İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

175789

HAREKETLİ SIVI KOLONUNDA ISI GEÇİŞİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Ünal AKDAĞ
(503982051)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21 Nisan 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Temmuz 2005

Tez Danışmanı : Prof.Dr. A. Feridun ÖZGÜÇ
Diğer Jüri Üyeleri Yrd.Doç.Dr. Mustafa ÖZDEMİR (İTÜ)
Prof.Dr. Salim ÖZÇELEBİ (İ.Ü.)
Prof.Dr. İsmail TEKE (Y.T.Ü.)
Prof.Dr. Nurdil ESKİN (İTÜ)

TEMMUZ 2005

ÖNSÖZ

Zamana bağlı ısı ve kütle transferi olaylarıyla pratikte sıkça karşılaşılır. Geçici rejim veya zamana bağlı olayların bir kısmı darbeli veya yönü periyodik olarak değişen sinüzoidal salınımlı akışlar içerir. Periyodik akışlar salınımlı ve pulsatif akışlar olmak üzere iki farklı alt guruba ayrılmıştır. Bu akışlara verilebilecek doğal bir örnek insanların solunum ve dolaşım sistemlerindeki biyolojik akışlardır. Bu tür akış olayları aynı zamanda içten yanmalı motorların doldurma, boşaltma işlemleri ve pistonun hareketi, hidrolik ve pnömatik hatlar, kontrol sistemleri, özel tip ısı değiştiricileri, ısı boruları ve Stirling çevrimine göre çalışan makinalar gibi pek çok mühendislik sistemlerinde kullanılmaktadır. Salınımlı ve pulsatif akışta ısı ve kütle geçişi mekanizmasının çok iyi anlaşılması bu tür cihazların geliştirilmesinde çok büyük önem arz etmektedir. Salınımlı akışta ısı geçişi konusu son yıllarda üzerinde araştırma yapılan en önemli konulardan birisi olmuştur. Bu çalışmada, henüz üzerinde araştırmanın yapılmadığı düşey halkasal bir boruda atmosfere açık hava sıvı arayüzeyine sahip salınımlı akışta ısı geçişi mekanizması deneysel ve teorik olarak incelenmiştir.

Tez çalışmalarım esnasında geniş bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, her konuda desteğini gördüğüm tez danışmanım İ.T.Ü. Makina Fakültesi öğretim üyesi sayın Prof.Dr. A.Feridun ÖZGÜÇ'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmalarımı yakından takip eden, deneysel çalışmalarımda ihtiyaç duyduğum sistemlerin temin edilmesinde yardımlarını esirgemeyen İ.T.Ü. Makina Fakültesi öğretim üyesi sayın Yrd.Doç.Dr. Mustafa ÖZDEMİR'e, aynı ortamı paylaştığım İ.T.Ü Makina Fakültesi Isı ve Kütle Geçişi laboratuvarında bulunan mesai arkadaşlarıma ve deneysel düzeneğin hazırlanmasında yardımcı olan teknisyen Selman BENLİ'ye teşekkür ederim. Tez çalışmalarımda katkısı olan ancak beklenmedik bir anda aramızdan ayrılan merhum Prof.Dr. Osman F. GENCELİ'yi rahmetle anarım. Ayrıca, tez çalışmalarım süresince her zaman yanımda olan, sıkıntı ve mutluluklarımı birlikte paylaştığım oğlum Sancar'a ve eşim Yasemin'e de teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2005 Ünal AKDAĞ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
SEMBOL LİSTESİ ix
ÖZET xi
SUMMARY xii

1. GİRİŞ 1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI, TEORİK ESASLAR 3
2.1 Giriş 3
2.2 Fluidyne Isı Makinesi 3
2.3 Salınımlı Akış 5
2.3.1 Benzerlik parametreleri 6
2.3.2 Salınımlı akış karakteristikleri 7
2.3.3 Sürtünme katsayısı 10
2.3.4 Salınımlı akış hız profili 12
2.4 Salınımlı Akışta Isı Geçişi 15
2.4.1 Salınımlı akışta eksenel yayılım ile ısı geçişi 15
2.4.2 Salınımlı akışta taşınımla ısı geçişi 19
2.5 Sonuçlar 23

3. DENEYSEL ÇALIŞMA 25
3.1 Deney Tesisatı 25
3.2 Deneylerin Yapılışı 26
3.3 Deneysel Ölçmeler 29
3.3.1 Sıvı kolonu konum-zaman değerlerinin bulunması 30
3.3.2 Isıtıcı yüzey sıcaklığının belirlenmesi, 31
3.3.3 Problardan ölçülen sıcaklıklar 33
3.3.4 Cam dış yüzey sıcaklıkları, 35
3.4 Isı Geçişi Hesabı 35
3.4.1 Düşey boruda doğal taşınımla ısı kaybı 37
3.4.2 Soğutma suyu tarafından çekilen ısı 37
3.5 Kütlesel Yayılımla Buharlaşma 38
3.5.1 Salınımlı akışta kütlesel yayılım 38
3.6 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesinde İzlenen Hesap Yöntemi 42
3.7 Salınımlı Akış Nusselt Sayısının Daimi Akış ile Karşılaştırılması 49
3.8 Boyut Analizi 50
3.9 Gözlemler 51

4. FORMÜLASYON **52**
4.1 Diferansiyel Formülasyon 52
4.1.1 Hız profilinin bulunması; 55
4.2 Kontrol Hacmi Formülasyonu 58
4.2.1 Kontrol hacmi yaklaşımı ile Hareketli Sıvı Kolonunun modellenmesi 58
4.2.2 Elde edilen denklemler; 64
4.2.3 Denklemlerin boyutsuzlaştırılması 64
4.2.4 Denklemlerin çözümü 64
4.2.5 Sonuçlar 64

5. SAYISAL ÇÖZÜM **70**
5.1 Giriş 70
5.2 Çözüm alanı ve Kullanılan Yöntem 70
5.3 Kabuller ve Sınır Şartları 73
5.4 Korunum Denklemleri 74
5.5 Sonuçlar 77

6. SONUÇLAR **87**
6.1 Değerlendirme 87
6.2 Gözlemler 89
6.3 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar 90

KAYNAKLAR **91**

EKLER **95**

ÖZGEÇMİŞ **114**

KISALTMALAR

CFD : Computational Fluid Dynamics
HSK : Hareketli Sıvı Kolonu
İAB : İç Akış Bölgesi
PISO : Pressure-Implicit with Splitting of Operators
VOF : Volume of Fluid

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1.	Periyodik akış için β_{cri} nin kritik değerleri.[4]	9
Tablo 3.1.	Termoeleman uçlarının konumları	29
Tablo 5.1.	Ayrıklaştırma yöntemleri	72
Tablo 5.2.	Başlangıç şartları	74
Tablo B.1.	Deneylerde ***Nu*** sayısının belirsizliği	100
Tablo E.1.	Boyut matrisi	106
Tablo E.2.	Çözüm matrisi	107
Tablo F.1.	Yapılan deneyler ve değiştirilen temel parametreler	109
Tablo G.1.	Yapılan deneyler ve fiziksel ölçmeler	110
Tablo H.1.	Nusselt Sayıları	112

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	: Tipik bir Fluidyne Isı Makinası.....	4
Şekil 2.2	: Şekil 2.2 (a) Merkli ve Thoman [15] ve (b) Sergeev [7] tarafından yapılan hareketli sıvı kolonunda hız ve basınç düşümü ile ilgili çalışmalar için oluşturulmuş deney düzenekleri.....	8
Şekil 2.3	: Re_ω nın çeşitli değerleri için hız profilleri [4].....	15
Şekil 2.4	: Uchida [6] tarafından elde edilen Re_ω nın iki farklı değeri için hız profilleri.....	14
Şekil 2.5	: Zhao ve Cheng [21] tarafından bulunan sonlu uzunluktaki boru boyunca hız profilleri (A_o=10, Re_ω =100, D/L=20).....	14
Şekil 2.6	: Kurzweg vd. [16] tarafından geliştirilen test düzeneği (dream pipe).....	15
Şekil 2.7	: Hareketli sıvı kolonunda eksenel iletimle ısı geçişi için Nishio vd. [24] tarafından verilen şematik durum.....	17
Şekil 2.8	: Nishio tarafından verilen sıvı kolonunda ısı geçişi için anlık değerler [24].....	18
Şekil 2.9	: Zhao ve Cheng [23] tarafından yapılan çalışmalarda kullanılan salınımlı akış deney düzeneği.....	20
Şekil 2.10	: Cooper vd. [30] tarafından yapılan deneysel çalışma için oluşturulmuş test düzeneği.....	22
Şekil 2.11	: Chen, Z.D. ve Chen, J.J.J. [31] deney düzeneği.....	23
Şekil 3.1	: Deney düzeneği.....	27
Şekil 3.2	: Deney tesisatı fotoğrafı.....	27
Şekil 3.3	: Hareketli sıvı kolonu geometrisi ve termoelemanların konumları.....	28
Şekil 3.4	: Sıvı kolonu konum-zaman değerleri.....	30
Şekil 3.5	: Isıtıcı iç yapısı ve termoelemanların konumları.....	31
Şekil 3.6	: Bir noktadan ölçülen yüzey sıcaklığının zamanla değişimi (Deney-13 ω=1,435 rad/s, x_m=0.25 m, q=100W, z_o=1.575 m)	32
Şekil 3.7	: Isıtıcı ortalama yüzey sıcaklıklarının ısıtıcı boyunca değişimi (A_o=12.88).....	33
Şekil 3.8	: Hava ve su için kesit ortalama sıcaklıklarının zamanla değişimi.....	35
Şekil 3.9	: Salınımlı akışta kütlesel yayılım [42].....	39
Şekil 3.10	: Yayılımla buharlaşan kütlenin frekansla değişimi.....	42
Şekil 3.11	: Deneysel hesaplama için seçilen çözüm alanı ve boyutları.....	43
Şekil 3.12	: Nusselt sayısının boyutsuz parametrelere bağlı olarak değişimi.	47

Şekil 3.13 : Deney sonuçlarından elde edilen Nusselt sayıları ile literatürde bulunan korelasyonların karşılaştırılması..... 48
Şekil 3.14 : Nusselt sayılarının boyutsuz genliğe göre değişimi..... 48
Şekil 3.15 : Salınımlı akış ile daimi akış arasında Nu sayılarının karşılaştırması..... 50
Şekil 4.1 : Salınımlı akış alanı ve koordinat sistemi..... 52
Şekil 4.2 : Matematiksel model için Hareketli Sıvı Kolonu geometrisi..... 58
Şekil 4.3 : $V=V_A+V_B+V_C$ herhangi bir t anında kontrol hacimleri..... 62
Şekil 4.4 : Denklemlerin çözümünden elde edilen boyutsuz konum, hız ve sıcaklıkların zamanla değişimi (Z; konum, U; hız, θ_g; kontrol hacmine giriş sıcaklığı, θ_d; arayüzey sıcaklığı, θ_p; prob2 sıcaklığı, Re_ω=1000, A_o=12.88)..... 68
Şekil 4.5 : Denklemlerin çözümünden elde edilen boyutsuz sıcaklıkların deneysel sonuçlarla karşılaştırması (Re_ω=1000, A_o=12.88)..... 68
Şekil 4.6 : Denklemlerin çözümünden bulunan konum-zaman değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırması (ω=1.435 rad/s, z_o=1.575 m, x_m=0.25 m)..... 69
Şekil 5.1 : Çözüm alanı ve ağ dağılımının görünüşü..... 71
Şekil 5.2 : Kolon sıvı yüksekliğinin zamanla değişimi..... 77
Şekil 5.3 : Sıvı fazı (su) için hız dağılımı, (Re_ω=1000 A_o=12.88)..... 78
Şekil 5.4 : Sıvı fazı (su) için hız dağılımı, (Re_ω=3650, A_o=12.88)..... 78
Şekil 5.5 : Gaz fazı (hava) için hız dağılımı, (Re_ω=1000, A_o=12.88)..... 79
Şekil 5.6 : Gaz fazı (hava) için hız dağılımı, (Re_ω=3650, A_o=12.88)..... 79
Şekil 5.7 Sıvı fazı için çevrim boyunca sıcaklık dağılımı (Prob1, Re_ω=1000, A_o=12.88)..... 80
Şekil 5.8 : Sıvı fazı için çevrim boyunca sıcaklık dağılımı (Prob1, Re_ω=3650, A_o=12.88)..... 80
Şekil 5.9 : Gaz fazı için çevrim boyunca sıcaklık dağılımı (Prob2, Re_ω=1000, A_o=12.88)..... 82
Şekil 5.10 : Bir çevrim boyunca sıvı kolonunda eş sıcaklık eğrileri değişimi(Re_ω=1000, A_o=12.88)..... 83
Şekil 5.11 : Sıvı kolonu boyunca anlık hız dağılımı (Re_ω=1000, A_o=12.88)..... 84
Şekil 5.12 : Sayısal çözümden elde edilen ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile deneysel olarak bulunan değerlerin karşılaştırması (◇.Re_ω=1000, □Re_ω=2800)..... 85
Şekil 5.13 : Sayısal çözümden elde edilen Nusselt sayıları ile deneysel olarak bulunan değerlerin karşılaştırması (A_o=12.88)..... 86
Şekil C.1 : Cam cidarda sıcaklık dağılımı..... 101
Şekil C.2 : ω=1.435 rd/s için cam dış yüzey sıcaklıklarının karşılaştırması..... 104
Şekil C.3 : ω=2.723 rd/s için cam dış yüzey sıcaklıklarının karşılaştırması..... 104
Şekil D.1 : Deneysel konum-zaman değerlerinin ampirik bağıntılarla karşılaştırılması..... 105

SEMBOL LİSTESİ

A : Sıvı kolonu kesit alanı [m^2]
A_o : Boyutsuz genlik
A_p : Piston kesit alanı [m^2]
c, c_p, c_v : Özgül ısı [kJ/kg-K]
C : Derişiklik [$kmol/m^3$]
c_f : Sürtünme katsayısı
D : Hidrolik çap [m]
D_d : Cam boru dış çapı [m]
F : Sürtünme kuvveti [N]
h : Entalpi [kJ/kg]
h_w, $\bar{h}$: Isı geçiş katsayısı [W/m^2-K]
H_1, H_2 : Çevrim ortalama entalpileri [J]
k : Isı iletim katsayısı [W/m^2-K]
L : Isıtıcı boyu [m]
l_o : Probdan ısıtıcıya olan mesafe [m]
l_g : Sıvı kolonu başlangıcından ısıtıcıya kadar olan uzunluk [m]
Pr : Prandtl sayısı
P_o : Atmosfer basıncı [Pa]
P_x : Sıvı kolonu girişine etkiyen toplam basınç [Pa]
Q_k : Çevrim boyunca çevreye olan toplam ısı kaybı [J]
Q_l : Çevrim boyunca suya geçen toplam ısı [J]
q_e : Isıtıcı yüzeyinden olan toplam ısı akısı [W]
q_1'' : Isıtıcıdan kontrol hacmine geçen ısı [W/m^2]
q_2'' : Cam yüzeyden çevreye ısı akısı [W/m^2]
R_v : Volan yarıçapı [m]
Re_ω : Kinetik Reynolds sayısı
r_1, R_1 : İç boru yarıçapı [m]
r_2, R_2 : Dış boru yarıçapı [m]
x_m : Genlik [m]
t : Zaman [s]
T : Sıcaklık
T_a : Ortam sıcaklığı [°C]
T_b : Yığın (bulk) sıcaklık [°C]
T_{ca} : Test kısmının hava ile dolu kısmının dış yüzeyindeki ortalama sıcaklık [°C]
T_{cl} : Test kısmının su ile dolu kısmının dış yüzeyindeki ortalama sıcaklık [°C]
T_d : Arayüzey sıcaklığı [°C]
T_g : V_B kontrol hacmine giriş sıcaklığı [°C]
T_m : Akışkanın yığın (bulk) sıcaklığı [°C]

T_p : Sayısal çözüm için Prob2 sıcaklığı [°C]
T_o : Sıvı kolonuna giriş sıcaklığı [°C]
T_{10}, T_{p1} : Prob 1 sıcaklığı [°C]
T_{20}, T_{p2} : Prob 2 sıcaklığı [°C]
T_{wo} : Çevrim ortalama yüzey sıcaklığı [°C]
u : Ortalama hız [m/s]
u_m : Maksimum hız [m/s]
v_s : Arayüzeyin hızı [m/s]
v, v_{L1}, v_1 : Ortalama sıvı hızı [m/s]
y : Düşey koordinat
y^* : Referans noktasından menüsküse olan mesafe [m]
z : Arayüzey konumu [m]
z_o : Titreşim ekseni, yada doldurma yüksekliği [m]

Simgeler:

α : Isı yayılım katsayısı [m^2/s]
β_{cri} : Boyutsuz laminerden türbülansa geçiş kriteri
δ, δ_u : Momentum (Stokes)sınır tabaka kalınlığı [m]
δ_t : Isıl sınır tabaka kalınlığı [m]
ϕ : Kayıp parametresi
ρ : Akışkanın yoğunluğu [kg/m^3]
ν : Kinematik viskozite [m^2/s]
θ : Boyutsuz sıcaklık
τ : Çevrim süresi [s], boyutsuz zaman
ω : Açısal frekans [rad/s]

Alt Simgeler:

a : Hava
b : Buhar
c : Cam
$ç$: Çıkan
f : Sıvı
g : Giren
k : Kayıp
l : Sıvı
p : Prob

HAREKETLİ SIVI KOLONUNDA ISI GEÇİŞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, bir ucu atmosfere açık düşey halkasal sıvı kolonunda, sinüzoidal zorlanmış laminer bir akışta, ısı geçişi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel ölçmeler ve değerlendirmeler sonucunda, sabit ısı akısına sahip bir yüzeyden, salınımlı akışta ısı geçişine etki eden parametrelerin frekans ve genlik olduğu görülmüştür. Deneysel ölçmelerden, atmosferik şartlarda suyun buharlaşma için doyma sıcaklığına ulaşmadığı ve bu yüzden buharlaşmanın sadece kütlesel yayılım ile (difüzyonla) gerçekleştiği anlaşılmıştır. Buharlaşan su miktarının son derece az olmasından dolayı ısı geçişi mekanizmasını etkilemediği kabul edilmiştir. Deneylerden elde edilen değerler için bir hesap tarzı geliştirilmiş ve Nusselt sayıları bulunmuştur. Bulunan Nusselt sayıları için boyutsuz sayılara bağlı olarak bir korelasyon bağıntısı verilmiştir. Bu bağıntı literatürde bulunan benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Deney tesisatı ve salınımlı akışa uygun olarak kurulan matematiksel model iki farklı yaklaşımla ele alınmıştır. İlk olarak diferansiyel yaklaşımla genel olarak ele alınan kütle, momentum ve enerji denklemleri salınımlı akış şartlarına göre sadeleştirilerek geçerli denklemler bulunmuştur. Hız profili için halkasal kesitte sınır şartları yazılarak momentum denklemi analitik olarak çözülmüştür. İkinci olarak kontrol hacmi yöntemiyle integral formda kütle, momentum ve enerji denklemi yazılarak hareketli sınıra sahip kontrol hacminde ısıl enerji dengesi yazılmıştır. Arayüzey fiziğinin de dahil edildiği yönetici denklemler elde edilerek, Runge-Kutta yöntemiyle çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar deneylerle karşılaştırılarak aralarındaki uyum gösterilmiştir.

Sonlu hacimler ayrıklaştırma yöntemine göre çözüm yapan FLUENT yazılımı kullanılarak Hareketli Sıvı Kolonu sayısal olarak da incelenmiştir. Yapılan incelemelerde sıvı içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımı elde edilerek ısı geçiş mekanizması ortaya çıkarılmıştır. Isı geçişinde etkili olan mekanizmanın akışın merkezini takip edemeyen hidrodinamik sınır tabakadan kaynaklandığı, bu durumun ısı geçişini artırdığı anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçlardan bir çevrim boyunca ısıtıcı yüzeyinden suya geçen ısı bulunarak Nusselt sayıları cinsinden verilmiştir. Sayısal çözümden elde edilen sonuçlarla deneylerin birbirine uyduğu görülmüştür.

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN MOVING LIQUID COLUMN

SUMMARY

In this study, heat transfer in a laminar oscillating vertical annular liquid column having an interface with the atmosphere investigated experimentally and theoretically. Experimental study proved that the frequency and displacement amplitude were two important parameters affecting heat transfer from a uniform heat flux surface to reciprocating flow. With the help of experimental measurements, it is revealed that during to atmospheric conditions, water can not reach to the saturation temperature for evaporation and for this reason evaporation occurs only with the mass diffusion. Because of having extremely low evaporated water quantity, it is assumed that it does not affect the heat transfer mechanism. For the experimental investigation a new approach was considered in the calculation of Nusselt number. A correlation equation was obtained for the Nusselt number depending on dimensionless numbers.

Experimental setup and mathematical model related to reciprocating flow were examined with two different approximations. First of all, mass, momentum and energy equations examined generally by using differential approximation were simplified according to reciprocating flow and governing equations were obtained. In order to obtain velocity profile, using the appropriate boundary conditions in an annular cross section, momentum equations were solved analytically. Secondly, using the control volume approach mass, momentum and energy equations were written in integral form, then energy balance on the moving control volume were written. By getting governing equations which include interface physics, they are solved employing Runge-Kutta methods. The solutions are compared with the experimental data.

Heat transfer in the moving liquid column was also investigated numerically using the Fluent CFD code which uses a finite volume discretization method. Velocity and temperature profiles obtained numerically over a cycle were examined to gain insight into the heat transfer process of the problem. It is understood that, the mechanism that is effectual on heat transfer is due to the hydrodynamic boundary layer which can not follow the core flow. Because of this condition, it is found that the heat flow has been increasing. With the help of obtained results, heat transfer from heating surface to the water over a cycle is was given in terms of Nusselt numbers. Numerically calculated cycle averaged Nusselt numbers were compared with the experimentally determined Nusselt numbers. The agreement between the two results is reasonably good.

1. GİRİŞ

Son zamanlarda, ısı geçişinin iyileştirilmesi yönündeki çalışmalar, uzmanları değişik arayışlara itmiştir. Günlük hayatta sıkça kullanılan bilgisayar vb. elektronik cihazların boyutlarının giderek küçülmesiyle birlikte daha dar alanda daha çok ısının çekilmesi büyük önem kazanmıştır. Bu durum, termosifonlar ve ısı boruları gibi küçük boyutlarına göre, yüksek ısı geçişi sağlayan cihazlara olan ilgiyi artırmıştır. Özellikle içerisinde hareketli parça içermeyen cihazlar, bakım ve işletme maliyetlerinin düşük, imalatının ucuz ve kolay olmasından dolayı daha çok tercih edilmektedir. Bu tip uygulamalara daha çok kompakt ısı değiştiricilerinde, nükleer reaktörlerin soğutulmasında, Stirling çevrimine göre çalışan makinalar, içten yanmalı motorlar ve özel tip soğutucuların yapımında rastlanmaktadır. Bölüm.2'de bu akışlar ve kullanıldığı alanlarla ilgili geniş bir değerlendirme yapılmış olup, Hareketli Sıvı Kolonuna (HSK) benzer bir uygulama da, Stirling çevrimine göre çalışan fluidyne ısı makinasında görülmektedir. Bu çalışmada oluşturulan model, fluidyne ısı makinası üzerinde yapılan çalışmalardan kaynaklanmıştır.

Zamana bağlı ısı ve kütle transferi olaylarıyla pratikte sıkça karşılaşılır. Geçici rejim veya zamana bağlı olayların bir kısmı darbeli veya yönü periyodik olarak değişen sinüzoidal salınımlı akışlar içerir. Periyodik akışlar, salınımlı akış (reciprocating flow) ve pulsatif akışlar (pulsating flow) olmak üzere iki farklı alt guruba ayrılmıştır. Bu akışlara verilebilecek doğal bir örnek insanların solunum ve dolaşım sistemlerindeki biyolojik akışlardır. Bu tür akış olayları aynı zamanda içten yanmalı motorların doldurma, boşaltma işlemleri ve pistonun hareketi, hidrolik ve pnömatik hatlar, kontrol sistemleri, özel tip ısı değiştiricileri, ısı boruları ve Stirling çevrimine göre çalışan makinalar gibi pek çok mühendislik sistemlerinde kullanılmaktadır. Salınımlı ve pulsatif akışta ısı ve kütle geçişi mekanizmasının çok iyi anlaşılması bu tür cihazların geliştirilmesinde çok büyük önem arz etmektedir. Salınımlı akışta ısı geçişi konusu son yıllarda üzerinde araştırma yapılan en önemli konulardan birisi olmuştur. Bu çalışmada, henüz üzerinde araştırmanın yapılmadığı düşey halkasal bir

boruda atmosfere açık hava sıvı arayüzeyine sahip salınımlı akışta ısı geçişi mekanizması deneysel ve teorik olarak incelenmektedir. Yapılan incelemeler bölümler halinde verilmiştir.

Bölüm 2'de, salınımlı akış ile ilgili temel bilgiler ve daha önce yapılan çalışmalar tartışılmıştır. Bu çalışmada sunulacak modelde, başka hangi parametrelerin ve fiziksel olayların dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalar incelenerek kurulacak analitik model için yararlı sonuçlar çıkarılmıştır. Deneyler tek bir HSK imal edilerek yapılmıştır. Bu yüzden geometrik parametrelerin *(L/D)* etkisi ortaya çıkarılamamıştır. Ancak literatürde verilen deneysel ve analitik sonuçlar bu parametrelerin etkilerini kalitatif olarak açıklamaktadır.

Bölüm 3'de, yapılan deneysel çalışma tanıtılmıştır. Deney düzeneği ve deneylerin yapılışı anlatılarak, deneysel ölçmeler hakkında bilgi verilmiştir. Deneylerin hangi şartlarda yapıldığı, hangi parametrelerin değiştirildiği ve ısı kayıplarının nasıl hesaplandığı açıklanmıştır. Deneylerden elde edilen değerler için bir hesap tarzı geliştirilerek, bir çevrim boyunca suya geçen ısı için, Nusselt sayıları hesaplanmıştır.

Bölüm 4'te, salınımlı akışa göre temel (kütle, momentum ve enerji) denklemler yazılarak, yönetici denklemler bulunmuştur. Bu denklemlerin boyutsuzlaştırılması ile sistemin bağlı olduğu fiziksel parametreler elde edilmiştir. Daha sonra sistem, kontrol hacmi formülasyonuna göre modellenmiş ve elde edilen denklemler Runge-Kutta yöntemi ile çözülmüştür. Bu çözüm için MATLAB programlama dili kullanılmış ve kodları Ek-A da verilmiştir.

Bölüm 5'te bir çevrim boyunca ısıtıcı yüzeyinden suya geçen ısı için sayısal bir inceleme yapılmıştır. Yapılan incelemelerde, sıvı içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımı bulunarak ısı geçiş mekanizması ortaya çıkarılmıştır. Sayısal çözümden elde edilen sonuçlarla, deneyler karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Bunun için, sonlu hacımlar ayrıklaştırma yöntemine göre çözüm yapan FLUENT yazılımı kullanılmıştır.

Bölüm 6'da, yapılan çalışmada elde edilen deneysel ve sayısal çözüm için genel bir değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar tartışılarak bu konuda yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI, TEORİK ESASLAR

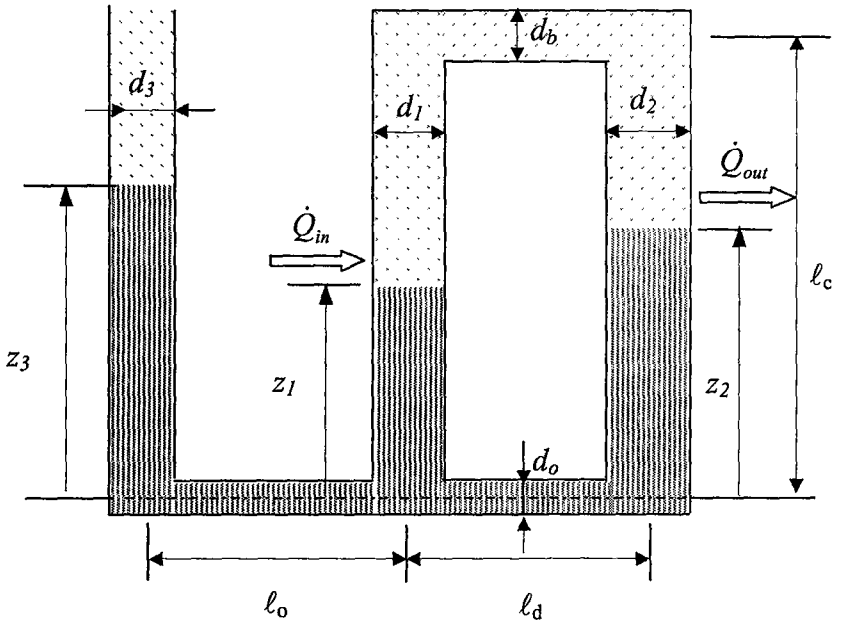
2.1 Giriş

Bu bölümde salınımlı akışlar ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar, konunun gelişim sırasına göre kısımlar halinde incelenmektedir. İlk olarak, mevcut çalışmanın nereden kaynaklandığı ve bu konu ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir. Daha sonra, salınımlı akışla ilgili akış karakteristikleri, sürtünme kayıpları ve ısı geçişi ile ilgili çalışmalar anlatılmaktadır. Salınımlı akışta ısı geçişi üzerinde yapılan çalışmalar, eksenel iletimle ve taşınımla ısı geçişi olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir.

2.2 Fluidyne Isı Makinası

Hareketli sıvı kolonuna benzer bir uygulama, Stirling çevrimine göre çalışan Fluidyne Isı Makinasında görülmektedir. Endüstride atık ısıların değerlendirilmesi için bu tip ısı makinaları kullanılmaktadır. Bu çalışmada oluşturulan model, fluidyne ısı makinası üzerinde yapılan çalışmalardan kaynaklanmıştır. Fluidyne ısı makinası üzerinde yapılan pek çok çalışmanın yanında, Arslantürk [1] ve Arslantürk&Özgüç [2] tarafından yapılan deneysel ve teorik çalışmalar bu çalışma için bir temel teşkil etmiştir.

Tipik bir Fluidyne Isı Makinesi Şekil 2.1'de görülmektedir. Burada iki kolon atmosfere kapalı ve sadece bir kolon atmosfere açıktır. Düşey kolonlar sırasıyla; çıkış kolonu (üçüncü kolon), sıcak kolon (birinci kolon) ve soğuk kolon (ikinci kolon) olarak adlandırılmıştır. Sıcak kolonda, arayüzeye yakın bölgeden verilen ısı vasıtasıyla buharlaşan su, yoğuşma bölgesinde ısının çekilmesiyle yoğuşturulmaktadır. Sıcak ve soğuk kolonlardaki kütle giriş çıkışı ve buharın yatay boru boyunca ilerleyişi nedeniyle, buharlaşma ve yoğuşma bölgeleri arasında basınç farkı oluşmaktadır. Bu basınç farkı nedeniyle, sıvı kolonları daimi rejimde titreşim hareketi yapmaktadır. Çıkış kolonuna emme ve basma doğrultusunda konulacak birer



Şekil 2.1 : Tipik bir Fluidyne Isı Makinası

çekvalf ile su pompalamak mümkündür. Tamamen atık ısı veya güneş enerjisini ısı kaynağı olarak kullanıp, buradan aldığı ısının bir kısmını mekanik enerjiye çevirmesi bu makinanın en önemli özelliğidir. Arslantürk&Özgüç [2] yaptıkları deneyler sonucunda, sıvı kolonlarındaki hareketin zamanla değişiminin sinüzoidal olduğunu gözlemlemiş ve sıvı kolonlarının hareketi için aşağıdaki korelasyonu önermişlerdir.

$$h(t) = A + BCos(\omega t + \phi) \qquad \textbf{(2.1)}$$

burada; A : Kolonun salınım ekseninin referans düzlemine olan uzaklığı

B : Salınımın yarı genliği (osilasyon büyüklüğü)

ω : Açısal frekans

ϕ : Faz farkını

göstermektedir. Özdemir ve Özgüç [3] Fluidyne ısı makinesi için basit bir matematik model önermişlerdir. Bu çalışmada fluidyne ısı makinesi, kontrol hacmi metoduyla modellenmiş ve denklemler sayısal olarak çözülmüştür. Verilen ve çekilen ısı akılarına göre Fluidyne ısı makinesinin davranışı incelenmiş ve çalışma karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır. Ancak Fluidyne üzerinde yapılan çalışmalarda, sıcak ve soğuk sıvı kolonlarında gerçekleşen ısı geçişi mekanizması üzerinde ayrıntılı bir şekilde durulmamıştır. Bu tez çalışmasında, bu kolonlarda gerçekleşen

mekanizmanın anlaşılması ve ısı makinesinin performansının iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Yapılan çalışmalar ışığında, buharlaşmanın gerçekleştiği hareketli sıvı kolonundaki ısı geçişi ayrıntılı olarak incelenmektedir.

2.3 Salınımlı Akış

Salınımlı akışlar ile ilgili ilk bilimsel çalışmalar, düz boru ve kanallarda laminer akış bölgesinde yapılmıştır. Araştırmacılar, bu konuda ilk olarak akışın hidrodinamiğinin anlaşılması yönünde çalışmalar yapmışlardır. İlk yapılan çalışmalarda laminer akış göz önüne alınmış ve akışın iki boyutlu hız profili elde edilmiştir. Daha sonra yapılan çalışmalarda, sınır tabaka, sürtünme etkileri ve türbülanslı akış durumları incelenmiştir. Akışın hidrodinamiğinin anlaşılmaya başlanması ile birlikte salınımlı akışta ısı geçişi üzerinde çalışmalar artmıştır. Akışın salınımlı olması ısı geçişi problemlerini daha da karmaşık hale getirmektedir.

Bir boru içerisinde periyodik basınç değişimiyle oluşturulan salınımlı akış problemi pek çok araştırmacı tarafından analitik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bunların arasında Richardson ve Tyler [4] tarafından yapılan çalışmada salınımlı bir boru akışında ilk defa hız dağılımı ölçülmüş ve "halkasal etki "(annular effect) nin varlığı keşfedilmiştir. Hızlı osilasyon yapan bir boru akışında maksimum eksenel hızın borunun merkezinden ziyade cidarın yakınlarında oluştuğu görülmüştür ve buna da halkasal etki adı verilmiştir. Halkasal etkinin varlığı Womersley [5] ve Uchida [6] tarafından yapılan çalışmalarla hem sinüzoidal hem de sinüzoidal olmayan hareketlerde tam gelişmiş salınımlı akış için doğrulanmıştır. Bu çalışmalar Siegel [25] tarafından dikdörgen kanal ve paralel plakalar için de yapılmıştır. Akhavan vd. [8] tarafından yapılan çalışmalarda Uchida [6] nın analitik sonuçları, bir boru içerisindeki suyun salınımlı akışı için, deneysel hız profili ölçümleriyle de doğrulanmıştır.

Chatwin [9] tarafından yapılan bir çalışmada bir tüp içerisinde salınımlı akışta eksenel kütle yayılımı incelenmiş, akış deneysel ve teorik olarak modellenmiş ve denklemler analitik olarak çözülmüştür. Isı-kütle benzeşimi gözönüne alınarak bu çalışmanın akabinde bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Watson [10] tarafından yapılan çalışmada bir boru boyunca salınımlı akışta kütlesel yayılım teorik olarak modellenmiş ve daimi akışa göre kütlesel yayılım miktarının

daha fazla olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada boru boyunca kütlesel yayılım dağılımı analitik olarak elde edilmiş olup, olayın teorisinin anlaşılması açısından referans çalışmalardan birisidir.

Hino vd. [11] tarafından yapılan deneylerde, bir boru içerisindeki salınımlı akışta laminerden türbülansa geçiş için, frekansa bağlı olarak Stokes Sınır Tabakası kalınlığı belirlenmiştir.

Gerrard ve Hughes [12] salınımlı akışta giriş bölgesi üzerinde yaptıkları çalışmada, giriş uzunluğunun daimi akışa göre çok daha kısa olduğu ve karakteristik giriş uzunluğunun boru çapı kadar olduğunu belirtmişlerdir. Peacock ve Stairmand [13] laminer salınımlı akışta giriş bölgesinde hız profilininin üniform akışta olduğu gibi düz olma eğiliminde olduğundan, değişmediğini giriş ve çıkışta salınımlı akış hız profilinin korunduğunu belirtmişlerdir. Atabek vd. [14] salınımlı akış giriş bölgesindeki akış için, hız profili üzerinde çalışmalar yapmışlar ve hız dağılımını analitik olarak elde etmişlerdir.

Kurzweg vd. [16-18] tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, salınımlı akışın bağlı olduğu boyutsuz parametreler gözönüne alınarak, laminerden türbülansa geçiş bölgesi için bazı değerler tespit edilmiştir. Bu değerler analitik sonuçlarla karşılaştırılarak doğruluğu sağlanmıştır. Bu çalışmalarda sıcak ve soğuk iki rezervuar arasında oluşturulan yatay veya düşey eksenli sıvı kolonlarında ısı geçişi problemi bir boyutlu olarak incelenmiş ve nümerik olarak çözülmüştür. Zamana bağlı hız ve sıcaklık profilleri ve sıvının yer değiştirmesi çeşitli Womersley sayılarında elde edilmiştir. Bu çalışmalar için Kurzweg ve arkadaşları tarafından geliştirilen deneysel düzeneğe daha sonra araştırmacılar tarafından "rüya boru" (dream pipe) adı verilmiştir. Rüya boru mekanizması ile ilgili diğer araştırmacılar tarafından da çok sayıda inceleme yapılmış ve ısı geçişi mekanizması anlatılmıştır.

2.3.1 Benzerlik parametreleri

Bir boru içerisinde $(D = 2a)$ sinüzoidal olarak hareket eden piston-silindir düzeneği vasıtasıyla uygulanan periyodik basınç titreşimlerine maruz sıkıştırılamaz bir akışa, kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri uygulanır ve salınımlı akışa göre uygun fiziksel parametrelerle boyutsuzlaştırılırsa benzerlik parametreleri elde edilir [4].

Sıkıştırılamaz akışkanın bir boru içerisindeki salınımlı hareketinde ısı geçişi üzerinde etkili olan benzerlik parametreleri A_0, Re_ω (yada λ), Pr, ve L/D dir.

Burada $\mathrm{Re}_\omega = \frac{\omega D^2}{\nu}$ kinetik Reynolds sayısıdır ve ν de akışkanın kinematik viskozitesidir, $A_0 = \frac{x_m}{D}$ boyutsuz genliktir, ve $\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{\alpha_f}$ Prandtl sayısıdır, α_f de akışkanın ısı yayılım katsayısıdır. Ayrıca x_m salınımın genliğini, ω da frekansı göstermektedir. Sonlu uzunluktaki bir boruda bu tip bir akışta ısıtıcı uzunluğunun hidrolik çapa oranı olarak tarif edebileceğimiz L/D de bir parametre olarak gözönüne alınır. Burada özellikle belirtmek gerekir ki, bazı araştırmacılar benzerlik parametresi olarak Re_ω kinetik Reynolds sayısını, bazıları da Re_{max} Reynolds sayısını kullanmaktadır. Bu sayılar arasında,

$$Re_{max} = \frac{u_m D}{\nu} = \frac{x_m \omega D}{2\nu} = \frac{A_0}{2} Re_\omega \qquad \textbf{(2.2)}$$

şeklinde bir ilişki olduğu görülür. Bazı araştırmacılar tarafından osilasyon frekansının etkisini belirtmek için bu sayılar yerine Womersley sayısıda kullanılmaktadır. Bu sayı,

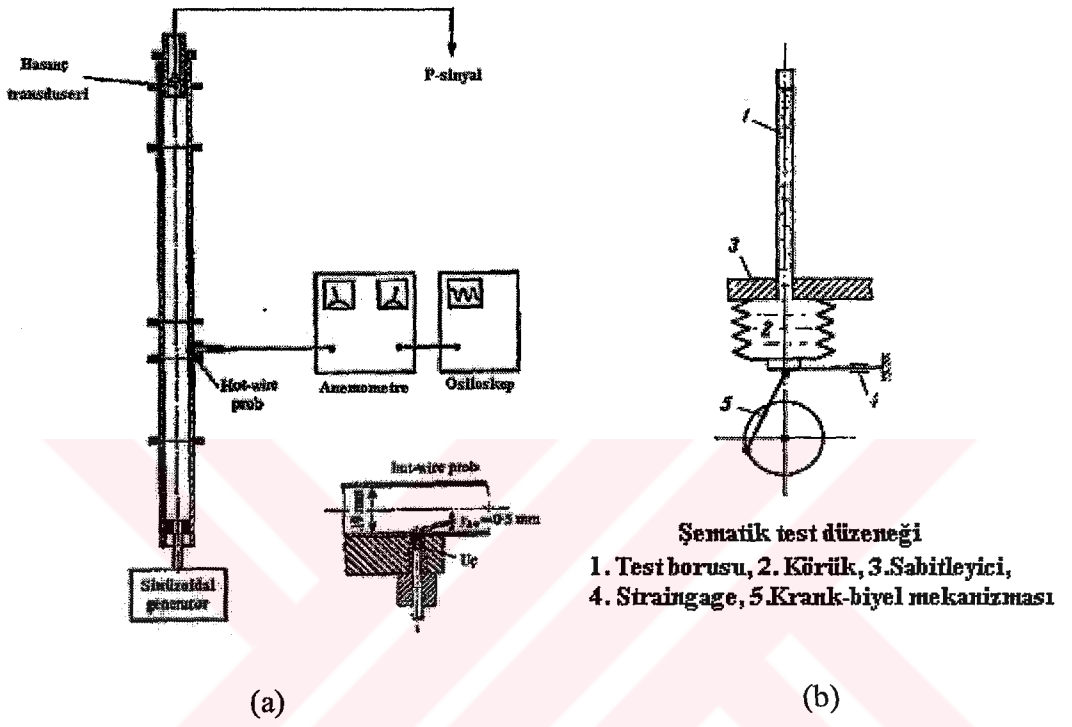
$$Wo = \lambda = a\sqrt{\frac{\omega}{\nu}} = \frac{1}{2}\sqrt{\mathrm{Re}_\omega} \qquad \textbf{(2.3)}$$

olarak belirtildiğinden, kinetik Reynolds sayısının değişik bir ifadesidir. Özet olarak sıkıştırılamaz akışkanın bir boru içerisindeki salınımlı hareketinde etkili olan benzerlik parametreleri A_0 , Re_ω (yada λ), Pr, ve L/D olarak belirtilebilir.

2.3.2 Salınımlı akış karakteristikleri

Isı geçişi ve sürtünme kayıpları için korelasyon eşitlikleri elde edilmeden önce akışın türbülanslı mı yada laminer mi olduğu bilinmelidir. Daha önce yapılan deneysel çalışmalara dayanarak geliştirilen korelasyonlar ve türbülansın başlangıcı için tahmin edilen değerler, uygun benzerlik parametreleri kullanılarak araştırmacılar tarafından sunulmuştur [10-16]. Salınımlı akışta türbülans başlangıcının tespiti ile ilgili araştırmacılar tarafından çok sayıda çalışma yapılmıştır. Genelde yapılan ölçümler salınımlı akışta türbülansa geçişin daimi akıştan farklı olduğunu göstermiştir.

Sergeev [7] sıkıştırılamaz viskoz bir akış için laminerden türbülansa geçiş üzerinde çalışmış ve bu kritik durum için bir korelasyon eşitliği önermiştir. Zhao ve Cheng [19-20] tarafından yapılan çalışmalarda hot-wire anemometresiyle, salınımlı bir akışta yapılan ölçümlerde, A_0 ve Re_ω, nin artan değerlerinde, cidara yakın olan



Şekil 2.2 : (a) Merkli ve Thoman [15] ve (b) Sergeev [7] tarafından yapılan hareketli sıvı kolonunda hız ve basınç düşümü ile ilgili çalışmalar için oluşturulmuş deney düzenekleri

kısımlarda periyodik türbülansın başladığı gözlenmiştir. Burada yapılan gözlemlerde duvar kenarındaki çalkantı değerlerinin borunun merkezine göre çok daha güçlü olduğu belirtilmiştir. Boru cidarına yakın bölgede oluşan rahatsızlıkların sebep olduğu çalkalanmaların radyal momentum transferine sebep olduğu, bu sebeple çalkantı değerlerinin daha düşük değerlerde merkeze doğru iletildiği anlaşılmıştır. Bu yüzden yüksek kinetik Reynolds sayılarında cidarın yakınlarındaki eksenel hızın merkezdeki eksenel hızdan daha büyük olduğu ve duvar yakınlarında hız profilinde bir bükülmenin olduğu yapılan ölçümler ve gözlemler sonunda tespit edilmiştir. Verilen genliğe (A_0) karşılık eğer kinetik Reynolds sayısı kritik bir değeri aşarsa ilk olarak cidarın yakınında rahatsızlıklar başlar ve cidar yakınında girdaplar oluşmaya başlar. Bu girdaplar iç akış bölgesine (akışın merkezine) transfer edilir, bu da küçük çalkantılara sebep olur.

Genel olarak salınımlı akışta türbülansa geçiş için iki önemli boyutsuz parametrenin etkili olduğu konusunda literatürde görüş birliği vardır. Boyutsuz genlik A_0 ve kinetik Reynolds sayısı Re_ω nin artmasıyla akıştaki rahatsızlıkların başladığı ve belirli bir değerden sonra türbülansın başladığı belirtilmiştir. Türbülansa geçiş için aşağıdaki bağıntı önerilmiştir [4].

$$\beta_{cri} = (A_0\sqrt{Re_\omega})_{cri} = (x_m\sqrt{\omega/\nu})_{cri} \tag{2.4}$$

Salınımlı akışta meydana gelen sınır tabakaya "Stokes-Sınır Tabakası" adı verilir, ve bu tabakanın kalınlığı $\delta \cong \sqrt{2\nu/\omega}$ olarak belirtilir. Yukarıdaki eşitlik (2.4) Stokes sınır tabakası cinsinden de ifade edilebilir,

$$\beta_{cri} = \sqrt{2}(\mathrm{Re}_\delta)_{cri} \tag{2.5}$$

Burada $Re_\delta = u_m\delta/\nu$, dir. Eşitlik (2.5) in fiziksel anlamı çok açıktır. Reynolds sayısı Re_δ Stokes sınır tabakası kalınlığı δ, belirli bir kritik değeri geçtiğinde türbülans başlayacaktır. Türbülansın başlangıcı için kritik değerler (β_{cri} değeri) çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilmiştir ve bu değerler Tablo 2.1 de verilmiştir. Burada bulunan kritik değerler arasındaki farklılıklar araştırmacılar tarafından kullanılan farklı yöntemler ve hatalardan kaynaklanmıştır. Bazı araştırmacılar akış görüntüleme yöntemi kullanarak türbülansın başlangıcını belirlerken bazılarıda hot-wire anemometresiyle yaptıkları ölçümleri esas almışlardır.

Tablo 2.1 : Periyodik akış için β_{cri} nin kritik değerleri [4]

Araştırmacı	Yıl	$\beta_{cri} = (A_0\sqrt{Re_\omega})_{cri}$
Li	1954	800
Collins	1963	230
Sergeev	1966	700
Vincent	1967	160
Pelissier	1973	150-420
Daneshvar	1973	730
Merkli&Thomann	1975	400
Hino, Savamoto&Takasu	1975	780
Ohmi, Iguchi&Urahata	1982	800
Kurzweg Lindgren&Lathrop	1989	700
Zhao&Cheng	1996	761

2.3.3 Sürtünme katsayısı

Harmonik olarak titreşen sonsuz uzunlukta düz bir levha üzerindeki durgun akışkanda, sınır tabaka davranışı Schlichting [32] tarafından incelenmiştir. Eğer plaka sinüzoidal bir kuvvetle hareket ettirilirse plakanın hızı aşağıdaki şekilde verilir.

$$u(0,t) = u_m Cos\,\omega t = \frac{x_m \omega}{2} Cos\,\omega t \tag{2.6}$$

Burada x akış doğrultusunu gösteren ve y de ona dik doğrultuyu gösteren koordinatlar olup, u_m osilasyon yapan plakanın hızını ve x_m de plakanın yer değiştirme büyüklüğünü göstermektedir. Bu şekilde osilasyonlar yapan bir plakanın üzerindeki akış için hız dağılımı Schlichting [32] tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$U(Y,\tau) = \frac{u(y,t)}{u_m} = e^{-\eta} Cos(\tau - \eta) \tag{2.7}$$

Burada $\eta = y\sqrt{\omega/2\nu}$ dir. Eşitlik (2.7) sönümlü bir harmonik titreşim hareketini ifade etmektedir, çünkü burada $e^{-\eta}$ ile verilen terim sönüm elemanıdır. Bir y mesafesindeki akışkan hızının sahip olduğu faz açısı $\eta = y\sqrt{\omega/2\nu}$, ile ilişkilidir. Burada önemli bir husus salınımlı sınır tabaka kalınlığının derecesi $\delta \sim \sqrt{2\nu/\omega}$ ile orantılı olmasıdır. Frekans arttıkça sınır tabaka kalınlığı incelmektedir. Burada düz levha için sınır tabaka kalınlığı (Stokes sınır-tabaka kalınlığı) Schlichting [32] tarafından aşağıdaki formülle verilmektedir.

$$\delta \cong \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \tag{2.8}$$

Aynı zamanda denklem (2.7)'den osilasyon yapan plakanın cidarındaki sürtünme katsayısı da belirlenebilir.

$$c_f = \frac{2\tau_w}{\rho u_m^2} = \frac{2\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0}}{\rho u_m^2} = \frac{4}{\sqrt{(Re_\omega)_x}} Sin(\omega t - \frac{\pi}{4}) \tag{2.9}$$

Burada $(Re_\omega)_x = \frac{\omega x_m^2}{\nu}$ düz plaka için kinetik Reynolds sayısıdır ve x_m de osilasyon yapan plakanın maksimum yer değiştirmesini göstermektedir.

Zhao ve Cheng [21] tarafından yapılan çalışmalarda, yatay bir dairesel boruda laminer tam gelişmiş salınımlı akışta sürtünme katsayısının tayini bu konuda daha önce yapılan çalışmalar kullanılarak deneysel ve teorik olarak incelenmiştir.

Boru içerisinde meydana gelen salınımlı akışta anlık sürtünme katsayısı c_f ve çevrimin ortalama sürtünme katsayısı $\bar{c}_f$ aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$c_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho u_m^2} = \frac{\mu(\frac{\partial u_t}{\partial r})_{r=a}}{\frac{1}{2}\rho u_m^2} \tag{2.10}$$

$$\bar{c}_f = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\sqrt{c_f^2}\,d\tau \tag{2.11}$$

burada μ akışkanın viskozitesidir. Eşitlik (2.10) tam gelişmiş bir akış için sürtünme katsayısını vermektedir ve bu da zamanın ve konumun bir fonksiyonudur. Laminer salınımlı tam gelişmiş bir boru akışında anlık ve çevrim ortalama sürtünme katsayılarının tam çözümleri Zhao ve Cheng [21] tarafından elde edilmiştir. Bunlar;

$$c_{f,\infty} = \frac{32F_\omega}{A_0}\sin(\phi + \phi_3) \tag{2.12}$$

$$\bar{c}_{f,\infty} = \frac{64F_\omega}{\pi A_0} \tag{2.13}$$

dır. Bir çevrim esnasında anlık sürtünme katsayısı negatif veya pozitif değerler alabilir, negatif değer aldığında akış pozitif olarak seçilen yönün tersine geri dönmüş demektir. Dikkat çeken bir başka noktada yukarıda verilen F_ω ve ϕ_3 ün yalnızca Re_ω nin fonksiyonu olduğudur. Bu ifadeleri hesaplamak için Re_ω değerlerine ihtiyaç vardır. Hesaplamalarda kolaylık olsun diye bu ifadeler bazı sınırlar dahilinde

araştırmacılar tarafından basitleştirilmiştir [4]. Eşitlik (2.13) deki F_ω ve ϕ_3 değerleri, $\mathrm{Re}_\omega \leq 400$ için aşağıdaki bağıntılarla hesaplanabilir.

$$F_\omega = \frac{0.161}{(\mathrm{Re}_\omega^{0.548} - 2.039)} \pm 3.3\% \tag{2.14}$$

$$\phi_3 = 0.647\,[1 - 1.015\,Exp(-0.019 Re_\omega)\,] \pm 1.9 \tag{2.15}$$

Eğer eşitlik (2.13) ü eşitlik (2.14) de yazarsak,

$$\bar{c}_{f,\infty} = \frac{3.272}{A_0(\mathrm{Re}_\omega^{0.548} - 2.039)} \tag{2.16}$$

yukarıdaki bağıntı bize çevrimin ortalama sürtünme katsayısını verir. Buradan da görüldüğü gibi ortalama sürtünme katsayısı A_0 ve Re_ω terimlerinin her ikisiyle de ters orantılıdır. Bu bağıntı (2.16) laminer salınımlı bir akışta yalnız $\mathrm{Re}_\omega \leq 400$ değerleri için geçerlidir.

2.3.4 Salınımlı akış hız profili

Uchida [6] bir dairesel boru içerisinde (çapı $D = 2a$ olan) tam gelişmiş laminer salınımlı akışta eksenel hız profili için tam çözümü elde etmiştir. Zhao ve Cheng [19] bu çözümü basitleştirerek hız profilini aşağıdaki formülle vermişlerdir. Bu hız profili,

$$u(r,t') = \frac{A_t}{\omega}\left[B\cos\omega t' + (1-A)\sin\omega t'\right] \tag{2.17}$$

dir. Burada A ve B sırasıyla aşağıda verilmiştir,

$$A = \frac{ber\lambda ber2\lambda R + bei\lambda ber2\lambda R}{ber^2\lambda + bei^2\lambda} \tag{2.18}$$

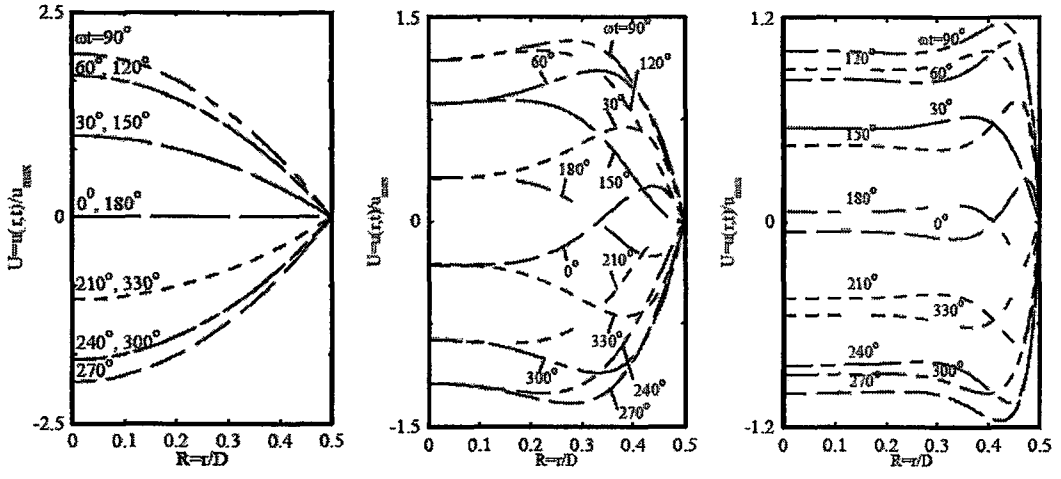
$$B = \frac{ber\lambda ber2\lambda R - bei\lambda bei2\lambda R}{ber^2\lambda + bei^2\lambda} \tag{2.19}$$

burada $R=r/D$ boyutsuz radyal koordinatı, λ Womersley sayısını göstermektedir. Ayrıca $I_0(\lambda\sqrt{i}) = ber(\lambda) + ibei(\lambda)$, olup bu ifadeler Bessel fonksiyonlarının özel kökleridir ve seri açılımları kitaplarda verilmiştir [39]. Eşitlik (2.17) nin boyutsuzlaştırılmasıyla tam gelişmiş laminer salınımlı akış için boyutsuz hız profili aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$U(R,\tau') = \frac{u}{u_m} = \frac{32}{\sigma Re_\omega}\left[B\cos\tau' + (1-A)\sin\tau'\right] \qquad \textbf{(2.20)}$$

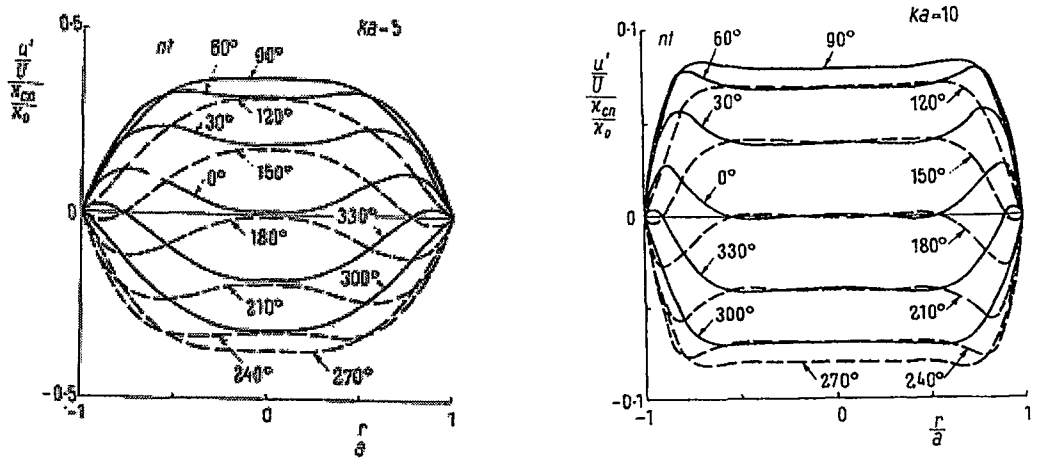
Burada $\tau' = \omega t'$ dür. Eşitlik (2.20) laminer salınımlı tam gelişmiş bir akış için boyutsuz eksenel hızı göstermektedir. Verilen bir konum ve zamanda hız yalnızca kinetik Reynolds sayısının bir fonksiyonudur, çünkü A, B ve σ da yalnızca Re_ω (ya da λ) ya bağlıdır.

Zhao ve Cheng [4] tarafından Re_ω nın üç farklı değeri için bulunan (Re_ω=1 , 200 ve 500) hız profilleri Şekil 2.3 de verilmiştir. Kinetik Reynolds sayısı çok küçük olduğunda (Şekil 2.3a, Re_ω=1) hız profili sanki daimi akışta olduğu gibi parabolik bir profile sahiptir. Bununla birlikte büyük Re_ω değerlerinde (Şekil 2.3b ve 2.3c) hız profillerinin değiştiği ve maksimum hızın cidarın hemen yakınlarında meydana geldiği görülmektedir. Bu "halkasal etki"dir ve yüksek kinetik Reynolds sayılarında meydana gelir. Şekil 2.3b de Re_ω=200 ve Şekil 2.3c de Re_ω=500 için salınımlı akış hız profilleri görülmektedir.



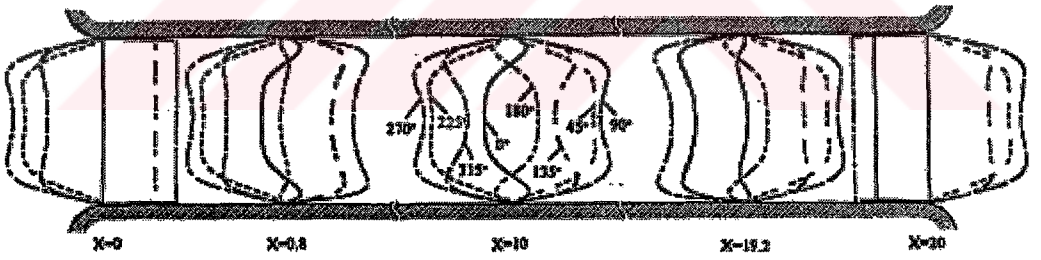
(a) Re_ω=1 (b) Re_ω=200 (c) Re_ω=500

Şekil 2.3 : Re_ω nın çeşitli değerleri için hız profilleri [4]



Şekil 2.4 : Uchida [6] tarafından elde edilen Re_ω nın iki farklı değeri için hız profilleri

Şekil 2.4 de Uchida [6] tarafından iki farklı frekans için elde edilen hız profillerinin bir çevrim boyunca değişimi görülmektedir. Şekil 2.4a'da frekans daha düşük olduğu için halkasal etki çok belirgin olmamıştır, burada hız profili parabol ile salınımlı akış hız profili arasında bir profile sahiptir. Şekil 2.4b'de daha yüksek frekansta hız profili üzerinde halkasal etki belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 2.5 : Zhao ve Cheng [21] tarafından bulunan sonlu uzunluktaki boru boyunca hız profilleri (A_0=10, Re_ω =100, D/L=20)

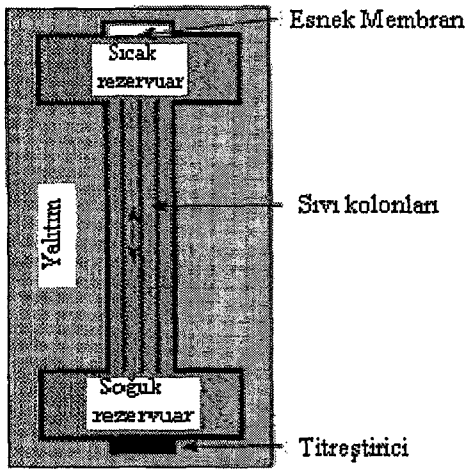
Şekil 2.5 de Zhao ve Cheng [21] tarafından yapılan sayısal çalışmada $A_0 = 10$, $Re_\omega = 100$, $L/D = 20$ değerleri için sonlu uzunluktaki bir boruda hız profilleri bulunmuştur. Burada, giriş ve çıkış etkileri gözönüne alınarak yapılan değerlendirmede hızın boru boyunca üniform olduğu ve kesit boyunca aynı yapıyı koruduğu görülmüştür. Yani giriş ve çıkışta hız dağılımı üniformdur ve hızın eksenel yöndeki değişimi sıfırdır.

2.4 Salınımlı Akışta Isı Geçişi

Salınımlı akış üzerinde yapılan deneysel ve teorik çalışmalarda ilk olarak kimyasal türlerin yayılımının salınımlı akışta davranışı incelenmiştir. Salınımlı akışta daimi akışa göre kütlesel yayılımın çok daha fazla olduğu görülmüştür. Isı ve kütle geçişi arasındaki benzeşimden yola çıkarak bu konuda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Isı geçişi ile ilgili ilk çalışmalar daha çok Kurzweg vd. [16] tarafından geliştirilen ve daha sonra rüya boru olarak adlandırılan sistem üzerinde ısı geçiş mekanizmasının anlaşılması üzerine yapılmıştır. Daha sonra, salınımlı akışta taşınımla ısı geçişi üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde, her iki durum için yapılan çalışmalardan ayrı ayrı bahsedilmiştir.

2.4.1 Salınımlı akışta eksenel yayılım ile ısı geçişi

Salınımlı akışta ısı ve kütle geçişi arasındaki benzeşimden yola çıkan araştırmacılar eksenel yönde ısı geçişini artırmak için çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapmışlardır. Kurzweg vd. [16-18] sıkıştırılamaz bir akışta biri sıcak ve diğeri soğuk olan iki rezervuar arasını, uzunluğu L olan boru demeti ile bağlayarak bir düzenek oluşturmuştur. Şekil 2.6'da da görüldüğü gibi, rezervuarların her ikisi de esnek membranlardan yapılmış olup, maksimum osilasyon büyüklüğünü karşılayacak şekilde hacim değişikliğine izin verilmiştir.



Şekil 2.6 : Kurzweg vd. [16] tarafından geliştirilen test düzeneği (dream pipe)

Burada amaç boru demetinde eksenel ısı iletiminin incelenmesidir. Kılcal boruların etrafı yalıtılarak bir boyutlu ısı iletim sağlanmıştır. Rezervuarın alt tarafından sinüzoidal hareket veren bir pistonla akışa osilasyonlar verilmiş ve bu durumdaki ısı iletiminin osilasyon olmadığı durum ile karşılaştırılması yapılmıştır. Salınımlı akışta eksenel ısı iletiminin çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Titreşimsiz durumda ısı geçişi;

$$Q = A_c k_f \frac{T_H - T_L}{L} \tag{2.21}$$

ifadesi ile verilmiştir. Burada A_c kılcal boruların kesit alanı, $k_f=\rho_f c\alpha_f$ de akışkanın ısı iletim katsayısıdır. Buradan yola çıkarak Kurzweg vd. [16-18] sıkıştırılamaz bir akışkan için salınımlı akışta ısı geçişi ifadesini benzer olarak şu şekilde yazmıştır.

$$Q = A_c \rho_f c \alpha_{eff} \frac{T_H - T_L}{L} \tag{2.22}$$

Burada α_{eff} efektif ısı yayılım katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Yapılan çalışmada aynı sıcaklık gradyanı için ısı akısının salınımlı akışta çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu cihaza daha sonra araştırmacılar rüya boru adını vermişler ve üzerinde çok sayıda araştırma yapmışlardır.

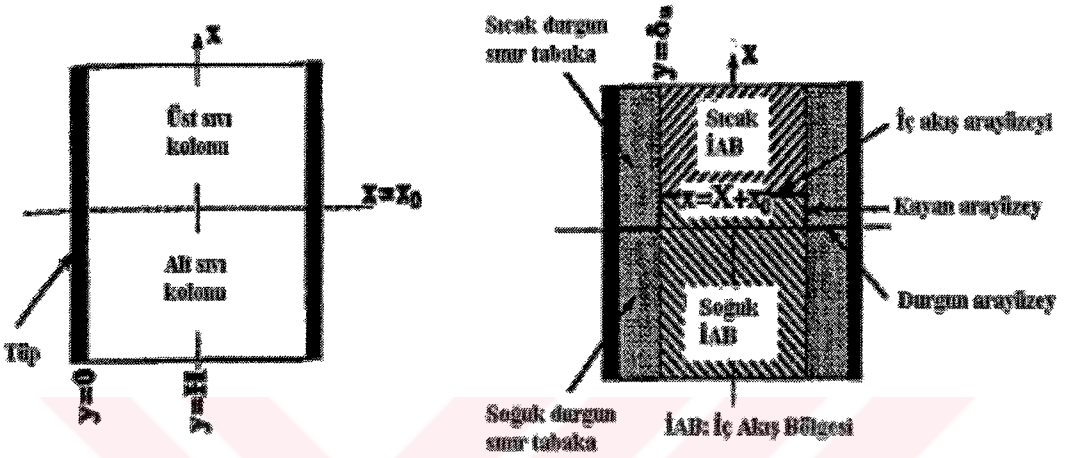
S. Nishio vd. [24], Kurzweg tarafından geliştirilen ve bir çeşit ısı borusuna benzeyen bu cihazı "osilasyon kontrollü ısı transfer tüpleri" olarak adlandırmış ve burada gerçekleşen ısı geçişi mekanizmasını açıklamıştır. Bu çalışmada *rüya boru* ile ilgili çalışmalar hakkında geniş bir literatür özeti verilmiştir. Burada efektif ısıl iletimin bu makinenin çalışmasında etkin bir rol oynadığı belirtilmiştir. İlk olarak cidarın ısı tutma kapasitesi ihmal edilerek akışkanın fiziksel özelliklerinin ısı geçişinin iyileştirilmesine etkisini, daha sonrada optimum çalışma şartlarının belirlenebilmesi için giriş gücünün ısı geçiş miktarına etkisini incelemişlerdir.

Bu çalışmada salınımlı akış için tüp cidarı yakınında hız ve ısıl sınır tabaka kalınlıkları aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\delta_u = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \qquad \text{(hız sınır tabaka kalınlığı)} \tag{2.23}$$

$$\delta_t = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \qquad \text{(ısıl sınır tabaka kalınlığı)} \tag{2.24}$$

Burada v viskozite ve α da ısı yayılım katsayısıdır. Bu çalışmada tüp cidarındaki ısıl kapasite ihmal edildiğinde kesitteki sıcaklık dağılımı üzerinde yalnızca hız profilinin etkili olduğu belirtilmiştir.



(a) (b)

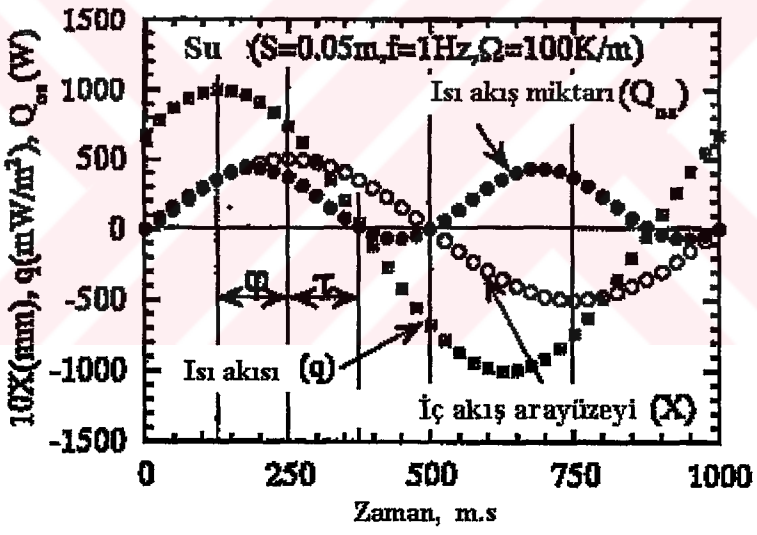
Şekil 2.7 : Hareketli sıvı kolonunda eksenel iletimle ısı geçişi için Nishio vd. [24] tarafından verilen şematik durum

Efektif iletimle ısı geçişini Nishio vd. [24], Şekil 2.7'de verilen iki boyutlu bir model üzerinde açıklamışlardır. Burada olayı basitleştirmek için iki boyutlu bir model seçilmiştir ve x ekseni boyunca eksenel sıcaklık gradyanı ($\Omega = \partial T/\partial x > 0$) sabit kabul edilmiştir. Başlangıçta akışın durgun olduğu durumda sıvı kolonu $x=x_o$ dan 'üst sıvı kolonu' ve 'alt sıvı kolonu' olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Sıcaklık gradyanı gözönüne alınarak üsteki sıvı kolonuna *Sıcak sıvı kolonu*, alttaki sıvı kolonuna *Soğuk sıvı kolonu* denmiştir. Salınımlı akış durumunda ise Şekil 2.7b'deki durum meydana gelmektedir. Salınımlı akışta her bir sıvı kolonu için kalınlığı δ_u(=hız sınır tabaka kalınlığı) olan *durgun sınır tabaka* ve *iç akış bölgesi* oluştuğu belirtilmiştir. Bu durumda bu bölgeler alt ve üst sıvı kolonlarına göre alt bölgelere ayrılmış ve üst bölge *sıcak durgun sınır tabaka* ve *sıcak iç akış bölgesi*, soğuk bölge ise *soğuk durgun sınır tabaka* ve *soğuk iç akış bölgesi* olarak adlandırılmıştır. Ayrıca Şekil 2.7b'de de görüldüğü gibi sıcak ve soğuk sınır tabaka arasına *durgun arayüzey*, iç akış bölgesindeki soğuk ve sıcak kolon arasına *iç akış arayüzeyi* ve sınır tabaka ile iç akış bölgesi arasına da *kayan arayüzey* adını vermişlerdir. Akışın herhangi bir

anında iç akış arayüzeyinin konumu $x=X+x_o$ olarak verilmiştir. Bu durumda verilen Ω sıcaklık gradyanında iç akış arayüzeyi ve durgun arayüzeyden ısı geçişi sadece moleküler iletimle gerçekleşmektedir. Salınımlı akışın sebep olduğu ilave ısı geçişi ise kayan arayüzeyden gerçekleşmektedir. Bu ilave ısının zaman ortalaması alındığında ısı akısının, $x>0$ için yarım periyotta sıcak durgun sınır tabakadan, soğuk iç akış bölgesine doğru ve $x<0$ için bu defa sıcak iç akış bölgesinden soğuk durgun sınır tabakaya doğru olduğu belirtilmiştir. Çevrim boyunca üst sıvı kolonundan alt sıvı kolonuna kayan arayüzeyden geçen ısı miktarı,

$$Q_{os,m} = \left(\frac{\omega}{2\pi}\right) \int_0^{2\pi/\omega} Q_{os}\, dt = \left(\frac{\omega}{2\pi}\right) \int_0^{2\pi/\omega} 2qX dt \qquad (2.25)$$

olarak verilmiştir. Burada Q_{os} ve q kayan arayüzeyden yanal yönde geçen ısı akısını göstermektedir.



Şekil 2.8 : Nishio tarafından verilen sıvı kolonunda ısı geçişi için anlık değerler [24]

Şekil 2.8'de X, Q_{os} ve q nun bir çevrim boyunca anlık değerleri verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken salınım hareketi ile ısı geçişi arasında bir faz farkının olmasıdır. Radyal yöndeki ısı akısı q, sıvı kolonu ile aynı periyotta salınırken, belirli bir faz farkıyla Q_{os} , yarım periyotta sıcak durgun sınır tabakadan sıcak iç akış bölgesine ve diğer yarım periyotta da sıcak iç akış bölgesinden soğuk durgun sınır tabakaya ısı geçmektedir. Bu durumda bir çevrimde üst sıvı kolonundan alt sıvı

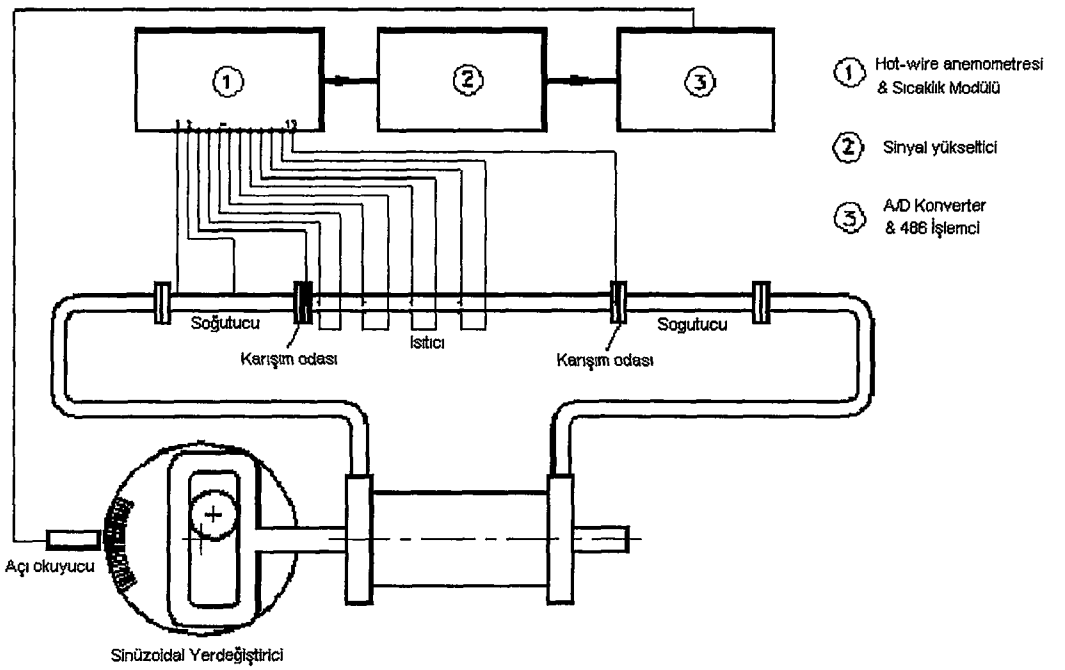
kolonuna iki defa $2Q_{os}$ şeklinde ısı geçişi olmaktadır. Sıvı kolonunda peş peşe bu hareket devam ettiğinden ısı bir uçtan diğerine bu mekanizma ile taşınmaktadır.

Bu konuda yapılan bir çok çalışmanın yanında Siegel [25] tarafından yapılan çalışmada iki paralel plaka arasındaki salınımlı akışta ısı geçişi problemi incelenmiştir. Sabit ısı akısıyla üniform olarak ısıtılmış paralel plaka arasındaki hidrodinamik olarak gelişmiş akışta ısıl giriş bölgesi boyunca sıcaklık değişimi incelenmiştir. Problemde elde edilen diferansiyel denklemler analitik olarak çözülmüş ve eksenel yönde sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

Ozawa ve Kawamato [26] sıcak ve soğuk iki rezervuar arasındaki laminer salınımlı akışta hız ve sıcaklık dağılımını nümerik olarak çözmüşlerdir. Bu çalışmada bir çevrim boyunca çevrimin her adımı için hız ve sıcaklık profilleri elde edilmiştir. Çevrimin herhangi bir anında eş sıcaklık eğrileri ve hız profilleri birlikte gösterilerek hız ile sıcaklık değişimi arasında bir faz farkı olduğu gösterilmiştir. Aynı zamanda sıvı kristal yöntemi ile deneysel olarak ölçülen sıcaklık profilleriyle de bu durum doğrulanmıştır.

2.4.2 Salınımlı akışta taşınımla ısı geçişi

Laminer salınımlı boru akışında ısı transferi problemi hem deneysel hem de analitik olarak çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Araştırmalar ilk olarak eksenel yayılımla ısı geçişinin artırılması üzerinde yoğunlaşmıştır. Daha sonra taşınımla ısı geçişi üzerinde yapılan araştırmalarda giderek bir artış olmuştur. Bu konu halen pek çok araştırmacı tarafından büyük bir ilgiyle incelenmektedir. Buradaki temel konu osilasyonun ısı transferine olan etkisinin ortaya çıkarılmasıdır. Araştırmacılar, incelemelerinde taşınım terimlerinin eksenel iletim terimlerinin yanında çok büyük olduğunu kabul ederek eksenel iletimi ihmal etmişlerdir [28-29]. Cidarlarda sınır şartı olarak sabit ısı akısı ve sabit duvar sıcaklığı olmak üzere iki farklı sınır şartı için incelemeler yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda salınımlı akışta ısı geçişine etki eden parametreleri ortaya çıkarmak için araştırmacılar tarafından çeşitli deney düzenekleri kurulmuştur. Bunlardan bir tanesi de Zhao ve Cheng [19-23] tarafından yapılan, laminer zorlanmış salınımlı akışta sabit ısı akısı ve duvar sıcaklığı durumlarında bir boru içerisindeki akışın deneysel ve teorik olarak incelenmesidir.



Şekil 2.9 : Zhao ve Cheng [23] tarafından yapılan çalışmalarda kullanılan salınımlı akış deney düzeneği

Bu çalışmalarda kullanılan deneysel düzenek Şekil 2.9'da görülmektedir. İş yapan akışkan olarak havanın kullanıldığı bu düzenek üzerinde Zhao ve Cheng [23] ısı geçişi ve basınç düşümü ile ilgili deneysel çalışmalar yapmışlardır. Aynı zamanda sonlu uzunlukta ve iki ucu açık silindirik bir borudaki sıkıştırılamaz salınımlı akışı sayısal olarak incelemişlerdir [21-22]. Sayısal incelemeler sonucunda sonlu uzunluktaki boru içerisindeki akışta giriş rejimi, tam gelişmiş rejim ve çıkış rejimi olmak üzere üç farklı akış rejiminin olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmalarda Zhao ve Cheng [19-23] yaptıkları sayısal analizler ve çok sayıda deney için akışı etkileyen boyutsuz parametrelere bağlı olarak korelasyon eşitlikleri önermişlerdir. Yukarıdaki deneysel düzenek üzerinde iş yapan akışkan olarak havanın kullanıldığı deneylerden elde edilen ortalama Nusselt sayısı için aşağıdaki korelasyon eşitliği önerilmiştir.

$$\overline{Nu} = 0.02 A_0^{0.85} \, \mathrm{Re}_\omega^{0.58} \qquad \textbf{(2.26)}$$

Bu eşitlik $8.5 \le A_0 \le 35$ ve $23 \le \mathrm{Re}_\omega \le 400$ aralığı için geçerlidir. Burada $\overline{Nu}$, çevrim boyunca ortalama Nusselt sayısını göstermektedir.

Zhao ve Cheng [22] tarafından yapılan sayısal çalışmalarda sonlu uzunluktaki bir boruda laminer salınımlı akışta ısı geçişi için aşağıdaki korelasyon eşitliği önerilmiştir.

$$\overline{Nu} = 0.00495 \; A_0^{0.9} \, \mathrm{Re}_\omega^{0.656} \qquad \textbf{(2.27)}$$

Bu eşitlikte verilen zaman ve konuma göre çevrim boyunca ortalama Nusselt sayısı $10 \le A_0 \le 35$ ve $10 \le \mathrm{Re}_\omega \le 400$, L/D=40 aralığı için geçerlidir. Sonlu uzunluktaki bir akışta L/D nin etkisinin göz önüne alındığı bir korelasyon eşitliği yine bu araştırmacılar tarafından aşağıda verilmiştir.

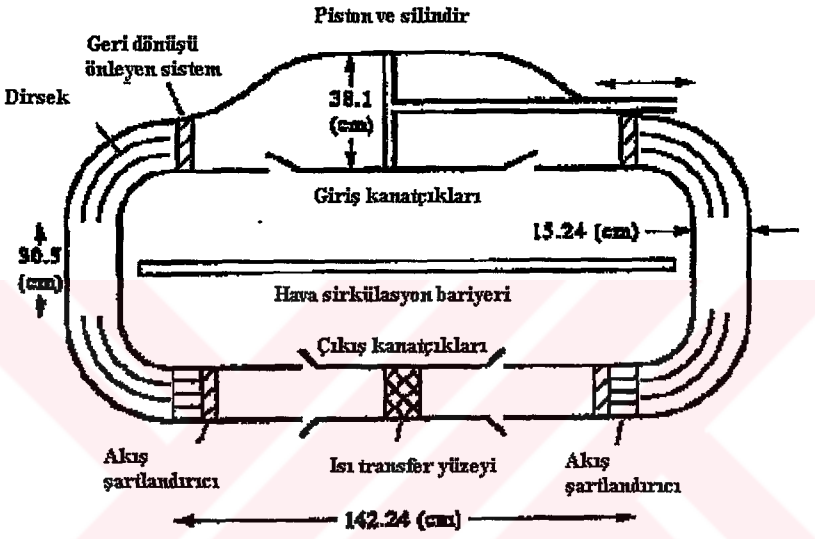
$$\overline{Nu} = 0.00495 \; A_0^{0.9} \, \mathrm{Re}_\omega^{0.656} [43.74(D/L)^{1.18} + 0.06] \qquad \textbf{(2.28)}$$

Burada $\overline{Nu}$, çevrim boyunca ortalama Nusselt sayısını göstermektedir. Üniform olarak sabit ısı akısıyla ısıtılan boru cidarındaki sıcaklığın, çevrim boyunca logaritmik olarak değiştiği görülmüştür. Bu eşitlik $8.5 \le A_0 \le 35$ ve $23 \le \mathrm{Re}_\omega \le 46$ aralığı için hassas sonuçlar vermektedir, daha geniş Re_ω aralığında uygun sonuçlar verdiği (Re_ω<500) araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

Thang ve Cheng [27] kapalı çevrimli bir test düzeneği üzerinde yaptıkları çalışmada silindirik bir kanalda salınımlı akış için sabit ısı akısında ısı geçişini incelemişlerdir. Çevrim ortalama Nusselt sayısını tariflemek için akışkanın yığın sıcaklığını kanalın giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalamaları olarak almışlardır. Elde ettikleri sonuçları bir regresyon analizi kullanarak korelasyon eşitliği şeklinde boyutsuz parametreler cinsinden ifade etmişlerdir.

Lee vd. [28-29] tarafından yapılan benzer çalışmalarda ısıl olarak gelişmiş bir bölgede keyfi sınır şartları için sıcaklık dağılımı analitik olarak incelenmiştir. Bu çalışmalarda eksenel mesafenin bir fonksiyonu olan sinüzoidal cidar sıcaklığını zamana göre ortalama bir değer kabul ederek, dairesel bir boruda laminer salınımlı akışta ısı geçişi teorik olarak analiz edilmiştir. Sonsuz uzunlukta ve R yarıçapındaki bir silindirde laminer salınımlı bir akışta daha önceki çalışmalara dayanarak cidarın ısı depolama kapasitesi, akışkandaki sıcaklık değişiminin yanında çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir. Ayrıca akış içerisinde eksenel yöndeki ısı iletiminin

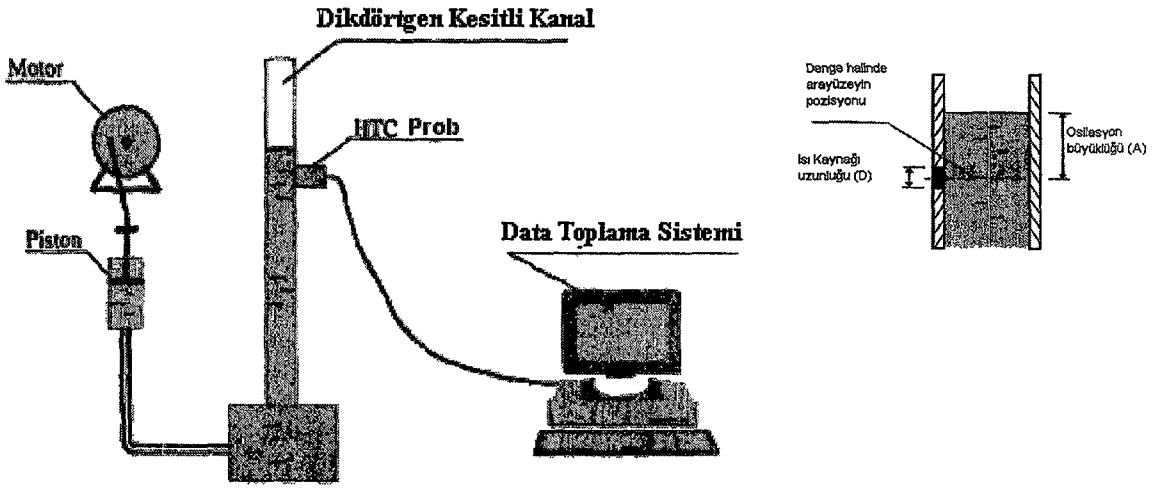
taşınım terimlerinin yanında oldukça küçük olduğunu ve bu yüzden akışkan içerisindeki eksenel iletimin ihmal edilebileceğini kabul etmişlerdir. Bu kabuller neticesinde salınımlı akış için yazdıkları denklemleri basitleştirmişler ve analitik olarak çözmüşlerdir. Bu çözümler eksenel yöndeki lineer olmayan sıcaklık değişimleri ve çevrim ortalama akışkan sıcaklığı için seri açılımları şeklinde verilmiştir. Bulunan sonuçlardan çevrim ortalama Nusselt sayısı için boyutsuz parametrelere bağlı olarak bir bağıntı vermişlerdir.



Şekil 2.10 : Cooper vd. [30] tarafından yapılan deneysel çalışma için oluşturulmuş test düzeneği

Cooper vd. [30] düşük frekanslarda ve büyük genliklerde Şekil 2.10'da görüldüğü gibi dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine yerleştirilmiş ve bir yüzeyi ısıtılmış dar plakalar arasındaki salınımlı akışta taşınımla ısı geçişini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, büyük genliklerde ve yüksek frekanslarda Nusselt sayısının arttığı belirtilmiştir. Deneysel verilerden, ısı geçiş katsayısı ve Nusselt sayısı için boyutsuz parametrelere bağlı olarak bir korelasyon eşitliği vermişlerdir. Ancak bu sayıların deneysel verileri fiziksel olarak yeterince karşılamadığı belirtilmiştir. Çalışmalarında salınımlı akışın daimi akışa göre ısı geçişini artırdığını belirtmişlerdir.

Chen ve Chen [31] Şekil 2.11'de deney düzeneği görülen dikdörtgen kesitli düşey bir kanal üzerine yerleştirilmiş ısıtıcı yüzeyin yakınında salınım yapan hava sıvı arayüzeyine sahip akışta ısı geçişini incelemişlerdir. Yüzeyden akışa geçen ısıyı



Şekil 2.11 : Chen, Z.D. ve Chen, J.J.J. [31] deney düzeneği

ölçmek için özel tip bir prob kullanan araştırmacılar düşük sıcaklıklarda ve genliklerde çalıştıkları için yüzeyden buharlaşma olmamıştır. Cidardan sabit ısı akısıyla olan ısı geçişi için yaptıkları deneysel çalışma sonucunda elde ettikleri deneysel sonuçlar için aşağıdaki korelasyon eşitliğini sunmuşlardır.

$$Nu = 0.318\, Re_o^{0.5} Pr^{0.5} \tag{2.29}$$

bu bağıntıda $Re_o = \dfrac{\omega D A}{v}$ olarak tarif edilmiştir. Burada A, genlik D, ısıtıcı boyunu göstermektedir. Salınımlı akışlarla ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bouvier vd. [49] salınımlı akışta cidarın ısıl özelliklerinin ısı geçişine etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca bu akışın yeni alanlara uygulanması ile ilgili güncel çalışmalar yapılmaktadır. Leong ve Jin [50] gözenekli ortamda salınımlı akışın ısı geçişine etkilerini incelemişlerdir.

2.5 Sonuçlar

Araştırmacılar tarafından bu konuda yapılan deneysel ve teorik çalışmalar sonucunda bu tip akışlar için elde edilen önemli bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Sonlu uzunluktaki bir boruda salınımlı akış için benzerlik parametrelerinin, kinetik Reynolds sayısı Re_ω, boyutsuz genlik A_0, boru için uzunluk çap oranı L/D, ve akışkanın Prandtl sayısı Pr olduğu anlaşılmıştır.
- Türbülans başlangıcı için literatürde kabul gören ve $\beta_{cri} = (A_0\sqrt{\mathrm{Re}_\omega})_{cri}$ ile ifade edilen bir kriter belirlenmiştir ve bu değerin 400 ile 800 arasında değiştiği kabul edilmiştir.
- Aynı frekans ve genlikte sürtünme katsayısının türbülanslı akışta laminer akışa göre çok daha büyük olduğu görülmüştür.
- Eksenel ısı geçişinin frekans ve genliğin artmasıyla arttığı ve ısı geçişi üzerinde aynı zamanda akışkanın ve cidarın termofiziksel özelliklerinin de etkili olduğu belirtilmiştir.
- Yapılan sayısal incelemelerde yüksek kinetik Reynolds sayılarında sıcaklık profilinde de halkasal etkinin var olduğu ifade edilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, hareketli sıvı kolonunda ısı geçişi mekanizmasının anlaşılması ve ısı geçişinin hesaplanması için laboratuvarda imal edilen HSK (Hareketli Sıvı Kolonu) üzerinde yapılan deneyler açıklanmaktadır. Isı geçişi deneylerinin yapıldığı tesisat tanıtıldıktan sonra, sıcaklık ölçme noktaları, ölçme yöntemi ve deneysel verilerin nasıl değerlendirildiği sırayla anlatılmaktadır. Isı geçişinin bağlı olduğu parametrelerin etkisinin ortaya çıkarılabilmesi ve ısı taşınım katsayısının hesaplanabilmesi için deney düzeneği üzerinde sıcaklık ölçümleri yapılmaktadır. Bu ölçümler yardımıyla ısı geçişi hesaplanmakta ve Nusselt sayıları bulunmaktadır. Bulunan Nusselt sayıları için boyutsuz parametrelere bağlı olarak bir korelasyon bağıntısı önerilmektedir. Salınımlı akış ile daimi akış rejimleri karşılaştırılarak salınımlı akışın ısı geçişini artırdığı gösterilmektedir.

3.1 Deney Tesisatı

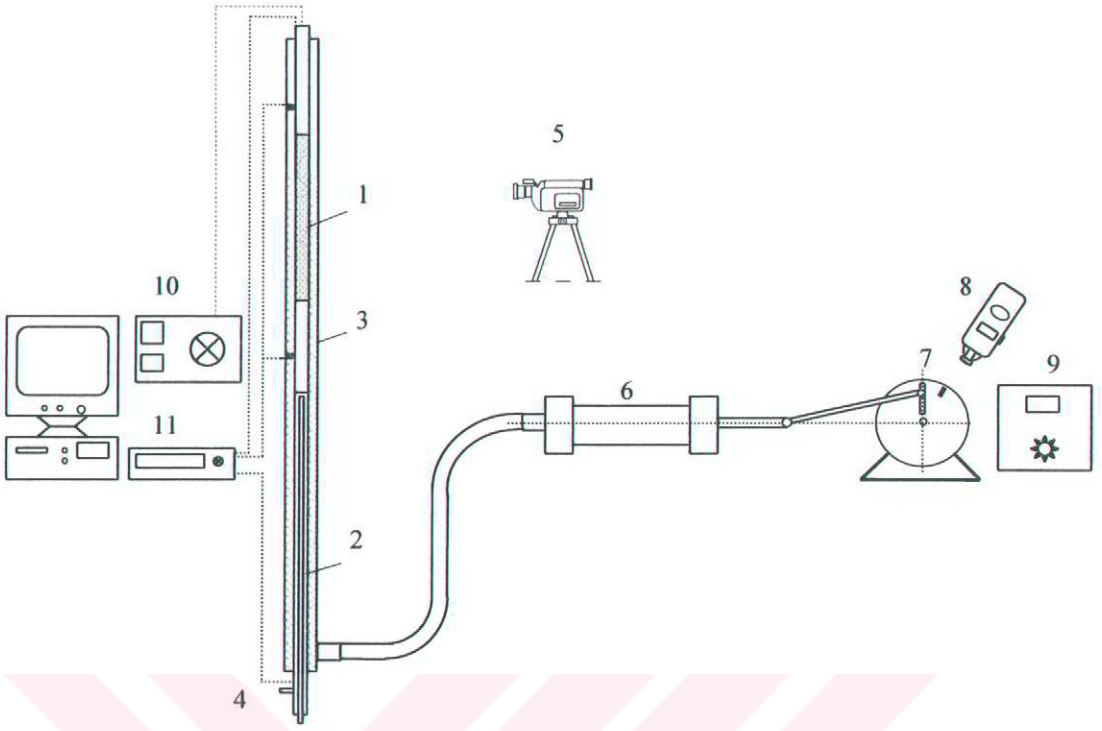
Hareketli sıvı kolonu deney düzeneği şematik olarak Şekil 3.1 de görülmektedir. Düşey olarak yerleştirilmiş test düzeneği iç içe iki borudan meydana gelmektedir. Dıştaki boru dış çapı 42 mm, iç çapı 37,4 mm ve uzunluğu 2 m olan üst kısmı atmosfere açık cam borudur. Cam borunun merkezinde bulunan iç boru 18 mm dış çapında olup soğutucu, adyabatik bölge ve ısıtıcı kısımlardan meydana gelmektedir. 600 mm uzunluğundaki ısıtıcı ve 760 mm uzunluğundaki soğutucu bakır malzemeden olup aralarındaki adyabatik kısım ise 300 mm uzunluğunda teflon malzemedendir. Aynı çaplı bu üç kısım, vidalı bir sistemle birbirine bağlanmış olup bağlantı yerleri mümkün olduğu kadar akışı bozmayacak şekilde yapılmıştır. Isıtıcı olan bakır boru içindeki elektrik direnci, ayarlanabilir bir güç kaynağı ile beslenmektedir. Soğutucu bakır boru ise iç içe iki boru şeklinde olup içteki borudan giren soğutma suyu dıştaki borudan dışarı çıkmaktadır. Böylece cam boru içindeki su ile soğutma suyu karışmamaktadır.

Isıtıcı ve soğutucu yüzey sıcaklıkları ile su ve hava sıcaklıkları 0.3 mm çapında (K-tipi) kromel-alumel termoelemanlar kullanılarak ölçülmektedir. Isıtıcıda bulunan 6 adet termoeleman bakır borunun iç tarafında olup içeriden geçirilerek dışarıya çıkarılmaktadır. Soğutucu da bulunan ve yüzeye kaynak edilen 7 adet termoelemanın kabloları ise soğutucu suyu içinden geçirilerek dışarı çıkartılmaktadır. Böylece, dıştaki akışın bozulmaması sağlanmaktadır. Sıcaklık ölçmeleri bir Veri Toplama Sistemi (20 veri/s) ve sıcaklık kartı (Keithley-2700) yardımıyla yapılmakta ve zamana bağlı elde edilen sonuçlar bilgisayara kaydedilmektedir. Belirli bir seviyeye kadar doldurulan su kolunu çift etkili bir piston silindir düzeneği vasıtasıyla, hızı ayarlanabilir 1 kW'lık DC bir motor ile tahrik edilmektedir. Motor devir sayısı (Lutron DT-2234B) foto tip dijital takometre cihazıyla ölçülmektedir. Arayüzeyin hareketi dijital kameraya kaydedilmektedir. Düşey kolon sıvı salınımı üst noktasından itibaren ısı geçişinin kontrollü olması için yalıtılmaktadır. Deney tesisatı fotoğrafı Şekil 3.2'de görülmektedir.

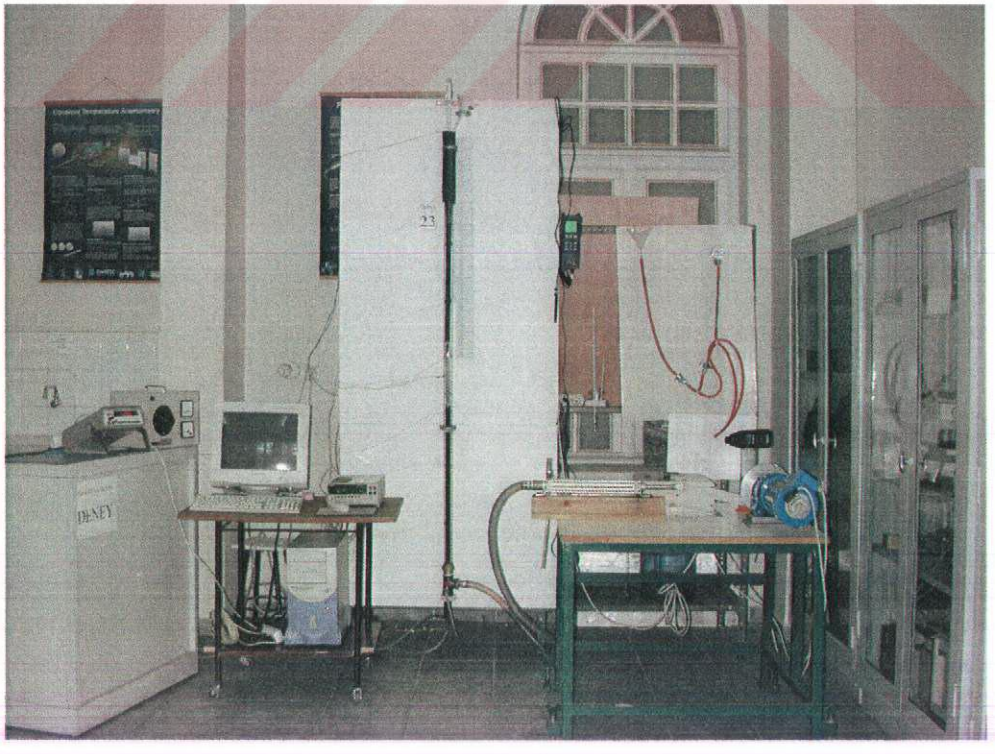
3.2 Deneylerin Yapılışı

Sıvı doluluk oranı önceden belirlenen değerine göre sıvı kolonu su ile doldurulur. Soğutucu içerisinden soğutma suyu geçirilir. Isıtıcı aktif gücü belirlenen değere ayarlanır ve piston-motor düzeneği ile sıvı kolonuna belirlenen genlik ve frekansta hareket verilir. Sistem rejim haline ulaşıncaya kadar çalışmaya devam eder. Sistemin rejim haline gelip gelmediği, sıcaklık ölçmelerinden anlaşılmaktadır. Rejim haline geldikten sonra bir an hareket durdurularak sıvının yüksekliği ölçülür ve tekrar sistem hareket ettirilir. HSK içerisindeki suyun seviyesi cam borunun en alt ucu referans alınarak belirlenmektedir. Sıvı seviyesinin ölçümü için sıvı kolonunun arkasına milimetrik bir skala yerleştirilmiştir. Deneyin başlangıcı ve bitişi esnasında sıvı kolonundaki su seviyeleri ölçülerek, deney süresince eksilen hacimden buharlaşan miktar tespit edilmektedir. Ayrıca sıvı kolonunun hareketi bir dijital kamera yardımıyla kaydedilmektedir. Daha sonra bu görüntüler bilgisayara aktarılarak arayüzeyin konum-zaman değerleri çıkarılmaktadır.

