

100695

TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİMİNİN ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Murat HOŞÖZ

100695

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17 Eylül 1998

Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Şubat 1999

Tez Danışmanı : Doç. Dr. A. Feridun ÖZGÜÇ

Diğer Juri Üyeleri : Prof. Dr. Haluk KARADOĞAN

Prof. Dr. Ahmet ARISOY

Prof. Dr. Salim ÖZÇELEBİ

Y. Doç. Dr. Ali ECDER

12/3/99

12.3.99

12.3.99

15.03.1999

Ali Eder 12.3.99

ŞUBAT 1999

ÖNSÖZ

Isı enerjisini mekanik enerjinin bir türü olan akustik güce dönüştüren termoakustik ısı makinaları, hareketli parçalardan oluşmayan ve çevreyi kirletmeyen yapılarıyla, mekanik güç üreten klasik makinaların alternatifi olmaya adaydır. Son yıllarda iş olarak akustik güç kullanılıp ısısının düşük sıcaklıktaki kaynaktan yüksek sıcaklıktaki ısı giderine pompalanabileceğinin bulunması, akustik güç üretiminin önemini daha da artırmıştır.

Bununla birlikte termoakustik makinaların performanslarının önceden belirlenebilmesi için, termoakustik güç üretiminin ayrıntılı olarak modellenmesine gerek vardır. Bu çalışmada, belirtilen ihtiyaca yönelik olarak, viskoziteli ve viskozitesi ihmal edilen iki ayrı ortam içinde termoakustik güç üretiminin analizi yapılmakta ve modeller geliştirilmektedir. Modellerin geçerliliği, imal edilen bir termoakustik güç üretici üzerinde değişik şartlarda yapılan çok sayıda deney ile araştırılmaktadır.

Termoakustik makinalar konusuna yönelmemi sağlayan, yüksek lisans ve doktora çalışmalarında sürekli olarak tavsiye ve yardımlarını gördüğüm sayın Doç. Dr. A. Feridun ÖZGÜÇ'e içtenlikle teşekkür ederim.

İstanbul, 1998

Murat HOŞÖZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	ii
SEMBOL LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
TABLO LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
1.1 Kaynak Araştırması.....	3
BÖLÜM 2 SES DALGA DENKLEMLERİ ve ÇÖZÜMLERİ.....	8
2.1 Akustik Basınç ve Akustik Hız.....	8
2.2 Ses Yayılma Hızı ve Dalgaboyu.....	9
2.3 Dalga Denklemlerinin Türetilmesi.....	9
2.4 Dalga Denklemlerinin Genel Çözümü.....	15
2.5 Özel Bir Durum İçin Dalga Denklemlerinin Tam Çözümleri.....	16
BÖLÜM 3 VİSKOZİTESİZ ORTAMDA TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİMİ.....	25
3.1 Rezonatör İçinde Akustik Basınç, Akustik Hız ve Akustik Sıcaklığın Belirlenmesi.....	25
3.2 Plaka Etrafındaki Akışkan Bölgesi İçinde Akustik Sıcaklık Genliğinin Belirlenmesi.....	31
3.3 Plaka Etrafındaki Akışkan İçinden Taşınan Isının Belirlenmesi.....	41
3.4 Plaka Etrafındaki Akışkan Tarafından Üretilen veya Kullanılan Akustik İşin Belirlenmesi.....	47
3.5 Verim ve Soğutma Tesir Katsayısının Belirlenmesi.....	53
3.6 Akustik İş Üretimi ve Isı Pompalanmasının Şekiller Yardımıyla Açıklanması	54
BÖLÜM 4 VİSKOZİTELİ ORTAMDA TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİMİ.....	61
4.1 Plakalar Arasındaki Akışkan Bölgesinde Akustik Hız Genliğinin Belirlenmesi	62
4.2 Plakalar İçindeki Akustik Sıcaklık Genliğinin Belirlenmesi.....	66

4.3 Plakalar Arasındaki Akışkan Bölgesinde Akustik Sıcaklık Genliğinin Belirlenmesi.....	68
4.4 Dalga Denkleminin Elde Edilmesi.....	73
4.5 Toplam Enerji Akısı Denkleminin Elde Edilmesi.....	79
4.6 Enerji Akısı Denklemindeki İntegrasyon ve Zamana Göre Ortalama Çarpım İşlemlerinin Yapılması.....	86
4.6.1 Enerji Akısı Denkleminin Birinci Terimindeki İşlemlerin Yapılması.....	88
4.6.2 Enerji Akısı Denkleminin İkinci Terimindeki İşlemlerin Yapılması.....	89
4.6.3 Enerji Akısı Denkleminin Üçüncü Terimindeki İşlemlerin Yapılması.....	92
4.6.4 Enerji Akısı Denkleminin Dördüncü Terimindeki İşlemlerin Yapılması.....	92
4.6.5 Enerji Akısı Denkleminin Beşinci Terimindeki İşlemlerin Yapılması.....	93
4.6.6 Enerji Akısı Denkleminin Altıncı Terimindeki İşlemlerin Yapılması.....	95
4.6.7 Enerji Akısı Denkleminin Yedinci Terimindeki İşlemlerin Yapılması.....	97
4.6.8 Enerji Akısı Denkleminin Sekizinci Terimindeki İşlemlerin Yapılması.....	99
4.6.9 Enerji Akısı Denkleminin Dokuzuncu Terimindeki İşlemlerin Yapılması.....	101
4.6.10 Sonuçların Birleştirilmesi.....	102
4.7 Enerji Akısı Denkleminin Basitleştirilmesi.....	103
4.8 Dalga Denkleminin Basitleştirilmesi.....	109
4.9 Akustik İş İfadesinin Elde Edilmesi.....	111
BÖLÜM 5 BİR UCU AÇIK REZONATÖRDE TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİMİNİN MODELLENMESİ.....	116
5.1 Rezonatör Yüzeyindeki Kayıpların Belirlenmesi.....	116
5.2 Isı Değiştiricilerdeki Kayıpların Belirlenmesi.....	119
5.3 Akustik Salınımların Gerçekleştiği Sıcaklık Gradyanının Belirlenmesi.....	120
5.4 Basınç Antinodlarındaki Akustik Basınç Genliğinin Belirlenmesi.....	124
5.5 İş Üreten Yapı İçindeki Akışkan Tarafından Termoakustik Olarak Üretilen Güç ve Taşınan Isının Belirlenmesi.....	125
5.6 Nonlineerlik Kontrolü, Türbülans Kontrolü ve İdeal Isı Değiştiricisi Uzunluklarının Belirlenmesi.....	126
BÖLÜM 6 DENEYSEL ÇALIŞMA.....	128
6.1 Deney Tesisatının Tanıtılması ve İmali.....	128
6.2 Akustik Basınç, Sıcaklık, Su Debisi ve Elektrik Gücü Ölçümleri.....	134
6.3 Deneylerin Yapılışı ve Sonuçları.....	139
6.4 Deney Sonuçlarının Viskoziteli ve Viskozitesiz Model Sonuçları ile Karşılaştırılması.....	141
BÖLÜM 7 SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	155
KAYNAKLAR.....	158

EK A	ARALARINDA FAZ FARKI BULUNAN DEĞİŞKENLERİN ÇARPIMI...	161
EK B	VİSKOZİTELİ ORTAMDA TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİM MODELİNİN PROGRAM LİSTESİ.....	164
EK C	VİSKOZİTESİZ ORTAMDA TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİM MODELİNİN PROGRAM LİSTESİ.....	170
EK D	DENEYLERİN ve GELİŞTİRİLEN MODELLERİN SONUÇLARI.....	176
EK E	ÖLÇÜLEN SICAKLIKLARI KULLANARAK İŞ ÜRETEN YAPININ UÇLARINDAKİ SICAKLIKLARI HESAPLAYAN PROGRAM	188
EK F	DENEY SONUÇLARINA GÖRE TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİMİNİN PERFORMANSINI BELİRLEYEN PROGRAM.....	190
ÖZGEÇMİŞ.....		195



SEMBOL LİSTESİ

A	: Alan
$A_{sış}$	: İş üreten yapının sıcak ısı değiştiricisinin yüzey alanı
$A_{soış}$	: İş üreten yapının soğuk ısı değiştiricisinin yüzey alanı
a	: Rezonatörün iç genişliği
a_p	: Isı değiştiricilerdeki plaka sayısı
b	: Plaka yarı kalınlığı
c	: Ses ilerleme hızı
c_s	: Plakanın özgül ısısı
c_{pm}	: Akışkanın sabit basınçtaki ortalama özgül ısısı
c_{ps}	: Suyun özgül ısısı
c_{vm}	: Akışkanın sabit hacimde ortalama özgül ısısı
d	: Dalgaboyuna bağlı bir sabit
E	: Plaka genişliğinin iki katı
$\dot{E}_{eş}$	: Isı değiştirici yüzeylerindeki toplam akustik güç kaybı
$\dot{E}_{rez}$	: Rezonatör yüzeylerindeki toplam akustik güç kaybı
$\dot{E}_{uç}$	: Rezonatörün kapalı ucundaki akustik güç kaybı
$\dot{E}_y$	: Rezonatörün açık ucundan çevreye yayılan akustik güç
$\dot{E}_{yan}$	: Rezonatörün yan yüzeylerindeki akustik güç kaybı
$\dot{e}$	: Birim rezonatör yüzeyindeki akustik güç kaybı

$\dot{e}_{sış}$	: İş üreten yapının sıcak ısı değıştiricisi için birim alan başına güç kaybı
$\dot{e}_{soış}$	: İş üreten yapının soğuk ısı değıştiricisi için birim alan başına güç kaybı
F	: Kuvvet
f	: Frekans
f_1, f_2	: Fonksiyonlar
f_α, f_v	: Geometriye ve akışkanın termofiziksel özelliklerine bağlı sabitler
$\dot{H}$	: Taşınan enerji
$\dot{H}_{ış}$	: İş üreten yapı içinde taşınan enerji
h	: Akışkanın entalpisi
h_m	: Ortalama entalpi
h_1	: Entalpi genliği
I	: Elektrik akımı
Im	: Kendisinden sonraki büyüklüğün imajiner kısmı
K	: Özgöl ısılar oranı
K_λ	: Isı iletim katsayısı
k	: Akışkanın ısı iletim katsayısı
k_s	: Plakanın ısı iletim katsayısı
L	: Termoakustik güç üreticinin rezonatör uzunluğu
L_p	: Plaka uzunluğu
$L_{pişg}$	: İş üreten yapıdaki efektif plaka uzunluğu
l	: Rezonatör uzunluğu
M	: Mach sayısı
m	: Kütle

$\dot{m}$	: Anlık kütleli debi
$n_{piş}$	: İş üreten yapıdaki toplam plaka sayısı
$n_{sış}$	: Sıcak ısı değıştiricideki plaka sayısı
$n_{soış}$	: Soğuk ısı değıştiricideki plaka sayısı
P	: Toplam basınç
P_m	: Ortalama basınç
p_A	: Basınç antinodundaki akustik basınç genliğı
p_1	: Akustik basınç genliğı
$p_{1ış}$	: İş üreten yapı içindeki ortalama akustik basınç genliğı
Pr	: Prandtl sayısı
s	: Özgöl entropi
s_m	: Ortalama özgöl entropi
s_1	: Entropi genliğı
Q	: Isı
Q_E	: Rezistansın yaydığı ısı
Q_s	: Suyu geçen ısı
$\dot{Q}_v$	: Rezonatörün açık ucundaki anlık hava debisi genliğı
q	: Isı akısı
R	: Gaz sabiti
Re	: Kendinden sonraki büyüklüğün reel kısmı
STK	: Soğutma tesir katsayısı
T	: Sıcaklık
T_{b1}	: Akışkan-plaka ara yüzeyindeki akustik sıcaklık genliğı
T_m	: Ortalama sıcaklık

T_s	: Plaka sıcaklığı
T_{s1}	: Plakadaki akustik sıcaklık genliği
t	: Zaman
$\vec{u}$	: Hızın x eksenindeki bileşeni, akustik hız
u_i	: İç enerji
u_p	: Piston hızı
u_0	: Efektif hız
u_1	: Akustik hız genliği
$u_{1i\dot{s}}$	: İş üreten yapı içindeki ortalama akustik hız genliği
u_{1m}	: Ortalama akustik hız genliği
u_{1P}	: Pistonun hız genliği
u_2	: İkinci dereceden akustik hız
V	: Hacim
V_m	: Ortalama hacim
V_{P1}	: Osiloskoptan okunan voltaj genliği
ν	: Vektörel hız
v	: Anlık hacim değişimi
v_1	: y doğrultusundaki akustik hız genliği
W	: Üretilen toplam akustik iş
$\dot{W}_{i\dot{s}}$	: İş üreten yapı tarafından üretilen toplam akustik güç
w	: Birim hacim başına birim zamanda üretilen akustik iş
x, y, z	: Koordinatlar
x_1	: x doğrultusundaki deplasman genliği
Y	: Osiloskoptan okunan, dalga genliğinin iki katını veren mesafe

y_0	: Plakalar arasındaki yarı boşluk mesafesi
α	: Akışkanın ısıl yayılım katsayısı
α_s	: Plakanın ısıl yayılım katsayısı
β	: Isıl genleşme katsayısı
δ_α	: Akışkan için ısıl nüfuz derinliği
ε_s	: Plakanın termofiziksel özelliklerine bağlı bir sabit
ε_x	: x doğrultusundaki yer değiştirme
ϕ	: Plakadaki sıcaklık gradyanının kritik sıcaklık gradyanına oranı
ϕ	: İş üreten yapıdaki sıcaklık gradyanının kritik sıcaklık gradyanına oranı
η	: Verim
λ	: Dalgaboyu
μ	: Dinamik viskozite
ν	: Kinematik viskozite
θ	: Plakanın termofiziksel özelliklerine bağlı bir sabit
ρ	: Akışkanın yoğunluğu
ρ_m	: Akışkanın ortalama yoğunluğu
ρ_s	: Plaka malzemesinin yoğunluğu
ρ_l	: Yoğunluk salınım genliği
ν	: Özgül hacim
ω	: Açısal frekans
ψ	: Plaka ve akışkanın termofiziksel özellikleri ile geometriye bağlı bir sabit
Ω	: Akışkanın termofiziksel özelliklerine ve geometriye bağlı bir sabit
$\sim$	: Eşlenik

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 Sondhauss Tüpü	4
Şekil 1.2 Çok Sayıda Plaka İçeren Termoakustik Güç Üretici	5
Şekil 1.3 Hoparlörsüz Tip Termoakustik Soğutucu	6
Şekil 2.1 Ses Dalgaları İçeren Ortamda Bulunan Diferansiyal Hacim	10
Şekil 2.2 Diferansiyal Hacimin Yaptığı Deplasman ve Uğradığı Deformasyon	13
Şekil 2.3 Bir Ucundan Ses Dalgaları Uygulanan Uçları Kapalı Boru	17
Şekil 2.4 Sistem İçinde Akustik Hız Genliğinin Değişimi	20
Şekil 3.1 Tek Boyutlu Ses Dalgaları İçindeki Plakanın Geometrisi	26
Şekil 3.2 Sıcaklık Genliğinin Kompleks Çarpanının Reel ve İmajiner Bileşenleri	38
Şekil 3.3 Keyfi Seçilmiş Bir Pozisyon Etrafında Akışkan Partiküllerinin Hareketi	39
Şekil 3.4 Akustik İş Üretimi Durumunda Akışkan Paketçiğinin Uğradığı Değişimler	54
Şekil 3.5 Akustik İş Üretimi Durumunda Çevrimin T-s Diagramında Gösterilmesi	55
Şekil 3.6 Isı Pompalanması Durumunda Akışkan Paketçiğinin Uğradığı Değişimler	57
Şekil 3.7 Isı Pompalanması Durumunda Çevrimin T-s Diagramında Gösterilmesi	57
Şekil 3.8 Plakadan Yeterince Uzakta Bulunan Akışkan Paketçiğinin Uğradığı Değişimlerin T-s Diagramında Gösterilmesi	60
Şekil 4.1 Sistemin Geometrik Özellikleri	62
Şekil 6.1 Termoakustik Güç Üreticinin Şeması ve Temel Boyutları	129
Şekil 6.2 İş Üreten Yapıyı Oluşturan Plakalar	130
Şekil 6.3 İş Üreten Yapı	132
Şekil 6.4 İş Üreten Yapının Değişik Yönlerden Görünümü	132

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 6.5 İş Üreten Yapıyı Kuşatan Rezonatör Kısım	133
Şekil 6.6 İş Üreten Yapı ve Çevresindeki Elemanlar	134
Şekil 6.7 Deney Tesisatının Genel Görünümü	135
Şekil 6.8 Akustik Basınç ve Sıcaklık Ölçüm Cihazları	135
Şekil 6.9 Basınç Duyargasının Görünüşü, Montajı ve Diğer Elemanlar ile Bağlantısı	136
Şekil 6.10 Isıl Çift ile Sıcaklık Ölçümü Yapılan Noktalar	138
Şekil 6.11 Akustik Basınç Genliğinin Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s	142
Şekil 6.12 Akustik Basınç Genliğinin Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s	142
Şekil 6.13 Frekansın, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s	143
Şekil 6.14 Frekansın Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s	144
Şekil 6.15 Termoakustik Olarak Üretilen Gücün Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s	144
Şekil 6.16 Termoakustik Olarak Üretilen Gücün Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s	145
Şekil 6.17 Üretilen Gücün Uygulanan Isıya Oranının Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s	146
Şekil 6.18 Üretilen Gücün Uygulanan Isıya Oranının Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s	146
Şekil 6.19 İş Üreten Yapı İçinde Termoakustik Olarak Taşınan Isının Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s	147
Şekil 6.20 İş Üreten Yapı İçinde Termoakustik Olarak Taşınan Isının Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s	148
Şekil 6.21 Açık Uçtan Yayılan Akustik Gücün Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s	148
Şekil 6.22 Açık Uçtan Yayılan Akustik Gücün Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s	149

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 6.23 Rezonatör Yüzeyindeki Akustik Güç Kaybının Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s	150
Şekil 6.24 Rezonatör Yüzeyindeki Akustik Güç Kaybının Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s	150
Şekil 6.25 Isı Değiştiricilerdeki Toplam Akustik Güç Kaybının Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s	151
Şekil 6.26 Isı Değiştiricilerdeki Toplam Akustik Güç Kaybının Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s	151
Şekil 6.27 Suya Geçen Isınının, Uygulanan Isı ile Değişimi	152
Şekil 6.28 Termoakustik Güç Üretiminin Başladığı Sıcak Uç Sıcaklığının Su Debisine Göre Değişimi	153
Şekil 6.29 İş Üreten Yapının Sıcak Uç Sıcaklığının Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s	154
Şekil 6.30 İş Üreten Yapıdaki Sıcaklık Gradyanının Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s	154
Şekil A.1 Alternatif Akım Devresine Bağlanan İmpedans	162

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo D.1 Yapılan Deneylerde Parametre Değerleri	176
Tablo D.2 Doğrudan Yapılan Ölçümlerin Sonuçları	177
Tablo D.3 Tablo ve Denklemler Kullanılarak Bulunan Sonuçlar	179
Tablo D.4 İş Üreten Yapının Sıcak ve Soğuk Uçlarının Sıcaklıkları	181
Tablo D.5 Deneyde Yapılan Ölçümlere Göre Bulunan Sonuçlar	182
Tablo D.6 Viskoziteli Modelin Deney Şartlarındaki Sonuçları	184
Tablo D.7 Viskozitesiz Modelin Deney Şartlarındaki Sonuçları	186

TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİMİNİN ANALİZİ

ÖZET

Viskozitesi ihmal edilen ve viskoziteli iki ayrı ortamda termoakustik güç üretiminin incelendiği bu çalışmada, bir ucu açık rezonatörde termoakustik güç üretimi için modeller geliştirilmekte ve bunların geçerlilikleri deneysel olarak araştırılmaktadır.

Başlangıç olarak ses dalga denklemleri elde edilmekte ve termoakustik güç üretimine benzeyen bir durum için dalga denklemlerinin tam çözümleri bulunmaktadır.

Yapılan literatür çalışmasından, termoakustik güç üreten makinaların yüksek performanslı olabilmeleri için, bunların rezonatörleri içine, aralarında küçük boşluklar bulunacak şekilde çok sayıda plaka benzeri elemanın konulması gerektiği anlaşılmaktadır. Buna uygun olarak, güç üretimi yapılan rezonatör içinde bir tek plaka bulunması durumunda termoakustik güç üretiminin basit analizi yapılmıştır. Burada akışkanın viskozitesi ihmal edilmiş ve plakanın sabit bir sıcaklık gradyanına sahip olduğu kabul edilmiştir. Enerji denklemi yardımıyla plakayı çevreleyen akışkan içinden ses dalgaları tarafından taşınan ısı ve üretilen termoakustik iş ifadeleri elde edilmiştir.

Daha sonra, gerçek şartlara uygun olarak, çok sayıda plakaya sahip rezonatör içinde viskoziteli akışkan bulunması durumunda termoakustik güç üretimi incelenmiştir. Önce momentum denklemi kullanılarak plakalar arasındaki akustik hız genliği belirlenmiş, sonra enerji denklemi kullanılarak plakalar ve akışkan içindeki akustik sıcaklık genliklerini veren ifadeler elde edilmiştir. Bunlar kullanılarak, bir plakayı çevreleyen akışkan hacmi içinden termoakustik olarak taşınan ısı ve bu esnada üretilen akustik işi veren ifadeler geliştirilmiştir.

Taşınan ısı ve üretilen akustik iş ifadeleri kullanılarak, içinde hava bulunan bir ucu açık rezonatörde termoakustik güç üretimi için bir model geliştirilmiştir. Modelde, rezonatör yüzeylerindeki ve ısı değiştiricilerdeki kayıplar dikkate alınarak termoakustik güç üretiminin gerçekleştiği sıcaklık gradyanı ve akustik basınç genliği belirlenmektedir. Bunlar yardımıyla üretilen akustik güç ve termoakustik olarak taşınan ısı bulunmaktadır. Model, viskoziteli ve viskozitesiz durumlar için iki ayrı bilgisayar programı haline getirilmiştir.

Geliştirilen model yardımıyla, çok sayıda plakadan oluşan, iki ısı değiştiricisine sahip, akışkan olarak hava kullanan bir termoakustik güç üretici imal edilmiştir. Isı değiştiricilerden birinin içinden dolaştırılan rezistans teli yardımıyla plakaların bir ucuna ısı uygulanmış, diğer uçtan ise başka bir ısı değiştiricisi aracılığıyla ısı çekilmiştir. Deney tesisatı üzerinde akustik basınç genliği, frekans, su debisi, uygulanan elektrik gücü ve çok sayıda noktadan sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Parametre değerleri değiştirilerek çok sayıda deney yapılmış ve sonuçlar, geliştirilen modellerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Viskoziteli modelin, ölçülen ve hesaplanan değişkenlerin büyük çoğunluğunda deney sonuçlarına yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

ANALYSIS OF THERMOACOUSTIC POWER GENERATION

SUMMARY

Pressure oscillations in sound waves are accompanied by temperature oscillations, which are generally regarded as unimportant. However, the interaction of these temperature oscillations with solid boundaries - thermoacoustic processes - can produce important thermodynamic effects, such as conversion of heat to acoustic power, or pumping heat from a low-temperature heat source to a high-temperature heat sink. Accordingly, heat devices relying on thermoacoustic interaction can be classified as thermoacoustic engines and thermoacoustic refrigerators.

In thermoacoustic engines, the interaction mentioned above results in a hydrodynamic heat flow from a high-temperature source to a low-temperature sink, and consequently causes acoustic power generation. In thermoacoustic refrigerators, acoustic power is used to pump heat from a low-temperature source to a high-temperature sink.

Thermoacoustic power generation was first noticed in the last century by glass blowers. They experienced that when a hot glass bulb was attached to a cool glass tubular stem, the tip of the stem sometimes emitted sound. Sondhauss investigated this event on the Sondhauss tube, which was the first version of thermoacoustic engines. In 1960s, it was understood that acoustic power obtained from Sondhauss tube was increased at a great extent by placing a stack of plates in the tube with small distances between the plates.

In this study, thermoacoustic power generation in resonators full with non-viscous and viscous fluids are analyzed. In non-viscous analysis, it is accepted that the resonator has only one rigid plate aligned parallel to the axis of the resonator. Besides this, it is assumed that the gas in the resonator supports plane standing sound waves, power generation is carried out in steady state, and the plate has a uniform temperature gradient of ∇T_m along its length. Ignoring viscosity of the fluid, utilizing Navier-Stokes and energy equations, heat flux and acoustic work expressions are obtained. In deriving these equations, it is understood that the presence of the plate results in a phase shift between pressure and temperature oscillations in a very thin fluid layer around the plate. This phase shift, consequently, causes heat to be carried from high-temperature end to low-temperature end of the plate through the fluid layer by resonant sound waves. It is also understood that acoustic work is produced in the fluid layer through which heat flows.

Since heat flux and acoustic work expressions derived for power generation in resonators full with non-viscous fluids can not be applied to realistic engines, a better analysis considering viscosity of the fluid is carried out. In this analysis, thermoacoustic power generation in a resonator having a stack of plates and full with a viscous fluid is considered. Out of many plates of the stack, only one plate and fluid

volume under the influence of this plate are taken into account. It is assumed that the engine is in steady state operation, and the plate has a uniform temperature gradient of ∇T_m along its length. Utilizing Navier-Stokes equation, an expression for the acoustic velocity amplitude in the fluid between the plates is derived. Then, utilizing energy equation, expressions for amplitudes of temperature oscillations both in the fluid between the plates and in the plate are derived. Later, a wave equation for acoustic pressure amplitude in terms of temperature gradient, thermophysical properties and geometry of the fluid-plate system is developed. Utilizing the expressions of acoustic velocity and temperature amplitude in energy equation, an expression for energy flux through fluid-plate system is derived. Using wave equation, an expression for acoustic work produced in fluid-plate system is also developed. Afterwards, both of these equations are simplified in order to make their numerical use easy. After simplification, the expression of energy flux per perimeter of the plate is obtained as,

$$\frac{\dot{H}}{E} = \frac{\delta_\alpha p_1 \text{Im}[u_{1m}] T_m \beta}{4(\text{Pr}-1)(1+\varepsilon_s) \left(1 + \frac{\delta_v^2}{2y_0^2} - \frac{\delta_v}{y_0}\right)} \times \left\{ \phi \left[\sqrt{\text{Pr}} \left(1 - \frac{3}{2} \text{Pr}\right) (1+\varepsilon_s) + \frac{1+\varepsilon_s \sqrt{\text{Pr}}}{\text{Pr}-1} (\sqrt{\text{Pr}}-1) \right] + (\sqrt{\text{Pr}}-1) \right\} - (k y_0 + k_s b) \frac{dT_m}{dx} \quad (1)$$

With zero viscosity, this expression further reduces to

$$\frac{\dot{H}}{E} = -\frac{1}{4} \frac{T_m \beta}{1+\varepsilon_s} \delta_\alpha p_1 \text{Im}[u_{1m}] (\phi - 1) - (k y_0 + k_s b) \frac{dT_m}{dx} \quad (2)$$

Simplified acoustic work expression giving acoustic work produced or absorbed by the fluid between the plates is obtained as,

$$\frac{\dot{W}}{E} = \frac{\delta_\alpha L_p}{4} \left\{ \frac{p_1^2 T_m \beta \omega \phi}{\rho_m c_{pm} \left(1 - \frac{\delta_v}{y_0} + \frac{\delta_v^2}{2y_0^2}\right)} \left[\frac{\left[1 + \varepsilon_s \sqrt{\text{Pr}} - \left(1 + \varepsilon_s \text{Pr}^{3/2}\right)\right]}{(1+\varepsilon_s)(1-\text{Pr})} - \sqrt{\text{Pr}} \right] - \frac{p_1^2 T_m \beta^2 \omega}{\rho_m c_{pm} (1+\varepsilon_s)} - \frac{\omega \rho_m (\text{Im}[u_{1m}])^2 \sqrt{\text{Pr}}}{1 + \frac{\delta_v^2}{2y_0^2} - \frac{\delta_v}{y_0}} \right\} \quad (3)$$

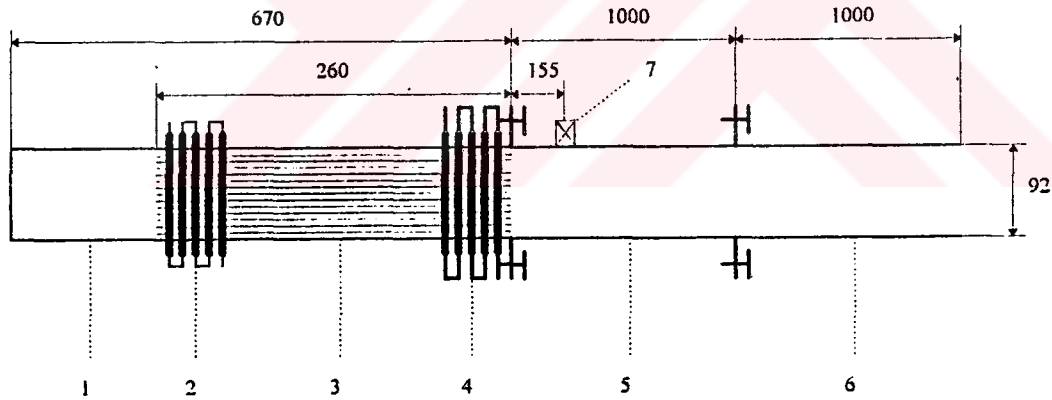
With zero viscosity, this expression reduces to

$$\frac{\dot{W}}{E} = \frac{\delta_a L_p}{4} \frac{(K-1)\omega}{\rho_m c^2 (1+\varepsilon_s)} p_1^2 (\phi - 1) \quad (4)$$

For non-zero viscosity, energy flux and acoustic work expressions given above take into account viscosity of the fluid better than previous work although for diminishing viscosity both expressions are the same with previous work.

After obtaining energy flux and acoustic work expressions, thermoacoustic power generation in a resonator with one end closed is modelled. Equating produced acoustic power with the sum of acoustic power losses and acoustic power radiating from the open end of the resonator, required temperature gradient to generate acoustic power is determined. Then, using energy flux expression, acoustic pressure amplitude at the pressure antinode of the resonator is determined. Having known temperature gradient along the plates and acoustic pressure amplitude at the pressure antinode, produced acoustic work, thermoacoustic heat flow and all other quantities related with the performance of thermoacoustic power generation are determined. In order to do this, a computer program is prepared. Another computer program for diminishing viscosity is also prepared in order to see the effect of viscosity on thermoacoustic power generation.

Utilizing the results of the computer program belonging to viscous model, a thermoacoustic power generator with a stack of plates and two heat exchangers is manufactured. Fundamental dimensions and components of the experimental device is shown in the figure below.



- 1) Empty resonator-first section, 2) Hot heat exchanger, 3) Acoustic work producing stack, 4) Cold heat exchanger, 5) Empty resonator-second section, 6) Empty resonator-third section, 7) Dynamic pressure transducer

Figure 1 Experimental Thermoacoustic Power Generator

The resonator end near the plates is closed while other end is open to atmosphere. Heat is applied to one end of the plates by means of a heat exchanger having electrical resistance wire in its pipes. This hot heat exchanger consists of 20

steel pipes perpendicular to the plates. Steel pipes are provided to be in good thermal contact with the plates by means of small copper rings of 1.0 mm thick touching both the plates and the pipe. Acoustic work producing stack consists of 46 steel plates. Each plate of this stack has a thickness of 0.7 mm, and the space between two plates is about 1.0 mm. Heat is rejected from other end of the plates by means of another heat exchanger consisting of 20 copper pipes perpendicular to the plates. Cooling water is forced to flow through the copper pipes of this cold heat exchanger to keep one end of the plates cool. In order to provide good thermal contact between the plates and copper pipes, copper rings of 1.0 mm thick touching plates and pipes are also used in cold heat exchanger. Besides providing good thermal contact, copper rings help in keeping a uniform space between the plates.

Applying heat to one end of the plates and rejecting heat from the other end, a sufficiently large temperature gradient along the plates is formed. After attaining this gradient, the fluid in the spaces between the plates starts to oscillate at the resonance frequency of the resonator. Thus, thermoacoustic work generation is carried out.

In order to determine the performance of acoustic work generation and to compare experimental results with viscous and non-viscous model results, various type of measurements are conducted. These are acoustic pressure amplitude, frequency, temperature, water flow rate and electrical power measurements. Acoustic pressure amplitude and frequency are measured by means of a dynamic pressure transducer relying on piezoelectric principle. Signals obtained from this transducer are sent to an oscilloscope via a power supply. Temperatures are measured by means of NiCr-Ni thermocouples welded on different points of the resonator wall. Utilizing measured quantities, amounts of produced acoustic power and thermoacoustically carried heat are determined. Totally, 24 different experiments are conducted by varying applied heat or water flow rate in each experiment. The amount of electrical power applied to the heat exchanger is varied between 412.0 to 964.2 W. Maximum amount of acoustic power produced in the experimental device is 17.4 W. The ratio of produced acoustic power to thermoacoustic heat flux is 13.3 % as a maximum. The ratio of produced acoustic power to applied electrical power is 1.81 % as a maximum.

Acoustic pressure amplitude, frequency, produced acoustic work, and thermoacoustic heat flux results of viscous model are found to be in good agreement with experimental results. In experiments, however, temperature gradients along the plates are found to be generally higher than viscous model results. It is observed that non-viscous model gives a couple times higher acoustic pressure amplitudes than experimental results although it gives frequency slightly below measured frequency. Non-viscous model gives lower temperature gradients compared to experimentally found temperature gradients. The amounts of produced acoustic power and thermoacoustically carried heat given by non-viscous model are a couple times higher than experimental values.

After comparing model results with experimental results, it is understood that viscous model can confidentially be used to predict the performance of thermoacoustic power generation. Since thermoacoustic refrigeration is based on the same thermodynamic mechanism with thermoacoustic power generation, the viscous model can also be applied to thermoacoustic refrigeration. On the other hand, it is seen that non-viscous model can not be used to determine the performance of real thermoacoustic engines. However, non-viscous model emphasizes the importance of viscosity, and consequently the type of the fluid to be used in the resonator. Using resonators with both ends closed and filled with a low viscosity gas like Helium or

Argon will increase the performance of thermoacoustic power generation.

It is understood that other important factors affecting the performance of thermoacoustic power generation are thermal conductivities of both the plates and the resonator walls. High thermal conductivities increase the amount of heat transmission through plates and resonator walls. On the other hand, it is desired that all amount of heat applied to one end of the plates be carried to cold end thermoacoustically. Unwanted heat transmission through plates and resonator walls decreases thermoacoustic heat flux, and consequently decreases the amount of produced acoustic power. For this reason, resonator and plate materials should have as low thermal conductivities as possible.



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ses dalgaları içinde basınç salınımları ile birlikte gerçekleşen sıcaklık salınımlarının, dalgaların içinde bulunduğu katı ortam sınırları ile ısı etkileşimi, termoakustik olarak isimlendirilir. Bu etkileşimden, ısı enerjisinin akustik güce çevrilmesinde veya akustik güç kullanılarak düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan yüksek sıcaklıktaki ısı giderine ısı pompalanmasında faydalanılır. Buna göre termoakustik etkileşim prensibini kullanan ısı makinaları, termoakustik güç üretici ve termoakustik soğutucu olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir.

Termoakustik yöntemle akustik güç üretilabileceği, uzun zamandan bu yana bilinmektedir. Cam ürünleri imalatçıları, aşırı sıcak haldeki bir cam balonuna, içi boş boru şeklinde bir cam sap takıldığında, sapın ucundan bazen ses çıktığını geçen yüzyılda farketmişlerdir. Bu olayın incelenmesiyle başlayan konu ile ilgili araştırmalar deneysel olarak yüzelli yıldan bu yana yapılsa da, teorik bir temele dayanan çalışmalara ancak 1970'li yıllardan bu yana rastlanmaktadır.

Belirli bir geometriye sahip bir ortam içinde bulunan gaz kütlesine rezonans halinde ses dalgaları uygulanarak ısı pompalanabileceği ve sonuçta soğutma yapılabileceği fikri ise daha yeni olup, 1980'li yıllarda ileri sürülmüş ve deneysel olarak ispatlanmıştır.

Termoakustik güç üreten makinalar ve termoakustik soğutucular günümüzde geliştirme aşamasında olup, ticari amaçla henüz imal edilmemektedir. Ancak bunlarda hareketli parça bulunmaması nedeniyle arıza ve bakım problemlerinin olmayışı, ayrıca doğa ve insanlar üzerinde zararlı etkilerinin bulunmayışı, bu tür ısı cihazlarının gelecekte pratik olarak kullanılır hale gelmesine yol açabilir. Bunu sağlayabilmek için ise, konunun daha iyi araştırılmasına ve termoakustik makinaların performanslarını önceden çok iyi belirleyecek modellerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Termoakustik soğutma, meydana geliş mekanizması olarak termoakustik güç üretimi ile aynı

olduğundan, geliştirilen modeller termoakustik güç üretimine olduğu gibi termoakustik soğutmaya da uygulanabilecektir.

Bu çalışmada, yukarıda belirtilen amaç doğrultusunda, termoakustik makinaların çalışma ilkelerinin temelini oluşturan ses dalga denklemleri ve çözümleri, Bölüm 2’de incelenmektedir. Bu bölümde, ses dalga denklemlerinin, termoakustik makinalarda karşılaşılan bir durum için tam çözümleri de yer almaktadır.

Termoakustik güç üretimi ve soğutmanın oluşum mekanizmasını görebilmek amacıyla, viskozitesiz ortamda rezonans halinde ses dalgaları içinde bulunan bir plaka ve onu çevreleyen akışkan hacmi dikkate alınarak geliştirilen bir model, Bölüm 3’de konu edilmiştir. Bu bölümde, plakayı çevreleyen viskozitesiz akışkan içinden ses dalgaları tarafından termoakustik olarak taşınan ısı ve bu esnada üretilen veya kullanılan akustik gücü veren ifadeler elde edilmektedir. Ayrıca termoakustik olarak ısı taşınması, akustik güç üretilmesi ve kullanılması olayları, şekiller yardımıyla açıklanmaktadır.

Bölüm 4’de ise akışkanın viskozitesi ihmal edilmeyerek, gerçek bir termoakustik güç üreticinde veya soğutucuda olacağı şekilde, rezonans halindeki ses dalgaları içinde bulunan, aralarında küçük boşluklara sahip çok sayıda plaka dikkate alınmaktadır. Bu durum için momentum ve enerji denklemleri kullanılarak plakalar arasındaki bölgede akustik hız genliği ve akustik sıcaklık genliği ifadeleri elde edilmiştir. Daha sonra süreklilik denklemi kullanılarak, plakaların sahip olduğu sıcaklık gradyanı, termodinamik özellikler ve akustik basınç genliği arasındaki bağıntıyı veren bir dalga denklemi geliştirilmiştir. Bunlardan faydalanılarak, plakayı çevreleyen akışkan içinden termoakustik olarak taşınan ısıyı veren enerji akısı ifadesi elde edilmiştir. Geliştirilen dalga denklemi kullanılarak, plakayı çevreleyen akışkan tarafından üretilen veya kullanılan akustik gücü veren bir ifade bulunmuştur. Çok sayıda kompleks terim içeren enerji akısı ve akustik güç ifadeleri, basitleştirici kabuller yapılarak sayısal olarak kullanılabilir hale getirilmiştir.

Bölüm 5’de, yapılacak deneysel çalışma ile ilgili önceden veriler elde etmek ve teori ile deney sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla, Bölüm 4’de bulunan sonuçları kullanan bir model geliştirilmiştir. Modelde, iş üreten yapının çok sayıda plakadan oluştuğu ve akışkan olarak hava kullanıldığı bir ucu kapalı rezonatörde akustik güç üretimi konu edilmektedir. Burada, daha önce geliştirilen enerji akısı ve üretilen akustik güç ifadeleri ile rezonatör içinde kaybolan ve rezonatörün açık ucundan yayılan akustik

güç denklemleri birlikte dikkate alınarak, herhangi bir termoakustik güç üreticinin performansına yönelik sayısal değerler verebilen ifadeler geliştirilmektedir. Model, bilgisayar programı haline getirilerek, viskoziteli ve viskozitesiz durumlar için iki ayrı liste halinde Ekler kısmında verilmiştir.

Bölüm 6'da ise, geliştirilen modelin geçerliliğini görmek amacıyla yapılan deneysel çalışma konu edilmektedir. Deneyler, bir ucu kapalı rezonatör içinde çok sayıda plakadan oluşan ve akışkan olarak hava kullanan termoakustik güç üretici üzerinde gerçekleştirilmiştir. Cihaz çeşitli ısı yüklerinde çalıştırılarak, çok sayıda noktadan sıcaklık, akustik basınç genliği, debi v.b. ölçümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, viskoziteli ve viskozitesiz model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, listelerinin Ekler kısmında verildiği, deney sonuçlarını kullanan iki ayrı bilgisayar programı hazırlanmıştır. Deney sonuçlarının, birçok ölçülen ve hesaplanan değişken için viskoziteli model sonuçları ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

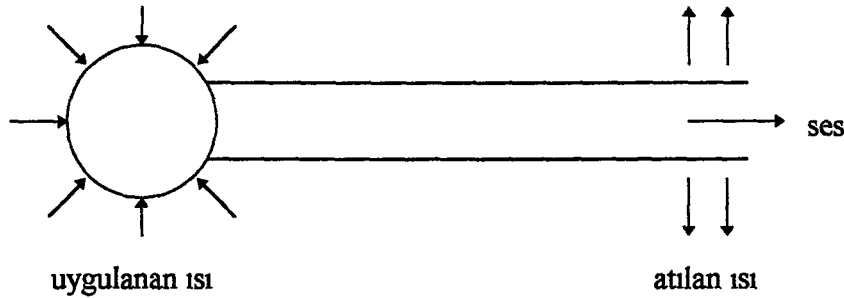
1.1 KAYNAK ARAŞTIRMASI

Termoakustik makinalar ile ilgili çalışmalar, termoakustik soğutmanın bulunduğu 1980'li yıllara kadar sadece termoakustik güç üretimi üzerinedir. Termoakustik soğutucularda ısı pompalamak amacıyla akustik iş olarak kabul edilen ses dalgalarının kullanılması, akustik gücün kullanım alanını genişleterek önemini artırmıştır. 1980'li yıllardan itibaren, termoakustik soğutma ile birlikte termoakustik güç üretimi üzerine yapılan çalışmalar da yoğunlaşarak devam etmiştir.

Şekil 1.1'de gösterilen Sondhauss tüpü, ilk termoakustik güç üretici olarak kabul edilebilir. Bazı cam ürünlerinin imalatında ses elde edildiğini gören Sondhauss, bu olayı cihazın boyutları ve elde edilen sesin özellikleri açısından çok sayıda Sondhauss tüpü üzerinde 1850'li yıllarda incelemiştir [1]. Bu amaçla tüpün kapalı ucunu ısıtırken açık ucundan ısı atmış ve tüp boyunca yeterli büyüklükte bir sıcaklık gradyanına ulaşıldığında, frekansı cihazın boyutlarına göre değişen ses elde etmiştir. Ancak olayın teorisine yönelik herhangi bir çalışma yapmamıştır.

Termoakustik güç üretimi prensibine göre gerçekleşen başka bir olay, 1940'lı yıllarda farkedilen ve Taconis osilasyonu olarak isimlendirilen, krojenik cihazlarda istenmeyen bir şekilde ortaya çıkan akustik salınımlardır. İçinde gaz bulunduran tüplerin bir ucunun oda sıcaklığında, diğer ucunun krojenik sıcaklıklarda olması

durumunda tüpler içinde kendiliğinden doğan ve son derece yüksek genlikte olabilen bu salınımlar, önce Taconis [2] tarafından kalitatif olarak, sonra da Yazaki ve arkadaşları [3] tarafından çeşitli ölçümler yapılarak incelenmiştir.



Şekil 1.1 Sondhauss Tüpü

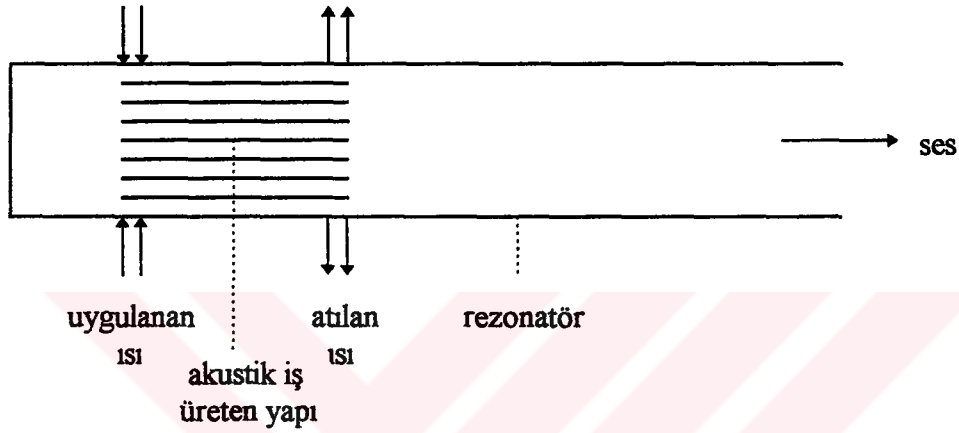
Modern deneysel termoakustikte en önemli ilerleme, Sondhauss tüpleri içine, aralarında küçük boşluklar olacak şekilde birbirine paralel çok sayıda plaka benzeri eleman konularak Sondhauss tüpünün performansının artırılmasıdır. Feldman, bu şekilde düzenlenmiş Sondhauss tüpü ile akustik güç üretmiş ve 600 W ısı kullanarak 27 W akustik güç elde etmiştir [4].

Termoakustikğin teorik alt yapısını, 1969-1984 yılları arasında Rott ve arkadaşları tarafından başlangıçta Taconis osilasyonlarını anlamaya yönelik olarak yapılan çok sayıda çalışma oluşturmaktadır [5-12]. Rott'un geliştirdiği teoriyi kullanan çeşitli araştırmacılar, konu ile ilgili deneysel çalışmalar yapmıştır.

Merkli ve Thomann, silindirik bir rezonatör içindeki ses dalgalarının hız antinodu civarında sıcaklık düşmesi gözlemlemişler ve olay için bir teori geliştirmişlerdir [13].

Yazaki ve arkadaşları, uçları kapalı ve içi Helyum gazı ile dolu üniform çaplı bir boruda, uzunluk boyunca değeri bilinen bir sıcaklık gradyanı oluşturmuş, gazın akustik salınım yaptığı sıcaklık aralığı ve salınım frekansını belirlemişlerdir [3]. Ölçümlerini çeşitli sıcaklık gradyanları, boyut ve geometriler için tekrarlayan bu araştırmacılar, sonuçlarını teori ile karşılaştırdıklarında, sıcaklıkla ilgili sonuçlarda %30'a, frekansta ise %8'e varan farklar görmüşlerdir. Ancak akustik basınç genliği ile akustik güç ölçüm ve hesaplarını yapmamışlardır.

Müller ve Lang ise, akışkan olarak hava kullanan, aralarında küçük boşluklar bulunan çok sayıda paralel plakaya sahip bir termoakustik güç üretici üzerinde deneyler yapmışlardır [14]. Araştırmacılar, akustik salınımların başlangıcında plakaların iki ucu arasındaki sıcaklık farkının, teoriye göre bulunan değerin % 50 kadar üzerinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Ölçtükleri akustik basınç genliği ve bununla orantılı olarak akustik güç değerleri, teoriye göre bulunan değerlerin 2/3'ü kadardır. Müller ve Lang'ın deneylerini gerçekleştirdikleri cihaz, Şekil 1.2'de basit olarak gösterilmektedir.



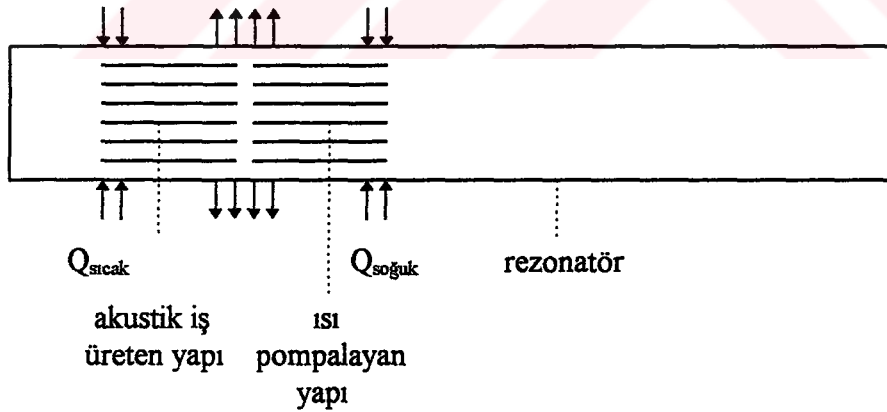
Şekil 1.2 Çok Sayıda Plaka İçeren Termoakustik Güç Üretici

Şekildeki sistemde plakaların bir ucundan, bütün plakalarla irtibatlı olan bir ısı değiştirici yardımıyla ısı uygulanmakta, diğer ucundan ise, içinden soğutma suyu geçen bir ısı değiştirici yardımıyla ısı çekilmektedir. Plakalar boyunca yeterli büyüklükte bir sıcaklık gradyanı sağlandığında, rezonatör adı verilen ve içinde iş üreten yapıyı bulunduran, genellikle silindirik geometriye sahip gövde içindeki gaz, rezonans haline gelerek sistemin rezonans frekansında akustik salınımlar yapmaktadır. Akustik güç olarak kabul edilen bu salınımlardan, termoakustik soğutmada ısı pompalamak amacıyla veya ısı ile çalışan sonar projektörlerde [15] faydalanılmaktadır.

Konu üzerinde çalışan sınırlı sayıda araştırmacıdan biri olan Swift ise, 20 Bara kadar basınçlı Helyum ile çalışan, çelikten olan iş üreten yapısı anı peteğine benzeyen bir termoakustik güç üretici üzerinde deneyler yapmıştır [16]. Cihaz içinde üretilen akustik gücün, cihazın kapalı uçlarından birine monte edilen akustik yüke verildiği bu çalışmada, statik basınç, frekans ve akustik basınç genliği değişik değerlerde

tutulmuştur. Özellikle lineer teoriden uzaklaşılan yüksek basınç genliklerinde, iş üreten yapının iki ucunda bulunan ısı değiştiriciler arasındaki sıcaklık farkının, teoriye göre bulunan değerden iki kata kadar fazla olduğu gözlemlenmiştir. Deneyde cihazı, maksimum değer olarak 7000 W ısı gücünde 630 W akustik gücü akustik yüke vermekte, bu ısı gücü için cihazın ürettiği toplam akustik güç 1050 W olmaktadır. Bu şartlarda ölçülen akustik basınç genliği ise, 0.9 Bar olup oldukça yüksek bir değerdedir. Ancak termoakustik makinaların yüksek performans gösterebilmeleri, akustik basınç genliğinin büyük olması ile mümkün olmaktadır. Çünkü cihaz tarafından üretilen akustik gücün değeri, cihaz içindeki ses dalgalarının basınç genliğine büyük oranda bağlıdır.

Ses dalgaları kullanılarak ısının düşük sıcaklıktaki kaynaktan çevre sıcaklığındaki ısı giderine pompalanıp soğutma yapılmasının, 1983 yılından itibaren yayınlanan çalışmalarda konu edildiği görülmektedir [17-19]. Isı pompalamak amacıyla iş olarak rezonans halinde ses dalgaları kullanan termoakustik soğutucular, yapı olarak termoakustik güç üreticine çok benzemektedir. Bunlarda rezonatör içinde iş üreten yapı ve ısı pompalayan yapı genellikle birlikte bulunur. Ancak ses dalgalarının rezonatör ucundan hoparlör ile rezonatöre uygulanması durumunda iş üreten yapıya ihtiyaç kalmaz. Aşağıda, hoparlörsüz tip termoakustik soğutucu, basit olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.3 Hoparlörsüz Tip Termoakustik Soğutucu

Burada iş üreten yapının bir ucuna, bütün plakalar ile irtibatlı olan bir ısı değiştirici yardımıyla $Q_{sıcak}$ ısı uygulanmakta, diğer ucundan ise ayrı bir ısı değiştirici

yardımıyla ısı çekilerek çevreye atılmaktadır. İş üreten yapı boyunca yeterli büyüklükte bir sıcaklık gradyanına ulaşıldığında, bu yapı tarafından rezonatörün en küçük rezonans frekansına eşit frekansta ses dalgaları üretilmektedir. Isı pompalayan yapının bir ucuna, plakaların tamamı ile irtibatlı olan bir ısı değiştirici aracılığıyla, soğutulacak kaynaktan çekilen $Q_{soğuk}$ ısı ısı uygulanmaktadır. Bu ısı, rezonans halindeki ses dalgaları tarafından, plakalar arasındaki boşluklarda bulunan akışkan içinden diğer uca taşınmakta ve yine bir ısı değiştirici ile irtibatlı olan bu uçtan çevreye atılmaktadır.

Termoakustik soğutma üzerine olan bir çalışmada, 10 Bar basınca kadar Helyum kullanan hoparlörlü bir termoakustik soğutucunun dizaynı yapılmış ve performansı ölçülmüştür [20]. Bu soğutucu ile ulaşılabilen en büyük soğutma gücü 6 W olup en düşük sıcaklık ise 200 K'dir. Bu soğutucuya benzeyen ve 118 K sıcaklığa kadar soğutma yapabilen başka bir soğutucu, 1992 yılında yapılan Discovery uzay mekiği uçuşlarında bazı elektronik elemanların soğutulması amacıyla kullanılmıştır [21]. Bu soğutucu, 5 Watt'a kadar soğutma yapabilmekte ve ısı pompalamak amacıyla rezonatöre hoparlör ile uygulanan 400 Hz frekansta ses dalgalarından faydalanmaktadır [22]. NASA tarafından yapılan bir çalışma, 4 °C'de 200 W soğutma yapabilecek ve uzay mekiğinde buzdolabı olarak kullanılabilecek termoakustik bir soğutucu üzerinedir [23]. Termoakustik soğutma üzerine ülkemizde yapılan bir çalışmada ise, viskozitesiz ortamda termoakustik soğutma incelenmektedir [24].

Termoakustik soğutmanın bulunması ile önem kazanan termoakustik güç üretimi ile ilgili çalışmalar, 1980'li yıllarda yoğunlaşarak devam etmiştir. Termoakustik güç üretiminde akışkan olarak sıvı Sodyum kullanılması durumunda geliştirilen teori ve deney sonuçlarının sunulduğu bir çalışmada, Carnot veriminin %33'üne ulaşıldığı görülmektedir [25]. Diğer bir çalışmada plakalar yerine gözenekli ortam kullanılması durumu deneysel olarak incelenmiş [26], başka bir çalışmada ise iş üreten yapı olarak plakalar yerine pimlerin kullanılması durumu teorik olarak incelenmiş ve pimlerin, plakalar kadar başarılı olmadığı görülmüştür [27]. Gaz ortamında termoakustik dalgaların üretilmesi ve iletimi, diğer bir çalışmada teorik olarak incelenmektedir [28].

BÖLÜM 2

SES DALGA DENKLEMLERİ VE ÇÖZÜMLERİ

Ses dalgaları, genellikle gaz olan elastik bir ortamın bir kısmının yer değiştirmeye maruz bırakılması sonucu, bu kısmın orijinal denge pozisyonu etrafında salınımlar yapması ile doğan mekanik dalgalardır. Ortam içindeki elastik kuvvetlerden dolayı üretildikleri kaynaktan uzağa yayılabilen ses dalgalarının ilerleme doğrultusu, ortam içindeki partiküllerin salınım doğrultusu ile aynıdır.

Ses dalgalarının insan kulağı tarafından işitilebilmesi için, frekanslarının 20-20000 Hz arasında olması gerekir. Frekansı işitme aralığının altında olan ses dalgalarına infrasonik; üzerinde olanlara ise ultrasonik dalgalar adı verilir. İşitilebilir ses dalgaları, hava sütunlarının, gergin tellerin, plakaların ve membranların titreşime maruz bırakılması ile elde edilebilir. Titreşim yapan bu elemanlar, çevrelerindeki gaz partiküllerinin çok küçük genliklerde basınç ve deplasman salınımları yapmasına neden olurlar. Gaz içinde yayılan bu salınımlar, ses dalgalarını meydana getirirler.

Bu bölümde, termoakustik teoremin temelini oluşturan ses dalgaları ile ilgili bazı kavramlara değinilecek, ses dalga denklemleri türetilecek ve termoakustik makinalarda karşılaşılan özel bir durum için dalga denklemlerinin tam çözümleri verilecektir.

2.1 AKUSTİK BASINÇ ve AKUSTİK HIZ

Ses dalgaları içeren bir gaz ortam içinde basınç, pozisyon ve zamana göre değişir. Ortam içinde göz önüne alınan bir pozisyonda belirli bir andaki basınç ile ortamın statik basıncı arasındaki farka akustik basınç adı verilir. Bir pozisyondaki maksimum akustik basınç ise, akustik basınç genliği olarak isimlendirilir.

Ses dalgalarının bulunduğu ortamda göz önüne alınan bir pozisyondan geçen partiküllerin belirli bir andaki hızına ise, akustik hız adı verilir. Bir pozisyondaki akustik hızın maksimum değerine, akustik hız genliği adı verilir.

2.2 SES YAYILMA HIZI ve DALGABOYU

İdeal gazlar içinde ses dalgasının yayılma hızı,

$$c = \sqrt{KRT} \quad (2.1)$$

denkleminde bulunabilir [29, s 580]. Burada,

K : gazın özgül ısılar oranı,

R : gaz sabiti

T : gazın mutlak sıcaklığı

anlamındadır.

Ses dalgalarının bulunduğu ortam içinde akustik basınç, akustik hız, v.b. gibi özellikler, pozisyon ve zamana göre sinüsoidal olarak değişirler. Buna göre bir an için ortam içinde yukarıdaki özelliklerden herhangi birinin işaret ve şiddet olarak aynı olduğu birbirine en yakın iki pozisyon arasındaki mesafe, dalgaboyu olarak isimlendirilir. Dalgaboyu, aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir.

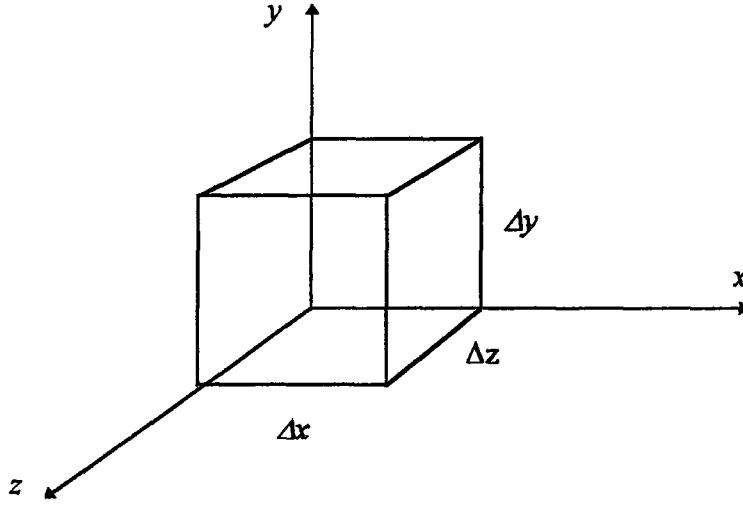
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

Burada f , ses dalgalarının frekansıdır.

2.3 DALGA DENKLEMLERİNİN TÜRETİLMESİ

Bu kısımda, ses dalgaları içeren bir ortamda anlık akustik basınç ve akustik hızı pozisyon ve zamana göre belirleyen dalga denklemleri, düzlemsel dalga kabulü ile tek boyutlu olarak elde edilecektir. Bu amaçla Newton'un İkinci Kanunu, bazı termodinamik bağıntılar ve süreklilik denkleminde kullanılacaktır.

Ses dalgaları içeren ortam içinde bulunan Şekil 2.1'deki gibi bir diferansiyel hacim dikkate alındığında, akustik basıncın pozisyona göre değişmesinden dolayı, diferansiyel hacim içinde $\frac{\partial p}{\partial x}$ basınç gradyanının mevcut olacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 2.1 Ses Dalgaları İçeren Ortamda Bulunan Diferansiyal Hacim

Bu gradyanın pozitif olması durumunda diferansiyal hacime x doğrultusunda, fakat negatif yönde bir kuvvet etki edecektir. Bu kuvvet,

$$F = -\left(\frac{\partial p}{\partial x} \Delta x\right) \Delta y \Delta z \quad (2.3)$$

olarak ifade edilebilir. Kuvvetin diferansiyal hacime bölünmesi ile birim hacim başına kuvvet,

$$\frac{F}{V} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.4)$$

olarak elde edilir. Burada V diferansiyal hacimin büyüklüğü olup, hacimi belirleyen Δx , Δy ve Δz boyutlarının çarpımından bulunabilir. Newton'un ikinci kanununa göre kuvvet ile diferansiyal hacimin yaptığı hareket arasındaki bağıntı,

$$\frac{F}{V} = \frac{m}{V} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.5)$$

olarak yazılabilir. Burada,

m : diferansiyel hacim içindeki gazın kütlesi

u : diferansiyel hacim içindeki gazın ortalama hızı anlamındadır.

Yukarıdaki denklemde $\frac{m}{V}$ terimi, diferansiyel hacim içindeki gazın belirli bir andaki yoğunluğunu vermektedir. Ses dalgasından dolayı gazdaki yoğunluk değişimi çok küçük olacağından, bu terimin ortalama gaz yoğunluğuna eşit olduğu kabul edilebilir. Bu durumda,

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_m \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.6)$$

ifadesi elde edilir. Burada ρ_m , ortalama gaz yoğunluğudur. Anlık akustik basınç ve akustik hız arasındaki bu bağıntıdan ileride faydalanılacaktır.

Şimdi ise, akustik basınç ile diferansiyel hacmin uğradığı hacim değişimi arasında bir bağıntı bulunacaktır. Bu amaçla, ilk olarak ses dalgalarının önemli bir özelliğinden faydalanılacaktır. Ses dalgaları içeren ortam içindeki basınç salınımları, doğal olarak kendileri ile aynı anda gelişen sıcaklık salınımlarına neden olur. Akustik biliminde, işitilebilir frekans aralığında, ses dalgaları içeren ortamın molekülleri arasında sıcaklık salınımları etkisiyle ısı alışverişi olmadığı ve ortamda ses dalgası etkisiyle meydana gelen sıkışma ve genişlemelerin adyabatik olduğu kabul edilir [1]. Adyabatik süreçlerde basınç ile hacim arasında aşağıdaki bağıntının geçerli olduğu bilinmektedir [29, s 580].

$$P V^K = sbt \quad (2.7)$$

Bu bağıntı diferansiyel şekilde yazılırsa,

$$\frac{\partial P}{P} = -K \frac{dV}{V} \quad (2.8)$$

ifadesi elde edilir. Şimdi tekrar Şekil 2.1'deki hacime dönelim. Bu diferansiyel hacim içinde belirli bir andaki toplam basınç ve hacimin değeri,

$$P = P_m + p \quad (2.9)$$

$$V = V_m + v \quad (2.10)$$

olsun. Burada,

P_m : diferansiyel hacimdeki ortalama basınç

V_m : diferansiyel hacmin ortalama hacmi

p : ses dalgasından dolayı diferansiyel hacimdeki basınç değişimi

v : ses dalgasından dolayı diferansiyel hacimdeki hacim değişimi anlamındadır.

