

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**ISI BORUSUNUN YALITILMIŞ BÖLGESİNDEKİ
AKIŞIN ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Musa SEVEN**

Programı : ENERJİ BİLİM VE TEKNOLOJİ

MAYIS 2007

**ISI BORUSUNUN YALITILMIŞ BÖLGESİNDEKİ
AKISIN ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Musa SEVEN
(301031019)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 3 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Filiz BAYTAŞ
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Melih GEÇKİNLİ
Prof.Dr. Feridun ÖZGÜÇ**

MAYIS 2007

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, ısı borusunun yalıtılmış bölgesini modellemek için, gözenekli bölgede sıvı akışının, merkezde ve ters yönde buhar akışının olduğu matematiksel model analitik olarak çözülmüştür.

Bu konuda çalışmayı bana öneren ve konu olarak veren, çalışmalar boyunca her zaman yardımlarını ve bilgisini esirgemeyen, yönlendiren, teşvik eden değerli hocam Sayın Prof. Dr. Filiz BAYTAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bütün hayatım boyunca gösterdikleri sabır, hoşgörü ve her konudaki destekleri için aileme özellikle anne ve babam'a en içten sevgilerimi sunarım.

Musa SEVEN

Mayıs, 2007

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. ISI BORUSUNUN TANITIMI	6
2.1. Isı Borusunun Yapı Elemanları	7
2.2 Isı Borusunun Verimini Etkileyen Faktörler	10
2.3 Isı Borusu Uygulamaları	11
3.GÖZENEKLİ ORTAMLAR	14
3.1 Gözenekli Ortam Özellikleri	14
3.2 Gözenekli Ortamlarda Temel Korunum Denklemleri	17
3.2.1 Darcy yasası	18
3.2.2 Ergün denklemi	19
3.2.3 Brinkman denklemi	19
3.2.4 Korunum denklemleri	20
3.2.4.1 Kütle korunum denklemi	20
3.2.4.2 Momentum denge denklemi	20
4. ISI BORUSUNDA YALITILMIŞ BÖLGEDE AKIŞIN İNCELENMESİ	21
4.1 Yalıtılmış Bölgede Korunum Denklemleri	21
4.2 Yalıtılmış Bölgenin Analitik Olarak İncelenmesi	27
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	41
KAYNAKLAR	44
EKLER	46
ÖZGEÇMİŞ	53

KISALTMALAR

TTH : Temsili Temel Hacim
REV : Representative Elementary Volume

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Isı borularında kullanılan akışkanlar.....	8
Tablo 4.1. Denklemlerde Yer Alan Bazı Değişkenler	25
Tablo 4.2. Çalışmada kullanılan akışkanların 50°C'deki bazı özellikleri , kinematik viskozite oranları (f) ve dinamik viskozite oranları (S)...	36

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Isı borusunun çalışma şeması	6
Şekil 2.2 : Isı borusunun tipik geometrileri.....	7
Şekil 3.1 : İnsan akciğerinin çeşitli bölgelerinin elektron mikroskobu ile çekilmiş görüntüleri	14
Şekil 3.2 : Gözenekli ortam örnekleri (a) İnce zar, çekirdeksel gözenekler, lifli ve tanecikli filtre yatakları, (b) Aktif karbon lifler	15
Şekil 3.3 : Temsili temel hacim.....	18
Şekil 4.1 : Isı borusunun yalıtılmış bölgesi.....	21
Şekil 4.2 : Farklı boyutsuz geçirgenlik değişkenlerinde hız değişimi, $P = 1.5, S = 53.3, R^* = 2.0$ için a) Sıvı b) Buhar hızı eğrileri ...	30
Şekil 4.3 : Farklı basınç değişimi oranları, $\sigma = 3.0, S = 53.3, R^* = 2.0$ için a) Sıvı b) Buhar hızı eğrileri	31
Şekil 4.4 : Farklı boyutsuz geçirgenlik değişkenlerinde basınç değişimi, $dP_s / dz = 100 Pa / m, S = 53.3$	32
Şekil 4.5 : Farklı boyutsuz geçirgenlik değişkenlerinde kütle akış hızı, $dP_s / dz = 100 Pa / m, S = 53.3$	33
Şekil 4.6 : Farklı boyutsuz geçirgenlik değişkenleri ve sıvı basınç değişimi için ısı borusunun gücü, $S = 53.3, R^* = 1.5$	34
Şekil 4.7 : Bağlı gözenekli ortam kalınlığının ısı borusunun üzerindeki etkisi, $S = 53.3, dP_s / dz = 100.0$	34
Şekil 4.8 : Farklı çalışma sıvıları ve $\sigma = 3.0, P = 1.5, R^* = 2.0$ için a) Sıvı b) Buhar hızı eğrileri	37
Şekil 4.9 : Farklı akışkanlar için basınç değişim grafiği $R^* = 2.0, dP_s / dz = 100 Pa / m$	38
Şekil 4.10 : Farklı akışkanlar için kütle akış hızı, $R^* = 2.0, dP_s / dz = 100 Pa / m$	39
Şekil 4.11 : Farklı akışkanlar için ısı borusunun gücü, $R^* = 2.0, dP_s / dz = 100 Pa / m$	40

SEMBOL LİSTESİ

a : Buhar akışının olduğu bölgedeki yarıçap (m)

b : Isı borusunun yarıçapı (m)

D_0, D_1, D_2, D_3 : İntegrasyon sabitleri

f : Akışkanın kinematik viskozite oranı, $\left(= \frac{v_b}{v_s} \right)$

g : Yerçekimi ivmesi (m/s^2)

K : Geçirgenlik (m^2)

L : Gizli Isı (kj/kg)

m : Kütle akış hızı (kg/s)

P : Basınç değişim oranı

R^* : Bağlı gözenekli ortam kalınlığı, $\left(= \frac{b}{a} \right)$

S : Dinamik viskozite oranı, $\left(= \frac{\mu_s}{\mu_b} \right)$

v : Akışkanın hızı

ε : Gözeneklilik

μ : Akışkanın dinamik viskozitesi (Ns/m^2)

ν : Akışkanın kinematik viskozitesi (m^2/s)

ρ : Sıvı yoğunluğu (kg/m^3)

σ^2 : Boyutsuz geçirgenlik değişkeni, $\left(= \frac{a^2}{K} \right)$

Alt indis

s : sıvı bölgesi

b : buhar bölgesi

ISI BORUSUNUN YALITILMIŞ BÖLGESİNDEKİ AKIŞIN ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Isı borusu bir yerden diğer tarafa hızlı şekilde ısı iletimini sağlayan bir ayardır ve birçok mühendislik uygulamalarında karşılaşılmaktadır. Isı borusu genellikle soğutma amaçlı olarak klimalar, buzdolapları, ısı değıştiricileri, transistörler gibi geniş bir ürün çeşidinde kullanılmaktadır. Ayrıca ısı borusu teknolojisi uzay uygulamalarından diz üstü bilgisayar teknolojisine kadar uygulanmaktadır.

Bağıl gözenekli ortamın kalınlığı, çalışma sıvısının basınç değışimi, boyutsuz geçirgenlik değışkeni, çalışma sıvısının cinsi ısı borusunun verimini etkileyen faktörlerdir.

Bu çalışmada, ısı borusunun yalıtılmış bölgesini analitik olarak modellemek için, gözenekli bölgede sıvı akışının, merkezde ve ters yönde buhar akışının olduğu matematiksel model analitik olarak çözülmüştür. Bu bölgede, merkezde buhar için Navier-Stokes denklemi ve fitil bölgesinde gözenekli ortam için Darcy kanununu da içeren Navier-Stokes denklemi kullanılarak, akışkan hızları, buhar basınç değışimi ve kütle akış hızı hesaplanmıştır.

Bir ısı borusunda çalışma sıvıları işlem sıcaklığına göre dört sınıfa ayrılır; çok düşük, düşük, orta ve yüksek sıcaklık bölgeleri. Düşük sıcaklık bölgesinde sıcaklık 200° ile $550^{\circ} K$ arasındadır. Çoğu ısı borusu bu bölgede çalışmaktadır. Freon bileşikleri ve çalışma sıvısı olarak yaygın kullanımı olan su düşük sıcaklık bölgesinde kullanılırlar.

Sonuçlar basınç değışimi, boyutsuz geçirgenlik değışkeni, gözenekli ortamın bağıl kalınlığı ve çalışma sıvısının cinsi gibi değışkenlere bağıl olarak incelenmiştir.

INVESTIGATION OF AN ANALYTICAL MODEL FOR FLUID FLOW IN THE ADIABATIC SECTION OF A HEAT PIPE

SUMMARY

A heat pipe is a simple device that can quickly transfer heat from one point to another and it is most frequently met in many engineering applications. Heat pipes are usually used for cooling an electronic component in a wide variety of products like in air-conditioners, refrigerators, heat exchangers, transistors, etc. Also heat pipes can find a wide spectrum of applications from space technology to laptop computers.

The factors affecting the performance of a heat pipe are the relative thickness of the porous media, its permeability, and the type of the working fluid.

In this study, a mathematical model of the heat pipe is proposed and solved analytically. In the adiabatic section of the heat pipe, the Navier-Stokes equation is used for the central vapor region, and Darcy's law has been implemented in the Navier-Stokes equation for the porous annular section of the heat pipe. The velocity distribution, pressure gradient ratio and mass flow rate of the two fluids were calculated.

Operating temperature ranges of working fluids in a heat pipe classifies into four categories; cryogenic, low, medium and high temperature ranges. The low temperature range is from 200° to $550^{\circ} K$. Most heat pipe applications fall within this range. Freon compounds and Water, which is the most widely used working fluid are used in the low temperature range.

The analytical results are elaborated with respect to pressure gradients, the permeability, the relative thickness of porous layer, and the type of the working fluid.

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Uzay çağının başlaması ile hafif ve uzun ömürlü ısı değiştiricileri yapımına büyük talep olmuştur. Böylece küçük hacim ve yüzeylerde büyük miktarda ısının taşınması konusundaki çalışmalar artmıştır.

Böyle bir cihaz ilk olarak Gaugler tarafından 1944 yılında yapılmıştır. Fakat ne yazık ki bu tarihlerde ısı değişimi için bir çok klasik cihazın bulunması yüzünden bu buluş yeterli ilgiyi görmemiş ve uzun zaman unutulmuştur.

1962 yılında Trefethen uzay araçlarında kullanılabilir bir ısı değiştiricisi fikrini ortaya atmıştır. Bu cihaz iç tarafında gözenekli fitil bulunan boş bir borudan ibaretti. Fakat bu yıllarda bu fikri gerçekleştirmek için hiçbir deney yapılmamıştır.

1964 yılında Grover ve arkadaşları bundan önce yapılan çalışmalardan habersiz olarak, Gaugler'in cihazına benzer ısı değiştiriciyi keşfettiler ve adını ısı borusu (HEAT PIPE) olarak koydular. Grover ve arkadaşlarının amacı uzay araçlarında enerji üretimi ve geçişi alanında çalışmak idi, ama ısı borusunun, diğer alanlarda da büyük bir kullanma potansiyeli olduğunu fark ettiler, (**Genceli, 1976**).

Isı borusu küçük kesit ve yüzeylerden büyük miktarlarda ısı geçişine olanak sağlayan iki fazlı bir ısı transfer cihazıdır. Sistem boyuna doğrultuda buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölgelerinden meydana gelmiştir. Bir de bu iki bölgeyi birbirinden ayırmaya yarayan üçüncü bir yalıtılmış bölge vardır. Isı borusunun buharlaştırıcı bölgesine ısı ilavesi ile birlikte sıvı fazdaki akışkan buhar fazına geçip borunun orta kısmında hareket edecektir. Yoğuşturucu bölgesinde ısı çekimi ile birlikte buhar fazdaki akışkan tekrar sıvı faza geçecektir. Böylece bir noktadan diğer noktaya ısı iletimi sağlanacaktır. Sıvı faza geçen akışkan fitil adı verilen kılcal yapı üzerinden kılcal kuvvetler etkisi ile tekrar buharlaştırıcı bölgesine geri dönecektir.

1964 yılından sonra ısı borusu üzerindeki çalışmalar yoğunlaştı. Isı boruları üzerinde yapılan analitik çalışmaları iki grupta toplamak mümkündür. Bunlardan ilki ısı

borularının geometrik şekli üzerinde yapılan analitik çalışmalardır. Bu çalışmalardan birisinde; **Pruzan ve diğ. (1990)** sinterlenmiş fitil yapıları ısı borularında daimi ısı transfer sınırlarının analitik modellemesini yapmışlardır. Buhar ve sıvı akışının bir boyutlu olduğu varsayılmıştır. Çalışmada deneysel olarak da çalışılmıştır. Bakır tozları küçük tanecikli olarak ısı borusunun içine iki kere sinterlenmiştir. Isı değişiminin değerleri, iki kere sinterlenmiş bakır fitil üzerinde deneysel ölçümlerle elde edilmiş, ayrıca analitik çözümler de yapılarak bulunmuştur. Elde edilen deneysel ölçümlerle analitik çözümlerin uyum içinde olduğu görülmüştür.

Analitik model kullanılarak bu tip ısı borularında verimi etkileyen dizayn değişkenleri değerlendirilmiştir. Sonuçta; fitilin kalınlığı, gözenekliliğin ve kılcal yapının ısı borusunun verimini etkilediği gözlenmiştir.

Zhu ve Vafai (1997) çalışmalarında asimetrik düz plaka ve disk şeklindeki ısı borularının analitik modellemesini geliştirmişlerdir. Isı borusunun duvar, sıvı ve fitil bölgelerinde ısı iletim eşitlikleri tam ve doğru olarak çözülmüştür. Buhar hızı, buhar basıncı ve sıcaklık dağılımları analitik olarak incelenmiştir. Çalışmada ısı borusundaki duvar ve sıvıyla doymuş fitil bölgesindeki ısı transferi bir boyutlu olarak modellenmiştir. Sonuç olarak; asimetrik düz plaka ve disk şeklindeki ısı borularında duvar ve sıvı bölgelerindeki ısı transferi, buhar bölgesindeki enerji denklemi çözülmüştür. Disk şeklindeki ve düz plaka şeklindeki ısı boruları için analitik çözümler elde edilmiştir.

Ling ve Cao (1999) çalışmalarında, çalışma sıvısı olarak sodyum kullandıkları merkezden çıkan bir eksen etrafında dönen yüksek sıcaklıktaki ısı borularında teorik ve deneysel veriler ile ısı iletiminin bakırınkinden 60-100 kez daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir. Bu tip ısı boruları yüksek sıcaklıkta gaz tribünü motor kanatlarında etkin bir soğutmayı mümkün kılmaktadır. Sıvının geri dönüşümü için merkezci kuvvetler kullanılmaktadır. Çalışmada yoğunlaştırıcı bölgesindeki yoğunlaşmayan gazın sıcaklık üzerindeki etkisi analitik olarak incelenmiştir. Isı borusu boyunca yüksek dönme hızının sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Sonuçlar; yoğunlaşmayan gazın ısı borusunun verimini kötü etkilediğini, yapılan analitik modellemenin ısı borusunun dizaynı ve verimlilik analizi için kullanışlı olduğunu ortaya koymuştur.

Kim ve diğ. (2002) çalışmalarında yivli fitilli yapıdaki minyatür ısı borularında ısı ve kütle transferinin analitik modellemesini yapmış, maksimum ısı transfer oranını analitik olarak çözmüşlerdir. Sıvı-buhar ara yüzünde kayma gerilmesinin temas açısı ve başlangıçtaki sıvı miktarı bu model için dikkate alınmıştır. Shah adında yeni bir modelleme yapılmıştır. Bu model sıvı-buhar ara yüzündeki kayma gerilmesi etkisini hesaplamaktadır. Sonuçta; yivli fitilli yapıda minyatür ısı borularının ısı verimlilik özelliklerini içeren, eğim açısını ve ara yüzdeki kayma gerilmelerini modelleyen bir boyutlu model geliştirilmiştir. Bu model fitilin et kalınlığının ve yiv yüksekliğinin ısı transferinde etkili olduğunu göstermiştir.

Suman ve Kumar (2005) çalışmalarında poligonal şekilli mikro ısı borularında ısı transferi ve akışkan akışı için analitik modellemede makroskopik yaklaşım kullanmışlardır. Akışkan akışı; ısı ve kütle transferi için lineer olmayan eşitlikler analitik olarak çözülmüştür. Boyutsuz değişkenler ısı borusunun verimini tahmin etmede kullanılmıştır. Çalışmada eşkenar üçgen ve dikdörtgen şeklindeki poligonal ısı boruları ele alınmıştır. Sıvı köşelerden, buhar orta kısımdan hareket etmektedir. Sıcak uç buharlaştırıcı, soğuk uç yoğunlaştırıcı bölgedir. Eğriliğin yarıçapı, sıvı hızı ve sıvı bölgesindeki basınç ısı borusu boyunca değişmektedir. Young-Laplace denklemi, sınır koşulları, boyutsuz değişkenler kullanılarak ısı borusunun analitik modellemesi yapılmış; sıvı ve buhar hızı, boyutsuz eğrilik yarıçapı, sıvı basıncı, buharlaştırıcıdaki ısı değişimi, boru içindeki kritik sıcaklık incelenmiştir. Sonuç olarak; analitik modelleme poligonal şekilli ısı borularında akışkan akışı ve ısı transfer değişkenleri için nicel ölçümler vermiştir. Isı borularının bu şekilde analitik modellemesinin daha kolay ve kullanışlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Isı boruları hakkında yapılan analitik çalışmaların ikinci grubu ısı borularının verimini etkileyen değişkenler üzerinde yapılan çalışmalardır.

Liu ve diğ. (1989) çalışmalarında ısı borularının yalıtılmış bölgesinde Brinkman-Darcy modeli kullanarak, sıvı ve buhar akışları üzerinde farklı değişkenlerin etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada çalışma sıvısı olarak su kullanılmıştır. Çalışmada buhar ve sıvı bölgesi için süreklilik, Navier-Stokes ve Darcy kanunlarından yararlanılmış; sınır koşulları ve boyutsuz değişkenler kullanılarak sıvı ve buhar hızı bulunmuştur. Sıvı ve buhar hız profilleri farklı geçirgenlik değişkeni değerlerinde, basınç değişimlerinde, viskozite oranlarında incelenmiştir. Sonuçta; akış hızlarının

basınç değişimine, gözenekliliğe ve gözenekli ortamın kalınlığına bağlı olduğu anlaşılmıştır. Sıvı hızı viskozite oranından bağımsızdır.