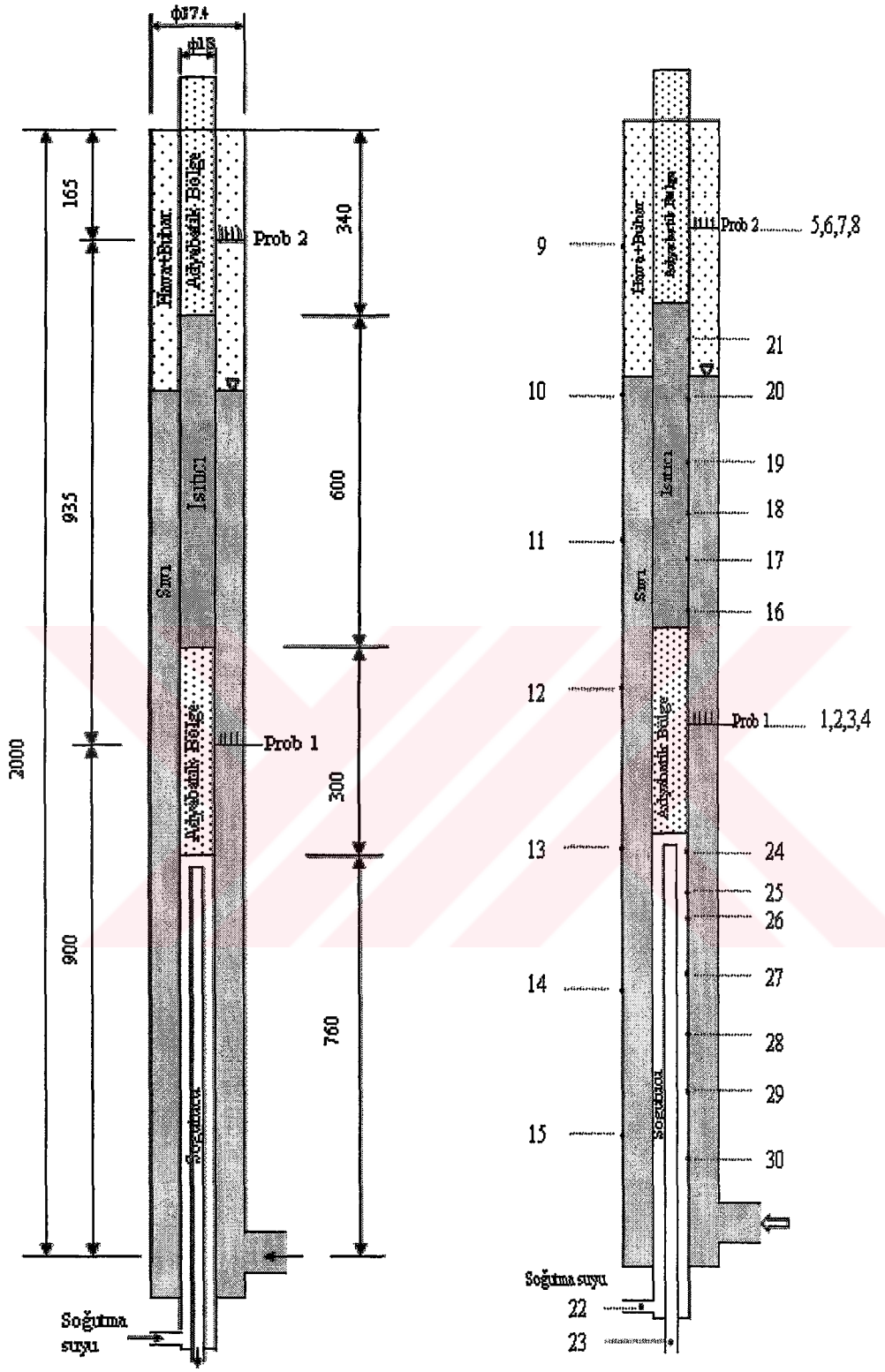
Deney boyunca belirli noktalardan (Şekil 3.3'de termoelemanların yerleri görülmektedir) sıcaklıklar ölçülerek kaydedilmektedir. Düşey kolonun dış yüzeyinden ölçülen sıcaklıklar artan frekanslarda sıvının hareketini takip edememektedir. Bu sıcaklıklar camın direncinden dolayı ortalama bir değerde kalmaktadır. Bu durum için ekte (Ek-C) ayrıntılı bir analiz yapılmıştır.



Şekil 3.1 : Deney düzeneği, 1.Isıtıcı, 2.Soğutucu, 3.Cam boru, 4.Soğutma suyu giriş çıkışı, 5.Kamera 6.Piston-silindir, 7.DC Motor, 8.Dijital takometre, 9.Hız kontrol, 10.Güç Kaynağı, 11.Veri Toplama sistemi (Keithley-2700)



Şekil 3.2 : Deney tesisatı fotoğrafı



(a) (b)

Şekil 3.3 : Hareketli sıvı kolonu geometrisi ve termoelemanların konumları

Soğutma suyu tarafından çekilen ısının belirlenebilmesi için giriş ve çıkış sıcaklık değerleri ölçülmektedir. Soğutucudan geçen suyun debisi belirli bir süre için toplanan suyun hassas terazide tartılmasıyla belirlenmektedir.

3.3 Deneysel Ölçmeler

Sıcaklık ölçmeleri düşey kolon üzerinde ve ısıtıcı ve soğutucunun iç yüzeylerine yerleştirilmiş 32 adet termoeleman vasıtasıyla yapılmıştır. Bir kesitten geçen entalpinin bulunabilmesi için kontrol hacmi giriş ve çıkışına dörder termoelemanlı birer prob yerleştirilmiş ve bu problar vasıtasıyla radyal yöndeki sıcaklıklar anlık ölçülebilmiştir. Isıtıcı yüzey sıcaklığının ölçülebilmesi için ısıtıcı içerisine özel olarak altı adet termoeleman yerleştirilmiştir. Termoelemanların test düzeneği üzerindeki yerleşimi Şekil 3.3b'de görülmektedir. Ayrıca termoeleman uçlarının yerleşim listesi Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1 : Termoeleman uçlarının konumları

No	Ölçme Noktası	No	Ölçme Noktası
1	Prob1 de bulunan 1 nolu eleman (T_{p1} 1)	17	Isıtıcı yüzey sıcaklığı (T_{w2})
2	Prob1 de bulunan 2 nolu eleman (T_{p1} 2)	18	Isıtıcı yüzey sıcaklığı (T_{w3})
3	Prob1 de bulunan 3 nolu eleman (T_{p1} 3)	19	Isıtıcı yüzey sıcaklığı (T_{w4})
4	Prob1 de bulunan 4 nolu eleman (T_{p1} 4)	20	Isıtıcı yüzey sıcaklığı (T_{w5})
5	Prob2 de bulunan 1 nolu eleman (T_{p2} 1)	21	Isıtıcı yüzey sıcaklığı (T_{w6})
6	Prob2 de bulunan 2 nolu eleman (T_{p2} 2)	22	Soğutma suyu giriş sıcaklığı
7	Prob2 de bulunan 3 nolu eleman (T_{p2} 3)	23	Soğutma suyu çıkış sıcaklığı
8	Prob2 de bulunan 4 nolu eleman (T_{p2} 4)	24	Soğutucu yüzey sıcaklığı (T_s 1)
9	Cam dış yüzey sıcaklığı (T_c 1)	25	Soğutucu yüzey sıcaklığı (T_s 2)
10	Cam dış yüzey sıcaklığı (T_c 2)	26	Soğutucu yüzey sıcaklığı (T_s 3)
11	Cam dış yüzey sıcaklığı (T_c 3)	27	Soğutucu yüzey sıcaklığı (T_s 4)
12	Cam dış yüzey sıcaklığı (T_c 4)	28	Soğutucu yüzey sıcaklığı (T_s 5)
13	Cam dış yüzey sıcaklığı (T_c 5)	29	Soğutucu yüzey sıcaklığı (T_s 6)
14	Cam dış yüzey sıcaklığı (T_c 6)	30	Soğutucu yüzey sıcaklığı (T_s 7)
15	Cam dış yüzey sıcaklığı (T_c 7)	31	Ortam sıcaklığı (T_o)
16	Isıtıcı yüzey sıcaklığı (T_{w1})	32	Bağlantı noktası

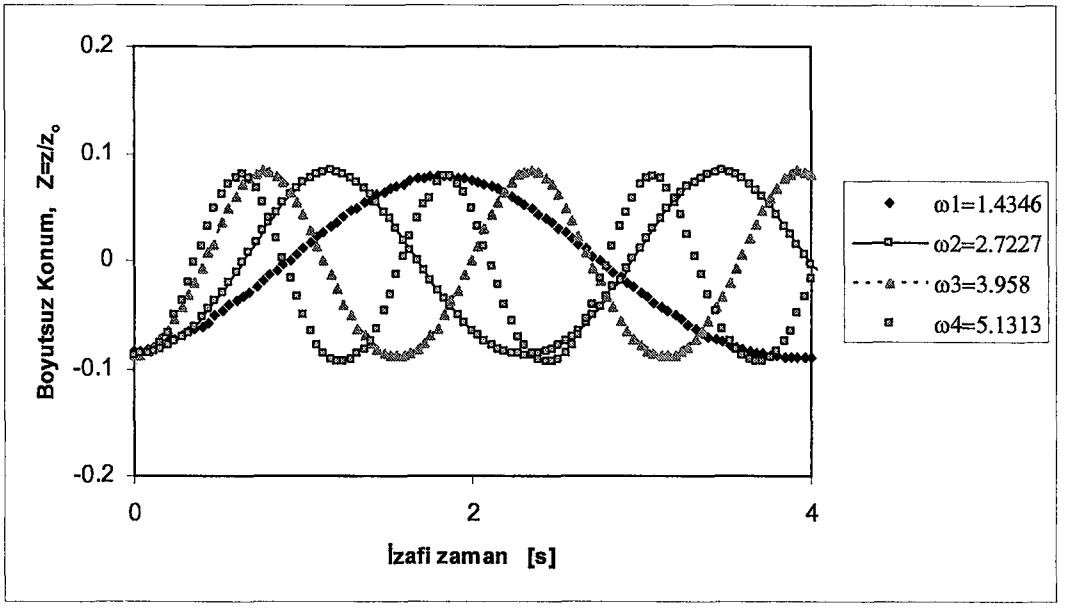
Kullanılan termoelemanlar Omega (K-tipi) kromel-alumel dir ve çapı 0.3 mm dir. Sıcaklık ölçmeleri bir Veri Toplama Sistemi (20 veri/s) ve sıcaklık kartı (Keithley-2700) yardımıyla yapılmaktadır. Sonuçlar doğrudan bilgisayar ortamına aktarılmakta

ve değerlendirilmektedir. Sıvı kolonunun hareketi dijital bir kamera ile filme alınmaktadır. Bu filmler bilgisayarda görüntü işleme programı yardımıyla çözülmekte ve konum-zaman değerleri çıkarılmaktadır. Yapılan deneylerde hava-sıvı arayüzeyinin hızının sinüzoidal olduğu ve verilen frekans aralığında yüzeyde herhangi bir dalgalanmanın olmadığı gözlemlenmiştir. Isıtıcı aktif kısmı su içerisinde kalacak şekilde doluluk seviyesi iki kez, ısı güçleri üç kez, genlik üç kez ve frekans dört kez değiştirilerek 45 deney yapılmıştır.

Deneysel ölçmelerde kullanılan termoelemanlar deneylerden önce kalibrasyon için hazırlanan bir düzenek üzerinde test edilmiştir. Sabit sıcaklık kabı kullanılarak farklı ısı akılarında her bir termoeleman kalibre edilerek, doğru sıcaklık değerleri için kalibrasyon denklemleri çıkarılmıştır. Deneylerde her bir eleman için bulunan sıcaklıklar bu denklemler kullanılarak düzeltilmektedir.

3.3.1 Sıvı kolonu konum-zaman değerlerinin bulunması

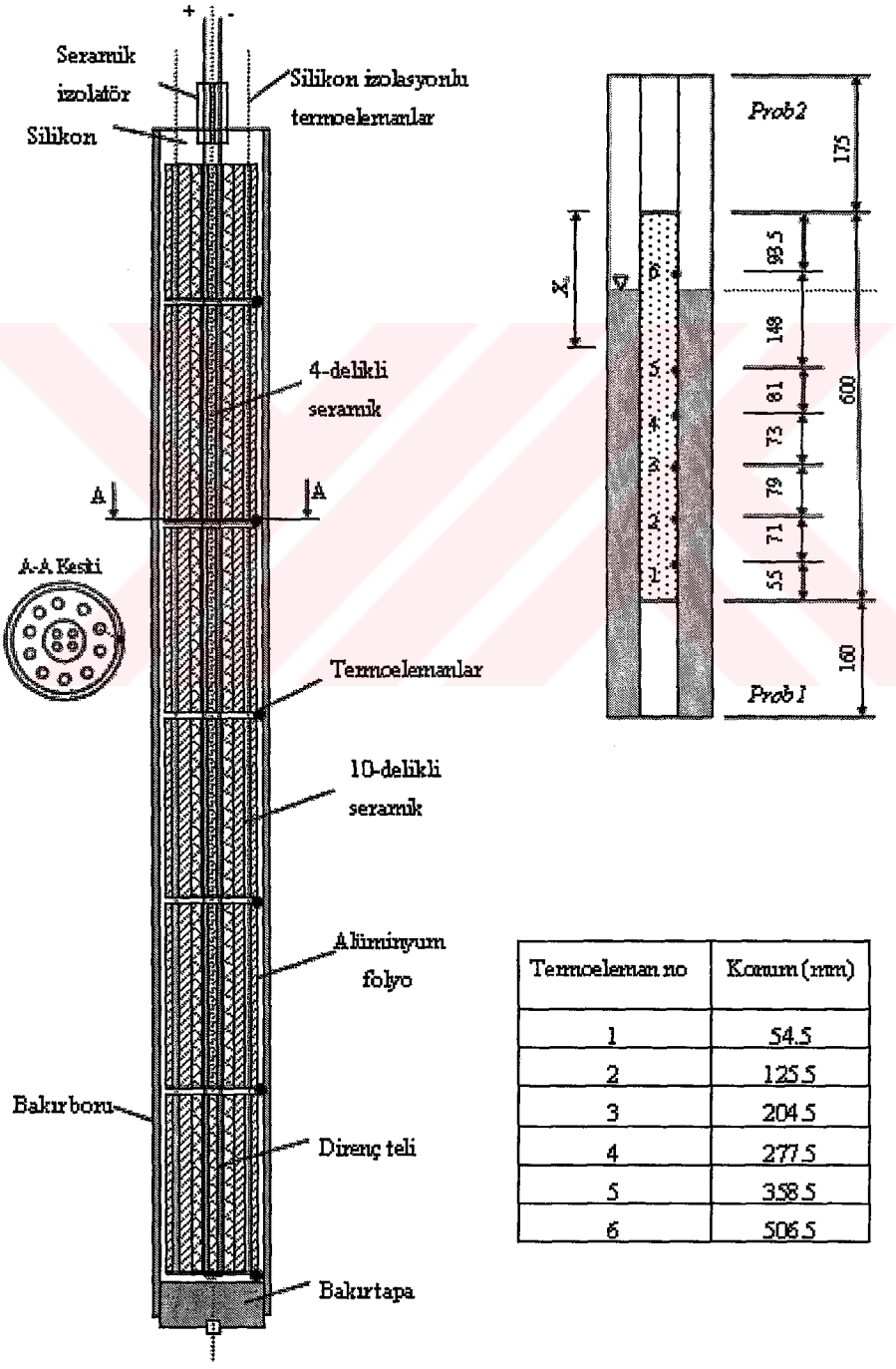
Sıvı kolonunun hareketi dijital bir kamera ile filme alınmıştır. Bu filmler bilgisayarda görüntü işleme programı yardımıyla çözülmüş ve konum-zaman değerleri çıkarılmıştır. Her bir frekans için elde edilen konum-zaman değerleri aşağıda grafik halinde verilmiştir. Sıvı kolonunun hareketi için daha önce araştırmacılar tarafından bulunan ampirik bağıntı, eşitlik(1.1) de $z(t) = z_o - z_m \, Cos(\omega t + \phi)$ olarak verilmişti.



Şekil 3.4 : Sıvı kolonu konum-zaman değerleri

Deneysel olarak elde edilen kolon yükseklikleri ile bu bağıntı kullanılarak bulunan değerler arasında karşılaştırmalar yapıldığında çok iyi bir uyum sağlandığı görülmektedir. Bu karşılaştırma Ek-D de her bir frekans için ayrı grafikler halinde verilmektedir. Arayüzeyin hareketinden yola çıkarak sıvı kolonu hızı belirlenebilir. Kolon yüksekliğinin zamana göre türevi ortalama sıvı hızını vermektedir.

3.3.2 Isıtıcı yüzey sıcaklığının belirlenmesi

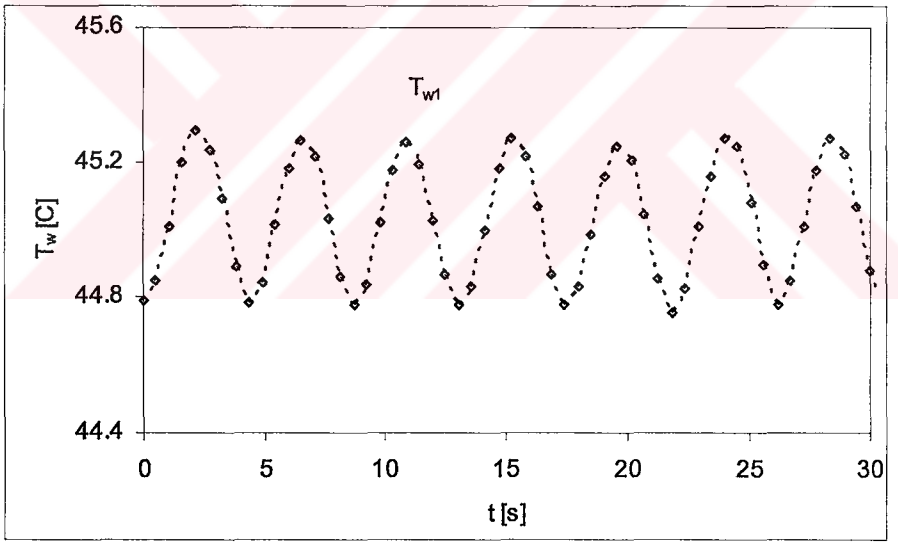


Termoeleman no	Konum (mm)
1	54.5
2	125.5
3	204.5
4	277.5
5	358.5
6	506.5

Şekil 3.5 : Isıtıcı iç yapısı ve termoelemanların konumları

Şekil 3.5'de kesit olarak görülen ısıtıcı 18 mm dış çapında ve 1mm et kalınlığında bakır borudan yapılmış olup cam borunun merkezine yerleştirilmiştir. 600 mm uzunluğundaki ısıtıcı içerisine iç içe yerleştirilen seramik izolatörler konulmuştur. İç kısımdaki seramiğe elektrik direnç telleri sarılmış, dıştaki seramik üzerindeki deliklerden de termoeleman kabloları geçirilmiştir. Dıştaki seramik içerisinden geçirilen bu termoelemanların uçları bakır cidara temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Bakır borunun bir ucuna bakır tapa kaynatılarak kapatılmış ve diğer ucundan da kablolar çıkarılmıştır. Isıtıcı olan bakır boru içindeki elektrik direnci, ayarlanabilir bir güç kaynağı ile beslenmektedir.

Deney boyunca ısıtıcı içerisine yerleştirilen termoelemanların her birinden alınan anlık sıcaklık değerleri ayrı ayrı kaydedilmektedir. Bir elemandan alınan anlık sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.6'da görüldüğü gibi sinüzoidal olarak değişmektedir.



Şekil 3.6 : Bir noktadan ölçülen yüzey sıcaklığının zamanla değişimi (Deney-13, ω=1.435 rad/s, x_m=0.25 m, q=100W, z_o=1.575 m)

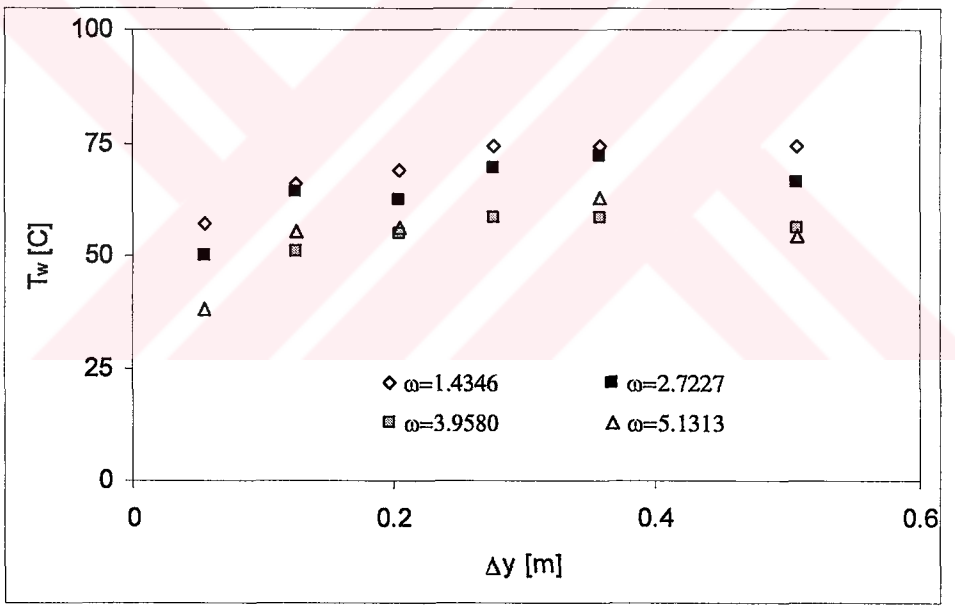
Yüzeye yerleştirilen her bir termoelemandan alınan anlık sıcaklıkların zaman ortalaması alınarak bu noktaların ortalama sıcaklığı bulunur. Zaman aralıkları eşit olduğu için ortalama sıcaklıklar,

$$T_{w,x} = \frac{1}{N\Delta t}\sum_{i=1}^{N} T_{w,i}(x,t)\Delta t \qquad \textbf{(3.1)}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, N toplam veri sayısını $T_{w,i}$ de anlık ölçülen sıcaklıkları göstermektedir. Bulunan bu ortalama sıcaklık daha önce elde edilen kalibrasyon denklemleriyle düzeltilir ve yüzeydeki doğru sıcaklık değeri elde edilir. Yerel ortalama sıcaklıklar yardımıyla yüzeyin ortalama sıcaklığı aşağıdaki formülde verildiği gibi aritmetik ortalamalar alınarak bulunmaktadır.

$$T_w = \frac{1}{A}\int_A T_w(x)dA \cong \frac{T_{w1}+T_{w2}+T_{w3}+T_{w4}+T_{w5}+T_{w6}}{6} \tag{3.2}$$

Bu ortalama yüzey sıcaklıklarının değişimi bir deney gurubu için Şekil 3.7'de görülmektedir. Hava kısmında kalan termoeleman dışında (Δy=0.5065) ısıtıcı yüzey sıcaklığı oldukça lineer bir değişim göstermektedir. Frekans arttıkça yüzey sıcaklıklarının değeri de düşmektedir.



Şekil 3.7 : Isıtıcı ortalama yüzey sıcaklıklarının ısıtıcı boyunca değişimi (A_o=12.88)

3.3.3 Problardan ölçülen sıcaklıklar

Deneysel verilerden ısı geçişini hesaplamak için iki prob arasındaki hacim kontrol hacmi olarak belirlenmiştir. Probların yerleri Şekil 3.3'de görülmektedir. Probların içerisine kesit alanının dar olmasından ve akışın bozulmasının engellenmesi açısından ancak dört termoeleman yerleştirilebilmiştir. Bu problar vasıtasıyla anlık kesit ortalama sıcaklıkları ve radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri elde

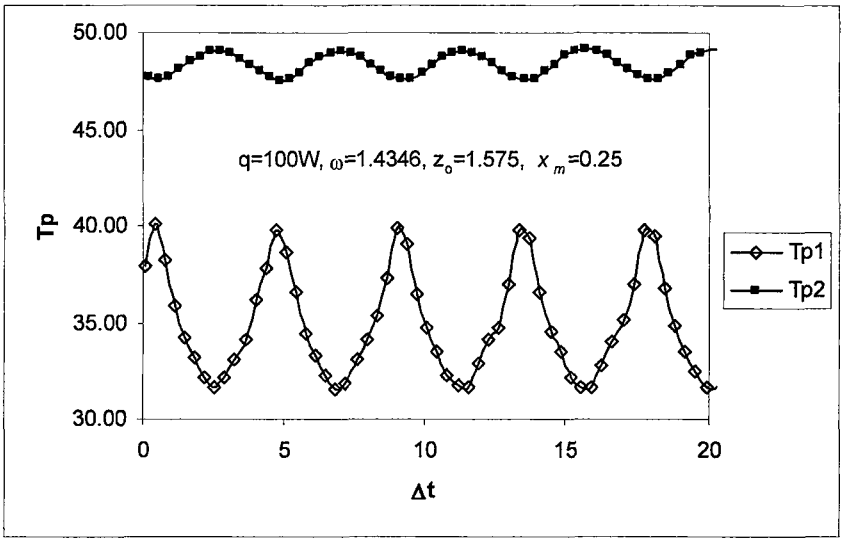
edilebilmektedir. Problardan bir tanesi akış boyunca tamamen su içerisinde bir tanesi de hava içerisinde kalmaktadır. Bu problardan su içerisinde kalana Prob1, hava içerisinde kalan Prob2 adı verilmiştir. Bu problar vasıtasıyla kesit ortalama sıcaklıkları bulunabilmektedir. Ancak akışın zamana bağlı ve periyodik olmasından dolayı bu problar vasıtasıyla sıcaklık profilini tam olarak yakalamak mümkün değildir. Sıcaklık profilini yakalamak için prob içerisine (kesit üzerine) çok sayıda termoeleman yerleştirmek gerekmektedir. Ancak bu durum akışın bozulmasına sebep olacaktır. Anlık sıcaklık profilleri sayısal çözümden elde edilmiş olup, Bölüm 5'de verilmektedir. Prob içinde bulunan dört adet termoelemandan alınan bu sıcaklıların alan ağırlıklı ortalamaları alınarak kesit için anlık ortalama sıcaklık değeri bulunmaktadır.

$$T_{10}(t) = \frac{1}{A}\int_A T_i(t,y)dA = \frac{1}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}\left[A_1T_1 + A_2T_2 + A_3T_3 + A_4T_4\right] \qquad \textbf{(3.3)}$$

Şekil 3.8'de görüldüğü gibi hava ve su için kesit ortalama sıcaklıkları zamanla sinüzoidal olarak değişmektedir. Hava ve su ortalama sıcaklıkları arasında yaklaşık 180 derecelik bir faz farkı oluşmaktadır. Sıvı kolonu yukarı doğru hareket ederken prob1 kesitinden yukarıya doğru daha soğuk akışkan geçtiğinden sıcaklık düşmektedir. Bu durum hava içerisine yerleştirilen prob2 kesiti için tam tersi olmaktadır. En yüksek akışkan sıcaklığı arayüzeyde elde edildiği için arayüzey yukarı doğru yükselirken prob2 kesitinde sıcaklık artmaktadır. Havanın ısı iletim katsayısının suya göre düşük olmasından dolayı hava tarafındaki sıcaklığın genliği suya göre oldukça küçük olmaktadır. Bu durumda hava tarafına geçen entalpinin suya göre çok daha az olduğu söylenebilir.

Kesitten geçen net ısının belirlenebilmesi için su ve hava tarafına yerleştirilen bu problar vasıtasıyla bir kesitten geçen akışkanın anlık ortalama sıcaklık değişimleri belirlenmektedir. Bulunan bu sıcaklıklar vasıtasıyla, hızı da bilinen akışkan için kesitten geçen enerji;

$$Q = \dot{m}(t)h(t) = 2\pi\int_{R1}^{R2}\rho c_p vTrdr \qquad \textbf{(3.4)}$$



Şekil 3.8 : Hava ve su için kesit ortalama sıcaklıklarının zamanla değişimi

formülüyle hesaplanır. Bu formülde bulunan ve kesitten geçen entalpiyi gösteren Q değeri sinüzoidal olarak değişmektedir. Bu durumda entalpi akışı pozitif ve negatif değerler almaktadır. Burada net entalpiyi bulmak için sinüzoidal eğrinin oluşturduğu alanlar ayrı ayrı bulunmaktadır. Bulunan bu alanlar vasıtasıyla pozitif değerlerden negatif değerler çıkarılarak net entalpi geçişi bulunmaktadır.

3.3.4 Cam dış yüzey sıcaklıkları

Dış cidar üzerine yapıştırılan 7 adet termoeleman vasıtasıyla camın dış yüzey sıcaklıkları ölçülmektedir. Ölçülen sıcaklıklardan düşük frekanslarda sıcaklığın salınımı takip ettiği ancak camın direncinden dolayı genliğin çok düşük olduğu neredeyse sabit bir değerde salınım yaptığı görülmüştür. Artan frekansla bu sinüzoidallik bozulmakta ve sıcaklıklar yaklaşık sabit bir değerde kalmaktadır. Cam cidar ve dış yüzeydeki sıcaklıklar için Ek-C de ayrıntılı bir analiz yapılmıştır.

3.4 Isı Geçişi Hesabı

Bu problemde ısı taşınım katsayısının bulunabilmesi için ölçülen parametreler yardımıyla suya geçen net ısının tayin edilmesi gerekmektedir. Isıtıcı vasıtasıyla kontrollü olarak verilen ısı başlangıçta suya ve havaya geçmektedir. Bu durumu matematiksel olarak,

$$Q_{verilen} = h_l P(T_w - T_{bl}) + h_a P(T_w - T_{ba}) \qquad (3.5)$$

şeklinde yazabiliriz. Bu sistemde ısı geçişi zamanın ve sıvı kolonunun yüksekliğinin fonksiyonu olarak değişmektedir. Isıtıcı yüzeyinin çoğunluğu sıvı içerisinde kaldığı ve suyun havaya göre ısı taşınım katsayısı daha fazla olduğu için suya geçen ısı miktarı daha fazladır. Suya geçen ısının bir miktarı dış cidardan çevreye geçerken bir kısmı da soğutucu tarafından çekilmektedir. Düşey kolon sıvı salınımı üst noktasından itibaren ısı geçişinin kontrollü olması için yalıtılmıştır. Deneylerde ölçülen sıcaklıklar yardımıyla ısıtıcı yüzeyinde sabit ısı akısıyla verilen ısının suya, hava ya ve çevreye geçen miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

Soğutucu ve ısıtıcı arasındaki adyabatik bölüme yerleştirilen prob ile soğutucu tarafına geçen net ısı belirlenir. Kesitteki ortalama sıcaklığın zamanla değişimi T_p(t) ve ortalama hız u(t) bilindiğine göre bu kesitten geçen entalpinin zamanla değişimi,

$$Q_{net} = \dot{m}(t)h(t) = 2\pi \int \rho c_p u T r dr \qquad (3.6)$$

şeklinde hesaplanır. Hava tarafına geçen ısı, soğutucu tarafına geçen net ısının belirlenebilmesi için uygulanan hesap tarzıyla benzer şekilde bulunmaktadır. Hava tarafında adyabatik bölüme yerleştirilen prob vasıtasıyla kesitten geçen akışkanın anlık sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Bu sıcaklıların alan ağırlıklı ortalamaları alınarak kesit için anlık ortalama sıcaklık değeri bulunmuştur. Havanın fiziksel özellikleri gereği, özgül ısısı ve yoğunluğu suya göre çok düşük olduğundan havaya geçen ısı miktarı çok düşük olmaktadır.

3.4.1 Düşey boruda doğal taşınımla ısı kaybı

Düşey boru üzerine yerleştirilmiş yedi adet termoeleman vasıtasıyla ölçülen sıcaklıklar göz önüne alınarak, boru yüzeyi ortalama sıcaklığı elde edilir. Ortam sıcaklığı ve boru yüzeyi ortalama sıcaklığı değerleri düşey bir borudan doğal taşınımla ortama geçen ısı D_d silindir çapını L ise uzunluğunu göstermek üzere aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır [37].

$$Ra_D = \frac{D_d}{L} \geq 10^4 \quad \text{için} \qquad Nu = \frac{hD_d}{k} = 0.6\left(Ra_D \frac{D_d}{L}\right)^{0.25} \qquad (3.7)$$

$$0.05 \le Ra_D \frac{D_d}{L} \le 10^4 \quad \text{için} \qquad Nu_D = 1.37\left(Ra_D \frac{D_d}{L}\right)^{0.16} \tag{3.8}$$

$$Ra_D \frac{D_d}{L} \le 0.05 \quad \text{için} \qquad Nu_D = 0.93\left(Ra_D \frac{D_d}{L}\right)^{0.05} \tag{3.9}$$

Bu bağıntılarda aşağıdaki ifadeler geçerlidir.

$$10^{-5} < Ra_D = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)D_d^3}{\nu\alpha} < 10^{12} \tag{3.10}$$

$$\beta = 1/T_f \quad \text{ve} \quad T_f(K) = \frac{T_w + T_\infty}{2} \quad \text{(Film sıcaklığı)} \tag{3.11}$$

Burada yapılan hesaplar sonucu bulunan ısı kayıpları deney sonuçlarının değerlendirilmesinde izlenen hesaplama yöntemi içerisinde bulunan, çevreye olan ısı geçişine göre düşük kalmaktadır. Doğal taşınım da yüzeyden ısı taşınım katsayısının doğru tespiti çok hassas ölçmeleri gerektirmektedir. Deney şartlarında ortam şartlarındaki en ufak bir değişiklik ısı geçişi üzerinde etkili olmaktadır. Ayrıca olayın zamanla periyodik olarak değişmesi de bu durumu etkileyen diğer bir parametredir. Buradaki mekanizmanın karışıklığı bu hesap tarzıyla bulunan değerlerin güvenirliğini azaltmaktadır.

3.4.2 Soğutma suyu tarafından çekilen ısı

Soğutma suyu tarafından çekilen ısı, soğutma suyu giriş ve çıkışlarına konulan termoelemanlar vasıtasıyla ölçülen sıcaklıklardan yararlanarak hesaplanmaktadır. Soğutma suyu belirli zaman aralığında bir kaba toplanıp tartılarak debisi bulunmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda ısıtıcı yüzeyinden verilen ısının büyük bir kısmının soğutma suyu tarafından çekildiği görülmüştür. Soğutma suyu tarafından çekilen ısı;

$$\dot{Q}_s = \dot{m}c_p(T_g - T_ç) \tag{3.12}$$

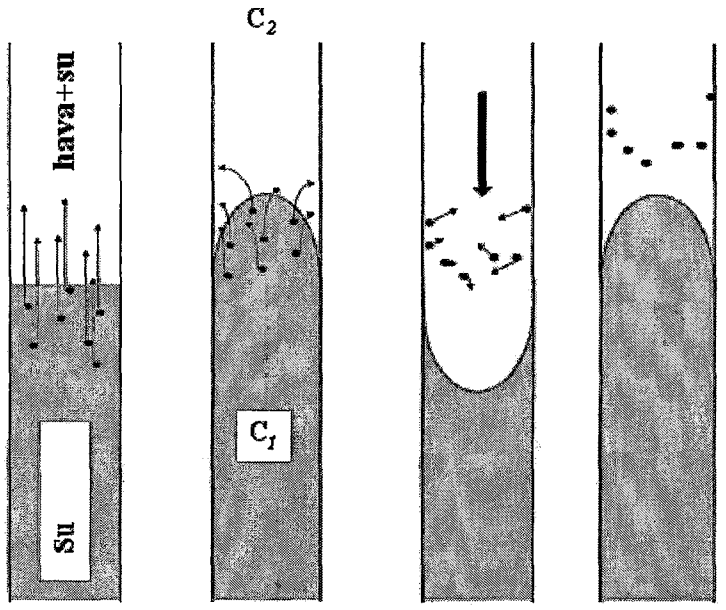
şeklinde hesaplanmaktadır. Bu sonuç ölçülen sıcaklık farklarının çok yakın olmasından dolayı hata yapma olasılığı yüksek olan bir durumdur. Bu yüzden burada bulunan değer sadece soğutucuya geçen ısının kontrolü için kullanılmaktadır.

3.5 Kütlesel Yayılımla Buharlaşma

Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara göre atmosfer basıncında sıvı arayüzeyi sıcaklığı buharlaşma sıcaklığına ulaşmamaktadır. Bu durumda sıvı kolonunda meydana gelen buharlaşma yayılımla gerçekleşmektedir. Deneylerde deneyin başlangıç ve bitişinde sıvı kolonu yükseklikleri tespit edilerek bu sürede ne kadar buharlaşma olduğu hesaplanmaktadır. Salınımlı akış kütlesel yayılımı artırmaktadır. Bu kısımda salınımlı akışta yayılım ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.5.1 Salınımlı akışta kütlesel yayılım

Salınımlı akışta kütlesel yayılım ilk olarak Watson[10] tarafından incelenmiş ve iki rezervuar arasında farklı derişiklikte bulunan iki madde arasında eksenel yayılımla kütle geçişinin bir boyutlu daimi akışa göre salınımlı akışta çok daha fazla olduğu belirtilmiştir. Daha sonra kütle geçişi ile ilgili yapılan çalışmalarda bu durum doğrulanmıştır. Taylor farklı derişikliğe sahip birbiri içinde çözünmüş iki maddenin (tür) ayrıştırılmasında salınımlı akışın çok etkili olduğunu ve ayrılmayı (taşınımı) hızlandırdığını belirtmiştir. Bu tür uygulamalar daha çok karışımlar içerisindeki çevreye zararlı CO_2 gibi maddelerin ayrıştırılmasında kullanılmıştır. Thomas ve Narayanan [41] tarafından kütlesel yayılımın periyodik akışta artıp artmamasının türler arasındaki yayılım katsayısına bağlı olduğu belirtilmiştir. Bazı durumlarda yayılım artarken bazılarında azalmaktadır. Burada kanal boyunca toplam kütle transferi üzerinde etkili olan parametrelerin yayılım katsayıları arasındaki fark, kinematik viskozite (taşıyıcı akışkan), salınım frekansı ve kanal genişliği olduğu belirtilmiştir [40-42]. Thomas [43] bu çalışmaları referans alarak, salınımlı akışa maruz iki ucu açık silindirik bir kanal ile birbirine bağlı farklı derişikliğe sahip iki maddenin yayılımla taşınım mekanizmasını açıklamıştır. Bu çalışmada iki tür arasındaki yayılım işleminde derişikliği yüksek olandan düşük olana doğru bir kütlesel akışın olduğu ve yoğunluğu düşük olan maddenin taşıyıcı olarak rol oynadığı belirtilmiştir. Salınım yapan sıvı kolonu içerisinde sıvı-hava arayüzeyinin



Şekil 3.9 : Salınımlı akışta kütlesel yayılım [42]

aldığı parabolik form radyal yönde de derişiklik gradyanı oluşturarak kütlesel yayılımı artırmaktadır. Sıvı kolonunun hareketi ile çevrimin ilk yarısında katı yüzeye yapışan sıvı filminden akışın merkezine doğru bir kütlesel yayılımın olmaktadır. Ayrılan bu zerrecikler çevrimin diğer yarısında konvektif etkilerle yukarı doğru taşınmaktadır. Bu durum Şekil 3.9'da gösterilmiştir ve bununla ilgili fiziksel mekanizmalar Thomas ve Narayanan [42] tarafından ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

Mevcut çalışmada Thomas [43] tarafından yapılan uçları açık iki tarafında farklı derişikliğe sahip türler bulunan ve silindirik geometriyle birbirine bağlanan sistemde salınımlı akış ta kütlesel yayılım modelinden yararlanarak hareketli sıvı kolonundaki kütlesel yayılım incelenmiştir. Burada ucu açık bir tüp içerisinden yayılım problemine benzer şekilde ucu açık düşey bir sıvı kolonunda bir uçta su ve diğer uçta da hava(+su buharı) olduğu kabul edilmiştir. Bir ucu açık tüp içerisinden olan moleküler yayılıma ek olarak sıvı kolonunun salınımlı hareketinin ilave bir artış sağladığı belirtilmiştir [42]. Buradan hareketle salınımlı akışta kütlesel yayılım, normal yayılımla ilave sağlanan yayılımın toplamı şeklinde düşünülmüştür. Suyun derişikliği C_1 ve hava (+subuharı) nın derişikliği de C_2 olarak alınırsa kütlesel yayılımın yönü $C_1 > C_2$ olduğu için sudan havaya doğru olacaktır.

Salınımlı akışta bir kanal içerisindeki laminer sıkıştırılamaz Newtonien bir akış için momentum denklemi yazılırsa, ($V_z = u$, kabul edildi)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K\,Cos\omega t + v\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u}{\partial r}\right) \tag{3.13}$$

daha öncede elde edildiği gibi salınımlı akış momentum eşitliği elde edilir. Burada v taşıyıcı akışkanın yani hava(+su buharı)nın kinematik viskozitesidir. Halkasal geometri göz önüne alınacak olursa cidarda kayma olmadığı için sınırlarda hız sıfır olacaktır.

$$r=R_1,\quad u=0, \qquad\qquad r=R_2,\quad u=0, \tag{3.14}$$

Bu durumda hız profili için aşağıdaki fonksiyon kabul edilebilir,

$$u = 2\Re\left[u(r)e^{-i\omega t}\right] \tag{3.15}$$

Derişiklik alanı için düşük derişikliğe sahip türe doğru olan yayılım katsayısı D_{AB} kabul edilirse kütlenin korunumu denklemi,

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial z} = D_{AB}\left[\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right] \tag{3.16}$$

olacaktır. Halkasal geometri için sınır şartları uygulanırsa cam cidardan kütlesel yayılım olmadığı için,

$$r = R_1 \text{ de } \frac{\partial C}{\partial r} = 0, \quad \text{ve} \quad r = R_2 \text{ de } \frac{\partial C}{\partial r} = 0 \tag{3.17}$$

dır. Bu durumda derişiklik profili analitik olarak verilen hız profiline benzer olarak yazılırsa, derişiklik

$$C = \frac{(C_2 - C_1)z}{L} + 2\Re\left\{\hat{C}(r)e^{i\omega t}\right\} \tag{3.18}$$

fonksiyonu ile verilebilir. Bu ifadede C_1 ve C_2 iki uçtaki derişikliği göstermektedir. Hız ve derişiklik profili bilindiğine göre, denklem (3.18) verilen kesit üzerinde çevrim boyunca integre edilirse, salınımlı akışta halkasal kesitten "bir çevrimde" taşınan kütle aşağıdaki bağıntı ile verilebilir.

$$\overline{Q} = -\frac{D_{AB}(C_1 - C_2)}{L}\pi(R_2^2 - R_1^2) + \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}}\int_{R_1}^{R_2} uCrdrdt \qquad (3.19)$$

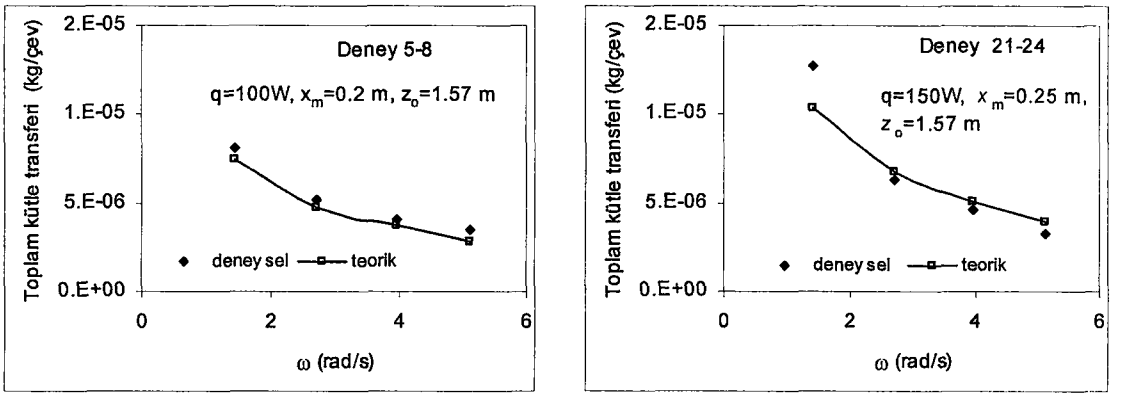
Burada ilk terim normal moleküler yayılımı ikinci terim ise salınımlı akıştan dolayı gelen ilave yayılım miktarını göstermektedir. Üstü açık bir tüpte gerçekleşen moleküler yayılıma ek olarak salınımlı akış yayılımın artmasına sebep olur ve daha fazla kütle geçişi olur. Denklem (3.19) un çözümü,

$$\overline{Q} = -\frac{D_{AB}(C_1 - C_2)}{L} - \frac{\frac{1}{8}x_m^2\omega(C_1 - C_2)}{D\,L\sqrt{\omega/\nu}}\vartheta(f) \qquad (3.20)$$

şeklinde alınabilir. Burada $\vartheta(f)$ ifadesi kompleks ifadelerden oluşan bir çarpanı ifade etmektedir. D de hidrolik çapı göstermektedir. Sudan havaya yayılım için

$$D_{AB} = D_0\left(\frac{T}{273}\right)^n, \qquad D_o=0.216\ 10^{-4}\ \mathrm{m^2/s},\ n=1.8 \qquad (3.21)$$

sıcaklığa göre değişen yayılım katsayısı kullanılmıştır [44]. Bu ifadeden elde edilen sonuçlarla deneysel olarak tespit edilen yayılım miktarı aşağıda grafikler halinde verilmiştir. Artan frekanslarda kütlesel yayılım azalmaktadır. Bu durum salınımın meydana getirdiği fiziksel durumdan kaynaklanmaktadır. Frekans düşük iken fazlar arasındaki geçiş için yeterli zaman varken frekans arttıkça geçiş için zaman kısalmaktadır. Ayrıca sıvı kolonunda frekans arttıkça akışkanın yığın sıcaklığı düştüğünden sıcaklığın etkisiyle olan artış da azalmaktadır. Şekil 3.10'da iki farklı deney gurubu için yapılan hesaplarla, deneysel olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve çok iyi bir uyum sağladığı görülmüştür. Grafiklerde artan frekansla yayılım miktarının azaldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3.10 : Yayılımla buharlaşan kütlenin frekansla değişimi

Diğer ısı geçişlerinin yanında buharlaşmayla kaybolan ısı ihmal edilebilecek kadar azdır. Buharlaşma ile kaybolan ısıyı,

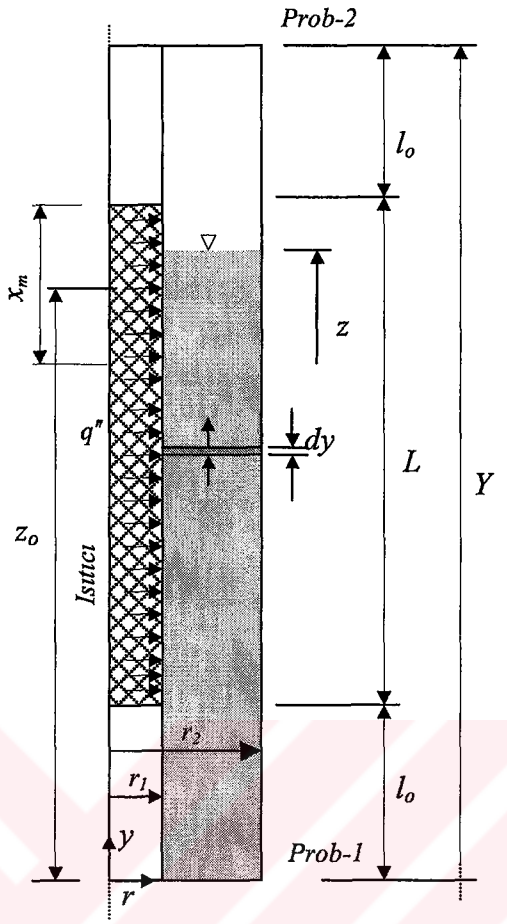
$$q_{buh} = \dot{m} h_{sb} \tag{3.22}$$

ile ifade edersek eksilen kütle son derece düşük olduğundan bu değerde sıfıra yakın çıkmaktadır. Bu durumda buharlaşmanın ihmal edilmesinin hesapları değiştirmeyeceği kabul edilmektedir.

3.6 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesinde İzlenen Hesap Yöntemi

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi düşey sıvı kolonu, devir sayısı ayarlanabilen bir motorla tahrik edilen piston-silindir düzeneği ile hareket ettirilmektedir. Motor momenti karşı yüke göre oldukça büyük olduğundan yerçekimi kuvvetinin motor devrine etkisi ihmal edilebilecek düzeyde kalmaktadır. Dolayısıyla motor frekansı sıvı kolonunun frekansı ile aynı olacaktır. Ayrıca takometre ile ölçülen motor frekansı ile sıvı-hava arayüzeyinin filme alınan hareketinin frekansının aynı olduğu tespit edilmiştir. Piston kesit alanı, sıvı kolonu kesit alanı, volan yarıçapı ve frekansa bağlı olarak sıvı kolonunun maksimum hızı $2R_v \omega A_p / A = u_m$ olmak üzere, sıvı kolonunun ortalama hızının zamanla değişimi

$$u(t) = u_m \, Sin\omega t \tag{3.23}$$



Şekil 3.11 : Deneysel hesaplama için seçilen kontrol hacmi ve boyutları

olacaktır. Su-hava arayüzeyinde kılcallık ve duvar etkileri ihmal edilirse arayüzey düz bir serbest yüzey olarak kabul edilebilir. Bu durumda arayüzeyin konumunu gösteren z yüksekliği denklem (3.23) ün integrasyonu ile

$$z(t) = z_0 - \frac{x_m}{2} Cos\omega t \qquad \textbf{(3.24)}$$

bulunur. Burada $x_m = 2R_v A_p / A$ dır.

Şekil 3.11'den de anlaşılacağı gibi sıvı kolonunun titreşim ekseni ısıtıcı bölgesinde bulunmaktadır. Salınım hareketiyle sıvı sütununun ısıtıcıyı yaladığı alan artıp azalmaktadır. Ayrıca sıvı ve hava tarafının ısıtıcı ile temasta oldukları süre frekansa bağlı olarak harmonik bir şekilde değişmektedir. Isıtıcının uçları arasında bulunan 6 adet termoelemandan alınan yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimleri de frekansa bağlı olarak salınmaktadır. Bu durum Şekil 3.6'da bir eleman için açıkça

görülmektedir. Frekansın artışı yüzey sıcaklıklarını azaltırken, çalkantı sebebiyle harmonik değişimi de bozmaktadır. Sıcak duvar sıcaklıklarının zaman ortalamalarının duvar boyunca değişimi Şekil 3.7'de görülmektedir. Konumla lineere yakın değişim gösteren yüzey sıcaklıkları, frekans arttıkça azalmaktadır.

Atalet kuvvetleri ile viskoz kuvvetlerin aynı mertebede olduğu bölge $\vartheta(\sqrt{2\nu/\omega})$ mertebelerindedir. Duvardan uzaklaştıkça (duvar) momentum yayılımı hızla azalır. Duvar etkisinin etkili olduğu derinlik yaklaşık [11]

$$\delta \cong 3\sqrt{2\nu/\omega}\,, \tag{3.25}$$

olup su için bu derinlik, bu çalışmadaki frekanslar için 1 mm.nin altında kalmaktadır. Bu sebeple, halkasal kanal içinde hız profili üniform kabul edilebilir. Viskoz yayılım, iç enerji üretimi ve akış doğrultusunda (z- doğrultusu) ısı iletiminin ihmal edildiği durum için ısıl enerji denklemi,

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{3.26}$$

olacaktır. Bu denklemi kesit alanı boyunca integre edersek,

$$\frac{\partial T_b}{\partial t} + u\frac{\partial T_b}{\partial z} = \frac{2}{\rho c(r_2^2 - r_1^2)}\left(r_1 q_1'' - r_2 q_2''\right) \tag{3.27}$$

Burada yığın sıcaklık $T_b = \frac{1}{A}\int_A TdA$ şeklinde belirlenmiştir. q_1'', q_2'' de sırasıyla ısıtıcı ve dış camın birim yüzeyinden birim zamanda geçen ısı akılarıdır.

İncelenen problem su ve havadan oluşan bileşik bir ısı geçişi problemidir. Su-hava arayüzeyini gösteren z, arayüzeyin yaklaşık konumunu gösterdiği için sıcak yüzey ile su arayüzeyini de kısmen belirtmektedir. Su-hava arayüzeyi hem kılcallığa hem de harekete bağlı olarak düzlem bir yüzey olmayacaktır. Suyun sıcak yüzeyi ıslattığı süreç yalnız z konumu ile belirlenemez. (3.26) denklemi ile yazılan ısıl enerji korunumu ifadesi de hava-su arayüzeyinde, arayüzey geometrisi ve hızı bilinmediğinden su ve hava için ayrı ayrı yazılması pratik sonuç vermez. Ancak

enerji denklemini su ve hava sistemi için integral formda yazıp bir çevrim boyunca integre edersek,

$$H_2 - H_1 = \oint uA[\rho_a c_a T_{ba}(Y,t) - \rho_l c_l T_{bl}(0,t)] = q_1'' 2\pi r_1 L\left(\frac{2\pi}{\omega}\right) - \oint \int_0^Y 2\pi r_2 q_2'' dydt \tag{3.28}$$

elde edilir. Bu ifade bir çevrim boyunca entalpi giriş çıkışlarının ısı alışverişine eşit olduğunu göstermektedir.

$$Q_k = \oint \int_0^Y 2\pi r_2 q_2'' dydt = q_1'' 2\pi r_1 L\left(\frac{2\pi}{\omega}\right) - (H_2 - H_1) \tag{3.29}$$

Ayrıca ısıtıcıdaki ısı akısı sabittir. Ancak camdan dış havaya geçen ısı akısı q_2'' yükseklik boyunca hem frekansa hem de konuma göre değişmektedir. (3.29) ifadesi ile bir çevrim boyunca dış havaya geçen toplam ısı akısı hesaplanabilir. Çünkü ifadedeki diğer büyüklükler ölçülerek bulunabilmektedir.

Ölçülen cam dış yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi ihmal edilebilecek mertebelerdedir. Cam iç yüzey sıcaklıklarının zamanla harmonik şekilde değişmesi gerektiği halde camın sönüm etkisinden dolayı dış yüzey sıcaklıklarının salınımı ihmal edilmektedir.

Hava su arayüzeyinin yaklaşık konumunu gösteren z mesafesinin salınım ekseni z_o'a göre (z_o aynı zamanda doldurma yüksekliğidir) su ve hava tarafında kalan cam dış yüzey sıcaklık ortalamaları hesaplanabilir. Böylece (3.29) denklemi ile bulunan ısı kaybı yaklaşık olarak su ve hava tarafından kaybolan ısılara ayrılabilir.

$$\frac{Q_{kl}}{Q_k} = \frac{z_0(T_{cl} - T_a)}{z_0(T_{cl} - T_a) + (Y - z_0)(T_{ca} - T_a)} = \phi \tag{3.30}$$

$$\frac{Q_{ka}}{Q_k} = \frac{(Y - z_0)(T_{ca} - T_a)}{z_0(T_{cl} - T_a) + (Y - z_0)(T_{ca} - T_a)} = 1 - \phi \tag{3.31}$$

Isıl enerji denklemini su için integral formda yazıp çevrim boyunca integre edersek,

$$H_1 = \oint \int_0^z 2\pi r_2 q_2'' dydt - \oint \int_{l_0}^{y^*} 2\pi r_1 q_1'' dydt \tag{3.32}$$

(burada y* girişten menüsküse kadar olan mesafeyi göstermektedir) bu denklemde sağ taraftaki ilk terim su ile dolu kısımdaki cam yüzeyden ortama olan ısı kaybını göstermektedir. Denklemi düzenlersek,

$$Q_l = \oint \int_{l_0}^{y^*} 2\pi r_1 q_1'' dydt = Q_{kl} - H_1 \tag{3.33}$$

suya bir çevrim boyunca geçen ısı,

$$Q_l = m_l q_1'' 2\pi r_1 L\left(\frac{2\pi}{\omega}\right) - \phi H_2 - (1-\phi)H_1 \tag{3.34}$$

şeklinde bulunur. Bir çevrim boyunca suya geçen toplam ısı miktarı Q_l, ortalama ısıtıcı yüzey sıcaklığı ve suyun giriş ortalama sıcaklığı arasında,

$$Q_l = 2\pi r_l L h_w (T_{wo} - T_m)(\frac{2\pi}{\omega}) \tag{3.35}$$

ilişkisini yazarsak Nusselt sayısı;

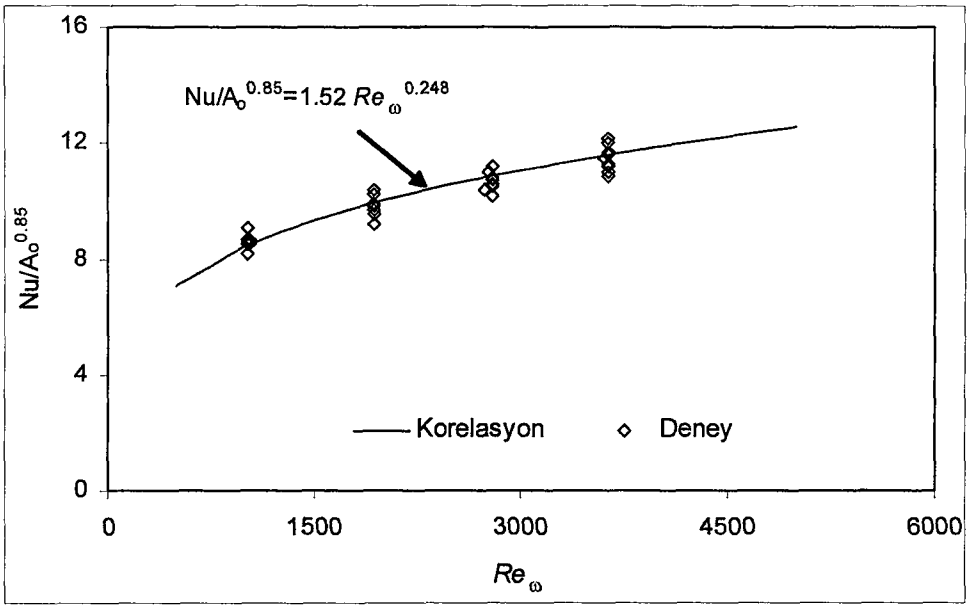
$$Nu = \frac{h_w L}{k} = \frac{L}{k} \frac{Q_l}{2\pi r_1 L(T_{wo} - T_m)(2\pi/\omega)} \tag{3.36}$$

olarak tariflenebilir. Bu bağıntı kullanılarak deneylerde elde edilen Nusselt sayıları Şekil 3.12'de boyutsuz parametrelere bağlı olarak toplu halde verilmiştir. Burada ortalama su sıcaklığı,

$$T_m = \frac{T_{10} + T_{20}}{2} \tag{3.37}$$

olarak tarif edilmiştir. T_{10} ve T_{20} da sırayla birinci ve ikinci prob sıcaklıklarıdır.

Eşitlik (3.36) kullanılarak hesaplanan Nusselt sayıları Şekil 3.12'de giriş gücü ve frekanslara bağlı olarak verilmiştir. Bu tür bir akışta Nusselt sayısının bağlı olduğu



Şekil 3.12 : Nusselt sayısının boyutsuz parametrelere bağlı olarak değişimi

parametreler daha önce belirtildiği gibi kinetik Reynolds sayısı, boyutsuz genlik, Prandtl sayısı ve ısıtıcı uzunluğunun hidrolik çapa oranı olan geometrik parametre olarak belirtilmişti.

$$Nu=f(Re_\omega, A_o, Pr, D/L) \tag{3.38}$$

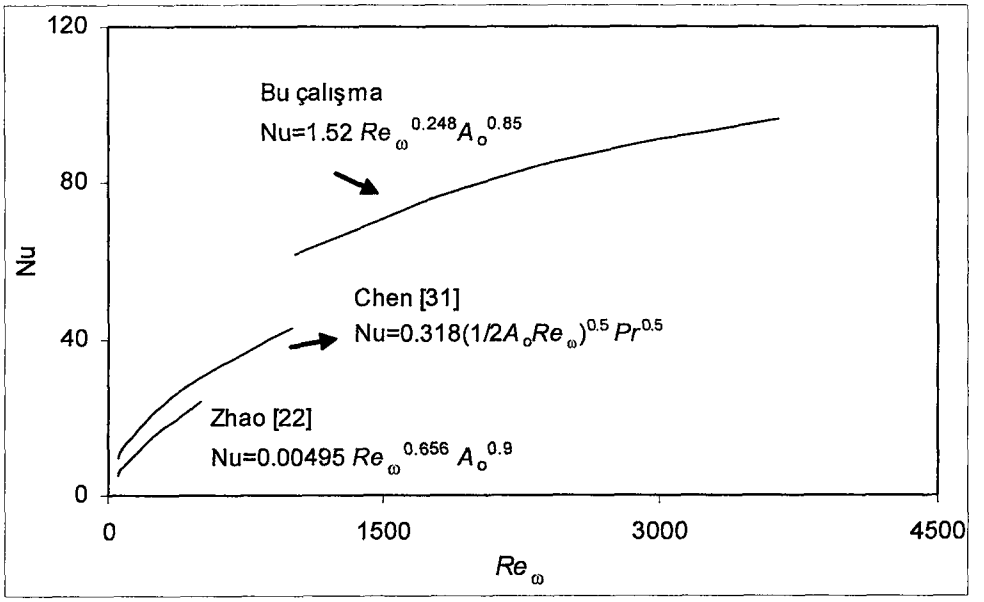
Bu çalışmada, Prandtl sayısı (Pr=3.5) ve geometrik parametre (D/L=1/30) sabit tutularak frekans ve genlik değiştirilmiştir. Bu durumda Nusselt sayıları için elde edilen korelasyon eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$Nu = 1.52\, Re_\omega^{0.248}\, A_0^{0.85} \tag{3.39}$$

Bu eşitliğin geçerli olduğu aralık,

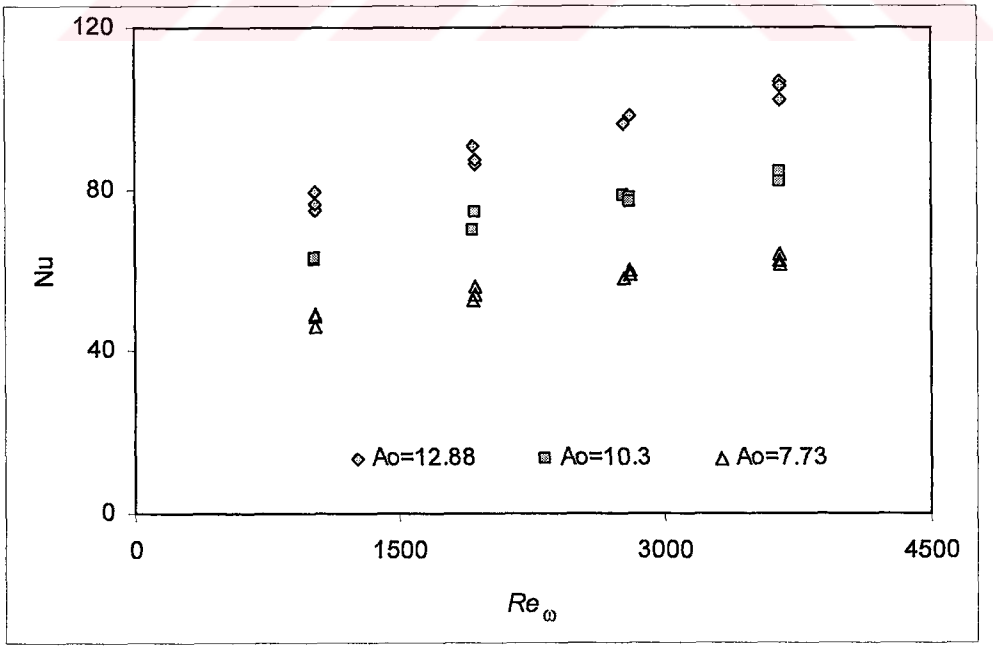
$$1000 < Re_\omega < 4000 \quad \text{ve} \quad 7 < A_0 < 15$$

dır. Eşitlik (3.39) ile deneysel verilerin karşılaştırması Şekil 3.12'de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi bulunan korelasyon bağıntısı deneylerle iyi bir uyum sağlamaktadır. Nusselt sayısının boyutsuz parametrelere bağlı olarak değişimi tüm deneyler için Ek-H'de tablo halinde toplu olarak verilmiştir. Nusselt sayısı frekansla ve genlikle birlikte artmaktadır. Nusselt sayısının belirsizliği için Ek-B'de ayrıntılı bir hata analizi yapılmıştır.



Şekil 3.13 : Deney sonuçlarından elde edilen Nusselt sayıları ile literatürde bulunan korelasyonların karşılaştırılması

Eşitlik (3.39) ile bu konuda yapılan diğer çalışmaların karşılaştırması Şekil 3.13'de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi sunulan korelasyon bağıntısı diğer çalışmalarla iyi bir uyum sağlamaktadır. Burada yapılan karşılaştırma, bu çalışmaya en yakın olan çalışmalar ile yapılmıştır.



Şekil 3.14 : Nusselt sayılarının boyutsuz genliğe göre değişimi

Şekil 3.14'de genliğin ısı geçişine etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi genlik arttıkça Nusselt sayısı da artmaktadır. Burada salınımlı akışta ısı geçişi için iki önemli parametrenin *genlik* ve *frekans* olduğu söylenebilir.

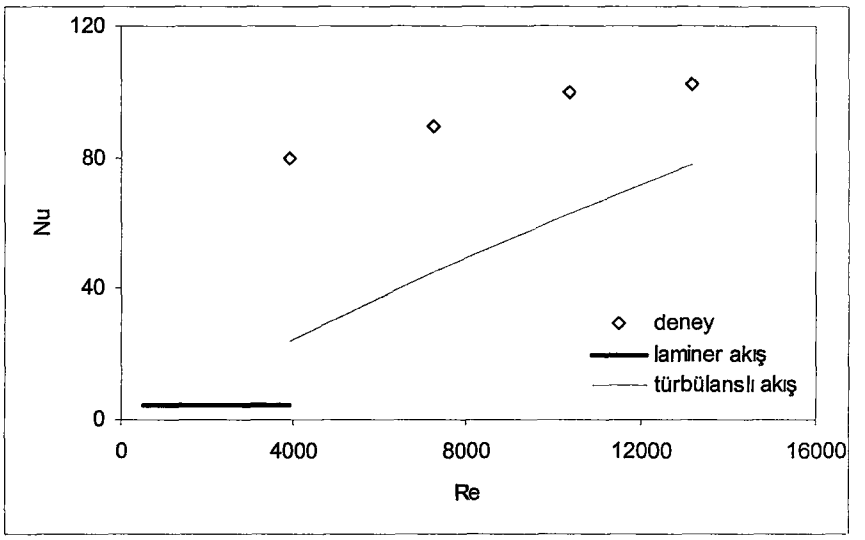
3.7 Salınımlı Akış Nusselt Sayısının Daimi Akış ile Karşılaştırılması

Salınımlı akışın ısı geçişine etkisinin anlaşılabilmesi için deneylerde elde edilen Nu sayıları, daimi akış için verilen Nu sayıları ile karşılaştırılmıştır. Bir boru içerisindeki akış için Nu sayısı akış rejimlerine bağlı olarak araştırmacılar tarafından ampirik bağıntılarla ifade edilmiştir. Salınımlı akışta hız sinüzoidal olarak değiştiği için bir çevrim sırasında frekansa bağlı olarak laminer, geçiş ve türbülanslı olmak üzere sırayla üç rejim birlikte gerçekleşmektedir. Burada bir karşılaştırma yapmak için salınımlı akışta genlik ve çevrim süresinden yararlanarak akışın ortalama hızı bulunmuş ve bu hızdaki Reynolds sayısı esas alınmıştır. Bulunan Reynolds sayılarında ise hidrolik çap kullanılmıştır. Ayrıca salınımlı akışta akışın geriye dönüşü sırasında girişte çok kısa bir bölgede gelişmekte olan akış bölgesi meydana gelmektedir. Bu giriş etkisinin dışında salınımlı akışta hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış şartları geçerlidir. Bundan dolayı, daimi akışta laminer ve türbülanslı bölgede hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış durumları için karşılaştırma yapılmış ve sonuçlar aşağıda grafik olarak verilmiştir.

Bir boru içerisinde sabit ısı akısında laminer akışta Nusselt sayısı Nu=4.36 olarak verilmiştir [48]. Geçiş bölgesi için tam olarak bir bağıntı sunulmamakla birlikte bazı araştırmacılar Re<10000 değerine kadar laminer akış, bazıları ise Re>4000 için türbülanslı koşulları kabul ederek bağıntılar vermişlerdir. Bu bölge için verilen korelasyonlar daha çok kabullere dayandığı için burada bir karşılaştırma yapılmamıştır. Türbülanslı akış koşulları için bu konuda Gnielinski [37] eşitliği kullanılabilir.

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \qquad \textbf{(3.40)}$$

Bu bağıntı $0.5 \le Pr \le 2000$ ve $3000 < Re < 5x10^6$ değerleri için geçerlidir. Burada f sürtünme faktörüdür ve Moody diyagramından bulunabilir.



Şekil 3.15 : Salınımlı akış ile daimi akış arasında Nu sayılarının karşılaştırması

Şekil 3.15'de verilen değerler deneylerden (salınımlı akış) ve yukarıdaki bağıntılar kullanılarak elde edilen Nu sayılarını göstermektedir. Görüldüğü gibi salınımlı akışta elde edilen ısı geçişi daimi akıştaki tüm rejimlerde elde edilen değerlerden daha büyüktür. Bu sonuçlara göre açıkça salınımlı akışın ısı geçişini artırdığını söyleyebiliriz.

3.8 Boyut Analizi

Hareketli sıvı kolonunda ısı geçişine etki eden fiziksel büyüklükler,

$$h = f(\omega, c_p, x_m, L, D, \rho, \mu, k_f) \tag{3.41}$$

olarak belirlenebilir. Bu parametreler göz önüne alınarak yapılan boyut analizinin detayları Ek-E'de verilmiştir. HSK için yapılan boyut analizinden elde edilen komple boyutsuz çarpım serisi aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$\pi_1 = \dfrac{\omega \rho D^2}{\mu} = \dfrac{\omega D^2}{\nu}$ $\quad \mathrm{Re}_\omega$, Kinetik reynolds sayısı

$\pi_2 = \dfrac{\mu C_p}{k_f}$ $\quad$ Pr, Prandtl sayısı

$\pi_3 = \dfrac{hD}{k_f}$ $\quad$ Nu, Nusselt sayısı

$\pi_4 = \dfrac{x_m}{D} = A_0$ $\quad A_0$, Boyutsuz genlik

$\pi_5 = \frac{L}{D}$ L/D Isıtıcı aktif boyunun hidrolik çapa oranı.

$$Nu = C\left(Re_\omega, Pr, A_0, L/D\right)$$

3.9 Gözlemler

Hareketli sıvı kolonunda sıvının hareketi pistonun hareketini takip etmektedir. Çeşitli ısı güçleri ve farklı frekanslarda yapılan deneylerin analizi sonucu elde edilen sonuçlardan buharlaşmanın sadece yayılımla olduğu, yüzey sıcaklıklarının atmosfer şartlarında suyu buharlaştırmaya yetmediği anlaşılmıştır. Bu durumda eksilen seviyenin ısı geçişi mekanizmasını değiştirmediği ve ihmal edilebileceği kabul edilmiştir.

Deneylerde sıvı kolonunun konum-zaman değerlerini bulmak için arayüzeyin hareketi bir dijital kamera yardımıyla filme alınmış ve filmler çözülerek salınım frekansı bulunmuştur. Bulunan bu frekans, dijital takometre ile devri ölçülen motorun frekansı ile karşılaştırılmış ve aralarında bir fark olmadığı anlaşılmıştır. Sıkıştırılamaz bir akış için bu beklenen bir durumdur.

Yapılan deneylerde hava-sıvı arayüzeyinin hızının (hareketinin) sinüzoidal olduğu ve verilen frekans aralığında arayüzeyde herhangi bir dalgalanmanın olmadığı gözlemlenmiştir.

Düşey kolonun dış yüzeyinden ölçülen sıcaklıklar frekans arttıkça sıvının hareketini takip edememektedir. Bu değerler camın sönüm etkisinden dolayı ortalama bir sıcaklıkta kalmaktadır.

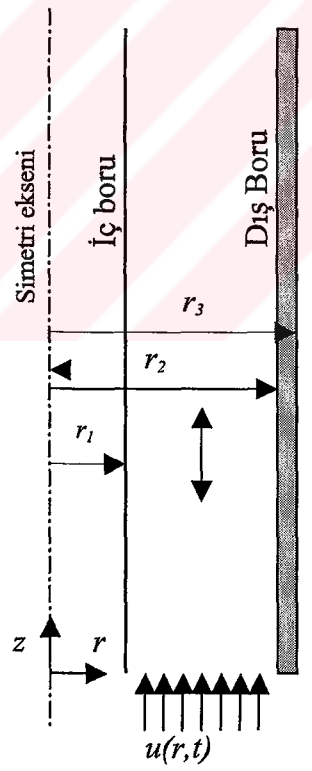
Genlik arttıkça yüzey sıcaklığının değeri yaklaşık lineer olarak düşmektedir. Isıtıcının girişinden üst kısma doğru gidildikçe sıcaklıklar lineer bir artış göstermektedir. Ayrıca, frekansın artması yüzeyi daha hızlı soğuttuğundan artan frekansla yüzey sıcaklığının değeri düşmektedir.

Hareketli sıvı kolonunda ısı geçişini etkileyen iki önemli parametrenin genlik ve frekans olduğu anlaşılmıştır. Her ikisinin de artması ısı geçişini artırmaktadır. Hareketli sıvı kolonunda genlik ve frekans değiştirilerek kontrollü bir şekilde ısı çekmek mümkündür. Bu durum kontrollü ısı geçişinin istendiği bir çok mühendislik alanında uygulanabilir.

4. FORMÜLASYON

4.1 Diferansiyel Formülasyon

Bu bölümde, düşey bir sıvı kolonu içerisinde sabit ısı akısı veren silindirik bir yüzey etrafındaki sinüzoidal titreşimlere maruz halkasal akışta diferansiyel korunum denklemleri çıkarılmıştır. Halkasal akış için önce silindirik koordinatlarda genel diferansiyel eşitlikler yazılmış ve daha sonra yapılan kabuller altında bu eşitlikler basitleştirilerek geçerli (yönetici) denklemler elde edilmiştir.



Şekil 4.1 : Salınımlı akış alanı ve koordinat sistemi

Problemde hem iki fazın bir arada bulunması hem de arayüzeyden buharlaşmanın olması olayı çok daha kompleks hale getirmekte ve denklemlerin çözümünü zorlaştırmaktadır. Bu yüzden diferansiyel formülasyon problemin fiziksel

mekanizmasının anlaşılması açısından arayüzey fiziği ve buharlaşma ihmal edilerek yapılmıştır. Ancak Bölüm 4.2'de arayüzey ve her iki fazında göz önüne alındığı bir matematik analiz yapılmıştır.

Bu tip bir boru akışı için daha önce yapılan çalışmalar [5-8] ışığında aşağıdaki kabuller yapılabilir.

- Akış sıkıştırılamaz, (ρ =sabit) cidarda kayma yok ve Newtonyen akıştır,
- Eksenel olarak simetrik, $\frac{\partial}{\partial\theta}=0, \quad V_\theta=0$
- Radyal yönde hız bileşeni sıfır, V_r=0
- Akışkanın termofiziksel özellikleri sabit, (k_f , c_p , sabit)
- Viskoz dissipasyon etkileri konvektif terimlerle karşılaştırıldığında ihmal edilebilmektedir [45].

bu kabuller altında salınımlı akış için, kütle momentum ve enerjinin korunumu ifadeleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial u}{\partial z}=0 \tag{4.1}$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+\nu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u}{\partial r}\right)\right]-g_z \tag{4.2}$$

$$\rho c_p\left[\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial z}\right]=k_f\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right] \tag{4.3}$$

Akış eksenel simetriktir ve üniform bir basınç gradyanı tarafından hareket ettirilmektedir. Basınç gradyanı yalnızca zamanın bir fonksiyonudur. (4.2) nolu denklemi basitleştirmek için yerçekimi terimini basınç terimine ilave edebiliriz. Yerçekimi ifadesi bir potansiyelden türetilebildiğinden, basınç terimi $\nabla(p+\rho gz)$ şeklinde yazılabilir. Bu durumda yerçekimi ifadesini basınç terimine ilave ederek değiştirilmiş basınç cinsinden bunları ifade edebiliriz [34]. Burada,

$$\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+g\right)=\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} \tag{4.4}$$

şeklinde değiştirilmiş basınç terimi kullanılabilir. Düşey eksenli silindirik bir boruda akışın yönünün yukarı doğru olduğu gözönüne alındığı için bu terim toplanmıştır. Burada eğer salınımlı akışı (hareketli sıvı kolonu) gözönüne alırsak, bu akışı meydana getiren kuvvetin basınç kuvveti olduğundan yola çıkarak, basınç terimleri için şu dönüşümü yapabiliriz, (Salınımlı formda basınç gradyanı) [23].

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} = K Cos(\omega t) \tag{4.5}$$

Buna göre (4.2) nolu denklemi tekrar düzenlersek,

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right) = K Cos\omega t + \nu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u}{\partial r}\right)\right] \tag{4.6}$$

haline gelir. Burada K ve ω dışarıdan akışa uygulanan basınç gradyanının büyüklüğü ile ilgili terimlerdir, K basınç genliği ve ω da basıncın açısal frekansını göstermektedir.

Silindirik koordinatlarda düşey bir boruda ısı geçişini göz önüne alarak mevcut problem için denklem (4.3)'ü düzenlersek, bu denklemde sağ taraftaki ikinci terim, birinci terimin yanında çok küçüktür. Bunun nedeni radyal yönde iletim terimlerinin, eksenel yönde ise taşınım terimlerinin daha büyük olmasındandır. Bu durumda sağ taraftaki ikinci terim birinci terime göre çok küçük olduğundan bu terim ihmal edilebilir [29]. Bu kabul altında denklem basitleşir ve,

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k_f}{\rho c_p}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)\right] \tag{4.7}$$

haline gelir. Salınımlı akışa etki eden boyutsuz büyüklükleri bulmak için bu denklemleri uygun fiziksel parametrelerle boyutsuzlaştırmak gerekmektedir. Akışın bağlı olduğu parametreleri boyutsuzlaştırmak için seçilen fiziksel büyüklükler aşağıda verilmiştir [23].

$$\tau = \omega t, \quad R = \frac{r}{D}, \quad Z = \frac{z}{D}, \quad U = \frac{u}{u_m}, \quad \mathrm{P} = P/\rho_f u_m^2, \quad \theta = \frac{k_f T}{q'' D}$$

Burada q'', cidardan akışkana uygulanan sabit ısı akısı, D, hidrolik çap, ve L akışkana ısı akısının uygulandığı, (ısıtıcı aktif kısmı) cidar uzunluğu olarak alınmıştır. Yapılan boyutsuzlaştırmalar sonunda elde ettiğimiz kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri,

$$\frac{\partial U}{\partial z} = 0 \tag{4.8}$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{A_o}{2} Cos\tau + \frac{1}{Re_\omega}\left[\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R\frac{\partial U}{\partial R}\right)\right] \tag{4.9}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{A_o}{2} U(\tau,R)\frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{1}{Pr\, Re_\omega}\left[\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R\frac{\partial \theta}{\partial R}\right)\right] \tag{4.10}$$

dır. Burada, A_o, sıvının toplam yerdeğiştirme uzunluğunun hidrolik çapa oranı olan boyutsuz genliktir. Diğer boyutsuz çarpanlarda kinetik Reynolds sayısı Re_ω ve Prandtl sayısı Pr, olarak ifade edilmektedir. Ayrıca ilave bir parametre olarak cidardan sabit ısı akısı uygulanan ısı geçişi probleminde, yerdeğiştiren sıvının ne kadarlık bir kısmının ısıtıcı ile temasta olduğunu belirten (D/L) oranı alınabilir.

Bu durumda salınımlı akışta ısı geçişine etki eden boyutsuz değişkenler, A_0, Re_ω, Pr, ve (D/L) oranı olarak belirlenebilir. Daha öncede bahsedildiği gibi, bu sayılara Salınımlı akış *benzerlik parametreleri* denilmektedir.

4.1.1 Hız profilinin bulunması;

Uchida[6] bir dairesel boru içerisinde (çapı $D = 2a$ olan) tam gelişmiş laminer salınımlı akışta eksenel hız profili için tam çözümü elde etmiştir. Zhao ve Cheng [19] elde edilen bu ifadeyi tam gelişmiş salınımlı akış için düzenleyerek analitik bir çözüm vermişlerdir. Bu konuda yapılan bir başka çalışmada da Shahin [45] tarafından halkasal zorlanmış salınımlı akışta hız dağılımı analitik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu bölümde elde edilen eşitlik (4.6) nın analitik çözümü Shahin [45] tarafından verilmiştir. Dolayısıyla hız denklemi laminer akışta analitik olarak çözülebilmektedir.

Çözüm için gerekli olan sınır sartları;

Sınır Şartları $u=u(r,t)$,

i-) $r=r_1$ için , $u=u(r,t)$, $u=0$ (cidarda hız sıfır)

ii-) $r=r_2$ için, $u=u(r,t)$, $u=0$ (cidarda hız sıfır)

ii-) $t \geq 0$ için $r_1 \leq r \leq r_2$ $u = u_o(r)e^{i\omega t}$

Denklem (4.6) da bu sınır şartları arasında, çözümü kolaylaştırmak amacıyla, basınç terimi uygun kompleks formda

$$K\,Cos\,\omega t = Ke^{i\omega t} \tag{4.11}$$

şeklinde yazılabilir [45]. Hız için,

$$u(r,t) = f(r)e^{i\omega t} \tag{4.12}$$

fonksiyonu şeklinde çözümler aranır ve bu fonksiyon denklem (4.6) da yazılırsa, aşağıdaki diferansiyel eşitlik elde edilir.

$$f''(r)+\frac{1}{r}f'(r)-\frac{i\omega}{r}f(r)=-\frac{K}{\nu} \tag{4.13}$$

Denklemin önce homojen kısmı gözönüne alınırsa, bunun bir Bessel diferansiyel denklemi olduğu görülür. Bu durumda (4.13) diferansiyel eşitliğinin tam çözümü aşağıdaki gibi olacaktır.

$$f(r) = AJ_0\left(r\sqrt{\frac{-i\omega}{\nu}}\right)+BY_0\left(r\sqrt{\frac{-i\omega}{\nu}}\right)+\frac{K}{-i\omega} \tag{4.14}$$

$f(r)$ yi (4.12) denkleminde yerine yazarsak hız profili,

$$u(r,t) = Ae^{i\omega t}J_0\left(r\sqrt{\frac{-i\omega}{\nu}}\right)+Be^{i\omega t}Y_0\left(r\sqrt{\frac{-i\omega}{\nu}}\right)+\frac{Ke^{i\omega t}}{-i\omega} \tag{4.15}$$

olarak bulunur. Denklemlerdeki sabitleri bulmak için sınır şartlarını uygularsak, birinci sınır şartından ($r=r_1$, $u=0$)

$$A = \frac{\frac{-K}{i\omega} - BY_0(\eta R_1)}{J_0(\eta R_1)} \tag{4.16}$$

ikinci sınır şartından ($r = r_2$, $u=0$)

$$B = \frac{\frac{K}{i\omega}\left[J_0(\eta R_2) - J_0(\eta R_1)\right]}{\left[Y_0(\eta R_2)\,J_0(\eta R_1) - Y_0(\eta R_1)\,J_0(\eta R_2)\right]} \tag{4.17}$$

bulunur ve bu ifadeyi A da yerine yazarsak,

$$A = -\frac{K}{J_0(\eta R_1)\,i\omega} - \left[\ \frac{\frac{K}{i\omega}Y_0(\eta R_1)\left[J_0(\eta R_2) - J_0(\eta R_1)\right]}{J_0(\eta R_1)\left[Y_0(\eta R_2)\,J_0(\eta R_1) - Y_0(\eta R_1)\,J_0(\eta R_2)\right]}\ \right] \tag{4.18}$$

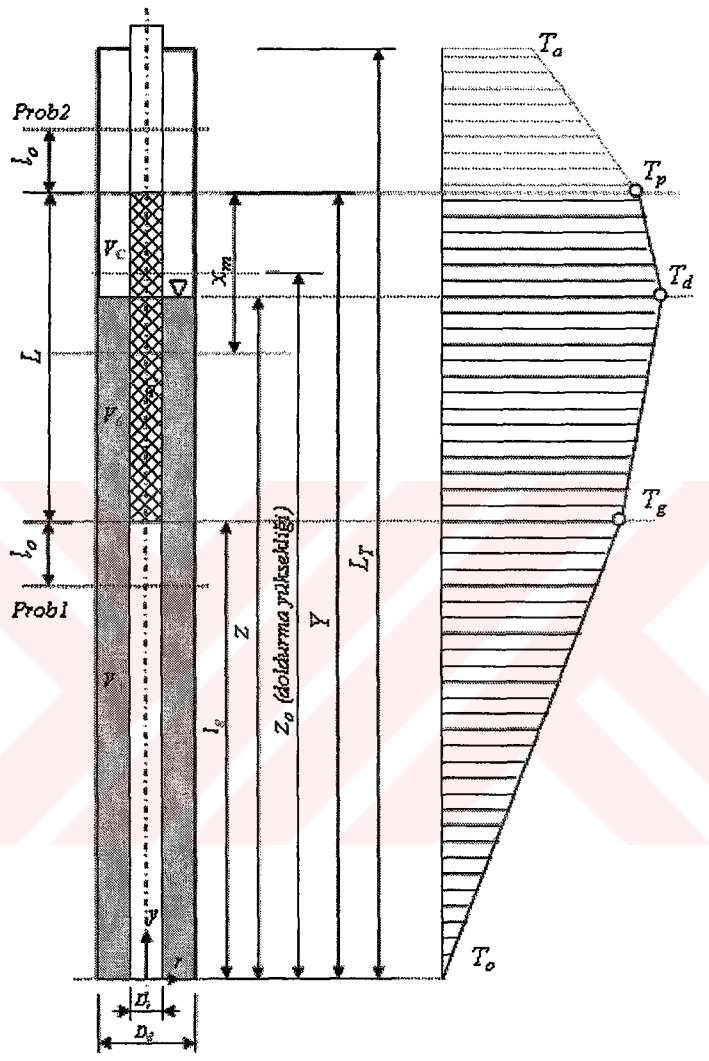
denklemlerdeki bilinmeyen sabitler bulunur. Bu sabitleri hız denkleminde yerine yazarsak hız profili elde edilir.

$$u(r,t) = e^{i\omega t}\Bigg(\left[-\frac{K}{J_0(\eta R_1)\,i\omega} - \frac{\frac{K}{i\omega}Y_0(\eta R_1)\left[J_0(\eta R_2) - J_0(\eta R_1)\right]}{J_0(\eta R_1)\left[Y_0(\eta R_2)\,J_0(\eta R_1) - Y_0(\eta R_1)\,J_0(\eta R_2)\right]}\right]J_0(\eta r) \tag{4.19}$$

$$+\left[\frac{\frac{K}{i\omega}\left[J_0(\eta R_2) - J_0(\eta R_1)\right]}{\left[Y_0(\eta R_2)\,J_0(\eta R_1) - Y_0(\eta R_1)\,J_0(\eta R_2)\right]}\right]Y_0(\eta r) + \frac{K}{-i\omega}\Bigg)$$

4.2 Kontrol Hacmi Formülasyonu

4.2.1 Kontrol hacmi yaklaşımı ile Hareketli Sıvı Kolonunun modellenmesi



Şekil 4.2 : Matematiksel model için Hareketli Sıvı Kolonu geometrisi

Hareketli sınıra sahip bir kontrol hacmi için kütle, momentum ve enerjinin korunumu ifadeleri integral formda aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{V_A}\rho dV + \int_{S_A}\rho(\mathbf{v}-\mathbf{v}_s)\cdot\mathbf{n}dA = 0 \qquad (4.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{vA}\rho \mathbf{v} dV + \int_{sA}\rho \mathbf{v}(\mathbf{v}-\mathbf{v}_s)\cdot \mathbf{n} dA = \sum \mathbf{F} \tag{4.21}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{V_A}\rho\left(u+\frac{|\mathbf{v}|^2}{2}+gz\right)dV + \int_{S_A}\rho\left(h+\frac{|\mathbf{v}|^2}{2}+gz\right)(\mathbf{v}-\mathbf{v}_s)\cdot \mathbf{n} dA = \dot{Q}-\dot{W} \tag{4.22}$$

Arayüzey korunum eşitlikleri için; arayüzeyde ve tüm cidarlarda yüzey gerilmeleri ve adhezyon kuvvetleri ihmal edilmektedir. Sıvı ve buhar Newtonien akışlardır [35]. Bu kabuller altında arayüzey korunum eşitlikleri yeniden düzenlenebilir. Çözüm için Şekil 4.2'de görüldüğü gibi bir kontrol hacmi seçilmiştir. Daha sonra problemin çözümünde kolaylık sağlaması açısından bu kontrol hacmi $V = V_A + V_B + V_C$ şeklinde üçe bölünmüştür. Bu kontrol hacmi için kütlenin korunumu eşitliği yazılırsa,

$$\dot{m} + \dot{m}_g - \dot{m}_ç = \rho_f A_1 \dot{z}_1 + \rho_l A_1 (v_{L1} - \dot{z}_1) - \rho_l A_1 v_1 = 0 \tag{4.23}$$

denklemi elde edilir. Burada sıvı yoğunluğu sabit ve sıvı hızı ortalama olarak alınırsa, bu kabuller altında aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$v_{LI} = v_I \tag{4.24}$$

Aynı şekilde kontrol hacmi için momentum denklemini elde edelim, genel momentum ifadesi yazılır,

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\int_0^z \rho v A dz\right] + \left[\rho v (v - v_s) A\right]_{çıkış} - \left[\rho v (v - v_s) A\right]_{giren} = \sum F \tag{4.25}$$

ve düzenlenirse,

$$\rho A z \dot{v} = \sum F \text{ =(Sürtünme kuvvetleri+yerçekimi+basınç kuvvetleri)}$$

ve buradan momentum denklemi,

$$P_x - (P_o + \rho \dot{v} z + \rho g z + F/A) = 0 \tag{4.26}$$

olarak elde edilir. Şimdi de kontrol hacmi için toplam enerji dengesine bakalım, (4.22) ifadesi düzenlenirse, daha basit bir ifadeyle enerji denklemi,

$$\frac{d}{dt}\int_{v}\rho\left(u+\frac{v^2}{2}+gz\right)dV+\dot{m}_{ç}\left(h+\frac{v^2}{2}+gz\right)_{ç}-\dot{m}_{g}\left(h+\frac{v^2}{2}+gz\right)_{g} \qquad (4.27)$$
$$=\dot{Q}-\dot{W}_{l}-\dot{W}_{f}$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeyi düzenlersek,

$$\frac{d}{dt}\int_{v}\rho u dV+\dot{m}_{ç}u_{ç}-\dot{m}_{g}u_{g}+\rho_{f}\frac{d}{dt}\int_{0}^{z_l}\left(\frac{v^2}{2}+gz\right)Adz+\dot{m}_{ç}\left(h+\frac{v^2}{2}+gz\right)_{ç} \qquad (4.28)$$
$$-\dot{m}_{g}\left(h+\frac{v^2}{2}+gz\right)_{g}=\dot{Q}-\dot{W}_{l}-\dot{W}_{f}$$

elde edilir. Bu denklemde $W_l=P_oA\dot{z}$ atmosfere karşı yapılan işi, W_f de sürtünmelere karşı yapılan işi göstermektedir. Burada çözümü kolaylaştırmak için,

$$\dot{m}_{ç}\left(\frac{P}{\rho}+\frac{v^2}{2}+gz\right)_{ç}-\dot{m}_{g}\left(\frac{P}{\rho}+\frac{v^2}{2}+gz\right)_{g}$$
$$=\underbrace{\dot{m}_{ç}\left(\frac{P_o}{\rho_b}+\frac{v_b^2}{2}+gz\right)-\dot{m}_{ç}\left(\frac{P_0}{\rho_l}+\frac{v_l^2}{2}+gz\right)}_{\text{Isı Enerji}}+\underbrace{\dot{m}_{ç}\left(\frac{P_0}{\rho_l}+\frac{v_l^2}{2}+gz\right)-\dot{m}_{g}\left(\frac{P_x}{\rho_l}+\frac{v_l^2}{2}+0\right)}_{\text{Mekanik Enerji}} \qquad (4.29)$$

dönüşümü yapılırsa, denklem (4.28) de bulunan mekanik enerji terimleri,

$$\rho_l\frac{d}{dt}\int_{0}^{z}\left(\frac{v^2}{2}+gz\right)Adz+\rho_lA(v-\dot{z})\left(\frac{P_o}{\rho_l}+\frac{v^2}{2}+gz\right)-\rho_fAv\left(\frac{P_x}{\rho_l}+\frac{v^2}{2}\right) \qquad (4.30)$$
$$=-W_l-W_f$$

olarak yazılabilir. Bu ifade düzenlenirse denklem (4.26) da verilen momentum eşitliği elde edilir. Elde edilen momentum ifadesini (4.27) denkleminde yazarsak mekanik enerji ile ilgili terimler enerji denkleminden düşer. Bu durumda geriye sadece ısıl enerji dengesi kalır ve denklem,

$$\frac{d}{dt}\int_v \rho u dV + \dot{m}_ç u_ç - \dot{m}_g u_g + \dot{m}_ç\left(\frac{P_0}{\rho_b} + \frac{v_b^2}{2} + gz\right) - \dot{m}_ç\left(\frac{P_0}{\rho_l} + \frac{v_l^2}{2} + gz\right) = \dot{Q} \qquad \textbf{(4.31)}$$

haline gelir. Arayüzeyde momentum dengesinden, $v_l = v_b$, elde edilir. Bu durumda denklem,

$$\frac{d}{dt}\int_v \rho u dV + \dot{m}_ç h_b - \rho_l A v u_g + \rho_l A(v - \dot{z})\frac{v_b^2}{2} - \rho_l A(v - \dot{z})\left(\frac{P_0}{\rho_l} + \frac{v^2}{2}\right) = \dot{Q} \qquad \textbf{(4.32)}$$

haline gelir, düzenlenirse, ısıl enerji dengesi için,

$$\frac{d}{dt}\int_v \rho u dV + \dot{m}_ç h_ç - \dot{m}_g h_g = \dot{Q} - P_0 A\dot{z} \qquad \textbf{(4.33)}$$

ifadesi elde edilir. Bu aşamadan sonra çözümü kolaylaştırmak için, V kontrol hacmini Şekil 4.3'de görüldüğü gibi üçe bölelim, $V = V_A + V_B + V_C$ ve (4.33) ifadesini bu kontrol hacimlerine sırayla uygulayalım.

$V_A = Al_g$, $V_B = A(z - l_g)$, $V_C = A(Y - z)$ ve $V = V_A + V_B + V_C = YA$

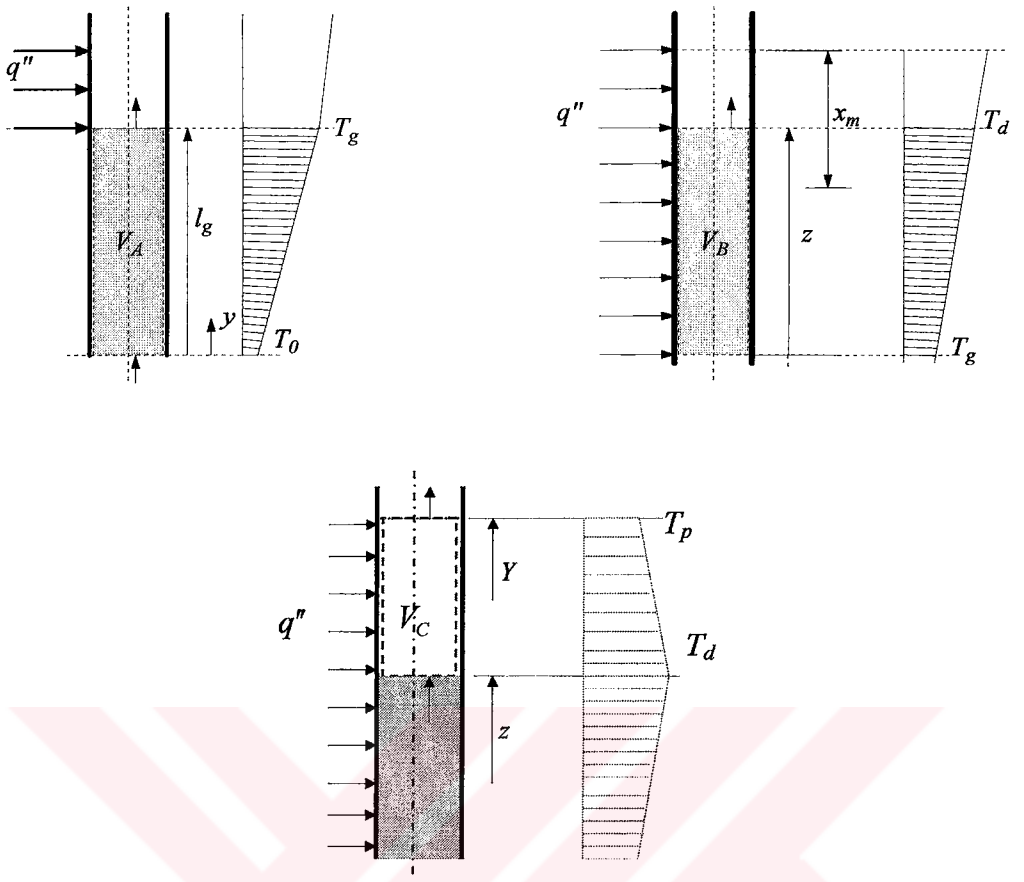
Isıtıcıdan suya geçen ısı $\dot{Q} = \pi D(z - l_g)q''$ ve havaya geçen de $\dot{Q}_a = \pi D(Y - z)q''$ olsun. Cam cidar dış yüzeyinden kaybolan ısı ise $\dot{Q}_k = h_i \pi D_d Y(T_c - T_\infty)$ ile ifade edilsin.

Sıvı kolonu boyunca sıcaklık değişimi lineer olarak kabul edilirse, V_A kontrol hacmi boyunca sıcaklık değişimi,

$T(y) = ay + b$ gibi lineer bir bağıntı ile belirlenebilir.

$$T_A(y) = T(y) = \frac{T_g - T_0}{l_g} y + T_0 \qquad \textbf{(4.34)}$$

Bu ifadeyi (4.33) denkleminde yerine yazar ve entalpiler için, $h = c_p T$ dönüşümü yapılırsa V_A hacmi için,



Şekil 4.3 : $V = V_A + V_B + V_C$ herhangi bir t anında kontrol hacimleri

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_0^{l_g}\left\{\rho c_v A\left[\frac{T_g - T_0}{l_g}y + T_0\right]\right\}dy + \underbrace{\rho_l A v}_{\dot{m}_ç}\underbrace{c_{pl}T_g}_{h_ç} - \underbrace{\rho_l A v}_{\dot{m}_g}\underbrace{c_{pl}T_0}_{h_g} = -\dot{Q}_{kg} \qquad \textbf{(4.35)}$$

denklemi elde edilir. Buradan,

$$\frac{d}{dt}\left\{\rho c_v A\left[\frac{T_g - T_0}{l_g}\frac{y^2}{2} + T_0 y\right]\right\}_0^{l_g} + \rho_l A c_{pl} v(T_g - T_0) = -\dot{Q}_{kg} \qquad \textbf{(4.36)}$$

bulunur ve düzenlersek,

$$\rho c_v A l_g \frac{d}{dt}\left[\frac{T_g + T_0}{2}\right] + \rho_l A c_{pl} v(T_g - T_0) = -\dot{Q}_{kg} \qquad \textbf{(4.37)}$$

denklemi bulunur.

Şimdi de V_B hacmi için, aynı yöntem uygulanırsa, V_B kontrol hacmi boyunca sıcaklık değişimi,

$$T(y) \cong T_d - \frac{T_d - T_g}{z - l_g}(z - y) = T_B(y) \tag{4.38}$$

olarak elde edilir ve denklem (4.33)

$$\frac{d}{dt}\left\{\rho c_v A\left[T_d y - \frac{T_d - T_g}{z - l_g}(zy - \frac{y^2}{2})\right]\right\}_{l_g}^{z} + \dot{m}_ç h_ç - \dot{m}_g h_g = \dot{Q}_l - \dot{Q}_{kl} - P_0 A\dot{z} \tag{4.39}$$

haline gelir. Tekrar düzenlersek, V_B hacmi için aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\begin{aligned} &½\rho_f c_{v_l} A\frac{d}{dt}\left[(T_d + T_g)(z - l_g)\right] + \underbrace{\rho_l A(v - \dot{z})}_{\dot{m}_b}\underbrace{c_{p_b} T_d}_{h_ç} + \underbrace{\rho_f A v}_{\dot{m}_g}\underbrace{c_{p_l} T_g}_{h_g} \\ &= Q_l - Q_{kl} - P_0 A\dot{z} \end{aligned} \tag{4.40}$$

Benzer şekilde V_C hacmi için, doğrusal sıcaklık değişimi kabulüyle enerji denklemi yazılırsa,

$$\begin{aligned} &½\rho_a c_{v_a} A\frac{d}{dt}\left[(T_d + T_p)(Y - z)\right] + \underbrace{\rho_a A v}_{\dot{m}_ç}\underbrace{c_{p_a} T_p}_{h_ç} - \underbrace{\rho_b A(v - \dot{z})}_{\dot{m}_b}\underbrace{c_{p_b} T_d}_{h_g} \\ &= \dot{Q}_a - \dot{Q}_{ka} - P_0 A\dot{z} \end{aligned} \tag{4.41}$$

ifadesi elde edilir.