$p \ll P_m$ ve $v \ll V_m$ olduğundan,

$$\frac{p}{P_m} = -K \frac{v}{V_m} \quad (2.11)$$

yazılabilir. Her iki tarafın zamana göre türevi alınırsa,

$$\frac{1}{P_m} \frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{K}{V_m} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.12)$$

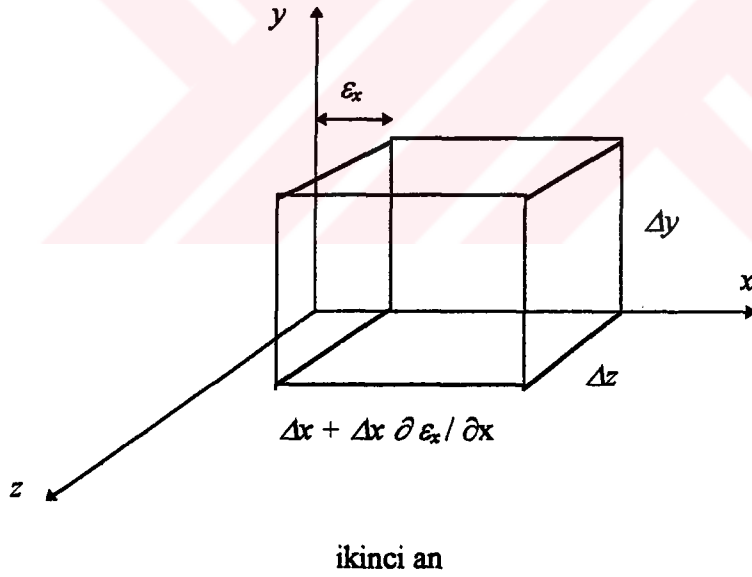
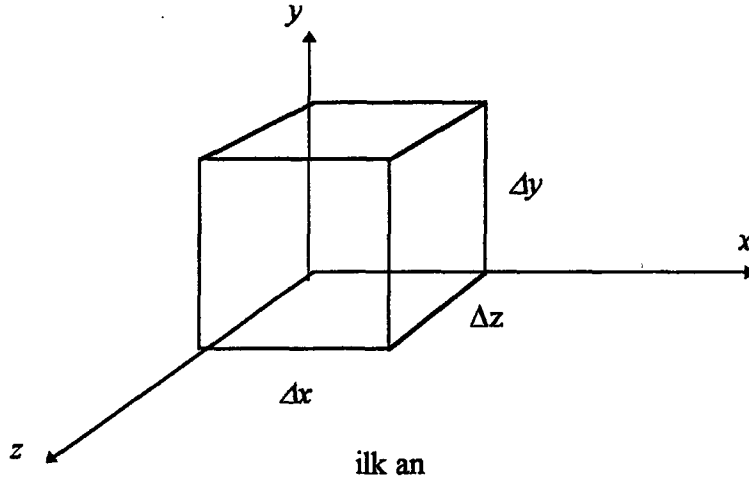
ifadesi elde edilir. Bu denklemden, ileride faydalanılacaktır.

Şimdi de, deforme olabilen diferansiyel hacim içindeki gaz kütesinin sabit kaldığını ifade eden süreklilik denklemini yazalım. Bu amaçla, diferansiyel hacmin boyutlarının ve pozisyonunun belirlendiği ilk an ile hacmin ses dalgası etkisiyle deplasman yaptığı ve deforme olduğu ikinci bir an göz önüne alınsın.

Şekil 2.2'den anlaşılacağı gibi, diferansiyel hacmin y-z düzleminde bulunan orijin tarafındaki yüzeyi, iki an arasında ϵ_x kadar deplasman yapmakta, bu esnada diferansiyel hacim x doğrultusunda $\frac{\partial \epsilon_x}{\partial x} \Delta x$ kadar deformasyona uğramaktadır. Bu durumda hacimdeki artış,

$$v = V_m \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} \quad (2.13)$$

ifadesinden bulunabilir.



Şekil 2.2 Diferansiyal Hacimin Yaptığı Deplasman ve Uğradığı Deformasyon

Denklem (2.13)'ün zamana göre türevi alınırsa,

$$\frac{\partial v}{\partial t} = V_m \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.14)$$

ifadesi elde edilir. Dalga denklemlerini elde etmek için bu denklem ile birlikte Denklem (2.6) ve (2.12)'den faydalanılacaktır. Denklem (2.14), Denklem(2.12)'ye taşınırsa,

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -K P_m \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.15)$$

bulunur. Bu ifadenin zamana göre türevinin alınması ile,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -K P_m \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad (2.16)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (2.6)'nın x'e göre türevi alınırsa,

$$-\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \rho_m \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad (2.17)$$

ifadesine ulaşılır. Son bulunan iki denklem birleştirilirse,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\rho_m}{K P_m} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.18)$$

sonucuna ulaşılır. Denklem (2.1) ve ideal gaz denkleminin kullanımı ile elde edilen,

$$c^2 = K R T = \frac{K P_m}{\rho_m} \quad (2.19)$$

ifadesi Denklem (2.18)'e taşınırsa,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.20)$$

ifadesi bulunur. Bu ifade, akustik basınç için dalga denklemdir. Benzer bir denklemi akustik hız için elde etmek amacı ile, Denklem (2.15)'in x 'e göre türevi alınır,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t} = -K P_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.21)$$

ifadesi bulunur. Denklem (2.6)'nın zamana göre türevi alınır,

$$-\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t} = \rho_m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.22)$$

denklemi elde edilir. Son bulunan iki denklemin birleştirilmesi ve Denklem (2.19)'un kullanılması ile,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.23)$$

ifadesine ulaşılır. Denklem (2.20) ve (2.23), tek boyutlu ses dalgaları için dalga denklemleri olarak isimlendirilir. Tek boyutlu ses dalgaları, sesin sadece bir doğrultuda yayıldığı ve ortam içinde dalgaların ilerleme yönüne dik herhangi bir düzlem üzerindeki bütün noktalarda anlık akustik basınç, anlık akustik hız gibi özelliklerin aynı değerde olduğu dalgalardır.

2.4 DALGA DENKLEMLERİNİN GENEL ÇÖZÜMÜ

Denklem (2.20) ile ifade edilen akustik basınç için dalga denkleminin genel çözümü aşağıdaki gibidir [30, s 32].

$$p = f_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (2.24)$$

Burada f_1 ve f_2 keyfi seçilebilen fonksiyonlar olup, tek şart birinci ve ikinci mertebeden türevlere sahip olmalarıdır. Denklem (2.24)'e benzer bir ifade, istenirse akustik hızı veren dalga denklemi için de yazılabilir.

Sürekli rejim durumu için dalga denklemlerinin genel çözümleri, aşağıdaki gibidir [30, s 32]

$$p(x,t) = \sqrt{2} \left[p_+ e^{i d (ct-x)} + p_- e^{i d (ct+x)} \right] \quad (2.25)$$

$$u(x,t) = \sqrt{2} \left[u_+ e^{i d (ct-x)} + u_- e^{i d (ct+x)} \right] \quad (2.26)$$

Bu ifadelerde,

$$i = \sqrt{-1} \quad (2.27)$$

olarak tanımlanan birim imajiner sayıdır. d ise bir sabit olup,

$$d = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.28)$$

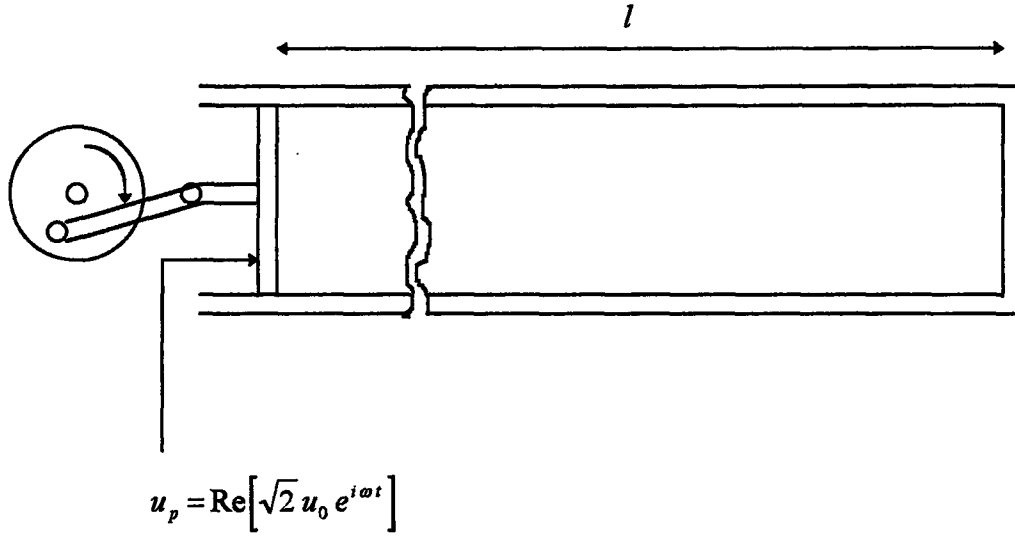
olarak tanımlanmaktadır. Burada ω , ses dalgalarının açısal frekansı olup p_+, p_-, u_+ ve u_- , sınır şartlarına göre değerleri belirlenecek kompleks büyüklüklerdir.

2.5 ÖZEL BİR DURUM İÇİN DALGA DENKLEMLERİNİN TAM ÇÖZÜMLERİ

Bu kısımda, içinde gaz bulunduran uçları kapatılmış bir boru içine bir uçtan sürekli rejimde ses dalgaları uygulanması durumunda dalga denklemlerinin tam çözümleri bulunacaktır. Bu amaçla, bir ucundan çok küçük deplasman salınımları yapan bir piston ile sinüsoidal ses dalgalarının uygulandığı Şekil 2.3'deki gibi bir sistem göz önüne alınsın. Pistonun herhangi bir andaki hızı,

$$u_p = \text{Re} \left[\sqrt{2} u_0 e^{i\omega t} \right] \quad (2.29)$$

ifadesi ile verilsin. Burada Re , parantez içindeki ifadenin reel kısmının alınacağı anlamında olup pistonun efektif hızı u_0 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Bir Ucundan Ses Dalgaları Uygulanan Uçları Kapalı Boru

Sinüsoidal bir dalgada bir pozisyon için akustik basınç, akustik hız, v.b. gibi zaman içinde değişen bir özelliğin genliğinin, o özelliğin söz konusu pozisyondaki karelerin karekökü türünden ortalama değerinin (efektif değerinin) $\sqrt{2}$ katı olduğu bilinmektedir. Buna göre,

$$u_{1p} = \sqrt{2} u_0 \quad (2.30)$$

olmak üzere piston hızı,

$$u_p = \text{Re}[u_{1p} e^{i\omega t}] \quad (2.31)$$

şeklinde de yazılabilir. Burada,

u_{1p} : $x = 0$ pozisyonundaki (pistonun nötr pozisyonu) akustik hız genliği

anlamındadır. Buna göre $x = 0$ pozisyonunda bulunan gaz partiküllerinin akustik hızı $\pm u_{1p} = \pm \sqrt{2} u_0$ değerleri arasında sinüsoidal salınımlar yapmaktadır. Kompleks sayılar teorisinde geniş kullanımı olan,

$$e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t \quad (2.32)$$

Euler bağıntısı [31, s 12] Denklem (2.31)'e taşıyıp çarpım işlemi sonucunun reel kısmı dikkate alınırsa, $x = 0$ pozisyonundaki piston ve gaz partiküllerinin anlık hızının,

$$u_p = u_{1p} \cos \omega t \quad (2.33)$$

olarak da ifade edilebileceği sonucuna ulaşılır.

Söz konusu sistem içindeki akustik hızı pozisyon ve zamana bağlı olarak bulmak amacı ile Denklem (2.26) için sınır şartları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$u(x=0, t) = \sqrt{2} u_0 e^{i\omega t} \quad (2.34)$$

$$u(x=l, t) = 0 \quad (2.35)$$

Burada ilk şart, $x = 0$ pozisyonunda bulunan partiküllerin piston ile aynı hıza sahip olduklarını, ikinci şart ise kapalı olan hareketsiz uçta partiküllerin hızının sürekli sıfır olduğunu ifade etmektedir. İlk sınır şartı Denklem (2.26)'ya taşınırsa,

$$u_+ + u_- = u_0 \quad (2.36)$$

ifadesi elde edilir. İkinci şart kullanıldığında,

$$u_+ e^{-idl} + u_- e^{idl} = 0 \quad (2.37)$$

bulunur. Sonra ise,

$$\sin \theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i} \quad (2.38)$$

bağıntısı yardımıyla,

$$u_+ = \frac{u_0 e^{idl}}{2i \sin dl} \quad (2.39)$$

$$u_- = \frac{u_0 e^{-idl}}{-2i \sin dl} \quad (2.40)$$

eşitlikleri elde edilir. Bu iki ifade Denklem (2.26)'a taşınıp Denklem (2.38) tekrar kullanılırsa,

$$u(x, t) = \sqrt{2} u_0 e^{i\omega t} \frac{\sin d(l-x)}{\sin dl} \quad (2.41)$$

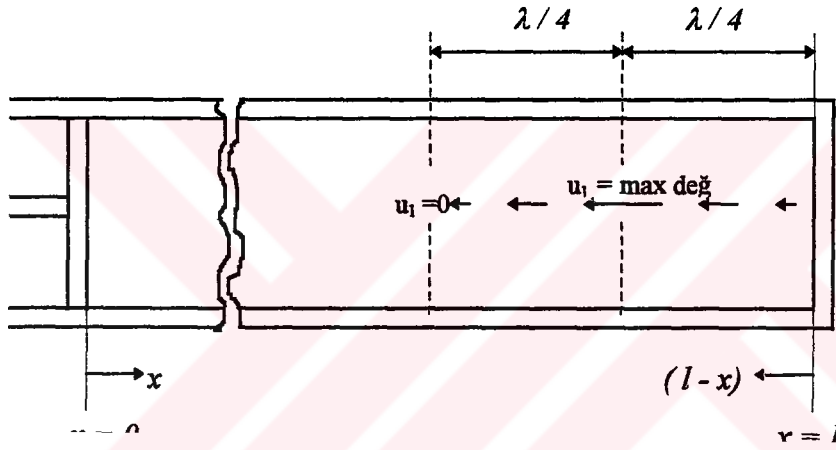
ifadesine ulaşılır. Bu denklem, sistem içinde herhangi bir pozisyondaki anlık akustik hızı vermektedir. Efektif akustik hız ise bu denklemin $\sqrt{2} e^{i\omega t}$ terimine bölünmesi ile,

$$u_{ef} = u_0 \frac{\sin d(l-x)}{\sin dl} \quad (2.42)$$

ifadesinden bulunabilir. Bu denklemlerden, anlık akustik hız, efektif akustik hız ve akustik hız genliğinin pozisyona göre sinüs fonksiyonu şeklinde değiştiği anlaşılmaktadır.

Denklem (2.28)'deki d sabitinin tanımı ve Denklem (2.2) yardımı ile $l-x = \frac{\lambda}{4}$ için $\sin d(l-x) = 1$ olduğu, bu durumda söz konusu pozisyonda efektif akustik hızın ve akustik hız genliğinin maksimum olduğu görülmektedir. $l-x=0$ için akustik hız genliği sıfır iken $l-x=0$ ile $l-x = \frac{\lambda}{4}$ arasında kalan bölgede sürekli artarak maksimum değerine ulaşmaktadır.

Denklem (2.42)'den, $l-x=\frac{\lambda}{4}$ ile $l-x=\frac{\lambda}{2}$ arasında kalan bölgede efektif akustik hız ile onunla orantılı olan akustik hız genliğinin sürekli azaldığı ve $l-x=\frac{\lambda}{2}$ iken sıfır değerine ulaştığı anlaşılmaktadır. $l-x>\frac{\lambda}{2}$ ile $l-x<\lambda$ arasında kalan bölgede ise Denklem (2.42)'in pay tarafında kalan sinüs fonksiyonunun değerinin negatif olduğu görülmektedir. Bu durumda bu bölgedeki partiküllerin hareketi ve $l-x=0$ ile $l-x=\frac{\lambda}{4}$ arasında kalan bölgedeki partiküllerin hareketi arasında 180° faz farkı vardır. Buna göre sistem içinde akustik hız genliğinin değişimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Anlık akustik hızın sürekli olarak sifira eşit olduğu bu pozisyonlar, hız nodları olarak isimlendirilmektedir. [1]. Akustik hız genliğinin maksimum olduğu pozisyonlar ise,

$$x \Big|_{u_1 = \max. \text{ de\u011fer}} = l - \frac{\lambda}{2} \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad n=0,1,2,\dots \quad (2.44)$$

ifadesini sa\u011flayan x de\u011ferleridir. Bu pozisyonlar, hız antinodları olarak isimlendirilir.

Şimdi de sistem içinde akustik basıncı pozisyon ve zamana göre veren bir ifade elde edilecektir. Bu amaçla, akustik basınç ve akustik hız arasındaki Denklem (2.6)'da verilen bağıntı kullanılacaktır.

$$u = u_1 e^{i\omega t} \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u_1 e^{i\omega t} \quad (2.46)$$

eşitlikleri Denklem (2.6)'e taşınır ve düzenleme yapılırsa,

$$p = -i\omega \rho_m \int u dx \quad (2.47)$$

ifadesi elde edilir. Burada u yerine Denklem (2.41)'deki de\u011ferinin taşınması ile sistem içindeki akustik basınç,

$$p(x,t) = -i \rho_m c \sqrt{2} u_0 e^{i\omega t} \frac{\cos d(l-x)}{\sin dl} \quad (2.48)$$

olarak bulunur. Herhangi bir pozisyon için efektif akustik basınç ise, yukarıdaki denklemin $\sqrt{2} e^{i\omega t}$ çarpanına bölünmesi ile,

$$p_{ef} = -i \rho_m c u_0 \frac{\cos d(l-x)}{\sin dl} \quad (2.49)$$

olarak elde edilir. Bu ifadenin i imajiner çarpanı içerdiği halde efektif akustik hızı veren Denklem (2.42)'in imajiner çarpanı içermeyişi, bu ikisi ile orantılı olan akustik basınç genliği ile akustik hız genliği arasında 90° faz farkı olduğunu göstermektedir. Bu zaman farkını daha açık olarak görebilmek için Denklem (2.41), zamana bağlı olan terimi trigonometrik fonksiyon olacak şekilde tekrar yazılsın. Bu durumda Denklem (2.32) yardımıyla,

$$u = \sqrt{2} u_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t) \frac{\sin d(l-x)}{\sin dl} \quad (2.50)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadenin sadece reel kısmının dikkate alınması ile anlık akustik hız,

$$u = \sqrt{2} u_0 \cos \omega t \frac{\sin d(l-x)}{\sin dl} \quad (2.51)$$

olarak bulunur. Benzer işlemler akustik basıncı veren Denklem (2.48)'e uygulanır ve bulunan ifadenin reel kısmı dikkate alınırsa anlık akustik basınç,

$$p = \rho_m c \sqrt{2} u_0 \sin \omega t \frac{\cos d(l-x)}{\sin dl} \quad (2.52)$$

olarak elde edilir. Son iki denklemdeki zaman ifade eden fonksiyonlardan birinin sinüs diğeri kosinüs türünden oluşu, anlık akustik hız ile anlık akustik basınç arasında 90° faz farkı olduğunu göstermektedir. Bir tam salınım için geçen süre periyod (T) kadar olduğuna göre, bir pozisyon için akustik basınç ile akustik hız arasındaki $T/4$ kadar faz farkı bulunmaktadır.

Denklem (2.49)'dan, sistem içinde efektif akustik basınç ve dolayısı ile akustik basınç genliğinin sıfıra eşit olduğu, başka bir ifade ile basınç salınımlarının olmadığı pozisyonların bulunduğu görülmektedir. Pay tarafındaki kosinüs fonksiyonunun sıfır olmasına neden olan bu pozisyonlar,

$$x \Big|_{p_1=0} = l - \frac{\lambda}{2} \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad , \quad n=0,1,2,\dots \quad (2.53)$$

ifadesini sağlayan x değerleridir. Anlık akustik basıncın daima sıfır olduğu bu pozisyonlar, basınç nodları olarak isimlendirilir. Denklem (2.44) incelendiğinde, basınç nodlarının aynı zamanda hız antinodları olduğu görülmektedir.

Denklem (2.49)'dan, hareketsiz kapalı uçta efektif akustik basınç ve onunla orantılı olan akustik basınç genliğinin maksimum olduğu anlaşılmaktadır. Aynı denklem incelendiğinde, akustik basınç genliğinin maksimum olduğu başka pozisyonların da var olabileceği görülmektedir. Bu pozisyonlar,

$$x \Big|_{p_1=\max.değer} = l - \frac{\lambda}{2} n \quad , \quad n=0,1,2,\dots \quad (2.54)$$

ifadesini sağlayan x değerleri olup basınç antinodları olarak isimlendirilir. Denklem (2.43) incelendiğinde, basınç antinodlarının aynı zamanda hız nodları olduğu anlaşılmaktadır.

Denklem (2.42) ve (2.49) incelenirse, bazı l uzunluklarında sistem içindeki akustik hız ve akustik basınç genliklerinin sonsuz büyük olduğu anlaşılmaktadır. Bu denklemlerin paydalarını sıfıra eşit yapan bu uzunluklar, d sabitinin tanımı yardımıyla,

$$l \Big|_{\substack{u_1=\infty \\ p_1=\infty}} = \frac{n\lambda}{2} \quad , \quad n=1,2,3,\dots \quad (2.55)$$

olarak belirlenir. Gerçekte ise uzunluğun yukarıdaki şartı sağladığı durumlarda akustik hız ve akustik basınç genlikleri sonsuz büyüklükte olmayıp, dalga denklemlerinin çıkarılması esnasında ihmal edilen kayıpların varlığı nedeni ile sonlu, fakat hayli büyük değerlere sahiptir.

Uzunluğun Denklem (2.55)'deki şartı sağlaması halinde akustik hız ve basınç genlikleri teorik olarak sonsuz olduğundan, sistemin bu durumuna rezonans hali adı verilir. Yukarıdaki şartın sağlanmasına neden olan frekanslara rezonans frekansı;

içinde rezonans halinde ses dalgalarının bulunduğu sisteme ise rezonatör adı verilir. Denklem (2.55)'den, bir sistemin,

$$f = \frac{nc}{2l} \quad , \quad n=1,2,3,\dots \quad (2.56)$$

şartını sağlayan çok sayıda rezonans frekansı olabileceği anlaşılmaktadır.

Bu bölümde elde edilen anlık akustik hız ve anlık akustik hız ifadeleri ile rezonans frekanslarından, gelecek bölümlerde termoakustik güç üretiminin analizinde faydalanılacaktır.

BÖLÜM 3

VİSKOZİTESİZ ORTAMDA TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİMİ

Termoakustik makinaların yüksek performans gösterebilmeleri için, aralarında küçük boşluklar bulunan plaka benzeri çok sayıda elemanın rezonatör içine uygun pozisyonda konulması gerektiği, kaynak araştırmasından anlaşılmaktadır [1, 16,17].

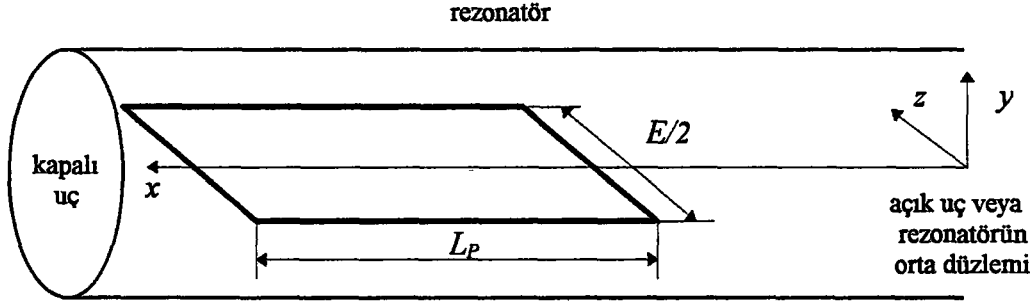
Bu bölümde, içinde rezonans halinde, sürekli rejimde, tek boyutlu, düzlemsel ve duran ses dalgaları bulunan bir rezonatör içine konulmuş bir plaka ve onu çevreleyen ideal gaz hacmi dikkate alınarak, termoakustik güç üretimi için nispeten basit bir model geliştirilecektir. İleride anlaşılabileceği üzere geliştirilen model, termoakustik soğutma için de geçerli olacaktır. Bundan dolayı göz önüne alınan plaka, Şekil 1.2'deki termoakustik güç üreticinin iş üreten yapısına ait olabileceği gibi, Şekil 1.3'deki termoakustik soğutucunun ısı pompalayan yapısına da ait olabilir. Ancak bulunacak ifadelerin basit olabilmesi için, bu bölümde, rezonatör içindeki plakaların çok sayıda değil, sadece bir adet olduğu kabul edilecektir.

3.1 REZONATÖR İÇİNDE AKUSTİK BASINÇ, AKUSTİK HIZ VE AKUSTİK SICAKLIĞIN BELİRLENMESİ

Yukarıda bahsedildiği şekilde, rezonatör içine ses dalgalarının salınım doğrultusuna paralel olarak konulmuş bir tek rijit plaka düşünölsün. Tek boyutlu ses dalgaları, Şekil 3.1'de geometrisi gösterilen bu plakanın etrafındaki akışkan bölgesi içinde bazı değişimlere uğrayacak, bu değişimlerin sonucu olarak termoakustik güç üretimi veya termoakustik ısı pompalanması söz konusu olacaktır.

Boyutlardan L_p plaka uzunluğunu, $E/2$ ise plaka genişliğini göstermektedir. Plaka kalınlığı ihmal edilebilecek kadar küçük kabul edildiğinden, ilgili şekilde sembol ile gösterilmemiştir. Plaka kalınlığı, Bölüm 4'de yapılan viskoziteli analizde dikkate alınacaktır. x eksen, rezonatör içinde akustik basıncın sürekli sıfır olduğu bir basınç

nodundan başlayacak ve plakaya en yakın basınç antinoduna (kapalı rezonatör ucuna) doğru pozitif yönde artacak şekilde seçilmiştir. Rezonatörün bir ucunun atmosfere açık olması durumunda x eksen, açık rezonatör ucundan başlayıp kapalı uca doğru pozitif yönde artacaktır. Rezonatörün iki ucunun da kapalı olması durumunda basınç nodu rezonatörün tam ortası olacağından, x eksen rezonatör ortasından başlayıp, plakanın bulunduğu taraftaki kapalı uca doğru pozitif yönde artacaktır. Plaka yüzeyinden başlatılan y eksen ise, akışkan içinde pozitif olarak artmaktadır.



Şekil 3.1 Tek Boyutlu Ses Dalgaları İçindeki Plakanın Geometrisi

Rezonatör içinde akustik hız ve akustik basıncı veren ifadeleri bulmak için, Denklem (2.41) ve (2.48)'den faydalanılacaktır. Literatürdeki termoakustik makineler ile ilgili çalışmalarda, akustik basınç genliğinin tamamen reel, akustik hız genliğinin ise tamamen imajiner olduğu kabul edilmektedir [1,17,19]. Bundan dolayı, bu çalışmada da akustik basınç genliği tamamen reel, akustik hız genliği ise tamamen imajiner kabul edilecektir. Başka bir ifade ile, herhangi bir pozisyonda akustik basıncın zaman içinde kosinüs fonksiyonu, akustik hızın ise sinüs fonksiyonu şeklinde değiştiği kabulü yapılacaktır. Bu durumda x ekseninin başladığı pozisyon dikkate alınarak rezonatör içinde akustik basınç ile akustik hızı pozisyon ve zamana göre veren ifadeler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$p = p_A \sin\left(\frac{x 2 \pi}{\lambda}\right) \cos \omega t \quad (3.1)$$

$$u = -\frac{p_A}{\rho_m c} \cos\left(\frac{x 2 \pi}{\lambda}\right) \sin \omega t \quad (3.2)$$

Bu denklemlerde,

p_A : rezonatörün basınç antinodlarındaki akustik basınç genliği

ω : ses dalgalarının açısal frekansı

anlamında olup açısal frekans,

$$\omega = 2\pi f \quad (3.3)$$

ifadesinden bulunabilir. Herhangi x bir pozisyondaki akustik basınç genliğini, basınç antinodundaki akustik basınç genliğine göre veren ifade,

$$p_1 = p_A \sin\left(\frac{x 2\pi}{\lambda}\right) \quad (3.4)$$

olarak yazılabilir. Bu durumda akışkanın statik basıncı ile akustik basıncın toplamından oluşan anlık toplam basıncı pozisyon ve zamana göre veren ifade,

$$P = P_m + p_1 \cos \omega t \quad (3.5)$$

olarak ede edilir. Denklem (2.32) yardımı ile Denklem (3.5)'in kompleks notasyondaki eşdeğeri,

$$P = P_m + p_1 e^{i\omega t} \quad (3.6)$$

olarak yazılabilir. Akustik hız kompleks notasyon ile yazılırsa,

$$u_1 = i \frac{P_A}{\rho_m c} \cos\left(\frac{x 2\pi}{\lambda}\right) \quad (3.7)$$

olmak üzere,

$$u = u_1 e^{i\omega t} \quad (3.8)$$

ifadesi elde edilir. Burada u_1 , herhangi bir x pozisyonu için akustik hız genliğidir. Yukarıdaki ifadelerde p_1 'in tamamen reel, u_1 'in ise tamamen imajiner oluşu, aralarında $\frac{\pi}{2}$ kadar faz farkı olmasından kaynaklanmaktadır. Rezonatör içinde akustik basınç ve akustik hız aynı anda gelişmemekte, aralarında 1/4 periyodluk zaman farkı bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak, nod ve antinodlara karşılık gelmeyen herhangi bir x pozisyonunda akustik basınç ekstrem değerlerine ulaştığı anda akustik hız sıfır olmakta, akustik hız ekstrem değerlerine ulaştığı anda ise akustik basınç sıfır olmaktadır.

Şimdi, rezonatörün plakadan y doğrultusunda yeterince uzak akışkan bölgeleri göz önüne alınacak ve plakadan etkilenmeyen bu bölgelerde basınç salınımlarından kaynaklanan sıcaklık salınımlarının genliği ile akustik basınç genliği arasında bir bağıntı bulunacaktır. Genel olarak, adyabatik sıcaklık salınımlarının genliği (akustik sıcaklık genliği) T_1 ile akustik basınç genliği p_1 arasında aşağıdaki bağıntı mevcuttur [1].

$$\frac{T_1}{p_1} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s \quad (3.9)$$

Burada s indisi, parantez içindeki türevin sabit entropide alınacağını göstermektedir.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \left(\frac{\partial v}{\partial s} \right)_p \quad (3.10)$$

Maxwell denklemi [29, s 296] ve özgül hacim ile yoğunluk arasındaki

$$v = \rho^{-1} \quad (3.11)$$

bağıntısı yardımı ile,

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = -\frac{1}{\rho_m^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial s}\right)_p \quad (3.12)$$

denklemini elde edilir. Yukarıdaki denklemlerde indis konumundaki P , parantez içindeki türevin sabit basınçta alınacağını göstermektedir.

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial s}\right)_p = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_p \quad (3.13)$$

bağıntısı Denklem (3.12)'ye taşınır ve bulunan ifade Denklem (3.9)'da kullanılırsa,

$$T_1 = -\frac{1}{\rho_m^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_p p_1 \quad (3.14)$$

ifadesi elde edilir. Burada kullanılmak üzere,

$$\beta = -\frac{1}{\rho_m} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \quad (3.15)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_p = \frac{T_m}{c_{pm}} \quad (3.16)$$

oldukları göz önüne alınırsa akustik sıcaklık genliği,

$$T_1 = \frac{T_m \beta}{\rho_m c_{pm}} p_1 \quad (3.17)$$

olarak elde edilir. Burada,

T_m : gazın ortalama sıcaklığı

β : gazın ısıl genişleme katsayısı

c_{pm} : gazın sabit basınçta ortalama özgül ısısı

anlamındadır. Mükemmel gaz denklemini yardımı ile, ideal gazlar için,

$$\beta = T_m^{-1} \quad (3.18)$$

yazılabilir. Gaz sabiti ile sabit basınçta ve sabit hacimdeki özgül ısılar arasındaki,

$$R = c_{pm} - c_{vm} \quad (3.19)$$

bağıntısı ve

$$\rho_m = \frac{P_m}{R T_m} \quad (3.20)$$

ifadesi Denklem (3.17)'ye taşınırsa,

$$T_1 = \frac{c_{pm} - c_{vm}}{R} \frac{R T_m P_1}{P_m c_{pm}} \quad (3.21)$$

ifadesine ulaşılır. Düzenleme yapılırsa,

$$T_1 = c_{vm} \left(\frac{c_{pm}}{c_{vm}} - 1 \right) \frac{T_m P_1}{P_m c_{pm}} \quad (3.22)$$

denklemini elde edilir. Özgül ısılar arasındaki,

$$K = \frac{c_{pm}}{c_{vm}} \quad (3.23)$$

bağıntısı yardımıyla,

$$\frac{T_1}{T_m} = \frac{K - 1}{K} \frac{P_1}{P_m} \quad (3.24)$$

ifadesi elde edilir. Akustik sıcaklık genliğini bulmak amacı ile p_1 'in Denklem (3.4)'deki değeri Denklem (3.24)'e taşınırsa,

$$T_1 = T_m \frac{K-1}{K} \frac{P_A}{P_m} \sin\left(\frac{x 2 \pi}{\lambda}\right) \quad (3.25)$$

sonucu elde edilir. Buna göre plakadan yeteri kadar uzakta bulunan bir pozisyonda sıcaklık, T_m ortalama sıcaklığı etrafında, değeri Denklem (3.25)'den bulunabilecek T_1 genliği ile salınımlar yapacaktır. Bu durumda plakadan etkilenmeyen bölgelerde akışkan sıcaklığı, Denklem (3.6)'ya benzer şekilde,

$$T = T_m + T_1 e^{i\omega t} \quad (3.26)$$

ifadesinden bulunabilir.

3.2 PLAKA ETRAFINDAKİ AKIŞKAN BÖLGESİ İÇİNDE AKUSTİK SICAKLIK GENLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Bu kısımda, tek boyutlu ses dalgaları içindeki plaka civarında bulunan akışkan hacmi için enerji denklemi çözülecek ve plakanın varlığından dolayı bu bölgede değişen akustik sıcaklık genliği için yeni bir ifade geliştirilecektir. Bu ifadeden, taşınan ısıyı ve üretilen ya da kullanılan akustik işi bulmak amacı ile daha sonra faydalanılacaktır. Karşılaşılabilecek işlemlerin basit olması açısından aşağıdaki kabuller yapılacaktır.

- Termoakustik iş üretimi ya da ısı pompalanması, sürekli rejimde yapılsın.
- Rezonatör içindeki gazın viskozitesi ihmal edilsin. Bunun sonucu olarak akustik hız, y eksenine boyunca sabit olsun.
- Plaka yeterince kısa olsun ve basınç ya da hız antinodlarından yeterince uzakta bulunsun. Bunların sonucu olarak akustik basınç ve hız genlikleri, plaka boyunca sabit kabul edilsin.

- Plakanın ısıl sığası yeterince büyük olsun. Bunun sonucu olarak plaka sıcaklığı, ses dalgalarından kaynaklanan sıcaklık salınımlarından etkilenmesin. Başka bir ifade ile plaka içinde sıcaklık salınımları söz konusu olmasın.

- Plaka, x doğrultusu boyunca sabit bir ∇T_m sıcaklık gradyanına sahip olsun.

-Plakanın herhangi bir x pozisyonundaki ortalama sıcaklığı ile aynı pozisyonda bulunan plakadan yeterince uzak bölgedeki akışkanın ortalama sıcaklığı birbirine eşit olsun. Yani akışkan da ∇T_m sıcaklık gradyanına sahip olsun.

-Plaka ve gazın termofiziksel özellikleri sıcaklıktan bağımsız olsun.

-Plaka ve akışkanın x doğrultusundaki ısı iletkenlikleri ihmal edilsin. Fakat her ikisi de y doğrultusunda ısıyı iletibilsin.

Bu kabullerden sonra plaka civarındaki akışkan için enerji denklemi en genel hali ile aşağıdaki gibi yazılabilir [1].

$$\rho T \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s \right) = k \nabla^2 T \quad (3.27)$$

Burada,

s : akışkanın entropisi

$\mathbf{v}$: akışkanın hızı

k : akışkanın ısı iletim katsayısı anlamındadır.

Ses dalgaları içindeki herhangi bir pozisyonda entropiyi zamana göre veren ifade, Denklem (3.5) ve Denklem (3.26)'ya benzer şekilde,

$$s = s_m + s_1 e^{i\omega t} \quad (3.28)$$

olarak yazılabilir. Burada,

s_m : x pozisyonu için ortalama entropi

s_1 : x pozisyonundaki entropi genliği

anlamındadır.

Ses dalgaları nedeni ile akışkan yoğunluğu da salınımlar yapacağından,

$$\rho = \rho_m + \rho_1 e^{i\omega t} \quad (3.29)$$

yazılabilir. Burada ρ_1 , yoğunluk genliğini göstermektedir. Bu durumda T için Denklem (3.26), v için Denklem (3.8) kullanılarak ve gerekli türev alınarak enerji denklemi tekrar yazılırsa,

$$\left(\rho_m + \rho_1 e^{i\omega t}\right) \left(T_m + T_1 e^{i\omega t}\right) \left(i\omega s_1 e^{i\omega t} + u_1 e^{i\omega t} \frac{ds_m}{dx}\right) = k \frac{d^2 T_1}{dy^2} e^{i\omega t} \quad (3.30)$$

ifadesi elde edilir. $\rho_1 e^{i\omega t} \ll \rho_m$ ve $T_1 e^{i\omega t} \ll T_m$ olduğu göz önünde tutulursa,

$$\rho_m T_m \left(i\omega s_1 + u_1 \frac{ds_m}{dx}\right) = k \frac{d^2 T_1}{dy^2} \quad (3.31)$$

ifadesine ulaşılır. Burada elverişli bir terim olarak görülmeyen s_1 yerine T_1 ve p_1 türünden bir ifade bulunsun. Entropi, basınç ve sıcaklığın fonksiyonu olduğundan,

halini alır. Isıl genleşme katsayısının Denklem (3.15)'deki tanımı ve

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P = \frac{c_p}{T} \quad (3.35)$$

bağıntısı yardımı ile,

$$ds = \frac{c_p}{T} dT - \frac{\beta}{\rho} dP \quad (3.36)$$

denkleminde ulaşılır. Burada c_p , sabit basınçta özgül ısı anlamındadır. Bu ifade genlikler türünden yazılırsa,

$$s_1 = \frac{c_{pm}}{T_m} T_1 - \frac{\beta}{\rho_m} p_1 \quad (3.37)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (3.35)'den,

$$\frac{ds_m}{dx} = \frac{c_{pm}}{T_m} \frac{dT_m}{dx} \quad (3.38)$$

olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre son iki ifade Denklem (3.31)'e taşınıp düzenleme yapılırsa,

$$\frac{d^2 T_1}{dy^2} - \frac{i \omega \rho_m c_{pm}}{k} T_1 = \frac{\rho_m u_1 c_{pm} \nabla T_m}{k} - \frac{i \omega T_m \beta p_1}{k} \quad (3.39)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemin çözülebilmesi için gerekli sınır şartları aşağıdaki gibidir.

$$T_1(y=0) = 0 \quad (3.40)$$

$$T_1(y \rightarrow \infty) = \text{sonlu değer} \quad (3.41)$$

Bu şartlardan ilki, plakanın ısıl sığasının yeteri kadar büyük olduğu kabulüne göre, plaka yüzeyinde bulunan akışkan partiküllerinde sıcaklık salınımlarının görülmeyeceğini, ikincisi ise plakadan yeterince uzak akışkan bölgesinde akustik sıcaklık genliğinin sonlu büyüklükte olduğunu göstermektedir. Denklem (3.39)'un genel çözümü,

$$T_{1g} = c_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega\rho_m c_{pm}}{k}} y\right) + c_2 \exp\left(\sqrt{\frac{i\omega\rho_m c_{pm}}{k}} y\right) \quad (3.42)$$

olarak bulunur. Burada c_1 ve c_2 , değerleri sınır şartları yardımı ile bulunacak sabitlerdir.

Denklem (3.39)'un özel çözümü ise,

$$T_{1\delta} = \frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} + \frac{i u_1 \nabla T_m}{\omega} \quad (3.43)$$

olarak elde edilir. Denklem (3.39)'un tam çözümü, genel ve özel çözümlerin toplamından bulunacaktır. Sınır şartları yardımı ile sabitlerin değerleri için,

$$c_1 = -\frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} - \frac{i u_1 \nabla T_m}{\omega} \quad (3.44)$$

$$c_2 = 0 \quad (3.45)$$

ifadeleri elde edilir. Denklemlerde görülen $i u_1$ çarpanı için Denklem (3.7) yardımı ile,

$$i u_1 = -\text{Im}[u_1] \quad (3.46)$$

yazılabilir. Burada $\text{Im}[u_1]$, u_1 'in imajiner kısmını, yani Denklem (3.7)'nin i çarpanı içermeyen halini göstermektedir. Bunlara göre akustik sıcaklık genliği için tam çözüm,

$$T_1 = \left(\frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} - \frac{\text{Im}[u_1] \nabla T_m}{\omega} \right) \left[1 - \exp \left(- \sqrt{\frac{i \omega \rho_m c_{pm}}{k}} y \right) \right] \quad (3.47)$$

olarak elde edilir. Bu denklemlerde görülen eksponansiyal terim,

$$\sqrt{\frac{i \omega \rho_m c_{pm}}{k}} = \sqrt{\frac{2i \omega}{2\alpha}} = \frac{\sqrt{2i}}{\delta_\alpha} \quad (3.48)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,

$$\alpha = \frac{k}{\rho_m c_{pm}} \quad (3.49)$$

$$\delta_\alpha = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (3.50)$$

olarak tanımlanmakta olup,

α : akışkanın ısıl yayılım katsayısı

δ_α : ısıl nüfuz derinliği

anlamındadır.

Isıl nüfuz derinliği, $1/\omega$ zaman aralığı içinde ısının akışkan içinde nüfuz edebileceği mesafe olarak tanımlanmaktadır [17]. Bunlara göre,

$$\sqrt{2i} = 1 + i \quad (3.51)$$

bağıntısı kullanılarak Denklem (3.47) tekrar düzenlenirse,

$$T_1 = \left(\frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} - \frac{\text{Im}[u_1] \nabla T_m}{\omega} \right) \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{(1+i)y}{\delta_\alpha} \right] \right\} \quad (3.52)$$

sonucu elde edilir. Plakadan yeterince uzak akışkan bölgeleri için akustik sıcaklık genliğini veren Denklem (3.17), kompleks terimler içermemektedir. Başka bir ifade ile bu bölgelerde sıcaklık salınımları ile basınç salınımları aynı anda gelişmekteydi. Plaka civarındaki akustik sıcaklık genliğini veren Denklem (3.52)'de kompleks terimlerin görülmesi ise, plaka yakınındaki akışkan içinde sıcaklık salınımlarının basınç salınımları ile aynı anda gelişmediği anlamına gelmektedir. Aşağıdaki denklemde görüleceği gibi, ancak plakadan yeterince uzak akışkan bölgeleri içinde sıcaklık ve basınç salınımları arasında faz farkı bulunmamaktadır. Bu bölgeler için akustik sıcaklık genliği,

$$y \gg \delta_\alpha \text{ için } T_1 = \frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} - \text{Im}[u_1] \frac{\nabla T_m}{\omega} \quad (3.53)$$

olacaktır. Şimdi ise Denklem (3.52)'nin sağ tarafındaki kompleks çarpanın reel ve imajiner bileşenlerinin y/δ_α oranına göre değişimi grafik olarak elde edilecek, böylece sıcaklık salınımları ile basınç salınımları arasındaki faz farkının y mesafesine bağlı olarak değişimi açık olarak görülecektir. Bu amaçla Denklem (2.35) yardımı ile kompleks çarpan trigonometrik fonksiyon şeklinde yazılırsa,

$$1 - \exp\left[-\frac{(1+i)y}{\delta_\alpha}\right] = 1 - \exp\left(-\frac{y}{\delta_\alpha}\right) \left(\cos\frac{y}{\delta_\alpha} - i \sin\frac{y}{\delta_\alpha}\right) \quad (3.54)$$

eşitliği elde edilir. Bu ifadenin reel ve imajiner kısımları ise,

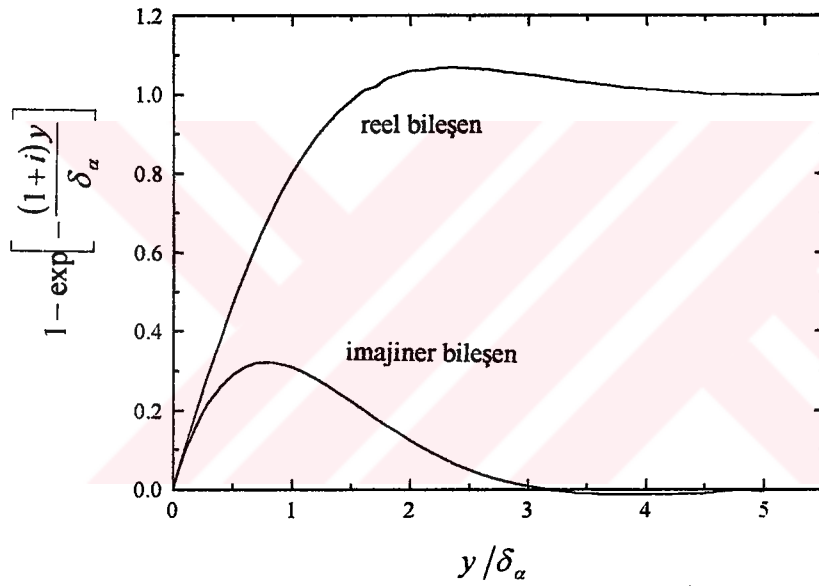
$$\text{Re}\left\{1 - \exp\left[-\frac{(1+i)y}{\delta_\alpha}\right]\right\} = 1 - \exp\left(-\frac{y}{\delta_\alpha}\right) \cos\frac{y}{\delta_\alpha} \quad (3.55)$$

$$\text{Im}\left\{1 - \exp\left[-\frac{(1+i)y}{\delta_\alpha}\right]\right\} = \exp\left(-\frac{y}{\delta_\alpha}\right) \sin\frac{y}{\delta_\alpha} \quad (3.56)$$

olarak bulunur. Bu ifadeler yardımı ile çizilen Şekil 3.2'deki grafikte, kompleks

çarpanın reel ve imajiner bileşenlerinin y/δ_α oranı ile değişimi gösterilmiştir.

İlgili grafikten, plakadan $y=\delta_\alpha$ kadar uzakta imajiner bileşenin reel bileşene göre oldukça küçük kaldığı anlaşılmaktadır. Bunun anlamı, plakadan δ_α kadar uzaklaşıldığında sıcaklık salınımları ile basınç salınımları arasındaki faz farkının hayli küçük olduğudur. Plakadan $y \geq 3\delta_\alpha$ şartını sağlayacak kadar uzaklaşıldığında ise imajiner bileşen sıfır olamakta ve sıcaklık salınımları ile basınç salınımları artık aynı anda gelişmemektedir. $0 < y \leq 3\delta_\alpha$ şartını sağlayan bölge içinde imajiner bileşenin sıfırdan büyük bir değere sahip oluşunun, başka bir ifade ile bu bölge içinde sıcaklık salınımları ile basınç salınımlarının aynı anda gelişmeyişinin, söz konusu bölge içinde kalan akışkanın, termoakustik iş üretimi veya termoakustik ısı pompalama işlevlerinden birini yerine getirmesine neden olacağı izleyen kısımlarda anlaşılabacaktır.



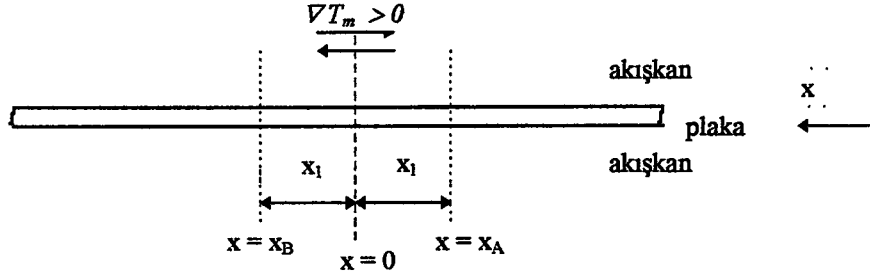
Şekil 3.2 Sıcaklık Genliğinin Kompleks Çarpanının Reel ve İmajiner Bileşenleri

Denklem (3.53) incelendiğinde, bu denklemin ilk teriminin Denklem (3.17) ile aynı olduğu görülmektedir. Bu terim, ses dalgaları nedeni ile akışkanın adyabatik olarak sıkışıp genişlemesinden kaynaklanmaktadır. Denklem (3.53)'ün ikinci terimi ise, plakada ve plakanın etkisi altındaki akışkan hacimi içinde ∇T_m ortalama sıcaklık gradyanının bulunması neden olmaktadır.

Denklem (3.53)'ün ikinci terimin geliş nedenini daha iyi görebilmek için, Şekil 3.3'de gösterildiği gibi, plaka ve civarındaki akışkan hacimi içinde keyfi olarak

seçilmiş bir $x=x_0$ pozisyonu göz önüne alınsın. Bu pozisyon etrafında deplasman salınımları yapan partiküllerin ulaştıkları uç pozisyonlar, $x=x_A$ ve $x=x_B$ olsun. Bu durumda partiküllerin deplasman genliği, aşağıdaki gibi bulunur.

$$x_1 = \frac{x_B - x_A}{2} \quad (3.57)$$



Şekil 3.3 Keyfi Seçilmiş Bir Pozisyon Etrafında Akışkan Partiküllerinin Hareketi

Akışkan partikülleri, x_0 denge pozisyonundan x_1 kadar sağa doğru hareket ederek $x=x_A$ pozisyonundaki basıncın p_1 kadar artmasına neden olsunlar. Bu esnada geçen zaman, $\frac{T}{4} = \frac{1}{4f}$ kadar olacaktır. Burada T , periyodu göstermektedir. Bu durumda partiküllerin $x=x_0$ 'dan $x=x_A$ 'ya gelirken kat ettikleri mesafe,

$$x_A - x_0 = \int_0^{\frac{1}{4f}} u \, dt \quad (3.58)$$

ifadesinden bulunabilir. Bu denklemden kullanmaya elverişli olacak şekilde u için yeni bir ifade bulunsun. Denklem (2.32)'deki Euler bağıntısı yardımıyla, Denklem (3.8) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$u = u_1 (\cos \omega t + i \sin \omega t) \quad (3.59)$$

Denklem (3.7)'den ise,

$$u_1 = i \operatorname{Im}[u_1] \quad (3.60)$$

olduğu anlaşılmaktadır. Burada $\text{Im}[u_1]$, Denklem (3.7)'deki u_1 ifadesinin i çarpanı içermeyen halini göstermektedir. Bu ifade Denklem (3.59)'a taşınır ve sonucun reel kısmı dikkate alınır,

$$u = -\text{Im}[u_1] \sin \omega t \quad (3.61)$$

denklemini elde edilir. Bu ifade Denklem (3.58)'e taşınır ve integrasyon işlemi yapılırsa

$$x_A - x_0 = -\frac{\text{Im}[u_1]}{\omega} \quad (3.62)$$

$$x_1 = \frac{\text{Im}[u_1]}{\omega} \quad (2.63)$$

ifadelerine ulaşılır. Akışkan partikülleri, $x = x_0$ pozisyonunda sahip oldukları sıcaklığı, ulaştıkları uç pozisyonlardan biri olan $x = x_A$ pozisyonuna da taşımaya çalışacaklardır. Bu olayın etkisi ile $x = x_A$ pozisyonundaki akışkanda görülecek sıcaklık salınım genliği,

$$T_{1gr} = (x_A - x_0) \nabla T_m = -\frac{\text{Im}[u_1] \nabla T_m}{\omega} \quad (3.64)$$

olarak bulunur. Burada T_{1gr} , plakanın ∇T_m sıcaklık gradyanına sahip olmasından kaynaklanan sıcaklık salınım genliğini göstermekte olup, Denklem (3.53)'ün ikinci terimine eşit olduğu görülmektedir.

Denklem (3.52) ve (3.53)'den, belirli bir sıcaklık gradyanı için, bu denklemlerdeki adyabatik sıkışma ve genleşmelerden kaynaklanan terim ile sıcaklık gradyanından kaynaklanan terimin birbirlerini etkisiz hale getireceği anlaşılmaktadır. Akustik sıcaklık genliğinin her y pozisyonu için sıfır olmasına neden olan bu gradyan, kritik sıcaklık gradyanı olarak isimlendirilir. Kritik sıcaklık gradyanı, Denklem (3.53)'ün sıfıra eşitlenmesi ile,

$$\nabla T_{kr} = \frac{T_m \beta \omega p_1}{\rho_m c_{pm} \operatorname{Im}[u_1]} \quad (3.65)$$

olarak elde edilir. Kritik sıcaklık gradyanın, belirli çalışma koşulları için plaka civarındaki akışkanın akustik iş üretme ya da ısı pompalama işlevlerinden hangisini yerine getireceğini belirleyen bir kriter olduğu ileride anlaşılabacaktır.

3.3 PLAKA ETRAFINDAKİ AKIŞKAN İÇİNDEN TAŞINAN ISININ BELİRLENMESİ

Bu bölümde, plakadan $y \cong 3\delta_\alpha$ mesafeye kadar olan akışkan bölgesinde sıcaklık salınımları ile basınç salınımlarının aynı anda gelişmeyişinin, bu bölgede kalan akışkan içinde x doğrultusunda bir ısı akısına neden olacağı anlaşılabacaktır. Önceki bölümlerde ses dalgaları içinde bulunan plakanın hem yakınında hem de uzağındaki pozisyonlar için sıcaklığın, akışkan hızının ve entropinin zamana göre değişimini veren ifadeler elde edilmişti. Buna göre Denklem (3.28) yardımı ile akışkan içinde herhangi bir pozisyonda entropi değişimi,

$$\Delta s = s - s_m = s_1 e^{i\omega t} \quad (3.66)$$

ifadesinden bulunabilir. Bu durumda akışkan tarafından taşınan ısı,

$$\underline{Q} = \overline{\dot{m} T \Delta s} \quad (3.67)$$

olacaktır. Burada $\dot{m}$, akışkanın anlık kütleli debisi anlamındadır. Terimler üzerindeki çizgi ise, çarpılacak değişkenlerin aynı anda gelişmediği, aralarında faz farkı bulunduğu anlamına gelmektedir. Anlık kütleli debi ve ısı akılarını veren,

$$\dot{m} = \rho A u \quad (3.68)$$

$$q = \frac{Q}{A} \quad (3.69)$$

ifadeleri yardımıyla,

$$q = \overline{\rho u T \Delta s} \quad (3.70)$$

denklemine ulaşılır. Yukarıdaki ifadelerde,

q : akışkan tarafından taşınan ısı akısı

A : içinden ısıнын taşıdığı alan

anlamındadır.

Bu denklemde ρ, u, T ve Δs yerine daha önce bulunan ilgili ifadeler yazılırsa,

$$q = \overline{(\rho_m + \rho_1 e^{i\omega t}) u_1 e^{i\omega t} (T_m + T_1 e^{i\omega t}) s_1 e^{i\omega t}} \quad (3.71)$$

denklemine ulaşılır. Bu ifade açık olarak yazılırsa,

$$q = \overline{\rho_m T_m u_1 s_1 e^{2i\omega t}} + \overline{\rho_m u_1 T_1 s_1 e^{3i\omega t}} + \overline{T_m \rho_1 u_1 s_1 e^{3i\omega t}} + \overline{\rho_1 u_1 T_1 s_1 e^{4i\omega t}} \quad (3.72)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemde sadece ilk terimin ikinci dereceden, diğerlerinin ise üçüncü ve dördüncü derecelerden oluşu nedeni ile diğer terimler ihmal edilebilir. Bu durumda,

$$q = \overline{\rho_m T_m u_1 s_1 e^{2i\omega t}} \quad (3.73)$$

yazılabilir. Burada s_1 yerine Denklem (3.37)'deki değeri yazılırsa,

$$q = \overline{\rho_m c_{pm} T_1 u_1 e^{2i\omega t}} - \overline{T_m \beta p_1 u_1 e^{2i\omega t}} \quad (3.74)$$

denklemini elde edilir. Buradaki çarpım işlemlerini yapmak için Ek A'da verilen,

ifadesi bulunur. Burada $\sim$ sembolü, üzerinde bulunan kompleks değişkenin eşleniğinin alınacağı anlamındadır. Bu denklemde,

$$\tilde{u}_1 = -i \operatorname{Im}[u_1] \quad (3.76)$$

olup tamamen imajinerdir. Bu durumda,

$$\operatorname{Re}[T_1 \tilde{u}_1] = \operatorname{Re}[T_1 (-i) \operatorname{Im}(u_1)] \quad (3.77)$$

olacaktır. Burada $\operatorname{Im}(u_1)$ tamamen reel olduğundan parantez dışına çıkarılabilir.

Geriye kalan $[T_1 (-i)]$ çarpımının reel sonuç veren kısmı ise $\operatorname{Im}[T_1]$ 'e eşit olacaktır.

Bunun sonucunda,

$$\operatorname{Re}[T_1 \tilde{u}_1] = \operatorname{Im}[T_1] \operatorname{Im}[u_1] \quad (3.78)$$

yazılabilir. Burada $\operatorname{Im}[T_1]$, Denklem (3.52)'nin imajiner kısmının i çarpanı içermeyen halini göstermektedir. Denklem (3.75)'in ikinci terimi ise, çarpılacak değişkenler arasında $\pi/2$ kadar faz farkı bulunduğundan,

$$\operatorname{Re}[p_1 \tilde{u}_1] = \operatorname{Re}[p_1 (-i) \operatorname{Im}(u_1)] = 0 \quad (3.79)$$

olacaktır. Bu denklemde de $\operatorname{Im}(u_1)$ parantez dışına çıkarılabilmekte, fakat tamamen reel olan p_1 ile $(-i)$ 'nin çarpılması sonucu tamamen imajiner bir sayı elde edilmekte; bu sayının reel kısmı bulunmadığından sonuç sıfır olmaktadır. Bulunan ifadeler Denklem (3.75)'e taşınırsa,

$$q = \frac{1}{2} \rho_m c_{pm} \operatorname{Im}[T_1] \operatorname{Im}[u_1] \quad (3.80)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemden, plaka civarındaki akışkan içinden taşınan ısı akısının $\text{Im}[T_1]$ ile orantılı olduğu görülmektedir. Isı akısı, $\text{Im}[T_1]$ ile birlikte plaka yüzeyinde sıfır olmakta, plakadan $y \equiv \delta_\alpha$ kadar uzakta maksimum değerine ulaşmakta ve $y \geq 3\delta_\alpha$ 'da $\text{Im}[T_1] \equiv 0$ olması nedeni ile pratik olarak sıfıra düşmektedir. Başka bir ifade ile, akışkan içinde basınç salınımları ile sıcaklık salınımları arasında faz farkı bulunduğu müddetçe akışkan içinden ısı taşınmaktadır. $y \geq 3\delta_\alpha$ şartını sağlayan bölgede basınç salınımları ile sıcaklık salınımları aynı anda geliştiğinden, bu bölgedeki akışkan içinden ısı taşınması söz konusu olmayacaktır.

Plaka civarındaki akışkan hacmi içinden taşınan toplam ısı, aşağıdaki denklemden bulunabilir.

$$Q = E \int_0^\infty q \, dy \quad (3.81)$$

Burada E, kalınlığı ihmal edilmiş plakanın çevre uzunluğunu vermektedir. Bu durumda T_1 için Denklem (3.52) kullanılırsa,

$$Q = \frac{1}{2} E \rho_m c_{pm} \text{Im}[u_1] \left(\frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} - \frac{\text{Im}[u_1] \nabla T_m}{\omega} \right) \times \text{Im} \left\{ \int_0^\infty \left[1 - \exp \left(- \frac{(1+i)y}{\delta_\alpha} \right) \right] dy \right\} \quad (3.82)$$

ifadesi elde edilir. Buradaki integrasyon işlemi yapılırsa,

$$Q = - \frac{1}{2} E \rho_m c_{pm} \text{Im}[u_1] \left(\frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} - \frac{\text{Im}[u_1] \nabla T_m}{\omega} \right) \delta_\alpha \text{Im} \left[\frac{1}{1+i} \right] \quad (3.83)$$

denkleminde ulaşılır. Buradaki $\frac{1}{1+i}$ terimi, payda kısmının eşleniği olan $(1-i)$ ile çarpılır ve bölünürse,

$$\frac{1}{1+i} = \frac{1-i}{2} \quad (3.84)$$

eşitliği elde edilir. Bu bağıntı yardımıyla,

$$\text{Im}\left[\frac{1}{1+i}\right] = -\frac{1}{2} \quad (3.85)$$

sonucuna ulaşılır. Denklem (3.65)'deki ∇T_{kr} ifadesinden,

$$\text{Im}[u_1] = \frac{T_m \beta \omega p_1}{\nabla T_{kr} \rho_m c_{pm}} \quad (3.86)$$

olduğu anlaşılmaktadır. Denklem (3.83)'de parantez içinde bulunan $\text{Im}[u_1]$ yerine Denklem (3.86)'daki değeri taşınır ve Denklem (3.85) kullanılırsa,

$$Q = -\frac{1}{4} E \delta_a T_m \beta p_1 \text{Im}[u_1] (\phi - 1) \quad (3.87)$$

sonucuna ulaşılır. Burada ϕ ,

$$\phi = \frac{\nabla T_m}{\nabla T_{kr}} \quad (3.88)$$

olarak tanımlanan gradyanlar oranıdır.

