İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORLARDA SICAKLIK DAĞILIMININ ÇIKARTILARAK TASARIM OPTİMİZASYONUNUN YAPILMASI

DOKTORA TEZİ

Filiz GÜRGÖZE

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

MAYIS 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORLARDA SICAKLIK DAĞILIMININ ÇIKARTILARAK TASARIM OPTİMİZASYONUNUN YAPILMASI

DOKTORA TEZİ
Filiz GÜRGÖZE
(504032001)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Ocak 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Mayıs 2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. A. Faik MERGEN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İbrahim ÖZKOL (ITU)
Prof. Dr. Feriha ERFAN(KOÜ)
Prof. Dr. İbrahim ŞENOL (YTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN (İTÜ)

MAYIS 2009

ÖNSÖZ

Bir elektrik mühendisi olarak ısı aktarımıyla konusuyla ilgilenmeye başlamam, yüksek lisans eğitimimin sırasında Tez Danışmanım Sayın Prof. Dr. A. Faik MERGEN'in önerisiyle oldu. Kendisine sadece bu ufuk açıcı önerisi için değil, çalışmam sırasında ve meslek yaşamımın her alanında bana gösterdiği büyük destek ve anlayış için minnettarım.

Sayın Prof. Dr İbrahim ÖZKOL' a çalışmalarımı okuyarak, değerli öneri ve uyarılarıyla katkıda bulunduğu için teşekkür ederim.

Elk.Yük.Müh. Sn. Murat İMERYÜZ, elindeki kaynakları benimle cömertçe paylaştı, mesleki ve manevi desteğini benden esirgemedi. Kendisine teşekkürü borç bilirim.

İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Elektrik Makinaları Ana Bilim Dalındaki tüm hocalarıma ve tüm çalışma arkadaşlarıma yardımları ve anlayışları için teşekkür ediyorum.

Çalışmalarım sırasında kullandığım motor GAMAK A.Ş. tarafından temin edildi. Elk.Müh. Sn Sinan ALTINDAĞ ' a bu süreçteki desteği için teşekkür ederim.

Eşim Gökhan ŞİMŞEK tüm çalışmam süresince bir sabır anıtıydı, desteğini ve anlayışını benden esirgemedi, kendisine ne kadar teşekkür etsem azdır. Her şeyimi borçlu olduğum sevgili Anne ve Babama, sonsuz sevgi ve şükranlarımı sunuyorum.

Ocak 2009

Filiz GÜRGÖZE
Yüksek Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **iv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xixx**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Asenkron Motorlar 1
1.2 .Motivasyon ve Amaç 2
1.3 Literatür Özeti 6
1.3.1 Isıl modeller 6
1.3.2 Optimizasyon 10
1.4 Bölümler 15
2. ISI AKTARIMI **17**
2.1 Isı Aktarımında Genel Yasalar 17
2.2 Isı Aktarımında Özel Yasalar 18
2.2.1 Isı iletiminde Fourier yasası: 19
2.2.2 Isı Taşınımı için Newton'un soğuma yasası 23
3. ASENKRON MOTORDA ISI AKTARIMI **29**
3.1 . Asenkron Motorun Yapısı ve Çalışma Prensibi 29
3.2 Asenkron Motorda Kayıplar 32
3.3 Asenkron Motorda Isı Aktarım Yolları 38
3.4 Asenkron Motorda Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi 39
3.4.1 Sayısal alan çözümüne dayanan modeller: 40
3.4.1.1 Sınır koşulları 39
3.4.2 Toplu parametreli modeller 41
3.5 Temel Silindirik Bileşen 45
3.6 Toplu Parametreli Eşdeğer Devrenin Oluşturulması 47
3.6.1 Gövde 47
3.6.2 Stator manyetik devresi 51
3.6.3 Stator sargısı 52
3.6.4 Hava aralığı 55
3.6.5 Stator sargı başı 57
3.6.6 Kapak boşluğu havası 59
3.6.7 Rotor sargısı 61
3.6.8 Rotor manyetik devresi 62
3.6.9 Mil 63
3.6.10 Isıl eşdeğer devre denklemleri ve çözümü 64
4. ASENKRON MOTOR TASARIM OPTİMİZASYONU **69**
4.1 Optimizasyon Yöntemlerine Genel Bakış 70
4.1.1 Gradyan bazlı optimizasyon yöntemleri 70
4.1.1.1 En dik iniş algoritması 70
4.1.1.2 Eşlenik gradyan yöntemi 71

4.1.1.3 Newton yöntemi 71
4.1.1.4 Yarı-newton yöntemler 72
4.1.2 Dolaysız yöntemler 72
4.1.2.1 Nelder Meade simplex yöntemi 72
4.1.2.2 Hooke-Jeeve yöntemi 74
4.1.2.3 Rosenbrock yöntemi 75
4.1.2.4 Powell yöntemi 75
4.1.3 Sezgisel algoritmalar 76
4.2 Yapay Isıl İşlem Algoritması 77
4.2.1 Boltzmann dağılım yasası 78
4.2.2 Metropolis kabul kriteri 81
4.2.2.1 Markov zincirleri 83
4.2.3 Isıl işlem benzeşimi ve yapay ısıl işlem algoritması 84
4.3 Asenkron Motorun Tasarım Eşitlikleri ve İşletme Büyüklükleri……..... 92
4.3.1 Tasarım değişkenleri 92
4.3.2 İşletme büyüklükleri 96
4.4 Sınırlamalı Optimizasyon Problemlerinin Sınırlamasız Problemlere Dönüştürülmesi 101
4.5 Çok Amaçlı Optimizasyon ve Pareto Optimal Çözümler 103
5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR 109
5.1 Deneysel Çalışma 112
5.2 Isıl Eşdeğer Devre Parametrelerinin Sıcaklık Dağılımı üzerine Etkisi 122
5.2.1 Isıl direnç ve kapasitelerin sıcaklık dağılımına etkisi 122
5.2.2 Kayıpların sıcaklık dağılımına etkisi 126
5.2.3 Diğer önemli parametreler 128
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 133
KAYNAKLAR 137
EKLER 145
ÖZGEÇMİŞ 147

KISALTMALAR

SEA	**:** Sonlu Elemanlar Analizi
SEY	**:** Sonlu Elemanlar Yöntemi
DOP	**:** Doğrusal Olmayan Programlama
DOSOP	**:** Doğrusal Olmayan Sınırlamalı Optimizasyon Problemleri
YSA	**:** Yapay Sınır Ağları
GA	**:** Genetik Algoritma
YIS	**:** Yapay Isıl İşlem
EDİ	**:** En Dik İniş Algoritması
MC	**:** Monte Carlo
MMC	**:** Metropolis Monte Carlo

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Yalıtım sınıfları. 2
Çizelge 1.2 : Türk Sanayinde 1984 -1993 yılları arasında tüketilen elektrik enerjisinin sektörel dağılımının aralığı 3
Çizelge 1.3 : Türk Sanayinde 1984–1993 yılları arasında tüketilen elektrik enerjisi içinde elektrik motorlarının payına ilişkin tahminler……..... 3
Çizelge 3.1 : Isıl sistemlerin elektriksel benzeşimi. 44
Çizelge 4.1 : Yapay Isıl İşlem ve Isıl İşlem arasındaki benzerlik. 85
Çizelge 4.2 : Metropolis kabul kriterinin yapay ısıl işlem algoritmasına uygulanışı . 86
Çizelge 4.3 : Optimizasyon yöntemlerinin kıyaslanması. 101
Çizelge 4.4 : Optimizasyon sonuçları. 107
Çizelge 5.1 : Tam yükte sıcaklık dağılımı 115
Çizelge 5.2 : Taşınım katsayıları 115
Çizelge 5.3 : Boşta çalışmada sıcaklık dağılımı 119
Çizelge 5.4 : R2, R2, R25, R33 dirençlerindeki artışın motor sıcaklık dağılımına etkisi. 123
Çizelge 5.5 : R2, R22, R25, R33 dirençlerinin %50 azalması durumunda elde edilen sıcaklık dağılımı. 125
Çizelge 5.6 : R2, R14,R19, R22, R25, R33,R38 dirençlerinin kısadevre edilmesi durumunda motor sıcaklık dağılımı. 125

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Isı iletiminde Fourier Yasası. 19
Şekil 2.2 : Kartezyen koordinatlarda üç boyutlu ısı iletimi 21
Şekil 2.3 : Silindirik koordinatlarda üç boyutlu kontrol hacmi.....23
Şekil 2.4 : Hız sınır tabakası 24
Şekil 2.5 : Isıl sınır tabaka.....25
Şekil 2.6 : İki silinidir arası akışta, iç silindirin dönmesi durumunda laminer hız profili. 26
Şekil 3.1 : Asenkron motorun çalışma ilkesi 31
Şekil 3.2 : Ferromanyetik malzemelerde histerezis çevrimi.....33
Şekil 3.3 : Ferromanyetik malzemelerde girdap akımı kayıplarının azaltılması. 35
Şekil 3.4 : Asenkron motorda iletim ve taşınım yoluyla ısı aktarımı.....38
Şekil 3.5 : Isı üretimi olmayan duvarda bir boyutlu ısı iletimi 43
Şekil 3.6 : Temel silindirik bileşen.....45
Şekil 3.7 : Eksenel ve radyal ısı aktarımı.....46
Şekil 3.8 : Temel silindirik bileşene ilişkin indirgenmiş eşdeğer devre. 46
Şekil 3.9 : Gövde ile boyunduruk, dış ortam ve kapak boşluğu havası arsındaki ısı iletimi ve elektriksel eşdeğer devre. 48
Şekil 3.10 : İki komşu soğutma kanadının oluşturduğu kanalın hidrolik çapı.....49
Şekil 3.11 : Stator manyetik devresindeki ısı aktarımına ilişkin elektriksel eşdeğer devre.....52
Şekil 3.12 : Stator sargısı ile boyunduruk, hava aralığı, sargı başı ve dişler arasındaki ısı iletimi ve elektriksel eşdeğer devre 53
Şekil 3.13 : Hava Aralığında Hız Profilleri 55
Şekil 3.14 : Hava aralığı ile stator sargısı, rotor sargısı ve dişler arasındaki ısı iletimi ve elektriksel eşdeğer devre 56
Şekil 3.15 : Sargı başı ile oluk sargısı ve kapak boşluğu havası arasındaki ısı aktarımına ilişkin eşdeğer devre 59
Şekil 3.16 : Kapak boşluğu havası ve temas ettiği yüzeyler arasındaki ısı aktarımı..61
Şekil 3.17 : Rotor sargısı, rotor boyunduruğu, hava aralığı ve kapak boşluğu arasındaki ısı iletimi ve elektriksel eşdeğer devr.....62
Şekil 3.18 : Rotor boyunduruğu, rotor sargısı ve mil arasındaki ısı iletimi. 63
Şekil 3.19 : Asenkron motorun toplu parametreli ısıl eşdeğer devresi.....67
Şekil 4.1 : .Simpleks Algoritmasının üç adımı a)Başlangıç,b)Yansıtma,c)Daraltma, d)Genişletme 73
Şekil 4.2 : Hooke – Jeeve Araştırma Yöntemi.....74
Şekil 4.3 : *Hump* fonksiyonu 90
Şekil 4.4 : 2 Boyutlu Rastrigin Fonksiyonu.....91
Şekil 4.5 : Stator ve Rotor Olukları.....94
Şekil 5.1 : Motor Sargı Şeması 110
Şekil 5.2 : Bağıl manyetik geçirgenliğin manyetik akı yoğunluğuna bağlı değişimi.....111

Şekil 5.3 : Deney montaj şeması, b) Sıcaklık ve hava hızı ölçümü…… 113
Şekil 5.4 : Anma Çalışmasında ısıl geçici rejim……. 116
Şekil 5.5 : Anma çalışmasında stator oluk sargısı için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması. ..... …..117
Şekil 5.6 : Anma çalışmasında stator sargı başı için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması..... 117
Şekil 5.7 : Anma çalışmasında stator oluk sargısı için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması. 118
Şekil 5.8 : Anma çalışmasında SEY ile elde edilen sıcaklık dağılımı. 118
Şekil 5.9 : Boşta çalışmada ısıl geçici rejim. 120
Şekil 5.10 : Boşta çalışmada stator boyunduruk için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması. 121
Şekil 5.11 : Boşta çalışmada stator oluk sargısı için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması. 121
Şekil 5.12 : Boşta çalışmada stator sargı başı için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması 122
Şekil 5.13 : Boşta çalışmada SEY ile elde edilen sıcaklık dağılımı. 122
Şekil 5.14 : Düğüm sıcaklıklarının demir kayıplarına bağlı değişimi 126
Şekil 5.15 : Düğüm sıcaklıklarının stator bakır kayıplarına bağlı değişimi 127
Şekil 5.16 : Düğüm sıcaklıklarının rotor bakır kayıplarına bağlı değişimi 127
Şekil 5.17 : Düğüm sıcaklıklarının g_0 değerine bağlı olarak değişimi..... 128
Şekil 5.18 : Düğüm sıcaklıklarının hc değerine bağlı olarak değişimi 128
Şekil 5.19 : Sıcaklığın %Δh3 değerine bağlı değişimi..... 130
Şekil 5.20 : Sıcaklığın %Δkcu,i değerine bağlı değişimi 131

SEMBOL LİSTESİ

A : Kesit alanı (m^2)
a : Isıl yayınım katsayısı (m^2/s)
Ac : Oluktaki toplam bakır alanı
a_{o1}, a_{o2} : Stator ve rotor oluk ağzı genişliği (m)
B : Rotor eğim açısı
B_δ : Hava aralığı akısı (T)
B_{b1},B_{b2} : Stator ve rotor boyunduruk yoğunluğu (T)
B_{d1},B_{d2} : Stator ve rotor diş akı yoğunluğu (T)
B_n : Akı yoğunluğunun n. dereceden harmonik bileşeni
b_{o1},b_{o2} : Stator ve rotor oluk genişlikleri (m)
^0C : Celcius sıcaklığı (K)
C : Öz ısı (J/kg.^{0}C)
c_{al} : Alüminyum öz ısısı (J/kg.^{0}C)
c_{cu} : Bakırın öz ısısı (J/kg.^{0}C)
c_{fe} : Demirin öz ısısı (J/kg.^{0}C)
C_0 : Faydalanma katsayısı ($kVA.min^{-1}/m^3$)
$\cos\varphi_0$: Boşta çalışmada güç katsayısı
$\cos\varphi_n$: Boşta çalışmada güç katsayısı
D_{i1}, D_{o1} : Stator iç ve dış çap (m)
D_{i2}, D_{o2} : Rotor iç ve dış çap (m)
d_{cubuk} : Rotor kafes çubuk çapı
d_h : Hidrolik çap(m)
d_i : Sargı yalıtkan kalınlığı
E : Elektrik alan şiddeti (V/m)
E : Enerji (J)
E1, E2 : Stator ve rotorda endüklenen gerilim (V)
F : Radyal iletkenlik katsayısı
e_i : i. enerji seviyesi
f_1, f_2 : Stator ve rotorda endüklenen gerilimlerin frekansı (Hz)
f_n : n. dereceden harmoniğin freakansı (Hz)
H : Manyetik alan şiddeti (A/m)
h : Taşınım katsayısı ($W/m^2.^0C$)
h_1 : Motor gövdesiyle dış ortam arasındaki taşınım katsayısı ($W/m^2.^0C$)
h_2 : Hava aralığı taşınım katsayısı ($W/m^2.^0C$)
h_3 : Kapak boşluğu havası taşınım katsayısı ($W/m^2.^0C$)
h_4 : Rotor soğutma kanalları taşınım katsayısı ($W/m^2.^0C$)
h_c : Stator boyunduruğu ve gövde arasındaki ısıl temas katsayısı ($W/m^2.0C$)
h_{db} : Diş ve boyunduruk ortalama manyetik alan şiddeti (A/m)
h_{11}, h_{21} : Stator ve rotor oluk ağzı yüksekliği (m)
h_{12}, h_{22} : Stator ve rotor oluk ağzı eğimi yüksekliği (m)

h_{sb}, h_{rb} : Stator ve rotor boyunduruk yükseklikleri (m)
h_{kr} : Rotor kanatçık yüksekliği
h_{o1},h_{o2} : Stator ve rotor oluk yükseklikleri (m)
g_{bb} : Kafesli asenkron motor için, rotor sargı başı dağılma katsayısı
I : Akım (A)
I_{μ} : Mıknatıslanma akımı (A)
I_o : Boşta çalışma akımı (A)
J : Eylemsizlik momenti ($kg.m^2$)
J : Akım yoğunluğu (A/m^2)
K : Isı iletim katsayısı ($W/m.^0C$)
k_a : Alüminyum ısıl iletkenlik katsayısı ($W/m.^0C$)
k_b : Harmonikli gerilimler için girdap akımı kayıpları düzeltme katsayısı
k_{cu} : Bakır ısıl iletkenlik katsayısı ($W/m.^0C$)
k_c : Carter faktörü
k_{cfe} : Demir doluluk faktörü
k_{cuf} : İletkenlerin doldurmuş olduğu oluk kısmı için düzeltme faktörü
k_d : Doyma faktörü
k_f : Form faktörü
k_i : Oluk yalıtkanının ısıl iletkenlik katsayısı ($W/m.^0C$)
k_{lr},k_{la} : Laminasyon sacının radyal ve eksenel ısı iletkenlik katsayısı ($W/m.^0C$)
k_{o1}, k_{o2} : Stator ve rotor yüzey kayıp katsayısı (W/m^3)
k_p : Sac işleme faktörü
k_v : Vernik ısıl iletkenlik katsayısı (W/m^0C)
k_{w1} : Stator sargı faktörü
L : Uzunluk (m)
l_{bb} : Bobin başı uzunluğu
L_{cubuk} : Kısadevre kafesi çubuk uzunluğu (m)
L_{fe} : Demir uzunluğu (m)
L_g : Motor gövde uzunluğu
L_i : Etkin uzunluk (m)
L_{ilet} : Toplam sargı uzunluğu (m)
Ltop : Toplam demir uzunluğu (m)
l_{sb}, l_{rb} : Stator ve rotor boyunduruğu ortalama akı yolu uzunluğu (m)
m_1, m_2 : Stator ve rotor faz sayısı
N1, N2 : Stator ve rotor sarım sayısı
N : Rotor devir hızı (min^{-1})
n_i : i. enerji seviyesindeki partikül sayısı
n_k : Kısmi iletken sayısı
n_{kr} : Rotor kanatçık sayısı
n_p : İletken paralel kol sayısı
n_s : Senkron hız (min^{-1})
P : Kutup sayısı
P_E : Girdap akımı kayıpları (W)
P_H : Histeresiz kayıpları (W)
P_i : i. düğüme ilişkin kayıp (W)
P_k : Kayıp gücü (W)
P_n : Nominal güç (W)
P_{1p},P_{2p} : Stator ve rotor pulzasyon kaybı (W)
P_{1y}, P_{2y} : Stator ve rotor yüzey kaybı (W)

Q	:	Isı Enerjisi (J)
Q'	:	Isı akış oranı (W)
q'	:	Birim hacimde üretilen enerji (W/m^3)
Qb	:	Birim elektrik yükü (C/m3)
$\mathbf{Q_E}$	:	Elektrik yükü (C)
Qs, Qr	:	Stator ve rotor oluk sayısı
$\mathbf{q_{cu1}}$	:	Stator sargısı iletken kesiti (m^2)
$\mathbf{Q_{cubuk}}$	:	Kısadevre halkası çubuk kesiti (m^2)
$\mathbf{q_{halka}}$	:	Kısadevre halkası kesiti (m^2)
R	:	Sargı başı halkasının çapı (m)
$\mathbf{r_1}$	:	Stator dış çapı (m)
$\mathbf{r_2}$	:	Stator diş dibi yarıçapı (m)
$\mathbf{r_3}$	:	Stator iç yarıçapı (m)
$\mathbf{r_4}$	:	Stator sargısı eşdeğer yarıçapı (m)
$\mathbf{r_5}$	:	Rotor kısadevre kafesi çubuğu eşdeğer yarıçapı (m)
$\mathbf{r_6}$	:	Sargı başı halkası kesitinin eşdeğer yarıçapı (m)
$\mathbf{r_7}$	:	kısadevre halkası iç yarıçapı (m)
$\mathbf{r_8}$	:	eşdeğer rotor sargı yarıçapı (m)
$\mathbf{r_9}$	:	Mil çapı (m)
$\mathbf{r_{10}}$	:	Soğutma kanalı yarıçapı (m)
$\mathbf{R_I}$	:	Isıl direnç ($^0C/W$)
$\mathbf{R_{ij}}$	:	i. ve j. Düğümler arasındaki ısıl direnç ($^0C/W$)
$\mathbf{R_K}$	:	Kısadevre direnci (Ω)
$\mathbf{r_1, r'_{2r}}$	:	Stator ve statora indirgenmiş rotor sargısı elektriksel dirençleri (Ω)
S	:	Görünür güç (kVA)
s	:	Oluk doluluk faktörü
T	:	Sıcaklık (^0C)
T	:	Markov zincirinin geçiş martisi
t	:	Zaman (s)
$\mathbf{x_{1\sigma}, x_{2\sigma}}$	:	Stator ve rotor kaçak reaktansları (Ω)
$\mathbf{X_K}$	:	Kısadevre reaktansı (Ω)
$\mathbf{w_{kr}}$	:	Rotor kanatçık genişliği
U	:	İç enerji (J)
V	:	Hacim (m^3)
$\mathbf{V_1}$	:	Motor besleme gerilimi (V)
$\mathbf{V_c}$	:	Toplam sargı bakır hacmi
$\mathbf{V_e}$	:	Kısadevre halkasının hacmi.
v	:	Hız (m/s)
$\mathbf{z_1, z_2}$	:	Stator ve rotor iletken sayısı
$\mathbf{Z_K}$	:	Kısadevre empedansı (Ω)
$\boldsymbol{\alpha}$	:	Yutma katsayısı
$\boldsymbol{\alpha}$	:	Oluk sargısı hacminin, sargı başı hacmine oranı
$\boldsymbol{\alpha_I}$	:	Fiktif kutup örtme faktörü
$\boldsymbol{\alpha_0}$	:	Direnç sıcaklık katsayısı ($1/^0C$)
$\boldsymbol{\beta}$	:	Hacimsel genişleme katsayısı (1/K)
$\boldsymbol{\beta}$	:	Oluk ağzı genişliğinin hava aralığı uzunluğuna oranı
$\boldsymbol{\delta}$	:	Hava aralığı uzunluğu (m)
$\boldsymbol{\delta_H}$	:	Hız sınır tabaka kalınığı (m)
$\boldsymbol{\delta_I}$	:	Isıl sınır tabaka kalınlığı (m)
$\boldsymbol{\varepsilon_0, \varepsilon}$	:	Bağıl ve mutlak dielektrik sabiti (F/m)

Φ : Manyetik akı (Weber)
$\Phi\mu$: Manyetik akının tepe değeri (Weber)
Θ_δ : Hava aralığı amper sarımı (A)
Θ_{b1}, : Stator ve rotor boyunduruk amper sarımı (A)
Θ_{b2},
Θ_{d1}, Θ_{d2}, : Stator ve rotor diş amper sarımı (A)
$\lambda_{os}, \lambda_{or}$: Stator ve rotor oluk permeabilitesi
Λ : Manyetik geçirgenlik
μ : Dinamik viskozite (kg/ms)
μ_0, μ_r : Mutlak ve bağıl manyetik geçirgenlik (H/m)
η : Verim
υ : Kinematik viskozite (m^2/s)
π : Markov zincirinin durağan dağılımı
ρ : Yoğunluk (kg/m^3)
ρ_a : Alüminyumun yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_{cu} : Bakırın yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_{fe} : Demirin yoğunluğu (kg/m^3)
ρ : Yansıma katsayısı
τ : Kayma gerilmesi (N/m^2)
τ_{01}, τ_{02} : Stator ve rotor oluk adımı (m)
τ_p : Kutup adımı (m)
σ_1 : Heyland faktörü
σ : Stefan-Boltzmann sabiti (W/m^2K^4)
ω : Açısal hız (rad/s)
ω : Sargı başı sıcaklığının oluk sargısı sıcaklığına oranı

ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORLARDA SICAKLIK DAĞILIMININ ÇIKARTILARAK TASARIM OPTİMİZASYONUNUN YAPILMASI

ÖZET

Basit ve sağlam yapıları nedeniyle asenkron motorlar, endüstriyel uygulamalarda en yaygın elektrik motorlarıdır. Artan malzeme maliyetleri, küçük ve hafif elektrik motorlarına duyulan ihtiyaç ve değişken hızlı tahriklerin yaygın kullanımı nedeniyle makinanın çeşitli kısımlarındaki sıcaklık artışının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, asenkron sürekli halde sıcaklık dağılımını ve ısıl geçici rejimi belirlemek üzere akım kaynaklı elektriksel devre benzeşimine dayanan bir ısıl model oluşturulmuştur. Isıl modeli oluşturmakta kullanılan kritik parametreler belirlenmiş ve bu parametrelerin hesabı incelenmiştir. Farklı yükleme durumları için elde edilen sonuçlar, deneysel yolla elde edilen verilerle kıyaslanarak modelin doğruluğu gösterilmiştir.

Asenkron motorun sürekli rejimdeki işletme büyüklüklerini hesaplayan bir tasarım programı yazılmıştır. Gerek imalatçı, gerek kullanıcı açısından motor performansının iyileştirilmesi ve maliyetin düşürülmesi büyük önem taşımaktadır. İşletme maliyetinin toplam maliyetin büyük bir kısmını oluşturması nedeniyle, işletme maliyetinin, motorda kullanılan aktif malzemelerin iyileştirilmesi ve motor tasarım değişkenlerinin optimizasyonu yoluyla azaltılması büyük önem taşır. Isıl model, asenkron motor tasarım programıyla birleştirilerek motor tasarım optimizasyonu için kullanılmıştır. Sabit güçte, mevcut tasarıma göre daha yüksek verimli, kompakt ve sıcaklık artışı daha düşük bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak ısıl işlem benzeşimi kullanılmış ve asenkron motorun çok amaçlı tasarım optimizasyonu için basit ve verimli bir yapay ısıl işlem algoritması geliştirilmiştir.

DESIGN OPTİMİZATION BY EMPLOYING THERMAL DISTRIBUTION IN 3-PHASE INDUCTION MOTORS

SUMMARY

Induction motors are most common electric motors for industrial application due to their simple construction and robustness. Because of increased material costs, need of compactnes for many applications such as electrical vehicles or home appliances and extensive use of variable speed drives, the temperature rise should be investigated in various part of an induction motor.

A thermal model for estimating the steady-state temperature distribution and transient thermal behaviour of a 3-phase induction motor was developed in this study. Critical parameters of the model were determined and their computations were discussed. The accuracy of the model for both steady state and transient cases was proven by comparing the calculated results that obtained from various load conditions with those of the experimental results.

The induction motor's steady state performance was calculated by a design program. It is important to improve the performance and to reduce the cost of the machine from the both manufacturers and custormers point of view. Operating cost is the main part of the total cost. It is achieved by increasing motor efficiency through improving the materials and optimizing the motor design variable. The thermal model integrated with design program was used for induction motor design optimization. A more efficient, more compact motor design with minimum temperature rise was achieved for constant power. Simulated annealing was choosen as optimization method. A simple and efficient simulated annealing algorithm was developed to obtain multi–objective design optimization of the induction motor.

1. GİRİŞ

1.1 Asenkron Motorlar

Kafesli asenkron motorlar, yapılarının basitliği, üretim kolaylığı, düşük üretim ve bakım maliyetleri, yüksek güvenilirlik gibi nedenlerden dolayı elektromekanik enerji dönüşümünde en yaygın olarak kullanılan motor tipidir. Rotor iletkenlerinde akımın endüksiyon yoluyla oluşumu nedeniyle asenkron motorda hareketli kısmın harici bir kaynakla akım alış-verişini düzenleyecek fırça-bilezik mekanizması gibi mekanik donanımlara ihtiyaç duyulmaması, bu motorların düşük üretim ve bakım maliyetleri ile uzun ömrünün temellerinden biridir.

Pratikte bir asenkron motorun ömrü yalıtım malzemesinin ömrüne eşit kabul edilebilir. Makinada meydana gelen bakır kayıpları, demir kayıpları, sürtünme ve havalandırma kayıpları nedeniyle oluşan ısı artışı ve yetersiz soğutma yalıtımın mekanik ve elektriksel özeliklerini bozar. Denklem (1.1) yalıtım ömrünün sıcaklıkla ters orantılı olarak değişimini vermektedir.

$$L_y = L_{yo}\, 2^{-(T2-T1)/\Delta T} \qquad \textbf{(1.1)}$$

Yukarıdaki denklemde L_{y0}, T_1 sıcaklığında L_y ise T_2 sıcaklığında yalıtım ömrüdür. Yalıtımın uzun ömürlü olabilmesi için izin verilen sınır sıcaklık değerleri aşılmamalıdır. Bu değerler üzerindeki her %10'luk sıcaklık artışı yalıtkan ömrünü yarıya düşürecektir.

Çizelge 1.1 de verilen en yüksek ısınımlar 40 ^{0}C ortam sıcaklığı ve deniz seviyesinden 1000 metreye kadar yükseklikler için geçerlidir. Ayrıca A sınıfı yalıtım için 5 ^{0}C, B sınıfı yalıtım için 10 ^{0}C, F ve H sınıfı yalıtım için 15 ^{0}C güvenlik sınırı öngörülmüştür. Buna göre, örneğin F sınıfı yalıtkan için izin verilen en yüksek sıcaklık 155 ^{0}C olarak belirlenir. İzin verilen en yüksek sıcaklık, ortam sıcaklığının 40 – 45 ^{0}C arasında olması durumunda 5 ^{0}C, 45-50 ^{0}C ortam sıcaklığı içinse 10 ^{0}C daha düşük olacaktır.

Çizelge 1.1: Yalıtım sınıfları [1]

Yalıtım sınıfı	En yüksek ısınım (^{0}C)	Malzeme
A	60	Pamuk,kâğıt
F	100	Mika,epoksi
B	80	Mika,epoksi,asfalt,şellak
H	125	Cam yünü, silikon

Küçük güçlü ve/veya alçak gerilimde çalışan makinalarda B, F, H sınıfı yalıtım, büyük güçlü ve/veya yüksek gerilimli makinalarda B sınıfı yalıtım kullanılır. Elektrik motorları plakalarında verilen anma gücünde sürekli olarak çalışmak üzere boyutlandırılmıştır. Ancak asansörler, çamaşır makinaları, vinçler gibi pek çok uygulamada motor kısa süreli olarak yüklenir ve sargı sıcaklıkları izin verilen maksimum değere ulaşamaz. Bu tip bir uygulama için gerekli momenti sağlayabilecek, anma gücü daha düşük bir motor seçilebilir. Aksi takdirde motor izin verilen maksimum sıcaklık değerinden çok daha düşük bir sıcaklıkta çalışmış olur ki, bu, makinada ısınmanın meydana geldiği etkin kısımların ya da soğutucu yüzeylerin gereğinden daha fazla boyutlandırılması, başka bir deyişle malzeme ve enerji veriminin düşük olmasıyla eşanlamlıdır.

1.2 Motivasyon ve Amaç

Türk sanayinde kullanılan asenkron motorlara ve bunların toplam elektrik enerjisi tüketimi içindeki payına ilişkin bir istatistik bulunmamakla beraber, Türkiye'de tüketilen elektrik enerjisinin çeşitli sektörlere dağılımına ilişkin istatistikler ve bu sektörlerdeki elektrik tüketimi içerisinde elektrik motorlarının yerine ilişkin tahminler, asenkron motorların yaygınlığına ilişkin fikir vermektedir. Çizelge 1.2 bazı sanayi kollarında tüketilen elektrik enerjisinin ülkemizde kullanılan toplam elektrik enerjisi içindeki yerini göstermektedir [2]. Çizelge 1.3 ise bu sektörlerde elektrik motorları tarafından kullanılan elektrik enerjisinin miktarına ilişkin tahminleri toplam enerjinin yüzdesi olarak vermektedir [3].

Çizelge 1.2: Türk Sanayinde 1984-1993 yılları arasında tüketilen elektrik enerjisinin sektörel dağılımının aralığı [2].

.	Sanayi Sektörü İçinde (%)
Ağaç İşleri ve Kağıt San	6.04-9.55
Tekstil,Deri,Giyim San.	5.33-18.55
Toprak ve Çimento San.	15.63-17.29
Organize ve Diğer Fab.San	2.69-7.33
Demir Dışı Ürt. Ve İş. San	8.99-12.89
Kimya	12.53-19.63
Demir Çelik Ürt ve İş. San	16.3-22.47
Makina, Elektrikli Aletler ve Ulaşım Araçları Yapımı	3.66-5.576

Not :Yine aynı yıllar arasında sanayi sektöründe tüketilen elektrik enerjisinin toplam elektrik enerjisi tüketimine oranı %53 - %66 arası değişmiştir.

Çizelge 1.3: Türk Sanayinde 1984-1993 aralığında tüketilen elektrik enerjisi içerisinde elektrik motorlarının payına ilişkin tahminler [3].

Ağaç İşleri ve Kağıt San	% 81
Tekstil,Deri,Giyim San.	% 79
Toprak ve Çimento San.	% 92
Kimya	% 63
Metal Üretim ve İşleme	% 82
Organize ve Diğer Fab.San	% 75
Makina,Elektrikli Aletler ve Ulaşım Araçları Yapımı	% 82

Mevcut doğal kaynakların hızla tüketimi ve alternatiflerinin üretilmesinde yaşanan sorunlar, artan enerji maliyetleri, uluslararası pazardaki rekabet koşulları gibi

faktörler göz önüne alındığında bu denli yaygın bir kullanıma sahip motorların üretim ve işletme verimliliği ülke ekonomisi açısından büyük önem taşımaktadır. Öte yandan teknolojinin geldiği noktada otomotiv sanayinden, havacılığa veya beyaz eşya sektörüne kadar her alanda kompakt yapıda elektrik motorlarının kullanımı ihtiyacı artmıştır. Bir elektrik motorunda işletme verimini arttırmak stator sargısında kullanılan bakır, rotor kafesi ve kısadevre halkalarında kullanılan alüminyum veya bakır ile manyetik nüve sacı gibi aktif malzemelerin iyileştirilmesi ve/veya tasarımının optimize edilmesiyle mümkün olacaktır [4]. Makine boyutlarında, hem malzeme ekonomisi, hem de küçük ve hafif motorlara duyulan ihtiyaç sonucu ortaya çıkacak azalma zorunluluğu ise ısınma problemi üzerinde durulmasını gerektirmektedir. Çünkü azalan malzeme hacmi nedeniyle eşdeğer güçte daha büyük hacimdeki bir motora kıyasla ısı artışı daha hızlı olacak, öte yandan ısı aktarım yüzey alanlarının azalması nedeniyle soğuma güçleşecektir. Dolayısıyla asenkron motor tasarımında mümkün olan minimum malzemeyle en yüksek güç/moment /verim/güvenilirlikte bir tasarımın gerçekleştirilebilmesi amaçlanmalıdır.

Makine boyutları, başka bir deyişle kullanılan malzeme miktarı ile güç arasındaki ilişki büyüme yasaları tarafından belirlenir. Buna göre L makine boyutunu ve P gücü temsil etmek üzere, ikisi arasındaki ilişki $P \sim L^4$ biçimindedir [3]. Yani makina gücünün iki katına çıkarılabilmesi için boyutların 1.2 katına çıkması yeterli olacaktır. Bunun üzerinde bir artış "aşırı boyutlandırma "olarak adlandırılır ve gereksiz demir, bakır, yalıtkan vb. harcanması, birim gücün maliyetinin artması anlamına gelir. Ancak burada verilen güç ve boyut değerlerinde makinanın maksimum akı ve akım yoğunluğunda, başka bir deyişle limit değerlerinde çalıştığı kabul edilmektedir. Büyüme kurallarına uygun olarak tasarlanmış bir makine, anma gücün az da olsa üstünde bir güç vermek zorunda kaldığında, akım yoğunluğu limit değerinin üzerine çıkacak ya da milinde aşırı bir yük momenti bulunan motoru mekanik olarak zarar görebilecektir. Bu tür zorlanmalar makine ömrünün beklenenden daha kısa olmasına ve hizmet sürecinin kesintiye uğrayarak enerji veriminin azalmasına yol açacaktır.

Motorun işletme taleplerine uygun olarak seçilmesi durumunda elektriksel, ısıl ve mekanik zorlanmalar istisnai olaylar olarak kabul edilir. Dolayısıyla "olasılık" boyutundaki zorlanmalara karşı tedbir olarak makinanın aşırı boyutlandırılması genel ekonomik eğilimler açısından yanlış olacaktır. Bunun yerine optimum

boyutlandırılmış motorun, ek yöntemlerle olası risklere karşı korunması yoluna gidilir.

Motor koruması temelde bir ısınma problemidir. Motordaki sıcaklık dağılımının bilinmesi, bu nedenle gerek tasarımcı gerek kullanıcı açısından büyük önem taşır. Motorun karmaşık bir geometriye sahip olması, kullanılan malzemelerin farklı ısıl özellikler taşıması, ısı kaynaklarının, yani kayıpların makine içinde dağılmış olması ve motorun hareketli parçalar içermesi nedeniyle sıcaklık ölçümünü sensörler aracılığıyla doğrudan yapmanın maliyeti çok yüksektir. Bunun yanısıra rotora yerleştirilmiş bir sensör yüksek merkezkaç kuvvetlerinin etkisi altında zarar görebilir. Ayrıca ölçü aletlerinin büyük zaman sabitleri sıcaklık değişiminin hızlı olduğu kısadevre, faz kaybı gibi durumlarda sıcaklıktaki değişimi algılamakta geç kalacaktır. Bu nedenle araştırmacılar motorun ısıl davranışını temsil edebilecek modeller üzerinde yoğunlaşmıştır. Doğrudan sıcaklık ölçümünün maliyetini yükselten faktörler, modelleme aşamasında da yüksek bilgisayar donanım maliyetleri ve çözümleme sürecinin çok uzun olması biçiminde kendini gösterir. Isıl analizin, dolayısıyla motor korumasının maliyetinin azaltılabilmesi için, motor davranışını en iyi biçimde temsil edebilen, kullanıcının ihtiyacını karşılamakta yeterli, ancak bunların yanısıra mümkün olduğunca sadeleştirilmiş ısıl modellerin oluşturulması gereklidir.

Literatürde asenkron motorlarda ısı artışını belirlemeye yönelik çok sayıda çalışmaya rastlanmakla beraber, ülkemizde gerek akademik alanda gerek sanayide bu konuya yönelik çalışma eksikliği gözlenmiştir. Elektrik motorlarında ısı artışı konusunda ülkemizde Yüksek Öğretim Kurumu Tez Merkezi verilerine göre [5,6] da verilen iki ve üç fazlı asenkron motor tasarım optimizasyonu konusunda bir adet yüksek lisans çalışması [7] bulunmaktadır. Bu çalışmalardan ilki toplu parametreli modelin teorisini vermekte, hesaplama ve deneysel sonuç içermemektedir. İkinci çalışmada basitleştirilmiş toplu parametreli modeli kullanmaktadır. Öte yandan Bölüm 2 de verilen literatür özetinde de görüleceği üzere asenkron motorun tasarım optimizasyonu işleminde sıcaklık artışı amaç veya sınır fonksiyonu olarak yaygın kabul görmemektedir. Sıcaklık artışının sınırlayıcı olarak ele alındığı çalışmalarda ise büyük oranda stator sargılarında sabit akım ve direnç kabulüyle hesaplanan artış dikkate alınmaktadır.

1.3. Literatür Özeti

1.3.1 Asenkron motorda sıcaklık dağılımının belirlenmesi

Küçük ve orta güçlü kapalı tipte asenkron motorlar yapılarının ve soğutma mekanizmalarının basitliği nedeniyle, basit ısıl modellerle incelenebilirler. Elektrik motorlarında sıcaklık dağılımının belirlenmesi için elektriksel eşdeğer devre kullanma yönteminin tarihi 1950'li yıllara kadar uzansa da, bu çalışmalar 1990'larda ivme kazanmıştır. Mellor *ve diğ.* [8] sürekli hal ve geçici durumda ısı dağılımını belirlemeye yönelik bir modeli incelemiştir. Söz konusu model makinenin boyutları ve kullanılan malzemelerin fiziksel ve ısıl özelliklerine dayanmakta ve modeli oluşturmanın görece karmaşıklığına rağmen, sonuçta elde edilen denklem takımının çözümünün basitliği nedeniyle gerçek zamanlı sıcaklık takibinde kullanılabilmektedir. Bu çalışma, takip eden yıllarda elektrik makinalarının ısıl modellenmesi üzerinde çalışan araştırmacılar için bir referans olmuştur. Bousbaine *ve diğ.,* sürekli çalışma durumuna ilişkin toplu parametreli modelde kullanılacak ısıl katsayıları tekil değer ayrıştırması yöntemiyle belirlemiştir [9]. Shenkman ve Chertkov, toplu parametreli modeli asenkron motorların tek faza kalma durumundaki ısıl zorlanmasını incelemekte kullanmıştır [10]**.** Roy, toplu parametreli modeldeki düğüm sayısının artırılmasıyla, dağılmış parametreli modelleme yaklaşımında olduğu gibi, sadece ortalama eleman sıcaklıklarının değil, en sıcak noktanın da belirlenmesinin mümkün olduğu varsayımıyla oluşturulan hibrid modelle, asenkron motorun sinüzoidal olmayan gerilimle beslenmesi durumunda verebileceği maksimum gücü incelemiştir [11]. Ancak, harmonik akılarının, çekirdekteki demir kayıplarına olan etkisi ihmal edilmiş ve ek kayıplar sabit olarak kabul edilmiştir

Her dört çalışmada da makinedeki demir kayıplarının ayrıştırılması işleminde genel kabul görmüş yaklaşıklıklar kullanılmakta ve harmoniklerin etkisi ayrıca incelenmemektedir. Mueller *ve diğ.,* demir kayıplarını ayrıştırılması ve yüke bağımlılığının gösterilmesi için zaman-adımlı SEA yöntemini kullanmış ve buldukları sonuçları kalorimetrik testle sınamışlardır [12]. Bu çalışmada stator ve rotor oluklarından kaynaklanan yüksek mertebeli harmonikler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sıcaklık-zaman yöntemi" olarak adlandırılan deneysel yöntem ise 1927 yılında Laffon ve Calvert tarafından senkron makinelerin demir kayıplarının belirlenmesi için kullanılmış olup, Bousbaine *ve diğ.* [13] ve Benamrouche *ve diğ.* [14] aynı yöntemi 4kW, 3 faz asenkron motorun demir kayıplarını ve ek kayıpları

ayrıştırmak üzere kullanmıştır. Yöntemin sağlıklı sonuç vermesi motor üzerinde yeteri kadar çok sayıda sıcaklık ölçerin eksensel ve yarıçapsal doğrultuda doğru noktalara yayılmasıyla mümkündür. Bousbaine *ve diğ.* sıcaklık - zaman yöntemini işletme kalkış kondansatörlü 1 fazlı asenkron motorların toplu parametreli ısıl modelinde kullanmıştır [15]. Kostić yüksüz durumdaki ek kayıpların belirlenmesi için sadece boşta çalışma deneyini gerektiren bir yöntem önermiştir [16]. Söz konusu yöntem motorun $I_0 = f(U_0)$ öz eğrisinin doğrusal ve doğrusal olmayan bölgelerinden seçilen iki farklı gerilim değeri için boşta çalışma deneyinin yapılmasını gerektirmektedir. Bu deneylerden elde edilen boşta çalışmada anma demir kaybı ve boşta çalışmada anma ek kayıp değerleri kullanılarak demir kayıplarının boşta çalışma akım ve gerilimine bağlı olarak ifade edilmesi sağlanmış ve sonuç deneysel olarak doğrulanmıştır.

Dabrowski yüksüz durumdaki ek kayıpların ayrıştırılması işleminde, mekanik kayıpların gerilime bağımlılığının ve yüksek dereceli harmonikler tarafında üretilen frenleyici asenkron moment bileşenlerinin (genel olarak ihmal edilen) etkilerini incelemiştir [17].

Okoro, sürekli hal ve geçici durum sonlu elemanlar analiziyle kayıp dağılımını incelemiş ve bu dağılımı kullanarak elde ettiği modelin, deneysel sonuçlarla uyumu önceki çalışmalara göre daha yüksek olmuştur [18]. Mezani *ve diğ.* [19] sürekli hal için, manyetik doyma ve oluk harmoniklerini de içerecek şekilde demir kayıplarını ve makinanın elektriksel eşdeğer devresini çift hava aralıklı SEY ve ısıl davranışını toplu parametre yöntemiyle incelediği, elektromanyetik devre parametreleriyle ısıl devre parametrelerinin birbirlerine bağlı olarak sürekli değişimini içeren manyetik-ısıl bağlantılı bir model oluşturmuştur**.** Boglietti *ve diğ.* [20] kapalı tipte asenkron motorlarda ısı aktarımına ilişkin toplu parametreli modelin oluşturulmasında yaşanan temel problemler ve çözüm yöntemleri üzerinde çalışmış, en önemli ısıl tasarım parametrelerini belirleyerek sıcaklık dağılımının bu parametrelere hassasiyetini göstermiştir. Elektriksel eşdeğer yöntemiyle modellemede bir diğer yaklaşım, ısıl limit eğrilerinden hareketle oluşturulan basitleştirilmiş modellerdir**.** Bu yaklaşımda stator ve rotor ısıl açıdan bağımsız birer devre olarak ele alınmakta, her bir devre birer ısıl kapasite ve frekansla değişen birer ısıl direnç elemanıyla tanımlanmaktadır [21, 22]. Kimi çalışmalarda benzer bir yaklaşımla sadece rotor devresi incelenmiştir [23]. Başka bir yaklaşım stator ve rotorun ısıl açıdan kuplajlı devreler olarak kabul

edilip her iki parça birer ısıl kapasite ve birer dirençle modellenirken, bu iki kısım arasında da ısı aktarımını temsil eden bir direnç kullanılması biçiminde olmuştur [24-26]. Bir diğer çalışma ısıl açıdan bağımsız rotor ve stator devrelerinin her biri için tek bir ısıl kapasite ve frekansla değişen bir ısıl direnç, birim değer cinsinden tanımlanmıştır [27].

Sonlu farklar yöntemi, elektrik makinalarında kayıpların dağılımı ve sıcaklık artışının belirlenmesi için kullanılan bir başka yöntem olmakla beraber, asenkron motorun geometrisi ve sınır koşullarının karmaşıklığı nedeniyle, sonlu elemanlar yöntemi kadar esnek değildir [28].

Isı akışının analizinde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) araştırmacılar tarafından geniş kabul gören bir yöntemdir. Literatürde asenkron motorların anma gerilim ve frekansında beslenmesi durumunda, kalkış sırasındaki ısıl zorlanmasını inceleyen çalışmaların yoğunluğu dikkat çekmektedir. 1990 yılında Garg ve Raymond, kalkış sırasında ivmelenemeyen bir motorun rotor çubuklarındaki sıcaklık artışını, WEMAP (Westinghouse Electric and Magnetic Analysis Program) adını verdikleri manyetik-termik bağlantılı iki boyutlu sonlu elemanlar algoritmasıyla incelemiştir [29]. Bu algoritma hem girdap akımlarının hem sıcaklık dağılımının belirlenebilmesi için aynı ağı kullanmaktadır. Başlangıçta girdap akımları, elektromanyetik sınır koşulları kullanılarak (ve ısıl sınır koşulları ihmal edilerek) bulunup kayıplar hesaplanmakta, sonrasında bu kayıplar ısı kaynağı olarak kullanılarak benzer yaklaşımla sıcaklık dağılımı elde edilmektedir. İteratif algoritmanın her adımında elektriksel iletkenlik sıcaklık artışına bağlı olarak değiştirilmektedir. 1993 yılında yayınlanan bir başka çalışmada ise kalkış sırasındaki elektromanyetik alan iki boyutlu, rotordaki sıcaklık artışı ise üç boyutlu SEY ile incelenmiştir [30]. [31] ve [32]'de manyetik-termik bağlantılı iki boyutlu SEY yaklaşımı kullanılarak derin oluklu rotorlarda geçici duruma ilişkin ısı artışını incelenmiştir. [31] de kalkışta rotorun hareketsiz kaldığı süre içindeki sıcaklık artışı hesaplanmış ve rotor çubukları ile oluk arasındaki yalıtımın sıcaklık dağılımına etkileri araştırılmıştır. Sürekli çalışma durumunda sadece ısıl inceleme gerekirken, geçici durumda akım, kayıplar, kayma ve momentin sıcaklığa bağlı olması nedeniyle manyetik-termik bağlantılı modelleme yaklaşımı kullanılmıştır.

1992 yılında Sarkar *ve diğ.* asenkron motorun statorunda döner alan yönünün değiştirilmesi durumundaki sıcaklık artışını üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle

araştırmıştır [33]. Bu çalışmada, makina silindirik koordinatlarda yay biçimli elemanlara ayrılmış ve çözüm matrisleri oluşturulmuştur. Bu sayede çözüm için gerekli zaman azalmıştır. Sonlu eleman eşitlikleri Galerkin yöntemiyle elde edilmiştir.

Rajagopal *ve diğ.* asenkron makinede geçici durumda asenkron motorun hem stator hem rotorundaki ısı aktarımını, iki boyutlu silindirik koordinatlarda Galerkin ağırlıklı rezidü yöntemiyle formüle etmişler ve değişik gerilimlerde yürütülen kısadevre deneyleriyle, yöntemin geçici olayları inceleme kapasitesini ispat etmişlerdir [28].

Asenkron motorların anma gerilim ve frekansında sürekli çalışma durumuna ilişkin sıcaklık artışının SEY ile belirlenmesine dair örnekler ile toplu parametreli modelleme ve sonlu elemanlar yöntemlerinin kıyaslanmasına ilişkin örnekler literatürde mevcuttur [34, 35].

Gerek sonlu farklar, gerek sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasında, oluk içerisindeki iletken demeti homojen bir ortam olarak ele alınmaktadır. Oluk doluluk faktörüne göre, iletkenlerin oluk içindeki rastlantısal dağılımı ve bu dağılımın ortalama ve maksimum sıcaklık değerlerine etkisi Chauveau *ve diğ.* tarafından araştırılmıştır [36].