Çevreye kaybolan ısıları da aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

V_A hacminden kaybolan ısı $\quad \dot{Q}_{kg} = h_g \pi D_d l_g\left[(T_o + T_g)/2 - T_\infty\right]$

V_B hacminden kaybolan ısı $\quad \dot{Q}_{kl} = h_l \pi D_d (z_0 - l_g)\left[(T_g + T_d)/2 - T_\infty\right]$

V_C hacminden kaybolan ısı $\quad \dot{Q}_{ka} = h_a \pi D_d (Y - z_0)\left[(T_p + T_d)/2 - T_\infty\right]$

4.2.2 Elde edilen denklemler;

$$v_{Ll} = v_l \qquad \text{(Kütle)} \qquad \textbf{(4.42)}$$

$$P_x - (P_o + \rho \dot{v} z + \rho g z + F/A) = 0 \qquad \text{(Momentum)} \qquad \textbf{(4.43)}$$

$$\frac{d}{dt}\int_v \rho u dV + \dot{m}_ç h_ç - \dot{m}_g h_g = \dot{Q} - P_0 A\dot{z} \qquad \text{(Enerji)} \qquad \textbf{(4.44)}$$

Enerji denkleminin kontrol hacimlerine uygulanması ile elde edilen denklemler,

V_A hacmi için,

$$\rho c_v A l_g \frac{d}{dt}\left[\frac{T_g + T_0}{2}\right] + \rho_f A c_{p_l} v(T_g - T_0) = -\dot{Q}_{kg} \qquad \textbf{(4.45)}$$

V_B hacmi için,

$$\tfrac{1}{2}\rho_l c_{v_l} A \frac{d}{dt}\left[(T_d + T_g)(z - l_g)\right] + \underbrace{\rho_l A(v - \dot{z})}_{\dot{m}_b} \underbrace{c_{p_b} T_d}_{h_ç} + \underbrace{\rho_l A v}_{\dot{m}_g} \underbrace{c_{p_l} T_g}_{h_g} = Q_l - Q_{kl} - P_0 A\dot{z} \qquad \textbf{(4.46)}$$

V_C hacmi için,

$$\tfrac{1}{2}\rho_a c_{v_a} A \frac{d}{dt}\left[(T_d + T_p)(Y - z)\right] + \underbrace{\rho_a A v}_{\dot{m}_ç} \underbrace{c_{p_a} T_p}_{h_ç} - \underbrace{\rho_b A(v - \dot{z})}_{\dot{m}_b} \underbrace{c_{p_b} T_d}_{h_g} = \dot{Q}_a - \dot{Q}_{ka} - P_0 A\dot{z} \qquad \textbf{(4.47)}$$

denklemleri elde edilmiştir.

4.2.3 Denklemlerin boyutsuzlaştırılması

Elde edilen denklemler olayda kullanılan fiziksel parametrelerin hangisinin daha etkili olduğunu bulmak ve değişken sayısını azaltarak çözümü kolaylaştırmak için boyutsuzlaştırılmıştır. Bu çalışma için boyutsuzlaştırmada kullanılan fiziksel parametreler aşağıda verilmiştir.

$$(Z,H)=(\frac{z}{D},\frac{Y}{D}),\quad U=\frac{u}{u_m},\quad P=\frac{p}{\rho u_m^2},\quad \theta=\frac{T-T_0}{\frac{q''D}{k}},\quad \tau=\omega t$$

Yönetici denklemler;

$$\dot{z}=\frac{X_m\omega}{2}Sin(\omega t) \qquad \text{Konum} \qquad \textbf{(4.48)}$$

$$\dot{v}=\left[P_x-(P_o+\rho gz+F/A)\right]/(\rho z) \qquad \text{Hız} \qquad \textbf{(4.49)}$$

$$\frac{d}{dt}\int_v \rho u dV+\dot{m}_ç h_ç-\dot{m}_g h_g=\dot{Q}-P_0 A\dot{z} \qquad \text{Enerji denklemi} \qquad \textbf{(4.50)}$$

Boyutsuz denklemler,

$$\dot{Z}=Sin\tau \qquad \textbf{(4.51)}$$

$$\dot{U}=\left[P_x-(P_o+Z\left(\frac{gD}{U^2}\right)+\left(\frac{F}{\rho U^2 A}\right)\right]/\left(\frac{2Z}{A_o}\right) \qquad \textbf{(4.52)}$$

Burada $Fr=\frac{gD}{U^2}$ Froude sayısı, $We=\frac{F}{\rho U^2 A}$ Weber sayısını göstermektedir.

Isıl enerji dengesi,

V_A hacmi için,

$$L_g\dot{\theta}_g+A_oU\theta_g=-\frac{2}{Re_\omega Pr}\frac{\dot{Q}_{kg}}{q''A} \qquad \textbf{(4.53)}$$

V_B hacmi için,

$$1/2\frac{d}{d\tau}\left[(\theta_d+\theta_g)(Z-L_g)\right]+1/2\,A_oU\theta_d-\theta_d\dot{Z}+1/2\,A_o\theta_gU$$
$$=\frac{1}{Re_\omega Pr}\left[\frac{\dot{Q}_l}{q''A}-\frac{\dot{Q}_{kl}}{q''A}-\frac{p_o\omega D}{q''}\dot{Z}\right] \qquad \textbf{(4.54)}$$

V_C hacmi için,

$$1/2\frac{d}{d\tau}\left[(\theta_d+\theta_p)(H-Z)\right]+1/2\,A_oU\theta_p-1/2\,A_oU\theta_d+\dot{Z}\theta_d$$
$$=\frac{1}{Re_\omega\,Pr}\left[\frac{\dot{Q}_a}{q''A}-\frac{\dot{Q}_{ka}}{q''A}-\frac{p_o\omega D}{q''}\dot{Z}\right] \qquad (4.55)$$

olarak kontrol hacimleri için ayrı ayrı elde edilir. Burada daha önce yapılan kabullere göre buharlaşma ihmal edilmiştir. Arayüzey sıcaklığı değişken olarak alınmıştır. Bu durumda çözülen denklemler sayısal çözüme uygun formda yazılarak aşağıda sırayla verilmiştir.

$$\dot{Z}=Sin\tau \qquad (4.56)$$

$$\dot{U}=\left[P_x-(P_o+Z\left(\frac{gD}{U_m^2}\right)+\left(\frac{F}{\rho U_m^2 A}\right)\right]/\left(\frac{2Z}{A_o}\right) \qquad (4.57)$$

$$\dot{\theta}_g=-\frac{A_o}{L_g}U\theta_g-\frac{2}{Re_\omega\,Pr}\frac{\dot{Q}_{kg}}{q''AL_g} \qquad (4.58)$$

$$\dot{\theta}_d=\left[\frac{2}{Re_\omega\,Pr}\left[\frac{\dot{Q}_l}{q''A}-\frac{\dot{Q}_{kl}}{q''A}-\frac{p_o\omega D}{q''}\dot{Z}\right]-\theta_g(Z-L_g)-(\dot{\theta}_d+\theta_g)\dot{Z}-A_oU\theta_g\right] /(Z-L_g) \qquad (4.59)$$

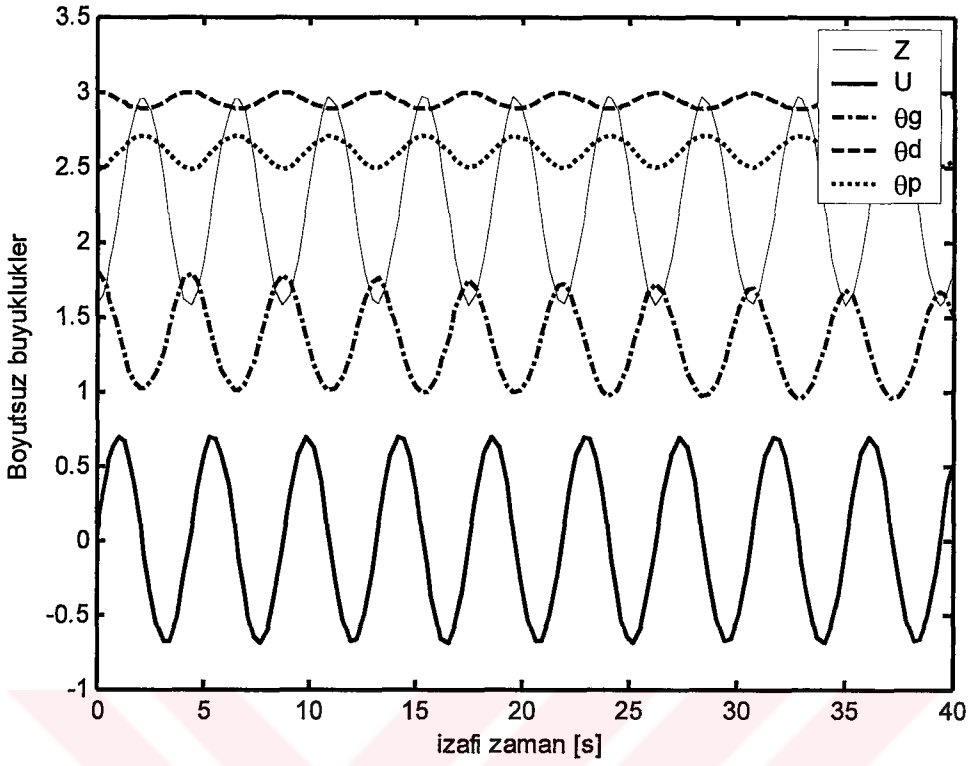
$$\dot{\theta}_p=\left[\frac{2}{Re_\omega\,Pr}\left[\frac{\dot{Q}_a}{q''A}-\frac{\dot{Q}_{ka}}{q''A}-\frac{p_o\omega D}{q''}\dot{Z}\right]-\theta_d(H-Z)-(\dot{\theta}_d+\theta_p)\dot{Z}-(\dot{\theta}_p-\theta_d)UA_o-2\theta_d\dot{Z}\right] /(H-Z) \qquad (4.60)$$

4.2.4 Denklemlerin çözümü

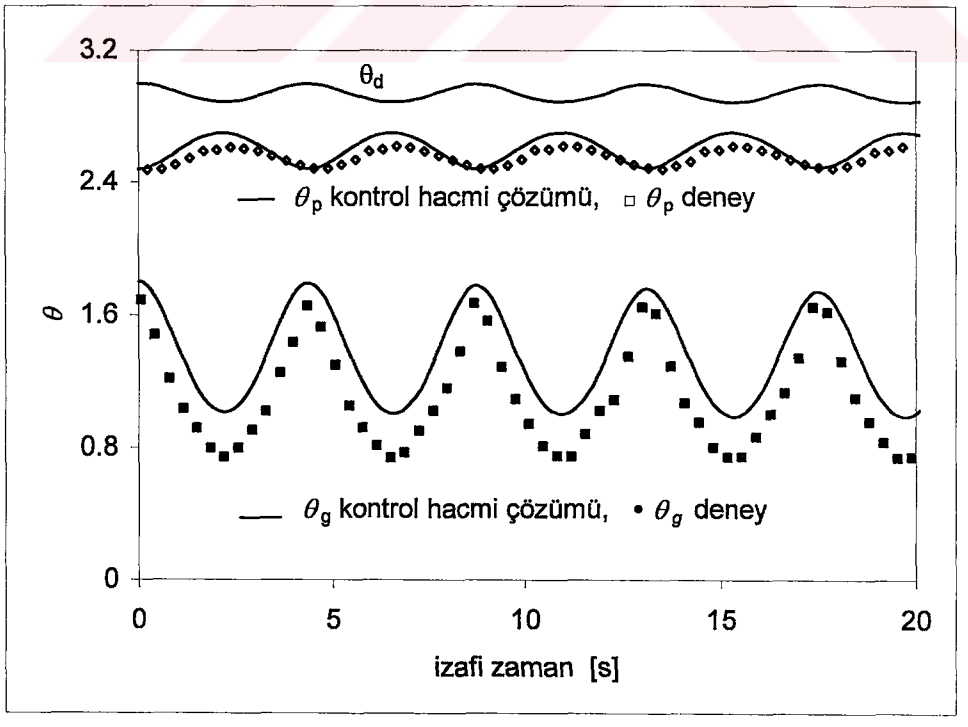
Elde edilen denklemler MATLAB programında dördüncü dereceden Runge-Kutta metoduyla çözülmüştür. Program kodları EK-A da verilmiştir. Bu çözüm de Δt zaman adımı, 0.1s, 0.01s ve 0.001 olarak alınmış ve 0.001 adımında çözümün zaman aralığından bağımsız olduğu görülmüştür. Çözümlerde toplam zaman 3600s (1 saat) olarak alınmıştır.

4.2.5 Sonuçlar

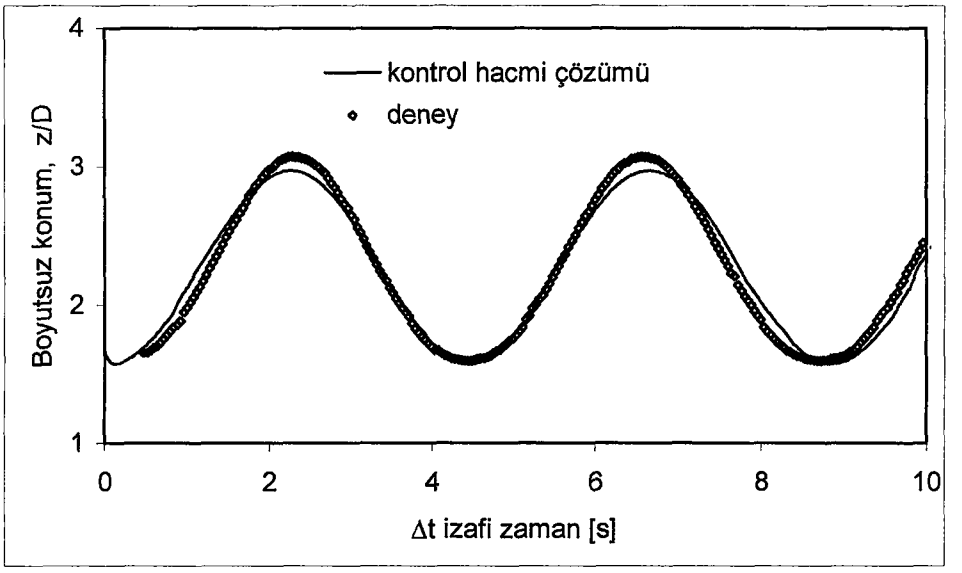
Denklemlerin çözümünden elde edilen değerler Şekil 4.4'de toplu olarak verilmiştir. Boyutsuz büyüklüklerin zamanla değişiminin sinüzoidal olduğu konum, hız ve sıcaklık değerleri için elde edilen eğrilerden anlaşılmaktadır. Kontrol hacmi yaklaşımıyla, bilinen büyüklüklerden yararlanarak, V_B hacmine giriş ve çıkış sıcaklıkları bulunmuştur. Sıvı için en yüksek sıcaklık beklendiği gibi arayüzeyde bulunmuştur. Arayüzey için bulunan sıcaklıklar sinüzoidal olarak değişmektedir, ancak genliği çok düşüktür ve giriş sıcaklığı ile karşılaştırıldığında zamanla değişimi ihmal edilebilecek düzeydedir. Deneylerde arayüzeyin sıcaklığı ölçülemediği için burada bulunan değerler deneylerle karşılaştırılamamıştır. Bununla birlikte, sıcaklık değerlerinin beklenen aralıkta olduğu görülmektedir. Bu çözümde bulunan bir diğer sıcaklık ise V_B kontrol hacmine giriş sıcaklığı olarak aldığımız θ_g dir. Bu hesaplama için seçilen kesit deneysel olarak sıcaklık ölçtüğümüz prob1'in bulunduğu kesite konum olarak çok yakın olduğundan değerlerin de birbirine çok yakın olması gerekmektedir. Şekil 4.5'de sayısal çözümden bulunan sıcaklıklar ile deneysel olarak prob1 den alınan anlık ortalama sıcaklıkların karşılaştırması verilmiştir. Bu sıcaklıkların mertebe olarak birbirine yakın olduğu ve yapılan karşılaştırmada beklenen uyumun sağlandığı görülmektedir. Ayrıca deneylerde hava tarafının sıcaklığını ölçmek için yerleştirilen prob (prob2) ile sayısal çözümde aynı kesit için bulunan sıcaklıklar için yapılan karşılaştırmada Şekil 4.5'de görüldüğü gibi iyi bir uyum sağlanmaktadır.



Şekil 4.4 : Denklemlerin çözümünden elde edilen boyutsuz konum, hız ve sıcaklıkların zamanla değişimi (Z; konum, U; hız, θ_g; kontrol hacmine giriş sıcaklığı, θ_d; arayüzey sıcaklığı, θ_p; prob2 sıcaklığı, Re_ω=1000, A_o=12.88)



Şekil 4.5 : Denklemlerin çözümünden elde edilen boyutsuz sıcaklıkların deneysel sonuçlarla karşılaştırması (Re_ω=1000, A_o=12.88)



Şekil 4.6 : Denklemlerin çözümünden bulunan konum-zaman değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırması (ω=1.435 rad/s, z_o=1.575 m, x_m=0.25 m)

Kontrol hacmi çözümüyle yapılan bir başka karşılaştırma ise sıvı kolonu konum zaman değerleridir. Şekil 4.6'da bir frekans için bu karşılaştırma verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi uyum son derece iyidir. Hız için deneysel olarak bir ölçüm yapılmadığından bir karşılaştırma verilmemiştir, ancak hızlar büyüklük olarak beklenen değerlerdedir.

5. SAYISAL ÇÖZÜM

5.1 Giriş

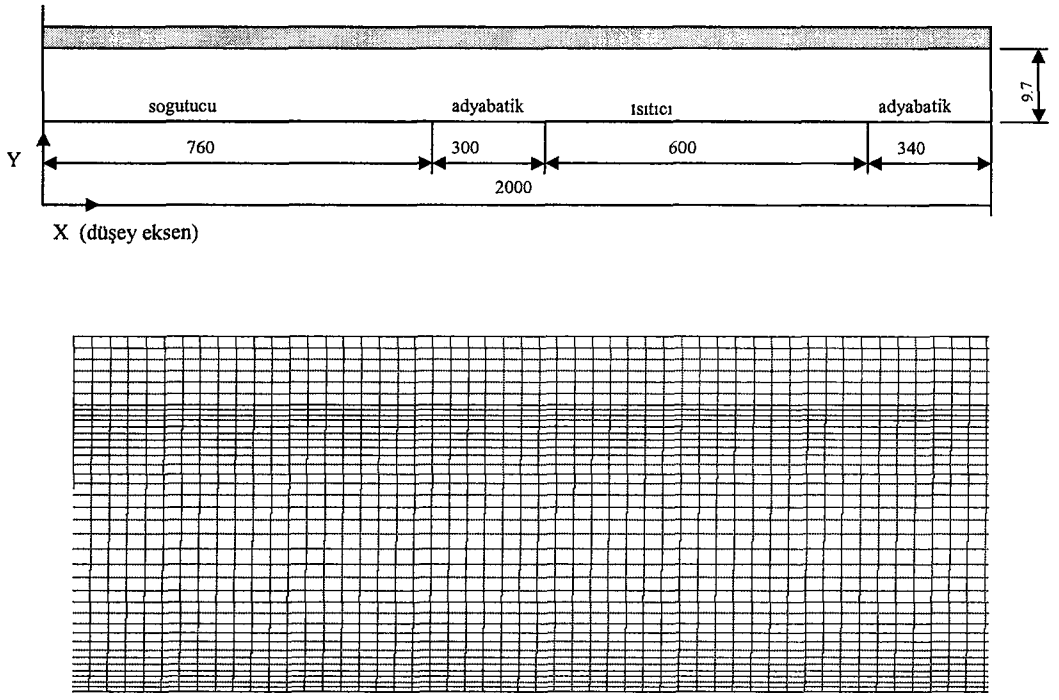
Bu bölümde, düşey eksenli bir boruda zorlanmış sinüzoidal basınç değişimlerine maruz laminer halkasal akış, deneysel parametreler esas alınarak (hareketli sıvı kolonu) sayısal olarak incelenmektedir. Kullanılan sayısal yöntemin prensibi, diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılarak iterasyonla çözülmesi esasına dayanmaktadır. Bunun için sonlu hacımlar ayrıklaştırma yöntemine göre çözüm yapan FLUENT yazılımı kullanılmaktadır. Bu CFD analiz programında süreklilik, momentum ve enerji denklemleri sonlu hacımlar yöntemi ile ayrıklaştırılmaktadır [36].

Bu kısımda, bir çevrim boyunca ısıtıcı yüzeyinden suya geçen ısı için sayısal bir inceleme yapılmaktadır. Yapılan incelemelerde sıvı içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımı elde edilerek ısı geçiş mekanizması ortaya çıkarılmaktadır. Sayısal çözümden elde edilen sonuçlarla deneyler karşılaştırılarak çözümün doğruluğu kontrol edilmektedir.

5.2 Çözüm Alanı ve Kullanılan Yöntem

Sayısal çözümde ele alınan çözüm alanı, deneysel geometriye bağlı olarak belirlenmiştir ve Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Çözüm alanının boyutları 12x2000 mm, olup eni boyuna göre çok uzundur. Borunun eksenine göre simetri mevcut olduğundan yalnızca bir kesiti göz önüne alınmıştır.

Şekil 5.1'de çözüm alanındaki ağ dağılımı görülmektedir. Bu çalışmada TGrid tipi hücreler kullanılmaktadır. Çözüm alanının çizilmesi ve hücrelere bölünmesi (meshing), bir 3 boyutlu çizim programı olan GAMBIT yazılımı ile yapılmaktadır. Çözüm alanına hücre yerleştirilmesinin uygunluğunu kontrol etmek için bazı



Şekil 5.1 : Çözüm alanı ve ağ dağılımının görünüşü

kıstaslar bulunmaktadır. Sayısal çözümün alınmasından önce dikkate alınan kıstaslar arasında en önemlileri, hücrelerin en-boy oranı (aspect ratio), komşu hücrelerin kenar uzunlukları arasındaki oran (successive ratio), hücrelerin kare şekline olan yakınlıkları (skewness) şeklinde sıralanabilmektedir. Türev terimlerinin lineerleştirilebilmesi için hücre boyutunun belirli bir büyüklüğün altında olması gerekmektedir. Bu büyüklük geometriye ve akışa bağlı olup, genel olarak akışla ilgili özeliklerin gradyenleriyle ilişkilidir. Örneğin, sınır tabaka içinde, akışkan hızı cidara dik doğrultuda büyük bir değişim göstermekte, yüzeyde "sıfır", sınır tabaka dışında ise sonlu bir değerde olmaktadır. Bu nedenle, sınır tabakadaki hücre büyüklüğünün bu geçişi yakalayabilecek kadar küçük, bir başka deyişle sınır tabaka kalınlığının altında olması gerekmektedir. Bununla birlikte, çözüm alanının tamamı düzgün dağılı olarak sınır tabakadaki kadar küçük hücrelere bölünmek istenirse, çok büyük hücre sayısı değerleri ortaya çıkmaktadır. Genel bir kural olarak hücrelerin kritik bölgelerde sık olarak, gradyenlerin küçük olduğu kısımlarda ise daha geniş aralıklarla yerleştirilmeleri gerekmektedir. Optimum hücre sayısı ve büyüklüğünün tespit edilmesi, çözümün hücre genişliğine bağımlılığı (grid dependency) adıyla bilinen ayrı bir çalışma gerektirmektedir. Bu çalışmada, 2 boyutlu ön incelemeler sırasında benzer bir çalışma yapılarak elde edilen hücre büyüklükleri, 3 boyutlu

çalışmalarda esas alınmaktadır. Sonuç olarak en fazla 124.000 mertebelerinde hücre sayısı seçilmektedir. Bu çalışmada, akış olduğu tüm bölgeler de dikdörtgen ağ yapısı kullanılmaktadır. Katı cidar (cam) için de homojen dikdörtgen ağ yapısı kullanılmaktadır.

Sayısal çözümlerde, ayrık çözüm algoritması (segregated solver) kullanılmaktadır. Sırasıyla, önce momentum denklemleri, sonra basınç düzeltme denklemi son olarak da enerji denklemi ve diğer transport denklemleri çözülmektedir. Ayrıklaştırılmış denklemlerin oluşturulmasında da üstel fonksiyon yaklaşımını (power law) tercih edilmektedir. Ayrıklaştırma için seçilen yöntemler Tablo 5.1 de toplu olarak görülmektedir.

Tablo 5.1 : Ayrıklaştırma yöntemleri

	Parametre	**Metod**
1	Basınç	Kütlesel Ağırlıklı Ortlama (Body-Force Weight)
2	Momentum	İkinci dereceden ileri fark (Second order upwind)
3	Enerji	Üstel fonksiyon yaklaşımı (Power Law)
4	Basınç-hız ilişkisi	PISO
5	Zamana bağlı formülasyon	Örtülü yaklaşım (Implicit Scheme)
6	Gaz-sıvı arayüzeyi	Geometric-Reconstruction

Süreklilik, momentum, enerji denklemlerinin yanı sıra, faz modeli için bir ilave transport denklemi olmak üzere, toplam dört diferansiyel denklem çözülmektedir. 124,000 civarındaki hücrenin her birinde ayrıklaştırılarak lineerleştirilen bu denklemler büyük bir matris seti oluşturmaktadır. Ayrıklaştırma işlemi, ikinci derece hassasiyetle (second-order upwind scheme) gerçekleştirilmektedir. Basınç ve hız arasındaki ilişki, PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) algoritması ile ele alınmaktadır [46]. Denklem setinin çözümünde, ardışık iki iterasyon arasındaki bağıl hatanın azalmasıyla birlikte çözümler yakınsamaktadır. Her bir denklem için ideal halde sıfır olması gereken bu hata değerlerinin, yakınsama kriterleri adı verilen değerlerin altına düşmesiyle birlikte çözümün yakınsamış olduğu kabul edilmektedir. Bu çalışmada, yakınsama kriterleri olarak, enerji denklemi ve faz denklemi için 10^{-6}, diğer denklemler için ise 10^{-3} değeri alınmaktadır.

"Under-relaxation" parametreleri adıyla bilinen azaltma katsayıları başlangıçta en fazla 1 alınmakta ve çözümün yakınsaması için, ilerdeki aşamalarda azaltılmaktadır. Boru ekseni düşey olduğu için yerçekimi ivmesinin etkisi de göz önüne alınmaktadır. Akışın simetri ekseni etrafında döndürülebilmesi için düşey eksenin x yönünde seçilmesi gerekmektedir. Şekil 5.1'deki gösterimde sıvı kolonu en üst noktasındaki basınç 0 Pa (mutlak basınç 101325 Pa) olacak şekilde seçilmektedir.

5.3 Kabuller ve Sınır Şartları

Bu çalışmada, deneylerde kullanılan parametreleri, en iyi ifade edecek şekilde kabuller yapılmaktadır. Deneylerde kullanılan değişken sayısının fazla olmasından dolayı, sayısal çözümde zaman kazanmak için bu durumu en iyi ifade edebilecek sınırlı (deney simüle edilerek) sayıda değişken kullanılarak sayısal çözüm yapılmaktadır.

Simetri mevcut olduğu için çözüm alanı iki boyutludur. Çözüm alanının bir tarafında düşey eksen boyunca, soğutucu, adyabatik kısım, ısıtıcı ve yine adyabatik kısımdan oluşan cidarlar yer almaktadır. Diğer kısmında ise cam malzemeden oluşan 2.3 mm kalınlığında katı kabuk yer almaktadır. Çözüm alanının alt kısmı giriş üst kısmı ise çıkış olarak adlandırılmaktadır. Dış ortam atmosfer şartları kabul edilerek, dış hava sıcaklığı 298 K ve doğal taşınım ısı geçiş katsayısı da ortalama 5 W/m^2-K olarak alınmaktadır. Soğutucu yüzey sıcaklığı 300 K girilmekte ve buradan sabit sıcaklıkta ısı çekilmektedir. Isıtıcı yüzeyinden deneylerde olduğu gibi sabit ısı akısı verilmektedir. Cam cidarın dış yüzeyi için doğal taşınım sınır şartı verilmekte ve problemin fiziğine uygun şekilde buradan ısının bir kısmı ortama geçmektedir. Girişte sınır şartı olarak hız sınır şartı verilmektedir. Sinüzoidal olarak değişen bu hız değeri için ayrıca yazılan bir "*altprogram*" başlangıçta programa tanıtılmaktadır. Girişte suyun sıcaklığı 300 K alınmaktadır. Deneylerde yapılan ölçümlerde giriş sıcaklığının sabit ve yaklaşık bu değerde olduğu tespit edilmektedir. Çıkış atmosfere açık olduğu için sınır şartı olarak basınç sınır şartı verilmiş ve içeri giren hava için atmosfer şartları alınmaktadır.

Başlangıç değerleri;

Başlangıçta sistemin hareketsiz olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda sıvı ve hava olmak üzere her iki faz için dolum miktarları, basınç, hız ve sıcaklık değerleri Tablo 5.2'de toplu halde verilmektedir. Burada sıvı dolum seviyesi deneyler için değiştirilen parametrelerden biridir, ancak sayısal çözümde sabit alınmaktadır.

Tablo 5.2 : Başlangıç şartları

	Parametre	**Değer**
	Başlangıç tahmini	
1	Gauge basıncı	0.0
2	Eksenel Hız	0.0
3	Radyal hız	0.0
4	Sıcaklık	300 K
	Ekleme (Patch) değerleri	
5	Su dolum seviyesi	1550 mm
6	Hava dolum seviyesi	500 mm

5.4 Korunum Denklemleri

Bu çalışmada hareketli sınıra sahip iki fazlı bir çözüm alanı için kütle, momentum ve enerjinin korunumu ifadeleri VOF (*Volume of Fluid*) metodunda aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Kimyasal reaksiyon ve faz değişimi söz konusu olmadığında, süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = S\alpha_q \qquad \textbf{(5.1)}$$

arayüzeyde fazlar arasındaki etkileşim sonucu bir fazın diğer faza göre hangi boşluk oranında olduğunu göstermektedir. Fluent'in VOF modeli gereği burada boşluk oranı sıvı fazı için 1 ve gaz fazı için 0 alınmaktadır.

Seçilen çözüm alanı için tek fazlı momentum eşitliği uygulanmakta, ancak hız alanı ortak olduğundan eşitlikteki ρ ve μ hacimsel doldurma miktarlarına göre ayrı ayrı ortalama değerler olarak alınmaktadır.

j yönündeki momentum denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_j + F_j \qquad \textbf{(5.2)}$$

şeklinde verilmektedir. Burada i indisi serbest indis iken, j indisi sabit indis olup momentum denkleminin yazıldığı yönü göstermektedir. Sol taraftaki zaman terimi ve taşınım terimi birlikte, u_j hızının toplam türevini göstermektedir. Sağ taraftaki ilk terim basınç gradyenini, üçüncü terim ağırlık kuvvetini ve son terim de diğer kütle kuvvetlerini göstermektedir. Sağ taraftaki ikinci terim momentum geçişinin diverjansını göstermekte olup, τ_{ij} terimi j yönündeki yüzeye paralel olarak etkiyen viskoz kuvvetleri göstermektedir [33]. Bu terim ikinci dereceden bir tansör olup kayma gerilmesi olarak da bilinmektedir [32]. Newtonyen akışkanlarda kayma gerilmesi hızın gradyeniyle ilişkilendirilmekte

$$\tau_{ij} = \left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij} \qquad \textbf{(5.3)}$$

ve buradaki μ orantı katsayısı, dinamik viskozite olarak bilinmektedir. δ_{ij} ise "kronecker delta" adıyla bilinen bir matematik terimi olup, sadece $i=j$ olması halinde 1'e eşit, diğer hallerde 0 değerini alan bir ikinci derece tensör olmaktadır.

Arayüzeyde enterpolasyon *Geometrik-Reconstruction* metoduna göre yapılmıştır. Bu metotta iki faz arasında arayüzey civarındaki hücreler için FLUENT belirtilen metoda göre özel bir enterpolasyon uygular [46].

Enerji denklemini, bu akış için FLUENT aşağıdaki formda çözmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho h + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i \rho h) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k\frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + \dot{q}''' \qquad \textbf{(5.4)}$$

Bu çalışmada denklemdeki $\dot{q}'''$ üretim terimi sıfır alınmaktadır.

burada entalpi tarifi, ideal gazlar için,

$$h = \sum_{j'} m_{j'} h_{j'} \tag{5.5}$$

ve sıkıştırılamaz akışlar için de,

$$h = \sum_{j'} m_{j'} h_{j'} + \frac{p}{\rho} \tag{5.6}$$

olarak belirlenmektedir. Kütlesel orana göre çevrim boyunca entalpi değişimi de aşağıdaki formülle verilmektedir.

$$h_{j'} = \int_{T_{ref}}^{T} c_{p,j'} dT \tag{5.7}$$

Burada T_{ref} 298.15 K.dir.

Kesitten geçen entalpi aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$Q = \int \rho H \vec{V} \cdot d\vec{A} \tag{5.8}$$

Cidardan sabit ısı akısı şartlarında periyodik ısı transferi için tam gelişmiş şartlarda cidardan ısı ilavesi periyodik akıştaki basınç değişimine benzemektedir ve sinüzoidal bir değişim göstermektedir. Burada akışkanın yığın (bulk) sıcaklığı aşağıdaki şekilde belirlenmektedir. Yığın sıcaklık,

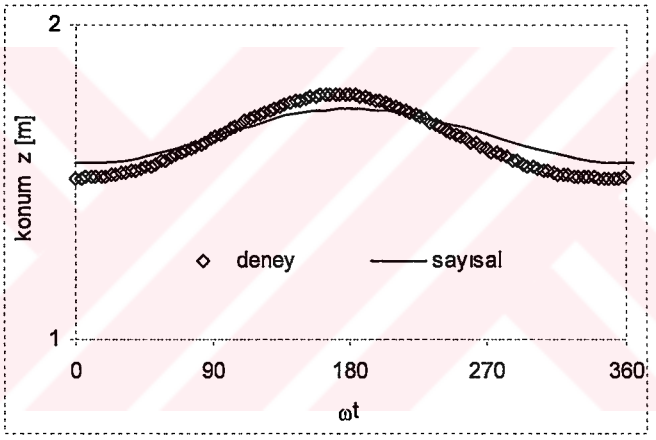
$$T_b = \frac{\int_A T \left| \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \right|}{\int_A \left| \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \right|} \tag{5.9}$$

ve ortalama ısı transferi katsayısı ortalama yüzey integralleri alınarak aşağıdaki şekilde bulunmaktadır.

$$\bar{h} = \frac{Q}{T_w - T_b} \tag{5.10}$$

5.5 Sonuçlar

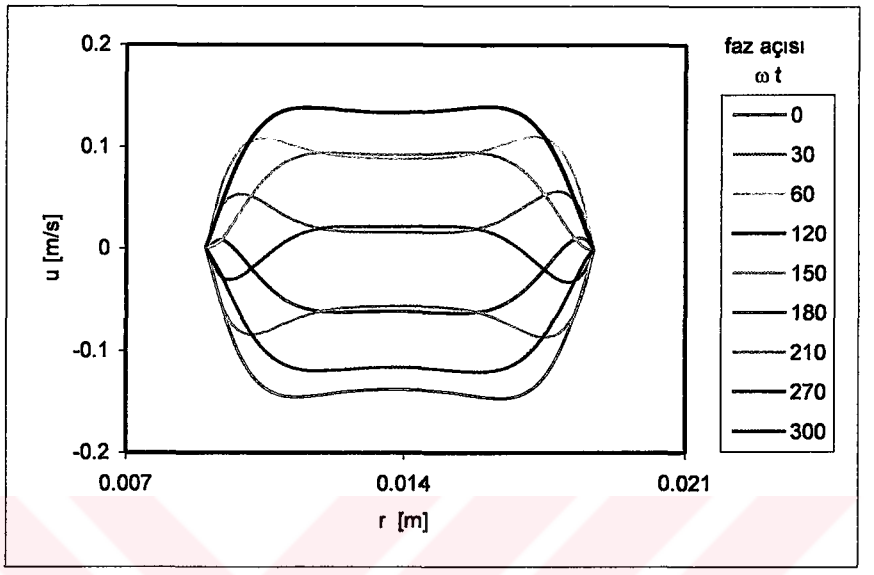
Hareketli sıvı kolonunda sıvı (su) ve gaz (hava) fazı olmak üzere iki faz bulunmaktadır. Bu fazlar bir arayüzeyle birbirinden ayrılmaktadır. Bu arayüzeyin hareketi piston vasıtasıyla suya verilen hareketi takip etmektedir. Sıvı kolonunun bir ucu atmosfere açıktır ve suyun hemen üzerinde buhar ve hava karışımı olan gaz fazı bulunmaktadır. Arayüzeyde momentum şartından gaz fazının da aynı basınç gradyanına maruz kaldığı kabul edilmektedir. Sayısal çözümden elde edilen sonuçlarda, arayüzeyin konum-zaman değerlerinin deneysel olarak bulunan değerlerle uyumlu olduğu Şekil 5.2'de görülmektedir. Bu sonuçlar aynı doldurma yüksekliği, frekans ve genlik için, deneysel verilere karşılık gelen sayısal çözümden elde edilmektedir.



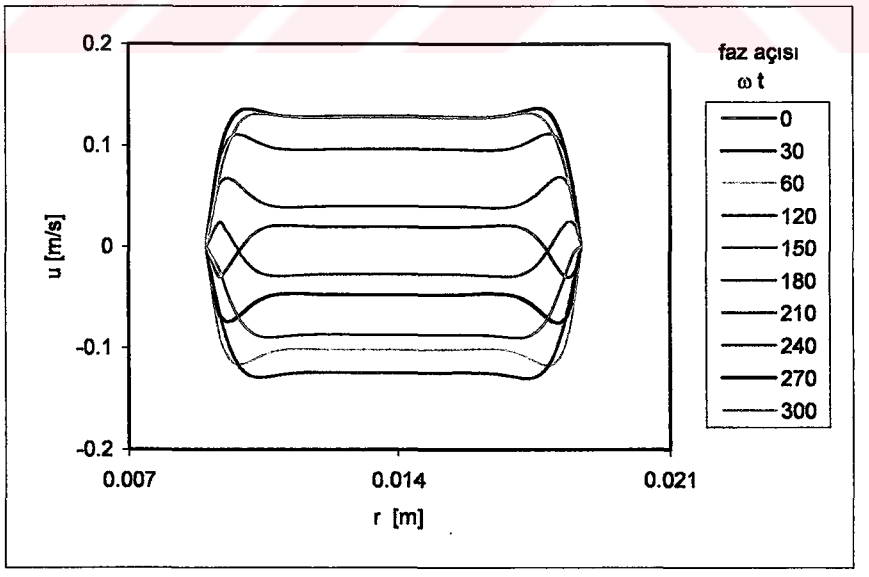
Şekil 5.2 : Kolon sıvı yüksekliğinin zamanla değişimi

Hız dağılımı, sıvı içerisinde sürtünmelerin fazla olmasından dolayı sıvı ve gaz fazı içerisinde farklı dağılımlar göstermektedir. Sıvı fazı içerisinde maksimum hız, cidara yakın kısımlarda olurken, göz önüne alınan frekanslarda gaz fazında simetri ekseninde meydana gelmiş olup daimi akışta bulunan parabolik hız dağılımına benzemektedir. Salınımlı akışta akış geriye döndüğü için cidardaki akışkan tabakaları ile akışın merkezindeki akışkan tabakaları arasında bir faz farkı meydana gelmektedir. Bu fark Şekil 5.3'de (Re_ω=1000) sıvı fazı için verilen hız dağılımında açıkça görülmektedir. Frekans ve genlik arttıkça maksimum hızın meydana geldiği kısımlar cidara doğru yaklaşmaktadır. Bu durum Şekil 5.4'de Re_ω=3650 için verilen hız profillerinde belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca akışın merkezi ile sınır

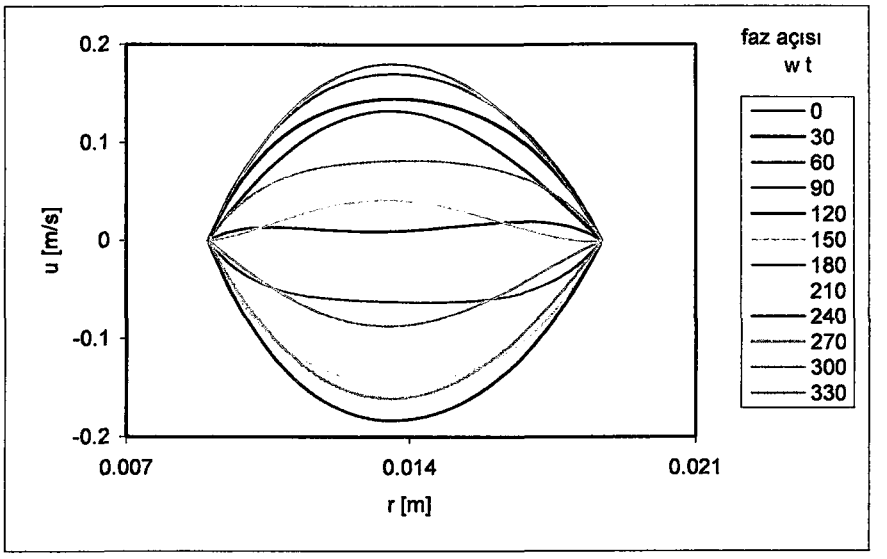
tabaka arasındaki fark, (sınır tabaka kalınlığı) *frekans, genlik* ve *geometriye* (*L/D*) göre değişim göstermektedir.



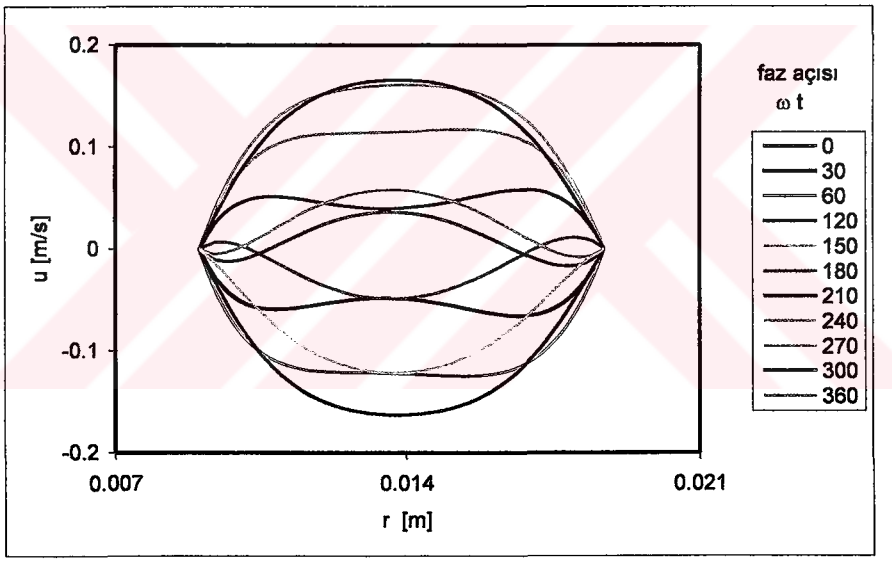
Şekil 5.3 : Sıvı fazı (su) için hız dağılımı, (Re_ω=1000, A_o=12.88)



Şekil 5.4 : Sıvı fazı (su) için hız dağılımı, (Re_ω=3650, A_o=12.88)

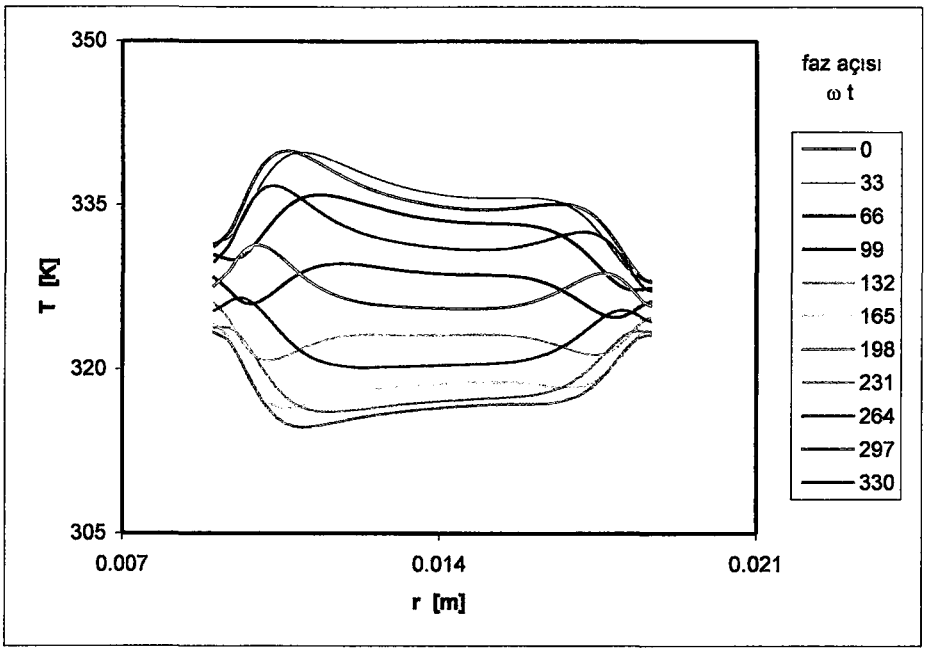


Şekil 5.5 : Gaz fazı (hava) için hız dağılımı, (Re_ω=1000, A_o=12.88)

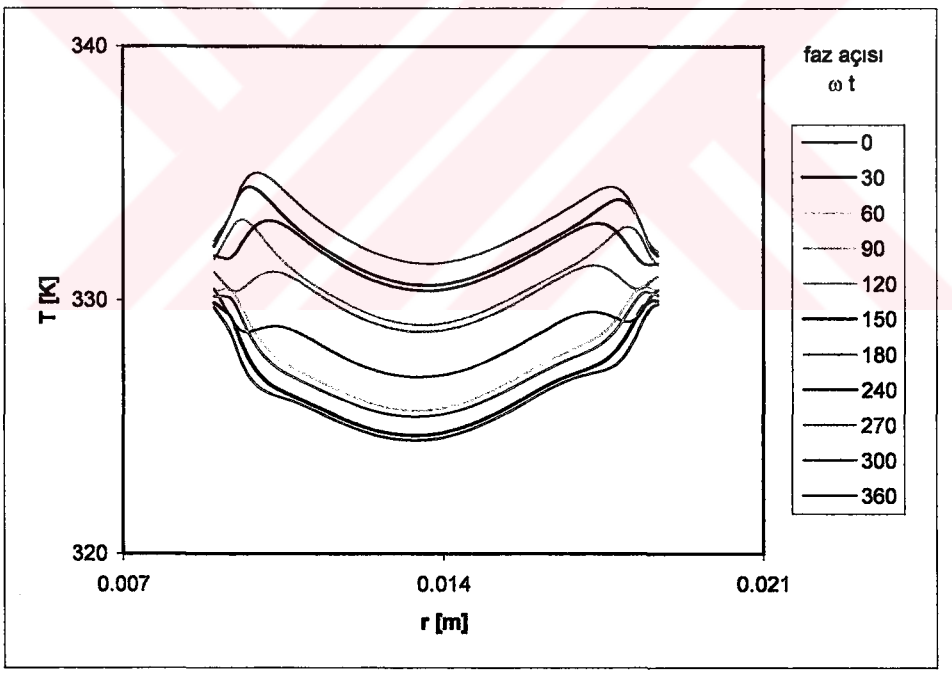


Şekil 5.6 : Gaz fazı (hava) için hız dağılımı, (Re_ω=3650, A_o=12.88)

Gaz fazı için Şekil 5.5'de görüldüğü gibi sıvı içerisindeki sürtünmelerin (akışkanın yoğunluğu düşük) az olmasından dolayı, akışın merkezi ile cidara yakın kısmı arasında çok büyük faz farkları meydana gelmemekte, akış neredeyse daimi akışa benzemektedir. Bu yüzden hız profili daimi akışta olduğu gibi parabolik olmaktadır. Yalnızca dönüşlerde bir miktar kırılma olmaktadır. Şekil 5.6'da Re_ω=3650 için hava içerisindeki hız profili görülmektedir. Hız profili frekans arttıkça salınımlı akış hız profiline benzemektedir. Yüksek frekanslarda (f>1 Hz) gaz fazı içinde de salınımlı akış hız profili elde edildiği araştırmacılar tarafından belirtilmektedir [4].



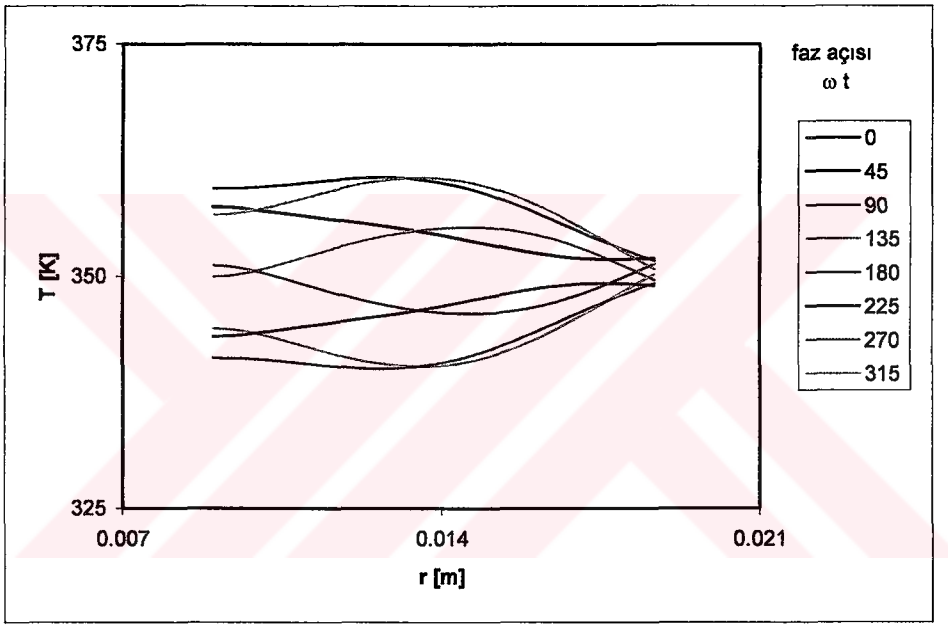
Şekil 5.7 : Sıvı fazı için çevrim boyunca sıcaklık dağılımı (Prob1, Re_ω=1000, A_o=12.88)



Şekil 5.8 : Sıvı fazı için çevrim boyunca sıcaklık dağılımı (Prob1, Re_ω=3650, A_o=12.88)

Deneysel çalışmadaki probların konumuna karşılık gelen kesitteki sıcaklık dağılımı için bir çevrim boyunca elde edilen sonuçlar sıvı ve gaz fazları için Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 de görülmektedir. Sıvı fazı için rejim halinde elde edilen sıcaklık değerleri salınımlı akış hız profiline çok benzemektedir. Frekans arttıkça akışın merkezindeki sıcaklık dağılımı yeterince gelişemediği için parabolik bir hal almaktadır. Cidara

yakın olan kısımlarla akışın merkezi arasında bir faz farkı olduğundan bu durum ısı geçişini artırmaktadır. Sıvı kolonunun hareketi esnasında cidara yakın olan kısımlar (ısıl sınır tabaka) ile akışın merkezi arasındaki sıcaklık farkı sürekli değişmektedir. Hareketin bir anında cidara yakın olan kısım merkezden daha sıcak olduğundan akışın merkezine doğru, dönüşte ise cidar daha soğuk olduğundan, akışın merkezinden cidara doğru bir ısı geçişi olmaktadır. Bu durum, Stirling çevrimindeki duruma benzemektedir. Akışkan paketleri arasındaki ısı alışverişi ile ısı sıcak kaynaktan soğuk kaynağa doğru ısı taşınmaktadır. Bu mekanizmaya *rüya boru* (dream pipe) denilmektedir [26].

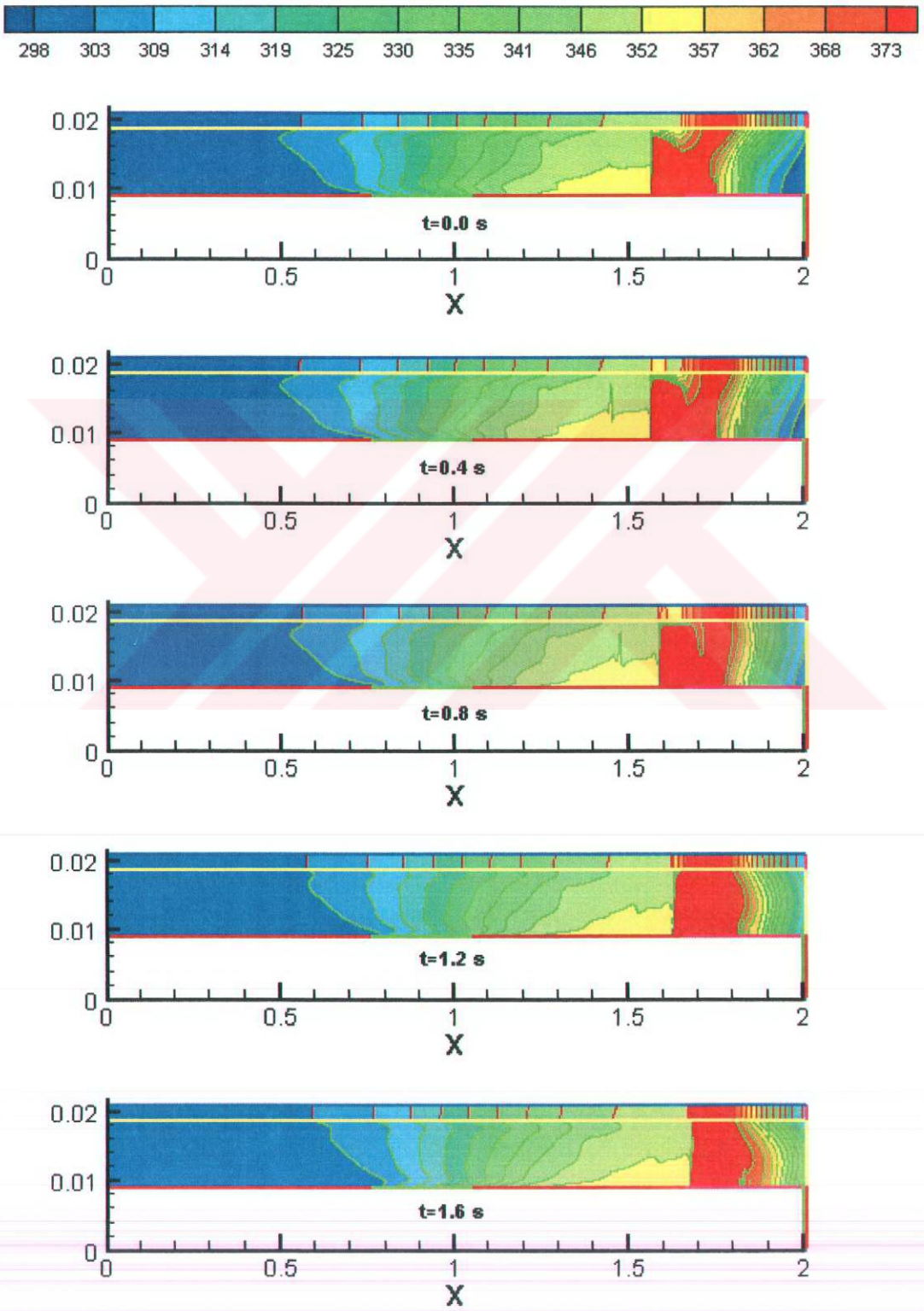


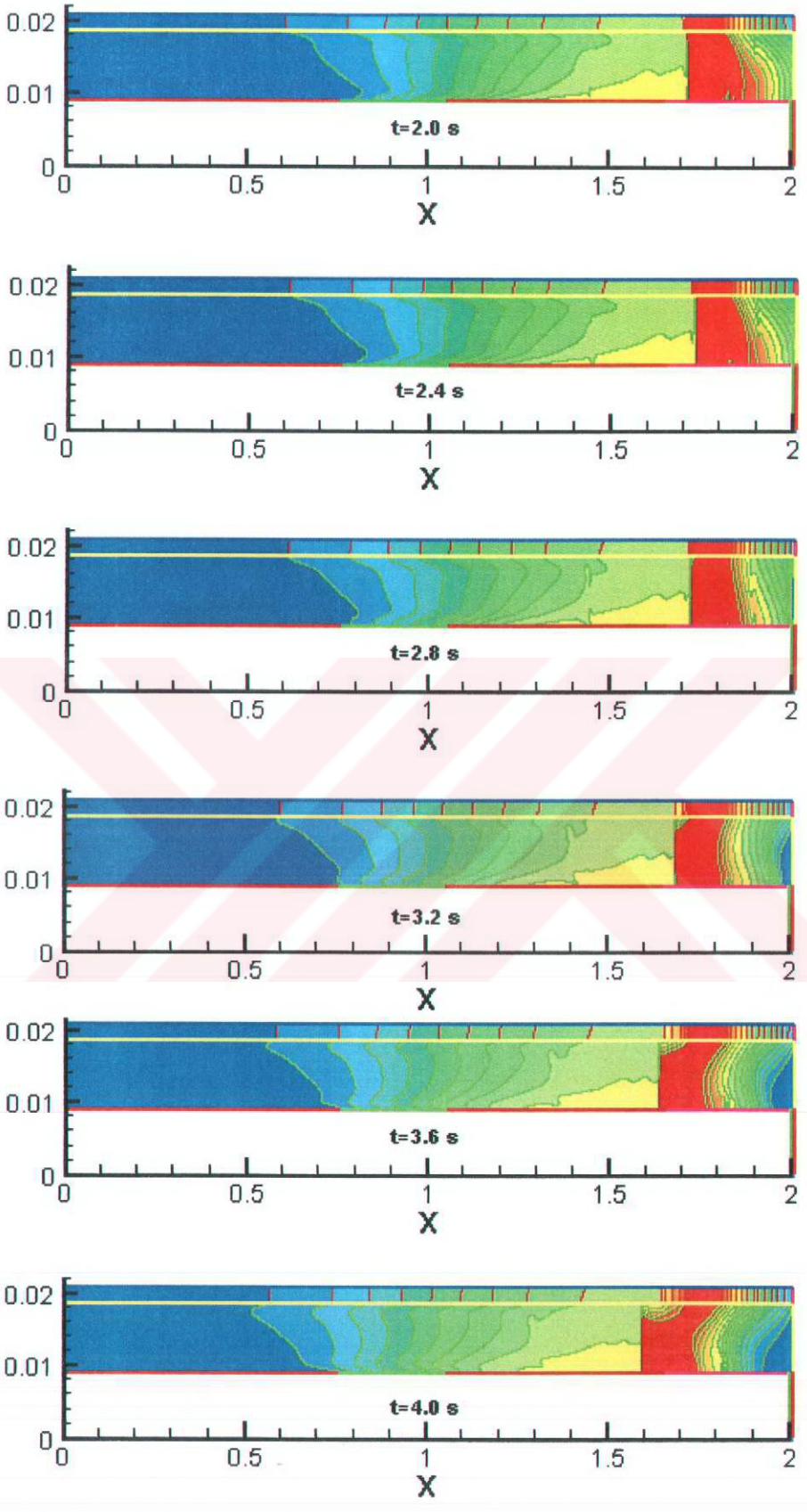
Şekil 5.9 : Gaz fazı için çevrim boyunca sıcaklık dağılımı (Prob2, Re_ω=1000, A_o=12.88)

Gaz fazı için verilen frekans ve ısı akısı için belirlenen kesitte anlık sıcaklık değişimi Şekil 5.9 da görülmektedir. Burada sıcaklık değişimi zamana bağlı tam gelişmiş boru akışındaki ısı geçişi problemine benzemektedir. Isıtıcı cidarına yakın olan kısımda, sıcaklık yüksek diğer tarafa doğru gittikçe parabolik bir düşme göstermektedir. Çevrimin bazı anlarında ki; bu anlar akışın ileriye yada geriye döndüğü anlardır, salınımlı akışta sıcaklık profili ortaya çıkmaktadır. Ancak bu durum sıvı fazında olduğu kadar baskın değildir.

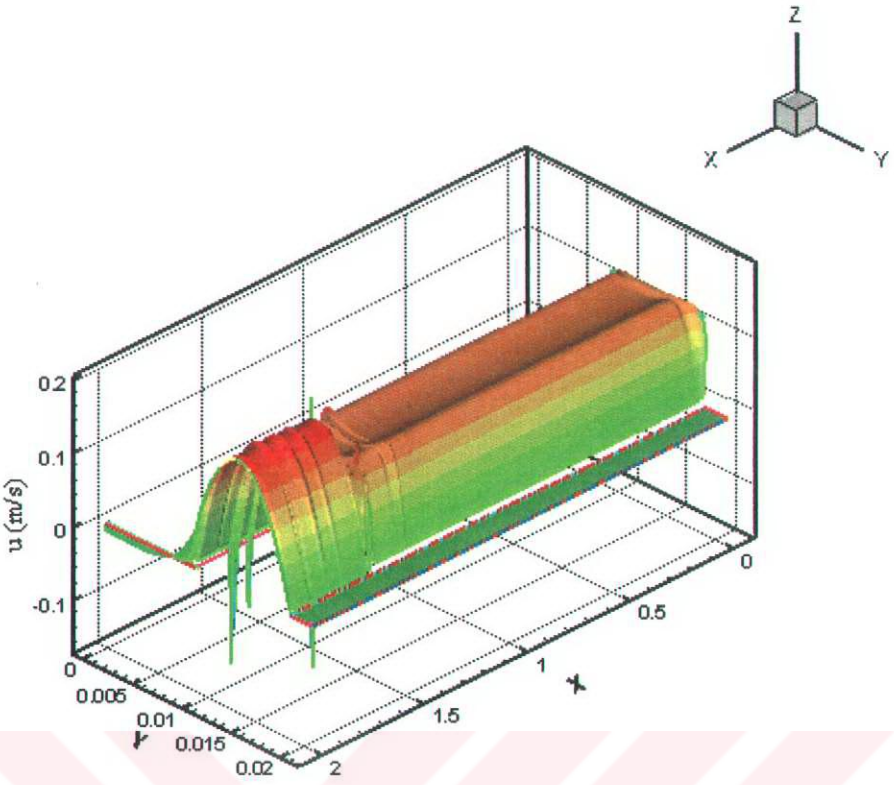
Şekil 5.10'da bir çevrim esnasında sıvı kolonu boyunca anlık eş sıcaklık dağılımı görülmektedir. Sıvı kolonu giriş bölgesinde sıcaklık sabit kalırken en yüksek sıcaklık arayüzeyde meydana gelmektedir. Ayrıca sıcaklık profillerinin salınımlı

akış hız profillerine benzediği görülmektedir. Salınımlı akışta ısı geçişi mekanizmasını hidrodinamik sınır tabakanın akışın merkezini takip edememesi oluşturmaktadır. Bu akışta ısıl sınır tabakanın da akışı belirli bir faz farkı ile takip ettiği çevrim boyunca verilen sıcaklık profillerinden anlaşılmaktadır.

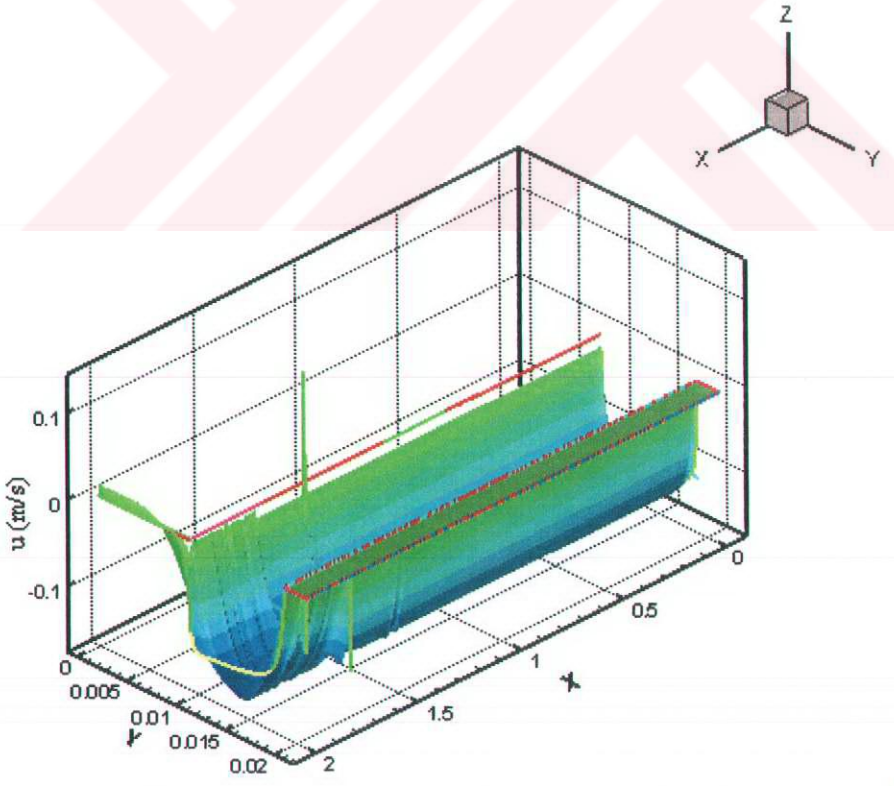




Şekil 5.10 : Bir çevrim boyunca sıvı kolonunda eş sıcaklık eğrileri değişimi (Re_ω=1000, A_o=12.88)



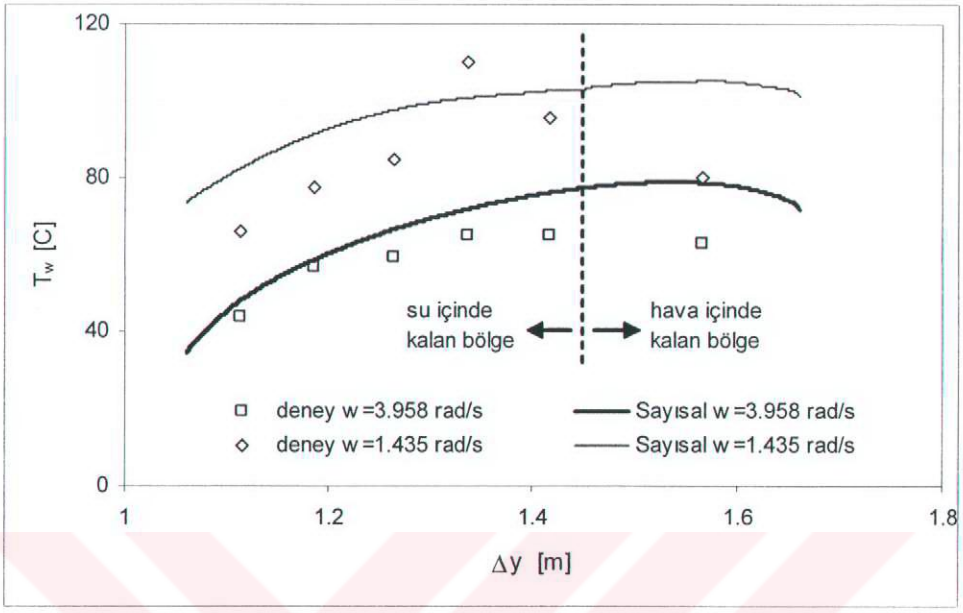
t=1.2 s



t=3.2 s

Şekil 5.11 : Sıvı kolonu boyunca anlık hız dağılımı (Re_ω=1000, A_o=12.88)

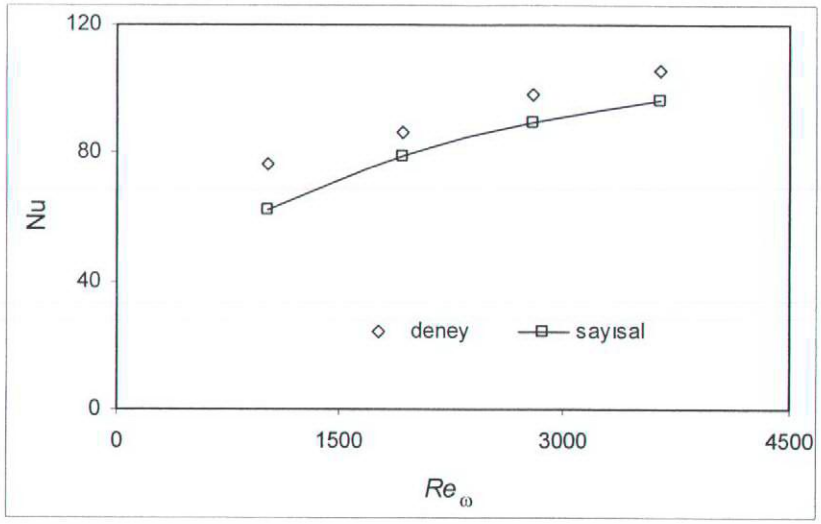
Şekil 5.11'de, Şekil 5.10'da sıcaklık dağılımı verilen t=1.2 s ve t=3.2 s anları için sıvı kolonu boyunca anlık hız dağılımı verilmiştir. Burada sıvı ve gaz fazı içerisindeki hız dağılımının birbirinden farklı olduğu görülmektedir.



Şekil 5.12 : Sayısal çözümden elde edilen ısıtıcı yüzey sıcaklığı ile deneysel olarak bulunan değerlerin karşılaştırması ($\diamond$ Re_ω=1000, $\square$ Re_ω=2800)

Şekil 5.12'de iki ayrı frekans için sayısal çözümden elde edilen ortalama yüzey sıcaklığı ile deneysel olarak ölçülen sıcaklık değerlerinin karşılaştırması görülmektedir. Isıtıcının su içerisinde kalan kısmı için iyi bir uyum sağlanırken hava içersinde kalan kısmı için uyum bir miktar bozulmaktadır. Bu durum, sayısal çözümde katı cidar boyunca oluşan sıvı filmi hareketinin tam olarak modellenememesinden kaynaklanmaktadır. Çünkü VOF modeli, katı-sıvı-hava ara çizgisinin hareketini sabit temas açısına göre modellemektedir. Temas açısı (contact angle) akışın ileriye ve geriye doğru hareketi durumlarında çok farklıdır. Ayrıca yüzey gerilimi de sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir [35]. Bir başka etkide yüzey pürüzlülüklerinin tam olarak tespit edilememesinden kaynaklanmaktadır. Ancak genel karakter olarak sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.

Bir çevrim boyunca ısıtıcı yüzeyinden suya geçen ısı için sayısal çözümden bulunan ısı taşınım katsayısının frekansla değişimi Şekil 5.13'de verilmiştir. Sayısal çözüm için Nusselt sayısı $Nu=hL/k_f$ denklemi yardımıyla deneysel hesaplamalara benzer şekilde hesaplanmaktadır.



Şekil 5.13 : Sayısal çözümden elde edilen Nusselt sayıları ile deneysel olarak bulunan değerlerin karşılaştırması (A_o=12.88)

Sayısal çözümde genlik (A_o=12.88) sabit tutularak yalnızca frekanslar değiştirilmiş olup Şekil 5.13'de görüldüğü gibi sayısal çözüm ve deneysel Nusselt sayıları çok az bir farkla bir biri ile uyum sağlamaktadır.

6. SONUÇLAR

6.1 Değerlendirme

Hareketli sıvı kolonu için kurulan deneysel düzenek üzerinde, sinüzoidal zorlanmış halkasal akışta ısı geçişi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Bu çalışmada yapılanlar,

- Hareketli sıvı kolonu üzerinde deneylerin yapılarak Nusselt sayılarının bulunması ve boyutsuz sayılar cinsinden ifade edilmesi,
- Deneysel şartlara göre kontrol hacmi formülasyonunun yapılması ve uygun kabuller altında analitik formülasyonun Runge-Kutta yöntemi ile çözülerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılması,
- Sıvı kolonundaki akışın CFD yöntemiyle çözülerek kesit boyunca anlık hız ve sıcaklık dağılımlarının elde edilmesi ve ısı geçişi mekanizmasının ortaya çıkarılması,

şeklinde özetlenebilir.

Salınımlı akışlar ile ilgili temel bilgiler ve daha önce yapılan çalışmalar incelenerek bu çalışmada hangi parametrelerin ve fiziksel olayların dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir. Literatürde yapılan deneysel çalışmalar incelenerek kurulacak deneysel ve analitik model için yararlı sonuçlar çıkarılmıştır. Sonlu uzunluktaki bir boruda salınımlı akış için elde edilen korunum denklemlerinin boyutsuzlaştırılmasından benzerlik parametrelerinin, kinetik Reynolds sayısı Re_ω, boyutsuz genlik A_o, boru için uzunluk çap oranı olarak da ifade edilen geometrik parametre L/D, ve akışkanın Prandtl sayısı Pr olduğu gösterilmiştir.

Yapılan deneylerde Prandtl sayısı (Pr=3.5) ve geometrik parametre $(L/D=30)$ sabit tutularak frekans ve genlikler değiştirilmiştir. Eksenel ısı geçişinin frekans ve genliğin artmasıyla birlikte arttığı gözlenmiştir. Deneylerde atmosferik şartlarda suyun buharlaşma için doyma sıcaklığına ulaşmadığı ve bu yüzden buharlaşmanın

sadece kütlesel yayılım ile gerçekleştiği ortaya çıkmıştır. Eksilen su miktarının son derece az olmasından dolayı ısı geçişi mekanizmasını etkilemediği görülmüştür. Deneylerden elde edilen değerler için bir hesap tarzı geliştirilmiş ve Nusselt sayıları bulunmuştur. Bulunan Nusselt sayıları için boyutsuz sayılara bağlı olarak,

$$Nu = 1.52\, Re_{\omega}^{0.248}\, A_0^{0.85} \qquad (6.1)$$

şeklinde bir korelasyon eşitliği bulunmuştur. Bu eşitliğin geçerli olduğu aralık,

$$1000 < Re_{\omega} < 4000 \quad \text{ve} \quad 7 < A_0 < 15$$

dır. Deneysel sonuçlardan elde edilen Nusselt sayıları için yapılan hata analizinde ortalama hata **±%6.45** olarak bulunmuştur. (Minimum %3, maksimum %13.6).

Deney tesisatına uygun olacak şekilde kurulan matematiksel model iki farklı yaklaşımla ele alınmıştır. İlk olarak diferansiyel yaklaşımla genel olarak ele alınan kütle, momentum ve enerji denklemleri salınımlı akış şartlarına göre sadeleştirilerek geçerli denklemler bulunmuştur. İkinci olarak kontrol hacmi yöntemiyle integral formda kütle, momentum ve enerji denklemi yazılarak hareketli sınıra sahip kontrol hacminde ısıl enerji dengesi yazılmıştır. Elde edilen yönetici denklemler Runge-Kutta yöntemiyle çözülmüştür. Bulunan sonuçlar deneylerle karşılaştırılarak aralarındaki uyum gösterilmiştir.

Deneysel geometri ve akış şartları esas alınarak Hareketli Sıvı Kolonu sonlu hacimler ayrıklaştırma yöntemine göre çözüm yapan FLUENT yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Yapılan incelemelerde sıvı içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımı elde edilerek ısı geçiş mekanizması açıklanmıştır. Isı geçişinde etkili olan mekanizmanın akışın merkezini takip edemeyen hidrodinamik sınır tabakadan kaynaklandığı bu durumun ısıl sınır tabaka üzerinde de etkili olduğu ve ısı geçişini artırdığı anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçlardan bir çevrim boyunca ısıtıcı yüzeyinden suya geçen ısı bulunarak Nusselt sayıları cinsinden verilmiştir. Sayısal çözümden elde edilen sonuçlarla deneylerin birbirine uyduğu görülmüştür.

Hareketli sıvı kolonunda ısı geçişi deneysel, analitik ve sayısal olarak incelenmiş olup ısı geçişi için boyutsuz parametreler bağlı bir *Nu* bağıntısı bulunmuş ve

literatürde bulunan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma HSK'da ısı geçişinin anlaşılması açısından son derece yararlı bir çalışma olmuştur.

6.2 Gözlemler

Hareketli sıvı kolonunda sıvının hareketi pistonun hareketini takip etmektedir. Çeşitli ısı güçleri ve farklı frekanslarda yapılan deneylerin analizi sonucu elde edilen sonuçlardan buharlaşmanın sadece kütlesel yayılımla olduğu, yüzey sıcaklıklarının atmosfer şartlarında suyu buharlaştırmaya yetmediği anlaşılmıştır. Bu durumda eksilen seviyenin ısı geçişi mekanizmasını değiştirmediği ve ihmal edilebileceği görülmüştür.

Deneylerde sıvı kolonu konum-zaman değerlerini bulmak için arayüzeyin hareketi bir dijital kamera yardımıyla filme alınmış ve filmler çözülerek salınımın frekansı bulunmuştur. Bulunan bu frekans dijital takometre ile devri ölçülen motorun frekansı ile karşılaştırılmış ve aralarında bir fark olmadığı anlaşılmıştır. Sıkıştırılamaz bir akış için bu beklenen bir durumdur.

Yapılan deneylerde hava-sıvı arayüzeyinin hızının (hareketinin) sinüzoidal olduğu ve verilen frekans aralığında arayüzeyde herhangi bir dalgalanmanın olmadığı gözlemlenmiştir.

Düşey kolonun dış yüzeyinden ölçülen sıcaklıklar frekans arttıkça sıvının hareketini takip edememektedir. Bu değerler camın sönüm etkisinden dolayı ortalama bir sıcaklıkta kalmaktadır.

Genlik arttıkça yüzey sıcaklığının değeri yaklaşık lineer olarak düşmektedir. Isıtıcının girişinden üst kısma doğru gidildikçe sıcaklıklar lineer bir artış göstermektedir. Ayrıca frekansın artması yüzeyi daha hızlı soğuttuğundan artan frekansla yüzey sıcaklığının değeri de düşmektedir.

Bu çalışmada HSK'da ısı geçişini etkileyen iki önemli parametrenin genlik ve frekans olduğu anlaşılmıştır. Her ikisinin de artması ısı geçişini artırmaktadır. Hareketli sıvı kolonunda genlik ve frekans değiştirilerek kontrollü bir şekilde ısı çekmek mümkündür. Bu durum kontrollü ısı geçişinin istendiği bir çok mühendislik alanında uygulanabilir.

6.3 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Yapılan çalışmalar ışığında bu konuda yapılabilecek diğer çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

- Daha geniş frekans aralığında ve genliklerde deneyler tekrarlanarak ısı geçişine etkileri ortaya çıkarılabilir.
- Bu çalışmada yapılan deneyler, literatürde türbülans başlangıcı için verilen $\beta_{cri} = A_0\sqrt{Re_\omega} > 761$ kriterine göre laminer akış bölgesinde yapılmıştır. Benzer bir çalışma türbülanslı akış içinde yapılabilir.
- Bu çalışmada akışkan olarak yalnızca su kullanılmıştır, farklı akışkanlar kullanılarak akışkanın ısı geçişine etkisi incelenebilir. Ayrıca atmosfer şartlarında düşük sıcaklıklarda buharlaşan akışkanla buharlaşmanın etkisi ayrıntılı olarak analiz edilebilir.
- Farklı geometrilerde deney düzeneği kurularak geometrinin etkisi daha net olarak ortaya çıkarılabilir. Salınımlı akışın mekanizması gereği kesit çapının düşük tutulmasının ısı geçişini artırdığı literatürde not edilmiştir.
- Kontrollü ısı geçişinin istendiği alanlarda örneğin; ısı borusu, mikro elektronik soğutma, ısı eşanjörü vb. gibi cihazlara uygulanarak yeni bir araştırma konusu oluşturulabilir.
- Salınımlı akışta basınç değişimlerine bağlı olarak değişik geometriler için sürtünme katsayılarının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] **Arslantürk, C.**, 1997. Fluidyne Isı Makinasının Analizi, *Doktora Tezi*, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[2] **Arslantürk, C., Özgüç, F.**, 2000. Hydrodynamic and Thermal Analysis of Fluidyne Heat Engine, *Applied Mechanics and Engineering*, **5**(2), 435-449

[3] **Özdemir, M. and Özgüç, F.**, 2003. A simple mathematical model to analyse a fluidyne heat machine, *J. Power and Energy*, Part:A, Proc. Inst.Mech. Eng. **217**, 91-100.

[4] **Zhao, T. S. and Cheng, P.**, 1998. Heat Transfer in Oscillatory Flow, Annual Review of Heat Transfer, Volume IX , The Hong Kong University of Science & Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, (Chapter 7).

[5] **Womersley, J.R.**, 1950. Method for the Calculation of Velocity, Rate of the Flow and Viscous Drag in arteries When the Pressure Gradient is Known, *J. Physiol.* **127**, 553-563.

[6] **Uchida, S.**, 1950. The Pulsating Viscous Flow Superposed on the Steady Laminar Motion of an İncompressible Fluid in a Circular Pipe, *ZAMP*, **7**, 403-422.

[7] **Sergeev, S.I.**, 1966. Fluid Oscillations in Pipes at Moderate Reynolds Numbers, *Fluid Dynamics*, **1**(1),121-122.

[8] **Akhavan, R., Kamm, R. D., and Shapiro, A. H.**, 1991. An Investigation of the Transition to Turbulence in Bounded Oscillatory Stokes Flows, Part 1: Experiments. *J. Fluid Mech,* **225**, 423-444.

[9] **Chatwin, P.C.**, 1975. On the Longitudinal Dispersion of Passive Contaminant in Oscillatory Flows in Tubes, *J.Fluid Mech.*, **71**, (3), 513-527.

[10] **Watson, E.J.**, 1983. Diffusion in Oscillatory Pipe Flow, *J.Fluid Mech.*, **133**, 233-244.

[11] **Hino, M., Savamato, M. and Takasu, S.**, 1976. Experiments on Trasition to Turbulence in an Oscillatory Pipe Flow, *J. Fluid Mech.*, **75**, (2), 193-207.

[12] **Gerrard, J. H. and Hughes, M. D.,** 1971. The Flow Due to an Oscillating Piston in a Cylindrical tube: a Comparison between Experiment and a Simple Entrance Flow Theory, *J. Fluid Mec*h. **50**, (1), 97-106.

[13] **Pecock, J. A. and Stairmand, J. W.,** 1983. Film Gauge Calibration in Oscillatory Pipe Flow, *J. Physics, E: Scientific Instruments*, **16**, 571-576,

[14] **Atabek, H. B. and Chang,C. C.,** 1961. Oscillatory Flow Near the Entry of Circular Tube, *ZAMP*, **12**, 185-201.

[15] **Merkli, P. and Thomann, H.,** 1975. Transition to Turbulence in Oscillating Pipe Flow, *J. Fluid Mech.*, **68**, 567-575.

[16] **Kurzweg, U. H., Lindgren,E. R. and Lothrop, B.,** 1989. Onset of Turbulence in Oscillating Flow at Low Womersley Number, *Physics of Fluids,* A, **12**, 1972-1975.

[17] **Kurzweg, U. H. and Zhao,L. D.,** 1984. Heat Transfer by High-Frequency Oscillations: A New Hydrodynamic Technique for Achieving Large Effective Thermal Conductivities, *Physics of Fluid*s, **27**, (11), 2624-2627.

[18] **Zhang, J.G. and Kurzweg, U.H.,** 1990. Numerical Simulation of time-dependent Heat Transfer in Oscillating Pipe Flow' *Journal of Thermophysics*, **5**, 401-406.

[19] **Zhao, T.S. and Cheng, P.,** 1996. The Friction Coefficient of a Fully Developed Laminar Reciprocating Flow in a Circular Pipe, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **17**, 167-172.

[20] **Zhao, T.S. and Cheng, P.,** 1996. Experimental Studies on the Onset of Turbulence and Frictional Losses in an Oscillatory Turbulent Pipe Flow, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **17**, 356-362,

[21] **Zhao, T.S. and Cheng, P.,** 1998. A Numerical Study of Laminer Reciprocating Flow in a Pipe of Finite Length, *Applied Scientific Research*, **59,** 11-25.

[22] **Zhao, T.S. and Cheng, P.,** 1995. A Numerical Solution of Laminer Forced Convection in a Heated Pipe Subjected to a Reciprocating Flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **38**(16), 3011-3022.

[23] **Zhao, T.S. and Cheng, P.,** 1996. Oscillatory Heat Transfer in a Pipe Subjected a Periodically Reversing Flow, *J. Heat Transfe*r, **118**, 592- 598.

[24] **Nishio, S., Shi, X.H. and Zhang,W.M.,** 1995. Oscillation-induced heat transport: heat transport charecteristics along liquid-columns of oscillation-controlled heat transport tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **38,** (13), 2457-2470.

[25] **Siegel, R.**, 1987. Influence of Oscillation-Induced Diffusion on Heat Transfer in a Uniformly Heated Channel, *J. Heat Transfer*, **109**, 244-247.

[26] **Ozawa, M. and Kawamoto, A.**, 1991. Lumped-Parameter Modelling of Heat Transfer Enhanced by Sinusoidal Motion of Fluid, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **34,** (12), 3083-3095.

[27] **Thang, X. and Cheng, P.,** 1993. Correlations of the Cycle-Averaged Nusselt Number in a Periodically Reversing Pipe Flow, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, **20**. 161-172.

[28] **Dae-Young Lee, Sang-Jin Park and Sung Tack Ro.,** 1995. Heat Transfer by Oscillating Flow in a Circular Pipe with a Sinusoidal Wall Temperature Distribution, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **38,** 2529-2537.

[29] **Dae-Young Lee, Sang-Jin Park and Sung Tack Ro.,** 1998. Heat Transfer in the Thermally Developing Region of a Laminar Oscillating pipe flow, *Cryogenics*, **38,** 585-594.

[30] **Cooper, W. L., V.W. Nee and K.T. Yang.,** 1994. An experimental investigation of convective heat transfer from the heated floor of a rectangular duct to a low frequency, large tidal displacement oscillatory flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **37,** (4), 581-592.

[31] **Chen, Z. D. and Chen, J. J. J.,** 1998. A Simple Analysis of Heat Transfer near an Oscillating İnterface, *Chemical Engineering Science*, **53,** (5), 947-950.

[32] **Schlichting, H.,** 1979. Boundary-Layer Theory, 7th Ed. Mcgraw Hill Publishing Co., New York.

33] **White, F.M.,** 1991. Viscous Fluid Flow, Second Edition, Mc-Graw Hill, New York.

[34] **Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N.,** 1960. Transport Phenomena, John Wiley&Sons. New York.

[35] **Carey, Van P.,** 1992. Liquid-vapor phase-change phenomena : an introduction to the thermophysics of vaporization and condensation processes in heat transfer equipment, Hemisphere Publishing Corperation, Washington DC.

[36] **Patankar, S.V.,** 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, D.C.

[37] **Incropera, Frank P. and Dewitt, David P.,** 2001. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Fourth Edition,John Wiley& Sons Inc. New York.

[38] **Holman, J. P.**, 2001. Experimental Methods for Engineers, Boston:McGraw-Hill. New York.

[39] **Abramowitz, M. and Stegun, I.A.,** 1965. Handbook of Mathematical Functions; with formulas, graphs and mathematical tables; Dover Publications, Inc., New York.

[40] **Jaeger, M. J.,** 1998. Diffusion and Dispersion in Steady Counterflow: A Method for the Separation of Gases Using Enhanced Mass Transport in Oscillatory Flow, *Chem. Eng. Sci.*, **53,** 3613-3621.

[41] **Thomas, A.M., Narayanan, R.,** 2001. Physics of oscillatory flow and its effect on the mass transfer and separation of species, *Phys. Fluids,* **13,** 859–866.

[42] **Thomas, A.M., Narayanan, R.,** 2002. A comparison between the enhanced mass transfer in boundary and pressure driven oscillatory flow., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **45**, 4057–4062.

[43] **Thomas, A.M.,** 2003. Unusual effects of oscillatory flows in an annulus on mass transfer and separation, *Adv. Space Res.*, **32** (2),279-285.

[44] **Vargaftik, N.B.,** 1975. Tables on the Thermophysical Properties of Liquids and Gases, p.634 Second Edition. John-Wiley Inc.,

[45] **Shahin, Gus A.,** 1998. The effect of pulsating flow on forced convective heat transfer. *MSc Thesis*, The University of Western Ontario, Ontario.

[46] **FLUENT 6.1.22**, 2001. Fluent Incorporated, Centerra Resource Park, 10, Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA. (YUBAHEM, İTÜ)

[47] **Kakaç, S and Yener, Y.,** 1995. Convective Heat Transfer, Second Edition, CRC Press, Inc. London.

[48] **Bejan, A.,** 1995. Convection Heat Transfer, Second Edition, Duke University John Wiley&Sons, Inc., New York.

[49] **Bouvier, P., Stouffs P., and Bardon J. P.,** 2005. Experimental study of heat transfer in oscillating flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **48**, 2473-2482.

[50] **Leong, K.C., and Jin, L.W.,** 2005. An experimental study of heta transfer in oscillating flow through a channel filled with an aluminium foam., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **48**, 243–253.

Ek A

BİLGİSAYAR PROGRAMI

Bu ekte Bölüm 4'de verilen denklemlerin sayısal çözümü için MATLAB da yazılan program kodları verilmiştir.

M.file

```
function dydx=runge(t,x)
        %Sabitler.....
  LGB=1.06;
        q=2950.; %isi akisi 150W q=4420, 100W q=2950
ROF=998.2;      ROB=585.;       ROA=1.1614;     CVF=4182.;      CPF=4182.;  CPB=1895.;
CPA=1007.;  CVA=716.5;  HFG=2258.;      D1=0.018;       D2=0.038;  Dd=0.042;
Dh=(D2-D1);     kf=0.65;  h=1.7;  Lh=0.6;  T0=25.;  Ts=23.;  ha=8.;  hs=5.;  hg=3.;
DMU=0.000555;  NU=DMU/ROF;  LG=LGB/Dh;  G=9.81;  Dhi=0.02;

        %Degiskenler.;
w=2.727;  Xm=0.25;  z0=1.575;  H=h/Dh;  Rew=(w*Dh^2/NU);  Pr=3.5;  Ao=Xm/Dh;  Um=(Xm*w)/2;
THU=w*t;
        %kisaltmalar.....
A=(pi*(D2^2-D1^2))/4 ;  %ALAN
RS=0.5*ROF*CVF*A;       RB=ROB*CPB*A;  RF=ROF*CPF*A;  RA=0.5*ROA*CVA*A;
  RAF=ROA*CPA*A;  Fi=(CPF*Dh)/(kf*A);  %AQ=(pi*DH*Q)/A;       %Fs=0.00667;
        %mb=0.000005;
  dydx=zeros(2,1);
  Po=10.01325;
  Px=750*cos(w*t);
  P0=Po/(ROF*Um^2); %Boyutsuz
  PX=Px/(ROF*Um^2); %Boyutsuz
  %z=z0-(Xm/2)*cos(w*t);
  %v=(Xm*w/2)*sin(w*t);
  %Fs=8*pi*DMU*x(2)*x(3)

        %Denklemler

  dydx(1)=sin(w*t);  %z
  dydx(2)=(PX-(P0+(G*Dh/Um^2)*x(1)+(8*pi*DMU*x(2)*x(1))/(ROF*A*Um^2)))/(2*x(1)/Ao);%v
  dydx(3)=(-Ao/LG)*x(2)*x(3)-(2/(Rew*Pr*q*LG*A))*(pi*Dd*LG*hg*3.); %Tg

 flag1=sin(w*t);
 flag2=(-Ao/LG)*x(2)*x(3)-(2/(Rew*Pr*q*LG*A))*(pi*Dd*LG*hg*3.);
 flag3=(1/2)*Rew*Pr;
 flag4=(pi*D1*(0.6)*q)/(q*A);
 flag5=(pi*Dd*Lh*hs*10.)/(q*A);
 flag6=((Po*w*Dh)/q)*sin(w*t);
 flag7=(pi*D1*(0.125)*q)/(q*A);
 flag8=(pi*Dd*(h-1.575)*ha*15.)/(q*A);

  dydx(4)=(flag4-flag5-flag6-(1/flag3)*(flag2*(x(1)-LG)+(x(5)+x(3))*flag1)+Ao*x(2)*x(5))/(x(5)*Fi*10000);%mb
  dydx(5)=0.;%Td
  dydx(6)=((1/flag3)*(flag7-flag8-flag6)+(x(5)+x(6))*flag1-Ao*x(2)*(x(6)-x(5))-2*x(5)*flag1)/(H-x(1));
```

Command File

```
clear all
format long
t0=0;
t1=0.01;
tf=40.;

G=9.81;
tspan=[t0 tf];
%x00=eye(4,4);
%x0=[1.52;0.];
x0=[1.575;0.;1.2;2.0;1.7];
%x0=[1.575;0.;0.11;0.;0.7;0.];
kin=fopen('sabit.xls','w');
options = odeset('reltol',1.e-3,'abstol',1.e-6,'stats','on');
[t,x]=ode45('sab3',tspan,x0,options);
siz=size(t);
aa=siz(1);

%t(aa),x(aa,:);
t(aa),x(aa,:);
gg=[t x(:,:)];
data=gg;
 t=data(:,1);
x1=data(:,2); %z
x2=data(:,3); %u
x3=data(:,4); %Tg
x4=data(:,5); %Td
x5=data(:,6); %Tp
%x6=data(:,7); %Nu

fprintf(kin,'%10.6f %10.6f %10.6f %10.6f %10.6f %10.6f %10.6f ,gg');

figure (1)
plot(t,x,'-')
legend('Z','U','\thetag','\thetad','\thetap');
xlabel('izafi zaman [s]');
ylabel('Boyutsuz buyuklukler');
zoom on
hold on
%grid on
%end

figure (2)
plot(t,x4,'-')
legend('Td');
zoom on
hold on
grid on


figure (3)
plot(t,x5,'-')
legend('Tp');
grid on
zoom on

fclose(kin);
```

Ek B

HATA ANALİZİ

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların geçerliliğinin belirlenmesi için bir hata analizi yapılmalıdır. Genel olarak deneysel hatalar üç gurupta toplanabilir. Bunlardan birincisi, dikkatsizlik ve tecrübesizlikten kaynaklanan hatalardır. Deneyler yapılırken ölçme cihazlarının yanlış seçiminden, veya ölçme sistemlerinin yanlış dizaynından kaynaklanan hatalar bu gurup içinde düşünülebilir. İkinci gurup hatalar, sabit veya sistematik olarak adlandırılan hatalardır. Bunlar genellikle tekrar edilen okumalarda görülen ve nedenleri çoğunlukla bilinemeyen hatalardır. Üçüncü gurup hatalar ise rasgele hatalardır. Bunlar ise deneyi yapan kişilerin dikkatlerinin zamanla azalması, elektrik geriliminin değişmesi ve cihazların ısınmasından ortaya çıkan, elektronik ölçme aletlerindeki salınım veya histerezis olaylarından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada yapılan deneylerde meydana gelebilecek hatalar daha çok çevre şartları ve elektrikli cihazlardan kaynaklanmaktadır. Özellikle deney süresince elektrik geriliminin değişmesi giriş gücünde belirli bir hataya sebep olmuştur. Deneylere ait hata oranlarının tespiti için pratikte bir kaç yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi, araştırmacılar tarafından en çok kullanılan (*uncertainty analysis) belirsizlik analizi* yöntemidir [38]. Bu çalışma için, hata oranları belirsizlik analizi kullanılarak bulunmuştur. Burada ölçülen büyüklükler ile ilgili hatalar tek tek analiz edilmiştir.

Belirsizlik Analizi

Bu yönteme göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R, ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1,\ x_2,\ x_3,\ldots\ldots\ x_n$ olsun. Bu durumda,

$$R = R(x_1,\ x_2,\ x_3,\ldots\ldots,x_n)$$

yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1,\ w_2,\ w_3,\ \ldots\ldots,\ w_n$ ve R büyüklüğünün hata oranı w_R ise,

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1}w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2}w_2\right)^2 + \ldots\ldots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n}w_n\right)\right]^{1/2} \qquad \textbf{(B.1)}$$

şeklinde verilmektedir.

Burada hataya sebep olan büyüklükler, giriş gücü Q_l, yüzey sıcaklığı T_{wo} ve akışkan sıcaklığı T_m dır. Bu büyüklükler ile ilgili ölçme hataları kaynağından itibaren alınarak sonuçta ne kadar hataya sebep olduğu bulunmaktadır.

T_w için hata oranının bulunması,

$$T_W = \frac{T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_{w4} + T_{w5} + T_{w6}}{6} \quad \textbf{(B.2)}$$

formülünden her bir sıcaklık için yapılan hatanın toplam yüzey sıcaklığında ne kadarlık bir hataya sebep olduğu bu formüle denklem (B.1) i uygulayarak bulunur. Aynı şekilde T_{10} için hata oranı ölçülen her bir sıcaklık değerinde yapılan hatalar göz önüne alınarak bulunur,

$$T_{10} = \frac{1}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}\left[A_1T_1 + A_2T_2 + A_3T_3 + A_4T_4\right] \quad \textbf{(B.3)}$$

benzer şekilde T_{20} da aynı formül kullanılarak hata oranı bulunur ve akışkan sıcaklığını gösteren T_m için hata oranı da aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$T_m = \frac{T_{10} + T_{20}}{2} \quad \textbf{(B.4)}$$

Q_l için hata oranının bulunması,

$$Q_l = m_l q_1'' 2\pi r_1 L\left(\frac{2\pi}{\omega}\right) - \phi\int U_m A\rho_a c_a T_{ba}(h,t) - (1-\phi)\int U_m A\rho_l c_l T_{bl}(0,t) \quad \textbf{(B.5)}$$

bulunan hata oranları Tablo B.1 de verilmiştir.

Nusselt sayısının belirsizliği;

Deneylerde elde edilen sonuçlardan aşağıdaki bağıntı kullanılarak Nusselt sayıları hesaplanmıştır.

$$Nu = \frac{h_w L}{k} = \frac{L}{k}\frac{Q_l}{2\pi r_1 L(T_{wo} - T_m)(2\pi/\omega)} \quad \textbf{(B.6)}$$

Burada belirsizliğe sebep olan Q_l, T_{wo} ve T_m için hata oranları yukarıda ayrı ayrı tespit edilmiştir. Bu hata oranlarının Nu sayısının belirsizliğinde ne kadar hataya sebep olduğu hesaplanırsa,

$$w_{Nu} = \left[\left(\frac{\partial Nu}{\partial Q_l} w_{Q_l}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_{wo}} w_{T_{wo}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_m} w_{T_m}\right)^2\right]^{1/2} \quad \textbf{(B.7)}$$

örnek bir deney (Deney-9) için yapılan hesap verilirse,

$$w_{Nu} = \left[\left((0.63)\ (10.01)\right)^2 + \left((-12.62)\ (1.34164)\right)^2 + \left((12.62)\ (0.35355)\right)^2 \right]^{1/2}$$

$$w_{Nu} = \left[(6.3063)^2 + (-16.9315)^2 + (4.4618)^2 \right]^{1/2}$$

seçilen bu deney için hata oranı $w_{Nu} = 10.69$ olarak bulunur. Diğer deneylerde de etkisini görmek için aşağıda bir deney gurubu için hata oranları tablo halinde verilmiştir (Tablo B.1). Hata hesabında baskın olan parametrelerin giriş gücü ve ısıtıcı yüzey sıcaklıklarında yapılan hatalar olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak diğer parametrelerin etkisi de ihmal edilemeyecek düzeydedir. Tabloda bir deney grubu için hataların oranı verilmiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi frekanslar arttıkça deneylerde belirsizlikler artmakta ve bunun sonucu olarak hata oranlarında da bir artış görülmektedir. Ancak yapılan değerlendirmelerde ortalama belirsizliğin yaklaşık

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \pm \%6.45$$

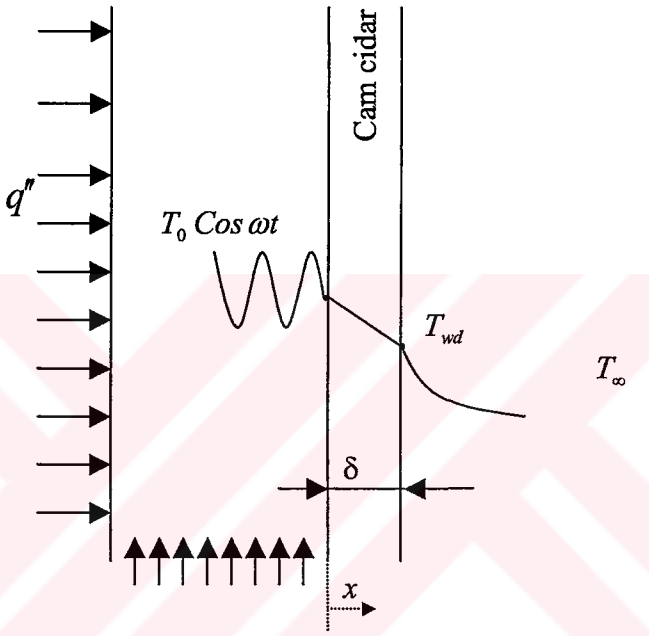
olduğu görülmüştür. Bu oranda kabul edilebilir deneysel belirsizlik sınırları içerisinde kalmaktadır. Tablo B.1 de Nu sayısının frekansla değişimi ve hata belirsizliği bir deney gurubu için açıkça görülmektedir.

