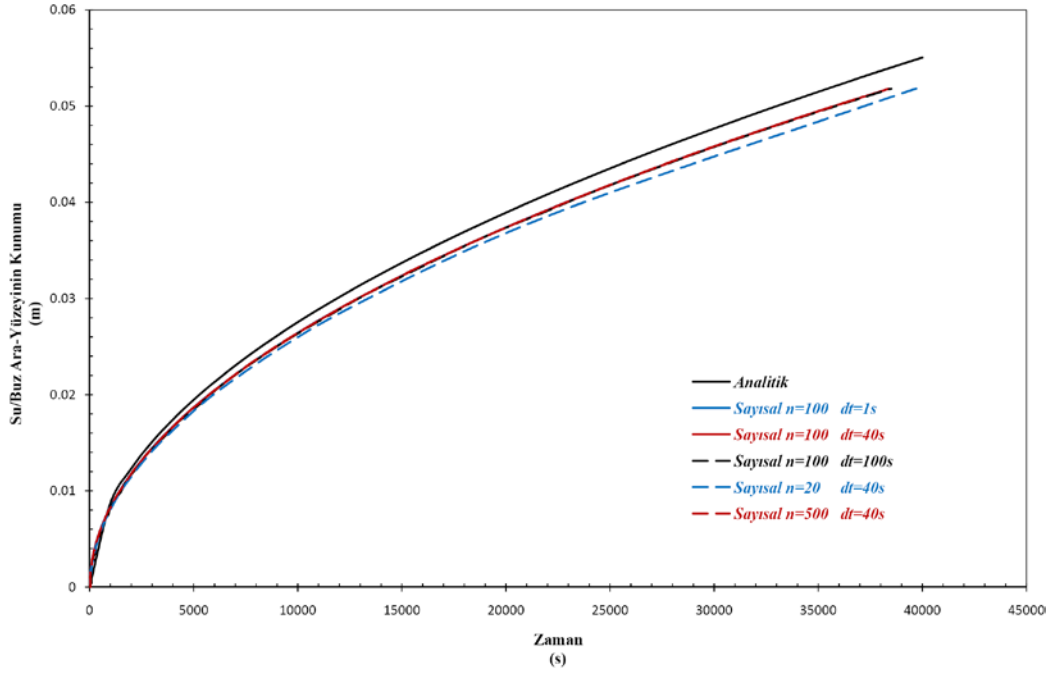
$$\sum_{i=0}^{\tau'} q^{*'}(i) \Delta \tau' = \sum_{i=1}^n [C_i(\tau') \theta_i(\tau') + S_i(\tau')] 2\pi R_i \Delta R_i \quad (3.57)$$

3.2.3 Sonuçlar

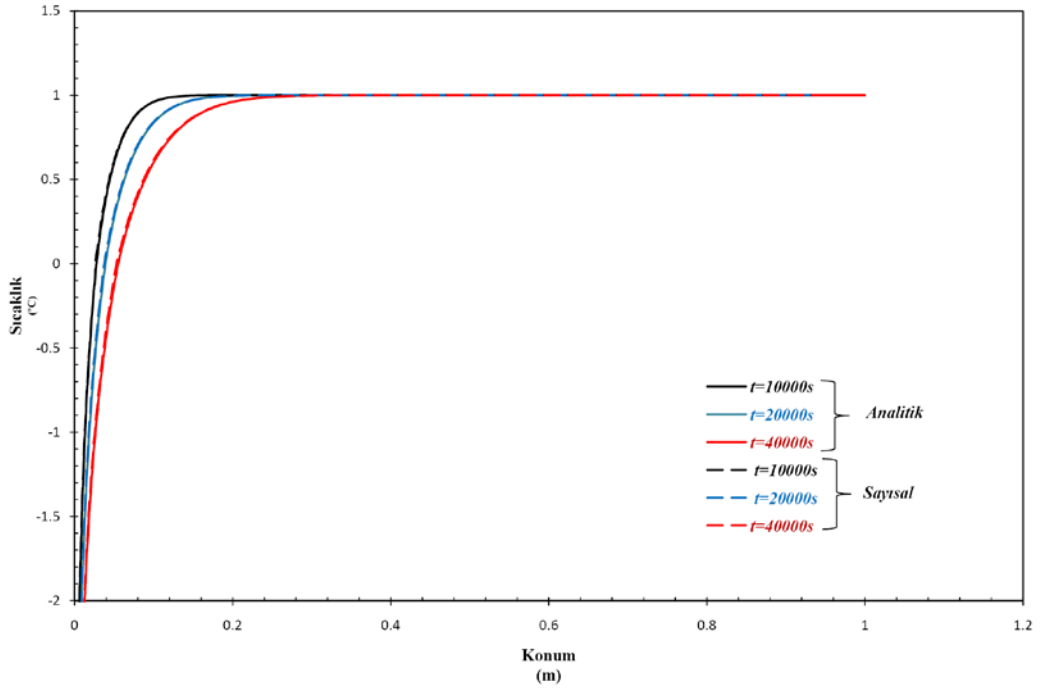
Çizgisel ısı yutucu etrafında bir boyutlu katılaşmayı Özışık (1980) analitik olarak incelemiştir. Özışık (1980)'un analitik olarak bulmuş olduğu sonuçlarla, aynı parametreler için sayısal olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve böylelikle sayısal modelin doğruluğu kontrol edilmiştir. Sayısal ve analitik çözüm karşılaştırılması, 40000 saniyeye kadar yapılmıştır.

Şekil 3.8'de, analitik ve sayısal yöntemle bulunan su/buz ara-yüzeyinin konumunun zamana göre değişimi verilmiştir. Sayısal yöntemde çözüm, 3 farklı kontrol hacim sayısı (n) ve 3 farklı zaman adımı (dt) için yapılmıştır. Çözüm bölgesinin 20 kontrol hacme ayrıldığı modelin dışındaki dört model çok yakın sonuçlar vermiştir ve bu sonuçlar, analitik yöntemle bulunan sonuçla kıyaslanınca kabul edilebilir düzeydedir.

Şekil 3.9'da ise farklı zamanlardaki sıcaklık dağılımı için analitik ve sayısal çözümün karşılaştırılması verilmiştir.



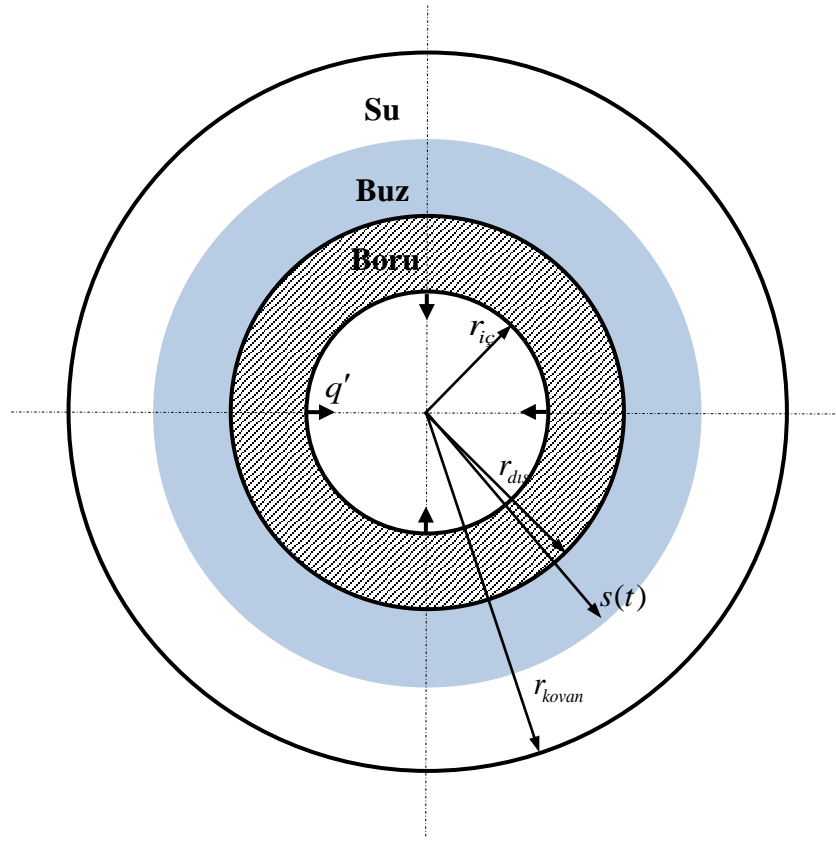
Şekil 3.8 Analitik ve sayısal yöntemle bulunan su/buz ara-yüzeyinin zamana göre değişimi



Şekil 3.9 Farklı zamanlar için analitik ve sayısal yöntemle bulunan sıcaklığın yarıçapa göre değişimi

3.3 Boru Etrafındaki Yarı Sonsuz Ortamda Tek Boyutlu Faz Değişimi

Yarı sonsuz boru etrafındaki tek boyutlu faz değişimi problemi olarak, Şekil 3.10'da şematik olarak gösterilmiş olan problem incelenmiştir. Bu problemde, içerisinde sabit ısı akısı olan ve k_b ısı iletim katsayısına sahip boru etrafındaki, başlangıç sıcaklığı T_i , erime sıcaklığı T_m 'den yüksek olan suyun eksenden simetrik olarak faz değişimi söz konusudur. Bu faz değişimi sayısal olarak modellenmiş ve borunun ısı iletim 200 W/mK alınarak, yapılan hesaplamalar, borunun etkisinin ihmal edildiği modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Borunun etkisinin ihmal edildiği model, birinci problemin çözümünde kullanılan modelin uyarlanmasından elde edilmiştir.



Şekil 3.10 Boru etrafındaki faz değişiminin parametreleri

Şekil 3.10'daki $r_{iç}$, $r_{dış}$ ve r_{kovan} sırası ile borunun iç yarıçapı borunun dış yarıçapları ve kovanın yarıçapı, r_s ise su/buz ara-yüzeyinin yarıçapıdır. Modelin yarı

sonsuz katı olarak kabul edilmesi için, analiz süresi olan $t=40000$ saniye boyunca $r = r_{kovan}$ 'da sıcaklık değişiminin olmaması gerektiğinden, kovan $r_{kovan}=1$ m yarıçapında alınmıştır.

3.3.1 Korunum Denklemleri

Sistem içerisindeki zamana ve konuma bağlı sıcaklık dağılımı ve faz değişimi ara-yüzeyinin belirlenmesi için, termodinamiğin birinci yasasını esas alınarak, model için enerji korunumu denklemi yazılabilir. Zamana bağlı bir sistem için, enerjinin korunumu denklemi en genel ifadeyle şu şekilde yazılmaktadır,

$$\dot{E}'_{giren} + \dot{E}'_{ünkânen} = \dot{E}'_{depolanan} + \dot{E}' \quad (3.58)$$

3.3.1.1 Boru Cıdarı Bölgesi İçin Korunum Denklemi

Boru cıdarı bölgesi için Eşitlik 3.58 açık olarak ifade edilirse,

$$\dot{E}'_{üretim} = 0 \quad (3.59a)$$

$$\dot{E}'_{giren} = q_r \quad (3.59b)$$

$$\dot{E}'_{çıkan} = q_{r+dr} \quad (3.59c)$$

$$\dot{E}'_{depolanan} = \rho c_p A \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.59d)$$

Burada,

$$q_r = -kA_l \frac{\partial T}{\partial r} \text{ ve } q_{r+dr} = q_r + \frac{\partial q_r}{\partial r} dr$$

Eşitlik 3.59a ile Eşitlik 3.59d kullanılarak, Eşitlik 3.58 yeniden düzenlenirse,

$$\begin{aligned}
q_r - q_{r+dr} &= \rho c_p A \frac{\partial T}{\partial t} \\
-\frac{\partial q_r}{\partial r} dr &= \rho c_p A \frac{\partial T}{\partial t} \\
\frac{\partial}{\partial r} \left(k 2\pi r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr &= \rho c_p 2\pi r dr \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.60)
\end{aligned}$$

Gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra, boru için enerji denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.61)$$

3.3.1.2 FDM Bölgesi İçin Korunum Denklemi

FDM bölgesi için enerjinin korunumu denklemi, birinci problem için elde edilen Eşitlik 3.18'dekiyle aynıdır.

3.3.2 Korunum Denklemlerinin Boyutsuzlaştırılması

Korunum denklemlerinin boyutsuzlaştırılmasında kullanılan boyutsuz parametreler aşağıda tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}
R &= r / D_{i\zeta}, \quad R_{kovanş} = r_{kdvqm} / D_{i\zeta}, \quad R_d = r / D_i, \quad \Delta R = \frac{\Delta r}{D_{i\zeta}}, \quad \theta = \frac{T - T_m}{T_i - T_m}, \quad H = \rho h \\
C &= \rho c_p, \quad C^* = C / C_l, \quad C_{sl} = C_s / C_l, \quad C_{bl} = C_b / C_l, \quad k^* = k / k_l, \quad k_{sl} = k_s / k_l \\
k_{bl} &= k_b / k_l, \quad \tau = \alpha_l t / D_{i\zeta}^2, \quad \alpha = k / \rho c_p, \quad S^* = \frac{S}{C_l (T_i - T_m)}, \quad Ste = \frac{C_l (T_i - T_m)}{\rho L} \\
q^{*r} &= \frac{q'}{k_l (T_i - T_m)}
\end{aligned}$$

3.3.2.1 Boru Cidarı Bölgesi İçin Korunum Denkleminin Boyutsuzlaştırılması

Boru cidarı için elde delilen Eşitlik 3.61, boyutsuz parametreler yardımı ile boyutsuz olarak ifade edilecek olursa,

$$\frac{\partial(CT)}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial \tau} = \frac{1}{RD_{iç}} \frac{\partial}{\partial R} \left(kRD_{iç} \frac{\partial T}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial r} \right) \frac{\partial R}{\partial r} \quad (3.62)$$

$$\frac{\partial(CT)}{\partial \tau} \frac{\alpha_l}{D_{iç}^2} = \frac{1}{RD_{iç}} \frac{\partial}{\partial R} \left(kRD_{iç} \frac{\partial T}{\partial R} \frac{1}{D_{iç}} \right) \frac{1}{D_{iç}}$$

$$\frac{\partial(CT)}{\partial \tau} \alpha_l = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(kR \frac{\partial T}{\partial R} \right)$$

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

Yapılan işlemler sonucu, boyutsuz enerji dengesini veren, Eşitlik 3.63 elde edilmiştir.

$$\frac{\partial(C^*\theta)}{\partial \tau} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(k^* R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) \quad (3.63)$$

3.3.2.2 FDM Bölgesi İçin Korunum Denkleminin Boyutsuzlaştırılması

FDM için enerji dengesini ifade eden Eşitlik 3.18, boyutsuz parametreler kullanılarak yeniden ifade edilirse,

$$\frac{\partial(CT)}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{1}{RD_{iç}} \frac{\partial}{\partial R} \left(kRD_{iç} \frac{\partial T}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial r} \right) \frac{\partial R}{\partial r} \quad (3.64)$$

$$\frac{\partial(CT)}{\partial \tau} \frac{\alpha_l}{D_{iç}^2} = \frac{1}{RD_{iç}} \frac{\partial}{\partial R} \left(kRD_{iç} \frac{\partial T}{\partial R} \frac{1}{D_{iç}} \right) \frac{1}{D_{iç}} - \frac{\partial S}{\partial \tau} \frac{\alpha_l}{D_{iç}^2}$$

$$\frac{\partial(CT)}{\partial \tau} \frac{k_l}{C_l} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(kR \frac{\partial T}{\partial R} \right) - \frac{\partial S}{\partial \tau} \alpha_l$$

$$\frac{\partial(C^*\theta)}{\partial \tau} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(Rk^* \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) - \frac{\partial S}{\partial \tau} \frac{1}{C_l(T_i - T_m)} \quad (3.65)$$

FDM için enerji dengesi boyutsuz olarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(Rk^* \frac{\partial\theta}{\partial R} \right) - \frac{\partial S^*}{\partial\tau} \quad (3.66)$$

Buradaki, C^* , S^* ve k^* değerleri Eşitlik 3.42 ila Eşitlik 3.44'teki gibidir.