Zhu ve Vafai (1999) alışmalarında, silindirik ısı borularında sıvı-buhar hızları ve basınç dağılımlarını iki boyutlu analitik modelleme ile incelemişlerdir. Elde edilen veriler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Buhar ve sıvı akışının analitik çözümleri ısı borularının çalışma sıcaklığı ve en yüksek ısı taşıma kapasiteleri için incelenmiştir. Buhar ve sıvı akışları daimi, laminer ve sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Fital eş sıcaklıktadır ve çalışma sıvısı ile doymuştur. Sıvı-buhar ara yüzündeki hidrodinamik çiftinin ve fitildeki Darcy olmayan taşınımı analizinde sonuçlar göstermiştir ki ara yüz etkileri küçük ve ihmal edilebilirdir. Eldeki analitik çözümler kılcallık sınırını da belirlemiştir. Bu tip analitik çözümlerin ısı borularında uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Wang ve Vafai (2000) alışmalarında, düz plakalı ısı borularının çalışmaya başlama ve kapanma işlemlerindeki verimlerini analitik olarak modellemişlerdir. Bu modellemede çalışmaya başlama ve kapanma işlemleri bağımsız olarak incelenmiş, sonra bu iki model düz plakalı ısı borularında periyodik çalışmaya başlama ve kapanma işlemleri için birleştirilmiştir. Ayrıca düz plakalı ısı borusunun duvar ve fitilindeki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Sonuçlar duvar ve fitilin kalınlığının ısı borusunun ısı yayılımını etkilediğini göstermiştir. Isıl yayılımın etkilerinin artması ısının nüfuz etme zamanını azaltmaktadır. Elde edilen ısı transfer sabitinin ısı borusunun zaman sabiti üzerinde büyük etkileri vardır.

Lefevre ve Lallemand (2005) alışmalarında düz mikro ısı borularının duvarındaki sıcaklık, buhar ve sıvı akışları için analitik çözümler yapılmıştır. Düz mikro ısı boruları için en yüksek ısı transfer kapasitesi hesaplanmış, boru içindeki gözenekli ortam için kılcal yapı modellenmiştir. Kılcal yapı hesaplamaları aę veya sinterlenmiş metal toz fitilleri şekline göre yapılmıştır. Çalışmada ısı ve hidrodinamik model olmak üzere iki model ele alınmıştır. Isıl model mikro ısı borusu içinde ısı transfer değişimini hesaplayabilmektedir. Hidrodinamik model mikro ısı borusu içinde buhar ve sıvı hızlarını hesaplamaya izin vermektedir. Ayrıca kılcal basıncı ve en yüksek ısı transfer kapasitesini hesaplamayı mümkün kılmaktadır. Mikro ısı borusundaki en yüksek ısı transfer kapasitesi birkaç elektronik bileşenle tahmin edilmiştir. Sonuç olarak; yapılan modelleme ile deneysel veriler uyum içindedir. Mikro ısı borusu içindeki buhar bölgesinde basınç düşüşü verimliliğini etkilemiştir. Mikro ısı

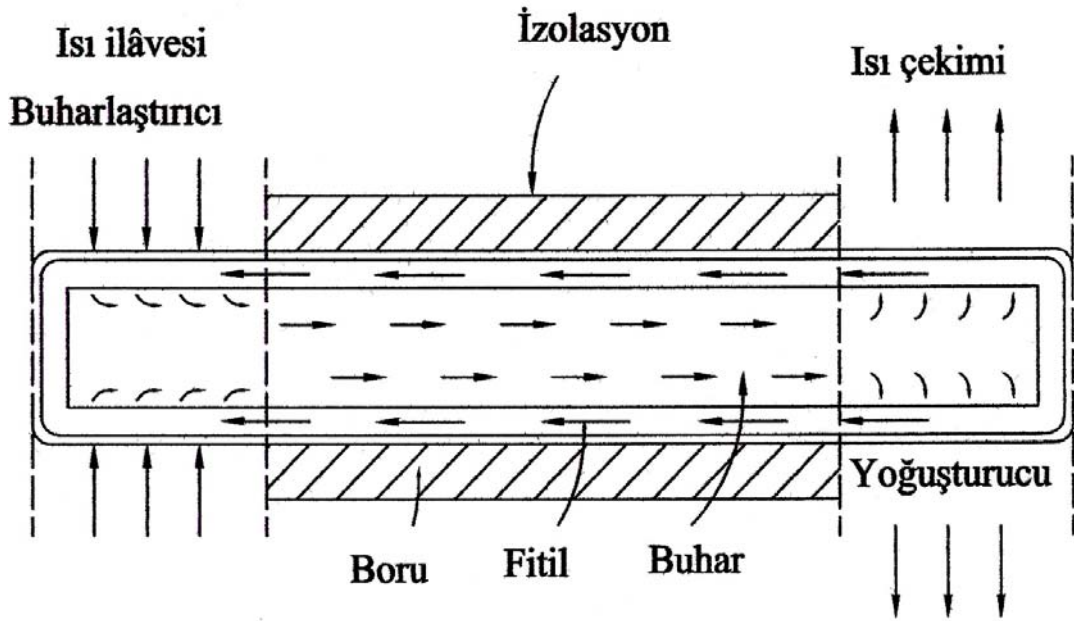
borusunun duvarında ısı dağılımı hesaplanmış, duvardaki direnç yeteri kadar küçük olduğunda mikro ısı borusunun en yüksek verimliliği gösterdiği anlaşılmıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, ısı borusunun yalıtılmış bölgesini analitik olarak modellemek için, gözenekli bölgede sıvı akışının, merkezde ve ters yönde buhar akışının olduğu matematiksel model analitik olarak çözülmüştür. Sonuçlar basınç değişimi, geçirgenlik değişkeni, gözenekli ortamın bağıl kalınlığı ve çalışma sıvısının cinsi gibi değişkenlere bağlı olarak incelenmiştir. Sunulan çalışmada, çalışma sıvısı olarak 50°C’de Su, Ethanol, Freon11, Freon21, Freon113 gibi akışkanlar incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 2

2. ISI BORUSUNUN TANITIMI

Isı borusu, küçük kesit ve yüzeylerden çok büyük miktarlarda ısı geçişine olanak sağlayan bir cihazdır. Sistem iç tarafından tabaka halinde bir fitil malzemesi ile kaplanmış içi boş silindirik bir borudan oluşmaktadır. Boru içinde aynı zamanda yoğuşabilen bir akışkan vardır. Akışkanın sıvı fazı kılcal olay yardımıyla fitil içinde hareket edebilmektedir. Buharlaştırıcı adı verilen borunun bir ucuna ısı verildiğinde, fitil içindeki akışkan buharlaşır ve buharlar borunun orta kısmında hareket ederler. Yoğuşturucu denilen borunun diğer kısmından ısı çekilirse bu bölgede buharlar yoğuşarak sıvı faza geçer ve sıvı fitil içinde kılcal olay dolayısıyla tekrar buharlaştırıcı kısmına geri döner. Boyuna doğrultuda ısı borusu buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölgelerinden meydana gelmiştir. Ayrıca buharlaştırıcı ve yoğuşturucu bölgeleri birbirinden ayırmak için ikisi arasında üçüncü bir yalıtılmış bölge vardır. Cihazın çalışma şeması Şekil 2.1 de görülmektedir.



Şekil 2.1: Isı borusunun çalışma şeması

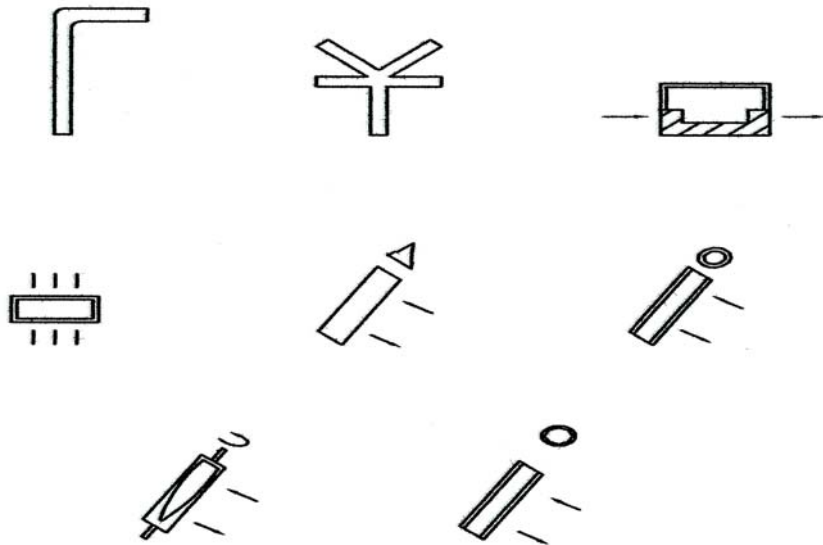
Bu noktada ısı borusu ile ısıl termosifon arasındaki benzerlikten bahsetmek uygun olur. Aralarındaki tek fark yoğunlaşan sıvının buharlaştırıcıya dönmesi, termosifonda yerçekimi ivmesinin, ısı borusunda ise kılcal olayın belirleyici olmasıdır. Bu yüzden ısı borusunun üstün tarafının yerçekimi olmayan bölgede bile çalışması ve buharlaştırıcının istenen herhangi bir konuma yerleştirilebilmesidir.

Isı geçişi saf doymuş buhar ile olduğundan ısı borusu yaklaşık olarak eş sıcaklıktadır. Eğer akışkan herhangi bir sebeple kirlenirse veya ikinci bir akışkan ile karıştırılırsa, ısı borusu eş sıcaklıkta olma özelliğini kaybeder.

Isı borusu esas olarak yoğunlaşan sıvının bir fitilden kılcal kuvvetlerin etkisi ile buharlaştırıcıya dönmesi ilkesine göre çalışır. Fakat buharlaştırıcıya dönüşün diğer bütün yollardan gerçekleştiği ısı değiştiricileri de ısı borusu adı ile anılır. Kılcal kuvvetlerin yanı sıra, merkezkaç kuvvet, ozmotik kuvvet, elektromanyetik kuvvetlerden de ısı borusu yapımında yararlanır.

2.1 Isı Borusunun Yapı Elemanları

Isı borusunun verimli biçimde çalışması, uzun ince bir yapıda olması ile mümkündür. Çeşitli geometriler olmakla beraber uygulamada en çok silindirik ve prizmatik uzun borular veya ince düzlemsel yapılar kullanılır. Isı borusunun geometrileri Şekil 2.2' de görülmektedir.



Şekil 2.2 : Isı borusunun tipik geometrileri

Isı borusu aşağıdaki gibi üç temel yapı elmanından oluşur.

- Akışkan
- Kılcal yapı
- Boru ve kapaklardan oluşan dış muhafaza

Akışkan

Akışkanın seçiminde en önemli rolü donma ve buharlaşma sıcaklıkları oynar. Isı borusunda en çok kullanılan akışkanlar, atmosfer basıncında donma ve buharlaşma sıcaklıklarıyla aşağıdaki Tablo. 2.1 de verilmiştir.

Tablo 2.1 : Isı borularında kullanılan akışkanlar (Çıkm, 1988)

AKIŞKAN	DONMA NOKTASI (°C)	1 atm' de KAYNAMA NOKTASI (°C)	KULLANIM ARALIĞI (°C)
Helyum	-272	-269	-271 ~ -269
Azot	-210	-196	-203 ~ -160
Amonyak	-78	-33	-60 ~ -100
Freon 11	-111	24	-40 ~ 120
Pentan	-130	28	-20 ~ 120
Freon 113	-35	48	-10 ~ 100
Aseton	-95	57	0 ~ 120
Metanol	-98	64	10 ~ 130
Flutec PP2	-50	76	10 ~ 160
Etanol	-112	78	0 ~ 130
Heptan	-90	98	0 ~ 150
Su	0	100	30 ~ 200
Flutec PP9	-70	160	0 ~ 225
Freon21	-134	9	-40 ~ 87
Civa	-39	361	250 ~ 650
Sezyum	29	670	450 ~ 900
Potasyum	62	774	500 ~ 1000
Sodyum	98	892	600 ~ 1200
Lityum	179	1340	1000 ~ 2300
Gümüş	960	2212	1800 ~ 2300

Akışkan seçilirken şu özelliklere dikkat edilmelidir;

- Kılcal yapı ve boru malzemeleriyle birlikte kullanıma uygunluk
- İyi bir ısı kararlılık, sıcaklığın artmasıyla bozulma tehlikesine maruz kalmamak
- Kılcal yapı ve boru malzemelerini ıslatabilmek
- Çalışma sıcaklığı aralığında buharlaşma basıncının gereğinden büyük ve küçük olmaması
- Buharlaşma gizli ısısının büyük olması
- Sıvı ve buhar fazlarında viskozitenin düşük olması
- Yüksek yüzey gerilimi
- Kabul edilebilir bir donma noktası

Kılcal Yapı

Isı borusunun fitil seçimi, çoğu kullanılan akışkana bağlı olan pek çok etken göz önüne alınarak yapılır. Doğal olarak fitilin amacı sıvıyı buharlaştırıcıya götüren kılcal kuvvetleri sağlamaktadır. Bunun yanı sıra bir ikinci görevi ısının buharlaştırıcı bölgesinde ısı alınan yerlere dağıtılmasıdır.

Özdeş yapıli fitiller için bir en elverişli gözenek çapı belirlenebilir. Düşük verimli ve yerçekimi ortamında çalışan ısı borularında gözenek çapı büyük tutulmalıdır. Yüksek kılcal kuvvetlerin gerekli olduğu yerlerde gözenek çapı daha küçük alınır. Uzay araçlarında kullanılan ısı borularının fitilleri ise genellikle özdeş olmayan yapıli ve karmaşıktır. Ayrıca fitilin et kalınlığı da göz önüne alınması gereken bir özelliktir.

Kılcal yapı malzemesinde istenen diğer özellikler çalışma şartlarına, akışkan tipine uygunluk ve akışkan tarafından ıslatılabilmektir. En çok kullanılan özdeş fitil tipleri arasında elyafli malzeme, sinterlenmiş malzeme esaslı olanlar örgü ve keçe tipi fitiller yaygındır.

Örgü tipinde kılcal yapılar değişik metallere yapılmaktadır. Paslanmaz çelikten, nikelden, bakırdan, alimünyumdan yapılmış örgü fitiller mevcuttur. Metal köpüğünden yapılan daha özel keçe tiplerinin de giderek kullanımı artmaktadır.

Sinterlenmiş metal tozları da küresel tanecikli olarak bir dizi malzeme için imal edilirler ve ısı borularında kullanılırlar.

Elyafli fitiller de ısı borularında geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Küçük gözenek çapları vardır.

Uzay araçları gibi çok yüksek verimlilik istenen yerlerdeki ısı borularında kılcal yapılar genellikle damarlı olur. Damarlı kılcal yapıda, halka kesitli kılcal yapının yanı sıra dairesel veya başka bir şekilde ama içi dolu damar adı verilen bir ikinci yapı daha vardır. Bu içi dolu kılcal yapı, sıvının yoğunlaştırıcıdan buharlaştırıcıya en küçük basınç kaybıyla gitmesini sağlar.

Dış Muhafaza

Dış muhafazanın görevi ısı borusu içindeki akışkanı çevreden yalıtımdır. Bu nedenle dış muhafaza sızdırmaz olmalı, iç ve dış basınç farkına dayanabilmeli, akışkan ile dış ortam arasındaki ısı alışverişine olanak vermelidir.

Dış muhafaza seçilirken dikkat edilecek hususlar;

- Hem çevre şartlarına, hem de ısı borusu içindeki akışkanın şartlarına uygun olmalı
- Dayanıklılık ve ağırlık oranı uygun olmalı
- İmal usullerine uygun olmalı, (kaynaklanabilme, makinede işlenebilme gibi)
- Kullanılan akışkanlar tarafından ıslatılabilmeli

Isı borusunu oluşturan elamanlar birbirlerine olumsuz etki yapmamalıdır. Malzemenin birbirine uygun olmaması halinde ortaya çıkan en önemli iki sorun paslanma ve yoğunlaşmayan gaz çıkmasına neden olan reaksiyonların olmasıdır. Yoğunlaşmayan gaz yoğunlaştırıcıda birikerek orada bloke edilecek ve ısı geçişini bozacaktır. Yapı malzemesi akışkan içinde eriyebiliyorsa bir miktar malzeme buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcıya taşınır ve orada birikir. Sıcak noktalarda veya fitil içinde tıkanıklıklar meydana getirir, **(Dunn, 1994)**.

2.2 Isı Borusunun Verimini Etkileyen Faktörler

- Çalışma sıvısı miktarı
- Eğim açısı
- Buharlaştırıcı uzunluğunun, yoğunlaştırıcı uzunluğuna oranı
- Çalışma basıncı
- Çalışma sıvısının cinsi şeklinde sıralanabilir.

Ayrıca ısı borusunun çalışabilmesi, ortalama buhar sıcaklığı tarafından belirlenen çalışma noktasının belli sınırlar içinde olması ile mümkündür.

Bu sınırlar şunlardır;

- Viskoz sınır
- Ses hızı sınırı
- Sürüklenme sınırı
- Kılcallık sınırı
- Kaynama sınırı

Kılcallık sınırı; ısı borusunun çalışabilmesi için en önemli etkenlerden biridir ve fitilin pompalama yeteneğidir. Bu sınır aşılsa fitil içindeki sıvı yeterince hızlı olarak yükselemez ve buharlaştırıcı kısmında fitil giderek kurur. Bu da ısı borusunun çalışmasının durmasına ve buharlaştırıcının yanmasına sebep olur.

Kaynama sınırı; yüksek ısı akılarında fitil içinde bir kaynama olursa önce ısı geçişi azalmakta daha sonra ise kılcallık sınırı aşıldığında olduğu gibi buharlaştırıcının yanması mümkün olabilmektedir, **(Faghri, 1995)**.

2.3 Isı Borusu Uygulamaları

Isı borusunun uygulanma amaçları altı grupta toplanabilir.

- Isı kaynağı ile ısı atılan yerin ayrılması
- Sıcaklık dağılımının özdeşleştirilmesi
- Isı akısı dönüşümü
- Sıcaklık kontrolü
- Isıl diyot ve anahtar olarak kullanımı
- Isı geri kazanım ünitesi olarak kullanımı

Birçok araştırmacı ısı borularını geliştirmek için çeşitli akışkan, fitil ve boru malzemeleri denemiştir. Isı borusu yardımıyla yüksek ısı geçişleri temin edilebilmektedir.

Kıvrılabilen bir boru kullanılarak, otomobillerin ısıtma devreleri ısı borusu ile çalıştırılabilir. Motorda eksoz manifolduna yerleştirilebilecek bir depo ile çekilen ısı, iç havalandırma ısı değiştiricisine bağlanan bir depo ile içeri alınır. Bu şekilde bir düzenleme ile otomobilin çabuk olarak ısıtılması temin edilir. Motorun çalışmasıyla

otomobilin içindeki havada ısınmaya başlayacaktır. Böylece klasik ısıtıcılarda olduğu gibi motor soğutma suyunun ısınması için geçmesi gereken uzun zamana ihtiyaç yoktur.