Tablo B.1 : Deneylerde ***Nu*** sayısının belirsizliği

Deney	ω	Re_w	q_e(W)	qe (J)	W_{Ql}	W_{Two}	W_{Tm}	Nu	$\pm W_{Nu}$	%hata
Deney9	1.445	1026.11	50	217.41	10.01	1.34	0.35	82.11	8.78	10.69
Deney10	2.7122	1925.97	50	115.83	5.20	1.34	0.35	99.64	12.40	12.44
Deney11	3.906	2773.70	50	80.43	3.65	1.34	0.35	105.72	13.77	13.02
Deney12	5.13	3642.88	50	61.24	2.98	1.34	0.35	116.91	15.91	13.61
Deney13	1.4346	1018.73	100	437.97	10.06	1.34	0.35	83.59	4.74	5.67
Deney14	2.7227	1933.43	100	230.77	5.36	1.34	0.35	94.66	5.52	5.83
Deney15	3.9479	2803.46	100	159.15	3.82	1.34	0.35	107.49	7.21	6.71
Deney16	5.13	3642.88	100	122.48	2.94	1.34	0.35	115.94	8.40	7.24
Deney21	1.434	1018.30	150	657.24	10.30	1.34	0.35	86.96	3.27	3.76
Deney22	2.7227	1933.43	150	346.16	5.48	1.34	0.35	95.47	3.82	4.00
Deney23	3.958	2810.63	150	238.12	3.81	1.34	0.35	107.67	4.70	4.37
Deney24	5.13	3642.88	150	183.72	3.03	1.34	0.35	112.18	4.96	4.42
Deney1	1.4346	1018.73	50	218.99	10.78	1.34	0.35	32.48	2.36	7.27
Deney2	2.7227	1933.43	50	115.39	5.65	1.34	0.35	67.20	7.02	10.45
Deney3	3.958	2810.63	50	79.37	3.86	1.34	0.35	73.40	8.21	11.19
Deney 4	5.099	3620.87	50	61.61	3.02	1.34	0.35	78.21	9.13	11.67
Deney 5	1.424	1011.20	100	441.23	10.63	1.34	0.35	61.17	3.03	4.95
Deney 6	2.712	1925.83	100	231.68	5.61	1.34	0.35	71.74	3.94	5.50
Deney 7	3.958	2810.63	100	158.75	3.87	1.34	0.35	74.72	4.22	5.65
Deney 8	5.13	3642.88	100	122.48	3.04	1.34	0.35	78.23	4.53	5.79
Deney39	1.445	1026.11	150	652.23	10.67	1.34	0.35	69.10	2.21	3.19
Deney40	2.7227	1933.43	150	346.16	5.67	1.34	0.35	81.52	2.92	3.58
Deney41	3.958	2810.63	150	238.12	3.96	1.34	0.35	84.20	3.03	3.60
Deney42	5.1313	3643.80	150	183.67	3.11	1.34	0.35	92.21	3.56	3.86
Deney35	1.4346	1018.73	50	218.99	11.54	1.34	0.35	50.77	4.02	7.92
Deney36	2.7227	1933.43	50	115.39	6.13	1.34	0.35	57.57	4.83	8.38
Deney37	3.958	2810.63	50	79.37	4.24	1.34	0.35	63.58	5.60	8.81
Deney38	5.1417	3651.19	50	61.10	3.28	1.34	0.35	68.62	6.32	9.21
Deney17	1.4346	1018.73	100	437.97	11.29	1.34	0.35	53.17	2.19	4.12
Deney18	2.7227	1933.43	100	230.77	6.00	1.34	0.35	61.70	2.74	4.44
Deney19	3.8746	2751.40	100	162.16	4.21	1.34	0.35	64.50	2.93	4.54
Deney20	5.13	3642.88	100	122.48	3.23	1.34	0.35	67.51	3.13	4.63
Deney25	1.4346	1018.73	150	656.96	11.25	1.34	0.35	53.63	1.45	2.71
Deney26	2.7122	1925.97	150	347.50	5.96	1.34	0.35	59.36	1.69	2.85
Deney27	3.958	2810.63	150	238.12	4.14	1.34	0.35	65.53	1.98	3.01
Deney28	5.13	3642.88	150	183.72	3.20	1.34	0.35	69.88	2.18	3.12
								Ortalama hata %		6.45

Ek C

CAM CİDARDA SICAKLIK DAĞILIMI



Şekil C.1 : Cam cidarda sıcaklık dağılımı

Dış cidar üzerine yapıştırılan 7 adet termoeleman vasıtasıyla camın dış yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklıklardan düşük frekanslarda sıcaklığın salınımı takip ettiği ancak camın direncinden dolayı genliğinin çok düşük olduğu neredeyse sabit bir değerde salınım yaptığı görülmüştür. Bu problemde cam cidarın iç tarafında periyodik bir değişim varken dışa doğru gidildikçe bu durumun nasıl değiştiği analiz edilmiştir. Bu problem periyodik sınır şartına sahip zamana bağlı bir boyutlu ısı iletimi problemidir. Bu durum için geçerli denklem ve sınır şartları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad \textbf{(C.1)}$$

Sınır şartları;

$$T(x,0) = T_0 \tag{C.2}$$

$$T(0,t) = T_0 \, Cos\omega t \tag{C.3}$$

$$T(\delta,t) = T_{wd} \tag{C.4}$$

Bu problemde sınır şartı zamana göre periyodik olarak değiştiği için konumdan ziyade zamana bağlı bir problemdir ve başlangıç şartından bağımsız olarak değerlendirilebilir. Zamana bağlı periyodik sıcaklık değişimi bir imaginer parametre ile tariflenebilir. Bu da zamanın üstel bir şekilde dağılımını verir, ki bu da silindirik koordinatın imaginer bileşeni ile açıklanabilir.

Denklemi çözmek için değişkenlerine ayırma yöntemi kullanılırsa,

$$\frac{1}{\alpha\tau}\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{X}\frac{d^2X}{dx^2} = \pm i\lambda^2 \tag{C.5}$$

yazılabilir. Burada açıkça görülmektedir ki $+i\lambda^2$ ve $-i\lambda^2$ imajiner köklerinin her ikisi de denklemi sağlamaktadır. Bu durumda her iki kök içinde sıcaklıklar aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$T_+(x,t) = e^{i\alpha\lambda^2 t}(C_1 e^{\lambda\sqrt{i}\,x} + C_2 e^{-\lambda\sqrt{i}\,x}) \tag{C.6}$$

$$T_-(x,t) = e^{-i\alpha\lambda^2 t}(C_3 e^{\lambda\sqrt{-i}\,x} + C_4 e^{-\lambda\sqrt{-i}\,x}) \tag{C.7}$$

burada $\sqrt{i} = \frac{1+i}{\sqrt{2}}$, ve $\sqrt{-i} = \frac{-1+i}{\sqrt{2}}$ kompleks değişkenleri kullanılarak denklemleri yeniden düzenlersek,

$$T(x,t) = T_+(x,t) + T_-(x,t) \tag{C.8}$$

$$\begin{aligned} &= C_1 e^{\lambda x/\sqrt{2}} e^{i(\alpha\lambda^2 t + \lambda x/\sqrt{2})} + C_2 e^{-\lambda x/\sqrt{2}} e^{i(\alpha\lambda^2 t - \lambda x/\sqrt{2})} + C_3 e^{-\lambda x/\sqrt{2}} e^{-i(\alpha\lambda^2 t - \lambda x/\sqrt{2})} \\ &+ C_4 e^{\lambda x/\sqrt{2}} e^{-i(\alpha\lambda^2 t + \lambda x/\sqrt{2})} \end{aligned} \tag{C.9}$$

bu eşitlikteki benzer terimler yan yana toplanırsa denklem,

$$T(x,t) = e^{-\lambda x/\sqrt{2}}[A\cos(\alpha\lambda^2 t - \lambda x/\sqrt{2}) + B\sin(\alpha\lambda^2 t - \lambda x/\sqrt{2})] \tag{C.10}$$

haline gelir ve (3) nolu sınır şartı uygulanırsa,

$$T_0 \cos\omega t = A\cos\alpha\lambda^2 t + B\sin\alpha\lambda^2 t \tag{C.11}$$

elde edilir, burada eşitliğin sağlanabilmesi için, B=0, ve $T_0 \cos \omega t = A \cos \alpha \lambda^2 t$ olması gerekir, bu durumda $T_0 = A$ ve $\omega t = \alpha \lambda^2 t$ dir. Buradan $\lambda^2 = \omega / \alpha$ olduğu bulunur. Bu değerler denklem (9) da yerine yazılırsa,

$$T(x,t) = T_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} Cos\left[\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\ x \right] \qquad \textbf{(C.12)}$$

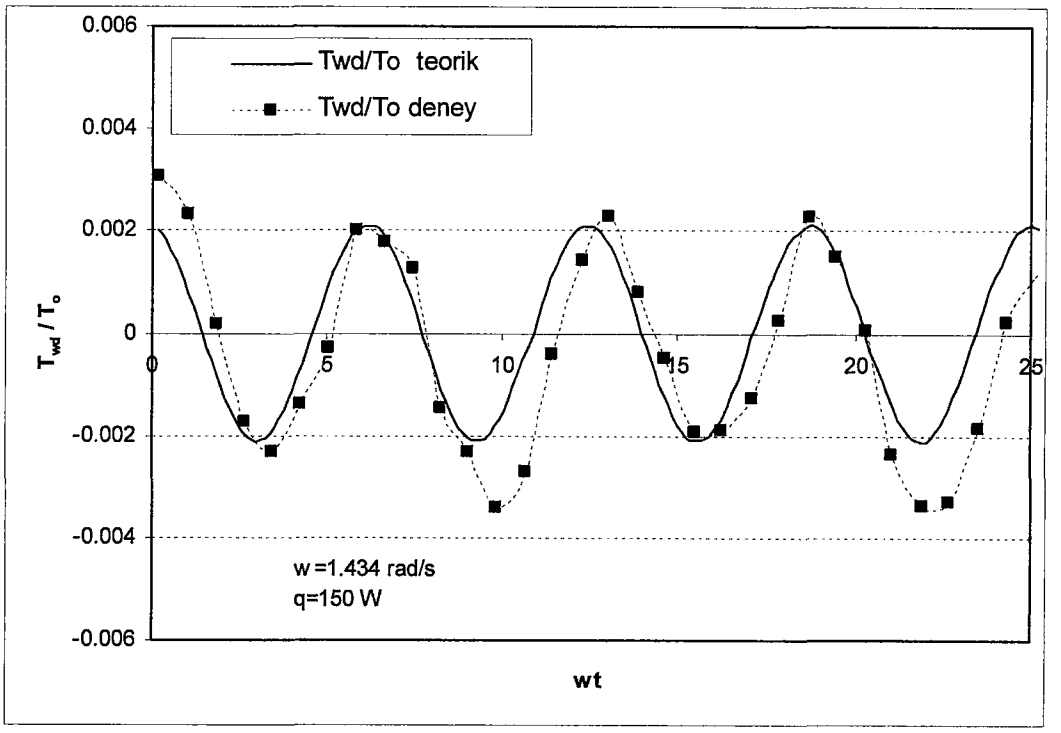
cam cidar içerisinde zamana bağlı sıcaklık ifadesi bulunur ve bu ifade düzenlenirse,

$$\frac{T(x,t)}{T_0} = e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} Cos\left[\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\ x \right] \qquad \textbf{(C.13)}$$

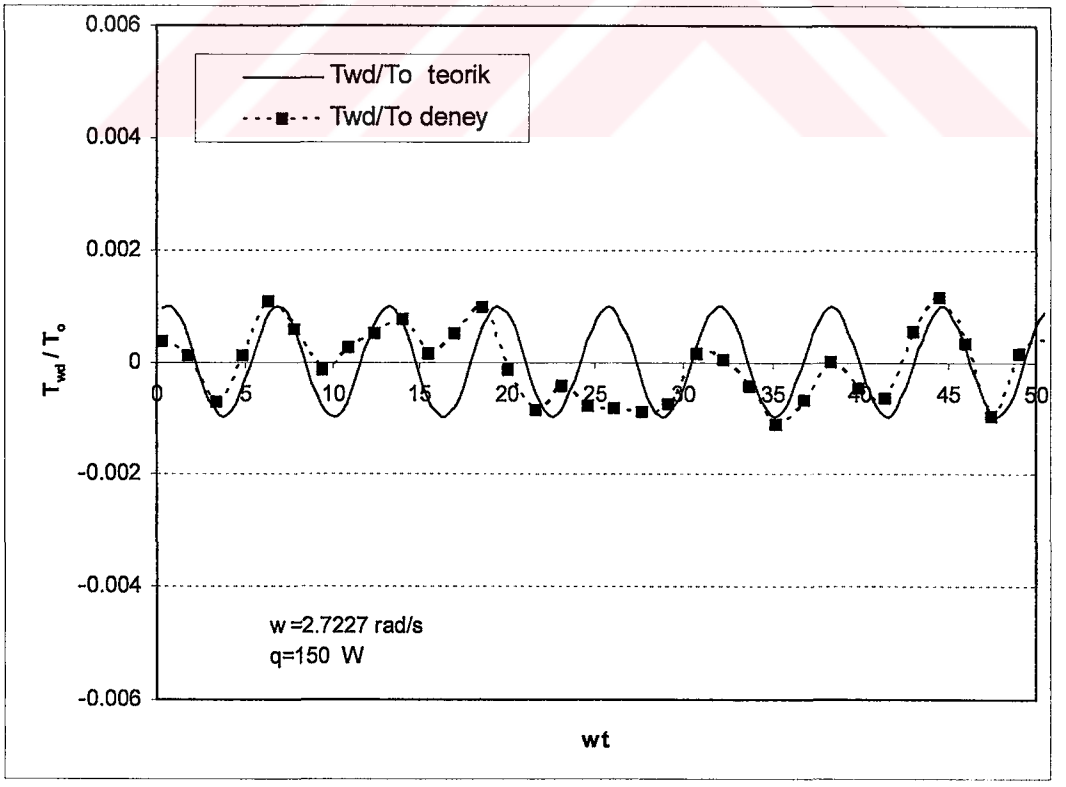
elde edilir. Bu ifade de (4) nolu sınır şartını yerine yazarsak,

$$\frac{T_{wd}}{T_0} = e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \delta} Cos\left[\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\ \delta \right] \qquad \textbf{(C.14)}$$

olarak dış cidardaki sıcaklık değişimini buluruz. Bu denklemden elde edilen sıcaklıklar ile deneylerden elde edilen sıcaklıklar iki farklı frekans için karşılaştırılmış ve Şekil C.2 ve C.3 de verilmiştir. Burada da görüldüğü gibi düşük frekanslarda sıcaklılıkların birbirine iyi bir uyum sağlarken frekans arttıkça bu uyum bozulmaktadır.



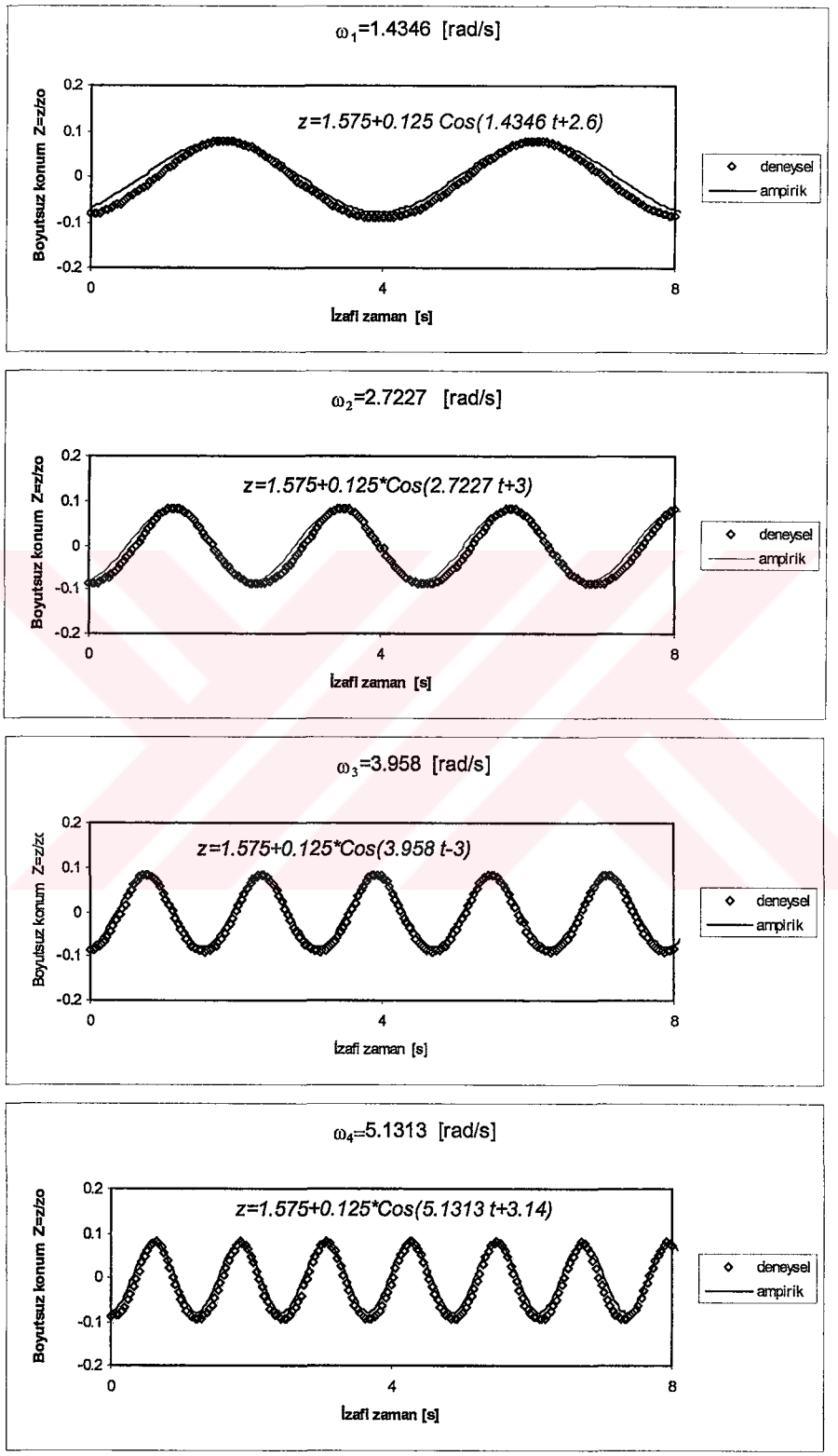
Şekil C.2 : ω_1=1.434 için cam dış yüzey sıcaklıklarının karşılaştırması



Şekil C.3 : ω_2=2.7227 için cam dış yüzey sıcaklıklarının karşılaştırması

Ek D

KONUM-ZAMAN DEĞERLERİ



Şekil D.1 : Deneysel konum-zaman değerlerinin ampirik bağıntılarla karşılaştırması

Ek E

BOYUT ANALİZİ

Hareketli sıvı kolonunda ısı geçişine etki eden parametreler,

$$h = f(U, \omega, C_p, x_m, L, D, \rho, \mu, k_f)$$

olarak belirlenebilir. Bu parametrelerden yararlanarak sistematik yöntemle boyut analizi yapmak için, önce boyut matrisi oluşturulur.

Tablo E.1 : Boyut matrisi

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9
	ω	C_p	h	x_m	L	D	ρ	μ	k_f
M	0	0	1	0	0	0	1	1	1
L	0	2	0	1	1	1	-3	-1	1
T	-1	-2	-3	0	0	0	0	-1	-3
θ	0	-1	-1	0	0	0	0	0	-1
Birim	1/s	J/	W/	m	m	m	Kg/m^3	N-s/	W/
Boyut	θ^{-1}	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	$MT^{-3}\theta^{-1}$	L	L	L	ML^{-3}	$ML^1\theta^1$	$MLT^{-3}\theta^{-1}$

Bu matrisin rank'ı r = 4 dür. Boyutsuz parametre sayısı n =9 dur. Böylece bu problemde (9 – 4 = 5) 5 adet bağımsız boyutsuz çarpan elde edilecektir. Herhangi bir boyutsuz çarpım;

$$\pi = M^0 L^0 T^0 \theta^0 = \omega^{k_1}\, C_p^{k_2}\, h^{k_3}\, x_m^{k4}\, L^{k_5}\, D^{k_6}\, \rho^{k_7}\, \mu^{k_8}\, k_f^{k_9}$$

şeklinde olacağı için, her iki taraftaki temel boyutların üsleri birbirine eşit olacaktır. Boyut matrisi yardımıyla ikinci tarafın boyut ifadesi bulunup bu işlem yapılırsa,

M nin üsleri için, $\quad k_3 + k_7 + k_8 + k_9 = 0$

L nin üsleri için, $\quad 2k_2 + k_4 + k_5 + k_6 - 3k_7 - k_8 + k_9 = 0$ **(E.1)**

T nin üsleri için, $\quad -k_1 - 2k_2 - 3k_3 - k_8 - 3k_9 = 0$

θ nın üsleri için, $\quad -k_2 - k_3 - k_9 = 0$

şeklinde homojen ve lineer bir denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminde daima temel büyüklük sayısı kadar denklem olacaktır. Oysa k değerlerinin sayısı değişken sayısı kadardır ve denklem sayısından fazladır. Bu durumda çözüm yöntemi gereği bazı k değerleri biliniyormuş gibi kabul edilecek ve diğer k değerleri bunların cinsinden bulunacaktır. Problemimizde k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 ve k_6 keyfi olarak seçilir ve diğer k'lar bunların cinsinden elde edilirse,

$$\left.\begin{aligned} k_6 &= 2k_1 + k_3 - k_4 - k_5 \\ k_7 &= k_1 \\ k_8 &= -k_1 + k_2 \\ k_9 &= -k_2 - k_3 \end{aligned}\right\} \qquad \textbf{(E.2)}$$

(E.2) denklemleri elde edilir. Sayısal değerleri elde etmek için bilinen k'lara (0) ve (1) gibi basit değerler verelim,

a) $k_1=1, k_2=k_3=k_4=k_5=0$, için (F.2) denklemlerinden, $k_6=2$ $k_7=1$, $k_8=-1$, $k_9=0$,

b) $k_2=1, k_1=k_3=k_4=k_5=0$, için (F.2) denklemlerinden, $k_6=0$ $k_7=0$, $k_8=1$, $k_9=-1$,

c) $k_3=1, k_2=k_1=k_4=k_5=0$, için (F.2) denklemlerinden, $k_6=1$ $k_7=0$, $k_8=0$, $k_9=-1$,

d) $k_4=1, k_2=k_3=k_1=k_5=0$, için (F.2) denklemlerinden, $k_6=-1$ $k_7=0$, $k_8=0$, $k_9=0$,

e) $k_5=1, k_2=k_3=k_4=k_1=0$, için (F.2) denklemlerinden, $k_6=-1$ $k_7=0$, $k_8=0$, $k_9=0$,

Bulunan k değerleri de bir matris oluşturur. Buna Çözüm veya çözümler matrisi denir. Şimdi bu matrisi oluşturalım.

Tablo E.2 : Çözüm matrisi

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9
	ω	C_p	h	x_{max}	L	D	ρ	μ	k_f
π_1	1	0	0	0	0	2	1	-1	0
π_2	0	1	0	0	0	0	0	1	-1
π_3	0	0	1	0	0	1	0	0	-1
π_4	0	0	0	1	0	-1	0	0	0
π_5	0	0	0	0	1	-1	0	0	0

Çözüm matrisinin her satırı bir boyutsuz çarpımın üslerini verir. Bu durumda aranılan komple boyutsuz çarpım serisi aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\pi_1 = \frac{\omega \rho D^2}{\mu} = \frac{\omega D^2}{\nu} \qquad \mathrm{Re}_\omega, \quad \text{Kinetik reynolds sayısı}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu C_p}{k_f} \qquad \mathrm{Pr}, \quad \text{Prandtl sayısı}$$

$$\pi_3 = \frac{hD}{k_f} \qquad \mathrm{Nu}, \quad \text{Nusselt sayısı}$$

$$\pi_4 = \frac{x_m}{D} = A_0 \qquad A_0, \quad \text{Boyutsuz genlik}$$

$$\pi_5 = \frac{L}{D} \qquad L/D \quad \text{Isıtıcı aktif boyunun hidrolik çapa oranı.}$$

$$Nu = C\left(\mathrm{Re}_\omega, \mathrm{Pr}, A_o, L/D\right)$$

Burada mertebe analizi yapılırsa bazı boyutsuz çarpımların olaydaki etkisi ihmal edilebilir.

Ek F

DENEYSEL PARAMETRELER

Tablo F.1 : Yapılan deneyler ve değiştirilen temel parametreler

h [mm]	x_m [mm]	ω [rd/s]	q Isı akısı [W]		
Doldurma yüksekliği	Genlik	Frekans	50	100	150
1500	200	1.435	deney1	deney5	deney39
		2.723	deney2	deney6	deney40
		3.958	deney3	deney7	deney41
		5.131	deney4	deney8	deney42
1450	250	1.435	deney9	deney13	deney21
		2.723	deney10	deney14	deney22
		3.958	deney11	deney15	deney23
		5.131	deney12	deney16	deney24
1500	150	1.435	deney35	deney17	deney25
		2.723	deney36	deney18	deney26
		3.958	deney37	deney19	deney27
		5.131	deney38	deney20	deney28
1675	150	1.435	deney29	deney32	deney43
		2.723	deney30	deney33	deney44
		3.968	deney31	deney34	deney45

Ek G

DENEYSEL ÖLÇMELER

Tablo G.1 : Yapılan deneyler ve fiziksel ölçmeler

Deney	q(W)	ω (rad/s)	x_m (m)	z_o doldurma yük. (mm)	Eksilen hacim (mm)	Süre(s)	Sog. Suyu debisi(kg/s)	T ortam(civalı)
deney1	50	1.4346	0.2	1500	10	9900	0.012348	22.70
deney2	50	2.7227	0.2	1500	18	12300	0.0125735	22.6
deney3	50	3.958	0.2	1500	13	8160	0.0162166	22.3
deney4	50	5.099	0.2	1500	8	3900	0.016023	21.8
deney5	100	1.4346	0.2	1500	16	7320	0.01152	24.8
deney6	100	2.7227	0.2	1500	15	4500	0.0111253	25
deney7	100	3.958	0.2	1500	18	6000	0.0114146	21
deney8	100	5.13	0.2	1500	22	6600	0,01168	20.8
deney9	50	1.445	0.25	1450	6	6300	0.01124266	21
deney10	50	2.7122	0.25	1450	6	7680	0.0147879	21.5
deney11	50	3.958	0.25	1450	8	5100	0.0106666	21.4
deney12	50	5.13	0.25	1450	10	6420	0.0119026	21.7
deney13	100	1.4346	0.25	1450	11	7260	0.011603	22.3
deney14	100	2.7227	0.25	1450	16	7200	0.010796	22.3
deney15	100	3.9479	0.25	1450	19	5100	0.01182333	22.3
deney16	100	5.13	0.25	1450	17	5040	0.01161933	21.6
deney17	100	1.4346	0.15	1500	11	5400	0.01191	22.8
deney18	100	2.7227	0.15	1500	11	6300	0.0122364	21.8
deney19	100	3.8746	0.15	1500	32	9720	0.0113925	21
deney20	100	5.13	0.15	1500	22	8220	0.01141166	21

Tablo G.1 devamı

Deney	q(W)	ω (rad/s)	x_m (m)	z_o doldurma yük. (mm)	Eksilen hacim (mm)	Süre(s)	Sog. Suyu debisi(kg/s)	T ortam(civalı)
deney21	150	1.434	0.25	1450	28	8100	0.0110333	21.6
deney22	150	2.7227	0.25	1450	19	5820	0.01211	21
deney23	150	3.958	0.25	1450	22	4440	0.0121433	21.5
deney24	150	5.13	0.25	1450	17	5400	0.01218443	21.6
deney25	150	1.4346	0.15	1500	43	5400	0.0121553	20.7
deney26	150	2.7122	0.15	1500	48	6180	0.0123766	21
deney27	150	3.958	0.15	1500	41	4200	0.01225667	21
deney28	150	5.13	0.15	1500	29	5100	0.01141166	21
deney29	50	1.466	0.15	1675	3	3480	0.011386666	25.4
deney30	50	2.7227	0.15	1675	10	6600	0.01169	22.6
deney31	50	3.958	0.15	1675	10	5100	0.008937	22.5
deney32	100	1.434	0.15	1675	20	7200	0.01195	22.4
deney33	100	2.7227	0.15	1675	22	6900	0.0124623	22.2
deney34	100	3.958	0.15	1675	23	6300	0.01148667	21
deney35	50	1.4346	0.15	1500	3	5580	0.012063333	22.5
deney36	50	2.7227	0.15	1500	10	6900	0.01239	22.2
deney37	50	3.958	0.15	1500	5	4800	0.012383333	23.3
deney38	50	5.1417	0.15	1500	10	5400	0.011903333	23.2
deney39	150	1.445	0.2	1500	33	5400	0.01127	21.6
deney40	150	2.7227	0.2	1500	31	5100	0.011333333	21.8
deney41	150	3.958	0.2	1500	22	4500	0.01169	21.8
deney42	150	5.1313	0.2	1500	28	5400	0.011533333	21.7

Ek H

NUSSELT SAYILARI

Tablo H.1 : Nusselt Sayıları

Deney	ω	Re_ω	A_o	$q_e(W)$	q_e (J)	T_{wo}	T_{20}	T_{10}	ϕ	$-H_1$	H_2	Q_k	Q_l	Q_a	h_w	Nu
deney9	1.445	1026.11	12.886	50	217.41	46.69	36.20	27.64	0.7667	126.91	0.1387	90.37	196.19	21.22	85.54	78.00
deney10	2.712	1925.97	12.886	50	115.83	39.57	29.86	24.95	0.7460	71.42	0.0781	44.34	104.49	11.34	99.66	90.88
deney11	3.906	2773.70	12.886	50	80.43	37.13	27.03	24.16	0.7528	50.65	0.0586	29.72	73.02	7.41	105.75	96.43
deney12	5.130	3642.88	12.886	50	61.24	36.19	25.07	25.33	0.8021	47.87	0.0284	13.34	58.57	2.67	116.94	106.63
deney13	1.435	1018.73	12.886	100	437.97	69.13	48.03	34.79	0.7648	182.22	0.1702	255.59	377.68	60.29	85.08	77.58
deney14	2.723	1933.43	12.886	100	230.77	64.04	43.16	32.24	0.7727	157.77	0.1451	72.86	214.07	16.70	96.44	87.94
deney15	3.948	2803.46	12.886	100	159.15	55.75	35.85	30.61	0.7945	82.38	0.0476	76.72	143.34	15.81	107.51	98.04
deney16	5.130	3642.88	12.886	100	122.48	52.28	32.84	30.46	0.7914	57.98	0.0305	64.47	109.00	13.48	111.48	101.66
deney21	1.434	1018.30	12.886	150	657.24	92.02	59.37	41.44	0.7832	348.76	0.4691	308.01	590.00	67.24	88.60	80.79
deney22	2.723	1933.43	12.886	150	346.16	80.90	47.34	37.49	0.7895	201.11	0.2094	144.83	315.46	30.70	97.81	89.19
deney23	3.958	2810.63	12.886	150	238.12	72.67	40.06	36.09	0.7953	150.14	0.0696	87.91	220.05	18.07	110.11	100.41
deney24	5.130	3642.88	12.886	150	183.72	69.19	35.37	34.80	0.8175	132.42	0.0083	51.29	174.35	9.37	110.08	100.37
deney1	1.435	1018.73	10.3	50	218.99	66.86	36.05	29.86	0.8199	109.79	0.1387	109.06	199.21	19.78	36.34	33.14
deney2	2.723	1933.43	10.3	50	115.39	47.10	34.49	27.21	0.8133	72.27	0.0781	43.04	107.27	8.11	78.12	71.23
deney3	3.958	2810.63	10.3	50	79.37	43.35	31.54	25.69	0.8053	54.71	0.0586	24.61	74.52	4.85	87.17	79.49
deney4	5.099	3620.87	10.3	50	61.61	40.74	28.55	25.12	0.8097	44.43	0.0284	17.15	58.32	3.29	93.21	84.99
deney5	1.424	1011.20	10.3	100	441.23	82.00	57.63	35.85	0.8028	219.92	0.1702	221.14	397.45	43.78	73.61	67.12
deney6	2.712	1925.83	10.3	100	231.68	71.00	49.09	32.59	0.8056	128.51	0.1500	103.02	211.51	20.17	81.36	74.19
deney7	3.958	2810.63	10.3	100	158.75	66.24	44.10	30.27	0.8080	95.83	0.0476	62.86	146.63	12.12	85.46	77.92
deney8	5.130	3642.88	10.3	100	122.48	62.56	37.61	31.20	0.8196	81.57	0.0305	40.87	115.08	7.40	90.21	82.26
deney39	1.445	1026.11	10.3	150	652.23	112.05	74.58	44.05	0.8169	312.03	0.4691	339.73	589.58	62.66	70.04	63.87
deney40	2.723	1933.43	10.3	150	346.16	96.30	62.72	40.08	0.8160	173.80	0.2094	172.14	314.28	31.88	81.54	74.35
deney41	3.958	2810.63	10.3	150	238.12	90.50	51.65	40.44	0.8271	140.11	0.0696	97.94	221.11	17.01	84.22	76.80
deney42	5.131	3643.80	10.3	150	183.67	83.00	45.41	39.11	0.8391	106.00	0.0083	77.66	171.17	12.50	92.24	84.11

Tablo H.1 devamı

Deney	ω	Re_ω	A_o	$q_e(W)$	q_e (J)	T_{wo}	T_{20}	T_{10}	ϕ	$-H_1$	H_2	Q_k	Q_l	Q_a	h_w	Nu
deney35	1.435	1018.73	7.73	50	218.99	63.39	45.81	31.27	0.8779	110.73	0.1387	108.12	205.65	13.34	52.07	47.48
deney36	2.723	1933.43	7.73	50	115.39	56.10	38.24	29.57	0.8833	67.39	0.0781	47.92	109.71	5.67	59.23	54.01
deney37	3.958	2810.63	7.73	50	79.37	54.03	37.69	29.76	0.8847	52.78	0.0586	26.54	76.25	3.12	65.59	59.81
deney38	5.142	3651.19	7.73	50	61.10	50.78	34.83	28.92	0.8862	42.76	0.0284	18.31	58.99	2.11	67.86	61.88
deney17	1.435	1018.73	7.73	100	437.97	101.00	68.51	41.01	0.8584	175.76	0.1702	262.04	400.69	37.28	54.36	49.57
deney18	2.723	1933.43	7.73	100	230.77	86.77	54.89	37.97	0.8644	106.14	0.1451	124.49	213.75	17.02	62.40	56.90
deney19	3.875	2751.40	7.73	100	162.16	82.18	51.75	35.01	0.8615	82.07	0.0476	80.05	151.03	11.14	65.14	59.40
deney20	5.130	3642.88	7.73	100	122.48	78.57	46.85	35.13	0.8722	69.19	0.0305	53.25	115.64	6.84	67.25	61.32
deney25	1.435	1018.73	7.73	150	656.96	133.59	83.50	43.84	0.8557	341.62	0.4691	314.88	611.07	45.89	55.63	50.73
deney26	2.712	1925.97	7.73	150	347.50	125.67	81.77	42.59	0.8550	192.57	0.2094	154.72	324.85	22.64	59.37	54.14
deney27	3.958	2810.63	7.73	150	238.12	114.10	70.76	41.18	0.8649	141.50	0.0696	96.55	225.01	13.11	66.02	60.20
deney28	5.130	3642.88	7.73	150	183.72	107.26	63.52	41.16	0.8629	119.57	0.0083	64.14	174.92	8.80	68.79	62.72

ÖZGEÇMİŞ

Ünal AKDAĞ, 1970 yılında Aksaray'da doğdu. İlk ve orta öğretimini burada tamamladıktan sonra girdiği Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 1992 yılında mezun oldu. Bir süre özel sektörde mühendislik yaptı. 1994 yılında yedek subay olarak vatani görevini tamamladı. 1995 yılında Niğde Üniversitesi Aksaray Mühendislik Fakültesine Araştırma Görevlisi olarak girdi. 1997 yılında Niğde Üniversitesinden Yüksek Lisans derecesi aldı. 1998 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde Doktora eğitimine başladı. Halen Yüksek Öğretim Kanununun 35. maddesi kapsamında İTÜ Makine Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak doktora çalışmalarına devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

175762

ÇOK AMAÇLI KARAR VERME YÖNTEMLERİ VE UYGULAMALARI

Kurallara uygundur.
Aydın DEMİR
FBE Araştırma Gör.

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Bülent BÖLAT
(Enstitü No: 503932035)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Ocak 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Ekim 2004

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ahmet KUZUCU**
Diğer Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Can ÖZSOY**
Prof. Dr. N. Aydın HIZAL
Prof. Dr. A. Talha DİNİBÜTÜN (Doğuş.Ü.)
Prof. Dr. H. Ziya ULUKAN (G.Ü)

EKİM 2004

ÖNSÖZ

Karar vermek... Doğru kararı verebilmek...

Bu, hergün yapmaya çalıştığımız ve hayatımızın son anına kadar yapmaya devam edeceğimiz bir işlevdir. İnsiyatif almaya başladığımızda başlar ve hayat boyunca, çok değişik ortam ve durumda ortaya çıkar.

İnsanlık tarihinin her evresinde de insanın almış olduğu kararlar, insanlık tarihini şekillendirmiş ve bugünkü medeniyetimizin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Toplum, millet, ekonomi, endüstri gibi tüm sosyal yapıların temel taşı olan insan tek karar vericidir ve verdiği kararlarla da geleceğini şekillendirir.

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ve uygulamalar son on yıl içinde hızlanmış ve bilgisayarlar günlük hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olmuş durumdadır. Bilgisayarların hesaplama gücü ve hızı, programlama teknikleriyle birleştirildiğinde karar verme süreçlerinde vazgeçilmez bir araç olarak kabul edilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, klasik ve yeni çok amaçlı karar verme tekniklerini karşılaştırmalı biçimde inceleyip, bu tekniklerin gerçek hayatta karşılaşılan problemler üzerinde yeni uygulamalarını yapmak ve bilgisayar yardımıyla yeni çözümler sunmaktır.

Bana bu tezi yapma fırsatı sağlayan ve çalışmanın yapılabilmesi için yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet KUZUCU' ya şükran ve saygılarımı sunarım.

"En kötü karar bile kararsızlıktan iyidir."

Ocak 2003

Bülent BÖLAT

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
ÖZET ix
SUMMARY xiv

1. GİRİŞ 1
1.1 Karar Verme Teorisi 1
1.2 Sitem Yaklaşımı İle Karar Verme Süreci 1
1.2.1 Problemin Tasarım Süreci 2
1.2.2 Uygun Seçeneklerin Araştırılması ve Değerlendirilmesi 5
1.2.3 Model Kurma ve Uygun Çözüm Tekniğinin Bulunması 7
1.2.4 Optimum Çözüm Veren Seçeneğin Seçilmesi 7
1.2.5 Verilen Kararın Uygulanması 8
1.2.6 Geri Bildirim 8
1.2.7 Karar Verme Sürecindeki Temel Unsurlar 8
1.3 Temel Yaklaşım ve Çözümler 12

2. ÇOK AMAÇLI KARAR VERME YÖNTEMLERİ 14
2.1 Giriş 14
2.2 Temel Kavramlar 15
2.3 Çok Amaçlı Karar Verme Yöntemlerinin Sınıflandırması 25

3. STATİK ÇAKV PROBLEMLERİ 28
3.1 Giriş 28
3.2 Statik ÇAKV Problemleri İçin Etkileşimli Yöntem 28
3.2.1 SEMOPS Yöntemi 29
3.3 Statik ÇAKV Problemleri İçin Bulanık Programlama 33
3.3.1 Min-max Yaklaşımı 33
3.3.2 Global Kriterler Yaklaşımı 40
3.3.3 TOPSIS Yöntemi 45
3.4 ÖRNEK - BOW NEHRİ VADİSİ SU KALİTE YÖNETİMİ 50
3.4.1 Problem Tanımı 50
3.4.2 SEMOPS Yöntemi İle Çözüm 58
3.4.3 TOPSIS Yöntemi İle Çözüm 66

4. DİNAMİK ÇAKV PROBLEMLERİ 69
4.1 Giriş 69
4.2 Dinamik ÇAKV Problemleri İçin Bulanık Mantık Uygulaması 70
4.2.1 Sıralı Yapı Bulanık Mantık Yöntemi 70
4.2.2 Algoritma Önerisi 71
4.3 ÖRNEK - ASANSÖR GRUP KONTROLÜ 72
4.3.1 Giriş 72

4.3.2 Asansör Grup Kontrol Sistemlerinde Kontrol ve Kumanda 73
4.3.3 Trafik Modeli 74
4.3.4 Asansör Kontrol Sistemleri 78
4.3.5 Asansör Kinematiği 81
4.3.6 Örnek Sistem - 30 Katlı İş Merkezi 4 Kabinli Asansör Grup Kontrolü 84
4.3.7 Asansör Bulanık Kontrol Sisteminin Özellikleri 86
4.3.8 Bina Asansör Kontrol Sistemi (BAKS) Simülasyon Programı 92
4.3.9 Simülasyon Şartları ve Sonuçları 102

5. SONUÇLAR 105

KAYNAKLAR 112

EKLER 117

ÖZGEÇMİŞ 151

KISALTMALAR

KV : Karar Verici
ÇAKV : Çok Amaçlı Karar Verme
LP : Lineer Programlama
NLP : Non-Lineer Programlama
OÇ : Optimum Çözüm
VMP : Vektör Maksimizasyonu Problemi
EUÇ : Eniyi Uzlaşık Çözüm
HP : Hedef Programlama
ÇALP : Çok Amaçlı Lineer Programlama
OB : Olurlu Bölge
BOÇ : Baskın Olmayan Çözüm
TEÇ : Tercih Edilmiş Çözüm
İÇ : İdeal Çözüm
BOÇK : Baskın Olmayan Çözümler Kümesi
BÇ : Baskın Çözüm
TEÇ : Tatmin Edici Çözüm
ÇAMP : Çok Amaçlı Matematik Programlama
SEMOPS : Sequental Multiobjective Problem Solving
İS : İstek Seviyeleri
TOPSIS : Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
SUMT : Sequental Unconstrained Minimization Technique
GRG : Generalized Reduced Gradient Method
PIS : Pozitive Ideal Solution
NIS : Negative Ideal Solution
ÇBKV : Çok Bileşenli Karar Verme
DO : Dissolved Oxygen
BODM : Biochemical Oxygen Demanding Material
$BODM_C$: Biochemical Oxygen Demanding Material (Carbonaceous)
$BODM_N$: Biochemical Oxygen Demanding Material (Nitrogenous)
YGD% : Yatırımın Geri Dönüş Yüzdesi
AGKS : Asansör Grup Kontrol Sistemi
TKK : Tek Kabin Kontrolü
ÜÇD : Uygun Çağrı Dağıtma
BGK : Bilgisayar Grup Kontrolü
BAKS : Bina Asansör Kontrol Sistemi Simülasyon Program Adı
BTS : Bina Trafik Senaryosu

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 1.1	Karar Verme Problemlerinin Genel Sınıflandırması	11
Tablo 2.1	ÇAKV Yöntemlerinin Sınıflandırılması	25
Tablo 2.2	ÇAKV Probleminin Genel Olarak Gösterilmesi	25
Tablo 3.1	Pozitif İdeal Çözüm Sonuç Tablosu	35
Tablo 3.2	**PIS** Sonuç Tablosu	47
Tablo 3.3	Karbon (C) ve Nitrojen (N) Taşınım Katsayıları, d_{ij}	53
Tablo 3.4	Şehirlerin Günlük **BODM** Atık Seviyesi	53
Tablo 4.1	Asansör Kinematiği (3.3 m. katlar arası mesafe)	84
Tablo 4.2	Simülasyonda Kullanılan 30 Bulanık Çıkarım Kuralı	90
Tablo 4.3	Örnek Durum İçin Bulanık Mantık Çıkarım Sonuçları	92
Tablo 4.4	Sabit mod için Geçerli Katsayılar	100
Tablo 4.5	Adaptift mod için Geçerli Katsayılar	100
Tablo B.1	Enerji Öncelikli Durum - Ağırlık Katsayıları	121
Tablo B.2	Toplu Sonuçlar	121
Tablo B.3	Bekleme Süresi Öncelikli Durum - Ağırlık Katsayıları	126
Tablo B.4	Toplu Sonuçlar	126
Tablo B.5	Adaptif Durum – Ağırlık Katsayıları	131
Tablo B.6	Toplu Sonuçlar	131
Tablo C.1	Enerji Öncelikli Durum - Ağırlık Katsayıları	136
Tablo C.2	Toplu Sonuçlar	136
Tablo C.3	Bekleme Süresi Öncelikli Durum - Ağırlık Katsayıları	141
Tablo C.4	Toplu Sonuçlar	141
Tablo C.5	Adaptif Durum – Ağırlık Katsayıları	146
Tablo C.6	Toplu Sonuçlar	146

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil Ö.1	: ÇAKV Yöntemleri Sınıflandırıması	x
Şekil Ö.2	: Bulanık Mantık İçeren ÇAKV Yöntemleri Sınıflandırması	xi
Şekil Ö.3	: Sıralı Yapı Bulanık Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi	xii
Şekil Ö.4	: Bina Asansör Kontrol Sistemi Simülasyon Programı Arayüzü	xiii
Figure S.1	: MODM Methods Classification	xv
Figure S.2	: MODM Methods Classification with Fuzzy Logic	xvi
Figure S.3	: Ordinal Structure Fuzzy Inference System	xvii
Figure S.4	: Elevator Group Control System Simulaton Program Interface	xviii
Şekil 1.1	: Bilgi Edinme Süreci	5
Şekil 1.2	: Araştırma Süreci	6
Şekil 2.1	: Karar Verme Sürecinde Çeşitli Uzaylar Arası İlişki	19
Şekil 2.2	: Örnek Problem 1' e ait Karar Değişkenleri Uzayı	20
Şekil 2.3	: Örnek Problem 1' e ait Amaç Fonksiyonları Uzayı	20
Şekil 2.4	: Örnek Problem 2' ye ait Karar Değişkenleri Uzayı	21
Şekil 2.5	: Örnek Problem 2' ye ait Amaç Fonksiyonları Uzayı	22
Şekil 2.6	: ÇAKV Yöntemlerinin Sınıflandırılması	27
Şekil 2.7	: ÇAKV Yöntemlerinin Sınıflandırılması	27
Şekil 3.1	: Hiperbolik Üyelik Fonksiyonu	36
Şekil 3.2	: Exponansiyel Üyelik Fonksiyonu	37
Şekil 3.3	: Ters Hiperbolik Üyelik Fonksiyonu	38
Şekil 3.4	: Sıralı Lineer Üyelik Fonksiyonu	38
Şekil 3.5	: Farklı d_p için Kayıtsız Uzaklık Eğrileri	42
Şekil 3.6	: **PIS** (f^*) ve **NIS** (f^-) Esaslı İki Uzlaşık Çözüm	46
Şekil 3.7	: $\mu_1(x)$ ve $\mu_2(x)$ Üyelik Fonksiyonları	48
Şekil 3.8	: p=2 için Uzlaşık Çözümler (Kalın Çizgi Üzerinde)	49
Şekil 3.9	: Bow Vadisi Su Kalite Yönetimi Temel Özellikleri	51
Şekil 3.10	: 1. Çevrim: Problemin Başlangıç Sonuçları	60
Şekil 3.11	: 2. Çevrim: Problemde 6. İS nin Kısıt Olarak Atanması	61
Şekil 3.12	: 3. Çevrim: İlave Olarak 2. İS nin Kısıt Olarak Atanması	63
Şekil 3.13	: 4. Çevrim: İlave Olarak 4. İS nin Kısıt Olarak Atanması	64
Şekil 3.14	: 5. Çevrim: İlave Olarak 5. İS nin Kısıt Olarak Atanması	65
Şekil 3.15	: TOPSIS Yöntemi ile Elde Edilen Çözüm	67
Şekil 4.1	: Sıralı Bulanık Model Yapısı	69
Şekil 4.2	: Genel Asansör Trafik Modeli	75
Şekil 4.3	: Asansör Grup Kontrol Sistemlerinin Genel Yapısı	78
Şekil 4.4	: Bilgisayar Esaslı Asansör Kontrol Sistemi	80
Şekil 4.5	: Zamana Göre jerk, ivme, hız ve yolculuk Profilleri	82
Şekil 4.6	: Çağrı Paneli	85
Şekil 4.7	: Giriş: Bekleme Zamanı Üyelik Fonksiyonları	88
Şekil 4.8	: Giriş: Yolculuk Zamanı Üyelik Fonksiyonları	88

Şekil 4.9 : Giriş: Yolculuk Mesafesi Üyelik Fonksiyonları 88
Şekil 4.10 : Giriş: Yolcu Sayısı Üyelik Fonksiyonları 89
Şekil 4.11 : Giriş: Alan Ağırlığı (Çağrı Katı) Üyelik Fonksiyonları 89
Şekil 4.12 : Giriş: Alan Ağırlığı (Gidiş Katı) Üyelik Fonksiyonları 89
Şekil 4.13 : Çıkış: Öncelik Üyelik Fonksiyonları 89
Şekil 4.14 : Bina Asansör Kontrol Sistemi Simülasyon Programı Arayüzü 93
Şekil 4.15 : Asansör Kabin Modülünde Dikkate Alınan Kinematik Yapı 96
Şekil 4.16 : BİNA TRAFİK SENARYO ÜRETİCİ Programı 98
Şekil 4.17 : BİNA TRAFİK SENARYO ÜRETİCİ Programı Çalışma Şeması .. 98
Şekil 4.18 : 07:30 İş Başlangıç Geliş Trafiği – Normal Dağılım 99
Şekil 4.19 : 07:30 İş Başlangıç Geliş Trafiği – Poisson Dağılımı 99
Şekil 4.20 : BAKS – Simülasyon Programı Çalışma Yapısı 103
Şekil 4.21 : 12:00 -12:15 Trafiği – Normal Dağılım 104
Şekil 4.22 : 12:00 -12:15 Trafiği – Poisson Dağılımı 104
Şekil A.1 : Bulanık Mantık Çıkarımi: Girişler[0.45,0.4,0.1,0.2,1,1], Çıkış:[0.512].. 118
Şekil A.2 : Bulanık Mantık Çıkarımi: Girişler[0.45,0.4,0.1,0.2,0.5,0], Çıkış:[0.64]. 119
Şekil A.3 : Bulanık Mantık Çıkarımi: Girişler[0.25,0.4,0.1,0.2,0.5,0], Çıkış:[0.699] 120
Şekil B.1 : Kabin Rota Grafiği 122
Şekil B.2 : Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 123
Şekil B.3 : Kabin Performans Grafiği 124
Şekil B.4.a : Bekleme Süreleri Grafiği 125
Şekil B.4.b : Yolculuk Süreleri Grafiği 125
Şekil B.5 : Kabin Rota Grafiği 127
Şekil B.6 : Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 128
Şekil B.7 : Kabin Performans Grafiği 129
Şekil B.8.a : Bekleme Süreleri Grafiği 130
Şekil B.8.b : Yolculuk Süreleri Grafiği 130
Şekil B.9 : Kabin Rota Grafiği 132
Şekil B.10 : Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 133
Şekil B.11 : Kabin Performans Grafiği 134
Şekil B.12.a : Bekleme Süreleri Grafiği 135
Şekil B.12.b : Yolculuk Süreleri Grafiği 135
Şekil C.1 : Kabin Rota Grafiği 137
Şekil C.2 : Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 138
Şekil C.3 : Kabin Performans Grafiği 139
Şekil C.4.a : Bekleme Süreleri Grafiği 140
Şekil C.4.b : Yolculuk Süreleri Grafiği 140
Şekil C.5 : Kabin Rota Grafiği 142
Şekil C.6 : Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 143
Şekil C.7 : Kabin Performans Grafiği 144
Şekil C.8.a : Bekleme Süreleri Grafiği 145
Şekil C.8.b : Yolculuk Süreleri Grafiği 145
Şekil C.9 : Kabin Rota Grafiği 147
Şekil C.10 : Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 148
Şekil C.11 : Kabin Performans Grafiği 149
Şekil C.12.a : Bekleme Süreleri Grafiği 150
Şekil C.12.b : Yolculuk Süreleri Grafiği 150

ÇOK AMAÇLI KARAR VERME YÖNTEMLERİ VE UYGULAMALARI

ÖZET

Mühendislikte, içinde birçok kriter ve amacı bulunan bir tasarımı formüle etmek çoğu zaman bir problemdir. Eğer amaçlar birbirleriyle çakışıyorsa, o zaman problem, birbiriyle çakışan amaçları karşılayan ve mümkün olan en iyi tasarımı bulma problemi olacaktır. Bu problem, çok amaçlı olarak ve sınırlamalar dikkate alınarak bir optimum tasarım problemi olarak çözülmelidir.Bu tip problemler, çok amaçlı, çok kriterli veya vektör optimizasyon problemi olarak bilinirler.

Bu tip problemlere örnek olarak, bir mühendisin araba tasarımı sırasında güvenlik amacı ile çarpma direncini maksimum yapmak istemesinin yanında yakıt ekonomisi için ağırlığı minimum yapmak istemesi verilebilir. Bu, tam olarak, çakışan iki amacı olan bir çok amaçlı optimizasyon problemi olup, amaçlardan biri olan çarpma dayanımının arttırılması sırasında diğer amaç olan ağırlığın azaltılmasının sağlanmaya çalışılmasıdır.

Bu problemin genel matematiksel tanımı şu şekildedir:

Amaç fonksiyonları:
$max/min\ f_j(\underline{x}) \qquad j=1,2,...k$

Kısıtlar:

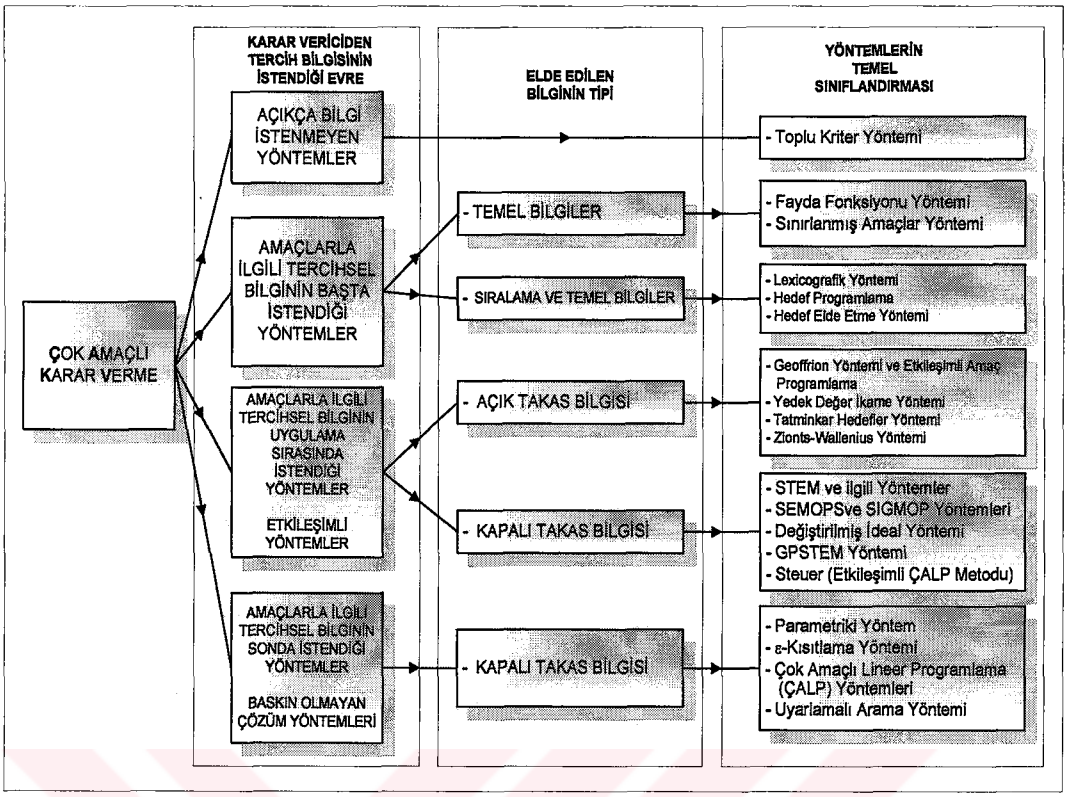
$g_i(\underline{x}) \leq 0, \quad i=1,2,..,m$

$\underline{x} \geq 0$

Bu tip problemlerin çözümü için pek çok yöntem geliştirilmiştir. Ancak bu çeşitliliğe rağmen geleneksel çözüm yöntemlerinin hepsi şu ortak karakteristiklere sahiptir:

- Bir yargı kriteri kümesi
- Bir karar değişkenleri kümesi
- Bir alternatif karşılaştırma yöntemi

Yöntemler ilk etapta ihtiyaç gösterdikleri tercih bilgilerine, ikinci etapta bilginin cinsine ve son olarak da temel sınıflarına göre ayrılabilir. Bu sınıflama Şekil Ö.1' de verilmiştir.



Şekil Ö.1 ÇAKV Yöntemeleri Sınıflandırması

Çok amaçlı optimizasyon probleminin bir diğer gösterimi de şu şekildedir:

Amaç fonksiyonları:
$max/min\ f_k(\underline{C_k}, \underline{x}) \quad k=1,2,...,K$

Kısıtlar:

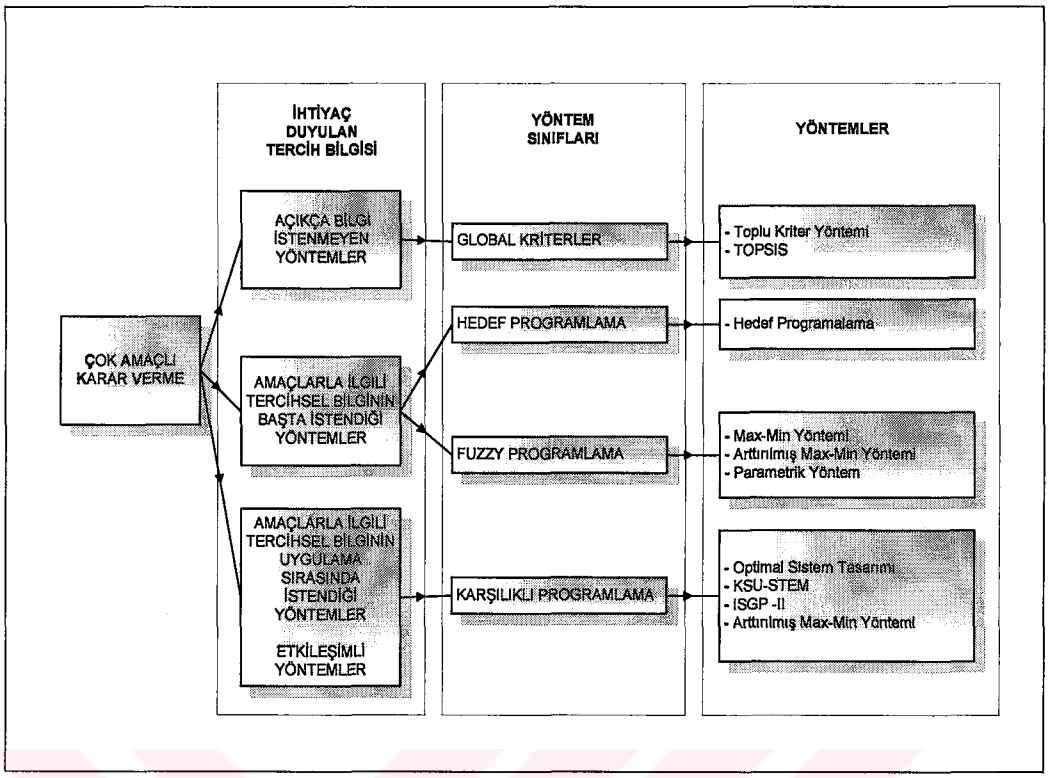
$g_i(\underline{A}, \underline{x}) = \underline{A}.\underline{x} \leq \underline{b}$

$\underline{x} \geq 0$

$\underline{C_k}=(c_{k1}, c_{k2}, ..., c_{kn})$ kâr/maliyet katsayıları vektörü
$\underline{b}=(b_1, b_2, ..., b_n)^T$ eldeki toplam kaynaklar vektörü
$\underline{x}=(x_1, x_2, ..., x_n)^T$ karar değişkenleri vektörü
$\underline{A}=[a_{ij}]_{mxn}$ teknik katsayılar matrisi

Uygulamada, giriş datası ($\underline{C}$, $\underline{b}$, $\underline{A}$) tam olarak elde edilemez veya eksik bilgi olması nedeniyle genellikle bulanık yapıdadır ve ancak linguistik terimlerle ifade edilebilir.

Bulanık mantık teorisi, çok amaçlı karar verme problemlerinin tanımlanması için daha iyi özellikler içermektedir. Bu nedenele çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde, değişik algoritmalar içinde kullanılmıştır. Bu algoritmaları içeren çok amaçlı karar verme problemlerin çözümüne yönelik yöntemleri içeren sınıflandırma Şekil Ö.2' de görülmektedir.



Şekil Ö.2 Bulanık Mantık İçeren ÇAKV Yöntemeleri Sınıflandırması

Çalışmada, çok amaçlı karar verme problemine örnek olması için nonlineer bir model seçilmiştir. Bu örnek modelin çözümü için seçilen iki yöntemden biri, etkileşimli yöntem (SEMOPS) olup karar vericinin problemin çözüm evrelerinin başından, son uzlaşık çözüm elde edilene kadar işin içinde olmasını gerektirir.

Bulanık mantık yaklaşımlarını kullanan ikinci yöntem (TOPSIS) ise karar vericiden problemin çözüm evresinin başında gerekli bilgileri alarak sonuç üretir.

Statik yapıdaki doğrusal olmayan problem, bir nehir yatağının kirlilik kontrolünü ele almakta ve bunun için belirlediği 6 amaç ve 6 kısıtı kullanmaktadır. Bu problemde karar verici olarak geçen Su Kirliliğ Kontrol Komisyonu bu problemin çözümü sırasında alınacak kararlarla nehir belirli noktalarında istenen seviyede su temizliğini sağlamış olacaktır. Karmaşık bir yapıda olan bu problem gerçek hayat problemidir ve benzer problemlerin çözümüne örnek teşkil ettiği için literatürde sıkça kullanılmaktadır.

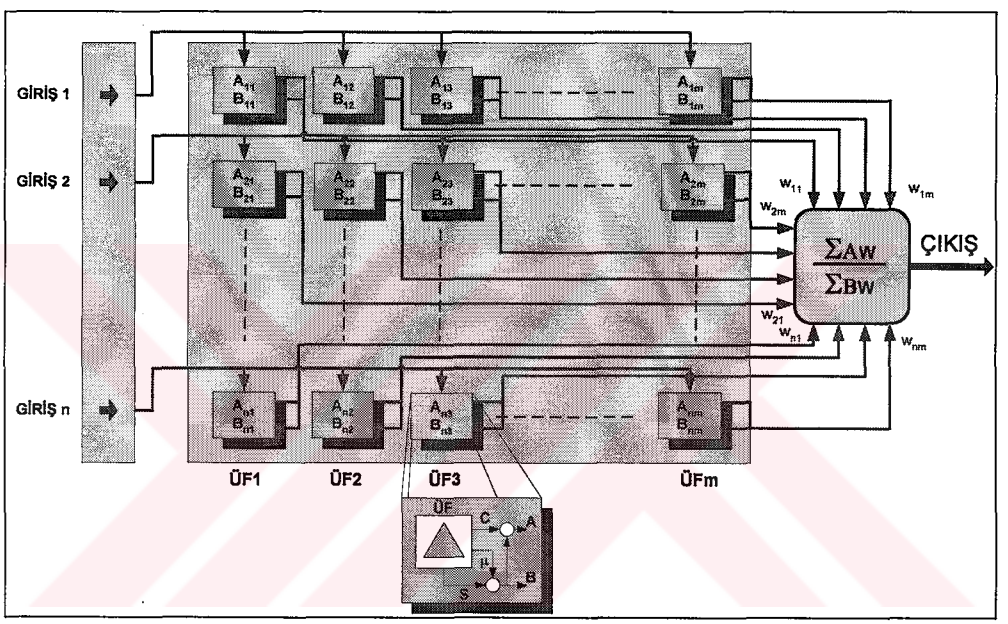
Bu problemin SEMOPS yöntemini kullanarak çözümü için MATLAB tabanlı bir program yazılmıştır. Bu program ile karar verici ve analist arasındaki etkileşim ortadan kaldırılmış ve bu sayede karar vericinin çok daha çabuk sonuca ulaşması sağlanmıştır. Ayrıca karar verici tanımladığı probleme karar aşamasının her evresinde müdahale edebilmekte, değişen tercih durumlarına göre yön verebilme esnekliğine sahip olabilmektedir.

Aynı problem de TOPSIS metodunun kullanılması için MATLAB tabanlı bir program yazılmıştır. Bu program karar vericiden aldığı gerekli ön bilgilerle hemen

bir sonuç üretmekte ve karar verici elde ettiği sonuçlardan tatmin oluncaya kadar bu işlemi ardışık biçimde tekrarlayabilmektedir.

Her iki programın kullanılmasıyla tatminkar sonuçlar elde edilebilmektedir. Problemin tek bir çözümü olmadığından, bu sonuçlar içinden en uygun olanının seçimi tamamen karar vericiye kalmaktadır.

Dinamik yapıda örnek olarak seçilen sistem, asansör grup kontrol sistemidir. Altı giriş ve bir çıkışlı bu sistemin kontrolü için sıralı yapıda bulanık mantık algoritması kullanılmıştır. Bu sayede sistem çok boyutlu uzay yerine tek boyutlu uzayda tanımlanabilmiş ve sistem kontrolü için gerekli kural tabanının oluşturulması kolaylaşmıştır. Sıralı yapı bulanık mantık sisteminin şematik gösterimi Şekil Ö.3' de verilmiştir.



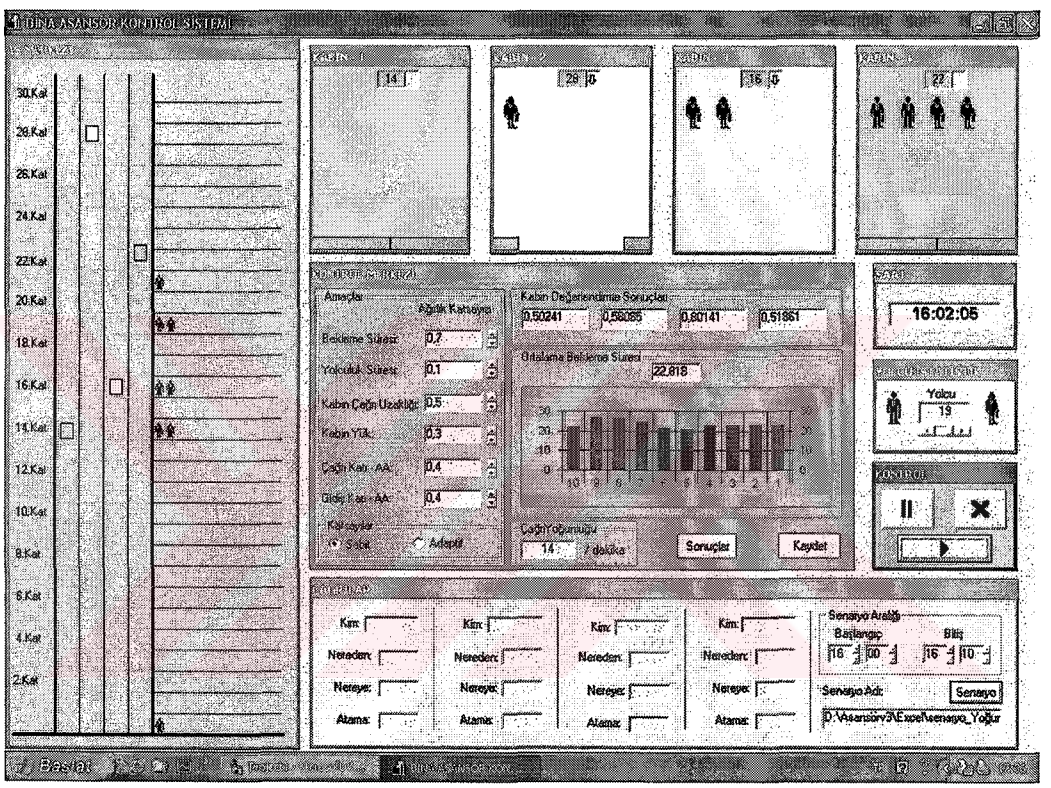
Şekil Ö.3 Sıralı Yapı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi

Simülasyon çalışması için 30 katlı bir iş merkezi ve 15 kişi kapasiteli 4 kabinli asansör grup kontrolü seçilmiştir. Bu sistem için göz önüne alınan amaçlar, çağrı bekleme süresinin, yolculuk süresinin, kabin yükünün, kabin çağrı uzaklığı ve enerjinin minimum yapılmasıdır. Belirlenen bu amaçların arzulanan sistem performansına uygun ağırlık katsayıları seçilir ve bu değerler bulanık mantık sistemine uygulanır. Çok değişik ağırlık katsayılar seti ile simülasyon yapıp, sistem için uygun olanını belirlemek mümkündür. Çağrı yapılan herhangi bir anda, sisteme giriş için gerekli kabinlerin durumları hesaplanmakta ve bu girişler program içinde oluşturulan sıralı yapı bulanık mantık çıkarım sistemine girilmektedir. Sistemin çıkışı olarak dört kabin için ayrı ayrı elde edilen öncelik değerlerinden en yüksek olan atama için seçilmektedir.

Simülasyon çalışması için gerekli bina trafik senaryosu ayrı bir program tarafından oluşturulmuştur. Bu gerçekçi senaryoda istenilen zaman dilimi veya tamamı programa girilerek sistem çalıştırılmaktadır.

Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda sistemin son derece başarılı çalıştığı gözlenmiştir. Örnek olarak belirlenen 12:00-12:15 çalışma aralığı için iki ayrı trafik modeline göre 138 ve 178 kişi çağrıda bulunmakta ve bu süre için her iki durumda da ortalama bekleme süresi 40 saniye civarında olmaktadır. Simülasyon sonucunda elde edilen kabin rota grafikleri ve yük grafiklerinden, yüklerin düzgün dağılmış olduğu ve hiçbir kabinin boşta beklemediği görülmektedir. Ayrıca elde edilen kişi bekleme ve yolculuk süreleri grafikleri ise bütün çağrılara cevap verildiğini göstermeketdir.

Simülasyon çalışması için yazılan programın arayüzü Şekil Ö.4' de görülmektedir.



Şekil Ö.4 BAKS – Bina Asansör Kontrol Sistemi Simülasyon Programı Arayüzü

MULTIOBJECTIVE DECISION MAKING METHODS AND APPLICATIONS

SUMMARY

In engineering, it is often a problem to formulate a design in which there are several criteria or design objectives. If the objectives are opposing, then the problem becomes finding the best possible design which still satisfies the opposing objectives. An optimum design problem must then be solved, with multiple objectives and constraints taken into consideration. This type of problem is known as either a multiobjective, multicriteria, or a vector optimization problem.

As an example, in the design of an automobile an engineer may wish to maximize crash resistance for safety and minimize weight for fuel economy. This is a multiobjective problem with two opposing objectives, that is, a step towards improving one of the objectives, increasing crash resistance, is a step away from improving the other, increasing the weight.

Mathematically, these problems can be represented as:

Objective functions:
$max/min\ f_j(\underline{x}) \quad j=1,2,...k$

Constraints:

$g_i(\underline{x}) \leq 0, \quad i=1,2,..,m$

$\underline{x} \geq 0$

Many methods have been developed to solve this type of problem. But in spite of this diversity, all traditional solution methods have similar characteristics.

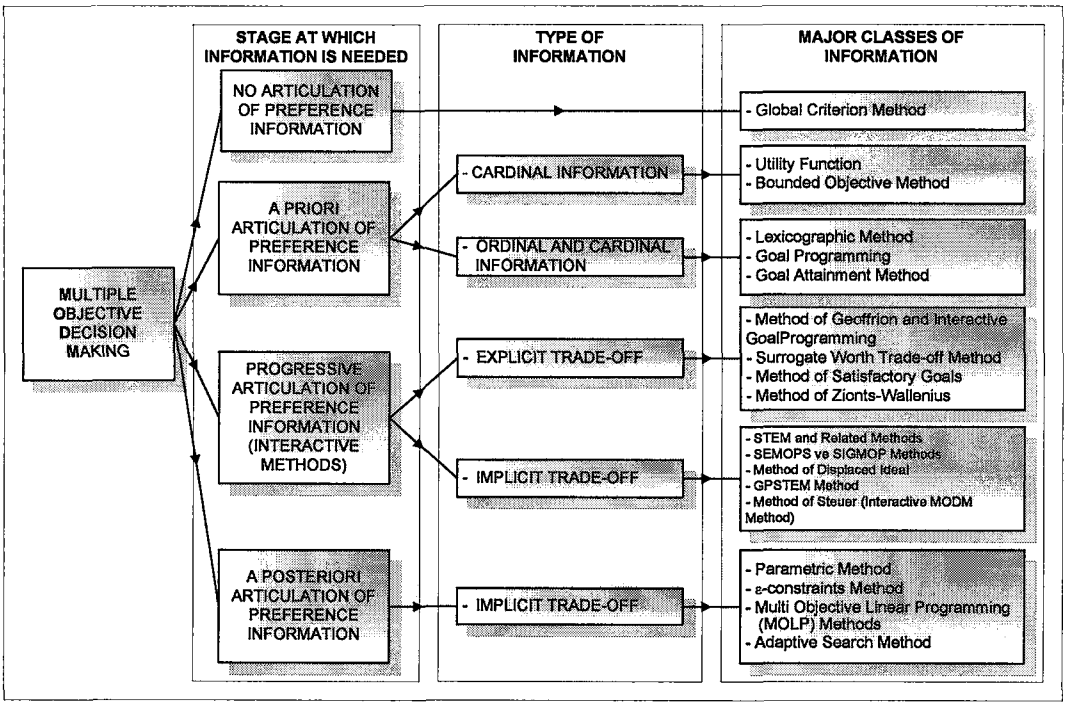


Figure S.1 MODM Methods Classification

Symbollically, a general linear MODM problem witk K objectives may be stated as:

$max/min\ f_k(\underline{C_k},\underline{x}) \qquad k=1,2,...,K$

subject to:

$g_i(\underline{A},\underline{x})=\underline{A}.\underline{x} \leq \underline{b}$

$\underline{x} \geq 0$

$\underline{C_k}=(c_{k1},c_{k2},...,\ c_{kn})$ vector of profit/cost coefficients
$\underline{b}=(b_1,b_2,...,b_n)^T$ vector of total resources available
$\underline{x}=(x_1,x_2,...,x_n)^T$ vector of decision variable
$\underline{A}=[a_{ij}]_{mxn}$ matrix of technical coefficients

In practice, input data (of $\underline{C}$, $\underline{b}$, $\underline{A}$) are usually fuzzy or imprecise because of incomplete and non-obtainable information.

Fuzzy logic theory has powerful features to describe multiobjective optimization problems. Thus, it can be used in different algorithms solving multiobjective optimization problems. The classification of these methods can be seen in Figure S.2.

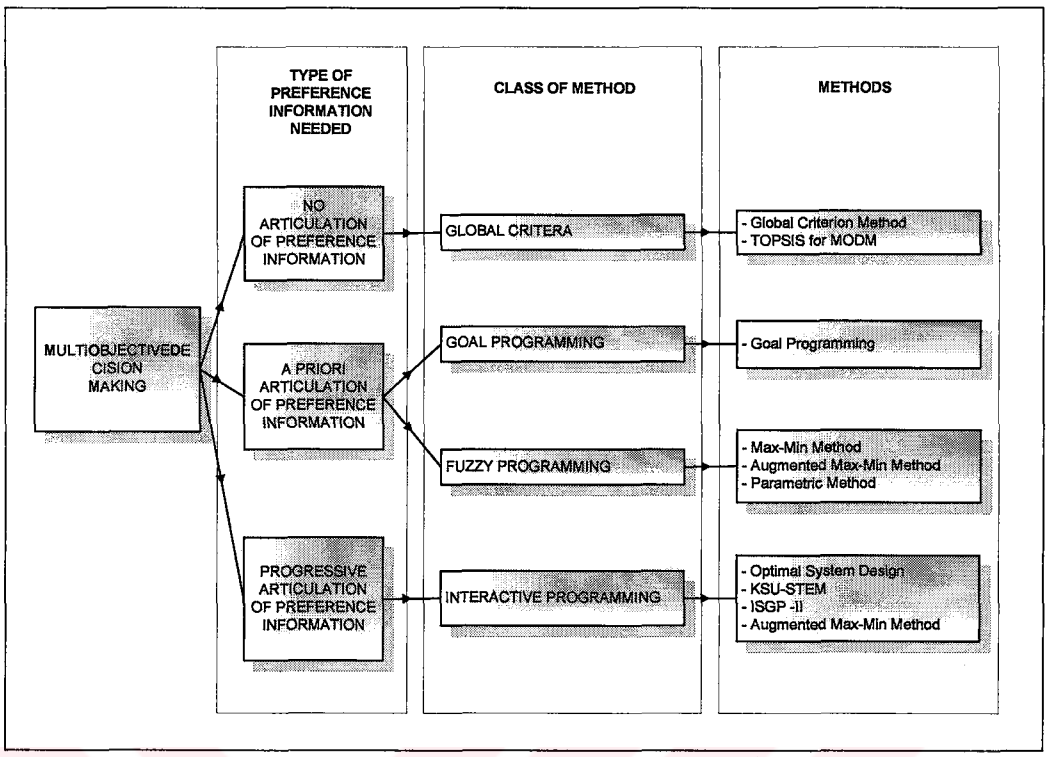


Figure S.2 MODM Methods Classification with Fuzzy Logic

In this study, multiobjective decision making problem has been examined considering two system with three methods. Applications of these two methods have been carried out on a realistic model called Bow River Water Quality Management Problem.

One of the methods is an interactive method known as SEMOPS. First, the algorithm of this method has been formed and then a MATLAB based computer program has been developed. To make the computer program interactive, a user interface has also been added. In this way, the decision maker is able to carry out the solution steps, observe the results, and at the end, reach the compromise solution he/she desires. The developed computer program is universal and it can be used for lineer or nonlineer systems.

The second method is known as TOPSIS method based on fuzzy logic concept. For this method, a MATLAB based computer program and a user interface have also been developed in order to make it flexible. At the beginning of the solution procedure, the decision maker has to give his/her desires for objectives as weighted coefficients. The program is run until he/she reach the compromise solution. The advantage of this method is flexibility. It is possible to observe and evaluate the results for many different situations.

In the example system which is nonlinear, the decision maker (the committe) wants to make the river clean on a certain level considering six objectives and one constraint. Decision variables are treatment levels in three points.

The second example system for multibjective optimization problem with dynamic structure is elevator group control system. Ordinal structure fuzzy logic algorithm has been proposed for the control of this system which has six inputs and one output. Thus, all fuzzy inference rules can be described in one dimensional space. The structure of ordinal fuzzy logic model is shown in Figure S.3.

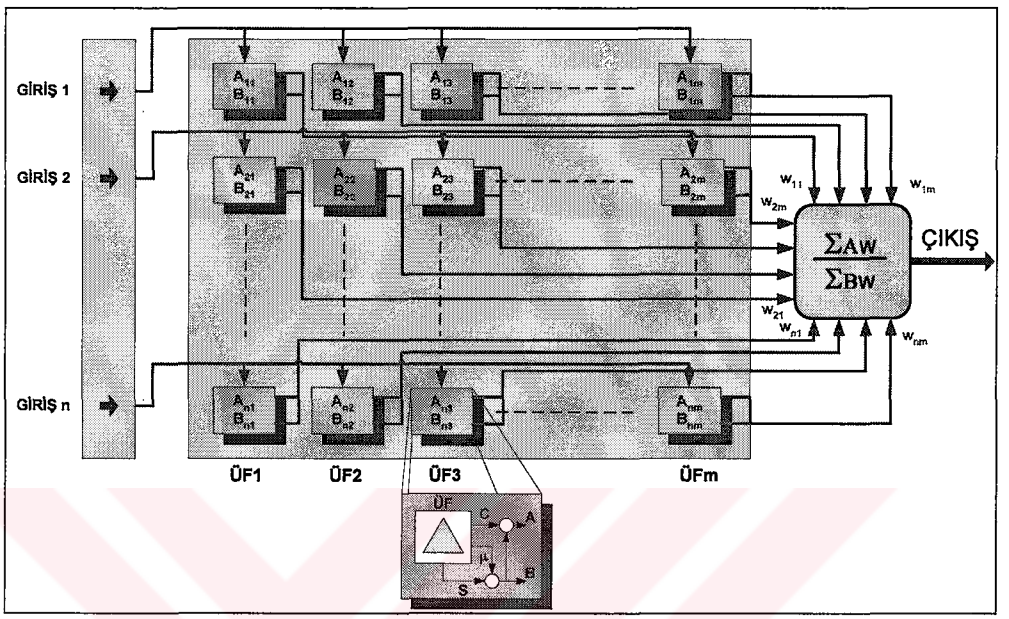


Figure S.3 Ordinal Structure Fuzzy Inference System

30 floor high rise business center with 4 elevator which has capacity of 15 person each, has been chosen for simulation. The objectives of this system are to optimize call waiting time, travelling time, the number of passengers, travelling distance and consumed energy. Weighing coefficients for these objectives according to the desired performance has been determined and applied to the fuzzy system. It is possible to simulate for different weight sets and determine the suitable one. When the hall call happens, the state of the cars is evaluated and sets to the ordinal structure fuzzy inference system as inputs. Priority values for four elevetors are calculated and the biggest one is selected as the output of the system. The elevator car which has this priority value is assigned to the hall call.

The traffic senario necessary for the simulation, has been generated in a different computer program. The whole time interval of the traffic senario or any period of this senario can be set for the simulation.

At the end of this simulation study, it is concluded that the system performs very well. In the sample period which is 12:00-12:15 PM, two different traffic senario have been simulated. 138 and 178 passengers have been served during this period in these two traffic senarios. Approximately 40 seconds waiting time has been obtained. From the path and load graphics of the elevators, it can be seen that the load has been distributed homogeneously and none of the elevators has been waited for an

assignment for a long time. In addition, from the waiting and travelling time graphics, it is seen that all the hall calls have been served.

The user interface of the simulation program is in Figure S.4.

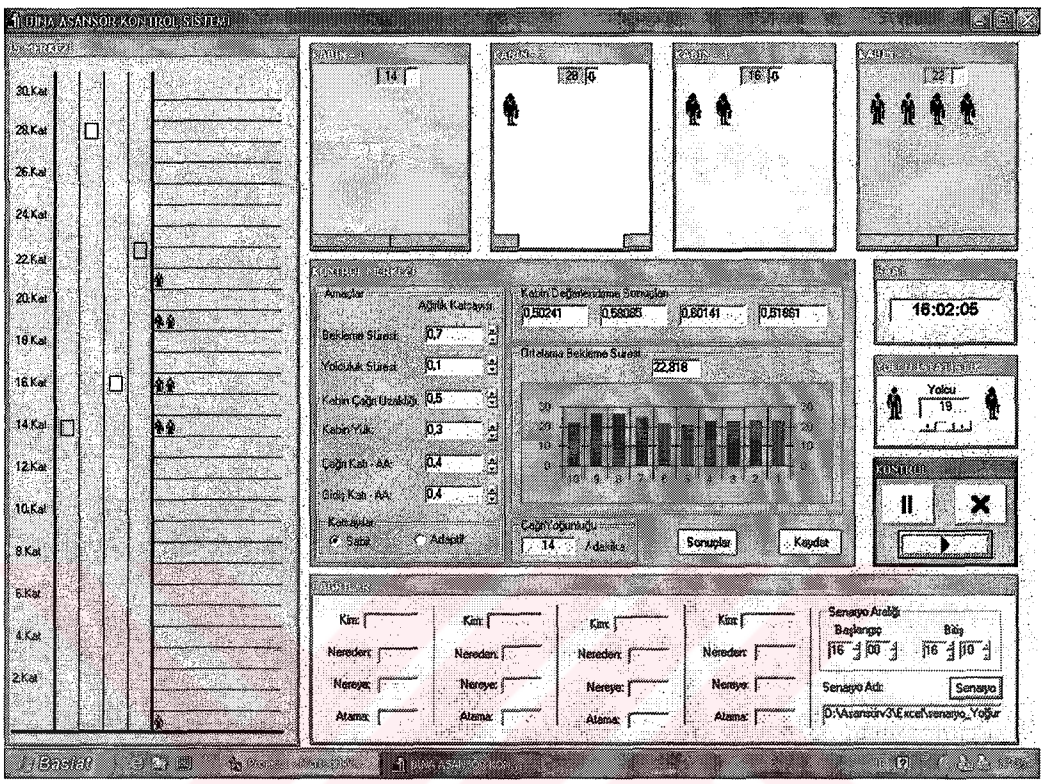


Figure S.4 BAKS – Elevator Group Control System Simulation Program Interface

I. GİRİŞ

1.1 Karar Verme Teorisi

Karar verme bir süreçtir. Bu süreç içinde mevcut tüm alternatifler, faaliyetler, seçenekler, olasılıklar, stratejiler içinden, amaç veya amaçlara en uygun ve mümkün bir veya birkaçı seçilir. Karar vermede temel unsur, insan olduğu için, problem yalnızca deterministik olmaktan çok daha ötedir. Bir karar, Karar Vericinin (KV), genetik, psikolojik, fizyolojik, sosyolojik, ekonomik, kültürel v.s. özellikleri ile yakından ilgilidir. Ayrıca geçmişin analizi ve geleceğin projeksiyonu ile karar vermek söz konusu olduğundan zamana bağımlılık söz konusudur.

Bir problemin karar problemi olabilmesi için, aşağıdaki şartların birlikte gerçekleşmesi gerekir;

- Birden çok davranış yollarının olması
- Her bir davranışın sonuçlarının birbirinden farklı olması
- Gerçekleştirilmek istenen bir takım amaçların bulunması

Karar verme problemine bir süreç içinde çözüm bulunması gerektiğinden söz konusu probleme sistem yaklaşımı yapılması mümkündür. Bu bölümde karar vermeye sistem yaklaşımı uygulanmıştır [1].

1.2 Sistem Yaklaşımı İle Karar Verme Süreci

Geleneksel sistem yaklaşımı karar verme sürecine kolaylıkla uygulanabilir. Öncelikle problem gözlenerek belirlenir. Daha sonra amaçlar tanımlanır. Tasarım surecinin son aşaması olarak veriler toplanır ve değerlendirilir. Bu bilgilerle uygun seçenekler araştırılır ve etüd edilir.

Bu inceleme bize, problemin modellemesini yapıp bu modele en uygun çözüm yönteminin bulunması imkanını sağlar. Bu yöntem, ilgili karar problemine uygulanır ve elde edilen sonuçlar kontrol edilip, KV' ye sunulur [1].

Bu bilgilerin ışığı altında sistem yaklaşımı ile karar verme sürecinin aşağıdaki unsurlardan oluştuğu söylenebilir:

- Problemin Tanımlanma Süreci
- Uygun Seçeneklerin Araştırılması ve Değerlendirilmesi
- Modelleme ve Çözüm Tekniğinin Bulunması
- Seçim işleminin Yapılması
- Uygulama
- Değerlendirme (Geri Bildirim)

1.2.1 Problemin Tanımlanma Süreci

Tanımlama süreci, araştırma süreci için bir girdi olup; problemin gözlenmesi, belirlenmesi, amaçların tanımlanması ve verilerin toplanıp işlenmesi gibi unsurları içerir.

Problemin Gözlenmesi: İşletmelerde problemler iki guruba ayrılabilir. Rutin işlerle ilgili olanlar, rutin dışı olanlar. Ne tür problem olursa olsun, öncelikle problemin niceliği ve niteliği üzerinde önemle durulmalı, daha önce bu tür problemin çıkıp çıkmadığı tespit edilmelidir.

Kısacası bir karar probleminin varlığı tüm özellikleri ile belirlenmelidir.

Problemin Belirlenmesi: Problemin gözlenmesi bölümünde de bahsedildiği gibi nicelik, nitelik, benzerlik, rutinlik konusunda çalışmalar yapılmalı, problem analiz edilmelidir. Mümkünse temel problem alt problemlere ayrıştırılabilmeli veya kademelendirilmelidir.

Gözlem aşamasında ortaya çıkan problemin varlığı, bu aşamada onun tüm ayrıntıları ile kesin, açık ve doğru olarak belirlemesine temel oluşturur. Bunun ötesinde problemi belirlemenin, çözümden daha önemli olduğu bir gerçektir. Problemin

belirlenmesi için öncelikle boyutlarının saptanması gerekmektedir. Problemin boyutları, üç etkenin incelenmesi sonucu elde edilir.

- **Zaman faktörü**; KV' ye problemin belirlenmesi ve çözümü için gerekli olan zamanın ne olduğunu gösterir.
- **Kazanç faktörü**; işletmenin amacına ulaşmasında problemin ne ölçüde etkin olabileceğini, kısaca problemin önemini açıklar.
- **İşletme örgütünün olanaklarına ilişkin faktörler**; problemin çözümü için gerekli verilerin toplanması işleminin, örgüt içinden mı yoksa dışından mı sağlanacağının araştırılmasıdır.

Problemin boyutları belirlendikten sonra, KV problemin niteliğini açıklamak olanağına kavuşur. Problemin belirlenmesinde izlenmesi gereken aşamaları söyle sıralayabiliriz:

- Ele alınan problemin tipi
- Kritik faktörün ne olduğu
- Ne zaman çözümlenmesi gerektiği
- Çözüm işleminin nedeni
- Çözüm maliyetinin ne olacağı

Bu aşamalar içinde ağırlık "kritik faktörün" ün saptanmasına verilmelidir.

Kısaca kritik faktör; durum, sistem ya da koşullarda var olan ve problemin asıl niteliğini açıklayan temel öğedir.

Amaçların Saptanması: KV bu aşamada amaçlarını ve bu amaçlara hangi ölçüde ulaşmak istediğini, yani hedeflerini belirlemek durumundadır.

Zira verilecek kararın geçerliliği, ya da uygunluğu KV' nin saptadığı amaçlara göre değişir.

Bazen aynı durumla karşı karşıya kalan iki kişi farklı karar verebilirler. Bu durum onların farklı amaçları başarmak istediklerini gösterir. KV amaçlarla ilgili bilgi edinerek, belirsizlikleri gidermeye çalışabilir. Ancak bir problemin çözümünde

amaçların tanımlanması her ne kadar çok arzu edilen bir şeyse de, bazan KV' ler amaçların belirlenmesinde çok açık olmayı istemezler. Böyle durumlarda daha çok seçim yöntemi kullanılır.

KV' ler seçenekleri inceleyip istenen özelliklerin bunlarda olup olmadığına bakarlar. Daha sonra eldeki seçeneklerin kendilerine göre en iyisini seçerler. Bazan da KV işlemin sonucu hakkında hiçbir bilgiye sahip değildir veya bilgi eksikliği vardır. Bu durumda amaçlann saptanmasında güçlükler çıkabilir.

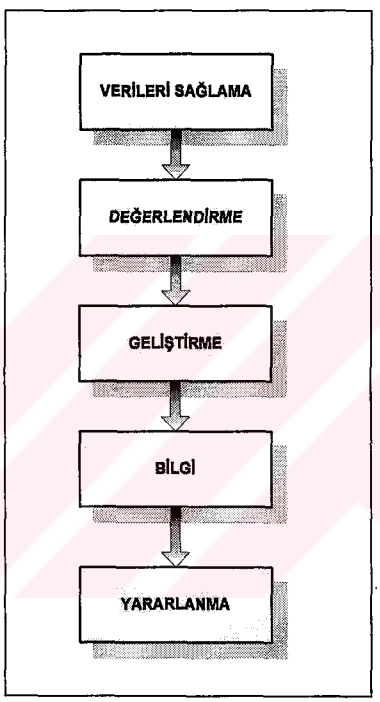
İşletmelerde saptanan genel amaçlar üst düzey (finansal güvence, saygınlık ve rahatlık gibi) amaçlar ve alt düzey amaçlar (maliyet, enerji, kapasite) olarak sınıflandırılabilir. Soyut olan üst düzey amaçların gerçekleştirilebilmesi için çoğu kez daha kolay olan alt düzey amaçlardan yola çıkılarak sorunun çözümü saptanır. Alt düzey amaçlar niteliklerinin somut ve ölçülebilir olması açısından yeğlenir.

Verilerin Toplanması ve İşlenmesi: Problemin gözlenmesi, belirlenmesi ve amaçların saptanmasını izleyen aşama, bilgi edinme aşamasıdır. Karar probleminin çözümünde yararlanılan bilgi edinme işlemi, işletmeler açısından bir maliyet gerektirir ve genel olarak bilgi edinme maliyeti yüksektir. Şekil 1.1. Bu nedenle yönetici, bu aşamada gerekli olan sağlıklı bilgiyi en küçük maliyetle elde etmeye özen göstermelidir. Veriler toplandıktan sonra işlenerek, bilgi durumuna gelmektedir. Buna göre bilgi edinme bir süreçtir. Verilerin, süreç içinde işlenip yorumlanarak kullanılabilirlik özelliğine kavuşturulması gerekmektedir. KV' nin verilerin toplanması ve işlenmesinde dikkat etmesi gereken hususlar şunlardır:

- Toplanması gerekli verilerin ne olduğu
- Verilerin, karar probleminin çözümünde yeterli olacak ölçüde sınırlandırılması yani aşırı ya da eksik olmaması
- Bilgi edinme zamanlamasının yapılması
- Bilgi edinme sürecinin saptanması
- Bilgi edinme maliyetinin üst sınırının belirlenmesi

Verilerin işlenmesi, sınırlandırılması, dolayısı ile sistematize edilerek kaydedilip saklanmasında, bilgisayarlardan yararlanılması, böylelikle işletmede bir bilgi bankası kurulması; karar sorunları ile ilgili verileri;

- Zamanında
- En düşük maliyetle
- Kolaylıkla
- Sağlıklı ve tutarlı bir biçimde elde etme olanağı sağlayacaktır.



Şekil 1.1 Bilgi Edinme Süreci

1.2.2 Uygun Seçeneklerin Araştırılması ve Değerlendirilmesi

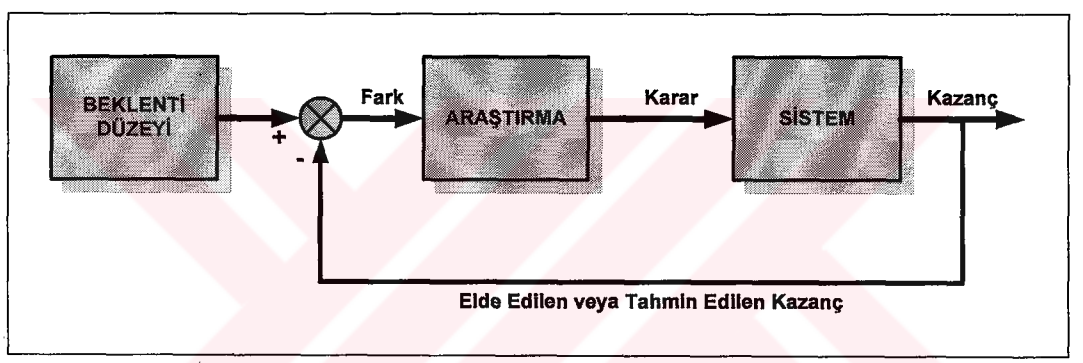
Problemle ilgili veriler toplandıktan ve gerekli bilgi oluşturulduktan sonra, karar safhasında, KV' nin karşısına birbirinden farklı seçenekler çıkacaktır.

Bu seçeneklerin tümünü değerlendirmek, yine bir maliyet ve zaman unsuru ortaya çıkarır.

Gereksiz seçeneklerin elenmesi, başka bir deyişle en uygun seçeneklerin araştırılması ve belirlenmesi için karar verme sürecinde çok deneyimli ve uzman kişilerden faydalanmak gerekir.

KV durumla ilgili unsurları göz önünde bulundurarak, gerekirse yeniden düzenlemeli ve yeni şıklar saptamalıdır. Her yeni şıkkın sonuçlarının önceden saptanan amaçlara uygunluğu kontrol edilmeli, bu sonuçların diğer amaçlara, KV' nin kişisel amaçlan, organizasyondaki diğer amaçlar v.s. etkisi de gözönünde bulundurulmalıdır.

Uygun seçenekler arasında verilecek kararın, mevcut amaçlar üzerindeki etkisi ile bu kararın gelecekteki etkisinin amaçlar arasında doğuracağı ilişkiyi de tanımlamak gerekir. Bu araştırmada en uzak olasılıklar dahi göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 1.2 Araştırma Süreci

Seçeneklerin araştırılması aynı zamanda yeni teknolojiyi, araştırma geliştirmeyi veya incelenen problemin mevcut niteliklerini değiştirmeyi gerektirebilir. Çünkü, hangi alanda olursa olsun olası durumlar için sürekli yeni seçenekler, çözüm yolları ortaya konulmaktadır. Bu nedenle seçeneklerin sadece mevcut teknolojiyle mümkün olduğu düşünülmemelidir. Şekil 1.2.

Gerekli araştırma yapılıp, seçenekler belirlendikten sonra bunların beklenen sonuçlan karşılaştırılmalıdır. Bu noktada verilerin toplanması safhasında elde edilen bilgilerden büyük ölçüde yararlanılacaktır.

Pek çok sayıdaki seçeneğin gerçekleşmesi mümkün sonuçlarla ve herbir mümkün sonuçtaki bilgi miktarıyla ilişkili olması gerekmektedir. Seçeneklerin mümkün sonuçları değerlendirilirken, çeşitli yöntemler uygulanır. Bunlardan en yaygın kullanılanı, ikili karşılaştırmalardır. Buna göre değerlendirme ölçütü olarak bir ölçüt

seçilir. Bu ölçüte göre seçenekler sıralanır ve birbirleri ile ikili olarak mukayese edilir. Bu süreçte amaç "En İyi Seçeneği" seçmektir. Yani eldeki seçeneklerden yalnızca biri ele alınan amaçla tutarlı ve belirlenen ölçüte en yakın olacaktır.

1.2.3 Model Kurma ve Uygun Çözüm Tekniğinin Bulunması

Genel tanımıyla model, incelenmekte ve kontrol altına alınması için çalışılmakta olan sistemin bir temsilidir. Bu temsil üzerinde çalışarak meydana gelecek değişmelerin sistemin etkinliğine olan tesirlerinin tahminine çalışılır. Karar verme probleminde problemin tanımlanıp, gerekli veriler toplandıktan sonra, karar safhasından önce problemin tümüyle anlaşılabilir bir yapıyla ortaya konulması, başka bir deyişle, problemin yapısının veya özünün soyutlanması gerekir. Bu da problemin modelinin kurulması ile gerçekleşir.

Modellemeden sonra, problemi çözmeye yönelik, en uygun deterministik veya probabilistik çözüm yöntemini seçmek gerekir. Problemin türüne, analiste ve KV' nin sahip olduğu bilgi düzeyine göre yöntemler farklılıklar gösterirler. Yöntem seçimi probleme uygun çözümü bulmak açısından önemlidir.

1.2.4 Optimum Çözüm Veren Seçeneğin Seçilmesi

Seçenekleri değerlendirirken onların mümkün olan sonuçlarının herbirinin tek tek ve kendi aralarında değerlendirilmesi gerekir. Bundan sonraki safha bu seçeneklerden birinin seçimidir. Fakat bu seçimi yaparken amaç "En iyi" nin seçimi olduğundan KV bunu ancak ardışık bir prosedürle uygulayabilir. Çoğu zaman KV en iyiden çok, en çok tatmin edici çözümü seçme yoluna gider. Çünkü bu tür çözüme daha kestirme yollarla gidilebilir. O zaman ölçüt daha farklı olacaktır. Örneğin amaca yakınlık derecesi gibi.