3.3.3 Korunum Denklemlerinin Ayrıştırılması

Korunum denklemleri ayrıştırılmadan önce problemin başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir.

$$\theta = \theta_i = 1 \quad \tau = 0 \quad (3.67a)$$

$$\frac{d\theta}{dR} = 0 \quad R \rightarrow R_{kovan} \quad (3.67b)$$

$$\frac{d\theta}{dR} = -\frac{q^*}{k^* 2\pi R} \quad R = 0,5 \quad (3.67c)$$

3.3.3.1 Boru Cidarı Bölgesi İçin Korunum Denkleminin Ayrıştırılması

Boru bölgesinde enerji dengesini ifade eden Eşitlik 3.63'ü ayrıştırmak için eşitlik kontrol hacim boyunca integre edilir. Çözüm bölgesi kontrol hacimlerine ayrılırken, FDM bölgesinde, boru cidarı bölgesinden daha hassas ağ yapısı oluşturulmuştur.

$$\int_s^{\tau+\Delta\tau} \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau} R d\tau dR = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_s^s \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(Rk^* \frac{\partial\theta}{\partial R} \right) R dR d\tau \quad (3.68)$$

Eşitlik 3.64'teki her bir terim için integral ayrı ayrı hesaplanır,

$$\int_s^{\tau+\Delta\tau} \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau} R d\tau dR = R_p \Delta R_p (C_p^* \theta_p - C_p^{*0} \theta_p^0) \quad (3.68a)$$

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_s^n \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R k^* \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) R dR d\tau = \left[R_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_P}{\Delta R_n} - R_s k_s^* \frac{\theta_P - \theta_S}{\Delta R_s} \right] \Delta \tau \quad (3.68b)$$

Eşitlik 3.68a ve Eşitlik 3.68b kullanılarak elde edilen, boru cidarı için enerji dengesini ifade eden Eşitlik 3.63'ün sonlu hacimlerde ayrıştırılmış hali Eşitlik 3.69'da verilmiştir.

$$\frac{\Delta R_p}{\Delta \tau} R_p (C_p^* \theta_p - C_p^{*0} \theta_p^0) = R_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_P}{\Delta R_n} - R_s k_s^* \frac{\theta_P - \theta_S}{\Delta R_s} \quad (3.69)$$

Eşitlik 3.69'u genel matris formunda ifade etmek gerekirse;

$$a_p \theta_p = a_N \theta_N + a_S \theta_S + b \quad (3.70)$$

Buradaki katsayılar,

$$a_N = \frac{k_n^*}{\Delta R_n} R_n \quad (3.70a)$$

$$a_S = \frac{k_s^*}{\Delta R_s} R_s \quad (3.70b)$$

$$a_p^0 = C_p^{*0} \frac{\Delta R_p}{\Delta \tau} R_p \quad (3.70c)$$

$$a_p^1 = C_p^* \frac{\Delta R_p}{\Delta \tau} R_p \quad (3.70d)$$

$$b = a_p^0 \theta_p^0 \quad (3.70e)$$

$$a_p = a_N + a_S + a_p^1 \quad (3.70f)$$

şeklinindedir. Eşitlik 3.77c'de tanımlanan sınır koşulu için

$$\left(\frac{d\theta}{dR} \right)_s = \frac{\theta_P - \theta_S}{\Delta R_s} = -\frac{q^*}{k^* 2\pi R} \quad \text{olduğundan, Eşitlik 3.89'da } \frac{\theta_P - \theta_S}{\Delta R_n} \text{ ifadesi yerine}$$

$-\frac{q^{*'}}{k^* 2\pi R}$ ifadesi yazılabilir. Bu durumda, ilk düğüm noktası için enerji dengesinin sonlu hacimlerde ayrıştırılmış hali Eşitlik 3.71'deki gibidir.

$$\frac{\Delta R_p}{\Delta \tau} R_p (C_p^* \theta_p - C_p^{*0} \theta_p^0) = R_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_p}{\Delta R_n} + \frac{q^{*'}}{2\pi} \quad (3.71)$$

Eşitlik 3.70'teki katsayılar, Eşitlik 3.71 için yeniden ifade edilirse, a_N , a_p^0 , a_p^1 , a_p katsayıları değişmemekte a_s ve b ise aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$a_s = 0 \quad (3.72a)$$

$$b = a_p^0 \theta_p^0 + \frac{q^{*'}}{2\pi} \quad (3.72b)$$

3.3.3.2 FDM Bölgesi İçin Korunum Denkleminin Ayrıştırılması

FDM için enerji dengesini ifade eden Eşitlik 3.66'yı ayrıştırmak için eşitlik kontrol hacim boyunca integre edilir.

$$\int_s^{n+\Delta\tau} \int_\tau \frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau} R d\tau dR = \int_\tau^{\tau+\Delta\tau} \int_s^n \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R k^* \frac{\partial\theta}{\partial R} \right) R dR d\tau - \int_w^e \int_\tau^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial S^*}{\partial\tau} R d\tau dR \quad (3.73)$$

Burada, her bir terim için integral yapılacak olursa,

$$\int_s^{n+\Delta\tau} \int_\tau \frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau} R d\tau dR = R_p \Delta R_p (C_p^* \theta_p - C_p^{*0} \theta_p^0) \quad (3.73a)$$

$$\int_\tau^{\tau+\Delta\tau} \int_s^n \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R k^* \frac{\partial\theta}{\partial R} \right) R dR d\tau = \left[R_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_p}{\Delta R_n} - R_s k_s^* \frac{\theta_p - \theta_s}{\Delta R_s} \right] \Delta \tau \quad (3.73b)$$

$$\int_s^{n+\Delta\tau} \int_\tau \frac{\partial S^*}{\partial\tau} R d\tau dR = (S_p^* - S_p^{*0}) R_p \Delta R_p \quad (3.73c)$$

Bu eşitliklerden yararlanarak Eşitlik 3.73 yeniden düzenlenerek, FDM’de enerji dengesinin sonlu hacimlerde ayrıştırılmış hali olan Eşitlik 3.74 elde edilir.

$$\frac{\Delta R_p}{\Delta \tau} R_p (C_p^* \theta_p - C_p^{*0} \theta_p^0) = R_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_p}{\Delta R_n} - R_s k_s^* \frac{\theta_p - \theta_s}{\Delta R_s} - \frac{\Delta R_p}{\Delta \tau} R_p (S_p^* - S_p^{*0}) \quad (3.74)$$

FDM denklemlerinin ayrıştırılmış hali genel olarak, Eşitlik 3.90’daki gibi ifade edilmektedir. Eşitlik 3.70’teki katsayılar, FDM için yeniden ifade edilirse a_N , a_s , a_p^0 , a_p^1 ve a_p katsayıları boru malzemeleri için elde edilen katsayılarla aynı olmaktadır, b sabiti ise aşağıdaki gibi elde edilmektedir,

$$b = -\frac{\Delta R_p}{\Delta \tau} R_p (S_p^* - S_p^{*0}) + a_p^0 \theta_p^0 \quad (3.75)$$

Eşitlik 3.67b deki sınır koşulu için $\left(\frac{d\theta}{dR}\right)_n = \frac{\theta_N - \theta_p}{\Delta R_n} = 0$ olduğundan Eşitlik 3.74’te $\frac{\theta_N - \theta_p}{\Delta R_n}$ ifadesi yerine 0 değeri yazılabildiğinden, son düğüm noktası için enerji dengesinin sonlu hacimlerde ayrıştırılmış hali Eşitlik 3.96’daki gibidir.

$$\frac{\Delta R_p}{\Delta \tau} R_p (C_p^* \theta_p - C_p^{*0} \theta_p^0) = 0 - R_s k_s^* \frac{\theta_p - \theta_s}{\Delta R_s} - \frac{\Delta R_p}{\Delta \tau} R_p (S_p^* - S_p^{*0}) \quad (3.76)$$

Bu eşitlik genel olarak Eşitlik 3.70’teki gibi ifade edilir. Eşitlik 3.76 için a_s , a_p^0 , a_p^1 , a_p değişmemekte b ve a_N ise aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$a_N = 0 \quad (3.77a)$$

$$b = -\frac{\Delta R_p}{\Delta \tau} R_p (S_p^* - S_p^{*0}) + a_p^0 \theta_p^0 \quad (3.77b)$$

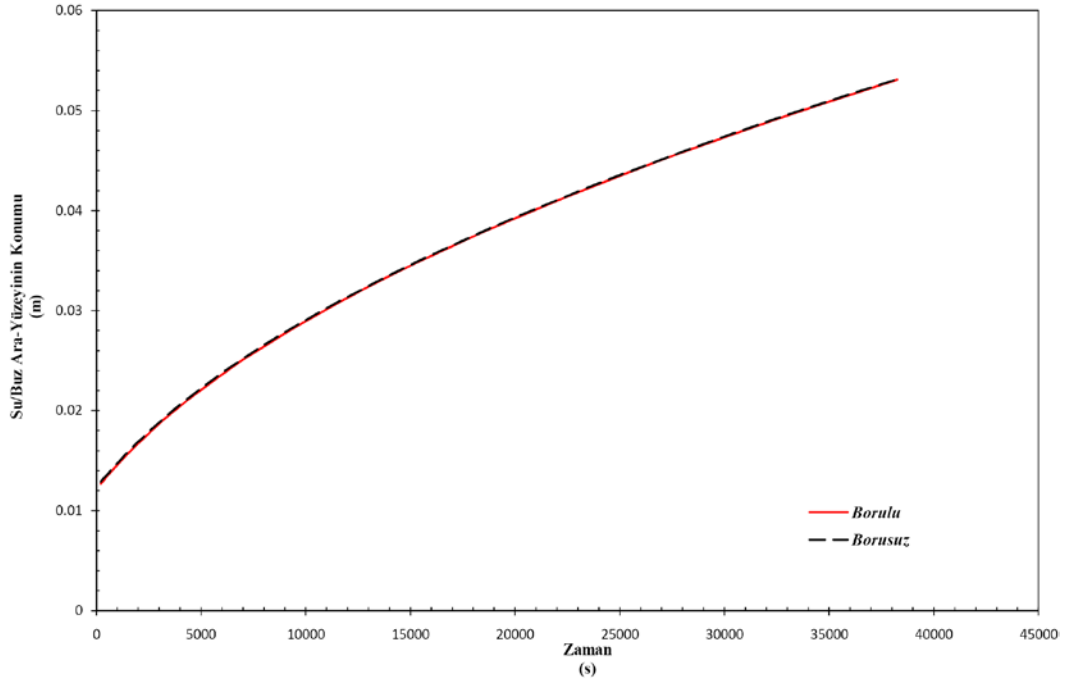
3.3.3.3 Enerji Dengesi

Enerji dengesinin kontrolünde, Eşitlik 3.64'te verilen korunum denklemi bu model için de uygulanabilir.

3.3.4 Sonuçlar

Modelde kullanılan borunun, iç yarıçapı ($r_{iç}$) 7,5 mm, dış yarıçapı ($r_{dış}$) 12,5 mm ve ısı iletim katsayısı (k) 200 W/mK olarak, borunun içindeki sabit ısı akısı (q') ise 94,5 W/m olarak alınmıştır. Borunun ısı iletim katsayısı yüksek olmasından dolayı, borunun etkisinin ihmal edilmesi durumunda, FDM'deki sıcaklık dağılımının ve su/buz ara-yüzeyinin konumunun, borunun etkisinin dâhil edildiği durumdakine yakın olması gerekmektedir. Doğruluğu kanıtlanan, çizgisel ısı yutucu çevresinde bir boyutlu katılaşma probleminin sayısal modeli, borunun etkisinin ihmal edildiği duruma uyarlanarak bulunan sonuçlar, borunun etkisinin göz önüne alınarak oluşturulan sayısal modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

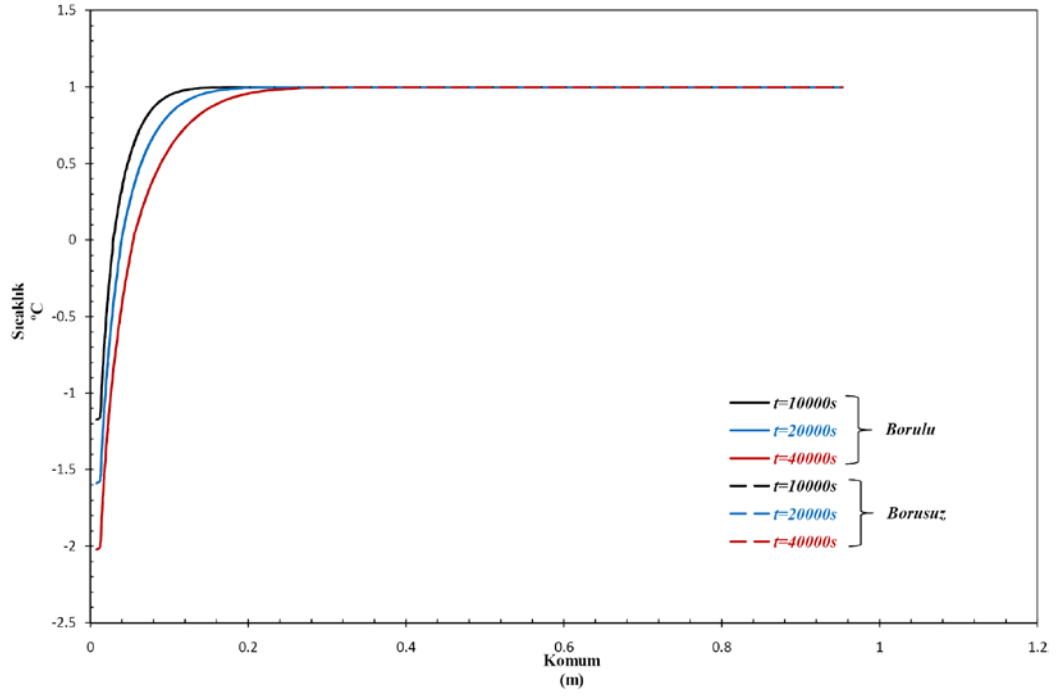
Şekil 3.11'de su-buz ara yüzeyinin konumunun zamana göre değişimi borunun etkisinin ihmal edildiği ve dâhil edildiği iki durum için verilmiştir. Bu iki durum içinde sayısal modeller oluşturulurken, FDM'deki toplam kontrol hacim sayısı (n) 100, zaman adımı (Δt) ise 40 s olarak alınmıştır. Borunun etkisinin ihmal edildiği durumdaki katılaşma miktarı, ihmal edilmediği durumdaki katılaşma miktarından biraz fazladır. Bu katılaşma miktarının birbirine yakın çıkması boru malzemesinin ısı iletkenlik katsayısının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır ve bu yakınlık modelin doğruluğunun bir göstergesidir.



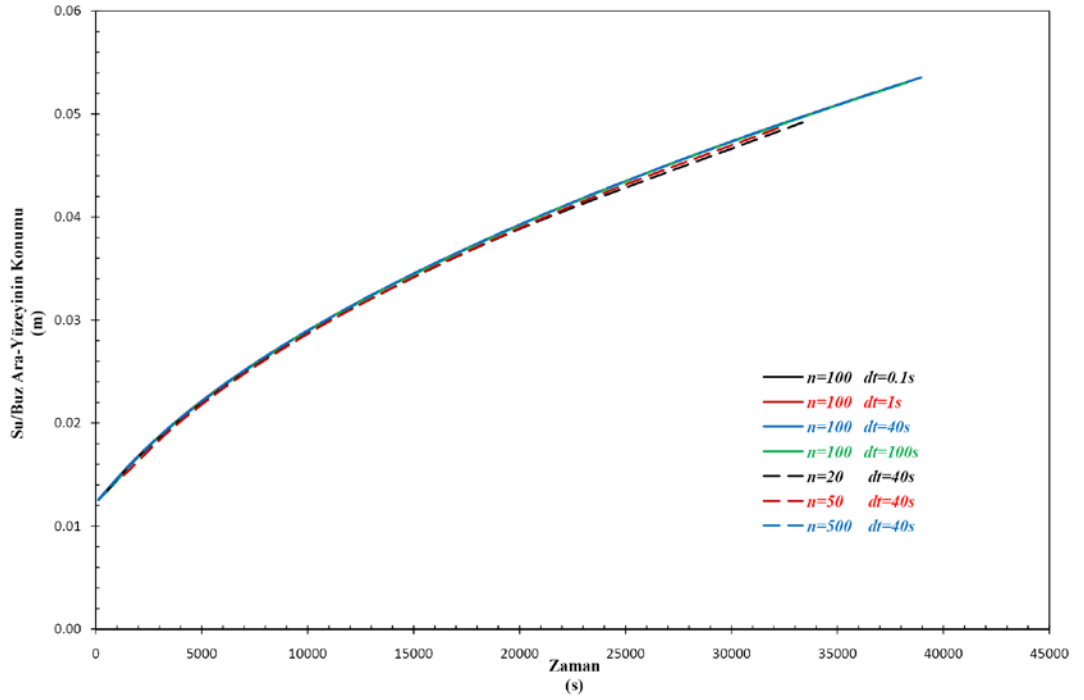
Şekil 3.11 Borunun etkisinin ihmal edildiği ve dâhil edildiği durum için su/buz ara-yüzeyinin konumunun zamana göre değişimi

Boru çevresinde bir boyutlu katılaşma probleminde, borunun etkisinin ihmal edildiği ve borunun etkisinin dikkate alındığı iki sayısal model için değişik zamanlarda, sıcaklığın yarıçapa göre değişimi eğrileri Şekil 3.12’de verilmiştir. İki modelde de sıcaklık dağılımının benzer çıkması, boru çevresinde bir boyutlu katılaşma için geliştirilen sayısal yöntemin doğruluğunun diğer bir göstergesidir. Borunun etkisinin göz önüne alındığı modelle elde edilen sıcaklık eğrilerinin boru cidarına denk gelen bölgede kırılmasının nedeni ise, boru malzemesinin ısı iletim katsayısının suyun ısı iletim katsayısından farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3.13’te çözüm bölgesinin değişik sayıda kontrol hacme bölünmesi ve sayısal çözümün farklı zaman adımlarında gerçekleşmesi durumunda su/buz ara-yüzeyinin konumunun zamana göre değişimini gösteren eğriler mevcuttur. Grafikte de görüldüğü gibi zaman adımının 0,1 s ile 100 s arasında değişmesi sonucu değiştirmemesine karşın, çözüm bölgesinin 100’den az sayıda kontrol hacmine ayrıldığı durumlarda sonuç değişiklik göstermektedir.



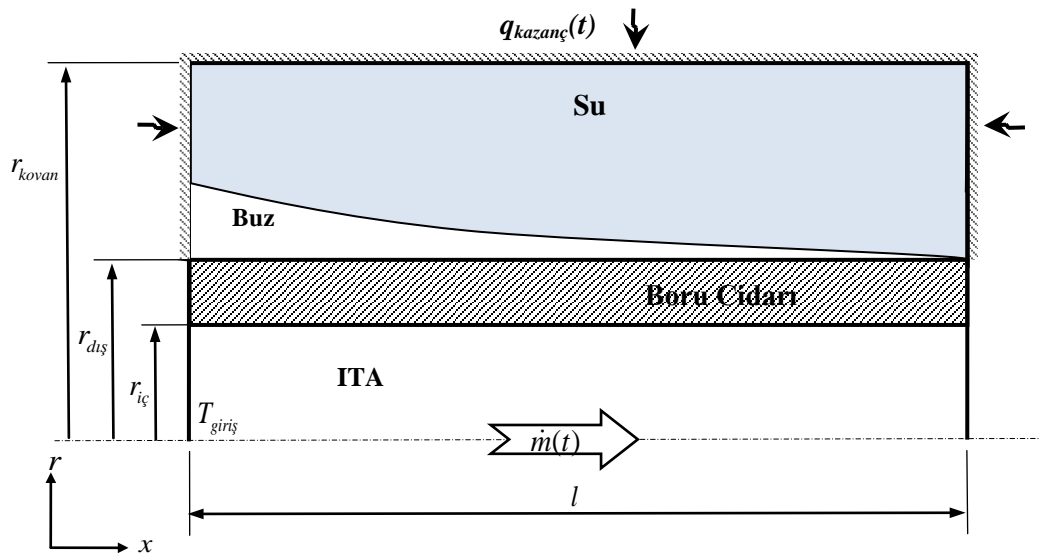
Şekil 3.12 Borunun etkisinin ihmal edildiği ve dâhil edildiği durum için sıcaklık dağılımı



Şekil 3.13 Farklı sayıda kontrol hacim için ve farklı zaman adımları için su/buz ara-yüzeyinin zamana göre değişimi

3.4 İki Boyutlu Faz Değişimi

Bu bölümde, deney düzeneğine eşdeğer matematiksel bir modelin oluşturulması ve elde edilen sayısal sonuçlar sunulacaktır. Sayısal model, gerçeğe yakın ve aynı zamanda da çözüm kolaylığına sahip olması açısından, Şekil 3.14'te görüldüğü gibi, iki boyutlu olarak modellenmiştir. Erek ve Ezan (2007) ve Zhang ve Faghri (1996) tarafından yapılan çalışmalar göz önüne alınarak, sayısal model, silindirik koordinatlarda iki boyutlu ve eksenden simetrik olarak oluşturulmuştur.