Mikroelektrik devrelerinin soğutulması, açığa çıkan ısının küçük yüzeyler yardımıyla dışarı atılmak istenmesi ve elektronik cihazların çalışmalarının sıcaklığa bağlı olması kritik bir durum yaratır. Burada ısı borusu, ısının küçük bir yüzeyden çevreye daha kolaylıkla verilebileceği büyük bir yüzeye taşınması için çok uygundur. İstenirse ısının çevreye verildiği kanatlı yüzey su soğutmalı olarak da yapılabilir. Elektronik cihazların soğutulmasında ısı borusunun üstünlüğü, ısı akısından bağımsız olarak cihazın çalışma aralığında yaklaşık bir eş sıcaklık çalışma şartını gerçekleştirmesidir.

Isı borusu bir sıcaklık kontrol elemanı olarak da kullanılabilir. Yoğuşmayan gaz ile dolu depo, ısı borusunun ısı çekilen yerine yerleştirilir. Bu gaz kullanılan çalışma sıvısı ile bir arayüz meydana getirmekte ve yoğuşmanın olduğu fitilin bir kısmını kapatmaktadır. Isının artması ile daha fazla buhar üretildiğinden artan buhar basıncı yoğuşmayan gazı tanka doğru iter. Bu şekilde açığa çıkan ilave yoğuşma alanı sayesinde daha fazla ısı uzaklaştırma olanağı doğar. Isının azalmasında ters olay gözlenir. Eğer ısı kaynağının sıcaklığı ısı borusu içindeki çalışma akışkanı ve gaza bağlı kritik bir değerin altına düşerse sistemde tam bir kapama meydana gelir. Bu şekildeki bir kontrol özelliği bilhassa hızlı ısıtma uygulamalarında gereklidir. Ayrıca değişken ısı yükü şartlarında da düzenleyici olarak vazife görür.

Isı borusu özellikle uzay araçlarında ısı problemlerin çözümünde başarı ile kullanılmaktadır. Bilindiği gibi bu araçların yüzeyine gelen ısı ışınımının düzgün olmaması araç içinde büyük sıcaklık farklarının doğmasına sebep olur. Uzay araçlarını çepeçevre saran ısı boruları yardımıyla bu aşırı sıcaklık farkları denge haline getirilmektedir. Isı borularının başka bir uygulama alanı uydulardır. Uydunun güneşe bakan yüzü aşırı ısınmakta, karanlık yüzü ise çok düşük sıcaklığa maruz kalmaktadır. Buna çare olarak uydunun dış yüzeyine ısı borularından oluşan bir yapı yerleştirilir. Böylece ısınan taraftan ısı borularıyla ısı geçişi sağlanarak uydu çevresel olarak sabit sıcaklıkta tutulmuş olur, **Feldman ve Whiting (1968)**.

Isı borularından ısı akısı dönüştürücüsü olarak da yararlanmak mümkündür. Isı akısının birim alandan iletilen ısı miktarı olduğu hatırlanırsa uygun boru geometrileriyle, ısı akısının istenen değere ulaştırılabileceği anlaşılabilir. Isı borularının bu uygulaması termoiyonik jeneratörlerde radyoaktif izotoplardan elde edilen nispeten düşük ısı akısının, jeneratörlerde kullanmaya yetecek büyüklükte ısı akılarına çevirmekte kullanılır.

Isı boruları yalnız tek yönde ısı geçirecek şekilde sokulabilir. Yalnız bir yönde ısı geçiren, diğer yönde ısı akısı geldiğinde çalışmayan ısı borularına ısı diyot denir.

Dışarı atılan gaz ve sıvıların ısının geri kazanılması son yıllarda ısı borusunun en önemli uygulama alanlarından birini oluşturmuştur.

Ayrıca ısı borusu uygulamaları;

- Uçak fren sistemlerinin soğutulması
- Gaz tribünleri jeneratörlerinde
- Güneş enerjisi toplayıcıları
- Kalorimetre
- Motor yağ devrelerinin soğutulması
- Transformatörlerin soğutulması

gibi bir çok alanda kullanılır, **(Genceli, 1976)**.

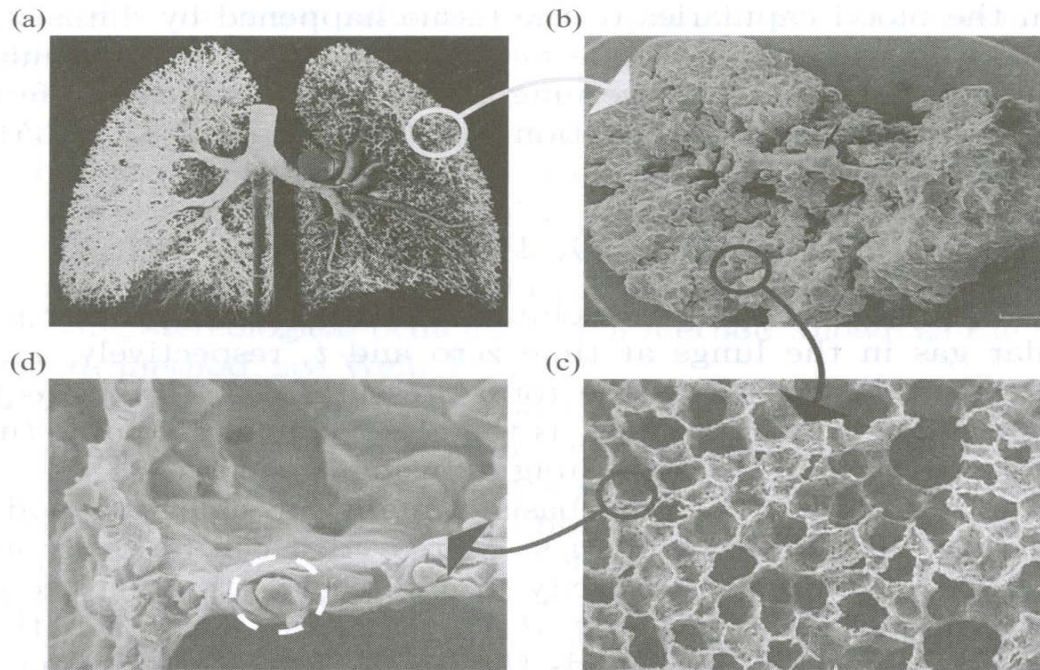
BÖLÜM 3

3.GÖZENEKLİ ORTAMLAR

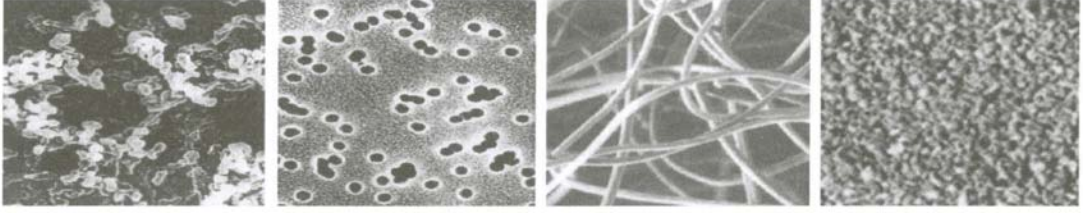
3.1 Gözenekli Ortam Özellikleri

Gözenekli madde içinde delikler bulunan bir katıdır. Ancak içi boş metal bir silindir gözenekli madde olarak sınıflandırılmaz. Zira gözenekli maddeyi oluşturan gözenekler, genellikle çıplak gözle görülmezler.

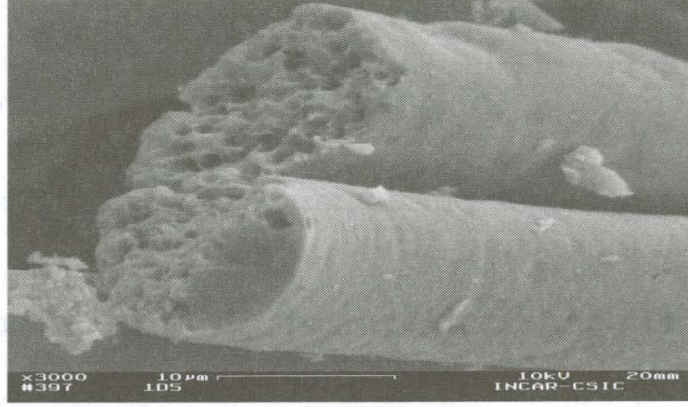
Gözenekli ortam, katı bir iskelet içerisinde birbiri ile irtibatlı boşlukların bulunduğu bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Gözenekli ortamlar, günlük hayatımızda her sahada karşımıza çıkmaktadır. Doğal gözenekli ortam olarak deniz kumu, kumtaşı, kireç taşı, çavdar ekmeği, tahta ve insan akciğerini örnek verebiliriz. Şekil 3.1 ve 3.2’de çeşitli gözenekli ortam örnekleri görülmektedir.



Şekil 3.1: İnsan akciğerinin çeşitli bölgelerinin elektron mikroskobu ile çekilmiş görüntüleri, Lage ve diğ. (2004).



(a)



(b)

Şekil 3.2: Gözenekli ortam örnekleri (a) İnce zar, çekirdeksel gözenekler, lifli ve tanecikli filtre yatakları, (b) Aktif karbon lifler, **(Miguel, 2004)**.

Petrolün yeraltından çıkarılması, jeotermal enerji, kimyasal ve nükleer atıkların depolanması, yalıtım malzemelerinde, çakıl yataklı nükleer reaktörlerin tasarımında, doku içinde kanın akışı ve ısı geçişi problemlerinde, hava ve uzay araçlarında aerodinamik ısınmanın önüne geçmek için kullanılan ısıl kalkan problemleri gibi çok sayıda bilimsel ve teknik alanda gözenekli ortam modellemesi kullanılmaktadır.

Gözenekli ortamlarda akış ile ilgili ilk rastlanan çalışma Henry Philibert Gaspard Darcy tarafından 1856 yılında Fransa'nın Dijon kentine temiz su getirme projesi kapsamında yapılan deneysel bir çalışmadır. Bu ilginç deneysel çalışmanın sonuçları daha sonraları gözenekli ortamlarda akış problemlerine uygulanabilecek güncel bir matematik model haline getirilmiştir ve halen kullanılmaktadır, **(Baytaş, 2006)**.

Günlük hayatımızda, teknolojiye ve doğada her yerde karşılaşılan bir malzemeye gözenekli ortam denebilmesi için aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekir, **(Dullien, 1992)**.

a) Malzeme kendi boyutları ile karşılaştırıldığında içerisinde çok küçük ve birbiri ile irtibatlı boşluklar içerir. Bir katı iskelet içerisinde oluşan bu boşluklar, hava, su vb. akışkanlar veya farklı akışkanlardan oluşan karışımlar içerir.

b) Akışkan katı malzemenin bir ucundan girip öbür ucundan çıkabilmelidir.

Doğal gözenekli ortam içinde bulunan boşlukların büyüklüğü ve şekli düzensizdir. Bu durumda, makroskobik gözenek yapısı değişkenleri gözenekli malzemenin ortalama özelliklerini temsil eder. En önemli gözenek yapısı değişkenleri; gözeneklilik, geçirgenlik ve akış yatağı olarak bilinir. Gözeneklilik ve akış yatağı yapısı gözenekli ortama has özelliklerdir. Fakat geçirgenlik gözenekli ortamın kütle geçiş özelliğini temsil eder.

Gözeneklilik, ε , malzeme içindeki toplam boşluk hacminin malzemenin toplam hacmine oranı şeklinde tanımlanır ve gözeneklilik sıfıra yakın veya hemen hemen bire yakın bir değer alabilir. Gözenekliliğin tanımı aşağıdaki denklemle açıklanabilir.

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_a + V_k} \quad (3.1)$$

Burada, ε ortamın gözenekliliğini, V_a katı içindeki akışkan veya boşluk hacmini ve V_k ise yalnızca katı iskeletin hacmini göstermektedir.

Akış yatağı yapısı, λ , gözeneklilik gibi iki boyutlu gözenekli ortam çalışmalarında gereklidir. Akış yatağı yapısı fiziksel olarak bir sabite eşit değildir; gözenekliliğe, boşluklar arasındaki küçük akış kanallarının şekline, tanecik çapına bağlı olarak değişir.

Akış yatağı yapısının deneysel olarak tespiti çok zordur. **Liu ve Masliyah (1999)** bir çakıl yatak için akış yatağını gözenekliliğe bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlamışlardır.

$$\lambda = \sqrt{\varepsilon} \quad (3.2)$$

Geçirgenlik, K , gözenekli ortamın akış iletkenliğinin veya malzeme içinden akışkanın geçme kolaylığının bir ölçüsüdür. Geçirgenlik akışkanın değil gözenekli malzemenin bir özelliğidir.

Z uzunluğunda, A kesit alanı olan gözenekli ortam için K geçirgenliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$K = \frac{Q\mu}{A (\Delta P / Z)} \quad (3.3)$$

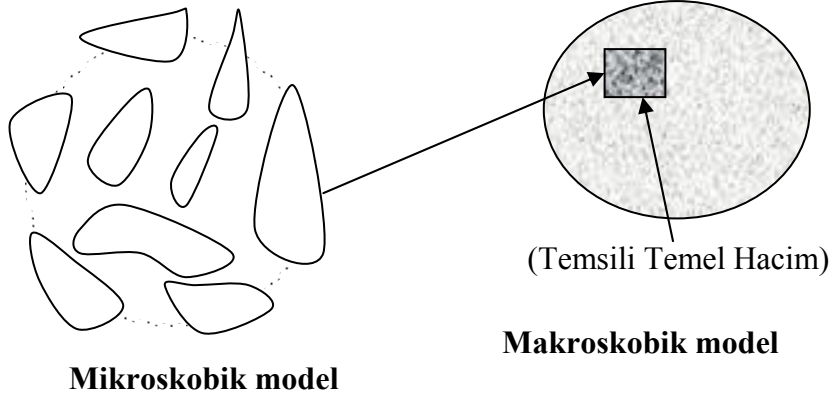
Burada Q debi, μ akışkanın viskozitesi (poise) ΔP ' de örnek uzunluğu boyunca uygulanan basınç farkıdır. Geçirgenlik için en fazla kullanılan birim darcy (d)'dir. 1 darcy kenarları 1 cm olan küpte 1 centipoise (1/100 poise) viskoziteli bir sıvının saniyede 1 cm³ debi ile akışına sebep olur, (Dullien, 1992).

$$1 \text{ darcy} = \frac{1(\text{cm}^3) \cdot 1(\text{cp})}{1(\text{cm}^2) \cdot 1(\text{atm/cm})}$$

3.2 Gözenekli Ortamlarda Temel Korunum Denklemleri

Gözenekli bir ortam, katı ızgara içerisinde boşluklar ve bu boşlukların içerisinde de bir ya da daha fazla akışkan içermektedir. Bu durumda ortam içerisinde korunum denklemlerinin mikroskobik seviyede tanımlanması ve çözümü mümkün değildir. Gözenekli ortamda akışkan akışı ve ısı geçişi, katı ızgara ile birlikte bir miktar boşluğuda içeren hacim üzerinden, niceliklerin ortalaması alınarak incelenebilir. Bu nedenle, gözenekli ortamlarda, ısı ve kütle geçişini tanımlayan temel denklemler yazılırken, Temsili Temel Hacim, TTH (Representative Elementary Volume, REV) tanımı yapılır.

Şekil 3.3'de görülen, TTH tüm gözenekli ortamın özelliklerini temsil edecek boyutta seçilmelidir. TTH'nin boyutu tüm sistemin boyutlarına göre çok küçük fakat gözenek boyutlarına göre büyük olmalıdır. Böylece tüm ortam içinde her bir TTH sıcaklık, hız, yoğunluk ve basınç gibi değişkenleri temsil edebilir.



Şekil 3.3: Temsili temel hacim

3.2.1 Darcy Yasası

Gözenekli ortamda akışı modelleyen en eski yasa Henry Darcy tarafından 1856 yılında yapılan deneysel çalışma sonucu ortaya çıkmıştır.

Darcy'nin deney düzeneğinde, içinde kum bulunan silindirik bir borunun üst kısmından giren su aşağıya doğru kum taneleri arasından süzülerek iner. Akış daimi, gözenekli ortam özdeş ve akış tek yönlüdür. Akışın hızı hayli düşüktür.

Darcy deneyleri sonucunda, akışkanın kum ile dolu kısmına girdiği sütunun üst ve çıktığı alt seviyedeki basınç farkı ile akışkanın akışı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu bulmuştur. Bugünkü düzenlenmiş hali ile Darcy yasası aşağıdaki gibidir, **Nield ve Bejan (1999)**.

$$v = -\frac{K}{\mu}(\nabla P + \rho g) \quad (3.4)$$

Denklemden v , darcy hızı olarak bilinir. ∇P ise akışkan kısmı içinde basınç değişim vektörüdür. K , yöne göre özellikleri değişmeyen gözenekli ortamın geçirgenliğini, ρ akışkanın özkütlesini, μ ise akışkanın dinamik viskozitesini verir. Bu denklem doğrusal bir denklemdir. Yani akışın doğrusal olmayan etkisini modelleyemez. Denklemden viskoz etkiler yer almaz ve en önemlisi katı sınırlar göz önüne alındığında sınırın sürtünme etkisini görmez.

3.2.2 Ergün Denklemi

Darcy yasası bir çok araştırmacı tarafından geliştirilmiş ve daha yüksek hızlardaki akışlarda akışın doğrusal olmayan etkisini modellemeye yardımcı olmuştur. Bu çalışmaların en önemlilerinden biri Sabri Ergün tarafından yapılan bir deneysel çalışma sonucu elde edilen bağıntıdır,

$$-\frac{dP}{dx} + \rho g_x = \frac{\mu}{K} v + \rho F v^2 \quad (3.5)$$

Denklem Hazen-Dupit-Darcy denklemi olarak da bilinir. Ergün'ün deneyinde gözenekli ortam küçük kürecikler bulunan bir akış kanalından ibarettir.

Denklemin sağ tarafındaki ilk terim viskoz sürüklenme kuvvetini, son terim ise şekil sürüklenme kuvvetini göstermektedir. Denklemden $F = C_E / \sqrt{K}$ gözenekli ortamın şekil sürtünme katsayısıdır. K ve C_E Sabri Ergün tarafından deneysel olarak aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$K = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{D (1 - \varepsilon)^2} ; C_E = \frac{B}{(150 \varepsilon^3)^{1/2}} \quad (3.6)$$

D ve B deneysel sabitler olup $D = 150$ $B = 1.75$ olarak bulunmuştur. Buradaki d_p ise deneyde gözenekli ortamı oluşturan küreciklerin çapıdır.

3.2.3 Brinkman Denklemi

Darcy yasasına göre yazılan denklemde viskoz yayılma etkisi görülmemektedir. Bunu gidermek için Brinkman 1947'de Darcy bağıntısını aşağıdaki gibi düzenlemiştir.

$$\nabla P + \rho g_x = \frac{\mu}{K} v - \mu_e \nabla^2 v \quad (3.7)$$

μ_e gözenekli ortamda akan akışkanın etkin viskozitesini göstermektedir. Brinkman denkleminin son terimi akış içinde viskoz kuvvetleri tanımlar. Darcy sınır etkisini göz önüne almazken, Brinkman denklemi ile bu eksikliği gidermiştir, fakat bu denklemde de atalet kuvvetler görülmez.