1.2.5 Verilen Kararın Uygulanması

Olası seçenekler için "En İyisi" ya da "En Çok Tatmin Eden" seçildikten sonra, sıra alınan kararın uygulanmasına gelir. İstenen hedeflere ulaşan bir karar genellikle KV' nin kişisel çıkarlarıyla çatışmaksızın gerçekleştirilmelidir. Sağlıklı bir karar verildikten sonra, verilen kararın yürürlüğe konulması gerekir. Bu aşamada yönetici, verilen karar doğrultusunda organizasyonun nasıl hareket edeceğini belirler. Bu

durumda kararlar ve planları gerçekleştirecek her kişi için ayrı ayrı organizasyon çalışması yapılmalı ve görevler tanımlanmalıdır. Burada yöneticiye düşen görev; kararı ilgili kişilere ulaştırmak, anlaşılmasını sağlamak, uygulama aşamasında onaylamak ve teşvik etmek, kişiler arasında gerekli koordinasyonu kurmak, hatta mevcut yapı yetersizse gerektiğinde organizasyonda birtakım değişiklikler ya da ilavelere giderek, uygulama için gerekli ortamı hazırlamaktır.

1.2.6 Geri Bildirim

Karar verme süreci, yukarıda öngörülen adımların tümünü kapsayan ve sistemi arzu edilen amaçlara ulaştırmak için yararlı ve gerekli bir araçtır. KV karar sistemi içinde, başından sonuna değin, kararın alınması ile uygulanmasına kadar yer alan bütün safhalarda etkindir.

Uygulama süreci, organizasyonun karmaşık yapısından etkilenebilir. Alınan kararların uygulanması ile işletmenin durumundaki değişiklik arasında belirli bir süre geçmektedir. İşletmenin içinde bulunduğu ortam, pratikte uygulama sürecini aksatmaktadır.

Bu nedenlerle KV' nin aldığı kararlarla ulaşmak istediği sonuçların gerçekleşmesi engellenebilir. Böyle bir durumun önüne geçmek için KV bu gibi unsurlardan ve onların etkilerinden zamanında haberdar olmalıdır. Bu da karar sürecinde, sağlıklı bir geri bildirimi gerektirir.

1.2.7 Karar Verme Sürecindeki Temel Unsurlar

İster tek amaçlı, ister çok amaçlı karar problemi olsun, bu unsurlar temelde değişmezler ve aşağıdaki gibi sıralanabilirler [2].

- Karar verici (veya vericiler)
- Karar ortamı
- Amaç veya amaçlar (kriterler, hedefler)
- Alternatifler, seçenekler, stratejiler
- Kaynaklar
- Yöntemler (bilimsel anlamda karar verme durumunda)

- Zaman

Görüldüğü gibi en genel halde KV çevrenin, sürecin ve kaynakların oluşturduğu kısıtları tatmin eden bir çözüme ulaşmada birden fazla kriteri gözönünde bulundurma (birden fazla amacı gerçekleştirme) durumundadır. Klasik matematik optimizasyon teknikleri {Lineer Programlama, (LP) , Non-Lineer Programlama (NLP) v.b.} ile karar verme problemi, tek kritere dayanan maksimize veya minimize edilecek bir amaç fonksiyonu ve genellikle birden fazla kısıt denklemi ile temsil edilmektedir. Kısıtları tatmin eden ve amaç fonksiyonunu arzu edilen doğrultuda eniyileyen çözüm "Optimum Çözüm" (**OÇ**) (eniyi çözüm) dür.

Örneğin tek amaçlı maksimizasyona dayanan bir karar verme probleminin klasik lineer programlama problemi olarak formülasyonu şu şekilde yapılır:

Amaç fonksiyonu:

$$\max f(\underline{x}) = C_1.x_1 + C_2.x_2 + ... + C_n.x_n$$

Kısıtlar:

$$\begin{aligned} & g_{11}.x_1 + g_{12}.x_2 + ... + g_{1n}.x_n \le 0 \\ & g_{p1}.x_1 + g_{p2}.x_2 + ... + g_{pn}.x_n \le 0 \\ & \underline{x} \ge 0 \end{aligned} \qquad (1.1)$$

Bu formülasyon; $\underline{x}$ n- boyutlu karar değişkenleri vektörü olmak üzere aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Amaç fonksiyonu:

$$\max f(\underline{x})$$

Kısıtlar:

$$\begin{aligned} & g_k(\underline{x}) \le 0 \qquad k = 1,2,...p \\ & \underline{x} \ge 0 \end{aligned} \qquad (1.2)$$

Amaç denkleminin tek olması nedeniyle formülasyonu böyle olan problemlerin bir tek en iyi çözümü vardır. Buna yukarıda da değinildiği gibi "Optimum Çözüm"

denilmektedir. Bir tek amaç yerine birbiriyle çelişen iki amacın olduğu, daha gerçekçi bir karar verme problemi göz önüne alınırsa;

Yine $\underline{x}$, n- boyutlu karar değişkenleri vektörü olmak üzere;

Amaç fonksiyonları:

$$\max f_1(\underline{x})$$
$$\max f_2(\underline{x})$$

Kısıtlar:

$$g_k(\underline{x}) \leq 0 \qquad k = 1,2,...p$$
$$\underline{x} \geq 0 \tag{1.3}$$

veya daha kısa olarak,

Amaç fonksiyonları:

$$\max\{f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x})\}$$

Kısıtlar:

$$g_k(\underline{x}) \leq 0 \qquad k = 1,2,...p$$
$$x \geq 0 \tag{1.4}$$

şeklinde formüle edilebilir. Klasik tek amaç fonksiyonlu matematik programlama problemlerinin uygulamaya daha dönük olarak ele alınma çabaları iki ölçütlü karar verme (Bicriteria Decision Making) problemlerinin çözüm yöntemlerini ortaya çıkarmıştır.

Dahası, amaç fonksiyonu sayısının arttırılması, dolayısıyla pratikteki problemleri daha gerçekçi şekilde ele alma gayretleri "Çok Amaçlı Karar Verme" (**ÇAKV**) (Multi-Objectıve Decision Making) kuramını ortaya çıkarmıştır. ÇAKV problemi matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

Amaç fonksiyonları:

$$\max\{f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}), ..., f_m(\underline{x})\}$$

Kısıtlar:

$$g_k(\underline{x}) \leq 0 \qquad k = 1,2,...p$$
$$\underline{x} \geq 0 \tag{1.5}$$

Burada $\underline{x}$, n- boyutlu karar değişkenleri vektörüdür. Bu problem kaynaklarda Vektör Maksimizasyonu Problemi (**VMP**) olarak bilinmektedir. Görüldüğü gibi bir amaç fonksiyonu yerine m tane amaç fonksiyonu ihtiva eden bir vektörün maksimize edilmesi sözkonusudur. Problemin optimum çözümü, tüm amaç fonksiyonlarını birlikte (simültane olarak) enbüyük yapan çözümdür. Böyle bir çözüme ulaşmak çok zordur. Çünkü genellikle gözönüne alınan amaçlar, diğer bir deyimle değerlendirme ölçütleri birbiri ile çelişkili ve karşıt yönde etkileşimlidir. Örneğin bir fabrikanın kalite kontrol kısmının temel karar verme probleminin özünü, kaliteyi arttırırken, kalite kontrol masraflarını azaltmak gibi amaçlar oluşturur.

Aslında bu iki amaç birbirini ters yönde etkilemektedir. Bu halde optimum çözümden sözetmek zorlaşmaktadır. Her bir amaç için optimum olan çözümlerin belirli bir şekilde KV nin tercihlerini de dikkate alarak uzlaştırılması en çıkar yol olarak gözükmektedir. Sonuçta ulaşılan çözüme de tek-amaçlı karar problemlerindeki optimum çözüm yerine, "Eniyi Uzlaşık Çözüm" (**EUÇ**) (The Best Compromise Solution) denebilir.

KV' nin tercihleri problemin çözümü sırasında değişik şekillerde gözönüne alınabilir.

Bu tercihleri, yukarıda anahatlarıyla tanıtılan ÇAKV probleminin çözümü sırasında farklı şekillerde ele alan birçok yöntem geliştirilmiştir [4].

Karar verme problemleri genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

Tablo 1.1 Karar Verme Problemlerinin Genel Sınıflandırması

	Belirlilik Altında Karar Verme	Belirsizlik Altında Karar Verme	Risk Altında Karar Verme
Tek Amaçlı Karar Verme	I.	II.	III.
Çok Amaçlı Karar Verme	IV.	V.	VI.

1.3 Temel Yaklaşım ve Çözümler

Bu çalışmada, çok amaçlı karar verme problemlerine örnek oluşturması amacıyla iki problem ele alınmıştır. Çalışma statik yapıda çok amaçlı karar verme problemleri ve dinamik yapıdaki çok amaçlı karar verme problemleri şeklinde ayrılarak problem tanımlamaları bu yapılara uygun örnek problemler seçilmiştir. Statik yapıdaki çok amaçlı karar verme problemi olarak Bow vadisi su kirliği kontrolü problemi ele alınmıştır. Bu problem, şartlar ve amaçlar çok çabuk değişmediğinden ve sonuçların gözlemlenmesi bir süreç aldığından statik yapıda kabul edilmektedir. Bu tip problemlere çok değişik yaklaşımlar mevcuttur. Problemin yapısına uygunluğundan dolayı SEMOPS ve TOPSIS yöntemleri seçilmiştir. Yöntemlerin algoritmalarının programlanmasıyla kullanılması ve uygulanması kolay, sonuç elde etme süresi çok kısa ve çok değişik amaç durumlarının değerlendirilmesinin seri bir şekilde yapılmasına uygun hale getirecek bir arayüz oluşturulmuştur. Bu yapı, karar vericinin problem üzerindeki hakimiyetini arttırmakta, değişik durumlar altında sonuçları çok çabuk görüp daha sağlıklı karar vermesini sağlamaktadır.

Dinamik yapıdaki çok amaçlı karar verme problemine örnek olarak 30 katlı bir iş merkezinin asansör grup kontrolü seçilmiştir. Şartların anlık değişimi ve karar verme sürecinin çok kısa olması nedeniyle dinamik yapı olarak göz önüne alınmaktadır. Asansör grup kontrolüne sistemin yapısı gereği bulanık mantık algoritması uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sistemin basitleştirilmesi ve daha hızlı sonuç alınabilmesi amacıyla sıralı yapı bulanık mantık algoritması uygulanmıştır. Bu yapının belirlenen sistem üzerine uygulanabilmesi için bilgisayar ortamında program yazılmış, hareket ve sonuçlar görsel olarak sergilenmiştir. Ayrıca simülasyondan elde edilen sonuçlar, daha sonra sağlıklı değerlendirebilmek için Excel ortamında grafiksel çıktılarla saklanabilmektedir. Değişik simülasyon şartlarında çalışmalar gerçekleştirilerek sistem performansı değerlendirilmiştir. Öncelikli olarak göz önüne alınan amaç, bekleme süresidir. Bu sürenin 25 – 30 saniye civarlarında elde edilmesi gerekmektedir. Daha sonra dikkate alınan amaçlar ise enerji tüketimi, yolculuk konforu ve yolculuk süresidir.

Sistemin yüklenebilmesi için ayrıca trafik senaryosu oluşturulmuştur. Bunun için de binada sürekli bulunan personel sayısı ve binaya günlük gelen misafir sayısı kabulü

ve günlük hareketler dikkate alınarak bir trafik yazılımı oluşturulmuş ve bu kişilerin oluşturduğu hareket gün içine yayılmıştır. Bu sayede sistem için gerekli trafik yükü istenilen çalışma dilimi için elde edilmiştir.

2. ÇOK AMAÇLI KARAR VERME YÖNTEMLERİ

2.1 Giriş

1951 yılında Kuhn-Tucker'ın [4] çalışmalarından 10 yıl sonra Charnes ve Cooper [5] ÇAKV problemlerine farklı biçimde yaklaşarak "Hedef Programlama" (**HP**) yöntemini geliştirdiler. Bu yöntem; KV nin amaçları için belirlediği hedeflerden sapmaların, öncelik sıralarına göre minimizasyonuna dayanır. Zadeh [6], amaç fonksiyon uzayının konveks olması halinde, parametrik skaler bir optimizasyon probleminin çözülerek baskın çözümler kümesinin bulunabileceğini ifade etti, Haimes [4] geliştirdiği "Kısıtlar Yöntemi" ile amaçlardan birine öncelik verip, diğerlerini ise kısıtlar haline dönüştürmek suretiyle VMP' ne çözüm getirebileceğini gösterdi. VMP nin, parametrik skaler bir optimizasyon problemine denkliği; Da Cunha Polak [7] ve Geoffrion [8] tarafından araştırıldı.

Amaçlara ağırlık verilerek etkin çözüm kümelerinin bulunabileceği Reid ve Vemuri [4] tarafından ortaya konuldu. Beeson ve Meisel [9] lineer olmayan problemlere uygun bir araştırma süreci ile etkin çözümler bulabilecek bir yöntem geliştirdiler. Gembicki ve Haimes [10] "Hedefe Erişme" yöntemi adıyla, hedef programlamaya çok benzer bir yöntem önerdiler. Zeleny [3], Steuer [19], Isermann [11] Çok Amaçlı Lineer Programlama (**ÇALP**) problemlerini çözmek üzere simpleks yöntemine dayanan algoritmalar geliştirdiler

Bunlara ilaveten, KV' nin tercihlerinden yararlanarak VMP'ne çözüm getirmeye çalışan çeşitli etkileşimli yöntemler geliştirildi. Bunlardan Roy [12] geliştirdiği Electre yönteminde; her amaç için bir verimlilik ölçüsü, bir de önem ölçüsü tespit edip, daha sonra seçenekleri göz önüne alınan ölçütlere göre değerlendirip uygun olanın KV tarafından seçilebileceğini gösterdi. Haimes ve Hail [13] tarafından geliştirilen yöntemde, "Yedek Değer" fonksiyonu yardımıyla. KV' nin kayıtsızlık bölgesindeki tercihlerini bulma yoluna gidildi.

Bunun dışında, daha problemin başında, temelden KV ile etkileşime giren yöntemler geliştirilmiştir. STEM [14] ve Zionts-Wallenius [15] yöntemleri bu gruba dahil edilebilir.

Son yıllarda ise, çok amaçlı tam sayılı programlama problemleri ile ilgili araştırmalar yayımlandı:

Shapiro [16] tam sayılı programlamayı dualite teorisinde kullanmayı önerdi. Bitran [17] çok amaçlı 0-1 tam sayılı problemler için bir yöntem geliştirdi. Bowmann [18] baskın çözümleri bulabilecek parametrik bir matematik algoritma önerdi.

Bu sahada daha birçok benzer çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca bunların bazıları gerçek problemlere de uygulanabilmiştir [19, 20, 21, 22].

2.2 Temel Kavramlar

ÇAKV ile ilgili kaynaklarda çok sık geçen, araştırmacılar tarafından değişik anlamlarda kullanılan dört temel kavram vardır. Birçok kaynakta belirtildiği gibi. tartışmasız (üniversal) tanımları olmayan bu kavramlar:

- Bileşenler (Attributes)
- Amaçlar (Objectives)
- Hedefler (Goals)
- Kriterler (Criteria)

Anlam kargaşasını önlemek ve bu kavramların kullanış şekillerini açıklığa kavuşturmak için birkaç örnek verilebilir.

Genellikle ÇAKV problemlerinde "Kriter" ile "Bileşen" eşdeğerde kullanılmaktadır, iki kriteri esas alan, lineer kısıtlara sahip bir problem aşağıdaki şekilde formüle edilir

1. Kriter : Zaman

$$f_1(x) = C_1^1.x_1 + C_1^1.x_2$$

2. Kriter : Kar

$$f_2(x) = C_1^2 . x_1 + C_1^2 . x_2$$

Kısıtlar:

$$g_1(x) = g_1^1 . x_1 + g_1^2 . x_2 \leq b_1$$
$$g_2(x) = g_2^1 . x_1 + g_2^2 . x_2 \leq b_2$$
$$g_3(x) = g_3^1 . x_1 + g_3^2 . x_2 \leq b_3$$

Yukarıdaki tüm eşitlik, eşitsizlik ve fonksiyonlar birer karar bileşeni (attribute) olarak göz önüne alınabilir.

Sadece kriterleri belirtmek, kısıtlar da olsa pek anlamlı gözükmemekte, dolayısıyla ilk bakışta problemde bir eksiklik hissedilmektedir. Ancak, örneğin amaçların mümkün olduğu ölçüde zamanı kısaltmak, buna karşın enerjiyi de azaltmak olduğu belirtilirse problem tam anlamıyla tanımlanmış bir karar problemi haline gelir.

Şu halde, bir karar verme probleminde,

"AMAÇLAR: KRİTERLERİN KARAR VERİCİNİN ARZULARI DOĞRULTUSUNDA TANIMLANMIŞ ŞEKLİ"

olarak tanımlanabilir. Böylece kriterlerle ilgili fonksiyonlar "Amaç Fonksiyonları" olmaktadır. Buna göre amaç fonksiyonları, yukarıdaki problem için;

$$\min f_1(x)$$
$$\max f_2(x)$$

şeklinde olacaktır.

Amaçların ortaya konabilmesi için bileşenler girdi işlevini yerine getirmektedir.

Son olarak, KV' nin amaçlarını daha kesin olarak ifade etmesi ve her bir amaç için erişilmesini arzu ettiği birer değer belirlemesi söz konusudur. Örneğin, üretim zamanının M_1 gün düşürülmesi, karın ise K_1 TL' ye çıkarılması amaçlansın. Bu değerler problemin çözülmesinde erişilmesine çalışılacak *HEDEFLER*' dir.

Şu halde,

"HEDEFLER: AMAÇLARIN DAHA DA SOMUTLAŞARAK BELİRLİ DEĞERLERE DÖNÜŞMÜŞ ŞEKİLLERİ"

olarak tanımlanabilir.

Karar bileşenleri veya kriterler, kararda esas alınacak temel kuralları, karar değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirlerler. Bu ilişkinin, arzu edileni daha iyi tanımlayabilmesi için bunları amaçlara, amaç fonksiyonlarına dönüştürmek gerekir. Amaçlar için belirli sabit değerler belirtmek suretiyle hedefler tanımlanmış olur.

Kaynaklarda bu tanımlar arasında kesin bir ayırım gözetilmeyip değişik yerlerde, değişik kişilerce farklı şekillerde kullanılmasına rağmen, "birden fazla kriter göz önünde tutulmak suretiyle çözülmesi gereken karar problemlerinin" genel bir ifade ile "Çok Amaçlı Karar Verme" (**ÇAKV**) adı altında toplanabileceği ortaya çıkmaktadır.

Bu tanımlar doğrultusunda bir ÇAKV problemi en genel halde aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\begin{aligned} &\max\left[f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}), \ldots, f_m(\underline{x})\right] \\ &g_i(\underline{x}) \le 0 \qquad i = 1,2,\ldots p \\ &\underline{x} \ge 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Burada $\underline{x}$ n-boyutlu karar değişkenleri vektörüdür. Problem, enbüyüklenecek m tane amaç, p tane de kısıt olduğunu göstermektedir. Burada $f_i(\underline{x})$ ve $g_i(\underline{x})$ fonksiyonlarının tümü veya bir kısmı lineer olabileceği gibi nonlineer de olabilirler. VMP olarak anılan bu problemde $g_i(\underline{x}) \le 0$, i = 1,...,p kısıtlar takımı, karar değişkenlerinin alabileceği maksimum veya minimum değerleri belirlemekte, dolayısıyla mümkün çözüm alternatiflerini tanımlamaktadır. Bu nedenle bu kısıtlar kümesinin belirlediği bölgeye genel olarak klasik matematik programlama problemlerinde olduğu gibi "Olurlu Bölge" (**OB**) (Feasible Region) denmektedir. ÇAKV problemlerinde bu bölge şu şekilde tanımlanmaktadır:

OB, kısıtlar kümesini tatmin eden karar değişkenler kümesidir. X ile gösterilen bu bölge matematiksel olarak şöyle tanımlanabilir:

$$X = \{\underline{x} \mid g_i(\underline{x}) \leq 0, \quad i = 1,2,...,p\} \tag{2.2}$$

Bu bölgedeki her bir noktanın koordinatları, amaç fonksiyonlarının karşılık gelen değerlerini oluşturacaktır.

Şu halde karar değişkenleri uzayında X olarak belirlenen olurlu bölgeye karşı, amaçlar uzayında da S ile gösterilecek olurlu bölge tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} S &= \{\underline{y} \mid \underline{y} = f(\underline{x}), \quad \underline{x} \in X\} \\ f(\underline{x}) &= [f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}),..., f_m(\underline{x})] \end{aligned} \tag{2.3}$$

Netice olarak VMP olarak ele alınan bir ÇAKV problemi aşağıdaki eşdeğer üç notasyondan biri ile ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} &\max [f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}),..., f_m(\underline{x})] \\ &g_i(\underline{x}) \leq 0 \qquad i = 1,2,...p \\ &\underline{x} \geq 0 \end{aligned} \tag{2.4}$$

$$\begin{aligned} &\max [f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}),..., f_m(\underline{x})] \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned} &\max f_1(\underline{x}) = \max [f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}),..., f_m(\underline{x})] \\ &f(\underline{x}) \in S \end{aligned} \tag{2.6}$$

$f_1, f_2, f_3, \ldots, f_m$ fonksiyonları, $\underline{x}$ vektörünün lineer fonksiyonları ise bağıntılar daha kısa olarak, $\underline{C}$, *nxm* boyutlu katsayılar matrisi, $\underline{x}$ n-boyutlu karar değişkenleri vektörü olmak üzere;

$$\begin{aligned} &\max \underline{C}.\underline{x} \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \tag{2.7}$$

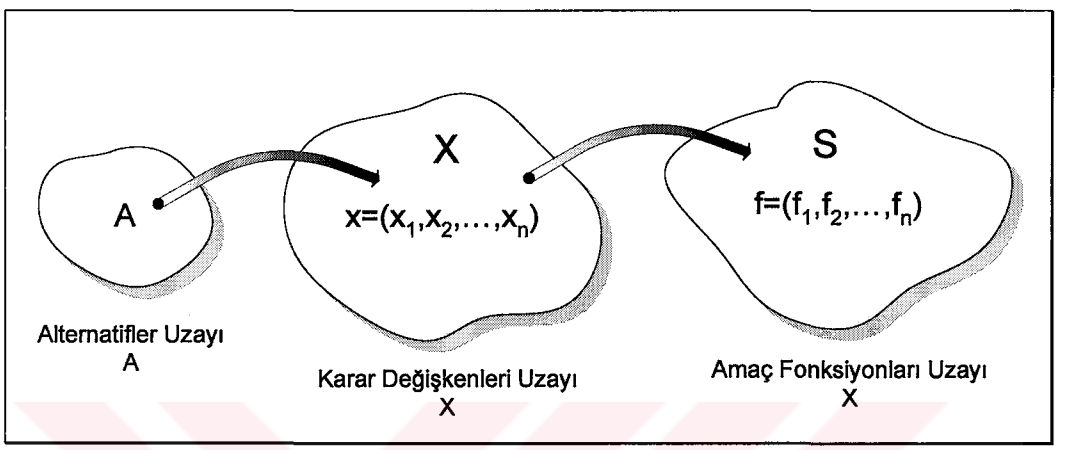
şeklinde yazılabilir.

Kaynaklarda bu tür gösterimlerin tümüne rastlamak mümkündür. Sonuç uzayı (Consequence Space) adıyla anılan X ve S den başka bunların oluşmasını sağlayan ve mümkün seçenekleri içine alan bir uzaydan daha bahsetmek yerinde olacaktır.

En genel halde birbirine karşılık gelen olurlu bölgelerin bulunduğu üç temel uzay

arasındaki ilişki Şekil. 2.1 ile gösterilebilir. Şekilde seçenekler uzayındaki bir seçeneğin (veya stratejinin) karar değişkenlerine ve amaçlar uzayına nasıl yansıdığı görülmektedir.

Böylece ÇAKV problemlerinde, sonuç uzayı diye nitelendirilen X ve S uzayları oluşacaktır.



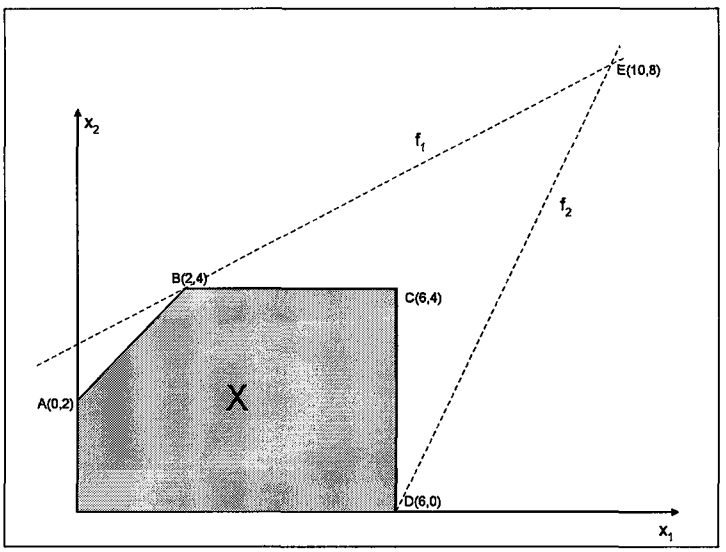
Şekil 2.1 Karar Verme Sürecinde Çeşitli Uzaylar Arası İlişki

Aşağıda basit bir sayısal örnekle bu tanımlara biraz daha açıklık kazandırılabilir.

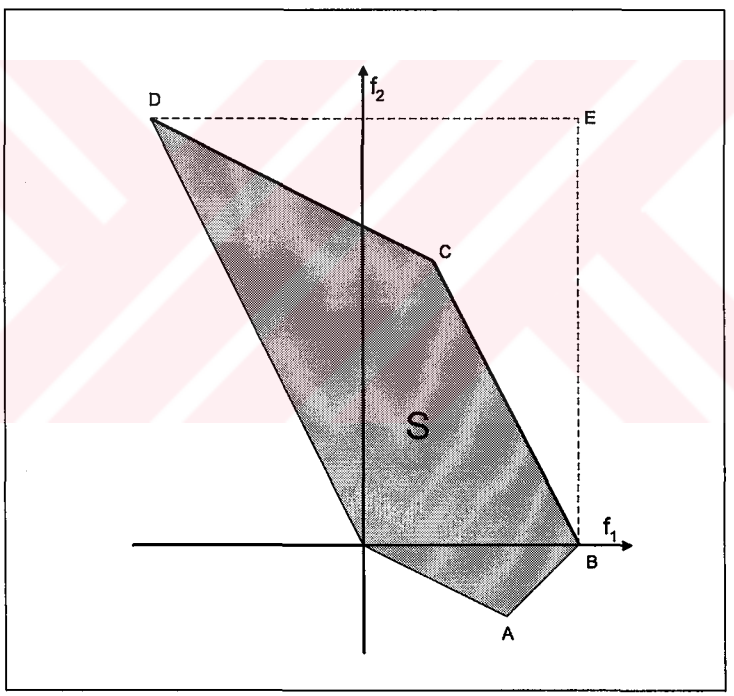
Sayısal Örnek 1:

$$\max f_1(\underline{x}) = -x_1 + x_2$$
$$\max f_2(\underline{x}) = 2x_1 - x_2$$
$$-x_1 + x_2 \leq 2$$
$$x_1 \leq 6$$
$$x_2 \leq 4$$
$$x_1, x_2 \geq 0$$

Sayısal Örnek 1' deki denklemler bir grafik üzerine taşınırsa, X ve S bölgeleri Şekil 2.2 ve Şekil 2.3' deki gibi elde edilir.



Şekil 2.2 Örnek Problem 1' e ait Karar Değişkenleri Uzayı



Şekil 2.3 Örnek Problem 1' e ait Amaç Fonksiyonları Uzayı

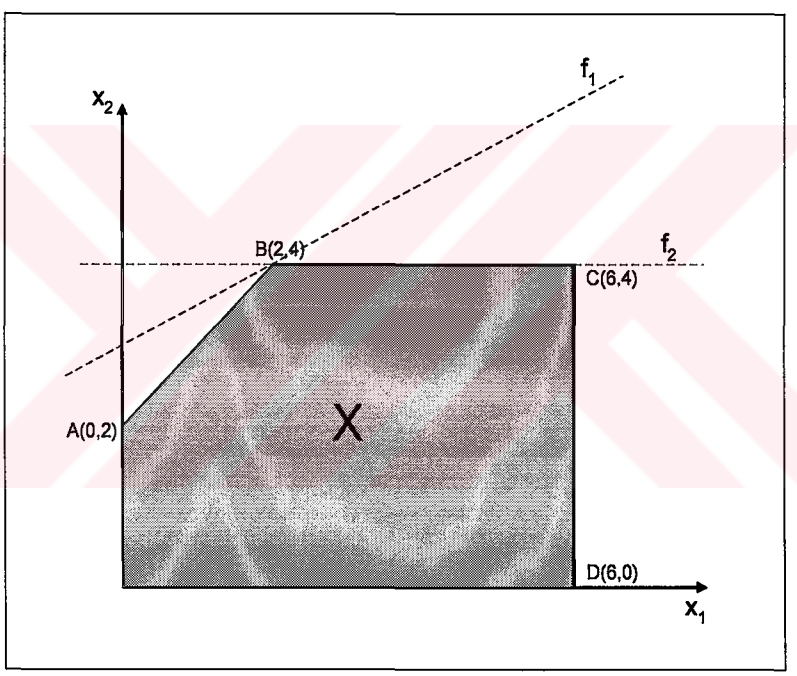
ÇAKV problemlerinin çözümünde ve bunun için geliştirilen yöntemlerde sık geçen bir kaç terimi daha tanımlamak gerekmektedir. Bunlar; "Optimum Çözüm" (**OÇ**) (Optimal Solution), "Baskın Olmayan Çözüm" (**BOÇ**) (nondominated veya Efficient Solution), "Tercih Edilmiş Çözüm", (**TEÇ**), (Preferred Solution).

Bu terimlerin anlamlarını daha iyi açıklamak amacıyla ikinci bir sayısal örnek verilebilir.

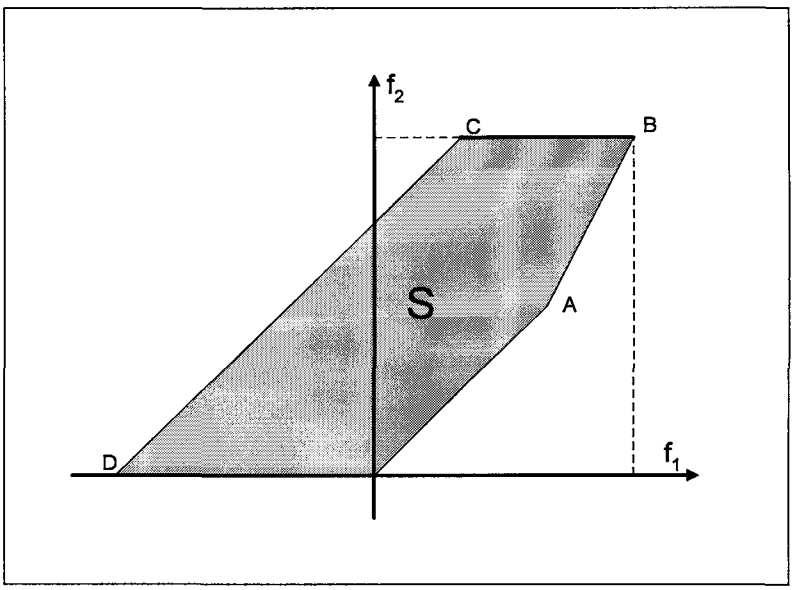
Sayısal Örnek 2:

$$\max f_1(\underline{x}) = -x_1 + x_2$$
$$\max f_2(\underline{x}) = 2x_2$$
$$-x_1 + x_2 \leq 2$$
$$x_1 \leq 6$$
$$x_2 \leq 4$$
$$x_1, x_2 \geq 0$$

Kısıtlar değişmediğine göre karar değişkenleri uzayındaki olurlu bölge Şekil 2.2' deki gibi olacaktır. Amaç fonksiyonları uzayındaki olurlu bölge ise Şekil 2.4' deki gibi olacaktır.



Şekil 2.4 Örnek Problem 2' ye ait Karar Değişkenleri Uzayı



Şekil 2.5 Örnek Problem 2' ye ait Amaç Fonksiyonları Uzayı

Optimal Çözüm (OÇ): Daha öncede kısaca belirtildiği gibi bir VMP' nin OÇ' ü her bir amaç fonksiyonunu birlikte, simültane olarak, maksimize eden çözümdür. Bu, matematiksel olarak şöyle de ifade edilebilir:

Yalnız ve yalnız:

$$\underline{x}^* \in X$$
$$f_i(\underline{x}^*) \geq f_i(\underline{x}), \quad i = 1,2,...,m \tag{2.8}$$

Tüm x' ler için, $\underline{x} \in X$ ise, x^*, VMP' nin OÇ' dür. Bu ifadeyi sözle tekrarlamak gerekirse;

VMP' nin OÇ' ü $\underline{x}^* = (x_1^*, x_2^*, ..., x_n^*)$ bu çözümün olurlu bölge içinde olması ve amaç fonksiyonlarında yerine konduğu zaman mümkün (olurlu bölge içinde olan) diğer tüm çözümlerin konmasıyla elde edilen değerlerden daha büyük değerler vermesi gerekir.

İkinci sayısal örnekte bu şartı sağlayan çözüm, Şekil 2.4' den de görüldüğü gibi, B noktasıdır. Klasik lineer programlama problemi hatırlanırsa bu problem için olası OÇ' ler olurlu bölgenin sınırlan üzerinde ve özellikle köşe noktalarında olmaktadır. Örnekte bu tür çözüm adayları A, B, C, D noktalarıdır. Amaç fonksiyonları göz önüne alındığında, bunları birlikte enbüyükleyen B noktası Şekil 2.4 ve Şekil 2.5' den kolaylıkla görülmektedir. Yukarıdaki şartlar irdelendiğinde:

$\underline{x}^B = \underline{x}^* = (2,4)$

- Kısıt denklemlerini sağlıyor. Dolayısıyla olurlu bölge içinde,
- Olurlu bölge içinde olan tüm çözüm alternatifleri amaç fonksiyonlarında yerlerine konduğu zaman f^* = (6,8) değerinden daha küçük değerler vermektedir.

Bu örnekte amaç fonksiyonları aynı doğrultuda olduğundan, her iki amaç fonksiyonu için OÇ' e ulaşılmıştır. Dolayısıyla problemin tek OÇ' ü vardır. Halbuki hatırlanacağı gibi ÇAKV problemlerinde genellikle amaçlar birbirleriyle çelişkilidir. Bu gibi hallerde VMP' nin OÇ niteliğini taşıyan çözümü yoktur. Sayısal örneklerden birincisine bakılacak olursa, yukarıda tanımlanan şartları yerine getiren bir çözümün olmadığı görülecektir.

Şekil 2.2 ve Şekil 2.3' e bakıldığında birinci amaç fonksiyonu açısından OÇ' ün B noktası, ikincisi açısından D noktası olduğu gözükmektedir. Her iki nokta da olurlu bölge içinde olmasına rağmen OÇ şartlarından ikinci şart gerçeklememektedir. Bu şartı gerçekleyen çözüm E noktası olabilirdi. Ancak, bu noktadaki çözümde ilk şartı gerçeklememekte, dolayısıyla olurlu bölgenin dışında kalmaktadır.

İdeal Çözüm (İÇ): Kaynaklarda amaç fonksiyonlarını ayrı ayrı enbüyükleyen ve olurlu bölge içinde olan çözümlere (Şekil 2.2' deki B ve D noktaları gibi) "amaç fonksiyonlarının İdeal Çözümleri", bunların birlikte oluşturdukları ve genellikle olurlu bölge dışında kalan çözüme de (Şekil 2.2' deki E noktası) "Problemin İdeal Çözümü" adı verilmektedir.

Sayısal Örnek 2' de olduğu gibi, problemin OÇ' ünün bulunmadığı durumlarda en çıkar yol "OÇ" gibi gözüken bazı çözümlerin uzlaştırılmasıdır. Bu özellikleri taşıyan çözümlerin nasıl bulunacağı ise aşağıdaki tanımları da yaptıktan sonra kendiliğinden ortaya çıkacaktır.

Baskın Olmayan Çözüm (**BOÇ**): VMP' nin diğer amaç fonksiyonları arasında en az birinde gerilemeye sebep olmaksızın, bir amaç fonksiyonunda gelişme sağlanamayan çözümlerine Baskın Olmayan Çözüm (BOÇ) adı verilir.

Kaynaklarda "Nondominated", "Efficient", "Pareto-Optimal", "Noninferior

Solution" deyimleri de kullanılmaktadır. Matematiksel olarak bu çözüm şöyle tanımlanmaktadır:

Yalnız ve yalnız:

$$f_i(\underline{x}^*) \leq f_i(\underline{x}) \quad bütün \quad i \quad ler \quad için$$
$$f_j(\underline{x}^*) < f_j(\underline{x}) \quad enaz \quad bir \quad j \quad için$$
$$\underline{x} \in X$$

Şartlarını sağlayan herhangi bir çözüm, $\underline{x}^* = (x_1,x_2,...,x_n)$ yoksa $\underline{x}^* = (x_1^*,x_2^*,...,x_n^*)$ çözümü baskın olmayan çözümdür.

Bu tanım dikkate alındığında, sayısal Örnek 1 ile ilgili Şekil 2.2 ve Şekil 2.3' de B ve D noktalarını birleştiren hat üzerindeki bütün noktalar BOÇ niteliğini taşımaktadır. Bu nedenle bu tür çözümlerin oluşturduğu bu çeşit hatlar "Baskın Olmayan Çözümler Kümesi" adıyla anılmaktadır.

Bu tezde bunlardan "Baskın Olmayan Çözümler Kümesi" (**BOÇK**) olarak bahsedilecektir. Zira, ikiden fazla boyutlu (ikiden fazla karar değişkeni veya amaç fonksiyonu) olan problemlerde bu küme bir yüzey veya yüzeyler şeklinde ortaya çıkabilir.

Şekil 2.3' de tüm baskın çözümlerin B ile D noktasını birleştiren hat üzerinde olması gerektiği açıktır. Çünkü, S, olurlu bölgesi içindeki herhangi bir nokta bu bölgeyi sınırlayan BD hattı üzerindeki en az bir nokta tarafından geçilir. Bu tür çözümlere "Baskın Çözüm" (**BÇ**) (Dominated Solution veya Inefficient Solution) adı verilir. Bu VMP' nin baskın çözümler kümesinin çok önemli bir özelliğidir.

Tatmin Edici Çözüm: Görüldüğü gibi bu basit örnekte bile baskın çözümlerin sayısı bir hayli fazladır. Bunun gibi VMP' lerinde baskın çözümler kümesindeki çözümlerin sayısı oldukça çoktur. O halde, KV diğer bazı kriterleri göz önünde bulundurarak "Tatmin Edici bir Çözüm" ü seçmek durumundadır. Böylece seçilen bu çözüm Tatmin Edici Çözüm (**TEÇ**) adını alır.

Eniyi Uzlaşık Çözüm: KV' nin nihai karar olarak, ilave bazı kriterleri de kullanmak suretiyle seçtiği baskın çözüme, "Eniyi Uzlaşık Çözüm" (**EUÇ**) denilir.

2.3 Çok Amaçlı Karar Verme Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Karar verme probleminde başvurulan yöntemlerin çoğu, kesin kurallara dayanır. Dolayısıyla bunların ışığında, KV daha sağlıklı kararlar alır. Çevre ve KV' nin özellikleri problem için farklılıklar gösterdiğinden, çok amaçlı karar durumları ve bunların çözümüne ilişkin yöntemler de farklılıklar gösterir. Bu yöntemler genellikle;

- KV' nin amaçları hakkındaki tercih bilgisine
- Amaç ve nitelikler arasındaki yararlılık ilişkisine,
- Problemde kullanılan kısıtların açık olarak yazılabilmesi veya kapalı olarak göz önüne alınmasına göre Tablo 2.1' deki gibi sınıflandırılabilir:

Tablo 2.1 ÇAKV Yöntemlerinin Sınıflandırılması

KISITLAR / ÇIKTI	KAPALI	AÇIK
	SONLU SAYIDA ALTERNATİF	SONSUZ SAYIDA ALTERNATİF
DETERMİNİSTİK	I - Zionta-Wallenius Yöntemi - ElectreYöntemi - Sirinivasan ve Shocker Y.	II - Çok Ölçütlü Matematik Programlama Yöntemeleri
PROBABİLİSTİK	III - Fayda Fonksiyonu Belirleme Yöntemeleri	IV - Stokastik Matematik Programlama Yöntemleri

I. Bölgede kabul edilen yöntemlerde problem, verilen N sayıda alternatiften, eldeki P tane amacı enbüyükleyen bir veya birkaçını belirlemektedir. Genel olarak problem şu şekilde özetlenebilir:

Tablo 2.2 ÇAKV Probleminin Genel Olarak Gösterilmesi

	AMAÇLAR	ALTERNATİFLERİN DEĞERİ
ALTERNATİFLER	f_{11} f_{12} ..... f_{1p}	S_1
	f_{21} f_{22} ..... f_{2p}	S_2
	.....	.
	f_{N1} f_{N2} ..... f_{Np}	S_p
AMAÇLARIN AĞIRLIKLARI	a_1 a_2 ..... a_p	

Burada ana amaç, en azından N alternatifin "iyi"lik derecesine göre sıralanmasıdır. Bu konudaki başlıca yaklaşımlar [5,6,7] seklinde özetlenebilir. Tüm bu yaklaşımlarda temel ilke, her bir alternatifin her bir ölçüt açısından aldığı değerleri, diğer alternatiflerin benzer yolla bulunan değerleri ile ikili olarak karşılaştırmaktır.

$$S_i = \sum_{j=1}^{p} w_j f_{ij}$$
$$\sum_{j=1}^{p} w_j = 1 \qquad (2.9)$$

Burada w ler KV tarafından tam bilinemeyen ölçüt ağırlıklarıdır.

II. Bölgede kısıtlar açık, çıktılar deterministiktir. Bu tip problemlere kaynaklarda Çok Amaçlı Matematik Programlama (**ÇAMP**) (Multicriteria Mathematical Programming) adı verilmektedir. Bu tip problemler VMP aynısıdır.

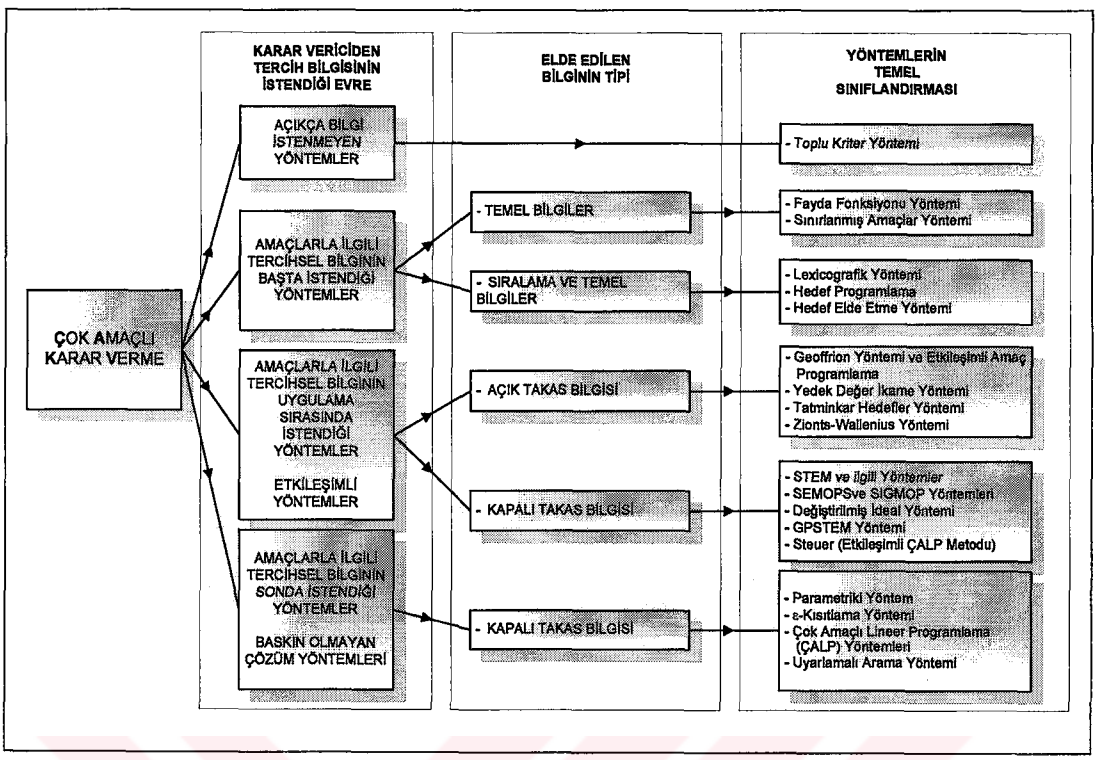
Bu konudaki yöntemlerde 4 ana yaklaşım tarzı izlenmektedir:

- KV' den Açıkça Bilgi İstemeyen Yöntemler
- KV' den Başlangıçta Bilgi İsteyen Yöntemler
- KV' den Karar Esnasında Ardışık Olarak Bilgi İsteyen Yöntemler.
- KV' den Bilgiyi Sonradan İsteyen Yöntemler.

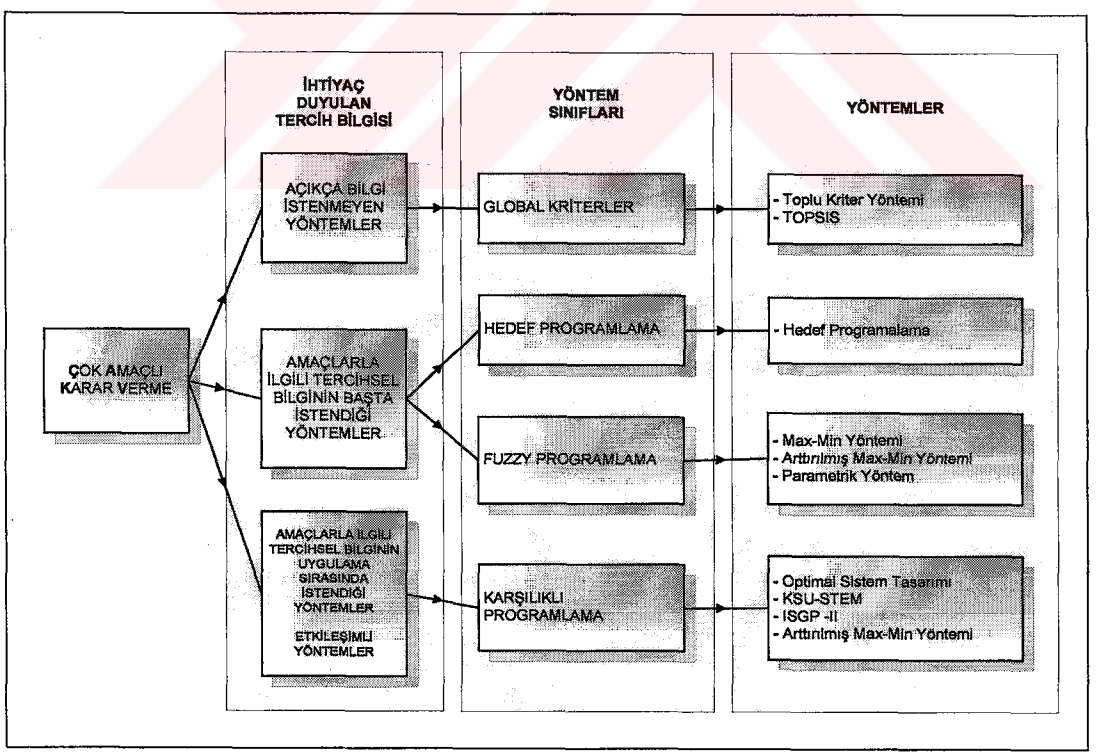
Bu yöntemlerin genel gösterimi Hwang ve Masud tarafından yapılan sınıflandırma şekliyle Şekil 2.6' da ve bulanık mantık yöntemlerini içeren gösterimleriyle Şekil 2.7' de verilmiştir.

III. Bölgede alternatifler sonlu sayıda olup, çıktılar probabilistiktir. Burada her bir alternatifin muhtelif çıktı değerleri için ihtimaller belirlenir. Daha sonra her bir alternatif için değer fonksiyonu teşkil edilir.

IV. Bölge ise, sonsuz seçenek kümesi ve stokastik problemlerin çözümü için geliştirilen yöntemleri içermektedir. Bunlar kaynaklarda Stokastik Matematik Programlama adı altında geçmektedir.



Şekil 2.6 ÇAKV Yöntemlerinin Genel Sınıflandırması



Şekil 2.7 ÇAKV Yöntemlerinin Bulanık Mantık İçeren Sınıflandırması

3. STATİK ÇAKV PROBLEMLERİ

3.1 Giriş

Amaçların ve şartların sistem yapısı gereği çabuk değişmediği ve alınacak karar için gereken hesaplama süresinin, sistemin yapısına ve daha sonraki karar durumlarına etkisinin olmadığı türdeki problemleri statik yapıdaki ÇAKV problemleri olarak isimlendirebiliriz. Örnek olarak inceleyeceğimiz, bir su havzasındaki suyun temizlik durumunun ve bunun için gerekli yatırım maliyetlerinin incelenmesi bu yapıdaki problemlere örnek olabilir. Bu problemde amaçlar ve şartlar karar süresine kıyasla çok uzun bir zaman için sabit kalmaktadır ve değişmeyecektir. Bir fabrikanın yeni bir ürün için dikkate alabileceği ÇAKV üretim planlama problemi de bu yapıdaki bir problem olarak kabul edilebilir.

3.2 Statik ÇAKV Problemleri İçin Etkileşimli Yöntem

Statik çok amaçlı karar verme problemlerinin çözümüne yönelik birçok yöntem mevcuttur, etkili yöntemlerden biri de SEMOPS (Sequental Multiobjective Problem Solving) yöntemidir. Bu yöntemde KV, her bir hesaplama çevriminde amaçlar için arzu edilen başarı seviyelerini tekrar değerlendirebilmektedir. Problemin çözüm aşamalarında kararların değişmesi ile KV sonuca ulaşmak için amaçlar arasında değişim yapabilir. Bu yöntem statik yapıdaki problemler için yani amaçların ve şartların başta bilindiği ve bu durumun çok çabuk değişmesinin mümkün olmadığı hallerde kullanımı uygundur. Doğrusal olamayan yapıdaki sistem tanımlamalarında kolaylıkla uygulanabilmektedir.

Pieter van Gelder, Lucien Duckstein ve Eric Parent [23], risk analizine çok kriterli yaklaşım üzerine yaptıkları çalışmada, su kaynaklarının yönetimi için bu yöntemin kullanılmış olduğundan ve evrimsel yapıdaki SEMOPS uygulamalarından bahsetmektedirler.

Taslima Akter ve Slobodan S. Simonovic [24], su baskını yönetimi ile ilgili çok amaçlı karar verme çalışmasında bu yöntemden bahsetmişler ve bu tip problemlerin çözümünde uygun olabileceğine değinmişlerdir.

K.D.W. Nandalal, ve Slobodan P. Simonovic [25], çalışmalarında su kaynağı yönetimindeki karışıklıklarla ilgili kararlarda bu tekniğin uygulanabilecek birkaç teknikten biri olduğuna değinmektedirler.

3.2.1 SEMOPS Yöntemi

SEMOPS (Sequental Multiobjective Problem Solving) tekniği [4], tatmin edici hareket yöntemini belirlemek için tarama prosesinde KV' nin dinamik olarak işin içine katıldığı bir etkileşimli programlama tekniğidir. Bu teknik, etkileşimli olarak KV' nin bir amaçla diğer bir amaç arasında değişim yapmasına izin verir. SEMOPS çevrimsel olarak amaçlara ulaşılması boyunca hedeflere ve KV' nin arzularına dayanan yedek amaç fonksiyonları kullanır. Hedef seviyeleri, KV' ye dış faktörler tarafından kabul ettirilir. İstek Seviyeleri (**İS**) ise KV' nin kişisel olarak ulaşmayı arzuladığı amaçların başarı seviyeleridir. Hedefler değişmez fakat İS' leri her bir çevrim boyunca değişir.

KV' nin belirlediği İS leri $İS=(İS_1, İS_2,..., İS_T)$ olarak kabul edilsin.

Amaç fonksiyonları $f(\underline{x})=(f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}),..., f_T(\underline{x}))$ olarak verilsin. Her bir amaç f($\underline{x}$) için uygun bölge $[f_{iL}, f_{iU}]$ olarak belirlenir. Her bir fonksiyon için bu uygun bölge, fonksiyonun maksimum ve minimum değerleri olmak zorunda değildir. Daha çok üzerinde karar verilecek değişkenlerdeki koşul setler ve sınırlar tarafından belirlenir.

Esas cevap uzayı $f_i(\underline{x})$, $y_i(\underline{x})$ ye dönüştürülür.

$$y_i(\underline{x}) = \frac{f_i(\underline{x}) - f_{iL}}{f_{iU} - f_{iL}} + \varepsilon \tag{3.1}$$

$y_i(\underline{x})$ [0,1] arasında tanımlanmıştır. ε yeterince küçük pozitif bir sayıdır ve boyutsuz başarı göstergeleri tanımlanması sırasında sıfıra bölme durumunu önlemek amacıyla kullanılmaktadır.

Aynı şekilde, KV' nin İS' leri İS* şeklinde boyutsuz hale dönüştürülerek [0,1] arasında tanımlanırlar.

$$İS^* = \frac{İS_i - f_{iL}}{f_{iU} - f_{iL}} + \varepsilon \tag{3.2}$$

Beş tip amaç fonksiyonu ve bununla ilgili d_i boyutsuz başarı göstergeleri, şu şekildedir:

- en fazla : $f_i(\underline{x}) \leq İS_i$

$$d_i = \frac{f_i(\underline{x})}{İS_i} = \frac{y_i(\underline{x})}{İS_i^*} \tag{3.3}$$

- en az : $f_i(\underline{x}) \geq İS_i$

$$d_i = \frac{İS_i}{f_i(\underline{x})} = \frac{İS_i^*}{y_i(\underline{x})} \tag{3.4}$$

- eşit : $f_i(\underline{x}) = İS_i$

$$d_i = \frac{1}{2}\left[\frac{İS_i}{f_i(\underline{x})} + \frac{f_i(\underline{x})}{İS_i}\right] = \frac{1}{2}\left[\frac{İS_i^*}{y_i(\underline{x})} + \frac{y_i(\underline{x})}{İS_i^*}\right] \tag{3.5}$$

- bir aralık içinde : $İS_{iL} \leq f_i(\underline{x}) \leq İS_{iU}$

$$d_i = \left[\frac{İS_{iU}}{İS_{iL} + İS_{iU}}\right]\left[\frac{İS_{iL}}{f_i(\underline{x})} + \frac{f_i(\underline{x})}{İS_{iL}}\right] = \left[\frac{İS_{iU}^*}{İS_{iL}^* + İS_{iU}^*}\right]\left[\frac{İS_{iL}^*}{y_i(\underline{x})} + \frac{y_i(\underline{x})}{İS_{iU}^*}\right] \tag{3.6}$$

- bir aralığın dışında : $f_i(\underline{x}) \leq İS_{iL}$ veya $f_i(\underline{x}) \geq İS_{iU}$

$$d_i = \left[\frac{İS_{iL} + İS_{iU}}{İS_{iU}}\right]\left[\frac{1}{\frac{İS_{iL}}{f_i(\underline{x})} + \frac{f_i(\underline{x})}{İS_{iL}}}\right] = \left[\frac{İS_{iL}^* + İS_{iU}^*}{İS_{iU}^*}\right]\left[\frac{1}{\frac{İS_{iL}^*}{y_i(\underline{x})} + \frac{y_i(\underline{x})}{İS_{iU}^*}}\right] \tag{3.7}$$

(3.3), (3.4), ve (3.6) ile tanımlanan tipler en çok kullanılanlardır.

Her bir örnekte, $d_i \leq 1$ olması amaç fonksiyonunun karşılandığı anlamına gelmektedir. Birinci tip hariç, hepsinde, d_i amaç fonksiyonlarının doğrusal olmayan fonksiyonu şeklindedir. Burada amaç fonksiyonlarının kendileri de doğrusal olmayabilir.

Algoritma, KV' nin yönlendirmesiyle bilgi üretir ve böylelikle KV bir karara varabilir. Amaçlar arasındaki karşılıklı bağımlılıkla ilgili bilgiler, bir amacın başarısının veya başarısızlığının, diğer amaçların İS' ni nasıl etkilediğinin göstergesi şeklindedir.

Yedek amaç fonksiyonlarının çevrimsel optimizasyonu, KV için üretilen bilgiye dayalı bir mekanizmadır. Burada kullanılan "yedek" terimi, her birinin gerçek performans fonksiyonlarının bilinmediği durumları tanımlamak maksadıyla kullanılmıştır.

T amaçlı bir kümenin alt kümesi olarak T' tanımlanmış olsun. Karar verme sürecinin adımlarında, bu T' alt kümesine sahip amaçlar aşağıda s olarak tanımlanan yedek-yardımcı fonksiyonların oluşmasını sağlarlar. Yedek-yardımcı fonksiyon şu şekilde tanımlanır:

$$s = \sum_{t \in T'} d_t \tag{3.8}$$

Yedek-yardımcı fonksiyondaki her d_t' nin değeri t. sayılı amacın karşılanıp karşılanmadığını gösterir. Karşılanmamış amaçlar için $d_t > 1$ değerine sahiptir.

İşlemsel olarak, SEMOPS başlangıç, iterasyon ve sonlandırmayı içeren üç adımlı bir algoritmadır. Başlangıç bölümü, esas problemin bu algoritma için uygun hale getirilmesi ve yedek amaç fonksiyonlarını içeren yardımcı problem kümesinin oluşturulmasını içerir.

İterasyon adımı, algoritmanın etkileşimli kısmıdır. Optimizasyon evresi (analist tarafından gerçekleşen) ve değerlendirme evresi (KV tarafından gerçeklenen) arasında gerçekleşen bir çevrimdir. Bu çevrim tercih edilen bir çözüme ulaşana kadar gerçekleşir ve algoritma sonlandırılır.

İlk iterasyonda, i = 1, esas problem ve T kümeye sahip yardımcı problemler çözülür. Yardımcı problemler, her bir amacın istek seviyesi, bu amaçların hedefi olarak verilen bir şekle sokulur. Yani, $İS_i = b_i,\ i = 1.2,...,T$

Esas Problem:

$$\begin{aligned} &\min s_1 = \sum_{t=1}^{T} d_t \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \tag{3.9}$$

Yardımcı problemler:

$$\begin{aligned} &\min s_{1k} = \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq k}}^{T} d_t \quad k = 1,2,...,T \\ &\underline{x} \in X \\ &f_k(\underline{x}) \geq İS_k \end{aligned} \tag{3.10}$$

(3.9) ve (3.10) problemlerinin çözümü optimizasyon evresini oluşturur. Esas problem için amaçlar ve elde edilen değerleri içeren vektör ve ayrıca yardımcı problemler kümesi değerlendirme evresinde kullanması için KV' ye sunulur. Yapılacak bir hareketin diğer amaçlarda elde edilenler üzerindeki etkileri değerlendirilir ve bu amaç için yeni istek seviyesi atanır.

Genel olarak, i. sayılı iterasyon aşağıdaki esas problemi ve yardımcı problemler setini çözer:

Esas Problem:

$$\begin{aligned} &\min s_i = \sum_{t \in T'}^{T} d_t \\ &\underline{x} \in X \\ &f_j(\underline{x}) \geq İS_j \quad j \in (T - T') \end{aligned} \tag{3.11}$$

Yardımcı problem seti, $k \in T'$ ($T' = T - (i+1)$)

$$\begin{aligned} &\min s_{1k} = \sum_{\substack{t \in T' \\ t \neq k}}^{T} d_t \\ &\underline{x} \in X \\ &f_j(\underline{x}) \geq \dot{I}S_j \quad \forall_j \text{ için} \quad j \in (T - T') \\ &f_k(\underline{x}) \geq \dot{I}S_k \quad \text{bir } k \text{ için} \quad k \in T' \end{aligned} \tag{3.12}$$

Optimizasyon evresi (3.11) ve (3.12) problemlerini çözer. Sonuçlanan çözümler, değerlendirme evresinde kullanılır ve KV bir sonraki iterasyon çevrimi için yönlendirme yapar.

Bu problem uygulanırken amaç fonksiyonlarının değerlerinin alt ve üst sınırları dikkatli seçilmelidir. Aksi takdirde probleme faydasız bilgi girilmiş olur.

Bu yaklaşımın en sorunlu durumu, yardımcı problemlerin çözümü sırasında geçersiz kısıtlar setinin bulunma ihtimalidir. Bu gibi bir durumda, istek seviyelerinin tutarlı setinin belirlenmesi, rasgele ve sistematik olmayan bir yapıya bürünür.

Yardımcı problemleri çözerken, istek seviyelerinden bir veya birkaçının çakışmaz bir set oluşturması durumunda baskın bir çözüm bulmak mümkündür.

SEMOPS yöntemini avantajları ise:

- Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılabilir.
- KV, amaçların hesaplandığı her çevrimde arzu edilen başarı seviyelerini tekrar değerlendirebilir.

3.3 Statik ÇAKV Problemleri İçin Bulanık Programlama

ÇOLP problemlerinin çözümü için birçok bulanık programlama tekniği geliştirilmiştir. Yapılan çalışma için kullanılan **TOPSIS** [32, 35, 36] metodunun temelini teşkil eden yöntemler aşağıda kısaca açıklanacaktır.

3.3.1 Min-Max Yaklaşımı

ÇOKV problemlerinin genel matematik tanımı şu şekilde yapılabilir:

$$\begin{aligned} &\max/\min\,[f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}), \ldots, f_k(\underline{x})] \\ &\underline{x} \in X = \{\underline{x} \mid g_s(\underline{x}) \{\geq, 0, \leq\} 0, \quad s = 1, 2, \ldots, m\} \end{aligned} \tag{3.13}$$

$f_j(\underline{x}),\ j \in J$: Maksimizasyon (fayda) amaçları

$f_i(\underline{x}),\ i \in J$: Minimizasyon (maliyet) amaçları

$I \cup J = \{1, 2, \ldots, K\}$

$f_k(\underline{x})$ ve $g_s(\underline{x})$ lineer veya nonlineer yapıda olabilir.

$(k = 1, \ldots, K \text{ ve } s = 1, \ldots, m)$

Zadeh ve Bellman' ın [33] maksimum operatörünü ilk kez Zimmerman [34] **ÇALP** problemlerinin çözümü için kullanmıştır. Şu denklemi göz önüne alalım:

$$\begin{aligned} &\textit{bul} \quad && \underline{x} \\ &\textit{öyle ki} \quad && f_k(k) \geq f_k^0 \quad \forall k \\ & && \underline{x} \in X \end{aligned} \tag{3.14}$$

f_k^0 , $\forall k$ ilgili hedeflerdir ve her amacın maksimum yapılacağı farzedilmektedir.

Denklem 3.14 ün amaç fonksiyonlarını bulanık sınırlamalı olarak tanımlayabiliriz. Bulanık sınırlamaların toleransları verilirse, üyelik fonksiyonları $\mu_k(\underline{x}),\ \forall k$ oluşturulabilir. "Min operatörü" kavramı sayesinde, uygun çözümler seti, bulanık amaçlar setinin kesişimiyle tanımlanabilir. Uygun çözümler seti, $\mu_D(\underline{x})$ üyeliği ile karakterize edilebilir.

$$\mu_D(\underline{x}) = \min(\mu_1(\underline{x}), \mu_2(\underline{x}), \ldots, \mu_k(\underline{x})) \tag{3.15}$$

KV, uygun karar seti içindeki maksimum μ_D değeri ile kararını verir. Seçilen çözüm, aşağıdaki problemin çözümü ile elde edilebilir.

$$\begin{aligned} &\max\,[\min_k \mu_1(\underline{x})] \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \tag{3.16}$$

$\alpha = \min_k \mu_I(\underline{x})$, uzlaşık çözümlerin toplam tatmin seviyesi olarak kabul edilirse, aşağıdaki denklem modeli elde edilmiş olur:

$$\begin{aligned} &\max \alpha \\ &\alpha \le \mu_k(\underline{x}) \quad \forall k \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \tag{3.17}$$

Amaç fonksiyonlarının, üyelik fonksiyonlarını oluşturmak için, öncelikle Pozitif İdeal Çözümün (**PIS**) Tablo 4.1' de görüldüğü gibi sonuç tablosu oluşturulur ve üyelik fonksiyonlarının lineer ve f_k^* ile $f_k^{'}$ $\forall$k arasında azalmayan yapıda olduğu kabul edilmektedir. $\forall$k,

$$\mu_k(\underline{x}) = \begin{cases} 1 & eğer \quad f_k(\underline{x}) > f_k^* \\ [f_k(\underline{x}) - f_k^{'}]/[f_k^* - f_k^{'}] & eğer \quad f_k^{'} \le f_k(\underline{x}) \le f_k^* \\ 0 & eğer \quad f_k(\underline{x}) < f_k^{'} \end{cases} \tag{3.18}$$

olmaktadır.

Üyelik fonksiyonları temelde, tercih veya tatmin kavramına dayanmaktadır. Pratikte ilgilenilen uygun çözüm bölgesi sadece şu kritik bölgedeki elemanları içermektedir.

$$\left\{\underline{x} \mid f_k^{'} \le f_k(\underline{x}) \le f_k^*, \quad \forall k \quad ve \quad \underline{x} \in X\right\}$$

$f_k^{'}$ her sütundaki minimum değerdir.

Tablo 3.1 Pozitif İdeal Çözüm Sonuç Tablosu

	f_1	f_2	f_3	...	f_4	X
max f_1	f_1^*	$f_2(x^1)$	$f_3(x^1)$	...	$f_k(x^1)$	x^1
max f_2	$f_2(x^2)$	f_2^*	$f_3(x^2)$	...	$f_k(x^2)$	x^2
max f_3	$f_3(x^3)$	$f_2(x^3)$	f_3^*	...	$f_k(x^3)$	x^3
:	:	:	:	:	:	:
max f_k	$f_1(x^k)$	$f_2(x^k)$	$f_2(x^k)$	...	f_k^*	x^k
	$f_1^{'}$	$f_2^{'}$	$f_3^{'}$	...	$f_k^{'}$	

Sonuç olarak aşağıdaki problem elde edilir.

$$\begin{aligned} &\max \alpha \\ &\mu_k(\underline{x}) = [f_k(\underline{x}) - f_k^{'}]/[f_k^* - f_k^{'}] \ge \alpha \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \tag{3.19}$$

Bununla birlikte, üyelik fonksiyonları bazen lineer fonksiyonlar yerine hiperpolik fonksiyonlarla daha iyi modellenebilmektedir. Matematiksel olarak bir hiperbolik üyelik fonksiyonu $\mu_k(x)$ Şekil 3.1' de görüldüğü gibi şu şekilde tanımlanabilir:

$$\mu_k(\underline{x}) = 1/2 + [e^{\delta_k . v(\underline{x})} - e^{-\delta_k . v(\underline{x})}]/2.[e^{\delta_k . v(\underline{x})} + e^{-\delta_k . v(\underline{x})}] \tag{3.20}$$

veya

$$\begin{aligned} &\mu_k(\underline{x}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\tanh[\delta_k . v(\underline{x})] \\ &v(\underline{x}) = f_k(\underline{x}) - (f_k^* + f_k^{'})/2 \end{aligned} \tag{3.21}$$

δk , KV tarafından önceden belirlenmiş herhangi bir parametredir.

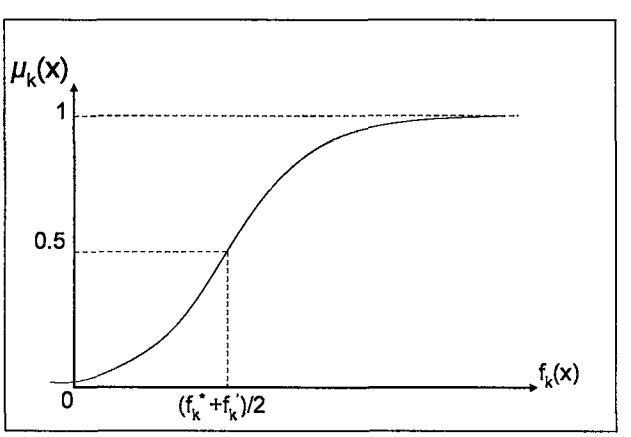
(3.20)' yi (3.19)' da yerine koyarsak, aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\begin{aligned} &\max \alpha \\ &\alpha \le \mu_k(\underline{x}) = 1/2 + [e^{\delta_k . v(\underline{x})} - e^{-\delta_k . v(\underline{x})}]/2.[e^{\delta_k . v(\underline{x})} + e^{-\delta_k . v(\underline{x})}] \quad \forall k \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \tag{3.22}$$

veya

$$\begin{aligned} &\max \alpha \\ &2\alpha - 1 \le \tanh(\delta_k . v(\underline{x})), \quad \forall k \\ &\underline{x} \in X \\ &v(\underline{x}) = f_k(\underline{x}) - (f_k^* + f_k^{'})/2 \end{aligned} \tag{3.23}$$

δ_k , KV tarafından önceden belirlenmiş herhangi bir parametredir.



Şekil 3.1 Hiperbolik Üyelik Fonksiyonu

$x_{n+1}=tanh^{-1}(2\alpha-1)$ olarak kabul edersek yukarıdaki denklem şu şekli alır:

$$\begin{aligned} &\max \alpha \\ &x_{n+1} \le \delta_k[f_k(\underline{x})-(f_k^* + f_k^{'})/2], \quad \forall k \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \tag{3.24}$$

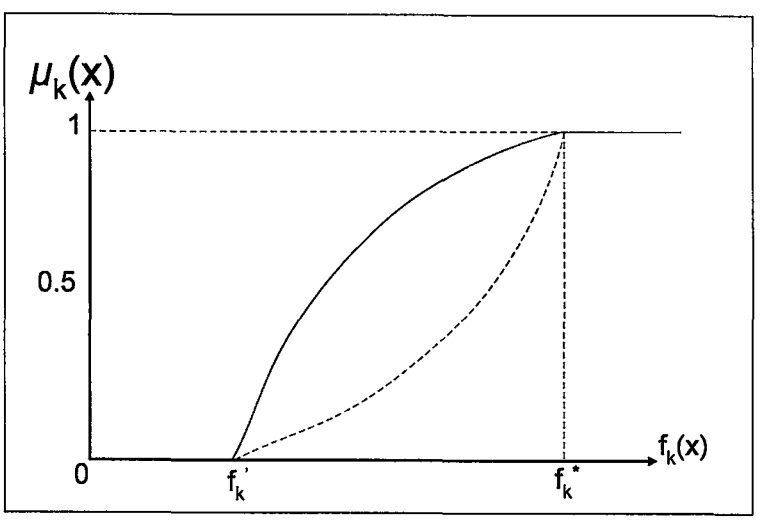
tanh ve $\tanh^{-1}$ artan fonksiyonlar olduğu için denklem (3.24) aşağıdaki denkleme denktir:

$$\begin{aligned} &\max x_{n+1} \\ &x_{n+1} \le \delta_k[f_k(\underline{x})-(f_k^* + f_k^{'})/2], \quad \forall k \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \tag{3.25}$$

Problem (3.25) standart lineer programlama probleminden başka bir şey değildir. Bu problemin çözümünden sonra, maksimum toplam uzlaşık tatmin seviyesi $\alpha^*=1/2+(tanhx^*)/2$ hiperbolik fonksiyonların tablosuna bakarak elde edilir.

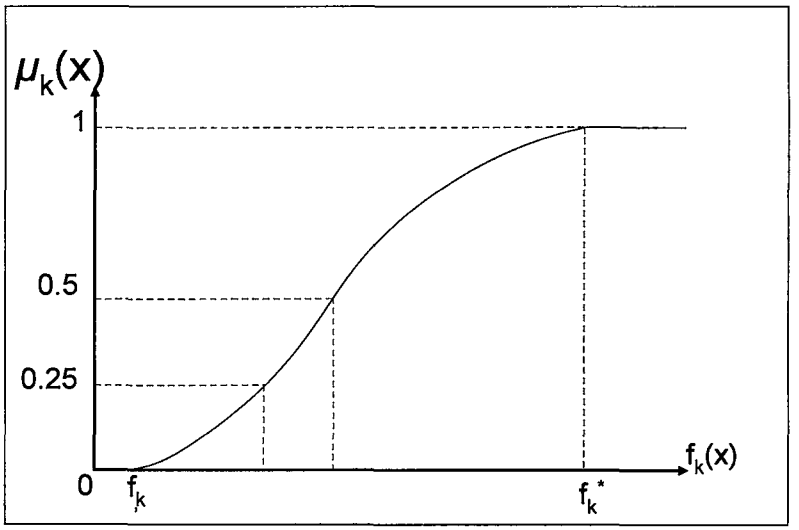
Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4' de görülen exponansiyel, ters hiperbolik, sıralı lineer fonksiyonlar gibi bazı monoton artan fonksiyonlar Zimmerman' ın yaklaşımına uygulanabilir. Bütün bu üyelik fonksiyonları nonlineer yapıdadır.

$$\mu_k(\underline{x}) = a_k + \{1-\exp[-\delta_k(f_k(\underline{x})-f_k^{'})/(f_k^*-f_k^{'})]\}$$



Şekil 3.2 Exponansiyel Üyelik Fonksiyonu

$$\mu_k(\underline{x}) = 1/2 + (1/2)\tanh^{-1}[\delta_k(f_k(\underline{x})-(f_k^*-f_k')/2)]$$



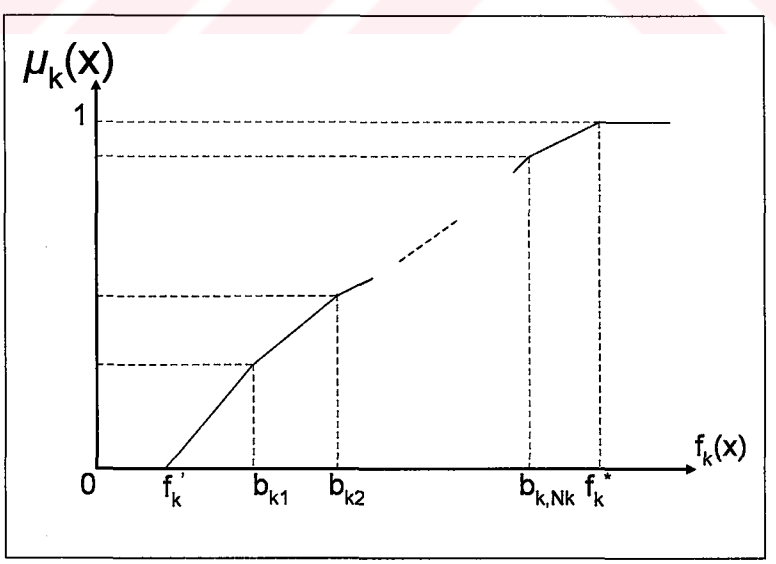
Şekil 3.3 Ters Hiperbolik Üyelik Fonksiyonu

$$\mu_k(\underline{x}) = \sum_{j=1}^{N_k} \beta_{kj} \left| f_k(\underline{x}) - b_{kj} \right| + \beta_k f_k(\underline{x}) + \tau_k$$

$$\beta_{kj} = (t_{k,j+1} - t_{kj})/2$$

$$\beta_k = (t_{k,Nk+1} + t_{k1})/2$$

$$\tau_k = (s_{k,Nk+1} + s_{k1})/2$$



Şekil 3.4 Sıralı Lineer Üyelik Fonksiyonu

Son olarak bazı operatörlerden bahsetmek gerekir.

- min-sınırlı toplam (min-bound sum) operatörü

$$\mu_D(\underline{x}) = \gamma \min_k \mu_k(\underline{x}) + (1-\gamma)\min[1, \sum_k \mu_k(\underline{x})] \tag{3.26}$$

γ : kompanzasyon katsayısı

Bu operatörün şu özellikleri mevcuttur.

- Her iki değişkende sürekli ve azalmayan
- Simetrik
- $\mu_D(x,x)$, x için artan yapıda
- $\mu_D(1,1)=1$ ve $\mu_D(0,0)=0$

Min-sınırlı toplam operatörünü kullanarak, $\underline{x} \in X$ uygun koşulları altında max $\mu_D(\underline{x})$ (toplam uzlaşık tatmin seviyesinin maksimizasyonu) nin hesaplanmasıyla **ÇOKV** problemleri çözülebilir. Şu denklem elde edilir:

$$\begin{aligned} &\max \gamma\alpha + (1-\gamma)\beta \\ &\alpha \le \mu_k(\underline{x}), \quad \forall k \\ &\beta \le \sum_k \mu_k(\underline{x}) \\ &\alpha \text{ ve } \beta \in [0,1] \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \tag{3.27}$$

(3.27) denkleminin çözümü zorunlu olarak yeterli değildir. Bununla birlikte hesapsal yeterlilik açısından uygun olanıdır.

- Zimmerman' ın min- ve max- operatörlerinin konveks kombinasyonu

$$\mu_D(\underline{x}) = \gamma \min_k \mu_k(\underline{x}) + (1-\gamma)\max_k \mu_k(\underline{x}) \tag{3.28}$$

Problem şu şekilleri alır:

$$\max_{\underline{x} \in X} \gamma . \min_k \mu_k(\underline{x}) + (1-\gamma)\max_k \mu_k(\underline{x}) \tag{3.29}$$

veya

$$
\begin{aligned}
&\max \gamma\alpha_1 + (1-\gamma)\alpha_2 \\
&\alpha_1 \le \mu_k(\underline{x}), \quad \forall k \\
&\alpha_2 \le \mu_k(\underline{x}), \quad \textit{enazından bir } k \textit{ için} \\
&\alpha_1 \textit{ ve } \alpha_2 \in [0,1] \\
&\underline{x} \in X
\end{aligned}
\tag{3.30}
$$

veya

$$
\begin{aligned}
&\max \gamma\alpha_1 + (1-\gamma)\alpha_2 \\
&\alpha_1 \le \mu_k(\underline{x}), \quad \forall k \\
&\alpha_2 \le \mu_k(\underline{x}) + Mr_k, \quad \forall k \\
&\textstyle\sum_k r_k \le K-1 \\
&\alpha_1 \textit{ ve } \alpha_2 \in [0,1] \\
&\underline{x} \in X
\end{aligned}
\tag{3.31}
$$

$r_k \in \{0,1\}$ ve M çok büyük gerçel sayıdır.

- "Bulanık ve" operatörü

$$\mu_D(\underline{x}) = \gamma \min_k \mu_k(\underline{x}) + (1-\gamma)(1/K)\textstyle\sum_k \mu_k(\underline{x}) \tag{3.32}$$

Bu operatörle problem şu şekli alır:

$$
\begin{aligned}
&\max \alpha + (1-\gamma)(1/K)\textstyle\sum_k \alpha_2 \\
&\alpha + \alpha_k \le \mu_k(\underline{x}), \quad \forall k \\
&\alpha_1 \textit{ ve } \alpha_2 \in [0,1], \quad \forall k \\
&\underline{x} \in X
\end{aligned}
\tag{3.33}
$$

- Arttırılmış max-min operatörü

$$\mu_D(\underline{x}) = \min_k \mu_k(\underline{x}) + \delta \textstyle\sum_k w_k \mu_k(\underline{x})$$

δ: küçük pozitif bir sayıdır.

3.3.2 Global Kriterler Yaklaşımı

ÇAKV problemlerinin çözümünde ilk adım genellikle referans noktasının belirlenmesidir. Global kriterler yöntemi, hedef programlama, bulanık programlama,

ve etkileşimli yaklaşımların hepsi çözüm sürecine başlayabilmek için başlangıç referans noktasına ihtiyaç duyarlar. Referans noktası için "ideal sistem" kavramı en önemli olanı olarak kabul edilebilir.

Verilen referans noktasıyla, alternatiflerin veya kararların bu referans noktaya (ideal noktaya) olabildiğince yakın yerleştirilmesiyle **ÇAKV** problemleri çözülebilir. Böylelikle, problem referans noktalarına olan uzaklıkların ölçülmesi halini alır.

Hedef programlama, verilen hedeflerden olan mutlak uzaklıkların ağırlıklı toplamını kullanarak bu uzaklığı ölçer.

Global Kriterler Yöntemi, bu uzaklığı Minkowski L_p ölçütünü kullanarak ölçer. L_p ölçütü, iki nokta arasındaki uzaklık (f ve f^* referans noktaları) tanımlar. K boyutlu bir uzayda:

$$d_p = \left[\sum_k \left(f_k^* - f_k\right)^p\right]^{1/p} \qquad p \geq 1 \quad k = 1,2,...,K \tag{3.34}$$

olarak tanımlanır.

Burada p artınca d_p uzaklığının azalacağı yani $d_1 \geq d_2 \geq ... \geq d_\infty$ görülmektedir. Toplamı oluştururken en fazla önem en büyük sapmaya verilir.

p=1 durumu bu sapmalar için eşit önemi (ağırlık) ifade etmektedir.

p=2 durumu ise bu sapmaların, en büyük sapmanın en fazla ağırlık almasıyla orantılı ağırlık kazandırıldığı anlamına gelmektedir.

p= ∞ ise en büyük sapmanın uzaklık belirlemede tamamen baskın olduğunu gösterir.

$$d_\infty = \max_k \left| f_k^* - f_k \right|$$

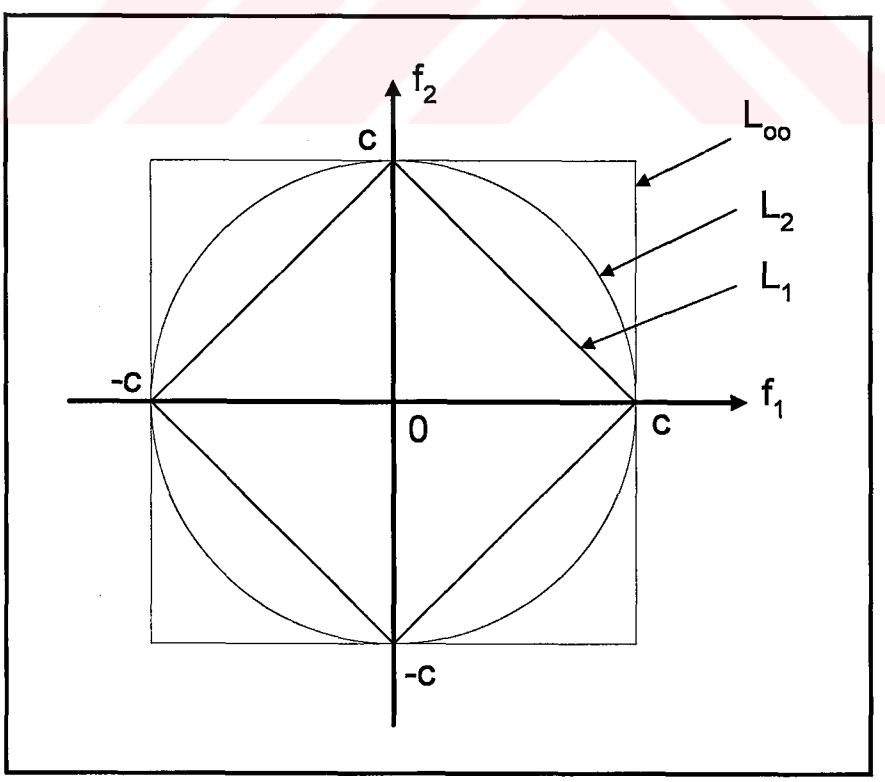
p=1,2 ve ∞ uzaklıkları özellikle işlemsel olarak önemlidir.

d_1 (Manhattan uzaklığı) ve d_2 (Euclid uzaklığı) geometrik anlamda en uzun ve en kısa uzaklıklardır. d_∞ (Tchebycheff uzaklığı) ise sayısal anlamda en kısa uzaklıktır.

Amaçlar arasındaki oransızlık nedeniyle bu uzaklık ailesinin doğrudan kullanımı mümkün değildir. Oransızlığın etkisini ortadan kaldırmak için bu uzaklık ailesi normalize edilmelidir. Yu ve Zeleny [32] (3.34) denklemindeki uzaklık ailesi denklemini referans noktalarını kullanarak normalize etmişlerdir. Denklem şu şekli alır:

$$d_p = \left\{ \sum_k \left[(f_k^* - f_k) / f_k^* \right]^p \right\}^{1/p}, \quad p \geq 1 \quad için \tag{3.35}$$

p parametresinin artması durumunda d_p miktarının azalacağı görülmektedir. d_p' nin diğer bir özelliği, insanın seçim tarzı ile uzaklık fonksiyonu arasındaki ilişkiyi gösteren kayıtsızlık (uzaklık) eğrilerini dikkate alarak ortaya çıkarılabilir. Aynı kayıtsızlık eğrisi üzerindeki herhangi bir nokta, verilen referans noktasından eşit uzaklığa sahiptir. İki boyutlu uzayda referans noktasından c birim uzaklıktaki yerler, p=1,2 ve ∞ için Şekil 3.5' de gösterilmiştir. Şekilden, d_p nin azaldıkça ($d_1 \geq d_2 \geq ... \geq d_\infty$) , s_p yerlerinin genişliğinin ($L_1 \leq L_2 \leq ... \leq L_\infty$) artacağı görülmektedir. Daha büyük p ile daha fazla nokta yer eğrilerinde gösterilebilir. Bu, p parametresinin artmasıyla uzaklık fonksiyonunun daha az özel veya güvenilir olacağını göstermektedir.



Şekil 3.5 Farklı d_p için Kayıtsız Uzaklık Eğrileri

ÇALP problemlerine uzlaşık çözüm elde etmek için, global kriterler yöntemi, ideal çözümlerin referans noktaları olarak verildiği (3.35)' de verilen uzaklık ailesi denklemlerini kullanır. Problem aşağıda verilen yardımcı problemi çözme problemine dönüşür:

$$\min_{\underline{x}\in X} d_p = \left\{\sum_k \left[(f_k^* - f_k)/f_k^*\right]^p\right\}^{1/p}$$

veya (3.36)

$$\min_{\underline{x}\in X} d_p = \left\{\sum_k \left[(f_k(\underline{x}^*) - f_k(\underline{x}))/f_k(\underline{x}^*)\right]^p\right\}^{1/p}$$

$\underline{x}^*$ (pozitif) ideal çözüm ve p=1, 2,..., ∞

Seçilen p, her biri kendi referans noktalarına göre (ideal noktaları) kriterlerin sapmalarının ağırlıklı toplamının minimizasyonundaki uzlaşık çözüme ulaşma şeklini belirler. Denklem (3.36)' da, pozitif ideal çözümden en az uzak olan kriter dikkate alınacaktır. (3.35)' de verilen denklemin normalizasyonu ile yeniden ele alınmaktadır. Böylelikle, uzaklık ailesinin normalize etmek için hem **PIS** (f^*) ve **NIS** ($\bar{f}$) kullanılmış olacaktır. Normalizasyon sonucunda aşağıdaki denklem elde edilir:

$$d_p = \left\{\sum_k \left[(f_k^* - f_k(\underline{x}))/(f_k^* - \bar{f}_k)\right]^p\right\}^{1/p}, \quad p \geq 1 \tag{3.37}$$

ÇOKV problemini daha anlaşılır kılmak için, tekrar elden geçirirsek,

$$\max/\min\,[f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x}), ..., f_k(\underline{x})]$$
$$\underline{x} \in X = \{\underline{x} \mid g_s(\underline{x})\{\geq, 0, \leq\} 0, \quad s = 1, 2, ..., m\} \tag{3.38}$$

$f_j(\underline{x}), j \in J$: Maksimizasyon (fayda) amaçları

$f_i(\underline{x}), i \in J$: Minimizasyon (maliyet) amaçları

$I \cup J = \{1, 2, ..., K\}$

$f_k(\underline{x})$ ve $g_s(\underline{x})$ lineer veya nonlineer yapıda olabilir.

$(k = 1, ..., K$ ve $s = 1, ..., m)$

(3.38) denkleminin çözümünde (3.37) denkleminin uzaklık ailesini kullanabilmek için önce **PIS** (f^*) ve **NIS** (f^-) bulmamız gerekmektedir.

$$\begin{aligned} & f^* = \left\{ \max_{\underline{x} \in X} f_j(\underline{x}), \quad \forall j \quad ve/veya \quad \min_{\underline{x} \in X} f_i(\underline{x}), \quad \forall i \right\} \\ & ve \\ & f^- = \left\{ \min_{\underline{x} \in X} f_j(\underline{x}), \quad \forall j \quad ve/veya \quad \max_{\underline{x} \in X} f_i(\underline{x}), \quad \forall i \right\} \\ & j \in J \quad ve \quad i \in I \end{aligned} \tag{3.39}$$

$f^* = \{f_1^*, f_2^*, \ldots, f_k^*\}$: pozitif ideal çözümler seti

$f^- = \{f_1^-, f_2^-, \ldots, f_k^-\}$: negatif ideal çözümler seti

Aynı zamanda, f^*, f^- K boyutlu amaç fonksiyonları uzayındaki çözüm noktalarıdır.

PIS ve **NIS'** e göre aşağıdaki uzaklık ailesi elde edilir:

$$\begin{aligned} d_p = \Big\{ & \sum_{j \in J} w_j^p \left[(f_j^* - f_j(\underline{x})) / (f_j^* - f_j^-) \right]^p + \ldots \\ & \sum_{i \in I} w_i^p \left[(f_i(\underline{x}) - f_i^*) / (f_i^- - f_i^*) \right]^p \Big\}^{1/p} \end{aligned} \tag{3.40}$$

w_k , $\forall k$ ilgili amaçların göreceli önem (ağırlık) katsayılarıdır. Böylelikle (3.38) denklemini, aşağıdaki yardımcı problemi çözerek çözebiliriz:

$$\begin{aligned} & \max d_p \\ & \underline{x} \in X \quad ve \quad p \geq 1 \end{aligned} \tag{3.41}$$

p=1 olması durumunda, eğer bütün amaç fonksiyonlarının ve kısıtların lineer olması halinde denklem (3.41) basit bir lineer programlama problemidir.

p=2 olması durumunda, denklem (3.41) konvex programlama problemi halini alır ve problemin çözümü, quadratik programlama, iz tarama teknikleri, gradyant metod ve diğer nonlineer programlama teknikleri gibi herhangi bir lokal extremleri bulma yöntemlerinden birinin kullanımıyla çözülebilir.

p=∞ olması durumunda ise, aşağıdaki yardımcı lineer programlama problemi ortaya çıkar:

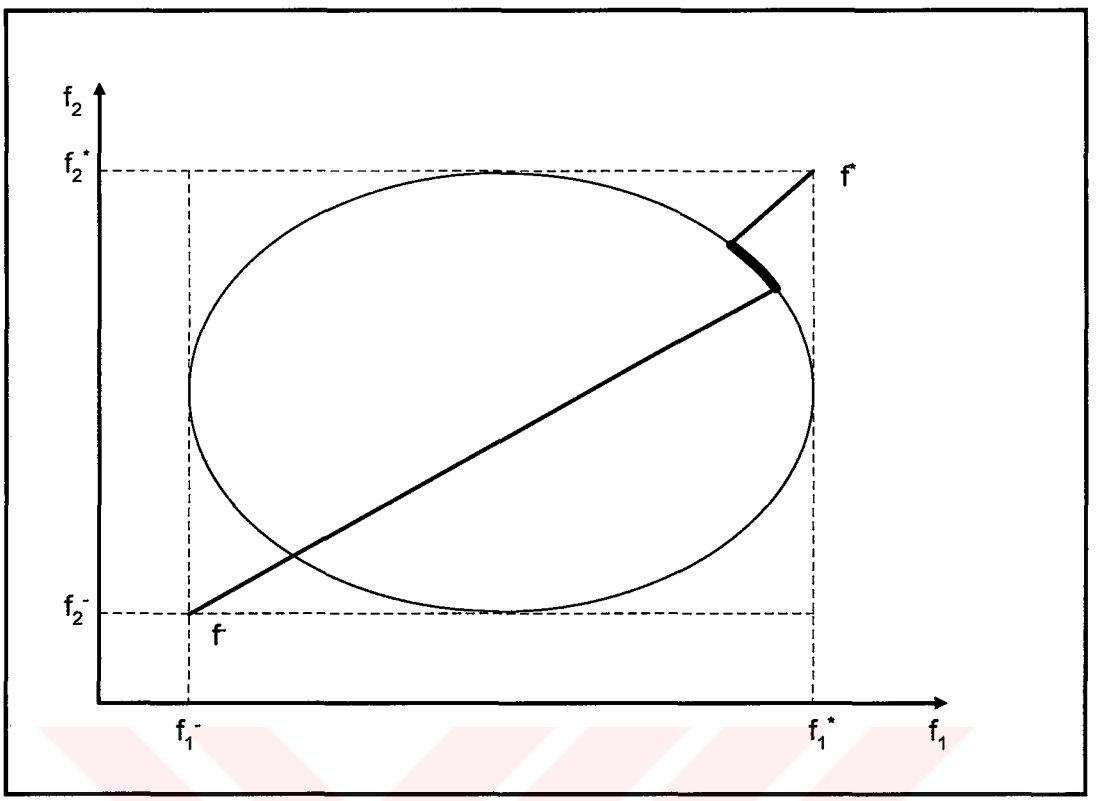
$$\begin{aligned} &\max d_\infty \\ &w_j\left[(f_j^* - f_j(\underline{x}))/(f_j^* - f_j^{'})\right] \le d_\infty \quad \forall j \in J \\ &w_i\left[(f_i(\underline{x}) - f_i^*)/(f_i^{'} - f_i^*)\right] \le d_\infty \quad \forall i \in I \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \tag{3.42}$$

Bu problemde aslında min-max problemidir.

$f_k(\underline{x})$, $\forall$k, amaç fonksiyonlarından herhangi birinin ve $g_s(\underline{x})$, $\forall$s kısıtlarından herhangi birinin nonlineer olması durumunda (3.41) denklemi p değeri ne olursa olsun nonlineer programlama problemi olacaktır. Bu tip nonlineer programlama problemlerinin çözümü için önerilen SUMT (Sequental Unconstrained Minimization Technique) veya GRG (Generalized Reduced Gradient Method) yöntemlerinden birini kullanmaktır [32].

3.3.3 TOPSIS Yöntemi

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi ilk olarak Hwang ve Yun [36] tarafından Çok Bileşenli Karar Verme (**ÇBKV**) problemlerinin çözümü için geliştirildi. Seçilen alternatiflerin **PIS**' den en kısa uzaklıkta ve **NIS**' den en uzak uzaklıkta olması ilkesine dayanmaktadır. En iyi alternatifler veya kararlar **PIS**' den en kısa uzaklıkta olanlar ve **NIS**' den en uzak uzaklıkta olanladır çünkü **PIS**' den en kısa Euclidian uzaklığında olan seçilen alternatif veya karar, bazen **NIS**' e diğer alternatiflerden daha kısa uzaklıkta olabilmektedir. **PIS**' e dayanan uzlaşık çözüm, **NIS**' e dayanana göre tanımlı değildir. Bu durum Şekil 3.6' da gösterilmektedir. Bu nedenle, **ÇAKV** problemlerinin çözümü için uzlaşma prensibi (**TOPSIS**), seçilen alternatifin veya kararın **PIS**' dan en kısa uzaklıkta ve aynı zamanda **NIS**' den en uzak uzaklıkta olması gerektiğidir. Bu ilke, kişinin seçim sürecinde temelde sezgisel ve akla yatkındır.



Şekil 3.6 **PIS** (f^*) ve **NIS** (f^-) Esaslı İki Uzlaşık Çözüm

Bu yöntem için (3.37) denklemindeki uzaklık ailesini kullanmak için ilk önce **PIS** (f^*) ve **NIS** (f^-) bulunmalıdır. Elde edilen **PIS** ve **NIS'** e göre aşağıdaki uzaklık fonksiyonları elde edilir:

$$d_p^{PIS} = \left\{ \sum_{j \in J} w_j^p \left[\frac{f_j^* - f_j(\underline{x})}{f_j^* - f_j^-} \right]^p + \sum_{i \in I} w_i^p \left[\frac{f_i(\underline{x}) - f_i^*}{f_i^- - f_i^*} \right]^p \right\}^{1/p} \tag{3.43}$$

$$d_p^{NIS} = \left\{ \sum_{j \in J} w_j^p \left[\frac{f_j(\underline{x}) - f_j^-}{f_i^* - f_i^-} \right]^p + \sum_{i \in I} w_i^p \left[\frac{f_i^- - f_i(\underline{x})}{f_i^- - f_i^*} \right]^p \right\}^{1/p} \tag{3.44}$$

w_k , k=1, 2, ... , K ilgili amaçların göreceli önem (ağırlık) katsayıları, $p = 1, 2, \ldots, \infty$ dur.

Uzlaşık bir çözüm elde etmek için, birbiriyle çelişen k amaçlı (3.38) denklemi, bu birbiriyle orantılı fakat yine çoğunlukla çelişen iki amaçlı probleme dönüştürülür.

$$\begin{aligned} &\min d_p^{PIS}(\underline{x}) \\ &\max d_p^{NIS}(\underline{x}) \\ &\underline{x} \in X, \quad p = 1,2,...,\infty \end{aligned} \tag{3.45}$$

Burada iki amaç genellikle birbiriyle çeliştiğinden, her birinin aynı zamanda ayrı ayrı optimumunu bulmak mümkün değildir. Her bir amaç sadece optimumunun belli bir "KISIM" ına ulaşır. Buradaki KISIM terimi temelde bulanık (fuzzy)' dır. Böylelikle, bu bulanık teriminin temsili için üyelik fonksiyonları kullanılabilir. Her iki amaç için üyelik fonksiyonları $\mu_1(\underline{x})$ ve $\mu_2(\underline{x})$ olsun ve d_p^* ve d_p' arasında lineer olduğu kabul edilsin.

$$\begin{aligned} &(d_p^{PIS})^* = \min_{\underline{x} \in X} d_p^{PIS}(\underline{x}) \quad ve \quad çözüm\ x^P \\ &(d_p^{NIS})^* = \max_{\underline{x} \in X} d_p^{NIS}(\underline{x}) \quad ve \quad çözüm\ x^N \\ &(d_p^{PIS})' = d_P^{PIS}(x^N) \\ &(d_p^{NIS})' = d_P^{NIS}(x^P) \end{aligned}$$

Denklem (3.45) **PIS** değerleri sonuç tablosunda şu şekilde gösterilebilir:

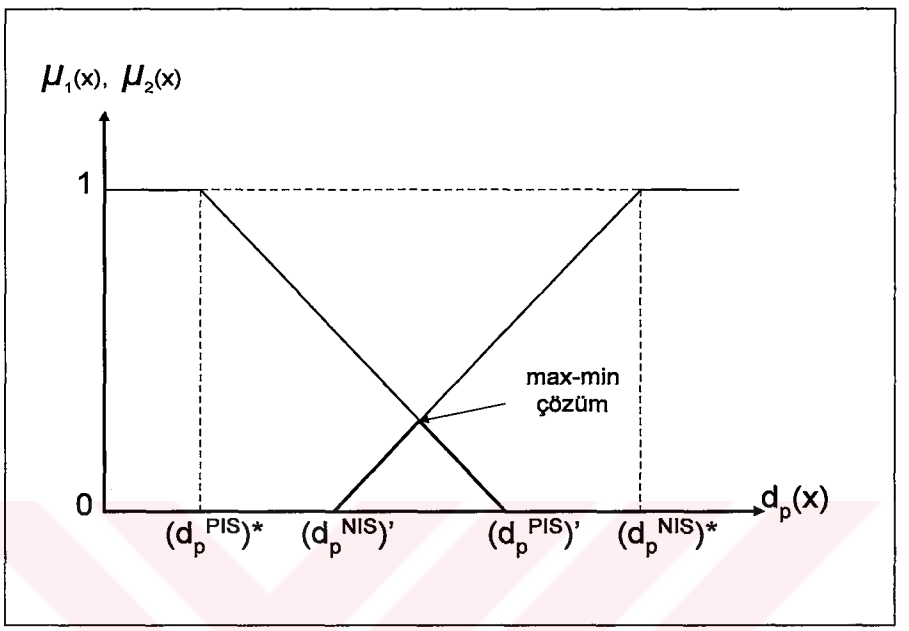
Tablo 3.2 **PIS** Sonuç Tablosu

	d_p^{PIS}	d_p^{NIS}	X
$\min d_p^{PIS}$	$d_p^{PIS*}(x^P)$	$d_p^{NIS'}(x^P)$	x^P
$\max d_p^{NIS}$	$d_p^{PIS'}(x^N)$	$d_p^{NIS*}(x^N)$	x^N

Tercih kavramına dayanarak, **PIS'** den daha kısa uzaklıkta olana daha yüksek derece atanarak $\mu_1(\underline{x})$ ve aynı şekilde **NIS'** den daha uzun uzaklıkta olana daha yüksek derece atanarak $\mu_2(\underline{x})$ üyelik fonksiyonları oluşturulur ve $\mu_1(\underline{x})$, $\mu_2(\underline{x})$ için aşağıdaki gibi elde edilir. Şekil 3.7.

$$\mu_1(\underline{x}) = \begin{cases} 1 & eğer\ d_p^{PIS}(\underline{x}) < (d_p^{PIS})^* \\ [d_p^{PIS}(\underline{x}) - (d_p^{PIS})^*]/[(d_p^{PIS})' - (d_p^{PIS})^*] & eğer\ (d_p^{PIS})^* \le d_p^{PIS}(\underline{x}) \le (d_p^{PIS})' \\ 0 & eğer\ d_p^{PIS}(\underline{x}) > (d_p^{PIS})' \end{cases} \tag{3.46}$$

$$\mu_2(\underline{x}) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } d_p^{NIS}(\underline{x}) > (d_p^{NIS})^* \\ [(d_p^{NIS})^* - d_p^{NIS}(\underline{x})]/[(d_p^{NIS})^* - (d_p^{NIS})'] & \text{eğer } (d_p^{NIS})' \le d_p^{NIS}(\underline{x}) \le (d_p^{NIS})^* \\ 0 & \text{eğer } d_p^{NIS}(\underline{x}) < (d_p^{NIS})' \end{cases} \quad (3.47)$$



Şekil 3.7 $\mu_1(\underline{x})$ ve $\mu_2(\underline{x})$ Üyelik Fonksiyonları

Denklem (3.45) min-max operatörü ile çözülebilir. Tatmin edici çözüm x^*, aşağıdaki problemin çözümüyle elde edilebilir:

$$\mu_D(\underline{x}^*) = \max_{\underline{x} \in X} \{\min(\mu_1(\underline{x}), \mu_2(\underline{x}))\} \quad (3.48)$$

Sonuç olarak, eğer $\alpha = min(\mu_1(\underline{x}), \mu_2(\underline{x}))$ ise, Zimmerman [34] (3.48) denklemi için aşağıdaki denk modeli önermiştir.