Şekil 3.14 Matematiksel model

Enerji depolama ünitesinin matematiksel modelinin şematik olarak gösterimi Şekil 3.14 te verilmiştir. FDM, iç çapı $r_{iç}$ ve dış çapı $r_{dış}$ olan boru ile iç çapı r_{kovan} olan kovan arasındaki l uzunluğundaki hacimsel bölge içerisinde bulunmaktadır. FDM'nin erime sıcaklığından daha düşük ve sabit $T_{giriş}$ sıcaklığında, sabit \dot{m} debisi ile boru içerisinden akmakta olan ITA, kendinden daha sıcak olan FDM'den ısı çekerek ısınmaktadır. Başlangıçta T_m 'den daha yüksek T_i sıcaklığında FDM zamanla soğumakta ve ısı vermiş olduğu boru etrafında katılaşma meydana gelmektedir. Borunun yan yüzeyleri mükemmel yalıtılmış olarak kabul edilirken, kovanın yanal ve çevresel yüzeylerinden gerçekleşen ısı kazançları göz önüne alınmıştır. Buna

göre, deneysel parametrelere uygun olarak kovan dış yüzeyinin δx_y kalınlığında k_y ısı iletim katsayısına sahip bir malzeme ile yalıtıldığı ve yalıtımın tüm dış yüzeyinin sabit T_y sıcaklığında tutulduğu kabul edilmiştir. Boru malzemesiyle ısı transferi akışkanının ısı özelliklerinin sıcaklıkla değişimleri ihmal edilmiştir. FDM'nin ısı özelliklerinin katı-sıvı durumları için değişimi göz önüne alınmış fakat her bir faz için sıcaklığa bağlı özellik değişimleri ihmal edilmiştir. FDM'nin başlangıç sıcaklığının faz değişim sıcaklığına yakın alınmasından dolayı, doğal taşınım etkileri hesaplamalarda göz önüne alınmamıştır.

3.4.1 Korunum Denklemleri

Enerji dengesini ifade eden Eşitlik 3.58 modeldeki tüm bölgeler için uygulanır.

3.4.1.1 ITA Bölgesi İçin Korunum Denklemi

Tam gelişmiş boru içi akış durumu için, enerji korunumu, Şekil 3.15'te görünen diferansiyel kontrol hacim için Eşitlik 3.58 açılırsa,

$$\dot{E}_{\text{üretim}} = 0 \quad (3.78a)$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} = \dot{m}c_p T + q_x \quad (3.78b)$$

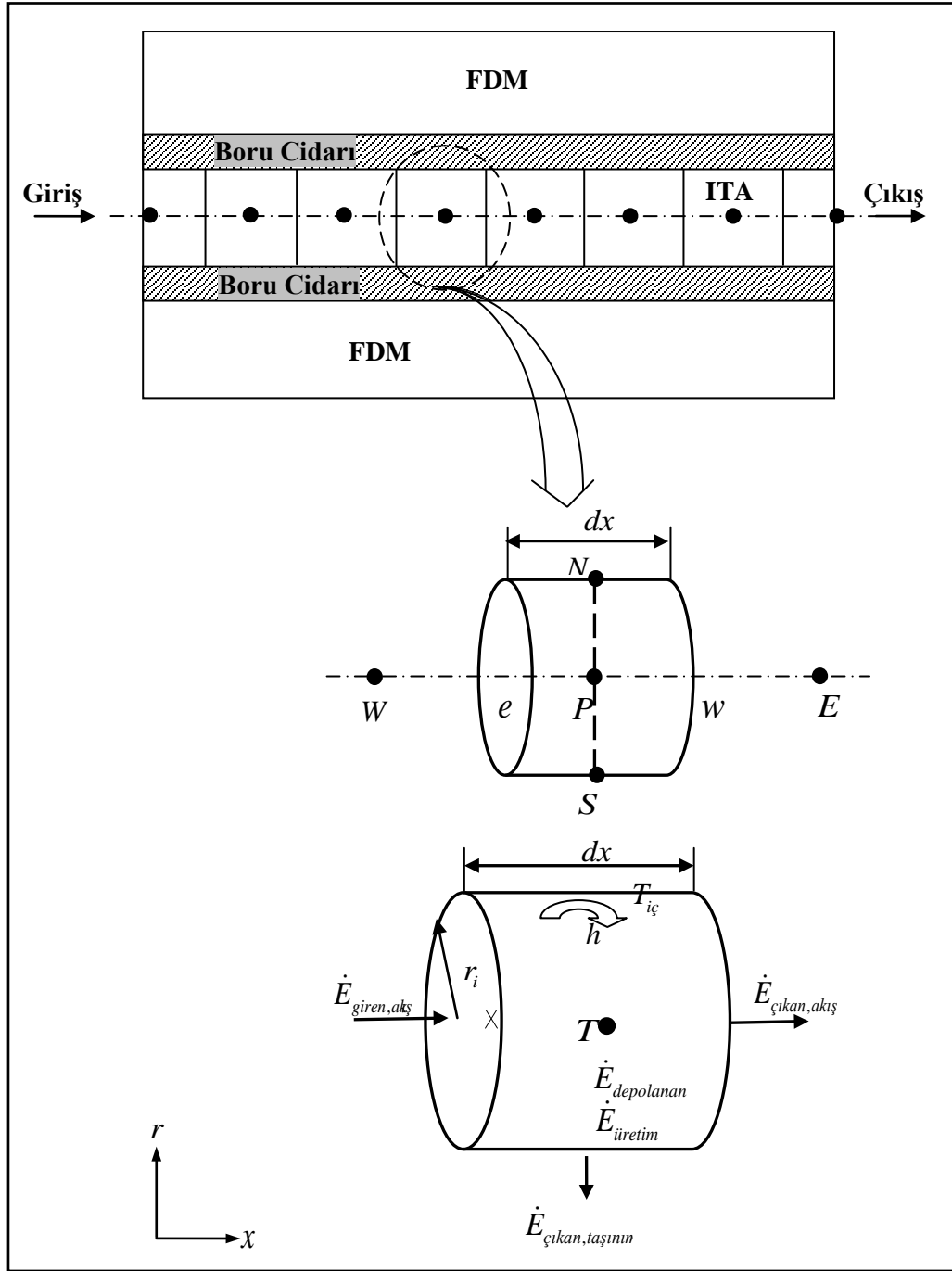
$$\dot{E}_{\text{çıkan}} = E_{\text{çıkan,akış}} + E_{\text{çıkan,taşınım}} \quad (3.78c)$$

$$\dot{E}_{\text{çıkan}} = \dot{m}cT_{x+dx} + q_{x+dx} + hA_l(T - T_{\text{cidar}}) \quad (3.78d)$$

$$\dot{E}_{\text{depolanan}} = \rho c_p A dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.78e)$$

Burada,

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \text{ ve } q_{x+dx} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (3.79)$$



Sekil 3.15 Isı transfer akışkanının enerji dengesi

Eşitliklerdeki, A kontrol hacminin akışa dik yüzey alanını, A_l ise kontrol hacminin yanal yüzey alanını ifade etmektedir. Yüzey alanlarını sırasıyla açmak gerekirse $A = \pi r_{iç}^2$ ve $A_l = 2\pi r_{iç} dx$ şeklinde yazılabilirler. Eşitlik 3.78a-3.78e, Eşitlik 3.58'de yerine koyulursa,

$$\dot{m}c_p T + q_x = \dot{m}c_p T_{x+dx} + hA(T - T_{x+dx}) + q_{x+dx} + \rho c_p A dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.80)$$

Akış tam gelişmiş olarak kabul edildiğinden debi, $\dot{m} = \rho Au$ olarak yazılabilir. Bu durum göz önüne alınarak Eşitlik 3.80 yeniden düzenlenirse,

$$-\rho\pi r_{iç}^2 u c_p (T_{x+dx} - T_x) - h(2\pi r_{iç} dx)(T - T_{iç}) = \rho c_p \pi r_{iç}^2 dx \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k\pi r_{iç}^2 \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \quad (3.81)$$

eşitliği elde edilir. Isı transfer akışkanında, yarıçap boyunca oluşan sıcaklık değişimi ile eksensel ısı iletimi ihmal edilirse,

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{2h}{r_{iç}} (T_{iç} - T) - \rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.82)$$

3.4.1.2 Boru Cidarı Bölgesi İçin Korunum Denklemi

Boru cidarındaki iki boyutlu ısı iletimi denklemini elde etmek için Şekil 3.16'daki kontrol hacmi incelenebilir. Seçilen kontrol hacmi için Eşitlik 3.58'deki enerji dengesi açık olarak yazılırsa,

$$\dot{E}_{üretim} = 0 \quad (3.83a)$$

$$\dot{E}_{giren} = q_x + q_r \quad (3.83b)$$

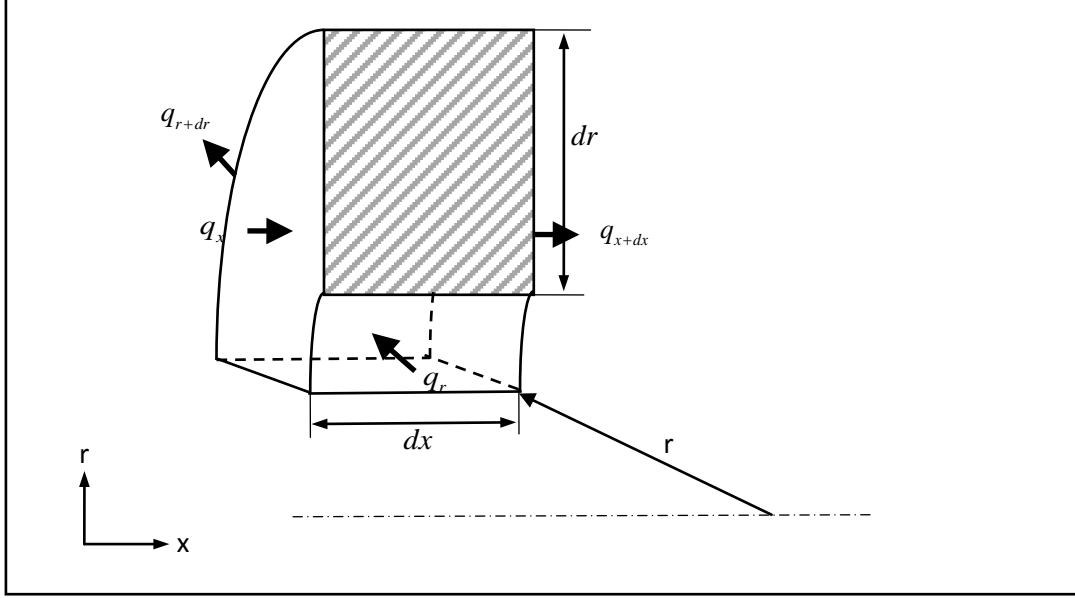
$$\dot{E}_{çıkan} = q_{x+dx} + q_{r+dr} \quad (3.83c)$$

$$\dot{E}_{depolanan} = \rho c_p A dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.83d)$$

Burada,

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \text{ ve } q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (3.84a)$$

$$q_r = -kA_l \frac{\partial T}{\partial r} \text{ ve } q_{r+dr} = q_r + \frac{\partial q_r}{\partial r} dr \quad (3.84b)$$



Şekil 3.16 Boru cidarı için enerji dengesi

Eşitlik 3.83a ile Eşitlik 3.84b kullanılarak, Eşitlik 3.58 boru cidarı bölgesi için yeniden düzenlenirse,

$$\begin{aligned} q_x + q_r - q_{x+dx} - q_{r+dr} &= \rho c_p A dx \frac{\partial T}{\partial t} \\ -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_r}{\partial r} dr &= \rho c_p A dx \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(k 2\pi r dr \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx + \frac{\partial}{\partial r} \left(k 2\pi r dx \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr &= \rho c_p 2\pi r dr dx \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.85)$$

eşitliği elde edilir. Gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra boru cidarı bölgesi için enerji denklemi aşağıdaki hali alır.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.86)$$

3.4.1.3 FDM Bölgesi İçin Korunum Denklemi

İki boyutlu faz değişimi için enerji dengesi Eşitlik 3.87’de verilmiştir.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.87)$$

Buradaki H ve k değerleri, birinci problemdeki gibi hesaplanmaktadır.

3.4.2 Korunum Denklemlerinin Boyutsuzlaştırılması

İki Boyutlu faz değişimi problemi değişken sayısını azaltmak için elde edilen korunum denklemleri aşağıdaki boyutsuz parametreler kullanılarak boyutsuz hale getirilir.

$$R = r / D_{i\zeta}, \quad X = x / D_{i\zeta}, \quad L^* = l / D_{i\zeta}, \quad R_{kovan} = r_{kovan} / D_{i\zeta}, \quad R_d = r / D_i, \quad \Delta R = \frac{\Delta r}{D_{i\zeta}}$$

$$\Delta X = \frac{\Delta x}{D_{i\zeta}}, \quad \tau = \alpha_l t / D_{i\zeta}^2, \quad \alpha = k / \rho c_p, \quad \alpha_{fl} = \alpha_f / \alpha_l, \quad H = \rho h, \quad C = \rho c_p, \quad C^* = C / C_l$$

$$C_{sl} = C_s / C_l, \quad C_{bl} = C_b / C_l, \quad k^* = k / k_l, \quad k_{sl} = k_s / k_l, \quad k_{bl} = k_b / k_l, \quad k_{fl} = k_f / k_l$$

$$\theta = \frac{T - T_m}{T_i - T_m}, \quad \theta_{in} = \frac{T_{in} - T_m}{T_i - T_m}, \quad \theta_{i\zeta} = \frac{T_{i\zeta} - T_m}{T_i - T_m}, \quad \theta_{kovan} = \frac{T_{kovan} - T_m}{T_i - T_m}, \quad q^* = \frac{q'}{k_l(T_i - T_m)}$$

$$S^* = \frac{S}{C_l(T_i - T_m)}, \quad Ste = \frac{C_l(T_i - T_m)}{\rho L}, \quad Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D_{i\zeta} \mu_f}, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Pe = Re^* Pr$$

$$Nu = \frac{h D_i}{k_f}$$

3.4.2.1 ITA Bölgesi İçin Korunum Denkleminin Boyutsuzlaştırılması

ITA bölgesi için enerji dengesini ifade eden Eşitlik 3.82 boyutsuz olarak ifade edilir.

$$\begin{aligned}
\rho_f c_{p,f} \frac{\partial T}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} &= \frac{2h}{r_{i\zeta}} (T_{i\zeta} - T) - \rho_f c_{p,f} u \frac{\partial T}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \\
C_f \frac{\partial T}{\partial \tau} \frac{\alpha_i}{D_{i\zeta}^2} &= \frac{2h}{r_{i\zeta}} (T_{i\zeta} - T) - C_f u \frac{\partial T}{\partial X} \frac{1}{D_{i\zeta}} \\
C_f \frac{\partial T}{\partial \tau} \frac{1}{\alpha_{fl}} \alpha_f &= 4h D_{i\zeta} (T_{i\zeta} - T) - D_{i\zeta} C_f u \frac{\partial T}{\partial X} \\
\frac{1}{\alpha_{fl}} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= 4Nu (T_{i\zeta} - T) - \frac{\nu_f}{\alpha_f} \frac{4\pi r_{i\zeta}^2 u \rho_f}{\pi D_{i\zeta} \nu_f \rho_f} \frac{\partial T}{\partial X}
\end{aligned} \tag{3.88}$$

Yapılan işlemler sonucu, ITA bölgesi için enerji dengesini sağlayan boyutsuz Eşitlik 3.89 elde edilmiştir.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha_{fl} \left[4Nu (\theta_{i\zeta} - \theta) - \text{Pr Re} \frac{\partial \theta}{\partial X} \right] \tag{3.89}$$

Eşitlikteki Nu değeri, tam gelişmiş laminer akış için, Kays ve Crawford (1980) tarafından bulunmuş olan ve daha sonra da Zhang ve Faghri (1996)'nın geliştirdiği Eşitlik 3.90 kullanılarak hesaplanır.

$$k_{bf}(Nu)_j = \frac{\sum_{k=1}^j \Delta \theta_k \sum_{n=0}^{\infty} G_n \exp \left[-\frac{2\lambda_n^2}{Pe_f} (X - (k-1)\Delta X) \right]}{2 \sum_{k=1}^j \Delta \theta_k \sum_{n=0}^{\infty} \frac{G_n}{\lambda_n^2} \exp \left[-\frac{2\lambda_n^2}{Pe_f} (X - (k-1)\Delta X) \right]} \tag{3.90}$$

Burada,

$$\Delta \theta_k = (\theta_{Ri})_k - (\theta_{Ri})_{k-1} \tag{3.90a}$$

$$j = \text{int} \left(\frac{X}{\Delta X} \right) + 1 \tag{3.90b}$$

Eşitlik 3.90'daki G_n sabitleri ve λ_n öz-değerleri, Kays ve Crawford (1980)'un

kullanılmış olduğu Eşitlik 3.90c kullanılarak bulunur.

$$\begin{aligned}
 \lambda_0^2 &= 7.312 & G_0 &= 0.749 \\
 \lambda_1^2 &= 44.62 & G_1 &= 0.544 \\
 \lambda_2^2 &= 113.8 & G_2 &= 0.463 \\
 \lambda_n^2 &= \left(4n + \frac{8}{3}\right)^2 & G_n &= 1.01276 \left(4n + \frac{8}{3}\right)^{\left(-\frac{1}{3}\right)}
 \end{aligned} \tag{3.90c}$$