3.2.4 Korunum Denklemleri

Ergün ve Brinkman denklemleri, bir gözenekli ortam içinde akışı bütün akış hızları için modelleyememektedir. Gözenekli ortamı tüm durumlar için modelleyen genel korunum denklemlerine ihtiyaç vardır.

3.2.4.1 Kütle Korunum Denklemi

Gözenekli bir ortamda akış için hacim ortalanmış korunum denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir. Burada ρ akışkanın özkütlesidir.

$$\varepsilon \frac{d\rho}{dt} + \nabla (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3.8)$$

Burada \mathbf{v} akışkan içinde toplam hacim (katı+akışkan) üzerinden ortalama hızı gösterir. Denklem (3.8) sadece bir akışkandan oluşan ortamlar için yazılan kütle korunum denklemine benzerdir. Eğer gözenekli ortam içerisindeki akışkan sıkıştırılmaz ise süreklilik denklemi gözenekli ortam için de akışkandan oluşan ortamlar için yazılan ile aynıdır, $\nabla \bar{\mathbf{v}} = 0$ şeklindedir, **(Baytaş, 2006)**.

3.2.4.2 Momentum Denge Denklemi

Gözenekli ortamlarda akış alanı incelenirken, Darcy kanununu içeren Brinkman denkleminin etkisini de taşıyan ve nicelikleri TTH üzerinden ortalama alınarak tanımlanan Navier-Stokes denklemi çözülür, **Vafai ve Tien (1981)**.

$$\rho \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \frac{1}{\varepsilon^2} (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \mu_e \nabla^2 \mathbf{v} - \frac{\mu}{K} \mathbf{v} - F\rho |\mathbf{v}| \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (3.9)$$

Denkleminde ilk terim yerel ivmelenmeyi, ikinci terim atalet terimlerini, üçüncü terim gözenekli ortam içinde akışkanın basınç değişimini, dördüncü terim viskoz kuvvetleri, beşinci terim Darcy akışı etkisi ile viskoz sürüklenme kuvvetini, altıncı terim şekil sürüklenme kuvvetini ve son terim ise gövde kuvvetlerini göstermektedir.

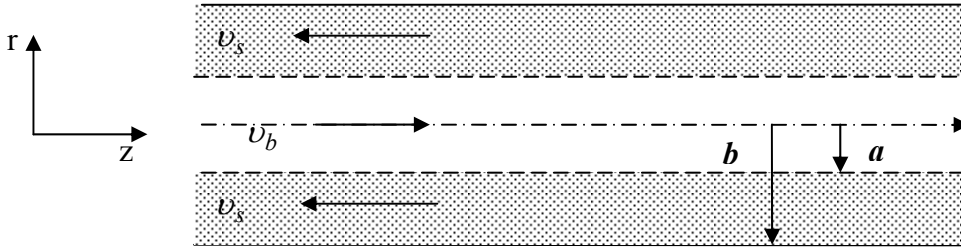
BÖLÜM 4

4. ISI BORUSUNDA YALITILMIŞ BÖLGEDE AKIŞIN İNCELENMESİ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında bir ısı borusunun yalıtılmış bölgesindeki akış incelenmiştir. Isı borusunun yalıtılmış bölgesinde, gözenekli ortamda sıvı akışı ve merkezdeki boşlukta ters yönde buhar akışı olmak üzere birbirine zıt yönde iki akış olayı gerçekleşmektedir.

4.1 Yalıtılmış Bölgede Korunum Denklemleri

Isı borusunun yalıtılmış bölgesinin geometrisi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1: Isı borusunun yalıtılmış bölgesi

Şekil 4.1’de b ısı borusunun yarıçapını, $(b-a)$ gözenekli ortamın kalınlığını, v_b buhar hızını ve v_s sıvı hızını göstermektedir. Yarıçapı a olan bölgede buhar akışı soldan sağa doğru, gözenekli ortam içerisinde ise sıvı akışı sağdan sola doğrudur. Isı borusunun enine kesitinde buhar basınç değişiminin değeri her noktada aynıdır.

Isı borusunun yalıtılmış bölgesinde akış incelenirken aşağıdaki kabuller yapılmaktadır:

- 1- Akış tamamen gelişmiş ve daimidir.
- 2- Akışkan ve gözenekli ortama ait özellikler (yoğunluk, viskozite, vb.) sabittir.
- 3- Gözenekli ortam yüksek geçirgenliğe sahiptir ve akışkan ile doymuş haldedir.

Isı borusunun buhar bölgesi için silindirik koordinatlarda kütle korunum denklemi genel hali ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

Boruda buhar bölgesinde, akış duvarlara paralel olduğu için r ve θ yönündeki hızlar sıfırdır, ($v_r = v_\theta = 0$), sadece akış yönündeki v_z hızı mevcuttur. Yukarıda verilen kabullere göre de akış daimi olduğu için kütle korunumu denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad ; \quad v_z = v_z(r) \quad (4.2)$$

Denklem (4.2) z yönündeki hızın sadece r yönünde değiştiğini göstermektedir. Bu aynı zamanda tam gelişmiş akış özelliğidir. Yine buhar bölgesindeki akış için, silindirik koordinatlarda Navier-Stokes denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z \quad (4.3)$$

$$+ \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right)$$

Yapılan kabuller ve kütle korunumu denklemi dikkate alındığında Navier-Stokes denklemi aşağıdaki şekle dönüşür.

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + r \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} \right) \quad (4.4)$$

Bu denklem buhar bölgesi için yazıldığından b indisi buhar bölgesini tanımlamak üzere, momentum korunum denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\mu_b \left(\frac{d^2 v_b}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_b}{dr} \right) = \frac{dP_b}{dz} \quad (4.5)$$

Burada, μ_b , ν_b , P_b sırasıyla buhar viskozitesi, buhar akış hızı ve buhar basıncıdır. Isı borusunda sıvı gözenekli ortam içerisinde akmaktadır. Dolayısı ile sıvı bölgesinde gözenekli ortam için momentum denklemi oluşturulmuştur.

Gözenekli ortam için, yapılan kabuller dikkate alınarak ve Darcy kanunundan da yararlanılarak yazılan Navier-Stokes denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\mu_s \left(\frac{d^2 v_s}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_s}{\partial r} \right) - \frac{dP_s}{dz} - \frac{\mu_s}{K} v_s = 0 \quad (4.6)$$

Bu denklem aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$\mu_s \left(\frac{d^2 v_s}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_s}{\partial r} \right) = \frac{dP_s}{dz} + \frac{\mu_s}{K} v_s \quad (4.7)$$

Burada, μ_s , P_s , ν_s sırasıyla sıvının viskozitesi, sıvı basıncı ve sıvı akış hızıdır. K ise gözenekli ortamın geçirgenliğidir. Denklem (4.5) ve (4.7) için sınır koşulları aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} r = b & , v_s = 0 \\ r = a & , v_s = \nu_b \\ r = a & , \mu_b \frac{dv_b}{dr} = \mu_s \frac{dv_s}{dr} \\ r = 0 & , \frac{dv_b}{dr} = 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Denklem (4.5) ve (4.7)'nin boyutsuzlaştırılması için kullanılan boyutsuz değişkenler aşağıdaki gibidir.

$$R = \frac{r}{a} , V_b = \frac{a}{\nu_b} \nu_b , V_s = \frac{a}{\nu_s} \nu_s \quad (4.9)$$

Denklem (4.9) kullanılarak denklem (4.5) aşağıdaki gibi boyutsuzlaştırılmıştır.

$$\frac{d^2 V_b}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dV_b}{dR} = G \quad (4.10)$$

Burada $G = \frac{dP_b}{dz} \frac{a^3}{v_b \mu_b}$ şeklinde ifade edilmiştir. Burada v_b buharın kinematik viskozitesidir.

Denklem (4.7)'nin boyutsuz hali aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d^2 V_s}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dV_s}{dR} - \sigma^2 V_s = H \quad (4.11)$$

Burada $\sigma^2 = \frac{a^2}{K}$ ve $H = \frac{a^3}{\mu_s v_s} \frac{dP_s}{dz}$ şeklindedir. Burada σ , v_s sırasıyla boyutsuz geçirgenlik değişkeni ve sıvının kinematik viskozitesi olarak tanımlanmıştır. Sınır koşulları denklem (4.9) kullanılarak boyutsuz halde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} R = \frac{b}{a}, \quad V_s &= 0 \\ R = 1, \quad V_s &= fV_b \\ R = 1, \quad \frac{dV_s}{dR} &= \frac{f}{S} \frac{dV_b}{dR} \\ R = 0, \quad \frac{dV_b}{dR} &= 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Bu denklemde yer alan $f = \frac{v_b}{v_s}$, $S = \frac{\mu_s}{\mu_b}$ şeklindedir.

Denklem (4.12)'deki sınır koşulları kullanılarak denklem (4.10) ve (4.11)'in çözümü ile elde edilen buhar ve sıvı bölgelerindeki akışkanların hızları aşağıdaki gibidir.

$$V_b = \frac{Q}{f} \left(\frac{D_1}{D_0} + \frac{1}{4} SR^2 \right) \quad (4.13)$$

$$V_s = Q \left(\frac{D_2}{D_0} I_0(\sigma R) + \frac{D_3}{D_0} K_0(\sigma R) - \frac{P}{\sigma^2} \right) \quad (4.14)$$

Denklem (4.10) ve (4.11)'den denklem (4.13) ve (4.14)'e geçiş Ek_A'da ayrıntılı olarak verilmiştir. Denklem (4.13) ve (4.14)'de yer alan bazı değişkenler Tablo 4.1'de ve aşağıda verildiği gibidir.

$$D_0 = -I_0(R^* \sigma)K_1(\sigma) - I_1(\sigma)K_0(R^* \sigma) \quad (4.15a)$$

$$D_1 = \det \begin{bmatrix} \left(-\frac{P}{\sigma^2} - \frac{S}{4}\right) & -I_0(\sigma) & -K_0(\sigma) \\ \frac{P}{\sigma^2} & I_0(R^* \sigma) & K_0(R^* \sigma) \\ \frac{1}{2\sigma} & I_1(\sigma) & -K_1(\sigma) \end{bmatrix} \quad (4.15b)$$

$$D_2 = -\frac{PK_1(\sigma)}{\sigma^2} - \frac{1}{2\sigma}K_0(R^* \sigma) \quad (4.15c)$$

$$D_3 = \frac{I_0(R^* \sigma)}{2\sigma} - \frac{P}{\sigma^2}I_1(\sigma) \quad (4.15d)$$

Tablo 4.1 : Denklemlerde Yer Alan Bazı Değişkenler

Değişkenler	Açık ifadesi
R^* (Bağıl Gözenekli Ortam Kalınlığı)	$= \frac{b}{a}$
P (Basınç Değişim Oranı)	$= \frac{dP_s}{dz}$ $= \frac{dz}{dP_b}$
σ^2 (Boyutsuz Geçirgenlik Değişkeni)	$= \frac{a^2}{K}$
f (Kinematik Viskozite Oranı)	$= \frac{v_b}{v_s}$
S (Dinamik Viskozite Oranı)	$= \frac{\mu_s}{\mu_b}$
H	$= \frac{a^3}{\mu_s v_s} \frac{dP_s}{dz}$
Q	$= \frac{a^3}{\mu_s v_s} \frac{dP_b}{dz}$
G	$= \frac{dP_b}{dz} \frac{a^3}{v_b \mu_b}$

Isı borusunda kütle akış hızı, buhar ve sıvı bölgesi için ayrı ayrı yazılabilir. Buhar bölgesi için kütle akışı, aşağıdaki gibidir.

$$m_b = 2\pi \int_0^a \rho_b v_b r dr \quad (4.16)$$

Burada m_b buhar kütle akış hızını ρ_b ise buhar yoğunluğunu göstermektedir. Denklem (4.16)'da, denklem (4.9)'daki boyutsuz değişkenler ve buhar hızını veren denklem (4.13) yerine konursa buhar kütle akış hızı aşağıdaki gibi yeniden elde edilir.

$$m_b = 2\pi \mu_b \frac{1}{a} \int_0^a \frac{Q}{f} \left(\frac{D_1}{D_0} + \frac{1}{4} SR^2 \right) r dr \quad (4.17)$$

Denklem (4.17)'de integral işlemi gerçekleştirildikten sonra buhar kütle akış hızı aşağıdaki gibi bulunur.

$$m_b = \pi a \mu_b \frac{Q}{f} \left(\frac{D_1}{D_0} + \frac{S}{8} \right) \quad (4.18)$$

Benzer şekilde sıvı bölgesi için kütle akışı;

$$m_s = 2\pi \int_a^b \rho_s v_s r dr \quad (4.19)$$

şeklindedir. Burada da denklem (4.9)'daki boyutsuz değişkenler ve sıvı hızını veren denklem (4.14) yerine konur ve integral işlemi gerçekleştirilirse, sıvı kütle akış hızı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$m_s = \frac{2\pi a \mu_b Q}{\sigma} \left\{ R^* \left[\frac{D_2}{D_0} I_1(R^* \sigma) - \frac{D_3}{D_0} K_1(R^* \sigma) - \frac{PR^*}{2\sigma} \right] - \left[\frac{D_2}{D_0} I_1(\sigma) - \frac{D_3}{D_0} K_1(\sigma) - \frac{P}{2\sigma} \right] \right\} \quad (4.20)$$

Denklem (4.20) elde edilirken kullanılan Bessel fonksiyonlarının integral ifadeleri aşağıdaki gibidir, (El-Wakil, 1962).

$$\int I_0(\alpha z).z.dz = \frac{I}{\alpha} z.I_1(\alpha z)$$

$$\int K_0(\alpha z).z.dz = -\frac{I}{\alpha} z.K_1(\alpha z)$$

Isı borusunun yalıtılmış bölgesinde bu iki kütle akışı birbirine eşit olmalıdır. Isı borusunun gücü (ısı geçiş sığası) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Güç = mL \quad (4.21)$$

Burada. m dengelenmiş kütle akışı ve L ise sıvının gizli ısısıdır.

4.2 Yalıtılmış Bölgenin Analitik Olarak İncelenmesi

Bu yüksek lisans tez çalışmasında ısı borusunun yalıtılmış bölgesini modellemek için Şekil 4.1’de verilen, gözenekli bölgede sıvı akışının, merkezde ve ters yönde buhar akışının olduğu matematiksel model analitik olarak çözülmüştür. Sonuçlar basınç değişimi, boyutsuz geçirgenlik değişkeni ve gözenekli ortamın bağıl kalınlığı gibi değişkenlere bağlı olarak incelenmiştir. Sıvı ve buhar fazları için hız dağılımı denklem (4.13), (4.14) ve (4.15 a-g)’den görüleceği gibi gözenekli tabakanın bağıl kalınlığına ve gözenekli ortamın geçirgenliğine bağlıdır.

Hız eğrilerinin çeşitli değişkenlere bağlı olarak incelendiği Şekil 4.2, ve 4.3’de hız eğrileri verilirken yatay eksen sıvı bölgesi için (V_s / Q) olarak, buhar bölgesi için ise $(V_b f / Q)$ olarak verilmiştir. Yine bu şekillerden görüleceği gibi $R = 0 - 1.0$ arası buhar bölgesini, $R = 1.0 - 2.0$ arası ise sıvı bölgesini yani gözenekli bölgeyi temsil etmektedir. Çalışma sıvısı olarak da $50^\circ C$ deki su kullanılmıştır.

Şekil 4.2’de buhar ve sıvı hızlarının dağılımı farklı boyutsuz geçirgenlik değişkeni (σ) için verilmiştir. Burada $\sigma = 0.2, 1.0, 3.0, 10.0, 15.0$ değerlerini almakta olup Şekil 4.2 için basınç değişim oranı, $P = 1.5$, mutlak viskozite oranı, $S = 53.3$ (Bu değer $50^\circ C$ deki su ve buharı için dinamik viskozite oranını göstermektedir.) ve bağıl gözenekli ortam kalınlığı, $R^* = 2.0$ olarak alınmıştır.