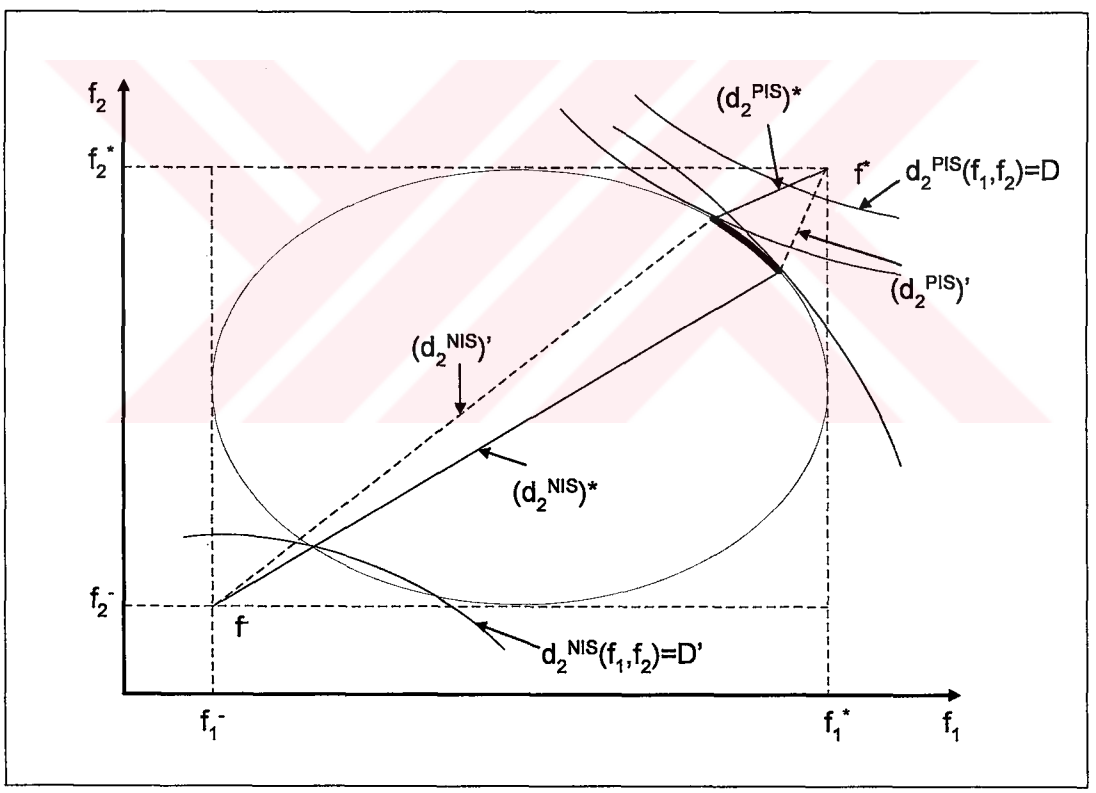
$$\begin{aligned} &\max \alpha \\ &\mu_1(\underline{x}) \ge \alpha \\ &\mu_2(\underline{x}) \ge \alpha \\ &\underline{x} \in X \end{aligned} \quad (3.49)$$

α, **PIS'** den en kısa uzaklıklar ve **NIS'** den en uzun uzaklıklar kriterlerin her ikisi için tatmin edici seviyedir. $p = 2$ olduğu durumda (3.49) denkleminin uzlaşık çözümü Şekil 3.8' deki kalın çizgi üzerinde olacaktır.

$p = \infty$ olması durumunda, aşağıdaki problem elde edilir.

$$
\begin{aligned}
&\min d_{\infty}^{PIS} \\
&\max d_{\infty}^{NIS} \\
&w_j\left[\left(f_j^* - f_j(\underline{x})\right)/\left(f_j^* - f_j^-\right)\right] \le d_{\infty}^{PIS} \\
&w_i\left[\left(f_i(\underline{x}) - f_i^*\right)/\left(f_i^- - f_i^*\right)\right] \le d_{\infty}^{PIS} \\
&w_j\left[\left(f_j(\underline{x}) - f_j^-\right)/\left(f_j^* - f_j^-\right)\right] \ge d_{\infty}^{NIS} \\
&w_i\left[\left(f_i^- - f_i(\underline{x})\right)/\left(f_i^- - f_i^*\right)\right] \ge d_{\infty}^{NIS} \\
&\underline{x} \in X
\end{aligned}
\tag{3.50}
$$

d_{∞}^{PIS} , d_{∞}^{NIS} gerçek uzaklıklar olmayıp sadece k boyutsal uzaklık fonksiyonlarının en küçük ve en büyük bileşenledir. Benzer şekilde üyelik fonksiyonları hesaplanır ve (3.49) denklemi elde edilir.



Şekil 3.8 p=2 için Uzlaşık Çözümler (Kalın Çizgi Üzerinde)

3.4 ÖRNEK - BOW NEHRİ VADİSİ SU KALİTE YÖNETİMİ

3.4.1 Problem Tanımı

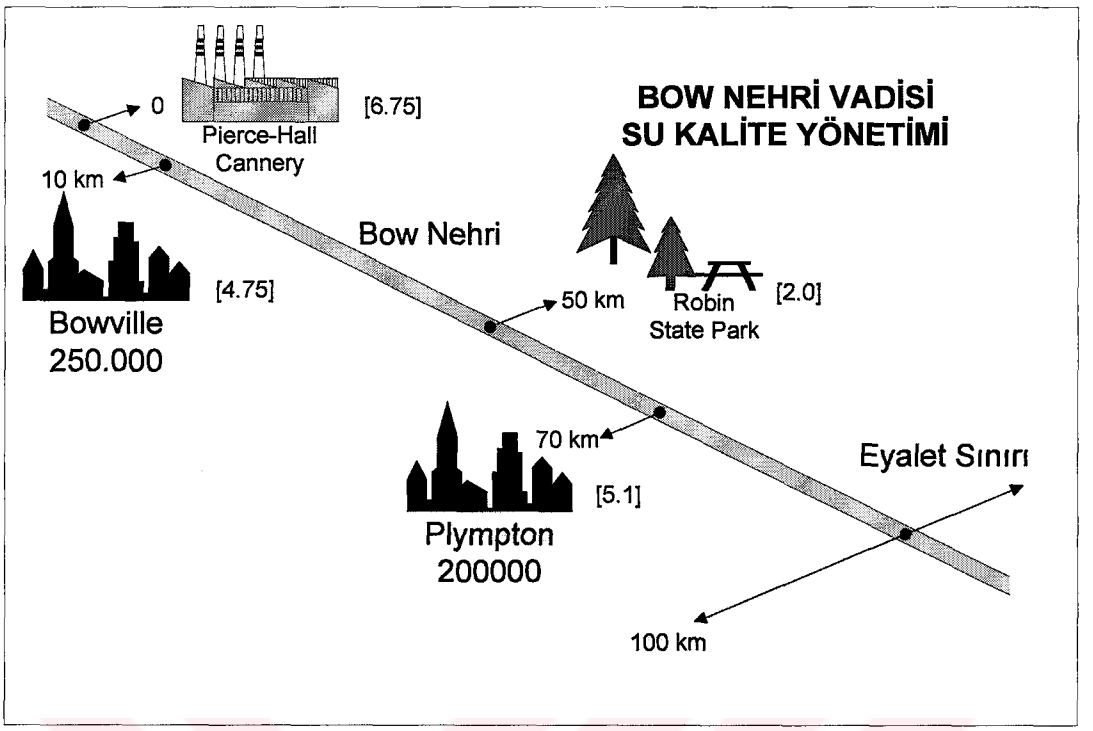
Bu problem, Dorfman ve Jacoby [30] tarafından geliştirilmiş ve Monarchi [28,29] tarafından yeniden gözden geçirilmiş varsayımsal bir durumdur. Temel özellikleri Şekil 3.9' da görülen Bow Nehir Vadisi yatağındaki kirlenme sorunu gözönüne alınmıştır. Endüstriyel kirlenme, vadinin yukarısında yerleşmiş Pierce-Hall Cannery' den kaynaklanmakta ve şehirsel atık kirlenmesi ise Bowville ve Plympton şehirlerinin çıkışlarından gelmektedir. Eyalet Parkı iki şehir arasında bulunmaktadır ve vadinin sonu eyalet sınırının bir parçasıdır.

Su kalitesi özellikleri tek boyuta indirgenmiştir:

Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonu (**DO**). Şehirsel ve endüstri atıklarının içerikleri Oksijen İsteyen Biyokimyasal Maddeler (**BODM**) olarak tarif edilmekte ve ton olarak verilmektedir. Karbon barındıranlar $\mathbf{BODM}_C$ ve nitrojen barındıranlar $\mathbf{BODM}_N$ olarak tanımlanmaktadır.

Pierce-Hall Cannery ve iki şehir, brüt atıklarının **BODM** seviyesini % 30 azaltan ön iyileştirici tesislere sahiptirler. Atıkları daha ileri düzeyde azaltmak için, ilave iyileştirici tesisler kurulmak istenmektedir. İlave iyileştirici tesislerin maliyeti, Pierce-Hall Cannery de yapılan yatırımın geri dönüş oranını azaltacak ve Bowville ve Plympton'daki vergi oranını arttıracaktır.

Bu problem için Karar Verici (**KV**) olarak gözüken Bow Vadisi Su Kirlenme Komisyonu, üç atık kaynağının temsilcilerinden ve eyalet ve federal hükümetten üyelerinde oluşmaktadır. Sorumlulukları, üç kirlilik kaynağındaki atık azaltma gereksinimlerini karşılayarak nehir su kalite kısıtlarını sağlamaktır. Fakat aynı zamanda, ilave iyileştirme maliyetlerinin vadinin ekonomisine etkisini de gözeterek hareket etmeleri gerekmektedir.



Şekil 3.9 Bow Vadisi Su Kalite Yönetimi Temel Özellikleri

Komisyon (**KV**) aşağıdaki altı amacı dikkate almaktadır:

- Bowville daki **DO** seviyesi
- Robin State Park daki **DO** seviyesi
- Plymton daki **DO** seviyesi
- Pierce-Hall Cannery' deki yatırımın geri dönüş yüzdesi (**% YGD)**
- Bowville de vergi oranlarına yapılacak ilave
- Plymton da vergi oranlarına yapılacak ilave

KV' nin ilk problemi, eyalet sınırındaki **DO** seviyesinin 3.5 mg/l üzerinde olmasını sağlayacak atık iyileştirme politikasını belirlemektir.

Başlangıçta, **KV** bütün yerleşimlerde **DO** seviyesinin en azından 6.0 mg/l seviyesine yükselmesini istemektedir.

KV, Pierce-Hall daki yatırımın geri dönme oranının % 6.5' un üzerinde olmasını sürdürmeyi arzulamaktadır

Bowville ve Plympton daki vergi oranlarını 1.5$/1000$ katma değerinin altında tutmayı istemektedir.

Pierce-Hall Cannery, Bowville ve Plympton daki atık boşaltımının iyileşme seviyesi (sırasıyla x_1, x_2, x_3) belirlenmesi gereken karar değişkenleridir.

Nehirdeki organik atıkların ayrışması, **DO** seviyesini, nehirdeki atıkların yoğunluğuna orantılı oranda azaltır.

İyileşme seviyeleri, $\mathbf{BODM}_C$ terimleriyle tanımlanmakta ve aşağıdaki bağıntıyla verilmektedir:

$$w_i = \frac{0.39}{1.39 - x_i^2} \tag{3.51}$$

x_i : kaynak i de brüt $\mathbf{BODM}_C$ miktarına orantılı iyileşme

w_i: kaynak i de brüt $\mathbf{BODM}_N$ miktarına orantılı iyileşme

j noktasındaki su kalitesi q_j, (**DO** seviyesi) şu bağıntıyla hesaplanmaktadır:

$$q_j = \bar{q}_j - \sum_i [d_{ij}^c . L_i^c . (x_i - 0.3) + d_{ij}^n . L_i^n . (w_i - 0.3)] \tag{3.52}$$

d^c_{ij} :i ve j noktası arasındaki karbon taşınım katsayısı

d^n_{ij} :i ve j noktası arasındaki nitrojen taşınım katsayısı

L^c_i : i. Kaynak için $\mathbf{BODM}_C$ yükü

L^n_i : i. Kaynak için $\mathbf{BODM}_C$ yükü

x_i : L^c_i de oransal azalma

w_i : L^n_i de oransal azalma

$\bar{q}_j$: j noktasındaki **DO** seviyesi

i,j : i=1,2,3 Pierce-Hall Cannery, Bowville, Plymton' u temsil etmektedir.

j=1,2,3, 4 Bowville, Robin Eyalet Parkı, Plympton, Eyalet Sınırı

d^c_{ij}, d^n_{ij} transfer katsayıları Tablo 5.1' de verilmektedir. Atık seviyeleri Tablo 5.2' de görülmektedir.

Tablo 3.3 Karbon (C) ve Nitrojen (N) Taşınım Katsayıları, d_{ij}

	Bowville		Robin Eyalet Parkı		Playmton		Eyalet Sınırı	
	C	N	C	N	C	N	C	N
P.H.Cannery	-5.68	-	-1.31	-3.15	-0.442	-0.771	-0.0830	-0.073
Bowville	0	0	-2.18	-5.53	-0.764	-1.600	-0.0145	-0.162
Plympton	-	-	-	-	0	0	-3.4900	-7.330

Tablodaki bütün değerler 10^{-5} ile çarpılacaktır. Örnek olarak, Pierce-Hall Cannery Bowville arasındaki karbon iletim katsayısı: $-5.68.10^{-5}$ (mg/l)(kg/gün) şeklindedir.

Tablo 3.4 Şehirlerin Günlük **BODM** Atık Seviyesi [kg/gün]

	Brüt		Ön İyileştirmeden Sonra	
	$BODM_C$	$BODM_N$	$BODM_C$	$BODM_N$
Pierce Hall Cannery	40000	28000	28000	19000
Bowville	128000	48000	89600	33600
Plaympton	95700	35700	67000	25000

Danışman şirket, % 30' un üzerindeki $\mathbf{BODM}_C$ azalma oranına ile her üç bölge için artımsal maliyetler arasında bir bağıntı geliştirmiştir. Bu bağıntıya göre yıllık brüt ilave maliyet:

Pierce-Hall Cannery:

$$C_1 = \left(\frac{59}{1.09 - x_1^2}\right) - 59 \quad 1000\$/yıl \tag{3.53}$$

Bowville:

$$C_2 = \left(\frac{532}{1.09 - x_2^2}\right) - 532 \quad 1000\$/yıl \tag{3.54}$$

Plympton:

$$C_3 = (\frac{450}{1.09 - x_3^2}) - 450 \ \ 1000\$/yıl \tag{3.55}$$

Bununla birlikte her kuruluş için brüt maliyetleri azaltan hafifletici faktörler de söz konusudur.

Bunlar:

Federal şirket vergisi Pierce-Hall Cannery' in vergisini % 40 azaltacaktır. Bowville ve Plympton için brüt maliyetler, Federal Su Kirlilik Kontrol Birliğinin belediyelere toplam masrafın yarısı tutan inşaat masraflarının % 50' sini karşılayacak parayı bağışlamasıyla azalacaktır. Böylelikle her şehir toplam masrafın % 75' ini ödemiş olacaktır.

Pierce-Hall Cannery yılda ortalama 375.000 $ net kar etmektedir. Bu da 5 milyon dolar tutarındaki toplam hisseye sahip hissedarların % 7.5' lik getirisidir. Ayrıca şu kabuller yapılacaktır:

Satışlar önceden görülebilir bir geleceğe kadar stabil olacaktır. Üretim masrafları değişmeyecek ve rekabet baskısı nedeniyle fiyatlar artmayacaktır. Sonuç itibariyle, atık iyileştirme masrafları net karı azaltacaktır. Maliyet C_1 ile yatırımda geri dönme oranı (r) arasındaki bağıntı şu şekilde olmaktadır.

$$r = \frac{100}{5.000.000}(375.000 - 0.6.C_1) \tag{3.56}$$

Bowville' deki ilave atık iyileştirme masrafları şehrin vergi oranını etkileyecektir. Şehir planlama bölümü, vergi oranındaki değişim (Δt) ile masraf (C) arasında şu şekilde bir bağıntı geliştirmiştir:

$$\Delta t_2 = (2.4 * 10^{-3})(0.75.C_2) \tag{3.57}$$

Δt, katma değer olarak 1000$ başına artımı göstermektedir.

Benzer olarak, Plympton için:

$$\Delta t_3 = (3.33 * 10^{-3})(0.75.C_3) \tag{3.58}$$

Amaçlar ve Kısıtlar

Amaç 1:

Bowville için **DO** seviyesi ($f_1 \geq 6$ mg/l)

$$f_1 = 4.75 + (5.68*10^{-5})(4.0*10^4)(x_1 - 0.3) \tag{3.59}$$

Amaç 2:

Robin Eyalet Parkı için **DO** seviyesi ($f_2 \geq 6$ mg/l)

$$\begin{aligned} f_2 = q_2 &= 2.0 + (1.31*10^{-5})(4.0*10^4)(x_1 - 0.3) \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots + (3.15*10^{-5})(2.8*10^4)(w_1 - 0.3) \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots + (2.18*10^{-5})(1.28*10^5)(x_2 - 0.3) \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots + (5.53*10^{-5})(4.8*10^4)(w_2 - 0.3) \end{aligned} \tag{3.60}$$

Amaç 3:

Plympton için **DO** seviyesi ($f_3 \geq 6$ mg/l)

$$\begin{aligned} f_3 = q_3 &= 5.1 + (0.442*10^{-5})(4.0*10^4)(x_1 - 0.3) \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots + (0.771*10^{-5})(2.8*10^4)(w_1 - 0.3) \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots + (0.764*10^{-5})(1.28*10^5)(x_2 - 0.3) \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots + (1.60*10^{-5})(4.8*10^4)(w_2 - 0.3) \end{aligned} \tag{3.61}$$

Amaç 4:

Pierce-Hall Cannery için yatırımın geri dönüş yüzdesi ($f_4 \geq$ % 6.5)

$$f_4 = r = \frac{10^2}{5*10^6}\left[(3.75*10^5)\right] - 0.6.\left(\frac{59}{1.09 - x_1^2} - 59\right)*10^{-3} \tag{3.62}$$

Amaç 5:

Bowville' de vergi oranına olan ilave ($f_5 \leq 1.5$)

$$f_5 = \Delta t_2 = (2.4*10^{-3}).(0.75).\left(\frac{532}{1.09 - x_2^2} - 532\right) \tag{3.63}$$

Amaç 6:

Plympton' da vergi oranına olan ilave ($f_6 \leq 1.5$)

$$f_6 = \Delta t_3 = (3.33*10^{-3}).(0.75).(\frac{450}{1.09 - x_3^2} - 450) \tag{3.64}$$

Kısıtlar:

$$\begin{aligned} q_3 &= 1.0 + (8.3*10^{-7})(4.0*10^4)(x_1 - 0.3) \\ &.....+ (7.3*10^{-7})(2.8*10^4)(w_1 - 0.3) \\ &.....+ (1.45*10^{-7})(1.28*10^5)(x_2 - 0.3) \\ &.....+ (1.62*10^{-6})(4.8*10^4)(w_2 - 0.3) \\ &.....+ (3.49*10^{-5})(9.57*10^4)(x_3 - 0.3) \\ &.....+ (7.33*10^{-5})(3.57*10^4)(w_3 - 0.3) \geq 3.5 \end{aligned} \tag{3.65}$$

Sınırlar:

$$0.3 \leq x_i \leq 1.0 \quad \text{i=1,2,3}$$

Yardımcı Bağıntı:

$$w_i = \frac{0.39}{1.39 - x_i^2} \quad \text{i=1,2,3} \tag{3.66}$$

Problemin Özeti:

Karar Değişkenleri:

x_1, x_2, x_3 : amaçları, kısıtları, hedefleri, tatmin edecek belirlenmesi gereken karar değişkenleri

Amaçlar:

$$f_1 = 4.75 + 2.27*(x_1 - 0.3)$$

$$\begin{aligned} f_2 = {} & 2.0 + 0.524*(x_1 - 0.3) + 0.882*(w_1 - 0.3) + ... \\ & 2.79*(x_2 - 0.3) + 2.65*(w_2 - 0.3) \end{aligned}$$

$$f_3 = 5.1 + 0.177*(x_1 - 0.3) + 0.216*(w_1 - 0.3) + \ldots$$
$$0.978*(x_2 - 0.3) + 0.768*(w_2 - 0.3)$$

$$f_4 = 7.5 - 0.012*\left(\frac{59}{1.09 - x_1^2} - 59\right)$$

$$f_5 = 1.8*10^{-3}*\left(\frac{532}{1.09 - x_2^2} - 532\right)$$

$$f_6 = 2.5*10^{-3}*\left(\frac{450}{1.09 - x_3^2} - 450\right)$$

Kısıtlar:

$$q_3 = 1.0 + 0.0332*(x_1 - 0.3) + 0.0204*(w_1 - 0.3)$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots + 0.0186*(x_2 - 0.3) + 0.778*(w_2 - 0.3)$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots + 3.34*(x_3 - 0.3) + 2.62*(w_3 - 0.3) \geq 3.5$$

Sınırlar:

$0.3 \leq x_i \leq 1.0 \quad i=1,2,3$

Yardımcı Bağıntı:

$$w_i = \frac{0.39}{1.39 - x_i^2} \quad i=1,2,3$$

Her Bir Amaç İçin Uygun Aralık:

$0 \leq f_i \leq 8.5 \quad i=1,2,3$

$0 \leq f_4 \leq 7.5$

$0 \leq f_5 \leq 10$

$0 \leq f_6 \leq 12$

Her Bir Amacın Hedefi:

$f_i \geq 6.0 \quad i=1,2,3$

$f_4 \geq 6.5$

$f_5 \leq 1.5$

$f_6 \leq 1.5$

KV' nin Başlangıç İstek Seviyeleri: (Hedeflerle aynı kabul edilmiştir.)

$İS_i = 6.0 \quad i=1,2,3$

$İS_4 = 6.5$

$İS_5 = 1.5$

$İS_6 = 1.5$

Amaçlar ve Boyutsuz Kazanım Göstergeleri:

$$f_i \geq İS_i \Rightarrow d_i = \frac{İS_i}{f_i(x)} \quad i=1,2,3$$

$$f_i \leq İS_i \Rightarrow d_i = \frac{f_i(x)}{İS_i} \quad i=5,6$$

3.4.2 SEMOPS Yöntemi İle Çözüm

Bölüm 3.4' te ele alınan örnek problemin çözümü için geliştirilen MATLAB tabanlı program ilgili algoritma ile etkileşimli biçimde sonuçlar üretmektedir. Sonuçların her seferinde KV tarafından anlaşılabilmesi ve yorum yapılarak isteklerin tekrar programa verilebilmesi için bir ara yüz geliştirilmiş ve bu ara yüz ile KV ve program arasında karşılıklı bir etkileşim sağlanmış olmaktadır. Bu yöntemin de amacı olan bu etkileşim, normalde analist ile KV arasında gerçekleşirken bu program ve ara yüz sayesinde bilgisayar ile KV arasında gerçekleşmektedir.

Çözüm Çevrimleri

1. Çevrim:

Esas Problem:

$$\min s_1 = \sum_{t=1}^{6} d_t$$

$$\underline{x} \in X$$

Yardımcı Problemler : l = 1, 2, ..., 6

$$\min s_{1l} = \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq l}}^{6} d_t$$

$$\underline{x} \in X$$

$f_l(\underline{x}) \geq \text{İS}_l$ (eğer l = 1, 2, 3 veya 4)

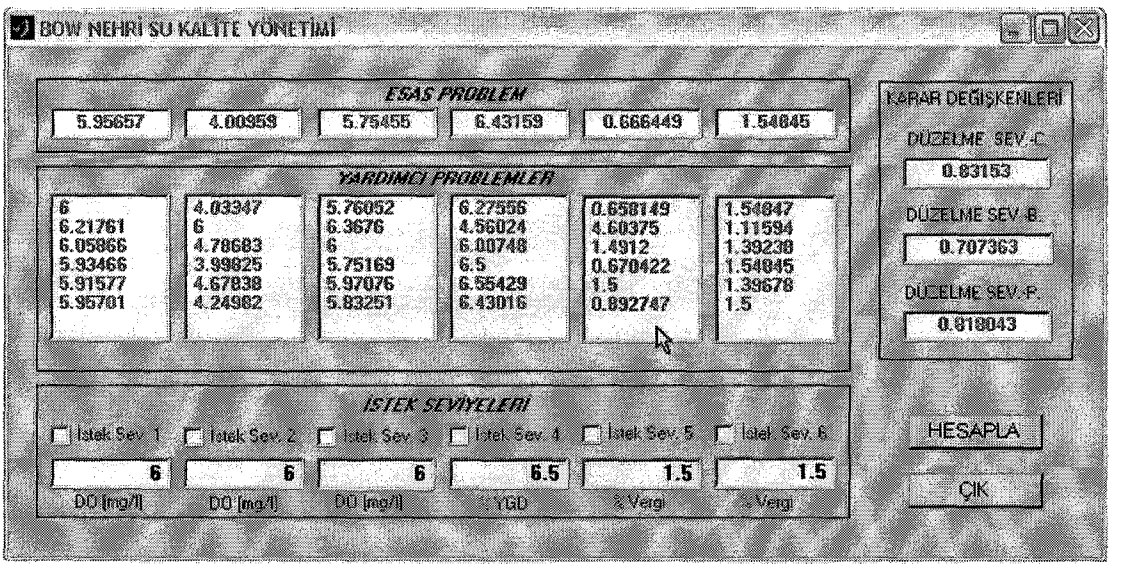
veya

$f_l(\underline{x}) \leq \text{İS}_l$ (eğer l = 5 veya 6)

Başlangıç istek seviyeleri Şekil 3.10' da görüldüğü gibidir.

Bu problem bir nonlineer programlama problemidir ve çözümü için oluşturulan algoritmanın içinde MATLAB Programlama dilinin Optimizasyon Toolbox program paketi kullanılmıştır. Yukarıda gösterilen esas ve yardımcı problemlerin çözümü bu toolbox ın *fmincon* fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar esas, yardımcı problemler ve ayrıca karar değişkenleri Şekil 3.10' da görülebilir.

Şekil 3.10' un incelenmesi sonucunda, 6. amaç fonksiyonundaki vergi değişim yüzdesi diğer amaçların sağlanmasından bağımsız görünmektedir veya başka bir deyişle diğer amaçların sağlanmasında etkisizdir. Çünkü Plymptondaki $BODM_c$ seviyesindeki gerekli azalma ağırlıklı olarak eyalet sınırındaki DO sınırlamasından etkilenmektedir. Bu nedenle, 6. amaç için uygun bir istek seviyesi belirleyip bunu kısıt olarak atamak uygun olacaktır. Bu istek seviyesi için 1.55 belirlenmesi normal hedef seviyesi olan 1.5' den çok farklı olmamakta ve diğer amaçlar için çok farklı sonuçlar vermemektedir. Dolayısıyla yeni istek seviyesi olarak 1.55 belirlenir.



Şekil 3.10 1. Çevrim: Problemin Başlangıç Sonuçları

Çevrim 2:

Esas Problem:

$$\min s_{2.6} = \sum_{t=1}^{5} d_t$$

$$\underline{x} \in X$$

$$f_6(\underline{x}) \leq 1.55$$

Yardımcı Problemler : l = 1, 2, ..., 6

$$\min s_{2.6l} = \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq l}}^{6} d_t$$

$$\underline{x} \in X$$

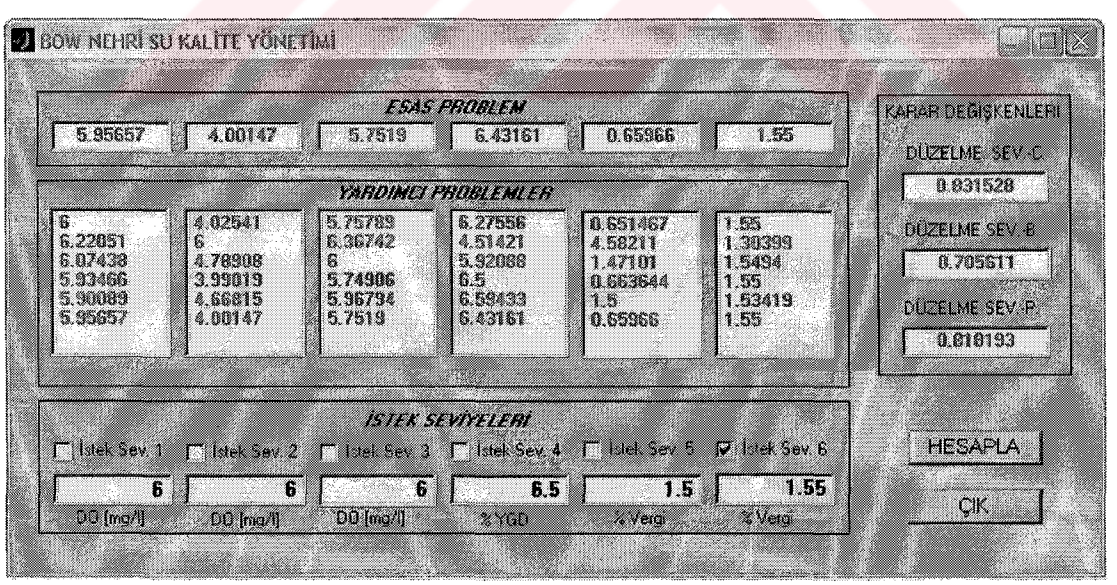
$$f_6(\underline{x}) \leq 1.55$$

$$f_l(\underline{x}) \geq \text{İS}_l \qquad \text{(eğer l = 1, 2, 3 veya 4)}$$

veya

$$f_l(\underline{x}) \leq \text{İS}_l \qquad \text{(eğer l = 5 veya 6)}$$

Problem yine aynı algoritma ile çözülür ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.11' de görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken yardımcı problemler içindeki 6. problem ile esas problem sonuçlarının aynı olduğudur. Bunun nedeni, 6. problemin çözümünün esas problemin çözümünün aynı olmasıdır. Dolayısıyla yardımcı problemler içinde istek seviyesi sabitlenmiş amacın ilgili satırı yokmuş gibi düşünülebilir. Çözüme giderken diğer sonuçlar dikkate alınmalıdır. Elde edilen sonuçların irdelenmesi ile görülmektedir ki f_2 (4.02541 6 4.78908 3.99019 4.66815 4.00147) amacının sonuçları, sadece ikinci amacın kısıt olarak kabul edildiği ikinci yardımcı problemin dışında, KV' nin istek seviyesi 6.0 mg/l seviyesinden oldukça düşüktür. Yardımcı problem 2 nin sonuçlarından, Bowville' deki vergi oranının f_5=4.58211 olduğu görülmektedir. $f_2 \geq 6$ mg/l olarak seçilmesi durumunda f_5 in ciddi miktarda etkileneceği anlaşılabilir. Bu nedenle State Park' taki DO seviyesi için belirlenen değer makul bir değere çekilebilir. Bu değer de standartlarda belirtilen doğal hayat için ve su temaslı sporları da içeren eğlence amaçları için uygun olan 5 mg/l olarak seçilebilir. Bu istek seviyesi ikinci amaç için KV tarafından benimsenip, bu amacın da kısıt olarak atanmasından sonra bir sonraki çevrime geçilir.



Şekil 3.11 2. Çevrim: Problemde 6. İstek Seviyesinin Kısıt Olarak Atanması

Çevrim 3:

Esas Problem:

$$\min s_{3.62} = \sum_{\substack{t=1 \\ t\neq 2}}^{5} d_t$$

$$\underline{x} \in X$$

$$f_6(\underline{x}) \leq 1.55$$

$$f_5(\underline{x}) \leq 5.0$$

Yardımcı Problemler : l = 1, 2, ..., 6

$$\min s_{3.62l} = \sum_{\substack{t=1 \\ t\neq 2 \\ t\neq l}}^{6} d_t$$

$$\underline{x} \in X$$

$$f_6(\underline{x}) \leq 1.55$$

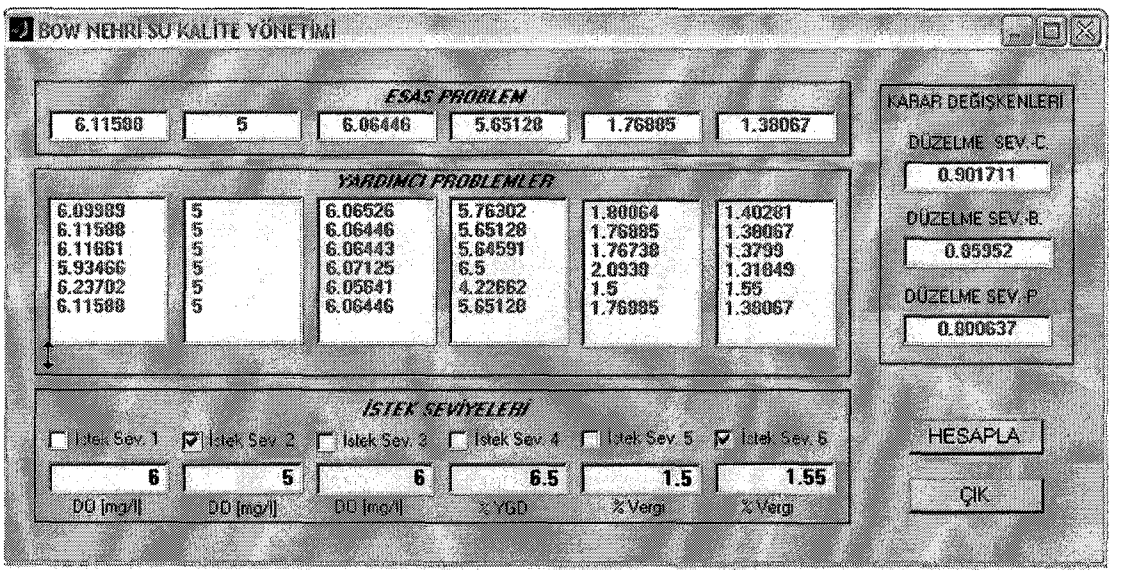
$$f_5(\underline{x}) \leq 5.0$$

$$f_l(\underline{x}) \geq \text{İS}_l \qquad \text{(eğer l = 1, 2, 3 veya 4)}$$

veya

$$f_l(x) \leq \text{İS}_l \qquad \text{(eğer l = 5 veya 6)}$$

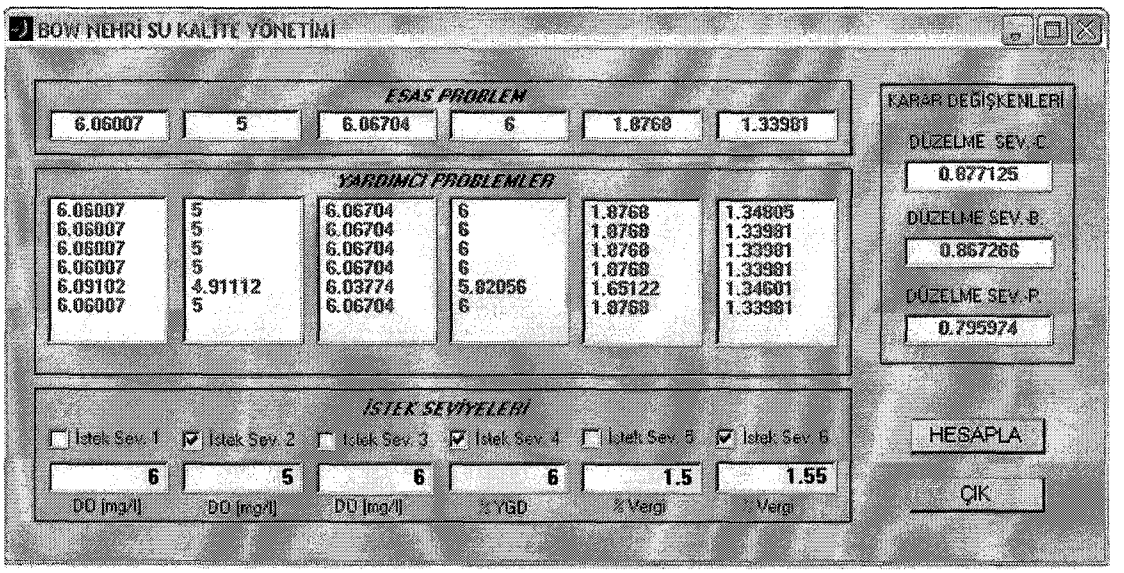
3. Çevrimin sonuçları Şekil 3.12 de görülmektedir. Yardımcı problemlerden 2. ve 6. sı esas problemin aynı sonuçlarına sahiptir. Çünkü bu yardımcı problemler ile esas problemlerin yapısı ve kısıtları birebir aynıdır. Şekilden f_4 amacının değerinin, $f_4 \geq$ 6.5 kısıt olarak belirlendiği 4. yardımcı problemdeki değeri haricinde oldukça düşük olduğu görülmektedir. KV, P.H.Cannery' nin ekonomik varlığının devamının bütün vadinin ve özellikle Bowville' in refahı için önemli olduğunun farkındadır. P.H.Cannery' nin toplam iş gücü Bowville' de yaşamaktadır. KV bu durumu dikkate alarak P.H. Cannery için belirlenen % YGD kabul edilebilir bir seviyede belirleyip bunu kısıtlar içine katacaktır. Şeklin incelenmesiyle, KV % YGD olarak 6.0 seviyesini uygun bulur. Bir sonraki çevrime geçilir.



Şekil 3.12 3. Çevrim: İlave Olarak 2. İstek Seviyesinin Kısıt Olarak Atanması

Çevrim 4:

Bu çevrimin sonuçları Şekil 3.13 üzerinde görülmektedir. Sonuçların değerlendirilmesiyle, 5. yardımcı problem için 2. ($f_2 \geq 5$) 4. ($f_4 \geq 6$) ve 5. ($f_5 \geq 1.5$) amaçlar için belirlenen kısıt durumlarının bozulmuş olduğu fark edilmektedir. Bu durumda f_5 için belirlenen istek seviyesi $İS_5$ yeniden belirlenmeli veya önceden sabitlenmiş olan istek seviyeleri ($İS_2 = 5$, $İS_4 = 6$, $İS_6 = 1.55$) yeniden gözden geçirilmelidir. $İS_5$ arttırılması bu durum için çok garip olmayacaktır. Bowville, Plympton' a göre vergi olarak zaten bir avantaja sahiptir. KV, Bowville' deki vergi seviyesini yeniden düzenlemeyi öngörür. Şekilde f_5 için elde edilen değerlerin incelenmesi sonucunda $İS_5$' i 1.95 seviyesine yükseltilir ve bir sonraki çevrime geçilir.

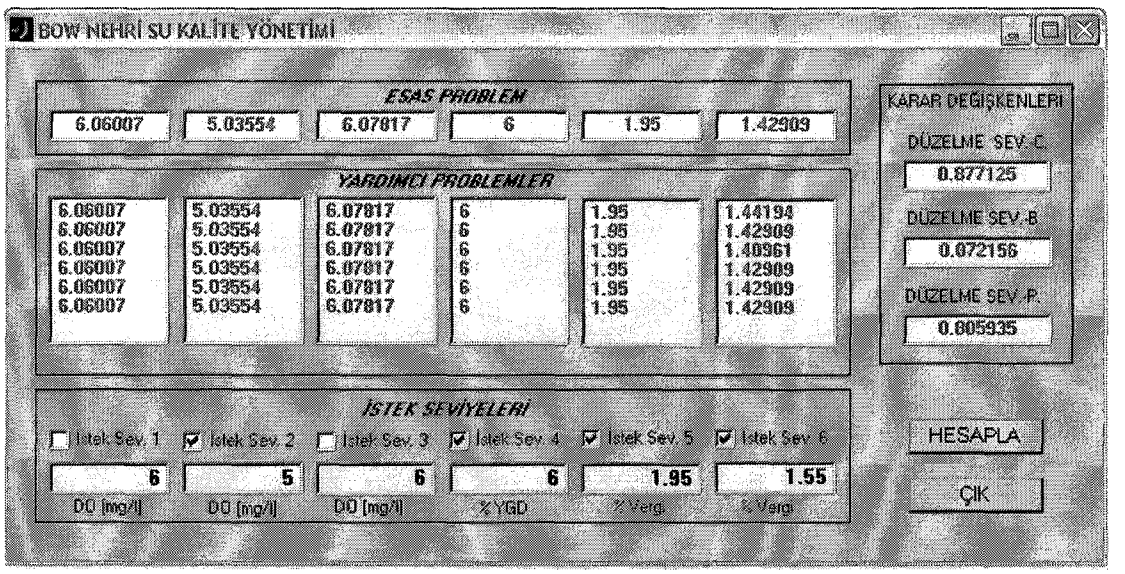


Şekil 3.13 4. Çevrim: İlave Olarak 4. İstek Seviyesinin Kısıt Olarak Atanması

Çevrim 5:

Bu çevrimin sonuçları Şekil 3.14' den görülebilmektedir. Sonuçların incelenmesi sonucunda 1. ve 3. yardımcı problemin 6. amaç fonksiyonunun sonuçları dışında diğerleri tamamen aynıdır. Farklı olan sonuçlarda birbirlerine yakın olup tatmin edici düzeydedir. KV burada işleme son verip, bu değerleri sonuç değerleri olarak kabul eder. Elde edilen iyileştirme seviyeleri P.H. Cannery için % 87.7, Bowville için % 86.7 ve Plympton için ise % 79.6 olmaktadır. Amaç fonksiyonlarının değerleri ise

$\underline{f}$ = (6.06, 5.05, 6.08, 6, 1.95, 1.43) dir.



Şekil 3.14 5. Çevrim: İlave Olarak 5. İstek Seviyesinin Kısıt Olarak Atanması

Bu yöntemin kullanılması durumunda amaç fonksiyonlarının değerlerinin alt ve üst sınırları dikkatli seçilmelidir. Aksi takdirde yanlış sonuçlar üretilmektedir. Bu yöntemin en arzu edilmeyen durumu, yardımcı problemlerin çözümü sırasında uygun olmayan kısıt setlerinin bulunmasıdır. Bu gibi durumda, uygun istek seviyeleri kümesinin belirlenmesi rasgele ve düzensiz olmaktadır. Ayrıca yardımcı problemlerin çözümü sırasında istek seviyelerinden bir veya birkaçının çelişmeyen yapıda olması durumunda baskın çözüm elde etme ihtimali vardır.

Bu yöntemin avantajları ise

- Nonlineer problemlerin çözümü için kullanılabilir
- KV, amaçlar için her bir hesaplama çevriminde arzu edilen başarı seviyelerini tekrar değerlendirebilmektedir.

3.4.3 TOPSIS Yöntemi İle Çözüm

Bu yöntemin uygulaması için Bölüm 3.4' de örnek olarak verilen Bow nehri su kalite yönetimi problemi ele alınmıştır. Yöntemin algoritması MATLAB ortamında geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi ve değişik durumların probleme girdi olarak verilebilmesi için çalışan algoritmaya bir kullanıcı arayüzü oluşturulmuştur. Bu sayede sonuçlar okunur olmakta ve değerlendirilmesi daha hızlı yapılabilmektedir. KV' nin sonuçtan memnun olmaması durumunda, istenen değerler değiştirilip, programa arayüz vasıtasıyla girilmektedir. Bu program ve arayüzü, probleme yönelik olup, arkasında çalışan algoritma genel yapıdadır. Herhangi başka bir problem için bu algoritma, program ve arayüzde yapılacak küçük değişikliklerle tekrar kullanılabilir.

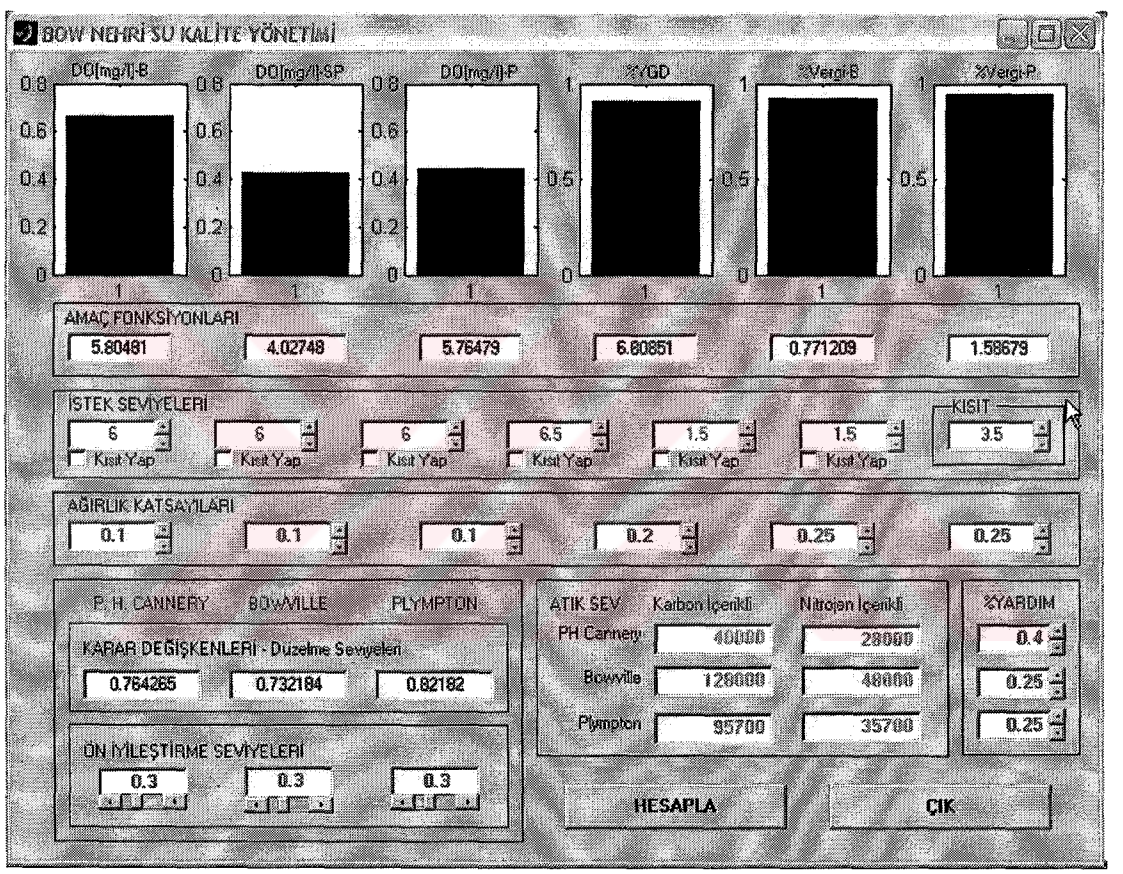
Bu yöntemin uygulanması sırasında elde edilen sonuç PIS ve NIS sonuç tabloları ve bu tabloların oluşturulmasıyla elde edilen uzaklık ailesi fonksiyonları d_p^{PIS} , d_p^{NIS}, yöntem için geliştirilen program içinde alt fonksiyonlar olarak tanımlanmıştır. İstenen sonuçların elde edilmesinde bu değerlerin görülmesi ve üzerinde değişiklik yapılmasını gerek olmadığı için değerler sonuç ekranında gösterilmemiştir. Programının örnek çıktısı Şekil 3.15' de verilmiştir.

Şekil 3.15' de gösterilen durum, programın başlangıç şartları olup amaç fonksiyonları için verilen ağırlık katsayıları [0.1, 0.1, 0.1, 0.2, 0.25, 0.25] şeklindedir. Ağırlık katsayılarının toplamı 1 olmalıdır. Bu ağırlık katsayılarından 6 amaca göre öncelik şehirlerdeki vergi oranlarına verilmiş, daha sonra KV, Pearce-Hall Cannery deki % YGD esas almıştır. Üç noktadaki DO seviyesi ise eşit ağırlıkta olup en az öncelikli durumdadır. Problemin çözümü için belirlenen istek seviyeleri değiştirilebilmekte ve her bir seviye ayrıca kısıt olarak belirlenebilmektedir. Bu da problemin çözümüne esneklik katmakta ayrıca karar verici için daha geniş düşünebilme ayrıcalığı sağlamaktadır.

Belirlenen bu sıralama ve ağırlık katsayılarına göre elde edilen sonuçlar, üç bölge için çözünmüş oksijen (DO) seviyeleri 5.80 mg/l, 4.02 mg/l, 5.76 mg/l olarak elde edilmiştir. Bu değerler, ağırlık katsayılarının en düşük değere sahip olmasından dolayı belirlenen 6 mg/l seviyesinden düşük çıkmıştır. Yatırımın geri dönüş yüzdesi için istenen % 6.5 değer, elde edilen % 6.81 değerle tutturulmuştur. Vergi

oranlarındaki artış için belirlenen % 1.5' den küçük olma şartı ise bir şehir için % 0.77 değeri ile yeterince iyi sağlanırken, ikinci şehir için % 1.58 gibi çok küçük bir aşma ile sonuç alınmıştır. Karar değişkenleri olarak [0.7642, 07321, 0,8218] değerleri bulunmuştur. Bu değerler, yapılan yatırımdan sonra atık kaynaklarındaki iyileşme yüzdelerini göstermektedir.

Bu sonuçların karar verici için uygun sonuçlar olmaması durumunda katsayıların değiştirilmesi ile farklı sonuçlar tekrar elde edilebilir.



Şekil 3.15 TOPSIS Yöntemi ile Elde Edilen Çözüm

Şeklin üst kısmında görülen grafikler ise her amaç fonksiyonun başarı oranını gösteren grafiklerdir. Başarı oranı hesaplanırken aşağıdaki ifade dikkate alınmıştır.

$$BO = (f_j - f_j^-)/(f_j^* - f_j^-) \qquad \text{maksimize edilecek amaç fonksiyonları}$$
$$j \in J$$

$$BO = (f_i^- - f_i)/(f_i^- - f_i^*) \qquad \text{minimize edilecek amaç fonksiyonları}$$
$$i \in I$$

f_j : Maksimize edilecek amaç fonksiyonunun değeri

f_j^* : Maksimize edilecek amaç fonksiyonunun PIS değeri

f_j^- : Maksimize edilecek amaç fonksiyonunun NIS değeri

f_i : Minimize edilecek amaç fonksiyonunun değeri

f_i^* : Minimize edilecek amaç fonksiyonunun PIS değeri

f_i^- : Minimize edilecek amaç fonksiyonunun NIS değeri

4. DİNAMİK ÇAKV PROBLEMLERİ

4.1 Giriş

Dinamik yapıdaki ÇAKV problemleri, amaçların ve şartların her an değişebileceği, sistemin performansı için bu amaçlara uygun kararların her an ve çok çabuk alınması gerektiği durumdaki problemlerdir. Çalışmada ikinci örnek olarak ele alınan asansör sisteminin grup kontrolü bu yapıda bir sistem olarak görülebilir. Sistem dinamik bir yapıdadır. Kontrol edilmek istenen sistemin durumları her an değişebilmekte ve bu durumları oluşturan çağrılar sisteme giriş olarak her an yapılabilmektedir. Bu sistemin optimum kontrolü için sürekli değişen kabin şartlarının ve binanın trafik durumuna göre öncelik sırası değişen amaçların her an dikkate alınması ve hesapların buna göre yapılıp, kararın elde edilen sonuçlar irdelenerek sistemin işletme süresine kıyasla çok daha küçük bir zaman aralığında uygulanması gerekmeketedir.

Modellenebilecek bir çarpışma durumu da bu yapıda bir problem olarak görülebilir. Birliklerin savaş anındaki değişken konumları, lojistik durumları, kuvvet durumları ve belirli bir hedefe, en az kayıpla, en kısa zamanda ulaşılması gibi savaşın gidişatına göre önceliği değişebilecek amaçlar bu sistemin dinamik yapısını göstermektedir. Bu tip bir problemde de kararların seri bir şekilde alınması ve uygulanması gerekir.

Şartları günlük ve hatta anlık değişen portföy yönetimi problemleri de bu yapıdaki problemler olarak kabul edilebilir. Değişken yatırım araçlarındaki birikimin, ekonomik durumlara bağlı olarak yönlendirilmesi ve yatırımların riski minimuma indirip, kazancı en kısa zamanda maksimum kılacak şekilde yapılması problemin dinamik yapısını göstermektedir.

4.2 Dinamik ÇAKV Problemleri İçin Bulanık Mantık Uygulaması

4.2.1 Sıralı Yapı Bulanık Mantık Yöntemi

Bulanık Mantık hem sayısal hem de sembolik tekniklerin birleşimidir. Kesin olmayan bilgilerden kesin sonuçlar üretmesi bakımından üstünlüklere sahiptir. Bulanık mantıkta durumlar klasik mantıkta olduğu gibi "doğru veya yanlış", "1 veya 0" veya "siyah veya beyaz" olarak görülmez. Bulanık mantıkta her durumun 0 ila 1 arasında herhangi bir değer aldığı kabul edilir. Bu değer o durumun verilen dağılıma üyeliğinin derecesini göstermektedir. İnsan beyni, belirsizlikler, bulanıklıklar ve yorumlamalarla bir sonuca varır. Oysa bilgisayarlar kesin değerlendirmeler üzerine işlem yapar. Bulanık mantık bu iki tekniğin birleşimi üzerine kurulmuştur.

"Eğer X, A takımına ait ise o zaman Y, B takımına aittir" şeklinde tanımlanabilecek bulanık mantık yapısının, basit ve insan dil yapısına uygun olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, sistem yapısının çok girişli ve çok çıkışlı olması durumunda, bulanık mantık kurallarının sistem davranışını tanımlamak için çok boyutlu giriş ve çıkış uzaylarında oluşturulması gerekmektedir. Bu, incelenen sistemi çok iyi tanımlayanlar için bile zor olabilmektedir. Bu zorluğun bulanık mantık tanımlamasıyla insanların sahip olduğu çıkarım kurallarının gerçek görüntüsü arasındaki uyuşmazlıktan kaynaklandığı düşünülebilir. Bunun üstesinden gelmek için, Ohnishi ve arkadaşları [44] tarafından sıralı yapı modelli bulanık mantık yöntemi önerilmiştir.

n girişli tek çıkışlı bir sistem için, sıralı yapı modeli aşağıdaki şekilde tanımlanır:

R^i : Eğer X_1, A_{i1} ise o zaman Y, B_i dir.
R^j : Eğer X_2, A_{j1} ise o zaman Y, B_j dir. (i,j : 1,2,...n)

X_1, X_2	girişler,
Y	çıkış,
R^i	i. bulanık çıkarım kuralı,
A_{i1}, A_{j2}, B_i, B_j	bulanık değişkenler
n	kural sayısını göstermektedir.

Moment metodunu kullanarak:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \mu_i c_i S_i + \sum_{j=1}^{n} w_j \mu_j c_j S_j}{\sum_{i=1}^{n} w_i \mu_i S_i + \sum_{j=1}^{n} w_j \mu_j S_j} \tag{4.7}$$

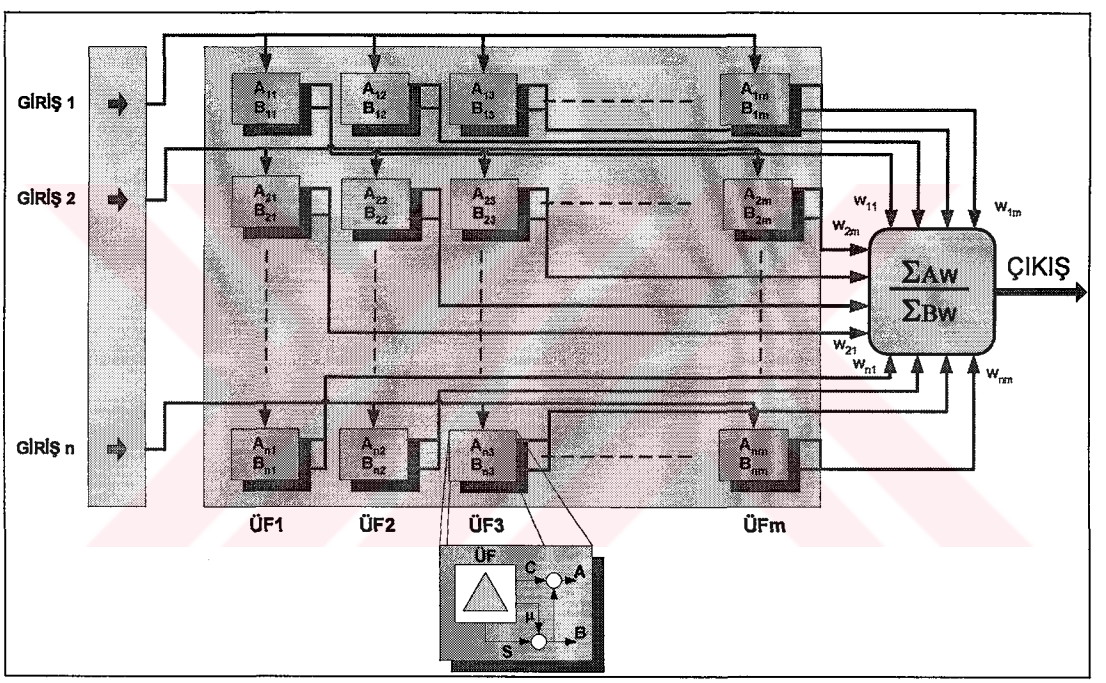
w_i, w_j : R_i ve R_j kurallarının ağırlık katsayıları

μ_i : R_i kuralının doğruluk değeri

C_i : B_i bulanık değişkeninin üyelik fonksiyonunun ağırlık merkezi konumu

S_i : B_i bulanık değişkeninin üyelik fonksiyonu alanı

Sıralı bulanık model yapısı Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Sıralı Bulanık Model Yapısı

4.2.2 Algoritma Önerisi

Asansör grup kontrol sistemindeki her bir asansöre çok girişli tek çıkışlı (ÇGTÇ) bir kontrol sistemi ile kumanda edildiği kabul edilebilir. Klasik bulanık mantık metodunun kullanılması durumunda çıkarım kuralları çok boyutlu giriş ve tek boyutlu çıkış uzayında tanımlanmak zorundadır ve oluşturulması oldukça zordur. Sistemin çok girişli ve çok çıkışlı olması durumunda bulanık çıkarım kurallarının insan düşünce yapısıyla bu modelin çok iyi örtüştüğü görülmektedir. Modelin her bir giriş ve çıkışı için bütün bulanık çıkarım kuralları tek boyutlu uzayda tanımlanır. Bu kuralların düzenlenmesi her bir kurala bir ağırlık verilmesiyle yapılmaktadır. Bu

model, her bir kuralının tek boyulu uzayda tanımlanmış olmasından dolayı, oluşturulması ve bulanık çıkarım kurallarının düzenlenmesi bakımından klasik bulanık mantık metodundan çok daha kolaydır.

4.3 DİNAMİK ÇAKV PROBLEMİ ÖRNEĞİ – ASANSÖR GRUP KONTROLÜ

4.3.1 Giriş

Şehir merkezlerindeki alanların azlığı ve yüksek fiyatlar nedeniyle günümüzde gittikçe yüksek binaların yapımı artmaktadır. 30 veya daha fazla katlı binalar gelişen büyük şehirlerin normal görüntüleri olmakta ve her 10 yılda başka bir şehir en yüksek binaya sahip olmaktadır. Şu anda 452 metre ile rekoru elinde bulunduran Kuala Lumpur Petrona İkiz kuleleri yakında bu rekorunu 508 metre ile Taipei 101 binasına devredecek daha sonra da Dünya Ticaret Merkezinin yerine dikilecek olan 541 metre yüksekliğimdeki Özgürlük Kulesi bu rekoru New York'a taşıyacaktır.

Son zamanlarda, bilgisayar destekli akıllı binalardaki gelişmelerle, asansör kontrolünde daha karmaşık ve farklı fonksiyonlu güçlü özellikler aranır olmuştur. Bir akıllı asansör kontrol sisteminin tasarım kriterleri, asansör grubunun hareketinin, zamana, yüke, enerjiye vb. göre optimizasyonunu içermelidir. Bu çalışmada , sıralı yapıda bulanık mantık algoritması içeren yeni bir asansör grup denetim kontrol sistemi geliştirilmiştir. Sistem, kat çağrısına en uygun olan kabin atamasını, uzmanların belirlediği deneysel kurallar ve bilgilere dayanarak belirlemektedir. 30 katlı ve 4 kabinli bina trafiğini bilgisayar ortamında canlandırmak üzere bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılımda, kabinler, elde edilecek sonuçların gerçekçi olması amacıyla gerçek asansör sistemlerinde olduğu gibi hareket etmektedir. Bu simülasyon sayesinde, klasik yöntemlerle kıyaslandığında, elde edilen ortalama bekleme zamanı, yolculuk süresi gibi amaçlardaki iyileşmeler açık bir şekilde görülebilmektedir.

Asansör sistemlerinin optimum performansı için iki ana kriter, bekleme süresinin ve yolculuk süresinin minimize edilmesidir. Diğer kriterler de kabindeki yolcu sayısına bağlı olarak yük, güvenlik tedbirleri ve ayrıca yolculuk konforu olmaktadır.

Klasik asansör sistemlerinde, fazla sayıdaki asansörün kontrolü belirli bir sabit-değerlendirme fonksiyonunun hesaplanması yoluyla sayısal olarak

gerçekleştirilmektedir [37]. Ayrıca, performansın geliştirilmesi için uzmanların bilgi ve deneysel kuralları işin içine dahil edilmektedir. Bununla birlikte, bu gibi uzman bilgisi, organize edilebilmesi ve uygulanabilmesi için yeterince kesin ve tam değildir. Dahası, "iyi" kurallar ve değerlendirme fonksiyonları birçok durumda çok karmaşık olabilmektedir. Bundan dolayı bu çeşit bilginin klasik yazılımlar ve donanımların kullanılmasıyla sisteme dahil edilmesi son derece zor olmaktadır.

Bu çeşit problemlerin üstesinden gelebilmek için sıralı yapıda bulanık mantık algoritmasını kullanan yeni bir asansör kontrol sistemi ortaya konmuştur. Bu sistem, uzmanın bilgi ve deneysel kurallarını kullanarak kat çağrısına cevap vermek için asansör grubu içindeki en uygun kabini belirler. Basit, yukarı aşağı kat çağrı tuşları yerine, her katta varış noktası esaslı tuş takımı kullanılmaktadır. Yolcuların kabine girmeden önce gitmek istedikleri katı belirterek çağrı girişini yapmaları gerekmektedir. Sistem, kabin durumlarını değerlendirerek bu yolcu için en uygun kabin atamasını yapar ve atama bilgisini tuş takımı yanındaki ekranda gösterir.

Bu yeni asansör yönetim kontrol sisteminde göz önüne alınan amaç sadece ortalama bekleme zamanı olmayıp bunun yanında yolculuk süresi, yük, enerji gibi amaçlar da iyileştirilebilmektedir.

4.3.2 Asansör Grup Kontrol Sistemlerinde Kontrol Ve Kumanda

Asansörler insanların bina içinde düşey taşımacılığında kullanılmak üzere, rahat ve uygun hizmet vermek amacıyla yerleştirilirler. Dört veya daha fazla katlı binalarda tek, altı kattan fazla olan binalarda iki veya daha fazla kabinli asansörlerin kullanılması tavsiye edilir.

Birden fazla kabin bulunan sistemlerde koordinasyonu sağlamak için asansör tasarımcıları tarafından tanımlanan mantık kurallarına göre çalışan kontrol sistemleri kullanılır. Bu kuralların tümüne "asansör kontrol algoritması" denir.

Binaların ve özellikle yüksek bina yapımının artmasıyla, artan "bina nüfusuna" cevap vermek ve yüksek taşıma kapasitesi sağlamak için birden fazla kabine ihtiyaç doğmuştur. Asansör kontrol algoritması, asansörün kabin ve kat çağrılarına en uygun biçimde yanıt vermesini sağlar. Bunun sonucunda elde edilenler;

- Binalarda her kata hizmet temin etmek,
- İnsanların bir kattan diğerine gidiş süresini azaltmak,
- İnsanların hizmet için katta bekleme süresini azaltmak,
- Belli bir sürede mümkün olduğunca fazla kişiye hizmet etmek,

İnsanların katlarda bulunması ve asansörlerden hizmet talep etmelerinin ve talep zamanının da tesadüfi olması nedeniyle yukarıda sayılanların elde edilmesinde problemlerle karşılaşılır. Sonuç olarak kontrol algoritmasının insanların taleplerindeki değişmeyi takip etmesi gerekir.

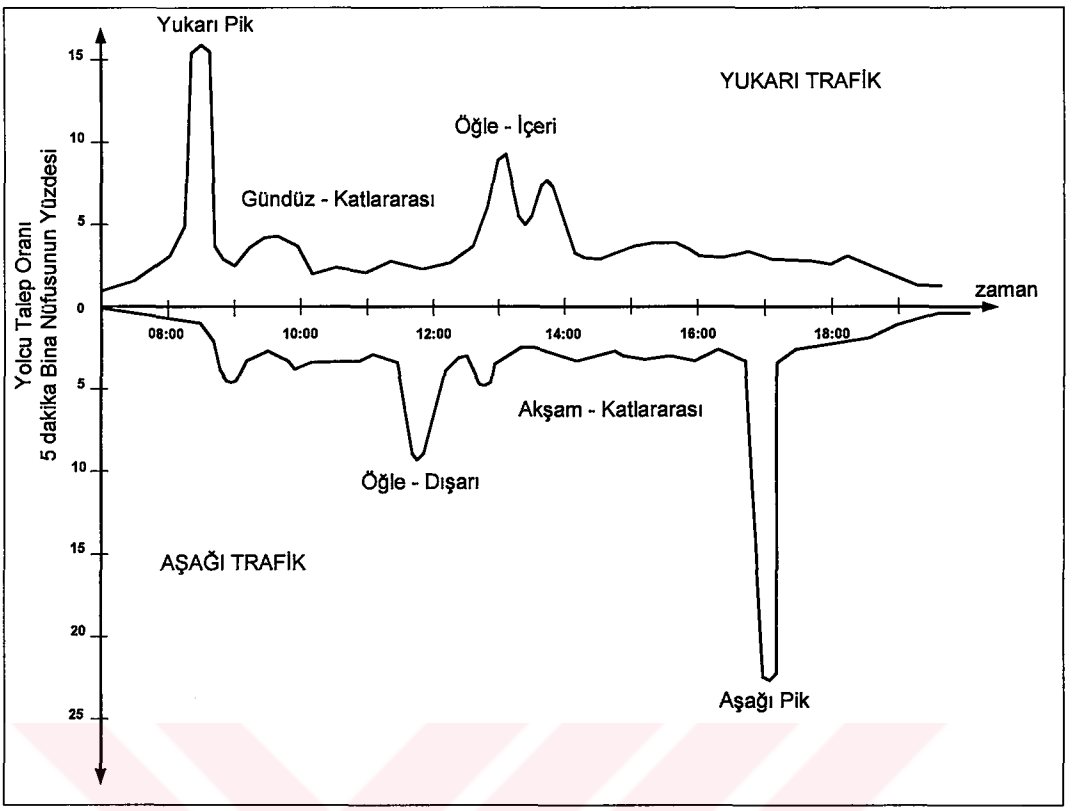
Asansör tesislerinden beklenenler arasında "maksimum sayıda insanın minimum bekleme zamanında istedikleri katlara ulaştırılması" hedefi ilk sırayı almıştır. Bina içindeki insan hareketliliğine (bina trafiğine) cevap verebilmek için bir grup halinde bulunan kabinlerin tek tek hareketlerinin kontrolünün yanı sıra grup halinde hizmet verebilmesi için grup kontrolünün de uygulanması gerekir.

4.3.3 Trafik Modeli

Bina içinde yaşayanların veya kısa bir süre için bina içinde bulunan insanların katlar arasında yaptıkları hareketlilik "bina trafiği" olarak tanımlanır. Asansör trafiği ise, bina hareketliliğine yanıt vermek üzere hizmet talep eden insanların asansör vasıtasıyla katlar arasındaki ulaşımını düzenleyen kurallar topluluğudur. Asansör trafiğinden, *maksimum sayıdaki insanın, minimum zamanda hedeflenen katlara ulaştırılması* beklenmektedir.

Trafik hesabının ve analizinin sonucuna göre kabin seçimi ve asansör hızı bulunmasından sonra asansör tesisinin proje ve montajına başlanması bir zorunluluk olarak TS 1812 standartlarına göre belirlenmiştir.

Binadaki yolcu hareketinin değişimi trafik modeli ile belirlenir. Günlük yaşantımızda kullandığımız binalar fonksiyonları gereği oldukça çeşitlilik gösterir. Belirli bina tipleri (apartman, iş merkezi, vb.) için genelleştirilmiş trafik modelleri vardır [37,43,47]. Bir iş merkezinde karşılaşılan trafik modeli Şekil 4.2' de görülmektedir.



Şekil 4.2 Genel Asansör Trafik Modeli

Asansör trafik yoğunluğu, genelde 5 dakikalık zaman aralığında asansörden hizmet talep eden bina nüfusunun yüzdesiyle ifade edilir. Grafik incelendiğinde binaya sabah saatlerinde gelen insanların ofislerine ulaşmak yönünde bina trafiğinde hareketlilik olduğu, gün boyunca çeşitli katlar arasında trafik olduğu, akşam saatinde ise binada bulunanların binayı terk etme yönünde aşağı (lobiye) yönelik hareketlilikleri olduğu görülür. Gün boyunca izlenen bir asansörde ortaya çıkan trafik durumları şunlardır:

- Yukarı-pik trafik: Ana girişten yukarıya doğru tüm veya büyük bir kısım trafiğin etkin olduğu haldir. Sabah işbaşı ile başlar ve azalarak öğle zamanına doğru biter.
- Aşağı-pik trafik: Yolcuların büyük bir kısmının ana girişten asansörü terk ettiği trafik akışının olduğu haldir. Öğle zamanında az olarak görülür ve çalışma saatlerinin sonunda biter.
- İki yönlü trafik: Belirli bir kata ve bu kattan başka katlara trafik akışının olduğu haldir. Bu kat ana giriş katı olabilir.

- Dört yönlü trafik: Baskın trafik akışının belirli bir iki kat arasında olduğu haldir. Bu katlardan biri ana giriş katı olabilir.
- Tesadüfi veya dengeli katlar arası trafik: Saptanan çağrıların sezilebilen modelinin olmadığı ve insanların bina içinde hareket etmelerinden dolayı gün içinde görülen trafik halidir.

Dengeli trafik hali, diğer özel durumlara nazaran daha genelleştirilmiş bir trafik halidir. Yukarı-pik durumunda insanlar ana girişten sadece yukarıdaki diğer katlara gitmek için asansör kullanırlar. Böylece katlar arası dengesiz trafik yaratılmış olur. Yolcuların bekleme sürelerini minimum tutmak için dengesiz trafik hallerinde, özel kabuller gerekir. Aşağı-pik trafik, yukarı-pik trafik halinin tersi şeklinde gelişir. Bu durumda yolcular çeşitli katlardan ana girişe doğru gitmek için çağrıda bulunurlar.

Binaların gerçek trafik modelleri, binaların kendine ait özelliklerine bağlıdır. Bunlardan başlıcaları binanın tipi ve kullanım amacıdır. Örneğin bina, iş yeri, okul, hastane veya apartman olabilir. Trafik modelini etkileyen diğer faktörler; ikametgah olarak kullanılmayan binalarda çalışma zamanından etkilenen bina nüfusu, binalarda yaşayan insanlardır. İş yerlerinde lokanta gibi servis katlarının varlığı belirli zamanlarda yüklü iki yönlü trafiğe sebep olur. Bazı durumlarda, belirli katta bulunan konferans salonunun varlığı ara sıra yüklü iki yönlü trafik veya dört yönlü trafik olmasına neden olabilir.

Asansör sistemleri her zaman mümkün olan trafik hallerini karşılamak üzere tasarlanır ve bina talepleri için belli bir esnekliğe sahip kontrol algoritması oluşturulur.

Yukarı-pik trafik hali, en iyi tanımlanan hallerden biridir. Zira yolcuların büyük bir bölümü ana girişten hizmet talebinde bulunur, böylece kontrol algoritması mümkün olduğu sürece diğer kat çağrılarını önemsemeyerek tüm kabinleri ana girişe gönderir. Taşıma kapasitesini arttırmak için belirlenen nitelikler algoritmaya dahil edilir. Ana girişten kabinin iyice yüklenmeden hareket etmemesi sağlanarak bu artış elde edilir. Bu optimizasyonu yapmak için her bir kabin işletiminde taşınan yolcu sayısı tanımlanır. Kabin ana girişte bulunduğunda, belli bir yük düzeyine gelinceye kadar beklenir; veya diğer katlardan ilk kabin çağrısı kaydedilinceye kadar beklemeye devam edilir.

Aşağı-pik trafik hali, yukarı-pik trafik halinin tersi şekilde gelişir. Bu durumda çeşitli katlardan yolcular ana girişe doğru gitmek için çağrıda bulunurlar. Bu nedenle temel aşağı-pik kontrol algoritması bina içinde hizmet dağılımı talep eder. Saptanan en büyük problem, kabinlerin yukarı katlarda dolması ve aşağı katlara hizmet verebilmek için yerin olmamasıdır. Bunu önlemek için, binayı sabit talep sektörlerine bölmek önerilebilir. Bu yöntemde sektörlerin genişliği yerel hizmet taleplerine göre ayarlanabilir.

İki yönlü ve dört yönlü trafik hallerinde, binada belirli katlardaki istek seviyelerinin saptanması gerektiğinden, kabinin ilk nerede duracağını tespit etmek sorun yaratır ve özel bir çaba gerektirir. Daha yoğun talebin olacağı katları önceden sezip, boş kabini oraya göndererek bu sorun çözülür. Bazı sistemler iki veya dört yönlü trafik için mümkün olan etkin kat olarak önceden belirlenen bir veya iki kata müsaade eder. Bu katlar genelde restoran veya kafeterya bulunan katlardır.

Ticari binalarda rasgele katlar arası trafik en büyük etkinliği gösterir. Her bir yolcu dolaşımı için sistem kapasitesinde daha çok talep edilen durak sayısına ihtiyaç duyulur. Bunun sebebi her yolcunun kabinin kendi çağrısına ve hedeflediği kat çağrısına uyarak durmasını istemesidir. Sonuçta asansör sistemi tüm zamanlarda yolcu bekleme zamanının azaltılmasını sağlamak ve binada her kata verilen servisi düzenlemek zorundadır. Bunun için kabinler, boşaldığında bina içine dağıtılmakta ve genellikle park etme yöntemiyle bu iş yapılmaktadır. Bina, mevcut kabin sayısında park sektörlerine ayrılır ve her sektör sınırı içinde kabinler park edilir. Kat çağrılarına kabinlerin dağılımı birçok yöntemle sağlanır. Genel yaklaşım, kabini en yakın çağrıya yollamak ve eşit dağılım temin etmektir. Özellikle trafik yoğunluğu fazla olduğunda kabinin bina içindeki çevrim zamanı artar. Kabinin dolaşım sırasında uğrayacağı durak adedi artacağından, sonuçta yolcu bekleme zamanı da artar.

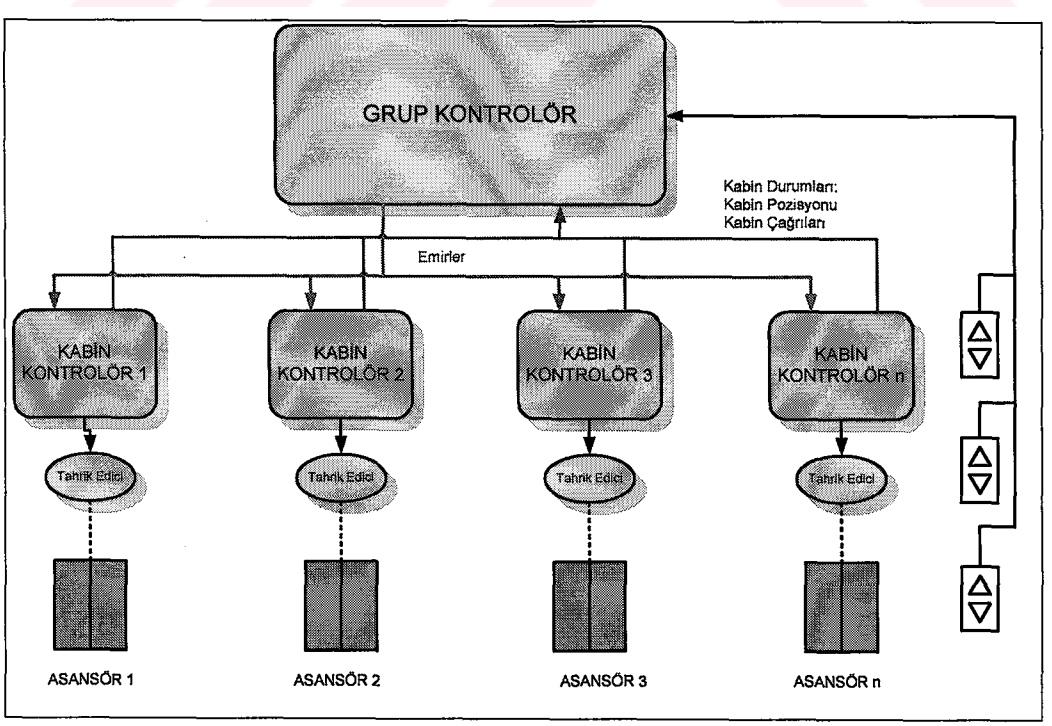
Geleneksel grup kontrol sistemi, çeşitli trafik hallerindeki sakıncaları gidermek amacıyla geliştirilmiş bir otomatik asansör grup kontrolüdür. Bu kontrol sistemlerinde kabinler tek başlarına çalışmaları halinde daha iyi performans sergilerler. Bu tip kontrol sistemlerine etki eden etkenler şöyle sıralanabilir:

- Talep sektörleri
- Kabinlerin dağıtımı

- Tercihli kat servisi
- Yukarı servis
- Aşağı servis
- Yüklü lokal talepler
- Park etme
- Bodrum katı servisi

4.3.4 Asansör Kontrol Sistemleri

Şekil 4.3' de asansör kontrol sisteminin genel yapısı, kontrol bloğunun çeşitli bölümlerinin aşama sırasıyla gösterilmiştir. "Tek Kabin Kontrolü" (TKK) sadece sorumlu olduğu tek bir kabinin hareketlerini kontrol etmektedir. "Grup İzleme Kontrolü", grup kontrol algoritmasındaki kurallara uygun olarak mevcut kat çağrılarına uygun kabinlerin servis vermesini kontrol etmekle yükümlüdür. Kontrol bloklarından bazıları veya hepsi elektrik bağlantılarının imkan vermesi halinde bilgisayarla kontrol edilebilir. Bu durumda bilgisayarlar orijinal bloktaki kontrol fonksiyonlarını izler. Bu durumda her kontrol bloğu yerini bir tek bilgisayara bırakır. Böylece sistem asansör yönetimi için uygun hale gelmektedir.



Şekil 4.3 Asansör Grup Kontrol Sistemlerinin Genel Yapısı

Otomatik Kabin Kontrolü

En basit otomatik asansör kontrolü, tek çağrılı sistemdir. Yolcular gidecekleri katın düğmesine basarak kabini hareket ettirirler. Kabin bu kata doğru hareket eder, diğer katlara uğramadan yoluna devam eder. Yolcunun kontrol ettiği bu sistem operatör kullanılan sistemden daha iyi performans gösterir.

Grup Kontrolü

Binadaki yolcuların trafiğini karşılamak için tek kabinin yetersiz kaldığı hallerde birden fazla kabin yan yana yerleştirilir. Bu durumda kabinler arası bağlantının kurulması problemi karşımıza çıkar. Tek tek kabin kontrol mekanizmaları birbirine bağlanır ve "otomatik izleme kontrolü" uygulanır. Katlardan gelen çağrıya göre kontrol devresi hangi katta duracağına gruptaki her kabin için karar verir.

Grup İzleme Kontrolü

Asansör grubunun, tek tek kabinlerin çalıştırılmasını koordine edebilmek için otomatik "grup izleme sistemine" ihtiyacı vardır. Bu kontrol sistemi taşıma kapasitesinden maksimum faydalanmayı sağlayarak ve bekleme zamanını azaltarak yolcu servisini arttırır. Kabin çağrıları ve kat çağrıları önce kaydedilir, daha sonra en uygun şekilde yanıtlanır. Grup izleme kontrol algoritması belirli trafik durumlarında sistemin uyduğu kontrol kurallarını düzenler. Asansör izleme sistemi, çok basit programdan karmaşık çoklu programa kadar çeşitlilik gösterir. Birçok durum için geliştirilmiş değişik kontrol algoritmaları mevcuttur [47].

Bilgisayar Esaslı Asansör Kontrol Sistemleri

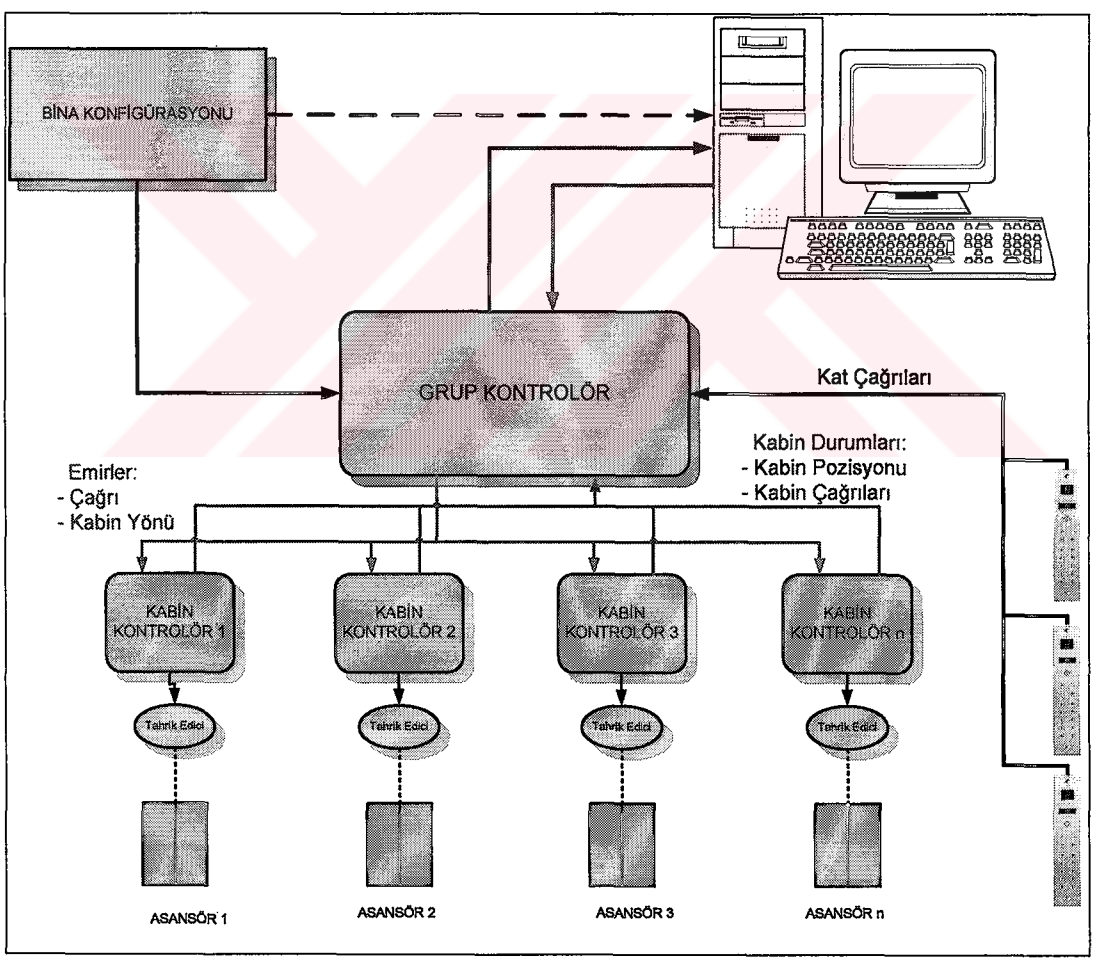
Asansör konfigürasyonu minimum tesis ile maksimum trafik akışı elde etmelidir. Bu nedenle esnek kontrol sistemlerine ihtiyaç duyar.

- Esneklik asansör sistemlerinden beklenen bir özelliktir ve geleneksel kontrol sistemleri kolay ve ucuz bir şekilde bu esnekliği gösteremezler. Bu nedenle yerlerini hızla bilgisayar kontrolüne bırakmışlardır.

Günümüzde sıkça kullanılan bilgisayar esaslı asansör sistemleri aşağıda verilmiştir.

- Mini Bilgisayar esaslı kontrol
- Optimum bilgisayar kontrol
- Uygun çağrı dağıtma sistemi
- Bilgisayar grup kontrolü
- Yapay zeka uygulamalı kontrol

Şekil 4.4' de asansör grup kontrolüne bilgisayar uygulamasının prensip şeması verilmiştir. Burada kontrol ünitesinde kat ve kabin çağrıları binada hizmet veren kabinlere mikroişlemci yardımıyla en uygun biçimde yönlendirerek, bina içinde bekleme zamanları en aza indirilmektedir.



Şekil 4.4 Bilgisayar Esaslı Asansör Kontrol Sistemi

4.3.5 Asansör Kinematiği

İyi bir asansör, yüksek kapasiteli, düzgün (rahat) kullanışlı ve ekonomik işletim sağlamalıdır. İvmelenme ve frenleme rahatsız etmeyecek düzeyde ve kesin durmayı sağlayacak tarzda olmalıdır. Ayrıca elektrik tahrik sistemi az masraflı ve verimli olmalıdır. Bakım masrafları da düşük düzeyde olmalıdır.

Elektrik tahrik sistemi, sadece yukarı-aşağı yönde gitmesini sağlamayıp, içindeki yolcuların da rahatsız olmayacağı bir konforu vermelidir.

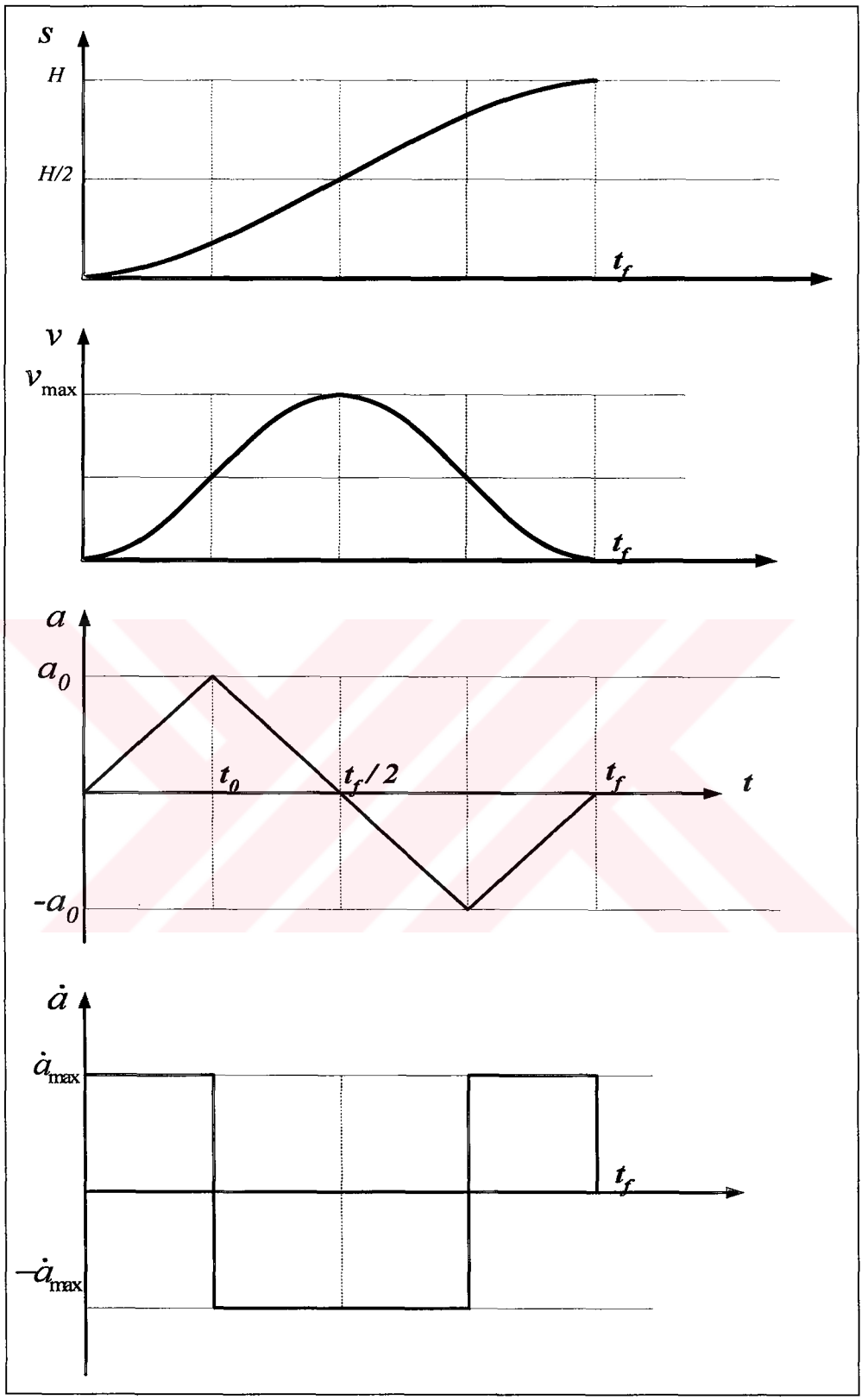
Eğer kabin ivmesi yüksek değerlere ulaşırsa, insan vücudu rahatsız olur; iç organlar vücut içinde hareket eder. Bu etkiye g etkisi denir. Bu etki, ivmelenme ve durma anında yaşanır. Örneğin; 80 kg. kütlesinde bir kişinin yukarı doğru 1/8 g değerinde ivme ile hareket etmesi sırasında hissettiği ağırlık değeri m.g.(1+1/8) = 90 kg. kuvvet dir.

Buradaki g etkisi, her bir kişinin yaşına, cinsiyetine, sağlık durumuna ve ani hareketi bekleyip beklemediğine bağlıdır. Asansördeki ivmelenme yavaşlama değerleri, g etkisi yaratmamak için deneysel olarak bulunmuştur. Asansördeki jerk (sıçrama), ivmelenme, hız ve seyahat mesafesi Şekil 4.5' de verilmiştir. İvmelenme ve yavaşlama değerleri 1.5 m/s^2 ile sınırlanmıştır. İvmedeki maksimum sıçrama değeri ise 2 m/s^3 ile sınırlıdır.

Asansör Tahrikinde Hareket Eşitlikleri

Bir asansör kabini bulunduğu yerden başka bir kata giderken birçok olaylar meydana gelir. Tahrik motoruna güç uygulanır, motor anında yanıt verir ve akım çekilir. Frenler boşaltılır ve bileşke yük (kabin, halatlar, kasnak vs.) ivmelenir. Maksimum ivme değerine belli bir zamanda ulaşılır; bu anda sabit hıza erişilir. Maksimum ivmeye ulaşıldıktan sonra yolcuların rahat seyahati için jerk (sıçrama) sıfırlanır.

Matematik olarak, hız mesafenin zamana göre türevi; ivme hızın zamana göre türevi şeklinde ifade edilir. Kabin maksimum hıza ulaştığında mesafenin yarısına ulaşmış olur. Bu noktada ise ivme sıfırdır. İvmenin maksimum olduğu hal ise seyahat süresinin ¼ olduğu yerdir.



Şekil 4.5 Zamana göre jerk, ivme, hız ve yolculuk profilleri

Kabin hareketi Motz [48] tarafından 1976 yılında incelenmiştir. Buna göre, bir asansörün ivmeli hareketindeki değerler:

Sabit ivmede ulaşılan mesafe s_0 [m]:

$$s_0 = \frac{2.a^3}{j^2} \tag{4.1}$$

s mesafesine ulaşıncaya kadar geçen zaman t [sn.]:

$$t = \frac{a}{j} + \sqrt{\left(\frac{a}{j}\right)^2 + \frac{4.s}{a}} \tag{4.2}$$

s mesafesindeki hız v [m/sn.]:

$$v = -\frac{a^2}{2.j} + \sqrt{\left(\frac{a^2}{2.j}\right)^2 + s.a} \tag{4.3}$$

Bir asansörün sabit ivme olmayan hareketinde ise;

Maksimum ivme a_m [m/sn^2]:

$$a_m = \sqrt[3]{\frac{1}{2} j^2 s} \tag{4.4}$$

Maksimum hız v_m [m/sn.]:

$$v_m = \sqrt{\frac{1}{2} a.s} \tag{4.5}$$

Seyahat zamanı t [sn.]:

$$t = \sqrt[3]{32.\frac{s}{j}} \tag{4.6}$$

Tablo 4.1' de seyahat zamanı ve hızlar, ivme değeri a=1.5 m/s^2 ve sıçrama değeri j=2 m/s^3 değerlerinde ve 3.3 m. katlar arası mesafe için maksimum hızlar 1, 3 ve 5 m/s^2 değerleri için verilmiştir.

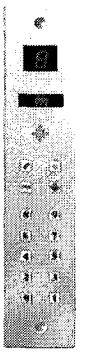
Tablo 4.1 Asansör Kinematiği (3.3 m katlar arası mesafe)

Kat No:	v_m=1 m/sn		v_m=3 m/sn		v_m=5 m/sn	
	Zaman(sn)	Hız(m/sn)	Zaman(sn)	Hız(m/sn)	Zaman(sn)	Hız(m/sn)
1	5.3	1.0	4.8	1.4	4.8	1.4
2	8.6	1.0	6.2	2.1	6.2	2.1
3	11.9	1.0	7.4	2.7	7.4	2.7
4	15.2	1.0	8.4	3.0	8.3	3.2
5	18.5	1.0	9.5	3.0	9.2	3.6
6	21.8	1.0	10.6	3.0	10.0	4.0
7	25.1	1.0	11.7	3.0	10.7	4.3
8	28.4	1.0	12.8	3.0	11.3	4.7
9	31.7	1.0	13.9	3.0	12.0	5.0
10	35.0	1.0	15.0	3.0	12.6	5.0

4.3.6 Örnek Sistem - 30 Katlı İş Merkezi 4 Kabinli Asansör Grup Kontrolü

Asansör Grup Kontrol Sisteminin genel yapısı Şekil 4.3' de şematik olarak gösterilmiştir. Asansör sisteminde kat çağrıları ve kabin çağrıları olmak üzere iki çeşit yolcu talebi vardır. Kat çağrısında yolcu gitmek istediği yönün tuşuna yani yukarı veya aşağı olmak üzere basar ve bu kaydedilir. Kabin çağrısında ise yolcunun varmak istediği katın bilgisi tutulmaktadır. Şekil 4.3' de verilen sistemde iki çeşit kontrolör mevcuttur. Kabin kontrolörü her bir kabinin kontrolünü kontrol etmekte ve onun durumu ile ilgili bilgileri grup kontrolörüne iletmektedir. Her bir kabinin durumu ve katlardan gelen kat çağrıları grup kontrolörü tarafından göz önüne alınmaktadır. Elde edilen bu bilgilere dayanarak, grup kontrolörü kat çağrısına cevap vermek için en uygun kabini belirler. Bu belirlemede genellikle sadece kabinin yolcudan uzaklığını gösteren kriter dikkate alınmaktadır. Bu tip asansör yönetiminde sadece yukarı ve aşağı tuşları ve yukarı aşağı ışıkları bulunmaktadır. Bu tip sistemler bazı sakıncalara da sahiptir. Bu yönetim sisteminde, yolcu kabine binmeden yolcunun varmak istediği kat bilgisi gibi kesin bilgiler elde edilememekte ve karar aşamasında kullanılamamaktadır.

Birçok klasik asansör sistemlerindeki yukarı aşağı tuşları kullanmak yerine, Şekil 4.6' da gösterildiği gibi telefon tuş takımındakine benzer şekilde bir tuş takımı kullanılabilir. Bu tuş takımı her kattaki asansör bekleme bölgesinde yerleştirilir ve sistem, her yolcunun asansör çağrı anında gitmek istediği katla ilgili giriş yapmasına ihtiyaç duyar. Yolcu kat çağrısı gerçekleştirdikten sonra sistem hemen yolcu için en uygun kabin atamasını gerçekleştirir ve tuş takımının ekranında gösterir.



Şekil 4.6 Çağrı Paneli

Sistem çağrı yapmamış ve dolayısıyla ataması olmayan yolculara ve ayrıca aynı çağrıda bulunan beraber hareket eden yolcu gruplarına karşı yüklemeyi kabul yeteneğine sahip olmalıdır. Yük ağırlığının hesaplanmasıyla, beklenmedik yolcular algılanabilir ve yönetici sistem gerçek yükü buna göre ayarlayabilmelidir. Benzer şekilde kabin çağrısı yapıp da kabine binmeyen yolcular da yük ağırlığına bakılarak algılanabilir ve bu çeşit anlamsız çağrılar iptal edilebilir.

Tasarım Kriterleri ve Sınırlamalar

Klasik kontrol sistem tasarımında, optimum hız, konum, minimum-zaman gibi karşılanması gereken genellikle sadece bir performans kriteri bulunur. Klasik kontrol algoritmalarının uyarlama sınırlamalarından dolayı, birçok amacı karşılayabilecek bir sistemi tasarlamak oldukça zordur. Bununla birlikte, bulanık mantık kontrol sistemlerinde birçok amaç tasarıma kolaylıkla dahil edilebilir. Bulanık mantık kontrolörünün yapısı birçok önemli amacın eşzamanlı olarak karşılanmasını mümkün kılmaktadır. Yapılan çalışmada tasarlanan asansör grup denetim kontrol sisteminde şu amaçlar göz önüne alınmıştır:

- Bir katta bekleyen yolcuların bekleme sürelerini minimum yapmak.
- Yolcuların kabinde geçirecekleri süreyi minimum yapmak.
- Konfor şartları için kabin doluluğunu minimum yapmak
- Her bir asansörün yolculuk mesafesini minimum yapmak.

Bununla birlikte, yukarıda bahsedilen amaçlar birçok karışık açıdan karşıt olabilir. Örneğin, bekleme zamanının kısaltılması, enerji tasarrufundan ve kabin doluluğundan bir dereceye kadar feragat etmeyi gerektirir. Böylece, asansör grup

kontrol sisteminin zaman ve trafik akışıyla ilgili birçok tasarım amacını optimize etmesi gerekmektedir.

Pratikte uygulanan birçok asansör sistemine benzer olarak, aşağıda belirtilen kısıtlamalar, üzerinde çalışılan akıllı asansör kontrol sistemi simülasyonu için de kabul edilmiştir.