3.4.2.2 Boru Cıdarı Bölgesi İçin Korunum Denkleminin Boyutsuzlaştırılması

Boru cıdarı için elde delilen Eşitlik 3.86, boyutsuz parametreler yardımı ile boyutsuz olarak, aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(CT)}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial X} \left(k \frac{\partial T}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{1}{RD_{i\zeta}} \frac{\partial}{\partial R} \left(kRD_{i\zeta} \frac{\partial T}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial r} \right) \frac{\partial R}{\partial r} \\
 \frac{\partial(CT)}{\partial \tau} \frac{\alpha_l}{D_{i\zeta}^2} &= \frac{\partial}{\partial X} \left(k \frac{\partial T}{\partial X} \frac{1}{D_{i\zeta}} \right) \frac{1}{D_{i\zeta}} + \frac{1}{RD_{i\zeta}} \frac{\partial}{\partial R} \left(kRD_{i\zeta} \frac{\partial T}{\partial R} \frac{1}{D_{i\zeta}} \right) \frac{1}{D_{i\zeta}} \\
 \frac{\partial(CT)}{\partial \tau} \alpha_l &= \frac{\partial}{\partial X} \left(k \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(kR \frac{\partial T}{\partial R} \right) \\
 \frac{\partial(C^*T)}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial X} \left(k^* \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(k^* R \frac{\partial T}{\partial R} \right)
 \end{aligned} \tag{3.91}$$

Yapılan işlemler sonucu, boyutsuz enerji dengesini veren, Eşitlik 3.92 elde edilmiştir.

$$\frac{\partial(C^*\theta)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left(k^* \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(k^* R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) \tag{3.92}$$

3.4.2.3 FDM Bölgesi İçin Korunum Denkleminin Boyutsuzlaştırılması

FDM bölgesi için enerji dengesini ifade eden Eşitlik 3.87, boyutsuz parametreler kullanılarak yeniden ifade edilirse,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(CT)}{\partial\tau} \frac{\partial\tau}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial\tau} \frac{\partial\tau}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial X} \left(k \frac{\partial T}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{1}{RD_{i\zeta}} \frac{\partial}{\partial R} \left(kRD_{i\zeta} \frac{\partial T}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial r} \right) \frac{\partial R}{\partial r} \\
\frac{\partial(CT)}{\partial\tau} \frac{\alpha_l}{D_{i\zeta}^2} &= \frac{\partial}{\partial X} \left(k \frac{\partial T}{\partial X} \frac{1}{D_{i\zeta}} \right) \frac{1}{D_{i\zeta}} + \frac{1}{RD_{i\zeta}} \frac{\partial}{\partial R} \left(kRD_{i\zeta} \frac{\partial T}{\partial R} \frac{1}{D_{i\zeta}} \right) \frac{1}{D_{i\zeta}} - \frac{\partial S}{\partial\tau} \frac{\alpha_l}{D_{i\zeta}^2} \\
\frac{\partial(CT)}{\partial\tau} \frac{k_l}{C_l} &= \frac{\partial}{\partial X} \left(k \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(kR \frac{\partial T}{\partial R} \right) - \frac{\partial S}{\partial\tau} \alpha_l \\
\frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau} &= \frac{\partial}{\partial X} \left(k^* \frac{\partial\theta}{\partial X} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(Rk^* \frac{\partial\theta}{\partial R} \right) - \frac{\partial S}{\partial\tau} \frac{1}{C_l(T_i - T_m)}
\end{aligned} \tag{3.93}$$

FDM bölgesi için enerji dengesi boyutsuz olarak yazılacak olursa,

$$\frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left(k^* \frac{\partial\theta}{\partial X} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(Rk^* \frac{\partial\theta}{\partial R} \right) - \frac{\partial S^*}{\partial\tau} \tag{3.94}$$

Eşitlik 3.94 elde edilir. Eşitlikteki C^* , S^* ve k^* değerleri, Eşitlik 42 ile Eşitlik 44'teki gibidir.

3.4.3 Korunum Denklemlerinin Ayrıştırılması

Matematiksel modeli Şekil 3.14'te verilen problemin korunum denklemlerinin ayrıştırılabilmesi için problemin başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir.

Başlangıç koşulu: ($\tau = 0$)

$$\theta = \theta_i = 1 \qquad 0 \leq R \leq 1 \quad \text{ve} \quad 0 \leq X \leq l^* \tag{3.95a}$$

Sınır koşulları: ($\tau > 0$)

$$k^* \frac{d\theta}{dR} = k_y^* \frac{\theta_{kovan} - \theta_{yüzey}}{\delta R_{yalitim}} \quad R = R_{kovan} \quad \text{ve} \quad 0 \leq X \leq l^* \quad (3.95b)$$

$$\frac{d\theta}{dX} = 0 \quad R_{iç} \leq R \leq R_d \quad \text{ve} \quad X = 0 \quad (3.95c)$$

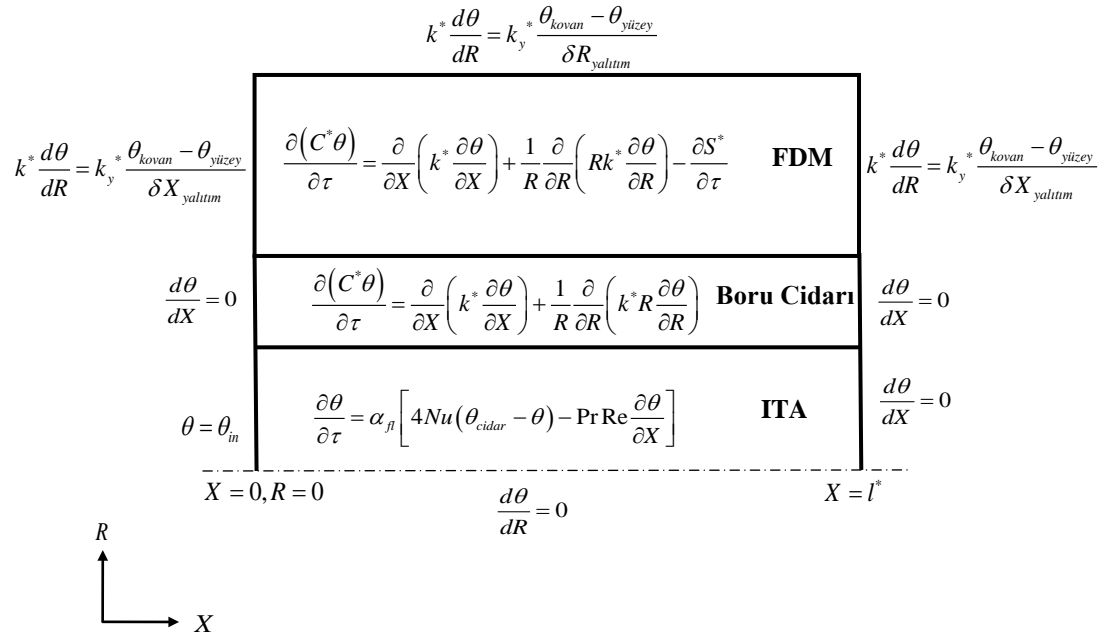
$$k^* \frac{d\theta}{dR} = k_y^* \frac{\theta_{kovan} - \theta_{yüzey}}{\delta X_{yalitim}} \quad R_d \leq R \leq R \quad \text{ve} \quad X = 0 \quad (3.95d)$$

$$\theta = \theta_{giriş} \quad 0 \leq R \leq R_{iç} \quad \text{ve} \quad X = 0 \quad (3.95e)$$

$$k^* \frac{d\theta}{dR} = k_y^* \frac{\theta_{kovan} - \theta_{yüzey}}{\delta X_{yalitim}} \quad R_d \leq R \leq R \quad \text{ve} \quad X = l^* \quad (3.95f)$$

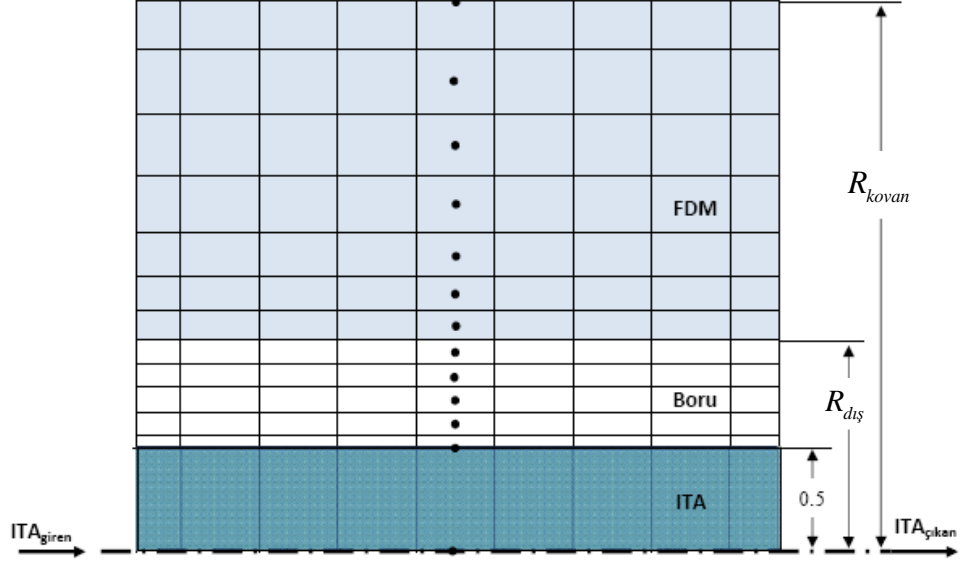
$$\frac{d\theta}{dX} = 0 \quad 0 \leq R \leq R_{dış} \quad \text{ve} \quad X = l^* \quad (3.95g)$$

Sayısal modelde, sistemin, tüm elemanları için korunum denklemlerinin boyutsuz halleri ile sınır koşulları Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17 Matematiksel modelin korunum denklemleri ve sınır koşulları

Sayısal model oluşturulurken sistem, Şekil 3.18’de görüldüğü gibi sonlu hacimlere ayrılmıştır. Sonlu hacimlerin yapısı dikkate alınarak, sistem elemanları için elde edilen korunum denklemleri sonlu hacimlerde ayrıştırılır.



Şekil 3.18 Sistemin sonlu hacimlere bölünmüş halinin gösterimi

3.4.3.1 ITA Bölgesi İçin Korunum Denkleminin Ayrıştırılması

Isı transfer akışkanı bölgesi için enerjinin korunumu denklemlerinin ayrıştırılması, boyutsuz korunum denklemini ifade eden Eşitlik 3.89’un kontrol hacmi boyunca integre edilmesiyle gerçekleştirilir.

$$\int_{\forall \tau} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau d\forall = \alpha_{fl} \left[\int_{\tau} \int_{\forall} 4Nu(\theta_{cidar} - \theta) d\forall d\tau - \int_{\forall \tau} Pr Re \frac{\partial \theta}{\partial X} d\forall d\tau \right]$$

$$\frac{\theta_p - \theta_p^0}{\Delta \tau} = \alpha_{fl} \left[4Nu(\theta_N - \theta_p) - Pe \frac{\theta_e - \theta_w}{\Delta X_p} \right] \quad (3.96)$$

Kontrol hacmi yüzeylerinde sıcaklık tanımlanmadığından dolayı, yüzeylerdeki sıcaklık, upwind ayrıştırma şeması kullanılarak bulunmuştur. Upwind ayrıştırma şemasına göre, kontrol hacmi yüzeylerindeki sıcaklık olarak, önceki kontrol hacminin merkez sıcaklığı kabul edilmektedir. (Versteeg ve Malalasekera, 1995)

$$\theta_w = \theta_w \text{ ve } \theta_e = \theta_p \quad (3.97)$$

Bu eşitliklerden yararlanılarak, ayrıştırılmış boyutsuz korunum denklemi yeniden düzenlenirse,

$$\frac{\theta_p - \theta_p^0}{\Delta\tau} = \alpha_{fl} \left[4Nu(\theta_N - \theta_p) - Pe \frac{\theta_p - \theta_w}{\Delta X_p} \right] \quad (3.98)$$

elde edilir. Ayrıştırılmış olan ITA'nın korunum denklemi genel matris formunda yazılabilir,

$$a_p \theta_p = a_E \theta_E + a_W \theta_W + a_N \theta_N + a_S \theta_S + b \quad (3.99)$$

Buna göre, denklem katsayıları aşağıdaki gibidir.

$$a_E = 0 \quad (3.99a)$$

$$a_W = \frac{\alpha_{fl} Pe}{\Delta X_p} \quad (3.99b)$$

$$a_N = 4\alpha_{fl} Nu \quad (3.99c)$$

$$a_S = 0 \quad (3.99d)$$

$$a_p^0 = \frac{1}{\Delta\tau} \quad (3.99e)$$

$$a_p^1 = \frac{1}{\Delta\tau} \quad (3.99f)$$

$$b = a_p^0 \theta_p^0 \quad (3.99g)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^1 \quad (3.99h)$$

İlk düğüm noktasının sıcaklığı bilindiğinden dolayı Eşitlik 3.99'un ilk düğüm noktası için çözülmesine gerek yoktur.

$$\theta_p = \theta_{in} \quad (3.100)$$

3.4.3.2 Boru Cidarı Bölgesi İçin Korunum Denklemine Ayrıştırılması

Boru için boyutsuz korunum denklemini ifade eden Eşitlik 3.92, herhangi bir iç kontrol hacmi için kontrol hacim boyunca integre edilerek aşağıda gösterildiği şekilde ayrıştırma gerçekleştirilir,

$$\int_{w_s}^e \int_{s_w}^n \int_{\tau}^{z+\Delta\tau} \frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau} 2\pi R d\tau dX dR = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{s_w}^e \frac{\partial}{\partial X} \left(k^* \frac{\partial\theta}{\partial X} \right) 2\pi R dX dR d\tau$$

$$+ \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{w_s}^e \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R k^* \frac{\partial\theta}{\partial R} \right) 2\pi R dR dX d\tau$$
(3.101)

$$\frac{(C_P^*\theta_P - C_P^{*0}\theta_P^0)}{\Delta\tau} \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{2} \Delta X_P = \left[k_e^* \frac{\theta_E - \theta_P}{\Delta X_e} - k_w^* \frac{\theta_P - \theta_W}{\Delta X_w} \right] \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{2}$$

$$+ \left[R_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_P}{\Delta R_n} - R_s k_s^* \frac{\theta_P - \theta_S}{\Delta R_s} \right] \Delta X_P$$
(3.102)

Boru cidarında, boyutsuz korunum denkleminin ayrıştırılmış hali olan Eşitlik 3.102 genel olarak ifade edilirse,

$$a_P \theta_P = a_E \theta_E + a_W \theta_W + a_N \theta_N + a_S \theta_S + b$$
(3.103)

Burada herhangi bir iç kontrol hacmi için katsayılar,

$$a_E = k_e^* \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{\Delta X_e}$$
(3.103a)

$$a_W = k_w^* \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{\Delta X_w}$$
(3.103b)

$$a_N = 2k_n^* \frac{R_n \Delta X_P}{\Delta R_n}$$
(3.103c)

$$a_S = 2k_s^* \frac{R_s \Delta X_P}{\Delta R_s}$$
(3.103d)

$$a_P^0 = \frac{C_P^{*0}}{\Delta\tau} (R_n^2 - R_s^2) \Delta X_P$$
(3.103e)

$$a_p^1 = \frac{C_p^*}{\Delta\tau} (R_n^2 - R_s^2) \Delta X_p \quad (3.103f)$$

$$b = a_p^0 \theta_p^0 \quad (3.103g)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^1 \quad (3.103h)$$

olarak elde edilir. Boru cidarı için korunum denklemi $X = 0$ ve $X = l^*$ 'deki düğüm noktaları için Eşitlik 3.95c ve Eşitlik 3.95g'deki sınır koşullarından yararlanılarak ayrıştırılır. Elde edilen ayrıştırılmış denklemin katsayılarının Eşitlik 3.103'tekinden farklı olanları,

$X = 0$ 'daki düğüm noktaları için,

$$a_W = 0 \quad (3.104a)$$

$X = l^*$ 'deki düğüm noktaları için,

$$a_E = 0 \quad (3.104b)$$

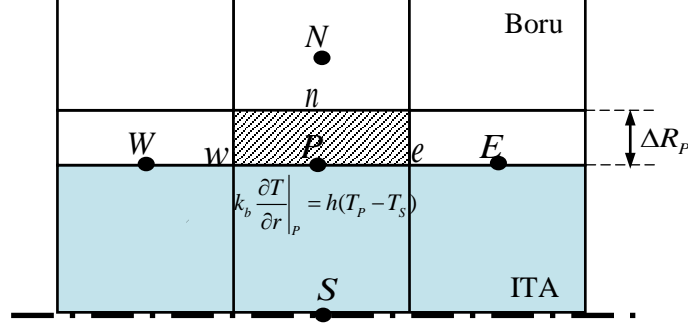
Boru cidarının $R = 0$ 'daki yüzeyinde taşınım olduğundan dolayı, bu yüzeydeki kontrol hacimlerinin ayrıştırılması ile elde edilen a_S katsayısı Eşitlik 3.103'tekinden farklıdır.