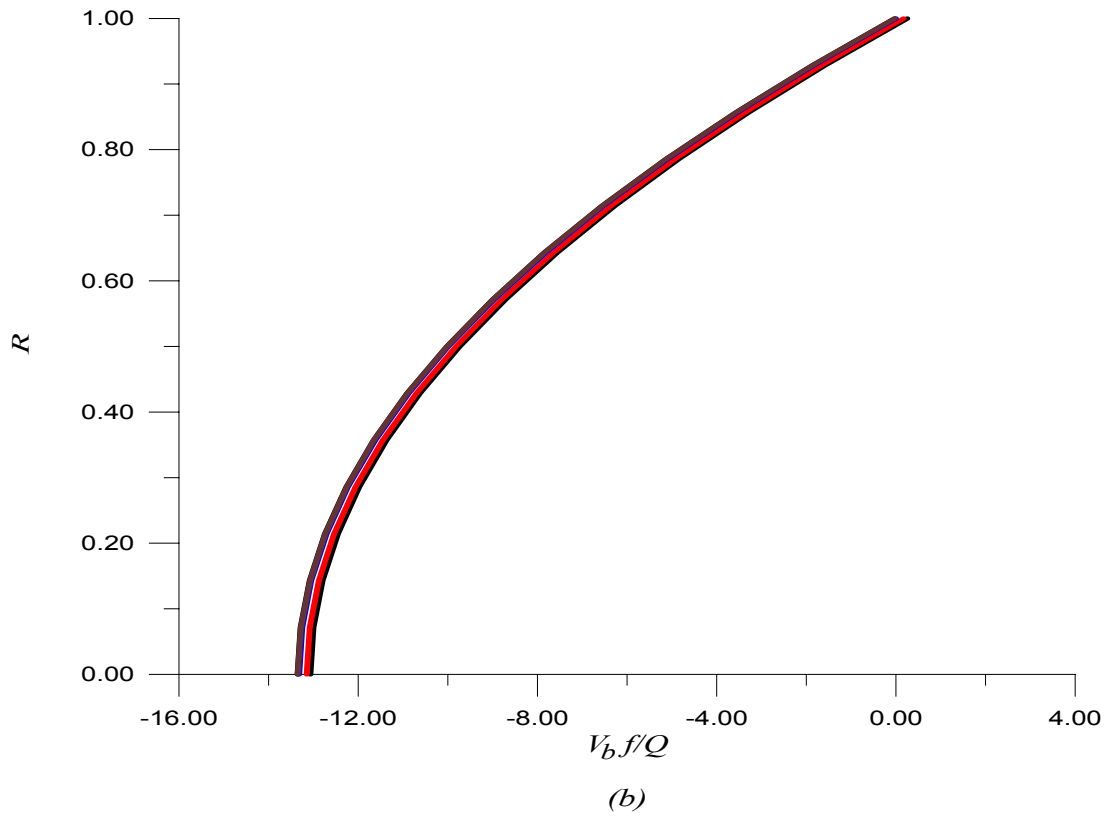
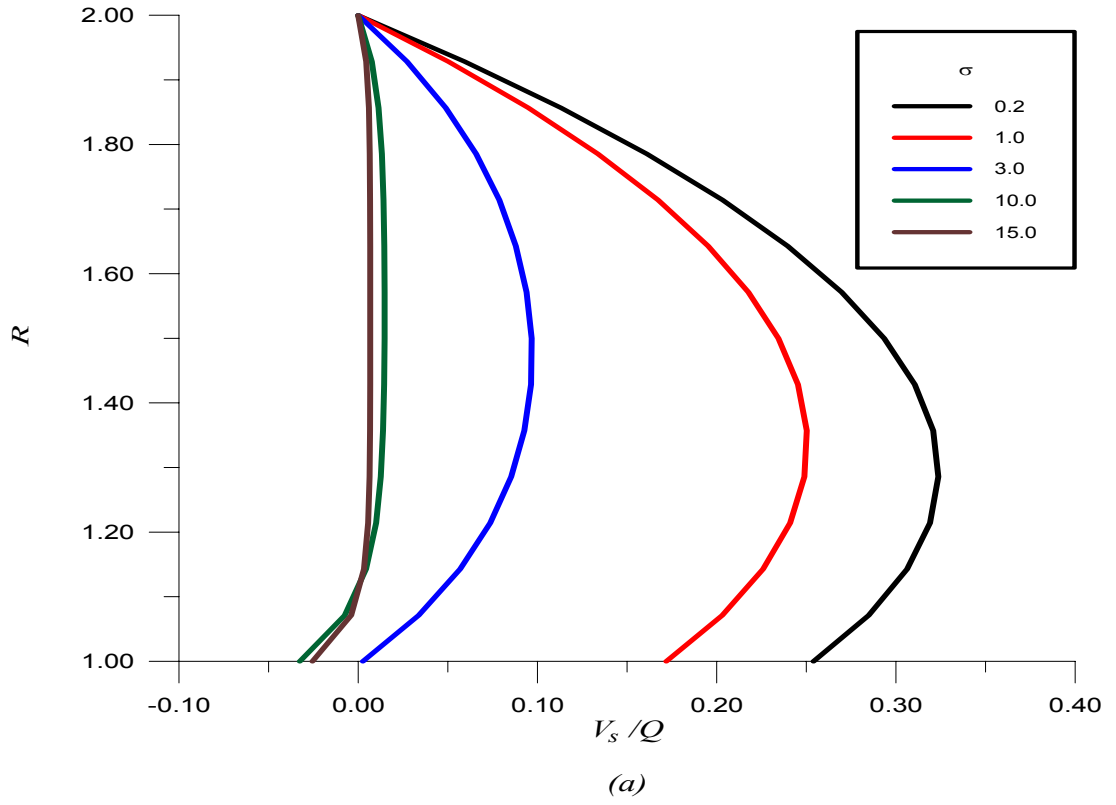
Şekil 4.2 deki hız eğrilerinden görüldüğü gibi, boyutsuz geçirgenlik değişkenleri azaldıkça buhar hızında önemli bir değişim olmamakta ama sıvı hızları artmaktadır. Burada boyutsuz geçirgenlik değişkeni ile bahsettiğimiz $\sigma = \sqrt{a^2/K}$ ifadesidir. Burada $a = 25.10^{-3} m$ olarak alınmıştır. Denklemden anlaşılacağı gibi boyutsuz geçirgenlik değişkeni azaldıkça geçirgenlik artmaktadır. Geçirgenliğin artması da hızları artırmaktadır. Boyutsuz geçirgenlik değişkeni 10.00 dan büyük olduğunda önemli bir hız değişikliği göze çarpmamaktadır.

Şekil 4.3’de buhar ve sıvı hızlarının dağılımı farklı basınç değişim oranları (P) için verilmiştir. Burada $P = 1.5, 5.0, 10.0, 15.0$ değerlerini almakta olup Şekil 4.3 için boyutsuz geçirgenlik değişkeni $\sigma = 3.0$, bağıl gözenekli ortam kalınlığı $R^* = 2.0$, mutlak viskozite oranı $S = 53.3$, olarak alınmıştır.

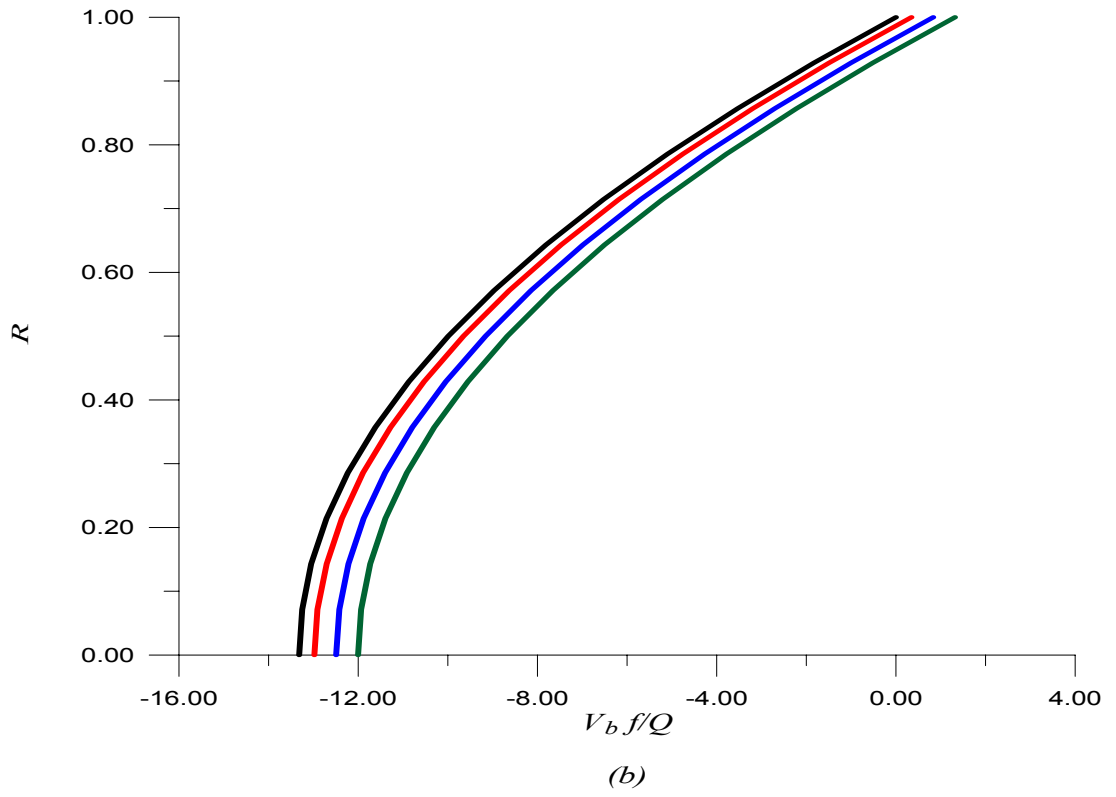
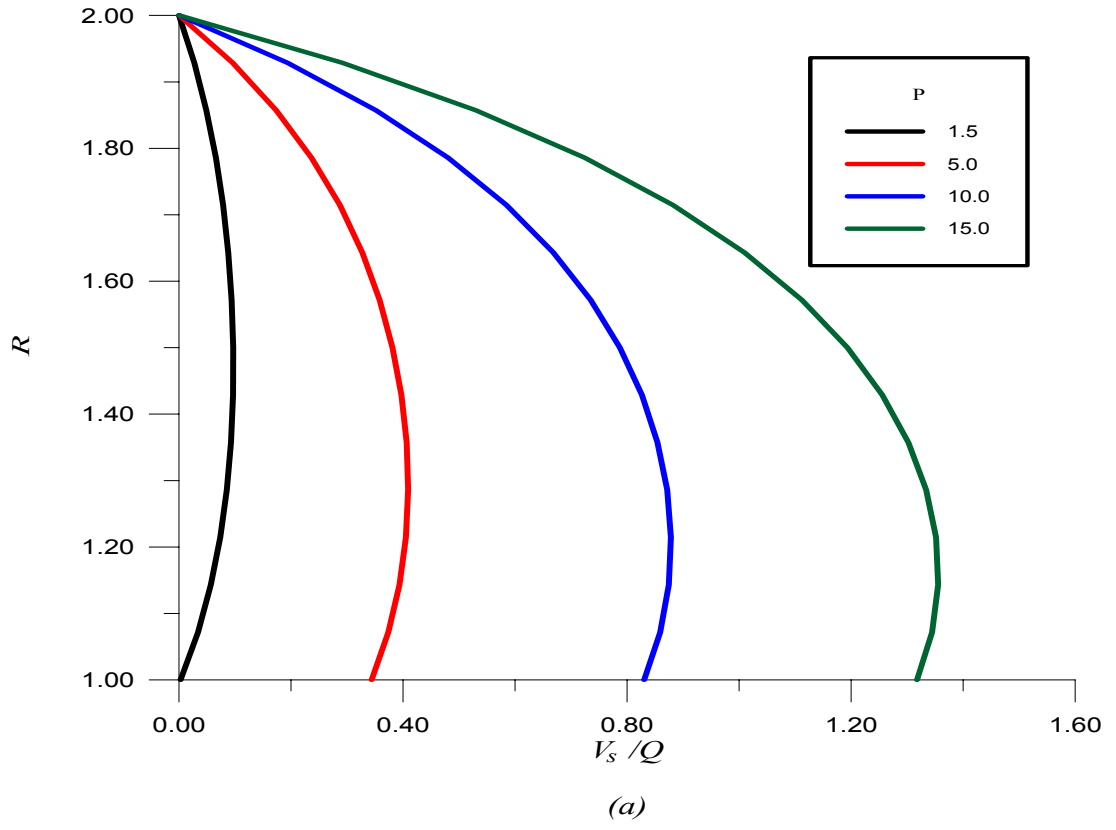
Şekil 4.3’deki hız eğrilerinden net bir şekilde görülüyor ki; basınç değişim oranı arttıkça özellikle sıvı hızı artmaktadır. Denklem (4.14)’den görüleceği gibi sıvı hızı basınç değişim oranını içermektedir, aynı zamanda denklem (4.14)’de yer alan D_2 ve D_3 katsayılarında, denklem (4.15 c-d), basınç değişim oranı bulunmaktadır. Bu nedenle basınç değişim oranı özellikle sıvı hızının artışı sağlamaktadır. Öte yandan, denklem (4.13)’e göre basınç değişim oranı buhar hızı ifadesinde görünmemekle birlikte, denklemde yer alan D_1 katsayısı, denklem (4.15b), basınç değişim oranını içermektedir. Bu nedenle, basınç değişim oranının artışı sıvı hızına göre daha az miktarda da olsa buhar hızının artışı sağlamaktadır.

Isı borusunda basınç değişim oranı fitilin yapısına, çalışma sıvısının özelliklerine ve borunun tasarımına bağlıdır. Denklem (4.13), (4.14), (4.18) ve (4.20)’den görüleceği gibi buhar basıncı değişimi hem hız hem de kütle akış hızını etkilemektedir. Zira söz konusu denklemlerde yer alan P ve Q , denklem (4.15 f ve g), buhar basıncı değişimini içermektedir. Bu nedenle Şekil 4.4’te farklı boyutsuz geçirgenlik değişkenleri (σ) için buhar basıncının değişimi farklı bağıl gözenekli ortam kalınlıklarında incelenmiştir. Buhar basınç değişimi hesaplanırken ısı borusunun yalıtılmış bölgesinde buhar ve sıvı kütle akış hızı birbirine eşit olması şartı göz önüne alınmıştır.

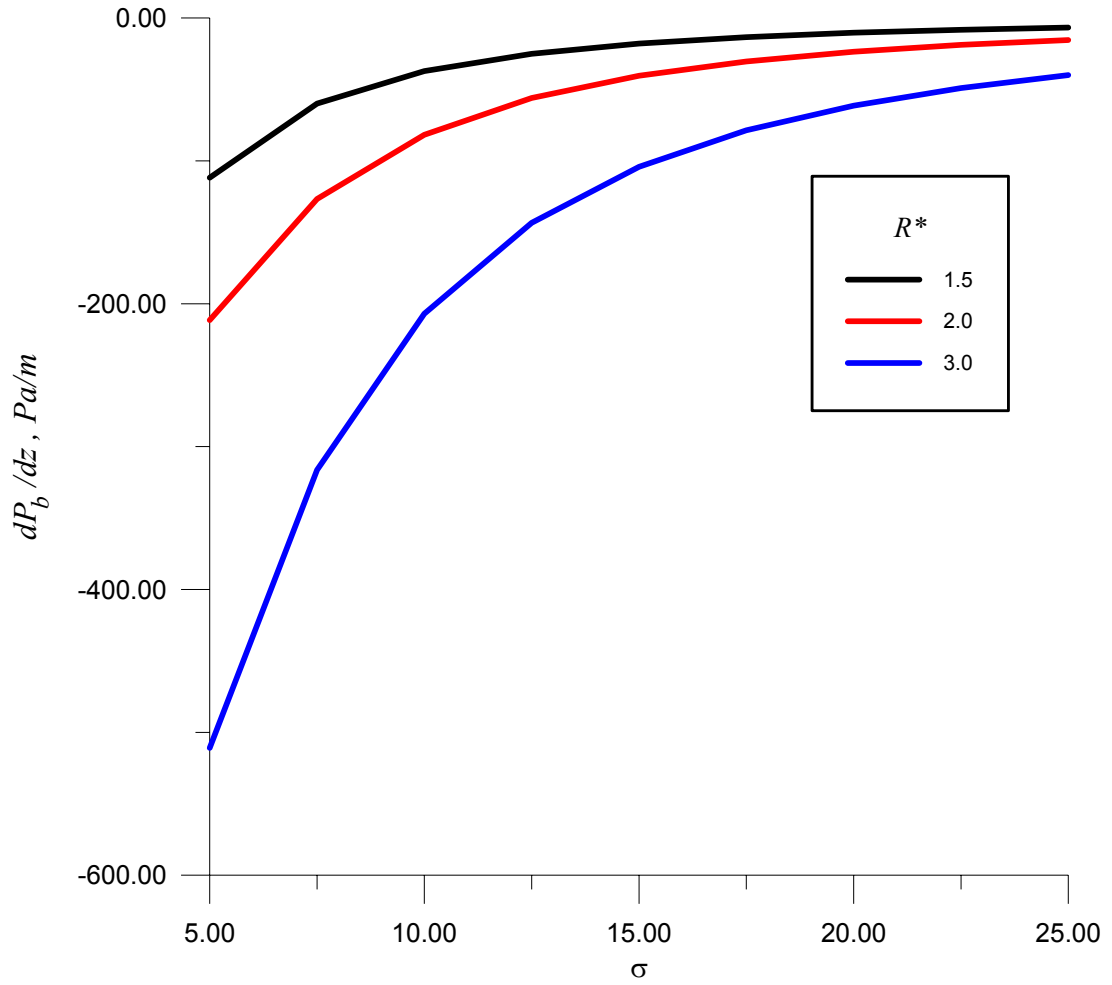
Şekil 4.4'deki buhar basınç değişim eğrilerinden görüldüğü gibi boyutsuz geçirgenlik değişkeni arttıkça buhar basınç değişim oranı artış göstermektedir, ancak boyutsuz geçirgenlik parametresi 15.0 'den büyük olduğunda bu artış hızı düşmektedir. Ayrıca burada buhar akışı, sıvı akışına ters yönde olduğundan dolayı buhar basınç değişim oranı negatiftir. Burada elde edilen basınç değişimleri kütle akış hızının hesaplanmasında kullanılacaktır, zira buhar basıncının değişimi gözenekli ortamda kütle akış hızını etkilemektedir. Ayrıca Şekil 4.4'den görüldüğü gibi gözenekli ortamın bağıl kalınlığı arttıkça buhar basınç değişimi azalmaktadır.



Şekil 4.2 : Farklı boyutsuz geçirgenlik değişkenlerinde hız değişimi,
 $P = 1.5$, $S = 53.3$, $R^* = 2.0$ için a) Sıvı b) Buhar hızı eğrileri



Şekil 4.3 : Farklı basınç değışimi oranları, $\sigma = 3.0$, $S = 53.3$, $R^* = 2.0$ için
a) Sıvı b) Buhar hızı eğrileri

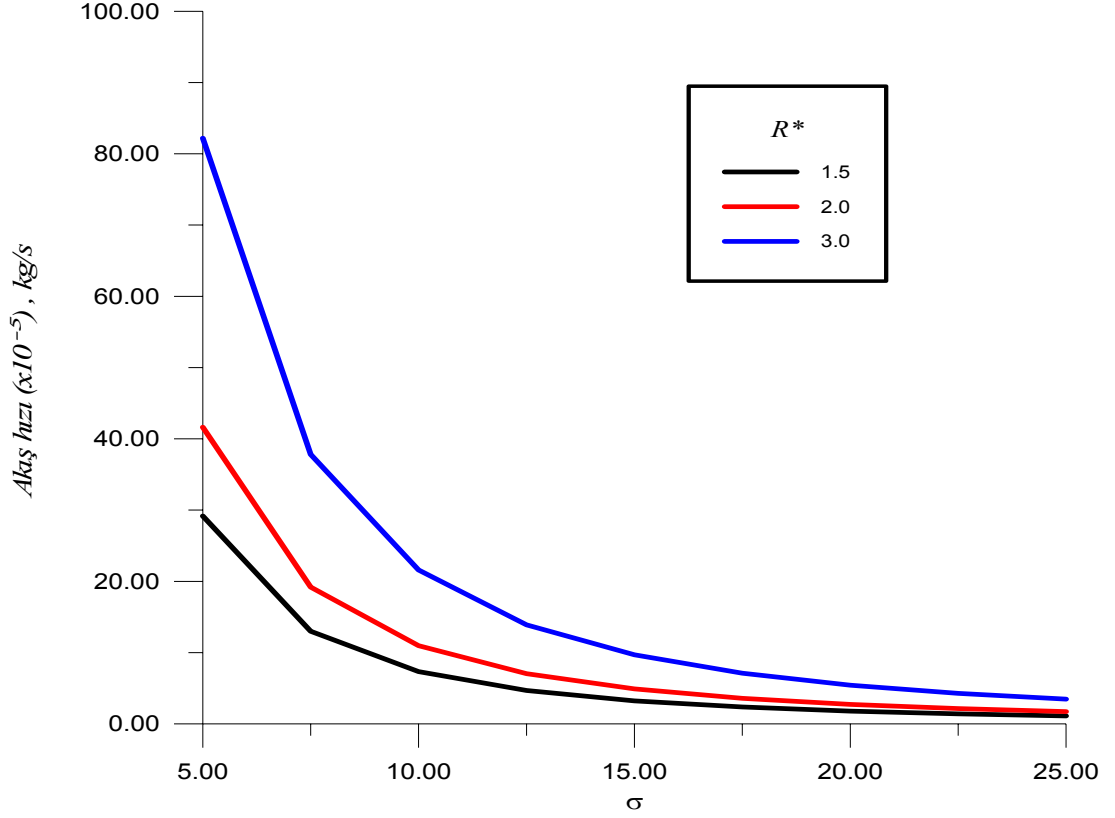


Şekil 4.4 : Farklı boyutsuz geçirgenlik değişkenlerinde basınç değişimi,

$$dP_s / dz = 100.0 \text{ Pa} / m, S = 53.3$$

Şekil 4.5’de farklı boyutsuz geçirgenlik değişkenlerinde kütle akış hızı incelenmiştir. Kütle akış hızı eğrilerinden görüldüğü gibi boyutsuz geçirgenlik değişkeni arttıkça kütle akış hızı azalmaktadır. Bilindiği gibi boyutsuz geçirgenlik değişkenlerinin artması geçirgenliği azaltacak, dolayısıyla buhar basınç değişimi artacaktır. Bu da kütle akışının azalmasına sebep olacaktır.