1980lerden itibaren, yüksek akım taşıma kapasiteli yarı iletken elemanların varlığı, değişken frekanslı sürücü devrelerinin yaygınlaşmasını sağlamıştır. Bir asenkron motorun değişken frekanslı sürücüyle beslenmesi durumuna ilişkin eşdeğer devresi, kayıpları ve yalıtım sistemleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Eviriciden beslenen bir asenkron motorda sıcaklık artışının incelenmesinde soğutucu hava hızında ve demir kayıplarındaki frekansa bağlı değişiklikler ve harmonikler göz önüne alınmalıdır. Bu tip motorlarda sıcaklık artışı sinüzoidal kaynaktan beslenen motorlara göre daha fazladır ve bu nedenle motorun anma yükünde çalıştırılması mümkün olmayabilir. Sinusoidal olmayan gerilim altında çalışan motorlarda yükleme oranının belirlenebilmesi için motordaki sıcaklık artışı bilinmelidir. Harmoniklerin sıcaklık artışı üzerindeki etkisi toplu parametreli ısıl model [37], basitleştirilmiş deneysel toplu parametre yaklaşımı [38], karma model (toplu parametreli modelde düğüm sayısının arttırılması ile dağılmış parametreleri temsil etme) [12] , ve SEY [39] ile incelenmiştir. 2000 yılında, Sınıf 1, Tip 2 olarak sınıflandırılmış, patlama riski taşıyan bölgelerde kullanılacak evirici beslemeli kapalı tipte asenkron motorlarda [40], 2004 yılında ise genel olarak kapalı tipte asenkron motorlarda [41] değişken

soğutucu hava hızı, frekansa bağlı demir kayıpları ve harmonik akımlarının yol açtığı ilave bakır kayıplarının sıcaklık artışı üzerindeki etkisi, sabit ve zayıflatılmış akı bölgeleri için incelenmiş ve karkas-çevre arasında ısı aktarımına ilişkin katsayıyı deneysel yolla belirlenmiştir.

1.3.2 Optimizasyon

1960'lere kadar asenkron motorların tasarım optimizasyonu "deneme-yanılma" yaklaşımına dayanmaktaydı. Tasarımcı, müşterinin veya standartların taleplerini karşılayan bir tasarımı elde etmek için, çok sayıda modeli test edip en uygununu seçmek durumundaydı. Yüksek hızlı bilgisayarlarların kullanılmaya başlanması bu süreci daha verimli ve güvenilir hale getiren bir adım olmuştur [42].

Optimizasyonun matematiksel bir bakış açısından ele alındığı çalışmaların ilk örneklerinden biri, 1965 de Appelbaum ve Erlicki tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada asenkron motorun maliyet fonksiyonu, araştırmacıların geliştirdiği bir sınır araştırma algoritması yardımıyla minimize edilmekteydi [43].

1971 yılında Ramaratham ve Desai tarafından yapılan çalışmada [43], maliyet ve sınırlama fonksiyonlarının yapısı gereği, optimizasyon problemi bir "Doğrusal Olmayan Programlama (DOP)" problemi olarak ele alınmakta ve maliyet fonksiyonu /sıcaklık güç faktörü, kalkış moment ve akımı), anma yükünde güç katsayısı, sıcaklık artışı ve anma kayması sınırlamalarına göre, bir ceza fonksiyonu" yöntemi olan "Ardışıl Serbest Minimizasyon Tekniği (ASMT)" kullanılarak minimize edilmekteydi.Yöntemin yakınsama özelliğinin zayıf oluşu, 1972 yılında yine aynı yazarlar ve Rao tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada vurgulanmıştır [44]. Bu ikinci çalışmada ASMT ile birlikte kullanılabilecek çeşitli minimizasyon yöntemlerinin (dolaylı yöntemler ile doğrudan ve rastlantısal araştırma teknikleri) kıyaslanması da yapılmış ve doğrudan araştırma yönteminin dönen elektrik makinalarının optimizasyonu için en uygun yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Sing *ve diğ.*, ASMT ile birlikte "Döner Koordinatlar için Rosenbrock Yöntemi" olarak adlandırılan doğrudan araştırma yöntemini kullanarak asenkron motor için tanımladıkları altı farklı amaç fonksiyonu minimize ettiler [45]. Bu fonksiyonlar; aktif malzeme maliyeti, yıllık enerji tüketimi maliyeti, bu iki bileşenin toplamı olan genel maliyet, anma güç katsayısı, yıllık KVAH maliyeti, karma maliyet (yıllık enerji tüketim bedeli + malzeme bedeli) olarak tanımlanmakta ve sonuç olarak hem

üretici, hem kullanıcı, hem de elektrik enerjisinin sağlandığı kaynak açısından en uygun yaklaşımın karma maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi olduğu vurgulanmaktaydı. Aynı yöntem Murthy *ve diğ.* tarafından, sulama pompası tahrikinde kullanılan bir motorun güç katsayısı ve verimini, performans sınırlamalarına uygun olarak iyileştirmek üzere kullanıldı [46].

Appelbaum, Fusch ve Fellow [47, 48] tasarım maliyeti ve verimi aynı anda optimize etmek üzere değiştirilmiş sınır-araştırma tekniğini (SAT) kullandılar. Yöntem, başlangıç için "makul" bir bölge (veya tasarım) seçmeyi ve amaç fonksiyonu genelleştirilmiş pozitif polinom formunda yazmayı gerektirmekteydi. Bu çalışmayı öncekilerden ayıran temel farklardan ikisi, ikincil (sabit) parametrelerin bazılarının (örneğin oluk doldurma faktörü, doyma faktörü gibi) 'değişken sabitler' olarak adlandırıp, tasarım parametrelerine bağlı olarak optimizasyon işlemi boyunca değiştirilmesi ve ayrık parametrelerin (stator sargısındaki paralel kol sayısı gibi) de optimizasyon işlemine dahil edilmesiydi [49].

Huang, Fusch ve Zak [50] işletme kondansatörlü 1 fazlı asenkron motorların tasarım optimizasyonu için SAT ve Han-Powell yöntemini kıyasladıkları çalışmalarında, performans ve maliyet sınırlamaları altında optimum motor verimini araştırdı. SAT yönteminin ayrık parametreleri işleyebilme avantajının yanında, Han-Powell metodu global minimuma yakınsama, herhangi bir dönüşüm gerekmeksizin hem eşitlik hem eşitsizlik formundaki sınırlama fonksiyonlarını işleyebilme ve de diğer quasi-Newton yöntemler gibi yalnızca birinci dereceden türev ifadelerini içerme avantajlarını taşımaktaydı. Bu iki yöntemin avantajlarını birleştiren karma bir metot, verim, güç katsayısı, maliyet, demir ve bakır malzeme hacmi ile işletme kondansatörünün sığa değeri arasındaki ilişkiyi analiz etmek üzere kullanıldı.

Singh ve Sarkar asenkron motorlarda optimizasyon problemini Ardışıl İkinci Dereceden Programlama (AİDP) yöntemiyle çözdüler. Kullandıkları yöntem Han-Powell yönteminin Schittkowski tarafından modifiye edilmiş biçimiydi [51].

Cannistra *ve diğ.* pompa motorlarının optimizasyonunu Lagranj çarpanları yöntemiyle incelediler [52]. Amaç fonksiyonu olarak motorun satın alma ve işletme maliyetlerinin toplamından oluşan yıllık maliyet, sınırlama koşulları olarak ise çıkış gücü, toplam nüve ve sargı kayıpları, mil çapı ve çift kafesli rotorun oluk alanlarının oranı seçildi. Maliyete ilişkin Lagrange fonksiyonu "Nelder-Nead Simplex" algoritması yardımıyla minimize edildi. Çalışmada aynı zamanda elde edilen

optimum tasarımda sıcaklık artışı [34] de verilen yöntemle belirlenmekteydi. Rao ve Ramamoorty, eviriciden beslenen asenkron motorlar için malzeme maliyeti fonksiyonunu, ortalama moment, moment darbesi, verim, güç faktörü, kalkış momentinin anma momentine oranı, devrilme momenti ve anma yükünde stator sargı sıcaklığı sınırlamaları altında, Powell Ardışıl Serbest Minimizasyon Yöntemi ve Zangwill Harici Ceza Fonksiyonu Yöntemini kullanarak minimize etmiştir [53]. Asenkron motorların tasarımında kullanılan diğer bazı lokal optimizasyon yöntemleri [54-58] 'de verilmiştir

Her ne kadar, [50] ve [51] de Han-Powell yöntemi ile global minimumun hesaplandığı belirtilse de Appelbaum, söz konusu yöntem de dahil olmak üzere tüm lineer olmayan optimizasyon yöntemlerinin ancak lokal minimumu belirleyebilme kapasitesinde olduğunu vurgulamaktadır [59]. Global optimizasyonun amacı, belli bir çözüm seti içinde, amaç fonksiyonun en küçük değerini aldığı çözümü bulmaktır. Lokal optimizasyon yöntemleri, başlangıç değerlerine bağlı olarak farklı optimum noktalara yakınsayabilirler. Kullanılan değişken sayısının yüksekliği nedeniyle, olası tüm durumların elde edilip aralarından en iyisinin seçilmesi gibi bir yaklaşım pratik ve/ veya kabul edilebilir değildir.

Idir *ve diğ.* herhangi bir anda amaç fonksiyonun gerçek değeri ve önceden belirlenebilen bir limit değeri arasındaki farkı veren hata fonksiyonu *e(t)*'ye dayalı bir global optimizasyon algoritması önerdiler [60]. Bu yöntemde her bir tasarım değişkeninin "izleyeceği" yön, *e(t)* tarafından belirlenmekte, hatanın büyüklüğüne ve işaretine göre adım büyüklüğü ve yönü ayarlanmaktadır. Çalışmada bir lokal optimizasyon yöntemi olan Hooke-Jeeves ile önerilen algoritma, asenkron motorda yol alma akımı ve kalkış momenti sınırlamaları altında, stator diş optimizasyonu için kıyaslanmış, global algoritmanın üstünlüğü vurgulanmıştır.

Onuki *ve diğ.*, [61] asenkron motorda radyal soğutma kanallarının optimizasyonu için "yapay ısıl işlem (YI)" adı verilen global optimizasyon yöntemini kullandı. Amaç fonksiyonu olarak kanalların toplam alanı, sınırlama olarak da hava aralığı akısının değerinin sabit tutulması alındı. Isıl tavlama sırasında ısıtma ve yavaş soğutma işlemlerinin atomları başlangıçtaki minimum enerji seviyelerinden koparıp daha düşük bir enerji seviyesine yerleştirme işlemini taklit eden bu yöntemin başarısı "soğutma" işleminin yavaş yapılmasına bağlı olduğu için, hesaplama zamanının yüksek olması bu yöntemin temel dezavantajını oluşturmaktaydı.

Liuzzi *ve diğ.* [62] asenkron motorlarda çok amaçlı optimizasyon için "Kontrollü Rastlantısal Araştırma (KRA) Algoritması" kullandı. Amaç fonksiyonu; verim, güç faktörü, kalkış akımı ve üretim maliyeti hedef fonksiyonlarını içeren birleştirilmiş bir fonksiyon ve sınırlamalar da stator ve rotor sıcaklığı, stator ve rotor dişlerindeki akı yoğunluğu, kalkış momenti ile anma kaymasıydı. Bunun yanı sıra bahsedilen tekil amaç fonksiyonları, işlemin farklı adımları sırasında sınırlama olarak işlev görmekteydi. Çalışmanın sonucunda bu yöntemle elde edilen sonuçların, her bir fonksiyonun diğer üçü için birer sınır değer verilerek tekil olarak optimize edilmesi durumunda elde edilen sonuçlara göre daha üstün olduğu gösterilmiştir. Asenkron motor tasarımında kullanılan bir diğer global optimizasyon yöntemi Genetik Algoritmadır (GA). Bu algoritma, tasarım parametrelerini ikili tabanda yazılmış sayılara çevirir ve parametrelerin rastlantısal bileşiminden oluşan M adet farklı gen üretir. Bu genlerden en iyi olanların eşleşmesi ve çoğalmasına izin verilir. Belli bir gen için iyilik ölçütü, optimizasyon probleminin hedef fonksiyonunun o gen için aldığı değer tarafından belirlenmektedir. Dolayısıyla GA, hedef fonksiyonun türevleriyle ilgilenmez. İşlem çok sayıda rastlantısal noktadan başlayıp, her bir nokta için diğerlerinden bağımsız olarak yürütüldüğü için, uygun bir başlangıç tasarımı oluşturma gerekliliği yoktur [63]. Yüksek sayıda ve ayrık yapıda parametreler içeren optimizasyon problemleri için uygun bir yöntemdir [64]. [65] genetik algoritma ve elektrik makinaları uygulamalarına ilişkin literatürü incelemektedir. [66]'da tek fazlı asenkron motorların tasarım optimizasyonu için GA, Yapay Isıl İşlem ve Yapay Sinir Ağları temelli yöntemlerin kıyaslaması yapılmıştır. Araştırmacılar karmaşık çok değişkenli radyal temelli geri-beslemeli yapay sinir ağları yöntemiyle gerek amaç fonksiyonunun (verim) değeri, gerekse işlem zamanı açısından, diğer iki yönteme kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Aynı yazarlar [67]'de üç fazlı asenkron motorda çok amaçlı optimizasyon problemini "Yapay Isıl İşlem" algoritmasıyla incelemiştir. Bu çalışmada verim, kalkış momentinin anma momentine oranı ve sıcaklık artışı hedef fonksiyonu olarak seçilmiş ve birbirinden bağımsız olarak, aynı tasarım parametreleriyle optimize edilmiştir. Verimin amaç olarak seçilmesi durumunda, ana boyutlar standart bir tasarımda elde edilenlere göre önemli derecede azalırken, düşük kayma ve yüksek güç faktörü elde edilmiş, sıcaklık belirlenen limitler dahilinde kalmıştır. Sıcaklığın veya moment oranının amaç olarak seçilmesi durumunda diğer amaç fonksiyonları,

güç katsayısı ve kayma gibi büyüklüklerden en az biri için daha olumsuz sonuçlar alınmış, dolayısıyla verime göre optimizasyonun en uygun yaklaşım olduğu sonucuna varılmıştır.

[68,69]'da Genetik Algoritma elektrikli otomobillerde kullanılacak bir üç fazlı asenkron motorun çok amaçlı (anma gücünde verim, maksimum güçte verim, malzeme maliyeti, güç faktörü ve sıcaklık) optimizasyonu için kullanılmıştır.

Yapay sinir ağlarından (YSA) elektromanyetik sistemlerin optimizasyonunda matematiksel yöntemleri destekleyici bir araç olarak yararlanılmaktadır. Ratnajeevan, Hole ve Haldar YSA yöntemini, optimum tasarıma en yakın uygun başlangıç tasarımını belirlemek için kullandılar [70]. Bu çalışmada ağ için eğitim verileri, optimize edilecek devrenin SEY ile analizi sonucu elde edilmekteydi. Öte yandan Idir *ve diğ.* —bu yaklaşımı da desteklemekle beraber- tersi bir yaklaşımla, motor tasarım parametreleri ile motor performansı arasındaki ilişkiyi öğrenmek üzere eğitilmiş geri-beslemeli adaptif Hopfield ağını, sonlu elemanlar veya diğer bir yöntemle elde edilmiş optimum sonucu iyileştirmek için kullandılar [4].

Asenkron motor tasarım optimizasyonunda, sıcaklığın amaç fonksiyonu olarak incelendiği yayınların sayısı azdır ve bu yayınlarda kullanılan ısıl modeller oldukça basitleştirilmiştir. Yapay ısıl işlem algoritmasının üç fazlı asenkron motorun sıcaklık dağılımını iyileştirmeye yönelik tasarım optimizasyonuna uygulanmasına dair literatürde bir örneğe rastlanmıştır [66]. Bu yayında kullanılan yöntem de tek- amaçlı yapay ısıl işlem benzeşimidir. Çalışma, motorun sıcaklık dağılımının ayrıntılı bir hesabın içermemekte, sadece stator sargı sıcaklığının yaklaşık hesabına dayanmaktadır.

Bu çalışmada ise, asenkron motorda ısı artışının belirlenebilmesi için bir model oluşturmak ve bu modeli motorun tasarım sürecine entegre etmek amaçlanmıştır. Bu sayede literatüre katkıda bulunmanın yanı sıra endüstriyel çalışmalarda kullanılabilecek bir yaklaşım önerilecektir. Literatürde toplu parametreli ısıl devre parametreleri ve katsayıların hesabı üzerinde tartışmalar sürmektedir. Bu tartışmaya katkıda bulunmak çalışmanın amaçlarından biridir.

Konuya ilişkin daha önce yapılmış çalışmalarda, farklı düğüm sayısına sahip modeller önerilmiş, parametrelerin oluşturulması ve devrenin çözümüne ilişkin farklı yöntemler oluşturulmuştur. Bu modellerden bazıları çok basittir ve motorun ısıl

davranışını temsil etmekte zayıf kalmaktadır. Kimi modeller ise karmaşıklığı nedeniyle, işlem yükünü arttırmakta ve devrenin çözümü güçleşmektedir. Burada önerilen model, motorun ısıl davranışını temsil edecek kadar ayrıntılı olmakla beraber çözümü basittir ve kendisini oluşturan parametrelerinin önemli bir bölümünün değişimine karşı hassasiyeti düşüktür. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak tüm parametrelerin hesabı ayrıntılı olarak verilmiştir.

Bu model tasarım optimizasyonu sürecinde kullanılarak, asenkron motorun çok-amaçlı optimizasyonu için etkin bir Yapay Isıl İşlem Algoritması yazılmıştır. Yazılan kod basit ve verimli olup, çoklu amaç ve kısıtlama fonksiyonlarını karmaşık ara işlemlere gerek kalmadan aynı anda işleyebilmektedir.

1.4 Bölümler

Bölüm 2. asenkron motorlarda ısı dağılımının incelenmesine zemin oluşturmak üzere ısı aktarım olaylarına ilişkin temel kavramlara ayrılmıştır. Bu temel kavramlardan hareketle Bölüm 3. de asenkron motorlardaki ısı aktarımı incelenmiş, ısı kaynakları, ısı aktarım yolları ve sıcaklık dağılımının belirlenmesinde kullanılan yöntemler açıklanmış ve asenkron motorda sıcaklık artışı ve dağılımını belirlemek üzere toplu parametreli modeli oluşturulmasına ilişkin ayrıntılar verilmiştir.

Bölüm 4. asenkron motor tasarım optimizasyonuna ayrılmıştır. Asenkron motor optimizasyonunda kullanılan başlıca yöntemler açıklanmış ve bu çalışmada kullanılan Yapay Isıl İşlem algoritmasının ayrıntıları ve elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur. Deneysel çalışma ve hesap yoluyla elde edilen sıcaklık dağılımı değerleri Bölüm 5. de verilmiş ve kıyaslamaları yapılmıştır. 6. Bölüm sonuçlara ayrılmıştır.

2. ISI AKTARIMI

2.1 Isı Aktarımında Genel Yasalar

Isı aktarımı, farklı ısıl enerji seviyeleri arasındaki enerji aktarımını inceler. Bir ortamın ısıl enerjisi, mikro düzeyde moleküllerin kinetik enerjisine bağlıdır ve ortamın sıcaklığıyla temsil edilir. Farklı sıcaklıkta ortamlar arasındaki ısı akışı cisimlerin ısıl iletkenliği, yoğunlukları, ısıl kapasiteleri, akışkanların hızı ve viskozitesi gibi birçok farklı parametre tarafından düzenlense de, bütün ısı aktarımı olayları uygulamadan bağımsız dört temel yasaya bağlıdır.

1. Kütlenin korunumu yasası
2. Termodinamiğin 1. yasası
3. Termodinamiğin 2. yasası
4. Newton'un 2. hareket yasası

Kütlenin korunumu yasası bir sistem içerisindeki kütlenin zamanla değişmezliğini belirtir.

$$\frac{dm}{dt} = 0 \qquad \textbf{(2.1)}$$

Denklem (2.2) ile verilen termodinamiğin 1. yasası, enerjinin korunumu yasasıdır. Bir sisteme verilen enerji ile sistemin yaptığı iş arasındaki farkın sistemin iç enerjisini değiştirdiğini ifade eder. Başka bir deyişle, "enerji üretimi"nden bahsetmek, gerçekte bir formdan başka bir forma dönüşen enerjiden bahsetmektir.

$$\partial E = \partial Q - \partial W \qquad \textbf{(2.2)}$$

Termodinamiğin 2. yasası ise bu dönüşümün yönünü belirlemektedir. Bu yasa farklı enerji formlarının birbirine dönüşmesindeki dengesizliğe ilişkin gözlemlere dayanmaktadır. Örneğin elektrik enerjisinin (elektriğe karşı direnç gösteren herhangi bir ortamda) ısı enerjisine tamamen dönüşmesi mümkünken, bunun tersi kendiliğinden gerçekleşmez. Isı enerjisinin sıcak bir ortamdan soğuk ortama

kendiliğinden geçişi veya havanın vakum ortamına kendinden yayılışı, ancak bu süreçlerin tersinin sadece dışarıdan enerji verilerek, (bir ısı pompası veya vakumlayıcı kullanılarak) gerçekleştirilebilmesi enerji formlarının dönüşümleri arasındaki dengesizliğin tipik örneklerindendir. Her durumda enerji korunmuş, ancak tamamen veya kısmen kullanılamaz bir forma dönüşmüştür. Dolayısıyla yukarıdaki örneklerde enerji dönüşümü sistemin daha düşük bir enerji seviyesine gelmesini sağlayacak yönde olmuştur. Entropi yalıtılmış bir sistemdeki kullanılamayan enerjinin ölçütüdür. Kapalı bir istemde δt aralığında sistemdeki ısı enerjisi artışı δQ, sistemin o andaki sıcaklığıyla entropisinin çarpımından küçük veya ona eşittir.

$$\partial H \geq \frac{\partial Q}{T} \tag{2.3}$$

İstatistiksel olarak termodinamiğin ikinci yasası yalıtılmış bir sistemin belli bir durumda olma olasılığıyla alakalıdır. Bir durumun olasılığı ne kadar yüksekse, o durumun entropisi de o kadar yüksek olacaktır.

Newton'un 2. yasasına göre sisteme etki eden kuvvetlerin bileşkesinin sistemin momentumundaki değişime eşittir.

$$\sum \vec{F} = \frac{d(m \times \vec{v})}{dt} \tag{2.4}$$

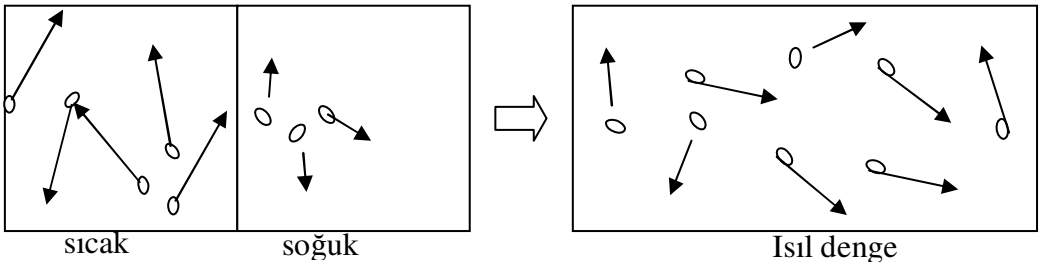
Isı aktarımı analizlerinin çoğu için genel yasalardan ikisi olan termodinamiğin 1. ve 2. yasaları yeterli olacaktır. Termodinamik ısıl dengede olan sistemler ve sistemlerin bu dengeye ulaşmak için ihtiyaç duyduğu enerji miktarıyla ilgilenir. Sistemlerin ısıl dengeye ulaşması için gerekli olan ısı aktarımının hangi mekanizmalarla gerçekleştiği ise ısı aktarımı biliminin ilgi alanına girer.

2.2 Isı Aktarımında Özel Yasalar

Uygulamadan bağımsız olduğu belirtilen dört genel yasanın yanı sıra, ortam ve yüzey özelliklerine bağlı olmak üzere farklı ısı aktarım mekanizmaları için geçerli üç özel yasa vardır.

2.2.1 Isı iletiminde Fourier yasası:

Isı aktarımında üç temel mekanizmasından ilki, bu çalışmada "iletim" olarak adlandırılacak olan, ısının birbirine dokunmakta olan farklı sıcaklıktaki ortamlar (katı, sıvı veya gaz) arasında moleküler hareket veya serbest elektronların hareketi yoluyla iletilmesidir.



Şekil 2.1: Isı iletiminde Fourier Yasası.

Isı iletiminin temel yasası olan ve Fourier yasası olarak adlandırılan kural, belli bir bölgede her noktada belirli bir doğrultudaki ısı geçiş hızının o noktadaki sıcaklık gradyanı ile doğru orantılı olduğunu belirtir ve orantı katsayısını tanımlar. Bu kuralın bir boyutlu akış için matematiksel ifadesi Denklem (2.5) de verilmiştir. Orantı katsayısı k ısıl iletkenlik ve T sıcaklıktır.

$$\dot{\vec{q}}_x = -k\frac{\partial T}{\partial x} \qquad \textbf{(2.5)}$$

k (W/m^0C), ile gösterilen ısıl iletkenlik, birim sıcaklık farkı için, birim uzunlukta birim kesitten ısının aktarılma hızıdır. Maddenin kimyasal bileşimine, fiziksel yapısına, haline, sıcaklığa ve daha az oranda basınca bağlı olmak üzere, maddenin bir özelliği olup daima pozitiftir. Dolayısıyla Denklem (2.5) deki - işareti termodinamiğin ikinci yasasından kaynaklanır ve ısı akışının akış yönündeki sıcaklık gradyanına ters yönde olduğunu belirtir.

Metalik katı maddelerde ısı iletimi serbest elektron yayınımı ile gerçekleştiği için, elektriksel açıdan iyi iletken olan malzemeler aynı zamanda iyi ısı iletkenleridir. Amorf veya gözenekli yapıya sahip katı maddelerde ısı iletimi atomsal titreşime dayalıdır ve ısı iletim katsayıları kristal malzemelerden düşüktür. Sıvılarda moleküler titreşime dayanan ısı iletiminde, moleküller arası mesafenin daha büyük olması nedeniyle ısı iletim katsayıları katılara göre daha düşük, gazlara göre ise daha

yüksektir. Gazlar genel olarak ısı aktarımının sadece iletimle gerçekleştiği durumlar için iyi yalıtkanlardır. Artan sıcaklıkla birlikte iletkenlik özellikleri iyileşir.

Bir ortamda ısı iletim katsayısı tüm yönlerde aynı ise sistem izotropik bir sistemdir ve Fourier yasası Denklem (2.6) daki gibi yazılır.

$$\vec{\dot{q}} = -k\Delta T \qquad \textbf{(2.6)}$$

Anizotropik sistemler için kartezyen koordinatlarda Fourier Yasası Denklem (2.7) ile verilmiştir.

$$\vec{\dot{q}} = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} - k_y \frac{\partial T}{\partial y} - k_z \frac{\partial T}{\partial z} \qquad \textbf{(2.7)}$$

Isı iletimi ile ilgili diğer bir önemli ifade Denklem (2.8) de verilmiştir.

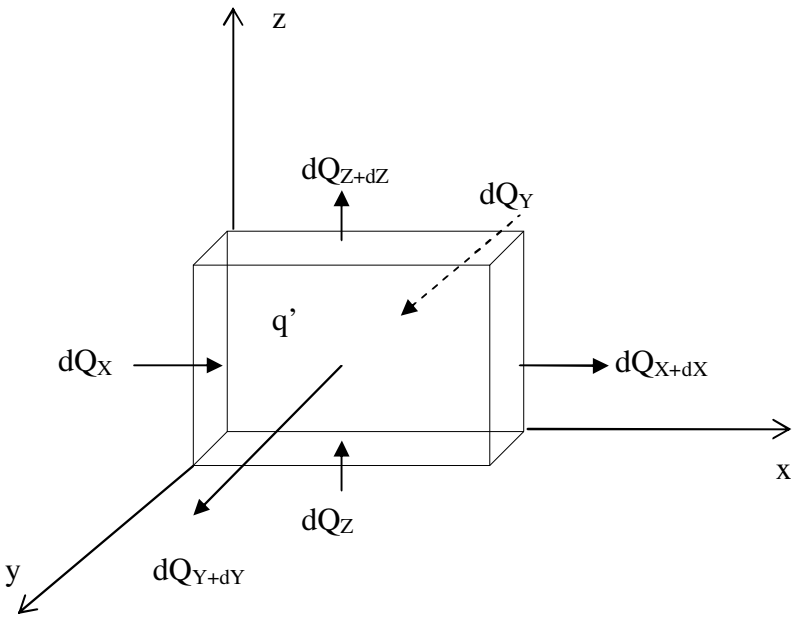
$$\frac{\Delta \dot{Q}}{A} = \dot{q} \qquad \textbf{(2.8)}$$

Yukarıdaki ifade, ısı akısının diverjansının bir bölge içinde üretilen ısıya eşit olduğunu belirtmektedir.

Kapalı bir sistemde enerjinin toplamındaki değişim, sistemi terk eden ve sistemde depo edilen enerjilerin değişiminin toplamına eşit olmalıdır. Şekil 2.2. kartezyen koordinatlarda kapalı bir kontrol hacmini göstermektedir. Bu sistem için Denklem (2.7) ve (2.8) kullanılarak ısı iletiminin genel ifadesi elde edilir.
Burada sisteme x yönünde, dy.dz düzleminden dt zamanda aktarılan ısı enerjisi Fourier yasasına göre

$$dQ_X = k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} dt \qquad \textbf{(2.9)}$$

denklemi ile hesaplanır. Sistemden x yönünde ayrılan ısı enerjisi ise, Taylor serisinde yüksek dereceli terimler ihmal edilmek suretiyle Denklem (2.10) ile hesaplanır.



Şekil 2.2: Kartezyen koordinatlarda üç boyutlu ısı iletimi.

$$dQ_{X+dX} = dQ_X + \frac{d(dQ_{X+dX})}{dx} \qquad \textbf{(2.10)}$$

Dolayısıyla x yönünde sisteme aktarılan net ısı enerjisi

$$dQ_X - dQ_{X+dX} = kdydz\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}dxdt \qquad \textbf{(2.11)}$$

olarak elde edilir. Benzer şekilde y ve z doğrultularında sisteme aktarılan net enerjiler aşağıda verilmiştir.

$$dQ_Y - dQ_{Y+dY} = kdzdz\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}dydt$$

(2.12)

$$dQ_Z - dQ_{Z+dZ} = kdydx\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}dzdt$$

Birim hacimde birim zamanda üretilen ısı $\dot{q}$ ise sistemde birim zamanda üretilen toplam ısı enerjisi miktarı

$$\dot{Q} = \dot{q}\,dxdydz \qquad \textbf{(2.13)}$$

olarak hesaplanır.

Birim sıcaklık için sistemde depo edilen enerji malzemenin yoğunluğu ve öz ısısının fonksiyonudur.

$$\frac{dU}{dt} = \rho c dx dy dz \ \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2.14}$$

(2.8) in enerji ifadesinde yerine yazılıp gerekli sadeleştirmelerin yapılmasıyla kartezyen koordinatlarda üç boyutlu ısı aktarımının genel ifadesi elde edilir.

$$(\frac{\partial^2 T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial y} + \frac{\partial^2 T}{\partial z}) + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2.15}$$

Eşitliğin sol tarafındaki ilk terim sıcaklığın gradyanına eşittir.Denklem buna göre yeniden düzenlenirse

$$\nabla^2 \mathrm{T} + \frac{\dot{\mathrm{q}}}{\mathrm{k}} = \frac{1}{\mathrm{a}} \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}} \tag{2.16}$$

ifadesi elde edilir. Burada $a = \frac{k}{\rho c}$ yazılmıştır. L^2/T boyutundaki a sayısı ''Isı Yayılma Katsayısı" olarak adlandırılır.

Bu denklemde yer alan ρc ifadesi birim hacim için "ısıl kapasite" olarak tanımlanır. ρ (kg/m^3) cismin yoğunluğu, c(J/kg ^{0}C) cismin özısısı olmak üzere ısıl kapasitenin birimi (J/^{0}C) olarak verilir ve bir cismin sıcaklığını 1 ^{0}C arttırmak için cisme verilmesi gereken toplam ısı enerjisini gösterir. Buna göre V (m^3) hacim olmak üzere ısıl kapasitenin genel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$C = \rho c V \tag{2.17}$$

Sürekli rejimde Denklem (2.16), Denklem (2.18) e dönüşür ve bu denklem Poison Denklemi olarak adlandırılır.

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \tag{2.18}$$

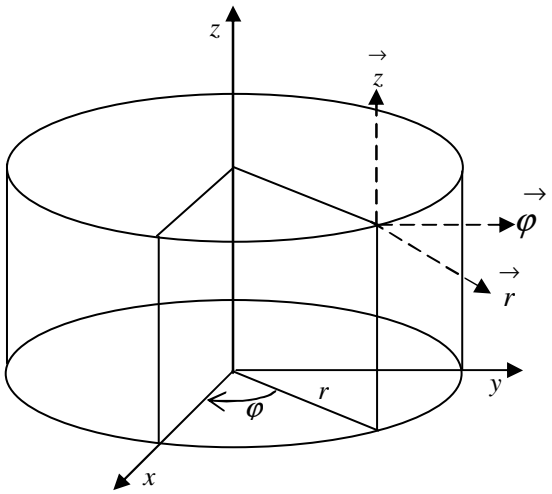
İçinde ısı üretimi olmayan sistemler için ise ısı iletiminin genel denklemi Denklem (2.19) ile verilen Fourier Denklemine dönüşür.

$$\nabla^2 \mathrm{T} = \frac{1}{\mathrm{a}} \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}} \tag{2.19}$$

Sürekli rejimde ısı üretimi olmayan sistemler için ısı iletiminin denklemi en basit halini alır ve Laplace Denklemi olarak adlandırılır.

$$\nabla^2 T = 0 \qquad \textbf{(2.20)}$$

Silindirik koordinatlarda üç boyutlu ısı iletiminin denklemi de benzer şekilde ifade elde edilebilir. Şekil 2.2. silindirik koordinatlarda verilen bir kontrol hacmini göstermekte ve Denklem (2.21) bu hacme ilişkin ısı iletim denklemini vermektedir.



Şekil 2.3: Silindirik koordinatlarda üç boyutlu kontrol hacmi.

$$\frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z} \right) + \frac{\dot{q}}{k} \qquad \textbf{(2.21)}$$

2.2.2 Isı taşınımı için Newton'un soğuma yasası

Isı geçişinin bu çalışmada "taşınım" olarak adlandırılan ikinci mekanizması, gaz veya sıvı akışkanlarda moleküllerin makroskobik boyutta hareketi ile ısının aktarılmasıdır. Taşınım için hareket halinde (yer değiştiren) bir akışkan ortam gereklidir.

Şekil 2.4 farklı sıcaklıktaki bir akışkanla temas halinde olan katı yüzeyi göstermektedir. Bu yüzey üzerinde katı ve sıvının temas halinde olduğu bölgede akışkan yüzeye yapışmıştır ve hareketsizdir. Dolayısıyla bu bölgede ısı aktarımı iletim mekanizmasıyla gerçekleşir. Yüzeyden uzaklaştıkça akışkan partiküllerinin hızı artar ve y doğrultusunda belli bir mesafeden sonra serbest akışın hızına erişir. Hızın serbest akış hızının %99'una ulaştığı mesafe sınır tabaka kalınlığı olarak adlandırılır ve bu tabakanın kalınlığı x ekseni boyunca artmaktadır. Sınır tabakası

içerisinde akışkan sürtünmesi belirleyicidir ve bu bölgenin dışında akışkan sürtünmesiz kabul edilebilir. Dinamik viskozite akışkan sürtünmesi için bir ölçüt olup, akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak tanımlanır. Sınır tabakası içerisinde belirli bir y yüksekliği için akışkanın birim

yüzeyine akış yönünde etki eden kuvvet olan kayma gerilmesi, μ (kg/ms) akışkan dinamik viskozitesi olmak üzere Denklem (2.22) ile verilir.

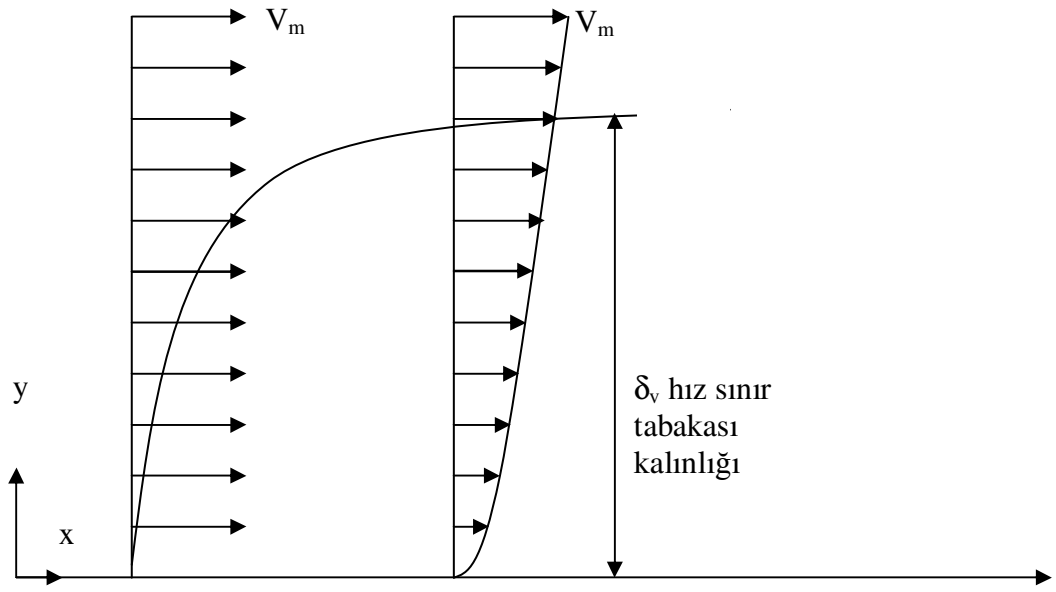
$$\tau_{xy} = \mu \frac{dV_x}{dy} \qquad \textbf{(2.22)}$$

Bu denklem Newton'un viskozite yasası olarak bilinir.

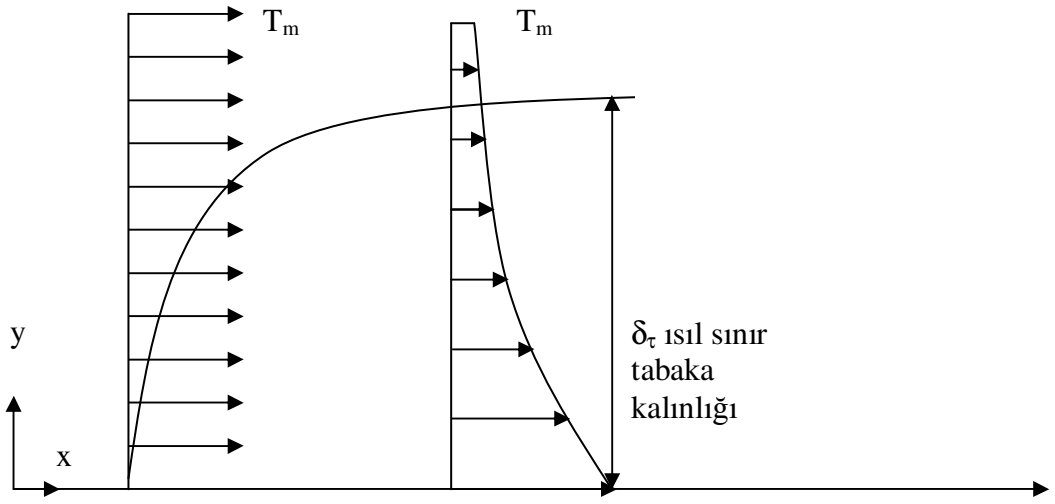
Dinamik viskozitenin yoğunluğa bölünmesiyle momentum difüzyon katsayısı olarak da adlandırılan kinematik viskozite ν (m^2/s) elde edilir.

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \qquad \textbf{(2.23)}$$

Yukarıda bahsedilen sınır tabaka, hız sınır tabakası olarak adlandırılır. Benzer şekilde yüzeyle temas halindeki akışkan partiküllerinin sıcaklıkları levha sıcaklığına eşitken, yüzeyden uzaklaştıkça- belli bir noktada akışkan sıcaklığına eşit olmak üzere- giderek azalmasıyla sıcaklık sınır tabakası meydana gelir.



Şekil 2.4: Hız sınır tabakası [71].



Şekil 2.5: Isıl sınır tabaka [71].

Sınır tabaka kalınlıklarının oranlanmasıyla Prandtl boyutsuz sayısı bulunur. Prandtl sayısının küçük olması ısının momentumdan, başka bir deyişle hızdan daha çabuk yayıldığı anlamına gelmektedir. Gazlar için bu sayı 0.7–1 arasında değer alır.

$$\mathrm{Pr} = \frac{\upsilon}{a} \qquad \textbf{(2.24)}$$

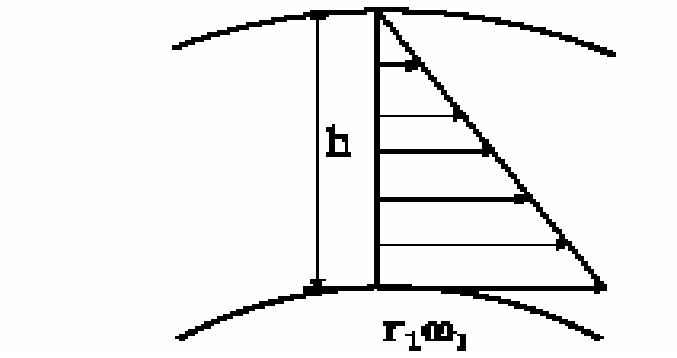
Taşınım doğal (serbest) veya zorlanmış taşınım olmak üzere iki grupta incelenir. Doğal taşınımda akışkan yalnızca kütlesel kuvvetlerin etkisi altındadır. Örneğin sıcak bir levha üzerindeki doğal taşınım yerçekimi kuvveti sayesinde oluşur. Bu örnekte sıcak hava yoğunluğundaki azalma nedeniyle hafifler ve yukarı yönde hareket eder. Zorlanmış taşınım soğutucu maddenin ısınmış cisim etrafında dolanımının, sözgelimi bir fan yardımıyla, yapay yollardan olmasıdır. Isı iletim katsayısı doğal taşınımdaki belirleyici değişkenlerin yanı sıra soğutucunun hızı, akışın türbülanslı ya da laminar akış oluşu gibi faktörlere de bağlıdır. Akışkanın hareketi sırasında akış çizgileri düzgün ve paralel iseler, başka bir deyişle akışkan katmanları birbirlerinin üzerinde kayarak birbirlerine makroskobik ölçülerde karışmadan hareket ediyorsa, bu akış "Laminar Akış" olarak, aksi durumda, yani akış çizgilerinin birbirine paralel olmaması durumunda "Türbülanslı Akış" olarak adlandırılır. Akışın karakteristiği, akışkanın hızına, viskozitesine ve akış yolunun boyutlarına bağlıdır. Laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş kritik Reynolds sayısı tarafından belirlenmektedir (2.25). Reynolds sayısı eylemsizlik kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranıdır ve dolayısıyla akış üzerinde bu kuvvetlerden hangisinin daha baskın olduğunu ifade eder.

$$Re = \frac{vL}{\upsilon} \tag{2.25}$$

Burada v akışkan hızı, ν akışkanın kinematik viskozitesi, L ise akış yolunun geometrisine bağlı olan ve karakteristik boyut olarak adlandırılan bir boyuttur. Örneğin düz bir levha üzerindeki akışta L levhanın uzunluğu, bir kanal içindeki eksenel akışta ise kanalın iç çapıdır. Reynolds sayısının kritik değeri de, yine akışın meydana geldiği ortamın geometrisine bağlıdır. Viskoz kuvvetler akışı laminar karakterde tutmak yönünde etki ederken, eylemsizlik kuvvetleri türbülansların oluşmasını sağlar. Böylelikle düşük Reynolds sayıları için akış laminarken, büyük sayılar için türbülanslı karakterdedir. Dolayısıyla Şekil 2.4.a'da L uzunluğunun kısa olduğu başlangıç noktasında akış laminarken, levha boyunca ilerledikçe türbülanslı akışa dönüşebilir. Akış geometrisine bağlı olarak Denklem (2.25) de verilen karakteristik boyut L nin niteliği değişebilir. Bir kanal içerisindeki akışta L kanal çapına eşitken, daha farklı kesitler için hidrolik çapa eşittir. Hidrolik çap, akışkanın geçtiği kesitin ıslak çevre uzunluğunun dörtte birine bölümüyle bulunur. Örneğin çapları R_1 ve R_2 olan ($R_1<R_2$) iki silindir arasındaki akışta hidrolik çap aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$R_h = \frac{4*0.025*\pi*(R_2^2 - R_1^2)}{\pi(R_1 + R_2)} \tag{2.26}$$

Bu tip halka kesitli kanalda eğer iç silindir dönme hareketi yapmaktaysa, iki silindir arasında hız dağılımı Şekil 2.6 da verildiği gibidir [72].



Şekil 2.6: İki silindir arası akışta, iç silindirin dönmesi durumunda laminar hız profili [72].

T_y levha yüzey sıcaklığı, T_a ortalama akışkan sıcaklığı olmak üzere, $T_y > T_a$ için levhadan akışkana aktarılan ısı enerjisi Newton'un soğutma yasasıyla belirlenir.

$$\dot{Q} = hA(T_y - T_a) \quad \textbf{(2.27)}$$

Bu yasa, aslında "h" taşınım katsayısını tanımlamaktadır. Taşınım katsayısı; ısınmış olan cisimle ortamın sıcaklıkları arasındaki fark, ısınmış cismin yapısal detayları ve yönü, soğutucunun fiziksel özellikleri gibi birçok değişkene bağlıdır. A levha yüzeyinin alanıdır.

Taşınım katsayısı boyutsuz Nusselt sayısının bir fonksiyonudur. Nusselt sayısı fiziksel olarak, taşınımın varlığı durumundaki ısı aktarımının, sadece iletimin var olduğu durumdaki ısı aktarımına oranıdır. Başka bir deyişle,eğer bir ortamda sadece iletim yoluyla ısı aktarımı varsa Nusselt sayısı 1 dir. Bu sayının birim değerden daha büyük olması, ortamda taşınım yoluyla ısı aktarımının var olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla boyutsuz Nusselt sayısı, taşınımla ısı aktarımının bir ölçütü olarak kullanılabilir. Nusselt sayısı, Reynolds sayısı ve Prandtl sayısının bir fonksiyonu olarak bulunabilir. Bu fonksiyon genel olarak Denklem (2.28) ile verilir . Farklı geometriler için C, m, n katsayıları, dolayısıyla Nusselt sayısının Reynolds ve Prandtl sayılarına bağlı olarak ifadeleri literatürde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Isı taşınım katsayısı h ile Nusselt sayısı arasındaki bağıntı Denklem 2.29 da verilmiştir.

$$Nu = C.(Re)^{m}(Pr)^{n} \quad \textbf{(2.28)}$$

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad \textbf{(2.29)}$$

L akış yolunun geometrisine bağlı olan bir boyuttur.

Zorlanmış taşınımda Reynolds sayısının oynadığı rolü, doğal taşınımda Grashof sayısı üstlenmiştir.Bu sayı, kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranı olarak tanımlanır.

$$Gr = \frac{g\Delta\rho V}{\rho^2 \upsilon} \quad \textbf{(2.30)}$$

Bu denklemde g yerçekimi ivmesi, ρ akışkanın yoğunluğu,V hacimdir. Doğal taşınımda Nusselt sayısı Grashof sayısı ile Prandtl sayısının çarpımı olan Rayleigh sayısının fonksiyonudur.

$$Nu = C(Ra)^n \quad \textbf{(2.31)}$$

2.2.3 Stefan-Boltzmann'ın ısıl ışınım yasası

Üçüncü mekanizma olan ışınım ise ısının elektromanyetik yolla aktarılmasıdır. İletim ve taşınım fizikisel madde içerisinde meydana gelir. Araştırmalar böyle bir ortam var olmadığında da ısı enerjisinin ışığın dalga boyundan daha büyük dalga boyundaki elektromanyetik dalgalarla yayılabildiğini göstermektedir. Katı, sıvı veya gaz tüm maddeler sıcaklıklarıyla orantılı olarak elektromanyetik yoldan enerji yayabilir ve soğurabilirler. Stefan-Boltzmann yasası siyah cisim olarak adlandırılan, üzerine düşen ışınımın tamamını emme özelliğine sahip ideal yüzeyin, sıcaklığının dördüncü kuvvetiyle orantılı olarak enerji yaydığını ifade eder.

$$Q = \sigma A T^4 \quad \textbf{(2.32)}$$

$\sigma = 5.6697 * 10^{-8}$ (W/m^2K^4) Stefan-Boltzmann sabitidir.

3. ASENKRON MOTORDA ISI AKTARIMI

3.1 Asenkron Motorun Yapısı ve Çalışma Prensibi

Yapısal olarak hareketsiz kısım olan stator ve stator oluklarına yerleştirilmiş sargılar ile hareketli kısım olan rotor ve sargılarından oluşur. İki kısım arasında çok küçük bir hava aralığı bulunmaktadır. Üç fazlı asenkron motorların statorları üç fazlı simetrik alternatif akım sargılarını taşır. Simetrik sargı sarım sayıları ve empedansları birbirine eşit ve stator oluklarına aralarında 120^0 elektriksel açı bulunacak şekilde yerleştirilmiş sargıdır. Asenkron motorlar rotor yapılarına bağlı olarak iki gruba ayrılır. İlk gruptaki motorların rotor oluklarında alternatif akım sargıları, ikinci grupta ise alüminyum (ve nadiren bakır) çubuklar bulunur. Hangi tipte olursa olsun rotor sargıları kısadevre edilmiştir.

Stator sargıları genlikleri eşit ve aralarında 120^0 faz farkı bulunan üç fazlı gerilimlerle beslendiğinde, her bir faz Ampere yasası uyarınca (3.1) bir manyetik alan meydana getirir.

$$\nabla x \vec{H} = \vec{J} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Bu denklemde H (A/m) manyetik alan şiddetidir. Manyetik alanı oluşturan akım mıknatıslanma akımı olarak adlandırılır. Bu alanın manyetik devre üzerinde oluşturacağı manyetik akı, A devrenin kesit alanı, olmak üzere aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\phi = \mu.H.A \text{ (Weber)} \qquad \textbf{(3.2)}$$

Manyetik akı, devredeki doymanın ihmal edilmesi durumunda akımla aynı formda bir fonksiyondur. Yani mıknatıslanma akımı sinüs formunda ise manyetik akının zamana göre değişimi de sinüs formunda olacaktır. Gerçekte manyetik devrenin geçirgenliğinin sabit olmaması nedeniyle, manyetik akının zamana göre değişiminin sinüs formunda olması durumunda, mıknatıslanma akımı çeşitli dereceden harmonikler içeren bir akımdır.