Şekil 3.19'da gösterilen kontrol hacmi için enerji dengesinden yola çıkarak, yüzeye taşınım ile olan ısı geçişinin yüzeyden iletimle olan ısı geçişine eşit olduğu kabul edilebilir.

$$k_p \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_p = h(T_p - T_s) \quad (3.105)$$

Eşitlik 3.105 boyutsuz olarak ifade edilirse,

$$k_p^* \frac{\partial \theta}{\partial R} \Big|_P = k_{fl} Nu (\theta_P - \theta_S) \quad (3.106)$$



Şekil 3.19 Borunun iç yüzeyindeki kontrol hacmi

$$k_p \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_P = h(T_P - T_S) \quad (3.105)$$

Eşitlik 3.105 boyutsuz olarak ifade edilirse,

$$k_p^* \frac{\partial \theta}{\partial R} \Big|_P = k_{fl} Nu (\theta_P - \theta_S) \quad (3.106)$$

Kontrol hacmin yarım olmasından dolayı P ile s noktaları çakışık durumda olduğundan k_p ile k_s 'nin değerleri aynıdır. Bu durum göz önüne alınırsa enerji dengesi,

$$k_s^* \frac{\theta_P - \theta_S}{\Delta R_s} = k_{fl} Nu (\theta_P - \theta_S) \quad (3.107)$$

olarak yazılabilir. Eşitlik 3.107 göz önüne alınarak, Şekil 3.19'daki kontrol hacminin ayrıştırılmış korunum denklemlerinin a_s katsayısı yazılırsa aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$a_s = 2k_{fl} Nu R_p \Delta X_p \quad (3.108)$$

3.4.3.3 FDM Bölgesi İçin Korunum Denkleminin Ayırıştırılması

FDM için elde edilmiş olan boyutsuz korunum denklemini ifade eden Eşitlik 3.94'ü, ayırştırmak için, herhangi bir iç kontrol hacmi, hacimsel olarak integre edilebilir.

$$\begin{aligned} \int_w^e \int_s^n \int_\tau^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial(C^*\theta)}{\partial\tau} 2\pi R d\tau dXdR &= \int_\tau^{\tau+\Delta\tau} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial X} \left(k^* \frac{\partial\theta}{\partial X} \right) 2\pi R dXdR d\tau \\ &+ \int_\tau^{\tau+\Delta\tau} \int_w^s \int_s^n \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(Rk^* \frac{\partial\theta}{\partial R} \right) 2\pi R dR dXd\tau \\ &+ \int_w^e \int_s^n \int_\tau^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial S^*}{\partial\tau} 2\pi R d\tau dXdR \end{aligned} \quad (3.109)$$

$$\begin{aligned} \frac{(C_P^*\theta_P - C_P^{*0}\theta_P^0)(R_n^2 - R_s^2)}{\Delta\tau} \Delta X_P &= \left[k_e^* \frac{\theta_E - \theta_P}{\Delta X_e} - k_w^* \frac{\theta_P - \theta_W}{\Delta X_w} \right] \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{2} \\ &+ \left[R_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_P}{\Delta R_n} - R_s k_s^* \frac{\theta_P - \theta_S}{\Delta R_s} \right] \Delta X_P \\ &+ \frac{(S_P^* - S_P^{*0})(R_n^2 - R_s^2)}{\Delta\tau} \Delta X_P \end{aligned} \quad (3.110)$$

FDM'de, boyutsuz korunum denkleminin ayırştırılmış hali olan Eşitlik 3.110 genel olarak ifade edilirse,

$$a_P \theta_P = a_E \theta_E + a_W \theta_W + a_N \theta_N + a_S \theta_S + b \quad (3.111)$$

Burada herhangi bir iç kontrol hacmi için katsayılar,

$$a_E = k_e^* \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{\Delta X_e} \quad (3.111a)$$

$$a_W = k_w^* \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{\Delta X_w} \quad (3.111b)$$

$$a_N = 2k_n^* \frac{R_n \Delta X_P}{\Delta R_n} \quad (3.111c)$$

$$a_s = 2k_s^* \frac{R_s \Delta X_P}{\Delta R_s} \quad (3.111d)$$

$$a_p^0 = C_p^{*0} \frac{(R_n^2 - R_s^2) \Delta X_P}{\Delta \tau} \quad (3.111e)$$

$$a_p^1 = C_p^* \frac{(R_n^2 - R_s^2) \Delta X_P}{\Delta \tau} \quad (3.111f)$$

$$b = a_p^0 \theta_p^0 + (S_p^* - S_p^{*0}) \frac{(R_n^2 - R_s^2) \Delta X_P}{\Delta \tau} \quad (3.111g)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_s + a_p^1 \quad (3.111h)$$

Eşitlik 3.111'deki a_N , a_p katsayıları ve b sabiti, Eşitlik 3.95b'de tanımlanan sınır koşulundan dolayı, FDM'nin kovanın silindirik yüzeyine komşu olan kontrol hacimler için farklıdır.

$$k^* \frac{d\theta}{dR} \Big|_{R=R_{kovan}} = k_{yl} \frac{\theta_{kovan} - \theta_{yüzey}}{\delta X_{yalitim}} \quad (3.112)$$

$$k_n^* \frac{\theta_N - \theta_P}{\Delta R_{n\ utum}} = k_{yl} \frac{\theta_{yüzey} - \theta_P}{\delta X_{yal}} \quad (3.112)$$

Eşitlik 3.111'e göre Eşitlik 3.110 yeniden düzenlenerek,

$$\begin{aligned} \frac{(C_p^* \theta_p - C_p^{*0} \theta_p^0) (R_n^2 - R_s^2)}{\Delta \tau} \Delta X_P = & \left[k_e^* \frac{\theta_E - \theta_P}{\Delta X_e} - k_w^* \frac{\theta_P - \theta_W}{\Delta X_w} \right] \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{2} \\ & + \left[R_n k_{yl} \frac{\theta_{yüzey} - \theta_P}{\delta X_{yalitim}} - R_s k_s^* \frac{\theta_P - \theta_S}{\Delta R_s} \right] \Delta X_P \\ & + \frac{(S_p^* - S_p^{*0}) (R_n^2 - R_s^2)}{\Delta \tau} \Delta X_P \end{aligned} \quad (3.113)$$

elde edilen Eşitlik 3.113 göz önüne alınarak değişen katsayılar ifade edilir.

$$a_N = 0 \quad (3.114a)$$

$$b = a_p^0 \theta_p^0 + (S_p^* - S_p^{*0}) \frac{(R_n^2 - R_s^2) \Delta X_P}{\Delta \tau} + R_n k_{yl} \frac{\theta_{yüzey}}{\delta R_{yalıtım}} \Delta X_P \quad (3.114b)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^1 + R_n k_{yl} \frac{1}{\delta R_{yalıtım}} \Delta X_P \quad (3.114c)$$

Eşitlik 3.95d’de tanımlanan sınır koşulu göz önüne alınırsa, Eşitlik 3.111’deki a_W , a_p katsayıları ve b sabiti, FDM’nin sol yan yüzeyine komşu olan kontrol hacimler için farklıdır.

$$k^* \frac{d\theta}{dR} \Big|_{X=0} = k_{yl} \frac{\theta_{kovan} - \theta_{yüzey}}{\delta X_{yalıtım}}$$

$$k_w^* \frac{\theta_P - \theta_W}{\Delta X_{yalıtım}} = k_{yl} \frac{\theta_P - \theta_{yüzey}}{\delta X_{yalıtım}} \quad (3.115)$$

Eşitlik 3.115’e göre Eşitlik 3.110 yeniden ifade edilerek,

$$\begin{aligned} \frac{(C_p^* \theta_p - C_p^{*0} \theta_p^0) (R_n^2 - R_s^2)}{\Delta \tau} \frac{\Delta X_P}{2} &= \left[k_e^* \frac{\theta_E - \theta_P}{\Delta X_{yalıtım}} - k_{yl} \frac{\theta_P - \theta_{yüzey}}{\delta X_{yalıtım}} \right] \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{2} \\ &+ \left[R_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_P}{\Delta R_n} - R_s k_s^* \frac{\theta_P - \theta_S}{\Delta R_s} \right] \Delta X_P \\ &+ \frac{(S_p^* - S_p^{*0}) (R_n^2 - R_s^2)}{\Delta \tau} \frac{\Delta X_P}{2} \end{aligned} \quad (3.116)$$

elde edile Eşitlik 3.116 göz önüne alınarak değişen katsayılar,

$$a_W = 0 \quad (3.117a)$$

$$b = a_p^0 \theta_p^0 + (S_p^* - S_p^{*0}) \frac{(R_n^2 - R_s^2) \Delta X_P}{\Delta \tau} + k_{yl} \frac{\theta_{yüzey}}{\delta X_{yalıtım}} \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{2} \quad (3.117b)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^1 + k_{yl} \frac{1}{\delta X_{yalıtım}} \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{2} \quad (3.117c)$$

olarak yazılabilir. Eşitlik 3.98f’de tanımlanan sınır koşulu göz önüne alınırsa, Eşitlik 3.111’deki a_E , a_P katsayıları ve b sabiti, FDM’nin sol yan yüzeyine komşu olan kontrol hacimler için farklıdır.

$$k^* \frac{d\theta}{dR} = k_{yl} \frac{\theta_{yüzey} - \theta_{kovan}}{\delta X_{yalıtım}}$$

$$k_e^* \frac{\theta_E - \theta_P}{\Delta X_{e\ itum}} = k_{yl} \frac{\theta_{yüzey} - \theta_{kovan}}{\delta X_{yalıtım}} \quad (3.118)$$

Eşitlik 3.118’e göre Eşitlik 3.110 yeniden ifade edilirse,

$$\frac{(C_P^* \theta_P - C_P^{*0} \theta_P^0)}{\Delta \tau} \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{2} \Delta X_P = \left[k_{yl} \frac{\theta_{yüzey} - \theta_{kovan}}{\delta X_{yalıtım}} - k_w^* \frac{\theta_P - \theta_W}{\Delta X_w} \right] \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{2}$$

$$+ \left[R_n k_n^* \frac{\theta_N - \theta_P}{\Delta R_n} - R_s k_s^* \frac{\theta_P - \theta_S}{\Delta R_s} \right] \Delta X_P \quad (3.119)$$

$$+ \frac{(S_P^* - S_P^{*0}) (R_n^2 - R_s^2)}{\Delta \tau} \frac{\Delta X_P}{2}$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik 3.119 göz önüne alınarak değişen katsayılar aşağıdaki gibidir.

$$a_E = 0 \quad (3.120a)$$

$$b = a_P^0 \theta_P^0 + (S_P^* - S_P^{*0}) \frac{(R_n^2 - R_s^2) \Delta X_P}{\Delta \tau} + k_{yl} \frac{\theta_{yüzey}}{\delta X_{yalıtım}} \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{2} \quad (3.120b)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^1 + k_{yl} \frac{1}{\delta X_{yalıtım}} \frac{(R_n^2 - R_s^2)}{2} \quad (3.120c)$$

3.4.3.4 FDM Bölgesi İçin Korunum Denkleminin Ayrıştırılması

Sayısal modelin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla, modelin enerji dengesinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Model için enerji dengesi Eşitlik 3.121’de ifade

edilmiştir.

$$\sum \dot{E}_{akiskan} = \sum \dot{E}_{depolana} - \sum q^*_{kazanç} \quad (3.121)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n \left[\dot{m} c_{p,f} (T_{k\text{giri}}(k\Delta t) - T(k\Delta t)) \right] \Delta t = & \iiint_{\forall} \left[\left\{ \rho(t) c_p(t) (T(t) - T_m) + S(t) \right\} - \right. \\ & \left. \left\{ \rho(0) c_p(0) (T(0) - T_m) + S(0) \right\} \right] 2\pi r dr dx \\ & + \sum_{k=0}^n \left[A_{yalitim} k_y \frac{T_{kovan}(k\Delta t) - T_{yuzey}}{\delta x_{yalitim}} \right] \Delta t \end{aligned} \quad (3.122)$$

Enerji dengesini ifade eden Eşitlik 3.122 boyutsuz hale getirilirse,

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n \left[\text{Pe} \frac{k_{fl}}{4} (\theta_{in}(k\Delta\tau) - \theta_{out}(k\Delta\tau)) \right] \Delta\tau = & \iiint_{\forall} \left[\left\{ C^*(\tau) \theta(\tau) + S^*(\tau) \right\} \right. \\ & \left. - \left\{ C^*(0) \theta(0) + S^*(0) \right\} \right] 2RdRdX \\ & + \sum_{k=0}^n \left[(R_{kovan} L + R_{kovan}^2) k_{yl} \frac{\theta_{kovan}(k\Delta\tau) - \theta_{yuzey}}{\delta X_{yalitim}} \right] 2\Delta\tau \end{aligned} \quad (3.123)$$

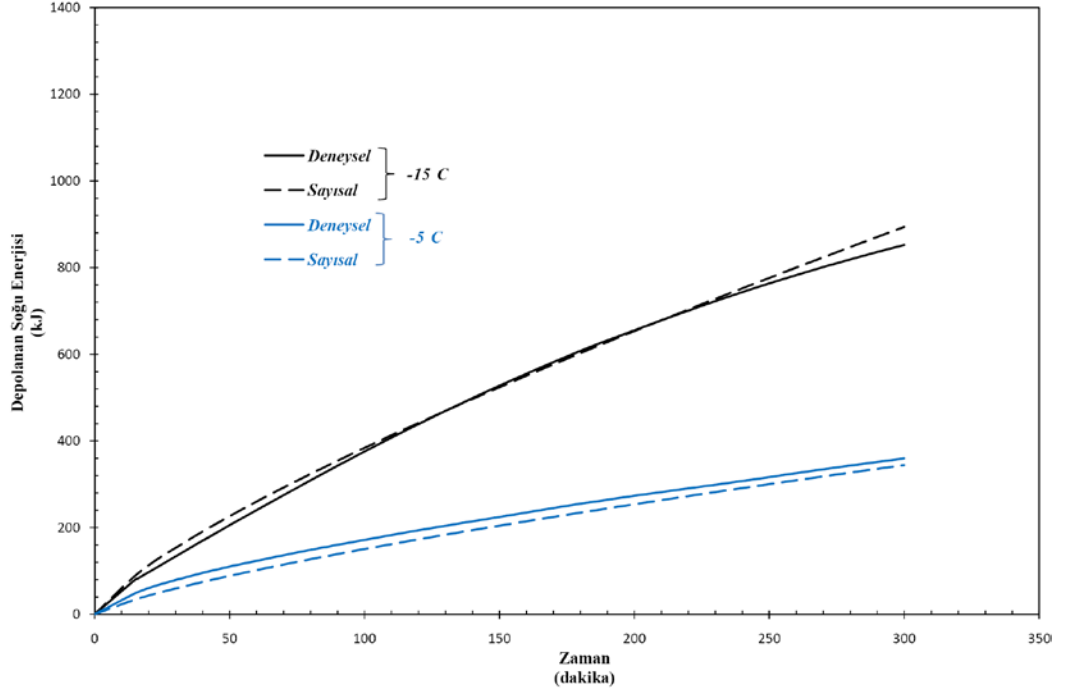
eşitliği elde edilir. Eşitlik 3.122 ve Eşitlik 3.123'teki n sabiti, zaman adımı sayısıdır.

$$\left(n = \frac{t}{\Delta t} \right)$$

3.4.4 Sonuçlar

Boru etrafında bir boyutlu katılma probleminin sayısal modeli doğrulandıktan sonra bir sonraki adıma geçilerek sistem, akışın etkisi de dâhil edilerek, problem iki boyutlu olarak modellenmiştir. Oluşturulan modelde, FDM bölgesi, boru cidarı bölgesi ve akış bölgesi, akış yönünde 50, akışa dik yönde ise sırasıyla 100, 10 ve 1'er adet kontrol hacmine ayrılmış, zaman adımı, 40 s olarak alınmıştır. Sayısal modelin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla, elde edilen sonuçlar, aynı parametreler için deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

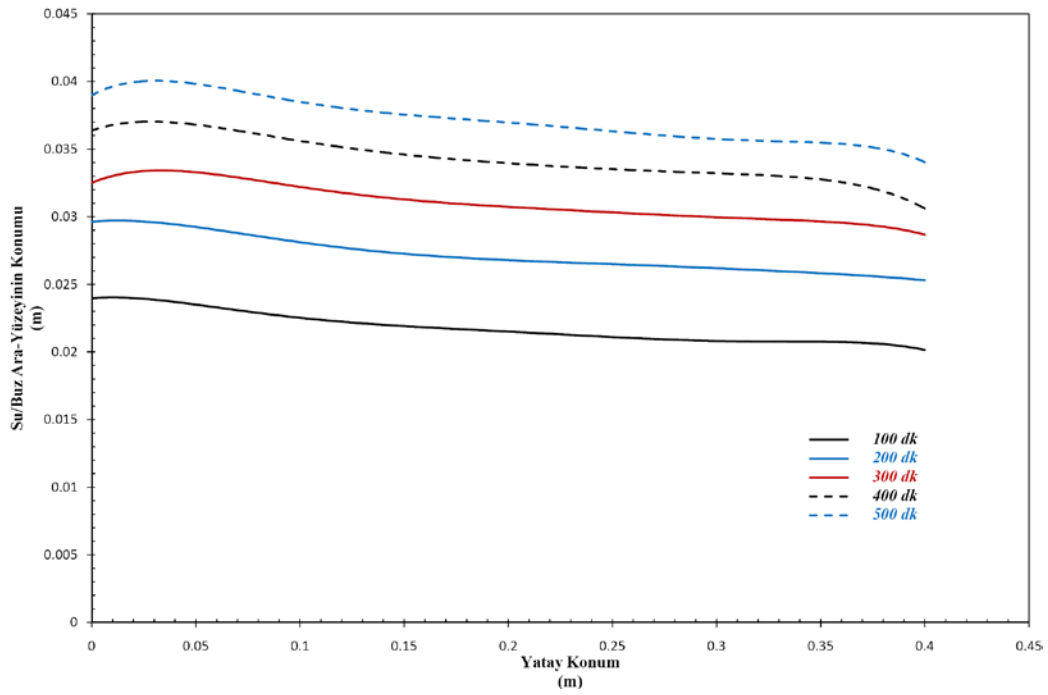
Debinin 4 l/dk, giriş sıcaklığının -5°C ve -10°C , kovan çapının 114 mm, borunun bakır olduğu durumlar için elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Seçilen 2 deney için depolanan soğu enerjisinin zaman göre değişiminin karşılaştırılması Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20 Deneysel ve sayısal yöntemlerle elde edilen depolanan soğu enerjisinin zamana göre değişiminin karşılaştırılması

Depolama periyodunda deneysel olarak, enerji ve ekserji verimine etkileri incelenen parametrelerin, depolanan enerji miktarına etkileri sayısal olarak incelenmiştir.