Şekil 4.5’den bağıl gözenekli ortam kalınlığının artmasının kütle akışını arttırdığı görülmektedir. Burada bağıl gözenekli ortam kalınlığının artması fitilin kalınlığının artması demektir. Fitilin kalınlığı arttıkça buhar basınç değişimi azalacak bu da yüksek buhar hızına sebep olacaktır. Yüksek buhar hızı da ters yöndeki sıvı akışını hızlandıracaktır.

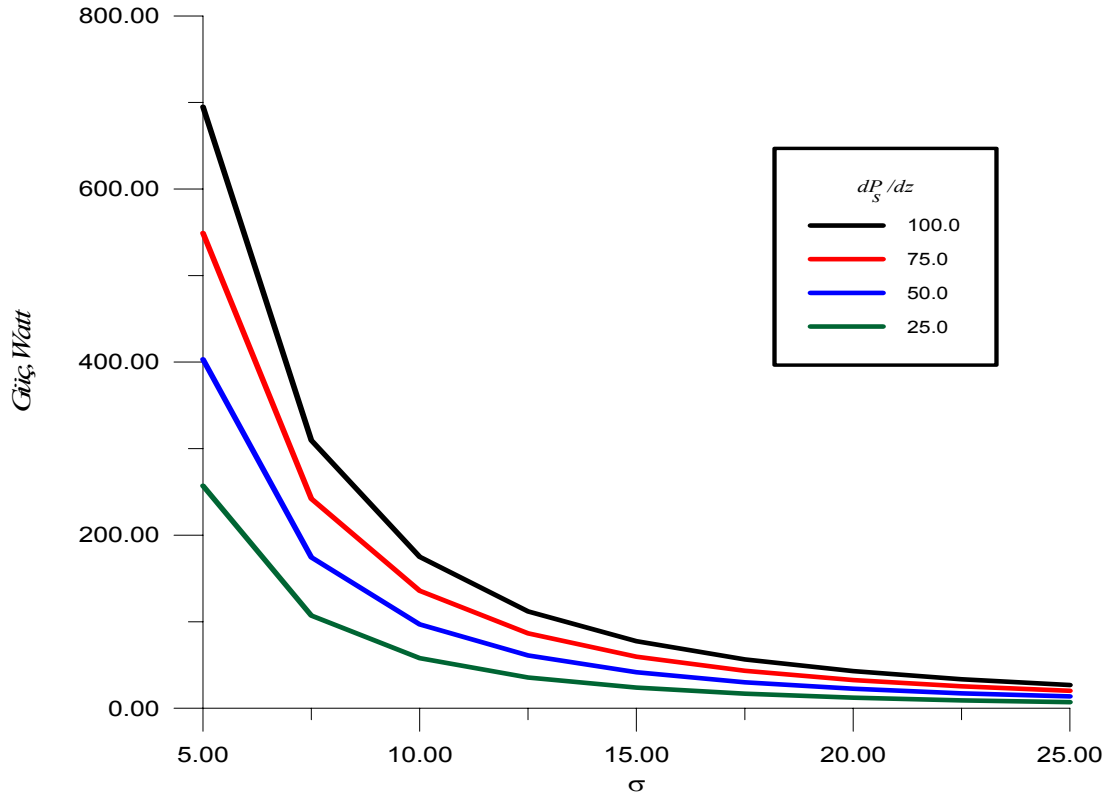


Şekil 4.5: Farklı boyutsuz geçirgenlik değişkenlerinde kütle akış hızı,

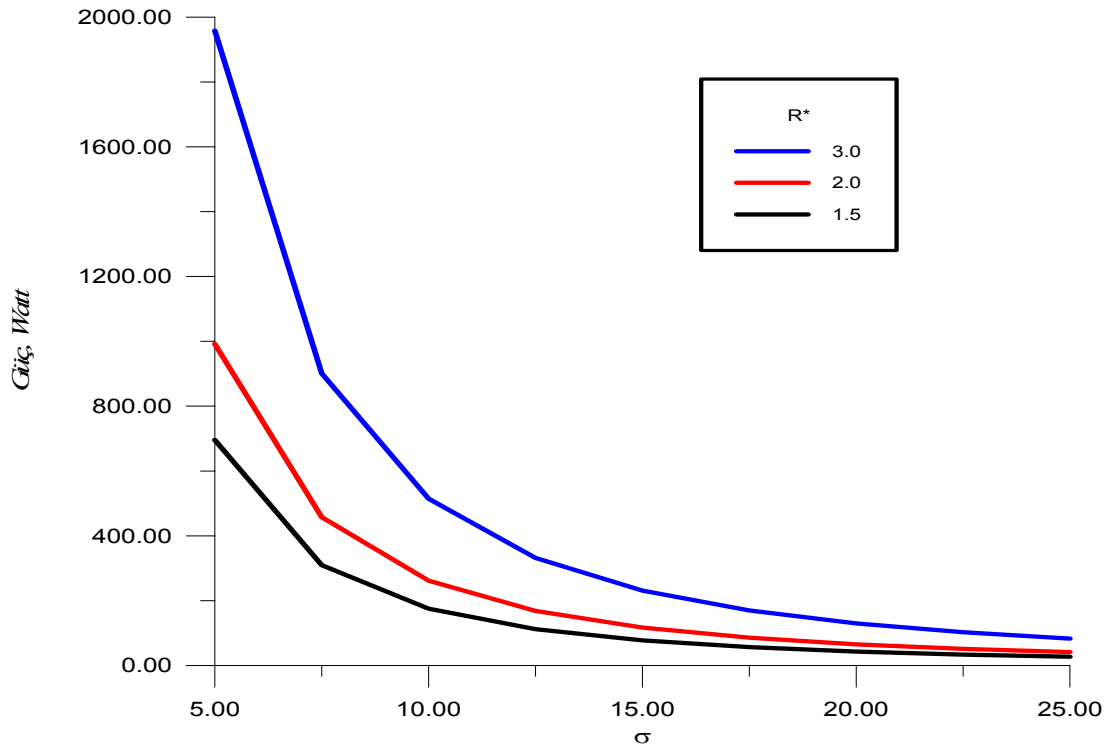
$$dP_s / dz = 100.0 \text{ Pa} / m, S = 53.3$$

Şekil 4.6'de farklı boyutsuz geçirgenlik değişkenlerinde (σ) için güç dağılımı farklı sıvı basınç değişimi değerlerinde incelenmiştir. Burada gizli ısı $50^\circ C$ su için $L = 2382 \text{ kJ} / \text{kg}$ alınmıştır. (Faghri, 1995)

Şekil 4.6'dan görüldüğü gibi, sıvı basıncının değişiminin her değeri için boyutsuz geçirgenlik parametresi arttıkça ısı borusunun gücü azalmaktadır. Yani gözenekli ortam geçirgenliğinin azalması ve dolayısıyla ortamda kütle akışının zorlaşması, ısı borusunun gücünü azaltmaktadır. Ayrıca Şekil 4.6'dan görüleceği gibi, sıvı basıncının değişiminin değeri arttıkça ısı borusunun da gücü artmaktadır. Şekil 4.6'da bağıl gözenekli ortam kalınlığı $R^* = 1.5$ olarak alınmıştır. Bağıl gözenekli ortam kalınlığının ısı borusunun gücü üzerindeki etkisini incelemek üzere Şekil 4.7'de $dP_s / dz = 100.0, \text{ Pa} / m$ değeri için (Şekil 4.6'da ısı borusunun gücünün en yüksek olduğu sıvı basıncı değişimi değeri) $R^* = 1.5, 2.0, 3.0$ için güç-boyutsuz geçirgenlik değişkeni eğrileri çizdirilmiştir. Şekil 4.7'den görüleceği gibi bağıl gözenekli ortam kalınlığı arttıkça ısı borusunun gücü artmaktadır.



Şekil 4.6: Farklı boyutsuz geçirgenlik değişkenleri ve sıvı basınç değişimi için ısı borusunun gücü, $S = 53.3$, $R^* 1.5$



Şekil 4.7: Bağıl gözenekli ortam kalınlığının ısı borusunun üzerindeki etkisi, $S = 53.3$, $dP_s / dz = 100.0$

Tezde buraya kadar yapılan çalışma $50^{\circ}C$ 'deki su için gerçekleştirilmiştir. Su ısı borularında yaygın olarak kullanılan bir akışkandır. Isı borularında kullanılan akışkanlar, ısı borusunun çalışma sıcaklığına göre çok düşük, düşük, orta ve yüksek sıcaklıkta çalışan akışkanlar diye 4 gruba ayrılırlar. Çoğu ısı borusu düşük sıcaklık ($200^{\circ} - 550^{\circ} K$) bölgesinde çalışırlar, (Faghri, 1995). Su düşük sıcaklıktaki ısı borularında kullanılan bir akışkandır.

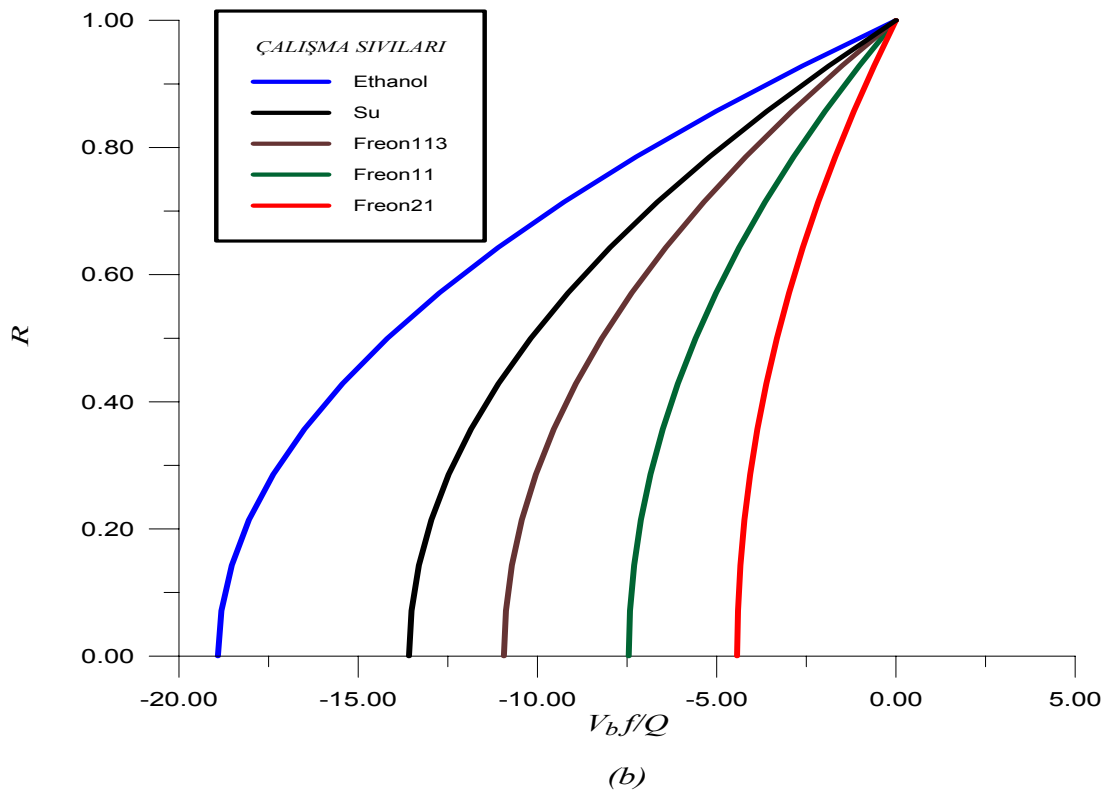
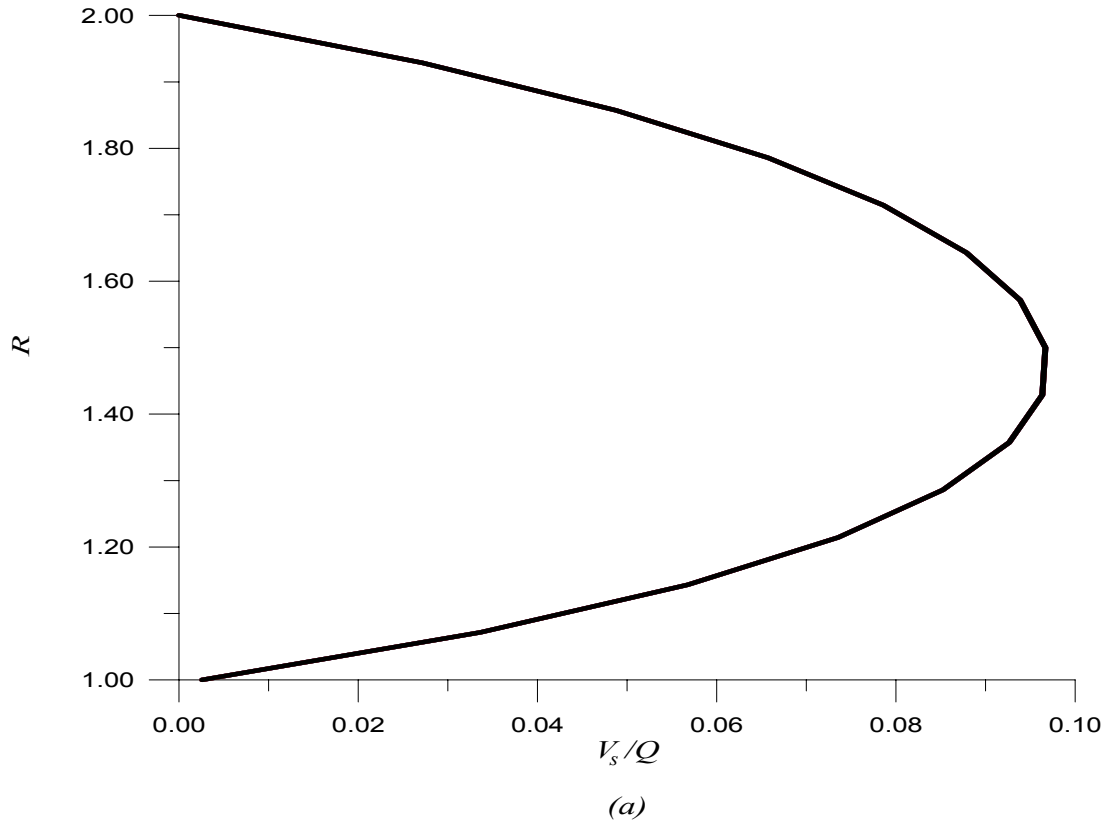
Tezin bu aşamasında, ısı boruları için düşük sıcaklık bölgesine düşen diğer bazı akışkanlar için de yalıtılmış bölgedeki akış incelenecektir. Burada kullanılan akışkanların yine $50^{\circ}C$ 'deki bazı özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Şekil 4.8'de buhar ve sıvı hızlarının dağılımı farklı çalışma sıvıları su ile karşılaştırılarak verilmiştir. Şekil 4.8 için basınç değişim oranı $P = 1.5$, boyutsuz geçirgenlik değişkeni $\sigma = 3.0$, bağıl gözenekli ortam kalınlığı $R^* = 2.0$ olarak alınmıştır.

Şekil 4.8'deki hız eğrilerinden görüldüğü gibi çalışma sıvıları değiştikçe farklı buhar hızı değerleri elde edilmektedir. Tablo 4.2'de görüleceği gibi dinamik viskozite oranı, S , Ethanol için en büyük Freon21 için en küçük değerdedir. Tablo 4.2 göz önünde bulundurularak Şekil 4.8 incelendiğinde dinamik viskozite oranı arttıkça buhar hızı azalmaktadır. Ancak sıvı hızında bir değişim olmamaktadır. Bunun nedeni denklem 4.13 ve 4.14'ten görüldüğü gibi mutlak viskozite oranı sadece buhar hızı denkleminde mevcuttur. Dinamik viskozite oranı çalışma sıvısına ve ısı borusunun sıcaklığına bağlıdır.