Denklem (3.87)'den, plaka etrafındaki akışkan tarafından taşınan ısınnın $(\phi - 1)$ ile orantılı olduğu görülmektedir. Plakanın sahip olduğu ∇T_m sıcaklık gradyanı kritik gradyandan küçük olursa, $(\phi - 1)$ negatif olacaktır. Denklem (3.87)'den, $(\phi - 1) < 0$ için ısınnın pozitif yönde aktığı görülmektedir. x eksenı akustik hız antinodundan basınç antinoduna doğru pozitif olacak şekilde seçildiğinden, bu durumda ısınnın akustik basınç genliğinin maksimum olduğu kapalı uç tarafına, başka

bir ifade ile plakanın sıcak ucuna doğru aktığı anlaşılmaktadır. $(\phi - 1) < 0$ durumunda ısı, plakanın soğuk ucundan sıcak ucuna doğru plaka etrafındaki akışkan içinden taşınmakta, yani ısı pompalanmaktadır.

Plakanın sahip olduğu sıcaklık gradyanının kritik gradyana eşit olması durumunda $(\phi - 1) = 0$ olmakta, bunun sonucunda akışkan içinden ısı taşınması söz konusu olmamaktadır.

Plakadaki gradyanın kritik gradyandan büyük olması durumunda ise $(\phi - 1) > 0$ olacak ve ısı negatif yönde taşınacaktır. Bu durumda ısı, basınç antinodu tarafından hız antinoduna doğru, yani plakanın sıcak ucundan soğuk ucuna doğru plaka etrafındaki akışkan içinden taşınacaktır. Negatif yöndeki bu ısının önemi, izleyen bölümlerde anlaşılabilecektir.

Denklem (3.87), sadece bir plaka civarındaki akışkan tarafından taşınan ısıyı göstermekte olup, bu ısının sayısal değeri hayli küçüktür. Rezonatör içine, ses dalgalarının salınım yönüne paralel ve aralarında $(2...6)\delta_\alpha$ kadar mesafe bulunan çok sayıda plaka konulursa, aynı zamanda plakaların iki ucuna plakalar ile ısı kaynağı ve gideri arasında ısı alışverişi yapabilen küçük ısı değiştiricileri monte edilirse, bir ısı değiştiriciden diğerine plakalar etrafındaki akışkan içinden büyük miktarlarda ısının taşınması mümkün olacaktır.

Denklem (3.87)'den, plakaların akustik hız veya akustik basınç antinodlarından birinin bulunduğu bir bölgede olması durumunda, p_1 veya u_1 'in sıfır olması nedeni ile akışkanın ısı taşıyamayacağı anlaşılmaktadır. Aynı denklemin elde edilmesinde kullanılan Denklem (3.80) ve (3.52)'den ise, $y \geq 3\delta_\alpha$ şartını sağlayan bölge içinde bulunan akışkanın ısı taşımakta etkisiz kaldığı görülmektedir. Denklem (3.87)'nin alt yapısını hazırlayan Bölüm 3.2'de, p_1 ve u_1 'in plaka boyunca sabit kaldığı kabul edilmekteydi. Aynı kabul gereğince, Denklem (3.87) ile ifade edilen akışkan içinden taşınan ısının da plaka boyunca değişmediği kabul edilecektir.

3.4 PLAKA ETRAFINDAKİ AKIŞKAN TARAFINDAN ÜRETİLEN veya KULLANILAN AKUSTİK İŞİN BELİRLENMESİ

Bu bölümde, Şekil 3.1’de gösterilen plakayı çevreleyen akışkan hacmi içinde sıcaklık ve basınç salınımları arasında faz farkı oluşmasının, bu akışkanın akustik iş üretmesine veya akustik iş kullanmasına neden olacağı anlaşılabacaktır.

Üretilen veya kullanılan akustik işi veren ifadeyi bulmak amacı ile, plakayı çevreleyen akışkan bölgesi içinde bulunan $dx dy dz$ diferansiyal hacmi göz önüne alınsın. Bu hacim, daha sonra ses dalgaları nedeni ile genişlemeye uğrasın ve genişleme sonundaki hacmi $dx dy dz + dv$ olsun. Diferansiyal hacim içinde bulunan akışkan kütlelerinin değişmeyeceği göz önünde bulundurularak akışkanın birinci ve ikinci durumlarındaki yoğunlukları için,

$$\rho = \frac{dm}{dx dy dz} \quad (3.89)$$

$$\rho + d\rho = \frac{dm}{dx dy dz + dv} \quad (3.90)$$

ifadeleri elde edilir. Bu denklemlerde,

dm : diferansiyal hacim içindeki akışkanın kütlesi

$d\rho$: genişleme sonunda akışkandaki yoğunluk değişimi

anlamındadır. Bu ifadelerden,

$$\rho dx dy dz = (\rho + d\rho)(dx dy dz + dv) \quad (3.91)$$

olduğu anlaşılmaktadır. Bu ifade açık olarak yazıldığında karşılaşılan $d\rho dv$ terimi diğerlerinin yanında çok küçük olduğundan ihmal edilirse, genişleme sonundaki hacim değişimi,

$$dv = -\frac{d\rho}{\rho} dx dy dz \quad (3.92)$$

olarak bulunur. Diferansiyal hacim genişlerken aynı zamanda çevresine iş vermektedir. Bu iş,

$$dw = P dv = -\frac{P}{\rho} dx dy dz d\rho \quad (3.93)$$

ifadesinden bulunabilir. Akışkanın birim hacim başına birim zamanda yaptığı iş ise,

$$w = \frac{dw}{dx dy dz} = -\frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (3.94)$$

olacaktır. Burada kullanılmak üzere,

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (3.95)$$

yazılabilir. Burada yoğunluk için Denklem (3.29) kullanılıp ρ_1 'in plaka boyunca sabit kaldığı kabul edilirse,

$$\frac{d\rho}{dt} = i\omega \rho_1 e^{i\omega t} + u_1 e^{i\omega t} \frac{\partial \rho_m}{\partial x} \quad (3.96)$$

denklemini elde edilir. Bu ifade Denklem (3.94)' e taşınır ve P için Denklem (3.6) kullanılırsa,

$$w = -\left(\frac{P_m + \rho_1 e^{i\omega t}}{\rho_m + \rho_1 e^{i\omega t}} \right) \left(i\omega \rho_1 e^{i\omega t} + u_1 e^{i\omega t} \frac{\partial \rho_m}{\partial x} \right) \quad (3.97)$$

ifadesi bulunur. Bu denklem açık olarak yazıldığında,

$$\begin{aligned}
w = & - \frac{\overline{P_m i \omega \rho_1 e^{i \omega t}}}{\rho_m + \rho_1 e^{i \omega t}} - \frac{\overline{P_m u_1 e^{i \omega t}} \frac{\partial \rho_m}{\partial x}}{\rho_m + \rho_1 e^{i \omega t}} - \frac{\overline{p_1 e^{i \omega t} i \omega \rho_1 e^{i \omega t}}}{\rho_m + \rho_1 e^{i \omega t}} \\
& - \frac{\overline{p_1 e^{i \omega t} u_1 e^{i \omega t} \frac{\partial \rho_m}{\partial x}}}{\rho_m + \rho_1 e^{i \omega t}}
\end{aligned} \tag{3.98}$$

ifadesine ulaşılır. Bir periyodluk zaman aralığı içinde,

$$\overline{\rho_1 e^{i \omega t}} = 0 \tag{3.99}$$

$$\overline{u_1 e^{i \omega t}} = 0 \tag{3.100}$$

oldukları dikkate alınırsa,

$$w = - \frac{1}{\rho_m} \overline{p_1 \rho_1 i \omega e^{2 i \omega t}} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \rho_m}{\partial x} \overline{p_1 u_1 e^{2 i \omega t}} \tag{3.101}$$

ifadesi elde edilir. Aralarında faz farkı bulunan değişkenlerin çarpım kuralı bu denklemin ikinci terimine uygulandığında,

$$\operatorname{Re}[p_1 \tilde{u}_1] = 0 \tag{3.102}$$

olması nedeniyle ikinci terim sıfıra eşit olacaktır. Denklem (3.102)'de p_1 tamamen reel olduğundan parantez dışına çıkarılabilmekte; $\tilde{u}_1$ ise tamamen imajiner olduğundan reel kısmı sıfır olmakta ve çarpımın sonucu sıfır çıkmaktadır. Bu durumda diferansiyal hacimdeki akışkanın genleşmesi ile birim hacim başına birim zamanda üretilen iş, yani birim hacim başına üretilen akustik güç,

$$w = -\frac{\omega}{\rho_m} \overline{i p_1 \rho_1 e^{2i\omega t}} \quad (3.103)$$

olacaktır. Yoğunluk, sıcaklık ve basıncın fonksiyonu olduğundan,

$$d\rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T dP \quad (3.104)$$

yazılabilir. Bu ifade ve ısı genleşme katsayısının Denklem (3.15)'deki tanımı yardımıyla,

$$\rho_1 = -\rho_m \beta T_1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T p_1 \quad (3.105)$$

denklemini elde edilir. Bu ifade Denklem (3.103)'e taşınırsa,

$$w = \omega \beta \overline{i p_1 T_1 e^{2i\omega t}} - \frac{\omega}{\rho_m} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T \overline{i p_1 p_1 e^{2i\omega t}} \quad (3.106)$$

ifadesine ulaşılır. Burada,

$$\overline{i p_1 p_1} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [i p_1^2] = 0 \quad (3.107)$$

olacağından, aralarında faz farkı bulunan değişkenlerin çarpım kuralına göre elde edilen,

$$\omega \beta \overline{i p_1 T_1 e^{2i\omega t}} = \frac{1}{2} \omega \beta p_1 \operatorname{Re} [iT_1] = \frac{1}{2} \omega \beta p_1 \operatorname{Re} [i T_1] \quad (3.108)$$

denklemini yardımıyla,

$$w = -\frac{1}{2} \omega \beta p_1 \operatorname{Im}[T_1] \quad (3.109)$$

ifadesine ulaşılır. Plaka etrafındaki birim hacime sahip akışkan tarafından birim zamanda üretilen işin $\operatorname{Im}[T_1]$ ile orantılı oluşu, iş üretiminin de ısı taşınmasında olduğu gibi plaka etrafındaki akışkan bölgesi içinde sıcaklık salınımlarının basınç salınımları ile aynı anda gelişmeyişiinden kaynaklandığı anlamına gelmektedir. Daha önce anlaşıldığı gibi, viskozitesiz akışkan durumunda ancak plakadan $y \cong 3\delta_\alpha$ mesafeye kadar olan akışkan hacmi içinde $\operatorname{Im}[T_1]$ 'in değeri sıfırdan farklı olacaktır. Plaka civarındaki akışkan hacmi tarafından birim zamanda üretilen toplam iş ise, Denklem (3.109)'un bütün akışkan hacmi içinde integrasyonu ile,

$$W = -\frac{1}{2} \omega \beta p_1 E L_p \int_0^\infty \operatorname{Im}[T_1] dy \quad (3.110)$$

denkleminde bulunabilir. Burada T_1 için Denklem (3.52) kullanılır ve integrasyon işlemi yapılırsa,

$$W = \frac{1}{2} \omega \beta p_1 E L_p \left(\frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} - \frac{\operatorname{Im}[u_1] \nabla T_m}{\omega} \right) \delta_\alpha \operatorname{Im} \left[\frac{1}{1+i} \right] \quad (3.111)$$

ifadesine ulaşılır. Denklem (3.85) ve (3.86) yardımı ile birim zamanda üretilen toplam akustik iş, yani üretilen akustik güç,

$$W = \frac{1}{4} E \delta_\alpha L_p \frac{T_m \beta^2 \omega}{\rho_m c_{pm}} p_1^2 (\phi - 1) \quad (3.112)$$

olarak elde edilir.

Bu ifadeden, toplam akustik işin, plakadan ısı nüfuz derinliğine kadar olan bölge içinde kalan $E \delta_\alpha L_p$ akışkan hacmi ile orantılı olduğu görülmektedir. Akustik

güç p_1^2 ile orantılı olduğundan, plakanın akustik basınç genliğinin sıfır olduğu basınç nodunda (hız antinodunda) bulunması durumunda akustik iş sıfır olacaktır. Plakanın sahip olduğu sıcaklık gradyanının kritik gradyana eşit olması durumunda $\phi = 1$ olacağından, akustik iş yine sıfır olacaktır. $\nabla T_m > \nabla T_{kr}$, yani $(\phi - 1) > 0$ için Denklem (3.112)'den bulunan iş pozitif olduğundan, bu durumda plaka civarındaki akışkan tarafından akustik iş üretimi yapılmaktadır. $\nabla T_m < \nabla T_{kr}$, yani $(\phi - 1) < 0$ için söz konusu denklemden bulunan iş negatif olduğundan, plaka etrafındaki akışkan tarafından akustik iş absorbe edilmekte, yani kullanılmaktadır.

$(\phi - 1) < 0$ şartını sağlayan yeteri kadar küçük sıcaklık gradyanları için, Denklem (3.87)'den ısının pozitif yönde taşındığı, yani plakanın soğuk ucundan sıcak ucuna doğru plaka etrafındaki akışkan içinden pompalandığı anlaşılmaktadır. $(\phi - 1) < 0$ durumu için akustik işin negatif olması, plaka etrafındaki akışkanın soğuk uçtan sıcak uca doğru ısı taşıırken akustik iş kullandığını göstermektedir. Bu durumda plaka uçlarına soğutulacak ısı kaynağı ve ısı gideri ile bağlantılı ısı değiştiricileri konulursa, soğutulacak kaynaktan çekilecek ısı plaka boyunca çevredeki akışkan tarafından pompalanarak ısı giderine atılacaktır.

$(\phi - 1) > 0$ şartını sağlayan büyük sıcaklık gradyanlarında ise, Denklem (3.87)'den ısının negatif yönde aktığı, yani plakanın sıcak ucundan soğuk ucuna doğru plaka etrafındaki akışkan tarafından taşındığı anlaşılmıştı. $(\phi - 1) > 0$ için akustik işin pozitif olması, ısının sıcak uçtan soğuk uca doğru taşınması esnasında plaka etrafındaki akışkan tarafından akustik iş üretildiği anlamına gelmektedir. Bu durumda plaka etrafındaki akışkan, frekansı içinde bulunduğu rezonatörün rezonans frekansına eşit olan ses dalgaları üretmektedir. Rezonatör içinde termoakustik soğutucularda olduğu gibi ısı pompalayan başka plaka varsa, bu plakanın çevresindeki akışkan, ısı pompalamak amacı ile akustik iş üreten plakanın sağladığı akustik gücü kullanacaktır.

Bir plaka için üretilen iş veya pompalanan ısı çok küçük olmasına rağmen, rezonatör içine aralarında $(2...6) \delta_\alpha$ mesafe bulunan çok sayıda plaka konulması ve bunların uçları ile ısı kaynak ve giderleri arasında ısı değiştiricileri yardımıyla uygun termal bağlantılar kurulması ile pompalanan ısı ya da üretilen iş önemli miktarlarda artacaktır.

3.5 VERİM ve SOĞUTMA TESİR KATSAYISININ BELİRLENMESİ

$(\phi - 1) > 0$ olması halinde gerçekleşen akustik iş üretimi durumunda verim, Denklem (3.112)'nin Denklem (3.87)'ye bölünmesi ve Denklem (3.65)'deki kritik sıcaklık gradyanı ifadesinin kullanılmasıyla,

$$\eta = \frac{W}{Q} = \frac{\Delta T}{\phi T_m} \quad (3.113)$$

olarak elde edilir. Burada ΔT , plakanın uçları arasındaki sıcaklık farkını, T_m ise plakayı çevreleyen akışkanın ortalama sıcaklığını göstermektedir.

Buna göre verimin yüksek olabilmesi için, plakanın sahip olması gereken sıcaklık gradyanı kritik gradyanın hemen üzerinde olmalıdır. Fakat bu durumda $(\phi - 1)$ teriminin küçük oluşu nedeni ile üretilen akustik işin az miktarda olduğu, Denklem (3.112)'den görülmektedir. Büyük miktarlarda akustik iş üretimi ise, ancak düşük verimle sonuçlanan sıcaklıklar ile sağlanabilmektedir. $(\phi - 1) < 0$ olması halinde söz konusu olacak ısı pompalama durumu için soğutma tesir katsayısı, Denklem (3.87)'nin Denklem (3.112)'ye bölünmesiyle,

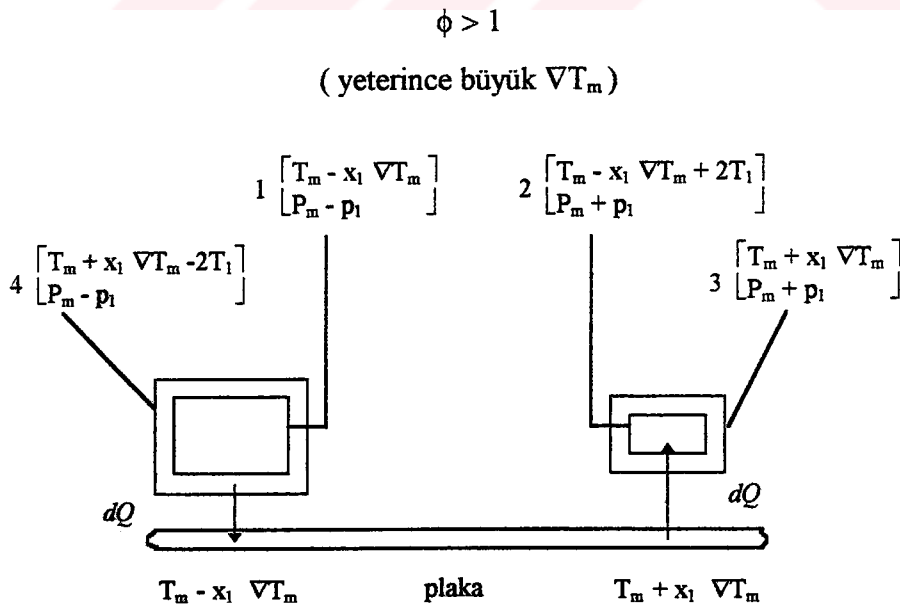
$$STK = \frac{Q}{W} = \frac{\phi T_m}{\Delta T} \quad (3.114)$$

olarak bulunur. Bu ifadeden, büyük STK ile soğutma yapmak istenmekte ise plakanın sahip olması gereken sıcaklık gradyanının, kritik gradyanın hemen altında olması gerektiği anlaşılmaktadır. Fakat bu durumda $(\phi - 1)$ teriminin küçük kalması nedeni ile pompalanan ısının az miktarda olduğu, Denklem (3.87)'den görülmektedir. Buradan, termoakustik soğutucularda büyük miktarda soğutma yapmak istendiğinde, düşük STK veren sıcaklıklar ile çalışılması gerektiği sonucuna ulaşılır.

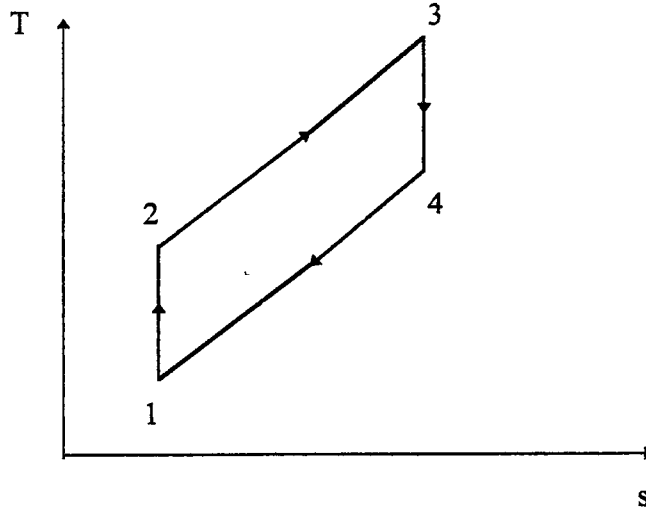
3.6 AKUSTİK İŞ ÜRETİMİ ve ISI POMPALANMASININ ŞEKİLLER YARDIMIYLA AÇIKLANMASI

Bu bölümde, rezonatör içinde bulunan Şekil 3.1'deki plaka etrafında rezonans halindeki ses dalgaları etkisiyle salınım yapmakta olan akışkan içinden, çok küçük hacimde bir akışkan paketçisi ile bu paketçinin ses dalgaları etkisiyle sürekli olarak kat ettiği, deplasman genliğinin iki katı kadar mesafenin altında bulunan çok kısa uzunlukta bir plaka kısmı göz önüne alınacaktır. Plakanın sahip olduğu sıcaklık gradyanının kritik gradyandan, büyük, küçük ve kritik gradyana eşit olması durumlarında plakayı çevreleyen belirli bir bölge içindeki akışkanın sırası ile akustik iş üreteceği, ısı pompalayacağı ve hiçbir işlev görmeyeceği, önceki bölümlerde anlaşılmıştı. Şimdi ise bu üç ayrı durum için paketçinin uğradığı değişimler, göz önüne alınan sistem üzerinde ve T-s diagramında gösterilecektir. Ses dalgalarından kaynaklanan basınç, deplasman ve sıcaklık salınımlarının sinüsoidal olduğu, daha önce elde edilen ilgili denklemlerde görülmüştü. Burada ise, bu salınımların kare profilli dalgalar şeklinde olduğu basitleştirmesi yapılacaktır.

$\nabla T_m > \nabla T_{kr}$ olması durumunda $0 < y < 3\delta_\alpha$ şartını sağlayan bölgede bulunan akışkan akustik iş üretecek olup, bu durumda paketçinin uğradığı çevrim iki adet tersinir adyabatik, iki adet tersinmez sabit basınçta gerçekleşen toplam dört süreçten oluşacaktır. Söz konusu durum için paketçinin uğradığı değişimler, Şekil 3.4 ve 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Akustik İş Üretimi Durumunda Akışkan Paketçisinin Uğradığı Değişimler



Şekil 3.5 Akustik İş Üretimi Durumunda Çevrimin T-s Diagramında Gösterilmesi

Yukarıdaki şekillerde,

$\overline{12}$: tersinir adyabatik sıkışma

$\overline{23}$: sabit basınçta plakadan ısı alma

$\overline{34}$: tersinir adyabatik genişleme

$\overline{41}$: sabit basınçta plakaya ısı verme

işlemlerini göstermektedir.

Şekilden anlaşılacağı üzere, akışkan paketçigi ses dalgaları etkisi ile denge pozisyonu etrafında x_1 genliği ile deplasman salınımları yapmakta ve deplasman genliğinin iki katı olan mesafe boyunca gidip gelmektedir. Paketçigin denge pozisyonunda plaka sıcaklığı T_m olarak kabul edilsin. Bu durumda paketçigin ulaştığı ekstrem pozisyonlarda plaka sıcaklıkları, $T_m + x_1 \nabla T_m$ ve $T_m - x_1 \nabla T_m$ olacaktır. Akustik iş üretimi durumunda, paketçigin plakanın soğuk tarafından sıcak tarafına doğru harekete başladığı an, (1) olarak isimlendirilsin. Bu durumda paketçik ile plakanın ısı dengede olduğu kabul edilsin. Paketçik $2x_1$ kadar mesafeyi hızla tersinir adyabatik olarak katettikten sonra (2) durumuna ulaşsın. Bu durumda paketçigin basıncı ve sıcaklığı, (1) durumuna göre $2T_1$ ve $2p_1$ kadar artacaktır. Paketçigin bu pozisyonunda plaka sıcaklığı, plakanın sahip olduğu sıcaklık gradyanının yeterince büyük oluşu nedeni ile paketçik sıcaklığından büyük olacak, başka bir ifade ile $x_1 \nabla T_m > 2T_1 - x_1 \nabla T_m$ olacaktır. Diğer yandan, (2) durumundan itibaren kare

profilli dalğanın yatay parçasına gelindiğinden paketçik bekleme yapacak; bu esnada yeterli süre bulunması nedeni ile plakadan paketçiğe ısı geçişi olacaktır. Bekleme süresi bitiminde paketçiğin sıcaklığı ideal durum kabulü ile plaka sıcaklığına eşit olacak ve (3) durumuna ulaşılacaktır. Daha sonra paketçik, plakanın soğuk tarafına doğru tersinir adyabatik olarak hızla $2x_1$ kadar hareket edecek ve bu hareket sona erdiğinde (4) durumuna ulaşacaktır. Bu durumda sıcaklık ve basınç, (3) durumuna göre $2T_1$ ve $2p_1$ kadar azalmıştır. Plakanın sahip olduğu sıcaklık gradyanının büyük olması nedeni ile $x_1 \nabla T_m - 2T_1 > -x_1 \nabla T_m$ olacak, başka bir ifade ile (4) durumundaki akışkan, aynı pozisyondaki plakadan daha sıcak olacaktır. Bunun sonucunda, dalğanın yatay profilli kısmına gelinmiş olması nedeni ile paketçiğin bekleme yapması sonucu yeterli zaman da bulunduğundan, paketçikten plakaya ısı geçişi olacak ve paketçik, ideal durum kabulüne göre plaka sıcaklığına kadar soğuyup tekrar (1) durumuna ulaşacaktır.

Bunlara göre, bir çevrim içinde dQ ısının paketçik tarafından plakanın sıcak ucundan soğuk ucuna doğru $2x_1$ mesafesi kadar taşındığı görülmektedir. Çevrim esnasında paketçik yüksek basınçta iken ısı alarak hacim artışına uğramış; düşük basınçta iken ısı vererek hacmi azalmıştır. Bu durumda paketçik yüksek basınçta iken etrafına iş vermiş; düşük basınçta iken paketçik üzerine iş yapılmıştır. Yüksek basıncıdaki işin değeri daha büyük olduğundan, bir çevrimde paketçik tarafından çevreye net olarak iş verilmektedir. Sonuç olarak dQ ısı, plakanın sıcak kısmından soğuk kısmına doğru paketçik tarafından taşınması esnasında akustik iş üretimi yapılmaktadır. Başka bir ifade ile paketçik, rezonatör içinde rezonans halindeki ses dalgalarının devamlı olarak üretilmesine katkıda bulunmaktadır.

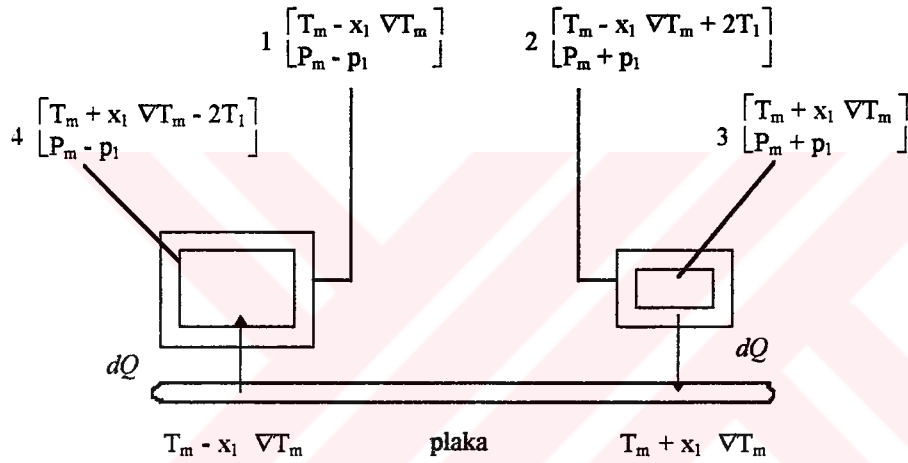
Şekil 3.4'de, plakanın çok küçük bir kısmı gösterilmiştir. Tam uzunluktaki bir plaka üzerinde, birbirleri ile irtibatlı çok sayıda akışkan paketçiği bulunacak ve dQ ısı bu paketçikler tarafından $2x_1$ 'lik mesafeler boyunca plakanın sıcak ucundan soğuk ucuna doğru taşınacaktır. Aralarında uygun mesafeler bulunan çok sayıda plaka rezonatör içine uygun şekilde konulup, plaka uçlarından biri yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağı ile, diğeri ısı gideri ile termal olarak irtibatlandırılırsa, büyük miktarda ısı sıcak uçtan soğuk uca taşınırken, ısıyı taşıyan akışkan tarafından önemli miktarda akustik iş üretimi yapılacaktır. Bu akustik iş, istenirse rezonatör içine konulacak ikinci bir plaka

grubu içinde bulunan akışkan tarafından ısı pompalama amacı ile kullanılabilir; ya da uygun elemanlar kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

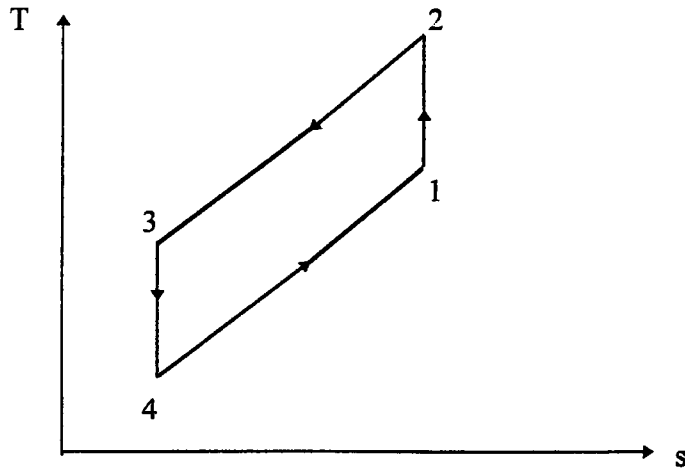
$\nabla T_m < \nabla T_{kr}$ olması durumunda plaka etrafındaki $0 < y < 3\delta_\alpha$ şartını sağlayan bölge içinde kalan akışkan ısı pompalama işlevini yerine getirecek olup, bu bölge içinde göz önüne alınan akışkan paketçığının uğradığı çevrim, iki adet tersinir adyabatik ve iki adet tersinmez sabit basınçta gerçekleşen toplam dört süreçten meydana gelecektir. Bir periyod gibi kısa bir zaman içinde tamamlanan çevrim boyunca akışkan paketçığının uğradığı değişimler, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

$$\phi < 1$$

(yeterince küçük ∇T_m)



Şekil 3.6 Isı Pompalanması Durumunda Akışkan Paketçığının Uğradığı Değişimler



Şekil 3.7 Isı Pompalanması Durumunda Çevrimin T-s Diagramında Gösterilmesi

Yukarıdaki şekillerde,

$\overline{12}$: tersinir adyabatik sıkışma

$\overline{23}$: sabit basınçta plakaya ısı verme

$\overline{34}$: tersinir adyabatik genişleme

$\overline{41}$: sabit basınçta plakadan ısı alma

işlemlerini göstermektedir.

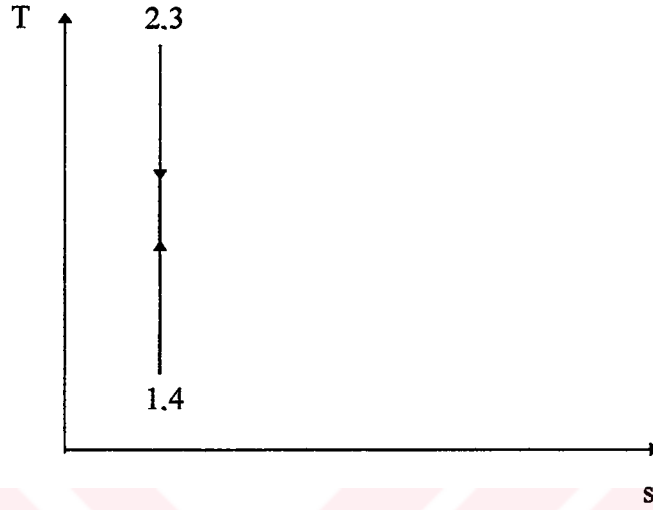
Başlangıç olarak, paketçinin plakanın soğuk tarafında bulunduğu durumda paketçik ile plakanın ısı dengede olduğu kabul edilsin ve bu durum (1) ile gösterilsin. Ses dalgası etkisi ile paketçik, daha sonra deplasman genliğinin iki katı kadar mesafeyi hızla kat edecek; bunun sonucunda basıncı ve sıcaklığı ilk duruma göre $2 T_1$ ve $2 p_1$ kadar artacaktır. Bu hareket sonunda ulaşılan durum, (2) ile gösterilsin. Paketçinin $\overline{12}$ arasında yaptığı hareket kare profilli dalganın dikey parçasına karşılık geldiğinden, bu esnada geçen süre çok kısa olacak ve paketçik ile plaka arasında herhangi bir ısı alışverişi, zaman yetersizliğinden dolayı söz konusu olmayacaktır. Bu nedenle $\overline{12}$ arasındaki süreç, tersinir adyabatik kabul edilecektir. Paketçik (2) durumuna ulaştığı andaki sıcaklığı, plakanın sahip olduğu sıcaklık gradyanının küçük oluşu nedeni ile bu pozisyondaki plaka sıcaklığından daha büyüktür. başka bir ifade ile $2 T_1 - x_1 \nabla T_m > x_1 \nabla T_m$ olduğundan (2) durumundaki paketçik, bu pozisyondaki plakadan daha sıcaktır. Bunun sonucunda paketçikten plakaya ısı geçişi olacak ve paketçik, ideal durumda plaka sıcaklığına kadar soğuyacaktır. Paketçinin ısı verdikten sonra ulaştığı durum (3) ile gösterilsin. $\overline{23}$ arası geçen süre, bu esnada kare profilli dalganın yatay parçasında olunması nedeni ile ısı geçişine izin verecek kadar uzundur. Daha sonra paketçik, hızla plakanın soğuk tarafına doğru $2 x_1$ kadar hareket edecek ve (4) durumuna ulaşacaktır. $\overline{34}$ arasındaki hareket dalganın dikey parçasına karşılık geldiğinden, zaman yetersizliği nedeni ile bu esnada yine ısı alışverişi olmayacak ve bu süreç tersinir adyabatik kabul edilecektir. Paketçik hareketini bitirip (4) durumuna ulaştığı anda sıcaklığı ve basıncı, (3) durumuna göre $2 T_1$ ve $2 p_1$ kadar azalacaktır. Plakanın sahip olduğu sıcaklık gradyanının küçük oluşu nedeni ile paketçinin (4) durumundaki sıcaklığı plakadan daha düşük olacak, yani $x_1 \nabla T_m - 2 T_1 < -x_1 \nabla T_m$ olacaktır. (4) durumundan itibaren kare profilli dalganın

yatay parçasına gelindiğinden paketçik kısa bir süre bekleme yapacak; bu esnada yeterli süre bulunması nedeni ile plakadan paketçiğe ısı geçişi olacak ve bunun sonucunda paketçik, ideal halde plaka sıcaklığına kadar ısınarak tekrar (1) durumuna ulaşacaktır.

Görüldüğü gibi bir çevrimde dQ ısı, plakanın soğuk tarafından sıcak tarafına doğru $2x_1$ mesafe kadar taşınmıştır. Çevrim esnasında paketçik, $P_m + p_1$ basıncına sahip iken hacim azalmasına uğramış, yani paketçik üzerine iş yapılmıştır. Çevrim içinde basınç $P_m - p_1$ iken paketçik hacim artışına uğramış, yani etrafa iş vermiştir. Paketçiğin yüksek basınçta iş alıp düşük basınçta iş yapması nedeniyle bir çevrimde paketçik tarafından iş absorbe edilmiş, yani kullanılmıştır. Buna göre bir çevrim içinde dQ ısı, paketçik tarafından kullanılan net akustik iş ile plakanın düşük sıcaklıktaki kısmından yüksek sıcaklıktaki kısmına $2x_1$ 'lik mesafe boyunca pompalanmıştır.

Şekil 3.6, plakanın çok küçük bir kısmını ve bu kısım üzerindeki küçük bir akışkan paketçiğini göstermektedir. Tam bir plaka ve çevresindeki akışkan, Şekil 3.6'daki gibi çok sayıda sistemin yan yana gelmesinden oluşacak; plaka üzerinde birbirleri ile irtibatlı çok sayıda akışkan paketçiği bulunacaktır. Bu durumda paketçiğin $\overline{41}$ arasında plakadan aldığı ısı, yarım çevrim (zaman olarak $1/2f$) önce bu paketçiğin $2x_1$ kadar sağ tarafında bulunan başka bir paketçik tarafından oraya bırakılmış ısıdır. Bu durumda plaka sadece geçici olarak ısı depolama görevi yapmakta; birbirleri ile irtibatlı çok sayıda akışkan paketçiğinin herbiri $2x_1$ 'lik mesafeler boyunca çok küçük bir sıcaklık aralığı içinde dQ ısını pompalamaktadır. Paketçikler birbirleri ile seri bağlantı halinde olduklarından, dQ ısı plaka boyunca soğuk uçtan sıcak uca taşınmaktadır. Bu esnada herbir paketçik net olarak iş absorbe ettiğinden, paketçik sayısı ile orantılı, dolayısıyla plaka uzunluğu ve genişliği ile orantılı miktarda iş, plaka etrafındaki akışkan tarafından ısı pompalamak amacı ile kullanılmaktadır. Bu iş, hoparlörsüz termoakustik soğutucuda iş üreten yapı tarafından üretilen ses dalgalarının sağladığı akustik iştir. Rezonatör içinde aralarında uygun mesafeler bulunan çok sayıda plaka kullanılıp, plakaların bir ucu soğutulacak kaynakla, diğer ucu ısı gideri ile termal olarak irtibatlandırıldığında, soğutulacak kaynaktan çekilen ısı, plakaların arasındaki boşluklarda bulunan akışkan tarafından plakanın sıcak ucuna pompalanıp buradan ısı giderine atılacak; böylece soğutma yapılabilir.

Dikkate alınan paketçiğin $y \geq 3\delta_\alpha$ şartını sağlayacak kadar plakadan uzakta bulunması durumunda ise plaka ile paketçik arasında ısıl temas sağlanamayacak ve paketçik, ses dalgaları etkisi ile Şekil 3.8’de görüldüğü gibi tersinir adyabatik olarak sıkışma ve genişlemelere maruz kalacaktır. Bu esnada paketçik, akustik iş üretme veya ısı pompalama işlevlerinden hiçbirini yerine getiremeyecektir.



Şekil 3.8 Plakadan Yeterince Uzakta Bulunan Akışkan Paketçiğinin Uğradığı Değişimlerin T-s Diagramında Gösterilmesi

Yukarıdaki şekillerde,

$\overline{12}$: tersinir adyabatik sıkışma

$\overline{23}$: ısı alışverişi olmadan bekleme

$\overline{34}$: tersinir adyabatik genişleme

$\overline{41}$: ısı alışverişi olmadan bekleme

anlamındadır.

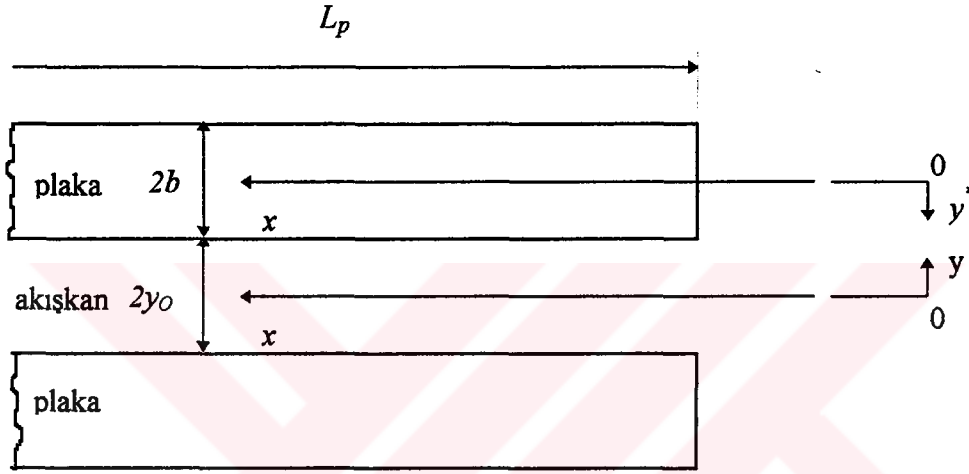
BÖLÜM 4

VİSKOZİTELİ ORTAMDA TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİMİ

Bu bölümde, termoakustik bir güç üreticinin ya da termoakustik soğutucunun, aralarında küçük boşluklara sahip çok sayıda plakadan oluşan iş üreten veya ısı pompalayan yapılarına ait bir plaka ve çevresindeki akışkan hacmi dikkate alınacaktır. Ancak Bölüm 3'dekinin aksine plakaların çok sayıda olduğu gerçeği burada kabul edilecektir. Bölüm 3'de ısı ve iş ifadeleri elde edilirken, karşılaşılabilecek işlemlerin basit olması açısından rezonatör içindeki akışkanın viskozitesi ihmal edilmiş, plaka ve akışkanın x doğrultusunda ısıl iletkenliğe sahip olmadıkları kabul edilmişti. Ayrıca plakaların ısıl sığasının yeterince büyük olduğu, bunun sonucunda plakalar içinde sıcaklık salınımlarının olmadığı kabulü yapılmıştı. Bu bölümde ise akışkanın viskoziteli olduğu, hem akışkan hem de plakalar içinden x doğrultusunda ısı iletimi olacağı ve plakaların ısıl sığasının sonlu büyüklükte olması nedeniyle çevresindeki ses dalgaları etkisiyle plakalarda da sıcaklık salınımları oluşacağı gerçekleri göz önünde bulundurulacaktır.

Bölüm 3'deki termoakustik iş üretimi ya da termoakustik ısı pompalanması işlemlerinin sürekli rejimde yapılıyor olduğu ve plakanın x doğrultusu boyunca sabit bir ∇T_m sıcaklık gradyanına sahip olduğu kabulleri, bu bölümde de geçerlidir. Ayrıca, plakaların yine yeterince kısa olduğu ve basınç ya da hız antinodlarından yeterince uzakta bulunduğu, bunun sonucunda p_1 , u_1 gibi akustik genliklerin plakalar boyunca sabit kaldığı kabulü bu bölümde de yapılacaktır. Basitleştirici kabullerin azlığı nedeni ile bu bölümde karşılaşılabilecek işlemler, Bölüm 3'deki işlemlere göre daha karmaşık ve uzun olacaktır. Ancak sonuçta elde edilecek enerji ve akustik iş ifadeleri daha hassas ve güvenilir olacak; bu ifadeler yardımı ile termoakustik güç üreten ve termoakustik soğutma yapan makinaların dizaynı yapılabilecek ve performansları önceden belirlenebilecektir.

Bu bölümde dikkate alınan sistemin geometrik özellikleri Şekil 4.1'de gösterilmiş olup, bu sistem, rezonans halinde tek boyutlu ses dalgaları içeren rezonatör içinde bulunmaktadır. Burada y ve y^* eksenleri, sırasıyla akışkan ve plakanın tam ortasından başlayacak şekilde seçilmiş olup, x eksenini ise Bölüm 3'de olduğu gibi bir basınç nodundan başlayacak ve plakaya en yakın basınç antinoduna doğru pozitif yönde artacak şekilde seçilmiştir. Söz konusu şekilde L_p plaka uzunluğunu göstermekte olup plaka kalınlığı ve plakalar arasındaki boşluk sırası ile $2b$ ve $2y_0$ ile ifade edilmiştir. Plaka genişliği ise, Bölüm 3'de olduğu gibi $E/2$ 'dir.



Şekil 4.1 Sistemin Geometrik Özellikleri

4.1 PLAKALAR ARASINDAKİ AKIŞKAN BÖLGESİNDE AKUSTİK HIZ GENLİĞİNİN BELİRLENMESİ

İleride karşılaşılabilecek denklemlerin çözülebilmesi için, plakalar arasındaki akışkan bölgesinde akustik hız genliğini veren ifadeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bölümde akışkanın viskoziteye sahip olduğu kabul edildiğinden, plakalar arasındaki bölgede akustik hız genliği, y 'nin fonksiyonu olarak değişecektir. Bu nedenle Bölüm 3'deki viskozitesiz durum için akustik hız genliğini y pozisyonundan bağımsız olarak veren ifade, şimdiki durum için geçerli değildir. Viskoziteli durumda akustik hız genliğini bulmak için momentum denkleminden faydalanılacak olup söz konusu denklem genel hali ile,

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (4.1)$$

olarak yazılabilir [1]. Burada μ , akışkanın dinamik viskozitesini göstermektedir.

Bu denklemin x eksenini üzerindeki bileşeni yazılırsa,

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\frac{dP}{dx} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4.2)$$

ifadesi elde edilir. Burada kullanılacak yoğunluk, akustik hız ve toplam basınç değerleri, sırası ile aşağıdaki gibidir.

$$\rho = \rho_m + \rho_1 e^{i\omega t} \quad (4.3)$$

$$u = u_1 e^{i\omega t} \quad (4.4)$$

$$P = P_m + p_1 e^{i\omega t} \quad (4.5)$$

Diğer taraftan $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ olduğundan, Denklem (4.2)'deki $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ terimi, diğer terim yanında ihmal edilebilir. Yukarıdaki ifadeler Denklem (4.2)'ye taşınır ve gerekli türevler alınır,

$$(\rho_m + \rho_1 e^{i\omega t}) \left[u_1 i\omega e^{i\omega t} + u_1 e^{i\omega t} \frac{\partial (u_1 e^{i\omega t})}{\partial x} \right] = -\frac{d(p_1 e^{i\omega t})}{dx} + \mu \frac{\partial^2 (u_1 e^{i\omega t})}{\partial y^2} \quad (4.6)$$

ifadesine ulaşılır. Bu denklemdeki ikinci ve üçüncü dereceden sonuçlar veren terimler, başka bir ifade ile iki ya da üç genliğin çarpım halinde bulunduğu terimler, birinci dereceden sonuçlar veren terimler yanında çok küçük olacağından, sadece birinci dereceden sonuçlar veren terimler dikkate alınır ve sadeleştirme yapılırsa,

$$i \omega \rho_m u_1 = -\frac{dp_1}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \quad (4.7)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemin çözülebilmesi için gerekli sınır şartları ise,

$$\left. \frac{du_1}{dy} \right|_{y=0} = 0 \quad (4.8)$$

$$u_1|_{y=y_0} = 0 \quad (4.9)$$

olarak yazılabilir. Bu şartlardan ilki, plakalar arasındaki boşluğun tam ortasında akustik hızın ve dolayısı ile akustik hız genliğinin maksimum olduğu anlamında olup, ikinci sınır şartı ise plaka yüzeyinde bulunan akışkan partiküllerinin hareket etmediğini ifade etmektedir.

Denklemin (4.7)'nin çözümü, genel ve özel çözümlerin toplamından oluşup aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$u_1 = A_1 \exp \left(\sqrt{\frac{i \omega \rho_m}{\mu}} y \right) + A_2 \exp \left(-\sqrt{\frac{i \omega \rho_m}{\mu}} y \right) + i \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{\omega \rho_m} \quad (4.10)$$

Burada A_1 ve A_2 sabitler olup, birinci sınır şartının kullanılması ile,

$$A_1 = A_2 = A \quad (4.11)$$

bulunur. İkinci sınır şartı yardımıyla A sabitinin değeri,

$$A = \frac{-i \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{\omega \rho_m}}{2 \cosh \left(\sqrt{\frac{i \omega \rho_m}{\mu}} y_0 \right)} \quad (4.12)$$

olarak elde edilir. Ayrıca,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_m} \quad (4.13)$$

$$\delta_\nu = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \quad (4.14)$$

$$\sqrt{2i} = 1+i \quad (4.15)$$

ifadeleri yardımı ile,

$$\sqrt{\frac{i\omega\rho_m}{\mu}} = \frac{1+i}{\delta_\nu} \quad (4.16)$$

eşitliğine ulaşılır. Yukarıdaki ifadelerde, ν akışkanın kinematik viskozitesi, δ_ν ise viskoz nüfuz derinliği anlamında olup, viskoz nüfuz derinliği, $1/\omega$ kadar süre içinde kayma gerilmesinin akışkan içinde nüfuz edebileceği mesafe olarak tanımlanmaktadır [17]. A sabitinin yukarıda bulunan değerinin Denklem (4.10)'a taşınıp Denklem (4.16)'nın kullanılması ile akışkan içinde akustik hız genliği,

$$u_1 = \frac{i}{\omega\rho_m} \frac{dp_1}{dx} \left\{ 1 - \frac{\cosh\left[\frac{(1+i)y}{\delta_\nu}\right]}{\cosh\left[\frac{(1+i)y_0}{\delta_\nu}\right]} \right\} \quad (4.17)$$

olarak elde edilir.

4.2 PLAKALAR İÇİNDEKİ AKUSTİK SICAKLIK GENLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Plakanın ısıl sığasının sonlu büyüklükte olması nedeni ile akışkandaki akustik sıcaklık salınımlarından plaka da etkilenecek ve plaka içinde sıcaklık, x, y^* ve zamana bağlı olarak aşağıdaki gibi değişecektir.

$$T_s = T_m(x) + T_{s1}(x, y^*)e^{i\omega t} \quad (4.18)$$

Burada,

T_s : plaka içinde herhangi bir pozisyonundaki sıcaklık

$T_m(x)$: göz önüne alınan pozisyonundaki ortalama plaka sıcaklığı

T_{s1} : göz önüne alınan pozisyonunda plakadaki akustik sıcaklık genliği

anlamındadır. Plakadaki akustik sıcaklık genliğini veren ifade, akışkandaki akustik sıcaklık genliğinin bulunabilmesi açısından önemli olduğundan, bu ifadenin elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla plaka için enerji denkleminde faydalanılacak olup, söz konusu denklem,

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \nabla^2 T_s \quad (4.19)$$

olarak yazılabilir. Burada,

$$\alpha_s = \frac{k_s}{\rho_s c_s} \quad (4.20)$$

olarak tanımlanan plakanın ısıl yayılım katsayısı olup,

k_s : plakanın ısı iletim katsayısı

ρ_s : plakanın yoğunluğu

c_s : plakanın özgül ısısı

anlamındadır.

Enerji denkleminde T_s için Denklem (4.18) kullanılır ve gerekli türevler alınıp sadeleştirme yapılırsa,

$$i \omega T_{s1} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial y^2} \right) \quad (4.21)$$

ifadesi elde edilir. T_{s1} 'deki değişim, x doğrultusunda dalgaboyu mertebesinde bir mesafe içinde gerçekleşirken, y^* doğrultusunda plaka yüzeyinden plaka için ısı nüfuz derinliğine kadar olan çok küçük bir mesafe içinde gerçekleşecektir. Bunun sonucunda $\frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial y^{*2}}$ olması nedeni ile küçük olan terim ihmal edilirse,

$$i \omega T_{s1} = \alpha_s \frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial y^{*2}} \quad (4.22)$$

ifadesine ulaşılır. Bu denklem için sınır şartları,

$$\left. \frac{\partial T_{s1}}{\partial y^*} \right|_{y^*=0} = 0 \quad (4.23)$$

$$T_{s1}|_{y^*=b} = T_{b1} \quad (4.24)$$

olarak yazılabilir. Burada ilk şart simetriden kaynaklanmakta olup, ikinci şart ise akışkan-plaka ara yüzeyindeki sıcaklık genliğinin, değeri akışkan için enerji denklemi çözülürken elde edilecek akışkan ve plaka için ortak bir T_{b1} değerine eşit olduğunu göstermektedir.

Denklem (4.22)'nin özel çözümü bulunmayıp, genel çözümü aşağıdaki gibidir.

$$T_{s1} = B_1 \exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\alpha_s}} y^*\right) + B_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{\alpha_s}} y^*\right) \quad (4.25)$$

Burada B_1 ve B_2 sabitler olup, birinci sınır şartının kullanımı ile,

$$B_1 = B_2 = B \quad (4.26)$$

bulunur. İkinci sınır yardımı ile B sabiti,

$$B = \frac{T_{b1}}{2 \cosh\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\alpha_s}} b\right)} \quad (4.27)$$

olarak elde edilir. Denklem (4.15), (4.27) ve

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2\alpha_s}{\omega}} \quad (4.28)$$

ifadesi yardımıyla plakalardaki akustik sıcaklık genliğini pozisyona göre veren ifade,

$$T_{s1} = \frac{T_{b1} \cosh\left[\frac{(1+i)}{\delta_s} y^*\right]}{\cosh\left[\frac{(1+i)}{\delta_s} b\right]} \quad (4.29)$$

olarak elde edilir. Burada δ_s , plaka için ısı nüfuz derinliği olup, $1/\omega$ kadar süre içinde ısının plaka içinde nüfuz edebileceği mesafe olarak tanımlanmaktadır [17].

4.3 PLAKALAR ARASINDAKİ AKIŞKAN BÖLGESİNDE AKUSTİK SICAKLIK GENLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Bölüm 3’de akışkan için akustik sıcaklık genliği bulunurken, plaka yüzeyinde akustik sıcaklık salınımları olmadığı ve akışkanın viskozitesiz olarak düşünülmesi nedeniyle plakayı çevreleyen akışkan içinde hız gradyanı bulunmadığı kabulleri yapılmış; bunların sonucunda akışkanın sahip olduğu akustik sıcaklık genliği için

nisbeten basit bir ifade bulunmuştur. Gerçekte ise akışkandaki sıcaklık salınımlarından plaka da etkilenecek ve plakalar arasındaki akışkan hızı, Denklem (4.17)'de görüldüğü gibi y 'nin fonksiyonu olarak değişecektir. Plakalar arasındaki akışkan tarafından taşınan enerjiyi ve bu esnada kullanılan ya da üretilen akustik işi veren ifadeleri elde edebilmek için, gerçek şartlarda akustik sıcaklık genliğini veren ifadeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ifadeyi bulabilmek için enerji denkleminden faydalanılacak olup, söz konusu denklem genel hali ile,

$$\rho T \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4.30)$$

olarak yazılabilir [1]. Burada k , akışkanın ısı iletim katsayısını göstermektedir. Bu denklemin x eksenini üzerindeki bileşeni ise,

$$\rho T \left(\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.31)$$

şeklindedir. Burada ρ ve u yerine sırası ile Denklem (4.3) ve (4.4)'deki değerleri kullanılacak olup, sıcaklık ve entropi için,

$$T = T_m + T_1 e^{i\omega t} \quad (4.32)$$

$$s = s_m + s_1 e^{i\omega t} \quad (4.33)$$

ifadeleri kullanılacaktır. Akışkan sıcaklığında x doğrultusunda meydana gelen değişimin dalgaboyu mertebesindeki bir mesafe içinde, y doğrultusundaki değişimin ise akışkan için ısı nüfuz derinliği kadar bir mesafe içinde gerçekleşmesi nedeni ile

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \text{ olacağından, çok küçük kalan terim ihmal edilebilir. Diğer yandan,}$$

plakanın yeterince kısa olduğu kabulüne göre s_1 plaka boyunca sabit olacağından,

$$\frac{\partial s}{\partial x} = \frac{ds_m}{dx} \quad (4.34)$$

yazılabilir. Bunlara göre gerekli türevler alınıp Denklem (4.31) tekrar düzenlenirse,

$$\left(\rho_m + \rho_1 e^{i\omega t}\right) \left(T_m + T_1 e^{i\omega t}\right) \left(s_1 i\omega e^{i\omega t} + u_1 e^{i\omega t} \frac{ds_m}{dx}\right) = k \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} e^{i\omega t} \quad (4.35)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemde ikinci ve üçüncü dereceden sonuçlar veren terimler, birinci dereceden sonuçlar veren terimler yanında çok küçük olduklarından ihmal edilebilir. Bu durumda,

$$\rho_m T_m \left(i\omega s_1 + u_1 \frac{ds_m}{dx}\right) = k \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \quad (4.35)$$

ifadesine ulaşılır. Burada s_1 yerine Denklem (3.37), $\frac{ds_m}{dx}$ yerine Denklem (3.38) kullanılıp,

$$\alpha = \frac{k}{\rho_m c_{pm}} \quad (4.36)$$

bağıntısı göz önünde bulundurulur ve düzenleme yapılırsa,

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} - \frac{i\omega T_1}{\alpha} = \frac{u_1}{\alpha} \frac{dT_m}{dx} - \frac{i\omega T_m \beta p_1}{k} \quad (4.37)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemin çözülebilmesi için gerekli sınır şartları ise,

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (4.38)$$

$$T_1|_{y=y_0} = T_{b1} = T_{s1}|_{y^*=b} \quad (4.39)$$

$$k \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=y_0} = -k_s \frac{\partial T_{s1}}{\partial y} \Big|_{y^*=b} \quad (4.40)$$

olarak yazılabilir. Bu şartlardan birincisi, plakalar arasındaki boşluğun tam ortasında simetriden dolayı sıcaklık gradyanı olmayacağını; bunun sonucu olarak bu pozisyonda akustik sıcaklık genliğinin maksimum olacağını göstermektedir. İkinci sınır şartı, plaka-akışkan ara yüzeyinde sıcaklığın ve dolayısı ile akustik sıcaklık genliğinin plaka ve akışkan için ortak bir T_{b1} değerine sahip olacağını, üçüncü sınır şartı ise bu ara yüzeyde akışkan ve plaka arasındaki ısı dengesini göstermektedir.

$$\delta_\alpha = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (4.41)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\delta_\nu^2}{\delta_\alpha^2} \quad (4.42)$$

bağıntıları yardımı ile Denklem (4.37)'nin genel ve özel çözümleri toplamı,

$$T_1 = C_1 \exp[(1+i)y/\delta_\alpha] + C_2 \exp[-(1+i)y/\delta_\alpha] + \frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} + \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} \left\{ \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\nu]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\nu]} \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}-1} - 1 \right\} \quad (4.43)$$

olarak elde edilir. Burada C_1 ve C_2 sabitler olup, Denklem (3.38) ile ifade edilen birinci sınır şartı kullanılırsa,

$$C_1 = C_2 = C \quad (4.44)$$

bulunur. İkinci sınır şartı yardımı ile,

$$C = \frac{T_{b1}}{2 \cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} - \frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} \frac{1}{2 \cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} - \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} \frac{1}{Pr-1} \frac{1}{2 \cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \quad (4.45)$$

olarak elde edilir. Buna göre akustik sıcaklık genliği için,

$$T_1 = \frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} \left\{ 1 - \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \right\} + T_{b1} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} - \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} \left\{ 1 + \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \frac{1}{Pr-1} - \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\nu]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\nu]} \frac{Pr}{Pr-1} \right\} \quad (4.46)$$

ifadesine ulaşılır. Görüldüğü gibi akışkan için akustik sıcaklık genliği, Denklem (4.29)'daki plaka için akustik sıcaklık genliği gibi, plaka-akışkan ara yüzeyindeki akustik sıcaklık genliğini gösteren T_{b1} 'e bağlıdır. Bu ortak sıcaklık genliği için bir ifade bulmak amacıyla Denklem (4.40)'daki üçüncü sınır şartı kullanılırsa,

$$T_{b1} = \frac{\varepsilon_s}{1 + \varepsilon_s} \left[\frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} + \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} \frac{1}{Pr-1} \left(1 - \frac{f_\nu}{f_\alpha} \right) \right] \quad (4.47)$$

denklemini elde edilir. Burada ε_s , f_ν ve f_α sabitler olup anlamları aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon_s = \frac{\sqrt{k \rho_m c_{pm}}}{\sqrt{k_s \rho_s c_s}} \frac{\tanh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]}{\tanh[(1+i)b/\delta_s]} = \frac{k \delta_s}{\delta_\alpha k_s} \frac{\tanh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]}{\tanh[(1+i)b/\delta_s]} \quad (4.48)$$

$$f_\nu = \frac{\tanh[(1+i)y_0/\delta_\nu]}{(1+i)y_0/\delta_\nu} \quad (4.49)$$

$$f_\alpha = \frac{\tanh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]}{(1+i)y_0/\delta_\alpha} \quad (4.50)$$

Bulunan T_{b1} ifadesi Denklem (4.46)'ya taşınıp düzenleme yapıldığında, plakalar arasındaki boşluklarda bulunan akışkan için akustik sıcaklık genliği,

$$T_1 = \frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} - \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} \left\{ 1 - \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}-1} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} \right\} - \left\{ \frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} + \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} \frac{1}{\text{Pr}-1} \left(1 + \varepsilon_s \frac{f_v}{f_\alpha} \right) \right\} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{(1+\varepsilon_s) \cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \quad (4.51)$$

olarak elde edilir. Görüldüğü gibi viskozitenin göz önüne alınması ve plakalarda sıcaklık salınımlarının olabileceği kabulü ile, Denklem (3.52)'deki akustik sıcaklık genliği ifadesi çok daha karmaşık hale gelmektedir. Denklem (4.51)'den, ileride termoakustik olarak taşınan enerji ve üretilen ya da kullanılan akustik iş ifadelerinin elde edilmesinde faydalanılacaktır.

4.4 DALGA DENKLEMİNİN ELDE EDİLMESİ

Bu kısımda, akustik basınç, plaka ve akışkanın termodinamik özellikleri, frekans, plakanın sahip olduğu sıcaklık gradyanı, plakalar arasındaki boşluk, plaka kalınlığı ve dolaylı olarak rezonatör uzunluğu arasında genel bir bağıntı kuran bir dalga denklemi geliştirilecektir. Bu amaçla süreklilik denkleminden, önceki kısımlarda elde edilen akustik hız genliği ve akışkan için akustik sıcaklık genliği ifadelerinden faydalanılacaktır. Bulunacak dalga denklemi, akışkan tarafından üretilen veya kullanılan akustik işi elde etmek için ileride kullanılacaktır.