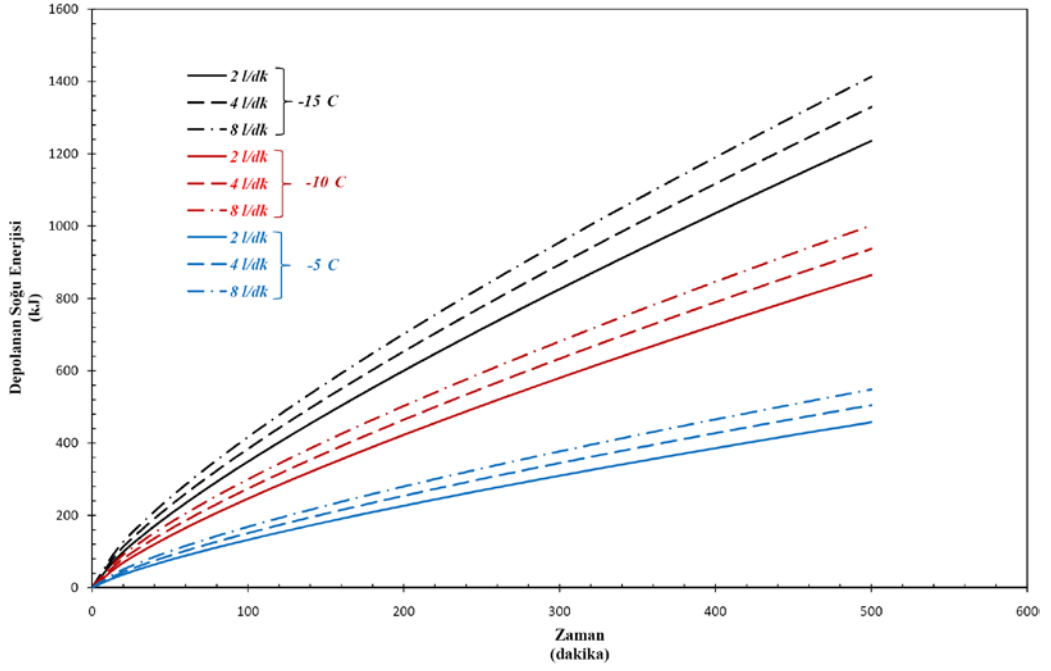
Şekil 3.21’de 4 lt/dk debi için giriş sıcaklığının -10°C olduğu durumda, farklı zamanlar için su/buz ara-yüzeyinin akış yönündeki değişimi gösterilmektedir. Giriş kesitinden çıkış kesitine doğru gittikçe ITA’nın sıcaklığı düştüğünden dolayı, oluşan buz miktarı azalmaktadır. Akış yönünde $x=0\text{ m}$ ve $x=4\text{ m}$ ’de eğrilerin düşüş göstermesi yanal yüzeylerden olan ısı kazancından kaynaklanmaktadır.



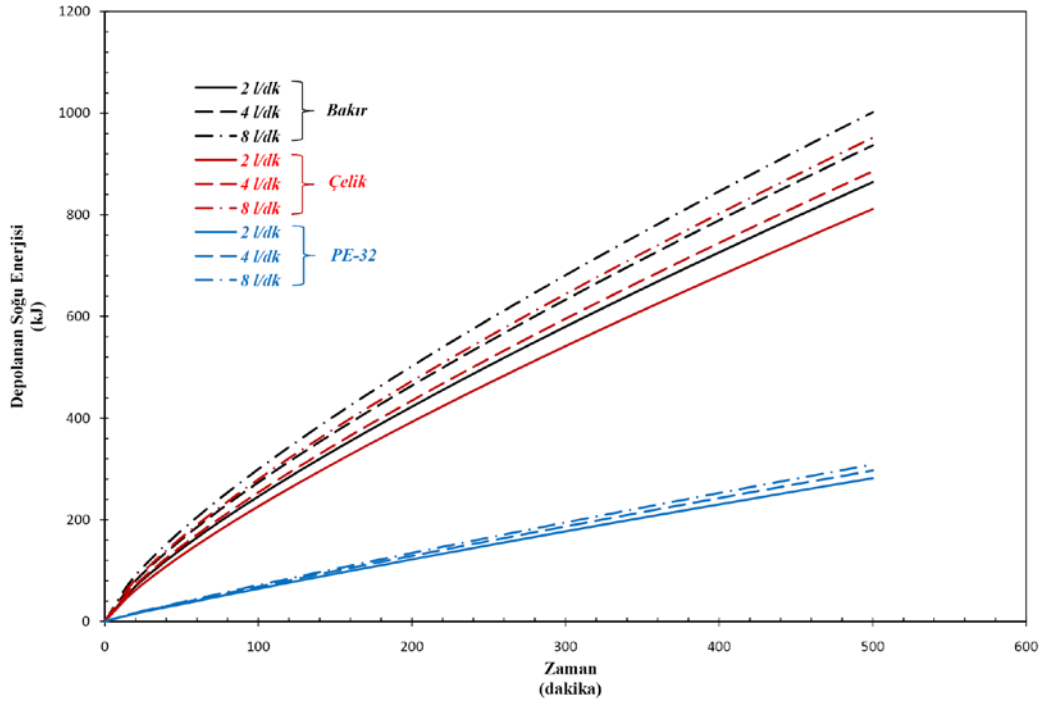
Şekil 3.21 Su/Buz ara-yüzey konumunun akış yönünde değişimi

ITA'nın debisinin ve giriş sıcaklığının depolanan enerji miktarına etkileri, kovan çapının 114 mm olduğu durum için Şekil 3.22'de gösterilmektedir. Beklenildiği gibi, ITA'nın debisinin artması depolanan enerji miktarını arttırmış, sıcaklığının artması ise depolanan enerji miktarını azaltmıştır. Depolanan enerji miktarlarında, giriş sıcaklığı debiye göre daha belirgin rol oynamaktadır. Enerji eğrilerinin eğimleri zaman geçtikçe azalmaktadır, bu azalma boru çevresinde katılaştıran buzun ısı direnci oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3.23'de, kovan çapının 114 mm ve ITA'nın giriş sıcaklığının 10°C olduğu durum için, boru malzemesinin ve ITA'nın debisinin depolanan enerji miktarlarına etkilerinin zamana göre değişimi gösterilmektedir. Boru malzemesinin ısı iletim katsayısının artması depolanan enerji miktarını arttırmıştır. Borunun ısı iletim katsayısının yüksek olduğu durumlarda, ITA'nın debisi daha fazla etkin rol oynamaktadır.

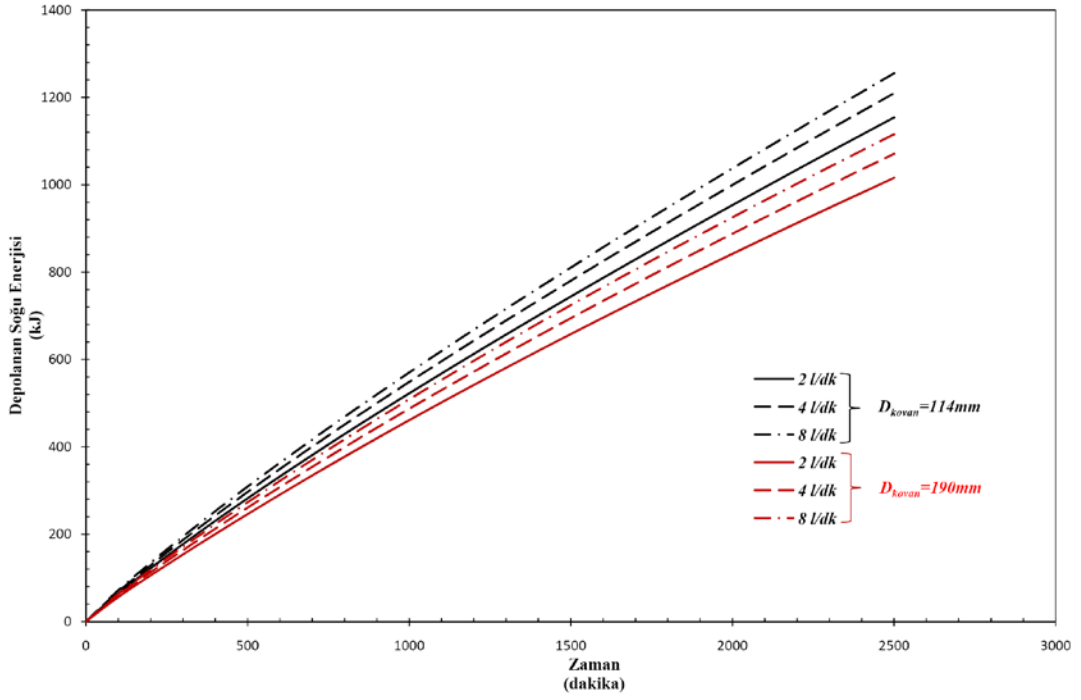


Şekil 3.22 Depolanmış soğuk enerjinin, ITA'nın farklı giriş sıcaklıkları ve debileri için zamana göre değişimi



Şekil 3.23 Depolanmış soğuk enerjinin, farklı ITA debileri ve farklı ısı iletim katsayısına sahip borular için zamana göre değişimi

ITA'nın giriş sıcaklığının 10°C ve borunun PE-32 olduğu durum için, kovan çapının ve ITA'nın debisinin depolanan enerji miktarına etkilerinin zamana göre değişimini, veren eğriler Şekil 3.24'te verilmektedir. Kovan çapının artması, yüzey alanını dolayısıyla ısı kazancını arttırdığından depolanan enerji miktarını azaltmaktadır. Şekildeki eğrilere bakılarak, depolanan enerji miktarında, kovan çapının değişimi, debinin değişiminden daha çok belirleyici olduğu söylenebilir.



Şekil 3.24 Depolanan soğu enerjisinin, farklı ITA debileri ve farklı kovan çapları için zamana göre değişimi

BÖLÜM DÖRT

SONUÇ

Bu çalışmada bir gizli ısı enerji depolama sisteminde çalışma parametrelerinin etkileri depolama ve geri kullanım periyotları için incelenmiştir. Depolama periyodu için hem deneysel hem de sayısal olarak, geri kullanım periyodunda ise sadece deneysel olarak inceleme yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar, kurulan bir boru-kovan tipi gizli ısı enerji depolama sisteminde gerçekleştirilmiştir. Depolama periyodu için kovan çapı ve boru malzemesinin değişimleri ile birlikte ITA'nın farklı giriş sıcaklığı ve debileri için deneyler tekrarlanmıştır. Geri kullanım periyodu için ise sadece ITA'nın değişen giriş sıcaklık ve debisi için deneyler gerçekleştirilmiştir.

Buna göre depolama durumu için elde edilen deneysel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir,

- ITA'nın giriş sıcaklığının düşmesi ve/veya debisinin artmasıyla enerji verimi artmaktadır, ancak giriş sıcaklığının etkisi debiye göre çok daha belirgindir. Debinin etkisi yüksek sıcaklıklarda belirgin olmaktadır. Ekserji verimi açısından ise, ikincil akışkanın giriş sıcaklığının ve debisinin artmasıyla ekserji verimi artmaktadır. Ekserji verimi enerji veriminde olduğu gibi debiden ziyade, giriş sıcaklığının değişmesinden daha çok etkilenmiştir, debinin etkisi yüksek giriş sıcaklıklarında belirginleşmektedir.
- Sistemde kullanılan boru malzemesinin ısı iletim katsayısının artmasıyla enerji ve ekserji verimlerinin de arttığı gözlenmiştir. Kovan çapının artması enerji verimini arttırmakta ancak ekserji verimini düşürmektedir.

Geri kullanım durumu için elde edilen deneysel sonuçlar ise,

- ITA'nın giriş sıcaklığının ve/veya debisinin artmasıyla enerji verimi artmaktadır. Yalnız seçilen parametreler için debinin etkisi giriş sıcaklığının yanında çok düşük kalmaktadır. ITA'nın giriş sıcaklığı ile faz değişim malzemesinin erime sıcaklığı arasındaki farkın artması tersinmezliği arttırdığından dolayı giriş sıcaklığının artmasıyla ekserji verimi düşmektedir. Ayrıca seçilen parametreler için debinin ekserji verimi üzerine belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

DeneySEL çalışmanın yanında, kullanılan sayısal model yardımıyla depolanan enerji değişimleri parametrik olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma kapsamında üç farklı model ele alınmıştır. Öncelikle, sabit ısı akısına sahip silindirik koordinatlarda bir boyutlu faz değişim problemi modellenmiş, daha sonra, borunun etkisi de göz önüne alınarak, problem yine silindirik koordinatlarda bir boyutlu olarak modellenmiştir. Bu modellerden elde edilen sayısal sonuçların analitik sonuçlarla analitik sonuçlarla doğrulanması yapıldıktan sonra, FDM, boru malzemesi ve ITA'dan oluşan sistemin iki boyutlu analizi gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan sayısal modellerin doğruluğu için öncelikle kod içi enerji dengesinin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tek boyutlu modellerde enerji dengesi için fark, %0,1 ile %0,001 arasında, iki boyutlu modelde ise bu fark, %1 ile %0,01 arasında oluşmaktadır. Enerji dengesi kontrolünün yanı sıra, elde edilen sayısal sonuçlar analitik veya deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tek boyutlu model için sayısal sonuçların doğruluğu, analitik yöntemle elde edilen sıcaklık dağılımlarının ve katı/sıvı ara-yüzey değişimlerinin karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Buna göre, ara-yüzey değişimleri için, iki yöntem arasındaki ortalama fark yaklaşık %4 olarak bulunmuştur. Sayısal model oluşturulurken yapılan sadeleştirmeler ve FDM bölgesindeki doğal taşınımın ihmal edilmesi oluşan bu farkın nedenleri olabilir. İki boyutlu modelin sonuçları ise deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve depolanan toplam enerji miktarları arasında %5'lik bir fark bulunmuştur. Model oluşturulurken yapılan sadeleştirmelerin ve kabullerin yanı sıra deneysel çalışmalardaki belirsizliklerin bu farka neden olduğu söylenebilir.

Deney düzeneğine eşdeğer iki boyutlu sayısal modelde, kovan çapının, boru malzemesinin, ITA'nın debisinin ve giriş sıcaklığının depolanan enerji miktarına etkileri ve oluşan buz profili incelenmiştir. ITA'nın, debisinin artması ve giriş sıcaklığının azalması ile depolanan enerji miktarı artmaktadır. Ayrıca, kullanılan borunun ısı iletim katsayısının artması ve kovan çapının azalması depolanan enerji miktarını arttırmıştır.

KAYNAKÇA

- Abhat A. (1979). Experimentation with a prototype latent heat thermal energy storage system. *International Solar Energy Congress USA* .
- Agyenim, F., Eames, P. ve Smyth, M. (2009). A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins. *Solar Energy*, 83, 1509-1520.
- ASHRAE, (1997). *Physical Properties of Secondary Coolants (Brines)*, Fundamentals. Chapter 20.
- ASHRAE, (1999). *Thermal Storage*. HVAC Applications. Chapter 33.
- Baker, J. (2008). New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy*, 36, 4368-4373.
- Cao, Y. ve Faghri, A. (1990). A numerical analysis of phase-change problem including natural convection. *ASME Journal of Heat Transfer*, 112 (3), 812-816
- Chapra, S.C. ve Canale, R.P. (2004). *Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler* (4). (H. Heperkan ve U. Kesgin, Çev.). İstanbul: Literatür Yayınları. (Orijinal çalışma basım tarihi 2002)
- Crıstenson, M.S. ve Incropera, F.P. (1989). Experiments on solidification of aqueous sodium carbonate solution in a horizontal cylindrical annulus. *Transaction of ASME*, 111, 998-1005.
- Diğer, I. ve Rosen, M.A. (2002). *Thermal energy storage systems and applications*, London: John Wiley & Sons.

- Eckert, E.R.G., Goldenstein, R.J., Ibele, W.E. ve Patankar, S.V. (1997). Heat transfer-a review of 1994 literature. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40, 3729-3804.
- Erek, A. (1999). *Phase change around finned horizontal cylinder: a conjugate problem*. PhD thesis. İzmir: Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University.
- Erek, A. ve Dinçer, İ. (2008). An approach to entropy analysis of latent heat storage module. *Int. J. Thermal. Sciences*, 47, 1077-1085.
- Erek, A. ve Ezan M.A. (2007). Experimental and numerical study on charging processes of an ice-on-coil thermal energy storage system. *Int. J. Energy Research*, 31, 158-176.
- Erek, A., İlken, Z. ve Acar, M.A. (2005). Experimental and numerical investigation of thermal energy storage with a finned tube. *Int J. Energy Research*, 29, 283-301.
- Farid, M.M., Khudhai, A.M., Razack, S.A.K ve Al-Hallaj, S. (2005). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45, 1597-1615.
- Habebullah, B.A. (2007). An experimental study on ice formation around horizontal long tubes. *Int. J. Refrigeration*, 30, 789-797.
- Ho, C.J. ve Chen, S. (1986). Numerical simulation of melting of ice around a horizontal cylinder. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 29, 1359-1369
- Ismail, K.A.R. ve Silva, M.G.E. (2003a). Melting of PCM around horizontal cylinder with constant surface temperature, *Int. J. Thermal Sciences*, 29, 1359-1369.

- Ismail, K.A.R. ve Silva, M.G.E. (2003b). Numerical solution of the phase change problem around a horizontal cylinder in the presence of natural convection in the melt region. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 1791-1799.
- Kakaç, S., Aug, W. ve Viskanta, R. (1985). *Natural Convection: Fundamentals and Applications*. Washington D.C.: Hemisphere
- Kays, W.M. ve Crawford, M.E. (1980). *Convective Heat and Mass Transfer*. New York: McGraw-Hill.
- Khodadi, J.M. ve Zhang, Y. (2001). Effects of buoyancy-driven convection on melting within spherical containers. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44, 1605-1618.
- Koca, A., Oztop, H.F., Koyun, T. ve Varol, T. (2008). Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector. *Renewable Energy*, 33, 567-574.
- Lacroix M. (1993). Numerical simulation of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit. *Solar Energy*, 50, 357-367.
- MacPhee, D., Dinçer, İ. (2009a). Thermal modeling of a packed bed thermal energy storage system during charging. *Applied Thermal Engineering*, 29, 695-705.
- MacPhee, D., Dinçer, İ. (2009b). Heat transfer and thermodynamic analyses of some typical encapsulated ice geometries during discharging process. *Journal of Heat Transfer*, 131, 082301-1
- Medrona, M., Yilmaz, M.O., Nogués, M., Martorell, I., Roca, J. ve Cabeza, L.F. (2009). Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage system. *Applied Energy*, 86, 2047-2055,
- Öztürk H. (2008). *Isı depolama tekniği*. Ankara: Teknik Yayınevi.

Özışık, M.N. (1980). *Heat Conduction*. New York: Wiley.

Patankar, S.V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. NY: McGraw-Hill.

Rosen M. A., Pedinelli N. ve Dinçer İ. (1999). Exergy and energy analyses of cold thermal storage systems. *International Journal of Energy Research*, 23, 1029–1038.

Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R. ve Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage whit phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318-345.

Tan, F.L., Hosseinizadeh, S.F., Khodadadi, J.M. ve Fan, L. (2009). Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 52, 3464-3472.