Her bir fazdan geçen akımların yarattığı alternatif akıların toplamı bir döner alan meydana getirir. Döner alan, herhangi bir anda hava aralığı çevresindeki dağılımı ve bir noktadaki zaman göre değişimi sinüs formunda olan bir alandır.

$$\phi = \phi_m \sin(x - \omega t) \quad \textbf{(3.3)}$$

ω döner alanın açısal hızıdır. Ancak döner alan devir hızı olarak ifade edilmesi benimsenmiştir. Asenkron motorlarda döner alan hızı sabittir ve senkron hız olarak adlandırılır. Bu hız değeri motorun kutup sayısı ve besleme frekansına bağlı olarak Denklem (3.4) ile hesaplanır.

$$n_s = \frac{60 f_1}{p} \quad \textbf{(3.4)}$$

Değişken manyetik alanın kısadevre edilmiş rotor sargılarını kesmesiyle, rotor sargılarında Faraday yasası uyarınca alternatif gerilimler endüklenir.

$$\nabla x \vec{E} = -\frac{dB}{dt} \quad \textbf{(3.5)}$$

Asenkron motorlar için Denklem (3.5), Denklem (3.6.) daki haline dönüşür. Bu denklemde "e" endüklenen elektromotor kuvveti, N endüklemenin meydana geldiği sargının sarım sayısıdır. Rotor sargılarının kısadevre edilmiş olması nedeniyle endüklenen gerilim bu sargılardan akım akmasını sağlar.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad \textbf{(3.6)}$$

"-" işareti, asenkron motorun çalışmasına ilişkin çok önemli bir noktanın altını çizmektedir. Rotorda endükleme sonucu akan akım stator akısını zayıflatacak yönde bir manyetik alan meydana getirmektedir.

Lorentz yasası manyetik alan içerisinde hareket eden yüklere kuvvet etki edeceğini belirtmektedir. Birim yük için Denklem (3.7)'de verilmiştir. Akım taşıyan bir iletkene etki eden kuvvet, her bir yüklü ve hareketli parçacığa etki eden kuvvetlerin toplamı olarak yazılabilir Denklem (3.8)'de q hacimsel yük yoğunluğudur. Elektrik akımının Denklem (3.9) ile verilen tanımı kullanılarak elde edilen Denklem (3.10), Lorentz kuvvetinin asenkron motorlar için kullanılan biçimidir.

$$\vec{F} = q_B . \vec{v} \times \vec{B} \quad \textbf{(3.7)}$$

$$\vec{F} = (\sum q\ ).\vec{v} \times \vec{B} = \underbrace{L.A.q.}_{Q_T}\vec{v} \times \vec{B} \qquad \textbf{(3.8)}$$

$$I = \frac{dQ_E}{dt} = \frac{q.A.dL.}{dt} = q.A.\vec{v} \qquad \textbf{(3.9)}$$

$$\vec{F} = L.\vec{I} \times \vec{B} \qquad \textbf{(3.10)}$$

B (Wb/m^2) manyetik devre üzerindeki akı yoğunluğudur. Şekil 3.1 de akım, manyetik alan ve iletkenin hareket yönüne göre etki eden kuvvetler gösterilmiştir. μ_{dp} ($A.m^2$) akım çevrimini karakterize eden ve manyetik dipol momenti olarak adlandırılan vektörel bir büyüklük olup, akım çevriminin oluşturduğu düzlemin A alanının normaliyle aynı yöndedir.

$$\vec{\mu}_{dp} = \text{I}.A\vec{n}_A \qquad \textbf{(3.11)}$$

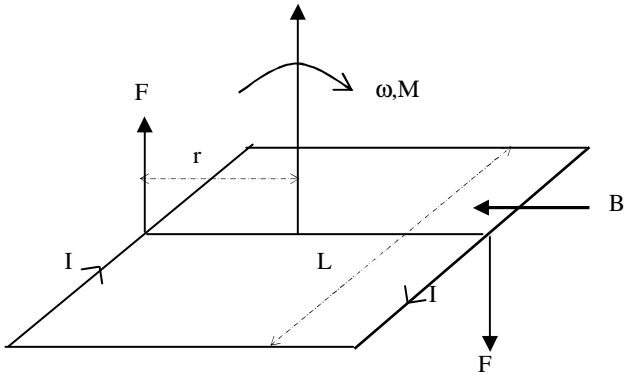
İletken çerçeveye etki eden moment, kuvvet ve kuvvet kolunun çarpımı olarak yazılabilir.

$$M = r.L.\vec{I} \times \vec{B} \qquad \textbf{(3.12)}$$

Moment, manyetik dipol momenti cinsinden Denklem (3.13) le verilmiştir.

$$M = \vec{\mu}_{dp} \times \vec{B} \qquad \textbf{(3.13)}$$

Çerçeveye etki eden moment, manyetik dipol momentine dik , dolayısıyla şekilde okla gösterilen yöndedir.



Şekil 3.1: Asenkron motorun çalışma ilkesi

Bu moment sayesinde rotor hızlanarak n_r hızına ulaşır. Döner alan hızı ile rotor hızı arasındaki farkın bağıl değeri, asenkron motorda enerji dönüşümü ve kayıplar açısından önemli bir büyüklük olan "kayma"yı verir. Motorun yüksek çıkış gücü üretebilmesi yani yüksek verimde çalışması kaymanın küçük olmasına bağlıdır. Asenkron motorlarda kayma- motorun gücüne bağlı olarak %1-%5 arasında değişir.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \qquad \textbf{(3.11)}$$

Rotorda endüklenen gerilimlerin ve akımların frekansı kaymaya bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$f_2 = s.f_1$ **(3.12)**

3.2 Asenkron Motorda Kayıplar

Asenkron motorlarda iki temel kayıp, stator ve rotor sargılarındaki bakır kayıpları ile değişken manyetik alanların neden olduğu sac paketlerindeki demir kayıplarıdır.

Bakır kayıpları, faz sayısı, sargıdan akan akımın etkin değeri ve sargı direnci kullanılarak elde edilir. 1 ve 2 indisleri stator ve rotoru göstermektedir.

$$P_{cu} = m_1 r_1 I_1^2 + m_2 r_2 I_2^2 \qquad \textbf{(3.13.a)}$$

Denklem (3.13.a) integral formda yazılırsa, bakır kayıplarının akımın frekansına göre değişimi de görülebilir.

$$P_{cu} = \sum_i \frac{m_i}{1/f_i} \int_0^T i_i^2(t) r_i dt \qquad \textbf{(3.13.b)}$$

Bakır kayıplarının neden olduğu ısınma nedeniyle sargı direnci sabit kalmaz. Bir T sıcaklığı için direncinin değeri, başlangıç sıcaklığı T_0, bu sıcaklıktaki direnç değeri R_0 ve sargının yapıldığı malzemenin katsayısı α cinsinden aşağıda verilmiştir.

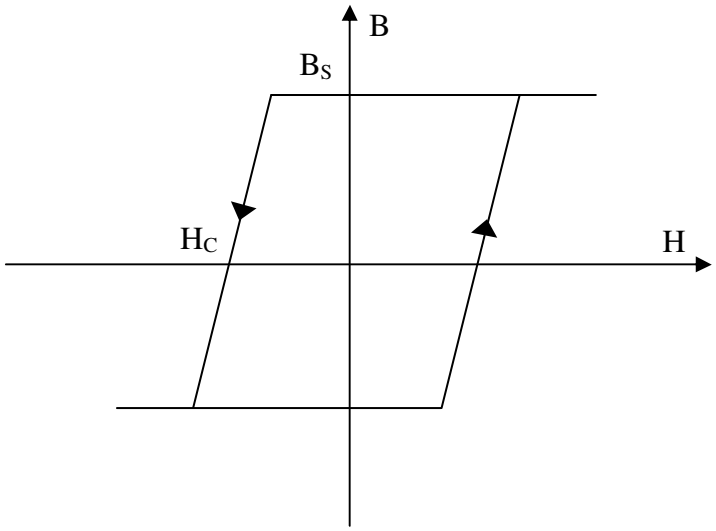
$R(T) = R_0 (1+\alpha (T-T_0))$ **(3.14)**

Asenkron motorlarda demir kayıplarının iki temel kaynağı vardır. Bunlardan ilki olan histerezis kayıpları, elektrik motorlarının manyetik devrelerinde kullanılan ferromanyetik malzemelerin özelliğinden kaynaklanır. Bu tür malzemelerde manyetik akı yoğunluğu B ile belirli bir akı yoğunluğu sağlamak üzere uygulanması

gereken manyetik alan şiddeti arasında Denklem (3.15) ile verilen bağıntı doğrusal değildir.

$$B=\mu H \quad \textbf{(3.15)}$$

Alternatif akımın her yarı periyodunda, akımın artmasıyla (periyodun 1. ve 3. çeyrekleri) birlikte Ampere yasasına göre artan manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğunun da artmasına sebep olur. Ancak belli bir yerden sonra manyetik alan şiddeti ne kadar artarsa artsın akı yoğunluğunda bir değişme olmayacaktır. Bu durumda manyetik devre doymaya girmiştir. Öte yandan manyetik alan şiddeti azalırken (periyodun ikinci ve 3. çeyreklerinde) manyetik akı yoğunluğundaki azalma, artış yönündekinden farklı bir yol izler ve alan şiddeti sıfıra indiğinde sıfır olmaz. Bu durumdaki akı artık akı olarak adlandırılır. Ferromanyetik malzemeler için manyetik alan şiddeti ve akı yoğunluğu arasındaki ilişkiyi gösteren eğriye Histerezis eğrisi denir. Şekil 3.2 de şematik olarak gösterilen bu eğrinin oluşturduğu çevrim, alternatif akımın her periyodunda tekrarlanır.



Şekil 3.2: Ferromanyetik malzemelerde histerezis çevrimi.

Histerezis eğrisinin altında kalan alan manyetik malzemenin histerezis kayıplarını verir. Bu eğrinin altında kalan alan ve alternatif gerilimin frekansı ne kadar büyükse kayıplar da o denli artacaktır. Histerezis kayıpları manyetik akı yoğunluğu ve frekans ile orantılı olarak ifade edilebilir. Orantı katsayısı σ_H manyetik malzemenin bir özelliğidir ve küçük olması arzu edilir. Asenkron motorlar için malzemeye özgü bir büyüklük olan Steinmetz katsayısı n yaklaşık olarak 1.6 alınır.

$$P_H=\sigma_H.G.f.B^n \quad \textbf{(3.16)}$$

Asenkron motorların stator geriliminin frekansı şebeke frekansıdır ve keyfi o

,larak değiştirilmesi mümkün değildir. Manyetik akı yoğunluğu aynı zamanda motorun üretebileceği döndürme momentiyle de orantılı olduğu için çok küçük seçilemez. G manyetik devrenin kütlesidir. Dolayısıyla statordaki demir kayıplarını küçük tutmanın yolu σ_H sabiti küçük olan yüksek kaliteli malzeme kullanımından geçer. Öte yandan sürekli çalışmada rotorda endüklenen gerilimlerin frekansının çok küçük olması nedeniyle rotor demir kayıpları ihmal edilebilecek düzeyde düşüktür.

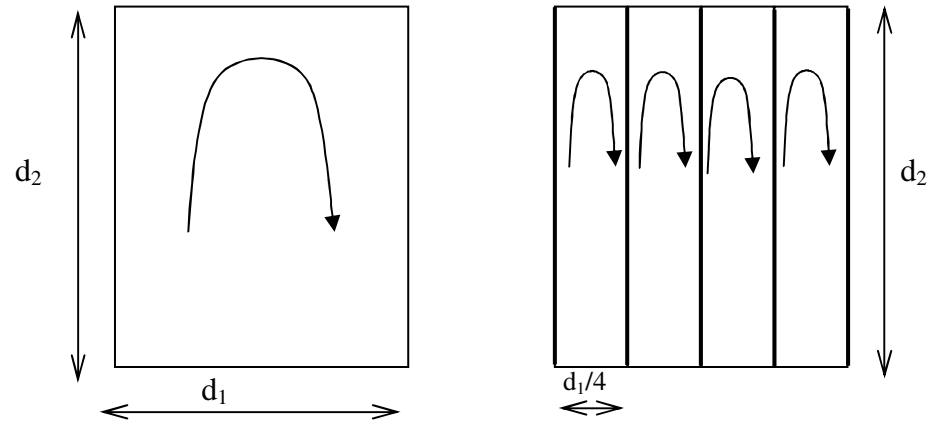
Manyetik akıyı taşıyan ortamın elektriksel olarak da iletken olması, histerezis kayıplarına ek olarak girdap akımı kaybı olarak adlandırılan bir başka tür demir kaybına yol açar. Değişken alternatif alan içerisinde bulunan bu elektriksel iletkende de, rotordakine benzer bir mekanizmayla gerilim endüklenecek ve bu gerilimler sac içerisinde kısadevre çevrimler biçimde akım akmasına yol açacaktır. Girdap akımları, iletken malzemenin elektriksel direnci üzerinde ısıya dönüşen bakır kayıplarına sebep olur.

Herhangi bir direnç devresindeki bakır kayıpları gerilimin karesi cinsinden yazılabileceğine ve manyetik alan B gerilimle yaklaşık olarak doğru orantılı olduğuna göre girdap akımı kayıpları da manyetik alan ve frekansla orantılı olarak yazılabilir. Girdap akımı kayıplarının frekansla bağlantısı Denklem (3.17) de görülebilir.

$$P_E = \sigma_E . G . f . B^2 \qquad \textbf{(3.17)}$$

Denklem (3.17) ile verilen kaybı azaltmak σ_F kayıp katsayısı düşük ve kaliteli bir malzeme kullanmak veya devrenin manyetik geçirgenlik özelliklerini zayıflatmadan, girdap akımlarının aktığı yolun direncini arttırıp akımı sınırlamakla mümkündür. Manyetik devre tek parça olarak yapılmak yerine, Şekil 3.3 de gösterildiği üzere birer yüzleri yalıtılmış ince levhaların birleştirilmesi yoluyla yapılırsa istenen koşullar sağlanacaktır. İkinci durumda sayfa düzleminden içeriye doğru giren toplam akı miktarı değişmeyecek ancak -şekilde verilen örneğe göre- dörde bölünüp parçalar arasında eşit olarak dağılacaktır. Her bir parçada endüklenen gerilim tek parçalı kütlede endüklenen gerilimin dörtte birine, dolayısıyla direncin değişmediği varsayımıyla kayıplar da on altıda birine düşecektir. Öte yandan akım yolunun kesitindeki azalma, uzunluğundaki azalmadan oransal olarak daha küçük olduğu için her bir parçanın direnci başlangıçtaki dirençten daha büyük olacaktır. Örneğin $d_1=d_2$

ise her bir parçanın direnci tek parçalı kütlenin direncinin 2.5, kaybı ise 0.025 katı olmaktadır. Böylece şekilde verilen örnek için ikinci durumdaki toplam kayıp P_{E2}, ilk durumdaki kayıp P_{E1} olmak üzere $P_{E2}=P_{E1}/10$ olarak bulunacaktır. Asenkron motorların sac paketlerinin yapımında 0.2 – 0.3mm kalınlığında çok sayıda ince levha kullanılır.



Şekil 3.3: Ferromanyetik malzemelerde girdap akımı kayıplarının azaltılması.

Histerezis ve girdap akımı kayıplarının yanı sıra üçüncü bir tip kayıp stator ve rotor dişlerinde meydana gelen yüzey kayıplarıdır. Stator iç çapı D_{1i}, oluk sayısı N_1, B_δ boşta çalışmada hava aralığı akısının en büyük değeri ρ ve μ_r sacın özgül direnci ve bağıl manyetik geçirgenliği olmak üzere yüzey kayıplarının ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$P_{1y} \cong \frac{272}{\sqrt{\mu_r \rho}} \left(\frac{N_1 n_r}{10^4}\right)^{1.5} \left[\frac{\beta k_c B_\delta . \left(\frac{\pi D_{1i}}{N_1}\right)}{0.1}\right]^2 \left(W/m^2\right) \qquad \textbf{(3.18)}$$

$$P_{2y} \cong \frac{272}{\sqrt{\mu_r \rho}} \left(\frac{N_2 n_r}{10^4}\right)^{1.5} \left[\frac{\beta k_c B_\delta . \left(\frac{\pi D_{2i}}{N_2}\right)}{0.1}\right]^2 \left(W/m^2\right) \qquad \textbf{(3.19)}$$

Denklem (3.18) de k_c ile gösterilen ve Carter faktörü olarak adlandırılan katsayı etkin hava aralığı uzunluğu bulmak üzere kullanılan bir düzeltme faktörüdür. Bu faktör asenkron motor oluklarının hava aralığı uzunluğunu arttırıcı etkisini temsil etmektedir ve hem statorun hem rotorun oluklu olması durumunda 1 ve 2 indisleri sırasıyla stator ve rotoru, a_o oluk ağzı genişliğini, δ hava aralığının fiziksel uzunluğunu göstermek üzere, Denklem (3.20) ile hesaplanır.

$$k_c = k_{c1} \times k_{c2} = \frac{\frac{\pi D_{1i}}{N_1}}{\frac{\pi D_{1i}}{N_1} - \frac{(a_{o1}/\delta)^2}{5+(a_{o1}/\delta)}.\delta} \times \frac{\frac{\pi D_{2i}}{N_2}}{\frac{\pi D_{2i}}{N_2} - \frac{(a_{o2}/\delta)^2}{5+(a_{o2}/\delta)}.\delta} \quad \textbf{(3.20)}$$

Stator ve rotor dişlerinin birbirlerine göre konumlarının, dolayısıyla hava aralığı genişliğinin ve buna bağlı olarak dişlerdeki akı yoğunluğunun sürekli ve periyodik olarak değişmesiyle, diş pulzasyon kayıpları meydana gelir. Stator dişlerindeki pulzasyonun frekansı $N_2.n_r$, rotor dişlerindeki pulzasyonun frekansı $N_1.n_r$ dir. Stator ve rotor dişlerindeki pulzasyon kayıpları sırasıyla (3.21) ve (3.22) de verilmiştir.

$$P_{1p} = \frac{1}{72} k_p \sigma_w \left(\frac{N_2 n_r}{10^4} \times \frac{(a_{o2}/\delta)^2}{(5+\frac{a_{o2}}{\delta}).2.(\pi.\frac{D_{1i}}{N_1})} \frac{B_{d1ort}}{0.1} \right) \quad \textbf{(3.21)}$$

$$P_{2p} = \frac{1}{72} k_p \sigma_w \left(\frac{N_1 n_r}{10^4} \times \frac{(a_{o1}/\delta)^2}{(5+\frac{a_{o1}}{\delta}).2.(\pi.\frac{D_{2i}}{N_2})} \frac{B_{d2ort}}{0.1} \right) \quad \textbf{(3.22)}$$

B_{d1} dişteki ortalama akı yoğunluğu, σ_w (W/m^3) malzeme kayıp sabiti, k_p ise sac işleme faktörüdür ve değeri 1.8–2 aralığındadır.

Kayıplar hakkında buraya kadar anlatılanlar, motorun sinüzoidal bir kaynaktan beslenmesi durumu içindir. Sinüs biçimli olmayan besleme gerilimleri çeşitli mertebeden harmonikler içerir. Harmoniklerin asenkron motor üzerindeki etkileri iki grupta toplanabilir.

1.Moment üzerindeki bozucu etkiler: Harmoniğin mertebesine bağlı olarak motor veya frenleme momentleri ile farklı mertebeden harmonikler arasındaki etkileşimden kaynaklanan parazitik momentler.

2. Akım ve akı harmonikleri nedeniyle demir, bakır kayıpları ile ek kayıplardaki artış.

Harmoniklerin varlığı durumunda, rotor direncinin sabit kaldığı kabulüyle, bakır kaybı aşağıdaki gibi yazılır. Bu denklemde n harmonik mertebesidir.

$$P_{cu} = (\sqrt{\sum_{n=1} (I.n.\cos(n\omega t + \varphi_n)^2}) \sum_{n=1} (r_1 + \frac{r_2}{s_n})) \quad \textbf{(3.23)}$$

Eğer rotor direncinin değişimi hesaba katılacaksa, yüksek frekanslarda direncin değeri yaklaşık olarak (3.24) ile bulunabilir. Frekans arttıkça iletken direnci de artmaktadır. Bu durum deri etkisi olarak adlandırılır.

$$R = \frac{\rho}{\sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f_n \mu}}} \left(\frac{L}{\pi D}\right) \tag{3.24}$$

L: iletken uzunluğu, D:iletken çapı, ρ iletkenin özgül direnci, μ mutlak manyetik geçirgenlik ve f_n=n.f_1, n. dereceden harmoniğin mertebesidir.

n. mertebeden harmonik akı yoğunluğunun ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$B_n = \frac{B_1}{n} \tag{3.25}$$

Her bir akı harmonik bileşeni manyetik devre üzerinde kendi frekansında titreşen histerezis çevrimleri oluşturacak ve toplam histerezis kaybı bu çevrimlerin içlerindeki alanların toplamına eşit olacaktır. Tüm çevrimlerin şekil olarak birbirine benzer olduğu kabulüyle

$$P_H = \sigma_H G \sum_{n=1} f_n B^2{}_n \tag{3.26}$$

bulunur.

Besleme gerilimde harmoniklerin bulunması durumunda girdap akımı kayıplarının ifadesi t_s sac kalınlığı olmak üzere aşağıda verilmiştir [53].

$$P_E = \sigma_E G \sum_{n=1} f_n B^2{}_n \frac{3}{\zeta} \frac{(\sinh\zeta - \sin\zeta)}{(\cosh\zeta - \cos\zeta)} \quad , \quad \zeta = 2\pi t_s \left(\frac{f_n \mu_r 10^{-9}}{\rho}\right)^{0.5} \tag{3.27}$$

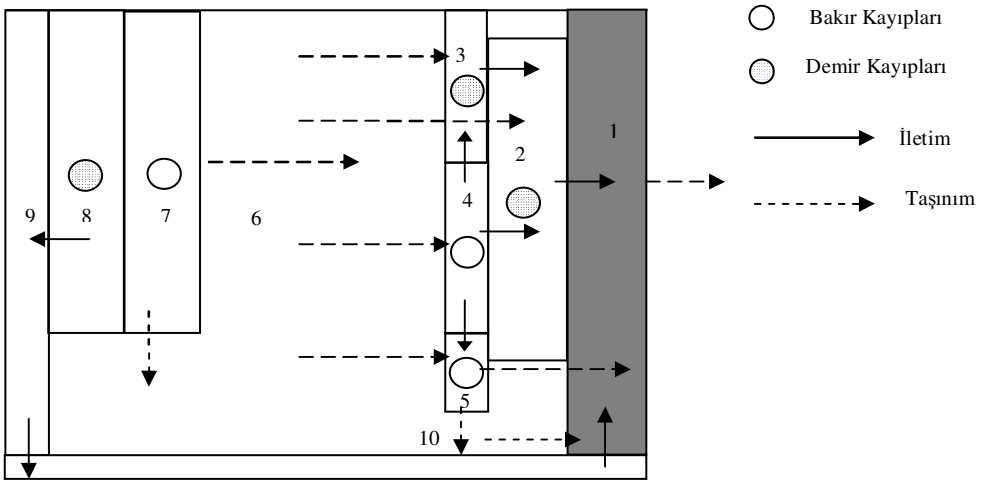
Bu kayıplar (3.28) ile de hesaplanabilir.

$$P_E = (\sigma_E G.f.B^2) \times \underbrace{\frac{B_1^2 + B_2^2 + ... + B_n^2 + ...}{B_\delta^2}}_{{}^{k}B} \tag{3.28}$$

B_δ hava aralığı akısının temel bileşenidir. Parantez içindeki terim sinüzoidal durumda (3.17) ile verilen kayıptır. Bu değer bir k_B katsayısıyla çarpılıp harmonik içeren besleme gerilimi için toplam girdap akım kaybı bulunmuştur. Girdap akımı kayıpları için yapılan bu düzeltme diş yüzey ve pulzasyon kayıpları için de yapılabilir.

3.3 Asenkron Motorda Isı Aktarım Yolları

Elektrik makinelerinde ısı aktarımı iletim, taşınım ve radyasyon aracılığıyla olur. Makinenin katı parçaları için iletim yöntemi baskındır, soğutucu akışkanlardaki aktarım ise taşınım yöntemiyle olmaktadır. Radyasyonla ısı iletimi elektrik makinelerinde, sıcaklıkların çok yüksek derecelere ulaşmaması nedeniyle ihmal edilebilir. Asenkron motorda iletim ve taşınıma ısı aktarımına ilişkin bir şema Şekil 3.4 de verilmiştir.



Şekil 3.4: Asenkron motorda iletim ve taşınım yoluyla ısı aktarımı: **1**.Gövde, **2**.Stator boyunduruğu, **3.**Stator dişleri, **4.**Stator sargısı, **5.**Hava aralığı, **6.**Sargı başı, **7.** Kapak boşluğu havası, **8.**Rotor sargısı, **9**.Rotor manyetik devresi, 1**0.**Mil.

Şekil 3.4 de motor eksenine dik düzlemden kesilmiş ve bir yarısı gösterilmiştir. Gösterimin şematik olması itibariyle geometrisine birebir uymamaktadır Şekle göre motorun başlıca kısımları ve bu kısımlar arasındaki ısı aktarım mekanizmaları aşağıda verilmiştir.

- Karkas ve dış ortam arasında taşınım ve yayınım yoluyla ısı aktarımı olur. Karkas kayıpsız olarak kabul edilir.
- Stator saç paketi ve karkas arasında temel olarak iletim mekanizması geçerlidir. Boyunduruk ve dişlerden oluşan stator saç paketi makinada demir kayıplarının meydana geldiği bölgedir. Bu kayıplar ısı enerjisi olarak açığa çıkar. Başka bir deyişle bu bölgede bir ısı kaynağı mevcuttur ve sürekli rejimde Poison denklemi, geçici rejimde Denklem (3.19) ile incelenirler.

- Stator sargıları ile sac paketi ve sargı başları arasında ısı, iletim mekanizmasıyla aktarılır. Stator oluk sargıları ve sargı başlarındaki bakır kayıpları ile bu bölgede büyük miktarlarda ısı enerjisi üretilir.
- Stator sargıları ile hava aralığı, sargı başları ile de kapak boşluğu havası arasında taşınım mekanizması geçerlidir.
- Kapak boşluğu havası temas halinde olduğu tüm yüzeylerle (motor yan kapakları, rotor kısadevre halkası, rotor ve stator manyetik devreleri) taşınım yoluyla ısı alışverişi yapar.
- Rotor sargısı / kısadevre kafesi ile rotor sac paketi arasında iletim yoluyla ısı aktarılırken, sargı/kafes ile hava aralığı arasında taşınım söz konusudur. Rotor sargısı/ kısadevre kafesi bakır kayıplarının oluştuğu üçüncü kısımdır.
- Rotor sac paketi mile iletim yoluyla ısı aktarır. Mil ısıl açıdan yataklar üzerinde karkasa bağlıdır. Rotor sacında oluşan demir kayıpları çok düşük değerdedir ve sürekli rejim için ihmal edilebilir.

3.4 Asenkron Motorda Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi

Elektrik makinelerinin ısıl analizinde kullanılan modeller belli başlangıç koşulları altında makinenin ısıl davranışını, makinedeki sıcaklık dağılımını öngörebilmek için kullanılır. Bir ısıl modelin kurulmasında öncelikle elektrik makinesi, yük ve çevre koşullarının fiziksel bir modeli oluşturulur. Daha sonra bu fiziksel model matematiksel olarak ifade edilecek ve sayısal çözüm yöntemlerinden biri kullanılarak çözümleme yapılacaktır. Fiziksel modelin oluşturulmasında, tasarımcının öncelikleri dikkate alınarak sistemin belirleyici fiziksel özelliklerini koruyan, mümkün olduğunca sadeleştirilmiş bir yapı oluşturulması gerekir. Aksi takdirde çözüm için gerekli donanım ve yazılım masrafları ile harcanacak zaman çok büyük boyutlara varacaktır.

Elektrik makinelerinin ısıl analizinde kullanılan modeller iki ana grupta toplanır. Birinci grup sayısal alan çözümlemelerine dayanan modeller, ikinci grup ise toplu parametreli elektriksel-ısıl eşdeğer modellerdir.

3.4.1 Sayısal alan çözümüne dayanan modeller:

Alan kavramı belirli bir bölgede sürekli dağılıma sahip skalar ya da fiziksel bir büyüklüğü ifade eder. Elektrik makinalarının sıcaklık dağılımı skalar bir alandır. Fiziksel bir sisteme ilişkin kısmi türevli denklemlerin analitik çözümü, kompleks sistemler için her zaman mümkün değildir. Dolayısıyla sonlu farklar veya sonlu elemanlar yöntemi gibi çeşitli sayısal yöntemlere başvurulur.

Isı aktarımı problemlerinde bu yöntemler (3.16)-(3.20) ile verilen denklemlerin, belirli sınır koşulları altında çözümünü arar.

Denklem 3.16.nın analitik çözümü, sıcaklık değerlerini x,y,z,t değişkenlerine bağlı bir fonksiyon olarak verir. Sayısal çözümlemede ise amaç, sıcaklığın geçici rejimde belirli bir (x^*,y*,z^*,t^*) noktası için, sürekli rejimde ise (x^*,y*,z^*) noktası için T^* değerini bulmaktır. Dolayısıyla sayısal çözümün ilk adımı, (3.16) nın çözümünün aranacağı ayrık noktaları elde etmektir. Bu ayrıklaştırma işlemi sonucu çözüm bölgesi bir dizi sonlu sayıda hücreye bölünmüş olur.

Sonlu Elemanlar Yönteminin uygulanmasında yaklaşık çözüm polinomlarının seçilmesi ve çözüm uzayının ayrıklaştırılması büyük deneyim ve çaba isteyen süreçlerdir. Dolayısıyla karmaşık sistemlere uygulanması bilgisayar yazılımları kullanılarak yapılmaktadır.

3.4.1.1 Sınır koşulları

Gerek sonlu elemanlar, gerek sonlu farklar yönteminde diferansiyel denklemlerin çözümü için denklemlerin tanımlı olduğu bölgenin sınırlarındaki koşullar bilinmelidir. Isı aktarımı problemlerinde beş tip sınır değer ve bir başlangıç koşulundan bahsedilebilinir.

1.Tip sınır koşulu veya Dirichlet tipi koşul: Sınırda yüzey sıcaklığı bilinmektedir.Bu sıcaklık zamanın, koordinatların veya her ikisinin fonksiyonu ya da sabit olabilir.

$$T=T(r_i,t) \qquad \textbf{(3.29)}$$

r sınırdaki koordinat eksenlerinden birini, i alt indisi i. sınırı belirtmektedir. Eğer sınırda sıcaklık sıfırsa, 1. dereceden homojen sınır şartı olarak adlandırılır.

Akı sınır koşulu veya Neumann koşulu: Sınırda ısı akısı bilinmektedir.

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial n_i} \right|_{r_i} = \dot{q}_{r_i} \qquad \textbf{(3.30)}$$

Adyabatik sınır koşulu: Sınırda yüzey yalıtılmıştır. Yani sınırda ısı akısı sıfırdır. Bu koşul 2. dereceden homojen sınır şartı olarak adlandırılır.

Karma tipte sınır koşulu: Sınırda taşınımla ısı aktarımı söz konusudur.

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial n_i} \right|_{r_i} + h_{r_i} (T(r_i, t) - T_\infty) = 0 \qquad \textbf{(3.31)}$$

Eğer ortam sıcaklığı sıfırsa, bu koşul 3. dereceden homojen sınır şartı haline dönüşür.

Buna ek olarak sınırda ışınımla ısı transferi de bulunabilir.

5.Tip sınır koşulu: İki yüzey temas halindedir.

$$k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial n_i} \right|_{r_i} = k_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial n_i} \right|_{r_i} \qquad \textbf{(3.32)}$$

Eğer ısıl temas mükemmelse, yani iki yüzey arasındaki ısıl direnç sıfıra eşitse $T_1=T_2$ olacaktır.

Bunların haricinde fiziksel anlamda bir "sınır"ın mevcut olmadığı durumlarda "0. tip sınır koşulu"ndan bahsedilir.

İlk şart veya başlangıç koşulu: Zamana bağlı problemlerde t = 0 anında cisim içerisinde veya sınırda sıcaklık dağılımı bilinir.

3.4.2 Toplu parametreli modeller

Bölüm 3.2.1 de, (3.20) ile verilen Laplace denklemi matematiksel olarak bir alanın gradyanının diverjansıdır. Isı ve kütle aktarımı, elektromanyetizm, akustik ve kütlesel çekim alanları başta olmak üzere pek çok fiziksel alana ilişkin potansiyel fonksiyonları bu denklemi sağlamaktadır.

Elektrik alanı birim yük üzerine etki eden kuvvettir ve Coulomb Yasasından hareketle, birim yükten r uzaklıktaki bir noktadaki değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_b}{r^2} \vec{r} \qquad \textbf{(3.33)}$$

Elektrik alan, birim yüzeyden geçen elektrik akı çizgisi olarak da tanımlanabilir, dolayısıyla elektrik alanın bir yüzey üzerindeki integrasyonu o yüke ait toplam elektrik akısını verecektir.

$$\Phi_E = \oint_A EdA = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\oint_A \frac{q_b}{r^2} dA_r = \frac{q_b}{\varepsilon_o} \qquad \textbf{(3.34)}$$

(3.49) bir yüzeyden çıkan toplam elektrik akısının o yüzey tarafından çevrelenen elektrik yüküne eşit olduğunu göstermektedir. Eğer yüzeyin kapladığı hacme eşit olarak dağılmış birden fazla yük var ise toplam elektrik akısı, hacim içerisindeki tüm yüklerin toplamıyla bulunur.

$$\Phi_E = \frac{q_E.V}{\varepsilon_o} = \frac{Q_E}{\varepsilon_0} \qquad \textbf{(3.35)}$$

(3.35) de q_E hacimsel yük yoğunluğu, ε_0 boşluğun geçirgenliği ve V ise hacimdir.

Öte yandan Gauss teoremine göre bir vektörel alanın belli bir yüzeydeki akısı, diverjansının o yüzey içerisinde sınırlana hacim için integraline eşittir. Dolayısıyla bir kuvvet alanı olması itibariyle vektörel elektrik alanı için Gauss teoremi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\oint_A EdA = \iiint divE.dV = \frac{Q_E}{\varepsilon_o} = \oint_V \frac{q_E}{\varepsilon_0} dV \qquad \textbf{(3.36)}$$

Denklem (3.36) dan hareketle elektrik alanının diverjansı için (3.37) elde edilir.

$$\varepsilon_0 divE = q_E \qquad \textbf{(3.37)}$$

Yüksüz ortamda

$$\varepsilon_0 divE = 0 \qquad \textbf{(3.38)}$$

A herhangi bir vektör alanı olmak üzere $\text{rot}\,\vec{A} = 0$ koşul sağlandığı müddetçe bu vektör alanı skalar bir alanın gradyanı olarak ifade edilebilir. Manyetik alanın zamanla değişmediği durumlarda, elektrik alanın rotasyoneli sıfırdır. Elektrik alanını belirleyen skalar büyüklük, elektrik potansiyelidir.

$$E = -gradV \qquad \textbf{(3.39)}$$

Denklem (3.54)'ün Denklem (3.38) de kullanılmasıyla, yüksüz ortamlarda elektriksel potansiyelin Laplacien'i yazılmış olunur.

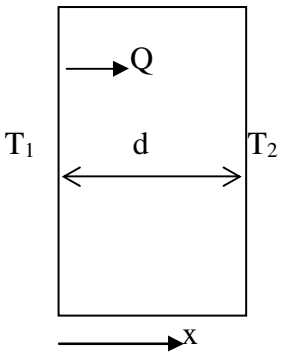
$$\nabla^2 V = 0 \qquad \textbf{(3.40)}$$

Yüklü ortamlarda ise elektrik potansiyeli ile elektrik yük yoğunluğu arasındaki ilişki Poison denklemi tarafından belirlenir.

$$\nabla^2 V = -\frac{q_E}{\varepsilon_0} \qquad \textbf{(3.41)}$$

Isı aktarımı ve elektrostatik alan için yazılan Laplace ve Poison denklemlerinden hareketle ısı iletimi ve elektrik akımı arasında bir benzerlik kurmak mümkündür. Denklem (3.56) da elektrik potansiyel farkı (V) yerine sıcaklık (T), elektriksel yük yoğunluğu (q_E) yerine birim hacimde üretilen ısı $\dot{q}$ ve dielektrik sabiti (ε veya ε_0) yerine ısıl iletkenlik (k) yazılırsa elektrostatik alanlar için geçerli Poison denklemi elde edilir.

Şekil 3.5 de yüzey alanı A, kalınlığı d, iç ve dış yüzey sıcaklıkları T ve T_2 olan bir duvar gösterilmiştir. Duvar içerisinde ısı üretimi yoktur ve ısı iletimi tek boyutlu olup, sadece x yönündedir.



Şekil 3.5: Isı üretimi olmayan duvarda bir boyutlu ısı iletimi.

Bu sistem için Laplace denklemi ve sınır koşulları aşağıdaki gibidir.

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \qquad \text{x=0 için T=T}_1 \text{ , x= d için T=T}_2$$

Denklemin sınır koşulları için çözümüyle duvar içerisindeki sıcaklığın konuma bağlı değişimi elde edilir.

$$T(x) = \frac{T_2 - T_1}{d} x + T_1 \qquad \textbf{(3.42)}$$

Bu sistem için Fourier yasasının uygulanmasıyla, duvardan birim zamanda aktarılan ısı enerjisi bulunur.

$$\dot{Q} = -kA\frac{\partial T}{\partial x} = kA\frac{(T_1 - T_2)}{d} = \frac{\Delta T}{d/kA} \qquad \textbf{(3.43)}$$

Yukarıdaki ifadede paydada bulunan terim, uzunlukla doğru, kesit alanı ile ters orantılı olan elektriksel direnç ifadesine benzemektedir. Dolayısıyla ısı iletimi için Denklem (3.44) ile verilen ifade iletim ısıl direnci olarak adlandırılır. Isıl direncin birimi ^{0}C/W dır. Elektrik direnci, potansiyel farkı nedeniyle akan akıma gösterilen dirençken, ısı direnç sıcaklık farkı nedeniyle aktarılan ısı enerjisine karşı gösterilen dirençtir.

$$R_I = \frac{L}{kA} \qquad \textbf{(3.44)}$$

Taşınımla ısı aktarımı ve elektriksel devreler arasındaki benzeşimi göstermek için (3.43) ün yeniden düzenlenmiş hali (3.45) de verilmiştir.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_C} \quad , \quad \mathrm{R_C} = \frac{1}{hA} \qquad \textbf{(3.45)}$$

Bölüm 3.2.1.de (3.14) ve (3.15) numaralı denklemlerde yer alan ρc ifadesi birim hacim için "ısıl kapasite" olarak tanımlanır. ρ (kg/m^3) cismin yoğunluğu, c(J/kg ^{0}C) cismin özısısı olmak üzere ısıl kapasitenin birimi (J/ ^{0}C) olarak verilir ve bir cisimin sıcaklığını belirli bir dereceye çıkarmak için cisme verilmesi gereken ısı enerjisini gösterir. Buna göre V (m^3) hacim olmak üzere ısıl kapasitenin genel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$C_I = \rho c V \qquad \textbf{(3.46)}$$

Isıl ve elektriksel sistemler arasındaki benzerlik Çizelge 3.1. de özetlenmiştir. Çizelge 3.1 de verilen benzeşimden hareketle motor belirli sayıda alt kısma ayrılarak,her bir alt kısmın ısıl direnci ve ısıl kapasitesi geometriye, boyutlara ve kullanılan malzemenin türüne göre hesaplanır. Her bir alt parça için ve bu parçalar arasında hangi yolla ısı iletiminin söz konusu olduğu belirlenir. Böylece motorun ısıl davranışını temsil eden bir elektriksel eşdeğer devre oluşturularak Kirchoff yasaları uyarınca bu devrenin çözümü yapılır.

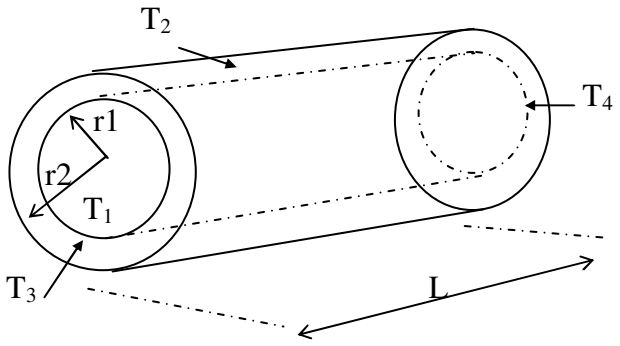
Çizelge 3.1: Isıl sistemlerin elektriksel benzeşimi.

Elektriksel Büyüklük	Sembol	Isıl Büyüklük	Sembol
Elektrik potansiyel farkı(V)	ΔV	Sıcaklık farkı (^{0}C)	ΔT
Elektriksel direnç(Ω)	R_e	Isıl direnç (^{0}C/W)	$R_ı$
Elektrik yükü (C)	Q_e	Isı enerjisi (W.s)	$Q_ı$
Kapasite (F)	C_e	Isıl kapasite (J/^{0}C)	$C_ı$
Akım (A)	I	Isı akış oranı (W)	$\dot{Q}$

Asenkron motorda sıcaklık dağılımı belirlemek üzere Toplu Parametreli Modelin oluşturulması ve çözümüne ilişkin ayrıntılar Bölüm 3.6 da verilmiştir. Toplu parametreli ısıl modelin oluşturulması için asenkron motor, geometrisi ve malzeme özellikleri göz önüne alınarak on alt bileşene ayrılabilir. Her bir bileşenin ısıl direnci ve ısıl kapasitesinin hesaplanmasının ardından bu direnç ve kapasite elemanları gene makinanın geometrisine uygun olarak birleştirilir. Modellemede makinanın mil eksenine göre ve radyal planda simetrik olduğu kabul edilir. Asenkron motorun toplu parametreli modelini oluşturan bileşenler incelenirken, her bir alt bileşen yaklaşık olarak bir silindir biçiminde modellenebilir. Bütün bileşenlerin incelenmesine temel oluşturmak üzere Bölüm 3.5 de anlatılan "Temel Silindirik Bileşen" tanımlanmıştır.

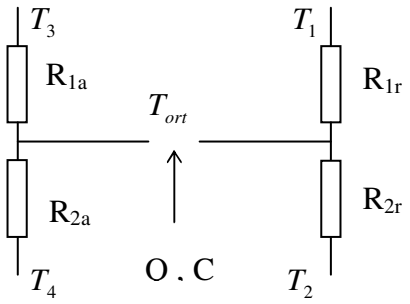
3.5 Temel Silindirik Bileşen

Şekil 3.6. asenkron motorun alt bileşenlerini modellemede temel alınan silindirik yapıyı göstermektedir.



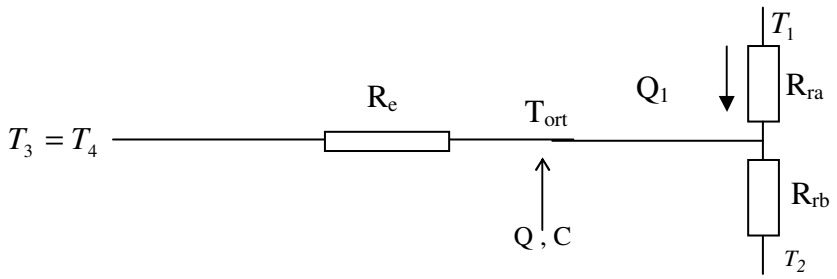
Şekil 3.6: Temel silindirik bileşen [8].

Temel silindirik bileşene dayanarak yapılan modelleme bazı kabullere dayanır. Bu kabullerin ilki, eksenel ve radyal yöndeki ısı aktarımının birbirinden bağımsız olmasıdır. Çevresel ısı aktarımı ise ihmal edilir. Bir diğer kabul ısıl kapasitenin ve ısıl kaynakların geometri boyunca düzgün olarak dağılmış olmasıdır. Son olarak, gerek eksenel gerek radyal yöndeki ısı akışına ilişkin tek bir ortalama sıcaklık değeri tanımlanır. Bu kabullere göre, eksenel ve radyal yöndeki bağımsız ısı aktarımı Şekil 3.7. de verilen ağla modellenir.



Şekil 3.7: Temel silindirik bileşene ilişkin eksenel ve radyal ısıl ağ [8].

Yukarıdaki şekillerde $T_1 ve T_2$ sırasıyla silindirin dış ve iç yüzey sıcaklığı T_3 ve T_4 silindirin iki taban yüzeyinin sıcaklıklarıdır. Silindirin merkezi radyal düzleme göre simetrik olduğu kabulüyle T_3 ve T_4 birbirine eşittir. T_{ort}, bileşenin ortalama sıcaklığıdır. Eksensel ve radyal yöndeki ısı akışına ilişkin ortalama sıcaklık değerleri aynı olduğuna göre Şekil 3.7. de ayrı ayrı gösterilen bu iki akış birleştirilebilir ve simetriden dolayı silindirin yarı uzunluğunun modellenmesi yeterlidir. Şekil 3.8 de temel silindirik bileşene ilişkin indirgenmiş ağ modeli verilmiştir. Şekil 3.8. de görülen dirençlerin değeri aşağıdaki denklemlerle verilmiştir [8, 37].



Şekil 3.8: Temel silindirik bileşene ilişkin indirgenmiş ağ [8].

$$R_{rb} = \frac{1}{4kL\pi}\left(1 - \frac{2r_1^2 \ln\frac{r_2}{r_1}}{r_2^2 - r_1^2}\right) \quad \textbf{(3.47)}$$

$$R_{ra} = \frac{1}{4kL\pi}\left(\frac{2r_2^2 \ln\frac{r_2}{r_1}}{r_2^2 - r_1^2} - 1\right) \quad \textbf{(3.48)}$$

$$R_e = \frac{L}{6k\pi\left(r_2^2 - r_1^2\right)} \quad \textbf{(3.49)}$$

$$C = c(r_1^2 - r_2^2)\pi L \quad \textbf{(3.50)}$$

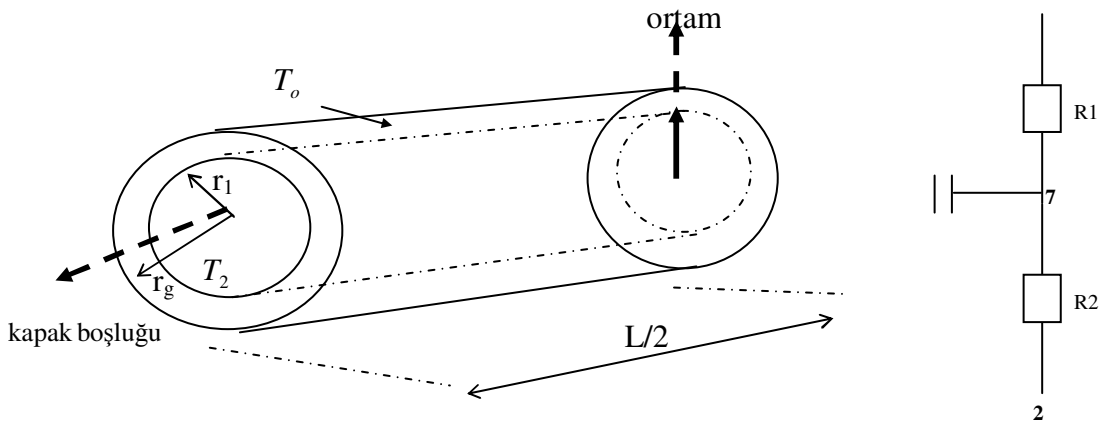
3.6 Toplu Parametreli Eşdeğer Devrenin Oluşturulması

3.6.1 Gövde

Asenkron motorun karkasıyla dış ortam havası arasındaki ısı alış-verişi taşınım yoluyla meydana gelmektedir. Karkas ve hava arasındaki sıcaklık farkı doğal taşınıma yol açarken, harici fanın sağladığı hava akışı zorlanmış taşınıma sebep olur. Şekil 3.9 gövde ile bunu çevreleyen T_0 sıcaklığındaki dış ortam, kapak boşluğu havası (7.düğüm) ve T_2 sıcaklığındaki boyunduruk (2.düğüm) arasındaki ısı alışverişini göstermektedir.

Doğal taşınımla ısı aktarımı Grashof ve Prandtl sayıları kullanılarak hesap yoluyla veya stator sargıları anma akımının % 50–70 i kadar doğru akımla beslenerek deneysel yolla, kolaylıkla bulunabilir. Bu durumda, stator sargılarında harcanan güç P_{DC} , Ortam sıcaklığı T_0 , gövde sıcaklığı T_g ile gösterilirse, doğal taşınımı temsil eden ısıl direnç aşağıdaki gibi hesaplanır

$$R_0 = \frac{T_g - T_0}{P_{DC}} \quad \textbf{(3.51)}$$



Şekil 3.9: Gövde ile boyunduruk, dış ortam ve kapak boşluğu havası arsındaki ısı iletimi ve elektriksel eşdeğer devre.

Zorlanmış taşınıma ilişkin ısıl direncin veya taşınım katsayısının bulunması, Reynolds ve Nusselt sayılarının bulunmasını gerektirir ve bu büyüklüklerin hava hızına bağlı olması nedeniyle karmaşıktır.

$Re< 10^4$ için $Nu=0.66.Re^{0.5}Pr^{0.33}$ **(3.52)**

$Re> 10^4$ için $Nu=0.066.Re^{0.75}Pr^{0.33}$ **(3.53)**

$$R_{0zk} = \frac{L_g}{Nuk_h A_g} \quad \textbf{(3.54)}$$

Yukarıdaki denklemlerde L_g dış karkas uzunluğu, A_g karkas yüzey alanı ve k_h havanın ısıl iletkenlik katsayısıdır. Bileşke direnç, R_0 ve R_{0zk} dirençlerinin paralel bağlanmasıyla hesaplanır. Ancak, asenkron motorun dış yüzeyinde bulunan eksenel soğutma kanallarının varlığı ve bu kanalların kısmen fan kapağı, kısmen bağlantı kutusu ve mekanik bağlantı ekipmanları tarafından bloke edilmiş olması, tek bir hava hızı değerinden bahsetmeyi olanaksız kılar. Hava hız fan tarafından yük tarafına gittikçe, gerek yukarıda bahsedilen blokajlar, gerek hava kaçakları nedeniyle azalmaktadır.