Genel hali ile süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (4.52)$$

olarak ifade edilir[1]. Bu denklemde vektörel akışkan hızı,

$$\mathbf{v} = u \vec{i} + v \vec{j} \quad (4.53)$$

olmak üzere x ve y doğrultularında iki bileşenden oluşacaktır. Akustik hızın y doğrultusunda bileşene sahip oluşu, plaka ile akışkan arasında ısı alışverişi sonucu plaka yakınındaki akışkan hacminde artma ve azalmaların meydana gelmesi nedeni ile akışkan partiküllerinin y doğrultusunda hareket etmesinden kaynaklanmaktadır. Bu doğrultuda akışkan hızı, x doğrultusundaki hıza benzer şekilde zaman içinde sinüsoidal salınımlar yapacak olup,

$$v = v_1 e^{i\omega t} \quad (4.54)$$

olarak ifade edilebilir. Burada v_1 , y doğrultusundaki akustik hız genliği anlamındadır. Dalga denkleminin elde edilebilmesi için sadece x doğrultusundaki akustik hız genliğinin bilinmesi yeterli olup, birazdan anlaşılabileceği üzere y doğrultusundaki hız genliğinin bilinmesine gerek kalmayacaktır. Bunlara göre Denklem (4.52)'nin x doğrultusundaki bileşeni,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) = 0 \quad (4.55)$$

olarak yazılabilir. Burada ρ için Denklem (4.3), u için Denklem (4.4), v için Denklem (4.54) kullanılır ve gerekli türevler alınırsa,

$$i\omega \rho_1 e^{i\omega t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\rho_m + \rho_1 e^{i\omega t}) (u_1 e^{i\omega t}) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\rho_m + \rho_1 e^{i\omega t}) (v_1 e^{i\omega t}) \right] = 0 \quad (4.56)$$

ifadesine ulaşılır. Çok küçük olmaları nedeni ile ikinci dereceden sonuçlar veren terimler ihmal edilip sadece birinci dereceden çarpım sonuçları veren terimler göz önüne alınır ve sadeleştirme yapılırsa,

$$i\omega \rho_1 + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_m u_1) + \rho_m \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (4.57)$$

denklemini elde edilir. Denklem (4.7)'den,

$$\rho_m u_1 = \frac{dp_1}{dx} \frac{i}{\omega} - \frac{i\mu}{\omega} \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \quad (4.58)$$

olduğu anlaşılmaktadır. Bu ifade Denklem (4.57)'ye taşınır ve her iki taraf $i\omega$ ile çarpılırsa,

$$-\omega^2 \rho_1 - \frac{d^2 p_1}{dx^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) + i\omega \rho_m \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (4.59)$$

ifadesine ulaşılır. Burada ρ_1 yerine kullanılmak üzere T_1 ve p_1 türünden daha elverişli bir ifade geliştirilecektir. Bu amaçla Denklem (3.105)'den faydalanılacak olup, mükemmel gaz denklemini ve Denklem (2.1) yardımıyla,

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{R T} = \frac{K}{c^2} \quad (4.60)$$

bağıntısı elde edilir. Bu ifade Denklem (3.105)'e taşınırsa,

$$\rho_1 = -\rho_m \beta T_1 + \frac{K}{c^2} p_1 \quad (4.61)$$

denklemini bulunur. Bu ifade Denklem (4.59)'da kullanılırsa,

$$\omega^2 \rho_m \beta T_1 - \frac{\omega^2}{c^2} K p_1 - \frac{d^2 p_1}{dx^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) + i\omega \rho_m \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (4.62)$$

ifadesine ulaşılır. Burada T_1 yerine Denklem (4.51)'deki değeri, u_1 yerine Denklem (4.17)'deki değeri kullanılıp denklemin her iki tarafındaki terimler dy ile çarpılır ve $y = 0$ ile $y = y_0$ sınırları arasında integre edilirse,

$$\omega^2 \rho_m \beta \int_0^{y_0} T_1 dy - \frac{\omega^2}{c^2} K \int_0^{y_0} p_1 dy - \int_0^{y_0} \frac{d^2 p_1}{dx^2} dy \quad (4.63)$$

$$+ \int_0^{y_0} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) dy + i \omega \rho_m \int_0^{y_0} \frac{\partial v_1}{\partial y} dy = 0$$

denklemini elde edilir. Buradaki integrasyon işlemlerinin sonuçları, aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \int_0^{y_0} T_1 dy &= \frac{T_m \beta p_1 y_0}{\rho_m c_{pm}} - \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} y_0 + \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} \frac{Pr}{Pr-1} \\ &\times \frac{\delta_v}{1+i} \tanh[(1+i) y_0 / \delta_v] - \left[\frac{T_m \beta p_1}{\rho_m c_{pm}} + \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} \frac{1}{Pr-1} \left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_a} \right) \right] \\ &\times \frac{1}{1+\varepsilon_s} \frac{\delta_a}{1+i} \tanh[(1+i) y_0 / \delta_a] \end{aligned} \quad (4.64)$$

$$\int_0^{y_0} p_1 dy = p_1 y_0 \quad (4.65)$$

$$\int_0^{y_0} \frac{d^2 p_1}{dx^2} dy = \frac{d^2 p_1}{dx^2} y_0 \quad (4.66)$$

$$\int_0^{y_0} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) dy = - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\mu i}{\omega \rho_m} \frac{dp_1}{dx} \frac{(1+i)}{\delta_v} \tanh[(1+i) y_0 / \delta_v] \right\} \quad (4.67)$$

$$\int_0^{y_0} \frac{\partial v_1}{\partial y} dy = 0 \quad (4.68)$$

Son integrasyon işleminde sonucunun sıfır çıkmasının nedeni, plakalar arasındaki boşluğun tam ortasında ($y = 0$ pozisyonunda) bulunan akışkan

partiküllerinin, her iki plakanın etkisi altında olmaları nedeni ile y doğrultusunda hıza sahip olmayışı ve plaka yüzeyinde ($y = y_0$ pozisyonunda) bulunan partiküllerin hareket etmeyişidir. Denklem (4.64)'ün parantez içindeki ilk terimi için,

$$\frac{T_m \beta}{\rho_m c_{pm}} = \frac{K-1}{K} \frac{T_m}{P_m} \quad (4.69)$$

olduğu, Denklem (3.17) ve (3.24)'den anlaşılmaktadır. Diğer yandan, mükemmel gaz denklemini ile ısı genleşme katsayısının Denklem (3.15)'teki tanımı ve Denklem (2.1) kullanılırsa,

$$\beta = \frac{K P_m}{\rho_m c^2 T_m} \quad (4.70)$$

bağıntısı elde edilir. Buradan bulunacak,

$$\frac{T_m}{P_m} = \frac{K}{\rho_m c^2 \beta} \quad (4.71)$$

ifadesi Denklem (4.69)'a taşınırsa,

$$\frac{T_m \beta}{\rho_m c_{pm}} = \frac{K-1}{\rho_m c^2 \beta} \quad (4.72)$$

denkleminde ulaşılır. Bu ifadeden, Denklem (4.64)'ün yeniden düzenlenmesinde faydalanılacaktır.

Denklem (4.67)'nin her iki tarafı $\frac{1+i}{\delta_v}$ terimi ile çarpılıp bölünür ve f_v 'nin

Denklem (4.49)'daki tanımı kullanılırsa,

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\mu i}{\omega \rho_m} \frac{dp_1}{dx} \frac{1+i}{\delta_v} \tanh[(1+i)y_0/\delta_v] \right\} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{2\mu}{\omega \rho_m} \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{\delta_v^2} f_v y_0 \right] \quad (4.73)$$

ifadesi elde edilir. Dinamik ve kinematik viskoziteler arasındaki bağıntı ile viskoz nüfuz derinliğinin Denklem (4.14)'deki tanımını yardımıyla,

$$\frac{2\mu}{\omega \rho_m \delta_v^2} = 1 \quad (4.74)$$

bağıntısı bulunur. Bu durumda,

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\mu i}{\omega \rho_m} \frac{dp_1}{dx} \frac{1+i}{\delta_v} \tanh[(1+i)y_0/\delta_v] \right\} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dp_1}{dx} f_v y_0 \right) \quad (4.75)$$

olacaktır. Denklem (4.72)'deki bağıntı Denklem (4.64)'de kullanılıp f_v ve f_α sabitlerinin Denklem (4.49) ve (4.50)'deki tanımları göz önünde bulundurulur ve bütün terimlerin integrasyon sonuçları Denklem (4.63)'e taşınırsa,

$$\begin{aligned} & \frac{\omega^2}{c^2} (K-1) p_1 y_0 - \beta \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} y_0 + \beta \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} \frac{Pr}{Pr-1} f_v y_0 \\ & - \left[\frac{\omega^2}{c^2} (K-1) p_1 + \beta \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} \frac{1}{Pr-1} \left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} \right) \right] \frac{1}{1+\varepsilon_s} f_\alpha y_0 \\ & - \frac{\omega^2}{c^2} K p_1 y_0 - \frac{d^2 p_1}{dx^2} y_0 + \frac{d}{dx} \left(\frac{dp_1}{dx} f_v y_0 \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.76)$$

ifadesine ulaşılır. Bu denklemin her iki tarafı $-\frac{c^2}{\omega^2}$ terimi ile çarpılıp sadeleştirme yapılırsa,

$$\begin{aligned} & \left[1 + \frac{(K-1)f_\alpha}{1+\varepsilon_s} \right] p_1 + \frac{c^2}{\omega^2} \frac{d}{dx} \left[(1-f_v) \frac{dp_1}{dx} \right] - \beta \frac{c^2}{\omega^2} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{1-Pr} \frac{1}{1+\varepsilon_s} \\ & \times \left[(Pr-1)(1+\varepsilon_s) + f_\alpha + \varepsilon_s f_v - Pr f_v (1+\varepsilon_s) \right] = 0 \end{aligned} \quad (4.77)$$

ifadesi elde edilir. Rezonatör ve plakaların geometrik özellikleri, rezonatör içinde kullanılan akışkanın termofiziksel özellikleri ve plakaların sahip olduğu sıcaklık gradyanı ile akustik basınç genliği arasındaki bağıntı kuran bu denklem, dalga denklemi olarak isimlendirilecektir. Dalga denkleminde, daha sonra plakaları çevreleyen akışkan tarafından üretilen veya kullanılan akustik iş ifadesinin bulunmasında faydalanılacaktır.

4.5 TOPLAM ENERJİ AKISI DENKLEMİNİN ELDE EDİLMESİ

Bu kısımda, bir plaka ve bu plakayı çevreleyen akışkan hacmi için toplam enerji akısını veren bir ifade geliştirilecektir. Bu ifade, birim plaka çevre uzunluğu başına plaka ve çevresindeki akışkan hacmi içinden taşınan ısıyı toplam olarak gösterecektir. Bu bölümde göz önüne alınan sistem, Şekil 4.1'deki plakalardan birinin $y^* = 0$ düzlemi boyunca kesilmesi ile oluşan yarım plaka ve bu plakayı bir taraftan y_0 mesafesine kadar kuşatan akışkan hacmidir. Plaka ve çevresindeki akışkan için enerji denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho u_i \right) = - \nabla \cdot (-K_\lambda \nabla T + \rho h v) \quad (4.78)$$

olarak yazılabilir [1]. Burada,

u_i : iç enerji

K_λ : ısı iletim katsayısı

h : akışkanın entalpisi

anlamındadır. Bu denklemin sol tarafı, diferansiyel hacimdeki akışkan ve plaka tarafından depolanan ısıyı göstermektedir. Sağ taraf ise, bu hacmin ısı iletimi ve kütle geçiş yolları ile kazandığı net enerjiyi ifade etmektedir. Denklemdaki ısı iletimini gösteren terim,

$$K_\lambda \nabla T = k \nabla T + k_s \nabla T \quad (4.79)$$

olacak şekilde iki bileşenden oluşacaktır. Burada, k akışkanın ısı iletim katsayısı, k_s ise plakanın ısı iletim katsayısıdır.

Denklem (4.78)'in x doğrultusundaki bileşeni yazılıp akışkan ile ilgili terimler $y = 0$ ile $y = y_0$ sınırları arasında; plaka ile ilgili terimler $y^* = 0$ ile $y^* = b$ sınırları arasında integre edilir ve zamana göre ortalamalar alınırsa,

$$\frac{d}{dx} \left(\int_0^{y_0} \overline{\rho h u} dy - k \int_0^{y_0} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} dy - k_s \int_0^b \frac{\partial \overline{T_s}}{\partial x} dy^* \right) = 0 \quad (4.80)$$

ifadesine ulaşılır. Sürekli rejim kabulü nedeniyle plaka ve çevresindeki akışkan hacmi içinde zamana göre ortalama enerji depolanması söz konusu olmayacağından, Denklem (4.78)'in sol tarafına integrasyon ve ortalama işlemleri uygulandığında, sonuç sıfır olarak bulunmuştur. Denklem (4.80)'in parantez içindeki, x boyunca değişmeyen kısmı, bir plaka için, birim plaka çevre uzunluğu başına zamana göre ortalama enerji akısını ifade etmektedir. Buna göre,

$$\frac{\dot{H}}{E} = \int_0^{y_0} \overline{\rho h u} dy - k \int_0^{y_0} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} dy - k_s \int_0^b \frac{\partial \overline{T_s}}{\partial x} dy^* \quad (4.81)$$

olarak yazılabilir. Burada $\dot{H}$, bir plaka ve çevresindeki akışkan için toplam enerji akısıdır. Bu denklemin ikinci ve üçüncü terimleri, akışkan ve plaka içindeki ortalama sıcaklık gradyanlarının aynı olacağı kabul edilerek,

$$-\int_0^{y_0} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} dy - k_s \int_0^b \frac{\partial \overline{T_s}}{\partial x} dy^* = -(k y_0 + k_s b) \frac{dT_m}{dx} \quad (4.82)$$

olarak yazılabilir. Denklem (4.81)'in ilk terimi yerine kullanılmak üzere daha elverişli bir ifade bulabilmek amacıyla yoğunluk için Denklem (4.3)'den faydalanılacak, entalpi ve hız için ise aşağıdaki ifadeler kullanılacaktır [25].

$$h = h_m + h_1 e^{i\omega t} \quad (4.83)$$

$$u = u_1 e^{i\omega t} + u_2 \quad (4.84)$$

Burada,

h_m : akışkanın ortalama entalpisi

h_1 : akustik entalpi genliği

u_2 : streaming olarak isimlendirilen zamana göre ortalama akustik hız [1] anlamındadır.

Burada u_2 , sıfır olmayan bir değere sahip olup, u_1 'in karesi ile orantılı olduğundan ikinci dereceden bir terimdir. Bundan dolayı 2 indisi taşımaktadır. Üçüncü ve dördüncü bölümlerdeki işlemlerde u_2 'nin dikkate alınmayışının nedeni, u ile p , T , v.b. gibi akustik değişkenlerden sadece birinin, yani aynı anda daima iki akustik değişkenin çarpılmasıdır. Üçüncü ve dördüncü dereceden sonuçlar, küçük oluşları nedeniyle ihmal edildiğinden, ikinci dereceden sonuçların elde edilebilmesi için şimdiye kadar u_2 'nin göz önüne alınması gerekmemiştir. Çünkü bütün genliklerin birinci dereceden, u_2 'nin ise ikinci dereceden oluşu nedeniyle u_2 ile bir genliğin çarpımı üçüncü dereceden terimler ile sonuçlanmakta ve bu terimler sonuçta ihmal edileceğinden, başlangıçtan itibaren u_2 dikkate alınmamaktadır. Denklem (4.81)'in ilk terimindeki çarpım işleminde ise u_2 'yi göz önüne almak gerekmektedir. Çünkü bu terimde akustik değişkenlerden üçü çarpım halinde olduğundan, işlem esnasında u_2 'nin sıfırcı dereceden ρ_m ya da h_m gibi bir terim ile çarpılması söz konusu olacaktır. Bu durumda çarpım işlemine birinci dereceden bir terim katılmaz ise sonuç ikinci dereceden çıkacağından, ihmal edilmesi mümkün olmayacaktır. Bunlara göre Denklem (4.3), (4.83) ve (4.84) yardımıyla,

$$\int_0^{y_0} \overline{\rho h u} dy = \int_0^{y_0} \overline{(\rho_m + \rho_1 e^{i\omega t})(h_m + h_1 e^{i\omega t})(u_1 e^{i\omega t} + u_2)} dy \quad (4.85)$$

olarak yazılabilir. Bu denklem açık olarak yazılırsa,

$$\begin{aligned}
\int_0^{y_0} \overline{\rho h u} dy &= \int_0^{y_0} \overline{\rho_m h_m u_1 e^{i\omega t}} dy + \int_0^{y_0} \overline{\rho_m h_1 u_1 e^{2i\omega t}} dy + \int_0^{y_0} \overline{h_m \rho_1 u_1 e^{2i\omega t}} dy \\
&+ \int_0^{y_0} \overline{\rho_1 h_1 u_1 e^{3i\omega t}} dy + \int_0^{y_0} \overline{\rho_m h_m u_2} dy + \int_0^{y_0} \overline{\rho_m u_2 h_1 e^{i\omega t}} dy \\
&+ \int_0^{y_0} \overline{h_m u_2 \rho_1 e^{i\omega t}} dy + \int_0^{y_0} \overline{u_2 \rho_1 h_1 e^{2i\omega t}} dy
\end{aligned} \tag{4.86}$$

ifadesine ulaşılır. Aralarında faz farkı bulunan değişkenlerin çarpımı kuralı bu denklemin terimlerine uygulanırsa, aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

$$\int_0^{y_0} \overline{\rho_m h_m u_1 e^{i\omega t}} dy = \int_0^{y_0} \overline{\rho_m h_m u_1} dy = 0 \tag{4.87}$$

$$\int_0^{y_0} \overline{\rho_m h_1 u_1 e^{2i\omega t}} dy = \int_0^{y_0} \overline{\rho_m h_1 u_1} dy \tag{4.88}$$

$$\int_0^{y_0} \overline{h_m \rho_1 u_1 e^{2i\omega t}} dy = \int_0^{y_0} \overline{h_m \rho_1 u_1} dy \tag{4.89}$$

$$\int_0^{y_0} \overline{\rho_1 h_1 u_1 e^{3i\omega t}} dy = \int_0^{y_0} \overline{\rho_1 h_1 u_1} dy \cong 0 \tag{4.90}$$

$$\int_0^{y_0} \overline{\rho_m h_m u_2} dy = \int_0^{y_0} \overline{\rho_m h_m u_2} dy \tag{4.91}$$

$$\int_0^{y_0} \overline{\rho_m u_2 h_1 e^{i\omega t}} dy = \int_0^{y_0} \overline{\rho_m u_2 h_1} dy \cong 0 \tag{4.92}$$

$$\int_0^{y_0} \overline{h_m u_2 \rho_1 e^{i\omega t}} dy = \int_0^{y_0} \overline{h_m u_2 \rho_1} dy \cong 0 \tag{4.93}$$

$$\int_0^{y_0} \overline{u_2 \rho_1 h_1 e^{2i\omega t}} dy = \int_0^{y_0} \overline{u_2 \rho_1 h_1} dy \equiv 0 \quad (4.94)$$

Burada $\overline{u_1} = 0$ oluşu nedeni ile Denklem (4.87)'deki işlemin; üçüncü veya dördüncü dereceden terimler ile sonuçlanmaları nedeniyle Denklem (4.90), (4.92), (4.93) ve (4.94)'teki işlemlerin sonucu sıfır olmaktadır. Denklem (4.91)'de ρ_m ve h_m zaten ortalama değer olduklarından, zamana göre ortalama değer çizgisi dışına çıkarılmışlardır. Yukarıdaki ifadeler Denklem (4.86)'ya taşınırsa,

$$\int_0^{y_0} \overline{\rho h u} dy = \int_0^{y_0} h_m (\rho_m \overline{u_2} + \overline{\rho_1 u_1}) dy + \int_0^{y_0} \rho_m \overline{h_1 u_1} dy \quad (4.95)$$

denkleme ulaşılır. Burada,

$$\rho_m \overline{u_2} + \overline{\rho_1 u_1} = 0 \quad (4.96)$$

olacaktır [25]. Çünkü bu ifade, zamana göre ortalama ikinci dereceden kütle akısı olup, rezonatör içinde zamana göre ortalama kütle akısı mevcut değildir. Bu ifadenin sıfırdan farklı bir değere sahip olması, ancak rezonatörün bir ucunun atmosfere açık olması ve bir fan ile rezonatör içine hava gönderilmesi durumunda mümkün olabilir.

Bu ifadenin sıfıra eşit olduğunun bir başka kanıtı da, $\int_0^{y_0} \overline{\rho h u} dy$ işleminin sonucunun

entalpiden bağımsız olması zorunluluğudur. Ortalama kütle akısı sıfıra eşit olmaz ise, ancak $h_m = 0$ olan özel bir durumda söz konusu işlemin sonucu entalpiden bağımsız olabilir. Bunlara göre, Denklem (4.82), (4.95) ve (4.96)'da bulunanlar Denklem (4.81)'e taşınırsa,

$$\frac{\dot{H}}{E} = \int_0^{y_0} \rho_m \overline{h_1 u_1} dy - (k y_0 + k_s b) \frac{dT_m}{dx} \quad (4.97)$$

denklemini elde edilir. Burada h_1 yerine T_1 , u_1 ve p_1 türünden bir ifade kullanmak daha elverişli olacaktır. Bu amaçla,

$$T ds = dh - v dP \quad (4.98)$$

denklemini ve yoğunluk ile özgül hacim arasındaki bağıntı kullanılırsa,

$$dh = T ds + \frac{dP}{\rho} \quad (4.99)$$

ifadesi elde edilir. Diğer taraftan entropi, sıcaklık ve basıncın fonksiyonu olduğundan,

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T dP \quad (4.100)$$

yazılabilir. Sabit basınç için,

$$T (ds)_P = c_P (dT)_P \quad (4.101)$$

bağıntısından [29, s 297]

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P = \frac{c_{pm}}{T} \quad (4.102)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklem ve

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = - \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T \quad (4.103)$$

Maxwell bağıntısı [29, s 297], Denklem (4.100)'e taşınırsa,

$$ds = \frac{c_{pm}}{T} dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP \quad (4.104)$$

denkleminde ulaşılır. Bu ifade Denklem (4.99)'da kullanılırsa,

$$dh = c_{pm} dT - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP + \frac{dP}{\rho} \quad (4.105)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemin ikinci terimi, ısı genleşme katsayısını içerecek şekilde tekrar düzenlenebilir. Bu amaçla ısı genleşme katsayısının Denklem (3.15)'deki tanımı kullanılırsa,

$$\beta = -\frac{1}{\rho_m} \left[\frac{\partial \left(\frac{1}{v} \right)}{\partial T} \right]_P = \rho_m \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \quad (4.106)$$

denklemini bulunur. Buradan elde edilecek,

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = \frac{\beta}{\rho_m} \quad (4.107)$$

ifadesi Denklem (4.105)'e taşınırsa,

$$dh = c_{pm} dT + \frac{1}{\rho_m} (1 - T_m \beta) dP \quad (4.108)$$

denklemini elde edilir. Aynı ifade,

$$h_1 = c_{pm} T_1 + \frac{1}{\rho_m} (1 - T_m \beta) P_1 \quad (4.109)$$

olarak da yazılabilir. Bu ifade Denklem (4.97)'de kullanılırsa,

$$\frac{\dot{H}}{E} = \int_0^{y_0} \left[\rho_m c_{pm} \overline{T_1 u_1} + (1 - T_m \beta) \overline{p_1 u_1} \right] dy - (k y_0 + k_s b) \frac{dT_m}{dx} \quad (4.110)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklem, birim plaka çevre uzunluğu başına bir plaka ve bu plakayı iki taraftan plakalar arası yarı boşluk mesafesine kadar çevreleyen akışkan içinden gerçekleşen toplam enerji akısını ifade etmektedir. Toplam enerji akısı denklemindeki işlemler, izleyen bölümlerde yapılacaktır.

4.6 ENERJİ AKISI DENKLEMİNDEKİ İNTEGRASYON ve ZAMANA GÖRE ORTALAMA ÇARPIM İŞLEMLERİNİN YAPILMASI

Bu kısımda, Denklem (4.110)'daki enerji akısı ifadesinde bulunan integrasyon işlemleri ve farklı anlarda gelişen akustik değişkenlerin, zamana göre ortalama değer gösterecek şekilde çarpımları yapılacaktır. Bunların sonucunda, enerji akısı denklemi için, akışkan ve plakanın termofiziksel özellikleri, göz önüne alınan sistemin geometrik özellikleri, plakanın sahip olduğu sıcaklık gradyanı, plaka boyunca ortalama akustik basınç genliği ve ses dalgalarının frekansının fonksiyonu olacak şekilde daha açık bir ifade elde edilecektir.

Akustik sıcaklık genliğinin Denklem (4.51), akustik hız genliğinin Denklem (4.17)'deki değerleri enerji akısı ifadesine taşınır ve düzenleme yapılırsa, gelecek sayfada verilen Denklem (4.111) elde edilir.

$$\frac{\dot{H}}{E} = \int_0^{y_0} \frac{1}{\rho_m \omega} \overline{i p_1 \frac{dp_1}{dx}} dy - \int_0^{y_0} \frac{1}{\rho_m \omega} i p_1 \frac{dp_1}{dx} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} dy$$

(1. terim) (2. terim)

$$- \int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{dT_m}{dx} \overline{i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx}} dy$$

(3. terim)

$$+ \int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{2Pr-1}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} dy$$

(4. terim)

$$- \int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{Pr}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} dy$$

(5. terim)

$$- \int_0^{y_0} \frac{T_m \beta}{\rho_m \omega} i p_1 \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{1+\varepsilon_s} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} dy$$

ifadesine ulaşılır. Bu denklemdeki integrasyon ve zamana göre ortalama çarpım işlemleri, Ek A’da açıklanan yöntem yardımıyla her terim için ayrı ayrı yapılacaktır.

4.6.1 Enerji Akısı Denkleminin Birinci Terimindeki İşlemlerin Yapılması

Denklem (4.111)’in birinci terimindeki integrasyon işlemi sonucunda,

$$\int_0^{y_0} \frac{1}{\rho_m \omega} \overline{i p_1 \frac{dp_1}{dx}} dy = \frac{y_0}{\rho_m \omega} \overline{i p_1 \frac{dp_1}{dx}} \quad (4.112)$$

ifadesi elde edilir. Burada p_1 , daha önce olduğu gibi tamamen reeldir. Denklem (4.17)’den, akustik basınç gradyanının reel ve imajiner bileşenlere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda,

$$\frac{dp_1}{dx} = \text{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] + i \text{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \quad (4.113)$$

yazılabilir. Bu ifade Denklem (4.112)’ye taşınırsa,

$$\overline{i p_1 i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right]} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ i p_1 (-i) \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \right\} = \frac{1}{2} p_1 \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \quad (4.116)$$

olarak elde edilir. Bulunanlar Denklem (4.114)'e taşınırsa,

$$\frac{y_0}{\rho_m \omega} \overline{i p_1 \frac{dp_1}{dx}} = \frac{p_1 y_0}{2 \rho_m \omega} \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \quad (4.117)$$

ifadesine ulaşılır.

$$\operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] = -\operatorname{Im} \left[\frac{d\tilde{p}_1}{dx} \right] \quad (4.118)$$

bağıntısı yardımıyla enerji akısı denkleminin birinci terimi,

$$\int_0^{y_0} \frac{1}{\rho_m \omega} \overline{i p_1 \frac{dp_1}{dx}} dy = -\frac{p_1 y_0}{2 \rho_m \omega} \operatorname{Im} \left[\frac{d\tilde{p}_1}{dx} \right] \quad (4.119)$$

olarak elde edilir.

4.6.2 Enerji Akısı Denkleminin İkinci Terimindeki İşlemlerin Yapılması

Denklem (4.111)'in ikinci terimine integrasyon işlemi uygulanırsa,

$$-\int_0^{y_0} \frac{1}{\rho_m \omega} \overline{i p_1 \frac{dp_1}{dx} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]}} dy = -\frac{y_0}{\rho_m \omega} \overline{i p_1 \frac{dp_1}{dx}} f_v \quad (4.120)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (4.49)'dan, f_v sabitinin reel ve imajiner bileşenlere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda,

$$f_v = \operatorname{Re}[f_v] + i \operatorname{Im}[f_v] \quad (4.121)$$

yazılabilir. Bunlara göre Denklem (4.113) yardımıyla,

$$\begin{aligned} \overline{i p_1 \frac{dp_1}{dx} f_v} &= \overline{i p_1 \operatorname{Re}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}[f_v]} + \overline{i p_1 \operatorname{Re}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] i \operatorname{Im}[f_v]} \\ &+ \overline{i p_1 i \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}[f_v]} + \overline{i p_1 i \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] i \operatorname{Im}[f_v]} \end{aligned} \quad (4.122)$$

olarak elde edilir. Burada tek sayıda i çarpanı içeren birinci ve dördüncü terimler, Denklem (4.115)'e benzer şekilde sıfıra eşit olacaktır. Diğer terimlerdeki zamana göre ortalama işlemleri yapılırsa,

$$\overline{i p_1 \operatorname{Re}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] i \operatorname{Im}[f_v]} = \frac{1}{2} p_1 \operatorname{Re}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Im}[f_v] \quad (4.123)$$

$$\overline{i p_1 i \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}[f_v]} = \frac{1}{2} p_1 \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}[f_v] \quad (4.124)$$

sonuçlarına ulaşılır. Bulunanların toplamı,

$$\frac{p_1}{2} \left\{ \operatorname{Re}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Im}[f_v] + \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}[f_v] \right\} = -\frac{p_1}{2} \operatorname{Im}\left[\frac{d\tilde{p}_1}{dx} \tilde{f}_v\right] \quad (4.125)$$

olarak yazılabilir. Bu durumda enerji akısı denkleminin ikinci terimi,

$$-\int_0^{y_0} \frac{1}{\rho_m \omega} \overline{i p_1 \frac{dp_1}{dx} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]}} dy = \frac{p_1 y_0}{2 \rho_m \omega} \operatorname{Im}\left[\frac{d\tilde{p}_1}{dx} \tilde{f}_v\right] \quad (4.126)$$

olarak elde edilir.

4.6.3 Enerji Akısı Denkleminin Üçüncü Terimindeki İşlemlerin Yapılması

Denklem (4.111)'in üçüncü terimindeki integrasyon işlemi sonucunda,

$$-\int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} dy = -\frac{c_{pm} y_0}{\rho_m \omega^3} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \quad (4.127)$$

ifadesi elde edilir. Akustik basınç genliği gradyanı için Denklem (4.113) kullanılırsa,

$$\begin{aligned} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} &= i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] + i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \\ &+ i i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] + i i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \end{aligned} \quad (4.128)$$

denklemini elde edilir. Burada birinci ve dördüncü terimler tek sayıda i çarpanı içerdiklerinden, sıfıra eşittir. Diğer terimlere ortalama işlemi uygulanırsa,

$$i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \quad (4.129)$$

$$i i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] = -\frac{1}{2} \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \quad (4.130)$$

ifadeleri bulunur. Bunların toplamı sıfır olacağından, enerji akısı denkleminin üçüncü terimi,

$$-\int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} dy = 0 \quad (4.131)$$

olarak elde edilir.

4.6.4 Enerji Akısı Denkleminin Dördüncü Terimindeki İşlemlerin Yapılması

Denklem (4.111)'in dördüncü terimindeki integrasyon yapıldığında,

$$\int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{2Pr-1}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} dy$$

$$= \frac{c_{pm} y_0}{\rho_m \omega^3} \frac{2Pr-1}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} f_v \quad (4.132)$$

ifadesi elde edilir. Burada $\frac{dp_1}{dx}$ ve f_v yerine Denklem (4.113) ve (4.121)'deki değerleri yazılıp ulaşılan ifadenin sıfırdan farklı sonuçlar veren terimleri dikkate alınırsa,

$$i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} f_v = i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} [f_v] + i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} [f_v]$$

$$+ i i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} [f_v] + i i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} [f_v] \quad (4.133)$$

ifadesi bulunur. Bu denklem, gerçekte dört ilave terime daha sahiptir. Fakat bu terimler tek sayıda i çarpanı içerdikleri için sıfıra eşittir. Yukarıdaki ifadenin herbir terimi için ortalama işlemi yapılırsa,

$$i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} [f_v] = \frac{1}{2} \left(\operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \right)^2 \operatorname{Im} [f_v] \quad (4.134)$$

$$i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} [f_v] = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} [f_v] \quad (4.135)$$

$$\overline{i i \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}[f_v]} = -\frac{1}{2} \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}[f_v] \quad (4.136)$$

$$\overline{i i \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] i \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] i \operatorname{Im}[f_v]} = \frac{1}{2} \left(\operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right]\right)^2 \operatorname{Im}[f_v] \quad (4.137)$$

sonuçları elde edilir. Bunların toplamı,

$$\frac{1}{2} \left\{ \left(\operatorname{Re}\left[\frac{dp_1}{dx}\right]\right)^2 \operatorname{Im}[f_v] + \left(\operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right]\right)^2 \operatorname{Im}[f_v] \right\} = \frac{1}{2} \frac{dp_1}{dx} \frac{d\tilde{p}_1}{dx} \operatorname{Im}[f_v] \quad (4.138)$$

olarak yazılabilir. Bu durumda enerji akısı denkleminin dördüncü terimi,

$$\begin{aligned} & \int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{2 \operatorname{Pr} - 1}{\operatorname{Pr} - 1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{d\tilde{p}_1}{dx} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} dy \\ & = \frac{c_{pm} y_0}{2 \rho_m \omega^3} \frac{2 \operatorname{Pr} - 1}{\operatorname{Pr} - 1} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{d\tilde{p}_1}{dx} \operatorname{Im}[f_v] \end{aligned} \quad (4.139)$$

olarak bulunur.

4.6.5 Enerji Akısı Denkleminin Beşinci Terimindeki İşlemlerin Yapılması

Denklem (4.111)'in beşinci terimindeki akustik basınç genliği gradyanları y' den bağımsız olduğundan integrasyon dışına çıkarılabilir. Bu durumda söz konusu terimin integre edilecek kısmı,

$$\begin{aligned} & \int_0^{y_0} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} dy \\ & = \frac{\int_0^{y_0} \left\{ \exp[(1+i)y/\delta_v] + \exp[-(1+i)y/\delta_v] \right\} \left\{ \exp[(1+i)y/\delta_v] + \exp[-(1+i)y/\delta_v] \right\} dy}{4 \cosh[(1+i)y_0/\delta_v] \cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} \end{aligned} \quad (4.140)$$

olacaktır. Bu denklemdeki integrasyon yapıldığında,

$$\int_0^{y_0} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} dy$$

$$= \frac{2y_0 + \frac{2\delta_v}{(1+i)} \sinh[(1+i)y_0/\delta_v] \cosh[(1+i)y_0/\delta_v]}{4 \cosh[(1+i)y_0/\delta_v] \cosh[(1+i)y_0/\delta_v]}$$
(4.141)

ifadesi elde edilir. Bu durumda f_v 'nin Denklem (4.49)'daki tanımı yardımıyla Denklem (4.111)'in beşinci terimi,

$$-\int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{Pr}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} dy$$

$$= -\frac{c_{pm} y_0}{2 \rho_m \omega^3} \frac{Pr}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} \left\{ i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \Omega + i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} f_v \right\}$$
(4.142)

olarak bulunur. Burada Ω , reel ve imajiner bileşenlere sahip bir sabit olup,

$$\Omega = \frac{1}{2 \cosh^2[(1+i)y_0/\delta_v]}$$
(4.143)

olarak tanımlanmaktadır. Denklem (4.142)'nin parantez içinde bulunan ikinci terimindeki işlemler daha önce yapılmış ve sonuç, Denklem (4.138) ile ifade edilmişti. İlk terim ise ikinci terime benzediğinden, Denklem (4.138) yardımıyla,

$$i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \Omega = \frac{1}{2} \frac{dp_1}{dx} \frac{d\tilde{p}_1}{dx} \text{Im}[\Omega]$$
(4.144)

ifadesi elde edilir. Bu durumda enerji akısı denkleminin beşinci terimi için,

$$\begin{aligned}
& - \int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{Pr}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} dy \\
& = - \frac{c_{pm} y_0}{4 \rho_m \omega^3} \frac{Pr}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{d\tilde{p}_1}{dx} \left\{ \text{Im} \left[\frac{1}{2 \cosh^2[(1+i)y_0/\delta_v]} \right] + \text{Im}[f_v] \right\}
\end{aligned} \tag{4.145}$$

ifadesine ulaşılır.

4.6.6 Enerji Akısı Denkleminin Altıncı Terimindeki İşlemlerin Yapılması

Denklem (4.50)'deki f_α sabitinin tanımı kullanılarak Denklem (4.111)'in altıncı terimindeki integrasyon yapılırsa,

$$\begin{aligned}
& - \int_0^{y_0} \frac{T_m \beta}{\rho_m \omega} i p_1 \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{1+\varepsilon_s} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} dy = - \frac{T_m \beta y_0}{\rho_m \omega} i p_1 \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{1+\varepsilon_s} f_\alpha
\end{aligned} \tag{4.146}$$

ifadesi elde edilir. Burada,

$$\theta = \frac{1}{1+\varepsilon_s} \tag{4.147}$$

olacak şekilde reel ve imajiner bileşenlere sahip bir θ sabiti tanımlansın. Bu sabit,

$$\theta = \text{Re}[\theta] + i \text{Im}[\theta] \tag{4.148}$$

olarak bileşenlerine ayrılabilir. Reel ve imajiner bileşenlere sahip f_α ise,

$$f_\alpha = \text{Re}[f_\alpha] + i \text{Im}[f_\alpha] \tag{4.149}$$

olarak bileşenlerine ayrılabilir. Bu ifadeler Denklem (4.113)'e taşınır ve sadece sıfırdan farklı terimler dikkate alınır,

$$\begin{aligned}
\overline{i p_1 \frac{dp_1}{dx} \theta f_\alpha} &= \overline{i p_1 \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\theta] i \operatorname{Im}[f_\alpha]} + \overline{i p_1 \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im}[\theta] \operatorname{Re}[f_\alpha]} \\
&\quad + \overline{i p_1 i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\theta] \operatorname{Re}[f_\alpha]} + \overline{i p_1 i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im}[\theta] i \operatorname{Im}[f_\alpha]}
\end{aligned} \tag{4.150}$$

denklemine ulaşılır. Buradaki ortalama işlemi yapılırsa,

$$\overline{i p_1 \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\theta] i \operatorname{Im}[f_\alpha]} = \frac{1}{2} p_1 \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\theta] \operatorname{Im}[f_\alpha] \tag{4.151}$$

$$\overline{i p_1 \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im}[\theta] \operatorname{Re}[f_\alpha]} = \frac{1}{2} p_1 \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Im}[\theta] \operatorname{Re}[f_\alpha] \tag{4.152}$$

$$\overline{i p_1 i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\theta] \operatorname{Re}[f_\alpha]} = \frac{1}{2} p_1 \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\theta] \operatorname{Re}[f_\alpha] \tag{4.153}$$

$$\overline{i p_1 i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im}[\theta] i \operatorname{Im}[f_\alpha]} = -\frac{1}{2} p_1 \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Im}[\theta] \operatorname{Im}[f_\alpha] \tag{4.154}$$

ifadeleri elde edilir. Bunların toplamından,

$$\overline{i p_1 \frac{dp_1}{dx} \theta f_\alpha} = \frac{1}{2} p_1 \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \theta f_\alpha \right] = -\frac{1}{2} p_1 \operatorname{Im} \left[\frac{d\tilde{p}_1}{dx} \tilde{\theta} \tilde{f}_\alpha \right] \tag{4.155}$$

denklemine ulaşılır. Bu durumda,

$$\left(\frac{\tilde{1}}{1 + \tilde{\varepsilon}_s} \right) = \frac{1}{1 + \tilde{\varepsilon}_s} \tag{4.156}$$

bağıntısı yardımıyla enerji akısı denkleminin altıncı terimi,

$$-\int_0^{y_0} \frac{T_m \beta}{\rho_m \omega} i p_1 \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{1+\varepsilon_s} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} dy = \frac{T_m \beta p_1 y_0}{2 \rho_m \omega} \operatorname{Im} \left[\frac{d\tilde{p}_1}{dx} \frac{1}{1+\tilde{\varepsilon}_s} \tilde{f}_\alpha \right] \quad (4.157)$$

olarak elde edilir.

4.6.7 Enerji Akısı Denkleminin Yedinci Terimindeki İşlemlerin Yapılması

Denklem (4.111)'in yedinci terimine, y 'den bağımsız bileşenler hariç kalacak şekilde integrasyon işlemi uygulanırsa,

$$\begin{aligned} & \int_0^{y_0} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\nu]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\nu]} dy \\ &= \frac{\delta_\alpha}{1+i} \tanh[(1+i)y_0/\delta_\alpha] - \frac{\delta_\alpha^2}{\delta_\nu(1+i)} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \frac{\sinh[(1+i)y/\delta_\nu]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\nu]} \Bigg|_0^{y_0} \\ &+ \frac{\delta_\alpha^2}{\delta_\nu^2} \int_0^{y_0} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\nu]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\nu]} dy \end{aligned} \quad (4.158)$$

ifadesi elde edilir. Isıl nüfuz derinliğinin Denklem (3.50) ve viskoz nüfuz derinliğinin Denklem (4.14)'teki tanımları yardımıyla bulunan,

$$\frac{\delta_\nu^2}{\delta_\alpha^2} = \frac{1}{\operatorname{Pr}} \quad (4.159)$$

bağıntısı ile f_α ve f_ν sabitlerinin değerleri Denklem (4.158)'e taşınırsa,

$$\int_0^{y_0} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\nu]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\nu]} dy = \frac{y_0 (\operatorname{Pr} f_\alpha - f_\nu)}{\operatorname{Pr} - 1} \quad (4.160)$$

denklemini elde edilir. Bu ifade enerji akısı denkleminin yedinci terimine taşınırsa,

$$\begin{aligned} & \int_0^{y_0} \frac{T_m \beta}{\rho_m \omega} i p_1 \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{1+\varepsilon_s} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\nu]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\nu]} dy \\ & = \frac{T_m \beta y_0}{\rho_m \omega} \frac{1}{Pr-1} i p_1 \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{1+\varepsilon_s} (Pr f_\alpha - f_\nu) \end{aligned} \quad (4.161)$$

denkleminde ulaşılır. Buradaki zamana göre ortalama çarpım işlemleri, Denklem (4.155)'e benzemektedir. Bu durumda Denklem (4.155) ve Denklem (4.156) yardımıyla,

$$i p_1 \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{1+\varepsilon_s} (Pr f_\alpha - f_\nu) = \frac{1}{2} p_1 \operatorname{Im} \left[\frac{d\tilde{p}_1}{dx} \frac{1}{1+\tilde{\varepsilon}_s} (\tilde{f}_\nu - Pr \tilde{f}_\alpha) \right] \quad (4.162)$$

denklemini yazılabilir. Bu ifade Denklem (4.160)'a taşınırsa, enerji akısı denkleminin yedinci terimi için,

$$\begin{aligned} & \int_0^{y_0} \frac{T_m \beta}{\rho_m \omega} i p_1 \frac{dp_1}{dx} \frac{1}{1+\varepsilon_s} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\nu]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\nu]} dy \\ & = \frac{T_m \beta p_1 y_0}{2 \rho_m \omega} \frac{1}{Pr-1} \operatorname{Im} \left[\frac{d\tilde{p}_1}{dx} \frac{1}{1+\tilde{\varepsilon}_s} (\tilde{f}_\nu - Pr \tilde{f}_\alpha) \right] \end{aligned} \quad (4.163)$$

ifadesine ulaşılır.

4.6.8 Enerji Akısı Denkleminin Sekizinci Terimindeki İşlemlerin Yapılması

Denklem (4.111)'in sekizinci terimindeki integrasyon işlemi yapılırsa,

$$\begin{aligned}
 & - \int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{1}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} \right) \frac{1}{1+\varepsilon_s} \frac{\cosh\left[\frac{(1+i)y/\delta_\alpha}{\cosh\left[\frac{(1+i)y_0/\delta_\alpha}{\delta_\alpha}\right]}\right]}{dy} \\
 & = - \frac{c_{pm} y_0}{\rho_m \omega^3} \frac{1}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} \right) \frac{1}{1+\varepsilon_s} f_\alpha
 \end{aligned} \tag{4.164}$$

ifadesi elde edilir. Burada,

$$\psi = \left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} \right) \frac{1}{1+\varepsilon_s} \tag{4.165}$$

olmak üzere reel ve imajiner bileşenlere sahip bir sabit tanımlansın. Bu sabitin bileşenleri,

$$\psi = \text{Re}[\psi] + i \text{Im}[\psi] \tag{4.166}$$

yazılabilir. $\frac{dp_1}{dx}$ için Denklem (4.113), f_α için Denklem (4.149), ψ için yukarıdaki

ifade kullanılır ve sadece sıfırdan farklı terimlerin dikkate alınır, gelecek sayfada verilen Denklem (4.167) elde edilir.

$$\begin{aligned}
& \overline{i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \psi f_\alpha} \\
&= \overline{i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha]} + \overline{i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\psi] i \operatorname{Im}[f_\alpha]} \\
&+ \overline{i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha]} + \overline{i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im}[\psi] i \operatorname{Im}[f_\alpha]} \\
&+ \overline{ii \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha]} + \overline{ii \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\psi] i \operatorname{Im}[f_\alpha]} \\
&+ \overline{ii \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha]} + \overline{ii \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im}[\psi] i \operatorname{Im}[f_\alpha]}
\end{aligned} \tag{4.167}$$

denklemleri elde edilir. Buradaki zamana göre ortalama çarpım işlemleri yapılırsa,

$$\overline{i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha]} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha] \tag{4.168}$$

$$\overline{i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\psi] i \operatorname{Im}[f_\alpha]} = \frac{1}{2} \left(\operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \right)^2 \operatorname{Re}[\psi] \operatorname{Im}[f_\alpha] \tag{4.169}$$

$$\overline{i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha]} = \frac{1}{2} \left(\operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \right)^2 \operatorname{Im}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha] \tag{4.170}$$

$$\overline{i \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] i \operatorname{Im}[\psi] i \operatorname{Im}[f_\alpha]} = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Im}[\psi] \operatorname{Im}[f_\alpha] \tag{4.171}$$

$$\overline{ii \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha]} = -\frac{1}{2} \operatorname{Im} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re} \left[\frac{dp_1}{dx} \right] \operatorname{Re}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha] \tag{4.172}$$

$$\overline{i i \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] i \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}[\psi] i \operatorname{Im}[f_\alpha]} = \frac{1}{2} \left(\operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \right)^2 \operatorname{Re}[\psi] \operatorname{Im}[f_\alpha] \quad (4.173)$$

$$\overline{i i \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] i \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] i \operatorname{Im}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha]} = \frac{1}{2} \left(\operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \right)^2 \operatorname{Im}[\psi] \operatorname{Re}[f_\alpha] \quad (4.174)$$

$$\overline{i i \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] i \operatorname{Im}[\psi] i \operatorname{Im}[f_\alpha]} = \frac{1}{2} \operatorname{Im}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Re}\left[\frac{dp_1}{dx}\right] \operatorname{Im}[\psi] \operatorname{Im}[f_\alpha] \quad (4.175)$$

denklemleri elde edilir. Bu ifadeler toplanırsa,

$$\overline{i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \psi f_\alpha} = \frac{1}{2} \frac{dp_1}{dx} \frac{d\tilde{p}_1}{dx} \operatorname{Im}[\psi f_\alpha] \quad (4.176)$$

denkleminde ulaşılır. Bu ifade Denklem (4.163)'e taşınırsa, enerji akısı denkleminin sekizinci terimi,

$$\begin{aligned} & - \int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{1}{\operatorname{Pr}-1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} \right) \frac{1}{1+\varepsilon_s} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} dy \\ & = - \frac{c_{pm} y_0}{2 \rho_m \omega^3} \frac{1}{\operatorname{Pr}-1} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{d\tilde{p}_1}{dx} \operatorname{Im} \left[\left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} \right) \frac{1}{1+\varepsilon_s} f_\alpha \right] \end{aligned} \quad (4.177)$$

olarak elde edilir.

4.6.9 Enerji Akısı Denkleminin Dokuzuncu Terimindeki İşlemlerin Yapılması

Denklem (4.111)'in dokuzuncu terimindeki integrasyon işlemi ile yerdinci terimde karşılaşılmış ve çözümü Denklem (4.160) ile ifade edilmişti. Buna göre dokuzuncu terim,

$$\begin{aligned}
& \int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{1}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} \right) \frac{1}{1+\varepsilon_s} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} dy \\
&= \frac{c_{pm} y_0}{\rho_m \omega^3} \frac{1}{(Pr-1)^2} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} \right) \frac{1}{1+\varepsilon_s} (Pr f_\alpha - f_v)
\end{aligned} \quad (4.178)$$

haline gelecektir. Bu ifadedeki ortalama çarpım işlemleri, Denklem (4.163)'teki işlemlere benzemektedir. Buna göre Denklem (4.176) yardımıyla dokuzuncu terim,

$$\begin{aligned}
& \int_0^{y_0} \frac{c_{pm}}{\rho_m \omega^3} \frac{1}{Pr-1} \frac{dT_m}{dx} i \frac{dp_1}{dx} \frac{dp_1}{dx} \left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} \right) \frac{1}{1+\varepsilon_s} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_\alpha]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_\alpha]} \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} dy \\
&= \frac{c_{pm} y_0}{2 \rho_m \omega^3} \frac{1}{(Pr-1)^2} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{d\tilde{p}_1}{dx} \operatorname{Im} \left[\left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} \right) \frac{1}{1+\varepsilon_s} (Pr f_\alpha - f_v) \right]
\end{aligned} \quad (4.179)$$

olarak elde edilir.

4.6.10 Sonuçların Birleştirilmesi

Enerji akısı denkleminin her terimindeki integrasyon ve zamana göre ortalama çarpım işlemlerinin yapılması ile elde edilen sonuçlar Denklem (4.111)'e taşınır ve düzenleme yapılırsa,

$$\begin{aligned}
\frac{\dot{H}}{E} &= \frac{-p_1 y_0}{2 \rho_m \omega} \operatorname{Im} \left[\frac{d\tilde{p}_1}{dx} \left(1 - \tilde{f}_v + \frac{T_m \beta (\tilde{f}_\alpha - \tilde{f}_v)}{(Pr-1)(1+\tilde{\varepsilon}_s)} \right) \right] - \frac{c_{pm} y_0}{2 \rho_m \omega^3 (Pr-1)} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{d\tilde{p}_1}{dx} \\
&\times \operatorname{Im} \left[f_v \left(1 - \frac{3}{2} Pr \right) + \frac{Pr}{2 \cosh^2[(1+i)y_0/\delta_v]} + \frac{(f_v - f_\alpha) \left(1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} \right)}{(1+\varepsilon_s)(Pr-1)} \right] - (k y_0 - k_s b) \frac{dT_m}{dx}
\end{aligned} \quad (4.180)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklem, bir plaka ve bu plakanın etkisi altındaki akışkan bölgesi için toplam enerji akısını göstermektedir. İleride, sayısal kullanıma elverişli hale getirmek amacıyla bu denklemde bazı basitleştirmeler yapılacak, ayrıca plakayı çevreleyen akışkan bölgesi içinde üretilen veya kullanılan akustik iş için bir ifade geliştirilecektir.

4.7 ENERJİ AKISI DENKLEMİNİN BASİTLEŞTİRİLMESİ

Bu kısımda, Bölüm 4'ün başlangıcında yapılanlara ilave olarak başka kabuller de yapılacak, böylece Denklem (4.180)'deki enerji akısı ifadesi sayısal olarak kullanılabilir hale getirilecektir.

Öncelikle, enerji akısı ifadesindeki akustik basınç genliği gradyanı yerine kullanılmak üzere, hız genliği türünden bir ifade geliştirilsin. Bu bölüm boyunca akışkan viskoziteli kabul edildiğinden, hız genliği y 'nin fonksiyonu olarak değişecektir. Bu durumda,

$$u_{1m} = \frac{1}{y_0} \int_0^{y_0} u_1 dy = i \operatorname{Im}[u_{1m}] \quad (4.181)$$

olmak üzere ortalama bir akustik hız genliği tanımlamak gerekmektedir. Ortalama akustik hız genliği tamamen imajiner olup, p_1 ile arasında $\pi/2$ kadar faz farkı bulunmaktadır. Akustik hız genliğinin Denklem (4.17)'deki değeri yukarıdaki denkleme taşınırsa,

$$u_{1m} = \frac{1}{y_0} \frac{i}{\omega \rho_m} \frac{dp_1}{dx} \int_0^{y_0} \left[1 - \frac{\cosh[(1+i)y/\delta_v]}{\cosh[(1+i)y_0/\delta_v]} \right] dy \quad (4.182)$$

ifadesi elde edilir. Buradaki integrasyon işlemi yapılırsa,

$$u_{1m} = \frac{i}{\omega \rho_m} \frac{dp_1}{dx} (1 - f_v) \quad (4.183)$$

denklemini bulunur. Bu durumda akustik basınç genliği gradyanı için, Denklem (4.181)'in ikinci tarafı yardımıyla,

$$\frac{dp_1}{dx} = \frac{\omega \rho_m \operatorname{Im}[u_{1m}]}{1 - f_v} \quad (4.184)$$

ifadesine ulaşılır.

Şimdi ise, plakalar arasındaki yarı boşluğun, akışkan için viskoz nüfuz ve ısı nüfuz derinliklerine göre çok büyük olduğu kabulü yapılsın. Benzer şekilde, plaka yarı kalınlığının, plaka için ısı nüfuz derinliğine göre çok büyük olduğu kabul edilsin. Bu durumda $y_0 \gg \delta_v$, $y_0 \gg \delta_a$ ve $b \gg \delta_s$ olması nedeniyle f_v , f_a ve ε_s sabitlerindeki tanh fonksiyonları, bire eşit olacaktır. $y_0 \gg \delta_v$ kabulü f_v ifadesine uygulanırsa,

$$f_v = \frac{\delta_v \tanh[(1+i)y_0 / \delta_v]}{(1+i)y_0} \cong \frac{\delta_v}{(1+i)y_0} \quad (4.185)$$

haline gelecektir. Bu ifade Denklem (4.184)'e taşınırsa,

$$\frac{dp_1}{dx} = \frac{\omega \rho_m \operatorname{Im}[u_{1m}](1+i)y_0}{(1+i)y_0 - \delta_v} \quad (4.186)$$

olarak elde edilir. $y_0 \gg \delta_v$ kabulü için aynı zamanda,

$$\frac{1}{2 \cosh^2[(1+i)y_0 / \delta_v]} = \frac{2}{2 + \exp[2(1+i)y_0 / \delta_v] + \exp[-2(1+i)y_0 / \delta_v]} \cong 0 \quad (4.187)$$

olacaktır. $y_0 \gg \delta_a$ kabulü f_a ifadesine uygulanırsa,

$$f_a = \frac{\delta_a \tanh[(1+i)y_0 / \delta_a]}{(1+i)y_0} \cong \frac{\delta_a}{(1+i)y_0} \quad (4.188)$$

olacaktır. $b \gg \delta_s$ ve $y_0 \gg \delta_\alpha$ kabulleri birlikte kullanılırsa,

$$\varepsilon_s = \frac{\sqrt{k \rho_m c_{pm}}}{\sqrt{k_s \rho_s c_s}} \frac{\tanh[(1+i)y_0 / \delta_\alpha]}{\tanh[(1+i)b / \delta_s]} \cong \frac{\sqrt{k \rho_m c_{pm}}}{\sqrt{k_s \rho_s c_s}} \quad (4.189)$$

haline gelecektir. Akışkan ve plaka için ısı nüfuz derinliklerinin Denklem (3.50) ve (4.28)'deki tanımlarından elde edilecek,

$$\sqrt{k} = \frac{\sqrt{\rho_m c_{pm} \omega} \delta_\alpha}{\sqrt{2}} \quad (4.190)$$

$$\sqrt{k_s} = \frac{\sqrt{\rho_s c_s \omega} \delta_s}{\sqrt{2}} \quad (4.191)$$

bağıntıları Denklem (4.189)'a taşınırsa,

$$\varepsilon_s = \frac{\rho_m c_{pm} \delta_\alpha}{\rho_s c_s \delta_s} \quad (4.192)$$

ifadesine ulaşılır. Bu denklemden görüldüğü üzere ε_s tamamen reel hale geldiğinden,

$$\tilde{\varepsilon}_s = \varepsilon_s \quad (4.193)$$

yazılabilir. f_v ve f_α için yukarıdaki ifadeler kullanılırsa,

$$1 + \frac{\varepsilon_s f_v}{f_\alpha} = \frac{\delta_\alpha + \varepsilon_s \delta_v}{\delta_\alpha} \quad (4.194)$$

denklemini elde edilir. Yukarıda bulunanlar Denklem (4.180)'e taşınırsa, enerji akısı ifadesi,

$$\begin{aligned}
\frac{\dot{H}}{E} = & \frac{-p_1 y_0}{2 \rho_m \omega} \operatorname{Im} \left\langle \left[\frac{\omega \rho_m \operatorname{Im}[u_{1m}](1+i)y_0}{(1+i)y_0 - \delta_v} \right] \left\{ 1 - \left(\frac{\tilde{\delta}_v}{(1+i)y_0} \right) + \frac{T_m \beta}{(\operatorname{Pr}-1)(1+\varepsilon_s)} \right\} \right. \\
& \times \left. \left[\left(\frac{\tilde{\delta}_\alpha}{(1+i)y_0} \right) - \left(\frac{\tilde{\delta}_v}{(1+i)y_0} \right) \right] \right\rangle \\
& - \frac{c_{pm} y_0}{2 \rho_m \omega^3 (\operatorname{Pr}-1)} \frac{dT_m}{dx} \frac{\omega \rho_m \operatorname{Im}[u_{1m}](1+i)y_0}{(1+i)y_0 - \delta_v} \left[\frac{\omega \rho_m \operatorname{Im}[u_{1m}](1+i)y_0}{(1+i)y_0 - \delta_v} \right] \\
& \times \operatorname{Im} \left\{ \frac{\delta_v}{(1+i)y_0} \left(1 - \frac{3}{2} \operatorname{Pr} \right) + \frac{\delta_\alpha + \varepsilon_s f_v}{\delta_\alpha (1+\varepsilon_s)(\operatorname{Pr}-1)} \left[\frac{\delta_v}{(1+i)y_0} - \frac{\delta_\alpha}{(1+i)y_0} \right] \right\} \\
& - (k y_0 + k_s b) \frac{dT_m}{dx}
\end{aligned} \tag{4.195}$$

haline gelecektir. Bu denklemde yapılacak çarpım işlemlerini kolaylaştırmak için payda tarafındaki i çarpanları pay tarafına getirilsin. Bu amaçla paydada i çarpanı içeren terimler eşlenikleri ile çarpılır ve gerekli düzenleme yapılırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\frac{1+i}{(1+i)y_0 - \delta_v} = \frac{2y_0 - \delta_v - \delta_v i}{2y_0^2 + \delta_v^2 - 2y_0 \delta_v} \tag{4.196}$$

$$\left[\frac{1+i}{(1+i)y_0 - \delta_v} \right] = \frac{2y_0 - \delta_v + \delta_v i}{2y_0^2 + \delta_v^2 - 2y_0 \delta_v} \tag{4.197}$$

Bu iki denklem yardımıyla,

$$\left[\frac{1+i}{(1+i)y_0 - \delta_v} \right] \left[\frac{1+i}{(1+i)y_0 - \delta_v} \right] = \frac{4y_0^2 + 2\delta_v^2 - 4y_0 \delta_v}{(2y_0^2 - 2\delta_v y_0 + \delta_v^2)(2y_0^2 - 2\delta_v y_0 + \delta_v^2)} \tag{4.198}$$

olarak elde edilir. Ayrıca,

$$\frac{1}{1+i} = \frac{1-i}{2} \quad (4.199)$$

bağıntısı yardımıyla f_v ve f_α sabitleri,

$$f_v = \frac{\delta_v(1-i)}{2y_0} \quad (4.200)$$

$$f_\alpha = \frac{\delta_\alpha(1-i)}{2y_0} \quad (4.201)$$

olarak ifade edilebilir. Bütün bu ifadeler Denklem (4.195)'e taşınırsa, enerji akısı denklemi,

$$\begin{aligned} \frac{\dot{H}}{E} = \frac{-p_1 y_0}{2 \rho_m \omega} \operatorname{Im} & \left\{ \left[\frac{\omega \rho_m \operatorname{Im}[u_{1m}](2y_0^2 - \delta_v y_0 + \delta_v y_0 i)}{2y_0^2 + \delta_v^2 - 2y_0 \delta_v} \right] \right. \\ & \times \left[1 - \frac{\delta_v(1+i)}{2y_0} + \frac{T_m \beta}{(\operatorname{Pr}-1)(1+\varepsilon_s)} \left(\frac{\delta_\alpha(1+i)}{2y_0} - \frac{\delta_v(1+i)}{2y_0} \right) \right] \Bigg\} \\ & - \frac{c_{pm} y_0}{2 \rho_m \omega^3 (\operatorname{Pr}-1)} \frac{dT_m}{dx} \omega^2 \rho_m^2 (\operatorname{Im}[u_{1m}])^2 y_0^2 \\ & \times \frac{4y_0^2 + 2\delta_v^2 - 4y_0 \delta_v}{(2y_0^2 - 2\delta_v y_0 + \delta_v^2)(2y_0^2 - 2\delta_v y_0 + \delta_v^2)} \\ & \times \operatorname{Im} \left\{ \frac{\delta_v(1-i)}{2y_0} \left(1 - \frac{3}{2} \operatorname{Pr} \right) + \frac{\delta_\alpha + \varepsilon_s \delta_v}{\delta_\alpha (1+\varepsilon_s) (\operatorname{Pr}-1)} \left[\frac{\delta_v(1-i)}{2y_0} - \frac{\delta_\alpha(1-i)}{2y_0} \right] \right\} \\ & - (k y_0 + k_s b) \frac{dT_m}{dx} \end{aligned} \quad (4.202)$$

haline gelecektir. Buradaki Im işlemleri yapılırsa, Denklem (4.203) ifadesine ulaşılır.

$$\begin{aligned}
\frac{\dot{H}}{E} = & \frac{-p_1 y_0 \operatorname{Im}[u_{1m}]}{2(2y_0^2 + \delta_v^2 - 2y_0\delta_v)} \left\{ \left(2y_0^2 - \delta_v y_0 \right) \left[\frac{-\delta_v}{y_0} + \frac{T_m \beta}{(\operatorname{Pr}-1)(1+\varepsilon_s)} \frac{\delta_\alpha - \delta_v}{2y_0} \right] \right. \\
& \left. + \delta_v y_0 - \frac{\delta_v^2}{2} + \frac{T_m \beta}{(\operatorname{Pr}-1)(1+\varepsilon_s)} \frac{\delta_v \delta_\alpha - \delta_v^2}{2} \right\} \\
& - \frac{c_{pm} y_0^3 \rho_m (\operatorname{Im}[u_{1m}])^2}{2\omega (\operatorname{Pr}-1)} \frac{dT_m}{dx} \frac{4y_0^2 + 2\delta_v^2 - 4y_0\delta_v}{(2y_0^2 - 2\delta_v y_0 + \delta_v^2)(2y_0^2 - 2\delta_v y_0 + \delta_v^2)} \\
& \times \left[\frac{-\delta_v}{2y_0} \left(1 - \frac{3}{2} \operatorname{Pr} \right) + \frac{\delta_\alpha + \varepsilon_s \delta_v}{\delta_\alpha (1+\varepsilon_s)(\operatorname{Pr}-1)} \frac{\delta_\alpha - \delta_v}{2y_0} \right] - (k y_0 + k_s b) \frac{dT_m}{dx}
\end{aligned} \tag{4.203}$$

Viskoziteli durumda kritik sıcaklık gradyanı, Denklem (3.65)'e benzer şekilde,

$$\nabla T_{kr} = \frac{T_m \beta \omega p_1}{\rho_m c_{pm} \operatorname{Im}[u_{1m}]} \tag{4.204}$$

olarak ifade edilebilir. Bu durumda plakanın sahip olduğu sıcaklık gradyanının kritik sıcaklık gradyanına oranı,

$$\phi = \frac{\nabla T_m}{\nabla T_{kr}} = \frac{dT_m}{dx} \frac{\rho_m c_{pm} \operatorname{Im}[u_{1m}]}{T_m \beta \omega p_1} \tag{4.205}$$

olacaktır. Buradan,

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{T_m \beta \omega p_1 \phi}{\rho_m c_{pm} \operatorname{Im}[u_{1m}]} \tag{4.206}$$

denklemini elde edilir. Diğer yandan, Denklem (4.159) yardımıyla,

$$\delta_\alpha - \delta_v = \delta_\alpha (1 - \sqrt{\operatorname{Pr}}) \tag{4.207}$$

bağıntısına ulaşılır. Denklem (4.206) ve (4.207)'nin Denklem (4.203)'e taşınmasıyla enerji akısı ifadesi,

$$\frac{\dot{H}}{E} = \frac{\delta_a p_1 \text{Im}[u_{1m}] T_m \beta}{4(\text{Pr}-1)(1+\varepsilon_s) \left(1 + \frac{\delta_v^2}{2y_0^2} - \frac{\delta_v}{y_0} \right)} \times \left\{ \phi \left[\sqrt{\text{Pr}} \left(1 - \frac{3}{2} \text{Pr} \right) (1+\varepsilon_s) + \frac{1+\varepsilon_s \sqrt{\text{Pr}}}{\text{Pr}-1} (\sqrt{\text{Pr}}-1) \right] + (\sqrt{\text{Pr}}-1) \right\} - (k y_0 + k_s b) \frac{dT_m}{dx} \quad (4.208)$$

olarak elde edilir. Bu denklem, viskoziteli durumda bir plaka ve bu plakayı iki taraftan y_0 mesafesine kadar çevreleyen akışkan içinden gerçekleşen toplam enerji akısını göstermekte olup, termoakustik iş üretimi ve termoakustik soğutma durumlarında taşınan ısıyı bulmak için bu denklemden faydalanılacaktır.