Trp, A., Lenic, K. ve Frankovic, B. (2006). Analysis of the influence of operating conditions and geometric parameters on heat transfer in water-paraffin shell-and-tube latent thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*, 26, 1830-1839.

Versteeg, H.K. ve Malalasekera W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method*. London: Prentice Hall.

Webb, B.W., Moallemi, M.K. ve Viskanta, R. (1987). Experiments on melting of unfixed ice in a horizontal cylindrical capsule. *ASME J. Heat Transfer*, 109, 454-459.

Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F. ve Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage whit phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 251-283.

Zhang, Y ve Faghri, A. (1996). Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using the internally finned tube. *Heat Mass Transfer*, 39 (15), 3165-3173.

EK – A.

FAZ DEĞİŞİM PROBLEMİ İÇİN BİLGİSAYAR PROGRAM KODU

Option Explicit

'----- Boyutsuz Parametreler -----'

Dim Csl As Double, Cwl As Double, Cfl As Double, Ksl As Double, Kwl As Double, Kfl As Double
 Dim Ste As Double, Re As Double, Pr As Double, Pe As Double, Kyl
 Dim dTeta_mushy As Double, Teta_in As Double, Teta_yuzey As Double, alfa_fl As Double
 Dim dz As Double, Rinf As Double, Ro As Double, Ri As Double, L As Double, dXyalitim

'----- Girilen Parametreler -----'

Dim k_solid As Double, k_liquid As Double, k_wall As Double, k_fluid As Double, k_yalitim
 Dim c_solid As Double, c_liquid As Double, c_wall As Double, c_fluid As Double
 Dim p_solid As Double, p_liquid As Double, p_wall As Double, p_fluid As Double, Viskozite
 AsDouble
 Dim deltaH As Double, Ti As Double, Tinlet As Double, Tm As Double, dT_mushy As Double,
 T_yuzey As Double
 Dim rahatlamasabiti As Double, r_kovan As Double, r_borudis As Double, r_boruic As Double,
 uzunluk As Double
 Dim n As Double, n_boru As Double, n_fdm As Double, m As Double, dx_yalitim
 Dim zaman As Double, dzaman As Double, YakinsamaK As Double, ddR As Double, Debi As
 Double

'----- Yardimci Parametreler -----'

Dim anahtar As Double, dR_1 As Double, dR_Toplam As Double
 Dim time As Double, i As Double, j As Double, ik As Double, iik As Double, ki As Double, kj As
 Double, kk As Double
 Dim Nu_ToplamX As Double, Nu_ToplamX2 As Double, Nu_ToplamY As Double,
 Nu_ToplamXY As Double
 Dim Nu_KatsayiA As Double, Nu_KatsayiB As Double, Nu_Pay As Double, Nu_Payda As Double
 Dim Nu_Ustterim As Double, Nu_Altterim As Double, Nu_DeltaT As Double, Nu_F As Double,
 Nu_Xon As Double
 Dim Enerji_i As Double

'----- Matrisler -----'

Dim Q(), Qgain(), NU(), NuLamda2(), NuGn()
 Dim T(), T0(), T1(), T2(), Tkontrol()
 Dim AP_T2(), AE_T2(), AW_T2(), AN_T2(), AS_T2(), AP0_T2(), AP1_T2(), b()
 Dim e(), f(), g(), r(), x()
 Dim S0(), S1(), S(), C0(), C1(), C(), K0(), K1(), k(), Kh_n(), Kh_e()
 Dim Enerji_t(), interface(), dRP(), RP(), XP(), dXP()

Private Sub Form_Load()

k_solid = 2.2: k_liquid = 0.567: k_wall = 400: k_fluid = 0.383: k_yalitim = 0.05
 c_solid = 2040: c_liquid = 4210: c_wall = 385: c_fluid = 3367
 p_solid = 916.8: p_liquid = 999.8: p_wall = 8933: p_fluid = 1069.63: Viskozite = 0.00906
 deltaH = 333400: Ti = 274: Tinlet = 263: Tm = 273: dT_mushy = 0.2: T_yuzey = 285
 r_kovan = 0.072: r_borudis = 0.0125: r_boruic = 0.0075: uzunluk = 0.4: dx_yalitim = 0.04
 rahatlamasabiti = 0.1: zaman = 2000: dzaman = 50: n_boru = 10: n_fdm = 100: m = 50
 YakinsamaK = 0.00000001: ddR = 1.05: Debi = 4

```

' ***Debi litre/dakika olarak girilmektedir kg/s donusturlur***
Debi = Debi * p_fluid / (60 * 10 ^ 3)
Rinf = r_kovan / (2 * r_boruic)
Ro = r_borudis / (2 * r_boruic)
Ri = 0.5
L = uzunluk / (2 * r_boruic)
dXyalitim = dx_yalitim / (2 * r_boruic)
Csl = (c_solid * p_solid) / (c_liquid * p_liquid)
Cwl = (c_wall * p_wall) / (c_liquid * p_liquid)
Cfl = (c_fluid * p_fluid) / (c_liquid * p_liquid)
Ksl = k_solid / k_liquid
Kwl = k_wall / k_liquid
Kfl = k_fluid / k_liquid
Kyl = k_yalitim / k_liquid
alfa_fl = Kfl / Cfl
dTeta_mushy = dT_mushy / (Ti - Tm)
Teta_in = (Tinlet - Tm) / (Ti - Tm)
Teta_yuzey = (T_yuzey - Tm) / (Ti - Tm)
dz = dzaman * (k_liquid / (p_liquid * c_liquid)) / (2 * r_boruic) ^ 2
n = n_boru + n_fdm + 1
Ste = c_liquid * p_liquid * (Ti - Tm) / (p_solid * deltaH)
Re = 2 * Debi / (3.14 * Viskozite * r_boruic)
Pr = Viskozite * c_fluid / k_fluid
Pe = Re * Pr
ReDim T(m, n), T0(m, n), T1(m, n), T2(m, n), Tkontrol(m, n)
ReDim S(m, n), S0(m, n), S1(m, n)
ReDim C(m, n), C0(m, n), C1(m, n)
ReDim k(m, n), K0(m, n), K1(m, n), Kh_e(m, n), Kh_n(m, n)
ReDim AP_T2(m, n), AE_T2(m, n), AW_T2(m, n), AN_T2(m, n), AS_T2(m, n), AP0_T2(m, n),
      AP1_T2(m, n), b(m, n)
ReDim RP(n), dRP(n + 1), XP(m), dXP(m), NU(m), interface(m)
ReDim e(n), f(n), g(n), r(n), x(n)
ReDim NU(m), NuLamda2(1000), NuGn(1000)

Open "c:\Sicaklik_dt50_n200_m50_t2000_iter20_.txt" For Output As 1
Open "c:\Interface_dt50_n200_m50_t2000_iter20.txt" For Output As 2
Open "c:\Enerji_dt50_n200_m50_t2000_iter20.txt" For Output As 3

dRP(1) = Ri
dRP(2) = (Ro - Ri) / (2 * n_boru - 1)
For i = 3 To n_boru + 1
  dRP(i) = dRP(2) * 2
Next i
dR_Toplam = 0
For i = 1 To n_fdm - 1
  dR_Toplam = dR_Toplam + ddR ^ (i - 1)
Next i
dR_Toplam = dR_Toplam + ddR ^ (n_fdm - 1) / 2
dR_1 = (Rinf - Ro) / dR_Toplam
dRP(n_boru + 2) = dR_1
For i = 2 To n_fdm - 1
  dRP(n_boru + i + 1) = dR_1 * ddR ^ (i - 1)
Next i
dRP(n) = (dR_1 * ddR ^ (n_fdm - 1)) / 2
RP(1) = 0
RP(2) = RP(1) + dRP(1)
RP(3) = RP(2) + dRP(2) + dRP(3) / 2

```

```

For i = 3 To n - 2
  RP(i + 1) = RP(i) + (dRP(i) + dRP(i + 1)) / 2
Next i
RP(n) = RP(n - 1) + dRP(n - 1) / 2 + dRP(n)
dXP(1) = L / (2 * (m - 1))
XP(1) = 0
For i = 2 To m - 1
  dXP(i) = L / (m - 1)
  XP(i) = XP(i - 1) + dXP(i)
Next i
dXP(m) = L / (2 * (m - 1))
XP(m) = XP(m - 1) + dXP(m)
For j = 1 To n
  Print #1, dRP(j),
Next j
Print #1,
For j = 1 To n
  Print #1, RP(j),
Next j
Print #1,
For i = 1 To m
  Print #1, dXP(i),
Next i
Print #1,
For i = 1 To m
  Print #1, XP(i),
Next i
Print #1,
For j = 1 To n
  For i = 1 To m
    T0(i, j) = 1
  Next i
Next j
time = zaman / dzaman
ReDim Q(time), Qgain(time), Enerji_t(time)
Call Hesapla_K_C_S(T0(), K0(), C0(), S0())
Enerji_i = 0
Q(0) = 0
Qgain(0) = 0
For j = 1 To n
  For i = 1 To m
    If j < 3 Then
      Enerji_i = Enerji_i + (C0(i, j) * T0(i, j) + S0(i, j)) * 2 * (RP(j) + dRP(j) / 2) * dRP(j) * dXP(i)
    End If
    If j > 2 And j < n Then
      Enerji_i = Enerji_i + (C0(i, j) * T0(i, j) + S0(i, j)) * 2 * RP(j) * dRP(j) * dXP(i)
    End If
    If j = n Then
      Enerji_i = Enerji_i + (C0(i, j) * T0(i, j) + S0(i, j)) * 2 * (RP(j) - dRP(j) / 2) * dRP(j) * dXP(i)
    End If
  Next i
Next j
For i = 1 To m
  interface(i) = 0
Next i
Enerji_t(0) = Enerji_i

```

```

For kk = 1 To time
  Call Hesapla_K_C_S(T0(), K0(), C0(), S0())
  For j = 1 To n
    For i = 1 To m
      T1(i, j) = T0(i, j)
      T2(i, j) = T1(i, j)
    Next i
  Next j
  Call Nusset(Re, Pr, Pe, m, T1(), XP(), NU())
  Do
    Call Hesapla_K_C_S(T1(), K1(), C1(), S1())
    For i = 1 To m
      Kh_n(i, 1) = Kwl
      For j = 2 To n - 1
        Kh_n(i, j) = Log(RP(j + 1) / RP(j)) / (Log((RP(j) + dRP(j) / 2) / RP(j)) / K1(i, j) + Log(RP(j)
          + 1) / (RP(j) + dRP(j) / 2)) / K1(i, j + 1))
      Next j
    Next i
    For i = 1 To m - 1
      Kh_e(i, 1) = Kfl
      Kh_e(i, 2) = Kwl
      For j = 3 To n
        Kh_e(i, j) = 2 * K1(i, j) * K1(i + 1, j) / (K1(i, j) + K1(i + 1, j))
      Next j
    Next i
    Katsayilar_T2
    Hesapla_T2
    Kontrol
  Loop Until anahtar <= YakinsamaK

  Q(kk) = Q(kk - 1) + Pe * Kfl * (T1(1, 1) - T1(m, 1)) * dz / 4
  Qgain(kk) = Qgain(kk - 1)
  For j = n_boru + 1 To n
    Qgain(kk) = Qgain(kk) + RP(j) * dRP(j) * Kyl * (Teta_yuzey - T1(1, j)) * 2 * dz / dXyalitim
    Qgain(kk) = Qgain(kk) + RP(j) * dRP(j) * Kyl * (Teta_yuzey - T1(m, j)) * 2 * dz / dXyalitim
  Next j
  For i = 1 To m
    Qgain(kk) = Qgain(kk) + RP(n) * dXP(i) * Kyl * (Teta_yuzey - T1(i, n)) * 2 * dz / dXyalitim
  Next i
  For j = 1 To n
    For i = 1 To m
      If j < 3 Then
        Enerji_t(kk) = Enerji_t(kk) + (C1(i, j) * T1(i, j) + S1(i, j)) * 2 * (RP(j) + dRP(j) / 2) *
          dRP(j) * dXP(j)
      End If
      If j > 2 And j < n Then
        Enerji_t(kk) = Enerji_t(kk) + (C1(i, j) * T1(i, j) + S1(i, j)) * 2 * RP(j) * dRP(j) * dXP(i)
      End If
      If j = n Then
        Enerji_t(kk) = Enerji_t(kk) + (C1(i, j) * T1(i, j) + S1(i, j)) * 2 * (RP(j) - dRP(j) / 2) *
          dRP(j) * dXP(i)
      End If
    Next i
  Next j
  ' ***Asagidaki dongude interfacenin belirtilen grid noktasina geldigi zaman bulunmaktadir.***
  For i = 1 To m
    For j = n_boru + 2 To n
      If (T0(i, j) / T1(i, j)) < 0 Then

```

```

        interface(i) = RP(j)
    End If
Next j
Next i
For ki = 1 To m
    For kj = 1 To n
        T0(ki, kj) = T1(ki, kj)
    Next kj
Next ki
If (kk / 10) = Fix(kk / 10) Then
    Print #1, "zaman(Saniye): "; kk * dzaman
    Print #2, "zaman(Saniye): "; kk * dzaman;
    Print #3, "zaman(Saniye): "; kk * dzaman;
    Print #3, Q(kk), Qgain(kk), Enerji_i, Enerji_t(kk)
    For j = 1 To n
        For i = 1 To m
            Print #1, T1(i, j),
            Next i
            Print #1,
        Next j
        For i = 1 To m
            Print #2, interface(i),
        Next i
        Print #2,
    End If
Next kk
End Sub
*****

```

```

Public Sub Hesapla_K_C_S(T(), k(), C(), S())
    For ki = 1 To m
        C(ki, 1) = Cfl
        k(ki, 1) = Kfl
        S(ki, 1) = 0
        For kj = 2 To n
            If kj <= n_boru + 1 Then
                C(ki, kj) = Cwl
                k(ki, kj) = Kwl
                S(ki, kj) = 0
            End If
            If kj > n_boru + 1 Then
                If T(ki, kj) < -dTeta_mushy Then
                    C(ki, kj) = Csl
                    S(ki, kj) = Csl * dTeta_mushy
                    k(ki, kj) = Ksl
                End If
                If -dTeta_mushy <= T(ki, kj) And T(ki, kj) <= dTeta_mushy Then
                    C(ki, kj) = (Csl + 1) / 2 + 1 / (2 * Ste * dTeta_mushy)
                    S(ki, kj) = (Csl + 1) / 2 * dTeta_mushy + 1 / (2 * Ste)
                    k(ki, kj) = Ksl + (1 - Ksl) / (2 * dTeta_mushy) * (T(ki, kj) + dTeta_mushy)
                End If
                If dTeta_mushy < T(ki, kj) Then
                    C(ki, kj) = 1
                    S(ki, kj) = Csl * dTeta_mushy + 1 / Ste
                    k(ki, kj) = 1
                End If
            End If
        Next kj
    Next ki
End Sub

```

```

Next ki
End Sub
'-----
Public Sub Nusset(Re, Pr, Pe, m, T(), XP(), NU())
If Re < 2300 Then
  NuLamda2(0) = 7.312
  NuGn(0) = 0.749
  NuLamda2(1) = 44.62
  NuGn(1) = 0.544
  NuLamda2(2) = 113.8
  NuGn(2) = 0.463
  For ki = 3 To 1000
    NuLamda2(ki) = (4 * ki + 8 / 3) ^ 2
    NuGn(ki) = 1.01276 * (4 * ki + 8 / 3) ^ (-1 / 3)
  Next ki
  Nu_ToplamX = 0
  Nu_ToplamX2 = 0
  Nu_ToplamY = 0
  Nu_ToplamXY = 0
  Nu_ToplamX = Nu_ToplamX + Log(0.0000000001)
  Nu_ToplamX2 = Nu_ToplamX2 + (Log(0.0000000001)) ^ 2
  Nu_ToplamY = Nu_ToplamY + T(1, 1)
  Nu_ToplamXY = Nu_ToplamXY + Log(0.0000000001) * T(1, 1)
  For ki = 2 To m
    Nu_ToplamX = Nu_ToplamX + Log(XP(ki))
    Nu_ToplamX2 = Nu_ToplamX2 + (Log(XP(ki))) ^ 2
    Nu_ToplamY = Nu_ToplamY + T(ki, 1)
    Nu_ToplamXY = Nu_ToplamXY + Log(XP(ki)) * T(ki, 1)
  Next ki
  Nu_KatsayiB = (Nu_ToplamXY - Nu_ToplamX * Nu_ToplamY / (m)) / (Nu_ToplamX2 -
    Nu_ToplamX ^ 2 / (m))
  Nu_KatsayiA = Nu_ToplamY / m - Nu_KatsayiB * Nu_ToplamX / m
  For ki = 1 To m
    Nu_Pay = 0
    Nu_Payda = 0
    Nu_Ustterim = 0
    Nu_Altterim = 0
    For ik = 1 To ki
      If ik = 1 Then
        Nu_Xon = 0
      Else
        Nu_Xon = XP(ik - 1)
      End If
      For kj = 0 To 1000
        Nu_Ustterim = Nu_Ustterim + NuGn(kj) * Exp(-2 * NuLamda2(kj) / Pe * (XP(ki) -
          Nu_Xon))
        Nu_Altterim = Nu_Altterim + NuGn(kj) / NuLamda2(kj) * Exp(-2 * NuLamda2(kj) / Pe *
          (XP(ki) - Nu_Xon))
      Next kj

      If ik = 2 Then
        Nu_DeltaT = Nu_KatsayiB * (Log(XP(ik)) - Log(0.0000000001))
      End If
      If ik = 2 Then
        Nu_DeltaT = Nu_KatsayiB * (Log(XP(ik)) - Log(0.0000000001))
      End If
      If ik > 2 Then
        Nu_DeltaT = Nu_KatsayiB * (Log(XP(ik)) - Log(XP(ik - 1)))
      End If
    Next ik
  Next ki
End Sub

```

```

End If
If Nu_DeltaT = 0 Then
  Nu_DeltaT = 0.00000001
End If
Nu_Pay = Nu_Pay + Nu_Ustterim * Nu_DeltaT
Nu_Payda = Nu_Payda + Nu_Altterim * Nu_DeltaT * 2
Next ik
NU(ki) = Nu_Pay / Nu_Payda
Next ki
End If
If Re > 2300 Then
  For i = 1 To m
    Nu_F = (1.58 * Log(Re) - 3.28) ^ (-2)
    NU(i) = ((Nu_F / 2) * (Re - 1000) * Pr) / (1 + 12.7 * (Nu_F / 2) ^ 0.5 * (Pr ^ (2 / 3) - 1))
  Next i
End If
End Sub
'-----