Tablo 4.2: Çalışmada kullanılan akışkanların $50^{\circ}C$ 'deki bazı özellikleri ve kinematik viskozite oranları (f) ve dinamik viskozite oranları (S)

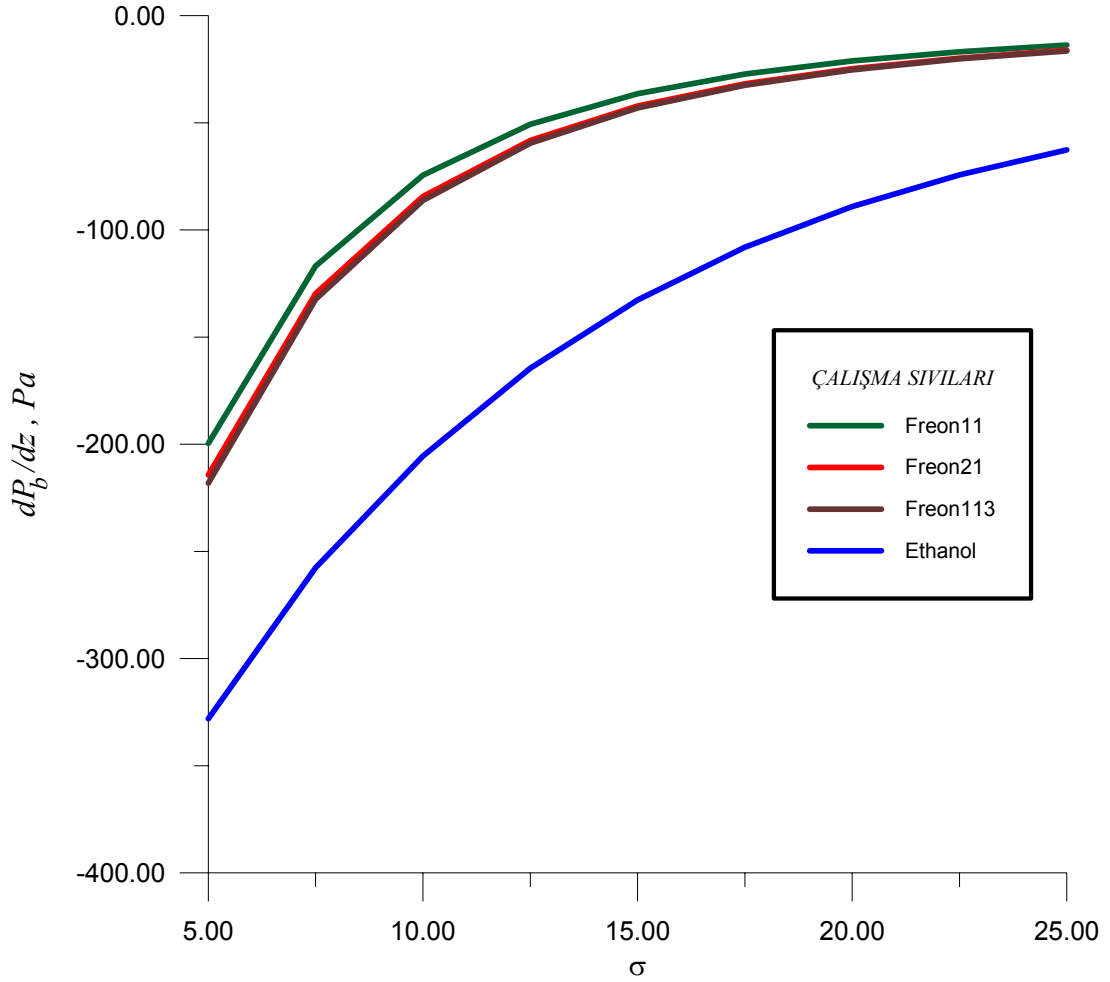
Akışkan	L Gizli Isı (kJ/kg)	ρ_s Sıvı Yoğunluğu (kg/m^3)	ρ_b Buhar Yoğunluğu (kg/m^3)	μ_s Sıvı Dinamik Viskozitesi ($\times 10^{-3} Ns/m^2$)	μ_b Buhar Dinamik Viskozitesi ($\times 10^{-7} Ns/m^2$)	S Dinamik Viskozite Oranı	f Kinematik Viskozite Oranı
Ethanol	1000.4	779.5	0.532	0.7035	92.95	75.685	19.3593
Freon113	143.82	1508	8.0	0.475	108.5	43.7788	4.3057
Freon11	171.475	1415	13.275	0.3625	121.5	29.835	3.5726
Freon21	213	1305	17.31	0.2145	121	17.7272	4.2527



Şekil 4.8 : Farklı akışkanlar ve $\sigma = 3.0$, $P = 1.5$, $R^* = 2.0$ için

a) Sıvı b) Buhar hızı eğrileri

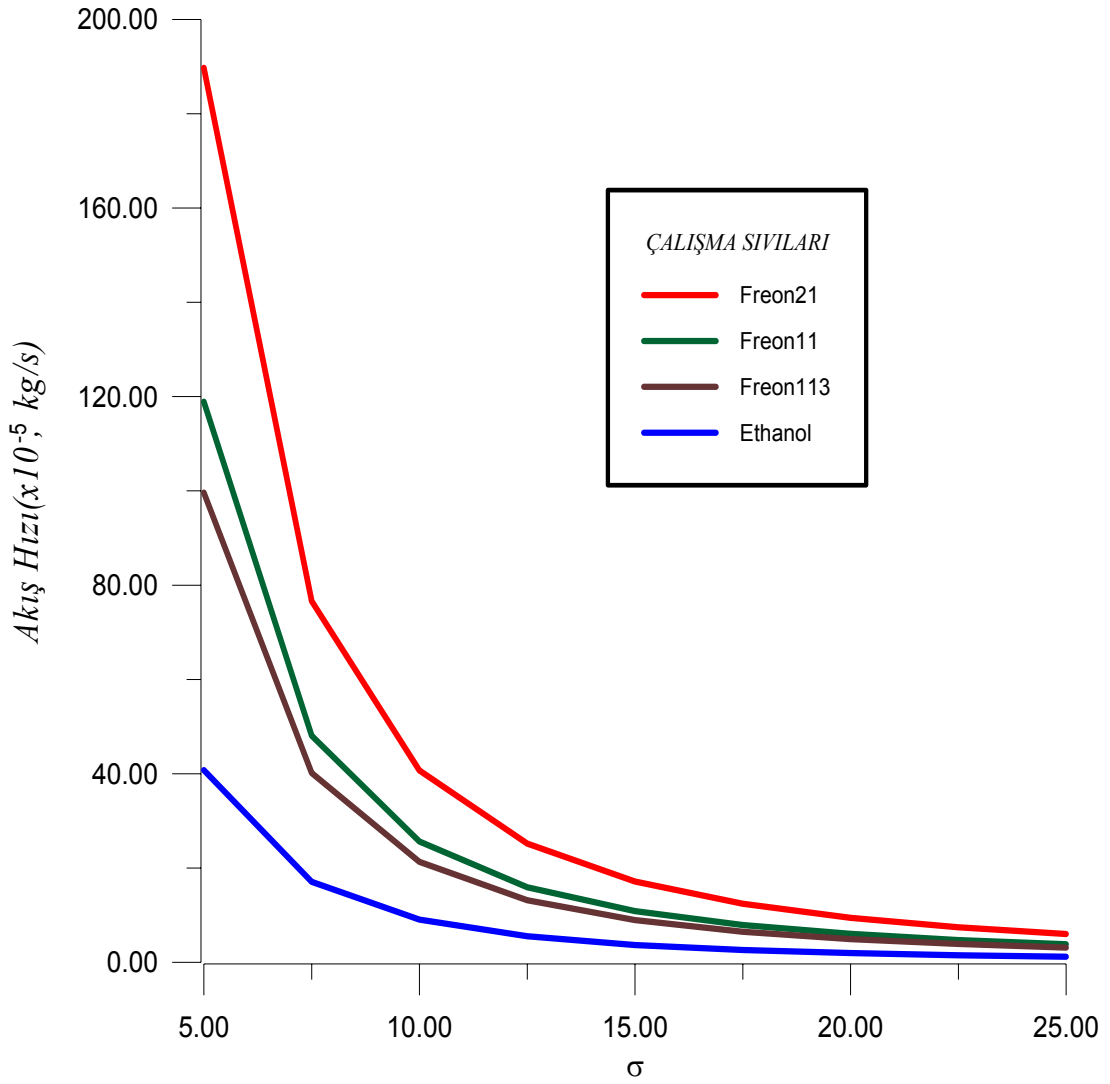
Şekil 4.9’da buhar basıncının değişimi farklı akışkanlar boyutsuz geçirgenlik değişkenlikleri için incelendiğinde Ethanol dışındaki tüm akışkanların birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. En düşük buhar basıncı değişimi Ethanol’a aittir.



Şekil 4.9 : Farklı akışkanlar için basınç değişim grafiği

$$R^* = 2.0, \quad dP_s / dz = 100.0, \text{ Pa} / m$$

Şekil 4.10'da farklı akışkanlar için kütle akış hızı ve boyutsuz geçirgenlik değişkeni eğrileri görülmektedir. Bu şekilden görüleceği gibi en yüksek kütle akış hızı Freon21'e aittir. Tablo 4.1'den görüleceği gibi dinamik viskozite oranı en düşük olan akışkan Freon21'dir. Şekil 4.10 ve Tablo 4.1'den görüleceği gibi kütle akış hızı, sıvının dinamik viskozite oranı arttıkça azalmaktadır.

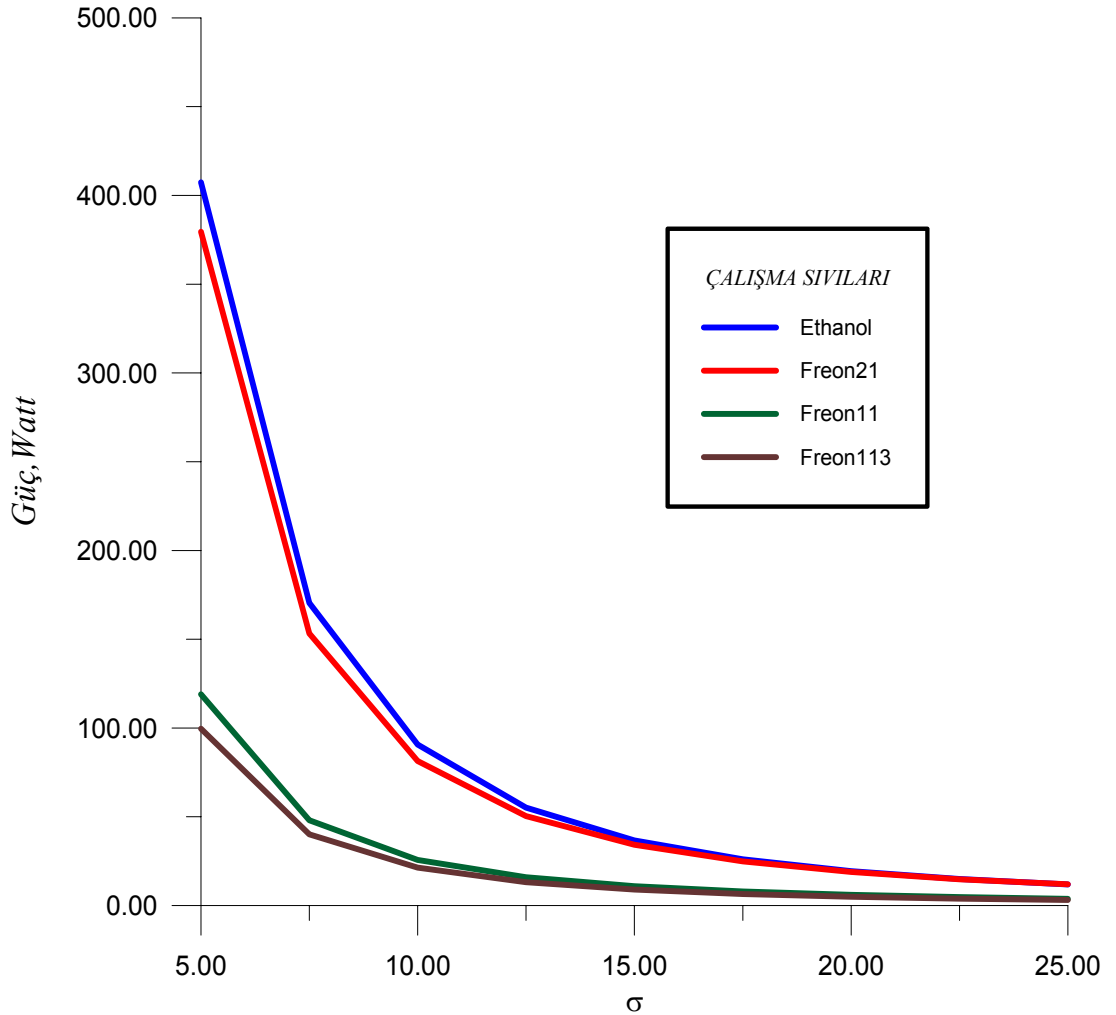


Şekil 4.10 : Farklı akışkanlar için kütle akış hızı,

$$R^* = 2.0, dP_s / dz = 100.0, Pa / m$$

Şekil 4.11’de bağıl gözenekli ortam kalınlığı $R^* = 2.0$, sıvı basınç değişimi $dP_s/dz = 100.0, Pa/m$ ve farklı akışkanlar için ısı borusunun gücünün boyutsuz geçirgenlik değişkenine bağlı değişimi verilmiştir.

Şekil 4.11’den görüldüğü gibi, Ethanol ve Freon21, Freon11 ve Freon113 birbirlerine yakın değerlerdedir. Ethanol-Freon21 ikilisi için ısı borusunun gücü daha büyüktür. Şekil 4.7 de dikkate alınarak Şekil 4.11 incelendiğinde aynı koşullar altında ($R^* = 2.0, dP_s/dz = 100.0, Pa/m$) su kullanıldığında diğer akışkanlara göre ısı borusunun gücü daha fazla olmaktadır. Bu durum akışkanların gizli ısı ile açıklanabilir. Kullanılan akışkanların içerisinde $50^\circ C$ ’de gizli ısı en yüksek olan sudur.



Şekil 4.11: Farklı akışkanlar için ısı borusunun gücü, $R^* = 2.0$
 $dP_s/dz = 100.0, Pa/m$

BÖLÜM 5

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Günlük yaşantımızda ısı boruları bir çok mühendislik uygulamalarında karşımıza çıkmaktadır. Isı kaynağı ile ısıtılan yerin ayrılması, sıcaklık dağılımının özdeşleştirilmesi, ısı akısı dönüşümü, sıcaklık kontrolü, ısı geri kazanım ünitesi bu uygulamalara örneklerdir.

Isı borusu üzerinde yapılan analitik çalışmaları iki grupta toplamak mümkündür. Bunlar ısı borularının geometrik şekli üzerinde yapılan çalışmalar ve ısı borularının verimliliğini etkileyen değişkenler üzerinde yapılan analitik çalışmalardır.

Bağıl gözenekli ortamın kalınlığı, çalışma sıvısının basınç değişimi, çalışma sıvısının cinsi ve geçirgenlik ısı borusunun verimini etkileyen faktörlerdir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında da ısı borusunun yalıtılmış bölgesini modellemek için gözenekli bölgede sıvı akışının, merkezde ve ters yönde buhar akışının olduğu matematiksel model; Navier-Stokes denklemi ve Darcy kanunundan yararlanılarak analitik olarak çözülmüştür.

Çalışmada öncelikle akışkan olarak $50^{\circ}C$ 'deki suyun termofiziksel özellikleri kullanılmıştır. Ayrıca Freon11, Freon21, Freon113 ve Ethanol gibi farklı akışkanlar da incelenip karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada amaç, buhar ve sıvı akışı üzerinde etkili olan değişkenleri incelemek ve sonuçta ısı borusunun veriminin ne şekilde etkilendiğini ortaya koymaktır.

Isı borusunun yalıtılmış bölgesinde akış incelenirken; akışın tamamen gelişmiş ve daimi olduğu, akışkan ve gözenekli ortama ait özelliklerin (yoğunluk, viskozite, vb.) sabit olduğu, gözenekli ortamın yüksek geçirgenliğe sahip ve akışkan ile doymuş olduğu kabulleri yapılmıştır.

Çalışmada önce, buhar ve sıvı bölgesindeki akışlar için ayrı ayrı korunum denklemleri analitik olarak çözülmüş; akışkanın sıvı ve buhar bölgesindeki hızları,

kütle akış hızları, buhar basıncı değişimi ve ısı borusunun gücünü veren eşitlikler elde edilmiş ve bu eşitliklerden yararlanılarak bilgisayar programı hazırlanmıştır.

Tezin bundan sonraki aşamasında, basınç değişimi, boyutsuz geçirgenlik değişkeni, gözenekli ortamın bağıl kalınlığı gibi değişkenlere bağlı olarak sıvı ve buhar fazları için hız dağılımı incelenmiştir.

Boyutsuz geçirgenlik değişkeni azaldıkça buhar ve özellikle sıvı hızlarının arttığı görülmüştür. Boyutsuz geçirgenlik değişkeni azaldıkça geçirgenlik artmakta; geçirgenliğin artması da akışın gözenekli ortamda ilerlemesini kolaylaştırmakta ve hızları arttırmaktadır. Sıvı basınç değişiminin buhar basınç değişimine oranı arttıkça da yine hızların arttığı gözlemlenmiştir.

Sonuçta; akışın, basınç değişimine, boyutsuz geçirgenlik değişkenine ve gözenekli ortamın bağıl kalınlığına bağlı olduğu görülmüştür. Boyutsuz geçirgenlik değişkeni 10.0 'dan daha az olduğunda sıvı ve buhar bölgesi arasında önemli etkileşim olduğu anlaşılmıştır.

Buhar basıncının değişimi, boyutsuz geçirgenlik değişkenine bağlı olarak, farklı bağıl gözenekli ortam kalınlıklarında ve sıvı basıncı değişim oranının sabit olduğu bir değerde incelenmiştir. Yapılan incelemede boyutsuz geçirgenlik değişkeni arttıkça buhar basınç değişiminin arttığı gözlenmiştir. Isı borusunda buhar akışı, sıvı akışına ters yönde olduğundan dolayı buhar basınç değişimi negatif değerlerde elde edilmiştir. Ayrıca bağıl gözenekli ortam kalınlığının azalmasıyla buhar basınç değişiminde artış gözlenmiştir.

Sonuçta; geçirgenliğin azalmasının, gözenekli ortamda akışı zorlaştırdığı için sıvı hızının düştüğü ve böylece buhar basınç değişiminin yükseldiği gözlenmiştir.

Kütle akış hızı hesaplanırken, ısı borusunun yalıtılmış bölümünde çalıştığımız için sıvı bölgesindeki kütle akış hızı ile buhar bölgesindeki kütle akış hızı eşit alınmıştır, sıvı bölgesine göre kütle akış hızları incelenmiştir. Kütle akış hızının boyutsuz geçirgenlik değişkeninin artmasına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Bu doğal bir sonuçtur, ortamda boyutsuz geçirgenlik değişkeni arttıkça, yani geçirgenlik azaldıkça kütle akışı zorlaşır.

Bağıl gözenekli ortam kalınlığının artması ise kütle akışını arttırmıştır. Bağıl gözenekli ortam kalınlığının artması gözenekli ortamda sıvı akışını hızlandırmıştır.

Isı borusunun ısı transfer kapasitesi yani gücü incelendiğinde ise; boyutsuz geçirgenlik değişkeni azaldıkça ve sıvı basınç değişiminin artması ile arttığı gözlenmiştir. Ayrıca bağıl gözenekli ortam kalınlığı arttıkça aynı boyutsuz geçirgenlik değişkenlerinde ısı borusunun gücü artmaktadır. Sonuçta; geçirgenliğin ve gözenekli ortam kalınlığının artışı ısı borusunun gücünü arttırmaktadır.

Tezin bir diğer aşamasında, çalışma sıvısı olarak, ısı borularında su ile aynı sıcaklık aralığında çalışan Freon11, Freon21, Freon113, Ethanol gibi farklı akışkanlar kullanılmıştır. Farklı çalışma sıvıları da yine $50^{\circ}C$ 'de incelenmiştir. Farklı çalışma sıvılarının kullanılması demek dinamik viskozite oranının değişmesi anlamına gelmektedir. Çalışmada buhar hızının, dinamik viskozite oranının artması ile azaldığı, bununla beraber sıvı hızının bir farklılık göstermediği görülmüştür.