İzleyen kısımlarda, Denklem (4.208) yardımıyla bulunacak ısının taşınması esnasında, ısının taşındığı yöne göre, plaka civarındaki akışkan tarafından üretilen ya da kullanılan akustik işi veren bir ifade geliştirilecektir. Bu amaçla, ilk olarak dalga denkleminde bazı basitleştirmeler yapılacaktır.

4.8 DALGA DENKLEMİNİN BASİTLEŞTİRİLMESİ

Bu kısımda, enerji akısı denkleminin basitleştirilmesinde kullanılan $y_0 \gg \delta_a$ ve $y_0 \gg \delta_v$ kabulleri, daha önce genel hali ile elde edilen Denklem (4.77)'deki dalga denkleminde uygulanacak ve dalga denklemi olarak daha basit bir ifade elde edilecektir. Daha sonra bu denklemden, plaka etrafındaki akışkan tarafından üretilen veya kullanılan akustik iş ifadesinin geliştirilmesinde faydalanılacaktır. Denklem (4.77)'deki f_a yerine, $y_0 \gg \delta_a$ durumu için geçerli Denklem (4.188) ve δ_v yerine,

$$\delta_v = \delta_a \sqrt{\text{Pr}} \quad (4.209)$$

ifadesi kullanılırsa,

$$\begin{aligned}
p_1 + \frac{c^2}{\omega^2} \frac{d}{dx} \left[(1-f_v) \frac{dp_1}{dx} \right] &= \frac{-\beta c^2}{\omega^2} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} + \frac{\beta c^2}{\omega^2} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{\delta_\alpha}{(1-\text{Pr})(1+\varepsilon_s)(1+i)y_0} \\
&+ \frac{\beta c^2}{\omega^2} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{\varepsilon_s \delta_\alpha \sqrt{\text{Pr}}}{(1-\text{Pr})(1+\varepsilon_s)(1+i)y_0} - \frac{\beta c^2}{\omega^2} \frac{dT_m}{dx} \frac{dp_1}{dx} \frac{(1+\varepsilon_s) \text{Pr}^{3/2} \delta_\alpha}{(1-\text{Pr})(1+\varepsilon_s)(1+i)y_0} \\
&- \frac{(K-1) \delta_\alpha p_1}{(1+\varepsilon_s)(1+i)y_0}
\end{aligned} \tag{4.210}$$

denklemini elde edilir. $\frac{dp_1}{dx}$ 'in Denklem (4.184)'teki değeri yukarıdaki denkleme taşıyıp düzenleme yapılırsa,

$$\begin{aligned}
p_1 + \frac{c^2}{\omega^2} \frac{d}{dx} \left[(1-f_v) \frac{dp_1}{dx} \right] &= \frac{(K-1) \delta_\alpha p_1}{(1+i)y_0(1+\varepsilon_s)} \\
&\times \left\{ \frac{\beta c^2}{\omega^2} \frac{dT_m}{dx} \frac{\omega \rho_m \text{Im}[u_{1m}]}{1-f_v} \frac{(1+i)y_0(1+\varepsilon_s)}{(K-1)\delta_\alpha p_1} \left[\frac{\delta_\alpha + \varepsilon_s \delta_\alpha \sqrt{\text{Pr}} - (1+\varepsilon_s) \text{Pr}^{3/2} \delta_\alpha}{(1-\text{Pr})(1+\varepsilon_s)(1+i)y_0} - 1 \right] - 1 \right\}
\end{aligned} \tag{4.211}$$

ifadesi elde edilir. Gradyanlar oranı ϕ 'nin Denklem (4.205)'teki tanımı yukarıdaki denklemde kullanılırsa,

$$\begin{aligned}
p_1 + \frac{c^2}{\omega^2} \frac{d}{dx} \left[(1-f_v) \frac{dp_1}{dx} \right] &= \frac{(K-1) \delta_\alpha p_1}{(1+i)y_0(1+\varepsilon_s)} \\
&\times \left\{ \frac{\beta c^2 (1+i)y_0(1+\varepsilon_s) T_m \beta}{(1-f_v)(K-1)\delta_\alpha c_{pm}} \phi \left[\frac{\delta_\alpha + \varepsilon_s \delta_\alpha \sqrt{\text{Pr}} - (1+\varepsilon_s) \text{Pr}^{3/2} \delta_\alpha}{(1-\text{Pr})(1+\varepsilon_s)(1+i)y_0} - 1 \right] - 1 \right\}
\end{aligned} \tag{4.212}$$

denklemini elde edilir. Denklem (4.72)'den,

$$\frac{\beta^2 c^2 T_m}{c_{pm}(K-1)} = 1 \tag{4.213}$$

olduğu anlaşılmaktadır. Bu ifade yukarıdaki denklemde kullanılırsa, dalga denklemi,

$$p_1 + \frac{c^2}{\omega^2} \frac{d}{dx} \left[(1-f_v) \frac{dp_1}{dx} \right] = \frac{(K-1) \delta_a p_1}{(1+i) y_0 (1+\varepsilon_s)}$$

$$\times \left\{ \frac{\phi}{(1-f_v) \delta_a} \left[\frac{\delta_a \left[1+\varepsilon_s \sqrt{\text{Pr}} - (1+\varepsilon_s) \text{Pr}^{3/2} \right] - (1-\text{Pr})(1+\varepsilon_s)(1+i) y_0}{1-\text{Pr}} \right] - 1 \right\}$$
(4.214)

haline gelir. Bu ifadeden, plaka civarındaki akışkan tarafından üretilen veya kullanılan akustik işin bulunmasında faydalanılacaktır.

4.9 AKUSTİK İŞ İFADESİNİN ELDE EDİLMESİ

Bu bölümde, ısıyın plakaların bir ucundan diğer ucuna doğru akışkan tarafından taşınması esnasında, bir plakayı iki taraftan y_0 mesafesine kadar çevreleyen akışkanın ürettiği veya kullandığı akustik işi gösteren bir ifade elde edilecektir. Söz konusu akustik iş,

$$\dot{W} = E y_0 \left[\left(\overline{p_1 u_{1m}} \right)_{\text{sol uç}} - \left(\overline{p_1 u_{1m}} \right)_{\text{sağ uç}} \right] = E y_0 L_p \frac{d}{dx} \left[\overline{p_1 u_{1m}} \right] \quad (4.215)$$

ifadesinden bulunabilir [25]. Burada,

$$\frac{d}{dx} \left[\overline{p_1 u_{1m}} \right] = \frac{d}{dx} \left\{ \frac{1}{2} \text{Re} [p_1 \tilde{u}_{1m}] \right\} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[p_1 \frac{d\tilde{u}_{1m}}{dx} + \frac{dp_1}{dx} \tilde{u}_{1m} \right] \quad (4.216)$$

olarak da yazılabileceğinden, akustik iş,

$$\dot{W} = \frac{E y_0 L_p}{2} \text{Re} \left[p_1 \frac{d\tilde{u}_{1m}}{dx} + \frac{dp_1}{dx} \tilde{u}_{1m} \right] \quad (4.217)$$

olacaktır. Bu denklemdeki $\frac{d\tilde{u}_{1m}}{dx}$ terimi kullanıma elverişli olmadığından, basitleştirilmiş dalga denklemi yardımıyla bu terim yerine diğer bilinenler türünden bir ifade geliştirilecektir. Bu amaçla Denklem (4.184)'teki basınç gradyanı ifadesi ile Denklem (4.181)'den bulunacak,

$$\text{Im}[u_{1m}] = -i u_{1m} \quad (4.218)$$

ifadesi birleştirilir ve elde edilen sonuç dalga denkleminin sol tarafındaki basınç gradyanı yerine kullanılırsa, dalga denklemi,

$$\begin{aligned} \frac{-i \rho_m c^2}{\omega} \frac{du_{1m}}{dx} &= \frac{(K-1) \delta_\alpha p_1}{(1+i) y_0 (1+\varepsilon_s)} \\ &\times \left\{ \frac{\phi}{(1-f_v) \delta_\alpha} \left[\frac{\delta_\alpha \left[1+\varepsilon_s \sqrt{\text{Pr}} - (1+\varepsilon_s) \text{Pr}^{\frac{3}{2}} \right] - (1-\text{Pr})(1+\varepsilon_s)(1+i) y_0}{1-\text{Pr}} \right] - 1 \right\} - p_1 \end{aligned} \quad (4.219)$$

haline gelecektir. Bu denklemde $\frac{du_{1m}}{dx}$ gradyanı çekilirse,

$$\begin{aligned} \frac{du_{1m}}{dx} &= \frac{(K-1) \delta_\alpha p_1 i}{(1+i) y_0 (1+\varepsilon_s)} \frac{\omega}{\rho_m c^2} \\ &\times \left\{ \frac{\phi}{(1-f_v) \delta_\alpha} \left[\frac{\delta_\alpha \left[1+\varepsilon_s \sqrt{\text{Pr}} - (1+\varepsilon_s) \text{Pr}^{\frac{3}{2}} \right] - (1-\text{Pr})(1+\varepsilon_s)(1+i) y_0}{1-\text{Pr}} \right] - 1 \right\} - \frac{p_1 i \omega}{\rho_m c^2} \end{aligned} \quad (4.220)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemdeki kompleks terimlerin çarpımı yapılırsa,

$$\frac{1}{(1+i)(1-f_v)} = \frac{-y_0 + y_0 i}{2i y_0 - \delta_v - \delta_v i} \quad (4.221)$$

denklemini bulunur. Kompleks terimleri paydadana kaldırarak amacıyla sağ taraf paydadanın eşleniği ile çarpılıp bölünürse,

$$\frac{1}{(1+i)(1-f_v)} = \frac{2y_0^2 - 2\delta_v y_0 i + 2iy_0^2}{4y_0^2 - 4y_0\delta_v + 2\delta_v^2} \quad (4.222)$$

ifadesine ulaşılır. Denklem (4.217)'den, iş ifadesinin bulunabilmesi için $\frac{du_{1m}}{dx}$ 'e

ihtiyaç duyulduğu görölmektedir. Bu nedenle Denklem (4.222)'nin eşleniği alınır,

$$\sim \left[\frac{1}{(1+i)(1-f_v)} \right] = \frac{2y_0^2 + 2\delta_v y_0 i - 2iy_0^2}{4y_0^2 - 4y_0\delta_v + 2\delta_v^2} \quad (4.223)$$

ifadesi elde edilir. Benzer şekilde $\frac{du_{1m}}{dx}$ ifadesindeki diğer kompleks terimlerin eşdeğerleri bulunursa,

$$\frac{i}{(1-f_v)} = \frac{2\delta_v y_0 - 2\delta_v y_0 i + 4iy_0^2}{4y_0^2 - 4y_0\delta_v + 2\delta_v^2} \quad (4.224)$$

$$\sim \left[\frac{i}{1-f_v} \right] = \frac{2\delta_v y_0 + 2\delta_v y_0 i - 4iy_0^2}{4y_0^2 - 4y_0\delta_v + 2\delta_v^2} \quad (4.225)$$

$$\frac{i}{1+i} = \frac{1+i}{2} \quad (4.226)$$

$$\sim \left[\frac{i}{1+i} \right] = \frac{1-i}{2} \quad (4.227)$$

sonuçları elde edilir. Yukarıda bulunanlar Denklem (4.220)'ye taşınıp eşlenik alma işlemi uygulanırsa,

$$\frac{d\tilde{u}_{1m}}{dx} = \frac{\omega}{\rho_m c^2} \left[\frac{(K-1)p_1 \phi \delta_\alpha}{y_0(1+\varepsilon_s)} \frac{2y_0^2 + 2\delta_v y_0 i - 2iy_0^2}{4y_0^2 - 4y_0\delta_v + 2\delta_v^2} \frac{1+\varepsilon_s\sqrt{\text{Pr}} - (1+\varepsilon_s)\text{Pr}^{3/2}}{1-\text{Pr}} \right. \\ \left. - (K-1)p_1 \phi \frac{2\delta_v y_0 + 2\delta_v y_0 i - 4iy_0^2}{4y_0^2 - 4y_0\delta_v + 2\delta_v^2} - \frac{(1-i)(K-1)\delta_\alpha p_1}{2y_0(1+\varepsilon_s)} + p_1 i \right] \quad (4.228)$$

ifadesine ulaşılır. Denklem (4.217)'de $\frac{d\tilde{u}_{1m}}{dx}$ yerine, yukarıdaki ifade kullanılacaktır.

Aynı denklemde parantez içinde bulunan ikinci terim ise, Denklem (4.181) ve (4.184) yardımıyla,

$$\frac{dp_1}{dx} \tilde{u}_{1m} = \frac{-i\omega \rho_m (\text{Im}[u_{1m}])^2 (1+i)y_0}{(1+i)y_0 - \delta_v} \quad (4.229)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemin sağ tarafı paydanın eşleniği ile çarpılıp bölünürse,

$$\frac{dp_1}{dx} \tilde{u}_{1m} = \frac{\omega \rho_m (\text{Im}[u_{1m}])^2 (-y_0 \delta_v - 2iy_0^2 + iy_0 \delta_v)}{2y_0^2 - 2y_0\delta_v + \delta_v^2} \quad (4.230)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (4.228) ve (4.230), Denklem (4.217)'ye taşınırsa,

$$\dot{W} = \frac{E y_0 L_p}{2} \times \text{Re} \left\{ \frac{\omega}{\rho_m c^2} \left[\frac{p_1^2 (K-1) \phi \delta_\alpha}{y_0(1+\varepsilon_s)} \frac{2y_0^2 + 2\delta_v y_0 i - 2iy_0^2}{4y_0^2 - 4y_0\delta_v + 2\delta_v^2} \frac{1+\varepsilon_s\sqrt{\text{Pr}} - (1+\varepsilon_s)\text{Pr}^{3/2}}{1-\text{Pr}} \right. \right. \\ \left. \left. - (K-1)p_1^2 \phi \frac{2\delta_v y_0 + 2\delta_v y_0 i - 4iy_0^2}{4y_0^2 - 4y_0\delta_v + 2\delta_v^2} - \frac{(1-i)(K-1)\delta_\alpha p_1^2}{2y_0(1+\varepsilon_s)} + p_1^2 i \right] \right. \\ \left. + \frac{\omega \rho_m (\text{Im}[u_{1m}])^2 (-y_0 \delta_v - 2iy_0^2 + iy_0 \delta_v)}{2y_0^2 - 2y_0\delta_v + \delta_v^2} \right\} \quad (4.231)$$

denklemini elde edilir. Buradaki Re işlemi yapılırsa,

$$\dot{W} = \frac{E y_0 L_p}{2} \left\{ \frac{\omega}{\rho_m c^2} \left[\frac{2 p_1^2 (K-1) \phi y_0 \delta_\alpha \left[1 + \varepsilon_s \sqrt{\text{Pr}} - (1 + \varepsilon_s) \text{Pr}^{3/2} \right]}{(1 + \varepsilon_s) (4 y_0^2 - 4 y_0 \delta_v + 2 \delta_v^2) (1 - \text{Pr})} - \frac{2 p_1^2 (K-1) \phi y_0 \delta_v}{4 y_0^2 - 4 y_0 \delta_v + 2 \delta_v^2} - \frac{(K-1) \delta_\alpha p_1^2}{2 y_0 (1 + \varepsilon_s)} \right] - \frac{y_0 \delta_v \omega \rho_m \left(\text{Im}[u_{1m}] \right)^2}{2 y_0^2 - 2 y_0 \delta_v + \delta_v^2} \right\} \quad (4.232)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (4.209)'daki bağıntı ve Denklem (4.72)'den elde edilecek,

$$K-1 = \frac{\beta^2 c^2 T_m}{c_{pm}} \quad (4.233)$$

ifadesi Denklem (4.232)'ye taşınıp son düzenleme yapılırsa,

$$\dot{W} = \frac{E \delta_\alpha L_p}{4} \left\{ \frac{p_1^2 T_m \beta^2 \omega \phi}{\rho_m c_{pm} \left(1 - \frac{\delta_v}{y_0} + \frac{\delta_v^2}{2 y_0^2} \right)} \left[\frac{\left[1 + \varepsilon_s \sqrt{\text{Pr}} - (1 + \varepsilon_s) \text{Pr}^{3/2} \right]}{(1 + \varepsilon_s) (1 - \text{Pr})} - \sqrt{\text{Pr}} \right] - \frac{p_1^2 T_m \beta^2 \omega}{\rho_m c_{pm} (1 + \varepsilon_s)} - \frac{\omega \rho_m \left(\text{Im}[u_{1m}] \right)^2 \sqrt{\text{Pr}}}{1 + \frac{\delta_v^2}{2 y_0^2} - \frac{\delta_v}{y_0}} \right\} \quad (4.234)$$

sonucuna ulaşılır. Bu ifade, bir plakayı iki taraftan y_0 mesafesine kadar çevreleyen akışkan tarafından, ısının taşındığı yöne bağlı olarak üretilen ya da kullanılan akustik işi vermektedir. Denklem (4.234) ve daha önce elde edilen Denklem (4.208), bu bölümün temel sonuç denklemleri olup, gelecek bölümde bu iki ifade kullanılarak bir ucu açık rezonatörde termoakustik güç üretimi modellenenecektir.

BÖLÜM 5

BİR UCU AÇIK REZONATÖRDE TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİMİNİN MODELLENMESİ

Bu bölümde, içinde termoakustik güç üretimi yapılan ve akışkan olarak hava kullanan belirli bir konstrüksiyona ve çalışma şartlarına sahip bir ucu açık rezonatör dikkate alınmaktadır. Bu rezonatör için, rezonatör içindeki akustik güç kayıpları ve rezonatörden çevreye yayılan akustik güç dikkate alınarak, Denklem (4.208) ve Denklem (4.234) birlikte çözülecektir. Böylece, belirli çalışma koşullarında rezonatörün basınç antinodundaki akustik basınç genliği, iş üreten yapıdaki sıcaklık gradyanı, rezonatör içinde oluşan ses dalgalarının frekansı, iş üreten yapı içinde bulunan akışkan tarafından termoakustik olarak taşınan ısı, termoakustik olarak üretilen güç, rezonatörün açık ucundan çevreye yayılan akustik güç, rezonatör yüzeylerinde ve iş üreten yapısının iki ucunda bulunan ısı değiştiricilerindeki akustik güç kayıpları sayısal olarak bulunacaktır.

5.1 REZONATÖR YÜZEYİNDEKİ KAYIPLARIN BELİRLENMESİ

Akışkanın viskoziteli oluşu ve ısıl iletkenliğe sahip olması nedeniyle rezonatör yüzeylerinin etkisi altında kalan akışkan, akustik güç kaybına uğrayacaktır. Bunun sonucu olarak, iş üreten yapı tarafından üretilen akustik işin bir kısmı rezonatör kayıplarını karşılamada kullanılacaktır. Rezonatör yüzeylerinde kaybolan güç ise ısıya dönüşecek ve rezonatör yüzey sıcaklığının artması şeklinde etkisini gösterecektir.

Birim rezonatör yüzey alanı için viskoz ve termal yollar ile enerji kaybını bulmak için, Denklem (4.234)'deki akustik iş ifadesi, plaka yüzey alanı olan EL_p terimine bölünecek ve rezonatör yüzeyi için $\phi = 0$, $y_0 \gg \delta_a$ ve $y_0 \gg \delta_v$ olduğu göz önünde bulundurulacaktır. Bu durumda, rezonatörün iş absorbe ettiği bilindiği için negatif işaret de ihmal edilerek,

$$\dot{e} = \frac{\delta_\alpha}{4} \left\{ \frac{p_1^2 T_m \beta^2 \omega}{\rho_m c_{pm} (1 + \varepsilon_s)} + \rho_m (\text{Im}[u_{1m}])^2 \sqrt{\text{Pr}} \omega \right\} \quad (5.1)$$

ifadesi elde edilir. Burada $\dot{e}$, birim rezonatör yüzey alanı için enerji kaybı anlamındadır.

Denklem (4.233)'den,

$$\frac{T_m \beta^2}{c_{pm}} = \frac{K-1}{c^2} \quad (5.2)$$

olduğu anlaşılmaktadır. Bu ifade ile birlikte viskoz ve ısı nüfuz derinlikleri arasındaki Denklem (4.209) ile verilen bağıntı Denklem (5.1)'e taşınırsa,

$$\dot{e} = \frac{p_1^2 (K-1) \delta_\alpha \omega}{4 \rho_m c^2 (1 + \varepsilon_s)} + \frac{\rho_m (\text{Im}[u_1])^2 \delta_v \omega}{4} \quad (5.3)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem, birim rezonatör yüzeyinde gerçekleşen kayıpların, akışkan için ısı nüfuz derinliği, viskoz nüfuz derinliği ve akustik salınımların frekansı ile orantılı olduğunu göstermektedir.

Rezonatör yüzeylerindeki kayıplar, rezonatörün yanal yüzeylerinde ve kapalı ucunda meydana gelen kayıpların toplamından oluşacaktır. Bir ucu kapalı, diğer ucu atmosfere açık rezonatörün yanal yüzeylerindeki akustik güç kaybı,

$$\dot{E}_{yan} = 2 \int_0^L \dot{e} (a+b) dx \quad (5.4)$$

denkleminde bulunabilir. Burada,

L : rezonatör uzunluğu

a : rezonatörün iç genişliği

b : rezonatörün iç yüksekliği

anlamındadır.

Denklem (5.3)'deki p_1 ve u_1 yerine Denklem (3.4) ve (3.7)'deki değerleri kullanılırsa,

$$\begin{aligned} \dot{E}_{yan} = & \frac{p_A^2 (K-1) \delta_a \omega(a+b)}{2 \rho_m c^2 (1+\varepsilon_s)} \int_0^L \sin^2\left(\frac{x 2\pi}{\lambda}\right) dx \\ & + \frac{p_A^2 \delta_v \omega(a+b)}{2 \rho_m c^2} \int_0^L \cos^2\left(\frac{x 2\pi}{\lambda}\right) dx \end{aligned} \quad (5.5)$$

ifadesi elde edilir. Buradaki integrasyon işlemleri yapılırsa,

$$\dot{E}_{yan} = \frac{p_A^2 \omega(a+b) L}{4 \rho_m c^2} \left[\frac{\delta_a (K-1)}{(1+\varepsilon_s)} + \delta_v \right] \quad (5.6)$$

ifadesine ulaşılır.

Bir ucu kapalı, diğer ucu atmosfere açık rezonatörün kapalı ucundaki akustik güç kaybının bulunması için, yine Denklem (5.3)'den faydalanılacaktır. Kapalı uç için $x = \lambda / 4$ olduğundan, Denklem (5.3)'deki p_1 ve u_1 yerine, Denklem (3.4) ve (3.7)'den $x = \lambda / 4$ için elde edilecek değerler yazılacaktır. Bu durumda rezonatörün kapalı ucundaki akustik güç kaybı, bahsedilen şekilde elde edilen elde edilen $\dot{E}$ ifadesi ile kapalı ucun alanının çarpılmasıyla,

$$\dot{E}_{uç} = \frac{p_A^2 (K-1) \delta_a \omega a b}{4 \rho_m c^2 (1+\varepsilon_s)} \quad (5.7)$$

olarak bulunur. Burada, $\dot{E}_{uç}$, kapalı uçtaki akustik güç kaybı anlamındadır.

Denklem (5.7) ve yanal yüzeylerdeki kayıpları veren Denklem (5.6)'nın toplanmasıyla, rezonatör yüzeylerindeki toplam akustik güç kaybı,

$$\dot{E}_{rez} = \frac{p_A^2 (a+b) L \omega}{4 \rho_m c^2} \left[\frac{\delta_a (K-1)}{1+\varepsilon_s} \left(1 + \frac{ab}{(a+b)L} \right) + \delta_v \right] \quad (5.8)$$

olarak bulunur. Görüldüğü gibi toplam akustik güç kaybı, akustik basınç genliğinin karesi ile orantılıdır.

5.2 ISI DEĞİŞTİRİCİLERDEKİ KAYIPLARIN BELİRLENMESİ

Akustik iş üreten yapının ısı değiştiricileri civarındaki akışkan, viskoz sürtünmeler ve ısıl iletkenlik nedeniyle akustik güç kaybına uğrayacaktır. Her ısı değiştirici için bu kayıpları bulmak amacıyla, Denklem (5.3)'ün göz önüne alınan ısı değiştirici için geçerli hali ile bu ısı değiştiricinin toplam yüzey alanı çarpılacaktır. Buna göre ısı değiştirici yüzeylerindeki toplam akustik güç kaybı,

$$\dot{E}_{eş} = \dot{e}_{sış} A_{sış} + \dot{e}_{soış} A_{soış} \quad (5.9)$$

denklemden bulunabilir. Burada,

$\dot{e}_{sış}$: iş üreten yapının sıcak tarafındaki ısı değiştirici için birim alan başına güç kaybı

$\dot{e}_{soış}$: iş üreten yapının soğuk tarafındaki ısı değiştirici için birim alan başına güç kaybı

$A_{sış}$: iş üreten yapının sıcak tarafındaki ısı değiştiricinin yüzey alanı

$A_{soış}$: iş üreten yapının soğuk tarafındaki ısı değiştiricinin yüzey alanı

anlamındadır.

Yukarıdaki denklemde her ısı değiştiricideki akustik güç kaybının bulunuşunda kullanılacak u_1 akustik hız genliği için, plakalar içinde ve dışında anlık akışkan hacimsel debisinin aynı olduğu dikkate alınarak, Denklem (3.4), (4.183) ve (4.184) yardımıyla elde edilecek,

$$\text{Im}[u_{1m}] = \left(1 + \frac{b}{y_0}\right) \frac{P_A}{\rho_m c} \cos\left(\frac{x 2\pi}{\lambda}\right) \left(1 - \frac{\delta_v}{2y_0}\right) \quad (5.10)$$

denklemini kullanılacaktır. Burada x mesafesi, kaybın hesaplandığı ısı değiştiricinin hız antinodundan ortalama uzaklığıdır.

Isı değiştirici yüzey alanları, kendilerini oluşturan plakalarının genişliği ve ısı değiştiricinin x doğrultusundaki uzunluğunun bilinmesi durumunda,

$$A_{sış} = 2 a_p \Delta L_{sış} n_{sış} \quad (5.11)$$

$$A_{soış} = 2 a_p \Delta L_{soış} n_{soış} \quad (5.12)$$

ifadelerinden bulunabilir. Burada,

a_p : ısı değiştirici plakalarının genişliği

$\Delta L_{sış}$: sıcak taraftaki ısı değiştiricinin uzunluğu

$\Delta L_{soış}$: soğuk taraftaki ısı değiştiricinin uzunluğu

$n_{sış}$: sıcak taraftaki ısı değiştiricinin plaka sayısı

$n_{soış}$: soğuk taraftaki ısı değiştiricinin plaka sayısı

anlamındadır.

Isı değiştirici yüzey alanlarını veren yukarıdaki ifadeler Denklem (5.9)'a taşınıp bu denklemdeki birim alan başına kayıplar için Denklem (5.3)'ün ısı değiştiricilere uygulanmış hali kullanılırsa, ısı değiştiricilerdeki kayıplarının akustik basınç genliğinin karesi ile orantılı olduğu görülür.

5.3 AKUSTİK SALINIMLARIN GERÇEKLEŞTİĞİ SICAKLIK GRADYANININ BELİRLENMESİ

Rezonatör içinde termoakustik güç üretiminin başlayacağı sıcaklık gradyanını belirlemek için, üretilen akustik gücü kaybedilen ve rezonatörün açık ucundan çevreye yayılan akustik güce eşitleyen bir denklem yazılacaktır. Akustik gücün kaynağı iş üreten yapı, akustik gücün kaybolduğu yerler ise rezonatör ve ısı değiştirici yüzeyleri olduğundan,

$$\dot{W}_{ış} = \dot{E}_{rez} + \dot{E}_{eş} + \dot{E}_y \quad (5.13)$$

yazılabilir. Burada,

$\dot{W}_{ış}$: iş üreten yapı tarafından üretilen toplam akustik güç

$\dot{E}_y$: rezonatörün açık ucundan çevreye yayılan akustik güç

anlamındadır.

Üretilen toplam akustik gücün bulunmasında, Denklem (4.234)'den faydalanılacaktır. Fakat bu denklem, iş üreten yapı içindeki plaka sayısını ve geometriyi dikkate alacak şekilde değiştirilecektir. Bu durumda iş üreten yapı için ortalama akustik basınç ve hız genlikleri,

$$p_{liş} = p_A \sin\left(\frac{L_{miş} 2\pi}{\lambda}\right) \quad (5.14)$$

$$\text{Im}[u_{liş}] = \left(1 + \frac{b}{y_0}\right) \frac{p_A}{\rho_m c} \cos\left(\frac{L_{miş} 2\pi}{\lambda}\right) \left(1 - \frac{\delta_v}{2y_0}\right) \quad (5.15)$$

olarak yazılabilir. Burada $L_{miş}$, iş üreten yapının hız antinodundan ortalama uzaklığı anlamındadır. İş üreten yapının yüzey alanı ise,

$$A_{iș} = 2 \alpha_p n_p L_{pişg} \quad (5.16)$$

ifadesinden bulunabilir. Burada,

n_p : iş üreten yapıdaki toplam plaka sayısı

$L_{pişg}$: iş üreten yapının efektif uzunluğu

anlamındadır.

∇T_{kr} için Denklem (3.65)'in, $p_{liş}$ ve $\text{Im}[u_{liş}]$ için Denklem (5.14) ve (5.15)'in kullanılmasıyla,

$$\phi_{iș} = \frac{\left(\frac{dT_m}{dx}\right)_{iș}}{\nabla T_{kr}} = \frac{\left(\frac{dT_m}{dx}\right)_{iș} c_{pm} \left(1 + \frac{b}{y_0}\right) \left(1 - \frac{\delta_v}{2y_0}\right)}{\omega c \tan\left(\frac{L_{miş} 2\pi}{\lambda}\right)} \quad (5.17)$$

ifadesi elde edilir. Burada,

$\phi_{iș}$: iş üreten yapı için gradyanlar oranı

$\left(\frac{dT_m}{dx}\right)_{iș}$: iş üreten yapıdaki sıcaklık gradyanı

anlamındadır.

Yukarıdaki ifadeler ve Denklem (4.234) yardımıyla, iş üreten yapı tarafından üretilen toplam akustik güç,

$$\dot{W}_{i\dot{s}} = \frac{a_p}{2} n_p \delta_a L_{pi\dot{s}g} p_A^2 (D_1 \phi_{i\dot{s}} D_2 - D_3 - D_4) \quad (5.18)$$

denklemden bulunabilir. Burada,

$$D_1 = \frac{\sin^2 \left(\frac{L_{mi\dot{s}} 2\pi}{\lambda} \right) \beta \omega}{\rho_m c_{pm} \left(1 - \frac{\delta_v}{y_0} + \frac{\delta_v^2}{2 y_0^2} \right)} \quad (5.19)$$

$$D_2 = \frac{1 + \varepsilon_s \sqrt{\text{Pr}} - (1 + \varepsilon_s) \text{Pr}^{3/2}}{(1 + \varepsilon_s) (1 - \text{Pr})} - \sqrt{\text{Pr}} \quad (5.20)$$

$$D_3 = \frac{\sin^2 \left(\frac{L_{mi\dot{s}} 2\pi}{\lambda} \right) \beta \omega}{\rho_m c_{pm} (1 + \varepsilon_s)} \quad (5.21)$$

$$D_4 = \frac{\omega \sqrt{\text{Pr}} \left(1 + \frac{b}{y_0} \right)^2 \cos^2 \left(\frac{L_{mi\dot{s}} 2\pi}{\lambda} \right) \left(1 - \frac{\delta_v}{2 y_0} \right)^2}{\left(1 + \frac{\delta_v^2}{2 y_0^2} - \frac{\delta_v}{y_0} \right) c^2 \rho_m} \quad (5.22)$$

anlamındadır.

Bir ucu kapatılmış, diğer ucu atmosfere açık rezonatörde termoakustik olarak üretilen ses dalgalarının esas frekansının, Denklem (2.59)'dan bulunacak en küçük frekans olan,

$$f = \frac{c}{4 L} \quad (5.23)$$

ifadesine eşit olacağı bilinmektedir. Bu durumda ω ile f arasındaki Denklem (2.31) ile ifade edilen bağıntıdan açılmal frekans da bulunabilir. Diğer taraftan, Denklem (2.46) ve (2.47)'den, rezonatörün hız ve basınç antinodları arasında $\frac{\lambda}{4}$ kadar mesafe bulunduğu anlaşılmaktadır. Basınç antinodu kapalı uç, hız antinodu ise rezonatörün açık ucu olduğundan,

$$\lambda = 4L \quad (5.24)$$

ifadesinden dalga boyu bulunabilir.

Rezonatörün açık ucundan çevreye yayılan akustik gücü bulabilmek için,

$$\dot{E}_y = \frac{\pi}{2} \rho_m c \left(\frac{\dot{Q}_r}{\lambda} \right)^2 \quad (5.25)$$

$$\dot{Q}_r = u_1 ab \quad (5.26)$$

denklemlerinden faydalanılacaktır [30, s164,168]. Burada $\dot{Q}_r$, rezonatörün açık ucundaki hava debisi genliğidir. Açık uç için,

Denklem (5.8)'deki $\dot{E}_{rez}$, Denklem (5.9)'daki $\dot{E}_{eş}$, Denklem (5.18)'deki $\dot{W}_{ış}$ ve Denklem (5.29)'daki $\dot{E}_y$ ifadeleri Denklem (5.13)'e taşınırsa, bütün terimlerde bulunan p_A^2 çarpanı sadeleştirilebilir. Bu durumda tek bilinmeyen olan $\left(\frac{dT_m}{dx}\right)_{ış}$ ifadesi Denklem (5.13)'den çekilerek, akustik salınımların gerçekleştiği sıcaklık gradyanı bulunabilir. Bu sıcaklık gradyanı, akışkanın viskoziteli kabul eden Ek B'deki bilgisayar programı yardımıyla, rezonatör içindeki akışkanın, plakaların ve rezonatör gövdesinin termofiziksel özelliklerinin sıcaklık ile değiştiği dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Bu programda $\left(\frac{dT_m}{dx}\right)_{ış}$ için başlangıçta bir kabul yapılmakta ve bu kabulün sonucu olan sıcaklıklardaki termofiziksel özellikler için yeni bir $\left(\frac{dT_m}{dx}\right)_{ış}$ hesaplanmaktadır. Yeni ve eski sıcak eşanjör sıcaklıkları arasındaki fark $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ olana kadar iterasyon işlemine devam edilmekte ve akustik güç üretiminin gerçekleştiği sıcaklık gradyanı ile buna karşılık gelen sıcak eşanjör sıcaklığı hesaplanmaktadır. Ek C'deki bilgisayar programı ise, akışkanın viskozitesiz kabul edilmesi durumunda aynı işlemleri yapmaktadır.

5.4 BASINÇ ANTİNODLARINDAKİ AKUSTİK BASINÇ GENLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Rezonatörün basınç antinodu olan kapalı rezonatör ucundaki p_A akustik basınç genliğini belirlemek amacıyla Denklem (4.208)'den faydalanılacaktır. Bu denklem, çok sayıda plakadan oluşan iş üreten yapı için tekrar düzenlenirse,

$$\begin{aligned} \dot{H}_{ış} = & \frac{a_p n_p}{2} \delta_a p_A^2 \left\{ E_1 \left[\phi_{ış} E_2 + (\sqrt{Pr} - 1) \right] \right\} \\ & - 2 a_p n_p (k y_0 + k_s b) \left(\frac{dT_m}{dx} \right)_{ış} - (a_{ış} b_{ış} - a_{iç} b_{iç}) k_r \left(\frac{dT_m}{dx} \right)_{ış} \end{aligned} \quad (5.30)$$

ifadesi elde edilir. Burada,

$$E_1 = \frac{\sin\left(\frac{L_{miş}}{\lambda}\right)\left(1 + \frac{b}{y_0}\right)\cos\left(\frac{L_{miş}}{\lambda}\right)\left(1 - \frac{\delta_v}{2y_0}\right)}{\rho_m c (\text{Pr} - 1) (1 + \varepsilon_s) \left(1 + \frac{\delta_v^2}{2y_0^2} - \frac{\delta_v}{y_0}\right)} \quad (5.31)$$

$$E_2 = \sqrt{\text{Pr}} \left(1 - \frac{3}{2}\text{Pr}\right) (1 + \varepsilon_s) + \frac{1 + \varepsilon_s \sqrt{\text{Pr}}}{\text{Pr} - 1} (\sqrt{\text{Pr}} - 1) \quad (5.32)$$

olup,

$\dot{H}_{iş}$: iş üreten yapı içinde taşınan ısı

$a_{dış}$: rezonatörün dış genişliği

$b_{dış}$: rezonatörün dış yüksekliği

k_s : plaka malzemesinin ısı iletim katsayısı

k_r : rezonatör malzemesinin ısı iletim katsayısı

anlamındadır.

İş üreten yapı içinde taşınan ısı, iş üreten yapının sıcak ısı değiştiricisine uygulanan ısıdan, çevreye olan ısı kayıplarının çıkarılması suretiyle bulunabilir. Ancak iş üreten yapı içinde ısı negatif x yönünde taşındığından, Denklem (5.30)'daki $\dot{H}_{iş}$ ifadesinin sayısal değeri, bahsedilen şekilde bulunacak taşınan ısıya, negatif işaret eklenerek elde edilecektir. Bu durumda Denklem (5.30)'dan tek bilinmeyen olan p_A değeri çekilerek kapalı uçtaki akustik basınç genliği bulunur. Ek B'deki bilgisayar programında p_A değeri, termofiziksel özelliklerin sıcaklığa göre değiştiği dikkate alınarak, viskoziteli akışkan durumu için hesaplanmaktadır. Ek C'deki program ise, viskozitesiz akışkan için akustik basınç genliğini hesaplamaktadır.

5.5 İŞ ÜRETEYEN YAPI İÇİNDEKİ AKIŞKAN TARAFINDAN TERMOAKUSTİK OLARAK ÜRETİLEN GÜÇ ve TAŞINAN ISININ BELİRLENMESİ

İş üreten yapıdaki sıcaklık gradyanı ve kapalı uçtaki basınç genliği belirlendikten sonra bu iki ifade Denklem (5.18)'e taşınırsa, iş üreten yapı tarafından üretilen akustik güç sayısal olarak bulunabilir.

İş üreten yapı içindeki akışkan tarafından termoakustik olarak taşınan ısı ise, sıcak ısı değiştiriciye uygulanan ısıdan çevreye kaçan ısıнын çıkarılması yoluyla elde edilen değerden, Denklem (5.30)'daki ikinci ve üçüncü terimlerin çıkarılması ile bulunabilir. Üretilen güç ve taşınan ısı ile ilgili sayısal hesaplamalar, viskoziteli durum için Ek B'deki bilgisayar programı tarafından, viskozitesiz durum için Ek C'deki program tarafından yapılmaktadır.

Sözkonusu bilgisayar programları, termoakustik güç üretiminin gerçekleştiği sıcaklık gradyanı ve akustik basınç genliğini belirledikten sonra, rezonatör yüzeylerindeki akustik güç kaybını, ısı değiştiricilerdeki akustik güç kaybını ve rezonatörün açık ucundan çevreye yayılan akustik gücü de belirlemektedir.

5.6 NONLINEERLİK KONTROLÜ, TÜRBÜLANS KONTROLÜ ve İDEAL ISI DEĞİŞTİRİCİSİ UZUNLUKLARININ BELİRLENMESİ

İş ve ısı ifadeleri akustik basınç genliğinin karesi ile orantılı olduğundan, termoakustik güç üreticinin büyük p_A ile sonuçlanan şartlarda çalıştırılması, üretilen gücün artmasını sağlayacaktır. p_A 'nın belirli bir değerden daha büyük olması durumunda ise nonlineerlik başlayacak ve sonuçlar, lineer teoriden sapacaktır. Rezonatör içinde nonlineerlik kriteri,

$$M = \frac{p_A}{\rho_m c^2} \quad (5.33)$$

olarak tanımlanan Mach sayısıdır. Nonlineer davranışların başlamaması için $M \leq 0.1$ olmalıdır [1]. Mach sayısının küçük olabilmesi için, $\rho_m c^2 = K P_m$ mümkün olduğunca büyük olmalıdır. Ek B'de ve Ek C'deki programlar, belirli çalışma koşulları için nonlineerliğin başladığı p_A değerini hesaplamakta ve nonlineerlik varsa kullanıcıyı uyarmaktadır.

İş üreten yapı içinde türbülansın olmaması için, bu yapı içinde her pozisyonda,

$$\frac{u_1 \delta_v}{\nu} < 500 \quad (5.34)$$

şartı sağlanmalıdır [3]. Ek B ve Ek C'deki programlar, akustik iş üreten yapının uç noktaları olan ısı değiştiriciler için yukarıdaki şartı kontrol etmekte ve türbülans varsa kullanıcıyı uyarmaktadır.

Isı değiştiricilerin ideal uzunlukları, rezonatör içindeki akışkan parçacıklarının deplasman genliğini veren Denklem (3.63) yardımıyla,

$$\Delta L_{es} = \frac{2 \operatorname{Im}[u_1]}{\omega} \quad (5.35)$$

denkleminde bulunabilir. Bu ifade deplasman genliğinin iki katını vermekte olup, ısı değiştirici uzunluğunun bulunacak değerden daha fazla olan kısmı faydalı olamayacak; aksine viskoz ve termal kayıpların artmasına yol açarak üretilen akustik gücün düşmesine neden olacaktır. Isı değiştirici uzunluğunun Denklem (5.35)'den bulunacak değerden daha küçük tutulması durumunda ise ısı değiştirici ile ısı alışverişi yapması gereken bazı akışkan parçacıkları ısı değiştirici yüzeyleri ile hiçbir zaman ısıl temas halinde olamayacak ve taşınan ısı ile üretilen akustik iş değerlerinde azalma görecektir. Ek B ve C'deki programlar, viskoziteli ve viskozitesiz akışkan durumları için belirli çalışma koşullarında iki ısı değiştiricisi için ayrı ayrı ideal uzunlukları hesaplamaktadır.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMA

Termoakustik güç üretimi için geliştirilen modelin geçerliliğini deneysel olarak araştırmak amacıyla, bir ucu atmosfere açık rezonatör içine akustik iş üreten bir yapı konularak termoakustik güç üretici imal edilmiştir. Cihaz değişik ısı yüklerinde çalıştırılarak, akustik basınç, frekans, sıcaklık, elektriksel güç ve debi ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler yardımıyla, Bölüm 4'te alt yapısı hazırlanan ve Bölüm 5'de çok sayıda plaka içeren bir ucu açık rezonatör içinde termoakustik güç üretimi için geliştirilen model kullanılarak, deney cihazında üretilen, kaybedilen, rezonatörün açık ucundan çevreye yayılan akustik güç değerleri ve iş üreten yapı içinde termoakustik olarak taşınan ısı bulunmaktadır. Ayrıca, geliştirilen modele göre bulunan akustik basınç ve sıcaklık değerleri ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması da yapılmaktadır.

İmal edilen termoakustik güç üreticini oluşturan elemanların boyutlarının ve iş üreten yapının rezonatör içindeki konumunun belirlenmesinde, Bölüm 5'de geliştirilen modele göre hazırlanmış, viskoziteli durum için geçerli bilgisayar programı kullanılmıştır. Ek B'de verilen bu program, çok sayıda boyut ve pozisyon için çalıştırılarak, imali kolay ve deney cihazının performansının yeterince yüksek olduğu boyut ve pozisyon değerleri seçilmiştir.

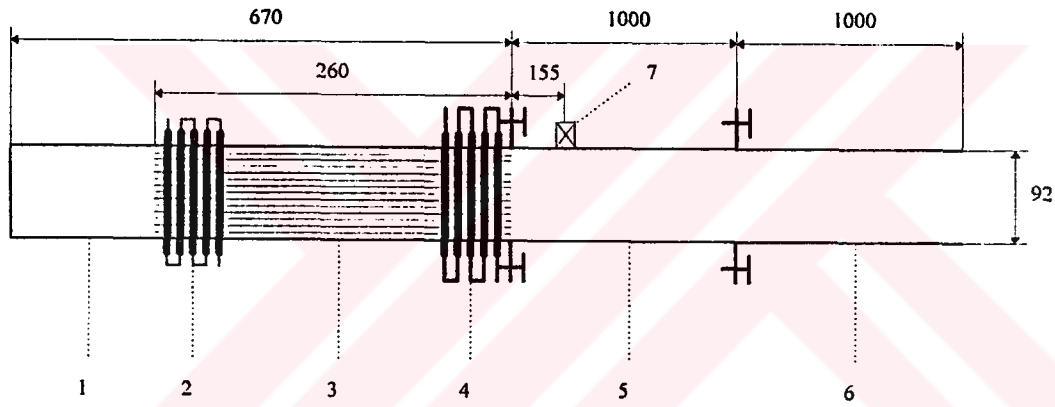
6.1 DENEY TESİSATININ TANITILMASI ve İMALİ

Termoakustik güç üreticinin şematik görünümü ve temel boyutları, Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi cihazın rezonatör kısmı üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan en soldaki iş üreten yapıyı içermekte olup, diğer kısımlar frekansı belirleyen içleri boş parçalardır.

İş üreten yapının sıcak ısı değiştiricisi içindeki ısıtıcı rezistansa bir varyak aracılığı ile dışarıdan elektrik enerjisi verilmekte, soğuk ısı değiştiriciden ise soğutma

suyu geçirilmektedir. Plakalar boyunca yeterli büyüklükte sıcaklık gradyanı oluştuğunda, plakalar arasındaki boşluklarda bulunan hava, sistemin rezonans frekansına eşit frekansta akustik salınımlar yapmakta, başka bir ifade ile akustik güç üretilmektedir. Aynı zamanda rezonatörün açık ucundan dışarıya akustik güç yayılmaktadır.

Termoakustik güç üreticinin rezonatörünün dairesel kesitli olması durumunda, iş üreten yapıyı oluşturacak plakaların, aralarında belirli mesafeler bırakılarak dairesel kesiti dolduracak şekilde üst üste dizilmesinin zor olacağı düşünülerek, rezonatör kesiti kareye yakın seçilmiştir. Rezonatör içinde oluşacak akustik salınımların frekansının düşük olması için, rezonatör uzunluğu mümkün olduğunca büyük tutulmuştur. Düşük frekans, ısı ve viskoz nüfuz derinliklerini artırmakta; böylece plakalar arasındaki boşluğun yeterince büyük tutulabilmesine imkan vermekte ve sonuçta iş üreten yapının imali kolaylaşmaktadır.



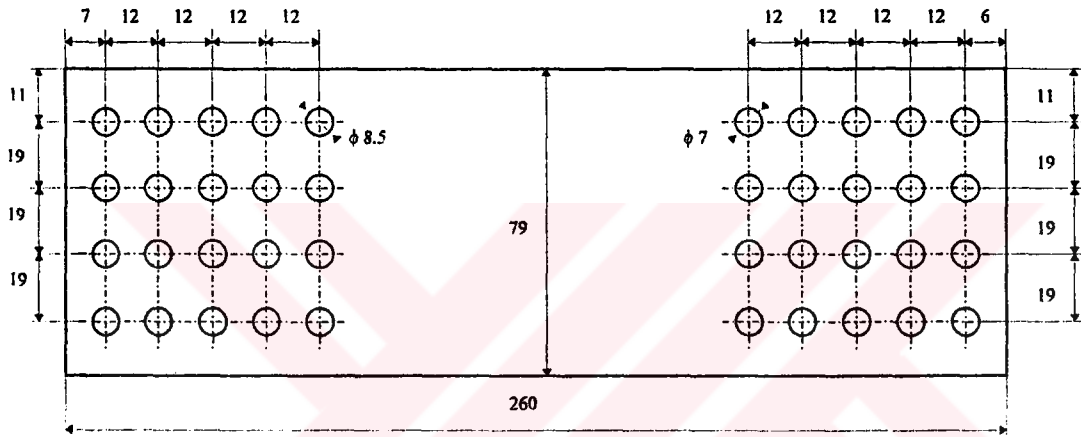
- 1) Birinci kısım boş rezonatör, 2) Sıcak ısı değiştirici, 3) İş üreten yapı,
4) Soğuk ısı değiştirici, 5) İkinci kısım boş rezonatör, 6) Üçüncü kısım boş rezonatör
7) Dinamik basınç duyargası

Şekil 6.1 Termoakustik Güç Üreticinin Şeması ve Temel Boyutları

Bilgisayar programı yardımıyla boyutlar ve konumlar belirlendikten sonra, iş üreten yapının imali için, 0.7 mm kalınlıkta çelik sac levha kullanılarak, Şekil 6.2'de gösterilen dış ölçülere sahip 46 adet parça yapılmıştır. Daha sonra bu plakalara, beşli gruplar halinde verilen ölçülerde delikler delinmiştir. Bu plakaların sol tarafındaki

deliklerden ϕ 8 mm çelik borular, sağ tarafındaki deliklerden ϕ 6.35 mm bakır borular geçecektir.

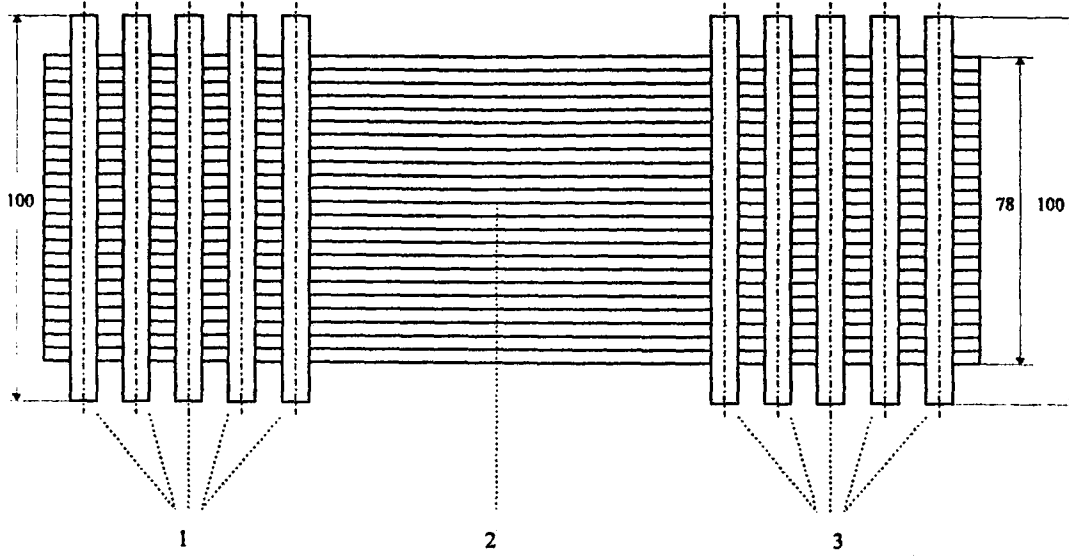
Plakalar içinden geçecek borular ile plakalar arasındaki ısı geçişini artırmak için, ϕ 8 mm çaplı çelik boruların etrafına geçecek, ϕ 8 mm iç ve ϕ 10 mm dış çaplarına sahip 900 adet bakır pul, 1 mm kalınlıkta bakır sac kullanılarak imal edilmiştir. Benzer şekilde ϕ 6.35 mm çaplı bakır boruların etrafına geçecek şekilde, ϕ 6.35 mm iç ve ϕ 8.5 mm dış çaplarına sahip 900 adet bakır pul, yine 1 mm kalınlıkta bakır sac kullanılarak imal edilmiştir. Bu pullar, iç yüzeylerinden borulara, alt ve üst yüzeylerinden ise plakalara temas edecek, böylece ısı geçişi iyileştirildiği gibi plakalar arasında yaklaşık 1 mm'lik boşluk da pullar tarafından sağlanacaktır.



Şekil 6.2 İş Üreten Yapıyı Oluşturan Plakalar

Daha sonra, çelik ve bakır borulardan yeterli sayıda ve uzunlukta kesilerek, plakaların boru demetlerine takılmasına başlanmıştır. Her plakadan sonra, borulara uygun çapta pullar takılmış ve bu pulların altlarındaki plaka yüzeyine değmesi sağlanmıştır. Plaka ve pulların takılması işlemi bittiğinde, Şekil 6.3'de gösterilen yapı elde edilmiştir. İmalatı tamamlanmış iş üreten yapının değişik yönlerden görünümü, Şekil 6.4'de gösterilmiştir.

Çalışma esnasında akustik etkiler sonucu plakaların titreme yapmasını engellemek için, plakalar yan taraflarından Oksi-Asetilen kaynağı ile birkaç yerden birbirlerine kaynak edilmiştir.

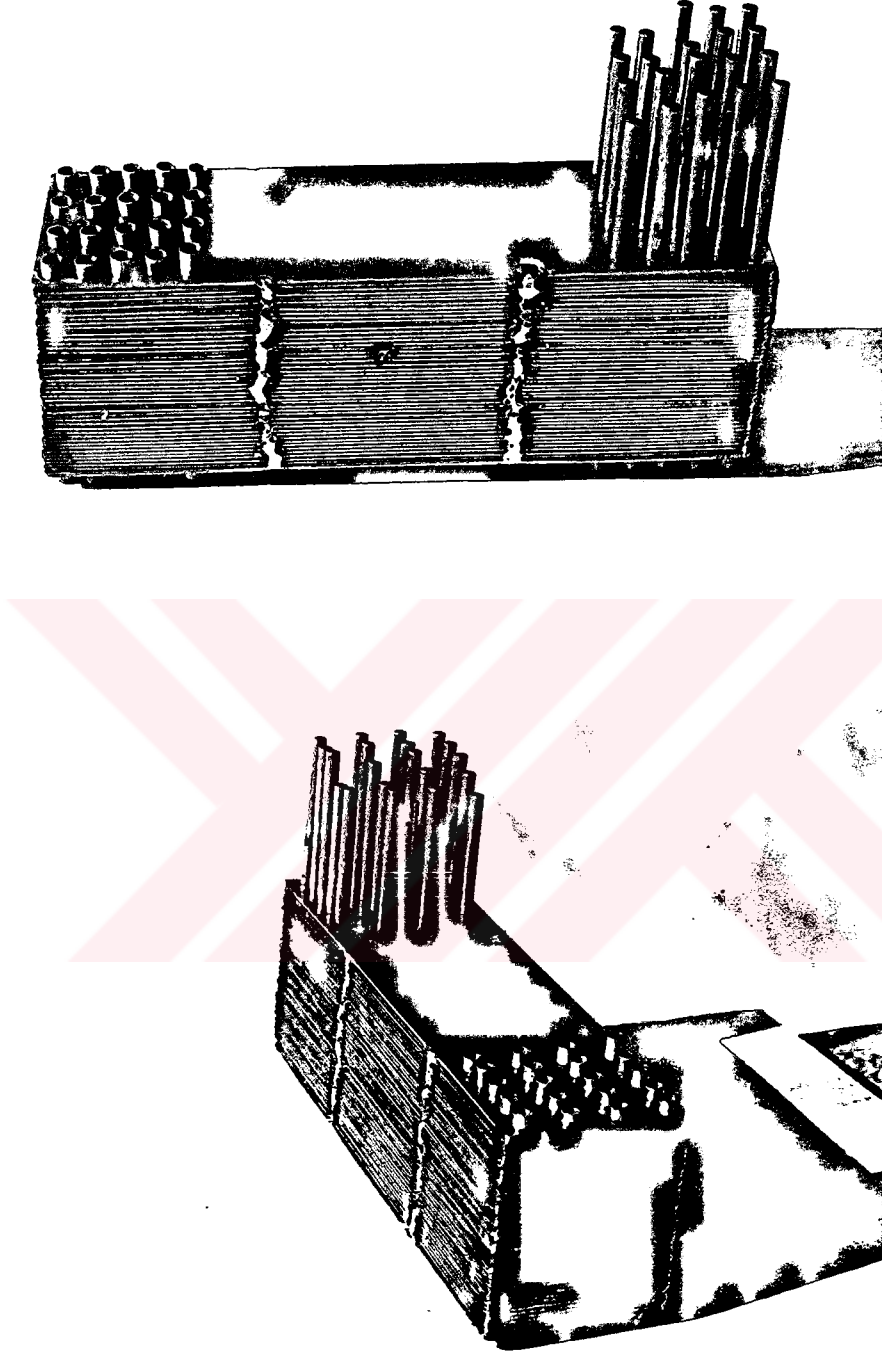


1) Çelik borular, 2) İş üreten yapının plakaları, 3) Bakır borular

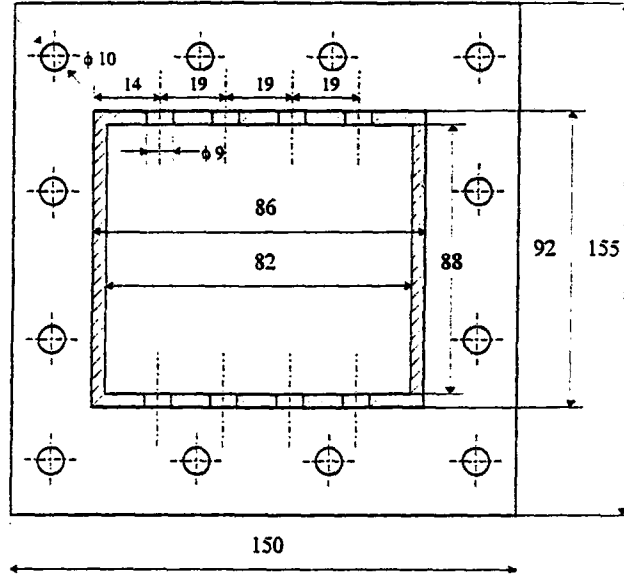
Şekil 6.3 İş Üreten Yapı

Daha sonra 2 mm kalınlıkta çelik sac levha kullanılarak, iş üreten yapıyı kuşatacak rezonatör kısmı imal edilmiştir. Bu kısım 670 mm uzunlukta olup, temel ölçüleri Şekil 6.5’de gösterilmiştir. Başlangıçta iki parçadan yapılan bu kısım, iş üreten yapı etrafına getirilmiş, iş üreten yapıya ait boruların rezonatör gövdesi dışına taşması sağlandıktan sonra iki kısım birbirine kaynak edilmiştir. Çelik ve bakır boruların rezonatör gövdesinden dışarı çıkan uçları, rezonatör içi ile dışı arasında sızdırmazlığı sağlayacak şekilde, 660 °C’de eriyen sert lehim teli kullanılarak rezonatör gövdesine lehimlenmiştir. İş üreten yapıyı kuşatan rezonatör kısmının bir ucu, 2 mm kalınlıkta sac levha kaynak edilerek kapatılmış, diğer uca ise 4 mm kalınlıkta lamelden yapılan flanş kaynak edilmiştir.

Rezonatörü oluşturan diğer iki kısım, yine Şekil 6.5’de gösterilen ölçülere göre imal edilmiştir. Bunların herbirinin uzunluğu 1000 mm olup, birinci kısımdan farklı olarak üzerlerinde delikler bulunmamakta ve uçları açık olup her uçta flanşlar yer almaktadır.



Şekil 6.4 İş Üreten Yapının Değişik Yönlerden Görünümü

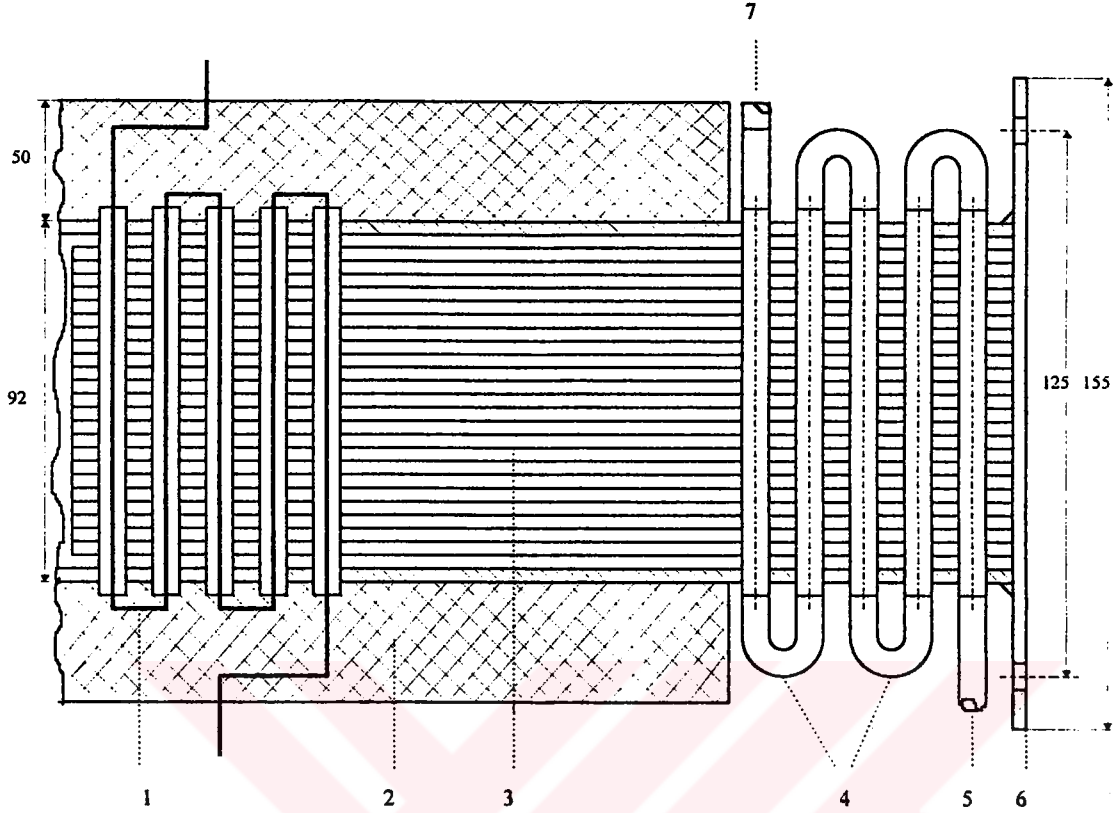


Şekil 6.5 İş Üreten Yapıyı Kuşatan Rezonatör Kısım

Rezonatör kısımlarının imalinden sonra, 0.5 mm kalınlıkta rezistans teli önce ikili olarak bükülmüş, sonra da etrafında porselen yalıtıcılar olacak şekilde iş üreten yapının çelik boruları içinden geçirilmiştir. Bakır boruların uçları ise, aynı çapta bakır borudan yapılan bağlantı parçalarının uçlarının şişirilmesi ve yapıştırılması suretiyle birbirleriyle irtibatlı hale getirilmiştir. Konumları izleyen bölümde belirtilen rezonatör yüzeyindeki sıcaklık ölçümünün yapılacağı noktalara 11 adet NiCr-Ni ısı çifti (termokupl), punta kaynağı ile kaynak edilmiştir. Çevreye ısı kaybını azaltmak için, çalışma esnasında ısınacak rezonatör yüzeyleri 5 cm kalınlıkta taş yünü levha ile yalıtılmıştır. İş üreten yapı ve çevresindeki elemanların son durumdaki görünüşleri, Şekil 6.6'da gösterilmiştir.