Bu sorun, kanatçıklı dış yüzey hayali bir silindirik yüzeyle değiştirilerek aşılabilir [32]. Gerçek motor dış yüzey alanı A_g , bu yüzeye ilişkin taşınım katsayısı h_g ve silindirik yüzeye ilişkin alan A'_g , olmak üzere , h'_g (3.55) ile bulunur.

$$h'_g = h_g \frac{A_g}{A'_g} \quad \textbf{(3.55)}$$

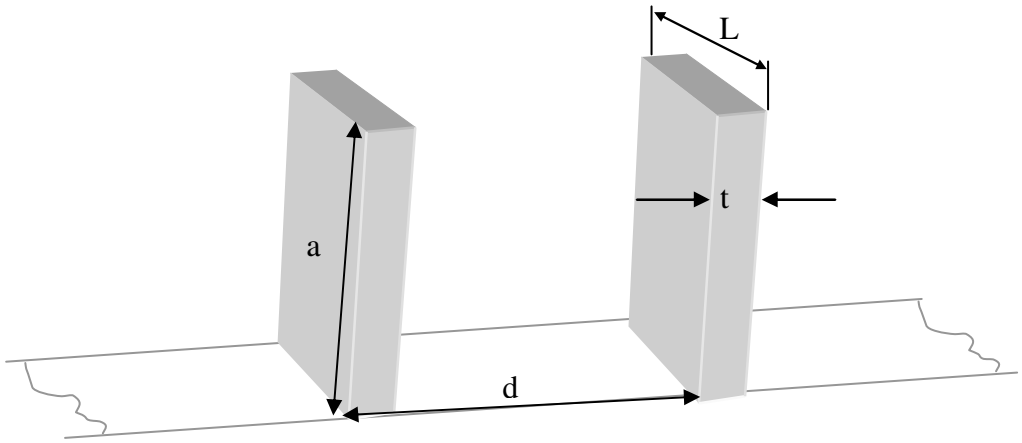
h_g katsayısı, Denklem (3.56) ile verilen D_h, ardışıl iki kanatın oluşturduğu hava yolunun (Şekil 3.10) hidrolik çapı olmak üzere Denklem (3.57) ile hesaplanır.

$$D_h = \frac{2d}{d+h} \tag{3.56}$$

$$a = 0.014767 \frac{L^{0.946}}{D_h^{1.16} v^{0.214}} \quad ,$$

$$h = 284.55 \frac{D_h v}{L_g}(1 - e^{-a}), \tag{3.57}$$

Bir diğer deneysel yaklaşım taşınım katsayısının, motorun sabit yük altında son sıcaklığına ulaşmasından sonra, motorun toplam kayıpları ve karkas-ortam sıcaklık gradyanı kullanılarak bulunmasıdır. Bu şekilde hesaplanan katsayı ile motor dış yüzeyinden doğal ve zorlanmış taşınımın yanı sıra yayınım yoluyla ısı aktarımı tek bir dirençle (R_1) modellenebilir. Bu yaklaşımla elde edilen ısıl direncin Denklem (3.52) kullanılarak hesaplanan dirençle uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 3.10: İki komşu soğutma kanadının oluşturduğu kanalın hidrolik çapı.

Asenkron motorda doğal ve zorlanmış taşınımın olduğu yerde yayınım yoluyla ısı aktarımı da mevcuttur. Bu yolla aktarılan ısı miktarı Stefan-:Boltzmann yasasıyla belirlenir.

$$Q = \varepsilon \sigma A T^4 \tag{3.58}$$

$\sigma = 5.6697 * 10^{-8}$ (W/m^2K^4) Stephan-Boltzmann sabitidir.

ε ideal olmayan yüzeyin yayınım katsayısıdır. Asenkron motorun dökme demir gövdesi için bu katsayı 0.8 değerindedir.

Yayınım yoluyla ısı aktarımına ilişkin direnç taşınım ısıl direncine benzer şekilde belirlenebilir.

$$R_r = 1/(h_r A) \quad \textbf{(3.59)}$$

A motor yüzey alanı, h_r Denklem (3.60) ile verilen film katsayısıdır[9].

$$h_r = \sigma F_f (T^2 + T_o^2)(T + T_0) \quad \textbf{(3.60)}$$

Yukarıdaki denklemde F_f form faktörü, T motor yüzey sıcaklığı, T_o ortam sıcaklığıdır.

Küçük ve orta güçlü kapalı tipte asenkron motorlarda, hızın (dolayısıyla zorlanmış taşınımla ısı aktarımının) çok düşük olduğu durumlar haricinde, Denklem 3.51 ile verilen direncin bileşke taşınım direncine oranla yüksek olması nedeniyle yayınım yoluyla ısı aktarımı ihmal edilebilir [74]. Bu çalışmada incelenen motorda da bileşke R1 direnci 0.25 ^{0}C/W olarak ölçülmüş olup, hesap yoluyla bulunan yayınım direnci 10^2 mertebesindedir.

Makinada kayıplar yolu ile üretilen ısı enerjisinin önemli bir bölümü boyunduruk üzerinden karkasa aktarılır. Yüzey pürüzlülüklerinden dolayı karkasla boyunduruk arasındaki temasın ideal olmaması nedeniyle ısı aktarımı bir temas direnci üzerinden gerçekleşir. Bu direnç taşınım ve yayınım ısıl dirençlerine benzer şekilde bir h_c katsayısı ve temas yüzey alanının çarpımı olarak ifade edilebir. h_c katsayısının değeri, temas eden yüzeylerin cinsine, yüzey pürüzlülüklerine, temas basıncına ve sıcaklığa bağlıdır. Brunot ve Buckland tarafından verilen deneysel bir eğride 0-15x10^6 N/m lik temas direnci aralığında, temas katsayısı 0–5x10^3 W/ ^{0}C m^2 aralığında yaklaşık olarak üstel biçimde artmaktadır [8]. Temas katsayısının bilinmesi durumunda geçiş direncinin değeri, r_1 sac paketinin dış çapı olmak üzere Denklem (3.60) ile hesaplanır.

$$R_2 = \frac{1}{\pi h L r_1} \quad \textbf{(3.60)}$$

Denklem (3.61) gövdenin ısıl kapasitesini vermektedir. M_k ve M_f sırasıyla gövde ve kapağın ağırlığı, c_k ve c_f ise öz ısılarıdır.

$$C_1 = M_k c_k + \frac{1}{2} M_f c_f \qquad \textbf{(3.61)}$$

3.6.2 Stator manyetik devresi

Stator manyetik devresi, ısıl olarak paralel bağlı bir dizi dolu silindir biçiminde modellenebilecek dişler ve dişler çıkarıldıktan sonra geride kalan içi boş silindirik yapıdaki boyunduruktan oluşur. Makinanın demir kayıpları boyunduruk ve dişler arasında ağırlıklarıyla orantılı olarak dağıtılmıştır. Boyunduruk ile radyal yönde stator dişleri (düğüm3), stator sargısı (düğüm 4) ve gövde arasında (düğüm 1), eksenel yönde kapak boşluğu havası arasında (düğüm 7) iletim yoluyla ısı aktarımı meydana gelmektedir. Stator dişleri radyal yönde stator boyunduruğu (düğüm 2) ve hava aralığı (düğüm 5), eksenel yönde ise kapak boşluğu havası ile ısıl bağlantıyı sağlayan dirençlerin yanı sıra stator sargısından kaynaklanan çevresel ısı aktarımını temsil eden ek bir dirençle modellenir. Şekil 3.11 stator manyetik devresindeki ısı aktarımına ilişkin eşdeğer devreyi göstermektedir

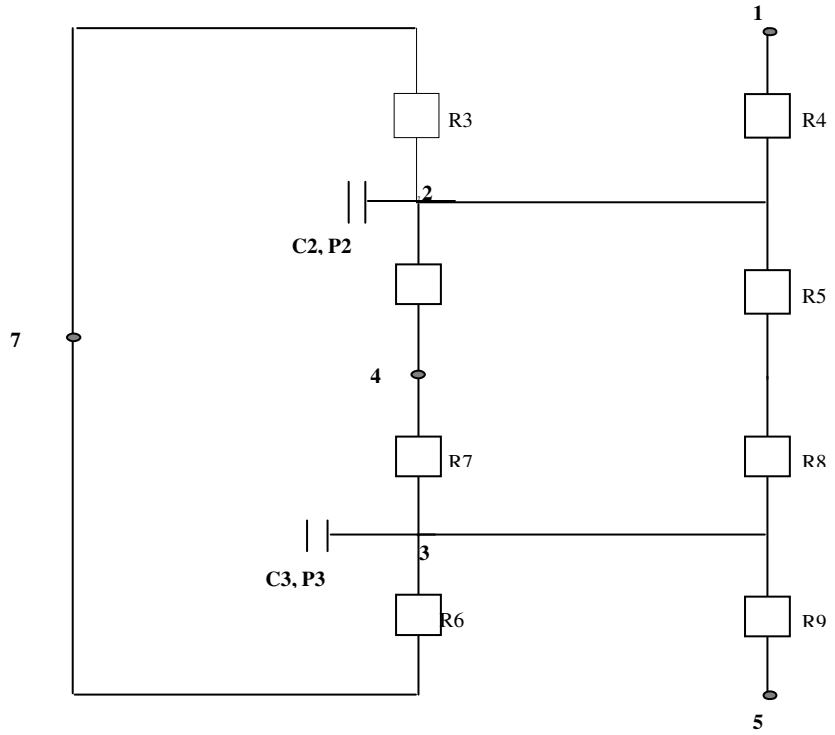
Elektrik motorlarında kullanılan manyetik sac ısı iletimi açısından anizotropiktir. Radyal yöndeki ısı iletim katsayısı, eksenel yöndeki ısı iletim katsayısından 20 – 40 kat daha büyük değerdedir. Çevresel yöndeki ısı iletim katsayısı ise eksenel yöndekinin yarısından daha azdır. L boyunduruk uzunluğu, r_1 sac paketi dış yarıçapı, r_2 stator diş dibi yarıçapı, k_{la} laminasyon eksenel ısıl iletkenlik katsayısı, k_{lr} laminasyon radyal ısıl iletkenlik katsayısı, ρ_l laminasyon malzemesi yoğunluğu, r_3 stator diş iç yarıçapı, α_d eşdeğer kutup yayı uzunluğunun diş adımına oranı, n diş sayısı, $\dot{q}_2$ ve $\dot{q}_3$ boyunduruğun ve dişlerin birim hacmindeki ısı üretimi olmak üzere ısıl dirençler ve kapasite aşağıda verilmiştir [8, 9, 15].

$$R_7 = \frac{\pi \alpha_d (r_2^2 - r_3^2)}{k_{lr} L (r_2 - r_3)^2 n^2} \qquad \textbf{(3.62)}$$

$$R_8 = \frac{1}{2\pi k_{lr} \alpha_d L} [1 - \frac{2 r_3^2 \ln(\frac{r_2}{r_3})}{r_2^2 - r_3^2}] \qquad \textbf{(3.63)}$$

$$R_9 = \frac{1}{2\pi k_{lr} \alpha_d L} [\frac{2 r_2^2 \ln(\frac{r_2}{r_3})}{r_2^2 - r_3^2} - 1] \qquad \textbf{(3.64)}$$

$$C_3 = \frac{c_l \rho_l L \pi \alpha_d (r_2^2 - r_3^2)}{2} \quad \textbf{(3.65)}$$



Şekil 3.11: Manyetik devredeki ısı aktarım yollarına ilişkin elektriksel eşdeğer devre.

3.6.3 Stator sargısı

Oluk sargıları, ısı iletim katsayıları birbirinden farklı olan, iletkenler, iletkenler arası boşluklar, iletken ve bobin yalıtımları, oluk örtüsü ve bununla oluk çeperi arasındaki boşlukların oluşturduğu karmaşık bir yapıdır. Modelde iletkenler ve bunlara ilişkin yalıtkanlar ve iletkenler arasındaki boşluklar, alanı oluk alanına eşit homojen bir çubukla temsil edilmiştir (Şekil 3.12). Eksenel yöndeki ısı iletim katsayısı sargı iletkeninin ısı iletim katsayısına, radyal yöndeki ısı iletim katsayısı ise yalıtkan malzemenin ısıl iletkenliğin 2–3 katına eşit olarak alınabilir. Mellor [8] bu oranı 2.5 olarak vermiştir. Boglietti, modelin deneysel sonuçlarla uyum göstermesini sağlayacak şekilde bu büyüklüğün değiştirilmesini önermektedir [20]. Staton, 4, 7.5, 15, 30 ve 55 kWlık 4 kutuplu kapalı tipte asenkron motorlarda yaptığı çalışmalar sonucu oluk yalıtkanı da içeren Denklem (3.66) ile verilen ampirik formülü önermektedir.

$k_{cu,i}=0.02997+0.1076*k_f$ **(3.66)**

k_f oluk doldurma katsayısı olup, sıfıra eşit olması durumunda $k_{cu,i}$ havanın ısıl iletim katsayısına eşit olmaktadır.Söz konusu güç aralığında kapalı tipte asenkron motorlarda k_f $0.35 \div 0.45$ arasındadır. Oluk içerisindeki yalıtkan malzemelerin kalınlıkları yaklaşık olarak öngörülebiliyorsa, eşdeğer ısıl iletkenlik Denklem (3.67) ile de hesaplanabilir.

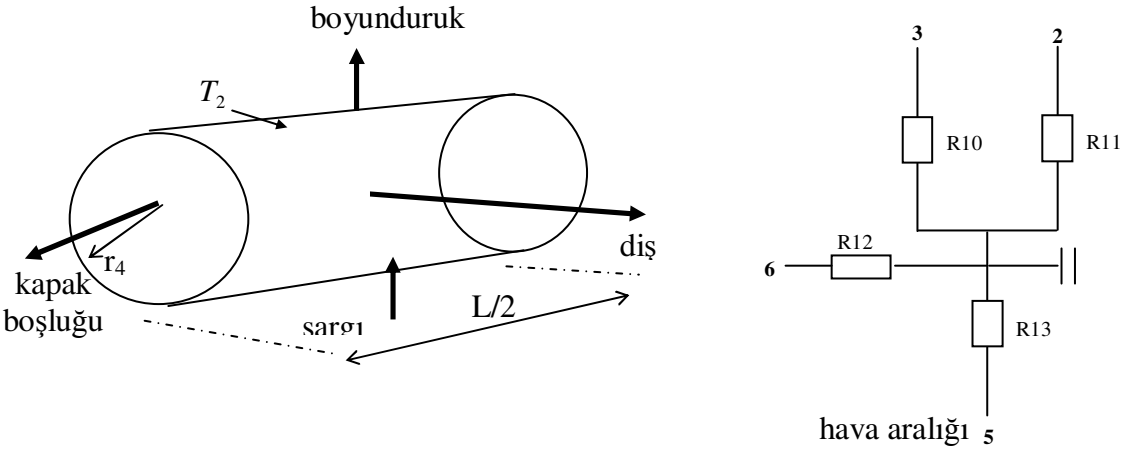
$$k_{cu,i} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{d_3}{k_3}} \qquad \textbf{(3.67)}$$

Oluktaki toplam yalıtkan kalınlığı d_1, d_2, d_3 ün toplamı olarak alınabilir veya Denklem (3.68) ile bulunabilir.

$$d_{eş} = \frac{A_{oluk} - A_{cu}}{Ç_o L} \qquad \textbf{(3.68)}$$

Yukarıdaki denklemde $Ç_o$ oluk iç yüzeyinin çevresi, L oluk uzunluğudur. Denklem (3.66)-(3.68) kullanılarak, stator sargısıyla manyetik devre arasında tek bir direnç aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$R_{eş} = \frac{d_{eş}}{k_{cu,i} A_{oluk}} \qquad \textbf{(3.69)}$$



Şekil 3.12: Stator sargısı ile boyunduruk, hava aralığı, sargı başı ve dişler arsındaki ısı iletimi ve elektriksel eşdeğer devre.

Stator sargısında oluşan bakır kayıpları modelde bir ısıl kaynakla temsil edilir İletkenler ve bunlara ilişkin yalıtkanlarla, iletkenler arasındaki boşlukları temsil eden, alanı oluk alanına eşit homojen çubuğun çapı r_4 ile gösterilmiştir. R14 direnci stator sargısı ile boyunduruk arasındaki ısıl direnci göstermektedir. Bu direnç iletkenler

üzerindeki vernik tabakasının meydana getirdiği direnç ile sargı ve boyunduruk arasındaki oluk yalıtkanın dirençlerinin seri bağlantısından oluşur. Vernik ve yalıtkanın ısıl iletkenliği bakır malzemeye göre çok düşük olduğu için bakır malzemenin radyal yönde ısı akışına karşı gösterdiği direnç ihmal edilmiştir. Sargının silindirik olarak modellenmesi nedeniyle stator sargısı ile diş arasındaki ısıl direnç de aynı şekilde hesaplanır. Ancak sargı her iki yandan eşit sıcaklıktaki iki dişe bağlı olduğu için bu dirençler paralel bağlı olarak kabul edilir. Dolayısıyla sargı ile dişler arasındaki ısı iletimini temsil eden R12 direnci R14 direncinin yarısına eşittir.

$$R_{10} = \frac{2d_i}{\pi k_i L r_4 n} + \frac{1}{2\pi k_v LFn} \quad \textbf{(3.70)}$$

$$R_{11} = \frac{4d_i}{\pi k_i L r_4 n} + \frac{1}{\pi k_v LFn} \quad \textbf{(3.71)}$$

$$R_{12} = \frac{L}{6k_c A_c n} \quad \textbf{(3.72)}$$

$$R_{13} = \frac{1}{\pi k_v LFn} \quad \textbf{(3.73)}$$

$$C_4 = \frac{c_c \rho_c LnA_c}{2} \quad \textbf{(3.74)}$$

Yukarıdaki direnç ifadelerinde kullanılan sembollerin anlamları aşağıda listelenmiştir.

r_4:eşdeğer stator sargı yarıçapı

c_c: sargı iletkeni öz ısısı

k_{lc}: bakırın ısıl iletkenlik katsayısı

A_c: oluk içindeki toplam bakır kesit alanı

N:oluk sayısı

d_i: yalıtkan kalınlığı

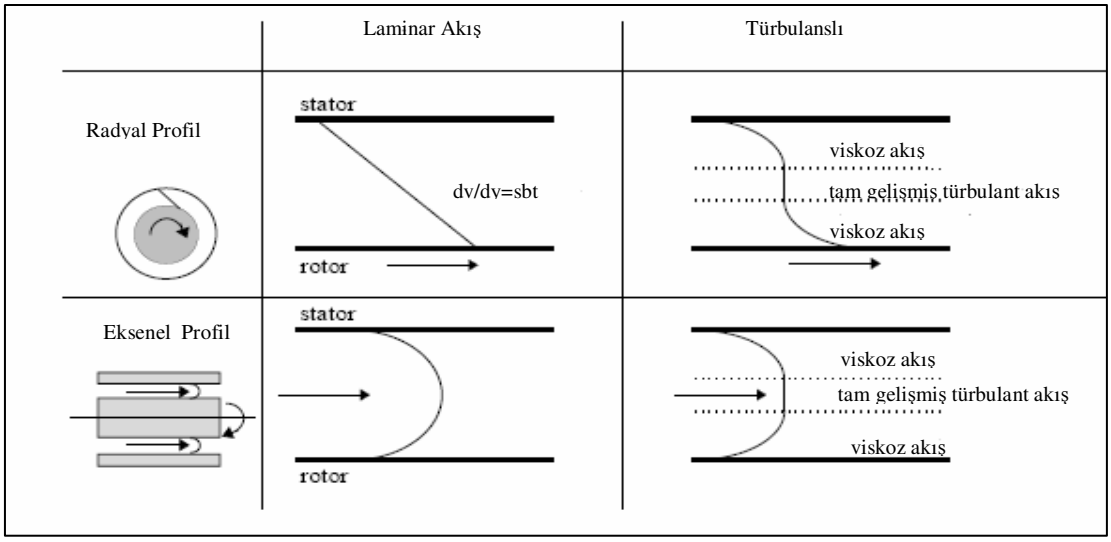
V_c: sargıdaki toplam bakır hacmi

k_{lv}: verniğin ısıl iletkenlik katsayısı

k_i: oluk yalıtkanının ısıl iletkenlik katsayısı

3.6.4 Hava aralığı

Hava aralığındaki ısı aktarımı incelenirken hava akışının niteliği belirlenmelidir. Şekil 3.13 hava aralığındaki eksenel ve çevresel yöndeki hız profillerini göstermektedir. Akışın karakteristiği, hava hızı ve hava aralığı uzunluğu tarafından belirlenmekte olup, düşük hız ve/veya küçük hava aralığı durumunda viskoz sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle akış laminardır. Yüzey pürüzlülüğü akışın karakterini belirleyen bir diğer faktördür. Akışın laminar olduğu durumda hız doğrusal olarak değişmektedir. Maksimum hız değeri havanın rotorla temas ettiği yüzeyde olup, rotorun çevresel hızına eşittir. Stator yüzeyinde hız sıfıra düşer. Viskoz sürtünmenin etkisiyle Taylor vortisleri olarak adlandırılan ve merkezkaç kuvvetlerin etkisiyle oluşan hava çevrimlerine laminar akışta rastlanmaz. Türbülanslı akışta stator ve rotor yüzeylerindeki ince bir hava katmanı içerisinde viskoz kuvvetler hakim olup, hava aralığının orta bölümlerinde akış kaotik karakterdedir.



Şekil 3.13: Hava aralığında hız profilleri [72].

Hava aralığındaki akış için boyutsuz Reynolds sayısı Denklem (3.75) ile hesaplanır.

$$\mathrm{Re} = \frac{\delta * v * \rho_{hava}}{\mu_{hava}} \qquad \textbf{(3.75)}$$

δ, v, ρ ve μ sırasıyla hava aralığı uzunluğu, hava hızı, yoğunluğu ve viskozitesidir. Akışın karakteristiğini belirlemek için kullanılan kriter Taylor sayısı olup, Reynolds sayısı, hava aralığı uzunluğu ve rotor dış çapına bağlı olarak aşağıda verilmiştir. Taylor sayısının kritik değeri 1.7×10^3 alınabilir [72].

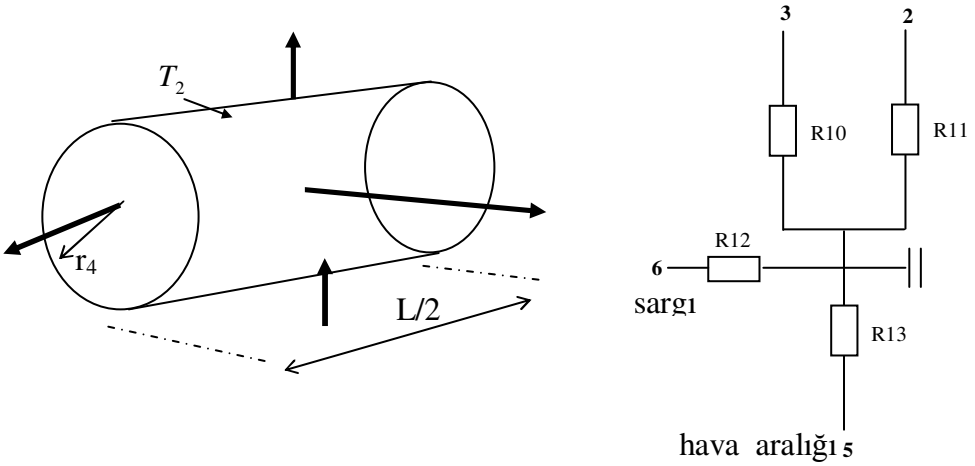
$$Ta = \mathrm{Re}^2 \frac{r_r}{\delta} \quad \textbf{(3.76)}$$

Denklem (3.77) deki koşul sağlandığında hava akışının laminar olduğu kabul edilir [7w].

$$41 < \mathrm{Re}\sqrt{\frac{r_r}{\delta}} \quad \textbf{(3.77)}$$

Laminar akış durumunda Nusselt sayısının değeri N_{Nu}=2 dir [72].

Yukarıdaki denklemle verilen durumda, hava aralığındaki ısı aktarımının iletim yoluyla olduğu da kabul edilebilir.Bu durumda rotordan statora tek bir ısıl direnç üzerinden ısı aktarımı olacaktır. R_δ ile gösterilen bu direnç Denklem (5.78) de verilmiştir.



Şekil 3.14: Hava aralığı, stator sargısı, rotor sargısı ve dişler arasındaki ısı iletimi.

$$R_\delta = \frac{1}{2\pi k_h L}\ln(\frac{r_{is}}{r_{or}}) \quad \textbf{(3.88)}$$

$41 < \mathrm{Re}\sqrt{\frac{r_r}{\delta}} < 100$ ise, gelişmekte olan akış, $\mathrm{Re}\sqrt{\frac{r_r}{\delta}} > 100$ ise, tam türbülanslı akış söz konusudur ve Nusselt sayısı sırasıyla Denklem (3.79) ve (3.90) ile verilmiştir.

$$N_{Nu} = 0.212 R_e^{0.63} P_r^{0.27} \quad \textbf{(3.89)}$$

$$N_{Nu} = 0.386 R_e^{0.5} P_r^{0.23} \quad \textbf{(3.80)}$$

r_5 rotor dış çapı olmak üzere hava aralığı (düğüm 5) ile stator sargısı (düğüm 4), stator dişler (düğüm 3) ve rotor sargısı (düğüm 8) arasındaki ısı iletimini temsil eden direnç değerleri Denklem (3.81) – (3.83) ile verilmiştir

$$R_{14} = \frac{1}{\alpha_d \pi r_3 L h_2} \tag{3.81}$$

$$R_{15} = \frac{1}{(1-\alpha_d)\pi r_3 L h_2} \tag{3.82}$$

$$R_{16} = \frac{1}{\pi r_5 L h_2} \tag{3.83}$$

Türbülanslı akışta hava aralığında sürtünmeden kaynaklanan kayıplar, Denklem (3.84) ile hesaplanabilir.

$$p_{hava} = \frac{0.0152 k \rho \pi \omega^3 r_r^4 \delta}{\mathrm{Re}^{0.24}} \tag{3.84}$$

Yukarıdaki denklemde k yüzey pürüzlülük katsayısıdır ve ideal düz bir yüzeyde bire eşittir. Tamamen kapalı tipte, hava ile soğuyan, küçük veya orta büyüklükte bir asenkron motorda, hava aralığındaki kayıpların motordaki sıcaklık dağılımı üzerinde etkili olabilmesi için hızın çok yüksek olması gereklidir. İncelenen motorun hava aralığındaki kayıp, çok küçük olması nedeniyle ihmal edilmiştir.

3.6.5 Stator sargı başları

Sargı başları, dış çapı ortalama oluk çapına eşit olan bir halka biçiminde modellenebilir. Düzensiz yapısı ve nedeniyle modelleme açısından en sorunlu bölgelerdendir. Teknik çizimlerde genel olarak bu yapının topolojisi hakkında bilgi verilmemektedir. Toplam sargı hacmi biliniyorsa, bu hacimden oluk sargısı hacmi çıkartılarak halkanın hacmi ve kesit çapı bulunabilir.

Lg gövde uzunluğu, L stator saç paketi uzunluğu ve r_{is} stator iç çapı olmak üzere sargı başının kapak boşluğu ile temas yüzeyinin alanı Denklem (3.85) ile hesaplanır.

$$A_{sb1}=(L_g-L)2\pi r_{is} \tag{3.85}$$

Kapak boşluğu taşınım katsayısı (3.86) da verilmiştir.

$$h = k_1(1+k_2 v^{k3}) \tag{3.86}$$

Mellor [8], bu katsayıları k_1= 13.5, k_2 =0.29, k_3 =1 olarak kullanmıştır. Bu bölgedeki hava hızı Denklem 3.87 kullanılarak yaklaşık olarak belirlenebilir.

$$v = r_m \omega_r \eta \quad \textbf{(3.87)}$$

r_m, kafesteki kanatçıkların oluşturduğu fanın eşdeğer yarıçapı, ω_r rotor hızı, η fan verimidir.

$$h_3=13.5(0.29 r_{or}\omega\eta + 1) \quad \textbf{(3.88)}$$

Taşınım ısı iletimi direncinin tanımından

$$R_{67(1)}=\frac{1}{A_{sb1}h_3} \quad \textbf{(3.89)}$$

bulunur.

Sargı başı ile oluk sargısı ve kapak boşluğu havası arasındaki ısıl dirençler ile sargı başının ısıl kapasitesi Denklem. (3.90) –(3.93) ile hesaplanır [8, 9].

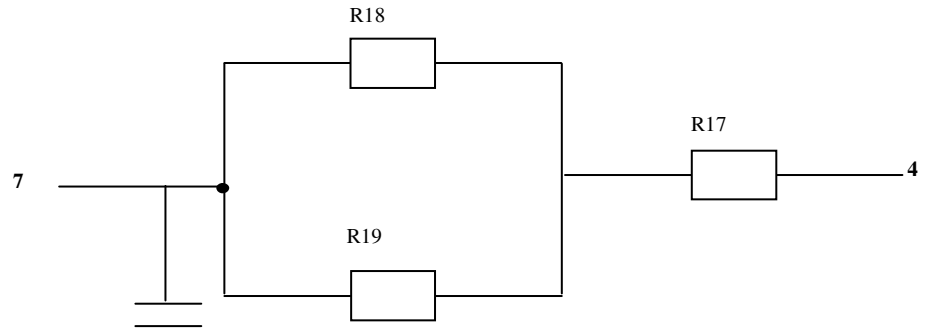
$$R_{17} = \frac{l_0}{nA_c k_c} \quad \textbf{(3.90)}$$

$$R_{18} = \frac{1}{16\pi^2 RFk_v} \quad \textbf{(3.91)}$$

$$R_{19} = \frac{r_6^2}{8\pi^2 r_4^2 l_0 nFk_v} \quad \textbf{(3.92)}$$

$$C_6 = \frac{c_c \rho_c (1-\alpha) V_c}{2} \quad \textbf{(3.93)}$$

Yukarıdaki denklem takımında α, oluk sargısı hacminin sargı başı hacmine oranı, R sargı başı toroidinin çapı ve r6 sargı başı toroidinin kesit çapıdır. Şekil 3.15 sargı başı ile oluk sargısı ve kapak boşluğu havası arasındaki ısı aktarım şemasını ve ısı aktarımını temsil eden elektriksel eşdeğer devreyi göstermektedir.



Şekil 3.15: Sargı başı ile oluk sargısı ve kapak boşluğu havası arasındaki ısı aktarımına ilişkin eşdeğer devre.

3.6.6 Kapak boşluğu havası

Kapak boşluğu içinde dolaşan hava eşit bir sıcaklık dağılımına sahiptir. Rotor soğutma kanallarıyla olan ısı aktarımı hariç, temasta olduğu tüm yüzeylerle ısı aktarımı için h_{3r} kullanılır. Temas yüzeyi A olmak üzere kapak boşluğu havası ile temas olduğu yüzeyler arasındaki ısıl direnç aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$R = \frac{1}{h_3 A} \tag{3.94}$$

Sargı başları ile karkas arasında kalan bölgede hava dolaşım hızının düşük olması sebebiyle, bu bölgede ısının iletim yoluyla aktarıldığı kabul edilmiştir. Bu bölge dış çapı stator dış çapına, , uzunluğu sargı başı uzunluğuna eşit, iç çapı ise stator diş dibi çapından 0.4–0.7 oranında büyük içi boş bir hava silindiri olarak incelenmiştir. İç ve dış çaplar arasındaki farkın ve havanın ısı iletim katsayısının düşük olması nedeniyle silindir, ısı akışına karşı yüksek direnç göstermektedir.

$$R_{khg} = \frac{1}{2\pi(L_g - L)} \ln\left(\frac{r_{oy}}{r_{oy} - \alpha_2 h_{boy}}\right), \alpha_2 = 0.4\text{–}0.7 \tag{3.95}$$

Yan kapaklar ile kapak boşluğu havası arasındaki ısıl direnç aşağıda verilmiştir.

$$R_{khyk} = \frac{1}{h_3 2 * pi * (r_1 + t_g)^2} \tag{3.96}$$

Şekil 3.16 da gösterilen R20 direnci yukarıda verilen iki direncin paralel bağlanmasıyla elde edilir. Pratikte R_{khg} direncinin R_{khyk} direncinden 20–40 kat büyük olması nedeniyle

$$R20 = R_{khyk} \tag{3.97}$$

kabulü yapılabilir. Stator boyunduruğu ve dişlerinin hava aralığı ile temas yüzey alanları, Denklem. (3.98)–(3.99) ile hesaplanır. Bu çalışmada incelenen motor için stator sargısı ve sargı başının bu bölgeleri kısmen örtmesi nedeniyle temas alanında yaklaşık olarak %50 oranında bir azalma olduğu hesaplanmıştır.

$$A_{sb} = \pi \frac{r_1^2 - r_2^2}{2} \quad \textbf{(3.98)}$$

$$A_{sd} = \pi \frac{r_2^2 - r_3^2}{2} - \frac{1}{2} Ns.A_{oluk} \quad \textbf{(3.99)}$$

Stator oluk sargısının kapak boşluğu havası ile doğrudan teması olmayıp, stator sargı başı toroidinin temas yüzey alanı aşağıda verilmiştir.

$$A_{ssb} = 2\pi(r_1^2 - (\frac{r_2 - r_3}{2})^2) \quad \textbf{(3.100)}$$

Rotor kısadevre halkası kafes sargısının bir parçası olarak kabul edilmiş ve dolayısıyla rotor sargısının kapak boşluğu havası ile temas yüzey alanı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$A_{rk} = pi(\frac{D_{ho}^2 - D_{hi}^2}{4} + n_{kr} * h_{kr} * (2w_{kr} + w_{kr}^2)) \quad \textbf{(3.101)}$$

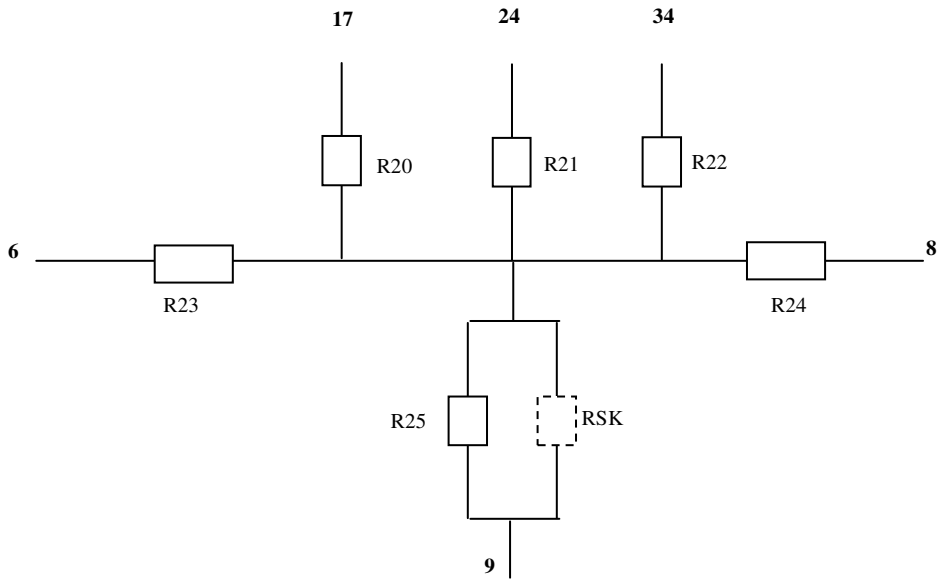
Yukarıdaki denklemde D_{ho} ve D_{hi} kısadevre halkasının dış ve iç yarıçapları, n_{kr}, h_{kr}, w_{kr} sırasıyla rotor üzerinde bulunan kanatçıkların sayısı, yüksekliği ve genişliğidir. Şekil 3.16 da kesikli çizgiyle gösterilen R_{SK}, rotor soğutma kanallarının bulunması durumunda tanımlıdır. Bu çalışmada incelenen motorda soğutma kanalı bulunmamaktadır. Ayrıca kısadevre halkasının rotor kafesinin bir parçası olarak tanımlanması ve incelenen motorda rotor boyunduruğunu tamamen örtmesi nedeniyle R25 direnci de sonsuzdur.

$$R_{21} = \frac{1}{A_{sb} h_{3r}} \quad \textbf{(3.102)}$$

$$R_{22} = \frac{1}{A_{sd} h_{3r}} \quad \textbf{(3.103)}$$

$$R_{23} = \frac{1}{A_{ssb} h_{3r}} \quad \textbf{(3.104)}$$

$$R_{25} = \frac{1}{A_{rk} h_{3r}} \quad \textbf{(3.105)}$$



Şekil 3.16: Kapak boşluğu havası ve temas ettiği yüzeyler arasındaki ısı aktarımı.

3.6.7 Rotor sargısı

Rotor sargısı rotor demirinin çevresini saran ve hacmi kafes çubuklarının toplam hacmine eşit tek parça bir silindir olarak modellenir. Rotor sargısına ilişkin düğüme rotordaki bakır kayıplarını temsil eden bir ısıl kaynak bağlıdır. Rotor sargısı ile rotor demiri arasında iletim yoluyla ısı aktarımı olurken, sargı yüzeyinden hava aralığı ve kapak boşluğu havasına taşınım yoluyla ısı aktarımı gerçekleşir.

Şekil 3.17 rotor sargısı ile rotor boyunduruğu, hava aralığı ve kapak boşluğu arasındaki ısı iletimi ve buna ilişkin elektriksel eşdeğer devreyi göstermektedir.

Şekil 3.17.b deki dirençlerin hesabı Denklem (3.106)-(3.109) da verilmiştir [8,9].

r_7: kısadevre halkası iç yarıçapı

r_8: eşdeğer rotor sargı yarıçapı

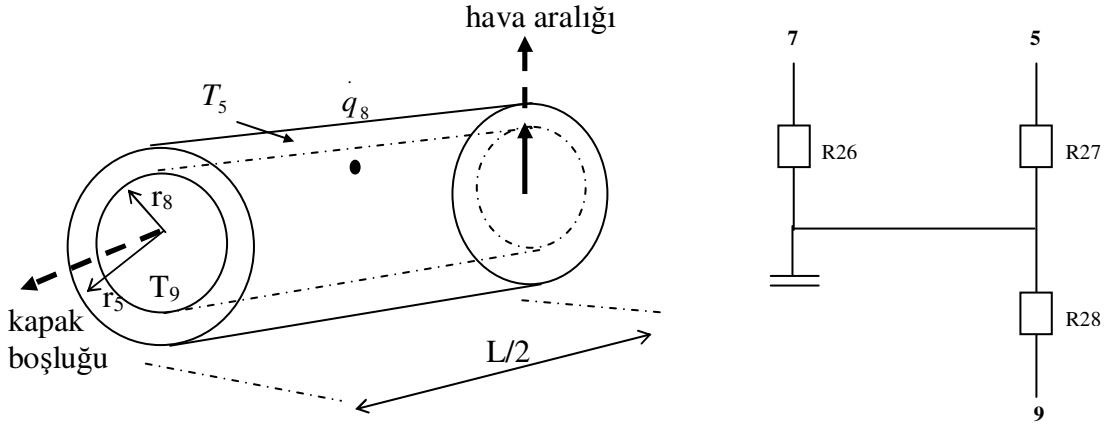
ρ_a:alüminyum yoğunluğu

k_a: alüminyumun ısıl iletkenlik katsayısı

V_e: kısadevre halkasının hacmi

Lr: rotor uzunluğu

le: sargı başı bağlantı bacaklarının uzunluğu



Şekil 3.17: Rotor sargısı ile rotor boyunduruğu, hava aralığı ve kapak boşluğu arasındaki ısı iletimi ve elektriksel eşdeğer devre.

$$R_{26} = \frac{L_r}{6\pi k_a L_r (r^2{}_5 - r^2{}_8)} + \frac{l_e}{\pi k_a L_r (r^2{}_5 - r^2{}_7)} \quad \textbf{(3.106)}$$

$$R_{27} = \frac{1}{2\pi k_a L_r}[1 - \frac{2r_8^2 \ln(\frac{r_5}{r_8})}{r_5^2 - r_8^2}] \quad \textbf{(3.107)}$$

$$R_{28} = \frac{1}{2\pi k_a L_r}[\frac{2r_5^2 \ln(\frac{r_5}{r_8})}{r_5^2 - r_8^2} - 1] \quad \textbf{(3.108)}$$

$$C_8 = c_a \rho_a (\frac{L_r \pi (r_5^2 - r_8^2)}{2} + V_e) \quad \textbf{(3.109)}$$

3.6.8 Rotor manyetik devresi

Rotor demiri homojen bir silindir olarak ele alınır. Rotor sargısını temsil eden silindirin çapının belirlenmesiyle rotor çekirdeğinin geometrisi de belirlenmiş olur. Asenkron motorun sürekli hal çalışmasında rotordaki demir kayıpları ihmal edilir. Motorun yol alması sırasında düşük devir hızlarında rotor demir kayıpları büyük değerlere ulaşabilir. Ancak çok büyük eylemsizlik momentine sahip sistemlerin tahriki dışında, yol alma zamanının son derece kısa olması nedeniyle rotorda oluşabilecek demir kayıplarının modelde bir ısı kaynağı olarak temsil edilmesine

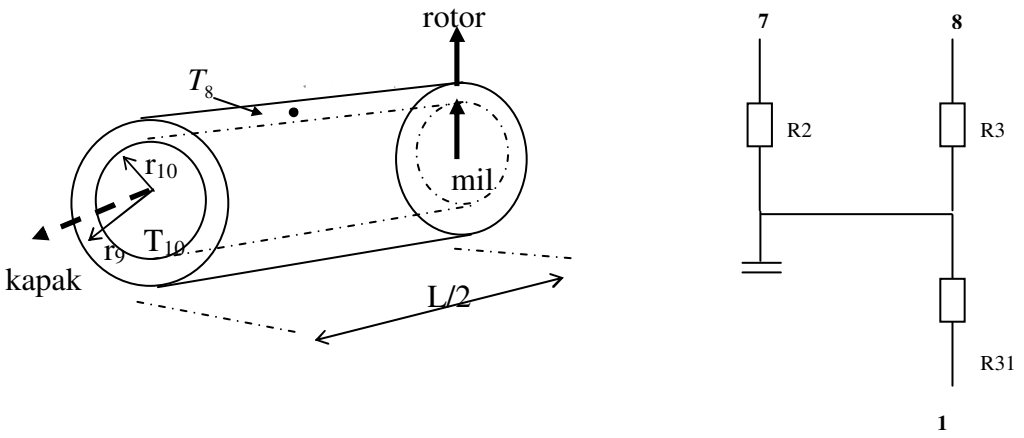
gerek yoktur. Şekil 3.18.b deki dirençlerin hesabı aşağıda verilmiştir. Bu denklemlerde r_9 mil yarıçapı, r_{10} soğutma kanallarının yarıçapı, m kanal sayısıdır.

$$R_{29} = \frac{L_r}{6\pi k_{le} L(r^2{}_8 - r^2{}_9 - mr_{10}^2)} \tag{3.110}$$

$$R_{30} = \frac{r^2{}_8 - r^2{}_9}{2\pi k_{lr} L(r^2{}_8 - r^2{}_9 - mr_{10}^2)}[1 - \frac{2r_9^2 \ln(\frac{r_8}{r_9})}{r^2{}_8 - r^2{}_9}] \tag{3.111}$$

$$R_{31} = \frac{r^2{}_8 - r^2{}_9}{2\pi k_{lr} L(r^2{}_8 - r^2{}_9 - mr_{10}^2)}[\frac{2r_8^2 \ln(\frac{r_8}{r_9})}{r^2{}_8 - r^2{}_9} - 1] \tag{3.112}$$

$$C_9 = \frac{c_l \rho_l L\pi(r^2{}_8 - r^2{}_9 - mr_{10}^2)}{2} \tag{3.113}$$



Şekil 3.18: Rotor boyunduruğu, rotor sargısı ve mil arasındaki ısı iletimi.

3.6.9 Mil

Rotor demiri ve yataklar üzerinden rotor gövdesi ile ısıl bağlantısı olan içi dolu silindirik bir yapıdır. Mil ile gövde arasındaki R32 ısıl direnci ile mil ile rotor sacı arasındaki R33 direnci ve milin ısıl kapasitesinin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler aşağıdadır.

$$R_{32} = \frac{1}{2\pi k_s L_r} + \frac{l_m}{2\pi k_s r^2{}_9} \quad \textbf{(3.114)}$$

$$R_{33} = \frac{1}{4\pi k_s l_b} + \frac{l_m}{2\pi k_s r^2{}_9} \quad \textbf{(3.115)}$$

$$C_{10} = \rho_s c_s \pi r_9^2 (l_m + \frac{1}{2} l_b + \frac{1}{6} L_r) \quad \textbf{(3.116)}$$

3.6.10 Isıl eşdeğer devre denklemleri ve çözümü

10 düğümlü modelde i. düğümle j. düğüm arasındaki toplam dirençler (R_{DiDj}), (3.127) denklem takımıyla verilmiştir.

R_{D2D3} = R2+R4	R_{D5D8} = R16+R27	
R_{D2D3} = R5+R8	R_{D1D7} = R20	
R_{D2D4} = R12	R_{D6D7} = (1/(1/R18+1/R19))+R23	
R_{D2D7} = R3+R21	R_{D7D8}=R24+R26	**(3.117)**
R_{D3D4} = R7+R10	R_{D8D9} = R30	
R_{D3D7} = R6+R22	R_{D9D10} = R31+R32	
R_{D3D5} = R9+R14	R_{D7D9} = R25+R29	
R_{D4D5} = R13+R15	R_{D1D10}=R33	
R_{D4D6} = R11+R17		

i. düğümle j. düğüm arasındaki ısıl iletkenlik ısıl direncin tersi olarak tanımlanır.

$$g_{ij} = \frac{1}{R_{DiiD}} \quad \textbf{(3.118)}$$

g_{ii} i.düğüme bağlı ısıl iletkenliklerin toplamıdır.

g_{11}=g0 +g12+g17+g110	g_{66}=g46+g67	
g_{22}=g12+g23+g24	g_{77}=g17+g79+g67+g78+g37	
g_{33}=g23+g34+g35+g37	g_{88}=g58+g78+g89	**(3.119)**
g_{44}=g24+g34+g45+g46	g_{99}=g79+g910+g89	
g_{55}=g35+g45+g58	$g1_{00}$=g110+g910	

Hava aralığı ve kapak boşluğu havası hariç her bir alt bileşen birer ısıl kapasite elemanına sahiptir.Havanın kg/m^3 olarak verilen yoğunluğunun, demir, bakır ve alüminyuma göre çok düşüktür. Öte yandan hava aralığı ve kapak boşluğu havası hacminin motorun madeni parçalarını hacmine kıyasla küçüktür.Sonuç olarak hava aralığı ve kapak boşluğu havasının ısıl kapasiteleri düşüktür.Bu iki değerin diğer 8 düğümün kapasite değerlerine kıyasla çok küçük olması nedeniyle, Matlab'da çözüm sırasında, köşegen kapasite matrisinin tersi alınamamaktadır. 10 düğüm ve 8 kapasite bileşeni olması nedeniyle geçici rejim denkleminin çözümü mümkün değildir. Dolayısıyla 5. ve 7. düğümler matematiksel olarak elimine edilirler.5. düğümün ortadan kaldırılabilmesi için bu düğüm üzerinden birbirlerine bağlı olan stator sargısı ve dişler ile rotor sargısı birbirine bağlayan ısıl geçirgenlikler aşağıdaki gibi hesaplanır.

g48d=g45*g58/g55; **(3.120)**

g38d=(g35*g58/g55) **(3.121)**

Benzer şekilde 7.düğümün iptal edilebilmesi için de gövde(1.düğüm), stator dişleri(3.düğüm), stator sargı başı(6. düğüm) , rotor sargı ve sac paketinin birbirlerine bağlanması gerekmektedir.

g11=g11-(g17*g17/g77)

g13=g37*g17/g77

g16=g17*g67/g77

g18=g17*g78/g77

g19=g17*g79/g77

g33=g33-(g35*g35/g55)-g37*g37/g77

g36=g37*g67/g77

g38=(g35*g58/g55)+g37*g78/g77

g39=g37*g79/g77

g44=g44-(g45*g45/g55)

g68=g67*g78/g77 **(3.122)**

g69=g67*g79/g77

g88=g88-(g58*g58/g55)-g78*g78/g77;

g89=g89+(g78*g79/g77);

g99=g99-(g79*g79/g77)

Şekil 3.19 da, 1. düğüm karkas, 2.düğüm stator boyunduruğu, 3. düğüm stator dişleri, 4. düğüm stator sargısı, 6.düğüm hava aralığı, 8. düğüm rotor sargısı, 9. düğüm rotor nüvesi ve 10. düğüm mili temsil etmektedir. Bu düğümlere bağlı ısıl kapasitelerin yanı sıra, düğüm 2, 3, 4, 6 ve 8 e sargılardaki bakır ve boyunduruktaki demir kayıplarını temsil eden birer kaynak bağlanacaktır. Bu kaynaklar Denklem

(3.133)'de P_i ile gösterilmiştir. Düğümler arasındaki direnç elemanları, bu iki düğümün temsil ettiği makine kısımları arasında ısı akışına gösterilen direnci temsil etmektedir.

i. düğüme bağlı ısıl kapasite C_i ve i. Düğüm ile j. Düğüm arasındaki ısıl direnç R_{ij} ile gösterilirse, motorda zamana bağlı sıcaklık değişimi Denklem (3.123) ile hesaplanır.

$$C_i \frac{dT}{dt} = \frac{T_j - T_i}{R_{ji}} + Q_{ii} \quad \text{i,j=1,2,.....8} \qquad \textbf{(3.123)}$$

Denklem (3.123) de ısıl direnç yerine iletkenliklerin kullanılması ve hacim içerisinde üretilen toplam ısı enerjisi "Q" yerine asenkron motorun ilgili kısmındaki elektriksel kayıpların yazılmasıyla Denklem (3.124) elde edilir.

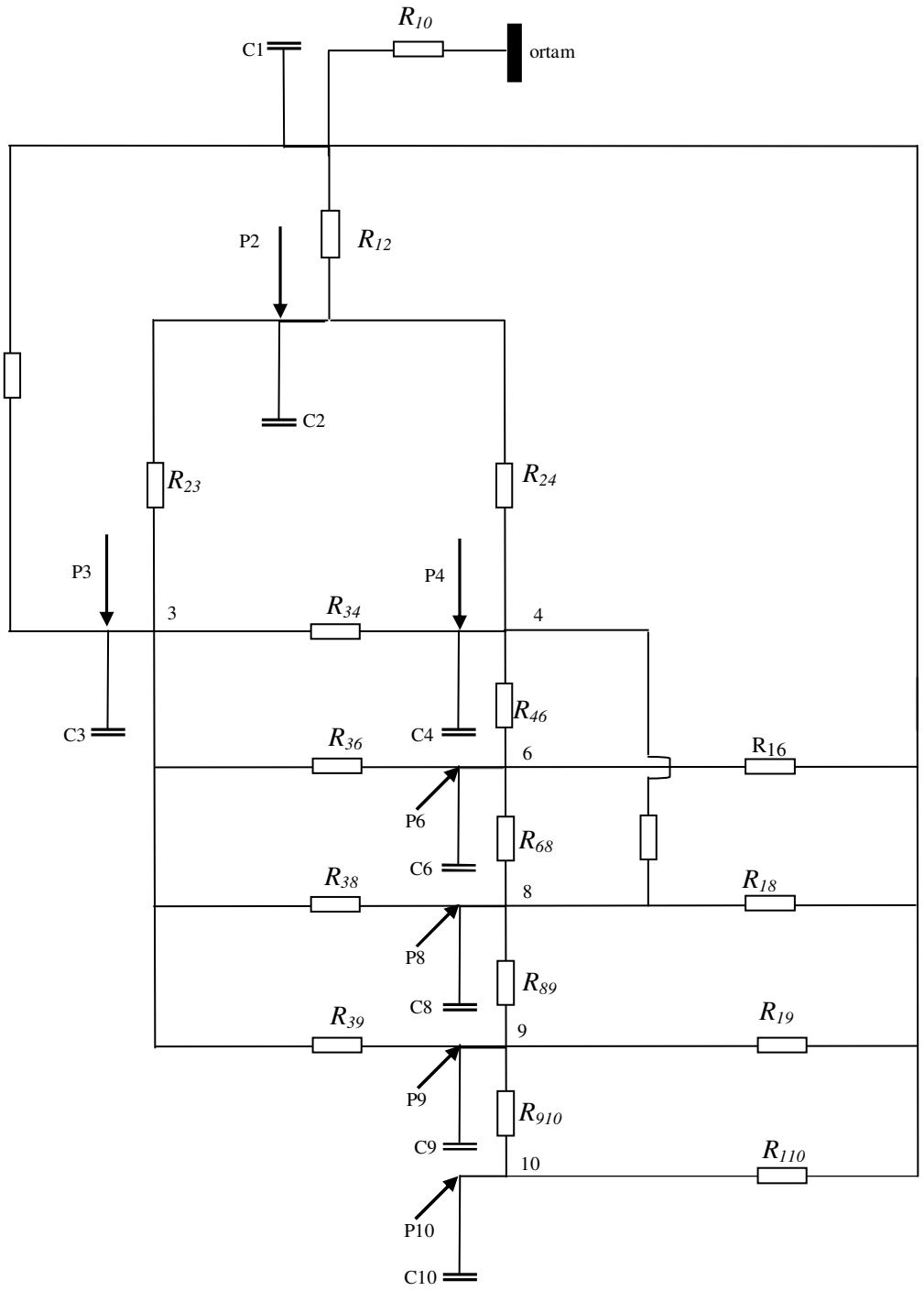
$$P_i = C_i \frac{dT}{dt} - g_{ji} \frac{T_j - T_i}{R_{ji}} \qquad \textbf{(3.124)}$$

P_i, C_i, g_{ji} matrisleri aşağıda verilmiştir.

$$P_i = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 \end{bmatrix}^T \qquad \textbf{(3.125)}$$

$$C_i = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{10} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.126)}$$

$$g_{ij=} \begin{bmatrix} g11 & -g12 & -g13 & 0 & -g16 & -g18 & 0 & -g110 \\ -g12 & g22 & -g23 & -g24 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -g13 & -g23 & g33 & -g34 & -g36 & -g38 & -g39 & 0 \\ 0 & -g24 & -g34 & g44 & -g46 & -g48 & 0 & 0 \\ -g16 & 0 & -g36 & -g46 & g66 & -g68 & 0 & 0 \\ -g18 & 0 & -g38 & -g48 & -g68 & g88 & -g89 & 0 \\ 0 & 0 & -g39 & 0 & 0 & -g89 & g99d & -g910 \\ -g110 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g910 & g100 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.127)}$$



Şekil 3.19: Asenkron motorun toplu parametreli ısıl eşdeğer devresi.