Sonuçta; buhar bölgesindeki akışın dinamik viskozite oranına bağlı olduğu, sıvı bölgesindeki akışın dinamik viskozite oranından bağımsız olduğu anlaşılmıştır.

Çalışmada farklı çalışma sıvıları için boyutsuz geçirgenlik değişkeni artırıldığında her bir sıvının buhar basınç değişim oranının arttığı gözlemlenmiştir. Farklı sıvıların kullanımı kinematik viskozite oranlarının da farklı olması anlamına gelmektedir. Sıvıların kinematik viskozite oranı küçüldükçe buhar basınç değişim oranı artmıştır.

Kütle akış hızı, boyutsuz geçirgenlik değişkeni arttıkça bütün sıvılar için azalmıştır. Farklı sıvıların kullanılması dinamik viskozite oranlarını değiştirmiştir. Dinamik viskozite oranları azaldıkça kütle akış hızı artmıştır. Dinamik viskozite oranının azalması sıvının dinamik viskozitesini azalmasına karşılık gelmektedir. Bu da kütle akışını arttırmıştır.

Güçteki artış kütle akışından ve kullanılan sıvıların gizli ısılarının büyüklüğünden kaynaklanmaktadır. Kütle akış hızı ve gizli ısı büyük olan akışkanın kullanıldığı ısı borusunun gücünün de büyük olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak; bu yüksek lisans tez çalışmasında ısı borusunun veriminin, kullanılan çalışma sıvısının cinsine ve fitil bölgesindeki gözenekli ortamın özelliklerine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Gözenekli ortamın geçirgenliğinin ve bağıl gözenekli ortam kalınlığının artması ısı borusunun verimini arttırmaktadır. Öte yandan gizli ısı yüksek ve dinamik sıvı viskozitesi düşük olan akışkanlar ısı borusunun verimini olumlu yönde etkilemektedir.

KAYNAKLAR

- Baytaş, A.C.**, 2006. Gözenekli Ortamlarda Taşınım Olayı, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, **4**, 3-13
- Çıkm, A.**, 1988. Isı boruları, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Dullien F.A.L.**, 1992. *Porous Media, Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press., San Dieogo.
- Dunn, P.D. and Reay, D.A.**, 1994. *Heat Pipes*, Pergamon Press., Great Britain.
- Faghri, A.**, 1995. *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor and Francis Press., Washington D.C.
- Feldman, K.T. and Whiting, G.H.**, 1968. Applications of the Heat Pipe, *Mechanical Engineering*, **90**, 48-53.
- Genceli, O.F.**, 1976. Isı Borusu, *İ.T.Ü. Makine Fakültesi Isı Tekniği ve Ekonomisi Araştırma Enstitüsü Bülteni*, **19**, 1-29
- Kim, S.J., Seo, J.K. and Do, K.H.**, 2002. Analytical and Experimental Investigation on the Operational Characteristics and Thermal Optimization of A Miniature Heat Pipe with A Groved Wick Structure, *Heat and Mass Transfer, J. Int.* **46**, 2051-2063
- Lage, J.L., Merrikh, A.A. and Kulish, V.V.**, 2004. A Porous Medium Model to Investigate the Red Cell Distribution effect on Alveolar Respiration, *Emerging Technologies and Techniques in Porous Media*, **25**, p. 381-407, Eds. Ingham, D.B., Bejan, A., Mamut, E., Pop, I., Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Lefevre, F. and Lallemand, M.**, 2005. Coupled Thermal and Hydrodynamic Models of Flat Micro Heat Pipes for The Cooling of Multiple Electronic Components, *Heat and Mass Transfer, J. Int.*, **49**, 1375-1383.
- Ling, J., Cao, Y.**, 1999. Closed-Form Analytical Solutions for Radially Rotating Miniature High Temperature Heat Pipes Including Non-Condensable Gas Effects, *Heat and Transfer, J.Int.*, **43**, 3661-3671.
- Liu, C.Y., Ying, W.M., and Tan, J.O.**, 1989. Flow in the Adiabatic Section of A Heat Pipe, *Heat Mass Transfer, Comm. Int.*, **16**, 79-88.

Liu, S. and Masliyah J.H., 1999. Non-linear Flows in Porous Media, *J. Non-Newtonian Mech.*, **86**, 229-252.

Miguel, A.F., 2004. Porous Media and Filtration, *Emerging Technologies and Techniques in Porous Media*, **27**, p. 419-431, Eds. Ingham, D.B., Bejan, A., Mamut, E., Pop, I., Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Nield, D.A. and Bejan, A. 1999. *Convection in Porous Media*, Springer-Verlag, New York Inc.

Pruzan, D.A., Klingensmith, L.K., Torrance, K.E. and Avedisian, C.T., 1990. Design of High-Performance Sintered-Wick Heat Pipes, *Heat and Mass Transfer, J.Int.*, **34**, 1417-1427.

Suman, B. and Kumar, P., 2005. An Analytical Model for Fluid Flow and Heat Transfer in A Micro-Heat Pipe of Polygonal Shape, *Heat and Mass Transfer, J.Int.*, **48**, 4498-4509.

Vafai, K., Tien, C.L., 1981. Boundary and Inertia Effects on Flow and Heat Transfer in Porous Medias, *Heat and Mass Transfer, J.Int.*, **28**, 1597-1611.

El-Wakil, M.M., 1962. *Nuclear Power Engineering*, p. 509-512, M.Grow-Hill Book Company, Inc.

Wang, Y. and Vafai, K., 2000. Transient Characterization of Flat Plate Heat Pipes During Startup and Shutdown Operations, *Heat and Mass Transfer, J.Int.* **43**, 2641-2655.

Zhu, N. and Vafai, K., 1997. Analytical Modeling of the Startup Characteristics of Asymmetrical Flat-Plate and Disk-Shaped Heat Pipes, *Heat and Mass Transfer, J.Int.*, **41**, 2619-2637.

Zhu, N. and Vafai, K., 1999. Analysis of Cylindrical Heat Pipes Incorporating the Effects of Liquid-Vapour Coupling and Non-Darcian Transport—A closed Form Solution, *Heat and Mass Transfer, J.Int.*, **42**, 3405-3418.

EK_A

BUHAR VE SIVI AKIŞ HIZI DENKLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ

Denklem (4.10) ve (4.11)'in çözümü aşağıdaki gibidir.

$$\frac{1}{R} \frac{dV_b}{dR} + \frac{d^2V_b}{dR^2} = G \quad (4.10)$$

$$\frac{dV_b}{dR} + R \frac{d^2V_b}{dR^2} = GR$$

$$\frac{d}{dR} \left(R \frac{dV_b}{dR} \right) = GR$$

$$\int \frac{d}{dR} \left(R \frac{dV_b}{dR} \right) = \int GR$$

$$R \frac{dV_b}{dR} = G \frac{R^2}{2} + A \quad (A-1)$$

$$\frac{dV_b}{dR} = G \frac{R}{2} + \frac{A}{R}$$

$$\int \frac{dV_b}{dR} = \int G \frac{R}{2} + \frac{A}{R}$$

$$V_b = G \frac{R^2}{4} + A \ln R + B \quad (A-2)$$

Denklem (A-1)'de $R = 0$, $\frac{dV_b}{dR} = 0$ sınır koşulunu kullanırsak, $A = 0$ olarak elde edilir. Bu durumda denklem (A-2) aşağıdaki gibi olur.

$$V_b = G \frac{R^2}{4} + B \quad (\text{A-3})$$

Denklem (4.11)'in çözümleri Bessel fonksiyonları ile olacaktır.

$$\frac{1}{R} \frac{dV_s}{dR} + \frac{d^2 V_s}{dR^2} - \sigma^2 V_s = H \quad (\text{4.11})$$

$$V_s = CI_0(\sigma R) + DK_0(\sigma R) - \frac{H}{\sigma^2} \quad (\text{A-4})$$

Denklem (A-4) için $R^* = \frac{b}{a}$ $V_s = 0$ sınır koşulu kullanılarak;

$$CI_0(R^* \sigma) + DK_0(R^* \sigma) = \frac{H}{\sigma^2} \quad (\text{A-5})$$

elde edilir.

Burada I_0 , K_0 düzenlenmiş Bessel fonksiyonlarıdır. A , B , C , D integrasyon sabitleridir. Sınır koşullarından ve Bessel fonksiyonunun türevinden faydalanarak bunları hesaplarız. Bessel fonksiyonlarının türevi aşağıdaki gibidir, (Wakil, 1962).

$$\frac{dI_0(\alpha x)}{dx} = \alpha I_1(x)$$

$$\frac{dK_0(\alpha x)}{dx} = -\alpha K_1(x)$$

Denklem (A-4)'ün türevini alırsak;

$$\frac{dV_s}{dR} = C\sigma I_1(\sigma R) - D\sigma K_1(\sigma R) \quad (\text{A-6})$$

elde edilir. Bu denkleme;

$$R = 1, \quad \frac{dV_s}{dR} = \frac{f}{s} \frac{dV_b}{dR}$$

sınır koşulunu uygulayalım.

Bunun için denklem (A-3)'ün türevi alınırsa;

$$\frac{dV_b}{dR} = \frac{GR}{2} \quad (\text{A-7})$$

elde edilir ve sınır koşulu aşağıdaki gibi uygulanır.

$$C\sigma I_1(\sigma) - D\sigma K_1(\sigma) = \frac{f}{s} \frac{G}{2}$$

$$C\sigma I_1(\sigma) - D\sigma K_1(\sigma) = \frac{v_b}{v_s} \frac{\mu_b}{\mu_s} \frac{a^3}{2} \frac{dP_b}{dz}$$

$$C\sigma I_1(\sigma) - D\sigma K_1(\sigma) = \frac{1}{2} \frac{a^3}{v_s \mu_s} \frac{dP_b}{dz}$$

$$C\sigma I_1(\sigma) - D\sigma K_1(\sigma) = \frac{Q}{2}$$

$$CI_1(\sigma) = \frac{Q}{2\sigma} + DK_1(\sigma)$$

Sonuçta, C sabiti aşağıdaki gibi elde edilir.

$$C = \frac{\frac{Q}{2\sigma} + DK_1(\sigma)}{I_1(\sigma)} \quad (\text{A-8})$$

(A-8)'i (A-5)'de yerine yazalım.

$$\frac{\frac{Q}{2\sigma} + DK_1(\sigma)}{I_1(\sigma)} I_0(R^* \sigma) + DK_0(R^* \sigma) = \frac{H}{\sigma^2}$$

Denklemin her iki tarafını $I_1(\sigma)$ ile çarpalım.

$$\frac{Q}{2\sigma} I_0(R^* \sigma) + DI_0(R^* \sigma) K_1(\sigma) + DI_1(\sigma) K_0(R^* \sigma) = \frac{H}{\sigma^2} I_1(\sigma)$$

D parantezine alıp $\frac{Q}{2\sigma}$ 'li terimi denklemin sağ tarafına geçirelim.

$$D\{K_1(\sigma)I_0(R^*\sigma) + I_1(\sigma)K_0(R^*\sigma)\} = \frac{H}{\sigma^2}I_1(\sigma) - \frac{Q}{2\sigma}I_0(R^*\sigma) \quad (\text{A-9})$$

Önce denklemin sağ tarafını ele alalım.

$$\left\{ \frac{H}{\sigma^2}I_1(\sigma) - \frac{Q}{2\sigma}I_0(R^*\sigma) \right\} \frac{Q}{Q} \text{ ile çarpıp düzenleyelim.}$$

$$Q \left\{ \frac{H}{\sigma^2}I_1(\sigma) - \frac{I_0(R^*\sigma)}{2\sigma} \right\}$$

$$\frac{H}{\sigma^2} = \frac{1}{\sigma^2} \frac{a^3 \frac{dP_s}{dz}}{\mu_s v_s} = \frac{1}{\sigma^2} \frac{a^3 \frac{dP_b}{dz}}{\mu_s v_s}$$

$$P = \frac{\frac{dP_s}{dz}}{\frac{dP_b}{dz}}$$

$$\frac{H}{\sigma^2} = \frac{P}{\sigma^2}$$

Bu durumda denklem (A-9) yeniden aşağıdaki gibi yazılır.

$$D\{K_1(\sigma)I_0(R^*\sigma) + I_1(\sigma)K_0(R^*\sigma)\} = Q \left\{ \frac{P}{\sigma^2}I_1(\sigma) - \frac{I_0(R^*\sigma)}{2\sigma} \right\}$$

Her iki tarafı $-$ ile çarpalım.

$$D \left\{ \underbrace{-K_1(\sigma)I_0(R^* \sigma) - I_1(\sigma)K_0(R^* \sigma)}_{D_0} \right\} = Q \left\{ \underbrace{\frac{I_0(R^* \sigma)}{2\sigma} - \frac{P}{\sigma^2} I_1(\sigma)}_{D_3} \right\}$$

Burada;

$$D_0 = -K_1(\sigma)I_0(R^* \sigma) - I_1(\sigma)K_0(R^* \sigma)$$

$$D_3 = \frac{I_0(R^* \sigma)}{2\sigma} - \frac{P}{\sigma^2} I_1(\sigma) \text{ olmak üzere düzenlenirse}$$

$$D = Q \frac{D_3}{D_0} \quad (\text{A-10})$$

elde edilir.

D' 'yi denklem (A-8)'de yerine koyalım.

$$C = \frac{\frac{Q}{2\sigma} + DK_1(\sigma)}{I_1(\sigma)} = \frac{\frac{Q}{2\sigma} + Q \frac{D_3}{D_0} K_1(\sigma)}{I_1(\sigma)} \quad \frac{D_0}{D_0} \text{ ile çarpalım.}$$

$$C = \frac{\frac{QD_0}{2\sigma} + QD_3K_1(\sigma)}{D_0I_1(\sigma)}$$

elde edilir, burada pay kısmında D_0 ve D_3 yerine yazılıp, yeniden düzenleme yapılırsa, C sabiti aşağıdaki gibi elde edilir.

$$C = \frac{\frac{Q}{2\sigma} \left\{ -K_1(\sigma)I_0(R^* \sigma) - I_1(\sigma)K_0(R^* \sigma) \right\} + QK_1(\sigma) \left\{ \frac{I_0(R^* \sigma)}{2\sigma} - \frac{P}{\sigma^2} I_1(\sigma) \right\}}{D_0I_1(\sigma)}$$

$$-\frac{Q}{2\sigma} \cancel{K_1(\sigma)} I_0(R^* \sigma) - \frac{Q}{2\sigma} I_1(\sigma) K_0(R^* \sigma) + \frac{Q}{2\sigma} \cancel{I_0(R^* \sigma)} K_1(\sigma) - \frac{PQ}{\sigma^2} I_1(\sigma) K_1(\sigma)$$

$$C = \frac{-\frac{Q}{2\sigma} I_1(\sigma) K_0(R^* \sigma) - \frac{P}{\sigma^2} Q I_1(\sigma) K_1(\sigma)}{D_0 I_1(\sigma)}$$

$$C = \frac{Q}{D_0} \left\{ \underbrace{-\frac{K_0(R^* \sigma)}{2\sigma} - \frac{P}{\sigma^2} K_1(\sigma)}_{D_2} \right\}$$

Burada $D_2 = -\frac{K_0(R^* \sigma)}{2\sigma} - \frac{P}{\sigma^2} K_1(\sigma)$ olmak üzere düzenleme yapılırsa

$$C = Q \frac{D_2}{D_0} \quad (\text{A-11})$$

elde edilir.

C ve D sabitlerini denklem (A-4)'de yerine konur ve düzenlenirse,

$$V_s = Q \frac{D_2}{D_0} I_0(\sigma R) + Q \frac{D_3}{D_0} K_0(\sigma R) - \frac{H}{\sigma^2}$$

$$V_s = Q \left(\frac{D_2}{D_0} I_0(\sigma R) + \frac{D_3}{D_0} K_0(\sigma R) - \frac{H}{\sigma^2} \right)$$

gözenekli bölgede sıvı hızı aşağıdaki gibi bulunur.

$$V_s = Q \left(\frac{D_2}{D_0} I_0(\sigma R) + \frac{D_3}{D_0} K_0(\sigma R) - \frac{P}{\sigma^2} \right) \quad (\text{A-12})$$

$R = l$ $V_s = f \cdot V_b$ sınır koşulunu denklem (A-12) ve (A-3) kullanılarak uygulanırsa denklem (A-3)'de yer alan B sabiti aşağıdaki gibi elde edilir.

$$B = \frac{Q}{f D_0} \left(I_0(\sigma) D_2 + K_0(\sigma) D_3 + \left(-\frac{p}{\sigma^2} - \frac{S}{4} \right) D_0 \right) \quad (\text{A-13})$$

Denklemden parantez içini ele alalım ve D_2 , D_3 ve D_0 katsayılarını yerine koyarak yeniden düzenleyelim.

$$\begin{aligned}
& I_0(\sigma) \left(\underbrace{-\frac{P}{\sigma^2} K_1(\sigma) - \frac{I}{2\sigma} K_0(R^* \sigma)}_{D_2} \right) + K_0(\sigma) \left(\underbrace{\frac{I_0(R^* \sigma)}{2\sigma} - \frac{P}{\sigma^2} I_1(\sigma)}_{D_3} \right) \\
& + \left(-\frac{P}{\sigma^2} - \frac{S}{4} \right) \underbrace{\left(-I_0(R^* \sigma) K_1(\sigma) - I_1(\sigma) K_0(R^* \sigma) \right)}_{D_0} \\
& - \frac{I_0(\sigma) P K_1(\sigma)}{\sigma^2} - \frac{I}{2\sigma} I_0(\sigma) K_0(R^* \sigma) + \frac{K_0(\sigma) I_0(R^* \sigma)}{2\sigma} - K_0(\sigma) \frac{P}{\sigma^2} I_1(\sigma) \\
& + \underbrace{\frac{P}{\sigma^2} I_0(R^* \sigma) K_1(\sigma) + \frac{P}{\sigma^2} I_1(\sigma) K_0(R^* \sigma) + \frac{S}{4} I_0(R^* \sigma) K_1(\sigma) + \frac{S}{4} I_1(\sigma) K_0(R^* \sigma)}_{D_1}
\end{aligned}$$

Sonuç olarak B katsayısı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$B = \frac{Q}{f} \frac{D_1}{D_0} \quad (\text{A-14})$$

Denklem (A-14), denklem (A-3)'de yerine konursa buhar hızı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V = \frac{Q}{f} \left(\frac{D_1}{D_0} + \frac{S}{4} R^2 \right) \quad (\text{A-15})$$

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında İstanbul'da doğdu. Orta öğrenimini tamamladıktan sonra Pamukkale Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümüne girdi ve buradan 1999 yılında mezun oldu. 2004-2005 eğitim-öğretim yılında İ.T.Ü Enerji Enstitüsünde Enerji Bilim ve Teknoloji yüksek lisans programına başladı. Halen Milli Eğitim Bakanlığında öğretmen olarak çalışmaktadır.