İmali tamamlanan üç rezonatör kısmı, flanşları arasına 3 mm kalınlıkta mantar contalar konularak M8 civatalar ile birbirlerine bağlanmıştır. Isıtıcı rezistans telinin uçları, taş klemens kullanılarak, 220 V ile beslenen ve çıkış gerilimi 0-220 V arasında istenilen değere ayarlanabilen bir varyak ile irtibatlı hale getirilmiştir. Bakır boruların giriş ve çıkış uçları ise, saydam hortumlar kullanılarak su vanasına ve su giderine bağlanmıştır. Ayrıca su debisini ölçebilmek amacıyla, vana çıkışına 0.050 lt/s'ye kadar su debisini gösterebilen bir rotametre bağlanmıştır. Dinamik basınç duyargasını monte edebilmek amacıyla, rezonatör yüzeyinin konumu Bölüm 6.2'de belirtilen yerine

kılavuz kullanılarak M10 diş açılmıştır. Deney tesisatının deneyler öncesindeki görünümü, ölçüm cihazları ve varyak ile birlikte Şekil 6.7’de gösterilmiştir.

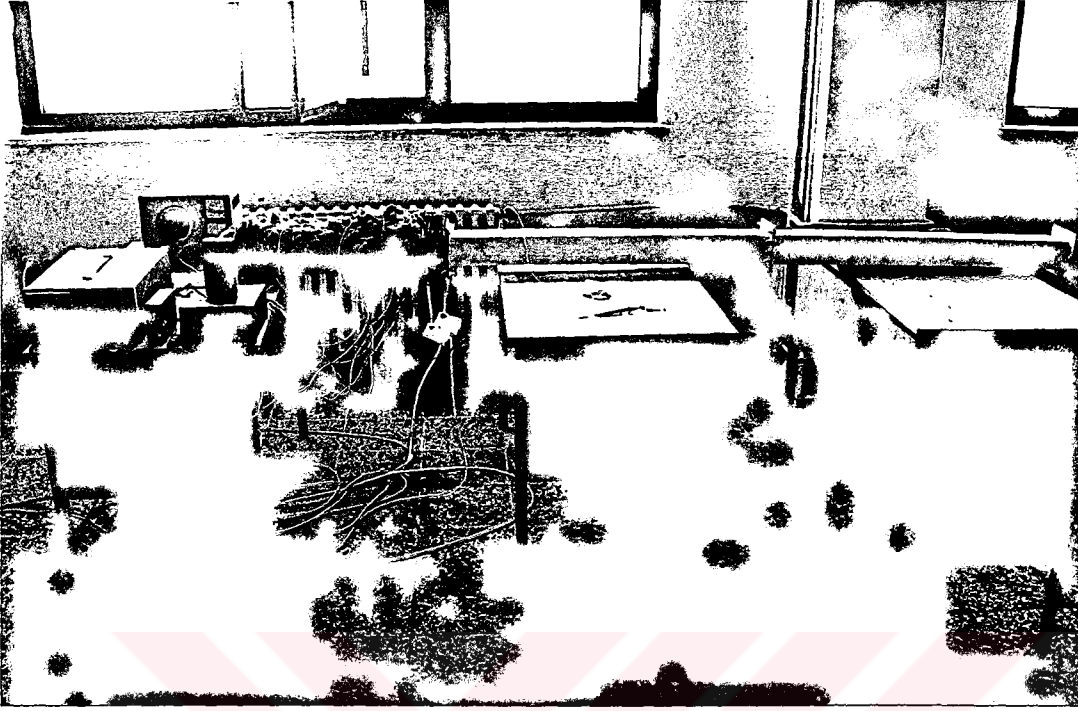


- 1)Rezistans teli, 2)Yalıtım, 3)İş üreten yapının plakaları, 4)Bağlantı parçaları, 5)Su girişi, 6)Flanş

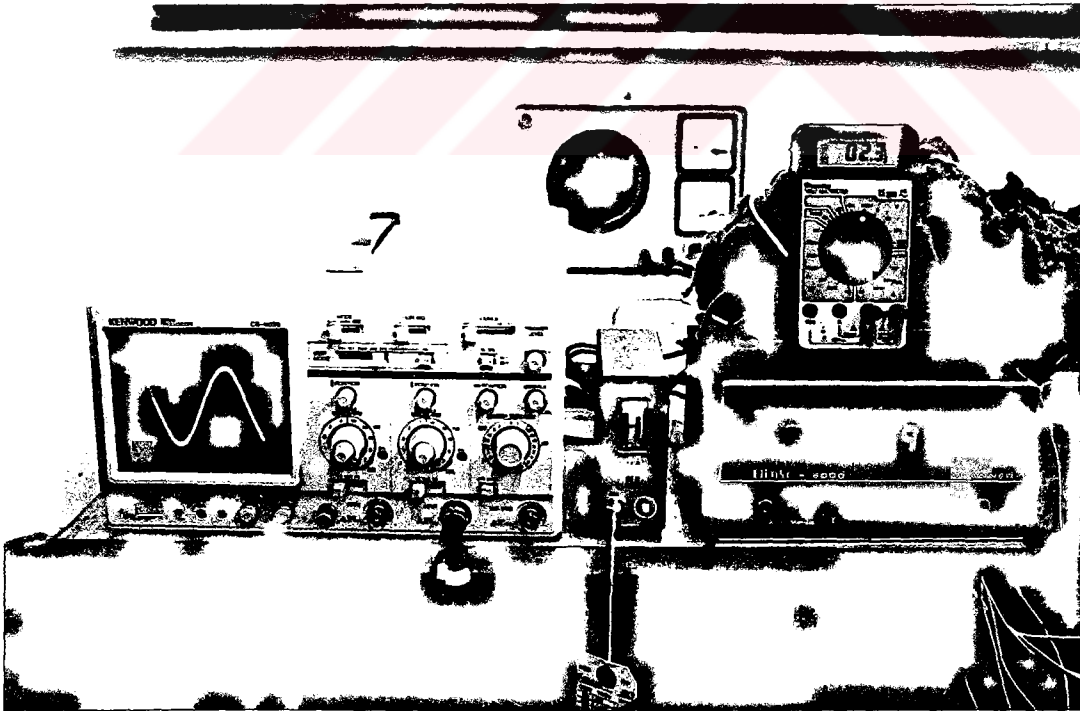
Şekil 6.6 İş Üreten Yapı ve Çevresindeki Elemanlar

6.2 AKUSTİK BASINÇ, SICAKLIK, SU DEBİSİ ve ELEKTRİK GÜCÜ ÖLÇÜMLERİ

Deney sonuçları ile geliştirilen modelin verdiği sonuçları karşılaştırmak için, rezonatör içinde belirli bir pozisyonda akustik basıncı, rezonatör içinde oluşan ses dalgalarının frekansını, çeşitli yerlerdeki sıcaklıkları, ısıtıcı rezistansa verilen elektrik gücünü ve su debisini ölçmek gerekmektedir. Deney cihazına istenilen besleme gerilimini uygulayan varyak, akustik basınç ölçümünde kullanılan dinamik basınç duyargası ile güç kaynağı, osiloskop, ısı çift gerilimlerinin ölçümünde kullanılan milivoltmetre ve kanal tarayıcı, Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



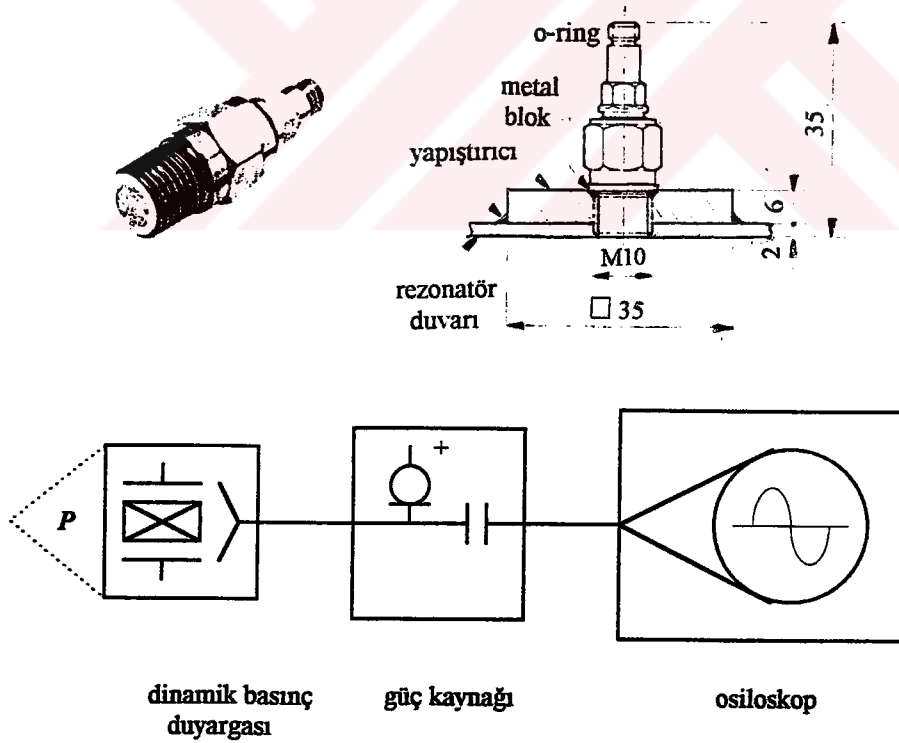
Şekil 6.7 Deney Tesisatının Genel Görünümü



Şekil 6.8 Akustik Basınç ve Sıcaklık Ölçüm Cihazları

Akustik basınç genliğini ve frekansı ölçmek amacıyla, PCB firması tarafından üretilen ve piezoelektrik ilkesine göre çalışan M102A05 modeli dinamik basınç duyargası kullanılmıştır. Duyargayı enerjilendirmek ve duyargadan gelen sinyalleri osiloskopa göndermek amacıyla, yine PCB firması tarafından üretilen 482A modeli ICP güç kaynağı kullanılmıştır. Gelen sinyalleri incelemek amacıyla, Kenwood CS4025 modeli osiloskoptan faydalanılmıştır. Duyarganın görünüşü, montajı ve ilgili diğer cihazlar ile bağlantısı, Şekil 6.9'da gösterilmektedir.

Kullanılan basınç duyargasının kalibrasyon eğrisinin lineer olduğu ve ölçümlerin yapıldığı basınç genliği aralığında 20 °C'deki hassasiyetinin 50.89 mV/PSI olduğu, cihazın kullanım kılavuzundan anlaşılmaktadır. Ayrıca duyarganın sıcaklık katsayısının % / °C biriminden en fazla 0.054 olduğu, yine kullanım kılavuzundan bulunmuştur. Sıcaklık katsayısı, ölçümlerin yapıldığı sıcaklığın 20 °C'den her 1 °C'lik sapmasının, ölçülen dinamik basınçta neden olduğu yüzde olarak maksimum hatayı göstermektedir. Deneyler esnasında akustik basınç genliği, 50.89 mV/PSI değeri kullanılarak osiloskop ekranından elde edilmiştir. Frekans ise, bir tam salınım için geçen sürenin osiloskop ekranı üzerinde bulunan cetvelden okunması ile bulunmuştur.



Şekil 6.9 Basınç Duyargasının Görünüşü, Montajı ve Diğer Elemanlar ile Bağlantısı

Osiloskop üzerinde ölçülen mesafe değerlerini kullanarak, akustik basınca karşılık gelen voltaj genliği ve frekansın bulunmasında aşağıdaki bağıntılardan faydalanılmıştır.

$$V_{PI} = \frac{Y \frac{V}{div}}{2} \quad (6.1)$$

$$f = \frac{1}{X \frac{time}{div}} \quad (6.2)$$

Burada,

V_{PI} : akustik basınca karşılık gelen voltaj genliği (mV)

Y : ekrandan ölçülen dalga genliğinin iki katını veren mesafe (cm)

$\frac{V}{div}$: osiloskop üzerinden ayarlanan voltaj / bölüntü değeri (mV/cm)

X : ekrandan ölçülen dalganın periyodu (cm)

$\frac{time}{div}$: osiloskop üzerinden ayarlanan zaman / bölüntü değeri (s/cm)

anlamındadır.

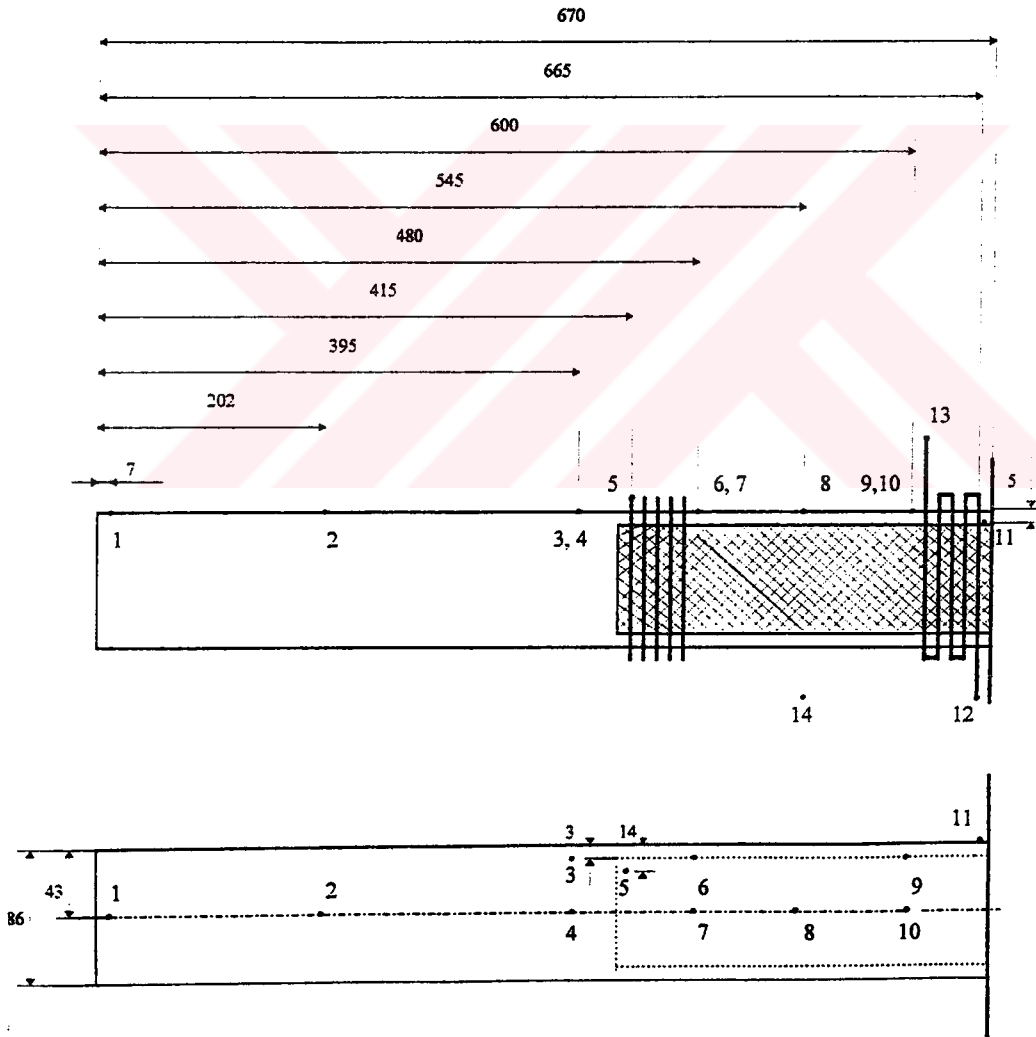
Osiloskopta voltaj / bölüntü ayarı, gelen sinyalin büyüklüğüne göre 2, 5 veya 10 mV/cm, zaman/bölüntü ayarı ise 5 ms/cm olarak yapılmıştır.

Dinamik basınç duyargası, açık uçtan 1845mm uzağa, rezonatör yüzeyinin ortasına monte edilmiştir. Bu durumda $x = 1.845$ m ve $\lambda = 4 L = 10.72$ m olarak bulunur. Bu değerler Denklem (3.4)'e taşınırsa,

$$P_A = \frac{P_1}{0.8826} \quad (6.3)$$

sonucu elde edilir. Bu ifade, ölçülen p_1 akustik basınç genliği ile rezonatörün kapalı ucundaki p_A akustik basınç genliği arasındaki bağıntıyı vermektedir. Kapalı uçtaki akustik basınç genliğinin doğrudan ölçülemeyişinin nedeni, basınç transducerinin 135°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılamamasıdır.

Rezonatör yüzeyinin değişik yerlerindeki sıcaklıkları ölçmek amacıyla, rezonatör yüzeyine Şekil 6.10'da gösterilen pozisyonlara punta kaynağı ile kaynak edilmiş 11 adet NiCr-Ni ısı çiftinden faydalanılmaktadır. Ayrıca suyun soğuk ısı değiştiriciye giriş ve çıkış sıcaklıkları ile deneyin yapıldığı ortam havasının sıcaklığı, üç ayrı NiCr-Ni ısı çifti ile ölçülmektedir. Şekil 6.10'da gösterildiği gibi rezonatör yüzey sıcaklıkları 1-11 arasında numaralanmış olup suyun ısı değiştiriciye giriş ve çıkış sıcaklıkları ile ortam havasının sıcaklığı sırasıyla 12, 13 ve 14 ile gösterilmiştir. Yüzey sıcaklıklarını ölçen termokupl tellerinin uçları, telefon kabloları ile uzatılarak bir kanal tarayıcıya bağlanmış, kanal tarayıcı ise dijital bir milivoltmetreye bağlanmıştır. 1-11 arasında numaralandırılan sıcaklıklar, milivoltmetrede okunan değere göre K tipi termokupl tablosundan bulunmaktadır. 12, 13 ve 14 numaralı sıcaklıklar ise, sensör olarak K tipi termokupl kullanan dijital bir sıcaklık ölçerin skalasından doğrudan okunmaktadır.



Şekil 6.10 Isıl Çift ile Sıcaklık Ölçümü Yapılan Noktalar

Soğuk ısı değiştiriciye giren su debisi, 0.050 lt/s'ye kadar ölçüm yapabilen bir rotametre ile ölçülmekte ve rotametre musluğu ile istenilen değere ayarlanmaktadır. Su debisi ve suyun giriş-çıkış sıcaklıklarının ölçülmesi ile,

$$Q_S = \dot{m}_S c_{PS} (T_{13} - T_{12}) \quad (6.4)$$

ifadesi kullanılarak ısı değiştiriciden suya atılan ısı bulunmaktadır. Burada c_{PS} , suyun özgül ısıdır

Sıcak ısı değiştiriciye ısıtıcı rezistans teli tarafından uygulanan ısı, varyak çıkış voltajının değiştirilmesi suretiyle ayarlanmaktadır. Bu ısı, varyak çıkış voltajının dijital bir voltmetre ile, rezistans telinin çektiği akımın ise hat içine bağlanan dijital bir ampermetre ile ölçülerek, okunan değerlerin

$$Q_E = V I \quad (6.5)$$

ifadesinde kullanılması ile bulunmaktadır.

6.3 DENEYLERİN YAPILIŞI ve SONUÇLARI

Deneylerde iş üreten yapının sıcak eşanjörüne uygulanan voltaj, 55 - 85.1 V arasında yaklaşık 5 V'luk artırımlarla 7 değişik değerde tutulmuştur. Buna karşılık elektrik enerjisi ve dolayısıyla uygulanan ısı güç olarak 412 - 964.2 W arasında 7 değişik değer elde edilmiştir.

Voltajın 55 V'dan başlatılmasının nedeni, daha küçük voltajlarda ısı kayıpları nedeniyle plakalar boyunca yeterli büyüklükte sıcaklık gradyanının sağlanamayışdır. Bunun sonucunda 55 V'un altındaki voltajlar tarafından sağlanan ısı değerlerinde, deney cihazı içinde akustik güç üretimi gerçekleşmemektedir. Uygulanan voltaj 85 V'u aştığında ise, sıcak ısı değiştirici borularının çıkış yaptığı rezonatör yüzeyinde 650 °C civarında sıcaklıklar görülmekte, bu sıcaklıktan itibaren söz konusu boruları rezonatör yüzeyine bağlamakta kullanılan sert lehim erimeye başlamaktadır.

Her uygulanan ısı güç değeri için su debisinin 0.010, 0.015 ve 0.020 lt/s değerlerinde tutulduğu üç ayrı sürekli rejim deneyi yapılmıştır. Ancak ilk uygulanan ısı

güç değeri olan 412 W için, üç değişik su debisi durumunda, termoakustik güç üretiminin başladığı anda da ölçümler yapılmıştır. Yapılan toplam 24 deneyin her birinde iş üreten yapının soğuk ısı değiştiricisinden geçen su debisi, varyak aracılığı ile ayarlanan voltaj, rezistansın çektiği akım ve bunlara karşılık gelen iş üreten yapıya uygulanan ısıl güç değeri, Ek D Tablo D.1’de gösterilmektedir. Deneylerde doğrudan ölçülen değerler ise, Ek D Tablo D.2’de gösterilmiştir.

Yapılan 24 deneyin ilk üçünde, çok küçük olması nedeniyle akustik basınç genliği dışında, Bölüm 6.2’de bahsedilen ölçümlerin tamamı yapılmıştır. Bu deneylerde akustik güç üretiminin başladığı an, mV / bölüntü ayarı en küçük değere getirilen osiloskop ekranından tesbit edilmiştir. Kalan 21 deneyde sürekli rejim oluşana kadar beklendikten sonra ölçümler yapılmıştır. Sürekli rejime ulaşıldığı, osiloskop ekranından izlenen dalga genliğinin ve rezonatör yüzeyinin değişik yerlerdeki sıcaklıklarını sezen termokupl voltajlarının sabit kalmasından anlaşılmaktadır. Su debisi veya iş üreten yapıya uygulanan ısı değiştirildikten sonra sistemin sürekli rejime gelmesi, uygulanan ısı değerine göre giderek artacak şekilde 1.5-3 saat arasında zaman almıştır. Sürekli rejim elde edildikten sonra osiloskop ekranından ölçülen değerler Denklem (6.1) ve (6.1)’ye taşınarak, frekans ve dinamik basınç duyargasının monte edildiği yerdeki akustik basınç genliği bulunmuştur. Kapalı uçtaki akustik basınç genliğini bulmak için, Denklem (6.3)’den faydalanılmıştır. Suyun kazandığı ısı ve iş üreten yapıya uygulanan ısı, Denklem (6.4) ve (6.5) kullanılarak bulunmuştur. Rezonatörün yüzey sıcaklıkları, K tipi termokupl tablosundan elde edilmiştir. Tablo ve denklemler kullanılarak bulunan değerler, EkD Tablo D.3’de gösterilmiştir.

Deney sonuçları ile Bölüm 5’de geliştirilen viskoziteli termoakustik güç üretimi modelinin verdiği sonuçları karşılaştırabilmek için, iş üreten yapının sıcak ve soğuk uçlarındaki ortalama plaka sıcaklıklarının ölçülmesine gerek vardır. Ancak rezonatör içindeki bu kısımlara termokupl monte edilmesi zor olduğundan, bu sıcaklıklar dolaylı olarak bulunmuştur. Bu amaçla, iş üreten yapının sıcak ve soğuk ısı değiştirici borularının dış yüzey sıcaklıklarını bulan ve Ek E’de verilen bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Program, tek boyutlu enerji denklemini ve ölçülen sıcaklıkları kullanarak, sıcak ısı değiştirici borularının dış yüzey sıcaklığı için dört ayrı değer, soğuk ısı değiştirici borularının dış yüzey sıcaklığı için iki ayrı değer belirlemektedir. Daha sonra her ısı değiştirici için bu sıcaklıkların ortalamasını bulmaktadır. İş üreten

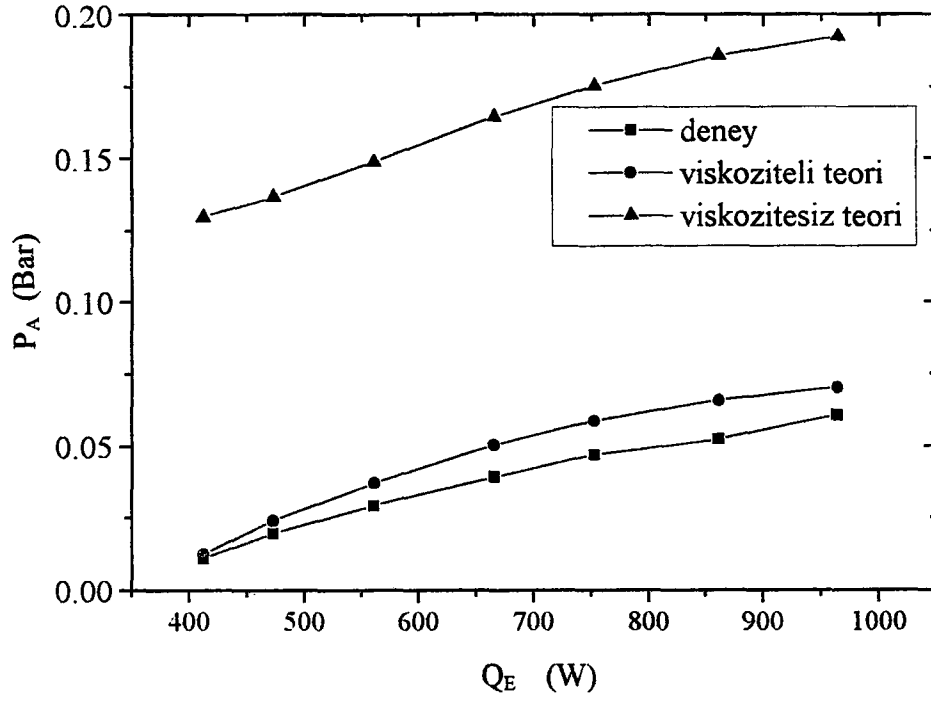
yapının sıcak ve soğuk uçlarındaki ortalama plaka sıcaklıkları, bu değerlere eşit kabul edilmektedir. Bu programın sonuçları, Ek D Tablo D.4’de gösterilmiştir.

Her deneyde üretilen akustik güç, termoakustik olarak taşınan ısı, rezonatörün açık ucundan çevreye yayılan akustik güç, rezonatör yüzeylerindeki akustik güç kaybı ve ısı değiştiricilerindeki akustik güç kaybını bulmak için, deney sonuçları ile Ek E’de verilen program yardımıyla bulunan sıcak ve soğuk uç sıcaklıklarını kullanan, viskoziteli durum için geçerli bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Ek F’de verilen bu program, ölçülen akustik basınç genliği ve frekans ile iş üreten yapının sıcak ve soğuk uç sıcaklıkların veri olarak girilmesine ihtiyaç duymaktadır. Deneylerde yapılan ölçümlere göre bu program tarafından bulunan değerler, Ek D Tablo D.5’de gösterilmiştir.

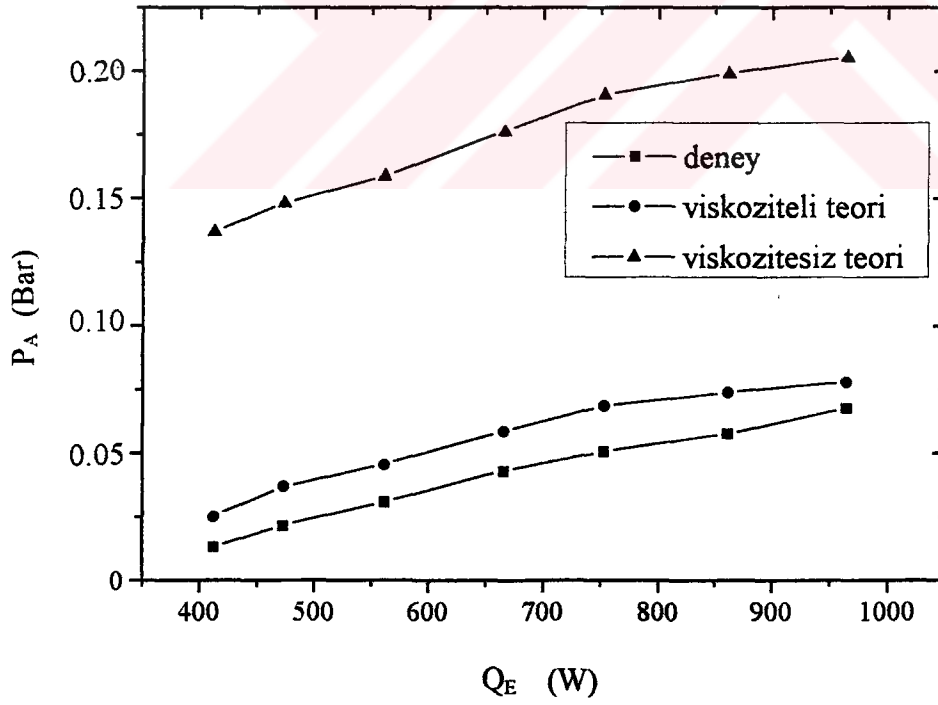
Deney sonuçlarıyla Bölüm 5’de geliştirilen viskoziteli ve viskozitesiz durumlarda termoakustik güç üretimi modellerinin verdiği sonuçları karşılaştırmak amacıyla, her deneyin yapıldığı koşullar grubu için Ek B ve Ek C’de verilen programlar çalıştırılarak geliştirilen modellerin sonuçları elde edilmiştir. Ek D Tablo D.6’da viskoziteli modelin sonuçları, Ek D Tablo D.7’de ise viskozitesiz modelin sonuçları gösterilmiştir.

6.4 DENEY SONUÇLARININ VİSKOZİTELİ ve VİSKOZİTESİZ MODEL SONUÇLARI ile KARŞILAŞTIRILMASI

Şekil 6.11 ve 6.12’de, iki farklı su debisi için, rezonatörün kapalı ucundaki akustik basınç genliğinin, sıcak ısı değiştiricisine uygulanan ısı ile değişimi gösterilmektedir. Diagramlardan, viskoziteli teorisinin deney sonuçlarına göre en fazla %20 oranında büyük sonuç verdiği görülmektedir. Bu farkın, iş üreten yapıyı oluşturan plakaların yüzeylerindeki küçük eğriliklerden ve plaka yüzeylerindeki korozyondan kaynaklandığı sanılmaktadır. Bunlardan dolayı bazı yerlerde plakalar arasındaki boşluk çok azalmakta ve cihazın performansı düşmektedir. Viskozitesiz model ise, uygulanan ısının küçük olduğu durumlarda deney sonuçlarına göre 12 kat fazla değerler vermektedir. Ancak viskozitesiz model ile deney sonuçları arasındaki fark sabit kalmakta, ikisi arasındaki yüzdesel fark, uygulanan ısı değeri arttıkça azalmaktadır. Bu diagramlardan, termoakustik güç üreticinde kullanılması gereken akışkanın mümkün olduğu kadar düşük viskoziteye sahip olması gerektiği anlaşılmaktadır.

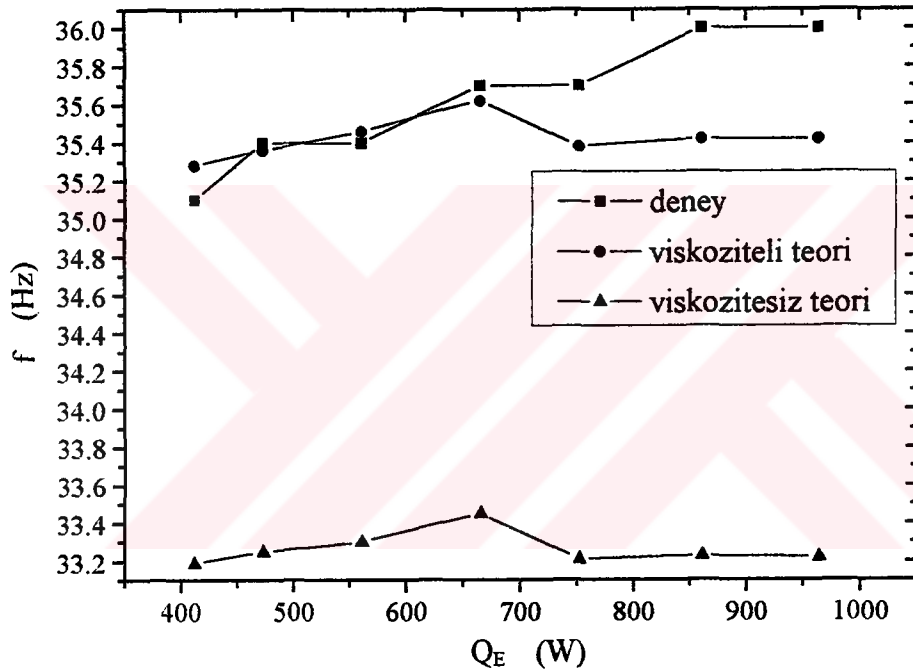


Şekil 6.11 Akustik Basınç Genliğinin Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s



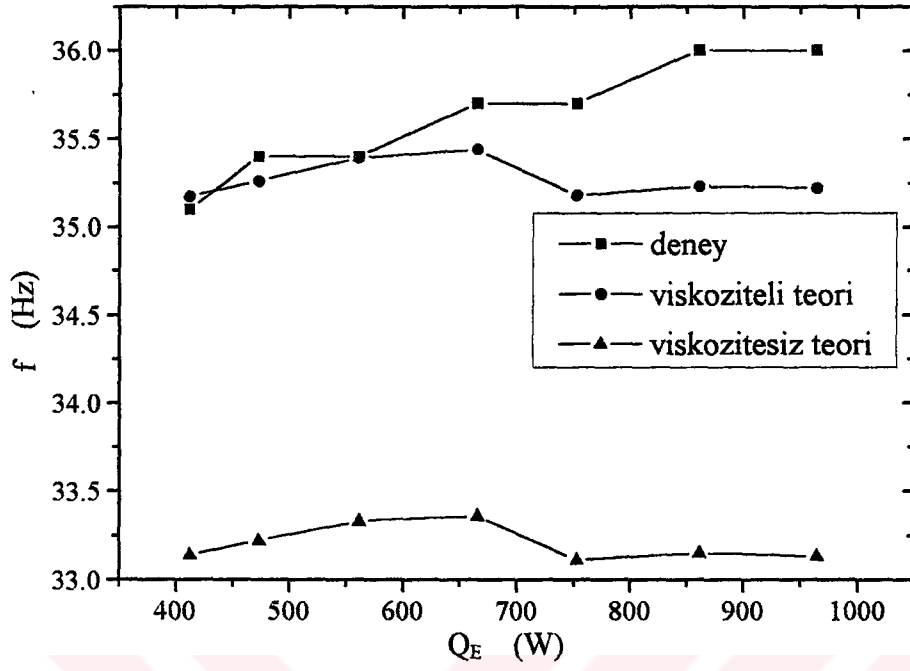
Şekil 6.12 Akustik Basınç Genliğinin Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s

Şekil 6.13 ve 6.14’de, iki farklı su debisi için, rezonatör içinde oluşan ses dalgalarının frekansının, iş üreten yapıya uygulanan ısı ile değişimi gösterilmiştir. Deney sonuçları ile viskoziteli teorinin, yaklaşık olarak aynı sonuçları verdiği görülmektedir. İki sonuç arasındaki fark, en fazla % 2 olmaktadır. Deney sonuçları ile viskozitesiz model sonuçları arasındaki ise en fazla % 8’lik bir fark bulunmaktadır. Sonuçlar arasındaki fark, frekansın, sesin ilerleme hızı ile orantılı olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır. Sesin ilerleme hızı ise, rezonatör içindeki K biriminden ortalama sıcaklığın karekökü ile orantılıdır. Deney sonucunda bulunan iş üreten yapının sıcak ucunun sıcaklığı, viskoziteli ve viskozitesiz modellerin verdiği sonuçlardan genellikle daha büyüktür. Bunun sonucunda deneyde ölçülen frekans da büyük olmaktadır.

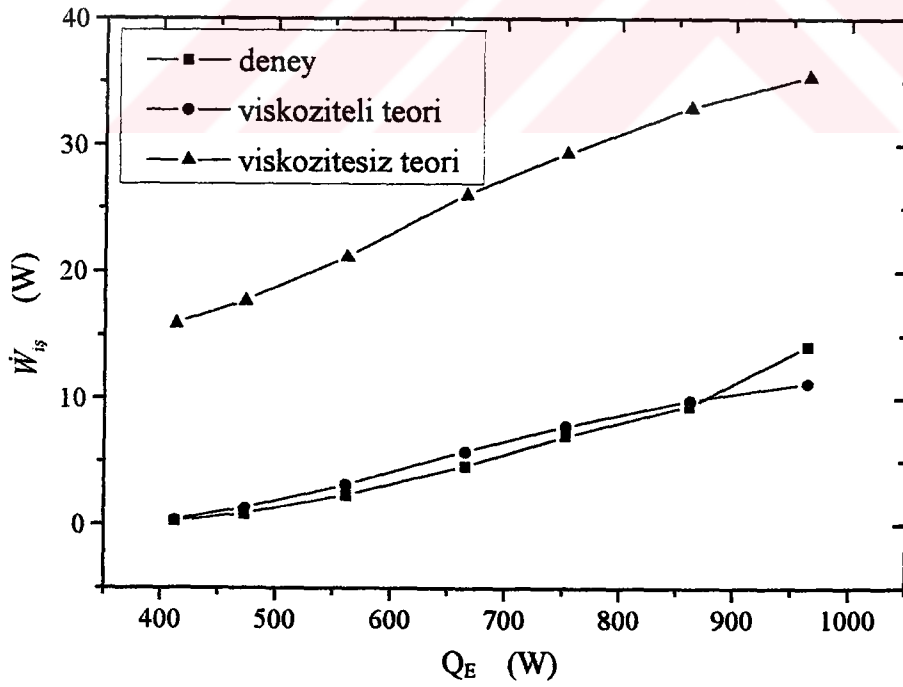


Şekil 6.13 Frekansın Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s

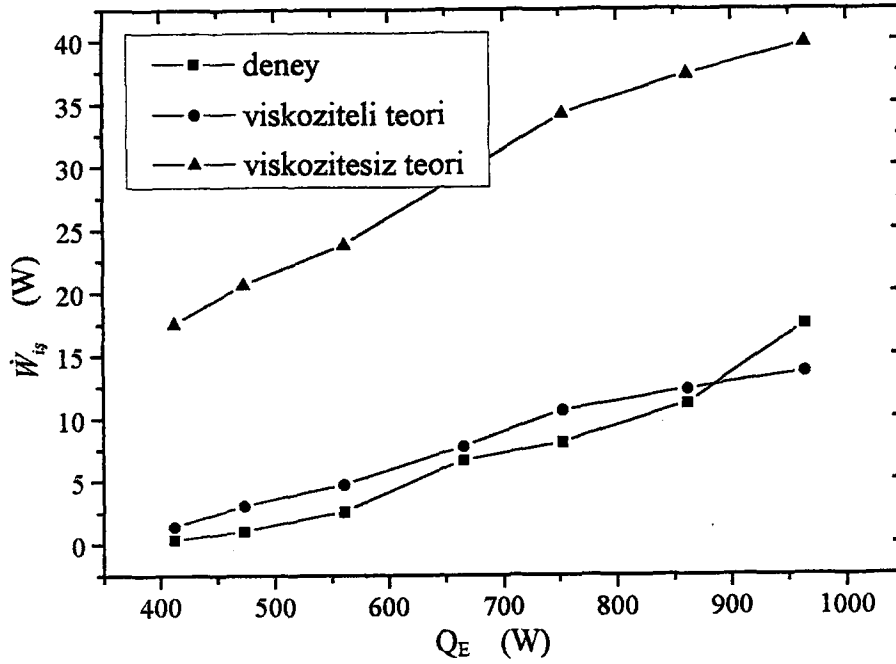
Şekil 6.15 ve 6.16’da, iki farklı su debisi için deney cihazında üretilen termoakustik gücün, iş üreten yapıya uygulanan ısı ile değişimi gösterilmiştir. Her iki debi değeri için viskoziteli model ile deney sonuçları uyum içinde olup, aralarında önemli bir fark bulunmamaktadır. Viskozitesiz model ise, daha yüksek akustik basınç genlikleri vermesinden dolayı daha büyük akustik güç değerleri ile sonuçlanmaktadır. Kullanılan akışkanın viskozitesinin düşük oluşu, üretilen akustik işin değerini artıracaktır.



Şekil 6.14 Frekansın Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s



Şekil 6.15 Termoakustik Olarak Üretilen Gücün Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s

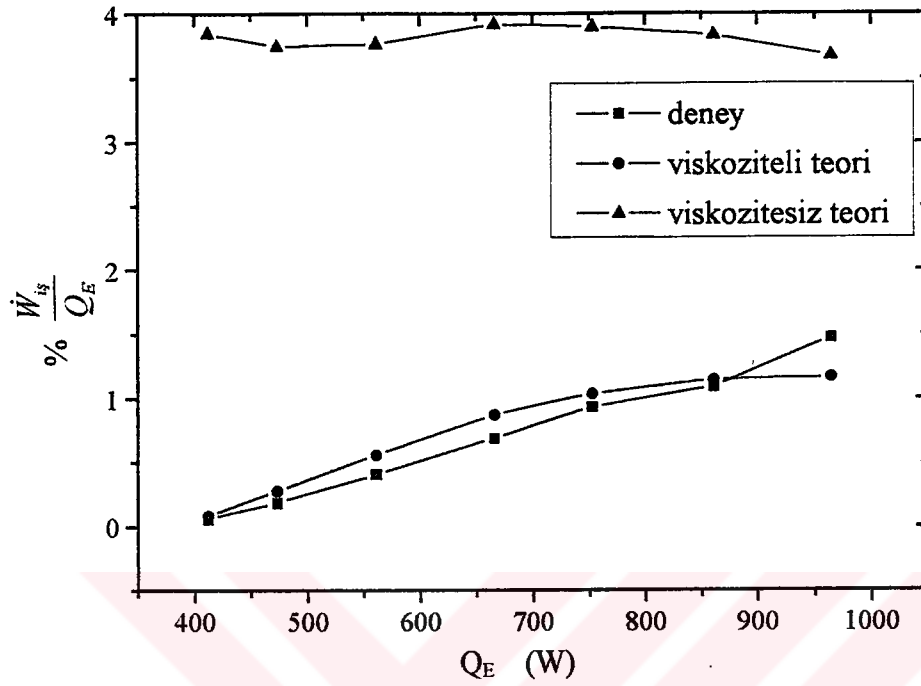


Şekil 6.16. Termoakustik Olarak Üretilen Gücün Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s

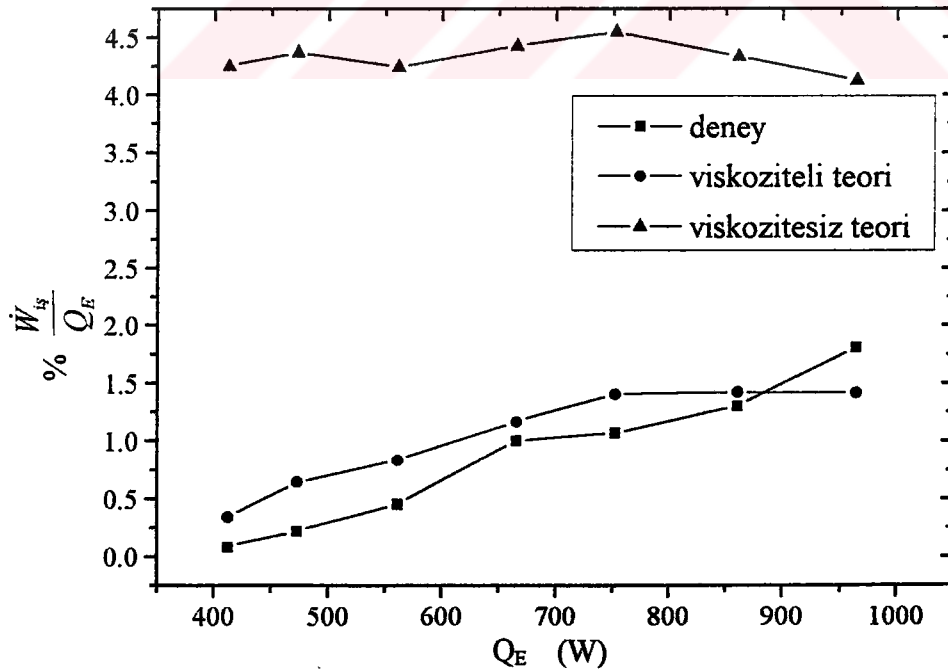
Termoakustik olarak üretilen gücün iş üreten yapıya uygulanan ısıya yüzdesel oranının, uygulanan ısı ile değişimi, Şekil 6.17 ve 6.18'de gösterilmiştir. Bu oran, uygulanan elektrik enerjisine göre sistemin verimi olarak kabul edilebilir. Görüldüğü gibi deney sonuçları ile viskoziteli model sonuçları arasında önemli bir fark bulunmamakta; ancak viskozitesiz model oldukça büyük oranlar vermektedir. Deneysel olarak elde edilen en büyük oran, uygulanan enerjinin 964.2 W, su debisinin 0.020 lt/s olduğu durumda elde edilen %1.81 değeridir. Aynı enerji değerinde 0.010 lt/s debi için bu oran, %1.47 değerine düşmektedir. Viskozitesiz modelin verdiği en büyük oran ise, 0.020 lt/s su debisi için %4.55 değeridir.

Termoakustik güç üretiminin gerçek verimi ise, üretilen akustik gücün termoakustik olarak taşınan ısıya oranı olarak tanımlanabilir. İş üreten yapıyı oluşturan plakaların ve havanın içinden iletim yoluyla soğuk ısı değiştiriciye geçen ısı, termoakustik olarak taşınan ısının değerini düşürmektedir. Ayrıca rezonatör gövdesi yoluyla soğuk ısı değiştiriciye olan ısı iletimi ve rezonatör gövdesinden çevreye olan ısı kaybı, termoakustik olarak taşınan ısının, uygulanan ısıdan çok daha düşük değerde olmasına neden olmaktadır. Bunlara rağmen Ek D Tablo 4 incelendiğinde, termoakustik güç üretiminin veriminin, 964.2 W'lık uygulanan ısı ve 0.010 lt/s debi değeri için %13.3 değerine ulaştığı görülmektedir. Kullanılan plakaların ve rezonatör

gövdesinin ısı iletim katsayısı düşük ve sıcaklığa dayanıklı başka malzemelerden yapılması durumunda, ayrıca sıcak rezonatör kısımlarının iyi yalıtılması durumunda bu oran çok daha büyük olacaktır.

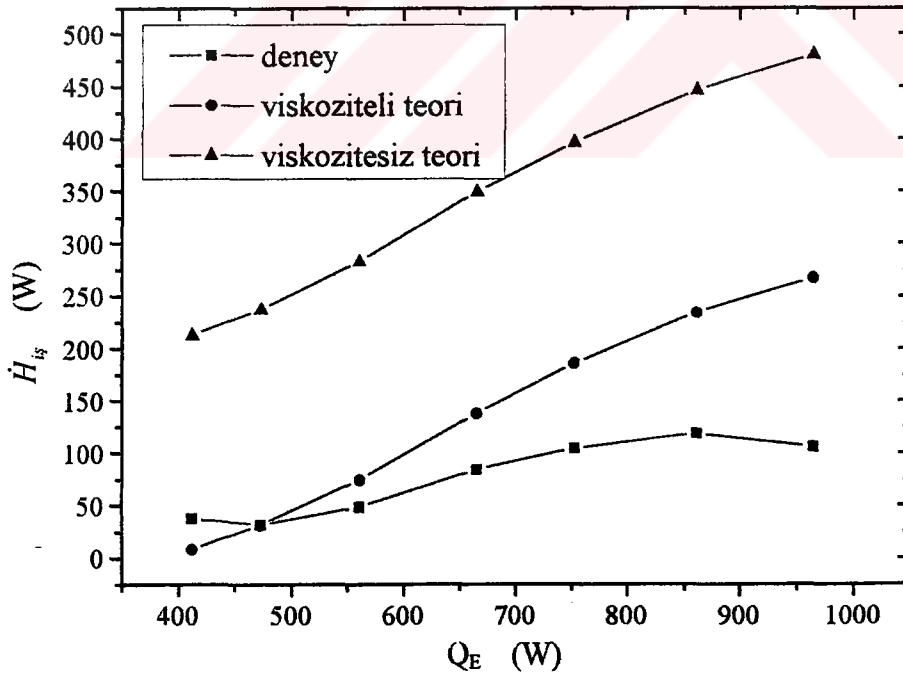


Şekil 6.17 Üretilen Akustik Gücün Uygulanan Isıya Oranının, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s

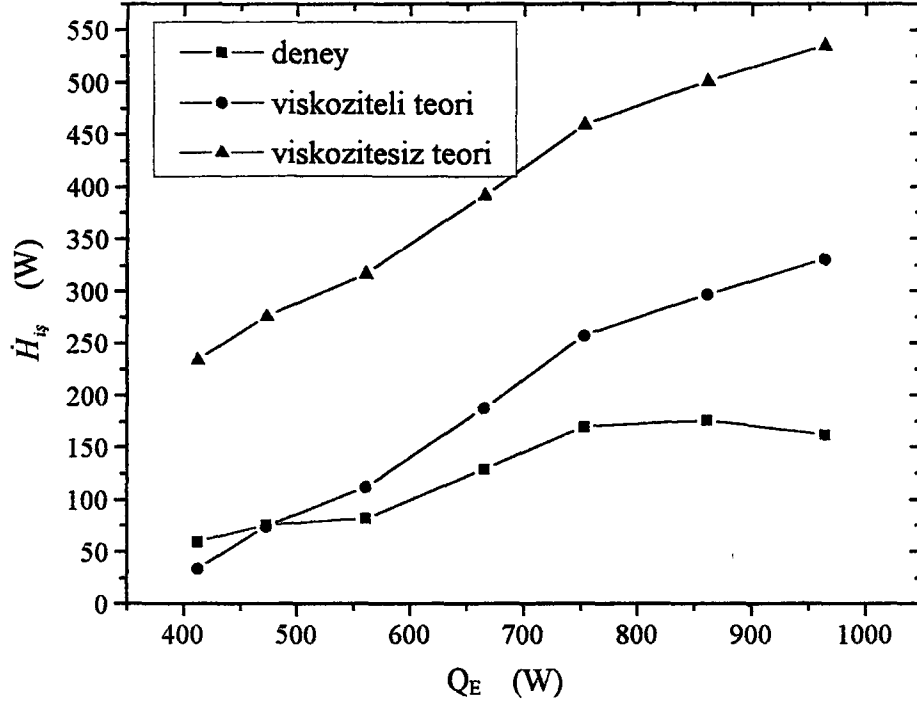


Şekil 6.18 Üretilen Akustik Gücün Uygulanan Isıya Oranının, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s

İş üreten yapı içinde termoakustik olarak taşınan ısının uygulanan ısıya göre değişimi, Şekil 6.19 ve 6.20’de gösterilmektedir. Akustik güç üretiminin henüz başladığı küçük ısı güçleri haricinde deney sonucu bulunan değerler, viskoziteli ve viskozitesiz modelin verdiği değerlerin altındadır. Uygulanan ısı arttıkça deney sonuçları ile viskoziteli modelin sonuçları arasındaki farkın büyümesi, iş üreten yapının sıcak ve soğuk uçlarının sıcaklıklarının doğrudan ölçülemeyişinden kaynaklanmaktadır. Deneylerde rezonatör dış yüzeyinden ölçülen sıcaklıklar kullanılarak, sıcak ve soğuk ısı değiştiricileri kuşatan rezonatör yüzeylerinden çıkış yapan boruların dış yüzey sıcaklıkları bulunmaktadır. Bu sıcaklıkların, iş üreten yapının sıcak ve soğuk uçlarının ortalama sıcaklıklarına eşit olacağı kabul edilmektedir. Gerçekte uç sıcaklıkları, sıcak taraf için bulunan sıcaklığın altında, soğuk taraf için bulunan sıcaklığın üzerindedir. Bu değerler kullanılarak hesaplanan iş üreten yapının sıcaklık gradyanı ile gerçek gradyan arasında fark olmaktadır. Büyük sıcaklık gradyanı durumunda plakalar ve akışkan içinde iletim yoluyla olan ısı kayıpları büyümekte, bunun sonucunda termoakustik olarak taşınan ısının değeri düşmektedir. İş üreten yapının her iki ucundan, plaka yüzeylerine monte edilmiş termokupllar kullanılarak sıcaklık ölçümleri yapılması durumunda, deney sonuçlarının viskoziteli model sonuçlarına yaklaşacağı tahmin edilmektedir.

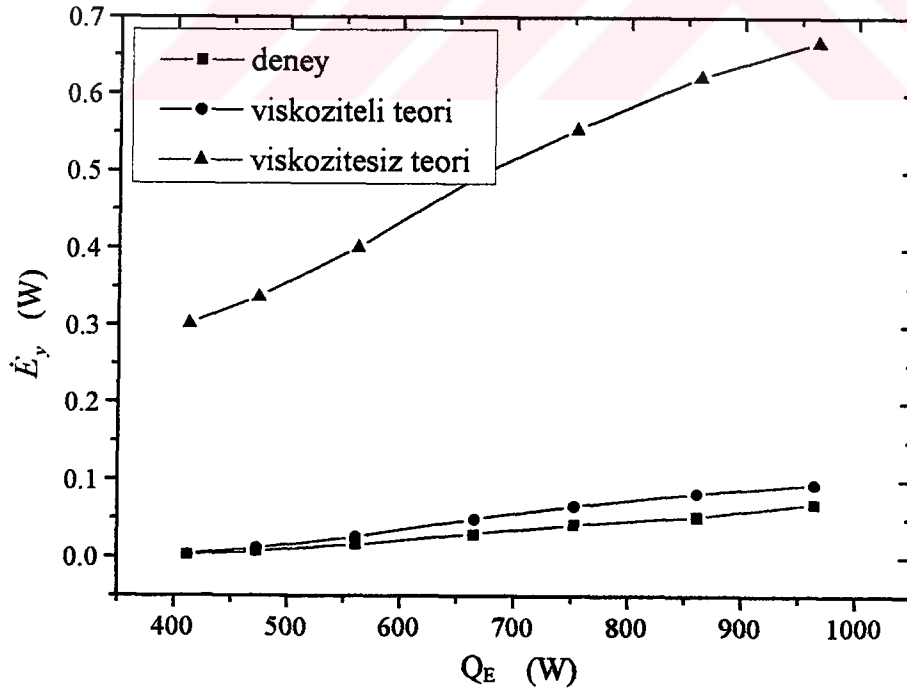


Şekil 6.19 İş Üreten Yapı İçinde Termoakustik Olarak Taşınan Isının, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s

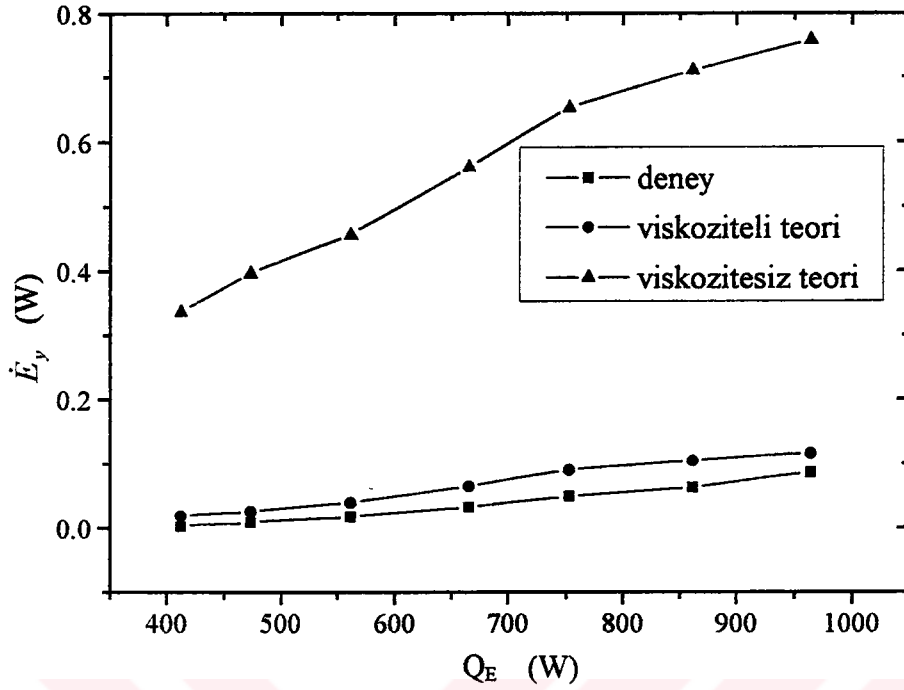


Şekil 6.20 İş Üreten Yapı İçinde Termoakustik Olarak Taşınan Isının, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s

Rezonatörün açık ucundan çevreye yayılan akustik gücün uygulanan elektrik enerjisi ile değişimi, iki değişik su debisi için Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de gösterilmiştir.



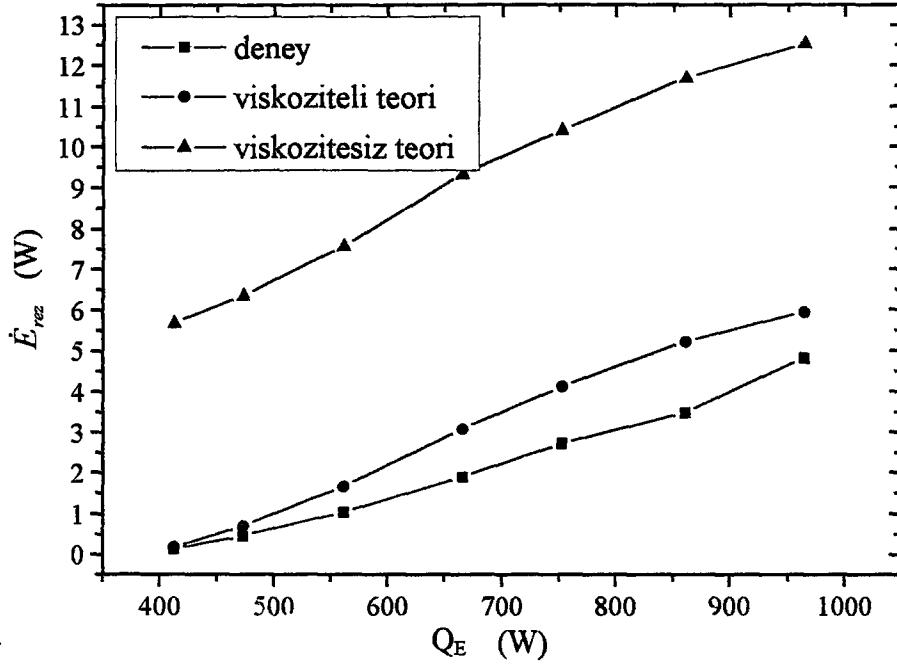
Şekil 6.21 Açık Uçtan Yayılan Akustik Gücün, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s



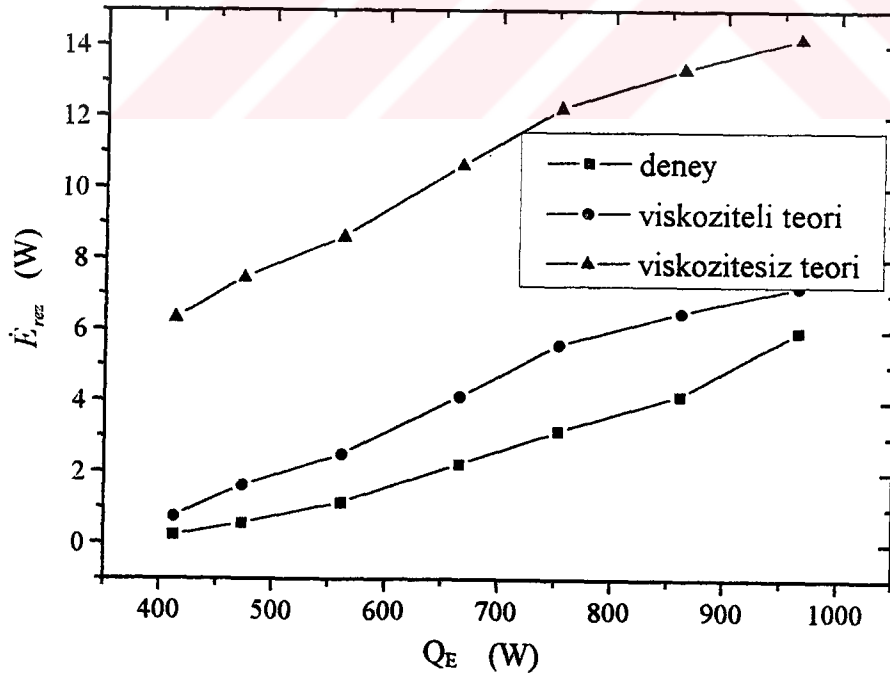
Şekil 6.22 Açık Uçtan Yayılan Akustik Gücün, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s

Viskoziteli modelin yüksek akustik basınç genliği vermesi nedeniyle, deneyler sonucu bulunan yayılan akustik güç değerleri, viskoziteli modelin biraz altında olmaktadır. Deney ve viskoziteli model sonuçları arasındaki en büyük fark, % 39'dur. Viskozitesiz model, yüksek akustik basınç genliğinden dolayı deney sonuçlarından daha büyük değerler vermektedir.