4. ASENKRON MOTOR TASARIM OPTİMİZASYONU

Enerji ve/veya maliyet fonksiyonlarının minimumlaştırılması, ekonomi, fizik, kimya, istatistik ve mühendislik problemleri gibi pek çok alanda, problem çözümünde kullanılan temel kavramlardan birisidir.

Optimizasyon problemleri; bir F(X) fonksiyonunu, $g_i(X) \geq 0$ (i=1,2…,m) ve $h_j(X)=b_j$ (i=1,2…,k ve b_k=sbt) sınırlamaları altında en büyük veya en küçük yapacak $X=[x_1,x_2,\ldots x_n]$ değerlerini bulmaktan ibarettir. Burada F(X) "amaç fonksiyonu", g ve h fonksiyonları ise kısıtlama olarak adlandırılır.

Genel olarak optimizasyon yöntemleri, X değişken vektörünün elemanlarını, amaç fonksiyonunda istenen değişikliği sağlayacak yönde değiştirmek yoluyla sonuca ulaşırlar.

Tüm $\lambda \in (0,1)$ değerleri için Denklem (4.1) sağlanıyorsa, F konveks yapıdadır. Fonksiyonların konveks yapıda olması durumunda, değer azalışının yönü türevle kolaylıkla tespit edilebilir, çünkü fonksiyonun sadece bir minimumu(veya maksimumu) bulunmaktadır.

$$F(\lambda x_i + (1-\lambda)x_j) \leq \lambda F(x_i) + (1-\lambda)F(x_j) \qquad \textbf{(4.1)}$$

Öte yandan problem birden fazla minimuma sahip non-konvex yapıdaysa, başlangıç noktasına bağlı olarak türev işlemi ile bu minimumlardan herhangi birine ulaşılabilir ve bu nokta fonksiyonun lokal minimumu olabilir. Dolayısıyla gradyana dayalı klasik yöntemler bu tarz problemlerin çözümü için uygun olmayacaktır. Bir problemin matematiksel formülasyonunun yapılamadığı, çözümün klasik yöntemlerle zor veya olanaksız olduğu durumlarda, optimizasyon probleminin çözümü için, amaç ve sınır fonksiyonlarının belirli bir noktada aldıkları değer haricinde herhangi bir analitik bilgiye ihtiyaç duymayan ve "Dolaysız Yöntemler" olarak adlandırılan yöntemler kullanılır. Hooke-Jeeves, Rosenbrock, Nelder-Mead Simplex yöntemleri, yaygın olarak kullanılan yerel doğrudan optimizasyon

yöntemleridir. Bu yöntemler başlangıç noktasına bağlı olarak farklı optimum noktalara yakınsar. Dolaysız yöntemlerin ikinci ana grubunu "Mutlak Optimizasyon Yöntemleri" oluşturur. Mutlak Optimizasyon Yöntemleri verilen bir çözüm uzayı içerisinde amaç fonksiyonun başlangıç noktasından bağımsız olarak mutlak en küçük veya en büyük olduğu noktayı arar. Elde edilen sonucun gerçek mutlak optimum olup olmadığını sınayacak herhangi bir analitik yöntemin olmaması nedeniyle, bu yöntemler mutlak optimumun bulunması için istatistiksel yöntemlerden faydalanır. Bu konuya Bölüm 4.2 de ayrıntılı olarak değinilmektedir.

Mutlak ve dolaysız algoritmalar, diğer bir isimle yapay zekâ algoritmaları, esnek ve yüksek performanslı çözümler sağlar. Yapay Sinir Ağları (YSA), Genetik Algoritma (GA) ve diğer Evrimsel Hesaplama Yöntemleri, Yapay Isıl İşlem (YIS), Yapay Bağışıklık Algoritması gibi istatistiksel algoritmalar, bu algoritmalardan bazılarıdır.

Elektrik motorlarının tasarımı doğrusal olmayan çok değişkenli ve çok hedefli, kısıtlamalı bir optimizasyon problemidir. Doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin(DOSOP) çözümünde kullanılan bazı temel yöntemler, sınırlamasız doğrusal olmayan problemler (DOP) için geliştirilmiş yöntemlere dayanmaktadır. Bu tarz problemlerin temeli, bir başlangıç çözümü X_0 belirleyip, bunu optimal koşullar sağlanıncaya kadar belirli bir araştırma yönünde ve belirli bir adım büyüklüğüyle değiştirmeye dayanmaktadır. Araştırma yönü, F(X) fonksiyonun X_i noktasındaki değerinin gradyanına bakarak bulunmaktadır. Sınırlamasız, doğrusal olmayan optimizasyon yöntemlerinin çözümünde kullanılan başlıca yöntemler Bölüm 4.2.1 de verilmiştir. Bu yöntemlerin sınırlamalı problemlere uygulanabilmesi için sınırlamalı problemlerin ceza ve bariyer fonksiyonları kullanılarak sınırlamasız probleme dönüştürülmesi yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Bölüm 4.4 de dönüştürme yöntemlerine değinilmektedir.

4.1 Optimizasyon Yöntemlerine Genel Bakış

4.1.1 Gradyan bazlı optimizasyon yöntemleri

4.1.1.1 En dik iniş algoritması

Minimize edilecek F(X) fonksiyonun X_i noktasındaki negatif gradyanına bakılarak aşağıya doğru en dik iniş yönü bulunur.

Bu algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir.

1. Başlangıç Çözümü $X_{t=0}$ ve durdurma kriteri ε belirlenir.
2. $\nabla F(X_t)$ ve $\left\|\nabla F(X_t)\right\|$ hesaplanır. Eğer $\left\|\nabla F(X_t)\right\| \le \varepsilon$ ise işlem sona erdirilir.
3. Adım yönü $d_t = -\nabla F_t$ olacak şekilde belirlenir.
4. $X_{t+1} = X_t + \alpha_t d_t$ olacak şekilde yeni X değeri belirlenir. Burada α, $F(X_{t+1})$ değerinin minimum yapacak şekilde hesaplanmış adım büyüklüğüdür.
5. t = t+1 yaparak bir sonraki adıma gidilir.

4.1.1.2 Eşlenik gradyan yöntemi

Bu yöntem "En Dik İniş" (EDİ) algoritmasının hızını arttırmak üzere kullanılmaktadır. Bölüm 4.2.1.1 de verilen EDİ algoritmasının 3 adımında adım yönünün aşağıdaki gibi hesaplanmasıyla elde edilir.

$$d_t = -\nabla F_t + \left(\frac{\left\|\nabla F(X_t)\right\|}{\left\|\nabla F(X_{t-1})\right\|}\right)^2 d_{t-1} \qquad \textbf{(4.2)}$$

4.1.1.3 Newton yöntemi

Bu yöntemde amaç fonksiyonun mevcut X_t değeri civarında ikincil dereceden modeli, Taylor serisine açılarak oluşturulur.

$$F(X) \approx h(x) = F(X_t) + \nabla F(X_t)^T (X - X_t) + \frac{1}{2}(X - X_t)^T H(X_t)(X - X_t) \qquad \textbf{(4.3)}$$

Burada $\nabla^2 F$, F fonksiyonunun Denklem (4.4) ile tanımlı Hessian matrisidir. Eğer Hessian matrisi pozitif tanımlı ise ikincil dereceden fonksiyonu minimize eden tek bir nokta mevcuttur.

$$H(x) = \nabla^2 F(x) \qquad \textbf{(4.4)}$$

h(X) fonksiyonunu, $\nabla h(X) = 0$ eşitliği çözülerek minimize edilecektir.

$$\nabla h(X) = \nabla F(X_t) + H(X_t)(X - X_t) = 0 \Rightarrow X - X_t = -H(X_t)^{-} \nabla F(X_t) \qquad \textbf{(4.5)}$$

$X\text{-}X_t$ değeri Newton yöntemi için X_t noktasındaki araştırma yönüdür. Newton yönteminin temel algoritma adımları, en dik iniş yöntemi için verilen adımlarla aynıdır.

4.1.1.4 Yarı-Newton yöntemler

Hessian matrisinin hesaplanmasının yarattığı işlem yükünün fazla olması veya bu matrisin tanımsız olduğu uygulamaların mevcudiyeti durumunda sadece birinci dereceden türev bilgilerine ihtiyaç duyan "Yarı-Newton" yöntemler kullanılır. Bu yöntemde ardışıl iki noktada X değerleri arasındaki fark (s_t) ve $\nabla F(X)$ değerleri arasındaki fark (η_t) kullanılarak Hessian matrisi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$H_{t+1}s_t = \eta_t$

Başka bir deyişle Hessian matrisi 2. dereceden türeve ihtiyaç duyulmadan, gradyanların değişiminin parametre değerlerinin değişimine oranı cinsinden bulunabilir.

4.1.2 Dolaysız yöntemler

"Dolaysız Araştırma" terimi Hooke ve Jeeve tarafından, önerilmiştir [75]. Bu yöntem optimum çözümü bulmak üzere, bir çözüm uzayı S içerisinden seçilen sınama çözümlerinin kıyaslanması ve bu deneme çözümlerinden elde edilen sonuçlarla bir sonraki sınama noktasının belirlenmesini içeren ardışıl adımlardan oluşmaktadır. Herhangi bir türev işlemine gereksinin duyulmaması nedeniyle, türev mertebelerine göre yapılan sınıflandırmada dolaysız yöntemler "Sıfırıncı Mertebe Yöntemler" olarak tanımlanır. Bu sınıflandırma çerçevesinde Bölüm 4.1 de bahsi geçen "En Dik İniş Yöntemi" birinci dereceden, "Newton Yöntemi" ise ikinci dereceden yöntemler olarak adlandırılmaktadır [76].

4.1.2.1 Nelder-Meade simplex yöntemi

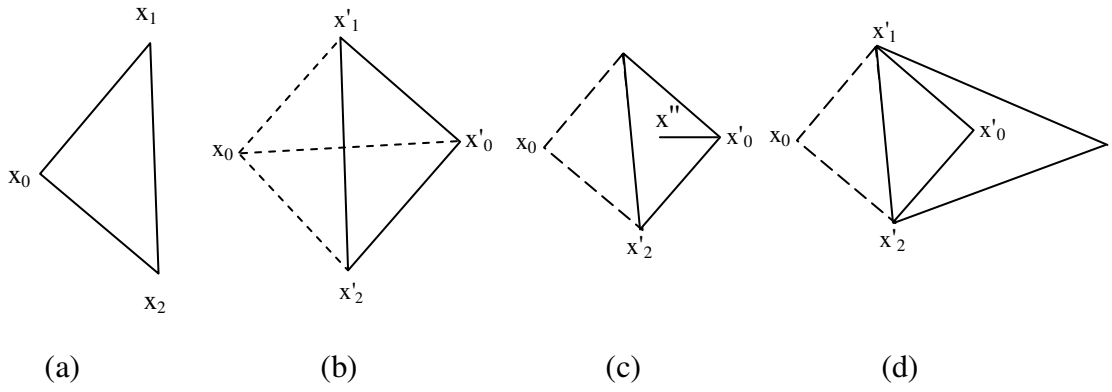
Simplex, n boyutlu bir uzayda n+1 noktayla tanımlanır. Simplex iki boyutlu uzayda üçgen, üç boyutlu uzayda bir tetrahedron formundadır. Şekil 4.1.a iki boyutlu uzayda bir S_0 simpleksini göstermektedir Simpleks yönteminde her bir iterasyon dört adımdan meydana gelir [77-78].

Başlangıç adımında So simpleksinin her bir köşesindeki noktalarda amaç fonksiyonunun değerleri hesaplanır ve en iyi çözümü veren x_0 ve en kötü çözümü x_2

noktaları belirlenir. Bu ikisinin arasında kalan çözüm x_1 olarak adlandırılmıştır. En kötü çözümün belirlenmesinin ardından simpleks $\overline{x_1 x_2}$ doğrusunun orta noktası etrafında 180 derece çevrilerek S_1 simpleksi elde edilir (Şekil 4.1.b). Bu işlem "yansıtma" olarak adlandırılır. S_1 simpleksinin köşelerinde elde edilen çözümlerden herhangi biri F_o dan daha iyi bir çözüm sağlıyorsa çözümün dördüncü adımına geçilir. Eğer bu adımda daha iyi bir çözüm elde edilememişse üçüncü adım uygulanır.

Daraltma adımında S_1 simpleksi herhangi bir $k_2 < 1$ katsayısıyla çarpılarak genişletilir ve bir S_2 simpleksi elde edilir. Şekil 4.1.c de görüldüğü üzere x'_0 noktasının x''_0 noktasına getirilmesi durumunda hala daha iyi bir çözüm bulunamıyorsa, benzer şekilde x'_1 ve x'_2 noktaları da optimum x_0 noktasına yaklaşacak şekilde $k_3<1$ katsayılarıyla çarpılır ve araştırma işlemi bir önceki optimum çözümün yakın komşuluğuyla sınırlandırılır

4. adım "genişletme" adımıdır. Bu adımda S_1 simpleksi herhangi bir $k_4 > 1$ katsayısıyla çarpılarak genişletilir ve bir S_3 simpleksi elde edilir.S_3 simpleksinin köşelerinden herhangi birinde S1 simpleksine göre daha iyi bir sonuç elde ediliyorsa S_3 simpleksi bir sonraki iterasyon adımı için So olarak seçilir. Tersi durumda k katsayısı küçültülerek tekrar sınama yapılır.

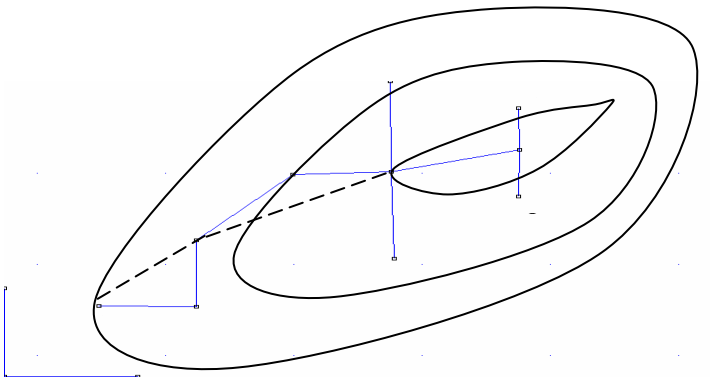


Şekil 4.1: Simpleks algoritmasının adımları. a)Başlangıç, b)Yansıtma, c)Daraltma, d)Genişletme.

Algoritmanın dört önemli parametresi vardır. Bunlar yansıtma (k_1), Daraltma (k_2 ve k_3), ve Genişletme (k_4) katsayılarıdır. Bu parametreler için yaygın olarak kullanılan değerler sırasıyla, $k_1=1$, $k_2=0.5$, $k_3=0.5$, $k_4=2$ dir.

4.1.2.2 Hooke – Jeeve yöntemi

"Örüntü Araştırma" yöntemi olarak da bilinen Hooke – Jeeve yöntemi [75], Şekil 4.2 de bir örnekle açıklanmıştır.



Şekil 4.2: Hooke – Jeeve Araştırma Yöntemi.

Adım1: Başlangıç noktası P_1 birinci temel nokta t_1 dir.P_1 noktasından x doğrultusunda yapılan bir hareketle P_2 noktasına varılmaktadır.

Adım 2: $f(P_2) < f(P_1)$ olduğu için bu noktadan itibaren y doğrultusunda bir adım atılır ve P3 noktasına ulaşılır.

Adım 3: $f(P_3) < f(P_2)$ için P_3 yeni temel nokta t_2 olacaktır. Her iki koordinat ekseni doğrultusunda birer başarılı hareket yapıldığı için bir aşama tamamlanmıştır.

Adım 4: Örüntü, t_2-t_1 doğrultusunda, $P_4 = 2t_2$-t_1 noktası olacak şekilde hareket ettirilir. Bu seçim sayesinde, bir önceki ilerlemenin devam etmesi beklenmektedir.

Adım 5: P_4 noktasından itibaren x doğrultusunda yapılan bir hareketle, amaç fonksiyonunun değerini iyileştiren P_5 noktasına ulaşılır. P_5 noktasından itibaren x ve y doğrultularında atılan adımlar amaç fonksiyonunu iyileştirmemektedir. $t_3=P_5$ olarak atanır ve örüntü t_3-t_2 doğrultusunda, $P_8 = 2t_3$-t_2 olacak şekilde taşınır.

Adım 6: Herhangi bir temel nokta etrafında yapılan bir dizi hareketle daha iyi bir çözüm noktasına ulaşılamıyorsa, bu noktaya dönülür ve adım uzunlukları azaltılarak yeni bir dizi sınama yapılır.

4.1.2.3 Rosenbrock yöntemi

Rosenbrock araştırmasının her bir aşaması, her bir doğrultuda bir başarılı işlemin ardından bir başarısız işlemle karşılaşılıncaya dek koordinat eksenlerine paralel olarak yapılan sınamalardan oluşur. Her başarılı adımdan sonra adım uzunluğu $k_1>1$

katsayısıyla, başarısız bir adımdan sonra ise $k_2<1$ katsayısıyla çarpılır. Bir aşamanın sonunda koordinat eksenleri döndürülerek, bir sonraki aşamaya geçilir [79].

j. aşamada koordinat eksenleri u_1^j , $u_2^j \ldots u_k^j$ olarak ve j–1. aşamanın sonundan j. aşamanın sonuna kadar her bir koordinat ekseninde alınan mesafeler $d_1,d_2,\ldots,d_k$ olmak üzere, dönüştürme işlemi aşağıdaki gibi yapılır.

$$v_k = d_k u_k^j \tag{4.6}$$

$$v_i = d_i u_i^j + v_{i+1} \qquad \text{i=k-1, k-2,…1} \tag{4.7}$$

$$w_1 = v_1$$

$$w_i = v_i - \sum_{p=1}^{i-1} (v_i^T u_p^{j+1}) u_p^{j+1} \quad \text{i=2,3,…k} \tag{4.8}$$

$$u_i^{j+1} = \frac{w_i}{\|w_i\|} \tag{4.9}$$

Toplam işlem sayısı önceden belirlenen bir sayıyla belirlenebilir veya ardışıl iki aşamada elde edilen amaç fonksiyonları arasındaki fark belirli bir değerden daha küçük olduğunda araştırma sonlandırılır.

4.1.2.4 Powell yöntemi

u_i ve u_j koordinat sistemleri Denklem (4.10) da verilen koşulu sağlamak koşuluyla A matrisine göre konjuge koordinatlar olarak tanımlanır [79].

$$u_i^T A u_j = 0 \quad i \neq j \tag{4.10}$$

A, k x k bir matris, b sabit bir vektör ve c sabit bir sayı olmak üzere, Powell yönteminde konjuge koordinatlar Denklem (4.11) ile tanımlanmaktadır.

$$u(\Phi) = \Phi^T A \Phi + b^T \Phi + c \tag{4.11}$$

Karesel formda bir fonksiyonun minimumu, her bir koordinat doğrultusunun yalnızca bir kere araştırılmasıyla bulunabilir.

j. adımdaki lineer bağımsız koordinat eksenleri u_1^j , $u_2^j \ldots u_k^j$ olmak üzere, j+1 adımdaki koordinat eksenleri $u_2^j \ldots u_k^j$, u olarak tanımlanır.

j. aşamanın başlangıç noktası Φ_0, ve k. minimumun elde edildiği nokta Φ_k olmak üzere, yeni koordinat ekseni Denklem (4.12) ile hesaplanır.

$$u = \Phi_k - \Phi_0 \quad \textbf{(4.12)}$$

4.1.3 Sezgisel algoritmalar

Bir problemin matematiksel formülasyonunun yapılamadığı, çözümün klasik yöntemlerle zor veya olanaksız olduğu durumlarda, sezgisel algoritmalar, diğer bir isimle yapay zeka algoritmaları, esnek ve yüksek performanslı çözümler sağlar [80]. Yapay Sinir Ağları (YSA), Genetik Algoritma (GA) ve diğer Evrimsel Hesaplama Yöntemleri, Yapay Isıl İşlem (YIS), Yapay Bağışıklık Algoritması gibi algoritmalar amaç fonksiyonunun türevlerini kullanmıyor, olmaları nedeniyle Dolaysız yöntemler olarak sınıflandırılabilse de, Bölüm 4.1.2 de bahsedilen algoritmalardan farklı olarak istatistiksel olarak global optimuma yakınsamayı amaçlarlar [80].

Elektrik makinalarının global optimizasyonunda genetik algoritmalar tek başlarına veya tamamlayıcı olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Biyolojik evrim sürecindeki doğal seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemlerine benzer bir süreçle en uygun çözümü bulmaya yönelik bir algoritmadır. Her adımda bir grup çözüm arasından uygunluk dereceleri en yüksek olanlar belirlenip, bunların bir sonraki adımdaki çözüm içinde baskın olması sağlanır.

Bu yöntemin elektrik makinalarında tasarım optimizasyonu problemlerine uygulanması için öncelikle tasarım değişkenlerinin ikili sistemde sayı dizileri ile ifade edilmesi gereklidir. Rastlantısal olarak üretilen N adet motor tasarımı, bu dizilerinin birleşmesinden oluşmuş diziler olarak belirlenir. Bu şekilde elde edilen tasarımlar bir uygunluk fonksiyonu ile test edilir. Uygunluk fonksiyonu amaç fonksiyonuyla bağlantılı olup, amaç fonksiyonunun kendisi de uygunluk fonksiyonu olarak seçilebilir. En yüksek uygunluk, ortalama uygunluk, toplam uygunluk vb. belirlendikten sonra bir sonraki kuşağı oluşturacak bireyler eleme yöntemi veya istatistiksel yöntemlerle belirlenebilir. Eleme yönteminde yüksek uygunluk seviyesine bağlı bireylerini seçilirken en kötü uygunluk seviyesine sahip olanlar elenir. İstatistiksel bir yaklaşımda ise en yüksek uygunluk seviyesine bağlı bireyler birden çok seçilebilirken, en kötü durumdaki bireylerin de seçilme şansı korunur.

Genetik algoritmanın klasik yöntemlere göre temel dezavantajı işle sayısının yüksekliğidir. Temel avantajları ise başlangıç noktasında bağlı olmaması, yerel

optimumlarda takılıp kalma riski taşımaması ve ayrık değişkenleri işleyebilmesidir. Yapay Isıl İşlem Algoritması bu alanda potansiyel görülen bir diğer algoritmadır. Bölüm 4.2. bu çalışmada optimizasyon yöntemi olarak seçilen Yapay Isıl İşlem yöntemine ve bu yöntemin istatistiksel temellerine ayrılmıştır

Yapay Isıl İşlem Algoritmasının tercih edilmesinin beş temel sebebi vardır.

1- Amaç fonksiyonunun türevlerine ihtiyaç duymayan dolaysız bir yöntem olduğu için gradyan bazlı yöntemlere göre daha az ara işlem gerektirir ve türev işleminden kaynaklanan hesap hatalarından muaftır.

2- Yapay Isıl İşlem Algoritması istatistiksel olarak global minimumu bulmayı garantiler.

3- Az sayıda temel adımdan oluşur. Program kodunun yazımı basittir. Çoklu amaç fonksiyonlarını ve kısıtlamaları kolaylıkla işleyebilir. Ayrık veya sürekli yapıda fonksiyonlar optimize edilebilir.

4- Çözümün doğruluğu başlangıç çözüm tahminine bağlı değildir. Kötü bir tahmin yalnızca işlem sayısını arttıracaktır.

5- Çözüm uzayının konveks karakterde olma zorunluluğu yoktur.

4.2 Yapay Isıl İşlem Yöntemi

Yapay Isıl İşlem Algoritması ardışıl iyileşmeler esasına dayanan bir optimizasyon yöntemidir. Ardışıl iyileştirme stratejisinde belirli bir başlangıç noktasından itibaren, bu noktadaki amaç fonksiyonun değerinden daha iyi bir değer üretecek yeni bir noktaya ulaşıncaya kadar düzenlemeler yapılır. Ulaşılan yeni nokta bir sonraki araştırma işlemi için başlangıç noktasıdır. Çözüm uzayında amaç fonksiyonunun değerini iyileştirecek noktaları araştırma işleminde Monte Carlo (MC) yöntemleri kullanılabilir. En basit haliyle MC tamamıyla rastlantısal olarak atılan adımlar sonucu elde edilen örneklerden ibarettir. Tek koşul her bir adımda uzayın farklı bir bölgesinin araştırılıyor olmasıdır. 1953 yılında Nikolay Metropolis [81] tarafından önerilen Metropolis Monte Carlo (MMC) araştırma yöntemi ise araştırma uzayında atılan adımların aşağıda verilen kurala uygun olarak yapılmasını öngörür.

$$P_{kabul} = \min(1, e^{-\Delta F / T}) \qquad \textbf{(4.13)}$$

P_{kabul}, atılan bir adım sonucu ulaşılan noktanın yeni başlangıç noktası olarak kabul edilme olasılığını göstermektedir. ΔF amaç fonksiyonunun başlangıç noktası ile gelinen noktada aldığı değerler arasındaki farka eşittir. T ise aşağıda ayrıntılı olarak açıklanacağı üzere "sıcaklık" olarak adlandırılan bir kontrol parametresidir.

Denklem (4.13) de verilen olasılık dağılımı istatistiksel mekanikteki Boltzmann-Gibbs kanonik dağılımına uymaktadır. Sistemin bir özelliğinin MMC yöntemi kullanılarak elde edilen örnekler üzerinden alınacak ortalamasının o özelliğin Boltzmann ortalamasına eşit olduğu da ispatlanabilir.

4.2.1 Boltzmann dağılım yasası

Boltzmann dağılımı, bir sistemin belirli bir fiziksel özelliğinin istatistiksel olarak tahmini için yaygın olarak kullanılan bir dağılımdır. Bir sistemin Boltzmann dağılımlı olması belirli bir fiziksel özellikle sınırlı değildir. Aşağıda verilen üç temel özelliği sağlayan herhangi bir sistemde bir özelliğin değeri Boltzmann Dağılımlı olabilir [82].

- Sistemdeki parçacık sayısı sabittir.
- Sistemin toplam enerjisi sabittir. Burada "enerji" genel bir tabir olup, farklı sistemlerde farklı parametrelere tekabül eder.
- Böyle bir sistem dengede ise enerjinin dağılımı Boltzmann yasasına uygundur.

İzole bir sistemde toplam enerji, sistem bileşenlerinin enerjilerinin toplamı olarak yazılabilir.

$$E = \sum_{i=0} n_i e_i \qquad \textbf{(4.14)}$$

Bileşenlerin toplam sayısı N bir sabit sayıdır.

$$N = \sum_{i=0} n_i \qquad \textbf{(4.15)}$$

Bu sistemdeki olası tüm alt sistemlerin (farklı enerji seviyelerinin) sayısı W, P(N,n) ile bulunur.

$$W = \frac{N!}{n_0! n_1! n_2! .....} \qquad \textbf{(4.16)}$$

Toplam parçacık sayısı N'nin çok büyük olması durumunda, bu sayının faktöriyelinin doğal logaritması Stirling Yaklaşıklığıyla aşağıdaki gibi yazılabilir [82].

$$\ln N! = N.\ln N - N + \frac{1}{2}\ln(2\pi N) \cong N.\ln N - N \quad \textbf{(4.17)}$$

Dolayısıyla toplam alt sistem sayısının doğal logaritması Denklem (4.18) ile elde edilir.

$$\ln W = (N.\ln N - N) - (\sum_{i=0} n_i \ln(n_i) - \sum_{i=0} n_i) = N.\ln N - \sum_{i=0} n_i \ln(n_i) - (N - \sum_{i=0} n_i) \quad \textbf{(4.18)}$$

$$(N - \sum_{i=0} n_i) = 0 \quad \textbf{(4.19)}$$

$$\ln W = N.\ln N - \sum_{i=0} n_i \ln(n_i) \quad \textbf{(4.20)}$$

elde edilir. Bu denklemin diferansiyeli aşağıda verilmiştir.

$$d(\ln W) = -\sum (1 + \ln(n_i))dn_i \quad \textbf{(4.21)}$$

N sabit bir sayı olduğuna göre diferansiyeli sıfıra eşit olacaktır.

$$dN = \sum_{i=0} dn_i = 0$$

Bu ifade Denklem (4.16) da yerine yazılırsa

$$d(\ln W) = -\sum (\ln(n_i))dn_i \quad \textbf{(4.22)}$$

elde edilir.

Sistemde enerjinin sabit kaldığı kabul edildiğine göre Denklem (4.14) ün diferansiyeli de sıfıra eşit olmalıdır.

$$dE = \sum_{i=0} e_i dn_i = 0 \quad \textbf{(4.23)}$$

Dolayısıyla dE ve dN terimleri, a ve b herhangi iki sabit olmak koşuluyla, Denklem (4.22) ye eklenebilir.

$$d(\ln W) = -\sum (\ln(n_i))dn_i \text{ -a.dN–n.dE} \quad \textbf{(4.24)}$$

W veya ln W nin maksimum olduğu nokta için diferansiyeli sıfıra eşitlenirse

$$d(\ln W) = 0 = -\sum_i (a + b.e_i \ln(n_i))dn_i \quad \textbf{(4.25)}$$

elde edilir. Bu eşitliğin sağlanabilmesi için parantez içerisindeki toplamının sıfıra eşit olması gerekmektedir.

$$a+b.e_i+\ln(n_i)=0 \rightarrow \ln(n_i) = -a - b.e_i \rightarrow n_i = e^{-a}.e^{-be_i} \quad \textbf{(4.26)}$$

$$N = \sum_{i=0} n_i = e^{-a} \sum_{i=0} e^{-be_i} \rightarrow e^{-a} = \frac{N}{\sum_{i=0} e^{-be_i}} \quad \textbf{(4.27)}$$

Bu ifade bir üstteki Denklem (4.26) da yerine yazılırsa Denklem (4.28) bulunur.

$$n_i = N \frac{e^{-be_i}}{\sum_{i=0} e^{-be_i}} \rightarrow \frac{n_i}{N} = \frac{e^{-E_i/kT}}{\sum_i e^{-E_i/kT}} \quad \textbf{(4.28)}$$

b=1/kT, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklık olmak üzere yukarıdaki denklem istatistiksel mekaniğin Boltzmann dağılım yasasının bir ifadesidir. Boltzmann dağılım yasası çok sayıda molekülün rastlantısal dağılımıyla ilgilidir. Bu denklemin paydası "Partisyon Fonksiyonu "olarak adlandırılır.

Boltzmann Dağılım Yasasıyla, bir ideal gaz karışımı içerisindeki farklı enerji seviyelerinde bulunan moleküllerin sayısı arasında da bir orantı kurmak mümkündür [83].

$$\ln \frac{N_j}{N_i} = -\frac{E_j - E_i}{kT} \Rightarrow \frac{N_j}{N_i} = e^{-\Delta E/kT} \quad \textbf{(4.29)}$$

Yukarıdaki denklemde N_j ve N_i sırasıyla E_j ve E_i enerji seviyelerinde bulunan moleküllerin sayısıdır.

Boltzmann dağılım yasasına göre bir sitemin herhangi bir fiziksel özelliği A'nın, bir T sıcaklığı için ortalama veya beklenen değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\langle A \rangle = \frac{\sum_{i=0} A_i n_i}{N} \tag{4.30}$$

Denklem (4.28) in bu denklemde kullanılmasıyla kullanılırsa <A> için Denklem (4.31) de verilen ifade elde edilir.

$$\langle A \rangle = \frac{\sum_{i=0} A_i e^{-E_i / kT}}{\sum_{i=0} e^{-E_i / kT}} \tag{4.31}$$

A özelliğinin beklenen değeri, aritmetik ortalamasına eşittir.

$$\langle A \rangle = \frac{A_{Top}}{N} \tag{4.32}$$

4.2.2 Metropolis kabul kriteri

Ardışıl iyileştirme esasına dayanan bir optimizasyon yönteminde araştırma uzayının çok boyutlu ve geniş olması durumunda, en iyi değeri veren noktayı bulmak üzere uzaydaki her bir noktanın incelenmesi mümkün değildir. Monte Carlo yöntemlerinde, uzaydaki tüm noktalar yerine bu örnek uzayını temsil ettiği kabul edilen bir örnek grubu incelenmektedir. Basit Monte Carlo yönteminde örnekleme işlemi tamamen rastlantısaldır. Dolayısıyla, örneğin bir hacim içerisinde bulunan gaz moleküllerinin ortalama enerjisini hesaplamak üzere rastlantısal olarak seçilen örnek grubunda çok sayıda molekülün ortalama enerji seviyesinden çok uzaktaki moleküllerden oluşması durumunda elde edilen ortalama değer gerçek ortalamayı yansıtmayacaktır. Seçilen örneklerin birbirine çok yakın olması da benzer şekilde, grubun temsil özelliğini bozacaktır. Bir optimizasyon işleminde basit Monte Carlo yöntemi, çözümün bir yerel optimumda takılmasına yol açabilir.

Tamamen rastlantısal olan basit MC örneklemesinden farklı olarak Metropolis Monte Carlo yöntemi "etki örneklemesi" prensibine dayanır. Örnek grubunun varyansının azalmasını sağlayan etki örneklemesinin temelinde tahmin edilmek istenen büyüklük üzerinde bazı örneklerin diğerlerinden daha büyük bir etkiye sahip olduğu, dolayısıyla seçilen grup içerisinde benzer örneklerin frekansının yüksek olması gerektiği fikri vardır.

Etki örneklemesi ile elde edilen temsil özelliği yüksek bir örnek grubu kullanılarak hesaplana ortalama değerin, sistemin Boltzmann ortalamasına eşit olduğunu ispatlamak mümkündür. Başka bir ifadeyle MMC, araştırma uzayından seçilen örnekler kullanarak sistemin bir özelliğine dair elde edilen ortalama değerin, o özelliğin Boltzmann averajına eşit olmasını sağlayacak şekilde örnekleme yapmak üzere kullanılmaktadır.

Metropolis Monte Carlo benzeşiminde sistemin herhangi bir anda bulunduğu hal h_0, bu hal için enerjisi E_0 ve ortalaması aranan özelliğin değeri A_0, rastlantısal bir adım sonucu ulaşılan hal, bu hal için enerji ve özellik değerleri h_1, E_1 ve A_1 ile gösterilir. N atılan adım sayısı ve A_{Top}, atılan adımlar sonucu elde edilen özellik değerlerinin toplamıdır. Başlangıçta N=0 ve A_{Top} =0 değerindedir. Rastlantısal olarak atılan bir adım sonunda gelinen nokta Metropolis kriterine göre uygun bir noktaysa N= N+1, $A_{top}=A_{top}+A_1$ olarak değiştirilir.

Metropolis kriterine göre kabul koşulları aşağıda listelenmiştir [84].

1) Eğer yeni noktada sistemin enerjisi, başlangıçtaki değerinden daha düşükse bu nokta yeni başlangıç noktası olarak seçilir ve bu hal için özelliğin değeri toplama eklenir. Atop=A_{top} + A_1, N = N + 1

2) Eğer yeni noktada sistemin enerjisi, başlangıçtaki değerinden daha yüksekse ancak enerji artışı kabul edilebilir düzeyde ise, bu nokta yeni başlangıç noktası olarak seçilir ve bu hal için özelliğin değeri toplama eklenir. $A_{top}=A_{top}$ + A_1, N = N + 1 olarak değiştirilir. Enerjinin kabul edilebilir oranda artıp artmadığının kontrolü, artış değerinin 0.0 ile 1.0 arasında bir rastlantısal R sayısıyla kıyaslanmasıyla yapılır.

   Eğer $e^{-(E_1-E_0)/kT} \geq R$ ise, artış kabul edilebilir bir artıştır.

3) Eğer $e^{-(E_1-E_0)/kT} < R$ ise yeni nokta örnek grubuna kabul edilmez ve başlangıç noktası değiştirilmez. $A_{top}=A_{top}$ + A_0, N = N + 1 olarak değiştirilir.

İster 1. veya 2., ister 3. maddeler yürütülmüş olsun, benzeşim bu işlemler sonucu ulaşılan noktadan itibaren devam ettirilir.

Benzeşim sonuçlandırıldığında özelliğin değerinin yığılmalı toplamı adım sayısına bölündüğünde, belirli bir T değeri için özelliğin ortalama değeri elde edilmiş olur.

$$A_{ort} = \frac{A_{Top}}{N}$$

4.2.2.1 Markov zincirleri

Metropolis Monte Carlo yöntemiyle elde edilen örnek grubu belirli bazı şartlara sahip bir Markov Zinciri meydana getirecektir. Markov zinciri; bir adımının çıktısı, sadece bir önceki adımın çıktısına bağlı olan bir denemeler dizisidir [85-87]. Yapay ısıl işlem algoritmasında söz konusu adım, bir başlangıç noktasından bir başka noktaya harekettir. Adım çıktısı ise, bu noktadan hareketle gidilebilecek sonlu sayıda elemandan oluşan bir komşuluğu ifade eder

Bir Markov zincirini belirleyen iki öğe başlangıç dağılımı ve geçiş matrisidir. Bir n anında sistemin x' halinde olma olasılığı $p_n(x')$ ve bu noktadan n+1 anında tek bir adımda x noktasına geçiş olasılığı $T_n(x',x)$ ise sistemin n+1 anında x noktasında bulunma olasılığı

$$P_{n+1}(x)=\sum_{x'} P_n(x')T_n(x',x) \qquad \textbf{(4.33)}$$

ile verilir. n anında bulunulabilecek herhangi bir noktadan bir adımda ulaşılabilecek diğer noktalara geçiş ihtimallerinin tamamını içeren matris, zincirin Geçiş Matrisidir ve T ile gösterilir. Markov zincirlerinin geçiş matrisleri olasılıksal matrislerdir. Bu matrisin her bir p_{ij} elemanı, i. halden j. hale bir adımda geçiş olasılığını göstermektedir. Dolayısıyla matrisin i. satırındaki tüm elemanlar; $t_{i1},t_{i2},\ldots..t_{im}$, sıfırdan büyüktür ve toplamları 1'e eşittir.

Eğer bu matris zamandan bağımsız ise homojen bir Markov Zinciri söz konusudur. Homojen bir sistemde k adım sonra belirli bir x noktasında bulunma olasılığı T matrisinin k. kuvveti kullanılarak hesaplanır. Bu matris k-adım geçiş matrisi olarak adlandırılır.

$$P_{n+1}=p_n.T^k \qquad \textbf{(4.34)}$$

Markov zincirlerine ilişkin bazı tanımlar aşağıda sıralanmıştır [85-87].

1- i. halden, j. hale, herhangi bir zamanda, sıfırdan farklı bir geçiş olasılığı varsa, j i den **ulaşılabilir**dir. Eğer j. halden i.hale geçişte de benzer bir olasılık söz konusu ise i.hal j.hal ile **iletişimde**dir. Bir zincirdeki tüm noktaların birbirleriyle iletişim halinde olması durumunda zincir **ayrıştırılamaz**dır.

2- Sistemin i. haline dönüşü ancak bir k sayısının katları kadar adımda gerçekleşebiliyorsa ve k bu adım sayılarının OBEB i ise, i. halin periyodu k dır. k=1 için hal **aperiyodik**tir. Bir zinciri oluşturan tüm noktalar iletişimde ise tüm noktaların periyotları aynıdır.

3- i. hal başlangıç noktası olmak üzere oluşturulan bir zincirde, Tn(i,i)=1 ise ve i. hale dönüş için gereken zaman sonlu ise i. hal **pozitif kalıcı**, aksi durumda **geçici**dir. Eğer i. halden başka bir hale geçiş olmuyorsa yutuculuktan bahsedilir. Bir geçiş matrisinin i. satırında t_{ii} =1 ise i. hal yutucu durumdur.

4- Denklem (4.35) ile verilen koşulu sağlayan π dağılımı zincirin durağan dağılımıdır.

$$\pi = \pi T_n \qquad \textbf{(4.35)}$$

Sonlu bir Markov zinciri en az bir durağan dağılıma sahiptir.

v bir olasılık vektörü olmak üzere

$$vT=v \qquad \textbf{(4.36)}$$

özelliği sağlanıyorsa, v **durağan dağılım vektörü**dür. v vektörünün boyutu 1 x m ise zincirin durağan geçiş matrisi, her bir satırı v vektörü olan m x m boyutunda bir kare matristir. T matrisinin kuvvetlerinden bazılarının tüm elemanları sıfırdan farklıysa T bir düzgün olasılıksal matristir ve tek bir durağan dağılımı mevcuttur

5-Zincir, başlangıç durumuna ($p_0(x)$) bağlı olmaksızın $n \to \infty$ için durağan bir dağılıma yakınsamalıdır. Yani zincir ergodik olmalıdır.

Markov zincirine dâhil her halin aperyodik ve pozitif kalıcı olması zincirin yakınsak olması için gerek ve yeter şarttır.

Markov zincirinin durağan dağılımı, Yapay Isıl İşlem algoritmasında kullanılacak olan örneklerin olasılık dağılımı olarak kullanılmaktadır.

4.2.3 Yapay ısıl işlem benzeşimi ve yapay ısıl işlem algoritması

Bu yöntem ismini, metalürjide malzemelerin kafes yapısını iyileştirmek üzere kullanılan, belirli bir sıcaklığa kadar ısıtma ve sonra kontrollü bir biçimde soğutma işleminden almıştır. Isıtma kristal yapıdaki atomların başlangıçtaki minimum enerji seviyelerinde kopmasına ve daha üst enerji seviyeleri arasında rastlantısal geçişler yapmasına yol açarken, yavaş ve kontrollü soğutma başlangıçtaki enerji seviyesinden

daha düşük bir enerji seviyesine, dolayısıyla daha kararlı bir konuma ulaşma şansını arttırmaktadır. Yapay ısıl işlem algoritmasında optimizasyon probleminin olası çözümleri, katının belli bir enerji seviyesinde moleküllerin hız, pozisyon, oryantasyon, vb özellikleri tarafından belirlenen durumlarına, söz konusu çözümler için amaç fonksiyonunun aldığı değerler ise enerji seviyelerine karşılık gelmektedir (Çizelge.4.1). Atomların mümkün olan en düşük enerji seviyesine ulaşması, problemin global optimum noktasının bulunması anlamına gelmektedir [81,82].

Çizelge 4.1: Isıl işlem ve yapay ısıl işlem arasındaki benzerlik .

ISIL İŞLEM	YAPAY ISIL İŞLEM
Bir enerji seviyesinde moleküllerin hız, pozisyon, oryantasyon, vb özellikler tarafından belirlenen durumları	Optimizasyon probleminin olası çözümleri
Enerji seviyeleri	Söz konusu çözümler için amaç fonksiyonunun aldığı değerler
Atomların mümkün olan en düşük enerji seviyesine ulaşması	Problemin global optimum noktası

Algoritmanın ilk adımı, uygun olan veya olmayan rastlantısal bir başlangıç çözümü $f(X_0)$ seçilmesidir. $f(X_0)$ çözümünden hareketle, bu çözümünün komşuluğunda bulunan farklı X noktaları arasında, amaç fonksiyonunun değerini en az yapan bir nokta aranacaktır. Belirli bir optimizasyon aşamasında X* ve bunun komşuluğunda bulunan N adet olası çözüm noktasında amaç fonksiyonunun alabileceği ortalama değer, örneklemenin Metropolis Monte Carlo algoritmasıyla yapılması durumunda elde edilebilir.

Başlangıç noktasında amaç fonksiyonun değerinin (enerji seviyesinin) hesaplanmasının ardından rastlantısal bir hareketle yeni bir çözüm belirlenir ve ilk çözüme kıyasla "enerji seviyesi" daha düşükse (örneğin bir minimizasyon uygulamasında, amaç fonksiyonun aldığı değer daha düşükse), yeni çözüm olarak kabul edilir. Eğer yeni çözümün enerji seviyesi öncekinden daha yüksekse, kabul edilip edilmeyeceği Denklem (4.13) ile verilmiş olan "Metropolis Olasılık Kriteri"ne göre belirlenecektir.

Denklem (4.13) den iki önemli sonuç çıkmaktadır. Birincisi yeni çözümün değerinin eski çözüme yakın olması durumunda kabul edilme olasılığının yüksek olması, ikincisi ise yüksek sıcaklıklarda kabul edilme oranlarının daha yüksek olmasıdır. Bu sayede yüksek sıcaklıklarda, yani optimizasyon işleminin başlangıç kısmında, algoritma en kötü çözümleri bile kapsayacak şekilde geniş bir alanda araştırma yapar. Ancak sıcaklık azaldıkça, mevcut çözümün komşuluğunda yerel bir optimum noktayı araştırmaya başlar. Öte yandan Metropolis Olasılık Kriterine göre, mevcut çözümden daha kötü bir çözümün kabul edilme olasılığı da vardır ve bu sayede çözümün yerel bir optimum noktaya takılması da engellenir. Metropolis kabul kriterinin yapay ısıl işlem algoritmasına uygulanması, $R \in (0,1)$ aralığında bir rastlantısal sayı olmak üzere, Çizelge 4.2. de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2: Metropolis kabul kriterinin yapay ısıl işlem algoritmasına uygulanması ([83]den uyarlanmıştır).

F1< F0	F1> F0	
	r <P	r>P
Yeni nokta için amaç fonksiyonunun değeri azalmıştır. Dolayısıyla bu nokta yeni minimum olarak kabul edilir. F0 = F1 FTOP=FTOP +F1	Yeni nokta için amaç fonksiyonunun değeri artmıştır. Ancak artış miktarı kabul edilebilir orandadır. F0 = F1 FTOP=FTOP +F1	Yeni nokta için amaç fonksiyonu değerindeki artış kabul edilemeyecek kadar büyüktür. F0 = F0 FTOP=FTOP+F0

Bu işlemin N kere tekrarlanmasıyla, sonuçta belirli bir nokta etrafında amaç fonksiyonun alabileceği değerlerin ortalaması hesaplanır.

$$\langle F \rangle = \frac{F_{Top}}{N} \qquad \textbf{(4.37)}$$

<F> değeri bir X noktasının komşuluğunda amaç fonksiyonun Boltzmann ortalamasıdır.

Metropolis kabul kriteri optimizasyon yapısının üç temel elemanın biridir. Bir diğer eleman bir x^* noktası etrafında yapılacak araştırmaya ilişkin yeni noktalar yaratmaktır. N boyutlu uzayda, optimizasyon işlemindeki değişkenler x_i ve bu değişkenleri ilişkin alt ve üst sınırlar $x_i \in [A_i, B_i]$ olarak verilmiş olsun. Bu durumda x_i noktasının komşuluğundaki noktalar Denklem (4.38) ile bulunabilir.

$$x_{i+1} = x_i + y_i(B_i - A_i) \quad \textbf{(4.38)}$$

$y_i \in [-1\ 1]$, $u_i \in [0\ 1]$ düzgün dağılımlı bir rastlantısal sayı olmak üzere Denklem (4.39) ile elde edilir.

$$y^i = sgn(u^i - \frac{1}{2})T_i[(1+1/T_i)^{|2u^i - 1|} - 1] \quad \textbf{(4.39)}$$

Algoritmanın üçüncü temel parçası sıcaklığın değiştirilmesidir. Bu işlem için yaygın olarak kullanılan üç yaklaşım sırasıyla Denklem (4.40)-(4.42) ile verilen lineer azalma, logaritmik azalma ve adaptif sıcaklık azaltma stratejileridir.

$$T_{k+1} = T_k \, x \, SDF, \quad 0 < \text{SDF} < 1 \quad \textbf{(4.40)}$$

$$T = \frac{T_0}{ln(k)}\ , \ \text{k (iterasyon sayısı)} >> 3 \quad \textbf{(4.41)}$$

$$T_{ki} = T_{0i} e^{(c_i k_i^{1/N})} \quad \textbf{(4.42)}$$

Yukarıdaki denklemlerde, k iterasyon sayısı, T_0 başlangıç sıcaklığı, T_k k. iterasyon adımındaki sıcaklık, SDF sıcaklık düşürme katsayısı, c_i sıcaklık değişiminin hızını kontrol etmeye yönelik bir serbest kontrol parametresi, N bağımsız değişken sayısı ve k_i i. parametrenin iterasyon sayısıdır [88].

Yapay Isıl İşlem Algoritması iç içe iki çevrimden oluşur. Dıştaki çevrim sıcaklık değiştirme planı uygular. İçteki çevrim belli bir sıcaklık değeri için bir çözümün komşuluğundaki belli sayıda noktada amaç fonksiyonu için minimum bir değer arar.

Tek Amaçlı Yapay Isıl İşlem Algoritmasının temel adımları aşağıda verilmiştir.

1- Başlangıç noktası X, sıcaklık düşürme faktörü SDF ve iç ve dış çevrimlerin işlem sayısı ve durdurma kriteri belirlenir.

2- X için; amaç ve eğer varsa kısıtlama fonksiyonlarının değerleri hesaplanır.

3- X değerinden hareketle XP noktası elde edilir ve XP için amaç ve eğer varsa kısıtlama fonksiyonlarının değerleri hesaplanır.