- Bir asansör eğer içerisinde bir yolcu varsa ters yönde hareket etmeyecektir.
- Her bir asansörün kapasitesi 15 kişidir ve eğer kapasite tam karşılandıysa kabin kat çağrılarını dikkate almayacaktır. Çağrıyı bir sonraki tur için değerlendirmeye sokacaktır.
- Her asansör en fazla 1 m/s^3 sıçrama, 1 m/s^2 ivme ve 4 m/s sabit hızla hareket etmektedir.
- Her kattaki yolcu iniş ve biniş zamanları için yolcu başına 1 saniye alınmıştır. Kapı açılma süresi 2 saniye ve kapanma süresi 2 saniye dir.
- Bir asansör herhangi bir kat çağrısını atlamamalıdır.

4.3.7 Asansör Bulanık Kontrol Sisteminin Özellikleri

Bu çalışmada, 30 katlı bir binada işletilen her biri toplam 15 yolcu kapasiteli 4 asansör kabininin denetimi ve yönlendirilmesi için asansör bulanık kontrol sistemi geliştirilmiştir. Yolcuların varış noktaları üzerinde herhangi bir kabul yapılmamıştır. Yolcular her kata ve işletim zamanına göre rasgele üretilmektedir. Sabah yoğun saatlerde, giriş katı diğer katlardan çok daha yoğun olmaktadır. Bu nedenle asansör kontrol sistemi yoğun saatlerde kabinleri en yoğun kata yönlendirmektedir.

İyi bir trafik performansı elde etmek için, asansör bulanık kontrol sistemi kontrol girişi için altı parametre, çıkış için bir parametre kullanmaktadır. Bu parametreler asansör sisteminde optimize edilecek amaçları veya kriterleri göstermektedir.

Girişler:

- **Bekleme Zamanı:** Bir asansörün bulunduğu konumdan yeni yapılan çağrı katına gidebilmesi için gerekli toplam süredir. En uzun bekleme süresine sahip kabin dikkate alınarak normalize edilmektedir.

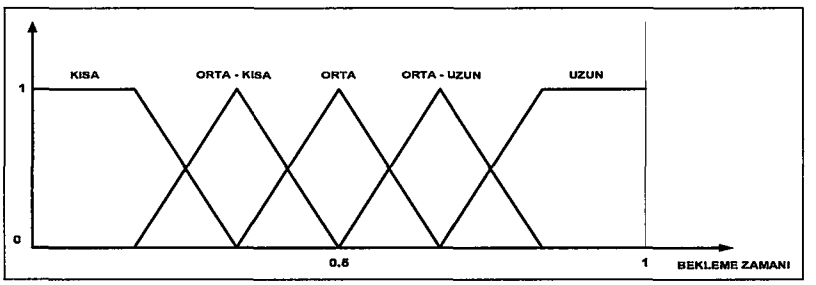
- **Yolculuk Zamanı:** Yolcunun gideceği kata varana kadar asansör içinde geçirdiği toplam süredir. En uzun yolculuk süresine sahip kabin dikkate alınarak normalize edilmektedir.
- **Yük:** Asansör kabini içindeki toplam yolcu sayısıdır. Yolcu sayısı 15 alınarak normalize edilmeketdir.
- **Yolculuk Mesafesi:** Asansör konumu ile yeni çağrı katı arasında kat sayısı olarak uzaklıktır. 30 katlı bina için en fazla yolculuk mesafesi 60 kat kabul edilerek normalize edilmektedir.
- **Çağrı Katı Alan Değeri:** Kabinin yerine getireceği görevler içinden, yapılan çağrının katına en yakın olanının kat sayısı olarak ifadesidir. Bu değerin kabin için sıfır veya sıfıra yakın olması, o kabinin çağrı yapılan kata veya yakınlarına hizmet vereceğini gösterir. Örneğin -1 değeri, çağrı yapılan katın bir kat altına o kabinin bir görevi (yolcu indirme veya bindirme) olduğunu göstermektedir. 6 kat aşağı ve 6 kat yukarı alan değeri uç noktaları olarak belirlenip normalize edilmektedir.
- **Gidiş Katı Alan Değeri:** Kabinin yerine getireceği görevler içinden, yapılan çağrının gidiş katına en yakın olanının kat sayısı olarak ifadesidir. Bu değerin kabin için sıfır veya sıfıra yakın olması, o kabinin çağrı gidiş katına veya yakınlarına hizmet vereceğini gösterir. Örneğin +2 değeri, çağrı gidiş katının iki kat yukarısına o kabinin bir görevi (yolcu indirme veya bindirme) olduğunu göstermektedir. 6 kat aşağı ve 6 kat yukarı alan değeri uç noktaları olarak belirlenip normalize edilmektedir.

Çıkış:

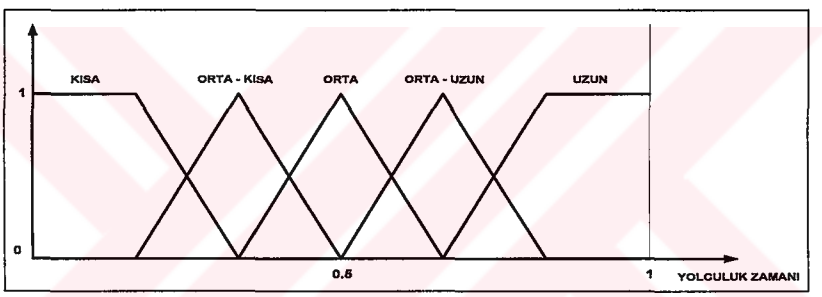
- **Öncelik:** Bulanık kontrol sisteminin çıkışı. Önceliği en yüksek olan kabine hareket ataması yapılmaktadır. Öncelik değeri 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır.

Altı parametrenin klasik bulanık mantık metodunu kullanarak aynı anda düzenlenmesi oldukça zordur. Bu nedenle sıralı bulanık mantık modeli kullanılmıştır. Bu model ile bütün bulanık çıkarım kuralları her bir giriş ve çıkış için tek boyutlu uzayda tanımlanır. Önerilen bulanık çıkarım kuralları Tablo 4.2' de gösterilmiştir.

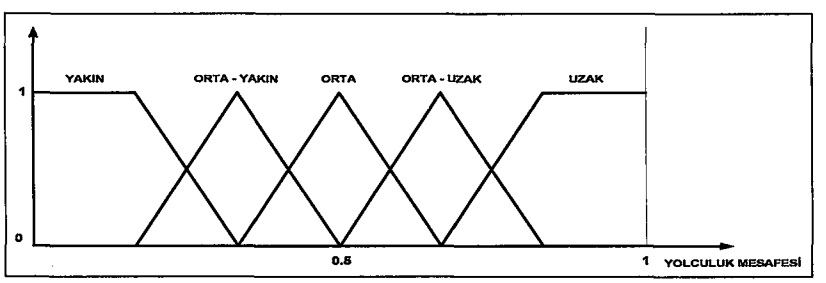
Giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları Şekil 4.7 - 4.12 ve çıkış değişkeninin üyelik fonksiyonu Şekil 4.13' de görülmektedir.



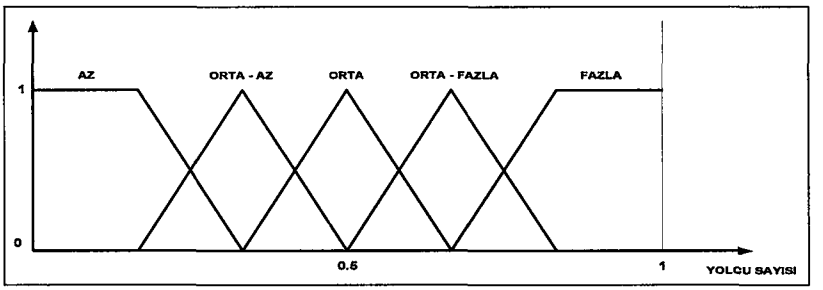
Şekil 4.7 Giriş: Bekleme Zamanı Üyelik Fonksiyonları



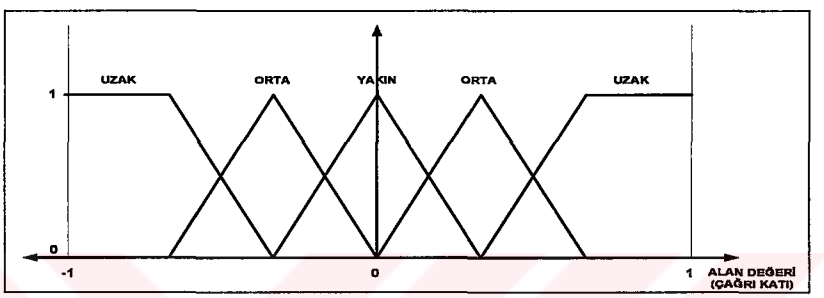
Şekil 4.8 Giriş: Yolculuk Zamanı Üyelik Fonksiyonları



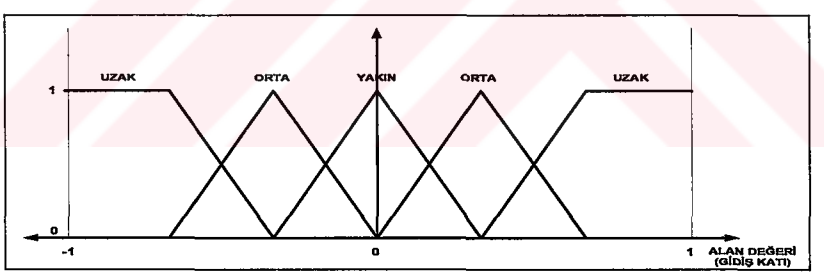
Şekil 4.9 Giriş: Yolculuk Mesafesi Üyelik Fonksiyonları



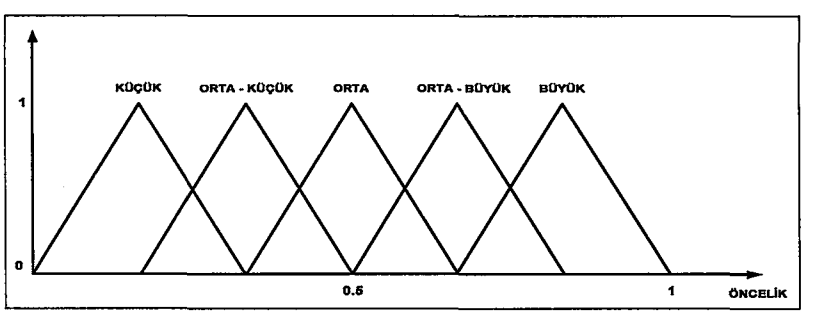
Şekil 4.10 Giriş: Yolcu Sayısı Üyelik Fonksiyonları



Şekil 4.11 Giriş: Alan Değeri (Çağrı Katı) Üyelik Fonksiyonları



Şekil 4.12 Giriş: Alan Değeri (Gidiş Katı) Üyelik Fonksiyonları



Şekil 4.13 Çıkış: Öncelik Üyelik Fonksiyonları

Tablo 4.2 Simülasyonda Kullanılan 30 Bulanık Çıkarım Kuralı

KURAL NO:	ÇIKARIM KURALLARI				AĞIRLIK KATSAYISI
R^1	Eğer o zaman	*Bekleme Zamanı* *Öncelik*	**Kısa** **Büyük**	ise	**0.70**
R^2	Eğer o zaman	*Bekleme Zamanı* *Öncelik*	**Orta-Kısa** **Orta-Büyük**	ise	**0.70**
R^3	Eğer o zaman	*Bekleme Zamanı* *Öncelik*	**Orta** **Orta**	ise	**0.70**
R^4	Eğer o zaman	*Bekleme Zamanı* *Öncelik*	**Orta-Uzun** **Orta-Küçük**	ise	**0.70**
R^5	Eğer o zaman	*Bekleme Zamanı* *Öncelik*	**Uzun** **Küçük**	ise	**0.70**
R^6	Eğer o zaman	*Yolculuk Zamanı* *Öncelik*	**Kısa** **Büyük**	ise	**0.10**
R^7	Eğer o zaman	*Yolculuk Zamanı* *Öncelik*	**Orta-Kısa** **Orta-Büyük**	ise	**0.10**
R^8	Eğer o zaman	*Yolculuk Zamanı* *Öncelik*	**Orta** **Orta**	ise	**0.10**
R^9	Eğer o zaman	*Yolculuk Zamanı* *Öncelik*	**Orta-Uzun** **Orta-Küçük**	ise	**0.10**
R^{10}	Eğer o zaman	*Yolculuk Zamanı* *Öncelik*	**Uzun** **Küçük**	ise	**0.10**
R^{11}	Eğer o zaman	*Yolculuk Mesafesi* *Öncelik*	**Yakın** **Büyük**	ise	**0.50**
R^{12}	Eğer o zaman	*Yolculuk Mesafesi* *Öncelik*	**Orta-Yakın** **Orta-Büyük**	ise	**0.50**
R^{13}	Eğer o zaman	*Yolculuk Mesafesi* *Öncelik*	**Orta** **Orta**	ise	**0.50**
R^{14}	Eğer o zaman	*Yolculuk Mesafesi* *Öncelik*	**Orta-Uzak** **Orta-Küçük**	ise	**0.50**
R^{15}	Eğer o zaman	*Yolculuk Mesafesi* *Öncelik*	**Uzak** **Küçük**	ise	**0.50**
R^{16}	Eğer o zaman	*Yolcu Sayısı* *Öncelik*	**Az** **Büyük**	ise	**0.30**
R^{17}	Eğer o zaman	*Yolcu Sayısı* *Öncelik*	**Orta-Az** **Orta-Büyük**	ise	**0.30**
R^{18}	Eğer o zaman	*Yolcu Sayısı* *Öncelik*	**Orta** **Orta**	ise	**0.30**
R^{19}	Eğer o zaman	*Yolcu Sayısı* *Öncelik*	**Orta-Fazla** **Orta-Küçük**	ise	**0.30**
R^{20}	Eğer o zaman	*Yolcu Sayısı* *Öncelik*	**Fazla** **Küçük**	ise	**0.30**
R^{21}	Eğer o zaman	*Çağrı Katı Alan Değeri* *Öncelik*	**Uzak** **Küçük**	ise	**0.40**
R^{22}	Eğer o zaman	*Çağrı Katı Alan Değeri* *Öncelik*	**Orta** **Orta**	ise	**0.40**
R^{23}	Eğer o zaman	*Çağrı Katı Alan Değeri* *Öncelik*	**Yakın** **Büyük**	ise	**0.40**
R^{24}	Eğer o zaman	*Çağrı Katı Alan Değeri* *Öncelik*	**Orta** **Orta**	ise	**0.40**
R^{25}	Eğer o zaman	*Çağrı Katı Alan Değeri* *Öncelik*	**Uzak** **Küçük**	ise	**0.40**
R^{26}	Eğer o zaman	*Gidiş Katı Alan Değeri* *Öncelik*	**Uzak** **Küçük**	ise	**0.40**
R^{27}	Eğer o zaman	*Gidiş Katı Alan Değeri* *Öncelik*	**Orta** **Orta**	ise	**0.40**
R^{28}	Eğer o zaman	*Gidiş Katı Alan Değeri* *Öncelik*	**Yakın** **Büyük**	ise	**0.40**
R^{29}	Eğer o zaman	*Gidiş Katı Alan Değeri* *Öncelik*	**Orta** **Orta**	ise	**0.40**
R^{30}	Eğer O zaman	*Gidiş Katı Alan Değeri* *Öncelik*	**Uzak** **Küçük**	ise	**0.40**

Tablo 4.2' de ağırlık katsayısı olarak verilen değerler elde edilmek istenen her amacın sistem çıkışı olan öncelik değeri içindeki etki yüzdesini göstermektedir. Örneğin 0.7 ağırlık katsayısına sahip bekleme zamanı, bulanık mantık çıkarım sisteminin sonucu olan öncelik değerinin elde edilmesinde yüzde 70 etkiye sahip olacaktır. Bulanık mantık çıkarım sisteminde öncelik değerini elde etmek için uygulanan durulaştırma işleminde, bu amaçla ilgili kurallara bağlı çıkış üyelik fonksiyonlarında oluşan alanların yüzde 70 i alınarak toplanır. Her amaç için belirlenmiş ağırlık katsayısının etkisiyle oluşan bu alanların toplamının oluşturduğu alanın ağırlık merkezinin hesaplanmasıyla öncelik değeri elde edilir. Amaçlar için belirlenen ağırlık katsayıları, göz önüne alınan sistem için arzulanan performansı veren, simülasyon çalışmalarıyla belirlenmiş değerlerdir.

Ek A' da üç örnek durumla, ağırlık katsayılarının etkisi ve çıkarım sisteminin çalışması gösterilmektedir. Şekil A.1' de gösterilen durumda, ilgili kabinin yapılan çağrıya cevap verebilmesi için gerekli süre (bekleme zamanı) 27 saniye olarak belirlenmiştir. Bekleme zamanı için normalleştirme, 60 saniye maksimum değeri alınarak yapılmaktadır. Bekleme zamanı için normalleştirilmiş değer 27/60=0.45 olarak uygulanmaktadır. Benzer şekilde, seyahat zamanı için 80 saniye, çağrı yakınlığı için 60 kat, yolcu sayısı için 15 yolcu, çağrı katı alan değeri için [+6,-6] kat aralığı, gidiş katı alan aralığı için [+6,-6] kat aralığı değerleri alınarak normalleştirme yapılmıştır. Seyahat zamanı için 32 saniye hesaplanmış ve normalleştirilmiş değer 32/80=0.4 olarak uygulanmıştır. Kabinin çağrı katına yakınlığı 6 kat olarak belirlenmiş ve normalleştirilmiş değer 6/60=0.1 olarak uygulanmıştır. Kabindeki yolcu sayısı 3 olarak belirlenip, normalleştirilmiş değer olarak 3/15=0.2 uygulanmıştır. Çağrı katı alan değeri ve gidiş katı alan değeri olarak 1 normalleştirilmiş değerleri alınmıştır. Bu, kabin görevleri içinde (yolcu indirme veya yolcu bindirme), çağrı katının ve gidiş katının 6 kat altında ve 6 kat üstünde bir görev olmadığını göstermektedir. Çağrı katı alana değeri veya gidiş katı alan değeri için 0.5 değeri 0.5*6=3 kat yukarısına bir görevi olduğunu, 0 ise 0*6=0 kat farkı ile çağrı yapılan kata veya gidiş katına bir kabin görevi olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.3 Örnek Durum İçin Bulanık Mantık Çıkarım Sonuçları

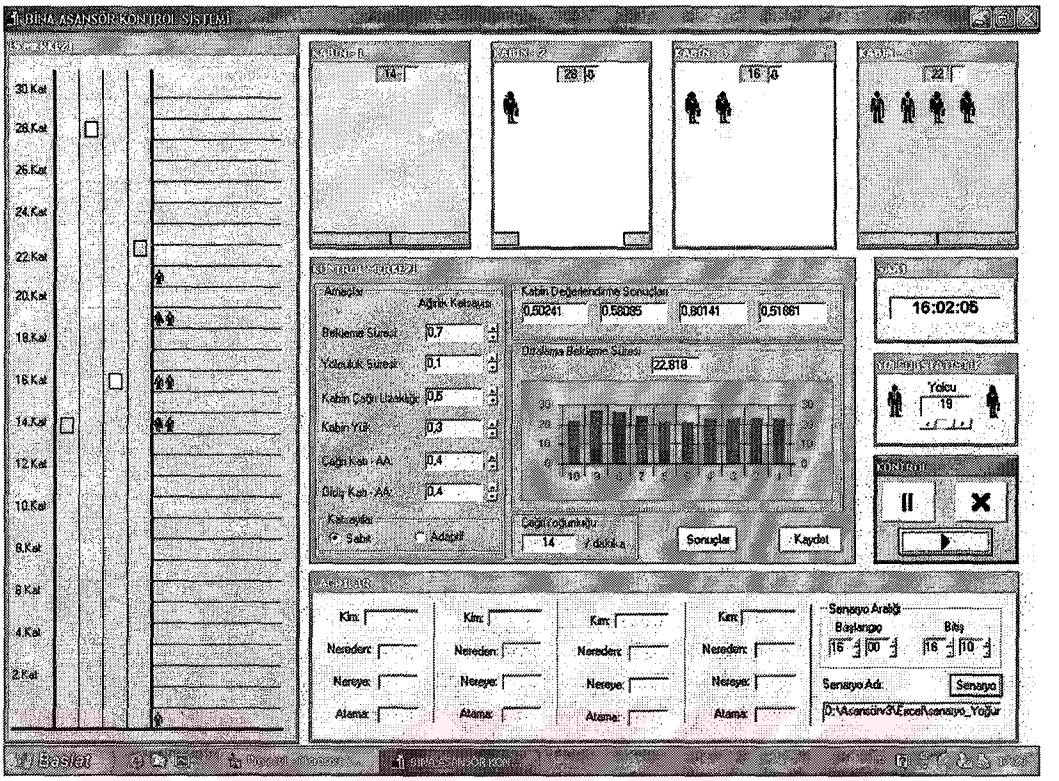
	Düz	Normalize	Düz	Normalize	Düz	Normalize
Bekleme Zamanı (sn.) [60 sn. max.]	27	0.45	27	0.45	15	0.25
Yolculuk Zamanı (sn.) [80 sn. max.]	32	0.4	32	0.4	32	0.4
Çağrı Yakınlığı (kat) [80 sn. max.]	6	0.1	6	0.1	6	0.1
Yolcu Sayısı (kişi) [15 yolcu max.]	3	0.2	3	0.2	3	0.2
Çağrı Nereden Alan Değeri (kat) [+6,-6]	6	1	3	0.5	3	0.5
Çağrı Nereye Alan Değeri (kat) [+6,-6]	6	1	0	0	0	0
ÖNCELİK	0.512		0.640		0.669	

Örnek olarak alınan üç durum için değerler Tablo 4.3' de gösterilmiştir. Üç durum için yolculuk süreleri, çağrı yakınlıkları ve yolcu sayıları aynı alınmıştır. Sadece bekleme zamanı ve alan değerleri değiştirilerek öncelik değerindeki değişimler gösterilmiştir. Diğerlerine göre bekleme süresi daha kısa ve alan değerleri daha düşük olan üçüncü durumda en yüksek öncelik değeri elde edilmektedir.

4.3.8 Bina Asansör Kontrol Sistemi (BAKS) Simülasyon Programı

Çalışma için örnek olarak belirlenen 30 katlı iş merkezinin bilgisayar ortamında canlandırılması ve uygulanacak kontrol yönteminin bu yazılıma entegre edilmesi için yazılım platformu olarak Microsoft Visual Basic 6.0 programlama dili seçilmiştir. Visual Basic 6.0 son derece gelişkin programlama dili olup Active X teknolojisinin kullanılabilmesi ve yapısında bulundurduğu gelişmiş "Library" fonksiyonları ve modülleriyle ileri düzey programlar yazmaya müsaittir. Adında da anlaşılacağı üzere visual-görsel yetenekleri sayesinde Windows uyumlu, kullanıcı dostu programlar geliştirilebilmektedir.

Visual Basic 6.0 kullanılarak yazılmış olan, asansör grup kontrol sistemi sıralı yapı bulanık mantık algoritması ile kontrol edilen 30 katlı iş merkezinin simülasyon programının ara yüzü Şekil 4.14' de görülmektedir.



Şekil 4.14 BAKS – Bina Asansör Kontrol Sistemi Simülasyon Programı Arayüzü

Simülasyon programı temel olarak 5 bölümden oluşmaktadır:

1- Bina:

Simülasyon boyunca yolcuların çağrı yaptıkları katları, asansör konumlarını, yolcu iniş ve binişlerinin görüntüleyen bölümdür. Bu bölümde çağrı yapan yolcular bulundukları kattaki kuyruklarına girer ve çağrı ataması yapılan kabin gelene kadar beklerler. Çağrı ataması yapılan kabin ilgili kata varınca yolcu yüklemesi gerçekleşir. Simülasyonda yolcu yüklemesi ve boşaltımı için belirlenmiş süre iniş için 1 saniye, biniş için 1 saniye kabul edilmiştir. Bu süreler esnek olup daha değişik çalışma şartları için programın içinden kolaylıkla değiştirilebilmektedir.

2- Kabinler:

Birbirinden bağımsız olarak hareket edebilmesi için modül yapısında tasarlanan kabinler, kendi zamanlayıcı yapısına sahiptir ve her biri kendi hareket , durma ve park etme kararlarını verebilmektedir.

Kabin kapasitesi esnek yapıda olup, program içinde 10, 12, 14 ve 15 kişi olarak belirlenebilmektedir. Uygulanan simülasyon çalışması için kapasite olarak 15 kişi seçilmiştir.

Kapı açılma ve kapanma süreleri 2 saniye olarak alınmıştır. Bu değer, bu kapasitelerdeki iki yana açılan kapılar için uygun değerdir.

Kabin hareketleri, elde edilecek sonuçların gerçeğe olabildiğince yakın olması için basitleştirilmemiştir. Her kabin yolculuğu boyunca ivmelenme ve hızlanma profillerine uygun olarak hareket etmektedir. Kabin hareketi 7 evreli olarak düşünülebilir. Yapacağı yolculuğa göre bu evreler önceden belirlenip gerekli sinyaller üretilmekte ve kabin tam olarak istediği noktada ve zamanında bulunabilmektedir. Asansör hareket profilleri iki ayrı nokta için Şekil 4.15' de gösterilmiştir. Bu profillerin elde edilebilmesi için kullanılan formüller aşağıdadır.

sıçrama:

$$j = j(t) \tag{4.8}$$

ivme:

$$a = a_0 + j(t).t \tag{4.9}$$

hız:

$$v = v_0 + a_0.t + \frac{1}{2} j(t).t^2 \tag{4.10}$$

yol:

$$s = s_0 + v_0.t + \frac{1}{2} a_0.t^2 + \frac{1}{6} j(t).t^3 \tag{4.11}$$

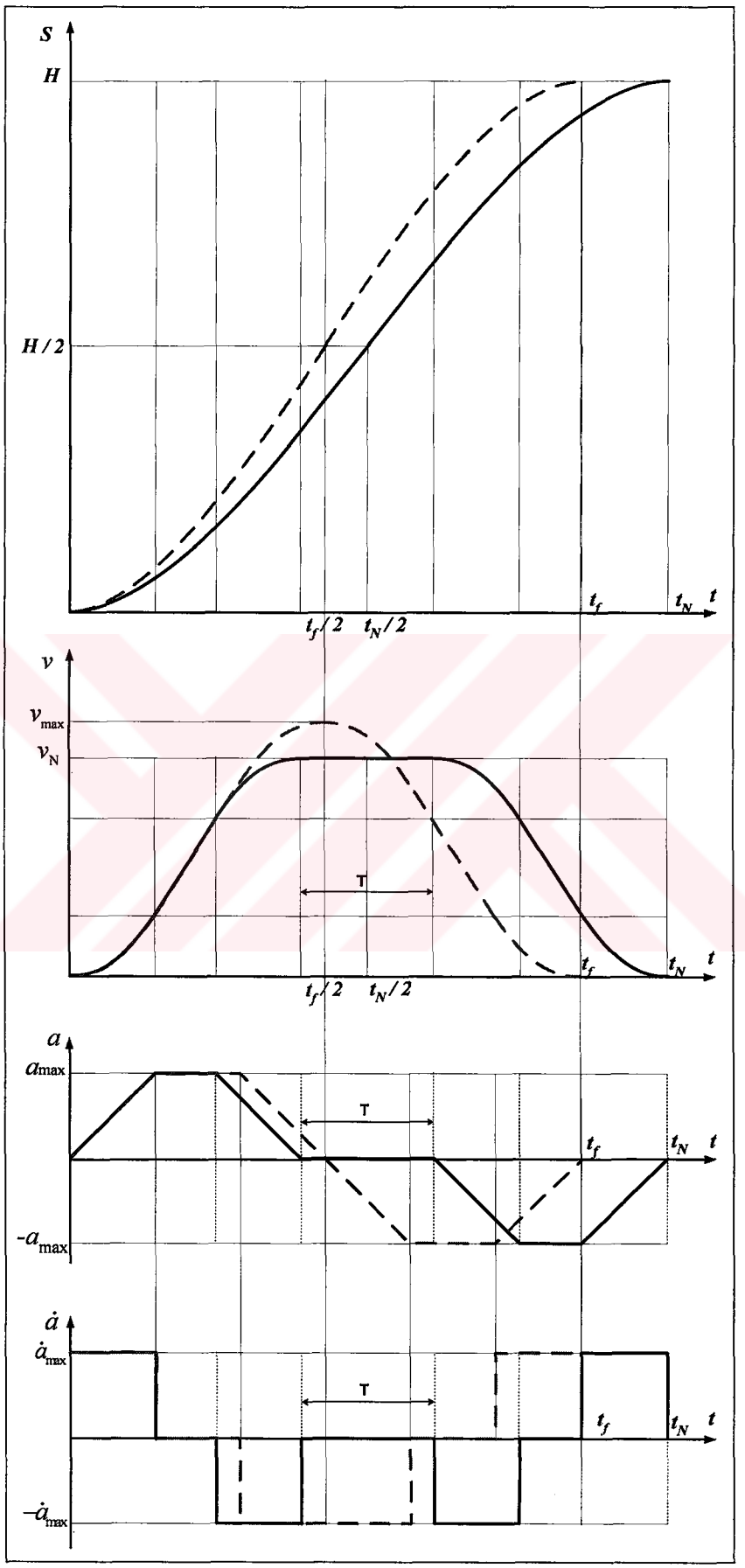
Şekil 4.15' den görüldüğü gibi, asansör hızında sınırlama yapılması durumunda kabin maksimum hızına ulaşamamakta ve siyah olarak gösterilen profili takip ederek t_N süresinde son noktasına varabilmektedir. Kısıtlama olmaması durumunda ise kırmızıyla gösterilen profil izlenecek ve son noktaya t_f süresinde varılacaktır.

3- Saat / Yolcu İstatistik / Kontrol:

Saat modülü, kullanıcı için geçen süreyi bilmek açısından önemlidir. Senaryo dosyasından canlandırılmak üzere alınan senaryo diliminin başlangıç anından bitiş anına kadar olan süre saniye bazında artımlarla ekranda gösterilmektedir.

Yolcu istatistik modülü simülasyon boyunca çağrı yapmış ve hizmet görmüş tüm yolcuların bilgilerinin tutulduğu ve ekranda gösterimini sağlayan bölümdür. Bu modül sayesinde herhangi bir yolcunun kodlanmış adı, geliş sırası, çağrı saati, biniş saati, iniş saati ve kabin ataması yapıldığı kabin numarası görülmektedir. Bu tutulan bilgiler sayesinde senaryo sonunda performans değerlendirmesi yapmak mümkün olmaktadır. Aynı bilgiler o anda kabin içinde veya binada kabin bekleme durumunda olan yolcuların herhangi birinin üzerine tıklanmasıyla da görülebilmektedir. Bu yapı yolcu takibi açısından da son derece önemlidir.

Kontrol modülü, programın çalıştırılması, sona erdirilmesi ve herhangi bir anda durdurulması için tasarlanmıştır. Durdurma işlemi, çok karmaşık yapıdaki program algoritmasının çalışma yapısının değerlendirilmesi ve programlama mantık hatalarının anlaşılabilmesi için son derece önemlidir. Durdurma tuşuna basılması durumunda program tüm modülleriyle birlikte durmakta, programın akışını bozacak, gözlemlenemeyen olaylar arka planda oluşmamaktadır. Çalışma düğmesine basılmasıyla program kaldığı yerden devam etmektedir.



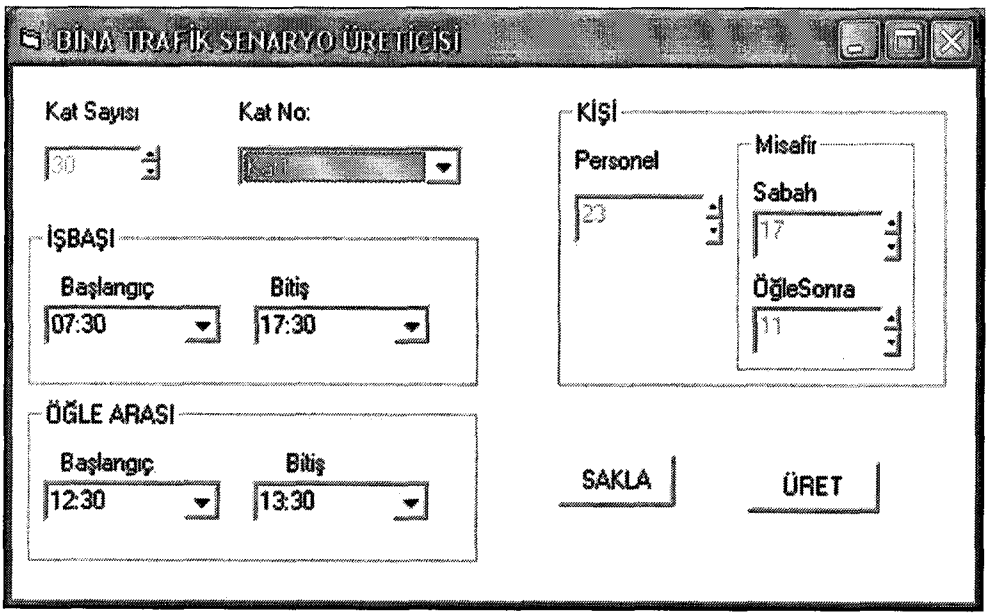
Şekil 4.15 Asansör Kabin Modülünde Dikkate Alınan Kinematik Yapı

4- Çağrılar:

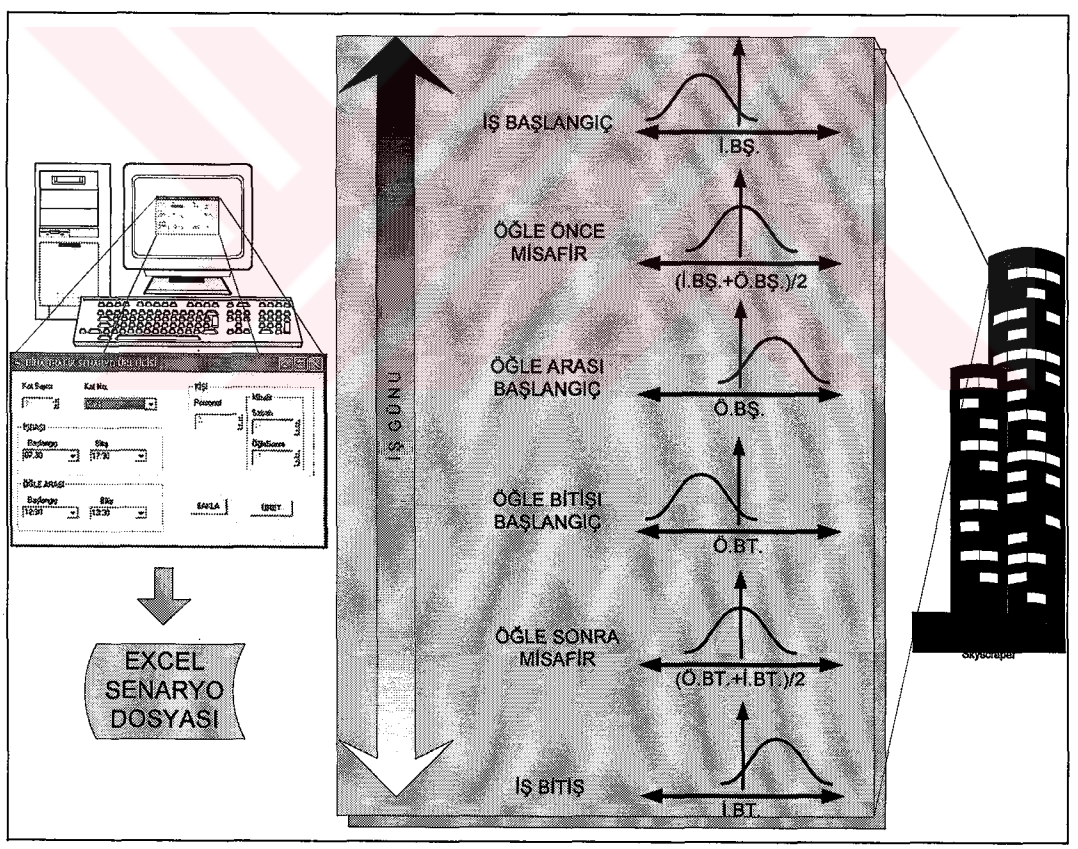
Çağrılar modülü sistemin yüklenebilmesi için tasarlanan modüldür. Bu modülde SENARYO tuşuna basılmak suretiyle önceden BİNA TRAFİK SENARYO ÜRETİCİ Programı tarafından üretilmiş herhangi bir senaryo, çıkan pop-up menüden seçilebilmektedir.Seçme işleminden önce senaryo dosyasının istenilen senaryo dilimi, senaryo başlangıç ve bitiş saatleri ve dakikaları girilerek seçim yapılmakta ve sisteme yüklenmektedir. Bu sayede üzerinde çalışma yapılmayacak senaryo diliminin boşuna hafızaya yüklenmesi ve bilgisayarı ağırlaştırması önlenmiş olur. Sisteme çağrı yapıldıktan sonra çağrı modülü, senaryo dilimindeki zaman aralığını saniye bazında kontrol ederek çağrı olması durumunda sisteme yükleme yapmaktadır. Çağrı modülü ekranında aynı anda dört çağrının yapılmasına müsaade edilmiştir. Rastlantısal olarak aynı anda ayrı katlardan veya aynı kattan ayrı panellerden dört çağrı yapılabilmektedir. Bu çağrı ekranlarında çağrı yapanın kodlanmış adı, nereden çağrı yaptığı, nereye çağrı yaptığı ve çağrı sonucunda kontrol merkezinin atadığı kabin numarası gösterilmektedir. Ayrıca küçük bir ekranda, sisteme yüklemek için kullanılan önceden oluşturulmuş simülasyon dosyasının adı kullanıcı için hatırlatıcı olması maksadıyla gösterilmektedir.

Çağrılar modülü yardımıyla sistemin yüklenmesi için kullanılan senaryo dosyalarının oluşturulması Şekil 4.16' da ara yüzü gösterilen BİNA TRAFİK SENARYO ÜRETİCİ programı tarafından yapılmaktadır. Bu programın senaryo üretme algoritmasını gösteren yapı Şekil 4.17' de verilmiştir. Programda yolcu dağılımı için normal dağılım ve poisson dağılımı modelleri kullanılmıştır. Bu iki dağılım modeline göre, 8. kattaki 29 ofis personeli için 07:30 sabah iş başlangıç geliş trafikleri Şekil 4.18 ve Şekil 4.19' da gösterilmiştir.

Bu programda senaryolar, gün içinde personel iş geliş ve gidişleri, yemek arası geliş ve gidişleri, binaya gelen misafirlerin geliş ve gidişleri seçime bağlı olarak normal dağılım veya poisson dağılımına uyduğu kabulüyle üretilmektedir. Belirlenecek başka bir dağılım modeli kullanılarak çok daha farklı trafik modelleri ve senaryoları üretmek mümkündür. Program bu esnekliğe sahiptir.



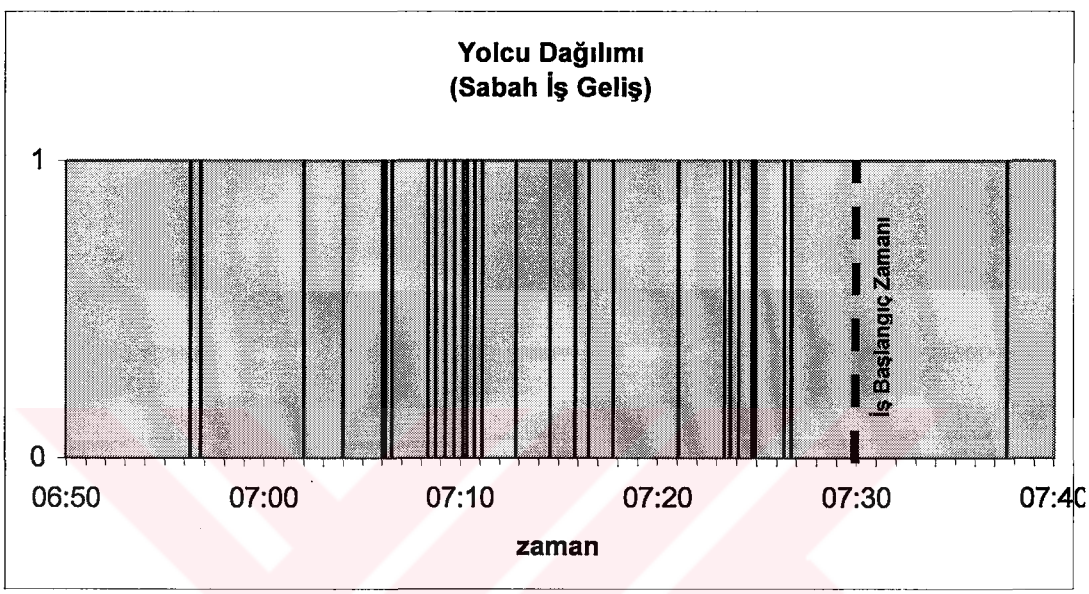
Şekil 4.16 BİNA TRAFİK SENARYO ÜRETİCİ Programı



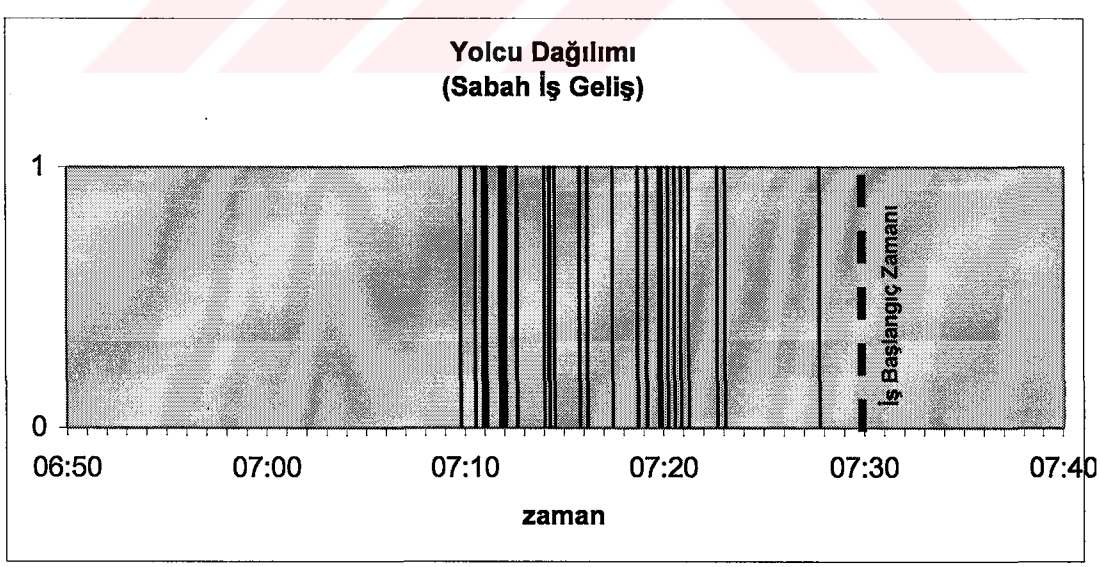
Şekil 4.17 BİNA TRAFİK SENARYO ÜRETİCİ Programı Çalışma Şeması

Programda istenilen kat sayısı kadar, bir binanın basitleştirilmiş trafik modeli oluşturulmaktadır. Seçilen kat sayısı kadar oluşturulan yapının trafiği için her katta çalışan personel sayısı, iş başlangıç ve bitiş saatleri, yemek arası başlangıç ve bitiş saatleri ve beklenen misafirlerin öğleden önce ve sonraki sayıları sisteme girilmekte,

bu değerler daha sonra tekrar kullanılabilmesi ve tekrar üzerinde düzenleme yapılabilmesi maksadıyla saklanabilmektedir. ÜRET düğmesine basılmasıyla Şekil 4.17' de şematik yapısı gösterilen sıraya göre her kat için dağılım yapılmakta ve bu iş her kat için tekrarlanarak gün içi yolcu trafiği 50400 satırlık EXCEL dosyasında kişinin vereceği herhangi bir adla saklanmaktadır.



Şekil 4.18 8. Kat Personelinin 07:30 İş Başlangıç Geliş Trafiği – Normal Dağılım



Şekil 4.19 8. Kat Personelinin 07:30 İş Başlangıç Geliş Trafiği – Poisson Dağılımı

5- Kontrol Merkezi:

Kontrol Merkezi programın beyni durumundadır. Bütün kontrol işleri, karar verme süreçleri ve bu sürecin çıktıları burada yapılmakta ayrıca sistemin kontrolü için önceden belirlenen amaç katsayılarının girilmesi ve değiştirilmesi de bu bölümde olmaktadır. Kontrol Merkezinin Katsayılar alt bölümünde, sistem performansı için önceden belirlenen altı amacın ağırlık katsayıları bulanık mantık çıkarım sisteminde kullanılmak üzere girilmektedir. Sistem başlangıç değerlerine sahiptir. Kullanıcı istediği değerleri, katsayı ekranının yanındaki küçük düğmelerle kullanarak arttırıp azaltabilmektedir. Ayrıca sistem katsayı kullanımı sabit ve adaptif olmak üzere seçilebilmekte ve ekranda önceden seçim yapılabilmektedir. Sabit modunda katsayılar simülasyon boyunca sabit kalmaktadır. Adaptif modunda ise Kontrol Merkezi içinde sürekli sayımı yapılan ve küçük bir ekranda gösterilen dakikada gerçekleşen çağrı sayısına göre önceden oluşturulmuş katsayılar tablosuna bakılarak o çağrı yoğunluğuna uygun katsayılar belirlenmekte ve simülasyonda kullanılmaktadır. Adaptif modda çağrı yoğunluğunun az olduğu durumlarda öncelik enerji tasarrufuna verilmekte, çağrı yoğunluğunun artması durumunda yolcu bekleme süresini azaltmaya yönelik katsayılar seçilmektedir. Sistem için belirlenen katsayılar Tablo 4.4 ve Tablo 4.5' de gösteriliştir.

Tablo 4.4 Sabit Mod İçin Geçerli Katsayılar

AMAÇLAR	AĞIRLIK KATSAYILARI
Bekleme Süresi	0.7
Yolculuk Süresi	0.1
Kabin Çağrı Uzaklığı	0.5
Kabin Yük / Yolcu Sayısı	0.3
Çağrı Katı Alan Ağırlığı	0.4
Gidiş Katı Alan Ağırlığı	0.4

Tablo 4.5 Adaptift Mod İçin Geçerli Katsayılar

AMAÇLAR	AĞIRLIK KATSAYILARI		
	Enerji Öncelikli	Normal	Bekleme Öncelikli
Bekleme Süresi	0.5	0.7	0.9
Yolculuk Süresi	0.1	0.1	0.1
Kabin Çağrı Uzaklığı	0.5	0.5	0.5
Kabin Yük / Yolcu Sayısı	0.3	0.3	0.3
Çağrı Katı Alan Ağırlığı	0.7	0.4	0.1
Gidiş Katı Alan Ağırlığı	0.7	0.4	0.1

Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi

Çalışmanın temelini oluşturan ve programın can damarı olan kısımdır. Bulanık çıkarım sisteminin oluşturulması için MATLAB programından faydalanılmıştır. Bu programın yardımcı programı olan Fuzzy Logic ToolBox gelişmiş bir program olup kendi bulanık çıkarım sistemine sahiptir. Bu yardımcı programın çıkarım sistemini kendi başına çalışabilir halde program içinde kullanabilmek için C programlama dili içinde derlemeler yapılmış ve sonunda "dll" dosya yapısında çıkarım sisteminin motoru ayıklanmıştır. Bu dosya, yardımcı dosyalarla birlikte her türlü program içinde bulanık çıkarım sistemi olarak kullanılmaya uygundur. Yapılması gereken, program içinde doğru tanımlamalar yapmak ve sistemi MWSTRUCT yapısında tanımlamaktır.

Her çağrı geldiğinde sistem durumu hesaplanmakta ve bulanık çıkarım sistemi yapısına uygun şekle dönüştürülmektedir. Dönüştürülen bu sistem durumu analiz ve karşılaştırma yapabilmek maksadıyla program içine yerleştirilen Sonuçlar ekranında gösterilmektedir. Bu ekrandaki değerlere bakarak sistemin çalışması hakkında fikir sahibi olunabilmeketdir.

Elde edilen dönüştürülmüş sistem durumu, bulanık çıkarım sistemine girilmekte ve kullanılan bilgisayarın konfügürasyonuna bağlı olarak 100 milisaniyenin altında sürelerde sonuç üretilmektedir. Üretilen sonuçlar her kabin için öncelik değeri olarak verilmektedir. Öncelik değeri en yüksek olan kabin o çağrı için ataması yapılacak olan kabindir. Bu öncelik değerleri de Kontrol merkezi içinde dört ayrı ekranda gösterilmektedir. Hesaplamadaki düşük süreler, böyle sistemlerin dinamik olarak kontrolünü mümkün kılmaktadır.

Sistem için öncelikli amaç olan bekleme süresinin durumunu gözlemleyebilmek için son on çağrının oluşturduğu kümülatif ortalama değerleri bir sütün grafik ekranında gösterilmekte ve bu sayede bekleme sürelerindeki gidişat gözlemlenebilmektedir. Toplam kümülatif ortalama bekleme süresi de simülasyon boyunca küçük bir ekranda kullanıcıya gösterilmektedir.

Son olarak, kontrol merkezi içinde bulundurulması gereken, yapılan simülasyon çalışmasının sonuçlarının saklanması ve daha sonra değerlendirilmesi maksadıyla oluşturulmuş saklama ekranıdır. Bu bölümde sonuçlar istenilen bir isim altında Excel

dosyası formatında diskte saklanmaktadır. Dosya oluşturulurken, simülasyon boyunca toplanan bütün bilgiler işlenmekte ve kullanıcı için yorumlanması kolay biçimde grafiksel hale getirilmektedir. Çalışmanın sonuç dosyasında simülasyon boyunca kabinlerin hareket rotaları, kümülatif ortalama bekleme süreleri, her yolcu için bekleme ve yolculuk süreleri, kişi başına kat ve durak sayılarını gösteren performans bilgileri ve ayrıca kabin başına yapılan taşımalar ve ortalamaları, değerleri ve grafikleri ile saklanmaktadır.

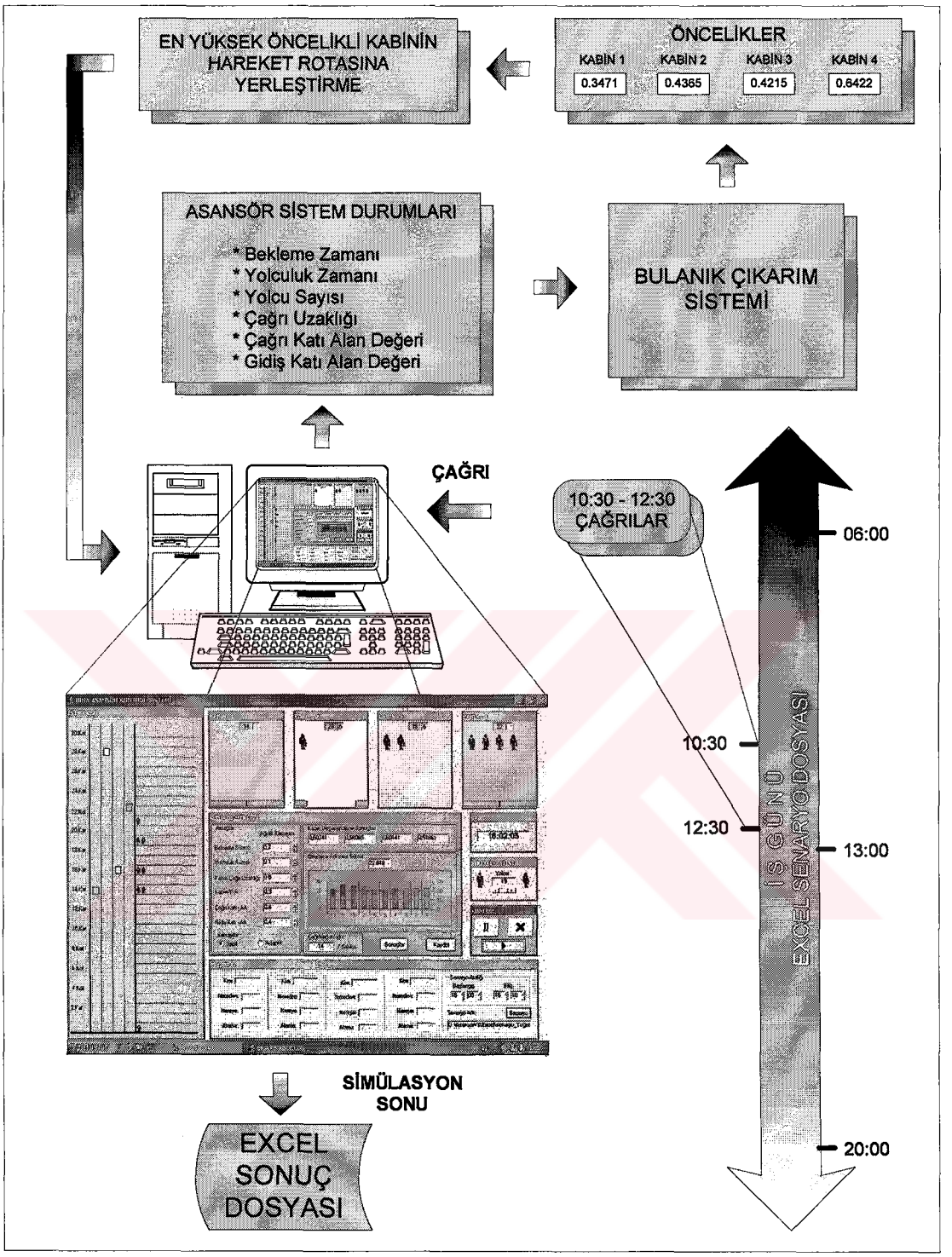
Tanıtımı yapılan BAKS – Bina Asansör Kontrol Sistemi Simülasyon Programı çalışma yapısı şematik olarak Şekil 4.20' de gösterilmiştir.

4.3.9 Simülasyon Senaryoları ve Sonuçları

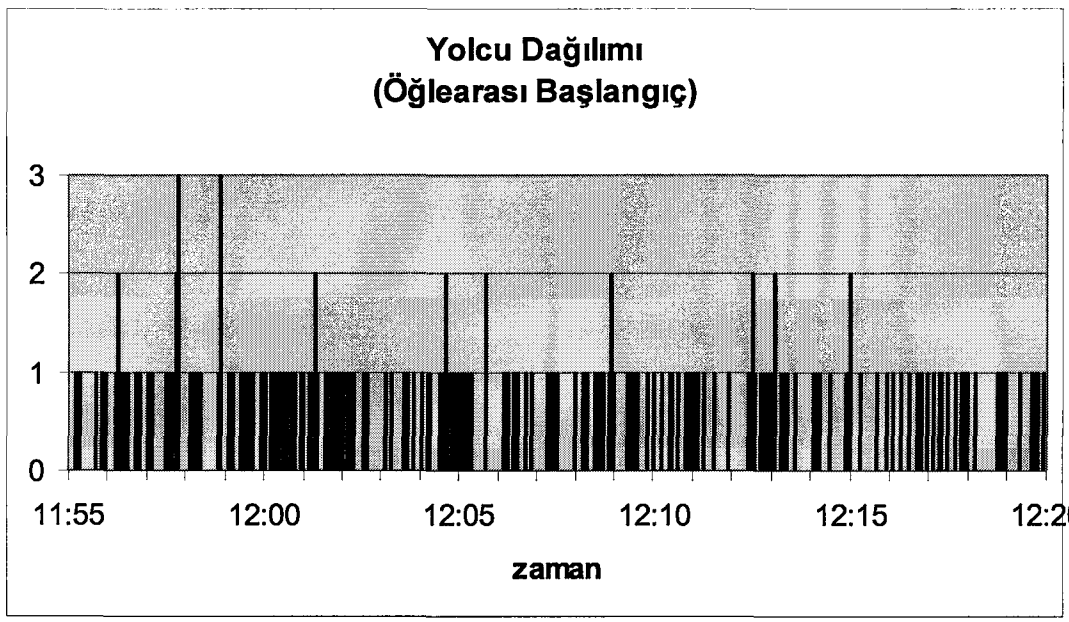
Yapılan çalışmanın denenmesi maksadıyla oluşturulan senaryo dosyası, her katta ortalama 25 personel ve gün boyu 18 misafir gelişini esas almıştır. İş geliş ve gidiş saatleri ve öğle arası bütün katlara düzgün olarak yayılmıştır. 30. kat kafeterya katı olduğu için bu kattan öğle arası personel çıkışı olmamaktadır. Bu esaslar dikkate alınarak oluşturulan senaryo dosyası (BTS-Bina Trafik Senaryosu) yapılacak simülasyon için trafik hareketleri sağlamaktadır.

BTS programından Normal dağılıma ve Poisson dağılımına göre trafik senaryoları elde edilmiştir. Örnek olarak belirlenen ve seçilen senaryo dilimi 12:00 12:15 aralığıdır. Bu dilimde her kattan kafeterya katına ve dışarıya çıkmak için lobi katına olmak üzere çift taraflı trafik akışı olmakta ve tam başlangıç saati olması nedeniyle yoğun bir trafik gözlenmektedir. Bu senaryo dilimi için elde edilen çağrı dağılımları Normal dağılım ve Poisson dağılımı için Şekil 4.21 ve Şekil 4.22' de gösterilmiştir. Normal dağılıma göre bu dilim için 138 kişi çağrı yapmakta, poisson dağılımına göre elde edilen senaryoda bu dilimde 178 kişi çağrıda bulunmaktadır.

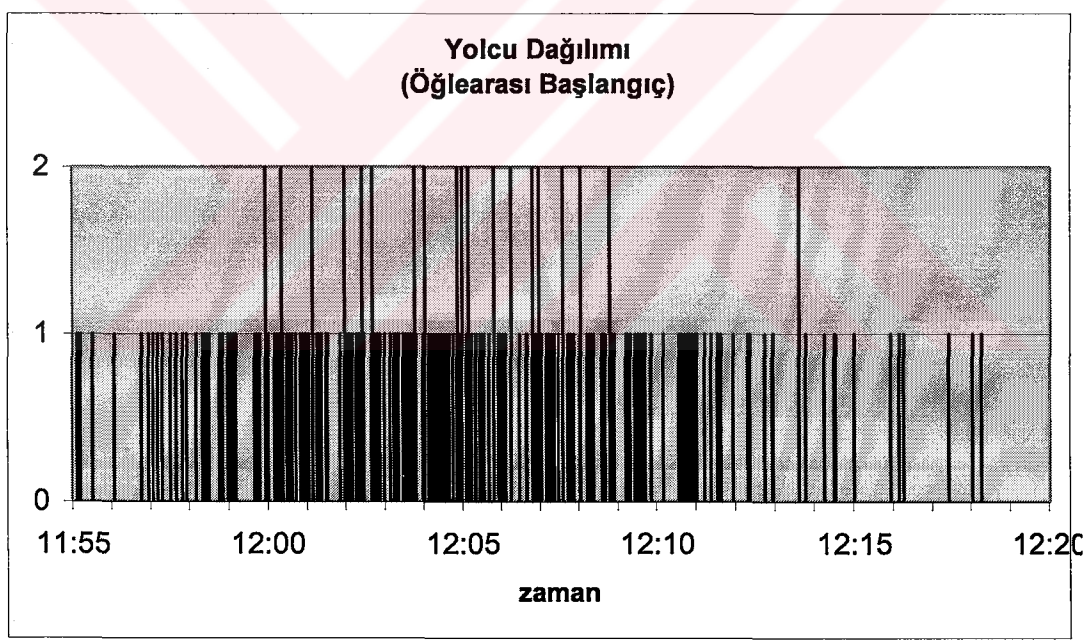
Seçilen bu dilim üç farklı şart altında çalıştırılmıştır. Bunlar katsayıları sırasıyla 0.5, 0.1, 0.5, 0.3, 0.7, 0.7 olan enerji ekonomisinin dikkate alındığı durum, katsayıları sırasıyla 0.9, 0.1, 0.5, 0.3, 0.1, 0.1 olan bekleme süresinin dikkate alındığı durum, ve katsayıları sırasıyla 0.9-0.5, 0.1, 0.5, 0.3, 0.7-0.1, 0.7-0.1 aralığında değişen adaptif durumdur. Bu üç durumun her iki dağılım modeline göre sonuçları EK B ve EK C' de sunulmaktadır.



Şekil 4.20 BAKS – Simülasyon Programı Çalışma Yapısı



Şekil 4.21 12:00 -12:15 Trafiği – Normal Dağılım



Şekil 4.22 12:00 -12:15 Trafiği – Poisson Dağılımı

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada amaç, çok amaçlı karar verme problemlerine değişik yaklaşımlar getirmek ve örnek problemler üzerinde bu yaklaşımların çalıştığını gözlemlemektir. Bu amaçla, çok amaçlı karar verme problemleri statik ve dinamik yapıda iki grup olarak ele alınmış ve her iki grup için de birer problem tanımlanarak çözümler elde edilmiştir. Statik yapıdaki grup için iki yöntem seçilmiş ve belirlenen örnek bu iki yöntemle çözülmüştür. Çözümler için geliştirilen algoritmalar ve bu algoritmaları kullanan programlar MATLAB programlama dili ve Optmizasyon Toolbox paketi kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçların daha iyi değerlendirilmesi ve uzlaşık çözüme ulaşılana kadar programla yapılacak bilgi alışverişinin daha verimli olması için bu yazılan programlara birer arayüz ilave edilmiştir. Dinamik yapıdaki grupta yer alan çok amaçlı karar verme problemine çözüm elde etmek için bulanık mantık yöntemi uygulanmış ve programlama dili olarak Visual Basic 6.0 dili kullanılmıştır.

Seçilen birinci yöntem olan SEMOPS yöntemi, etkileşimli çok amaçlı karar verme problemlerine güzel bir örnektir. Ele alınan yöntemin etkileşimli olması yani her adımda karar vericinin işin içine katılması, çevrim sonuçlarının değerlendirilmesi esnasında istek seviyelerinin tekrar belirlenmesini gerektirmektedir. Bu durum arzu edilen sonuca ulaşmada hız ve esneklik sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntem nonlineer problemlerin çözümü için de kullanılabildiğinden çok daha geniş uygulama alanına sahiptir.

Yapılan çalışmada, geliştirilen bilgisayar programı kullanıldığı için normalde analist ile karar verici arasında geçen etkileşim, bilgisayarla karar verici arasına taşınmış ve sonuca ulaşma süresi kısalmıştır. Bilgisayarla gerçekleşen etkileşim bir arayüzle oluşmakta ve elde edilen sonuçlar çok daha iyi değerlendirilebilmektedir. Karar vericinin bir sonraki çevrim için yapması gereken seçimler de bu sayede daha sağlıklı ve hızlı olmaktadır. Bu da, sonuca ulaşırken karar vericiye avantaj sağlamaktadır.

Bu yöntemin kullanılması durumunda amaç fonksiyonlarının değerlerinin alt ve üst sınırları dikkatli seçilmelidir. Aksi takdirde yanlış sonuçlar üretilmektedir. Bu yöntemin en arzu edilmeyen durumu, yardımcı problemlerin çözümü sırasında uygun olmayan kısıt setlerinin bulunmasıdır. Bu gibi durumlarda, uygun istek seviyeleri setinin belirlenmesi rastgele olmaktadır. Ayrıca yardımcı problemlerin çözümü sırasında istek seviyelerinden bir veya birkaçının çelişmeyen yapıda olması durumunda baskın çözüm elde etme ihtimali vardır.

Seçilen ikinci yöntem olan TOPSIS ise karar vericiden problemin çözümü için en başta gerekli bilgileri almakta ve uyguladığı algoritmayla sonuca ulaşmaktadır. Elde edilen sonuçlar karar verici tarafından benimsenmezse yani uzlaşık çözüme varılamazsa amaç fonksiyonları için belirlenen ağırlık katsayılarının değiştirilmesi ile tekrar çözüme gidilir. Bu süreç istenen sonuçlar yani uzlaşık çözüm elde edilene kadar devam eder. Amaç fonksiyonları için ağırlık katsayılarının verilmesi yoluyla çözüm elde edildiği için istenen çözüme varana kadar birçok deneme yapmak gerekebilir. Bu durum dezavantaj görünmekle birlikte algoritmaya esneklik katmaktadır. Çünkü karar vericinin gözlemek istediği her türlü sonucun irdelenmesi bu sayede mümkün olmaktadır.

Bu yöntem için de oluşturulan algoritmanın programı yine MATLAB programlama dili ve Optimizasyon Toolbox paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yazılan kullanıcı arayüzü ile bütün değerlerin okunması ve değiştirilmesi mümkün olmaktadır. Programlarda yapılacak küçük değişiklikler ve örnek sistem için yapılan tanımlamaların yeni sistem için yapılmasıyla program bütün sistemlere uygulanabilecek niteliktedir.

Örnek olarak belirlenen Bow vadisi su kalite yönetimi problemi, varsayımsal bir problem olup, benzer yapıdaki birçok probleme örnek teşkil etmektedir. Nonlineer yapısı ve gerçek dünyadan bir problem olması bakımından güzel bir örnektir. Bu problem için SEMOPS yöntemi ile elde edilen sonuçlar karar verici tarafından 5 çevrimde gerçekleştirilmiştir. Karar vericinin istediği sonucu elde edene kadar yapabileceği istek seviyelerindeki değişikliklerle sonuca ulaşma çevrim sayısı artabilir. Fakat harcanan süre etkileşimin bilgisayarla olması nedeniyle çok kısadır. Üç şehir için elde edilen DO (çözünmüş oksijen) seviyeleri 6.06 mg/l, 5.05 mg/l, 6.08 mg/l ilk başta belirlenen seviyelerden büyük olup karar vericiyi tatmin

etmektedir. Yatırım geri dönüş yüzdesi ise % 6.5' den büyük olması istenmekte fakat bu değer tam olarak elde edilememektedir.Elde edilen % 6 seviyesi karar verici için kabul edilebilir bir düzeydedir ve öncelikleri daha ağır olan diğer amaçlar için bu amaçtaki % 0.5' lik sapma kabul edilmiştir. Aynı şekilde, iki şehir için ilave vergi artışı da % 1.5' den küçük istenmiş, sadece bir şehir için bu amaç % 1.43 değeri ile elde edilebilmiştir. Diğer şehirdeki % 1.95 vergi artış değeri karar verici tarafından kabul edilebilir bir düzeyde görülmüştür. Görüldüğü gibi tüm amaçların sağlanabilmesi mümkün değildir. Hangi amaçların öncelikli olup önce sağlanacağı ve hangilerinden feragat edileceği karar vericiye kalmaktadır.

Bu probleme uygulanan ikinci yöntem TOPSIS' de ise ilk çözümden farklı olarak vergi oranları en öncelikli amaç olarak belirlenmiş ve bu iki amacın çözüm yöntemindeki katsayıları 0.25 olarak alınmıştır. Daha sonraki öncelikli amaç, yatırımın geri dönüş yüzdesi için amaç katsayı 0.2 ve en az öneme sahip amaçlar olan çözünmüş oksijen seviyeleri için belirlenen amaç katsayıları ise 0.1' dir. Bütün amaç katsayıları toplamı 1 olmak zorundadır. Problemin çözümü için belirlenen istek seviyeleri değiştirilebilmekte ve her bir seviye ayrıca kısıt olarak belirlenebilmektedir. Bu da problemin çözümüne esneklik katmakta ayrıca karar verici için daha geniş düşünebilme ayrıcalığı sağlamaktadır. Belirlenen bu sıralama ve ağırlık katsayılarına göre elde edilen sonuçlar, üç bölge için çözünmüş oksijen seviyeleri 5.80 mg/l, 4.02 mg/l, 5.76 mg/l olarak elde edilmiştir. Bu değerler, ağırlık katsayılarının en düşük değere sahip olmasından dolayı belirlenen 6 mg/l seviyesinden düşük çıkmıştır. Yatırımın geri dönüş yüzdesi için istenen % 6.5 değer, elde edilen % 6.81 değerle tutturulmuştur. Vergi oranlarındaki artış için belirlenen % 1.5' den küçük olma şartı ise bir şehir için % 0.77 değeri ile yeterince iyi sağlanırken, ikinci şehir için % 1.58 gibi çok küçük bir aşma ile sonuç alınmıştır. Bu sonuçların karar verici için uygun sonuçlar olmaması durumunda katsayıların değiştirilmesi ile farklı sonuçlar tekrar elde edilebilir.

Yapılan çalışmadaki program ve arayüzü probleme yönelik olup, arkasında çalışan algoritma genel yapıdadır. Herhangi başka bir problem için bu algoritma program ve arayüzde yapılacak küçük değişikliklerle tekrar kullanılabilir. Genel yapıda yapılan bir çok amaçlı karar verme problemi programı kullanıcının bu konulara yeterince hakim olmasını gerektirmektedir. Karar vericiden çok detaylı teorik bilgi

istenemeyeceğinden bu tip programların problem esaslı arayüz modülleri içermesinde fayda vardır.

Çok amaçlı karar verme problemlerinin tek bir çözümü yoktur. Geliştirilmiş bütün yöntemler, sunduğu çözüm ailesi içinden karar vericinin istekleri doğrultusunda en uygun olanını seçmesine yardım etmeye yöneliktir. Bu nedenle bir yöntemin diğer bir yönteme üstünlüğünden bahsetmektense amaca ve sonuca ulaşma şekline göre her yöntemin farklı kullanımlarının olacağı ve avantajları belirtilmelidir.

Dinamik sistem olarak ele alınan örnek bir asansör grup kontrol sistemidir. Çok katlı binalarda uygulanan asansör grup kontrol sistemi, göz önüne alınan birçok amacı yerine getirmek zorundadır. Yavaş ve verimsiz çalışan asansör sistemleri binaların faaliyetlerini etkilemekte ve yolcuları tatmin etmemektedir. Bu nedenle asansör sisteminin bina özellik ve gereksinimlerine göre doğru tasarlanmış olması gerekir. Tasarımın uygunluğu kadar, beklenen trafik tipi ve büyüklüğü hakkındaki bilginin doğru olması da önemlidir.

Bu çalışmada, asansör grup kontrol sistemi için bir bulanık kontrol algoritması önerilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu yeni asansör denetim kontrol sistemi, göz önüne alınan çok sayıdaki kontrol amacının geliştirilmesi maksadıyla tasarlanmıştır. Önerilen sistemin performansı, geliştirilen görsel tabanlı etkileşimli bir yazılımla simüle edilmiştir. Geleneksel sistemlerle kıyaslandığında, önerilen sistemin, bekleme zamanının, yolculuk zamanının, konfor açısından yolcu yük durumunun ve enerji sarfiyatının minimize edilmesi açısından daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Asansör grup kontrolüne bulanık mantık uygulaması için düşünülen sıralı yapı bulanık mantık algoritması, kuralların oluşturulması ve düzenlenmesi bakımından, klasik bulanık mantık algoritmasından daha basit bir mekanizma sunmakta ve yeterince iyi sonuçlar vermektedir.

Simülasyon çalışması iki ayrı trafik durumu için yapılmıştır. İki trafik durumu da yazılan ayrı bir program tarafından, Normal ve Poisson dağılımına göre elde edilmiş ve yapılan birkaç kabulle gerçeğe çok yakın trafik durumu oluşturulmuştur. Simülasyon için seçilen çalışma aralığı iki yönlü trafiğin yoğun olduğu öğle arası başlangıç saatidir. Bu aralıkta hem kafeterya katına hem de bina dışına çıkış olacağından her iki yönde de yoğun çağrı görülmektedir. Normal dağılıma göre

yapılan trafik durumunda yolcu dağılımı daha geniş bir zaman dilimine yayıldığından bu aralıkta görülen çağrı sayısı 138 dir. Poisson dağılımı yolcuları daha sık bir aralıkta toplamakta ve bu dağılıma göre bu aralık için elde edilen çağrı sayısı 178 olmuştur.

Ekteki çıktıların değerlendirilmesiyle, iki dağılıma göre elde edilmiş trafiğin bekleme öncelikli, enerji öncelikli ve adaptif işletme koşulları ile elde edilen rota grafiklerinden kabin dağılımlarının düzgün olduğunu ve kontrolörün düzgün çalıştığını söyleyebiliriz. Hiçbir kabin senaryo süresince sabit kalmamış, kısa süreli park etme durumları haricinde sürekli yüklenmiştir. Ayrıca herhangi bir andaki kabin konumlarına bakıldığında, birbirlerinden uzak olduğu yani kabinlerin katlar arasında düzgün bir dağılım sergilediği görülmektedir.

Normal dağılıma göre elde edilen trafik durumunda, kümülatif ortalama bekleme süresi beklenin tersine enerji öncelikli senaryo katsayılarıyla, diğer durumlardan daha düşük çıkmıştır. 36.53 saniyelik bu ortalama bekleme süresi sadece 15 dakikalık bir süreyi kapsadığından genel durum için fikir vermemektedir. Bekleme süresine öncelik tanıyan katsayılarla çalıştırılan durumlardaki 39.90 saniyelik süre ve adaptif durumdaki 38.28 saniyelik süreler, enerji öncelikli durumdaki halin % 9 ve % 4.5' i kadar fazla olup kısa bir periyot için elde edilen değerlerdir. Bu üç hal için elde edilen ortalama bekleme süreleri literatürede belirtilen ve olması istenen 25-30 saniyelik süreyi % 20-30 aralığında aşmıştır. Bu aşım miktarı, asansörlere çalışma bölgesi ayırımı (zonlama) yapılmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca elde edilen değerler 15 dakikalık sürede 138 yolcu taşımak gibi yoğun çağrı durumu için makul düzeydedir.

Poisson dağılımına göre elde edilen trafik durumunda kümülatif ortalam bekleme süresi enerji öncelikli durum için 41.4 saniye, bekleme süresi öncelikli durum için 52,72 saniye ve adaptif yapıdaki durum için ise 40.1 saniye olarak elde edilmiştir. Beklenenin tersine yüksek çıkan 52.72 saniyelik süre, asansör kontrol sisteminin her çağrı için hemen bir kabin atamasından ve bundan sonraki çağrılara yanıt vermek için görev sonlandırılmasını beklemesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil C.8.a ve C.8.b' de daha açık görülmektedir. Şekildeki bekleme ve yolculuk süreleri incelendiğinde çok sayıda uzun süre bekleyen yolcu olduğu görülür. Bu yolculara hizmet verecek kabinler yapılan ilk çağrıya cevap verdiğinden yeterince dolu

olmadan gideceği yere yönlenmekte ve bundan sonraki çağrılar için uzun bekleme süreleri oluşmaktadır. Bu durum ayrıca 1320 katlık toplam katedilen yolun diğer durumlardaki 1184 ve 1194 katlık toplam katedilen yollardan oldukça fazla olmasından görülebilmektedir. Trafik yoğunluğunun yüksek olduğu dilimlerde, her çağrıya hemen cevap vermek daha sonra oluşan çağrıların daha fazla beklemesine ve dolayısıyla kümülatif bekleme süresinin artmasına ve ayrıca sistemin daha fazla yüklenmesine neden olduğundan bu dilimler için bekleme süresi katsayılarını nispeten düşük tutmak daha iyi sonuç verecektir.

Kabinlerin toplam katettikleri yollara bakıldığında, olması gerektiği gibi en fazla yol Normal dağılıma göre oluşan trafikte 1420 kat ile ve Poisson dağılımına göre oluşan trafikte 1320 kat ile bekleme süresinin öncelik kazandığı katsayıların kullanıldığı simülasyon durumunda elde edilmiştir. Adaptif katsayılarla çalışan simülasyon durumu ise en iyi haldir ve Normal dağılıma göre oluşan trafik için 1282 ve Poisson dağılımına göre oluşan trafik için 1184 kat olarak görülmektedir. Bu, sistemin adaptif yapısından kaynaklanmakta, sistem öncelik katsayılarını çağrı yoğunluğuna göre değiştirebilmektedir. Bu durum, senaryonun daha uzun çalıştırılması durumunda daha açık biçimde görülecektir.

Performans grafiklerinden kişi başına yol (kat sayısı) ve durak sayıları görülebilir. Kabin performans grafikleri enerji tüketimleri hakkında fikir vermek maksadıyla oluşturulmuşlardır. Ayrıca kabinlerin birbirleri arasındaki yük dağılımı ve enerji tüketim dağılımını da göstermektedir. Her iki trafik durumu için de kabinler arasında dengeli bir dağılım oluşmuştur.

Adaptif durum her iki trafik durumu için de iyi sonuç vermiştir. Sistem, her iki trafik durumunda da daha az yol katederek daha az bekleme süresiyle en iyi performansı sergilemiştir. Katsayıların trafik yoğunluğuna bağlı olarak değişmesi sistem performansı için çok daha uygun olacaktır. Simülasyon çalışması daha uzun periyotlarda çalıştırılarak genel performans durumu incelenebilir. Ayrıca belirlenen katsayılar değiştirilerek değişik yoğunluktaki senaryo durumları için çalıştırılabilir. Elde edilecek en uygun katsayılar kümesi, binanın genel trafik yapısına göre sistemin kontrolü için en uygun katsayılar kümesi olacaktır. Bu, bir tabloda toplanarak kontrol programı içinde trafik yoğunluk durumlarına göre çağrılarak kullanılabilir.

Böyle bir yapı sayesinde sistem ani değişen durumlara veya beklenmeyen durumlara çok kolay adapte olabilecektir.

Asansör grup kontrol sisteminin sıralı yapıda bulanık mantık algoritması yardımıyla kontrol edilebilmesi amacıyla yapılan bu çalışma göstermiştir ki, seçilen yöntem böyle bir sistemi yeterince iyi performans sağlayacak şekilde ve dinamik olarak yönetebilmektedir. Bu çalışma Türkiye' de ilk olup, yapılan araştırmalar sonucunda dinamik simülasyonlu bulanık mantık uygulamalı asansör kontrol çalışmasına rastlanamamıştır. Görülen çalışmalarda anlık durumlar test edilmektedir. Bunun genele yayılmış halinin canlandırıldığı ve bir ara yüz ile gösterildiği bir çalışma görülememiştir.

Çalışmanın değerlendirilmesi amacıyla oluşturulan yazılım geliştirilmeye açıktır. Kullanılan sıralı yapı bulanık mantık algoritması modül yapıda olduğundan çıkarılıp başka bir algoritma ile test edilebilir ve kullanılabilir. Bu bulanık mantık kontrol algoritması Genetik Algoritmalar, Yapay Sinir Ağları gibi mevcut diğer algoritmalar ile birleştirilerek sistemin çalışma durumları değerlendirilebilir ve geliştirilebilir.

Bu tez kapsamında statik yapıda ÇAKV problemlerinin çözümünde en çok kullanılan TOPSIS ve SEMOPS yöntemlerine dayanan yeni karar destek algoritma ve programları geliştirilmiştir. Karar verici ile ara optimizasyon işlemlerini yürüten bilgisayar arasında oluşturulan arayüzler, incelenen yöntemlerin daha hızlı, daha esnek ve daha etkin sonuçlar vermesini sağlamaktadır.

Dinamik yapıda ÇAKV problemleri için sıralı bulanık mantık yapısında tamamen özgün bir yöntem geliştirilmiş ve asansör grup kontrolü uygulaması için sınanmıştır. Önerilen yeni yöntem için geliştirilen programlar ve karar verici-sistem arayüz modülleri sistemin etkileşimli ve esnek biçimde işletilmesini sağlamakatdır. Nitekim benzetimi yapılan sistem ve senaryolarda en başarılı davranışlar bu esnekliği kullanan adaptif yapıda kontrolör ile elde edilmiştir.

ÇAKV problemlerinde tek çözüm olmamasına rağmen bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen algoritma, program ve arayüz modülleri bundan sonraki çözüm süreçlerine de etkin yarar sağlayacak niteliktedir.

KAYNAKLAR

[1] **Stafford, J.H. and De Neufille, R.,** 1974. System Analysis for Engineers and Managers, Mc Graw Hill, Berkshire.

[2] **Salukvadze, M.E.,** 1974. On The Existence of Solutions In Problems of Optimization Under Vector Valued Criteria, *Journal of Optimization Theory and Application*, **13(2)**, 203-217.

[3] **Zeleny, M.,** 1982. Multiple Criteria Decision Making, McGraw Hill Book Company, Newyork.

[4] **Hwang, C.L. and Masud, A.S.,** 1979. Multiple Objective Decision Making-Methods and Applications. A State of the Art Survey Springer Verlag, Berlin.

[5] **Charnes, A. and Chooper, W.W.,** 1961. Management Models and Industrial Applications of Linear Programming, I, Wiley, Nevyork.

[6] **Zadeh, L.A.,** 1963. Optimality and Non-Scalar Valued Performance Criteria, *IEEE Transactions*. **AC-8**, 59-60.

[7] **Da Cunha, N.O. and Polak, E.,** 1967. Constrained Minimization Under Vector Criteria in Finite Dimensional Spaces. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, **19**, 103-124.

[8] **Geoffrion, A.M., Dyer, J.S. and Feinberg, A.,** 1972. An Interactive Approrach for Multi-Criterion Optimization, With an Application to the Operation of an Academic Department, *Managent Science*, **19(4)(I)**, 357-368.

[9] **Beeson, R.M. and Meisel, W.S.,** 1971. The Optimization of Complex Systems with Respect to Multiple Criteria, *Proceedings, System,. Man and Cybernetics Conference*, IEEE, Anaheim California.

[10] **Gembicki, F.W. and Haimes, Y.Y.,** 1975. Approach to Performance and Sensitivitiy Multiobjective Optimization: The Goal Attainment Method, *IEEE Transactions*, **AC-20**, 769-771.

[11] **Isermann, H.,** 1977. The Numeration of the Set of All Efficient Solutions for a Linear Multiple Objective Program, *Operational Research Quarterly*, **28**, 711-725.

[12] **Roy, B.,** Classement et Choix en Presence de Points de Vue Multiples, Afiro, Mars/Avril, 1968.

[13] **Haimes, Y.Y., Hall, W.A. and Freedman, H.T.,** 1975. Multiobjective Optimization in Water Resources Systems, the Surrogate Worth Trade-off Method, Elsivier Scientific, Newyork.

[14] **Benayoun, R., de Montgolfier, J., Tegny, J. and Larichev, O.,** 1971. Linear Programming With Multiple Objective Functions: Step Method (STEM), *Mathematical Programming*, **1(3)**, 366-375.

[15] **Wallenius, J. and Zionts, S.,** 1976. Some Tests of an Interactive Programming Method for Multicriterion and Attempt at Implementation, France, Springer-Verlag, Newyork, 319-331.

[16] **Shapiro, J.F.,** 1976. Multiple Criteria Public Investment Decision Making by Mixed Integer Programming, 170-182, Springer-Verlag, Berlin.

[17] **Bitran, G.R.,** 1971. Linear Multiple Objective Programs with Zero-One Variables, *Mathematical Programming*, **13**, 121-139.

[18] **Bowman, V.J.,** 1976. On the Relationship of the Tchebycheff Norm and the Efficient Frontier of Multiple-Criteria Objectives, Springer-Verlag, Berlin.

[19] **Steuer, R.E. and Schuler, A.T.,** 1978. An Interactive Multiple Objective Linear Programming Approach to a Problem in Forest Management, *Operations Research*, **26(2)**, 254-269.

[20] **Dyer, J.S.,** 1972. Interactive Goal Programming, *Managemant Science*, **19(1)**, 62-70.

[21] **Cohon, J.L. and Marks, D.H.,** 1973. Multiobjective Screening Models and Water Resources Investment, *Water Resources Research*, **9**, 826-836,

[22] **Zionts, S. and Deshpande, D.,** 1978. A Time Sharing Computer Programming Applications of a Multiple Criteria Decision Method to Enery Planning-A Progress Report, Springer-Verlag.

[23] **Gelder, P.V.,** 1999, A Multicriteria Approach to Risk Analysis, http://www.waterbouw.tudelft.nl/ public/gelder/ paper137a-0853.pdf

[24] **Akder, T. and Simonovic, S.S.,** 2002, A General Overview of Multi-objective Multipleparticipant Decision Making for Flood Management, http://www.engga.uwo.ca/research/iclr/fids/Documents/MOMP_Report.pdf

[25] **Nandalal, K.D.W. and Simonovic, S.S.,** 2002, State-of-the-Art Report on Systems Analysis Methods for Resolution of Conflicts in Water Resources Management, http://www.engga.uwo.ca/research/ iclr/fids/Documents/PCCPreport.pdf

[26] **Evren, R.,** 1989. Çok Amaçlı Karar Verme Yöntemleri Üzerine Bir İnceleme., İstanbul

[27] **Dündar, A.C.,** 1995. Çok Amaçlı Karar Vermede Yeni Bir Yöntem ve Uygulaması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[28] **Monarchi, D.E.,** 1972. Interactive Algorithm for Multiple Objective Decision Making, Technical Reports on Hydrology and Water Resources, University of Arizona, USA.

[29] **Monarchi, D.E., Kisiel, C.C., Duckstein, L.,** 1973. Interactive Multi-objective Programming in Water Resources: A Case Study, *Water Resources Researc*, **4**, 837-850.

[30] **Dorfman, R., Jacoby, H. and Duckstein, L.,** 1969. A Model for Public Decision Illustrated by a Water Pollution Policy Problem, The Analysis and Evaluation of Public Expenditures: *The PPS System, Joint Economic Committee, 91st Congress 1st session*, 226-276.

[31] **Coleman, T., Branch, M.A. and Grace, A.,** 1999. Optimization Toolbox For Use With MATLAB, The MathWorks Inc.

[32] **Lai, Y.J. and Hwang, C. L.,** 1996. Fuzzy Multiple Objective Decision Making, Springer-Verlag Berlin, Newyork

[33] **Bellman, R.E. and Zadeh, L.A.,** 1970. Decision-making in a fuzzy environment, *Management Science*, **17**, B141-B164

[34] **Zimmerman, H. J.,** 1978. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions, *Fuzzy Sets and Systems*, 45-55

[35] **Hwang, C.L., Lai, Y.J., and Lui, T.Y.,** 1999. A new approach for multiple objective decision making , *Computer and Operation Research.*

[36] **Lai, Y.J. and Hwang, C.L.,** 1994. TOPSIS for MODM, *European Journal of Operational Research*, **76** , 486-500

[37] **İmrak, C. E. ve Gerdemli, İ.**, 1999. Asansör ve Yürüyen Merdivenler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[38] **Chang, B.K. and Kyoung, A.S.**, 1995. A Fuzzy Approach to Elevator Group Control System, *IEEE Transections on Systems, Man and Cybernetics*, **25(6)**, 985-990

[39] **Chang, B.K. and Kyoung, A.S.**, 1999. Design and Implementation of a Fuzzy Elevator Group Control System, *IEEE Transections on Systems, Man and Cybernetics*, Part A: Systems and Humans, **28(3)**, 277-287

[40] **Wang, Y., Hasia, K. and Huang, Y.**, 1999. Elevator Group Control with Fuzzy Logic and Genetic Algorithms, http://www.fuzzy.org.tw/download/CFSA_%A4%A4%A4%E5%B4%C1%A5Z/5(2)/04.pdf

[41] **Wang, Y., Hasia, K. and Huang, Y.**, 1996. Intelligent Elevator Control By Ordinal Structure Fuzzy Logic Algorithms, http://www.cairo.utm.my/publications/kktan_Elevator.pdf

[42] **Qun, Z., Xue, L.H. and Jun, Y.Y.,** 2000. A Multi-Objective Dispatching Method in Elevator Group Control Systems, *Elevator World*, **12**, 164-168

[43] **Qun, Z., Shuhong, Y. and Zhenshi, W.**, 2002. Queuing Theory Based Traffic Flow Analyzing Of Elevator Group Control Systems, *Elevator World*, **10**, 114-120

[44] **Ohnishi, T.**, 1990. Fuzzy Reasoning by Ordinal Structure Model of Control Rule, *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems*, **2(4)**, 125-132.

[45] **Naitoh, Y., Furuhashi, T. and Uchikawa, Y.**, 1991. A Variable Ordinal Structure Model For Fuzzy Reasoning and Its Application to Decision Problem of Working Order, *International Conference On Industrial Electronic, Control and Instrumentation,* **2**, 1539-1543

[46] **Carlos, A.C.C.**, 2004, List of References on Evolutionary Multiobjective Optimization, http://www.lania.mx/~ccoello/EMOO/EMOObib.html

[47] **Barney, G.C.**, 2003, Elevator Traffic Handbook, Spon Press, London

[48] **Motz, H.D.**, 1976, Zur Kinematik Idealer Aufzugbewegungen, *Fordern und Heben*, **26(1)**, 38-42.

[49] **Mathworks**, 2001, MATLAB 6.1, Fuzzy Logic ToolBox User's Guide, Ver.2.

[50] **Çubukçu, F.**, 2000, Visual Basic 6.0, Başvuru Kılavuzu, Alfa Yayınevi, İstanbul

[51] **Microsoft**, 2002, Visual Basic 6.0 User's Guide

[52] **Microsoft**, 2002, Visual Basic 6.0 Developer's Guide

[53] **Microsoft**, 1999, MSDN Library 1999

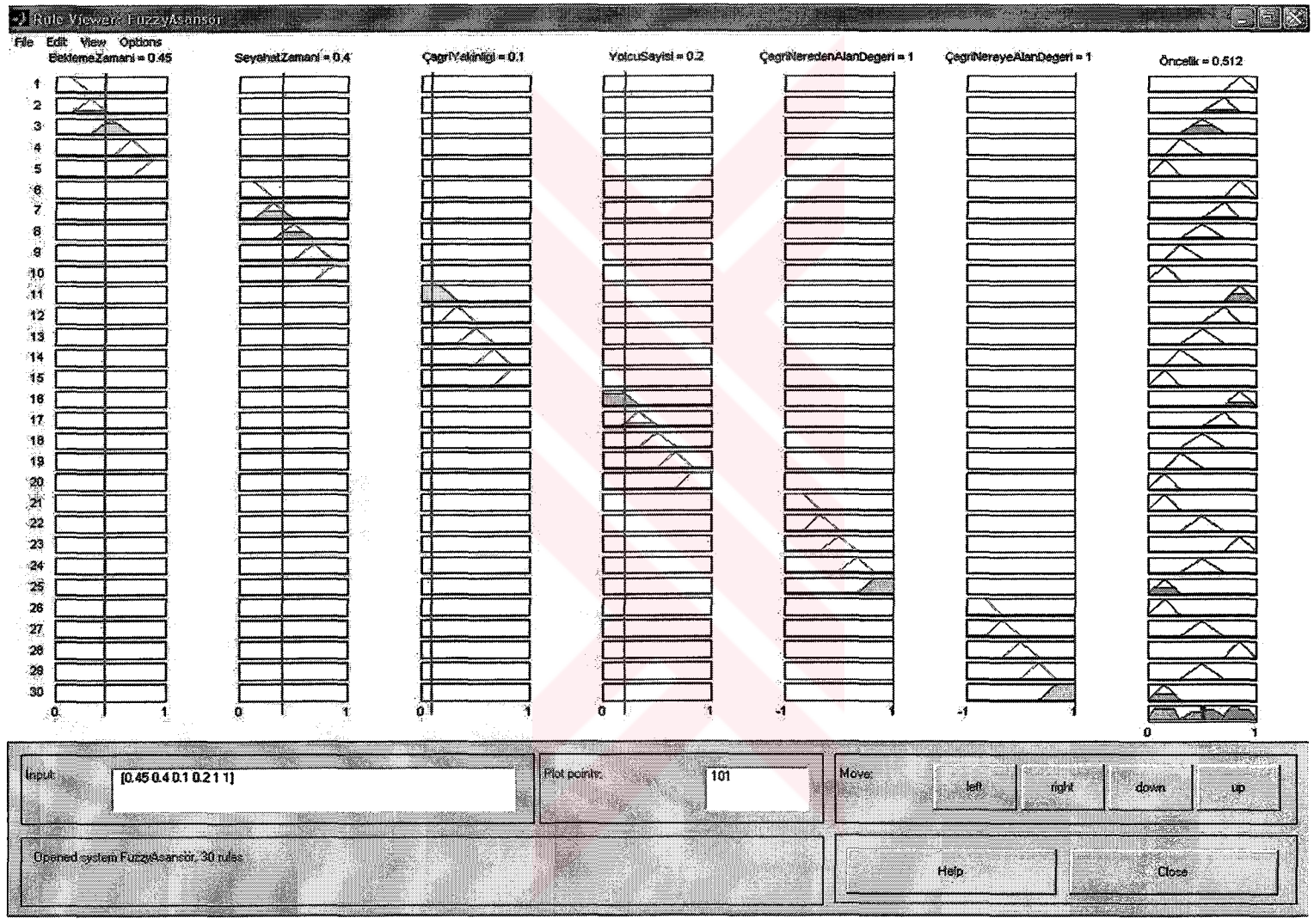
EKLER

EK A : Örnek Durumlar İçin Sıralı Yapı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi Grafikleri

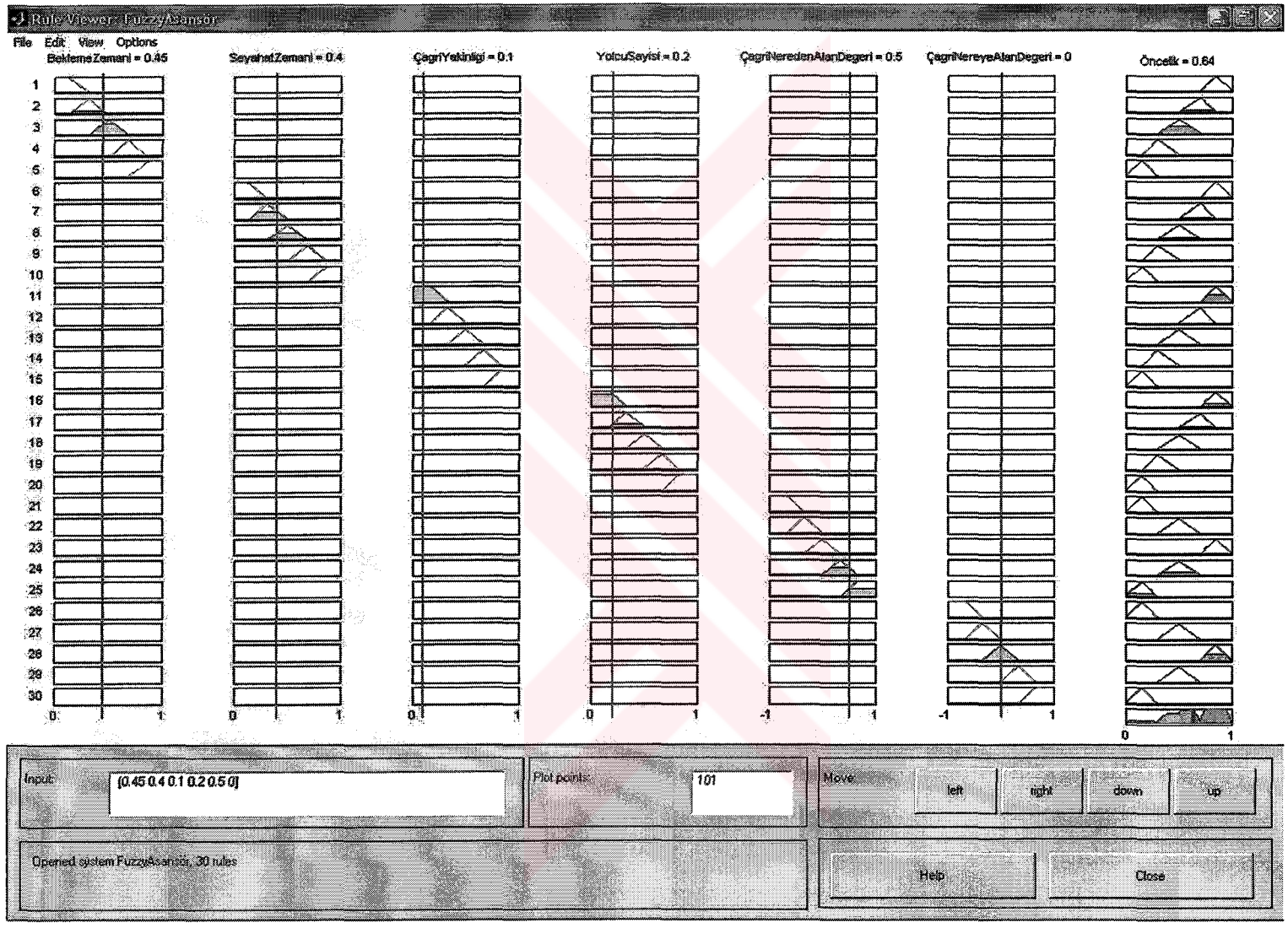
EK B : Normal Dağılıma Göre Elde Edilmiş Bina Trafik Senaryosu Grafikleri

EK C : Normal Dağılıma Göre Elde Edilmiş Bina Trafik Senaryosu Grafikleri

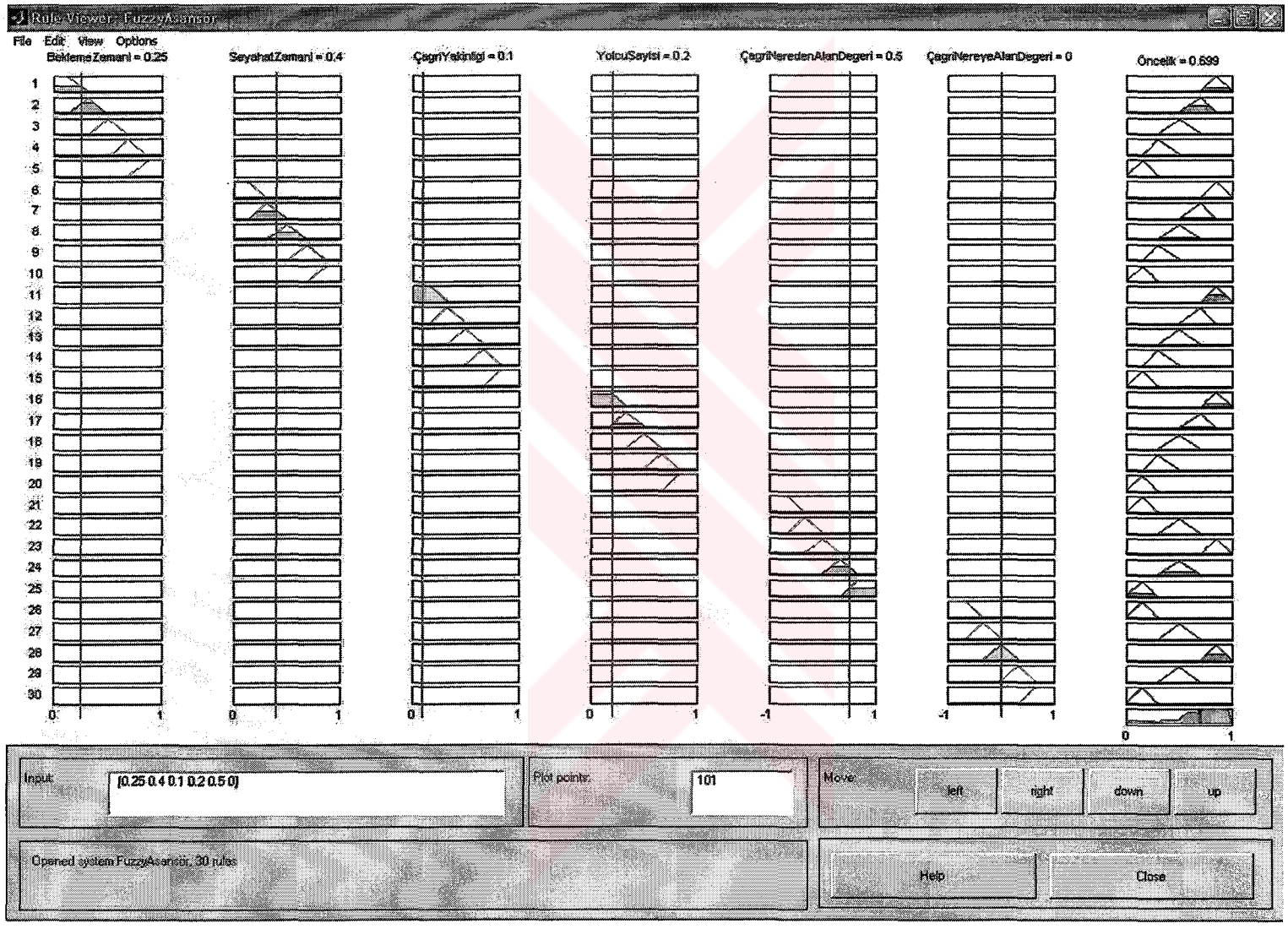
EK A.



Şekil A.1 Bulanık Mantık Çıkarımı: Girişler: [0.45,0.4,0.1,0.2,1,1] , Çıkış:[0.512]



Şekil A.2 Bulanık Mantık Çıkarımı: Girişler: [0.45,0.4,0.1,0.2,0.5,0] , Çıkış:[0.64]



Şekil A.3 Bulanık Mantık Çıkarımı: Girişler: [0.25,0.4,0.1,0.2,0.5,0] , Çıkış:[0.699]

EK B.