Rezonatör yüzeylerindeki akustik güç kaybının uygulanan ısı ile değişimi, Şekil 6.23 ve 6.24'de gösterilmektedir. Viskoziteli model, deney sonuçlarına göre % 45'e varan oranlarda daha büyük akustik güç kaybı vermektedir. Bunun nedeni, viskoziteli modelde akustik basınç genliği ile orantılı olarak akustik hız genliğinin de yüksek oluşudur. Akustik hız arttıkça rezonatör yüzeylerindeki akustik güç kayıpları da artmaktadır. Viskozitesiz modelde akustik hız genliği daha da arttığından, kayıplar daha büyük olmaktadır.

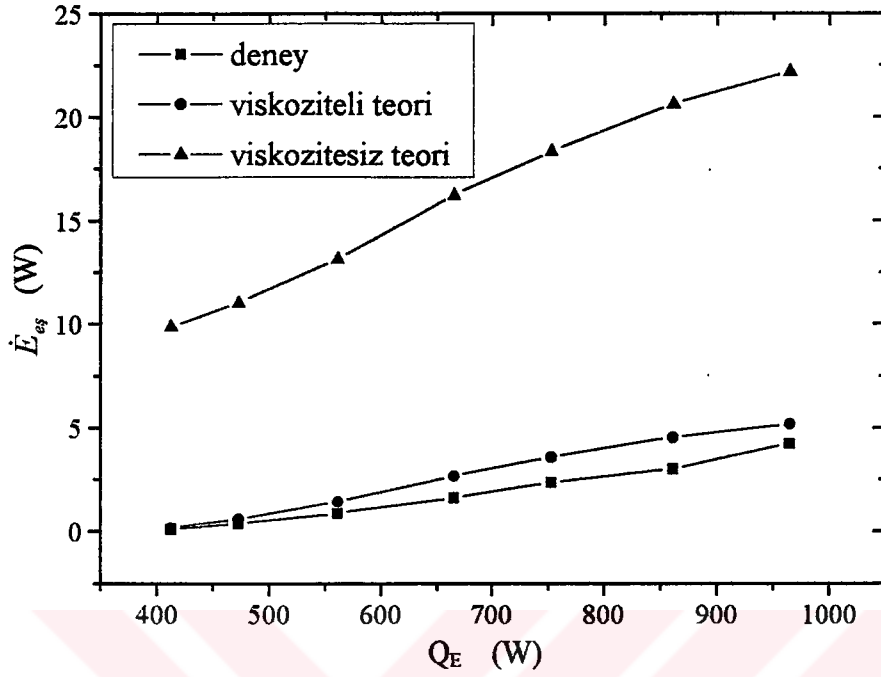


Şekil 6.23 Rezonatör Yüzeylerindeki Akustik Güç Kaybının, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s

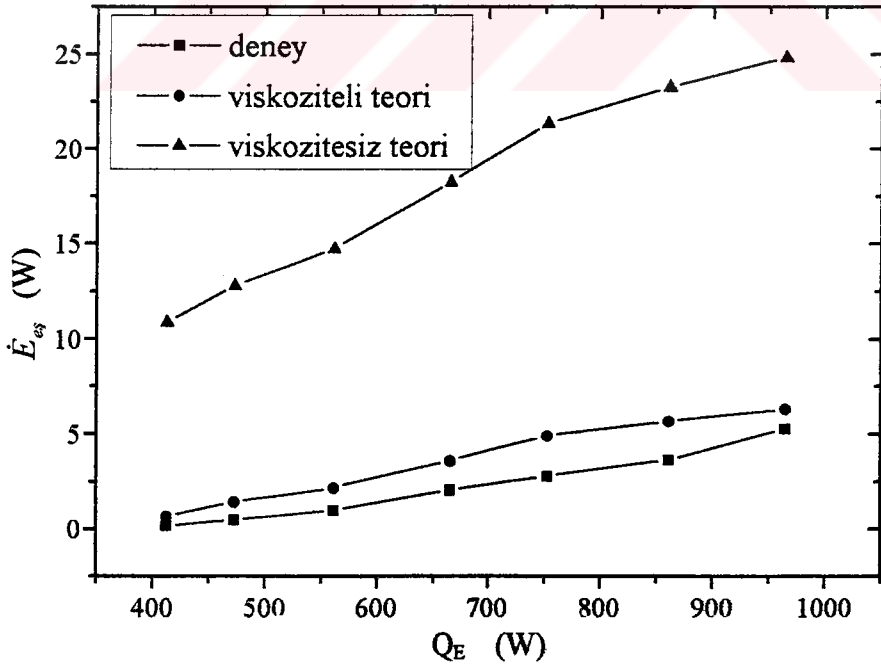


Şekil 6.24 Rezonatör Yüzeylerindeki Akustik Güç Kaybının, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s

Sıcak ve soğuk ısı değiştiricilerdeki toplam akustik güç kaybının uygulanan ısıya göre değişimi, Şekil 6.25 ve 6.26'da gösterilmiştir.



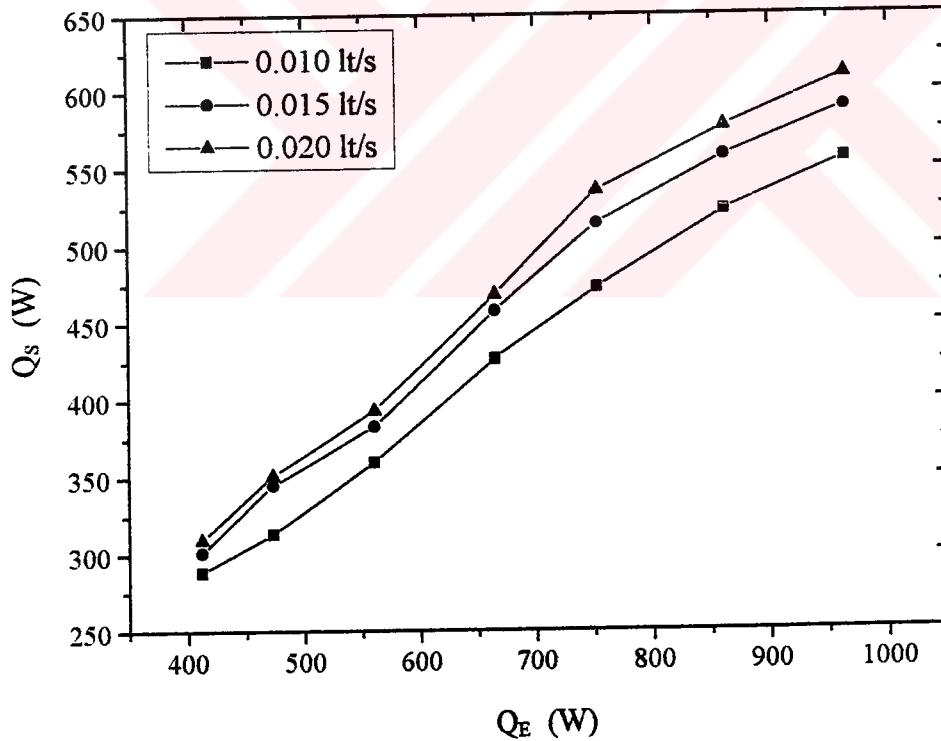
Şekil 6.25 Isı Değiştiricilerdeki Toplam Akustik Güç Kaybının, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s



Şekil 6.26 Isı Değiştiricilerdeki Toplam Akustik Güç Kaybının, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.020 lt/s

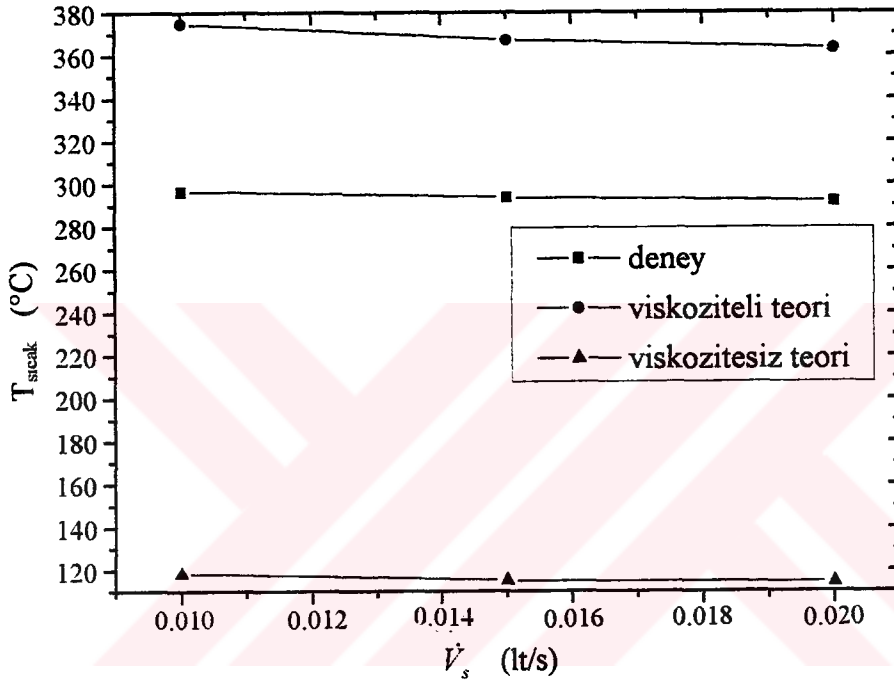
Deney sonuçları, düşük akustik basınç genliğinden dolayı viskoziteli model sonuçlarının biraz altındadır. İkisi arasındaki fark, en fazla % 39 olmaktadır. Viskozitesiz modelde akustik basınç ve hız genlikleri daha da arttığından, bu modelde eşanjörlerdeki akustik güç kayıpları daha yüksek olmaktadır.

Şekil 6.27'de, suya geçen ısı, iş üreten yapının sıcak ısı değiştiricisine uygulanan ısıya göre değişimi, üç ayrı su debisi için gösterilmiştir. Yüksek su debisi ile çalışıldığında, suya geçen ısı arttığı görülmektedir. Uygulanan ısı artırıldığında ise, çevreye olan ısı kayıpları nedeniyle suya geçen ısı yüzdesi azalmaktadır. Önceki diagramlardan, yüksek su debisi ile çalışıldığında akustik basınç genliği, termoakustik olarak taşınan ısı ve üretilen akustik güç değerlerinin arttığı anlaşılmıştı. Uygulanan ısı değerinin yüksek oluşu, üretilen akustik gücün uygulanan ısıya oranını da arttırmaktadır. Buradan, cihazın performansının yüksek olması için sıcak kısımlarının çok iyi yalıtılması, uygulanan ısı yüksek olması ve büyük su debisi ile çalıştırılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır.



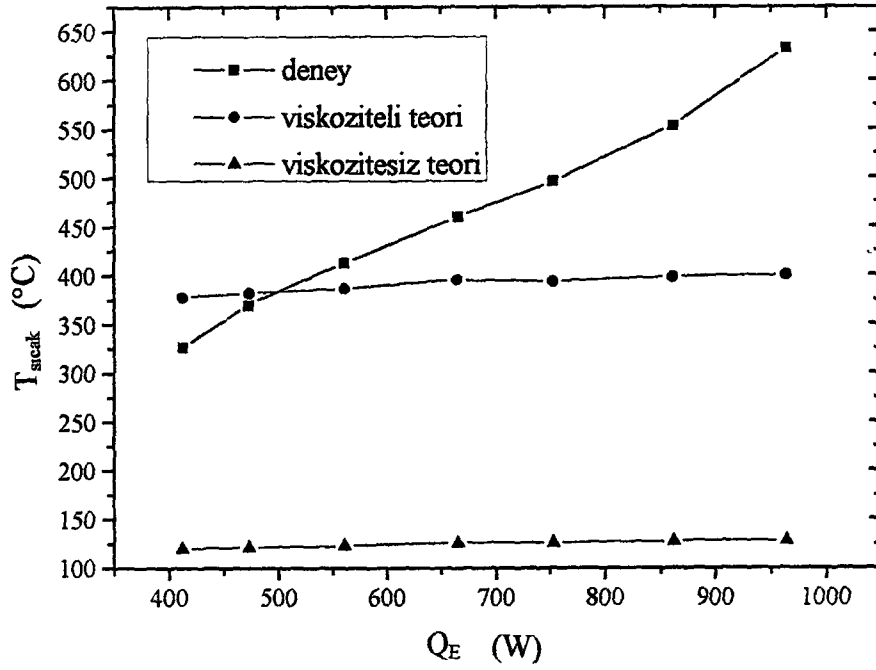
Şekil 6.27 Suya Geçen Isının, Uygulanan Isı ile Değişimi

Şekil 6.28’de, uygulanan ısı 412 W olması durumu için akustik güç üretiminin başladığı sıcak uç sıcaklığının, su debisine göre değişimi görülmektedir. Şu Deney sonucu bulunan sıcaklıklar, viskoziteli modelin verdiği sıcaklıklardan yaklaşık % 21 düşüktür. Aradaki fark, viskoziteli modelin sürekli rejim durumu için geçerli olmasından kaynaklanmaktadır. Akustik güç üretiminin başlama anında geçici rejim halinde olunması, viskoziteli model ile deney sonuçları arasında farka neden olmaktadır. Viskozitesiz model ise, akustik güç üretiminin başlayacağı sıcak uç sıcaklığı için daha küçük değerler bulmaktadır.



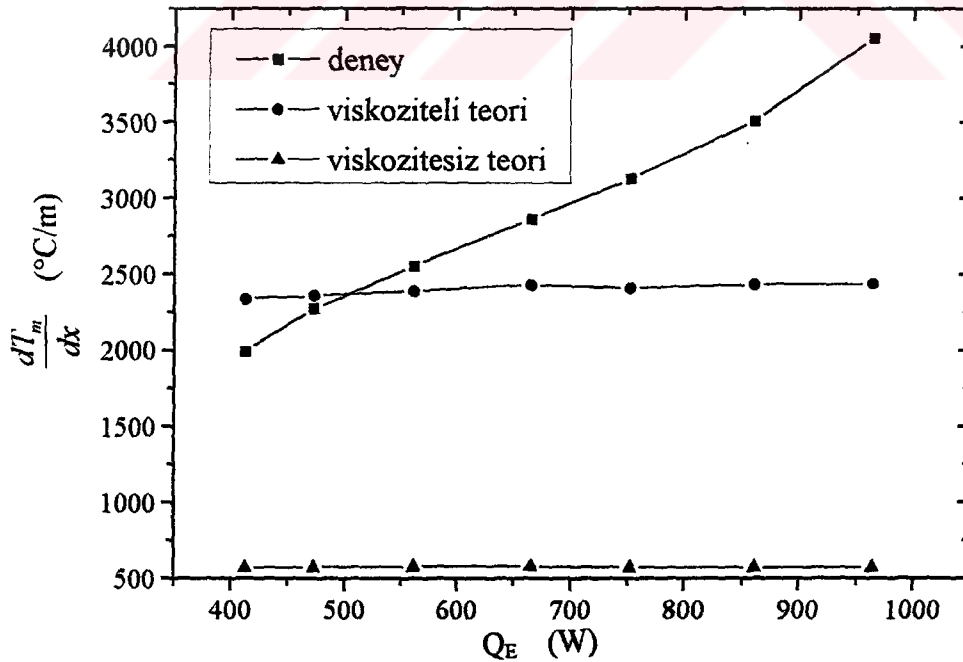
Şekil 6.28 Termoakustik Güç Üretiminin Başladığı Sıcak Uç Sıcaklığının, Soğutucu Su Debisine Göre Değişimi - Uygulanan Isı 412 W

İş üreten yapının sıcak uç sıcaklığının uygulanan ısıya göre değişimi, Şekil 6.29’da gösterilmiştir. Daha önce de belirtildiği şekilde iş üreten yapının uçlarındaki plaka sıcaklıklarının doğrudan ölçülemeyişi, deney sonuçları ile viskoziteli model sonuçları arasında farka neden olmaktadır. Bu sıcaklıkların termokupllar ile doğrudan ölçülmesi durumunda sıcak uç sıcaklığının, dolaylı olarak bulunan değer altında olacağı ve deney sonuçlarını gösteren eğrinin, viskoziteli model sonuçlarını gösteren eğriye paralel hale geleceği tahmin edilmektedir.



Şekil 6.29 İş Üreten Yapının Sıcak Uç Sıcaklığının, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s

Şekil 6.30'da, iş üreten yapıdaki sıcaklık gradyanının, iş üreten yapıya uygulanan ısı ile değişimi gösterilmektedir. Yukarıda bahsedilen nedenden dolayı, deney sonucu bulunan sıcaklık gradyanı ile viskoziteli model sonucu arasında, uygulanan ısı ile birlikte artan bir fark bulunmaktadır.



Şekil 6.30 İş Üreten Yapıdaki Sıcaklık Gradyanının, Uygulanan Isı ile Değişimi - Soğutucu Su Debisi 0.010 lt/s

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Termoakustik güç üretiminin, viskozitesiz ve viskoziteli akışkandan oluşan iki ayrı ortam türü için analizinin yapıldığı bu çalışmada, bir ucu açık rezonatörde termoakustik güç üretimi için modeller geliştirilmiştir. Modellerin sonuçlarını deney sonuçlarıyla karşılaştırarak geçerliliklerini araştırmak amacıyla, bir termoakustik güç üretici imal edilmiş ve parametre değerleri değiştirilerek çok sayıda deney yapılmıştır. Deney sonuçlarının, viskoziteli model sonuçlarıyla genellikle uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

Viskozitesiz ortamda termoakustik güç üretiminin analizinde elde edilen termoakustik olarak taşınan ısıyı ve bu esnada akustik olarak üretilen işi veren denklemler ile, literatürde de karşılaşılmaktadır. Bu nispeten basit analiz, termoakustik güç üretiminin ve termoakustik olarak ısı taşınmasının, rezonatör içinde bulunan belirli bir değerin üzerinde sıcaklık gradyanına sahip katı maddeleri çevreleyen akışkan içinde sıcaklık ve basınç salınımlarının aynı anda gerçekleşmeışinden kaynaklandığını ortaya çıkarmıştır.

Plakaların çok sayıda olduğu gerçeğinin kabul edilmesi ve akışkanın viskozitesinin dikkate alınması durumu için yapılan analizde elde edilen taşınan ısı ve üretilen akustik iş ifadelerinin, viskozitenin etkisini literatüre göre daha iyi dikkate aldıkları görülmüştür. Bu denklemler, viskozitenin sıfır kabul edilmesi durumunda, akışkan hızıyla ilgili bir terim dışında, daha önce yapılan viskozitesiz analizde bulunan denklemlere indirgenmektedir. Termoakustik güç üretimi ve termoakustik soğutma işlemleri aynı ilkelere göre gerçekleştiklerinden, geliştirilen taşınan ısı ve üretilen akustik iş ifadeleri termoakustik soğutmaya da uygulanabilecektir. Bu durumda taşınan ısı ifadesi, termoakustik olarak düşük sıcaklıktaki kaynaktan yüksek sıcaklıktaki ısı giderine pompalanan ısıyı, akustik iş ifadesi ise bu ısıyı pompalamak için kullanılan akustik işi verecektir.

Taşınan ısı ve üretilen akustik işi veren denklemlerden sayısal sonuçlar elde edebilmek için, bu denklemlerin aynı anda çözülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, akışkan olarak hava kullanan bir ucu açık rezonatörde üretilen akustik güç, kaybolan akustik güç ve rezonatörün açık ucundan çevreye yayılan akustik güç ifadelerinin bir denklem ile ifade edildiği bir model geliştirilmiştir. Model, belirli bir geometri ve malzeme özelliklerine sahip termoakustik güç üretici için, güç üretiminin gerçekleştiği sıcaklık gradyanı ile basınç antinodlarındaki akustik basınç genliğini belirlemektedir. Daha sonra bunları kullanarak, iş üreten yapı içindeki akışkan tarafından üretilen akustik gücü, termoakustik olarak taşınan ısıyı, rezonatör yüzeylerindeki akustik güç kaybını, ısı değiştiricilerdeki viskoz ve ısıl işlemlerden kaynaklanan akustik güç kaybı ile rezonatörün açık ucundan çevreye yayılan akustik gücü bulmaktadır. Model, viskoziteli ve viskozitesiz durumlar için iki ayrı bilgisayar programı haline getirilmiştir.

Geliştirilen model sonuçlarını deney sonuçlarıyla karşılaştırmak, böylece modellerin geçerliliğini görebilmek amacıyla, viskoziteli model için hazırlanan bilgisayar programı yardımıyla geometri ve boyutların belirlendiği bir termoakustik güç üretici imal edilmiştir. Deney cihazının akustik güç üreten yapısı, aralarında küçük boşluklar bulunan çok sayıda plakadan oluşmakta olup cihaz üzerinde akustik basınç genliği, debi, elektrik gücü ve çok noktadan sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde, güç üretici içinde 17.4 W'a kadar akustik güç üretimi yapıldığı belirlenmiştir.

Ölçülen akustik basınç genliği değerlerinin, viskoziteli model sonuçlarından bazen %20'ye ulaşan oranlarda daha küçük olduğu görülmüştür. Ses dalgalarının frekansı ise, viskoziteli modelden en fazla %2 büyük bulunmuştur. Viskozitesiz model ise, akustik basınç genliği için deney sonuçlarından 12 kata varan oranlarda büyük değerler vermektedir. Frekansı ise %8'e ulaşan oranlarda küçük bulunmaktadır.

Termoakustik güç üretiminin başladığı iş üreten yapının sıcak uç sıcaklığının ölçülen değerleri, viskoziteli model sonuçlarından °C biriminde %21 kadar küçük bulunmuştur. Viskozitesiz model ise, ölçülen sıcaklık değerlerinin yaklaşık 1/3'ünü vermektedir. Ancak uygulanan ısı arttığında, iş üreten yapının dolaylı olarak belirlenen uç sıcaklıkları, viskoziteli modelin verdiği sıcaklıkların üzerine çıkmaktadır.

Termoakustik güç üreten cihazların performanslarını belirleyen en önemli iki faktörün, akustik basınç genliği ve frekans olduğu, elde edilen akustik iş ve taşınan ısı denklemlerinden anlaşılmaktadır. Sıcaklıklar ise, plakaların sahip oldukları sıcaklık

gradyanı ile akışkanın ve plakaların termofiziksel özelliklerini belirlemektedir. Üretilen akustik iş ve termoakustik olarak taşınan ısının, akustik basınç genliği veya onunla orantılı olan akustik hız genliğinin karesi ile orantılı olarak değiştiği, Bölüm 4’de elde edilen ilgili ifadelerden anlaşılmaktadır. Bundan dolayı, viskoziteli modelin sıcaklıkları basınç genliği veya frekans kadar hassas belirlemeyişi, üretilen akustik güç ve termoakustik olarak taşınan ısının yeterince hassas olarak belirlenmesine engel olmamaktadır. Bu nedenle bu iki değişkenin viskoziteli model ve deney sonuçları yardımıyla bulunan değerleri, birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.

Termoakustik güç üretiminin verimi, üretilen akustik işin termoakustik olarak taşınan ısıya oranı olarak tanımlanır. Yapılan deneylerde verim, en fazla %13.3 olmaktadır. Diğer bir verim tanımı ise, üretilen akustik gücün uygulanan elektrik enerjisine oranı olarak yapılabilir. Bu türden verim ise, deneysel olarak %1.81 olarak bulunmuştur. Aynı şartlar altında viskoziteli model bu oranı %1.41, viskozitesiz model ise % 4.12 olarak belirlemektedir.

Deneyde, ısı değiştiricisi tarafından uygulanan ısı, rezonatör gövdesi ve plakalar içinden iletim yoluyla diğer ısı değiştiricisine geçmekte, bu ise termoakustik olarak taşınan ısının, uygulanan elektrik enerjisine göre çok küçük olmasına neden olmaktadır. Kullanılacak plaka malzemesinin ve rezonatörün ısı iletim katsayılarının çok küçük olması durumunda termoakustik olarak taşınan ısı artacak; bunun sonucunda üretilen akustik güç de yükselecektir. Ayrıca rezonatör dış yüzeyinin sıcak kısımları çok iyi yalıtılarak çevreye olan ısı kayıplarının azaltılması durumunda cihazın performansı yükselecektir.

Viskozitesiz modelin viskoziteli modele göre daha yüksek akustik güç değerleri vermesi, rezonatör içinde kullanılacak akışkanın önemini vurgulamaktadır. Termoakustik güç üreten cihazın her iki ucu da kapatılıp, içinde düşük viskoziteye sahip Helyum, Argon, v.b gibi bir gaz kullanılması durumunda, termoakustik güç üretimi daha az kayıpla gerçekleşecek ve performans yükselecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **SWIFT, G.** Thermoacoustic Engines, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 84, pp. 1145-1180, (1988)
- [2] **TACONIS, K., W.** Vapor - Liquid Equilibrium of Solutions of ^3He in ^4He , Physica, Vol.15, pp. 738-746, (1949)
- [3] **YAZAKI, T., TOMINAGA, A., NARAHARA, Y.** Experiments on Thermally Driven Acoustic Oscillations of Gaseous Helium, J. Low Temp. Phys., Vol 41, pp. 45- 52, (1980)
- [4] **FELDMAN, K., T.** Review of the Literature on Rijke Thermoacoustic Phenomena, Journal of Sound and Vibration, Vol 7, pp. 83-95, (1968)
- [5] **ROTT, N.** Damped and Thermally Driven Acoustic Oscillations in Wide and Narrow Tubes, Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP), Vol 20, pp. 230-243, (1969)
- [6] **ROTT, N.** Thermally Driven Acoustic Oscillations, Part II : Stability Limit for Helium, Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP), Vol 24, pp. 54-72, (1973)
- [7] **ROTT, N.** The Influence of Heat Conduction on Acoustic Streaming, Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP), Vol 25, pp. 417-421, (1974)
- [8] **ROTT, N.** The Heating Effect Connected with Non-Linear Oscillations in a Resonance Tube, Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP), Vol 25, pp. 619-634, (1974)
- [9] **ROTT, N.** Thermally Driven Acoustic Oscillations, Part III : Second Order Heat Flux, Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP), Vol 26, pp 43-49, (1975)
- [10] **ROTT, N., ZOULOULAS, G.** Thermally Driven Acoustic Oscillations, Part V : Gas - Liquid Oscillations, Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP), Vol 27, pp. 325-334, (1976)
- [11] **MÜLLER, U. A., ROTT, N.** Thermally Driven Acoustic Oscillations, Part VI : Excitation and Power, Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP), Vol 24, pp. 609-626, (1983)

- [12] **ROTT, N.** Thermoacoustic Heating at the Closed and of an Oscillating Gas Column, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 145, pp.1-9, (1984)
- [13] **MERKLI, P., THOMANN, H.** Thermoacoustic Effects in a Resonant Tube, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 70, pp. 161-177, (1975)
- [14] **MÜLLER, A., LANG, E.** Experimente Mit Thermisch Getriebenen Gas-Flüssigkeits-Schwingungen, *Z. Angew. Math. Phys.*, Vol 36 pp.358-360, (1985)
- [15] **GABRIELSON, T., B.** Radiation From a Submerged Thermoacoustic Source, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 90, pp. 2628-2636, (1991)
- [16] **SWIFT, G., W.** Analysis and Performance of a Large Thermoacoustic Engine, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 92, pp.1551-1563, (1992)
- [17] **WHEATLEY, J., C., HOFER, T., J., SWIFT, G., W., MIGLIORI, A.** An Intrinsically Irreversible Thermoacoustic Heat Engine, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 74, pp.153-170, (1983)
- [18] **WHEATLEY, J., C., HOFER, T., J., SWIFT, G., W., MIGLIORI, A.** Experiments with an Intrinsically Irreversible Acoustic Heat Engine, *Physical Review Letters*, Vol 50, pp. 499-502, (1983)
- [19] **WHEATLEY, J., C., HOFER, T., J., SWIFT, G., W., MIGLIORI, A.** Understanding Some Simple Phenomena in Thermoacoustics with Applications to Acoustical Heat Engines, *American Journal of Physics*, Vol 53, pp.147-162, (1985)
- [20] **HOFER, T., J.** Thermoacoustic Refrigerator Design and Performance, Ph.D. Dissertation, Physics Department, University of California at San Diego, (1986)
- [21] **GARRETT, S., L., ADEFF, J., A., HOFER, T., J.** Thermoacoustic Refrigerator For Space Applications, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 595-599, (1993)
- [22] **GARRETT, S., L.** Thermoacoustic Life Sciences Refrigerator, NASA Technical Report No.LS-10114, Johnson Space Center, Space and Life Sciences Directorate, Houston, Texas, (1991)
- [23] **GARRETT, S. L., HOFER, T., J.** Thermoacoustic Refrigeration, *ASHRAE Journal*, pp. 28-36, December (1992)

- [24] **HOŞÖZ, M., ÖZGÜÇ, A., F.** Termoakustik Soğutmanın Viskozite İhmal Edilerek Modellenmesi, Üçüncü Ulusal Soğutma ve İklimlendirme Kongresi, pp. 61-74, Çukurova Üniversitesi, Adana, (1994)
- [25] **SWIFT, G., W., MIGLIORI, A., HOFER, T., J., WHEATLEY, J., C.** Theory and Calculations for an Intrinsically Irreversible Prime Mover Using Liquid Sodium as Primary Working Fluid, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 78, pp. 767-781, (1985)
- [26] **ATCHLEY, A., A., BASS, H., E., HOFER, T., J., LIN, H., T.** Study of a Thermoacoustic Prime Mover Below Onset of Self Oscillation, Journal of the Acoustical Society of America, Vol 91, pp. 734-743, (1992)
- [27] **SWIFT, G., KEOLIAN, R.** Thermoacoustics in Pin - Array Stacks, Journal of the Acoustical Society of America, Vol 94, pp. 941-943, (1993)
- [28] **HUANG, Y., BAU, H.** Thermoacoustic Waves in a Confined Medium, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 40, pp. 407-419, (1997)
- [29] **BÜYÜKTÜRK, A., R.** Termodinamik Cilt 2 - Uygulama Esasları, Uludağ Üniversitesi Basımevi, (1985)
- [30] **KINSLER, E., L., FREY, A., R., COPPENS, A., B., SANDERS, J., V.** Fundamentals of Acoustics, John Wiley and Sons, (1982)
- [31] **İDEMEN, M.** Kompleks Değişkenli Fonksiyonlar Teorisi, İTÜ Basımevi, (1992)

EK A ARALARINDA FAZ FARKI BULUNAN DEĞİŞKENLERİN ÇARPIMI

Aralarında faz farkı bulunan değişkenlerin çarpımı kuralını açıklayabilmek için, uçlarına,

$$V(t) = V_A \cos(\omega t + \phi_V) \quad (\text{A.1})$$

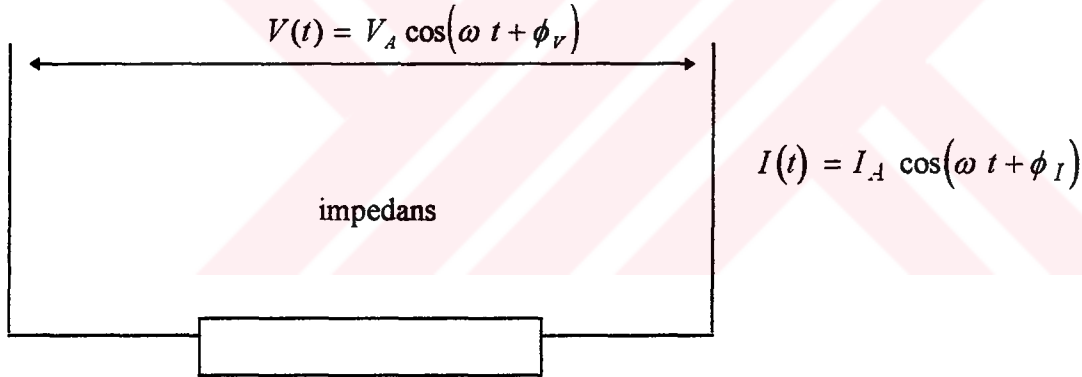
şeklinde zaman içinde değişen bir voltaj uygulanan bir impedans göz önüne alınsın. Burada impedans, seri bağlı bir rezistans ve kapasitörden oluşabileceği gibi seri bağlı rezistans ve indüktansdan (bobinden) de oluşabilir. Yukarıdaki denklemde,

V_A : voltaj genliği

ω : açısal frekans

t : zaman

ϕ_V : voltaj faz açısı anlamındadır.



Şekil A.1 Alternatif Akım Devresine Bağlanan İmpedans

İmpedansın tamamen rezistif olmaması nedeniyle impedans üzerinden geçen akım, voltaj ile aynı anda gelişmeyecek olup, akımın zamana bağlı olan değeri

$$I(t) = I_A \cos(\omega t + \phi_I) \quad (\text{A.2})$$

denklemini ile ifade edilebilir. Burada,

I_A : akım genliği

ϕ_I : akım faz açısı

anlamındadır.

İmpedans tarafından harcanan aktif güç ise,

$$\overline{I(t)V(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t)V(t)dt \quad (\text{A.3})$$

ifadesinden bulunabilir. Burada T, voltaj ve akımın periyodudur. Denklem (A.1) ve (A.2)'ye

$$\cos(x+y) = \cos x \cos y - \sin x \sin y \quad (\text{A.4})$$

bağıntısı uygulanırsa,

$$\overline{I(t)V(t)} = f \int_0^{1/f} I_A V_A (\cos \phi_I \cos \omega t - \sin \phi_I \sin \omega t) (\cos \phi_V \cos \omega t - \sin \phi_V \sin \omega t) dt \quad (\text{A.5})$$

ifadesine ulaşılır. İntegrasyon işlemi yapıldığında,

$$\overline{I(t)V(t)} = \frac{1}{2} I_A V_A (\cos \phi_I \cos \phi_V + \sin \phi_I \sin \phi_V) \quad (\text{A.6})$$

denklemini elde edilir.

$$\cos(x-y) = \cos x \cos y + \sin x \sin y \quad (\text{A.7})$$

bağıntısı yardımıyla,

$$\overline{I(t)V(t)} = \frac{1}{2} I_A V_A \cos(\phi_I - \phi_V) \quad (\text{A.8})$$

sonucuna ulaşılır.

Aynı sonucu kompleks notasyon ile veren ifadeyi bulabilmek için, impedans uçlarındaki voltaj ve üzerinden geçen akımı veren eşitliklerin kompleks notasyondaki eşdeğerleri, Denklem (2.32) yardımıyla aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I(t) = I_A \exp[i(\omega t + \phi_I)] = I_A [\cos(\omega t + \phi_I) + i \sin(\omega t + \phi_I)] \quad (\text{A.9})$$

$$V(t) = V_A \exp[i(\omega t + \phi_V)] = V_A [\cos(\omega t + \phi_V) + i \sin(\omega t + \phi_V)] \quad (\text{A.10})$$

Akım ve voltajın $t = 0$ anındaki değerleri ise,

$$I(t=0) = I_A \exp(i\phi_I) = I_A [\cos \phi_I + i \sin \phi_I] \quad (\text{A.11})$$

$$V(t=0) = V_A \exp(i\phi_V) = V_A [\cos \phi_V + i \sin \phi_V] \quad (\text{A.12})$$

olacaktır. Son ifadenin eşleniği ise,

$$\tilde{V}(t=0) = V_A [\cos \phi_V - i \sin \phi_V] \quad (\text{A.13})$$

olarak bulunur. Denklem (A.11) ile (A.13)'ün çarpımından,

$$[I \tilde{V}]_{t=0} = I_A V_A [\cos \phi_I + i \sin \phi_I] [\cos \phi_V - i \sin \phi_V] \quad (\text{A.14})$$

denklemini elde edilir. Buradaki çarpım işlemleri yapılır ve sonucun reel kısmı dikkate alınır,

$$\text{Re}[I \tilde{V}]_{t=0} = I_A V_A [\cos \phi_I \cos \phi_V + \sin \phi_I \sin \phi_V] \quad (\text{A.15})$$

ifadesine ulaşılır. Denklem (A.7) yardımıyla,

$$\frac{1}{2} \text{Re}[I \tilde{V}]_{t=0} = \frac{1}{2} I_A V_A \cos(\phi_I - \phi_V) \quad (\text{A.16})$$

sonucu elde edilir. Denklem (A.16)'nın sağ tarafının, impedansın aktif gücünü veren Denklem (A.8)'e eşit olduğu görülmektedir. Bu durumda impedans tarafından harcanan aktif güç,

$$\overline{I(t) V(t)} = \frac{1}{2} \text{Re}[I \tilde{V}]_{t=0} \quad (\text{A.17})$$

denkleminde bulunabilir. Bu kural, elektrik devrelerinde kullanılacağı gibi, değişkenleri arasında faz farkı bulunan akustik biliminde de kullanılmaktadır.

EK B VİSKOZİTELİ ORTAMDA TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİM

MODELİNİN PROGRAM LİSTESİ

```
REM BU PROGRAM, BASİTLESTİRİLMİŞ ENERJİ AKISI VE İS
REM DENKLEMLERİNİ KULLANARAK, HAVA İLE ÇALIŞAN TERMOAKUSTİK
REM GÜÇ ÜRETECİNİN PERFORMANSINI BELİRLİYEN HESAPLAMALAR
REM YAPMAKTADIR. PROGRAM VİSKOZİTELİ HAL İÇİN GEÇERLİ OLUP,
REM REZONATOR İÇİNDEKİ ORTALAMA MUTLAK BASINÇIN 1 BAR
REM OLDUĞU KABUL EDİLMEKTEDİR. AYRICA REZONATORUN BİR UCUNUN
REM KAPALI, DİĞER UCUNUN İSE ATMOSFERE AÇIK OLDUĞU VE
REM REZONATOR KESİTİNİN DİKDÖRTGEN OLDUĞU KABUL
REM EDİLMEKTEDİR. PLAKA VE REZONATOR MALZEMESİ OLARAK
REM YUMUŞAK ÇELİK GÖZ ÖNÜNE ALINMIŞTIR.
REM PROGRAM, GÜÇ ÜRETECİNİN BOYUTLARINI, GEOMETRİK
REM ÖLÇÜLERİNİ, SUYUN SOĞUK ESANJÖRE GİRİŞ VE ÇIKIŞ
REM SICAKLIKLARINI, SU DEBİSİNİ VE İS ÜRETEYİNİN SICAK
REM ESANJÖRÜNE DİŞARIDAN UYGULANAN İŞİYİ SORMAKTADIR.
REM BU ŞARTLAR İÇİN İS ÜRETİMİNİN GERÇEKLEŞTİĞİ SICAK
REM ESANJÖR PLAKALARININ SICAKLIĞINI, BASINÇ ANTI-NÖDÜNDKİ
REM AKUSTİK BASINÇ GENLİĞİNİ HESAPLAMAKTA, İS ÜRETEYİNİN YAPİ
REM İÇİNDE TERMOAKUSTİK OLARAK TAŞINAN İŞİ İLE ÜRETİLEN
REM AKUSTİK İŞİ BELİRLİYMEKTEDİR. AYRICA SOĞUK ESANJÖR
REM PLAKALARININ SICAKLIĞI, OLUSAN SES DALGALARININ FREKANSI,
REM REZONATORUN AÇIK UCUNDAN ÇEVREYE YAYILAN AKUSTİK GÜÇ,
REM ESANJÖRLERDEKİ VE REZONATOR YÜZEYLERİNDEKİ
REM AKUSTİK GÜÇ KAYIPLARI DA BULUNMAKTADIR.
REM PROGRAM, İDEAL ESANJÖR UZUNLUKLARINI İKİ ESANJÖR İÇİN
REM AYRI AYRI HESAPLAMAKTA, NONLINEERLİĞİN YA DA TURBÜLANSIN
REM OLMASI DURUMUNDA UYARIDA BULUNMAKTADIR.
PRINT "REZONATOR UZUNLUĞUNU M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT L
PRINT "REZONATORUN DİŞ GENİŞLİĞİNİ M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT ADİŞ
PRINT "REZONATORUN DİŞ YÜKSEKLİĞİNİ M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT BDİŞ
PRINT "REZONATOR GÖVDESİNİN ET KALINLIĞINI MM OLARAK GİRİNİZ"
INPUT RKAL
PRINT "İS ÜRETEYİNİN PLAKA KALINLIĞINI MM OLARAK GİRİNİZ"
INPUT PKAL
PRINT "İS ÜRETEYİNİN PLAKA SAYISINI GİRİNİZ"
INPUT NPİŞ
PRINT "İS ÜRETEYİNİN YÜKSEKLİĞİNİ MM OLARAK GİRİNİZ"
INPUT YİŞ
PRINT "İS ÜRETEYİNİN BİTİMİ İLE KAPALI UC ARASINDAKİ"
PRINT "MESAFİYİ M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT LBOS1
PRINT "İS ÜRETEYİNİN ESANJÖRLER DAHİL OLACAK ŞEKİLDE"
PRINT "UZUNLUĞUNU M BİRİMİNDEN GİRİNİZ"
INPUT LPİŞ
```

```

PRINT "SICAK ESANJORUN UZUNLUGUNU M BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT DLSIIS
PRINT "SOGUK ESANJORUN UZUNLUGUNU M BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT DLISOIS
PRINT "IS URETEY YAPININ EFEKTIF PLAKA GENISLIGINI M OLARAK"
PRINT "GIRINIZ "
INPUT EY
PRINT "SUYUN ESANJORE GIRIS SICAKLIGINI C BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT TSUG
PRINT "SUYUN ESANJORDEN CIKIS SICAKLIGINI GIRINIZ"
INPUT TSUC
PRINT "CEVRE SICAKLIGINI GIRINIZ"
INPUT TCEV
PRINT "SOGUK ESANJOR PLAKALARININ ICINDEN DIKEY OLARAK GECEN"
PRINT "BORULARIN SAYISINI GIRINIZ"
INPUT NB
PRINT "BU BORULARIN DIS CAPINI MM OLARAK GIRINIZ"
INPUT DDIS
PRINT "BU BORULARIN IC CAPINI MM OLARAK GIRINIZ"
INPUT DIC
PRINT "IS URETEY YAPININ SICAK ESANJORUNE UYGULANAN ELEKTRIK"
PRINT " GUCUNU W BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT QEL
PRINT "SOGUK ESANJORDEN GECEN SU DEBISINI G/S OLARAK GIRINIZ"
INPUT MSU
PKAL = PKAL / 1000
YIS = YIS / 1000
RKAL = RKAL / 1000
Y02IS = (YIS - NPIS * PKAL) / (NPIS - 1)
Y0IS = Y02IS / 2
B = PKAL / 2
AIC = ADIS - 2 * RKAL
BIC = BDIS - 2 * RKAL
TSU = TSUG + 273.15
PI = 3.1415927#
K = 1.4
RGAZ = 287
KSU = .628
KB = 384
PRSU = 1.512
VISSU = 6.58E-07
YOGSU = 1000
CPSU = 4180
DDIS = DDIS / 1000
DIC = DIC / 1000
MSU = MSU / 1000
QSU = MSU * CPSU * (TSUC - TSUG)
AINT = PI * DIC ^ 2 / 4
VORT = MSU / (YOGSU * AINT)
RE = VORT * DIC / VISSU
HIC = .023 * RE ^ .8 * PRSU ^ (1 / 3) * KSU / DIC
LT = NB * ADIS
KES1 = PI * DIC * LT
KES2 = 1 / HIC + DIC / (2 * KB) * LOG(DDIS / DIC)
DTM = QSU * KES2 / KES1

```

```

KES3 = 2.7183 ^ ((TSUC - TSUG) / DTM)
TBR = (TSUG - KES3 * TSUC) / (1 - KES3)
TSIIS = 400
LKAL = L - (LBOS1 + LPIS)
10 TMIS = (TSIIS + TBR + 273.15) / 2
TMORT = (TSIIS * LBOS1 + TMIS * LPIS + (TCEV + 273.15)
* LKAL) / L
C = SQR(K * RGAZ * TMORT)
CIS = SQR(K * RGAZ * TMIS)
LAMB = 4 * L
F = C / LAMB
OMEGA = 2 * PI * F
CCEL = 460
YOGCEL = 7884
KCELIS = 45 - .03152 * (TMIS - 273.15)
KCELORT = 45 - .03152 * (TMORT - 273.15)
SCELIS = SQR(KCELIS * YOGCEL * CCEL)
SCELORT = SQR(KCELORT * YOGCEL * CCEL)
BETAIS = 1 / TMIS
YOGIS = 100000 / (RGAZ * TMIS)
YOGORT = 100000 / (RGAZ * TMORT)
CPIS = 1068.11177# - .49271 * TMIS + .00117 * TMIS ^ 2
- 7.38E-07 * TMIS ^ 3 + 1.362E-10 * TMIS ^ 4
CPORT = 1068.11177# - .49271 * TMORT + .00117 * TMORT ^ 2
- 7.38E-07 * TMORT ^ 3 + 1.362E-10 * TMORT ^ 4
MVISIS = -3.598E-07 + 8.129E-08 * TMIS - 7.707E-11 * TMIS ^ 2
+ 5.726E-14 * TMIS ^ 3 - 1.872E-17 * TMIS ^ 4
MVISORT = -3.598E-07 + 8.129E-08 * TMORT
- 7.707E-11 * TMORT ^ 2 + 5.726E-14 * TMORT ^ 3
- 1.872E-17 * TMORT ^ 4
VISIS = MVISIS / YOGIS
VISORT = MVISORT / YOGORT
KIS = .0001273 + 9.715E-05 * TMIS - 3.157E-08 * TMIS ^ 2
- 8.959E-12 * TMIS ^ 3 + 1.135E-14 * TMIS ^ 4
KORT = .0001273 + 9.715E-05 * TMORT - 3.157E-08 * TMORT ^ 2
- 8.959E-12 * TMORT ^ 3 + 1.135E-14 * TMORT ^ 4
ALFIS = KIS / (YOGIS * CPIS)
ALFORT = KORT / (YOGORT * CPORT)
LMIS = L - (LBOS1 + LPIS / 2)
LPISG = LPIS - (DLSIIS + DLISOIS)
ASIIS = EY * DLSIIS * NPIS * 2
ASOIS = EY * DLISOIS * NPIS * 2
LSIIS = L - (LBOS1 + DLSIIS / 2)
LSOIS = L - (LBOS1 + LPIS) + DLISOIS / 2
DALFIS = SQR(2 * ALFIS / OMEGA)
DALFORT = SQR(2 * ALFORT / OMEGA)
DVISIS = SQR(2 * VISIS / OMEGA)
DVISORT = SQR(2 * VISORT / OMEGA)
EPAIS = SQR(KIS * YOGIS * CPIS)
EPAORT = SQR(KORT * YOGORT * CPORT)
EPSIS = EPAIS / SCELIS
EPSORT = EPAORT / SCELORT
REZA = (AIC + BIC) * OMEGA * L / (4 * YOGORT * C ^ 2)
REZB1 = DALFORT * (K - 1) / (1 + EPSORT)
REZB2 = 1 + AIC * BIC / ((AIC + BIC) * L)

```

```

REZB = REZB1 * REZB2 + DVISORT
EREZ = REZA * REZB
SBA1 = DALFIS * (K - 1) * OMEGA / (4 * YOGIS * CIS ^ 2
* (1 + EPSIS))
SBA2 = (SIN(LSIIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
SBA3A = DVISIS * OMEGA * (1 + B / YOIS) ^ 2
* (1 - DVISIS / (2 * YOIS)) ^ 2
SBA3B = 4 * YOGIS * CIS ^ 2
SBA3 = SBA3A / SBA3B
SBA4 = (COS(LSIIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
SBA = SBA1 * SBA2 + SBA3 * SBA4
ESSAB1 = SBA * ASIIS
SBB1 = DALFIS * (K - 1) * OMEGA / (4 * YOGIS * CIS ^ 2
* (1 + EPSIS))
SBB2 = (SIN(LSOIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
SBB3A = DVISIS * OMEGA * (1 + B / YOIS) ^ 2
* (1 - DVISIS / (2 * YOIS)) ^ 2
SBB3B = 4 * YOGIS * CIS ^ 2
SBB3 = SBB3A / SBB3B
SBB4 = (COS(LSOIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
SBB = SBB1 * SBB2 + SBB3 * SBB4
ESSAB2 = SBB * ASOIS
PRIS = VISIS / ALFIS
TA = NPIS * EY * DALFIS * LPISG / 2
TB = (SIN(LMIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2 * BETAIS * OMEGA
TC = YOGIS * CPIS
TD = 1 - DVISIS / YOIS + DVISIS ^ 2 / (2 * YOIS ^ 2)
TE = TB / (TC * TD)
TF = CPIS * (1 + B / YOIS) * (1 - DVISIS / (2 * YOIS))
TG = OMEGA * CIS * TAN(LMIS * 2 * PI / LAMB)
TH = TF / TG
TI = 1 + EPSIS * SQR(PRIS) - (1 + EPSIS) * PRIS ^ (3 / 2)
TJ = (1 + EPSIS) * (1 - PRIS)
TK = TI / TJ - SQR(PRIS)
TL = TE * TH * TK
TM = TB / (TC * (1 + EPSIS))
TN = OMEGA * SQR(PRIS) * (1 + B / YOIS) ^ 2
* (COS(LMIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
* (1 - DVISIS / (2 * YOIS)) ^ 2
TP = TN / (CIS ^ 2 * YOGIS * TD)
ERAD = OMEGA ^ 2 * AIC ^ 2 * BIC ^ 2
/ (8 * PI * YOGORT * C ^ 3)
SABTA = EREZ + ESSAB1 + ESSAB2 + ERAD
SABTB = SABTA / TA + TM + TP
GTMIS = SABTB / TL
FIISA = GTMIS * CPIS * (1 + B / YOIS)
* (1 - DVISIS / (2 * YOIS))
FIISB = OMEGA * CIS * TAN(LMIS * 2 * PI / LAMB)
FIIS = FIISA / FIISB
TSIY = GTMIS * LPISG + TBR + 273.15
DTIS = TSIY - TSIIS
TSIIS = TSIY
IF DTIS > .1 OR DTIS < -.1 THEN 10
J1 = EY * NPIS * DALFIS / 2
J2 = (1 + B / YOIS) * (1 - DVISIS / (2 * YOIS))
/ (YOGIS * CIS)

```

```

J3 = SIN(LMIS * 2 * PI / LAMB)
J4 = COS(LMIS * 2 * PI / LAMB)
J5 = (PRIS - 1) * (1 + EPSIS)
J6 = J1 * J2 * J3 * J4 / (J5 * TD)
J7 = SQR(PRIS) * (1 - 3 * PRIS / 2) * (1 + EPSIS)
J8 = 1 + EPSIS * SQR(PRIS)
J9 = (SQR(PRIS) - 1) / (PRIS - 1)
J10 = J8 * J9
J11 = FIIS * (J7 + J10)
J12 = J11 + SQR(PRIS) - 1
J13 = NPIS * 2 * EY
J14 = KIS * Y0 + KCE LIS * B
J15 = J13 * J14 * GTMIS
J16A = ADIS * BDIS - AIC * BIC
J16 = J16A * KCE LIS * GTMIS
PAK = (-QSU + J15 + J16) / (J6 * J12)
PA = SQR(PAK)
HIS = -QSU + J15 + J16
WIS = TA * (TL * GTMIS - TM - TP) * PA ^ 2
ERAD = ERAD * PA ^ 2
EREZ = EREZ * PA ^ 2
ESKAY1 = ESSAB1 * PA ^ 2
ESKAY2 = ESSAB2 * PA ^ 2
ETAEL = WIS / QEL
ETAT = WIS / HIS
ETAY = ERAD / QEL
ETAYT = ERAD / HIS
LPRINT "DATA DEGERLERI"
LPRINT "-----"
LPRINT
LPRINT "UYGULANAN ELEKTRIKSEL GUC="; QEL; "W"
LPRINT "SUYA GECEN ISI="; QSU; "W"
LPRINT "SU DEBISI="; MSU * 1000; " G / S "
LPRINT "SUYUN GIRIS SICAKLIGI="; TSUG; "C"
LPRINT "SUYUN CIKIS SICAKLIGI="; TSUC; "C"
LPRINT "ORTAM SICAKLIGI="; TCEV; "C"
LPRINT "REZONATOR UZUNLUGU="; L; "M"
LPRINT "REZONATOR DIS GENISLIGI="; ADIS; "M"
LPRINT "REZONATOR DIS YUKSEKLIGI="; BDIS; "M"
LPRINT "IS URE TEN YAPIDAKI PLAKA SAYISI="; NPIS
LPRINT "PLAKA KALINLIGI="; PKAL * 1000; "MM"
LPRINT "REZANATOR MALZEMESININ KALINLIGI="; RKAL * 1000; "MM"
LPRINT "PLAKALAR ARASINDAKI MESAFE="; YOIS * 1000; "MM"
LPRINT "REZONATORUN KAPALI UCU ILE IS URE TEN YAPI ARASINDAKI"
LPRINT "MESAFE="; LBOS1; "M"
LPRINT "IS URE TEN YAPININ UZUNLUGU="; LPIS; "M"
LPRINT "SICAK ESANJORUN UZUNLUGU="; DLSIIS; "M"
LPRINT "SOGUK ESANJORUN UZUNLUGU="; DLISOIS; "M"
LPRINT "SOGUK ESANJOR BORULARININ"
LPRINT "DIS CAPI="; DDIS * 1000; "MM"
LPRINT "SOGUK ESANJOR BORULARININ"
LPRINT "IC CAPI="; DIC * 1000; "MM"
LPRINT "ESANJOR BORULARININ SAYISI="; NB; "ADET"
LPRINT
LPRINT "SUREKLI REJIM HALINDEKI DEGERLER"

```



```

LPRINT "-----"
LPRINT
LPRINT "PLAKALARIN SICAK UC SICAKLIGI="; TSIIS - 273.15; "C"
LPRINT "KAPALI UCTAKI AKUSTIK BASINC GENLIGI="; PA; "Pa"
LPRINT "PLAKALARIN SOGUK UC SICAKLIGI="; TBR; "C"
LPRINT "SES DALGALARININ FREKANSI="; F; "Hz"
LPRINT "TERMOAKUSTIK OLARAK TASINAN ISI="; HIS; "W"
LPRINT "TERMOAKUSTIK OLARAK URETILEN GUC="; WIS; "W"
LPRINT "IS URETEYEN YAPIDAKI SICAKLIK GRADYANI="; GTMIS; "C/M"
LPRINT "IS URETIMININ GERCEKLESTIGI SICAKLIK GRADYANININ"
LPRINT "KRITIK SICAKLIK GRADYANINA ORANI="; FIIS
LPRINT "ACIK REZONATOR UCUNDAN CEVREYE YAYILAN"
LPRINT "AKUSTIK GUC = "; ERAD
LPRINT "REZONATOR YUZEYLERINDEKI TOPLAM"
LPRINT "AKUSTIK GUC KAYBI="; EREZ; "W"
LPRINT "SICAK ESANJORDEKI AKUSTIK GUC KAYBI="; ESKAY1; "W"
LPRINT "SOGUK ESANJORDEKI AKUSTIK GUC KAYBI="; ESKAY2; "W"
LPRINT "URETILEN AKUSTIK GUCUN UYGULANAN"
LPRINT "ELEKTRIK GUCUNE ORANI="; ETAEL
LPRINT "URETILEN AKUSTIK ISIN TERMOAKUSTIK OLARAK"
LPRINT "TASINAN ISIYA ORANI ="; ETAT
LPRINT "ACIK UCTAN YAYILAN AKUSTIK GUCUN, UYGULANAN ELEKTRIK"
LPRINT "GUCUNE ORANI="; ETAY
LPRINT "ACIK UCTAN YAYILAN AKUSTIK GUCUN,TERMOAKUSTIK OLARAK"
LPRINT "TASINAN ISIYA ORANI="; ETAYT
U1SIIS = (1 + B / Y0IS) * PA * COS(LSIIS * 2 * PI / LAMB)
/ (YOGIS * CIS) * (1 - DVISIS / (2 * Y0IS))
U1SOIS = (1 + B / Y0IS) * PA * COS(LSOIS * 2 * PI / LAMB)
/ (YOGIS * CIS) * (1 - DVISIS / (2 * Y0IS))
DSIIS = 2 * U1SIIS / OMEGA
DSOIS = 2 * U1SOIS / OMEGA
PAN = .1 * YOGIS * C ^ 2
RESIIS = U1SIIS * DVISIS / VISIS
RESOIS = U1SOIS * DVISIS / VISIS
LPRINT
LPRINT "ONERILER ve KRITIK DEGERLER"
LPRINT "-----"
LPRINT
LPRINT "IDEAL ESANJOR UZUNLUKLARI:"
LPRINT "SICAK ESANJORUN IDEAL UZUNLUGU="; DSIIS; "M"
LPRINT "SOGUK ESANJORUN IDEAL UZUNLUGU="; DSOIS; "M"
LPRINT
LPRINT "NONLINEERLIGIN BASLADIGI"
LPRINT "AKUSTIK BASINC GENLIGI="; PAN; "Pa"
LPRINT
LPRINT "TURBULANS KONTROLU:"
LPRINT "SICAK ESANJOR ICIN REYNOLDS SAYISI="; RESIIS
LPRINT "SOGUK ESANJOR ICIN REYNOLDS SAYISI="; RESOIS
IF RESIIS > 500 THEN LPRINT "IS URETEYEN YAPININ SICAK UCU"
IF RESIIS > 500 THEN LPRINT "CIVARINDA TURBULANS VAR"
IF RESOIS > 500 THEN PRINT "IS URETEYEN YAPININ SOGUK UCU"
IF RESOIS > 500 THEN PRINT "CIVARINDA TURBULANS VAR"
END

```

**EK C VİSKOZİTESİZ ORTAMDA TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİM
MODELİNİN PROGRAM LİSTESİ**

```
REM BU PROGRAM, REZONATOR İCİNDEKİ AKİSKANIN VİSKOZİTESİZ
REM KABUL EDEREK, BASİTLESTİRİLMİŞ ENERJİ AKISI VE İS
REM DENKLEMLERİNİ KULLANIP HAVA İLE ÇALIŞAN TERMOAKUSTİK
REM GÜC ÜRETECİNİN PERFORMANSINI BELİRLİYEN HESAPLAMALAR
REM YAPMAKTADIR. PROGRAMDA, REZONATOR İCİNDEKİ ORTALAMA
REM MUTLAK BASINÇIN 1 BAR OLDUĞU KABUL EDİLMEKTEDİR.
REM AYRICA REZONATORUN BİR UCUNUN KAPALI, DİĞER UCUNUN İSE
REM ATMOSFERE AÇIK OLDUĞU VE REZONATOR KESİTİNİN DİKDORTGEN
REM OLDUĞU KABUL EDİLMEKTEDİR. PLAKA VE REZONATOR MALZEMESİ
REM OLARAK YUMUSAK ÇELİK GÖZ ÖNÜNE ALINMIŞTIR.
REM PROGRAM, GÜC ÜRETECİNİN BOYUTLARINI, GEOMETRİK
REM ÖLÇÜLERİNİ, SUYUN SOĞUK ESANJÖR GİRİŞ VE ÇIKIŞ
REM SICAKLIKLARINI, SU DEBİSİNİ VE İS ÜRETEYİNİN YAPININ SICAK
REM ESANJÖRÜNE DİŞARIDAN UYGULANAN İŞİYİ SORMAKTADIR.
REM BU ŞARTLAR İÇİN İS ÜRETİMİNİN GERÇEKLEŞTİĞİ SICAK
REM ESANJÖR PLAKALARININ SICAKLIĞINI, BASINÇ ANTİNODUNDAKİ
REM AKUSTİK BASINÇ GENLİĞİNİ HESAPLAMAKTA, İS ÜRETEYİNİN YAPISI
REM İÇİNDE TERMOAKUSTİK OLARAK TAŞINAN İŞİ İLE ÜRETİLEN
REM AKUSTİK İŞİ BELİRLERMEKTEDİR. AYRICA SOĞUK ESANJÖR
REM PLAKALARININ SICAKLIĞI, OLUSAN SES DALGALARININ FREKANSI,
REM REZONATORUN AÇIK UCUNDAN ÇEVREYE YAYILAN AKUSTİK GÜC,
REM ESANJÖRLERDEKİ VE REZONATOR YÜZEYLERİNDEKİ
REM AKUSTİK GÜC KAYIPLARI DA BULUNMAKTADIR.
REM PROGRAM, İDEAL ESANJÖR UZUNLUKLARINI İKİ ESANJÖR İÇİN
REM AYRI AYRI HESAPLAMAKTA, NONLINEERLİK BULUNMASI
REM DURUMUNDA UYARIDA BULUNMAKTADIR.
PRINT "REZONATOR UZUNLUĞUNU M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT L
PRINT "REZONATORUN DİŞ GENİSLİĞİNİ M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT ADİŞ
PRINT "REZONATORUN DİŞ YÜKSEKLİĞİNİ M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT BDIS
PRINT "REZONATOR GÖVDESİNİN ET KALINLIĞINI MM OLARAK GİRİNİZ"
INPUT RKAL
PRINT "İS ÜRETEYİNİN YAPININ PLAKA KALINLIĞINI MM OLARAK GİRİNİZ"
INPUT PKAL
PRINT "İS ÜRETEYİNİN YAPININ PLAKA SAYISINI GİRİNİZ"
INPUT NPİS
PRINT "İS ÜRETEYİNİN YÜKSEKLİĞİNİ MM OLARAK GİRİNİZ"
INPUT YİS
PRINT "İS ÜRETEYİNİN BİTİMİ İLE KAPALI UC ARASINDAKİ"
PRINT "MESAFİYİ M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT LBOS1
PRINT "İS ÜRETEYİNİN ESANJÖRLER DAHİL OLACAK ŞEKİLDE"
PRINT "UZUNLUĞUNU M BİRİMİNDEN GİRİNİZ"
INPUT LPİS
PRINT "SICAK ESANJÖRÜN UZUNLUĞUNU M BİRİMİNDEN GİRİNİZ"
```



```

INPUT DLSIIS
PRINT "SOGUK ESANJORUN UZUNLUGUNU M BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT DLISOIS
PRINT "IS URETEY YAPININ EFEKTIF PLAKA GENISLIGINI M OLARAK"
PRINT "GIRINIZ "
INPUT EY
PRINT "SUYUN ESANJORE GIRIS SICAKLIGINI C BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT TSUG
PRINT "SUYUN ESANJORDEN CIKIS SICAKLIGINI GIRINIZ"
INPUT TSUC
PRINT "ORTAM SICAKLIGINI GIRINIZ"
INPUT TCEV
PRINT "SOGUK ESANJOR PLAKALARININ ICINDEN DIKEY OLARAK GECEN"
PRINT "BORULARIN SAYISINI GIRINIZ"
INPUT NB
PRINT "BU BORULARIN DIS CAPINI MM OLARAK GIRINIZ"
INPUT DDIS
PRINT "BU BORULARIN IC CAPINI MM OLARAK GIRINIZ"
INPUT DIC
PRINT "IS URETEY YAPININ SICAK ESANJORUNE UYGULANAN ELEKTRIK"
PRINT " GUCUNU W BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT QEL
PRINT "SOGUK ESANJORDEN GECEN SU DEBISINI G/S OLARAK GIRINIZ"
INPUT MSU
PKAL = PKAL / 1000
YIS = YIS / 1000
RKAL = RKAL / 1000
Y02IS = (YIS - NPIS * PKAL) / (NPIS - 1)
Y0IS = Y02IS / 2
B = PKAL / 2
AIC = ADIS - 2 * RKAL
BIC = BDIS - 2 * RKAL
PI = 3.1415927#
K = 1.4
RGAZ = 287
KSU = .628
KB = 384
PRSU = 1.512
VISSU = 6.58E-07
YOGSU = 1000
CPSU = 4180
DDIS = DDIS / 1000
DIC = DIC / 1000
MSU = MSU / 1000
QSU = MSU * CPSU * (TSUC - TSUG)
AINT = PI * DIC ^ 2 / 4
VORT = MSU / (YOGSU * AINT)
RE = VORT * DIC / VISSU
HIC = .023 * RE ^ .8 * PRSU ^ (1 / 3) * KSU / DIC
LT = NB * ADIS
KES1 = PI * DIC * LT
KES2 = 1 / HIC + DIC / (2 * KB) * LOG(DDIS / DIC)
DTM = QSU * KES2 / KES1
KES3 = 2.7183 ^ ((TSUC - TSUG) / DTM)
TBR = (TSUG - KES3 * TSUC) / (1 - KES3)
TSIIS = 400