2. Eğer F(XP) < F(X) ise ve gerekli kısıtlamalar sağlanıyorsa XP çözümü kabul edilir, X= XP olarak arşivlenir ve 4. adıma gidilir

3. $P_{kabul} = \min(1, e^{-\Delta F / T})$ kabul olasılığı hesaplanır. R uniform dağılımlı bir rastlantısal sayı olmak üzere P>R ise XP çözümü kabul edilir, X= XP olarak arşivlenir.

4. P < R ise X noktası mevcut çözüm noktası olarak korunur.

5. Adım uzunluğu değiştirme planına göre gerekiyorsa adım uzunluğu düşürülür.

6. Sıcaklık değiştirme planına göre, gerekiyorsa sıcaklık düşürülür.

7. 2–8 arası adımlar önceden belirlenmiş bir durdurma kriteri sağlanıncaya kadar tekrar edilir.

8. Algoritmanın bazı önemli parametreleri aşağıda açıklanmıştır.

1- T_0 başlangıç ve T_s son sıcaklık: İlk sıcaklık, önerilen çözümün mümkün olan hemen her komşuluğunu ziyaret etmeye yetecek kadar büyük olmalıdır. Aksi takdirde nihai çözüm başlangıç çözümüne çok yakın olacaktır [81, 87]. Kirkpatrick ve arkadaşları, başlangıç sıcaklığının doğru bir biçimde belirlenebilmesi için, seçilen sıcaklık değerinde kabul edilen hareket sayısının yapılan birkaç yüz harekete oranının önceden belirlenen bir sayıdan daha büyük olması durumunda bu sıcaklığın başlangıç değeri olarak kabul edilmesini aksi takdirde ise daha büyük bir sıcaklık değerinin kullanılmasını önermiştir [81].

Son sıcaklık olarak sıfır sıcaklığı seçilebilir veya önceden belirlenen bir kritere göre ardışıl iki sıcaklık değeri arasında sistemin hareketinde iyi ya da kötü yönde bir değişmeye rastlanmayıncaya kadar düşürülür [78].

2- Her bir sıcaklık derecesinde atılacak adım sayısı ve adım uzunluğu değiştirme : Isıl işlemde her bir sıcaklık kademesinde atomların ısıl dengeye ulaşabilmesi için belli bir süre beklenmelidir. Yapay ısıl işlemde bu, her sıcaklık değeri için belli sayıda iterasyon yapmaya karşılık gelir. İşlem sayısının aşırı boyutlara ulaşmaması için bu aşamada izlenecek temel strateji, çok sayıda sıcaklık kademesi için her bir kademede az sayıda iterasyonun yapılması veya sıcaklığın geniş aralıklarla değiştirilip her kademede çok sayıda iterasyon yapılması biçimindedir [81–82].

Yazılan algoritmada sabit bir sıcaklık derecesinde, bir koordinat ekseni doğrultusunda (burada koordinat eksenleri, bağımsız değişkenlerin değişim aralığına karşılık gelmektedir) atılan adım sayısı N_K, koordinat ekseni sayısı N olmak üzere N_K xN iterasyon sonra adım uzunluğu değiştirilmektedir

$$s^0{}_i = UL_i - AL_i \qquad \textbf{(4.43)}$$

olarak seçilmiş olup k. adım değiştirme işleminde

$$s^k{}_i = s^{k-1}{}_i \,/(ADF)^k \qquad \textbf{(4.44)}$$

değerini almaktadır.

UL_i ve AL_i, i. bağımsız değişken için üst ve alt limitlerdir.

ADF, adım uzunluğu düşürme faktörüdür ve değeri 1 den büyüktür. Bu değer XP noktasını bulmak üzere aşağıdaki şekilde kullanılır.

$$XP(i) = X(i) + (2.u_i - 1)s_i \qquad \textbf{(4.45)}$$

Adım uzunluğunun fazla azalıp, pratik olarak sıfıra düşmesi XP noktasının sabitlenmesine yol açacaktır. Bu nedenle ADF değeri mümkün olduğunca 1'e yakın seçilmelidir.

Bir sıcaklık derecesinde, her bir koordinat ekseni doğrultusunda adım uzunluğunun kaç kez değiştirileceği (N_A) seçilmesi gereken bir diğer büyüklüktür.

3- Sıcaklık azaltma faktörü: Sabit bir sıcaklıkta N_AxN_KxN iterasyondan sonra sıcaklık düşürülmektedir. Bu çalışmada incelenen problem için T_0 = 1000 için sıcaklığın doğrusal olarak azaltılması ve sıcaklık düşürme faktörünün SDF=0.95 olması yeterli olmaktadır.

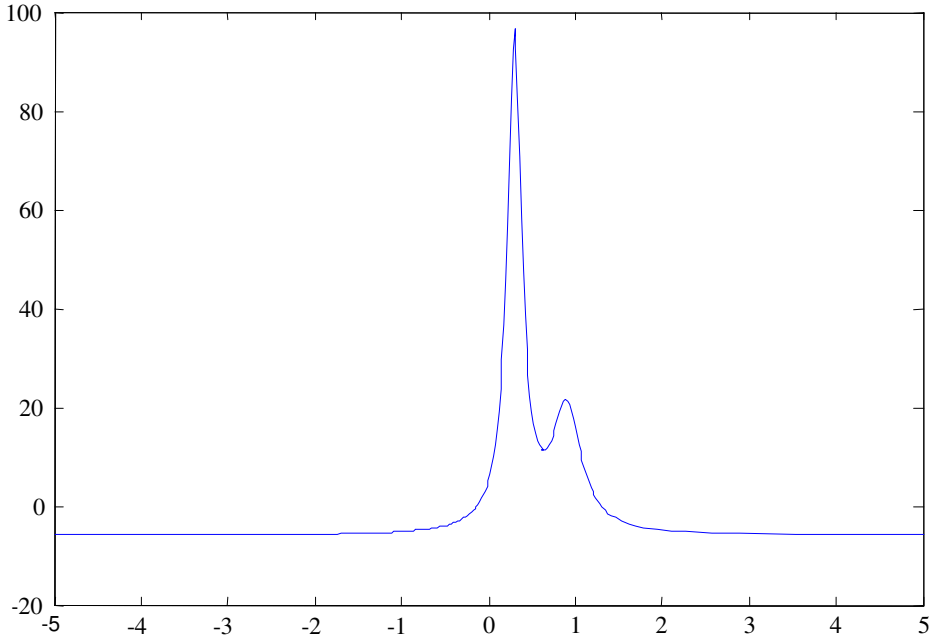
4- Durdurma kriteri

Durdurma kriteri olarak son sıcaklık değeri, amaç fonksiyonunun ardışıl birkaç değeri arasındaki farkın önceden belirlenmiş bir ε değerinden daha küçük olması veya maksimum işlem sayısı seçilebilir. Bu çalışmada ilk yaklaşım tercih edilmiştir. Son sıcaklık olarak T=0 değeri seçilmiştir.

Asenkron motor tasarımını optimize etmek amacıyla yazılan programın işlevselliğini kontrol etmek amacıyla bazı çok bilinen test problemlerinin çözümü araştırılmıştır.

1- Test problemlerinden ilki olan *Hump* fonksiyonu MATLAB araç kutusundan alınmıştır. Bu fonksiyonun [-5 5] aralığındaki değişimi aşağıda görülmektedir.

Optimizasyon algoritması bu aralıkta fonksiyonun minimumunu, x= -4.9980 noktasında y =-5.9357 olarak hesaplamıştır. Fonksiyonun bu aralıktaki gerçek minimumu, x=-4.99987, y= -5.9357 noktasıdır.



Şekil 4.3: *Hump* fonksiyonu.

İki değişkenli test problemleri olarak *Brain 1, Brain 2 ve 2 boyutlu Rastrigin* fonksiyonlarının çözümü araştırılmıştır.

2- *Brain-1* fonksiyonu Denklem (4.46) ile verilmiştir ve [-5 5] aralığındaki minimumu x = $\pm$(0.0089,-07126) için y = -1.0316 dır. Optimizasyon algoritması minimum nokta olarak x= [0.0899 , -0.7127] için y = -1.0316 değerini bulmuştur.

$$f = \frac{1}{3}x(1)^6 - 2.1x(1)^4 + 4x(1)^2 + x(1)x(2) - 4x(2)^2 + 4x(1)^2 \qquad \textbf{(4.46)}$$

3- Denklem (4.47) ile verilen *Brain–2* fonksiyonu [-10 10] aralığında 4 ayrı noktada minimum değer almaktadır.

x_1=(0.1487,0.4021), x_2= (0.40254,0.2874), x_3 = (1.5975,-0.2874), x_4 = (1.8513,-0.4021) noktalarında fonksiyonun değeri y = 0 dır.

$$f = 1 - 2x(2) + \frac{1}{20}\sin(4\pi x(2)) - x(1))^2 + (x(2) - \frac{1}{2}\sin(2\pi x(1)))^2 \qquad \textbf{(4.47)}$$

Bu çalışmada kullanılan optimizasyon algoritması ile

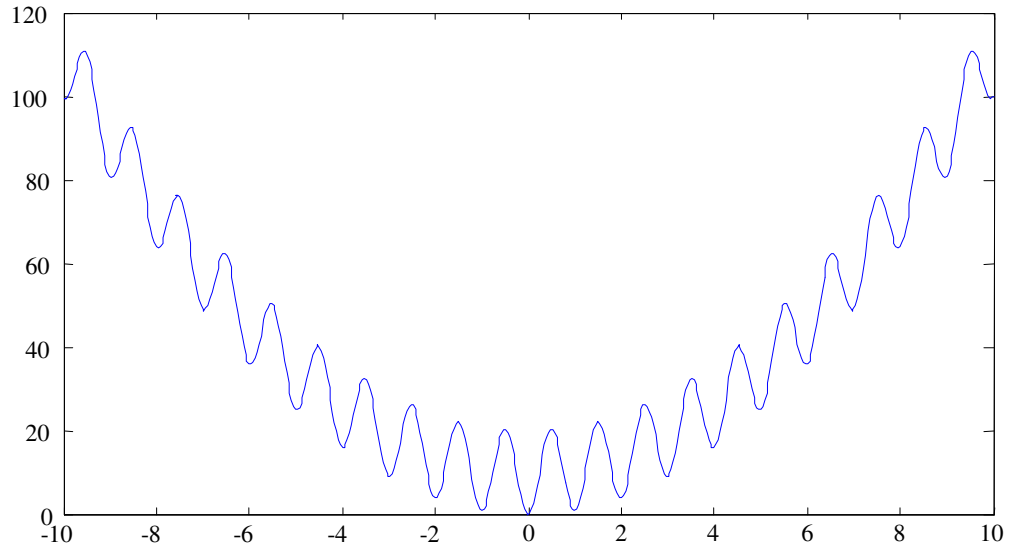
x=(1.8513,-0.4023) için y = 3.5861e-008, x= (1.5972 ,-0.2883) için y =9.0173e-008, x = (0.4025, 0.2876) için y = 1.3081e-007

değerleri elde edilmiştir.

4- Şekil 4.4 de gösterilen İki boyutlu Rastrigin fonksiyonu çok sayıda yerel maksimum ve minimuma sahip olup, global minimum değeri y = 0 dır .Bu değer orijin noktasında elde edilmektedir. Fonksiyonun ifadesi Denklem (4.48) ile verilmiştir.

$$f = 20 + x(1)^2 + x(2)^2 - 10(\cos(2\pi x(2)) + \cos(2\pi x(2))) \quad \textbf{(4.48)}$$

İki boyutlu Rastrigin için elde edilen çözüm x = 1.0e-004 .(-0.1592 -0.2302) noktasında y= 1.5540e-007 değeridir.



Şekil 4.4: 2 Boyutlu Rastrigin fonksiyonu.

5- Çok boyutlu Rastrigin fonksiyonunun genel ifadesi Denklem (4.49) ile verilmiştir.

$$f = 10n + \sum_i^n x(i)^2 - 10\cos(2\pi x(i)) \quad \textbf{(4.49)}$$

n=10 için Rastrigin fonksiyonunun minimumu x =1.0e-003x(-0.1467, -0.0471, 0.0210, -0.0271, 0, -0.0911, -0.1874, 0, 0.0276, -0.0233) noktasında, y = 1.3817e-005 olarak elde edilmiştir. Gerçek global minimum sıfıra eşittir ve orijin noktasındadır.

4.3 Asenkron Motorun Tasarım Değişkenleri ve İşletme Büyüklükleri

4.3.1 Tasarım değişkenleri

Stator uzunluğu, iç ve dış çaplar

Asenkron makinanın birim hacminden bir dakikada alınabilecek enerji Esson güç katsayısı veya faydalanma katsayısı olarak adlandırılan C_0 ($kVA.min^{-1}/m^3$) ile verilir.

$$C_0 = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} k_{w1} B_{\delta 1} 10^{-3} \quad \textbf{(4.50)}$$

Yukarıdaki denklemde k_{w1} stator sargı faktörünün, $B_{\delta i}$ ise hava aralığı akısının birinci harmoniğidir. Esson güç katsayısından faydalanarak makinada endüklenen iç güç aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S_i = C.D^2_i.L_i.n_s \quad \textbf{(4.51)}$$

Motordan kutup başına elde edilecek güce bağlı olarak Esson katsayısının değeri tablolar halinde verilmiştir[73]. Tasarım sürecinde iç çap D_{i1} veya aktif demir uzunluğu L_i den birinin belli olması durumunda diğeri de Denklem (4.51) ile belirlenmiş olur. Ancak aktif stator uzunluğunun motorun Denklem (4.52) ile tanımlanmış kutup adımına oranının belirli sınırlar içinde kalması gerekmektedir.

$$\tau_p = \frac{\pi D_{i1}}{2p} \quad \textbf{(4.52)}$$

Bu oran dört kutuplu makinalarda 1–2.2 aralığındadır.

Statorda soğutma kanallarının bulunmadığı durumda aktif demir uzunluğu statorun toplam uzunluğu ve saf demir uzunluğunun ortalamasıdır. Eğer yarıçapsal soğutma kanalları mevcutsa bu durumda aktif endüvi uzunluğu toplam stator uzunluğundan soğutma kanallarının çaplarının toplamı çıkartılarak bulunur.

Stator sargısında, sargı başı ve bağlantı bacaklarını içeren ortalama iletken uzunluğu Denklem (4.53) ile elde edilir.

$$L_{iletort} = L_{top} + 35 \quad \textbf{(4.53)}$$

Dolayısıyla stator sargısı için kullanılan iletkenin toplam uzunluğu

$$L_{ilet} = 2.m_1.N_1.L_{iletort} \quad \textbf{(4.54)}$$

olarak hesaplanır.

Denklem (4.54) de m_1 faz sayısı, N_1 stator sargısının sarım sayısıdır ve bir diğer tasarım değişkeni olan hava aralığı akı yoğunluğu tarafından belirlenir.

$$N_1 = \frac{V_1 \dfrac{1}{1+\sigma}}{4{,}44.f_1.k_{w1}\phi} \qquad \textbf{(4.55)}$$

p=2 için $\dfrac{1}{1+\sigma} = 0.975$ alınır.

Denklem (4.55) in sonucu tam sayı olarak bulunmamışsa tam sayıya yuvarlanması ve elde edilen sonuca göre hava aralığı akısında düzeltme yapılması gerekir. Denklem (4.54) deki $2.m_1.N_1$ çarpımı z toplam iletken sayısını verir. Bir oluktaki iletken sayısı ise paralel kol sayısı n_p, kısmi iletken sayısı n_k olmak üzere Denklem (4.56) ile bulunur.

$$z_{oluk} = \frac{z}{Q_s}.n_p.n_k = \frac{2.m_1 N_1}{Q_s}.n_p.n_k \qquad \textbf{(4.56)}$$

Toplam kısmi iletken sayısını ve iletkenlerin çaplarını belirlerken akım yoğunluğunun s_i = 3-5 A/mm^2 aşmamasına dikkat edilmelidir.

$$I_n = s_i.n_p.n_k.q_{cu1} \qquad \textbf{(4.57)}$$

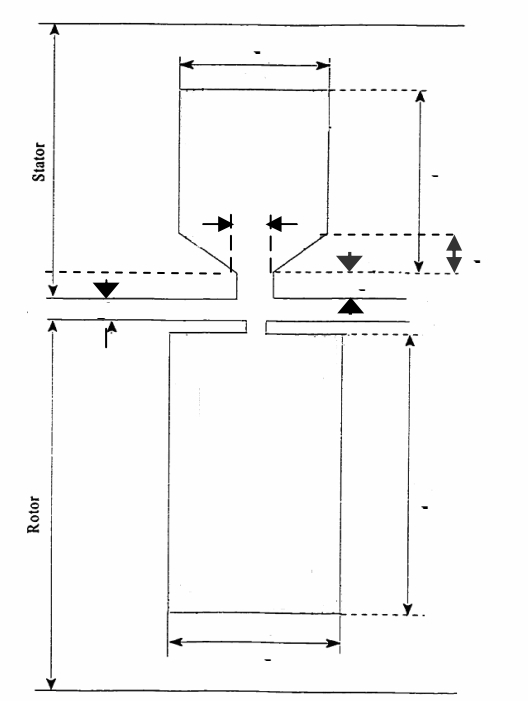
<u>Stator oluk genişliği ve derinliği:</u>

Stator oluk genişliği ve derinliği tasarım değişkenleridir. Ancak bir oluğun geometrisini belirleyen başka ölçüler de vardır. Optimizasyon işlemi sırasında değeri sabit tutulacak bu büyüklükler Şekil 4.5 de gösterilmiş olan a_{o1} stator oluk ağzı genişliği, h_{11} stator oluk ağzı yüksekliği ve h_{12} stator oluk ağzı eğimi yüksekliğidir. Buna göre stator dişlerinin en dar ve en geniş olduğu yerler ile ortalama diş genişliği, sırasıyla Denklem (4.58) – (4.60) ile hesaplanır.

$$b_{d1min} = \frac{(D_{i1} + h_{11} + h_{12})\times\pi}{Q_s} - b_{o1}, \qquad \textbf{(4.58)}$$

$$b_{d1maks} = \tau_{o1} - a_{o1} \qquad \textbf{(4.59)}$$

$$b_{d1ort} = \frac{(D_{i1} + h_{o1}) \times \pi}{Q_s} - b_{o1} \qquad \textbf{(4.60)}$$



Şekil 4.5: Stator ve rotor olukları [4].

50 Hz.lik besleme frekansı için stator boyunduruğundaki endüksiyonun en büyük değeri 1.2–1.5 Tesla, diş başında 1.6 ile 2.1 Tesla, diş ortasında 1.2–1.6 Tesla olmalıdır [73].

τ_{o1} stator oluk adımı, Denklem (4.61) ile hesaplanır.

$$\tau_{o1} = \frac{\pi D_{i1}}{Q_s} \qquad \textbf{(4.61)}$$

Oluk adımının yarısı diş, yarısı da oluk tarafından kaplanır. Dolayısıyla oluk adımı, oluk genişliği b_{o1} üzerinde belirleyicidir. Oluk genişliği ve derinliği arasında ise aşağıdaki koşulun sağlanması zorunludur [73].

$$\frac{h_{o1}}{b_{o1}} = 3 \div 5.5 \qquad \textbf{(4.62)}$$

Oluk genişliği ve derinliği kısmi iletken sayısı, yalıtılmış iletkenlerin çapı, kullanılan oluk yalıtkanı ile bobin yalıtımlarının kalınlığıyla ilgilidir. Oluğa yan yana yerleştirilecek iletken sayısı oluk genişliğini, üst üste yerleştirilecek iletken sayısı derinliği belirler.

Stator dış çapı:

Stator boyunduruğundan geçen akı stator boyunduruk yüksekliğini belirler.

$$h_{sb} = \frac{\phi(1+\sigma)}{4.k_{cfe}.L_{top}.B} \quad \textbf{(4.63)}$$

Bu uzunluk belirlendikten sonra stator dış çapının hesabı mümkündür.

$$D_{o1} = D_{i1} + 2.h_{sb} \quad \textbf{(4.64)}$$

Hava aralığı uzunluğu ve akı yoğunluğu:

Hava aralığının var olma nedeni rotora hareket serbestliği kazandırmaktır. Ancak yüksek manyetik direnci nedeniyle manyetik akı yoğunluğunun azalmasına ve aynı nedenle kaçak akıyı arttırarak güç faktöründe bozulmaya yol açar. Öte yandan büyük hava aralıklarının diş pulzasyon ve yüzey kayıplarında azalmaya yol açtığı Bölüm.3, Denklem (3.18)-(3.22) den görülebilir. Hava aralığı uzunluğu 4–12 kutuplu küçük güçlü motorlarda Denklem (4.65) ile hesaplanır.

$$\delta = 0.2 + \frac{Di1}{1000} \quad \textbf{(4.65)}$$

Asenkron motor oluklarının hava aralığı uzunluğunu arttırıcı etkisini temsil eden Carter faktörü Bölüm.3, Denklem (3.21) ile verilmiştir.

Hava aralığı uzunluğunun belirlenmesiyle rotor dış çapı da belirlenmiş olur.

Rotor kafes çubuklarının uzunluğu ve çapı:

Çubuk uzunluğu stator toplam uzunluğundan 6 ile 12 mm daha uzun olacaktır. Her bir çubuğun kesit alanıyla stator kısmi iletkenlerinin kesit alanları arasındaki bağıntı ise aşağıda verilmiştir.

$$q_{çubuk} = 0.6\frac{z_1.q_{cu1}}{Q_r} \quad \textbf{(4.66)}$$

Yuvarlak çubuklu rotor için oluk yüksekliği Denklem (4.67) ile bulunur.

$$h_{o2}=d_{cubuk}+1+(h_{21}+h_{22}) \quad \textbf{(4.67)}$$

h_{21} rotor oluk ağzı yüksekliği ve h_{22} rotor oluk ağzı eğimi yüksekliğidir.

Rotora endüklenen gerilimlerin genliklerinin kaymayla orantılı olarak çok düşük olması nedeniyle çubuk ve kafes arasında yalıtım, alçak gerilimlerde çalışan motorlar için gereksizdir.

Yüksüz durumda rotorda endüklenen gerilim ve bu gerilimin çubuktan akıttığı akım Denklem (4.68) ve Denklem (4.69) da verilmiştir.

$$E_{cubuk} = \frac{V_1}{\sqrt{3}} \frac{1}{1+\sigma} \frac{1}{2.N_1 k_{w1}} \quad \textbf{(4.68)}$$

$$I_{cubuk} = \frac{P_{ç,} + P_{stv}}{N_r . E_{cubuk} (1-s)} \quad \textbf{(4.69)}$$

Halka akımı Denklem (4.70) ile hesaplanır.

$$I_{halka} = \frac{Q_r I_{cubuk}}{2.\pi.p} \quad \textbf{(4.70)}$$

Bu akım değerlerine göre çubuk ve halkalardaki akım yoğunlukları bulunur.

$$s_c = \frac{I_{cubuk}}{q_{cubuk}}, s_c = \frac{I_{halka}}{q_{halka}} \quad \textbf{(4.71)}$$

Statordakine benzer şekilde, rotorda diş biçimine bağlı olarak diş boyunca manyetik zorlanma farklı değerler alacaktır. Rotorda dişlerinin en dar ve en geniş olduğu yerler ile ortalama diş genişliği, Denklem (4.58)-(4.60) da "1" veya "s" indisleri yerine "2" veya "r" indisi konularak hesaplanır. Rotor boyunduruk yüksekliği Denklem (4.72) ile elde edilir.

$$h_{rb} = \frac{\phi}{4.k_{cfe}.L_{top}.B} \quad \textbf{(4.72)}$$

Boyunduruktaki akı yoğunluğunun en fazla 1.2–1.6 Tesla, diş dibinde 1.7–2.2 Tesla, diş ortasında 1.5–1.8 Tesla olması gerekmektedir [73]

Kısadevre halkasının çapı, rotor dış çapından rotor oluk yüksekliğinin 1–2 katı çıkartılarak elde edilir.

4.3.2 İşletme büyüklükleri

Yukarıda verilen tasarım değişkenleri ve ikincil değişkenler kullanılarak hesaplanan geometrik boyutlarda üretilecek asenkron motorun standartlarda belirtilen ve /veya üretici tarafından talep edilen bazı işletme özelliklerini sağlayabiliyor olması gereklidir.

Boşta çalışmada güç faktörü:

Hava aralığında istenen akı yoğunluğunu üretebilmek için gereken amper-sarım Denklem (4.73) ile hesaplanır.

$$\Theta_{\delta} = 0{,}8.k_c.\delta.B_{\delta}.10^4 \quad \textbf{(4.73)}$$

Denklem (4.58)-(4.60) kullanılarak stator ve rotor dişlerindeki manyetik akı yoğunlukları aşağıdaki gibi bulunur.

$$B_{d1\min} = \frac{L_i \tau_{o1}}{L_{fe} b_{d1maks}} B_{\chi}(1+\sigma) \quad B_{d2\min} = \frac{L_i \tau_{o2}}{L_{fe} b_{d2maks}} B_{\chi}$$
$$B_{d1maks} = \frac{L_i \tau_{o1}}{L_{fe} b_{d1\min}} B_{\chi}(1+\frac{1}{3}\sigma) \quad B_{d1maks} = \frac{L_i \tau_{o2}}{L_{fe} b_{d2\min}} B_{\chi} \quad \textbf{(4.74)}$$
$$B_{d1ort} = \frac{L_i \tau_{o1}}{L_{fe} b_{d1ort}} B_{\chi}(1+\frac{2}{3}\sigma) \quad B_{d1ort} = \frac{L_i \tau_{o2}}{L_{fe} b_{d2ort}} B_{\chi}$$

Bu akı yoğunluklarına karşı gelen alan şiddeti değerleri H_{min}, H_{maks}, H_{ort} olmak üzere ortalama alan şiddeti Denklem (4.75) ile verilir.

$$H_{ort} = \frac{H_{\min} + 4H_{ort} + H_{maks}}{6} \quad \textbf{(4.75)}$$

Dişler ve boyunduruktaki amper-sarım, ortalama alan şiddeti ve akı yolu uzunluğunun çarpımına eşittir.

$$\Theta = H * l \quad \textbf{(4.76)}$$

Akı yolu uzunluğu dişlerde diş yüksekliğine eşittir. Stator ve rotor boyundurukları için bu uzunluğun yaklaşık değeri Denklem (4.77)- (4.78) ile hesaplanır.

$$l_{sb} = \frac{\pi(D_{o1} - h_{sb})}{2p} \quad \textbf{(4.77)}$$

$$l_{rb} = \frac{\pi(D_{i2} + h_{rb})}{2p} \quad \textbf{(4.78)}$$

Stator, rotor ve hava aralığının oluşturduğu kapalı manyetik devre için toplam amper-sarım aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\Theta = 2(\Theta_{\delta} + \Theta_{d1} + \Theta_{d2}) + \Theta_{b1} + \Theta_{b2} \quad \textbf{(4.79)}$$

Bu amper-sarımı üretecek mıknatıslanma akımının tepe değeri aşağıda verilmiştir.

$$I_\mu = \frac{p\Theta}{0{,}9.m_1.N_1.k_{w1}} \tag{4.80}$$

Mıknatıslanma akımı, motorun boşta çalışırken şebekeden çektiği akımın reaktif bileşenidir. Dolayısıyla boşta çalışmadaki güç katsayısı bu akım değerinden hareketle hesaplanabilir.

$$\cos\rho_0 = \cos(\arcsin\frac{I_\mu}{I_0}) \tag{4.81}$$

Kalkış momenti ve akımı:

Motorun yol alma sırasında şebekeden çekeceği akım ve bu akımla üretebileceği momentin hesaplanması için stator ve rotor sargı dirençleri ile kaçak reaktanslarının hesaplanması gerekir.

$$r_1 = \frac{z_1 L_{iletort}}{m_1 q_{cu1} \rho_{cu}} \rightarrow \text{stator sargı direnci} \tag{4.82}$$

$$r_2 = \rho_{al}\frac{L_{cubuk}}{q_{cubuk}} + \rho_{al}\frac{D_{halka}Q_r}{q_{halka}2\pi p^2} \rightarrow \text{toplam kafes direnci} \tag{4.83}$$

$$r'_2 = r_2\left(4\frac{m_1}{Q_r}\left[\frac{N_1 k_{w1}}{\frac{\sin b\pi/2\tau_p}{b\pi/2\tau_p}}\right]^2\right) \rightarrow \text{statora indirgenmiş rotor direnci} \tag{4.84}$$

$h_{1s}=h_{o1}-2*h_{11}-h_{12}$; **(4.85)**

$$b_{3s} = \frac{b_{o1}-h_{11}}{2.3\log\left(\frac{b_{o1}}{h_{11}}\right)} \tag{4.86}$$

$$\lambda_{os} = k_{cuf}\left(\frac{h_{1s}}{3b_{o1}}\right) + k_{o2}\left(\frac{h_{11}}{b_{o1}} + \frac{h_{21}}{b_{3s}} + \frac{h_{11}}{a_{o1}}\right) \tag{4.87}$$

$$\lambda_{or} = 0.66 + \left(\frac{h_{o2}}{b_{o2}}\right) \tag{4.88}$$

$$x_{1\sigma} = 1.6\pi^2\frac{f_1}{p}N_s^2(\lambda_{os}\frac{L_{top}}{(Q_s/2pm)} + 0.425(l_{bb} - 0.715\tau'_p) + 0.0103\frac{\tau_o L_i m_1}{\pi^2 k_c k_d \delta})10^{-8} \tag{4.89}$$

$$x_{2\sigma} = 1.6\pi^2 \frac{f_2}{p} N_2^2 \left(\frac{Z_2}{2pm_1} \tau_p g_{bb} + \lambda_{ro} \frac{L_{top}}{(Q_r / 2pm)} + \frac{Z_2}{2pm_1} \frac{\tau_p L_i m_1}{\pi^2 k_c k_d \delta} \right) 10^{-8} \quad \textbf{(4.90)}$$

Hesaplanan direnç ve kaçak reaktans değerleri kullanılarak asenkron motorun yaygın olarak kullanılan T eşdeğer devresi elde edilir. Bu devrenin oluşturulması ve bu devreden hareketle kalkış veya anma momentleri ile akımlarının hesaplanmasına ilişkin literatürde çok sayıda kaynak mevcuttur. Burada söz konusu akım ve momentlerin ifadelerinin verilmesiyle yetinilecektir [4].

$$M_{yv} = \frac{60 m_1}{2\pi n_s} \frac{V_1^2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma})} \quad \textbf{(4.91)}$$

$$I_{yv} = I_{kd} \frac{V_1}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma})^2}} \quad \textbf{(4.92)}$$

Verim:

Bölüm 3.2 de asenkron motor kayıpları anlatılmıştır. Bakır kayıpları, bu bölümde hesaplanan direnç değerleri kullanılmak suretiyle Denklem (3.13) den hesaplanır. Boyunduruk ve dişlerdeki histerezis ve girdap akımı kayıplarının hesaplanabilmesi için stator diş ve boyunduruğunun ağırlıkları bulunmalıdır.

Stator dişlerinin ağırlığı Denklem (4.93), boyunduruğunun ağırlığı Denklem (4.94), rotor diş ağırlığı Denklem 4.95 ile verilmiştir.

$$G_{d1} = \left[\pi \left(\frac{D_{i1} + 2h_{o1}}{2} \right)^2 - \pi \frac{D_{i1}^2}{4} - Q_s h_{o1} b_{o1} \right] k_{fe} L \rho_{Fe} \quad \textbf{(4.93)}$$

$$G_{b1} = \left[\frac{D_{i1}^2}{4} - \left(\frac{D_{i1} + 2h_{o1}}{2} \right)^2 \right] \pi k_{fe} L \rho_{Fe} \quad \textbf{(4.94)}$$

$$G_{d2} = \left[\pi \frac{D_{o2}^2}{4} - \pi \left(\frac{D_{02} - 2h_{o2}}{2} \right)^2 - Q_r \pi \frac{d_{o2}^2}{4} - Q_r h_{o2} b_{o2} \right] k_{fe} L \rho_{Fe} \quad \textbf{(4.95)}$$

Denklem (4.96) stator sargısının, Denklem (4.97) ve (4.98) da rotor kafes ve kısadevre halkasının ağırlıklarını vermektedir.

$$G_{sc} = m_1 . L_{ilet} . q_{cu1} \rho_{cu} \quad \textbf{(4.96)}$$

$$G_{çubuk}=\rho_a Z_2 L_{çubuk} q_{çubuk} 10^{-3} \quad \textbf{(4.97)}$$

$$G_{halka}=\rho_a D_{halka} q_{halka} 10^{-3} \quad \textbf{(4.98)}$$

Motorun aktif giriş gücü anma gücüne Bölüm 3.2 de anlatılan tüm kayıpların toplamının eklenmesiyle bulunur. Çıkış gücünün giriş gücüne oranı motorun verimini verir.

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \sum P_k} \quad \textbf{(4.99)}$$

Elde edilen sonuçlar ile anma çalışmasındaki güç katsayısının da doğrulaması yapılır.

$$\cos \rho_n = \frac{P_n + \sum P_k}{S_i} \quad \textbf{(4.100)}$$

Optimizasyon işlemi iki ana program içermektedir. Bunlardan ilki optimizasyon için gerekli iterasyon ve kıyaslamaları gerçekleştiren ASM_OPT, ikincisi ise motorun tasarım büyüklüklerini ve sıcaklığını hesaplayan AMAÇ programlarıdır. Motor performansı ile ilgili kısıtlamalar da AMAÇ programı tarafından hesaplanmaktadır. Yapay Isıl İşlem algoritmasının Literatürde en yaygın kullanımı ASA olarak bilinen bir paket programdır [88]. Çizelge 4.3 de düşük stator sargı sıcaklığı için, bu çalışmada kullanılan algoritmanın ASA ve Matlab Pattern Search araç kutusu kullanılarak uygulanan Örüntü Araştırma Yöntemi ile kıyaslaması verilmiştir.

Bu tablodan görüldüğü üzere her üç algoritmayla elde edilen sonuçlar birbirine çok yakındır. Her üç algoritmanın da rastlantısal sayılara dayalı işlem yapıyor olması nedeniyle farklı zamanlarda çok az da olsa farklı sonuçlar vermesi mümkündür. Dolayısıyla sonuçlar arasındaki fark anlamlı değildir. Ancak ASA çözüme çok daha uzun zamanda ulaşmaktadır. Pattern Search (PS) Araç Kutusunun Kullanılabilmesi için ayrı bir kısıtlama fonksiyonunun çağrılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca amaç ve kısıtlama fonksiyonlarının tek bir skalar değer üretmesi gerekmektedir. Dolayısıyla fonksiyonların uygun bir şekilde birleştirilmesi gerekir.

$$F=w_1F_1+w_2F_2+..+w_nF_n \quad \textbf{(4.101)}$$

Bu işlem, amaç fonksiyonlarının normalizasyonu ve uygun w katsayılarının seçilmesi gibi ara işlemleri zorunlu kılar. Ancak önerilen optimizasyon algoritmasında aynı dosya içerisinde çok sayıda amaç ve kısıtlama fonksiyonu herhangi bir ara işlem ve düzenlemeye gerek kalmadan da işlem görebilmektedir

Yapay Isıl İşlem algoritmasının kodu basit ve esnektir. Amaç ve kısıt fonksiyonlarını ayrık veya birleştirilmiş şekilde işleyebilir. Diğer dolaysız yöntemler gibi amaç fonksiyonunu türevlerini kullanmadığı için gradyan tabanlı yöntemlere göre daha az ara işlem gerektirir ve türev işleminden kaynaklanan hesap hatalarından muaftır.

Çizelge 4.3: Optimizasyon yöntemlerinin kıyaslanması.

	MEVCUT TASARIM	YAPAY ISIL İŞLEM	ASA	PS
İŞLEM SAYISI	---------	2926	38286	1403
İŞLEM SÜRESİ (s)	---------	17	191	12
SARGI SICAKLIĞI (^{0}C)	115.91	109.1012	109.1105	109.1104
VERİM	0.8145	0.8294	0.8294	0.8293
KALKIŞ İYİLİĞİ	1.5115	1.6453	1.6454	1.6454
KALKIŞ MOMENTİ (N.m)	31.166	39.071	39.0761	39.0761
MIK. AKIMI (A)	2.01	2.4933	2.5610	2.5089
AĞIRLIK (kg)	7.6	5.8787	5.8736	5.8736
KALKIŞ AKIMI (A)	20.5653	23.7443	23.7484	23.7484

4.4 Sınırlamalı Optimizasyon Problemlerinin Sınırlamasız Problemlere Dönüştürülmesi

Sınırlamalı problemlerin ceza ve bariyer fonksiyonları kullanılarak sınırlamasız probleme dönüştürülmesi yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Ceza Fonksiyonu kullanımı amaç fonksiyonuna bir ceza terimi eklemek suretiyle, sınırlamasız optimizasyon problemine dönüştürür. Değiştirilmiş amaç fonksiyonunun ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$F_p(X) = F(X) + r_k P(X) \qquad \textbf{(4.102)}$$

Burada P sınır aşımına bir limit koymak amacıyla kullanılan ceza fonksiyonu ve r,ceza büyüklüğünü belirlemek üzere kullanılan skalar bir çarpandır. Dahili ve Harici olmak üzere iki tip ceza fonksiyonu yöntemi vardır [3,53].

"Harici Ceza Fonksiyonu Yöntemi" asıl amaç fonksiyonuna uygun olmayan bölgede değeri arttıracak yönde bir ceza fonksiyonu eklenmesine dayanır. Böylece uygun olmayan bölgede bir minimum bulmak mümkün olmaz. En büyük avantajı, çözüm için uygun bir başlangıç bölgesi seçme zorunluluğunun olmamasıdır. HCFY için yaygın olarak kullanılan bir form aşağıda verilmiştir.

$$\min F_p(X) = F(X) + r_k \sum_{i=1}^{m} maks(0, g_i) \qquad \textbf{(4.103)}$$

Eğer $g_i \leq 0$ sınır koşulu sağlanıyorsa ceza fonksiyonu sıfır değerini alır. Eğer bu koşul sağlanmıyorsa P>0 olur.

Dikkat edilmesi gereken bir nokta sınırların, içlerinden birinin diğerlerini baskılayıcı etki göstermemesi için uygun bir şekilde ölçeklenmesidir. Bir diğer nokta r ceza çarpanının belirlenmesidir. Eğer r çok küçük seçilirse ceza fonksiyonu yeterince büyük değerler alamayacağı için hatalı sonuçlar verebilir. Çok büyük r değerleri sınırları korumaya yardımcı olsa da çözüm üzerinde bozucu etki yapar. Bu sorunun giderilmesi için önerilen bir yöntem, ceza çarpanının zamana bağlı artan bir fonksiyon olarak tanımlanmasıdır [4].

"Dahili Ceza Fonksiyonu Yöntemi"nde ise ceza fonksiyonu, çözümün uygun bölgeden ayrılmasını engelleyecek biçimde çalışır.

$$min \quad F_p(X) = F(X) + \sum_{i=1}^{m} r_i \, log(-g_i) \quad \text{logaritmik bariyer fonksiyonu} \qquad \textbf{(4.104)}$$

$$min \quad F_p(X) = F(X) + \sum_{i=1}^{m} r_i \frac{1}{g_i} \quad \text{ters bariyer fonksiyonu} \qquad \textbf{(4.105)}$$

Logaritmik veya ters ceza terimlerinin sayesinde, eğer değiştirilmiş amaç fonksiyonu bir sınırlama fonksiyonun maksimum değeri olan sıfıra yakınsıyorsa, değeri sonsuza gidecektir. Tam sınırda yani $g_i=0$ için F_p süreksizdir. Bu durum, başlangıç için uygun bir bölge seçme zorunluluğuyla birlikte, yöntemin dezavantajlarını oluşturur.

"Lagrange Çarpanları Yöntemi" dönüştürülmüş amaç fonksiyonu kullanan analitik yöntemlerin tipik bir örneğidir. Denklem (4.106), g_i eşitsizlik kısıtlamaları altındaki F(X) amaç fonksiyonunun kısıtlamasız formunu göstermektedir [52].

$$\text{Min } L = F(X) + \mu(h_i + z^2) + \lambda g_i(X) \qquad \textbf{(4.106)}$$

Burada μ ve λ eşitlik ve eşitsizlik formundaki sınırlama fonksiyonları için lagrange çarpanları ve z ise eşitsizlik formundaki sınır fonksiyonlarını eşitlik formuna dönüştürmek üzere kullanılan bir değişkendir.

Eşitlik ve eşitsizlik sınırlamalarının haricinde, bağımsız değişkenlerin değişim aralığı için alt ve üst limitlerin konulması da yaygın bir sınırlama biçimidir.Bu çalışmada amaç fonksiyonlarının optimum değerleri alt ve üst limitler arasında, kısıtlamaların sağlandığı bir çözüm grubu içinde aranmıştır. Başka bir deyişle XP noktasının amaç fonksiyonu için bir optimum noktası olup olmadığının belirlenmesi için öncelikle sınırlama fonksiyonu için $g(XP) \leq 0$ koşulu aranmıştır. Bu yaklaşım ceza ve bariyer fonksiyonlarında olduğu gibi uygun bir ceza katsayısı veya normalizasyon gerektirmediği için basittir ve uygun katsayıların belirlenmesinde yapılabilecek yanlışlıklar nedeniyle oluşacak hataların önüne geçilmiştir.

4.5 Çok Amaçlı Optimizasyon ve Pareto Optimal Çözümler

Bölüm 1.1 ve Bölüm 1.2 de açıklandığı üzere asenkron motor tasarımında birbiriyle çelişen beklentilerle karşılaşılmaktadır. Örneğin; düşük sıcaklık artışı ve küçük hacim beklentisi birbiriyle çelişecektedir. Çünkü azalan malzeme hacmi nedeniyle eşdeğer güçte daha büyük hacimdeki bir motora kıyasla sıcaklık artışı daha hızlı olacak, öte yandan ısı aktarım yüzey alanlarının azalması nedeniyle soğuma güçleşecektir. Yüksek güç beklentisiyle tasarlanmış bir motor kompaktlık gereksinimini karşılayamayacaktır. Motor momentinin akımla orantılı olması nedeniyle düşük kalkış akımında yüksek kalkış momenti elde etmek, ancak yüksek rotor dirençleriyle mümkündür. Ancak rotor direncinin yüksek olması motorun verimini düşürecektir. Demir kayıplarının azaltılması ve manyetik doymanın engellenmesi dişler ve boyunduruktaki manyetik akı yoğunluğunun azaltılmasıyla mümkündür. Diş genişliği arttırılarak manyetik akı yoğunluğu azaltılıp mekanik dayanıklılık arttırılabilir ancak bu durumda oluk derinliği ve buna bağlı olarak kaçak reaktans artacaktır. Sabit oluk genişlik ve derinliği için boyunduruk genişliğini

arttırmak doyma riski ortadan kaldıracak ve demir kayıplarını azaltacak, ancak makine dış çapının ve kullanılan malzeme miktarı ve ağırlığının artışına yol açacaktır. Bu durumda tek bir optimum noktadan bahsetmek mümkün değildir. Çok amaçlı optimizasyonda hedef, tasarımcı ve/veya kullanıcının belirli talepleriyle en uyumlu çözüm grubunu bulmaktır. Bu çözümler Pareto-Optimal çözümler olarak adlandırılır [62, 68, 89, 90].

M adet amaç fonksiyonu içeren bir minimizasyon problemi için eğer bütün j=1,2…M değerleri için $F_j(y) < F_j(x)$ eşitsizliğini sağlayan bir y çözümü yoksa ve en az bir j için $Fj(y) \leq F_j(x)$ sağlanıyorsa x çözümü pareto – optimal çözüm veya baskın olmayan çözüm olarak adlandırılır.

Tek amaçlı yapay ısıl işlem yönteminde, minimizasyon problemlerinin çözümünde $F(y) \leq F(x)$ ise y çözümünün kabul edilme olasılığı 1dir. Aksi durumda 1 den küçük bir olasılıkla kabul edilebilir. Ancak çok amaçlı optimizasyon probleminde karar mekanizması daha karmaşıktır. Eğer bütün j=1,2…M değerleri için $F_j(y)<F_j(x)$ eşitsizliğini sağlayan bir y değeri varsa y çözümü baskın çözümdür ve kabul edilme olasılığı 1 dir. Hiçbir j değeri için bu eşitsizlik sağlanamıyorsa bu durumda y çözümü 1 den küçük bir olasılıkla kabul edilebilir. y bir baskın olmayan çözüm ise, yani en az bir j değeri için $F_j(y) \leq F_j(x)$ elde ediliyorsa, bu durumda kabul edilme olasılığı λ_j normalize edilmiş, toplamları 1 olan rastlantısal sayılar olmak üzere

$$P = \min(1, \min(\lambda_j (F_j(y) - F_j(x))/T)) \qquad \textbf{(4.107)}$$

denklemiyle hesaplanabilir [90].

Bu çalışmada kullanılan algoritmada baskın çözümler aranmaktadır. Eğer y çözümü hiçbir j =1,2,…M değeri için $Fj(y) < F_j(x)$ eşitsizliğini sağlayamıyorsa,y noktasının kabul edilmesi bütün j değerleri için

$$Pj_{kabul} = e^{-((F_j(y)-F_j(x))/T)} > R \qquad \textbf{(4.108)}$$

eşitsizliğinin sağlanmasına bağlıdır.

Çizelge 4.4 çeşitli amaç fonksiyonları ve kısıtlamalar içim tek ve çok amaçlı optimizasyon algoritmaları kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir. Optimizasyon işlemi sabit güç ve moment için yapılmıştır.

Tek amaçlı algoritmada motorun sıcaklığı ve verimi optimize edilmiştir. Hesap kolaylığı açısından motorun tüm noktalarındaki sıcaklık dağılımı yerine sargı sıcaklığının optimizasyonu tercih edilmiştir. Asenkron motorun ısıl açıdan en çok zorlanan kısmının stator sargısı olması nedeniyle de bu yaklaşım uygundur. Ayrıca stator sargı sıcaklığının azaltılması, diğer noktalarda da farklı mertebelerde sıcaklık düşüşünü sağlamaktadır. Sargı sıcaklığının hesaplanması Bölüm 3.6. da kurulan model kullanılmıştır. Sıcaklık artışı hesabına ilişkin bazı ayrıntılar Bölüm 5. de verilmiştir.

Yüksek güç yoğunluğunun sağlanabilmesi için motor ağırlığının azaltılması kullanılan amaç fonksiyonlarından biridir

Asenkron motorun aktif kısımlarının toplam ağırlığı F_2 amaç fonksiyonunu verir.

$$F_2(x)=G_{sb}+G_{sd}+G_{rd}+G_{çubuk}+G_{halka}+G_{sc} \qquad \textbf{(4.109)}$$

Burada belirtilen amaç fonksiyonlarının yanı sıra çıkış gücü, hız, kısadevre akımı ve kalkış momenti gibi büyüklükler de amaç fonksiyonu olarak seçilebilir veya bu değerler kısıt fonksiyonu olarak kullanılabilir.

1-Kalkış momentinin anma momentine oranı $\frac{M_{yv}}{M_n} \geq a_1$

2- Kalkış akımının anma akımına oranı $\frac{I_{yv}}{I_n} \leq a_2$

3- Stator veya rotor dişlerindeki akı yoğunluğunun tepe değeri $B_d \leq a_3$

4- Anma çalışmasındaki güç faktörü $\cos\varphi_n \geq a_4$

5- Kayma $s \leq a_5$

kullanılacak kısıt fonksiyonlarından bazıları olabilir. Yapılan hesaplamalarda mıknatıslama akımının sınırlanmasının gerekli olduğu görülmüştür. Aksi takdirde değeri aşırı artabilmektedir.

Sargı sıcaklığının tekil optimizasyonu durumunda, kalkış momentiyle ilgili herhangi bir alt limit konulmazsa kalkış momenti azalmaktadır. Kalkış momentinin kısıtlama fonksiyonu olarak kullanılması durumunda kısadevre akımı da bir miktar artmakta, ancak $\frac{M_{yv}}{I_k}$ ile tanımlanan kalkış iyiliği de artmaktadır.

Çizelge 4.4 de verim artışı ile verim artışı ile kalkış iyiliği arasındaki doğru orantı görülmektedir. Verimin tekil optimizasyonunda kalkış momentiyle ilgili herhangi bir kısıtlama(alt limit) getirilmese bile kalkış momenti ve iyiliği artmaktadır. Verimin, sargı sıcaklığı ve ağırlığıyla çoklu optimizasyon durumunda kalkış momentiyle ilgili herhangi bir kısıtlama getirilmezse, mıknatıslanma akımı kalkış momenti üzerinde sınırlayıcı olmaktadır.

Asenkron motor tasarımında tek bir optimum noktadan bahsetmek mümkün değildir. Ancak Çizelge 4.4.e genel olarak bakıldığında sargı sıcaklığının, motor verimi ve aktif kısımların ağırlığıyla beraber, maksimum mıknatıslanma akımı ve minimum kalkış momenti sınırlamalarıyla optimize edilmesi durumunda en iyi sonuç alınmaktadır.

Çizelge 4.4: Optimizasyon sonuçları.

AMAÇ	Mevcut Tasarım	$T_{sargı}$	T_{sargi}	Verim	Verim	Verim	Verim	$T_{sargı}$ ve Verim	$T_{sargı}$ ve Verim	T_{sargi} ve Verim	T_{sargi} ve Ağırlık	T_{sargi} ve Ağırlık	Verim Ağırlık T_{sargi}	Verim Ağırlık T_{sargi}
KISITLAMA	------	------	Imag< 3		Imag <3	Myv>35	Myv>35 Im <2	------	Imag <3	Myv>35 Imag<3	Imag<3	Myv>35	Imag<3	Myv>35 Imag<3
İŞLETME BÜYÜKLÜĞÜ / **SARGI SICAKLIĞI (^{0}C)**	114.91	108.35	108.347	111.492	111.076	111.674	111.783	109.958	109.47	110.916	109.021	109.2146	109.939	109.517
VERİM	0.8145	0.8291	0.8291	0.8324	0.8318	0.8324	0.8317	0.8304	0.8295	0.8307	0.8295	0.8293	0.8307	0.8299
KALKIŞ İYİLİĞİ	1.5115	1.4574	1.4571	1.6454	1.6026	1.6401	1.5959	1.5554	1.51	1.5705	1.5639	1.5954	1.4699	1.5954
KALKIŞ MOMENTİ(N.m)	31.166	30.6559	30.6569	39.0759	37.0499	38.8218	36.6593	34.9177	32.83	35.5975	35.2979	36.7328	31.1855	36.7346
KALKIŞ AKIMI (A)	20.5653	21.035	21.0350	23.7483	23.1186	23.6708	22.9706	22.5018	21.7692	22.6666	22.5707	23.0236	21.906	23.0254
KÜTLE (kg)	7.6	5.8921	5.8921	5.8702	5.9064	5.8852	5.9986	5.9	5.8935	5.8891	5.8850	5.8929	5.896	5.8919
MIK.AKIMI (A)	1.991	1.991	1.596	10	2.2271	10.8	2.39	1.7528	1.5930	2.998	2.6297	2.0281	2.3630	2.2367
ANMA MOMENTİ (N.m)	18.2485	18.4669	18.4669	18.7067	18.640	18.7008	18.6385	18.6018	18.5400	18.6206	18.6124	18.6499	18.4855	18.6503

5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

Asenkron motorun toplu parametreli ısıl eşdeğer devresinden elde edilen sonuçların deneysel sınanması GAMAK firmasından temin edilen 2.2 kW, 2p=4,380 V, 50Hz, kapalı tipte bir asenkron motor üzerinde yapılmıştır.