Normal Dağılıma Göre Elde Edilmiş Bina Trafik Senaryosu

12:00-12:15 Senaryo Dilimi

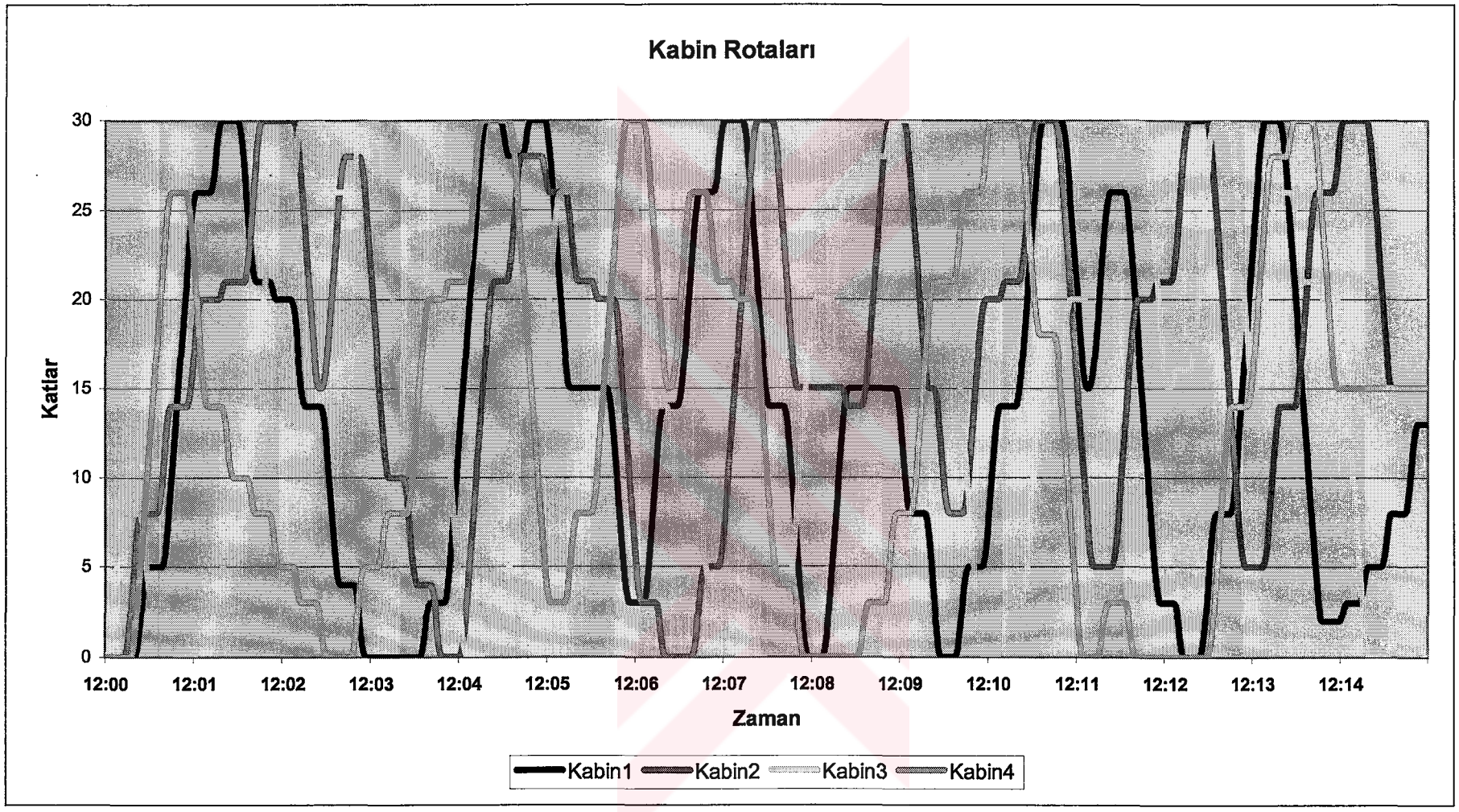
Enerji Öncelikli Durumu Dikkate Alan Amaç Ağırlık Katsayılarına Göre Çalıştırılan Simülasyon Sonuçları

Tablo B.1 Enerji Öncelikli Durum - Ağırlık Katsayıları

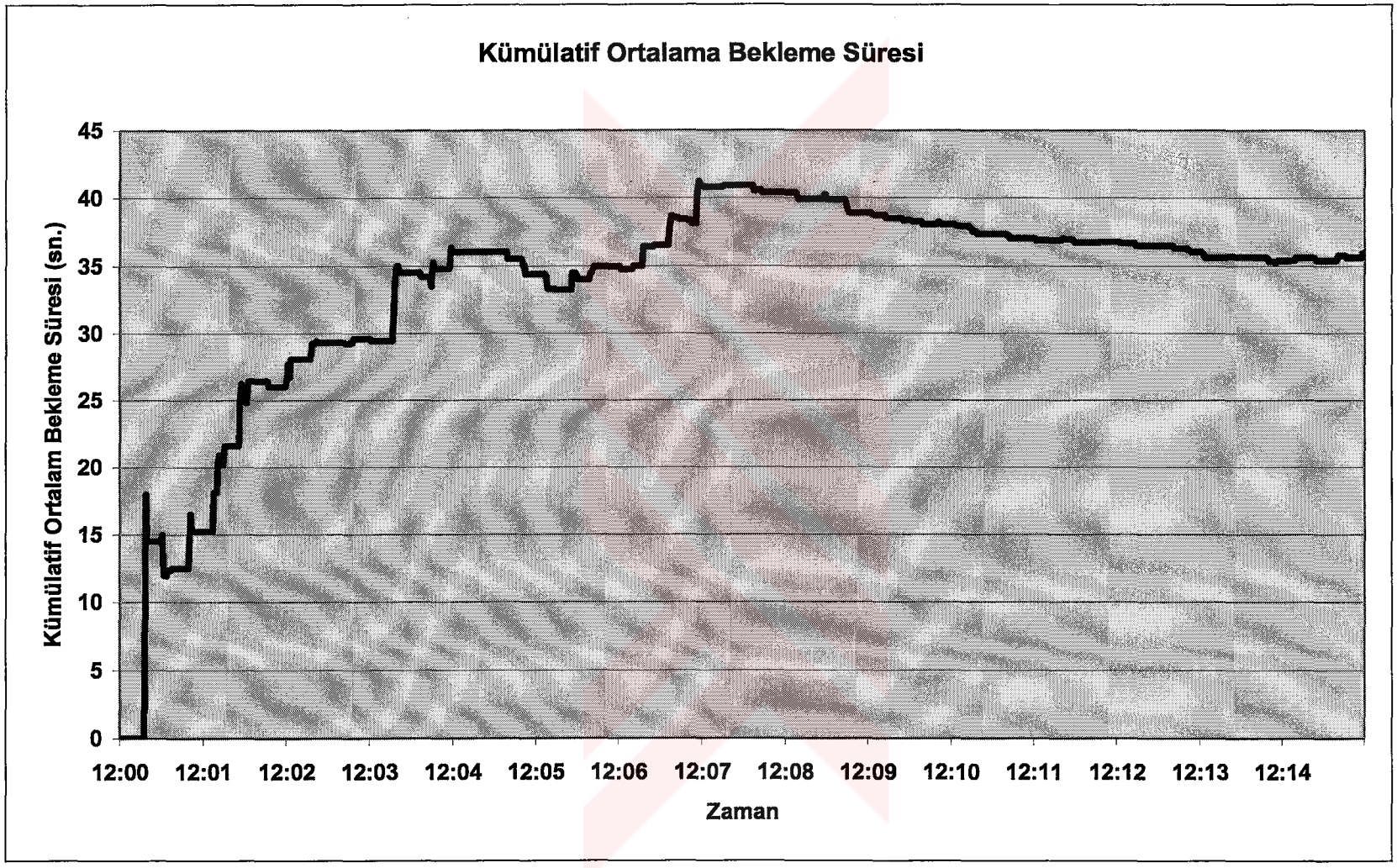
AMAÇLAR	AĞIRLIK KATSAYILARI
Bekleme Süresi	0.5
Yolculuk Süresi	0.1
Kabin Çağrı Uzaklığı	0.5
Kabin Yük / Yolcu Sayısı	0.3
Çağrı Katı Alan Ağırlığı	0.7
Gidiş Katı Alan Ağırlığı	0.7

Tablo B.2 Toplu Sonuçlar

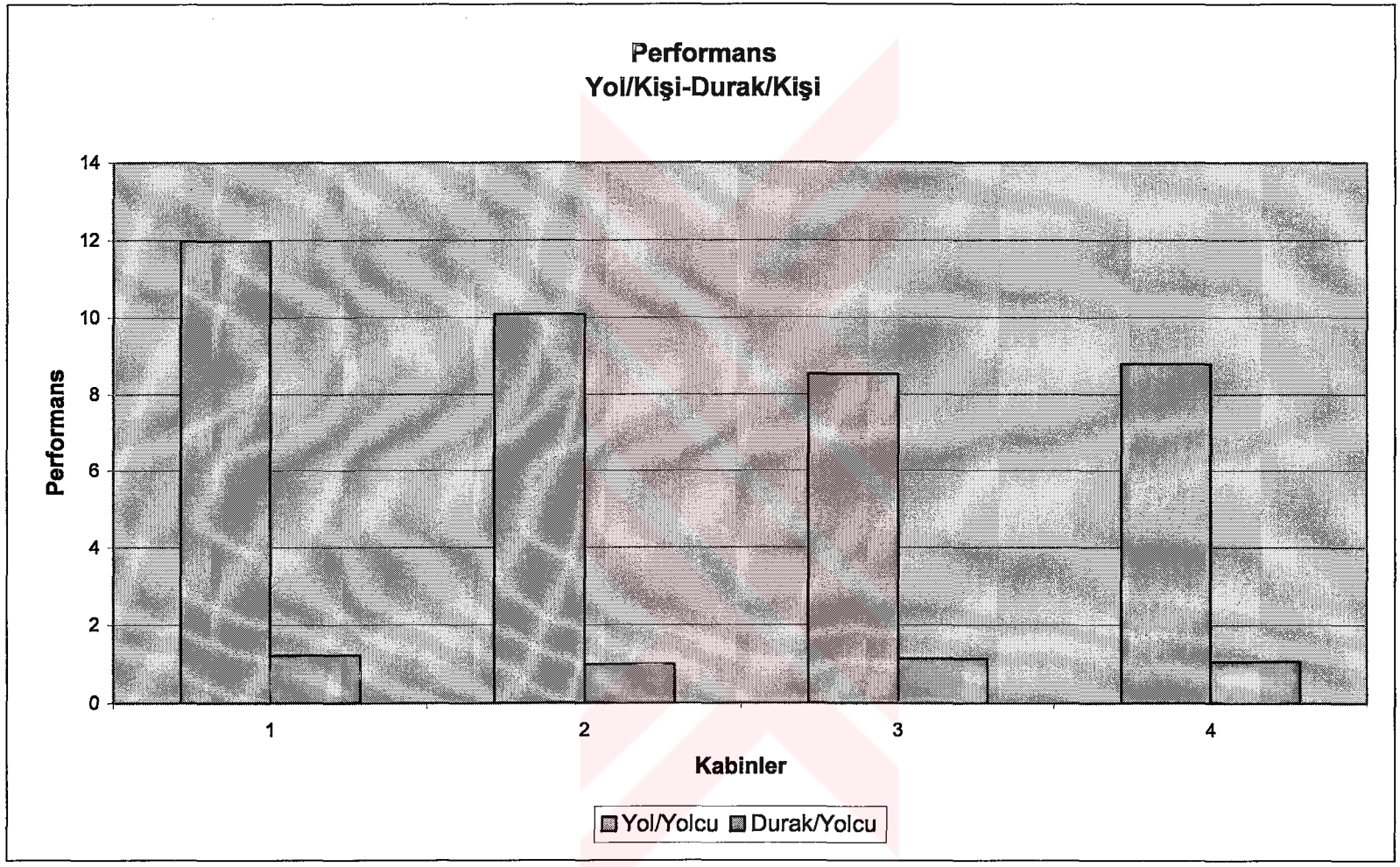
	Kabin1	Kabin2	Kabin3	Kabin4	TOPLAM
Yol	359	363	324	299	1345
Durak	37	36	43	36	152
Ortalama Bekleme Süresi	30.97	30.86	40.98	42.47	36.53
Ortalama Yolculuk Süresi	32.43	49.75	35.03	48.89	41.72
Taşınan Yolcu Sayısı	30	36	38	34	138
Yol/Yolcu	11.97	10.08	8.52	8.78	9.74
Durak/Yolcu	1.23	1.00	1,13	1.06	1.10



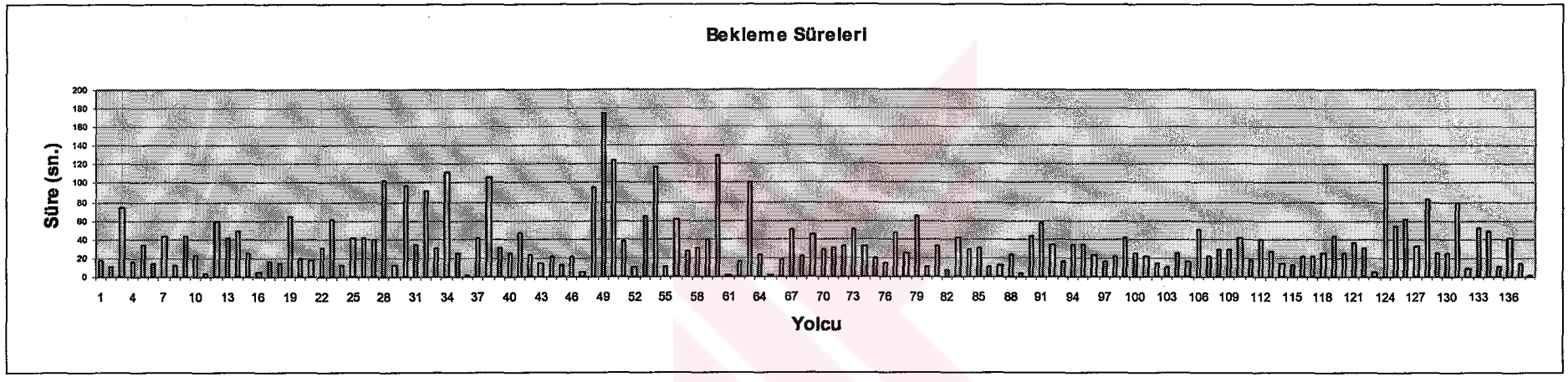
Şekil B.1 Kabin Rota Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Enerji Öncelikli



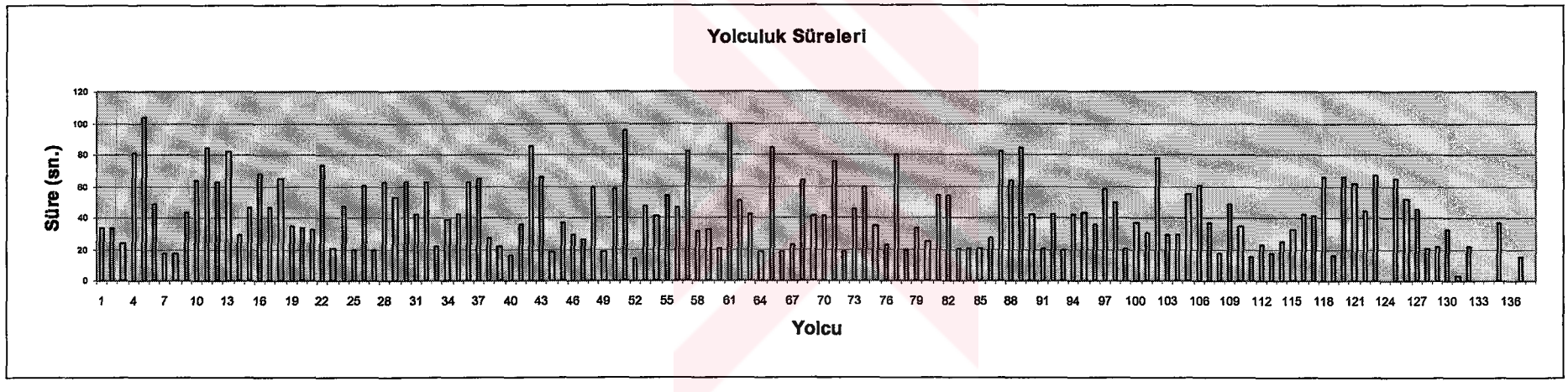
Şekil B.2 Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Enerji Öncelikli



Şekil B.3 Kabin Performans Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Enerji Öncelikli



Şekil B.4.a Bekleme Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Enerji Öncelikli



Şekil B.4.b Yolculuk Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Enerji Öncelikli

Normal Dağılıma Göre Elde Edilmiş Bina Trafik Senaryosu

12:00-12:15 Senaryo Dilimi

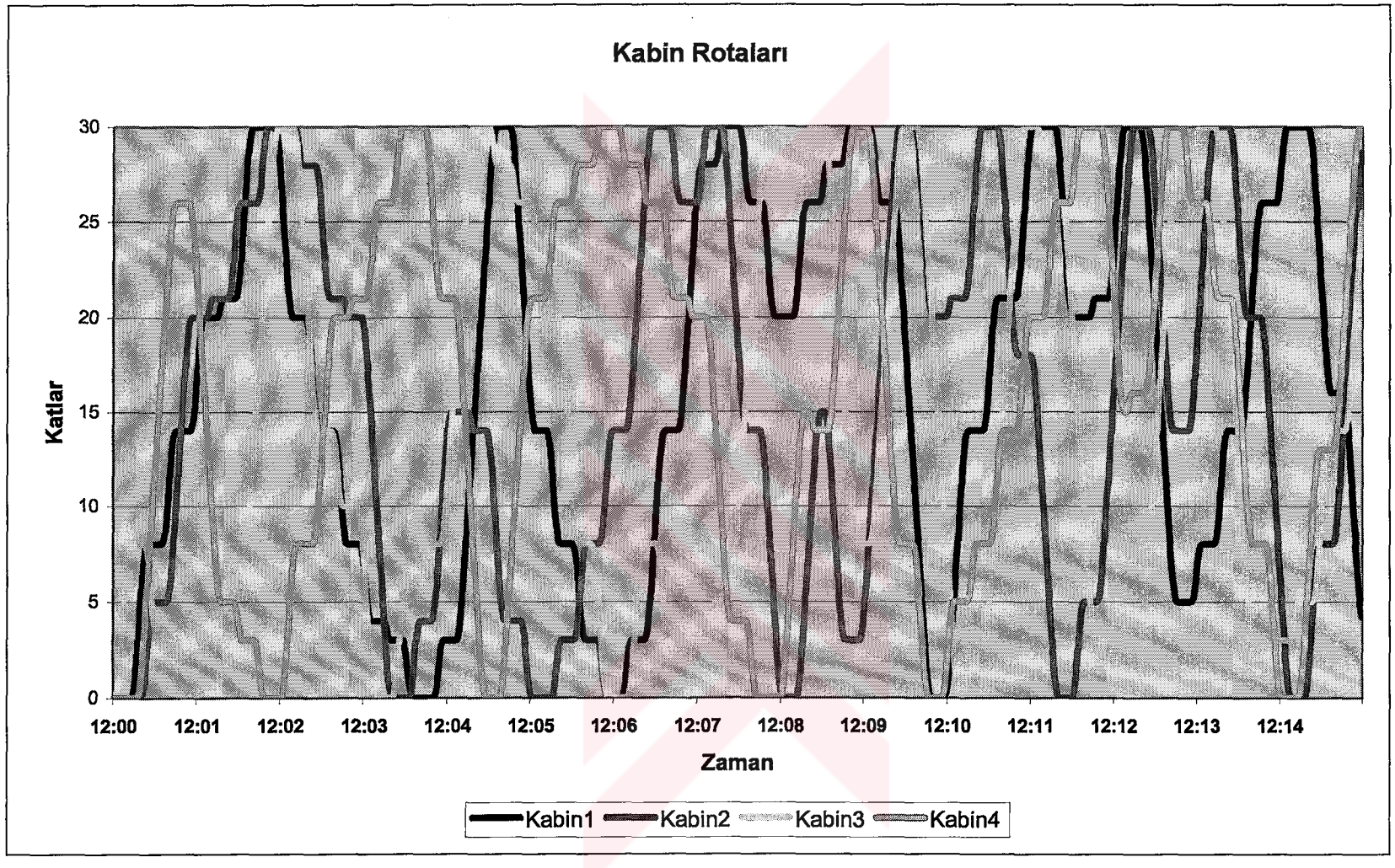
Bekleme Süresi Öncelikli Durumu Dikkate Alan Amaç Katsayılarına Göre Çalıştırılan Simülasyon Sonuçları

Tablo B.3 Bekleme Süresi Öncelikli Durum - Ağırlık Katsayıları

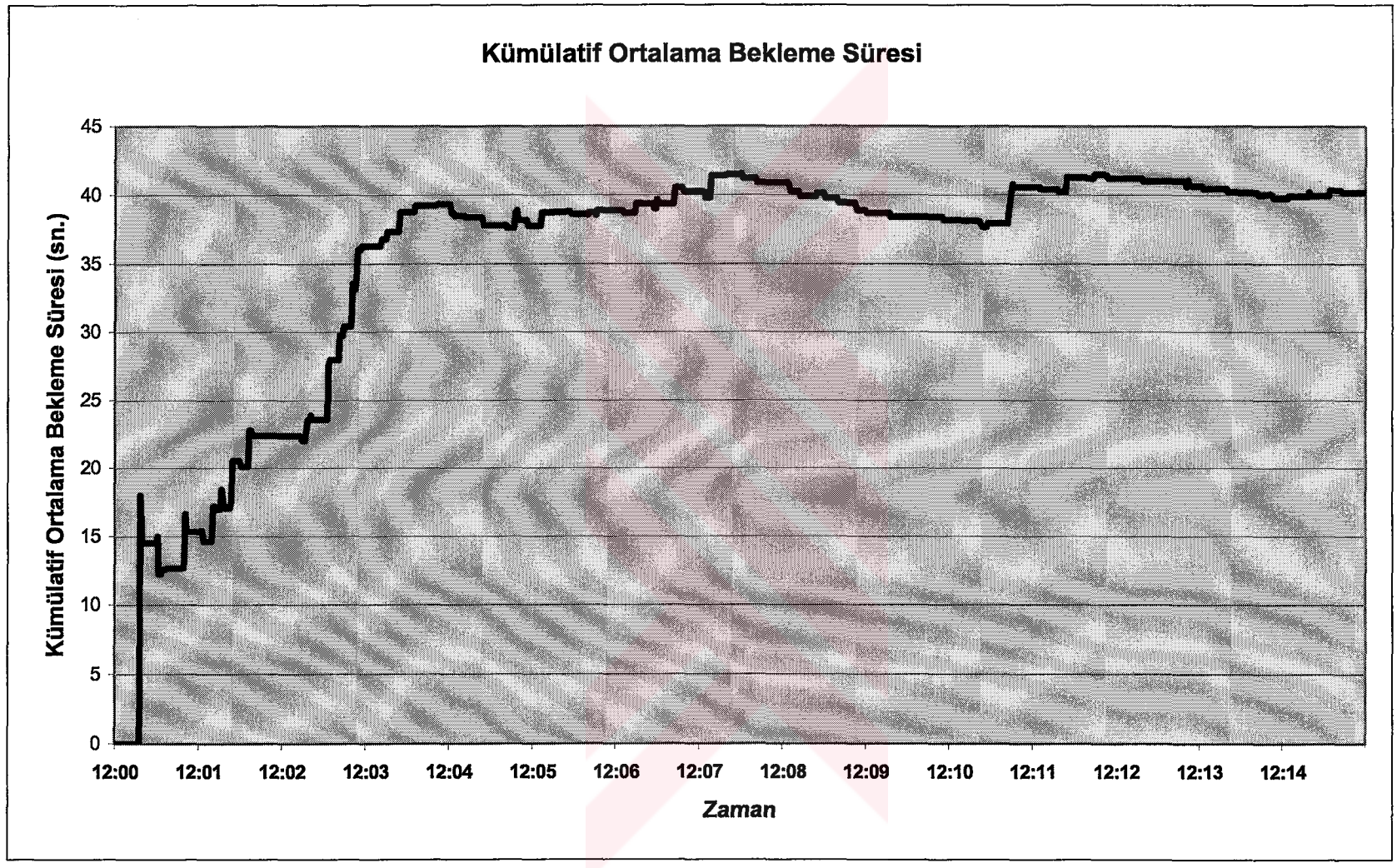
AMAÇLAR	AĞIRLIK KATSAYILARI
Bekleme Süresi	0.9
Yolculuk Süresi	0.1
Kabin Çağrı Uzaklığı	0.5
Kabin Yük / Yolcu Sayısı	0.3
Çağrı Katı Alan Ağırlığı	0.1
Gidiş Katı Alan Ağırlığı	0.1

Tablo B.4 Toplu Sonuçlar

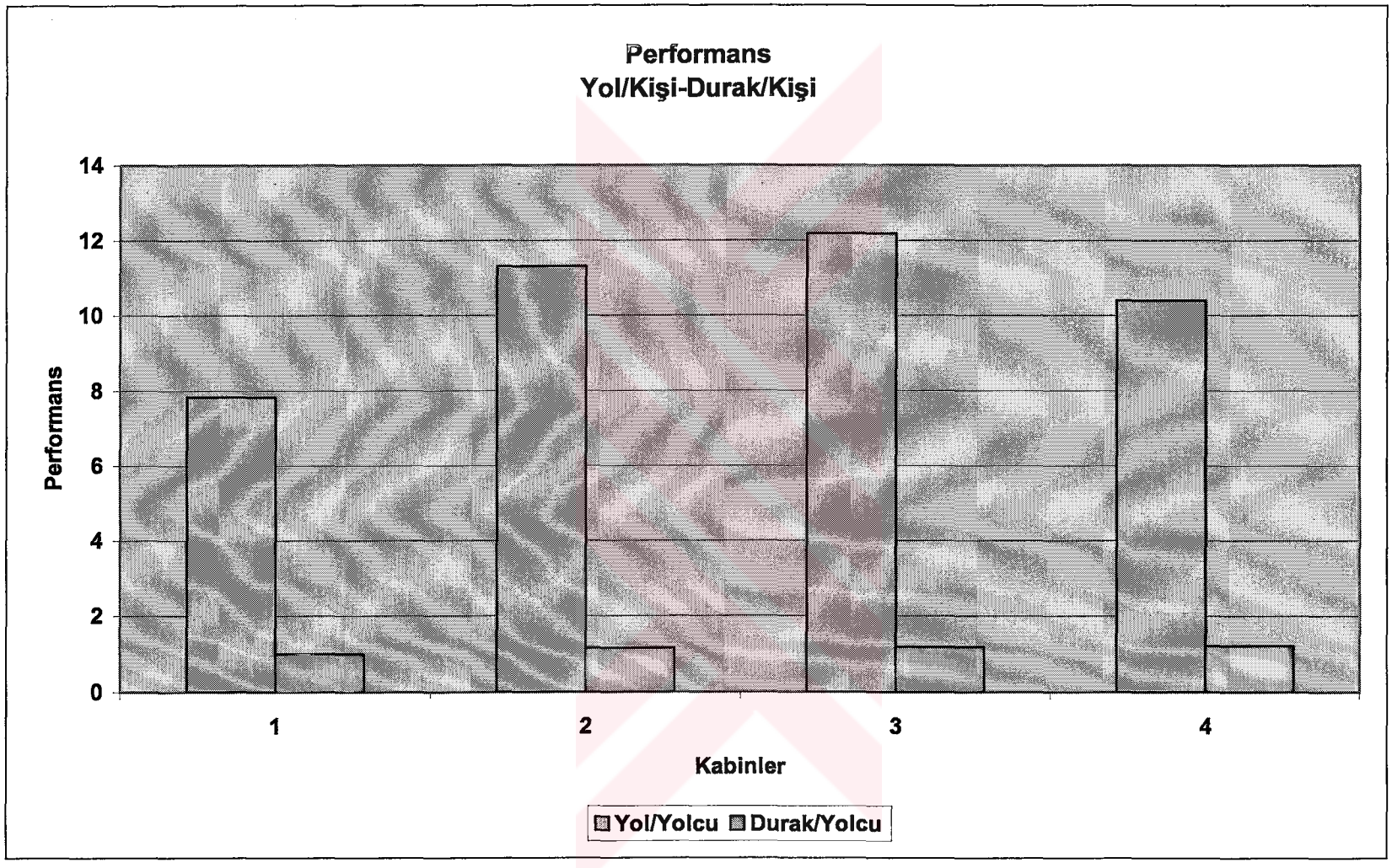
	Kabin1	Kabin2	Kabin3	Kabin4	TOPLAM
Yol	314	362	390	354	1420
Durak	40	37	38	41	156
Ortalama Bekleme Süresi	46	33.91	38.25	39.95	39.90
Ortalama Yolculuk Süresi	40.48	37.10	36.00	44.53	39.65
Taşınan Yolcu Sayısı	40	32	32	34	138
Yol/Yolcu	7.85	11.31	12.19	10.41	10.28
Durak/Yolcu	1.00	1.16	1.19	1.21	1.13



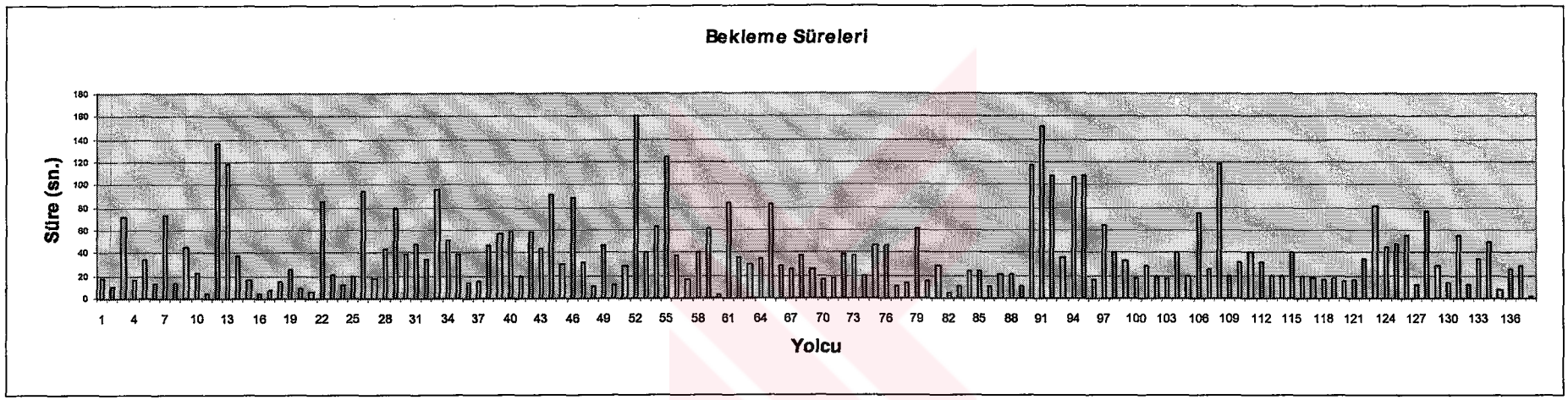
Şekil B.5 Kabin Rota Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Bekleme Süresi Öncelikli



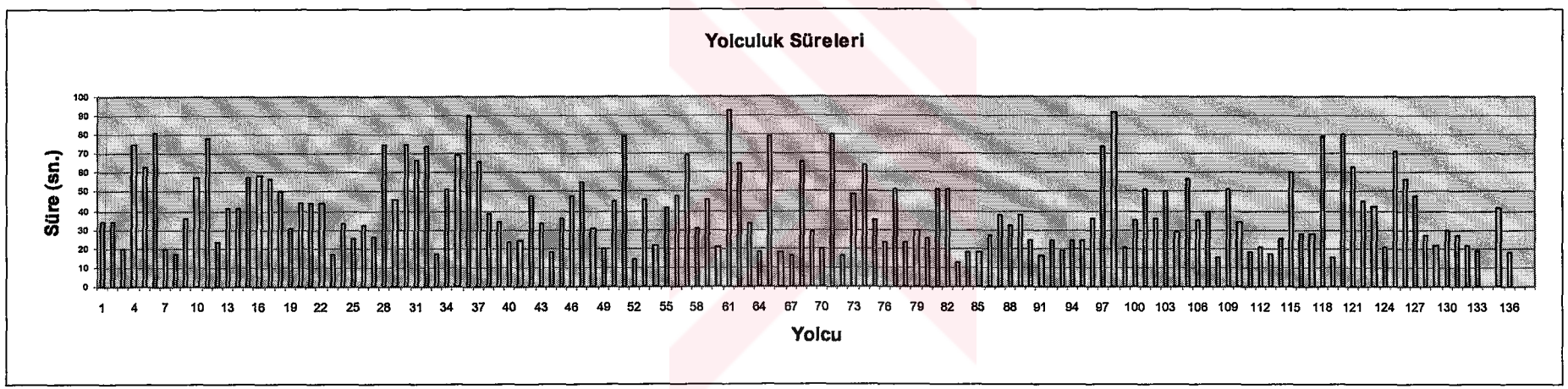
Şekil B.6 Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Bekleme Süresi Öncelikli



Şekil B.7 Kabin Performans Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Bekleme Süresi Öncelikli



Şekil B.8.a Bekleme Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Bekleme Süresi Öncelikli



Şekil B.8.b Yolculuk Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Bekleme Süresi Öncelikli

Normal Dağılıma Göre Elde Edilmiş Bina Trafik Senaryosu

12:00-12:15 Senaryo Dilimi

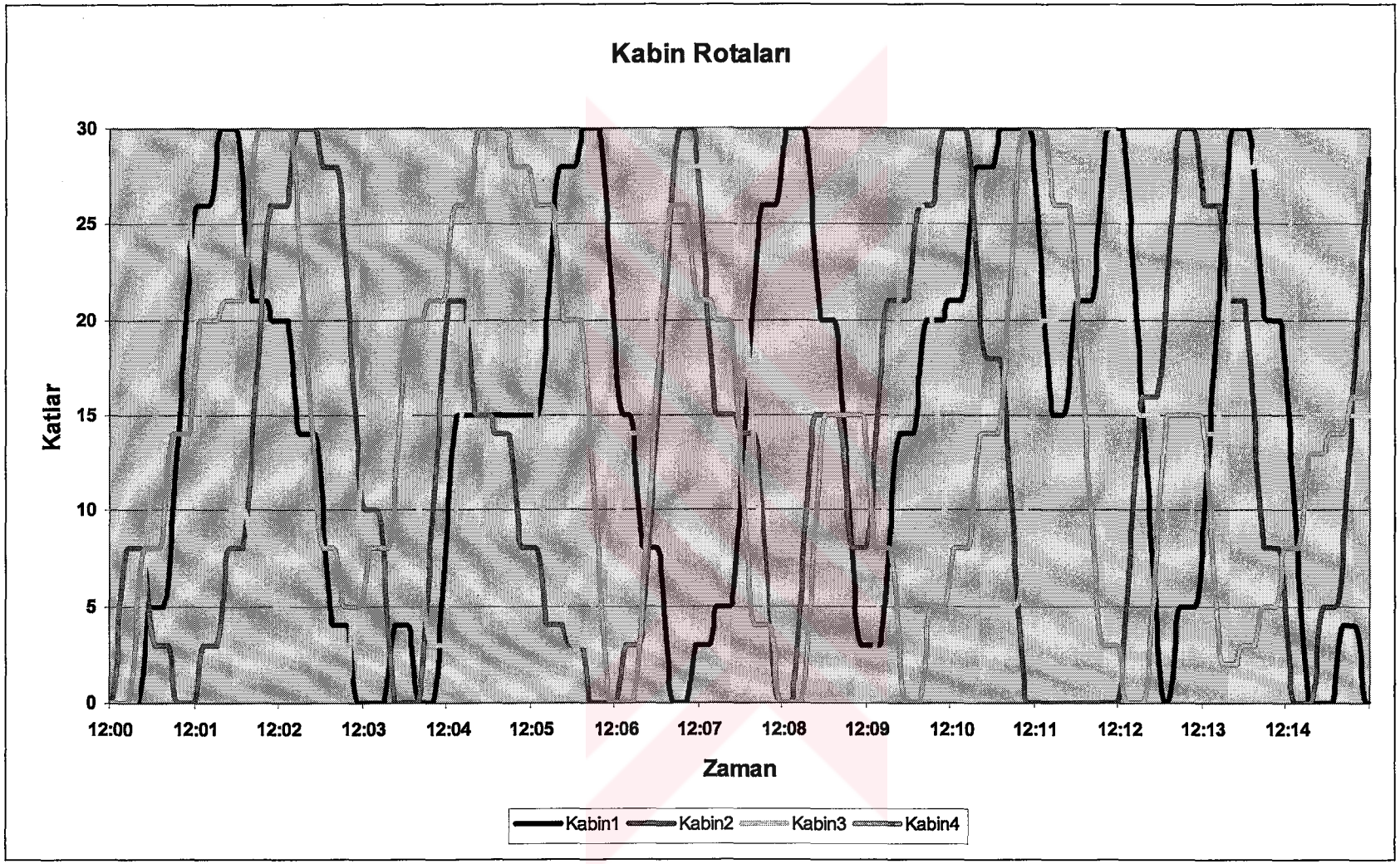
Adaptif Durumu Dikkate Alan Amaç Katsayılarına Göre Çalıştırılan Simülasyon Sonuçları

Tablo B.5 Adaptif Durum – Ağırlık Katsayıları

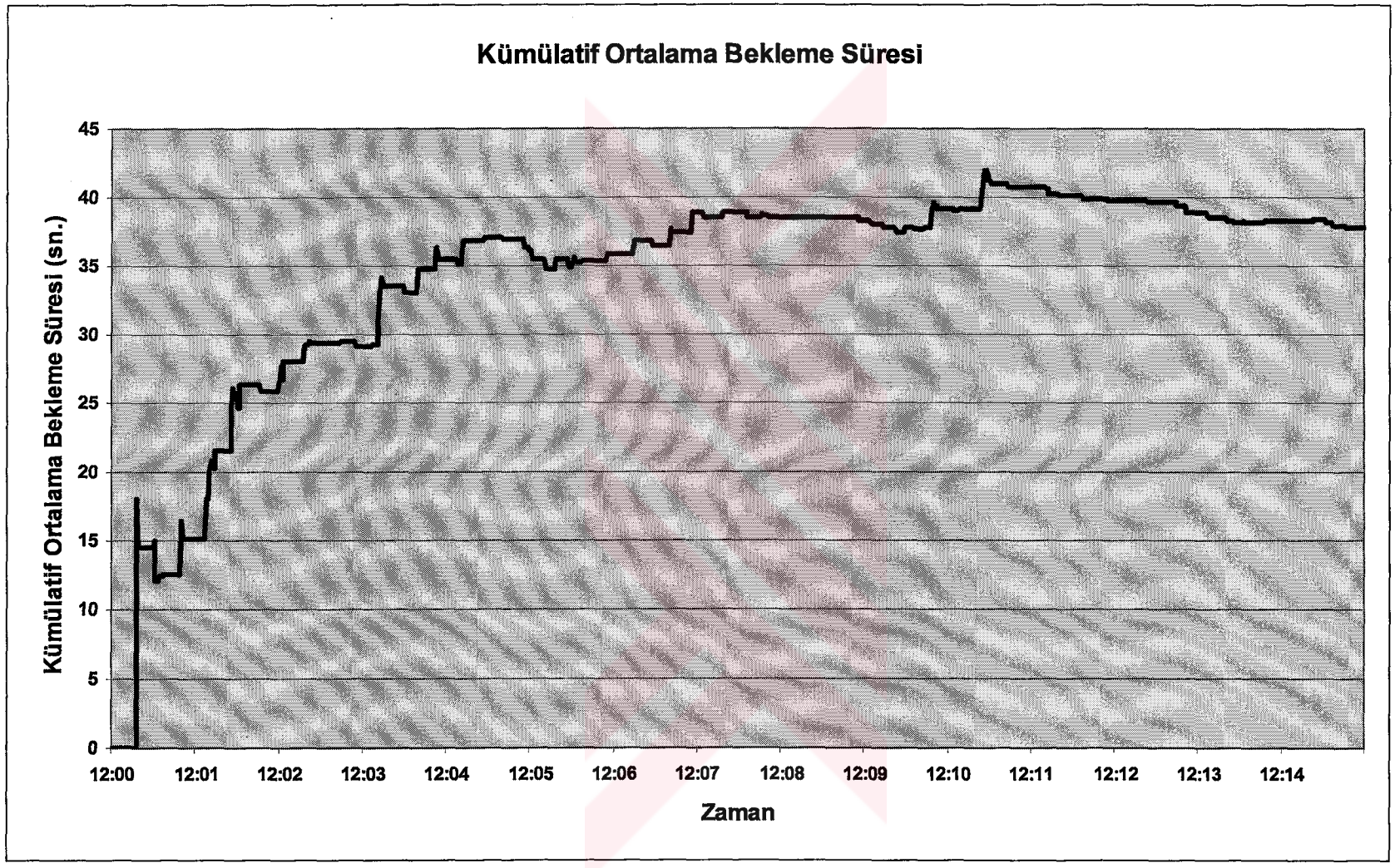
AMAÇLAR	AĞIRLIK KATSAYILARI
Bekleme Süresi	0.5 - 0.7 - 0.9
Yolculuk Süresi	0.1 - 0.1 - 0.1
Kabin Çağrı Uzaklığı	0.5 - 0.5 - 0.5
Kabin Yük / Yolcu Sayısı	0.3 - 0.3 - 0.3
Çağrı Katı Alan Ağırlığı	0.7 - 0.4 - 0.1
Gidiş Katı Alan Ağırlığı	0.7 - 0.4 - 0.1

Tablo B.6 Toplu Sonuçlar

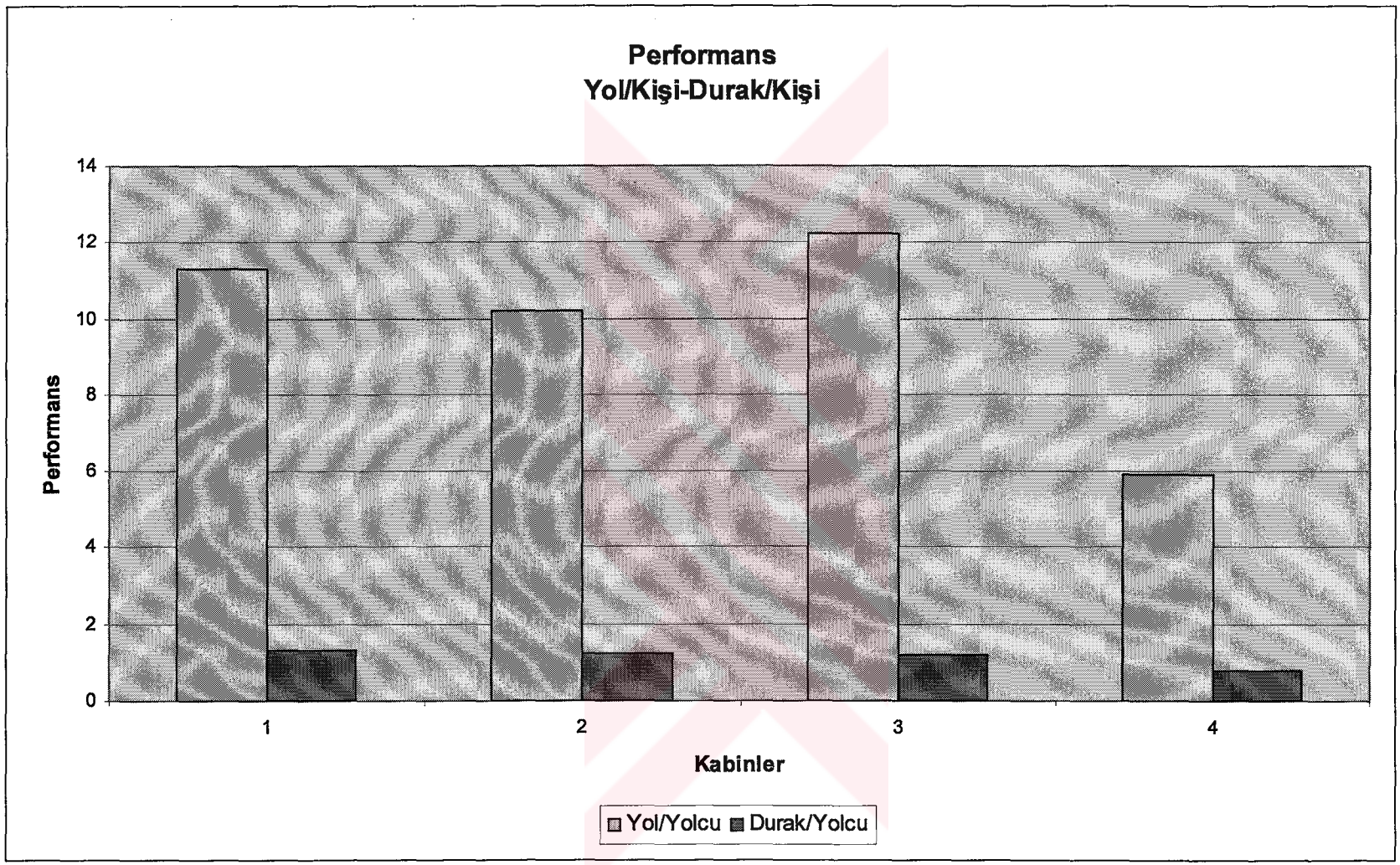
	Kabin1	Kabin2	Kabin3	Kabin4	TOPLAM
Yol	340	317	331	294	1282
Durak	39	38	32	39	148
Ortalama Bekleme Süresi	42.37	26.88	43.04	40.38	38.28
Ortalama Yolculuk Süresi	41.80	41.10	47.37	47.84	44.92
Taşınan Yolcu Sayısı	30	31	27	50	138
Yol/Yolcu	11.33	10.23	12.26	5.88	9.29
Durak/Yolcu	1.30	1.22	1.18	0.78	1.07



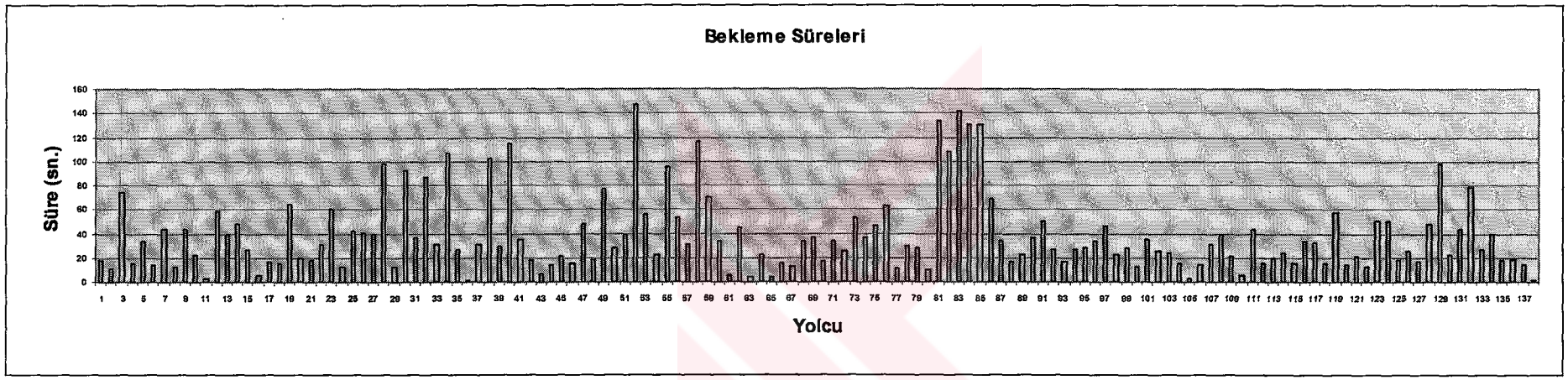
Şekil B.9 Kabin Rota Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Adaptif



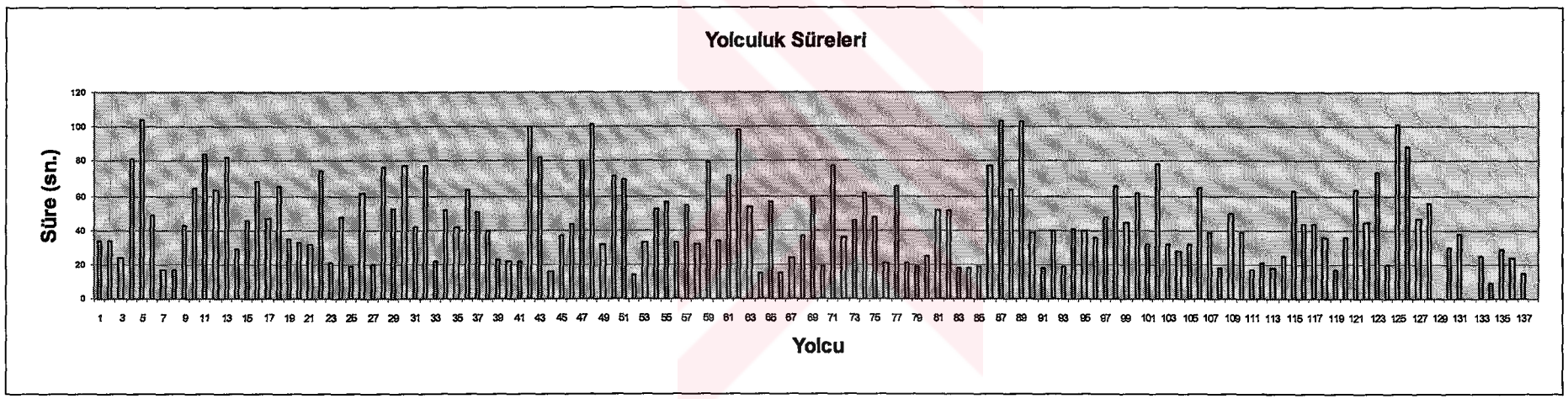
Şekil B.10 Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Adaptif



Şekil B.11 Kabin Performans Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Adaptif



Şekil B.12.a Bekleme Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Adaptif



Şekil B.12.b Yolculuk Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Adaptif

EK C.

Poisson Dağılımına Göre Elde Edilmiş Bina Trafik Senaryosu

12:00-12:15 Senaryo Dilimi

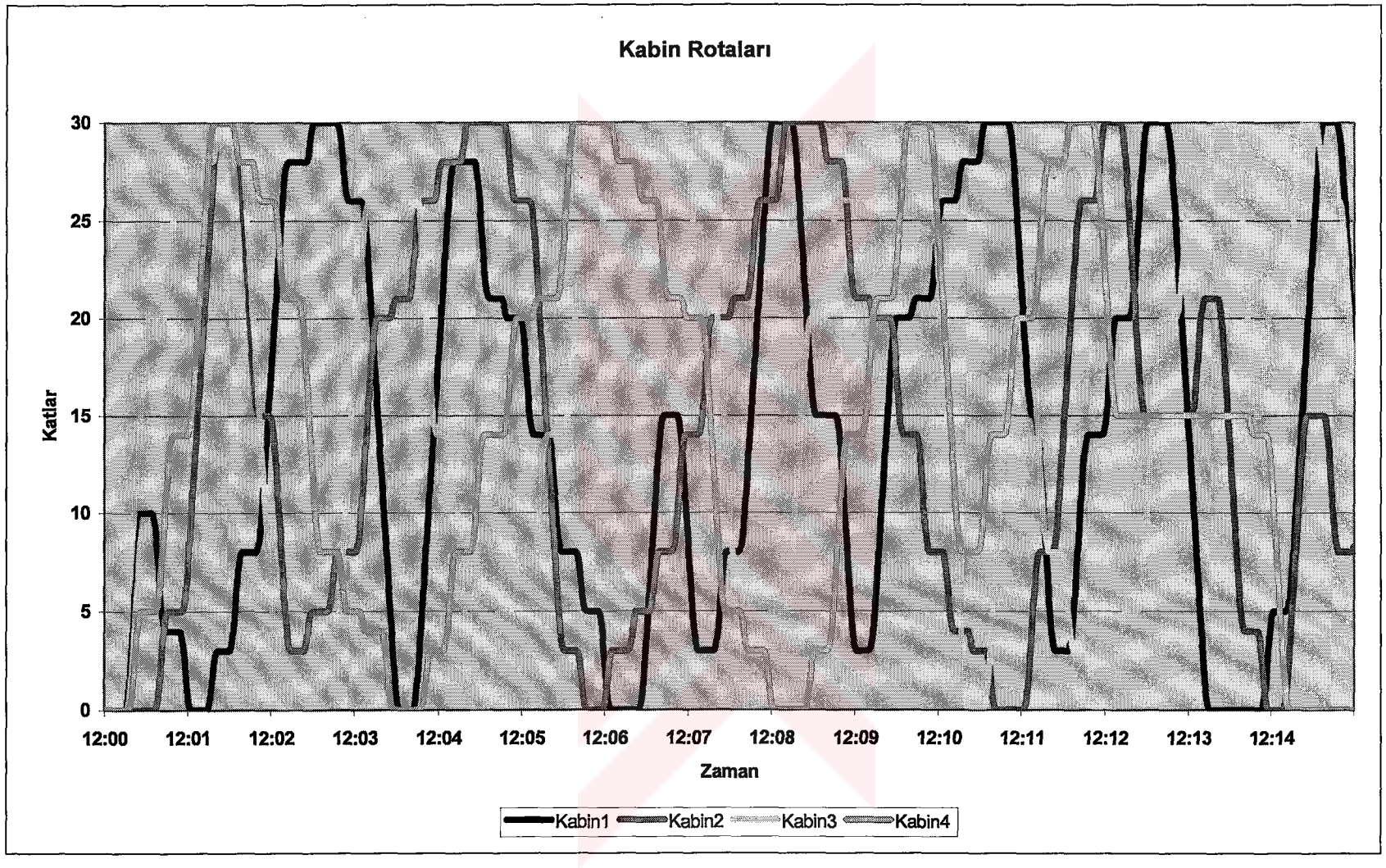
Enerji Öncelikli Durumu Dikkate Alan Amaç Ağırlık Katsayılarına Göre Çalıştırılan Simülasyon Sonuçları

Tablo C.1 Enerji Öncelikli Durum - Ağırlık Katsayıları

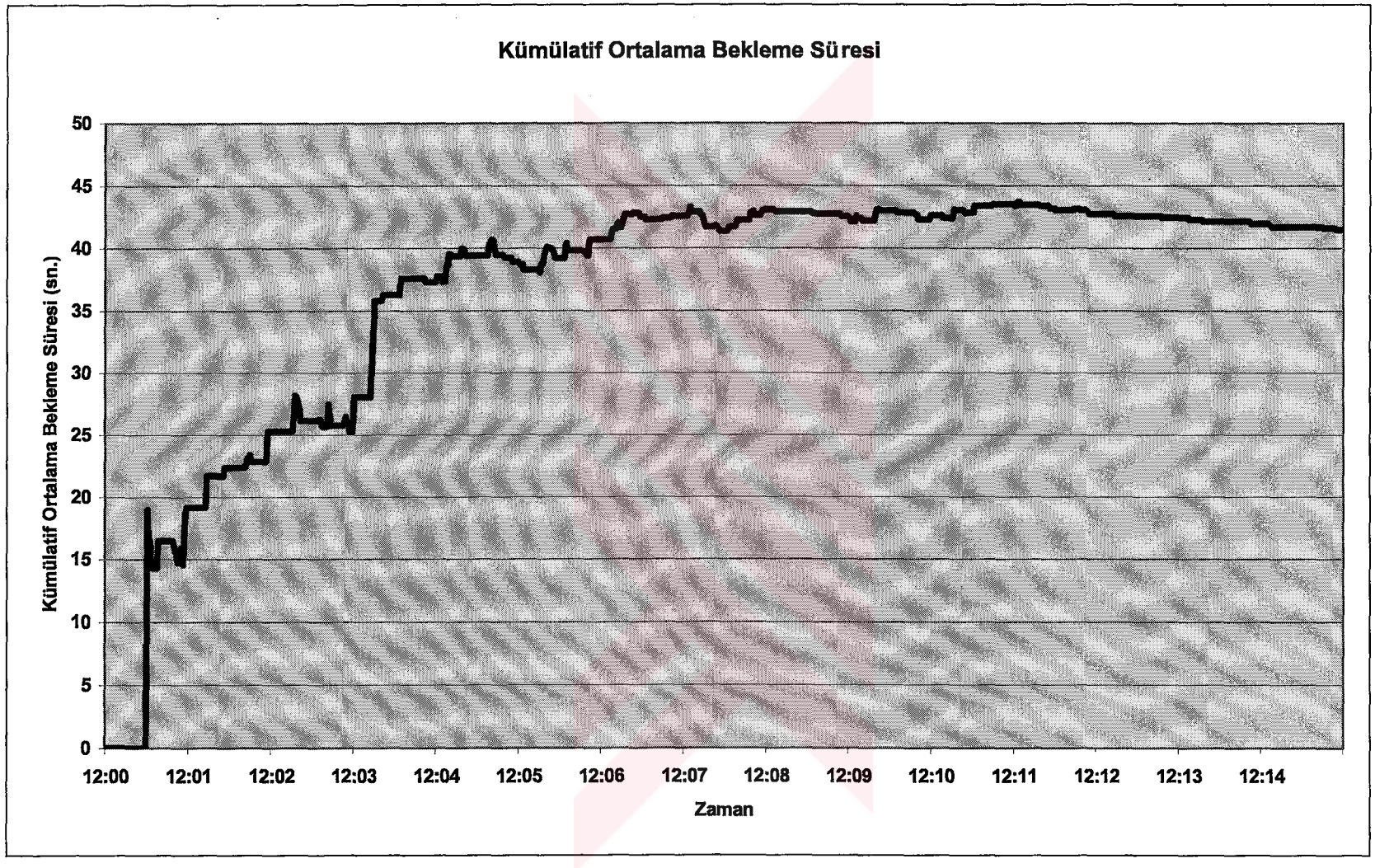
AMAÇLAR	AĞIRLIK KATSAYILARI
Bekleme Süresi	0.5
Yolculuk Süresi	0.1
Kabin Çağrı Uzaklığı	0.5
Kabin Yük / Yolcu Sayısı	0.3
Çağrı Katı Alan Ağırlığı	0.7
Gidiş Katı Alan Ağırlığı	0.7

Tablo C.2 Toplu Sonuçlar

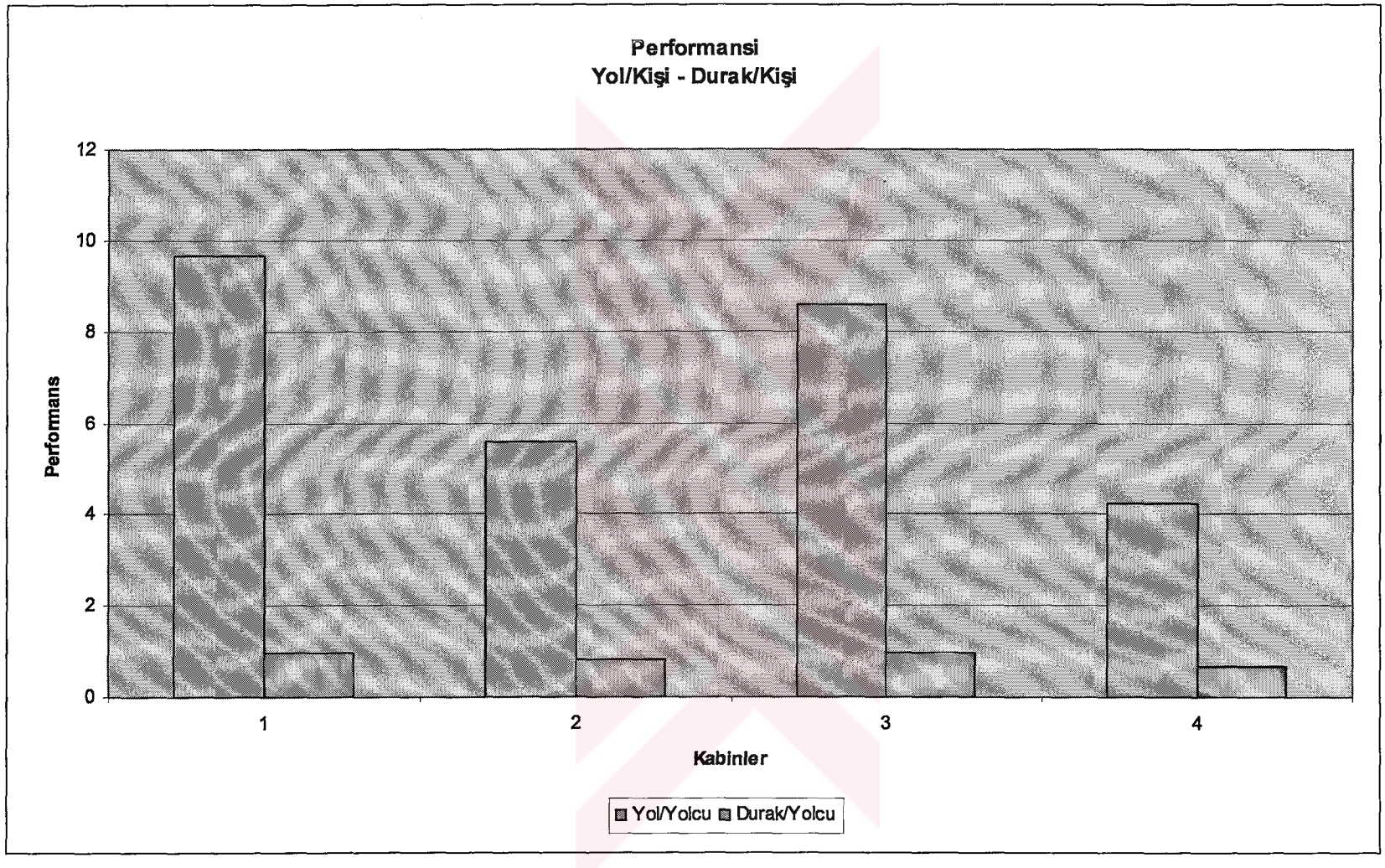
	Kabin1	Kabin2	Kabin3	Kabin4	TOPLAM
Yol	358	268	344	224	1194
Durak	35	39	38	36	148
Ortalama Bekleme Süresi	28.49	48.48	32.57	50.64	41.40
Ortalama Yolculuk Süresi	49.67	65.83	42.37	55	53.98
Taşınan Yolcu Sayısı	37	48	40	53	178
Yol/Yolcu	9.67	5.58	8.6	4.22	6.70
Durak/Yolcu	0.94	0.81	0.95	0.68	0.83



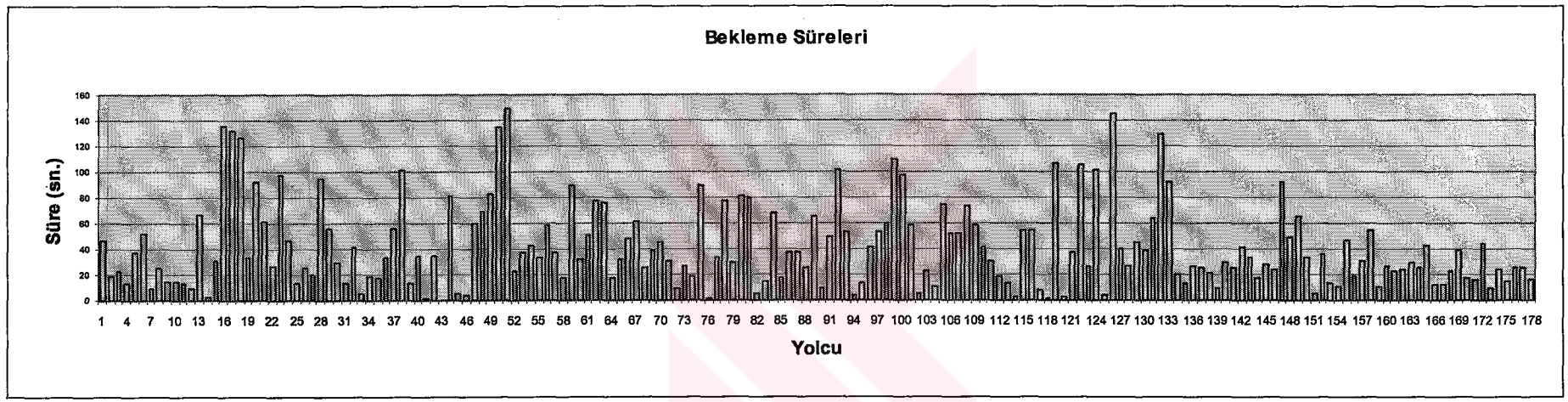
Şekil C.1 Kabin Rota Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Enerji Öncelikli



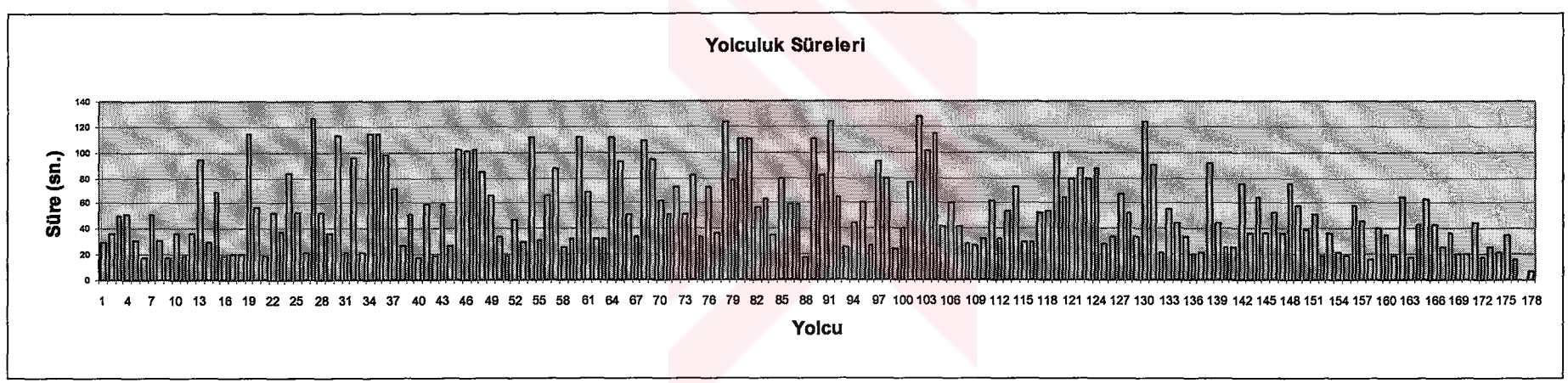
Şekil C.2 Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Enerji Öncelikli



Şekil C.3 Kabin Performans Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Enerji Öncelikli



Şekil C.4.a Bekleme Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Enerji Öncelikli



Şekil C.4.b Yolculuk Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Enerji Öncelikli

Poisson Dağılımına Göre Elde Edilmiş Bina Trafik Senaryosu

12:00-12:15 Senaryo Dilimi

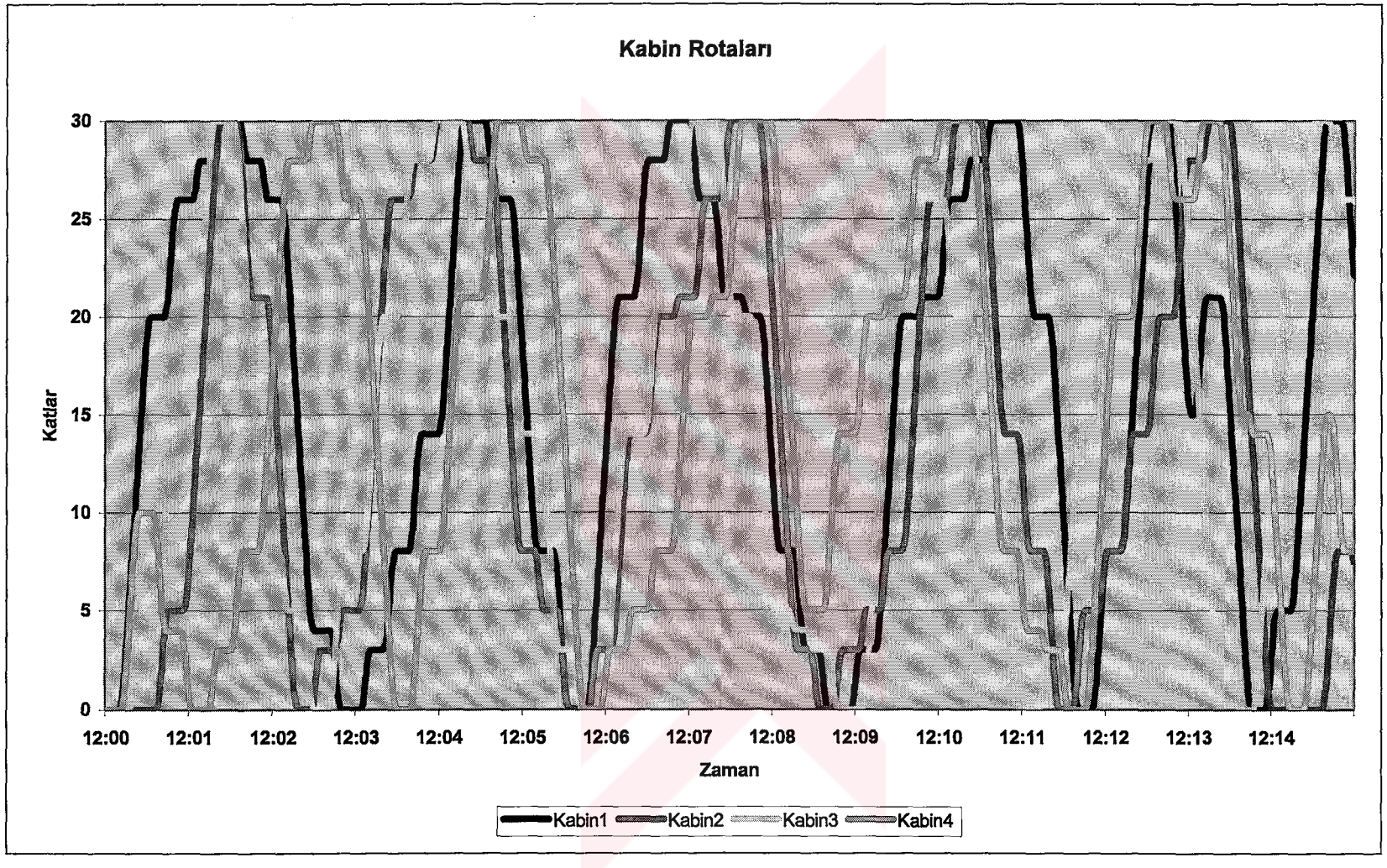
Bekleme Süresi Öncelikli Durumu Dikkate Alan Amaç Katsayılarına Göre Çalıştırılan Simülasyon Sonuçları

Tablo C.3 Bekleme Süresi Öncelikli Durum - Ağırlık Katsayıları

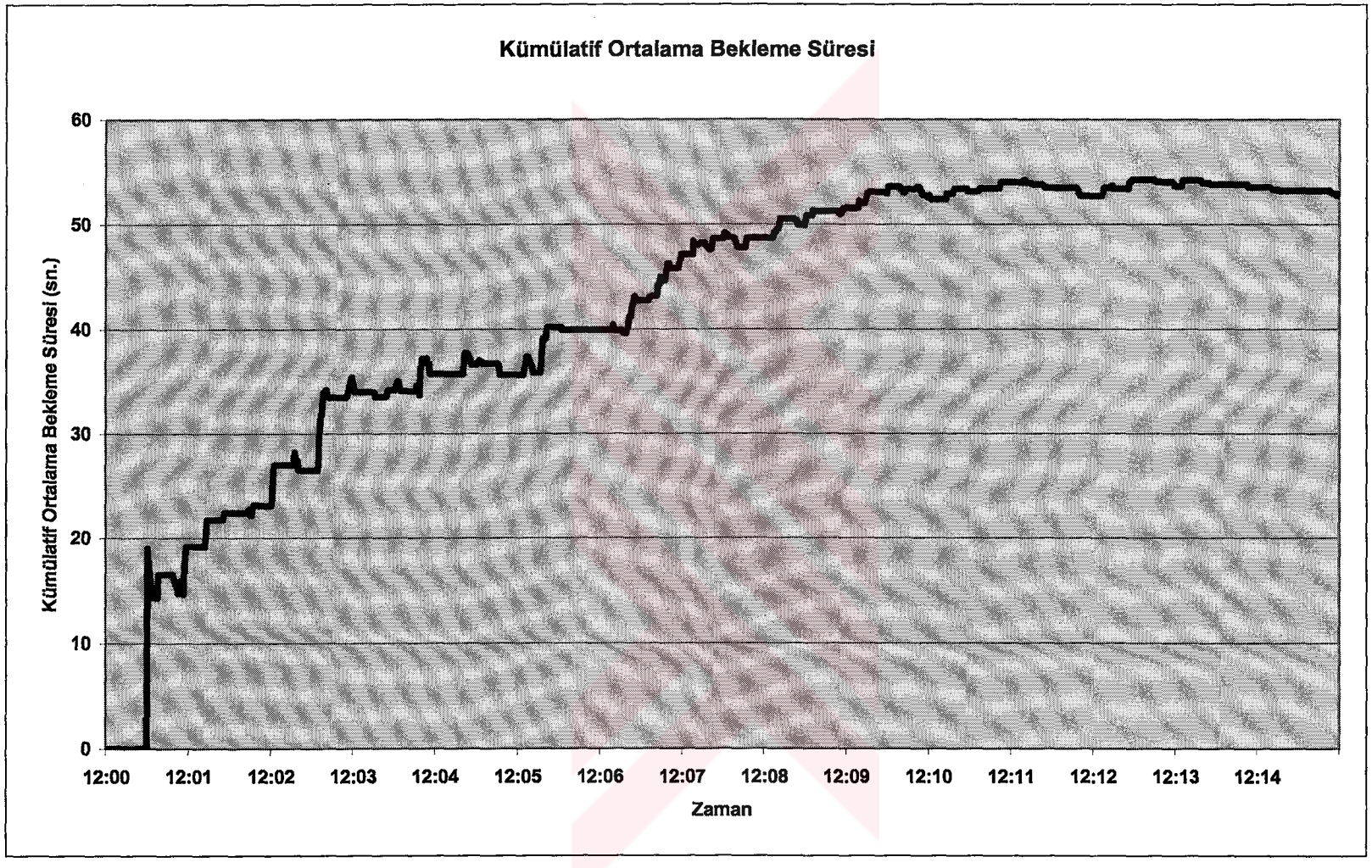
AMAÇLAR	AĞIRLIK KATSAYILARI
Bekleme Süresi	0.9
Yolculuk Süresi	0.1
Kabin Çağrı Uzaklığı	0.5
Kabin Yük / Yolcu Sayısı	0.3
Çağrı Katı Alan Ağırlığı	0.1
Gidiş Katı Alan Ağırlığı	0.1

Tablo C.4 Toplu Sonuçlar

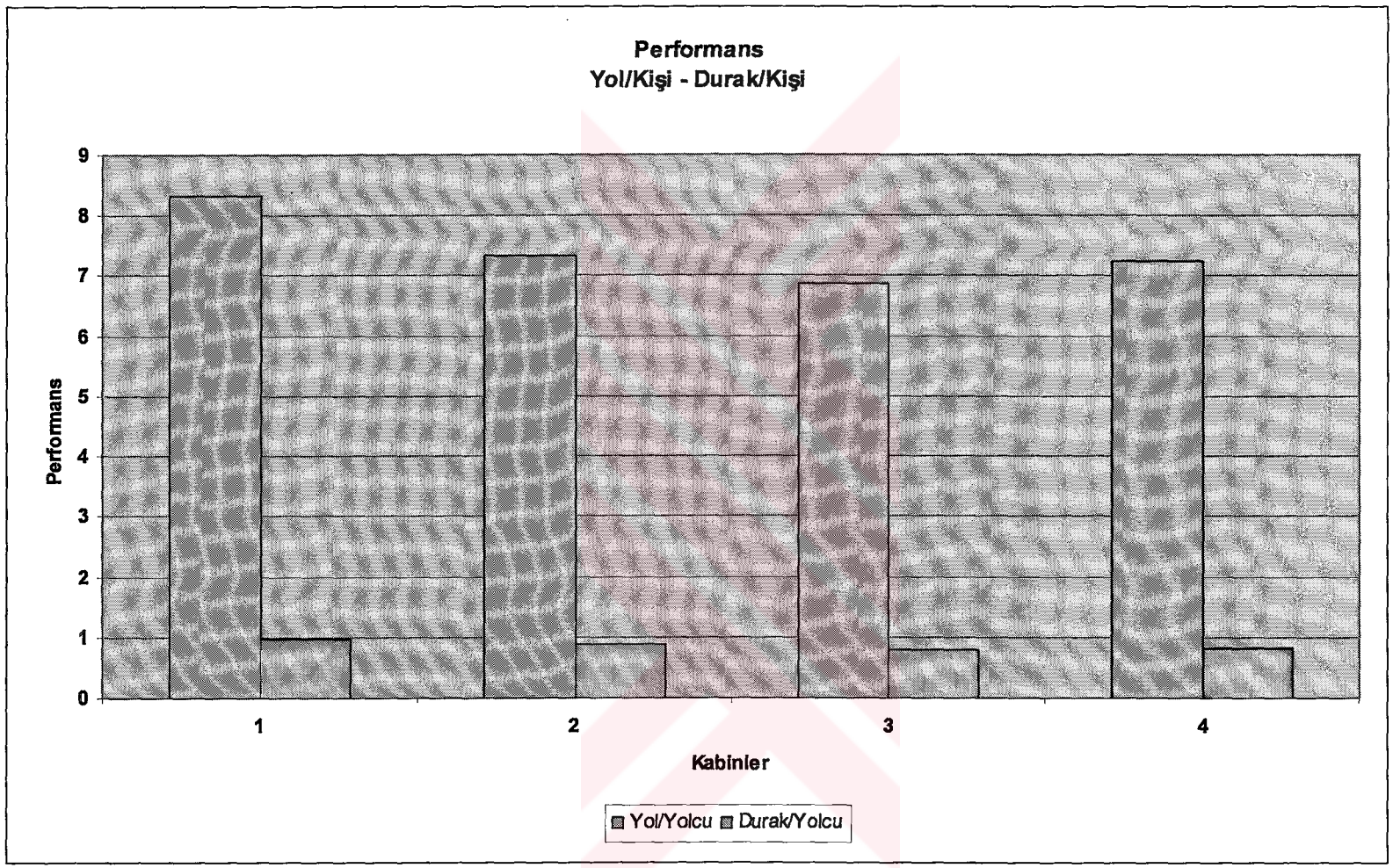
	Kabin1	Kabin2	Kabin3	Kabin4	TOPLAM
Yol	342	308	330	340	1320
Durak	39	37	38	39	153
Ortalama Bekleme Süresi	59.41	59.95	48.02	45.21	52.72
Ortalama Yolculuk Süresi	44.58	50.33	43.56	41.42	44.83
Taşınan Yolcu Sayısı	41	42	48	47	178
Yol/Yolcu	8.34	7.33	6.87	7.23	7.41
Durak/Yolcu	0.95	0.88	0.79	0.83	0.86



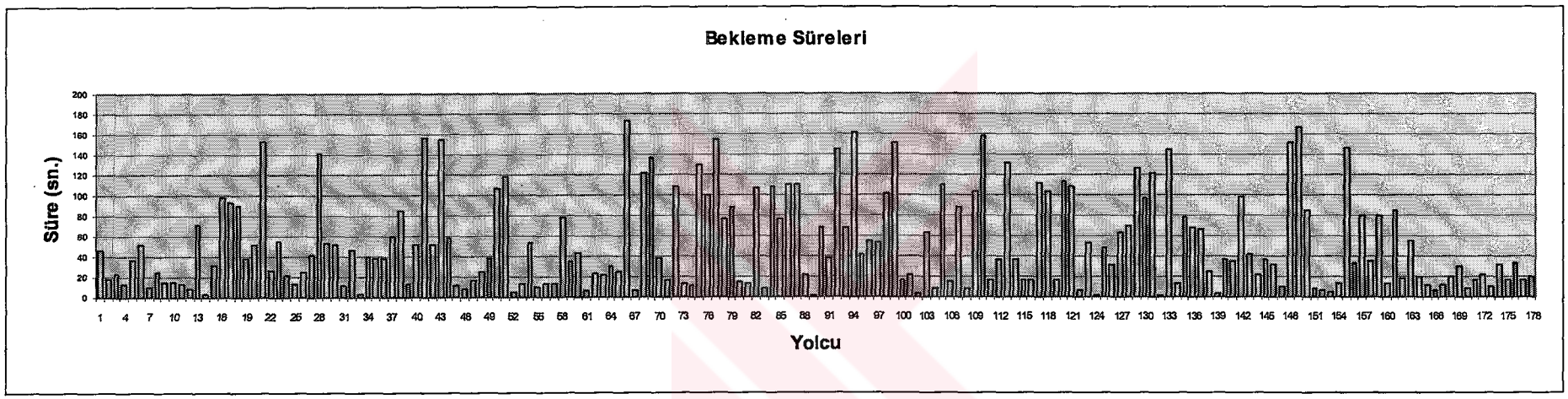
Şekil C.5 Kabin Rota Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Bekleme Süresi Öncelikli



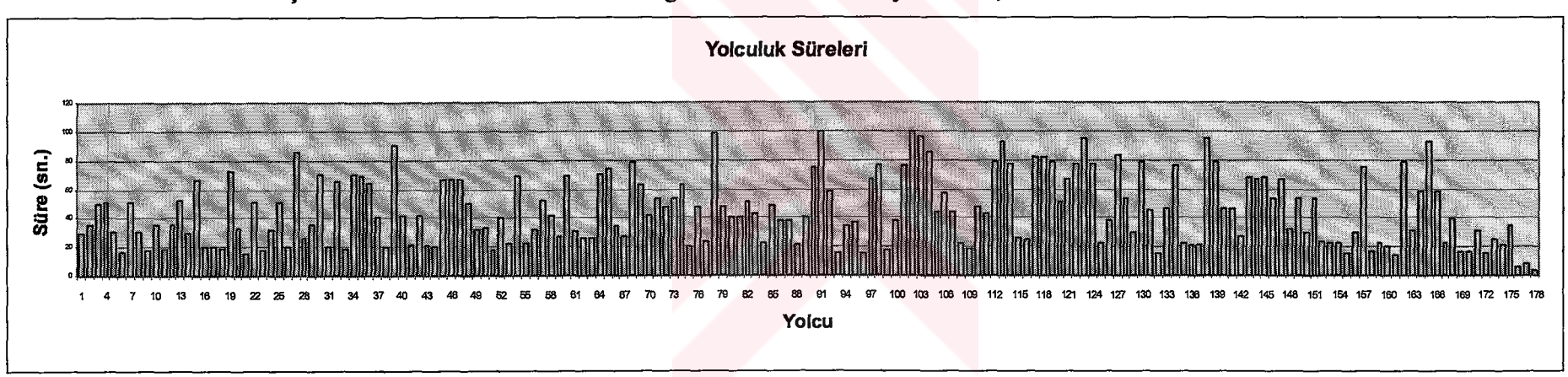
Şekil C.6 Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Bekleme Süresi Öncelikli



Şekil C.7 Kabin Performans Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Bekleme Süresi Öncelikli



Şekil C.8.a Bekleme Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Bekleme Süresi Öncelikli



Şekil C.8.b Yolculuk Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Bekleme Süresi Öncelikli

Poisson Dağılımına Göre Elde Edilmiş Bina Trafik Senaryosu

12:00-12:15 Senaryo Dilimi

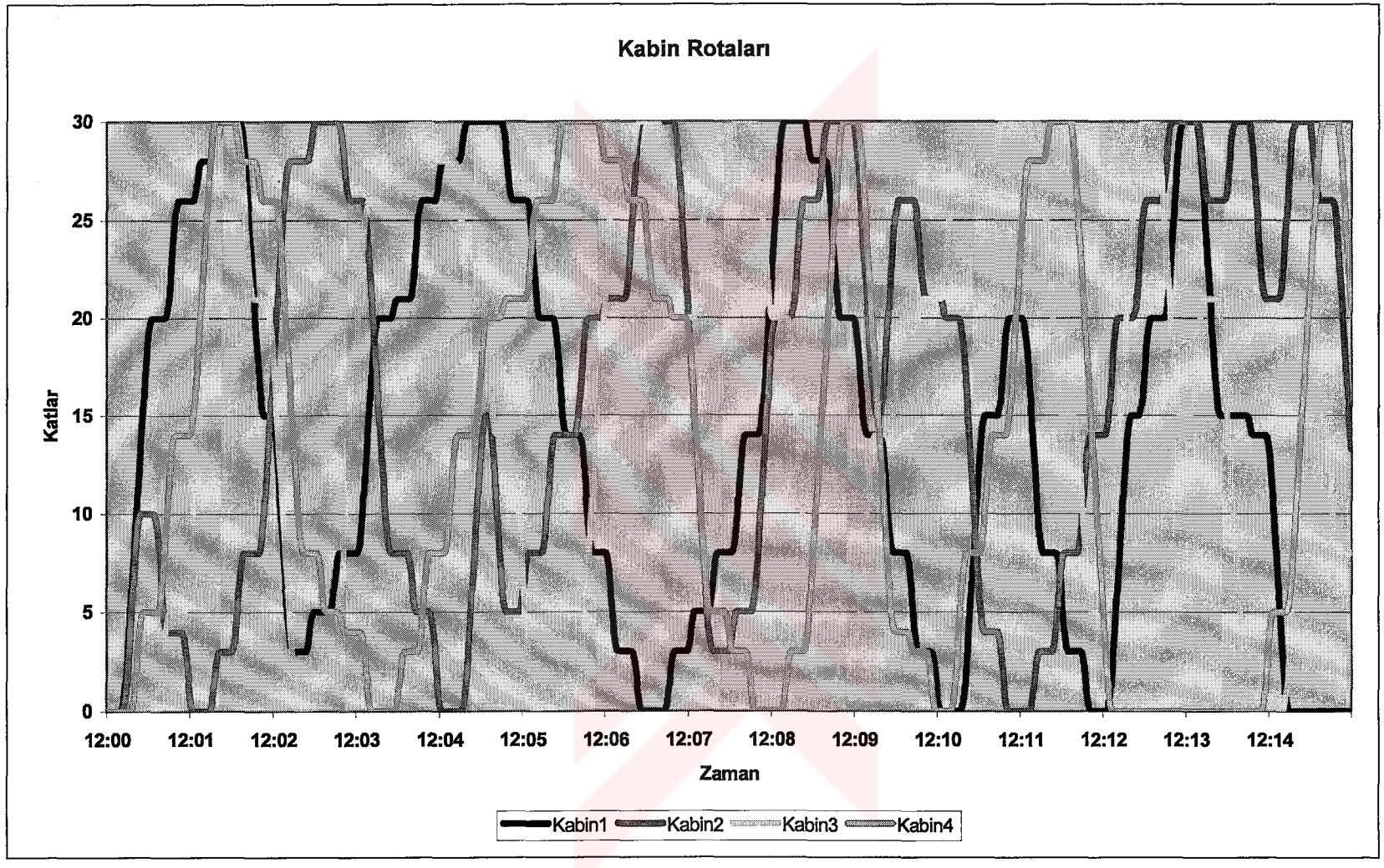
Adaptif Durumu Dikkate Alan Amaç Katsayılarına Göre Çalıştırılan Simülasyon Sonuçları

Tablo C.5 Adaptif Durum – Ağırlık Katsayıları

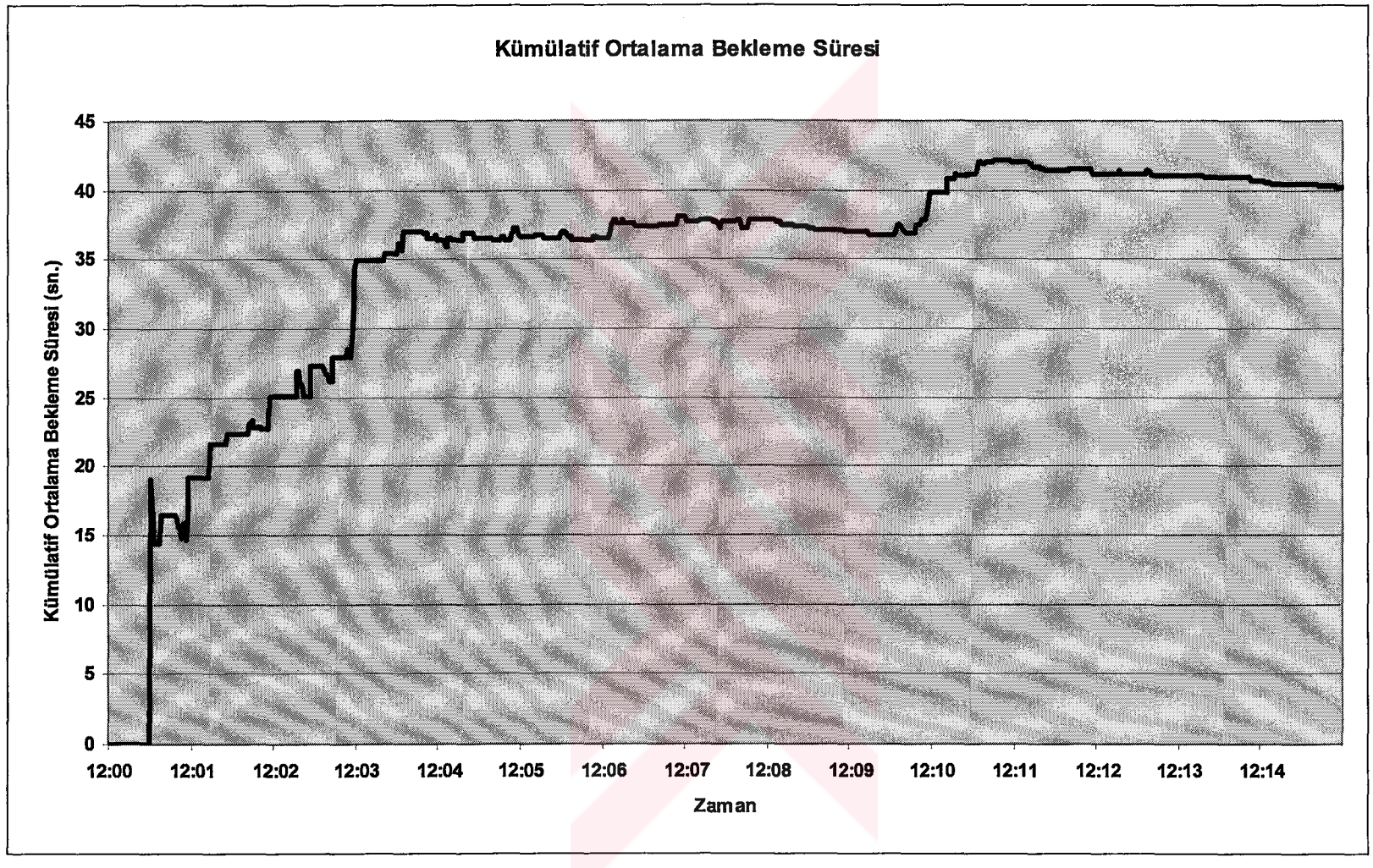
AMAÇLAR	AĞIRLIK KATSAYILARI
Bekleme Süresi	0.5 - 0.7 - 0.9
Yolculuk Süresi	0.1 - 0.1 - 0.1
Kabin Çağrı Uzaklığı	0.5 - 0.5 - 0.5
Kabin Yük / Yolcu Sayısı	0.3 - 0.3 - 0.3
Çağrı Katı Alan Ağırlığı	0.7 - 0.4 - 0.1
Gidiş Katı Alan Ağırlığı	0.7 - 0.4 - 0.1

Tablo C.6 Toplu Sonuçlar

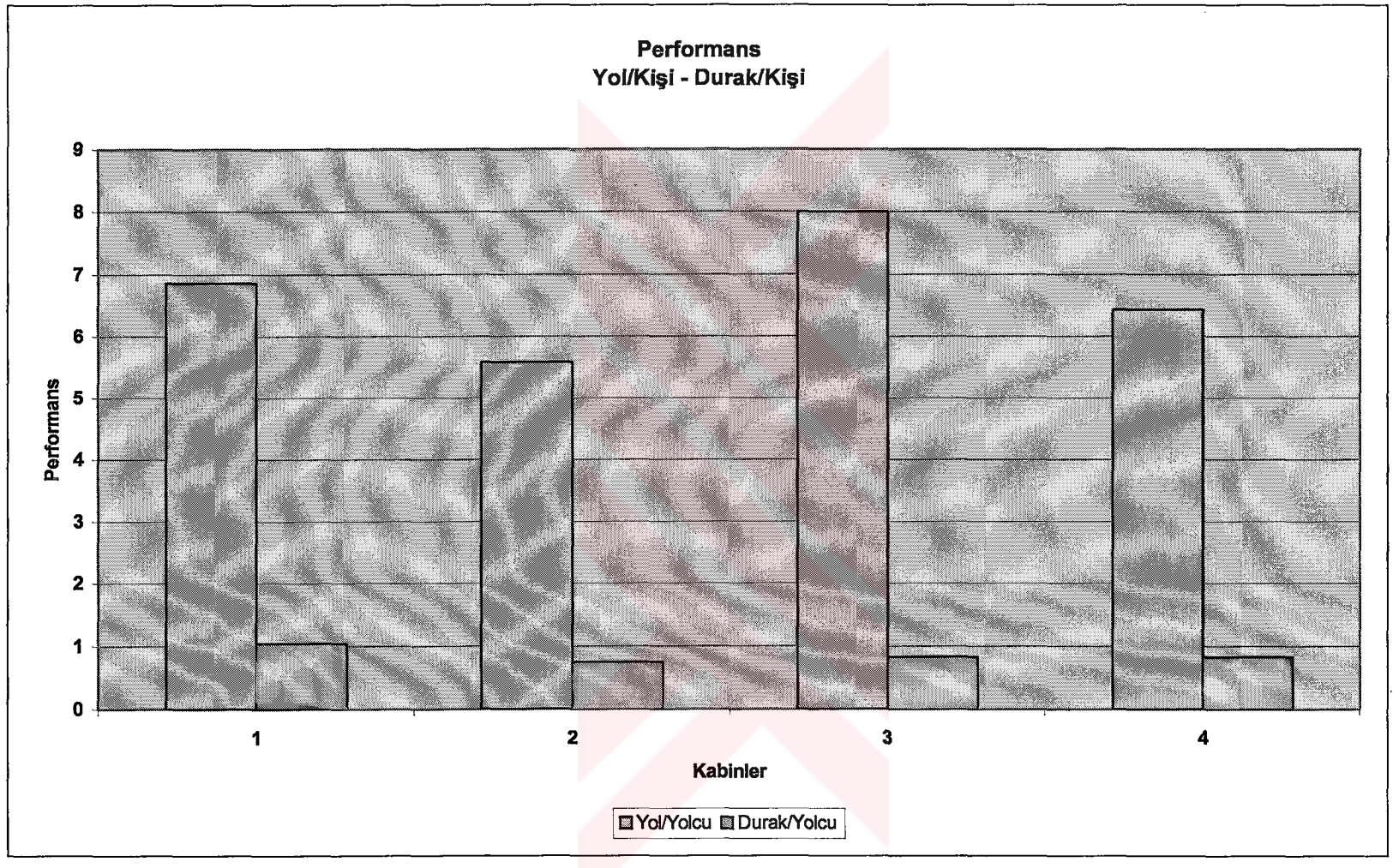
	Kabin1	Kabin2	Kabin3	Kabin4	TOPLAM
Yol	274	296	344	270	1184
Durak	42	40	36	35	153
Ortalama Bekleme Süresi	39.75	38.40	32.37	50.52	40.10
Ortalama Yolculuk Süresi	58.45	47.70	44.40	55	51.04
Taşınan Yolcu Sayısı	40	53	43	42	178
Yol/Yolcu	6.85	5.59	8	6.43	6.65
Durak/Yolcu	1.05	0.75	0.84	0.83	0.86



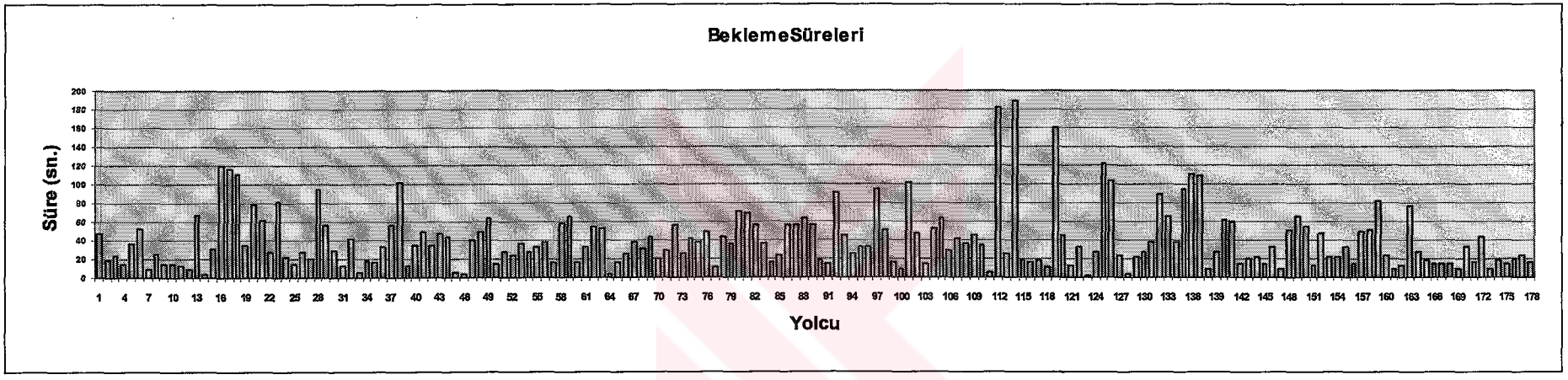
Şekil C.9 Kabin Rota Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Adaptif



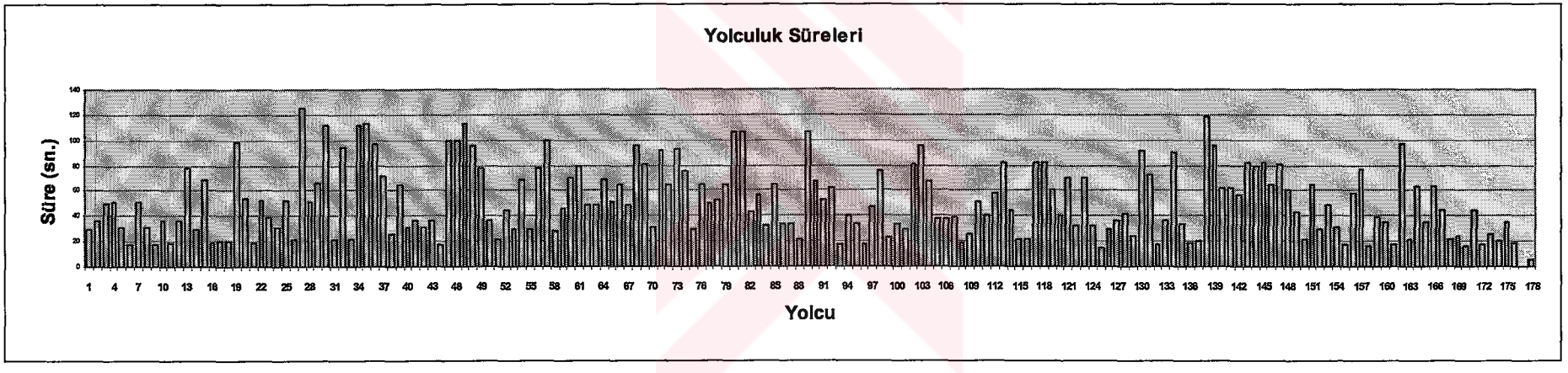
Şekil C.10 Kümülatif Ortalaman Bekleme Süresi Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Adaptif



Şekil C.11 Kabin Performans Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Adaptif



Şekil C.12.a Bekleme Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Adaptif



Şekil C.12.b Yolculuk Süreleri Grafiği 12:00-12:15 Senaryo Dilimi, Adaptif

ÖZGEÇMİŞ

1968 Yılında İstanbul' da doğdu. Orta öğrenimi, 1985 yılında İstanbul Vefa Lisesinden mezun olarak tamamladı. 1990 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1991 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Bölümüne Yüksek Lisans öğrencisi olarak girdi ve aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Otomatik Kontrol Biriminde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 1993 Yılında Fen Bilimleri Enstitüsünden Yüksek Lisans derecesi alarak mezun oldu ve aynı Enstitüde doktora programına başladı. 1995 Yılında NATO bursu alarak Florida Atlantik Üniversitesinde araştırmalara katıldı. Askerlik görevini, 1996-1997 yılları arasında Ankara 1011. Ordudonatım Ana Tamir Fabrikasında AR.GE Asteğmeni olarak yerine getirdi. 1999 yılında İstanbul Üniversitesi İşletme İktisadı Enstitüsünde, CPIM sertifika programınına devam edip, başarıyla tamamladı.