```

```

10 TMIS = (TSIIS + TBR + 273.15) / 2
   LKAL = L - (LBOS1 + LPIS)
   TMORT = (TSIIS * LBOS1 + TMIS * LPIS + (TCEV + 273.15)
   * LKAL) / L
   C = SQR(K * RGAZ * TMORT)
   CIS = SQR(K * RGAZ * TMIS)
   LAMB = 4 * L
   F = C / LAMB
   OMEGA = 2 * PI * F
   CCEL = 460
   YOGCEL = 7884
   KCELIS = 45 - .03152 * (TMIS - 273.15)
   KCELORT = 45 - .03152 * (TMORT - 273.15)
   SCELIS = SQR(KCELIS * YOGCEL * CCEL)
   SCELORT = SQR(KCELORT * YOGCEL * CCEL)
   BETAIS = 1 / TMIS
   YOGIS = 100000 / (RGAZ * TMIS)
   YOGORT = 100000 / (RGAZ * TMORT)
   CPIS = 1068.11177# - .49271 * TMIS + .00117 * TMIS ^ 2
   - 7.38E-07 * TMIS ^ 3 + 1.362E-10 * TMIS ^ 4
   CPORT = 1068.11177# - .49271 * TMORT + .00117 * TMORT ^ 2
   - 7.38E-07 * TMORT ^ 3 + 1.362E-10 * TMORT ^ 4
   KIS = .0001273 + 9.715E-05 * TMIS - 3.157E-08 * TMIS ^ 2
   - 8.959E-12 * TMIS ^ 3 + 1.135E-14 * TMIS ^ 4
   KORT = .0001273 + 9.715E-05 * TMORT - 3.157E-08 * TMORT ^ 2
   - 8.959E-12 * TMORT ^ 3 + 1.135E-14 * TMORT ^ 4
   ALFIS = KIS / (YOGIS * CPIS)
   ALFORT = KORT / (YOGORT * CPORT)
   LMIS = L - (LBOS1 + LPIS / 2)
   LPISG = LPIS - (DLSIIS + DLISOIS)
   ASIIS = EY * DLSIIS * NPIS * 2
   ASOIS = EY * DLISOIS * NPIS * 2
   LSIIS = L - (LBOS1 + DLSIIS / 2)
   LSOIS = L - (LBOS1 + LPIS) + DLISOIS / 2
   DALFIS = SQR(2 * ALFIS / OMEGA)
   DALFORT = SQR(2 * ALFORT / OMEGA)
   EPAIS = SQR(KIS * YOGIS * CPIS)
   EPAORT = SQR(KORT * YOGORT * CPORT)
   EPSIS = EPAIS / SCELIS
   EPSORT = EPAORT / SCELORT
   REZA = (AIC + BIC) * OMEGA * L / (4 * YOGORT * C ^ 2)
   REZB1 = DALFORT * (K - 1) / (1 + EPSORT)
   REZB2 = 1 + AIC * BIC / ((AIC + BIC) * L)
   REZB = REZB1 * REZB2
   EREZ = REZA * REZB
   SBA1 = DALFIS * (K - 1) * OMEGA / (4 * YOGIS * CIS ^ 2
   * (1 + EPSIS))
   SBA2 = (SIN(LSIIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
   SBA3A = 0
   SBA3B = 4 * YOGIS * CIS ^ 2
   SBA3 = SBA3A / SBA3B
   SBA4 = (COS(LSIIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
   SBA = SBA1 * SBA2 + SBA3 * SBA4

```

```

ESSAB1 = SBA * ASIIS
SBB1 = DALFIS * (K - 1) * OMEGA / (4 * YOGIS * CIS ^ 2
* (1 + EPSIS))
SBB2 = (SIN(LSOIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
SBB3A = 0
SBB3B = 4 * YOGIS * CIS ^ 2
SBB3 = SBB3A / SBB3B
SBB4 = (COS(LSOIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
SBB = SBB1 * SBB2 + SBB3 * SBB4
ESSAB2 = SBB * ASOIS
PRIS = 0
TA = NPIS * EY * DALFIS * LPISG / 2
TB = (SIN(LMIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2 * BETAIS * OMEGA
TC = YOGIS * CPIS
TD = 1
TE = TB / (TC * TD)
TF = CPIS * (1 + B / YOIS)
TG = OMEGA * CIS * TAN(LMIS * 2 * PI / LAMB)
TH = TF / TG
TI = 1
TJ = 1 + EPSIS
TK = TI / TJ
TL = TE * TH * TK
TM = TB / (TC * (1 + EPSIS))
TN = 0
TP = TN / (CIS ^ 2 * YOGIS * TD)
ERAD = OMEGA ^ 2 * AIC ^ 2 * BIC ^ 2
/ (8 * PI * YOGORT * C ^ 3)
SABTA = EREZ + ESSAB1 + ESSAB2 + ERAD
SABTB = SABTA / TA + TM + TP
GTMIS = SABTB / TL
FIISA = GTMIS * CPIS * (1 + B / YOIS)
FIISB = OMEGA * CIS * TAN(LMIS * 2 * PI / LAMB)
FIIS = FIISA / FIISB
TSIY = GTMIS * LPISG + TBR + 273.15
DTIS = TSIY - TSIIS
TSIIS = TSIY
IF DTIS > .1 OR DTIS < -.1 THEN 10
J1 = EY * NPIS * DALFIS / 2
J2 = (1 + B / YOIS) / (YOGIS * CIS)
J3 = SIN(LMIS * 2 * PI / LAMB)
J4 = COS(LMIS * 2 * PI / LAMB)
J5 = -(1 + EPSIS)
J6 = J1 * J2 * J3 * J4 / (J5 * TD)
J7 = 0
J8 = 1
J9 = 1
J10 = J8 * J9
J11 = FIIS * (J7 + J10)
J12 = J11 - 1
J13 = NPIS * 2 * EY
J14 = KIS * Y0 + KCELIS * B
J15 = J13 * J14 * GTMIS
J16A = ADIS * BDIS - AIC * BIC
J16 = J16A * KCELIS * GTMIS

```

```

PAK = (-QSU + J15 + J16) / (J6 * J12)
PA = SQR(PAK)
HIS = -QSU + J15 + J16
WIS = TA * (TL * GTMIS - TM - TP) * PA ^ 2
ERAD = ERAD * PA ^ 2
EREZ = EREZ * PA ^ 2
ESKAY1 = ESSAB1 * PA ^ 2
ESKAY2 = ESSAB2 * PA ^ 2
ETAEL = WIS / QEL
ETAT = WIS / HIS
ETAY = ERAD / QEL
ETAYT = ERAD / HIS
LPRINT "DATA DEGERLERI"
LPRINT "-----"
LPRINT
LPRINT "UYGULANAN ELEKTRIKSEL GUC="; QEL; "W"
LPRINT "SUYA GECEN ISI="; QSU; "W"
LPRINT "SU DEBISI="; MSU * 1000; "G/S"
LPRINT "SUYUN GIRIS SICAKLIGI="; TSUG; "C"
LPRINT "SUYUN CIKIS SICAKLIGI="; TSUC; "C"
LPRINT "ORTAM SICAKLIGI="; TCEV; "C"
LPRINT "REZONATOR UZUNLUGU="; L; "M"
LPRINT "REZONATOR DIS GENISLIGI="; ADIS; "M"
LPRINT "REZONATOR DIS YUKSEKLIGI="; BDIS; "M"
LPRINT "IS URETEYEN YAPIDAKI PLAKA SAYISI="; NPIS
LPRINT "PLAKA KALINLIGI="; PKAL * 1000; "MM"
LPRINT "REZONATOR MALZEMESININ KALINLIGI="; RKAL * 1000; "MM"
LPRINT "PLAKALAR ARASINDAKI MESAFE="; YOIS * 1000; "MM"
LPRINT "REZONATORUN KAPALI UCU ILE IS URETEYEN YAPI ARASINDAKI"
LPRINT "MESAFE="; LBOS1; "M"
LPRINT "IS URETEYEN YAPININ UZUNLUGU="; LPIS; "M"
LPRINT "SICAK ESANJORUN UZUNLUGU="; DLSIIS; "M"
LPRINT "SOGUK ESANJORUN UZUNLUGU="; DLISOIS; "M"
LPRINT "SOGUK ESANJOR BORULARININ"
LPRINT "DIS CAPI="; DDIS * 1000; "MM"
LPRINT "SOGUK ESANJOR BORULARININ"
LPRINT "IC CAPI = "; DIC * 1000; "MM"
LPRINT "SOGUK ESANJOR BORULARININ SAYISI="; NB; "ADET"
LPRINT
LPRINT "SUREKLI REJIM HALINDEKI DEGERLER"
LPRINT "-----"
LPRINT
LPRINT "PLAKALARIN SICAK UC SICAKLIGI="; TSIIS - 273.15; "C"
LPRINT "KAPALI UCTAKI AKUSTIK BASINC GENLIGI="; PA; "Pa"
LPRINT "PLAKALARIN SOGUK UC SICAKLIGI="; TBR; "C"
LPRINT "SES DALGALARININ FREKANSI="; F; "Hz"
LPRINT "TERMOAKUSTIK OLARAK TASINAN ISI="; HIS; "W"
LPRINT "TERMOAKUSTIK OLARAK URETEYEN GUC="; WIS; "W"
LPRINT "IS URETEYEN YAPIDAKI SICAKLIK GRADYANI="; GTMIS; "C/M"
LPRINT "IS URETEYEN GERCEKLESTIGI SICAKLIK GRADYANININ"
LPRINT "KRITIK SICAKLIK GRADYANINA ORANI="; FIIS
LPRINT "ACIK REZONATOR UCUNDAN CEVREYE YAYILAN"
LPRINT "AKUSTIK GUC = "; ERAD; "W"
LPRINT "REZONATOR YUZEYLERINDEKI TOPLAM"
LPRINT "AKUSTIK GUC KAYBI="; EREZ; "W"
LPRINT "SICAK ESANJORDEKI AKUSTIK GUC KAYBI="; ESKAY1; "W"

```

```

LPRINT "SOGUK ESANJORDEKI AKUSTIK GUC KAYBI="; ESKAY2; "W"
LPRINT "URETILEN AKUSTIK GUCUN UYGULANAN"
LPRINT "ELEKTRIK GUCUNE ORANI"; ETAEL
LPRINT "URETILEN AKUSTIK ISIN TERMOAKUSTIK OLARAK"
LPRINT "TASINAN ISIYA ORANI ="; ETAT
LPRINT "ACIK UCTAN YAYILAN AKUSTIK GUCUN, UYGULANAN ELEKTRIK"
LPRINT "GUCUNE ORANI= "; ETAY
LPRINT "ACIK UCTAN YAYILAN AKUSTIK GUCUN,TERMOAKUSTIK OLARAK"
LPRINT "TASINAN ISIYA ORANI= "; ETAYT
U1SIIS = (1 + B / YOIS) * PA * COS(LSIIS * 2 * PI / LAMB)
/ (YOGIS * CIS)
U1SOIS = (1 + B / YOIS) * PA * COS(LSOIS * 2 * PI / LAMB)
/ (YOGIS * CIS)
DSIIS = 2 * U1SIIS / OMEGA
DSOIS = 2 * U1SOIS / OMEGA
PAN = .1 * YOGIS * C ^ 2
LPRINT
LPRINT "ONERILER ve KRITIK DEGERLER"
LPRINT "-----"
LPRINT
LPRINT "IDEAL ESANJOR UZUNLUKLARI:"
LPRINT "SICAK ESANJORUN IDEAL UZUNLUGU="; DSIIS; "M"
LPRINT "SOGUK ESANJORUN IDEAL UZUNLUGU="; DSOIS; "M"
LPRINT
LPRINT "NONLINEERLIGIN BASLADIGI"
LPRINT "AKUSTIK BASINC GENLIGI="; PAN; "Pa"
END

```

EK D DENEYLERİN ve GELİŞTİRİLEN MODELLERİN SONUÇLARI

Tablo D.1 Yapılan Deneylerde Parametre Değerleri

Deney No	Açıklama	Su Debisi (lt/s)	Uygulanan Voltaj (V)	Çekilen Akım (A)	Uygulanan Enerji (W)
1	geçici rejim	0.010	55.0	7.49	412.0
2	geçici rejim	0.015	55.0	7.49	412.0
3	geçici rejim	0.020	55.0	7.49	412.0
4	sürekli rejim	0.010	55.0	7.49	412.0
5	sürekli rejim	0.015	55.0	7.49	412.0
6	sürekli rejim	0.020	55.0	7.49	412.0
7	sürekli rejim	0.010	59.1	8.00	472.8
8	sürekli rejim	0.015	59.1	8.00	472.8
9	sürekli rejim	0.020	59.1	8.00	472.8
10	sürekli rejim	0.010	64.7	8.67	560.9
11	sürekli rejim	0.015	64.7	8.67	560.9
12	sürekli rejim	0.020	64.7	8.67	560.9
13	sürekli rejim	0.010	71.0	9.37	665.3
14	sürekli rejim	0.015	71.0	9.37	665.3
15	sürekli rejim	0.020	71.0	9.37	665.3
16	sürekli rejim	0.010	75.5	9.97	752.7
17	sürekli rejim	0.015	75.5	9.97	752.7
18	sürekli rejim	0.020	75.5	9.97	752.7
19	sürekli rejim	0.010	80.4	10.71	861.1
20	sürekli rejim	0.015	80.4	10.71	861.1
21	sürekli rejim	0.020	80.4	10.71	861.1
22	sürekli rejim	0.010	85.1	11.33	964.2
23	sürekli rejim	0.015	85.1	11.33	964.2
24	sürekli rejim	0.020	85.1	11.33	964.2

Tablo D.2 Doğrudan Yapılan Ölçümlerin Sonuçları

Termokupl Voltajları (mV)											
Deney No	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉	V ₁₀	V ₁₁
1	6.6	7.3	10.8	10.9	13.7	9.1	9.5	4.7	1.5	1.1	0.1
2	5.7	6.6	10.5	10.8	13.4	9.0	9.4	4.7	1.4	1.1	0.1
3	5.3	6.3	10.4	10.7	13.3	8.9	9.4	4.7	1.4	1.0	0.1
4	6.9	8.0	11.8	12.1	14.7	10.1	10.5	5.4	1.6	1.2	0.1
5	6.8	7.9	11.7	12.0	14.6	10.0	10.4	5.3	1.6	1.1	0.1
6	6.8	7.9	11.7	12.0	14.6	10.0	10.4	5.3	1.6	1.1	0.1
7	8.3	9.6	13.4	14.1	16.8	11.5	12.0	6.1	1.8	1.4	0.2
8	8.1	9.4	13.2	13.9	16.6	11.4	11.9	6.0	1.7	1.3	0.1
9	8.0	9.2	13.0	13.5	16.3	11.2	11.6	5.8	1.7	1.2	0.1
10	9.2	10.8	15.2	15.8	18.8	13.0	13.5	6.7	2.0	1.6	0.2
11	9.1	10.7	14.9	15.7	18.6	12.9	13.4	6.6	2.0	1.4	0.1
12	8.9	10.6	14.8	15.6	18.5	12.8	13.3	6.5	1.8	1.3	0.1
13	10.1	11.8	16.9	17.7	20.9	14.6	15.2	7.5	2.3	1.7	0.2
14	10.0	11.7	16.8	17.5	20.7	14.5	15.1	7.4	2.2	1.5	0.1
15	9.8	11.4	16.5	17.2	20.4	14.2	14.9	7.2	2.1	1.4	0.1
16	10.9	12.9	18.7	19.4	22.6	16.1	16.8	8.4	2.6	2.0	0.4
17	10.8	12.8	18.6	19.2	22.4	15.9	16.7	8.2	2.5	1.8	0.3
18	10.7	12.7	18.4	19.0	22.2	15.7	16.5	8.0	2.4	1.7	0.2
19	12.3	14.6	21.1	21.7	25.2	18.1	19.0	9.3	2.9	2.2	0.5
20	12.1	14.4	20.9	21.4	24.9	17.9	18.9	9.1	2.8	2.0	0.4
21	12.0	14.2	20.7	21.2	24.7	17.7	18.7	8.0	2.7	1.9	0.3
22	14.1	17.0	24.2	25.0	29.2	21.0	22.1	10.2	3.2	2.5	0.6
23	14.0	16.8	24.0	24.8	28.9	20.8	21.9	10.0	2.0	2.3	0.5
24	13.8	16.4	23.7	24.5	28.7	20.6	21.8	9.8	2.8	2.2	0.4

Tablo D.2 Devam

Deney No	Y (cm)	X (cm)	V/div (mV)	time/div (ms)	T ₁₂ (°C)	T ₁₃ (°C)	T ₁₄ (°C)
1	-	5.70	-	5	27.8	33.7	27.9
2	-	5.70	-	5	27.1	31.2	28.2
3	-	5.70	-	5	27.1	30.4	28.4
4	7.2	5.70	2	5	27.6	34.5	29.6
5	7.8	5.70	2	5	27.2	32.0	29.7
6	8.6	5.70	2	5	27.0	30.7	29.6
7	5.1	5.65	5	5	28.0	35.5	30.6
8	5.4	5.65	5	5	27.3	32.8	30.6
9	5.6	5.65	5	5	27.0	31.2	31.2
10	7.6	5.65	5	5	27.9	36.5	32.2
11	7.8	5.65	5	5	27.4	33.5	32.6
12	8.0	5.65	5	5	27.1	31.8	33.6
13	5.1	5.60	10	5	28.1	38.3	34.3
14	5.4	5.60	10	5	27.5	34.8	34.4
15	5.6	5.60	10	5	27.0	32.6	34.1
16	6.1	5.60	10	5	27.6	38.9	28.5
17	6.4	5.60	10	5	27.1	35.3	28.0
18	6.6	5.60	10	5	26.8	33.2	27.8
19	6.8	5.55	10	5	27.6	40.1	28.6
20	7.2	5.55	10	5	27.5	36.4	28.4
21	7.5	5.55	10	5	17.4	34.3	28.4
22	7.9	5.55	10	5	27.2	40.5	28.1
23	8.5	5.55	10	5	27.2	36.6	28.1
24	8.8	5.55	10	5	27.0	34.3	28.0

Tablo D.3 Tablo ve Denklemler Kullanılarak Bulunan Sonuçlar

Deney No	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	T ₅ (°C)	T ₆ (°C)	T ₇ (°C)	T ₈ (°C)	T ₉ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₁₁ (°C)
1	189	207	294	296	364	252	262	143	65	55	31
2	167	190	287	294	357	250	260	143	63	55	31
3	158	182	284	292	355	247	260	143	63	53	31
4	199	226	320	327	389	278	288	162	69	60	32
5	196	224	317	325	387	276	286	159	69	57	32
6	196	224	317	325	387	276	286	159	69	57	32
7	235	267	359	376	440	314	326	180	75	66	36
8	230	262	355	371	436	311	323	177	73	63	33
9	228	258	350	362	429	307	317	173	73	61	33
10	259	298	404	418	489	351	363	196	82	72	37
11	257	296	397	416	482	349	361	194	82	68	35
12	253	295	396	414	482	348	359	193	78	66	35
13	283	325	446	465	540	392	406	218	91	76	39
14	281	322	444	460	536	389	404	216	89	72	37
15	276	315	437	453	529	382	399	211	86	69	37
16	297	345	483	500	574	422	438	235	93	78	39
17	294	342	480	494	569	416	435	230	90	73	36
18	291	340	475	489	564	411	430	224	87	70	33
19	331	386	539	554	636	469	490	257	100	83	41
20	326	381	534	546	628	464	487	252	97	78	38
21	323	376	530	542	624	459	483	247	95	75	36
22	373	442	612	630	730	537	562	279	106	90	43
23	371	438	607	626	723	532	558	274	99	85	41
24	366	428	600	619	718	527	555	269	97	83	38

Tablo D.3 Devam

Deney No	V _{p1} (mV)	p ₁ (Psi)	p ₁ (Pa)	p _A (Pa)	f (Hz)	Q _{su} (W)
1	-	-	-	-	35.1	246.6
2	-	-	-	-	35.1	257.1
3	-	-	-	-	35.1	275.9
4	7.20	0.1415	975.6	1105.4	35.1	288.4
5	7.80	0.1532	1056.3	1196.8	35.1	301.0
6	8.60	0.1690	1165.2	1320.2	35.1	309.3
7	12.75	0.2505	1727.1	1956.8	35.4	313.5
8	13.50	0.2653	1829.2	2072.5	35.4	344.9
9	14.00	0.2751	1896.7	2149.0	35.4	351.1
10	19.00	0.3734	2574.5	2916.9	35.4	359.5
11	19.50	0.3832	2642.1	2993.5	35.4	382.5
12	20.00	0.3930	2709.6	3070.0	35.4	392.9
13	25.50	0.5011	3455.0	3914.6	35.7	426.4
14	27.00	0.5306	3658.4	4145.0	35.7	457.7
15	28.00	0.5502	3793.5	4298.1	35.7	468.2
16	30.50	0.5993	4132.0	4681.6	35.7	472.3
17	32.00	0.6288	4335.4	4912.1	35.7	514.1
18	33.00	0.6485	4471.3	5066.1	35.7	535.0
19	34.00	0.6681	4606.4	5219.1	36.0	522.5
20	36.00	0.7074	4877.4	5526.2	36.0	558.0
21	37.50	0.7369	5080.7	5756.5	36.0	576.8
22	39.50	0.7762	5351.7	6063.6	36.0	555.9
23	42.50	0.8351	5757.8	6523.7	36.0	589.4
24	44.00	0.8646	5961.2	6754.1	36.0	610.3

Tablo D.4 İş Üreten Yapının Sıcak ve Soğuk Uçlarının Sıcaklıkları

Deney No	T _{SI1} (°C)	T _{SI2} (°C)	T _{SI3} (°C)	T _{SI4} (°C)	T _{SI ort} (°C)	T _{SO1} (°C)	T _{SO2} (°C)	T _{SO ort} (°C)	VT (°C/m)
1	312.8	315.0	279.8	279.3	296.7	35.0	34.1	34.5	1795.9
2	309.2	310.8	277.5	277.2	293.7	33.6	33.2	33.4	1782.9
3	307.1	308.3	275.7	275.6	291.7	32.3	32.2	32.3	1776.7
4	343.1	345.8	307.3	307.7	326.0	35.1	35.7	35.4	1990.4
5	340.5	343.1	305.5	305.7	323.7	34.0	34.3	34.1	1983.6
6	340.5	343.1	305.5	305.7	323.7	34.0	34.3	34.1	1983.6
7	389.0	392.7	348.1	348.3	369.5	37.4	37.6	37.5	2274.0
8	384.4	388.0	345.1	345.2	365.7	35.1	35.2	35.1	2264.4
9	376.9	380.3	339.9	339.7	359.2	35.0	34.7	34.8	2221.8
10	435.2	439.5	389.3	388.7	413.2	41.1	40.1	40.6	2252.1
11	430.3	434.6	387.3	386.7	409.7	39.1	38.1	38.6	2541.8
12	428.7	433.0	385.6	385.3	408.1	35.4	34.8	35.1	2554.8
13	482.8	487.2	435.3	437.7	460.0	42.9	41.9	42.4	2861.0
14	479.2	483.5	432.7	432.2	456.9	39.6	38.8	39.2	2861.0
15	471.9	476.0	426.4	425.9	450.0	37.1	36.1	36.6	2831.5
16	521.8	526.5	469.2	469.0	496.6	40.4	40.2	40.3	3125.3
17	517.0	521.8	464.7	464.4	492.0	36.7	36.2	36.4	3120.5
18	511.6	516.4	459.9	459.2	486.8	34.5	33.4	34.0	3101.4
19	580.1	585.6	524.1	523.5	553.4	41.6	40.4	41.0	3509.6
20	573.3	578.7	520.3	519.4	547.9	37.8	36.3	37.1	3498.6
21	569.2	574.4	515.8	514.6	543.5	36.1	34.1	35.1	3482.2
22	659.1	665.8	603.5	600.6	632.2	43.4	38.5	40.9	4050.0
23	654.4	661.0	599.1	596.2	627.6	37.0	32.2	34.6	4061.6
24	647.4	653.5	595.2	591.9	622.0	35.9	30.4	33.2	4032.9

Tablo D.5 Deneyde Yapılan Ölçümlere Göre Bulunan Sonuçlar

Deney No	$\phi_{i\dot{s}}$	$\dot{H}_{i\dot{s}}$ (W)	$\dot{W}_{i\dot{s}}$ (W)	$\dot{E}_y$ (W)	$\dot{E}_{s1e\dot{s}}$ (W)	$\dot{E}_{s2e\dot{s}}$ (W)
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	4.541	38.13	0.24	0.0024	0.055	0.062
5	4.524	51.44	0.28	0.0028	0.064	0.072
6	4.521	59.80	0.34	0.0034	0.078	0.088
7	4.912	32.17	0.87	0.0074	0.178	0.199
8	4.882	64.55	0.97	0.0083	0.199	0.223
9	4.815	75.40	1.02	0.0090	0.212	0.239
10	5.514	48.83	2.29	0.0163	0.414	0.458
11	5.498	72.88	2.40	0.0172	0.436	0.482
12	5.539	81.98	2.55	0.0181	0.460	0.508
13	5.850	84.43	4.57	0.0295	0.774	0.846
14	7.091	115.78	6.07	0.0374	0.908	0.974
15	7.310	129.15	6.66	0.0325	0.982	1.049
16	6.090	104.72	6.99	0.0421	1.132	1.224
17	6.047	146.98	7.64	0.0465	1.243	1.344
18	5.999	169.72	8.04	0.0495	1.317	1.427
19	6.366	119.35	9.39	0.0526	1.459	1.556
20	6.326	155.86	10.45	0.0591	1.631	1.741
21	6.294	176.15	11.16	0.0635	1.748	1.867
22	6.985	106.37	14.16	0.0699	2.072	2.159
23	6.968	138.86	16.35	0.0810	2.397	2.498
24	6.928	162.12	17.42	0.0869	2.562	2.674

Tablo D.5 Devam

Deney No	$\dot{E}_{rez}$ (W)	$\% \frac{\dot{W}_{i\dot{s}}}{Q_{el}}$	$\% \frac{\dot{W}_{i\dot{s}}}{H_{i\dot{s}}}$	$\% \frac{\dot{E}_y}{Q_{el}}$	$\% \frac{Q_{su}}{Q_{el}}$	Nonlinearliğin Başladığı P_A (Pa)
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	0.141	0.06	0.63	0.0006	70.0	11609
5	0.165	0.07	0.54	0.0007	73.0	11615
6	0.201	0.08	0.57	0.0008	75.1	11613
7	0.453	0.18	2.70	0.0016	66.3	11306
8	0.508	0.25	1.50	0.0018	72.9	11308
9	0.545	0.22	1.35	0.0019	74.3	11308
10	1.028	0.41	4.69	0.0029	64.1	11053
11	1.082	0.43	3.29	0.0031	68.2	11067
12	1.140	0.45	3.10	0.0032	70.1	11065
13	1.899	0.69	5.15	0.0044	64.1	10789
14	2.090	0.91	5.24	0.0046	68.8	10791
15	2.231	1.00	5.16	0.0049	70.4	10804
16	2.726	0.93	6.68	0.0056	62.3	10421
17	2.995	1.02	5.20	0.0062	68.3	10402
18	3.179	1.07	4.74	0.0066	71.1	10407
19	3.476	1.09	7.87	0.0061	60.7	10110
20	3.890	1.21	6.71	0.0069	64.8	10103
21	4.171	1.30	6.33	0.0074	67.0	10110
22	4.824	1.47	13.31	0.0073	57.7	9709
23	5.578	1.67	11.78	0.0084	61.1	9684
24	5.967	1.81	10.75	0.0090	63.3	9698

Tablo D.6 Viskoziteli Modelin Deney Şartlarındaki Sonuçları

Deney No	P_A (Pa)	f (Hz)	T_{SI} (°C)	T_{SO} (°C)	∇T (°C/ m)	$\phi_{i\dot{s}}$	$\dot{H}_{i\dot{s}}$ (W)	$\dot{W}_{i\dot{s}}$ (W)	$\dot{E}_y$ (W)
1	-	-	374.8	35.7	2323	-	-	-	-
2	-	-	367.0	33.0	2288	-	-	-	-
3	-	-	363.1	31.5	2272	-	-	-	-
4	1251	35.28	377.5	36.2	2338	4.690	8.53	0.35	0.003
5	2102	35.22	369.5	33.4	2302	4.696	24.11	0.99	0.085
6	2599	35.17	365.3	31.9	2284	4.701	34.10	1.39	0.019
7	2411	35.36	381.8	37.3	2359	4.685	31.68	1.31	0.012
8	3487	35.28	373.1	34.4	2320	4.695	66.38	2.73	0.023
9	3686	35.26	368.5	32.6	2301	4.704	74.27	3.04	0.026
10	3711	35.46	387.1	38.6	2387	4.686	75.15	3.13	0.027
11	4315	35.39	377.3	35.3	2343	4.699	101.85	4.21	0.036
12	4558	35.39	372.6	33.3	2324	4.709	111.84	4.69	0.040
13	5025	35.62	395.8	40.8	2432	4.686	138.00	5.79	0.049
14	5639	35.52	383.7	36.9	2375	4.699	174.12	7.23	0.061
15	5851	35.44	376.1	34.4	2340	4.707	187.60	7.74	0.066
16	5861	35.38	393.5	41.7	2410	4.665	186.40	7.78	0.066
17	6554	35.25	380.6	37.7	2349	4.676	233.49	9.65	0.082
18	6877	35.18	373.3	35.3	2315	4.683	257.26	10.57	0.090
19	6576	35.42	398.4	43.2	2433	4.662	234.51	9.83	0.083
20	7121	35.30	384.9	39.0	2369	4.673	275.56	11.43	0.097
21	7392	35.23	377.5	36.5	2336	4.681	297.28	12.26	0.105
22	7026	34.42	400.0	43.8	2440	4.658	267.45	11.22	0.095
23	7514	35.29	385.7	39.3	2373	4.671	306.66	12.72	0.108
24	7780	35.22	377.6	36.7	2335	4.679	330.81	13.64	0.116

Tablo D.6 Devam

Deney No	$\dot{E}_{ses}$ (W)	$\dot{E}_{soes}$ (W)	$\dot{E}_{rez}$ (W)	$\% \frac{\dot{W}_{is}}{Q_{el}}$	$\% \frac{\dot{W}_{is}}{H_{is}}$	$\% \frac{\dot{E}_y}{Q_{el}}$	$\% \frac{Q_{su}}{Q_{el}}$	Nonlinearliğin Başladığı P_A (Pa)
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0.077	0.085	0.187	0.09	4.13	0.0007	70.0	10462
5	0.217	0.238	0.525	0.24	4.10	0.0021	73.1	10541
6	0.305	0.335	0.741	0.34	4.09	0.0029	75.1	10581
7	0.288	0.315	0.697	0.28	4.14	0.0024	66.3	10448
8	0.599	0.656	1.452	0.58	4.11	0.0049	72.9	10530
9	0.666	0.732	1.620	0.64	4.10	0.0055	74.3	10592
10	0.687	0.750	1.663	0.56	4.16	0.0047	64.1	10440
11	0.922	1.009	2.239	0.75	4.13	0.0064	68.2	10541
12	1.024	1.124	2.498	0.84	4.12	0.0071	70.1	10614
13	1.271	1.384	3.081	0.97	4.19	0.0073	64.1	10414
14	1.584	1.732	3.855	1.09	4.15	0.0092	68.8	10527
15	1.694	1.856	4.129	1.16	4.13	0.0099	70.4	10592
16	1.719	1.871	4.127	1.03	4.18	0.0088	62.8	10289
17	2.126	2.323	5.118	1.28	4.13	0.0109	68.3	10393
18	2.325	2.546	5.608	1.40	4.11	0.0120	71.1	10455
19	2.174	2.362	5.211	1.14	4.19	0.0097	60.7	10248
20	2.519	2.749	6.062	1.33	4.15	0.0113	64.8	10363
21	2.697	2.950	6.505	1.42	4.12	0.0121	67.0	10431
22	2.484	2.697	5.946	1.16	4.20	0.0098	57.7	10223
23	2.807	3.061	6.747	1.13	4.15	0.0122	61.1	10348
24	3.002	3.284	7.235	1.41	4.12	0.0121	63.3	10420

Tablo D.7 Viskozitesiz Modelin Deney Şartlarındaki Sonuçları

Deney No	P_A (Pa)	f (Hz)	T_{SI} (°C)	T_{SO} (°C)	∇T (°C/ m)	ϕ_{is}	$\dot{H}_{is}$ (W)	$\dot{W}_{is}$ (W)	$\dot{E}_y$ (W)
1	-	-	118.3	35.1	570	-	-	-	-
2	-	-	115.3	32.4	568	-	-	-	-
3	-	-	114.3	31.5	567	-	-	-	-
4	12954	33.19	119.7	36.2	572	3.191	212.7	15.86	0.302
5	13396	33.16	116.6	33.4	570	3.196	225.4	16.86	0.323
6	13679	33.14	114.9	31.9	569	3.198	233.8	17.52	0.337
7	13662	33.25	121.1	37.3	574	3.191	237.6	17.71	0.337
8	14610	33.21	117.9	34.4	572	3.196	269.1	20.12	0.385
9	14822	33.22	115.9	32.6	571	3.200	275.3	20.65	0.396
10	14881	33.33	122.8	38.6	577	3.192	283.3	21.12	0.401
11	15560	33.31	119.2	35.3	575	3.198	306.4	22.94	0.438
12	15869	33.33	117.2	33.3	575	3.203	316.8	23.80	0.456
13	16466	33.45	125.6	40.8	581	3.192	349.8	26.07	0.492
14	17303	33.41	121.3	36.9	578	3.198	381.3	28.55	0.543
15	17616	33.36	118.5	34.4	576	3.202	391.9	29.43	0.562
16	17531	33.21	125.6	41.7	575	3.181	396.6	29.32	0.554
17	18563	33.14	121.1	37.7	571	3.186	438.6	32.57	0.620
18	19080	33.11	119.4	35.3	570	3.189	459.6	34.23	0.654
19	18560	33.23	127.2	43.2	576	3.179	446.7	32.97	0.622
20	19423	33.17	122.6	39.0	573	3.185	482.4	35.78	0.680
21	19881	33.15	119.9	36.5	571	3.188	501.3	37.30	0.711

Tablo D.7 Devam

Deney No	$\dot{E}_{ses}$ (W)	$\dot{E}_{soes}$ (W)	$\dot{E}_{rez}$ (W)	$\% \frac{\dot{W}_{is}}{Q_{el}}$	$\% \frac{\dot{W}_{is}}{H_{is}}$	$\% \frac{\dot{E}_y}{Q_{el}}$	$\% \frac{Q_{su}}{Q_{el}}$	Nonlineerliğin Başladığı P_A (Pa)
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	5.09	4.79	5.68	3.85	7.45	0.0734	70.0	12659
5	5.39	5.08	6.06	4.09	7.48	0.0784	73.0	12774
6	5.60	5.27	6.31	4.25	7.49	0.0817	75.1	12785
7	5.68	5.35	6.34	3.75	7.45	0.0713	66.3	12656
8	6.44	6.06	7.24	4.26	7.48	0.0814	72.9	12741
9	6.60	6.21	7.45	4.37	7.50	0.0838	74.3	12813
10	6.77	6.37	7.57	3.77	7.45	0.0715	64.1	12666
11	7.34	6.90	8.26	4.09	7.49	0.0781	68.2	12775
12	7.59	7.15	8.61	4.24	7.52	0.0813	70.1	12863
13	8.36	7.87	9.35	3.92	7.45	0.0740	64.1	12664
14	9.13	8.59	10.29	4.29	7.49	0.0816	68.8	12780
15	9.39	8.84	10.63	4.42	7.51	0.0845	70.4	12845
16	9.46	8.90	10.42	3.90	7.39	0.0736	62.8	12470
17	10.47	9.86	11.62	4.33	7.43	0.0824	68.3	12569
18	10.99	10.34	12.25	4.55	7.45	0.0869	71.1	12632
19	10.64	10.01	11.69	3.83	7.38	0.0722	60.7	12432
20	11.51	10.83	12.75	4.16	7.42	0.0789	64.8	12544
21	11.98	11.27	13.34	4.33	7.44	0.0826	67.0	12614
22	11.44	10.76	12.54	3.67	7.37	0.0692	57.7	12402
23	12.26	11.54	13.56	3.95	7.41	0.0750	61.2	12525
24	12.78	12.02	14.21	4.12	7.44	0.0786	63.3	12598

**EK E ÖLÇÜLEN SICAKLIKLARI KULLANARAK İŞ ÜRETEN YAPININ
UÇLARINDAKİ SICAKLIKLARI HESAPLAYAN PROGRAM**

```
REM BU PROGRAM, TERMOAKUSTİK GÜC ÜRETECİNİN REZONATOR
REM YÜZEYİNDEN ÖLCÜLEN SICAKLIKLARI KULLANARAK, İŞ ÜRETEN
REM YAPININ SICAK VE SOĞUK UÇLARININ SICAKLIKLARINI HESAPLAR
REM SICAKLIK ÖLCÜMÜNÜN YAPILDIĞI YERLER VE GEREKLİ ÖLCÜLER,
REM BÖLÜM 6'DA MEVCUTTUR.
REM PROGRAM, SICAK UÇ SICAKLIĞI İÇİN DÖRT AYRI DEĞER
REM BELİRLEMEKTE, DAHA SONRA BUNLARIN ORTALAMASINI
REM ALMAKTADIR. BU SICAKLIKLAR, TSICAK1, TSICAK2, TSICAK3
REM VE TSICAK4 OLARAK İSİMLENDİRİLMİŞTİR.
REM TSICAK1 BELİRLENİRKEN T2 İLE T3 VE T4 SICAKLIKLARI
REM KULLANILMAKTADIR. TSICAK2 BELİRLENİRKEN T1 İLE T3 VE
REM T4 SICAKLIKLARI KULLANILMAKTADIR. TSICAK3 BELİRLENİRKEN
REM T6 VE T7 İLE T8 SICAKLIĞI KULLANILMAKTADIR. TSICAK4
REM BELİRLENİRKEN T6 VE T7 İLE T9 VE T10 SICAKLIKLARI
REM KULLANILMAKTADIR.
REM PROGRAM, SOĞUK UÇ SICAKLIĞI İÇİN İKİ AYRI DEĞER
REM BELİRLEMEKTE, DAHA SONRA BUNLARIN ORTALAMASINI
REM ALMAKTADIR. BU SICAKLIKLAR, TSOGUK1 VE TSOGUK2
REM OLARAK İSİMLENDİRİLMİŞTİR. TSOGUK1 BELİRLENİRKEN T8 İLE
REM T9 VE T10 SICAKLIKLARI KULLANILMAKTADIR. TSOGUK2
REM BELİRLENİRKEN T6 VE T7 İLE T9 VE T10 SICAKLIKLARI
REM KULLANILMAKTADIR.
INPUT "ORTAM SICAKLIĞINI GİRİNİZ"; TCEV
INPUT "T1 SICAKLIĞINI GİRİNİZ"; T1
INPUT "T2 SICAKLIĞINI GİRİNİZ"; T2
INPUT "T3 SICAKLIĞINI GİRİNİZ"; T3
INPUT "T4 SICAKLIĞINI GİRİNİZ"; T4
INPUT "T6 SICAKLIĞINI GİRİNİZ"; T6
INPUT "T7 SICAKLIĞINI GİRİNİZ"; T7
INPUT "T8 SICAKLIĞINI GİRİNİZ"; T8
INPUT "T9 SICAKLIĞINI GİRİNİZ"; T9
INPUT "T10 SICAKLIĞINI GİRİNİZ"; T10
E = 2.7182
U = 1.424
P = .356
K = 36.8
A = .000696
M = SQR(U * P / (K * A))
T34 = (T3 + T4) / 2
T67 = (T6 + T7) / 2
T910 = (T9 + T10) / 2
TET1 = T1 - TCEV
TET2 = T2 - TCEV
TET34 = T34 - TCEV
TET67 = T67 - TCEV
TET8 = T8 - TCEV
TET910 = T910 - TCEV
```

```

A1 = E ^ (-.193 * M)
B1 = E ^ (.193 * M)
C21 = (A1 * TET34 - TET2) / (A1 - B1)
C11 = TET34 - C21
TSICAK1 = C11 * E ^ (-M * (-.019)) + C21 * E ^ (M * (-.019))
+ TCEV
PRINT "TSICAK1="; TSICAK1; "C"
A2 = E ^ (-.388 * M)
B2 = E ^ (.388 * M)
C22 = (A2 * TET34 - TET1) / (A2 - B2)
C12 = TET34 - C22
TSICAK2 = C12 * E ^ (-M * (-.019)) + C22 * E ^ (M * (-.019))
+ TCEV
PRINT "TSICAK2="; TSICAK2; "C"
A3 = E ^ (-.065 * M)
B3 = E ^ (.065 * M)
C23 = (A3 * TET67 - TET8) / (A3 - B3)
C13 = TET67 - C23
TSICAK3 = C13 * E ^ (-M * (-.012)) + C23 * E ^ (M * (-.012))
+ TCEV
PRINT "TSICAK3="; TSICAK3; "C"
A4 = E ^ (-.12 * M)
B4 = E ^ (.12 * M)
C24 = (A4 * TET67 - TET910) / (A4 - B4)
C14 = TET67 - C24
TSICAK4 = C14 * E ^ (-M * (-.012)) + C24 * E ^ (M * (-.012))
+ TCEV
PRINT "TSICAK4="; TSICAK4; "C"
TSICAK = (TSICAK1 + TSICAK2 + TSICAK3 + TSICAK4) / 4
PRINT "TSICAK="; TSICAK; "C"
A5 = E ^ (-.055 * M)
B5 = E ^ (.055 * M)
C25 = (A5 * TET910 - TET8) / (A5 - B5)
C15 = TET910 - C25
TSOGUK1 = C15 * E ^ (-M * (-.018)) + C25 * E ^ (M * (-.018))
+ TCEV
PRINT "TSOGUK1="; TSOGUK1; "C"
A6 = E ^ (-.12 * M)
B6 = E ^ (.12 * M)
C26 = (A6 * TET910 - TET67) / (A6 - B6)
C16 = TET910 - C26
TSOGUK2 = C16 * E ^ (-M * (-.018)) + C26 * E ^ (M * (-.018))
+ TCEV
PRINT "TSOGUK2="; TSOGUK2; "C"
TSOGUK = (TSOGUK1 + TSOGUK2) / 2
PRINT "TSOGUK="; TSOGUK; "C"
GR = (TSICAK - TSOGUK) / .144
PRINT "IS URETEN YAPIDAKI SICAKLIK GRADYANI="; GR; "C/M"
END

```

**EK F DENEY SONUÇLARINA GÖRE TERMOAKUSTİK GÜÇ ÜRETİMİNİN
PERFORMANSINI BELİRLEYEN PROGRAM**

```
REM BU PROGRAM, DENEY SONUÇLARINI KULLANARAK, AKISKAN OLARAK
REM HAVA İÇEREN TERMOAKUSTİK İS ÜRETİCİNİN 1 BAR MUTLAK
REM BASINCTAKI PERFORMANSINI BELİRLEMEKTEDİR. PROGRAMDA,
REM VİSKOZİTELİ DURUM İÇİN GELİSTİRİLEN BASİTLESTİRİLMİŞ İS
REM VE ENERJİ DENKLEMLERİ KULLANILMAKTADIR.
REM PROGRAM, BİR UCUNDAN KAPATILMIŞ, DİĞER UCU ATMOSFERE
REM AÇIK REZONATOR İÇİN GECERLİDİR. PROGRAMDA, PLAKA VE
REM REZONATOR MALZEMESİ OLARAK YUMUSAK ÇELİK KULLANILDIĞI
REM KABUL EDİLMEKTEDİR.
REM PROGRAMA VERİ OLARAK BOYUTLAR, GEOMETRİ, SUYUN SOĞUK
REM ESANJORE GİRİŞ VE ÇIKIŞ SICAKLIKLARI, SU DEBİSİ, İS
REM ÜRETEN YAPININ SICAK UCUNA DIŞARIDAN UYGULANAN İSİ
REM GİRİLİR. AYRICA DENEY SONUNDA BULUNAN DEĞİŞKENLERDEN
REM KAPALI UCTAKI AKUSTİK BASINÇ GENLİĞİ VE FREKANS İLE İS
REM ÜRETEN YAPININ SICAK VE SOĞUK UCLARININ SICAKLIKLARI DA
REM PROGRAMA VERİ OLARAK GİRİLİR. SONUÇ OLARAK İS ÜRETEN
REM YAPI İÇİNDE TERMOAKUSTİK OLARAK TASINAN İSİ, ÜRETİLEN
REM AKUSTİK İS, REZONATORUN AÇIK UCUNDAN ÇEVREYE YAYILAN
REM AKUSTİK GÜÇ, ESANJORDEKİ VE REZONATOR YÜZEYLERİNDEKİ
REM AKUSTİK GÜÇ KAYIPLARI BULUNMAKTADIR. PROGRAM, İDEAL
REM ESANJOR UZUNLUKLARINI İKİ ESANJOR İÇİN AYRI AYRI
REM HESAPLAMAKTADIR.
PRINT "REZONATOR UZUNLUGUNU M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT L
PRINT "REZONATORUN DİS YÜKSEKLİĞİNİ M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT ADİS
PRINT "REZONATORUN DİS YÜKSEKLİĞİNİ M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT BDIS
PRINT "REZONATOR GÖVDESİNİN ET KALINLIĞINI MM OLARAK GİRİNİZ"
INPUT RKAL
PRINT "İS ÜRETEN YAPININ PLAKA KALINLIĞINI MM OLARAK GİRİNİZ"
INPUT PKAL
PRINT "İS ÜRETEN YAPININ PLAKA SAYISINI GİRİNİZ"
INPUT NPİS
PRINT "İS ÜRETEN YAPININ YÜKSEKLİĞİNİ MM OLARAK GİRİNİZ"
INPUT YİS
PRINT "İS ÜRETEN YAPININ BİTİMİ İLE KAPALI UC ARASINDAKİ"
PRINT "MESAFEYİ M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT LBOS1
PRINT "İS ÜRETEN YAPININ UZUNLUGUNU, ESANJORLER DAHİL OLACAK"
PRINT "ŞEKİLDE M OLARAK GİRİNİZ"
INPUT LPİS
PRINT "SICAK ESANJORUN UZUNLUGUNU M BİRİMİNDEN GİRİNİZ"
INPUT DLSİİS
PRINT "SOĞUK ESANJORUN UZUNLUGUNU M BİRİMİNDEN GİRİNİZ"
INPUT DLSOİS
PRINT "İS ÜRETEN YAPININ EFEKTİF PLAKA GENİSLİĞİNİ M OLARAK"
```

```

PRINT "GIRINIZ"
INPUT EY
PRINT "SUYUN ESANJORE GIRIS SICAKLIGINI C BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT TSUG
PRINT "SUYUN ESANJORDEN CIKIS SICAKLIGINI GIRINIZ"
INPUT TSUC
PRINT "CEVRE SICAKLIGINI GIRINIZ"
INPUT TCEV
PRINT "IS URETEY YAPININ SICAK ESANJORUNE UYGULANAN ELEKTRIK"
PRINT "GUCUNU W BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT QEL
PRINT "SOGUK ESANJORDEN GECEN SU DEBISINI G/S OLARAK GIRINIZ"
INPUT MSU
PRINT "DENEYDE OLCULEN AKUSTIK BASINC GENLIGINI"
PRINT "PA BIRIMINDEN GIRINIZ "
INPUT PA
PRINT "DENEYDE OLCULEN FREKANSI HZ BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT F
PRINT "IS URETEY YAPININ SICAK UCUNUN DENEYDE BULUNAN"
PRINT "SICAKLIGINI C BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT TSIC
PRINT "IS URETEY YAPININ SOGUK UCUNUN DENEYDE BULUNAN"
PRINT "SICAKLIGINI C BIRIMINDEN GIRINIZ"
INPUT TSOE
MSU = MSU / 1000
QSU = MSU * 4180 * (TSUC - TSUG)
PKAL = PKAL / 1000
RKAL = RKAL / 1000
YIS = YIS / 1000
Y02IS = (YIS - NPIS * PKAL) / (NPIS - 1)
Y0IS = Y02IS / 2
B = PKAL / 2
AIC = ADIS - 2 * RKAL
BIC = BDIS - 2 * RKAL
K = 1.4
RGAZ = 287
PI = 3.1415927#
TMIS = ((TSIC - TSOE) / 2 + 273.15)
LKAL = L - (LBOS1 + LPIS)
TMORT = ((TSIC + 273.15) * LBOS1 + TMIS * LPIS
+ (TCEV + 273.15) * LKAL) / L
C = SQR(K * RGAZ * TMORT)
CIS = SQR(K * RGAZ * TMIS)
LAMB = C / F
OMEGA = 2 * PI * F
CCEL = 460
YOGCEL = 7884
KCELIS = 45 - .03152 * (TMIS - 273.15)
KCELORT = 45 - .03152 * (TMORT - 273.15)
SCELIS = SQR(KCELIS * YOGCEL * CCEL)
SCELORT = SQR(KCELORT * YOGCEL * CCEL)
BETAIS = 1 / TMIS
YOGIS = 100000 / (RGAZ * TMIS)
YOGORT = 100000 / (RGAZ * TMORT)
CPIS = 1068.11177# - .49271 * TMIS + .00117 * TMIS ^ 2
- 7.38E-07 * TMIS ^ 3 + 1.362E-10 * TMIS ^ 4

```

```

CPORT = 1068.11177# - .49271 * TMORT + .00117 * TMORT ^ 2
- 7.38E-07 * TMORT ^ 3 + 1.362E-10 * TMORT ^ 4
MVISIS = -3.598E-07 + 8.129E-08 * TMIS - 7.707E-11
* TMIS ^ 2 + 5.726E-14 * TMIS ^ 3 - 1.872E-17 * TMIS ^ 4
MVISORT = -3.598E-07 + 8.129E-08 * TMORT - 7.707E-11
* TMORT ^ 2 + 5.726E-14 * TMORT ^ 3 - 1.872E-17 * TMORT ^ 4
VISIS = MVISIS / YOGIS
VISORT = MVISORT / YOGORT
KIS = .0001273 + 9.715E-05 * TMIS - 3.157E-08 * TMIS ^ 2
- 8.959E-12 * TMIS ^ 3 + 1.135E-14 * TMIS ^ 4
KORT = .0001273 + 9.715E-05 * TMORT - 3.157E-08 * TMORT ^ 2
- 8.959E-12 * TMORT ^ 3 + 1.135E-14 * TMORT ^ 4
ALFIS = KIS / (YOGIS * CPIS)
ALFORT = KORT / (YOGORT * CPORT)
LMIS = L - (LBOS1 + LPIS / 2)
LPISG = LPIS - (DLSIIS + DLSOIS)
ASIIS = EY * DLSIIS * NPIS * 2
ASOIS = EY * DLSOIS * NPIS * 2
LSIIS = L - (LBOS1 + DLSIIS / 2)
LSOIS = L - (LBOS1 + LPIS) + DLSOIS / 2
DALFIS = SQR(2 * ALFIS / OMEGA)
DALFORT = SQR(2 * ALFORT / OMEGA)
DVISIS = SQR(2 * VISIS / OMEGA)
DVISORT = SQR(2 * VISORT / OMEGA)
EPAIS = SQR(KIS * YOGIS * CPIS)
EPAORT = SQR(KORT * YOGORT * CPORT)
EPSIS = EPAIS / SCelis
EPSORT = EPAORT / SCelORT
REZA = (AIC + BIC) * OMEGA * L / (4 * YOGORT * C ^ 2)
REZB1 = DALFORT * (K - 1) / (1 + EPSORT)
REZB2 = 1 + AIC * BIC / ((AIC + BIC) * L)
REZB = REZB1 * REZB2 + DVISORT
EREZ = REZA * REZB
SBA1 = DALFIS * (K - 1) * OMEGA / (4 * YOGIS * CIS ^ 2
* (1 + EPSIS))
SBA2 = (SIN(LSIIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
SBA3A = DVISIS * OMEGA * (1 + B / YOIS) ^ 2
* (1 - DVISIS / (2 * YOIS)) ^ 2
SBA3B = 4 * YOGIS * CIS ^ 2
SBA3 = SBA3A / SBA3B
SBA4 = (COS(LSIIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
SBA = SBA1 * SBA2 + SBA3 * SBA4
ESSAB1 = SBA * ASIIS
SBB1 = DALFIS * (K - 1) * OMEGA / (4 * YOGIS * CIS ^ 2
* (1 + EPSIS))
SBB2 = (SIN(LSOIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
SBB3A = DVISIS * OMEGA * (1 + B / YOIS) ^ 2
* (1 - DVISIS / (2 * YOIS)) ^ 2
SBB3B = 4 * YOGIS * CIS ^ 2
SBB3 = SBB3A / SBB3B
SBB4 = (COS(LSOIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
SBB = SBB1 * SBB2 + SBB3 * SBB4
ESSAB2 = SBB * ASOIS
PRIS = VISIS / ALFIS
TA = NPIS * EY * DALFIS * LPISG / 2
TB = (SIN(LMIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2 * BETAIS * OMEGA

```



```

TC = YOGIS * CPIS
TD = 1 - DVISIS / YOIS + DVISIS ^ 2 / (2 * YOIS ^ 2)
TE = TB / (TC * TD)
TF = CPIS * (1 + B / YOIS) * (1 - DVISIS / (2 * YOIS))
TG = OMEGA * CIS * TAN(LMIS * 2 * PI / LAMB)
TH = TF / TG
TI = 1 + EPSIS * SQR(PRIS) -- (1 + EPSIS) * PRIS ^ (3 / 2)
TJ = (1 + EPSIS) * (1 - PRIS)
TK = TI / TJ - SQR(PRIS)
TL = TE * TH * TK
TM = TB / (TC * (1 + EPSIS))
TN = OMEGA * SQR(PRIS) * (1 + B / YOIS) ^ 2
* (COS(LMIS * 2 * PI / LAMB)) ^ 2
* (1 - DVISIS / (2 * YOIS)) ^ 2
TP = TN / (CIS ^ 2 * YOGIS * TD)
ERAD = OMEGA ^ 2 * AIC ^ 2 * BIC ^ 2
/ (8 * PI * YOGORT * C ^ 3)
GTMIS = (TSIC - TSOG) / LPISG
FIISA = GTMIS * CPIS * (1 + B / YOIS)
* (1 - DVISIS / (2 * YOIS))
FIISB = OMEGA * CIS * TAN(LMIS * 2 * PI / LAMB)
FIIS = FIISA / FIISB
J13 = NPIS * 2 * EY
J14 = KIS * Y0 + KCELS * B
J15 = J13 * J14 * GTMIS
J16A = ADIS * BDIS - AIC * BIC
J16 = J16A * KCELS * GTMIS
HIS = -QSU + J15 + J16
WIS = TA * (TL * GTMIS - TM - TP) * PA ^ 2
ERAD = ERAD * PA ^ 2
EREZ = EREZ * PA ^ 2
ESKAY1 = ESSAB1 * PA ^ 2
ESKAY2 = ESSAB2 * PA ^ 2
ETAEL = WIS / QEL
ETAT = WIS / HIS
ETAY = ERAD / QEL
ETAYT = ERAD / HIS
PRINT "DATA DEGERLERI"
PRINT "-----"
PRINT
PRINT "UYGULANAN ELEKTRIKSEL GUC="; QEL; "W"
PRINT "SUYA GECEN ISI="; QSU; "W"
PRINT "AKUSTIK BASINC GENLIGI="; PA; "PA"
PRINT "IS URETEN YAPININ SICAK UC SICAKLIGI="; TSIC; "C"
PRINT "IS URETEN YAPININ SOGUK UC SICAKLIGI="; TSOG; "C"
PRINT "IS URETEN YAPIDAKI SICAKLIK GRADYANI="; GTMIS; "C/M"
PRINT "FREKANS="; F; "HZ"
PRINT "SU DEBISI="; MSU * 1000; "G/S"
PRINT "SUYUN GIRIS SICAKLIGI="; TSUG; "C"
PRINT "SUYUN CIKIS SICAKLIGI="; TSUC; "C"
PRINT "ORTAM SICAKLIGI="; TCEV; "C"
PRINT "REZONATOR UZUNLUGU="; L; "M"
PRINT "REZONATOR DIS YUKSEKLIGI="; ADIS; "M"
PRINT "REZONATOR DIS GENISLIGI="; BDIS; "M"
PRINT "IS URETEN YAPIDAKI PLAKA SAYISI="; NPIS;
PRINT "PLAKA KALINLIGI="; PKAL * 1000; "MM"

```

```

PRINT "REZONATOR MALZEMESININ KALINLIGI="; RKAL * 1000; "MM"
PRINT "PLAKALAR ARASINDAKI MESAFE="; YOIS * 1000; "MM"
PRINT "REZONATORUN KAPALI UCU ILE IS URETEN YAPI ARASINDAKI"
PRINT "MESAFE="; LBOS1; "M"
PRINT "IS URETEN YAPININ UZUNLUGU="; LPIS; "M"
PRINT "SICAK ESANJORUN UZUNLUGU="; DLSIIS; "M"
PRINT "SOGUK ESANJORUN UZUNLUGU="; DLSOIS; "M"
STOP
PRINT "SUREKLI REJIM HALINDEKI DEGERLER"
PRINT "-----"
PRINT "TERMOAKUSTIK OLARAK TASINAN ISI="; HIS; "W"
PRINT "TERMOAKUSTIK OLARAK URETILEN GUC="; WIS; "W"
PRINT "IS URETEN YAPIDAKI SICAKLIK GRADYANI="; GTMIS; "C/M"
PRINT "SICAKLIK GRADYANININ KRITIK GRADYANA ORANI="; FIIS
PRINT "REZONATOR YUZEYLERINDEKI TOPLAM"
PRINT "AKUSTIK GUC KAYBI="; EREZ; "W"
PRINT "ACIK REZONATOR UCUNDAN CEVREYE YAYILAN"
PRINT "AKUSTIK GUC="; ERAD; "W"
PRINT "SICAK ESANJORDEKI AKUSTIK GUC KAYBI="; ESKAY1; "W"
PRINT "SOGUK ESANJORDEKI AKUSTIK GUC KAYBI="; ESKAY2; "W"
PRINT "URETILEN AKUSTIK GUCUN UYGULANAN"
PRINT "ELEKTRIK GUCUNE ORANI="; ETAEL
PRINT "URETILEN AKUSTIK ISIN TERMOAKUSTIK OLARAK"
PRINT "TASINAN ISIYA ORANI="; ETAT
PRINT "ACIK UCTAN YAYILAN AKUSTIK GUCUN, UYGULANAN ELEKTRIK"
PRINT "GUCUNE ORANI="; ETAY
PRINT "ACIK UCTAN YAYILAN AKUSTIK GUCUN, TERMOAKUSTIK OLARAK"
PRINT "TASINAN ISIYA ORANI="; ETAYT
U1SIIS = (1 + B / YOIS) * PA * COS(LSIIS * 2 * PI / LAMB)
/ (YOGIS * CIS) * (1 - DVISIS / (2 * YOIS))
U1SOIS = (1 + B / YOIS) * PA * COS(LSOIS * 2 * PI / LAMB)
/ (YOGIS * CIS) * (1 - DVISIS / (2 * YOIS))
DSIIS = 2 * U1SIIS / OMEGA
DSOIS = 2 * U1SOIS / OMEGA
RESIIS = U1SIIS * DVISIS / VISIS
RESOIS = U1SOIS * DVISIS / VISIS
STOP
PRINT
PRINT "ONERILER ve KRITIK DEGERLER"
PRINT "-----"
PRINT
PRINT "IDEAL ESANJOR UZUNLUKLARI:"
PRINT "DLSIIS="; DSIIS; "M"
PRINT "DLSOIS="; DSOIS; "M"
PRINT
PRINT "TURBULANS KONTROLU:"
PRINT "RESIIS="; RESIIS, "RESOIS="; RESOIS
IF RESIIS > 500 THEN PRINT "IS URETEN YAPININ SICAK UCU"
IF RESIIS > 500 THEN PRINT "CIVARINDA TURBULANS VAR"
IF RESOIS > 500 THEN PRINT "IS URETEN YAPININ SOGUK UCU"
IF RESOIS > 500 THEN PRINT "CIVARINDA TURBULANS VAR"
END

```


ÖZGEÇMİŞ

1967 yılında Bursa'da doğan Murat HOŞÖZ, 1984 yılında Bursa Demirtaşpaşa Endüstri Meslek Lisesinden mezun oldu. Aynı yıl Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Makina Mühendisliği öğrenimine başladı. 1988 yılında bölüm ikincisi olarak buradan mezun olduktan sonra İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı Enerji Programında Yüksek Lisans öğrenimini sürdürdü. 1989-1991 yılları arasında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. 1990 yılında tamamladığı Yüksek Lisans çalışmasından sonra YÖK-Dünya Bankası Endüstriyel Eğitim projesi sınavlarını kazanarak, A.B.D. Ferris State Üniversitesinde bir yıl süreyle iklimlendirme-soğutma eğitimi gördü. 1991 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi Kocaeli Meslek Yüksekokulu İklimlendirme-Soğutma Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmakta ve 1992 yılından bu yana İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı Enerji Programında Doktora öğrenimini sürdürmektedir.