MATLAB ortamında yazılan bir tasarım programından elde edilen sonuçlar, motorun verileriyle kıyaslanarak doğrulaması yapılmış, bu program tasarım optimizasyonu için kullanılmıştır.

Motora ilişkin firma tarafından temin edilen teknik spesifikasyonlar ve tasarım Stator sargısı tek katmanlı, 2x0.65 mm çapındaki iletkenden 243 sarım/faz olarak imal edilmiştir. Sarım şeması Şekil 5.1 de verilmiştir. Değişkenlerinin değerleri aşağıda listelenmiştir.

i) Anma Gücü = 2.2 KW
ii) Anma Akımı = 5.25 A
iii) Anma Momenti = 14.93 N.m
iv) Anma Hızı = 1407 *min-1*
v) Kalkış Momenti = 31.4 N.m
vi) Kalkış Akımı = 26 A
vii) Devrilme Momenti = 38.8 N.m
viii) Stator Oluk Sayısı = 36
ix) Rotor Oluk Sayısı = 28
x) Stator Sarım Sayısı = 43 sarım / oluk
xi) Stator Empedansı zs =3.7 2+ j 3.53
xii) Rotor Empedansı r =2.96 + j 5.55
xiii) verim = % 79.3
xiv) Motorun toplam gövde uzunluğu GL=186 mm
xv) Gövde et kalınlığı g=3.5 mm
xvi) Kanatçık Sayısı N_k= 36
xvii) Kanatçık yüksekliği k=17.5 mm

xviii) Kanatçık genişliği 2 mm.

xix) Kısadevre halkasındaki soğutma kanat sayısı N_{hk}= 6

xx) Kısadevre halkasındaki soğutma kanatçık yüksekliği h_{hk}= 16 mm

xxi) Kısadevre halkasındaki soğutma kanatçık genişliği w_{hk}= 3 mm

xxii) Kısadevre halkasındaki soğutma kanatçık uzunluğu lh_{hk} = 13 mm

xxiii) Motor soğutma fanı dış çapı D_f = 150 mm

xxiv) Motor soğutma fanı kanat sayısı N_{fk} = 9

xxv) Motor soğutma fanı kanat uzunluğu Lfk= 47 mm

xxvi) Motor soğutma fanı kanat yüzey alanı A_{fk}= 1775 mm^2

xxvii) Anma Güç Katsayısı = 0.8

xxviii) Tasarım Değişkenlerinin Değerleri

$x1$(Stator uzunluğu) = 0.085 m

$x2$ (Stator oluk genişliği)= 72.5x10^{-6} m2

$x3$(Stator oluk derinliği) = 0.016 m

$x4$ (hava aralığı uzunluğu) = 0.00025 m

$x5$ (Rotor çubuk eşdeğer yarıçapı) = 3.678x10^{-6} m^2

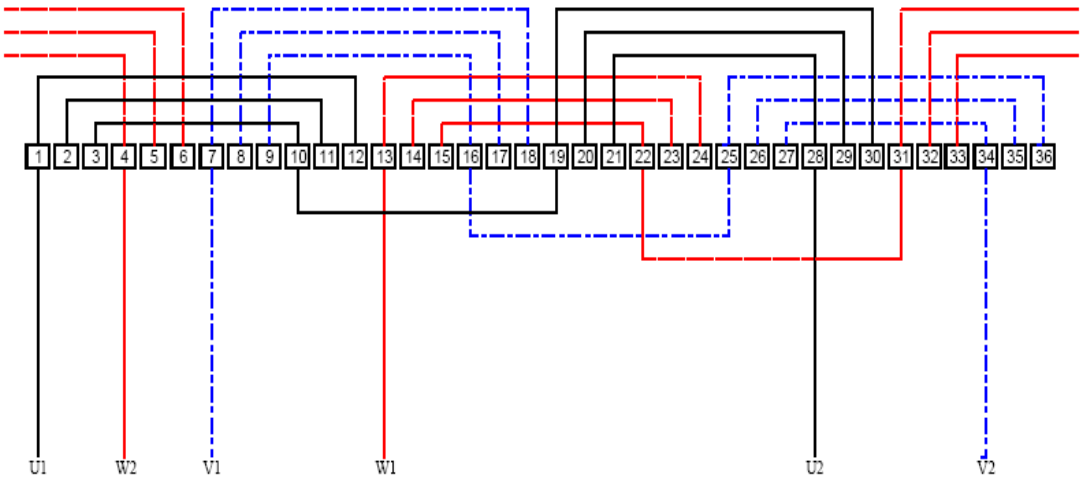
$x6$ (Rotor oluk derinliği) = 0.001 m

$x7$ (Hava aralığı akı yoğunluğu) = 0.873 T

$x8$(Stator iç çapı) = 0.09 m

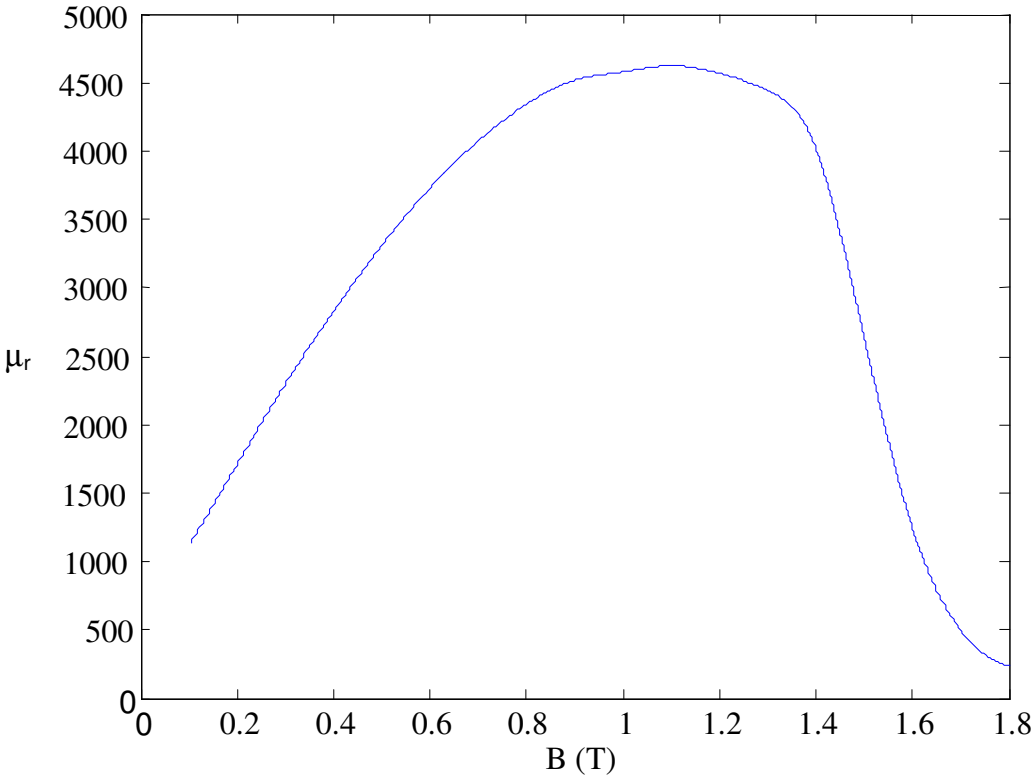
$x9$(Stator dış çapı) = 0.150 m

$x10$(Kısadevre Halka Çapı) = 0.156 m



Şekil 5.1: Motor sargı şeması [91].

Şekil 5.2 de bu çalışmada kullanılan motor sacının bağıl manyetik geçirgenliğinin manyetik akı yoğunluğuna bağlı değişimini gösterilmektedir.



Şekil 5.2: Bağıl manyetik geçirgenliğin manyetik akı yoğunluğuna bağlı değişimi.

Kayma değeri sabit kalmak koşuluyla anma akımı, anma momenti, devrilme momenti ve kalkış momenti motor empedansına bağlıdır. Yukarıda verilen bağımsız tasarım değişkenleri kullandığında TASARIM.m dosyası kullanılarak elde edilen stator ve rotor empedansları aşağıda verilmiştir.Bu dosya EK A' da verilmiştir.

$z_s = 3.779 + j\ 3.75$

$z_r = 2.734 + j\ 4.77$

Rotor kaçak reaktansındaki hata, kaçak reaktansların hesabının basitleştirilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Optimizasyon aşamasında TASARİM dosyası pek çok kez çağırılıp, hesaplamalar tekrarlanacağı için, sonlu eleman analizi gibi, daha doğru sonuçlar verecek ancak çok daha yüksek hesaplama zamanları gerektirecek yöntemlerin kullanılması mümkün değildir.

Empedanslardaki farklılıklar nedeniyle moment değerlerinde de farklılıklar görülmüştür. Hesap yoluyla elde edilen büyüklükler aşağıda listelenmiştir

Anma Akımı = 5.36 A

Anma Momenti = 15.91 N.m

Kalkış Momenti = 30.18 N.m

Devrilme Momenti = 39 N.m.
Kalkış Akımı = 26.6 A
verim = % 81
Anma Güç Katsayısı = 0.78

5.1. Deneysel Çalışma

Asenkron motorun sıcaklık dağılımının elde edilebilmesi için modeldeki ısı kaynaklarının, yani motor kayıplarının belirlenmesi gerekmektedir. Bunu için motorda boşta çalışma, kısadevre ve yükleme deneyleri yapılmıştır. Boşta çalışma deneyiyle, demir kayıpları 120 W olarak bulunmuştur. Boşta çalışma akımının yüksek olması nedeniyle ihmal edilemeyecek düzeyde stator bakır kaybı söz konusudur. Bu kayıp 126 W olarak hesaplanmıştır. Sürtünme ve vantilasyon kayıplarının belirlenebilmesi için $P_0=f(V^2_0)$ eğrisinden faydalanılmıştır. Şekil 5.3.a deney montaj şemasını, Şekil 5.3.b. sıcaklık ve hava hızı ölçümünü göstermektedir.

Gövdeyle ortam arasında doğal konveksiyonla ısı aktarım direncini belirlemek için stator sargıları 4 A (anma akımının % 75 i) doğru akımla beslenmiş, gövdenin dış sıcaklığı FLUKE infrared termometre ile ölçülmüştür. Gövdedeki sıcaklık değişiminin 30 dakika içerisinde 0.5 C den az olduğu durumda motor rejim sıcaklığına oturmuş kabul edilerek, bu anda ölçülen stator sargılarında harcanan güç P_{DC}, ortam sıcaklığı T_0 ve gövde sıcaklığı T_g kullanılarak R_o ısıl direnci 0.6 olarak hesaplanmıştır.

$$R_0 = \frac{T_g - T_0}{P_{DC}} \qquad \textbf{(5.1)}$$

Sıcaklık artışını belirlemek üzere PicoTech TC-08 veri kayıt cihazı, sensör olarak K tipi ısıl çift kullanılmaktadır. Sensörlerin oluk sargıları ve sargı başlarına yerleştirilebilmesi için motor yeniden sarılmış, oluk içlerine toplam 5 adet, sargı başlarına iki adet sensör yerleştirilmiştir. Boyunduruk sıcaklığı gövde üzerinde uygun derinlikte açılmış iki yuvaya yerleştirilmiş sensörlerle ölçülmüştür. Mil ve gövde sıcaklıklarının ölçümü için infrared termometre, soğutucu hava hızının belirlenebilmesi için EXTECH anemometre kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 5.3: a) Deney montaj şeması, **b)** Sıcaklık ölçüm

Çizelge 5.1 de motorun anma yükünde çalışması durumunda, ölçüm ve ısıl model ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak elde edilen değerler gösterilmiştir. Sonlu elemanlar analizi için FEMM 4.2. yazılımı kullanılmıştır. MATLAB ortamında oluşturulan ısıl model program kodları ve FEMM 4.2 dosyaları EK A' da verilmiştir.

2 Boyutlu sonlu elemanlar analizi için, eksenel simetri kabulüyle motorun ¼ ü modellenmiştir. Matlab ortamında oluşturulan tasarım programından elde edilen elektriksel ve mekanik kayıp yoğunlukları, SEA için ısı kaynağı olarak kullanılmıştır.

2 boyutlu sonlu eleman analizinde stator oluk sargısı ve sargı başını ayrı ayrı modellemek mümkün olmadığı için, SEA, stator oluk sargısı sıcaklığını belirlemek üzere yürütülmüştür. Bu nedenle Çizelge 5.1 3. sütunda stator oluk sargısı ve sargı başı için tek bir değer gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 de görüldüğü üzere, boyunduruk, stator sargı başı ve rotor kafes sıcaklıklarının hesabında ısıl eşdeğer devre ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar uyumludur. .

Sonlu eleman analizinde motor dış yüzeyinde Dirichlet, x ve y eksenleri doğrultusunda motor kesitini sınırlayan diğer iki yüzeyde 2.dereceden homojen sınır koşulu kullanılmıştır.

Isıl eşdeğer modelde hava aralığı ve stator-karkas temas yüzeyindeki ısı aktarımının taşınım yoluyla olduğu kabul edilirken, SEA'nde aynı bölgelerdeki ısının iletim yoluyla aktarıldığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla ısıl eşdeğer devrede kullanılan h_{2r} ve h_c taşınım film katsayıları yerine, eşdeğer ısıl iletkenlik katsayısı kullanılmıştır. Denklem (5.2), r_i iç çap ve r_d dış çap olmak üzere eşdeğer ısıl iletkenliğin hesabını göstermektedir. Bu denklem ısı iletim direncini, ısı taşınım direncine eşitleyerek elde edilmiştir.

$$k_{eş} = hr_i \ln\left(\frac{r_d}{r_i}\right) \qquad \textbf{(5.2)}$$

Çizelge 5.2 de ısıl eşdeğer devre ve SEA için hesaplanan taşınım film katsayıları ve eşdeğer ısıl iletkenlikler gösterilmektedir.

Çizelge 5.1: Tam yükte sıcaklık dağılımı.

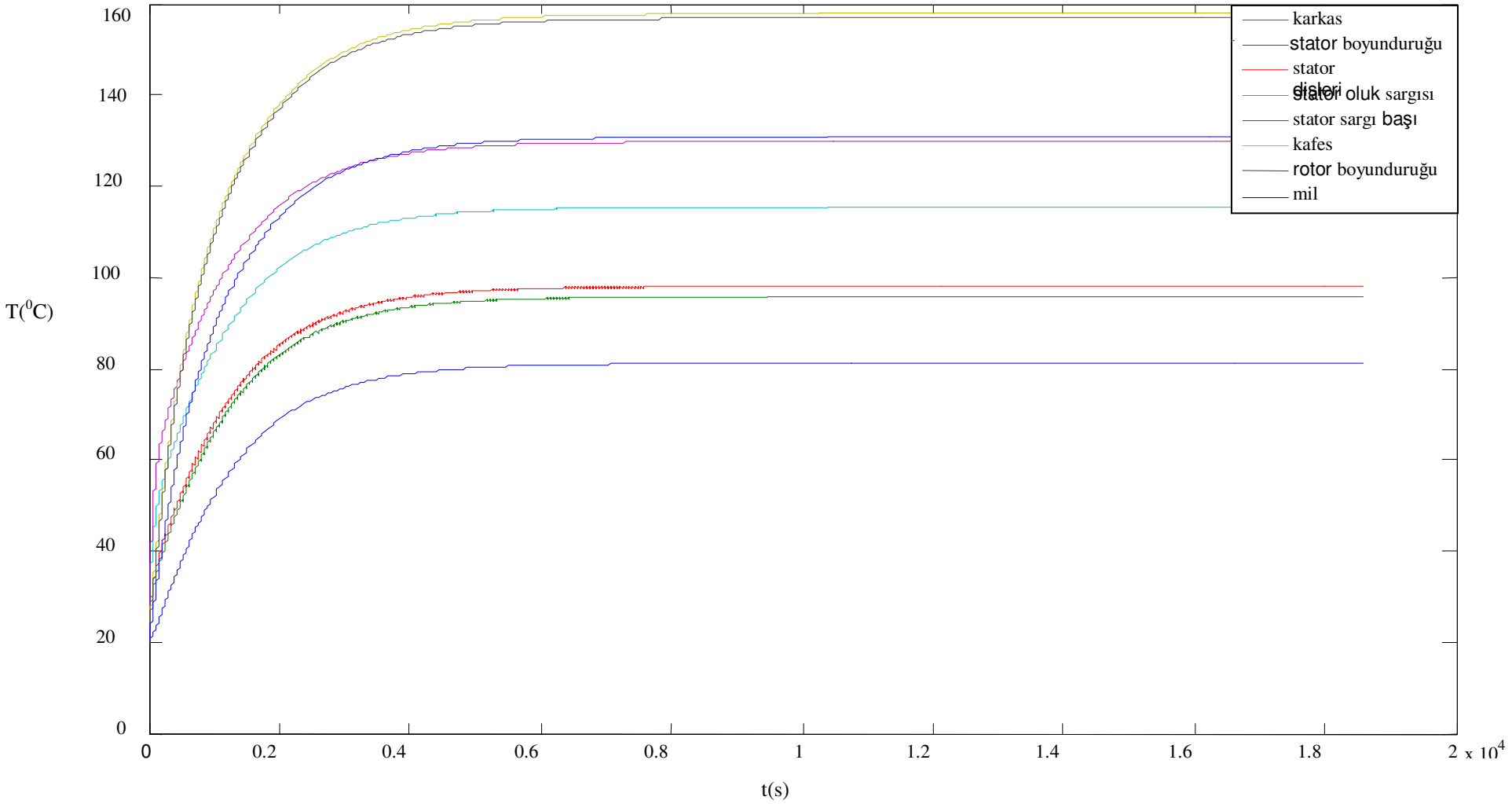
	Hesaplanan (^{0}C)	Ölçülen (^{0}C)	SEA (^{0}C)
Gövde	80.4878	79	79
Stator Boyunduruğu	94.8758	95.4	94.67
Stator Dişleri	97.2402	-	101
Stator Oluk Sargısı	113.5946	112.16	113.574
Stator Sargı Başı	122.4645	123..34	
Rotor Kısadevre Kafesi	151.7373	-	154.94
Rotor Boyunduruğu	150.5708	-	154.94
Mil	126.3055	112.2*	154.94

*Ölçüm rulmandan 7 cm uzakta yapılmıştır.

Çizelge 5.2 : Taşınım katsayıları

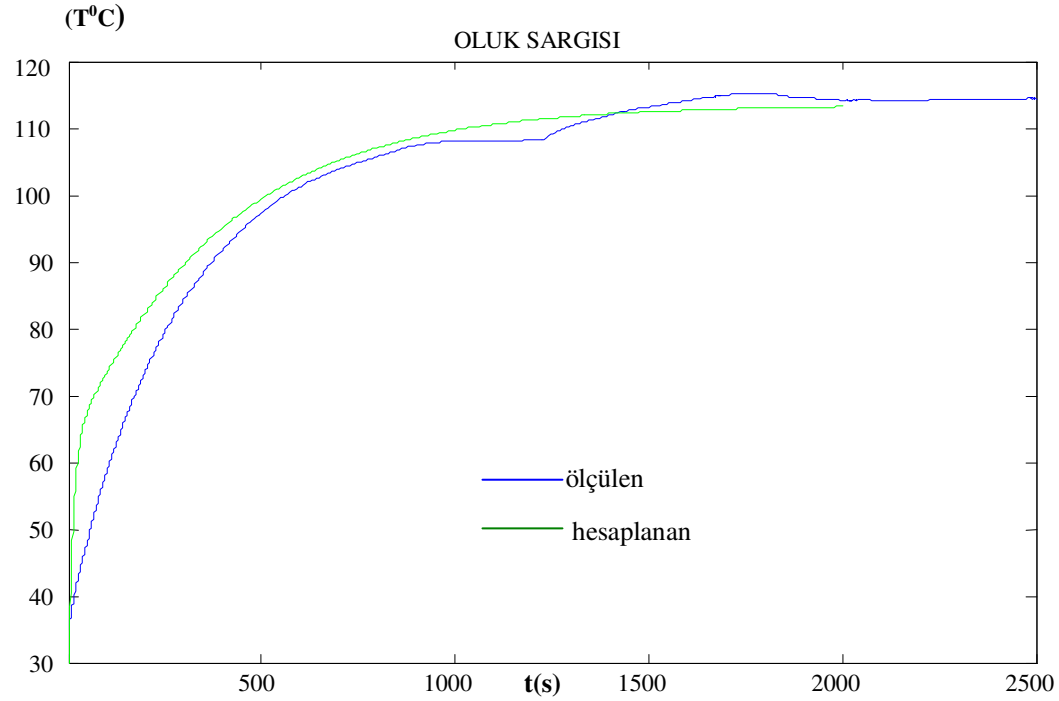
	Taşınım katsayısı h (W/m^{2}K)	Eşdeğer ısıl iletkenlik k (W/m^{0}C)
h_1	12.34	-
h_2	139	0.05
h_3	31	-
h_c	750	0.027

Motorun anma yükünde, hesap yoluyla elde edilen ısıl geçici rejim davranışı Şekil 5.4. de gösterilmektedir. Şekil 5.5.a-c. sabit anma akımında stator boyunduruğu, stator oluk sargısı ve sargı başı sıcaklıklarının zamana göre değişimini göstermektedir. Şekil 5.6 da anma çalışması için sonlu elemanlar analizinin sonuçları verilmiştir.

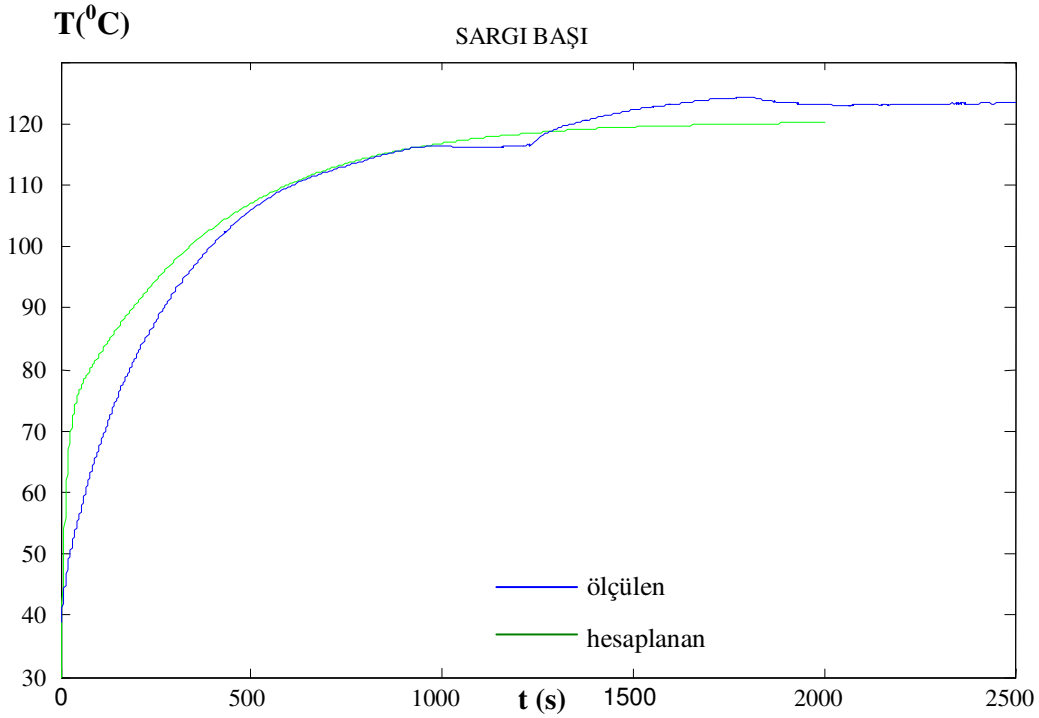


Şekil 5.4: Anma yükünde ısıl geçici rejim.

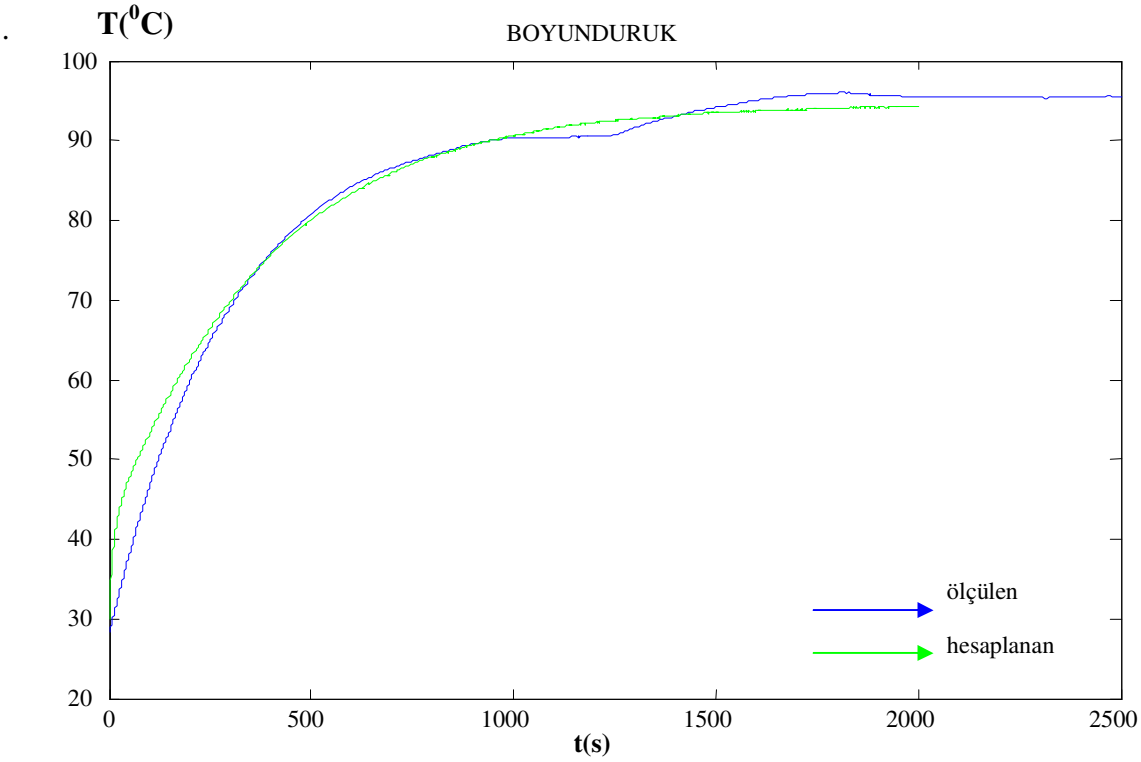
Şekil 5.5- 5.7 sabit anma akımında stator boyunduruğu, stator oluk sargısı ve sargı başı sıcaklıklarının zamana göre değişimini göstermektedir. Şekil 5.8 de anma çalışması için sonlu elemanlar analizinin sonuçları verilmiştir.



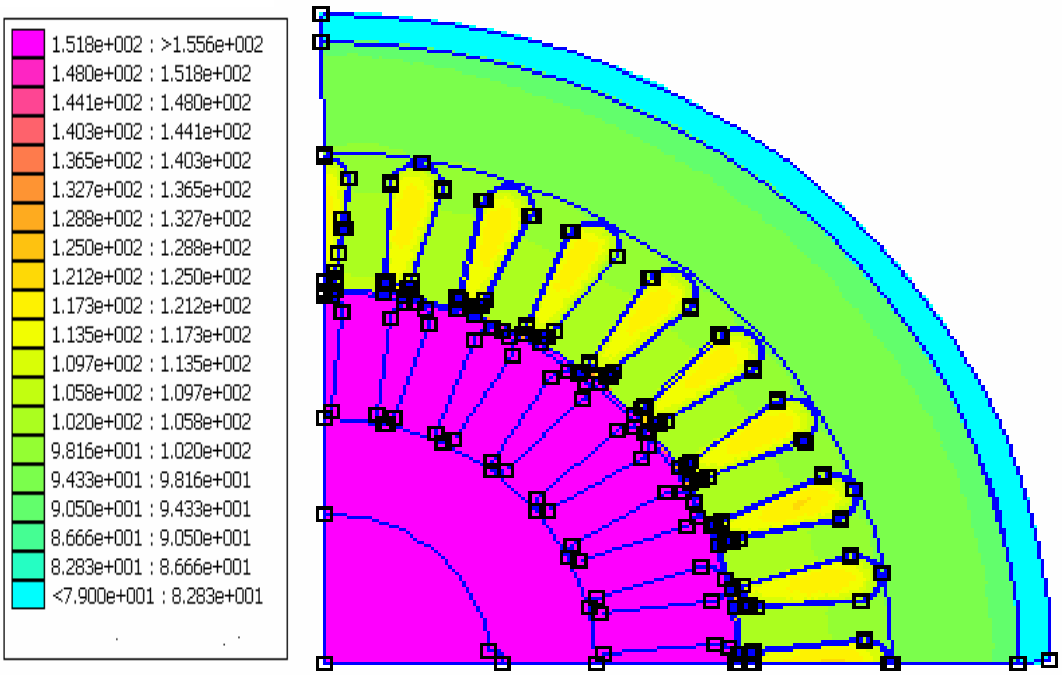
Şekil 5.5: Anma çalışmasında stator oluk sargısı için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması.



Şekil 5.6: Anma çalışmasında stator sargı başı için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması.



Şekil 5.7: Anma çalışmasında stator boyunduruğu için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması.



Şekil 5.8: Anma çalışmasında SEY ile elde edilen sıcaklık dağılımı.

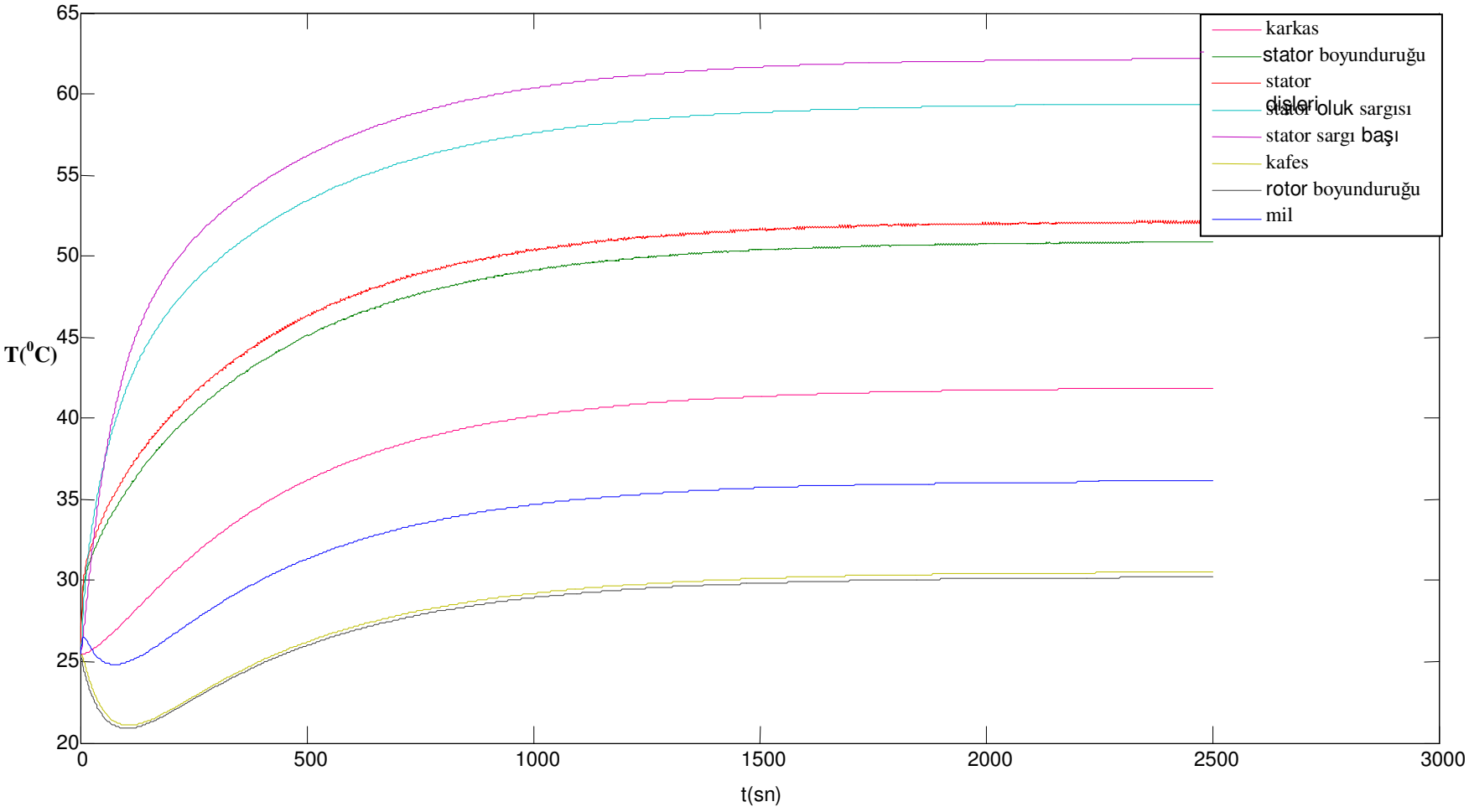
Çizelge 5.3 de motorun boşta çalışması durumunda, ölçüm ve ısıl model ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak elde edilen değerler gösterilmiştir. Motorun boşta

çalışmasında hesap yoluyla elde edilen ısıl geçici rejim davranışı Şekil 5.9 da gösterilmektedir.

Çizelge 5.3: Boşta çalışmada sıcaklık dağılımı.

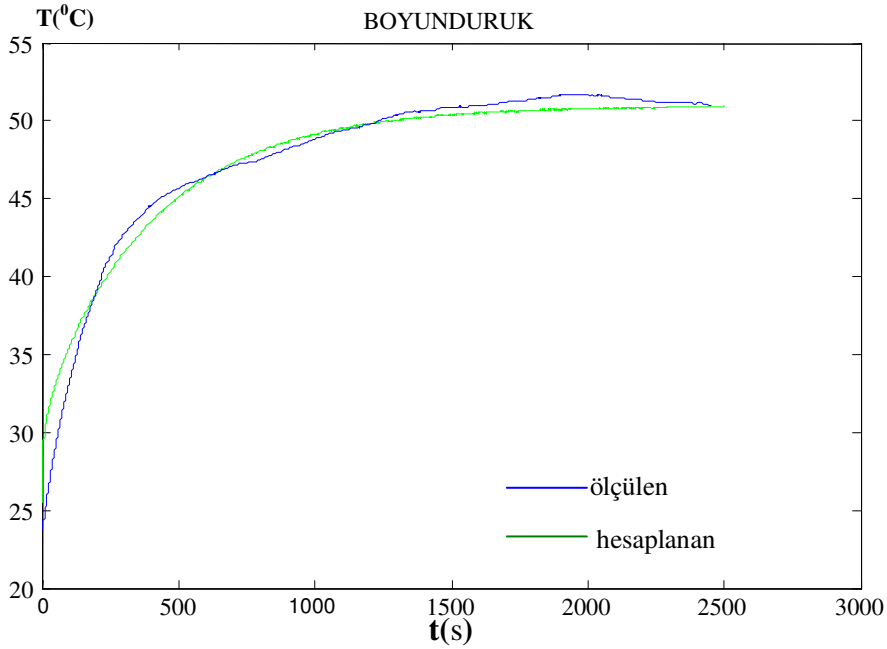
	HESAPLANAN (^{0}C)	ÖLÇÜLEN (^{0}C)	SEA (^{0}C)
Gövde	43.3853	43	43
Stator Boyunduruğu	51.2800	51	50.484
Stator Dişleri	52.0487	-	52.584
Stator Oluk Sargısı	58.0089	58.03	58.7756
Stator Sargı Başı	60.9509	60.67	-
Rotor Sargısı	56.2557	-	55.56
Rotor Boyunduruğu	56.2126	-	55.56
Mil	55.1310	42*	55.56

* Ölçüm rulmandan yapılmıştır.

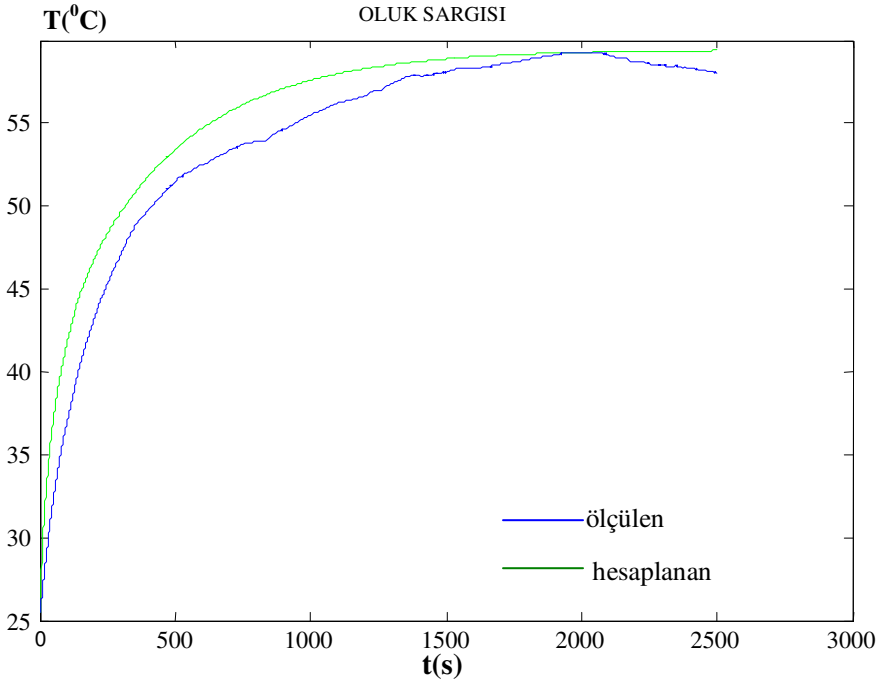


Şekil 5.9: Boşta çalışmada ısıl geçici rejim.

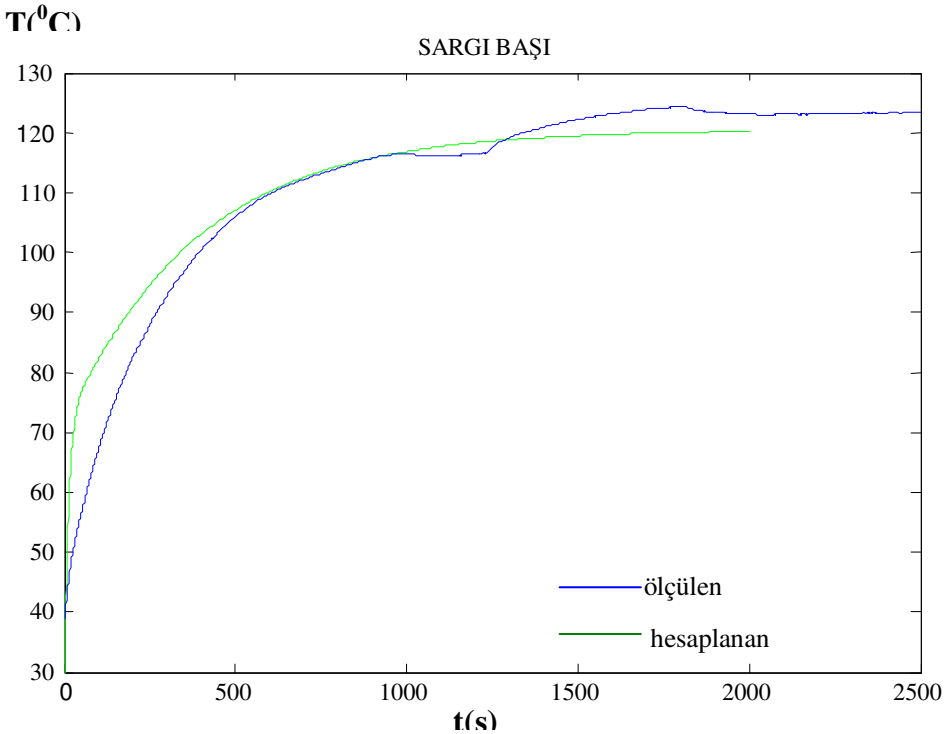
Şekil 5.10-5.12 boşta çalışmada stator boyunduruğu, stator oluk sargısı ve sargı başı sıcaklıklarının zamana göre değişimini göstermektedir. Bu grafiklerde stator ve rotor sargı dirençlerinin değişimi göz önüne alınmıştır. Şekil 5.13 de boşta çalışma için sonlu elemanlar analizinin sonuçları verilmiştir.1



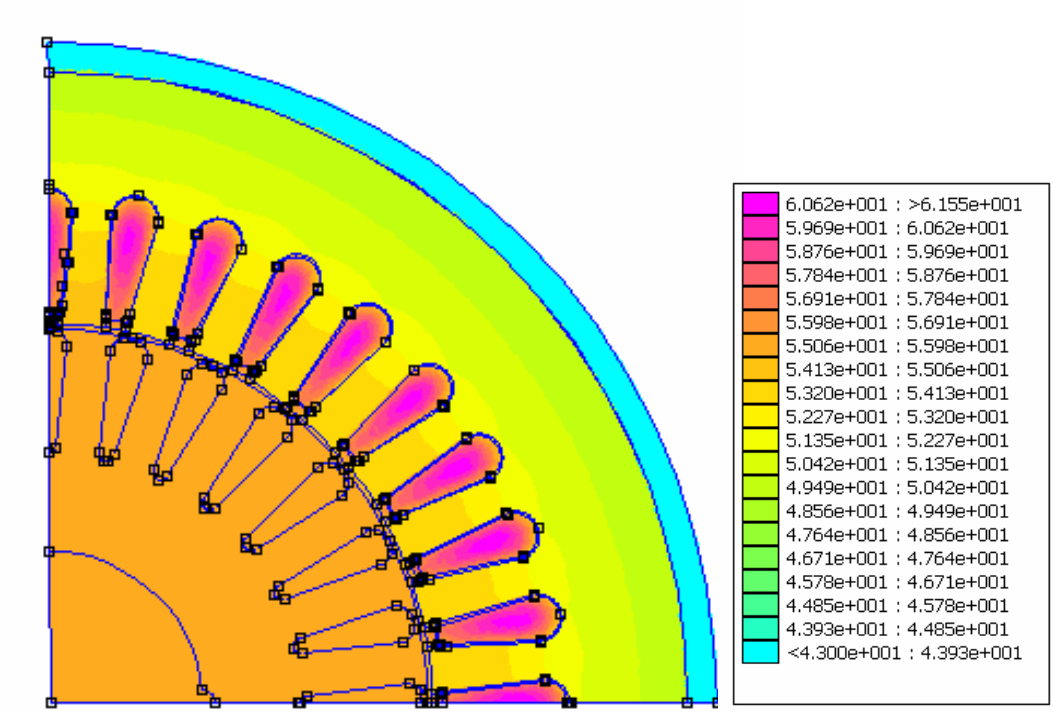
Şekil 5.10: Boşta çalışmada stator boyunduruğu için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması.



Şekil 5.11: Boşta çalışmada stator oluk sargısı için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması.



Şekil 5.12: Boşta çalışmada stator oluk sargısı için hesaplanan ve ölçülen sıcaklık artışlarının kıyaslanması.



Şekil 5.13: Boşta çalışmada SEY ile elde edilen sıcaklık dağılımı.

Bölüm 5.2. Isıl Eşdeğer Devre Parametrelerinin Sıcaklık Dağılımı üzerine Etkisi

Bölüm 5.2.1 Isıl direnç ve kapasitelerin sıcaklık dağılımına etkisi

Isıl eşdeğer devreyi oluşturan parametrelerin hesabında yapılabilecek hataların sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla ısıl dirençler değiştirilerek sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Değişim aralığının üst sınırı olarak direnç değerinin iki katına çıkarılması, alt sınır olarak ise kısadevre durumu seçilmiştir. Bu değişim aralığı, motorun geometrik boyutlarının ölçülmesi ve eğer gerekli ise hesabında yapılabilecek hatalar ile malzemelerin ısı iletim ve taşınım katsayılarının belirlenmesinde yapılabilecek hatalar göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Elde edilen veriler motordaki sıcaklık dağılımı üzerinde en belirleyici olan büyüklüklerin R2, R2, R25, R33 dirençleri olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.4 bu dirençlerden herhangi birinin artışı durumunda elde edilen sıcaklık dağılımını göstermektedir.

Çizelge 5.4: R2, R22, R25, R33 ısıl dirençlerindeki artışın motor sıcaklık dağılımına etkisi.

	Başlangıç (^{0}C)	1.5xR2 (^{0}C)	1.5xR38 (^{0}C)	2xR2 (^{0}C)	2xR22 (^{0}C)	2xR38 (^{0}C)
Gövde	79.385	79.3876	79.3873	79.3902	79.3867	79.3895
Stator Boyunduruğu	93.8011	99.9143	93.9685	105.73	94.5494	94.0982
Stator Dişleri	95.9529	102	96.1556	107.798	96.9166	96.3676
Stator Oluk Sargısı	112.984	118.504	113.463	124.165	115.683	114.33
Stator Sargı Başı	122.682	127.666	123.442	132.777	126.673	124.525
Rotor Sargısı	156.238	158.135	162.918	160.079	157.922	169.196
Rotor Boyunduruğu	155.272	157.14	162.013	159.052	156.929	168.344
Mil	129.175	130.303	137.373	131.458	130.175	144.985

R2 direnci başlıca stator manyetik devresi ve stator sargım üzerinde etkiliyken R38 direnci rotor sargısı (kafes) ve manyetik devresi üzerinde belirleyicidir. R38 direncinin2 katına çıkması milde %12.44, rotor boyunduruğunda %8.2, kafes

sargısında %8.4 oranında sıcaklık artışına yol açmaktadır. R22 direncinin 2 katına çıkması stator sargı başı sıcaklığını % 3.3, oluk sargısı sıcaklığını %2.4 oranında arttırmaktadır. R2 direncinin 2 katına çıkması durumunda ise en çok etkilenen motor kısımları stator manyetik devresi (%12) stator sargısı (%9.9), ve sargı başı (%8.2) dır.

R2 ve R38 dirençleri haricinde herhangi bir direncin % 50 oranında değişmesi boyunduruk sıcaklığında -%0.29 ÷ %0,5, stator dişlerinde -%0.5 ÷% 0.466, stator oluk sargısında -% 0.45 ÷% 1.05, sargı başında -%1.7÷%0.4, kafes sıcaklığında -%0.3 ÷% 1, rotor boyunduruğunda -% 0.48÷% 0.3 ve milde -%0.67÷%1.8 lik bir değişime yol açmaktadır. R2, R22, R38 dirençleri haricinde herhangi bir direncin % 100 artması durumunda sıcaklık değişimi -%1.17 ÷%1.4 aralığında kalmaktadır.

Isıl eşdeğer devreyi oluşturan dirençlerin % 50 oranında azaltılması halinde de baskın olan büyüklükler R2, R22, R33 dirençleri olmaktadır. Çizelge 5.5 bu dirençlerden herhangi birinin %50 değerinde azalması durumunda elde edilen sıcaklık dağılımını göstermektedir. Bu dirençler hariç herhangi bir parametrenin %50 oranında azaltılması durumunda sıcaklık değişimi -% 2.02÷%1.26 arasında olmaktadır.

Bu sonuçlar, R2, R25, R38 haricinde ısıl dirençlerin hesabında yapılan ± % 50 den küçük hataların sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisinin az olduğunu göstermektedir. Yine belirtilen dirençler hariç tüm ısıl direnç elemanları +%100 oranında bir artışı da tolere edebilmektedir.

Direnç değerlerinin %100 azalması durumu ise sıcaklık dağılımı üzerinde daha önemli etkiye sahiptir. Bu durumda yukarıdaki verilen dirençlere ek olarak R12, R13, R14, R17, R19, R31, R24 R26, R31 ve R33 dirençleri sıcaklık artışı ve dağılımı üzerinde belirleyici olmaktadır. Bu durum Çizelge 5.6 da gösterilmiştir. Bu dirençler hariç herhangi bir parametrenin %100 oranında azaltılması durumunda sıcaklık değişimi %2.2 den küçük olmaktadır.

Eşdeğer devredeki ısıl kapasite değerlerinin sürekli haldeki sıcaklık dağılımına etkisi bulunmamaktadır.

Çizelge 5.5: R2, R22, R25, R33 dirençlerinin %50 azalması durumunda motor sıcaklık dağılımı.

	Başlangıç (^{0}C)	0.5xR2 (^{0}C)	0.5xR22 (^{0}C)	0xR38 (^{0}C)
Gövde	79.385	79.3823	79.3821	79.3825
Stator Boyunduruğu	93.8011	87.3994	92.5975	93.6173
Stator Dişleri	95.9529	89.6698	94.4952	95.7305
Stator Sargısı	112.984	107.653	109.48	112.458
Stator Sargı Başı	122.682	117.868	117.098	121.848
Rotor Sargısı	156.238	154.403	153.852	148.904
Rotor Boyunduruğu	155.272	153.467	152.925	147.873
Mil	129.175	128.085	127.758	120.176

Çizelge 5.6: R2, R14,R19, R22, R25, R33, R38 dirençlerinin kısadevre edilmesi durumunda motor sıcaklık dağılımı.