```

```
Private Sub Katsayilar_T2()
```

```
  For kj = 1 To n
```

```
    For ki = 1 To m
```

```
      If kj = 1 Then
```

```
        AE_T2(ki, kj) = 0
```

```
        If ki = 1 Then
```

```
          AW_T2(ki, kj) = 0
```

```
        Else
```

```
          AW_T2(ki, kj) = alfa_fl * Pe / dXP(ki)
```

```
        End If
```

```
        AN_T2(ki, kj) = 4 * alfa_fl * NU(ki)
```

```
        AS_T2(ki, kj) = 0
```

```
        AP0_T2(ki, kj) = 1 / dz
```

```
        AP1_T2(ki, kj) = 1 / dz
```

```
        b(ki, kj) = 0
```

```
        AP_T2(ki, kj) = 0
```

```
        If ki = 2 Then
```

```
          b(ki, kj) = AN_T2(1, 1) * (T2(1, 2) - T2(1, 1)) / 2
```

```
        End If
```

```
      End If
```

```
      If kj = 2 Then
```

```
        AE_T2(ki, kj) = Kh_e(ki, kj) * (RP(kj) + dRP(kj) / 2) * dRP(kj) / dXP(2)
```

```
        AW_T2(ki, kj) = Kh_e(ki - 1, kj) * (RP(kj) + dRP(kj) / 2) * dRP(kj) / dXP(2)
```

```
        AN_T2(ki, kj) = Kh_n(ki, kj) * (RP(kj) + dRP(kj)) * dXP(ki) / (dRP(kj) + dRP(kj + 1) / 2)
```

```
        AS_T2(ki, kj) = Kfl * NU(ki) * RP(kj) * dXP(ki)
```

```
        AP0_T2(ki, kj) = C0(ki, kj) * (RP(kj) + dRP(kj) / 2) * dRP(kj) * dXP(ki) / dz
```

```
        AP1_T2(ki, kj) = C1(ki, kj) * (RP(kj) + dRP(kj) / 2) * dRP(kj) * dXP(ki) / dz
```

```
        b(ki, kj) = 0
```

```
        AP_T2(ki, kj) = 0
```

```
      End If
```

```
      If 2 < kj And kj <= n_boru + 1 Then
```

```
        AE_T2(ki, kj) = Kh_e(ki, kj) * RP(kj) * dRP(kj) / dXP(2)
```

```
        AW_T2(ki, kj) = Kh_e(ki - 1, kj) * RP(kj) * dRP(kj) / dXP(2)
```

```
        AN_T2(ki, kj) = Kh_n(ki, kj) * (RP(kj) + dRP(kj) / 2) * dXP(ki) / (dRP(kj) + dRP(kj + 1))
```

```
          * 2
```

```
        If kj = 3 Then
```

```
          AS_T2(ki, kj) = Kh_n(ki, kj - 1) * (RP(kj) - dRP(kj) / 2) * dXP(ki) / (dRP(kj) / 2 + dRP(kj - 1))
```

```
        Else
```



```

AS_T2(ki, kj) = Kh_n(ki, kj - 1) * (RP(kj) - dRP(kj) / 2) * dXP(ki) / (dRP(kj) + dRP(kj - 1)) * 2
End If
AP0_T2(ki, kj) = C0(ki, kj) * RP(kj) * dRP(kj) * dXP(ki) / dz
AP1_T2(ki, kj) = C1(ki, kj) * RP(kj) * dRP(kj) * dXP(ki) / dz
b(ki, kj) = 0
AP_T2(ki, kj) = 0
End If
If n_boru + 1 < kj And kj < n Then
AE_T2(ki, kj) = Kh_e(ki, kj) * RP(kj) * dRP(kj) / dXP(2)
AW_T2(ki, kj) = Kh_e(ki - 1, kj) * RP(kj) * dRP(kj) / dXP(2)
AN_T2(ki, kj) = Kh_n(ki, kj) * (RP(kj) + dRP(kj) / 2) * dXP(ki) / (dRP(kj) + dRP(kj + 1)) * 2
AS_T2(ki, kj) = Kh_n(ki, kj - 1) * (RP(kj) - dRP(kj) / 2) * dXP(ki) / (dRP(kj) + dRP(kj - 1)) * 2
AP0_T2(ki, kj) = C0(ki, kj) * RP(kj) * dRP(kj) * dXP(ki) / dz
AP1_T2(ki, kj) = C1(ki, kj) * RP(kj) * dRP(kj) * dXP(ki) / dz
b(ki, kj) = (S0(ki, kj) - S1(ki, kj)) * RP(kj) * dRP(kj) * dXP(ki) / dz
AP_T2(ki, kj) = 0
If ki = 1 Then
AP_T2(ki, kj) = AP_T2(ki, kj) + Kyl * RP(kj) * dRP(kj) / dXyalitim
b(ki, kj) = b(ki, kj) + Kyl * Teta_yuzey * RP(kj) * dRP(kj) / dXyalitim
End If
If ki = m Then
AP_T2(ki, kj) = AP_T2(ki, kj) + Kyl * RP(kj) * dRP(kj) / dXyalitim
b(ki, kj) = b(ki, kj) + Kyl * Teta_yuzey * RP(kj) * dRP(kj) / dXyalitim
End If
End If
If kj = n Then
AE_T2(ki, kj) = Kh_e(ki, kj) * (RP(kj) - dRP(kj) / 2) * dRP(kj) / dXP(2)
AW_T2(ki, kj) = Kh_e(ki - 1, kj) * (RP(kj) - dRP(kj) / 2) * dRP(kj) / dXP(2)
AN_T2(ki, kj) = 0
AS_T2(ki, kj) = Kh_n(ki, kj - 1) * (RP(kj) - dRP(kj)) * dXP(ki) / (dRP(kj) + dRP(kj - 1) / 2)
AP0_T2(ki, kj) = C0(ki, kj) * (RP(kj) - dRP(kj) / 2) * dRP(kj) * dXP(ki) / dz
AP1_T2(ki, kj) = C1(ki, kj) * (RP(kj) - dRP(kj) / 2) * dRP(kj) * dXP(ki) / dz
b(ki, kj) = (S0(ki, kj) - S1(ki, kj)) * (RP(kj) - dRP(kj) / 2) * dRP(kj) * dXP(ki) / dz + Kyl * RP(kj) * Teta_yuzey * dXP(ki) / dXyalitim
AP_T2(ki, kj) = Kyl * RP(kj) * dXP(ki) / dXyalitim
If ki = 1 Then
AP_T2(ki, kj) = AP_T2(ki, kj) + Kyl * RP(kj) * dRP(kj) / dXyalitim
b(ki, kj) = b(ki, kj) + Kyl * Teta_yuzey * RP(kj) * dRP(kj) / dXyalitim
End If
If ki = m Then
AP_T2(ki, kj) = AP_T2(ki, kj) + Kyl * RP(kj) * dRP(kj) / dXyalitim
b(ki, kj) = b(ki, kj) + Kyl * Teta_yuzey * RP(kj) * dRP(kj) / dXyalitim
End If
End If
b(ki, kj) = b(ki, kj) + AP0_T2(ki, kj) * T0(ki, kj)
AP_T2(ki, kj) = AP_T2(ki, kj) + AE_T2(ki, kj) + AW_T2(ki, kj) + AN_T2(ki, kj) + AS_T2(ki, kj) + AP1_T2(ki, kj)
Next ki
Next kj
AN_T2(1, 1) = 0
AP_T2(1, 1) = 1
b(1, 1) = Teta_in
End Sub

```

```

Private Sub Hesapla_T2()
  For ik = 1 To 20
    For ki = 1 To m
      For kj = 1 To n
        e(kj) = -AS_T2(ki, kj)
        g(kj) = -AN_T2(ki, kj)
        f(kj) = AP_T2(ki, kj)
        If ki < m Then
          r(kj) = b(ki, kj) + AE_T2(ki, kj) * T2(ki + 1, kj) + AW_T2(ki, kj) * T2(ki - 1, kj)
        Else
          r(kj) = b(ki, kj) + AW_T2(ki, kj) * T2(ki - 1, kj)
        End If
      Next kj
      Call TDMA(n, e(), f(), r(), x())
      For kj = 1 To n
        T2(ki, kj) = 0.5 * T2(ki, kj) + 0.5 * x(kj)
      Next kj
    Next ki
  Next ik
End Sub

```

```

Public Sub TDMA(n, e(), f(), r(), x())
  For kj = 2 To n
    iik = kj - 1
    e(kj) = e(kj) / f(iik)
    f(kj) = f(kj) - e(kj) * g(iik)
    r(kj) = r(kj) - e(kj) * r(iik)
  Next kj
  x(n) = r(n) / f(n)
  For kj = 2 To n
    iik = n + 1 - kj
    x(iik) = (r(iik) - g(iik) * x(iik + 1)) / f(iik)
  Next kj
End Sub

```

```

Private Sub Kontrol()
  For kj = 1 To n
    For ki = 1 To m
      Tkontrol(ki, kj) = Abs(T1(ki, kj) - T2(ki, kj))
    Next ki
  Next kj
  anahtar = Tkontrol(1, 1)
  For kj = 1 To n
    For ki = 1 To m
      If Tkontrol(ki, kj) > anahtar Then
        anahtar = Tkontrol(ki, kj)
      End If
    Next ki
  Next kj
  For kj = 1 To n
    For ki = 1 To m
      T1(ki, kj) = T1(ki, kj) * (1 - rahatlamasabiti) + T2(ki, kj) * rahatlamasabiti
      T2(ki, kj) = T1(ki, kj)
    Next ki
  Next kj
End Sub

```

EK-B SEMBOLLER

A	alan (m^2)
c_p	öz ısı ($kJ / kg K$)
C	ısı kapasite debisi (W / K)
C^*	boyutsuz ısı kapasite debisi (C / C_l)
C_{sl}	C_s / C_l
C_{bl}	C_b / C_l
D	çap (m)
\dot{E}	anlık enerji (W)
E	enerji (kJ)
Ei	üstel integral fonksiyonu
Ex	ekserji (kJ)
h	taşıyım katsayısı ($W / m^2 K$); duyulur entalpi (J / kg)
H	entalpi (J / kg)
k	ısı iletim katsayısı (W / mK)
k^*	boyutsuz ısı iletim katsayısı (k / k_l)
k_{sl}	k_s / k_l
k_{bl}	k_b / k_l
k_{fl}	k_f / k_l
k_{yl}	k_y / k_l
L	erime gizli ısısı (kJ / kg)
l	uzunluk (m)
l^*	boyutsuz uzunluk ($l / D_{iç}$)
m	kütle (kg)
\dot{m}	kütlesel debi (kg / s)
n	eleman sayısı (adet)
Nu	Nusselt sayısı ($hD_{iç} / k_f$)
q	ısı geçişi (W)

Q	Toplam ısı geçişi (kJ)
q'	birim uzunlukta ısı geçişi (W / m)
Q'	birim uzunlukta geçen toplam ısı geçişi (kJ / m)
q^{*}	boyutsuz birim uzunlukta ısı geçişi ($q' / k_l(T_i - T_m)$)
Pe	Peclet sayısı ($Re Pr$)
Pr	Prandtl sayısı (ν_f / α_f)
r	silindirik kordinatta konum (m); yarıçap(m)
R	silindirik kordinatta boyutsuz konum ; boyutsuz yarıçap ($r / D_{i}$)
R'	silindirik kordinatta boyutsuz konum ; boyutsuz yarıçap (r / D_{kovan})
r_{el}	ilk elektrot çiftinin merkezden olan uzaklığı (m)
Re	Renolds sayısı ($4\dot{m} / \pi D_{i} \mu_f$)
s	su/buz ara-yüzeyi
S	sabitler terimi
S^*	boyutsuz sabitler terimi ($S / C_l(T_i - T_m)$)
Ste	Stefan sayısı ($C_l(T_i - T_m) / \rho L$)
T	sıcaklık (K)
\bar{T}	hacimsel ortalama sıcaklık (K)
u	hız (m / s)
\forall	hacim (m^3)
$\dot{\forall}$	hacimsel debi (l / dk)
x	kartezyen koordinatlarda konum (m)
X	kartezyen koordinatlarda boyutsuz konum ($x / D_{i}$)

Yunan Harfleri

α	ısı yayılım katsayısı (m^2 / s)
α_{fi}	α_f / α_l
β	aı ($^\circ$)

δx_y	yalıtım kalınlığı (m)
$2\delta T_m$	faz değişim sıcaklık aralığı (K)
η	enerji verimi
θ	boyutsuz sıcaklık ($(T - T_m) / (T_i - T_m)$)
μ	dinamik viskozite ($Pa.s$)
ν	kinematik viskozite (m^2 / s)
ρ	yoğunluk (kg / m^3)
ψ	ekserji verimi
τ	boyutsuz zaman ($\alpha_1 t / D_{iç}^2$)

Alt indisler

el	elektrot çifti
b	boru
$çıkış$	boru çıkışı
$dış$	boru cidarının dışı
FDM	faz değişim malzemesi
f	ısı transfer akışkanı
$giriş$	boru girişi
ITA	ısı transfer akışkanı
i	başlangıç durumu
$iç$	boru cidarının içi
l	sıvı FDM; kontrol hacmin yanal yüzeyi
m	erime noktası
s	katı FDM
t	Isıl çift
y	yalıtım
∞	çevre

EK-C TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ

TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Bazı FDM'lerin sıvı ve katı fazları için özellikleri (Farid ve ark., 2005).....	6
Tablo 2.1 ITA, FDM ve boru malzemelerinin ısı özellikleri.....	13
Tablo 2.2 Geometrik parametreler	18
Tablo 2.3 Farklı boru malzemeleri için katılma oranları ve ısı dirençler	23
Tablo 2.3 Parametrik sonuçlar	31

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Tek borulu enerji depolama sistemi.....	11
Şekil 2.2 Boru-kovan tipi depolama tankı	12
Şekil 2.3 Fotoğraf çekimi.....	14
Şekil 2.4 Boru ve kovan geometrisi	15
Şekil 2.5 Ölçüm kartı üzerinde elektrot ve ısı çift yerleşimi	16
Şekil 2.6 Fotoğraf üzerinden ölçme.....	16
Şekil 2.7 Isıl çiftlerin ve elektrot çiftlerin ölçümünün doğrulanması	17
Şekil 2.8 Deneysel hesaplama parametreleri	18
Şekil 2.9 Enerji dengesinin kontrolü.....	22
Şekil 2.10 ITA'nın giriş sıcaklığının ve debisinin enerji verimine etkisi (Depolama periyodu)	24
Şekil 2.11 Boru malzemesinin ve ITA'nın debisinin enerji verimine etkisi (Depolama periyodu)	25
Şekil 2.12 Kovan çapının ve ITA'nın debisinin enerji verimine etkisi (Depolama periyodu)	25
Şekil 2.13 ITA'nın giriş sıcaklığının ve debisinin ekserji verimine etkisi (Depolama periyodu)	26

Şekil 2.14 Boru malzemesinin ve ITA'nın debisinin ekserji verimine etkisi (Depolama periyodu)	27
Şekil 2.15 Kovan çapının ve ITA'nın debinin ekserji verimine etkisi (Depolama periyodu)	28
Şekil 2.16 ITA'nın giriş sıcaklığının ve debisinin enerji verimine etkisi (Geri kullanım periyodu)	29
Şekil 2.17 ITA'nın giriş sıcaklığının ve debisinin ekserji verimine etkisi (Geri kullanım periyodu)	30
Şekil 3.1 Çizgisel ısı yutucu etrafındaki faz değişimi.....	33
Şekil 3.2 İki boyutlu silindir için kontrol hacim ve düğüm noktaları	36
Şekil 3.3 Ara yüzeyin konumu (Kartezyen koordinat)	38
Şekil 3.4 Ara yüzeyin konumu (Silindirik koordinat).....	39
Şekil 3.5 Entalpinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi.....	42
Şekil 3.6 Silindirik koordinatlarda faz değişiminde sayısal modelin düğüm noktaları	47
Şekil 3.7 Silindirdeki faz değişiminde enerji dengesi için parametreler.....	51
Şekil 3.8 Analitik ve sayısal yöntemle bulunan su/buz ara-yüzeyinin zamana göre değişimi	52
Şekil 3.9 Farklı zamanlar için analitik ve sayısal yöntemle bulunan sıcaklığın yarıçapa göre değişimi	52
Şekil 3.10 Boru etrafındaki faz değişiminin parametreleri	53
Şekil 3.11 Borunun etkisinin ihmal edildiği ve dâhil edildiği durum için su/buz ara-yüzeyinin konumunun zamana göre değişimi.....	62
Şekil 3.12 Borunun etkisinin ihmal edildiği ve dâhil edildiği durum için sıcaklık dağılımı	63
Şekil 3.13 Farklı sayıda kontrol hacim için ve farklı zaman adımları için su/buz ara-yüzeyinin zamana göre değişimi.....	63
Şekil 3.14 Matematiksel model.....	64
Şekil 3.15 Isı transfer akışkanının enerji dengesi.....	66
Şekil 3.16 Boru cidarı için enerji dengesi	68
Şekil 3.17 Matematiksel modelin korunum denklemleri ve sınır koşulları	73
Şekil 3.18 Sistemin sonlu hacimlere bölünmüş halinin gösterimi	74
Şekil 3.19 Borunun iç yüzeyindeki kontrol hacmi.....	78

Şekil 3.20 Deneysel ve sayısal yöntemlerle elde edilen depolanan soğu enerjisinin zamana göre değişiminin karşılaştırılması	84
Şekil 3.21 Su/Buz ara-yüzey konumunun akış yönünde değişimi.....	85
Şekil 3.22 Depolanan soğu enerjisinin, ITA'nın farklı, giriş sıcaklıkları ve debileri için zamana göre değişimi.....	86
Şekil 3.23 Depolanan soğu enerjisinin, farklı ITA debileri ve farklı ısı iletim katsayısına sahip borular için zamana göre değişimi.....	86
Şekil 3.24 Depolanan soğu enerjisinin, farklı ITA debileri ve farklı kovan çapları için zamana göre değişimi.....	87