	0xR2 (^{0}C)	0xR12 (^{0}C)	0xR13 (^{0}C)	0xR14 (^{0}C)	0xR17 (^{0}C)	0xR19 (^{0}C)	0.0001xR22 (^{0}C)	0*R21 (^{0}C)	0*R24 (^{0}C)	0xR31 (^{0}C)	0XR35 (^{0}C)	0xR38 (^{0}C)
Gövde	79.3794	79.3848	79.3848	79.3843	79.3847	79.3844	-7.588	4.2504	90.6422	79.3751	45.7905	79.3797
Stator Boyunduruğu	80.7303	94.0054	93.9306	94.0943	94.092	94.1626	-1.5621	0.8324	107.537	95.6207	57.172	93.4147
Stator Dişleri	83.0228	96.5069	96.1098	95.6352	96.742	96.3908	-1.1873	-0.7907	110.523	98.4995	58.675	95.4851
Stator Sargısı	101.181	109.332	113.364	107.74	107.779	114.043	1.5668	-14.144	127.162	113.596	70.6338	111.879
Stator Sargı Başı	112.025	119.386	120.592	117.949	117.985	116.848	-3.2484	-35.33	136.777	121.572	75.1706	120.928
Rotor Sargısı	152.18	155.007	155.457	154.464	154.489	154.057	52.547	49.0746	183.212	123.38	0	140.818
Rotor Boyunduruğu	151.28	154.062	154.504	153.528	153.552	153.127	51.8483	48.6228	182.38	122.945	0	139.714

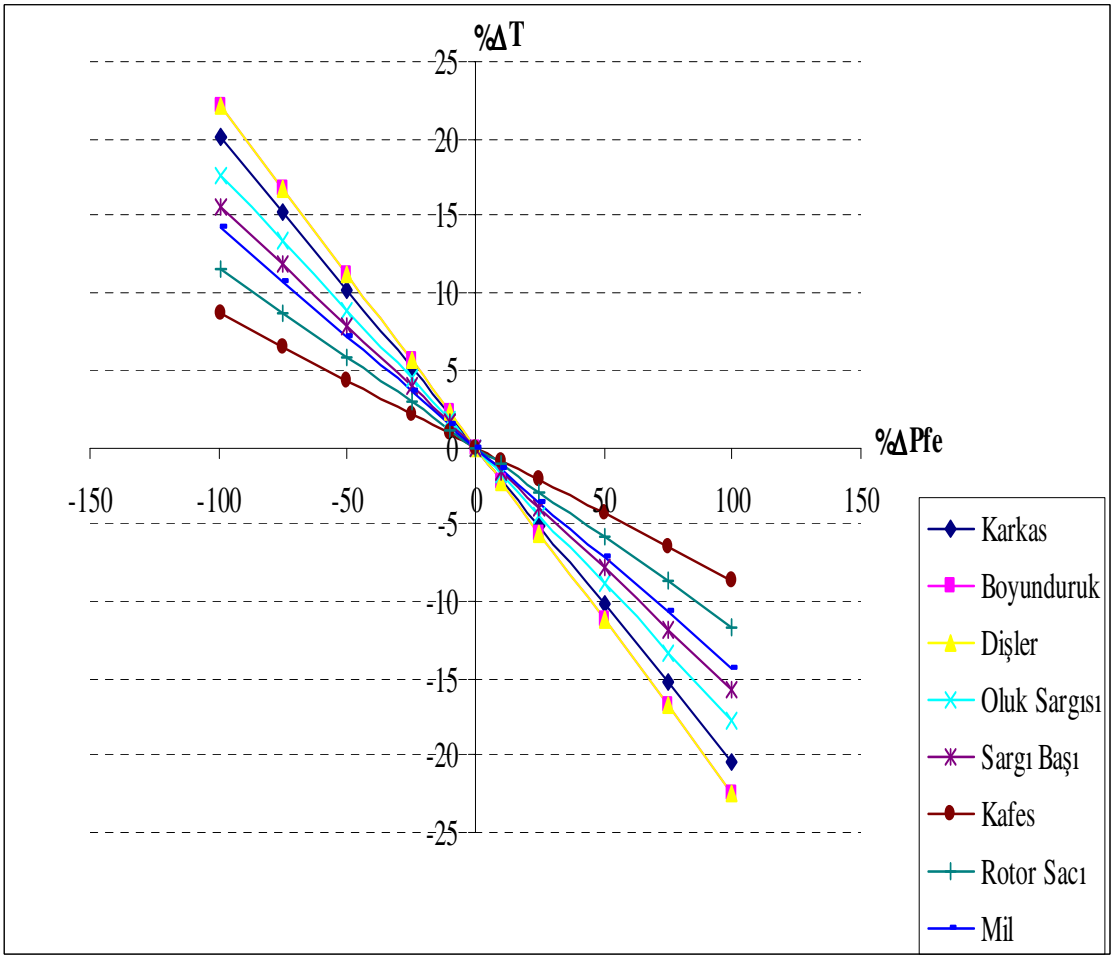
Bölüm 5.2.2 Kayıpların sıcaklık dağılımına etkisi

Demir ve bakır kayıplarının sürekli haldeki sıcaklık dağılımına etkisini belirlemek üzere, demir kayıpları, stator bakır kayıpları ve rotor bakır kayıpları $\pm\%100$ oranında değiştirilerek motorun sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. Şekil 5.14 düğüm sıcaklıklarının demir kayıplarının, Şekil 5.15 stator bakır kayıplarının, Şekil 5.16 rotor bakır kayıplarının değişimine bağlı olarak %değişim miktarını göstermektedir.

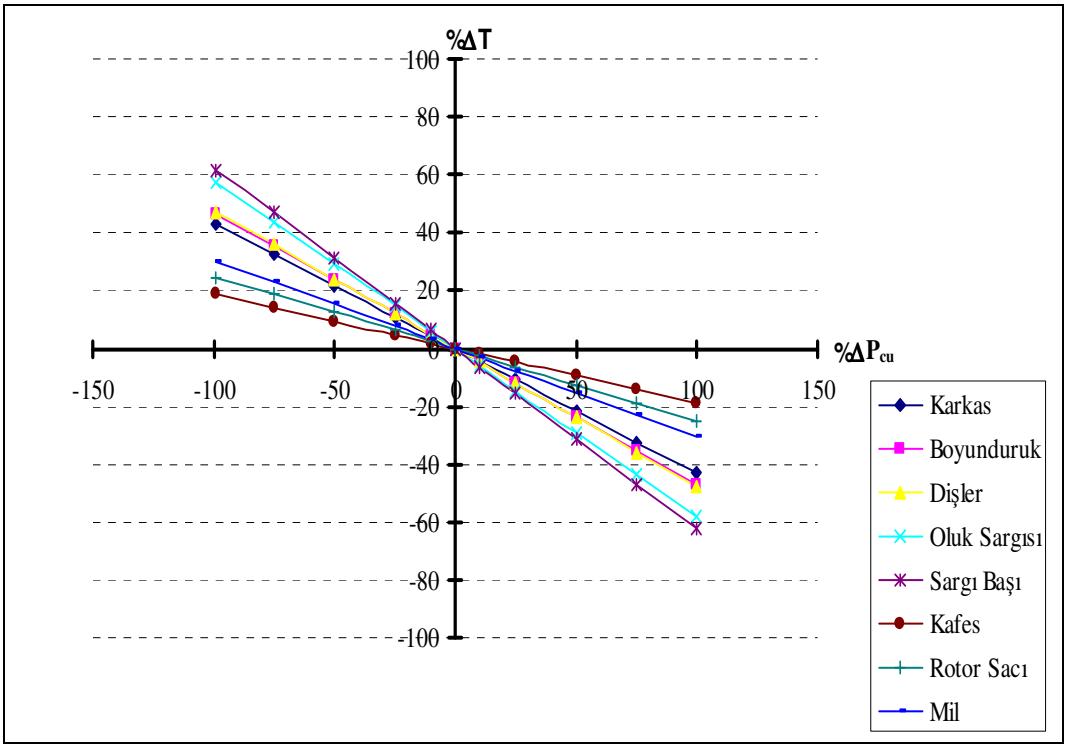
Sıcaklık değişiminin yüzde cinsinden değişimi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$\%\Delta T = \% \frac{T_0 - T}{T_0} * 100 \qquad \textbf{(5.3)}$$

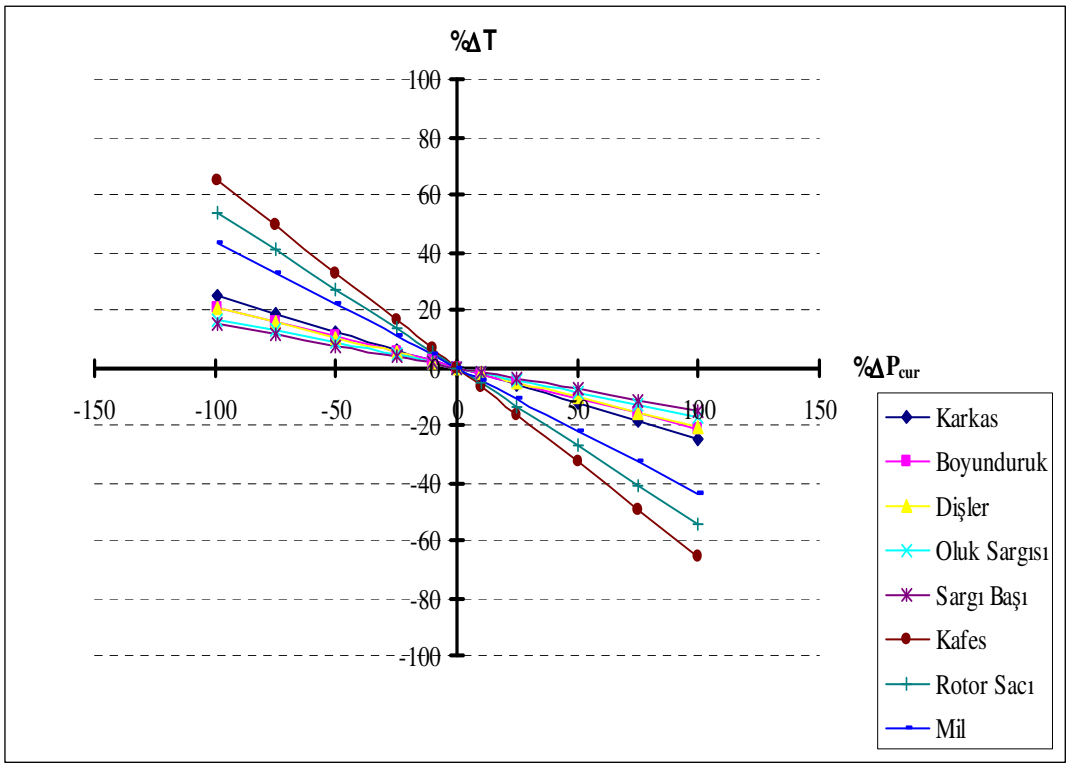
Bu eşitliğe göre $+\Delta T$ değerleri sıcaklığın azalmasına, $-\Delta T$ değerleri artmasına işaret etmektedir.



Şekil 5.14: Düğüm sıcaklıklarının demir kayıplarına bağlı değişimi.



Şekil 5.15: Düğüm sıcaklıklarının stator bakır kayıplarına bağlı değişimi.



Şekil 5.16: Düğüm sıcaklıklarının rotor bakır kayıplarına bağlı değişimi.

Bölüm 5.2.3 Diğer önemli parametreler

Bölüm 5.de toplu parametreli devrenin elde edilmesi bahsinde anlatıldığı üzere, ısıl eşdeğer devrenin oluşturulması için gerekli olan bazı parametrelerin analitik ve/veya deneysel olarak belirlenmesinde bazı belirsizlikler söz konusudur. Örneğin hava aralığı ve kapak boşluğu havasının konveksiyon film katsayıları (h_3 ve h_4) belirlenebilmesi için bu bölgelerde hava hızının bilinmesi gerekmektedir. Ancak söz konusu bölgelerin dar ve karmaşık olması nedeniyle hava hızının doğrudan ölçülmesi ve ortalama bir hava hızı belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle rotor devir hızı ve tahmini bir rotor fanı verimine bağlı olarak yaklaşık değerler kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar karkas ve boyunduruk arasındaki sıkı geçme basıncı ve hava aralığının motor gücü ve boyutlarından önemli ölçüde bağımsızdır [8]. Bu nedenle bu iki yüzey arasındaki film katsayısının($_{hc}$) ve direncin analitik hesabı mümkün değildir. Dış yüzey konveksiyon katsayısı (h_1), eşdeğer oluk ısı direnci (k_{cui}) Bölüm 5 de anlatıldığı üzere kesin bir hesap yöntemi bulunmayan büyüklüklerdir.

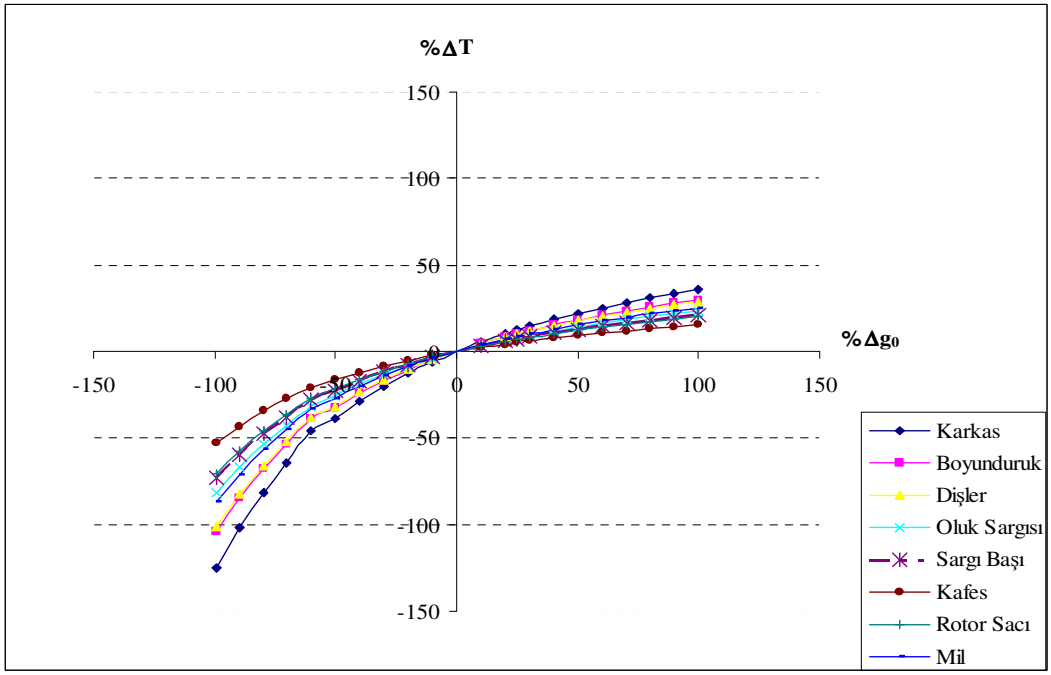
Yukarıda bahsedilen büyüklüklerin hesabında yapılması olası hataların sıcaklık dağılımı üzerinde etkisini belirlemek üzere, bu büyüklükler $\pm\%100$ oranında değiştirilerek motorun sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar h_1 katsayısının veya g_0 yüzey-ortam ısıl iletkenliğinin motorun tüm noktalarındaki sıcaklık dağılımı üzerinde önemli etkisi bulunduğunu göstermektedir. Bu durum Şekil 5.17 de görülmektedir. $+\Delta T$ değerleri sıcaklığın azalmasına, $-\Delta T$ değerleri, artmasına işaret etmektedir. g^*_0 bu parametrenin başlangıçtaki değerini göstermek üzere $\%\Delta g_0$ aşağıdaki biçimde hesaplanır.

$$\%\Delta g_0 = \% \frac{g_0^* - g_0}{g_0^*} * 100 \qquad \textbf{(5.4)}$$

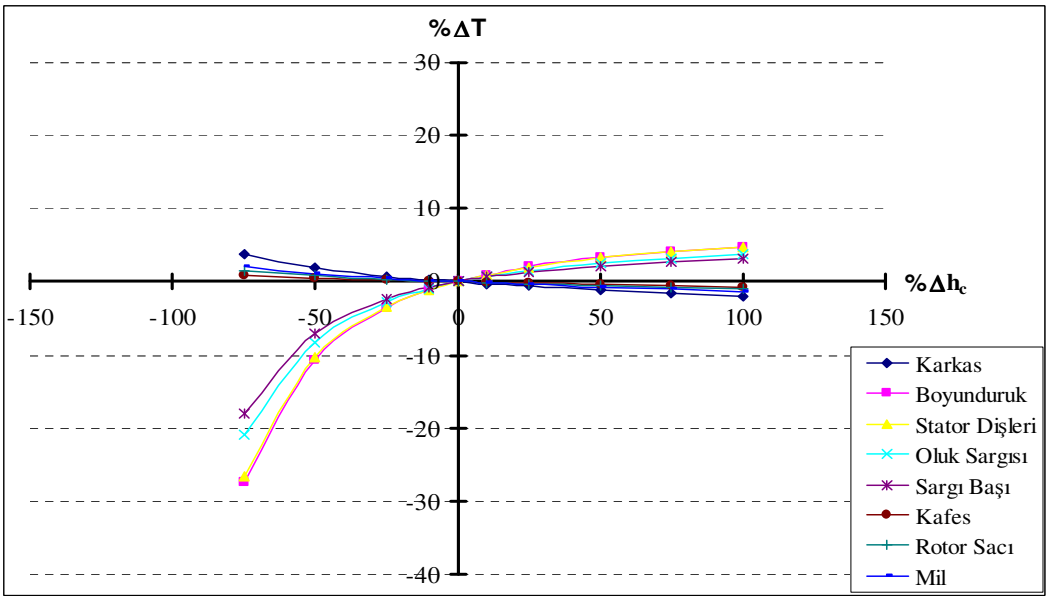
Öte yandan hc katsayısının artışı karkas sıcaklığının artmasına neden olurken, stator sargısı ve manyetik devresinin sıcaklıklarında azalma olmaktadır. Bunun sebebi artan hc değerinin stator boyunduruğu ile karkas arasındaki ısıl direnci azaltması ve dolayısıyla statordan karkasa ısı geçişinin kolaylaşmasıdır. Mil ve rotor sacındaki sıcaklık artışının nedeni, bu bölümlerin karkasla, rulman ve kapaklar üzerinden iyi ısıl temasta bulunmaları ve düşük kayıp yoğunluklarına sahip olmalarıdır. Şekil 5.18

sıcaklığın $\%\Delta h_c$ değerine bağlı değişimini göstermektedir. h^*_c bu parametrenin başlangıçtaki değerini göstermek üzere $\%\Delta h_c$ Denklem (5.5) ile bulunur.

$$\%\Delta h_c = \% \frac{h_c^* - h_c}{h_c^*} * 100 \qquad \textbf{(5.5)}$$



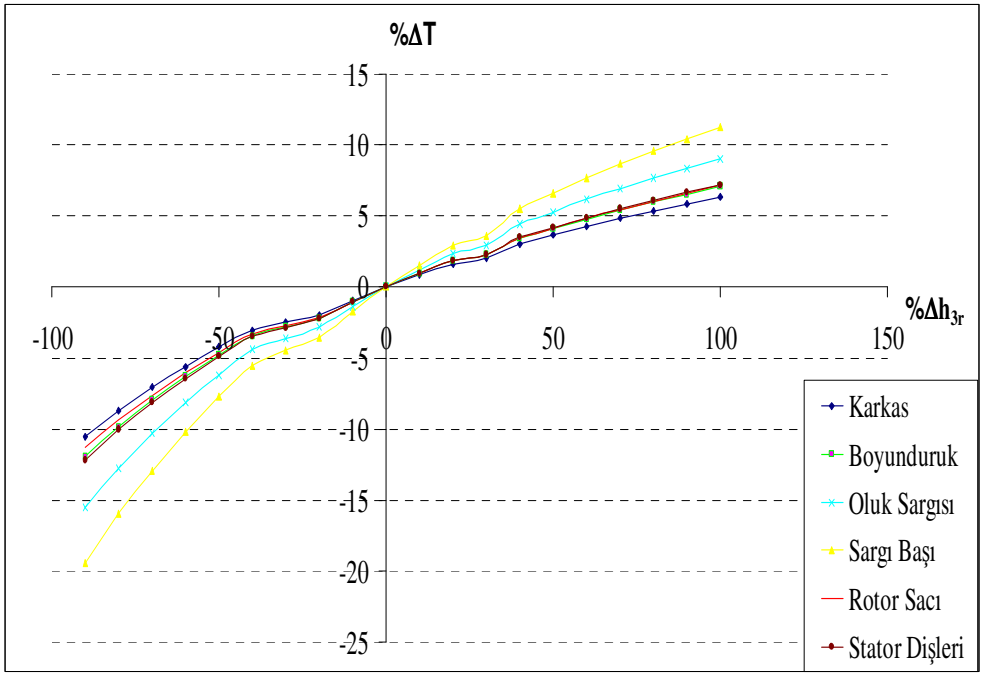
Şekil 5.17: Düğüm sıcaklıklarının g_0 ısıl iletkenlik değerine bağlı olarak değişimi.



Şekil 5.18: Düğüm sıcaklıklarının h_c değerine bağlı olarak değişimi.

Hava aralığı konveksiyon film katsayısının (h_2) motordaki sıcaklık dağılımı üzerine etkisi çok zayıftır. 139 W/m^2 ^{0}C olarak hesaplanan bu büyüklüğün -%99 - %100 oranında değişmesi durumunda stator sargısındaki sıcaklıktaki değişme -%1.35-+%0.65 aralığında kalmaktadır. Katsayının 3 katına çıkması durumunda sargı sıcaklığındaki azalma %1 mertebesindedir. Motorun geri kalan kısımları bu katsayıdan daha da az etkilenmektedir. Öte yandan kapak boşluğu havası konveksiyon film katsayısındaki (h_3) değişim, bütün düğüm sıcaklıkları üzerinde etkilidir. Kapak boşluğu havasının, motorun bütün düğüm noktalarının birbirleri ve gövde ile ısıl bağlantı sağlıyor olması nedeniyle, bu bölgenin ısıl direncinin artması, ısı akışını güçleştirici ve sıcaklığı arttırıcı etki yapmaktadır. Şekil 5.19 sıcaklığın $\%\Delta h^*_3$ değerine bağlı değişimini göstermektedir. $\%\Delta h_3$ değerinin hesabı Denklem (5.6) ile verilmiştir. Bu denklemde h^*_{3r} kapak boşluğu havası konveksiyon film katsayısının başlangıçtaki değeridir

$$\%\Delta h_3 = \% \frac{h_3^* - h_3}{h_3^*} * 100 \qquad \textbf{(5.6)}$$

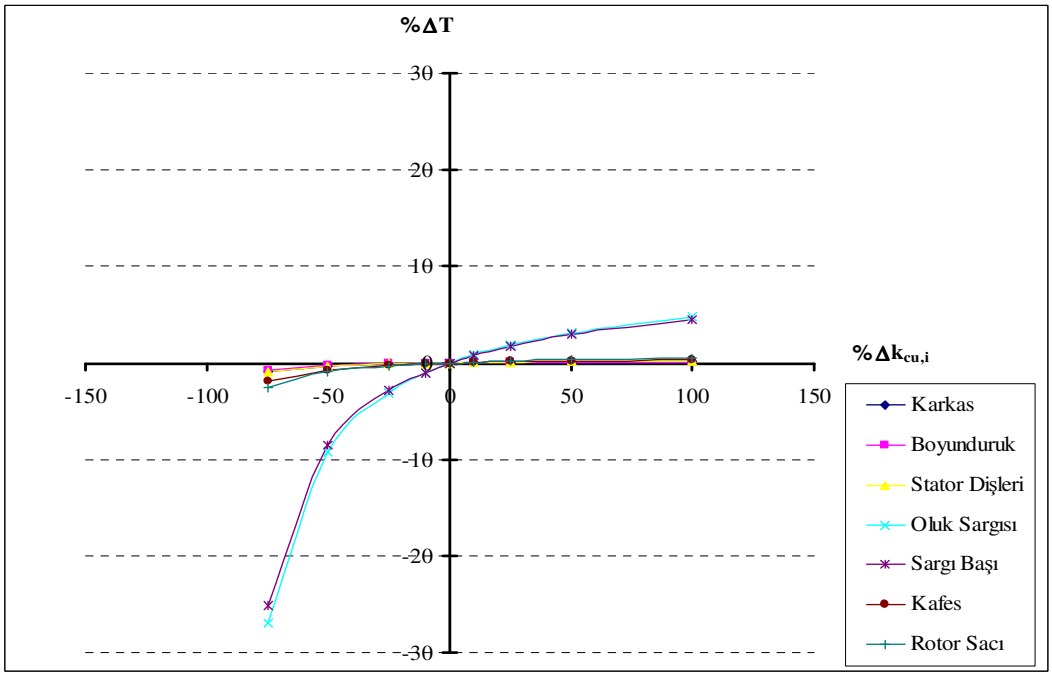


Şekil 5.19: Sıcaklığın Δh_3 değerine bağlı değişimi.

Stator oluk sargısı ve oluk yalıtkanlarının oluşturduğu karmaşık yapının eşdeğer ısı iletim katsayısı k_{cui}, başlıca oluk sargısı ve sargı başı sıcaklığını etkilemektedir. Şekil 5.20 bu durumu göstermektedir. Motordaki kayıpların önemli bir bölümü stator

sargısında meydana gelmektedir. Eşdeğer ısı iletim katsayısının artması, stator oluk ısıl direncini azaltmakta, bu sayede statorda üretilen ısı enerjisinin dışarı atılması kolaylaşmaktadır. Eşdeğer oluk ısı iletim katsayısının başlangıç değeri $k^*_{cu,i}$ olmak üzere, $\%\Delta k_{cu,i}$ değerinin hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\%\Delta k_{cu,i} = \% \frac{k^*_{cu,i} - k_{cu,i}}{k^*_{cu,i}} * 100 \qquad \textbf{(5.7)}$$



Şekil 5.20: Sıcaklığın Δk_{cui} değerine bağlı değişimi.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

3 fazlı asenkron motor için toplu parametreli bir ısıl eşdeğer devre oluşturulmuş ve bu model motorun tasarım eşitlikleriyle birlikte, motorun optimizasyonu için kullanılmıştır. Optimizasyon algoritması olarak yapay ısıl işlem benzeşimi tercih edilmiştir. Isıl model, motor tasarım programı ve optimizasyon algoritması MATLAB ortamında oluşturulmuştur. Bu programlardan elde edilen veriler, GAMAK tarafından üretilen, 3 Fazlı, 2.2 kW, 4 kutuplu bir motordan elde edilen gerçek değerlerle ve FEMM sonlu elemanlar analiz programının sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

Motorun demir, bakır ve sürtünme kayıpları boşta çalışma, kısadevre ve yükleme deneyleriyle tespit edilmiştir. Boşta ve tam yükte çalışma durumunda motorun boyunduruk, sargı ve sargı başı sıcaklıkları PICOTECH-08 sıcaklık kaydedicisiyle, karkas, mil ve rulman sıcaklıkları FLUKE IR termometreyle tespit edilmiş ve ısıl modelden elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Motorun sıcaklık, ağırlık ve verimini optimize etmek amacıyla çok amaçlı ısıl işlem algoritması yazılmıştır.

Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdadır.

1- Tasarım eşitliklerini içeren programdan elde edilen boyut ve performans büyüklüklerinin motor üreticisi tarafından sağlanan verilerle kıyaslanması sonucu, en büyük farkın, rotor reaktansında %10 mertebesinde olduğu görülmüştür. Rotor reaktansındaki bu hata nedeniyle hesaplanan değerlerde -üretici verilerine kıyasla- anma akımında %2.09, kalkış akımında %2.3, anma momentinde, %6.56, kalkış momentinde -%3.88, devrilme momentinde % 0.51, anma güç katsayısında -%2.5, anma veriminde % 2.14 fark meydana gelmiştir.

   Bu verilerden hareketle yazılan motor tasarım programının optimizasyon amaçlı kullanım için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

2- Toplu parametreli sürekli ısıl modelden elde edilen veriler deneysel sonuçlarla kıyaslanmış ve uyumlu oldukları görülmüştür. Anma çalışmasında hesaplanan değerler ve ölçüm sonuçları arasındaki maksimum fark mildedir ve değeri % 8.66'dır. Bu hatanın ölçmeden kaynaklandığı düşünülmektedir. Motorun yükle olan bağlantısı nedeniyle mil sıcaklığı motordan uzak bir noktada ölçülebilmektedir. Bu noktada havayla temas halinde olan mil, zorlanmış taşınımla hızla soğumaktadır. Bu yüzden ölçülen sıcaklık hesap sonucu elde edilen değerden küçük olmaktadır. Geri kalan noktalarda ölçülen değerle hesaplanan değer arasındaki fark % 4 den küçüktür.

3- Toplu parametreli sürekli ısıl modelden elde edilen veriler sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmış ve uyumlu oldukları görülmüştür.

4- Sıcaklığın zamanla değişimi deneysel çalışma ve hesap yoluyla elde edilmiştir. Anma çalışmasında stator oluk sargısı ile sargı baş, boşta çalışmada ise sargı başı sıcaklıklarının zamana göre değişimi gösteren deneysel eğrilerle hesap sonucu elde edilen eğrilerin başlangıç bölgesinde fark görülmekler beraber, nihai sıcaklığa oturma süreleri uyumludur.

5- Isıl eşdeğer devreyi oluşturan ısıl direnç parametrelerinin hesabında yapılması olası hataların, sonuçları nasıl etkileyeceğini görmek üzere hassasiyet analizi yapılmıştır. Buna göre sıcaklık dağılımını en fazla etkileyen ısıl dirençler

- Karkas ve gövde arasındaki ısıl temas direnci
- Karkas ve kapak boşluğu havası arasındaki taşınım ısıl direnci
- Kapak boşluğu havası ve stator sargı başı arasındaki taşınım ısıl direnci
- Stator sargı başı ve oluk sargısı arasındaki ısıl iletim direnci
- Rotor kısadevre kafesi ve hava aralığı arasındaki taşınım ısıl direnci
- Kapak boşluğu havası ve rotor boyunduruğu arasındaki taşınım ısıl direnci
- Mil ve karkas arasındaki iletim ısıl direnci

Bu dirençlerin ±%100 oranında değişmesi motorun çeşitli noktalarındaki sıcaklığı maksimum -%105 - +%127 arasında değiştirmektedir. Herhangi bir

başka ısıl direnç elemanının ±%100 oranında değişmesi durumunda ise motorun çeşitli noktalarındaki sıcaklık değişimi maksimum -%2.02÷%2.2 arasında kalmaktadır.

6- Isıl eşdeğer devrenin oluşturulması için gerekli olan bazı parametrelerin analitik ve/veya deneysel olarak belirlenmesinde bazı belirsizlikler söz konusudur. Bu parametreler g_0 karkas -ortam ısıl iletkenliği, karkas ve boyunduruk arasındaki temas direnç katsayısı h_c, hava aralığı taşınım film katsayısı h_2, kapak boşluğu havası taşınım film katsayısı h_3, stator sargısı iletken ve yalıtkanlarının oluşturduğu karmaşık yapının eşdeğer ısı iletim katsayısı k_{cui} dir. Bu parametrelerinin hesabında yapılması olası hataların, sonuçları nasıl etkileyeceğini görmek üzere hassasiyet analizi yapılmıştır. Buna analizden elde edilen veriler aşağıda sıralanmıştır.

- g_0 değerinin değişmesi motorun tüm noktalarındaki sıcaklığın önemli oranda değişmesine yol açmaktadır. En büyük değişiklik karkasta meydana gelmekte, rotor kafes sargısı bu değişimden en az etkilenmektedir. g_0 değerinin hesabı için kullanılan yöntemle deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar uyumludur.

- h_c katsayısı başlıca stator manyetik devresi ve sargısının sıcaklıklarını etkilemektedir. Motorun diğer kısımlarının bu parametrenin değişimine karşı hassasiyeti ±%3 den düşüktür. Katsayının değerinin %100 artması durumunda stator manyetik devresinin sıcaklığı % 5 azalmakta, katsayının %100 azalması durumunda ise sıcaklık %25 artmaktadır.

- h_2 katsayısı literatürde en çok tartışılan konulardan biri olmakla beraber, motor sıcaklık dağılımına etkisinin çok düşük olduğu belirlenmiştir. Maksimum etkisi stator sargı direnci üzerindedir ve %1.35 değerindedir.

- h_3 katsayısının motorun sıcaklık dağılımına etkisi büyüktür. Bu katsayının ±%100 değişmesi durumunda sargı başı sıcaklığındaki değişim -%20 - +%12 aralığında olmakta, motorun diğer noktalarındaki değişim -%15 - %8 aralığında kalmaktadır.

- k_{cui} katsayısı başlıca stator oluk sargısı ve sargı başı sıcaklıklarını etkilemektedir. ±%100 değişmesi durumunda stator sargı sıcaklığındaki

değişim -%25 - +%5 aralığında olmaktadır. Diğer noktalardaki sıcaklık değişimi üzerindeki etkisi maksimum %2.5 mertebesindedir.

- Motor sıcaklık dağılımı üzerine en büyük etkisi olan katsayı, g_o ısıl iletkenliğinin hesabında kullanılan h_1 film katsayısıdır. g_o değerini h_3 katsayısı takip etmektedir. Bu durum 4. maddede listelenen verilerle de uyumludur. Bu maddede bahsedilen dirençlerin üçünün hesabında h_3 katsayısı kullanılmaktadır. Öte yandan toplu parametreli modeldeki 9 düğüm noktasının 6 sı kapak boşluğu havası üzerinden gövdeyle temas halindedir. 2. düğüm noktasının ise karkasa mekanik teması vardır. Üretilen ısı enerjisinin büyük bir bölümü karkas üzerinden dış ortama iletilmektedir. Bu durum g_o katsayısının önemini açıklamaktadır.

7- Yazılan çok amaçlı yapay ısıl işlem algoritmasıyla motor optimize edilmiştir. Bu işlemden elde edilen sonuç iyi bilinen bir yapay ısıl işlem algoritması olan ASA ve Matlab Örüntü Araştırma Araç Kutusunun kullanılmasıyla elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Sonuçlar arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Kullanılan algoritma ASA yazılımına göre son derece hızlıdır. Örüntü araştırması yöntemine kıyasla optimimum sonucu bulmak %30 daha uzun sürmektedir. Avantajı ise çoklu amaç ve kısıtlama fonksiyonlarının herhangi bir ara işleme (normalizasyon, ağırlık, ceza ve bariyer katsayılarının hesabı vb.) gerek kalmadan işlenebilmesidir. Dolayısıyla bu işlemlerden kaynaklanabilecek hataların da önüne geçilmiş olmaktadır.

8- Yazılan algoritma ile sabit güçte asenkron motorun verim, sıcaklık ve ağırlığının tekli ve çoklu optimizasyonu çeşitli sınır koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Problemin doğası gereği tek bir optimum noktadan bahsetmek mümkün değildir. Kalkış momenti ve mıknatıslanma akımı sınırlamaları altında sıcaklık, verim ve ağırlığın çoklu optimizasyonu durumunda en olumlu sonuçlar alınmıştır. Mevcut tasarıma kıyasla düşük hacim ve sıcaklıkta, yüksek verim ve kalkış iyiliğine sahip bir tasarım elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Çetin İ., Schuisky I. W., 1987. *Elektrik Motörleri*, Fatih Yayınevi, İstanbul.

[2] Türkiye Elektrik İstatistikleri Özeti, 1993. Türkiye Elektrik Kurumu, Ankara,

[3] Önbilgin G., 1988. Endüstride Elektrik Motorlarının Enerji Tüketimi Açısından Verimli Kullanımına İlişkin Yöntemler, *EMO 2.Elektromekanik Sempozyumu.*

[4] Idir K., 1999. Optimization and Neural Network Model for Induction Motors, *PhD. Thesis*, The University of New Brunswick.

[5] Sarıkaya P., 1999. Kafesli Asenkron Motorlarda Isınmanın İncelenmesi ve Isısal Devre Modelinin Kurulması, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ-FBE İstanbul

[6] Gürgöze F., 2002. Kafesli Asenkron Motorların Dinamik Isıl Modeli, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ-FBE , İstanbul.

[7] Hamarat S., 1997. Design Optimization of Three Phase Induction Motor, *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ-FBE , Ankara.

[8] Mellor P.H., Roberts D., Turner D.R, 1991. Lumped Parmeter Thermal Model For Electrical Machines Of Tefc Design, *IEE Proceedings* B, Vol.138, No.5, 205-218.

[9] Bousbaine A., Mccormick M., Low W.F., 1995**.** Insitu Determination Of Thermal Coefficent For Electrical Machines*, IEEE Transactions On Energ Conversion*, Vol.10, No.3, 385-391.

[10] Shenkman A., Chertkov M., 1999. Heat Conditions of a Three-Phase Motor by a One -Phase Supply, *IEE Proeedings.-Electric Power Applications,* Vol.116, No.4, 361-367.

[11] Roy D., Mukhopadhyay S.C., Pal S.K., Bose S., 1997. Novel Thermal Model Aided Motor Derating Under Waveform Distortion, *International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Proceedings*, Vol.2, 829-833.

[12] Mueller M.A., Williamson S., Flack T.J., Atallah K., Baholo B., Howe D., Mellor P.H., 1995. Calculation of Iron Losses From Time Stepped

FEM of Cage Induction Machines, *Electric Machines and Drives Konferans Yayını, IEE* ,88-92.

[13] Bousbaine A., Mccormick M., Low W.F., 1996. Novel Approach to the Measurement of Iron and Stray Losses in Induction Motors, *IEE Proceedings-Electic Power Applications*, Vol.143, No.1, 78-85.

[14] Benamrouche N., Haddad S., Determination of Iron and Stray Losses in Induction Motors Using a Thermometric Method , *Electric Machines and Power Ssytems,* No.26, 3-12.

[15] Bousbaine A., Mccormick M., 1997. Thermal Modelling Of Permanent-Split-Capacitor Single-Phase Induction Machines based On Accurate Loss Density Measurement, Low W.F., *EMD97, IEEE Konferans Yayını*, No.44, 175-179.

[16] Kostic C., 2000. Indirect Methods for Measuring The Additional No-Load Losses in Induction Motor, *ICEM2000.*

[17] Dabrowski M., 2000. Improved Method of No-Load losses Seperation of the Induction Motor, *ICEM2000.*

[18] Okoro O., 2005. Steady and Transient Thermal Analysis of an 7.5 kE Squirrel Cage Induction Motor at Rated-Load Operation, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol.20, No.4, 730-736.

[19] Mezani S., Takorabet N., Laporte B., 2005. A Combined Electromagnetic and Thermal Analysis of Induction Motors, *IEEE Transactions On Industrial Applications*, Vol.39, No.5, 1572-1575.

[20] Boglietti A., Cavanino A., Stanton D.A., 2005. TEFC Induction Motors Thermal Models: A Sensitivity Approach, *IEEE Transactions On Industrial Applications* Vol.41, No.3, 756-763.

[21] Zocholl S.E., Schweitzer E.O., 1984. Thermal Protection Of İnduction Motors Enhanced By İnteractive Electrical And Thermal Models**,** *IEEE Transactions On Power Applications And Systems*, Vol.Pas-103, No.74, S.1479-1486.

[22] Eltom A.H., Moharari N.S, 1991. Motor Temperature Estimation Incorporating Dynamic Rotor Empedance, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol.6, No.1, S.107-113.

[23] Zocholl S.E., 1990 .Motor Analysis And Thermal Protection, *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol.5, No.3, S.1275-1280.

[24] J.P., Cabreira M.F.R.R., Sadowski N., Arruda S.R., 1997. A thermal Analysis of Induction Motor Using A Weak Coupled Modelling. *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol.33, No.2, 1714 – 1717.

[25] Shenkman A.L., Chertkov M., 2000. Experimental Method For Synthesis of Generalized Thermal Circuit of Polyphase Induction Motor, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol.15, No.3, 264-268.

[26] Moreno J.F., Hidalgo F.P., Martinez M.D., 2001. Realisation Of Tests To Determine The Parameters Of The Thermal Model Of An İnduction Motor , *Iee Proceedings – Electric Power Applications*, Vol.148, No.5, 393–397.

[27] Boys J.T., Miles M.J., 2001. Emprical Thermal Model For İnverter Driven Cage Induction Machines, *Iee Proceedings – Electric Power Applications*, Vol.141, No.6, S.360 – 372.

[28] Rajagopal M.S., Seetharamu K.N., Ashwathnarayana P.A., 1998. Transient Thermal Analysis of Induction Motors, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol.13, No.1, 62-69.

[29] Garg V.K., Raymond J., 1990. Magneto Thermal Coupled Analysis Of Canned İnduction Motor, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol.5, No.1, S.110-114.

[30] Chan C.C., Yan L., Chen P., Wang Z., Chau K.T., 1994. Analysis of Electromagnetic and Thermal Fields For Induction Motors During Starting, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol.9, No.1, 53 - 60.

[31] Feyzi M.R., Parker A.M., 1997. Heating in Deep-Bar Rotor Cages*", IEE Proc. – Electric Power Applications*, Vol.144, No.4, 271-276.

[32] Xypeteras J., Hatziathanassiou V., 1999. Thermal Analysis Of An Electrical Machine Taking İnto Account The İron Losses And Deep Bar Effect, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol.14, No.5, 996-1003.

[33] Sarkar D., Mukharjee P.K., Sen S.K., 1999. Use of 3-D Finite Elements For Computation Of Tmperature Distribution in the Stator of an Induction Motor*, IEEE Proceedings-B*, Vol.138, No.2.

[34] Cannistra G., Coviti A., Labini S., 1991. Thermal Analysis In An Induction Motor Using Thermal Network and FEM, *Electric Machines and Drives Conference*, 300 -304.

[35] Ibtiouen R., Mezani S., Touhami O., Nouali N., Benhaddadi M., 2001. Application of Lumped Parameters and Finite Elements Methods to the Thermal Modelling of an Induction Motor*, Electric Machines and Drives Conference*, 505 – 507.

[36] Chauveau E., Zaim E., Trichet D., Fouladgar J., 2000. A Statistical Approach of Temperature Calculation in Electrical Machines, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol.36, No.4, 1826 – 1829.

[37] Boglietti A., Cavanino A., Stanton D.A., Lazarri M., Pastorelli M., 2005. A Simplified Themal Model for Variable Speed Self-Coolde Industrial Induction Motors , *IEEE Transactions On Industrial Applications* Vol.39, No.4, 945–952.

[38] Souto O.N.C., Oliveira J.C., Neto L.M., 2000. Induction Motor Thermal Behaviour and Life Expectancy Under Non-Supply Conditions *, IEEE 9th International Conf. On Harmonics and Quality of Power Proceedings*, Vol.3, 899–904.

[39] Fouladgar J., Chauveau E., 2005. The Influence of the Harmonics on the Temperature of Electrical Machines, *IEEE Transactions On Magnetics,* Vol.41, No.5, 1644–1647.

[40] Doughty R.L., Daugherty R.H., Melfi M.J., Tsao J.P., 2002. Evaluation of Maximum Rotor Temperatures in TEFC Inverter-Fed Motors*, IEEE Industry Applications Magazin*, Vol.8, No.4, 35–43.

[41] Valenzuela M., Tapia J.A., Rooks J.A., 2004. Thermal Evaluation of TEFC Induction Motors Operating on Frequency-Controlled Variable-speed Drives, *IEEE Transactions On Industrial Applications* ,Vol.40, No.2, 682–687.

[42] Tindall C.E., Calvert P.A.J., 1977. Computer Aided Synthesis and Optimization of İnduction Motor Design, *IEEE Transactions On Manifactoring Technology*, Vol.MFT–6, No.2, 31-37.

[43] Ramarathnam R., Desai B.G., 1971. Optimization of Polyphase Induction Motor Design: A Nonlinear Approach ., *IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems,* Vol.PAS–90, No.2, 570–578.

[44] Ramarathnam R., Desai B.G, Rao V.S., 1973. A Comparative Study of Minimization Techniques for Optimization of İnduction Motor Design, Ramarathnam R., Desai B.G., Rao V.S., *IEEE PES Winter Meeting, N.Y*., 1448–1454.

[45] Singh B., Singh BV.P., Murthy S.S., Jha C.S., 1983. Experience In Design Optimization of Induction Motor Using "SUMT" Algorithm, *IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems,* Vol.PAS–102, No.10, 3379–3384.

[46] Murthy S.S., Jho C.S., Singh B.P., Shridar L.,1990. Design Optimization of Induction Motor, *IEEE ACE'90 Proceedings*, 159–164.

[47] Appelbaum J., Fuchs E.F., White J.C., 1987. Optimization of Three-Phase Induction Motor Design:Part I, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol.EC-2, No.3, 407-414.

[48] Appelbaum J., Fuchs E.F., White J.C., 1987. Optimization of Three-Phase Induction Motor Design:Part II, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. EC-2, No.3, 415-422.

[49] Jazdzynski W., 1989. Multicriterial Optimization of Squirrel Cage Induction Motor Design, *IEE Poceedings-B*, Vol.136, No.6, 299–307.

[50] Huang H.., Fuchs E.F., Zak Z., 1988. Optimization of Single-Phase Induction Motor Design:Part I, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol.3, No.2, 349–356.

[51] Singh C., Sarkar D., 1992. Practical Considerations in the Optimization of Induction Motor Design, *IEE Proceedings-B*, Vol.139, No.4, 365–373.

[52] Cannistra G., Coviti A., Labini S., 1995. Design Optimization and Thermal Analysis by FEM of An Induction Motor Having High Air Gap, *Electrical Machines and Drives Conference Publication*, No.412 , 472–476.

[53] Rao K.S.R., Ramamoorty M., 2003. Design Optimization of İnverter Fed 3-Phase Suirrel Cage Induction Motor, *TENCON 2003*, Vol.4, 1303–307.

[54] Zhang Z., Profumo F., Tenconi A., 1996. Improved Design for Electric Vehicle Induction Motor Using An Optimization Procedure, *IEE-Proceedings-Electric Power Applications*, Vol.143, No.6, 410–416.

[55] Park S., Lee.H., Jung H., Hahn S., 1995. Shape Design of Stator Slot for the Reduction of Stator Core Loss in Induction Motor,*IEEE Transactions On Magnetics*, Vol.31, No.3, 2004–2007.

[56] Dableh J.H., Findlay R.D., Szabados B., Belmans R., 1987. Investigation of The Air Gap Influence On The Performance and Cost Optimization Of

A Squirrel Cage Induction Motor, *6th International Conference On Electrical Machines and Drives,*Pub. No.376, 32–37.

[57] Koechli C., Fussel B.K., Prina S.R., James D.A., 2004. Design Optimization of Induction Motors for Aerospace Applications, Perriard Y.,*0-7803-8486-5/04, IEEE,* 2501-2505.

[58] Feyzi M.R., Kalankesh H.V., Sharifan M.B.B., 2004. A comparative Study of 3 optimization Methods in FEM Design of Induction Motors, *Power Electronic and Motion Control Conference, IPEMC'2004,* Vol.1, 305–309.

[59] Appelbaum J., 1988. Discussion *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol.3, No.2, 365–366.

[60] Idir K., Chang L., Dai H., 1997. A New Global Optimization Approach For Induction Motor Design, *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE 1997*, Vol.2, 870–873.

[61] Onuki T., Wakao S., Tokuhisa M., Meade A., 1999. A Novel Approach to Design Optimization of Ventilation Holes in Induction Motors, *Electric Machines and Drives, International Conference, IEMD'99,* 478–480.

[62] Luizzi G., Lucidi S., Parasiliti F., Villani M., 2003. Multiobjective Optimization techniques for the Design of Induction Motors, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol.39, No.3, 1261–1264.

[63] Üler G.F., Mohammed O.A., Koh C.S., 1995. Design Optimization of Electrical Machines using Genetic Algorithms, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol.31, No.3,2008–2011.

[64] Haupt R., 1995. Comparison Between Genetic Algorithm and Gradient-Based Optimization Algorithms for Solving Electromagnetics Problem, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol.31, No.3,1932–1935.

[65] Skaar S.E., Nilssen R., 2004. Genetic Optimization of Electric Machines, State of Art, *http://www.elkraft.ntnu.no/eno/Papers%202004/NORPIE04-Skaar-NilssEnergypdf.*

[66] Bhuvaneswari R., Subramanian S., 2006. Comparison of Modern Otimization Techniques with Applications to Single Phase Induction Motor Design, *Electric Power Components and Systems,* Vol.34, Taylor&Francis, 497–507.

[67] Bhuvaneswari R., Subramanian S., 2005. Optimization of Three-Phase Induction Motor Design Using Simulated Annealing Method, *Electric Power Components and Systems*, Vol.33, No.9, Taylor&Francis, 947–956.

[68] Kim M.K., Jung H.K., Lee C.G., 1998. Multiobjective Optimal Design of Three Phase Induction Motor Using Improved Evolution Strategy, *IEEE Transactions On Industrial Applications*, Vol.34, No.5, 2980 – 2983.

[69] Cho D.H., Jung H.K., Lee C.G., 2001. Induction Motor Design for EV Using a Niching Genetic Algorithm, *IEEE Transactions On Industrial Applications*, Vol.37, 994–999.

[70] Ratnajeevan S., Hole H., Haldar M.K., 1995. Optimization of Electromagnetic Devices:Circuit Models,Neural Networks and Gradient Methods in Concert, *IEEE Transactions On Magnetics,* Vol.31, No.3, 2016–2019.

[71] Altınışık K., 2006. *Uygulamalarla Isı Transferi*, Nobel Yayınevi, Ankara

[72] Saari J., 1998. Thermal Analysis of High Speed Induction Machines, Saari J., *Acta Polytechnıca Skandnavıka Electrical Eng. Series*, No.90, Helsinki

[73] Boduroğlu T., 1992. *Elektrik Makinalarının Temelleri Cilt.2 Kısım 2*, Birsen Yayınevi, İstanbul

[74] Boglietti A., Cavagnino A., 2006. Evaluation of Radiation Thermal Resistances in Industrial Motors, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol.42, No.9, 688–693.

[75] Hooke R., Jeeves T.A., 1961. Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems, *Jornal of The Association for Computing Machinery*, Vol.8, 212–229.

[76] Lewis R.M., 2000. Direct Search Methods:Then and Now, *ICASE Report* NO.2000–26, Virginia.

[77] Meza J.C., Judson R.S., Faulkner T.R., 1996. A Comparison of Direct Search Method and A Genetic Algorithm for Conformational Searching, *Journal of Computational Chemistry*, Vol.17, No.9, 1142-1151.

[78] Mathews J.H.,Fink K.K., 2004. *Numerical Methods Using Matlab*, Prentice – Hall Inc., New Jersey.

[79] Bandler J.W., 1989. Optimization Methods for Computer-Aided Design, IEEE *Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol.MTT-17, No.8, 533-549.

[80] Karaboğa D., 2005. *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, 1. Basım, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.

[81] Kirkpatrick S, Gellat C.D., Vecchi M.P., 1983. Optimization by Simulated Annealing, *SCIENCE*, Vol.220, No.4598, 671–681.

[82] Widom B., The Boltzmann Distribution Law ans statistical Thermodinamics, *www.Cambridge.org*, 04.04.2009.

[83] Monte Carlo methods and Metropolis Algorithm**,** *unb.br /lib /cel/chico /artigos /thesis/node6.html*, 04.11.2007.

[84] Luke B.T., Metropolis Monte Carlo simulation, *members.aol.com / btluke /smcsim.htm,* 20.03.2007.

[85] Cameron P.J., 2003. Markov Chains and Random Walks, *The Encyclopaedia of Design Theory*, Pareto Simulated Annealing, Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, Vol.7, 34–47..

[86] Introduction to probabilty, *http://www.dartmouth.edu/~change/teaching_aids book_articles/probability_book.html/Chapter_11.pdf*, 24.12.2008.

[87] Lıpschutz S., 1998. Schaum Serisi, *Kuram ve Alıştırmalarla Olasılık*, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 130-135.

[88] İngber L., Adaptive Simulated Annealing Program Code, *www.ingber.com*, 31.01.2007.

[89] Suman B., Simulated Annealing Based Multi – Objective Algorithms and Their Application for System Reliability, *Taylor&Francis, Enineering Optimisiation.,* Vol.35, No.4, 391–416.

[90] Czyzak P., Jaszkiewicz J., 1998. Pareto Simulated Annealing, *Journal of Multi- Criteria Decision Analysis*, Vol.7, 34-47.

[91] GAMAK Makine Sanayii A.Ş. , 100L4A, Winding Schema No:4

EKLER

EK A: MATLAB ve FEMM dosyalarını içeren CD.

Bu CD, tez çalışmasında yapılan hesaplamalara ilişkin dosyaları içermektedir. Kapsamında iki adet klasör bulunmaktadır. Klasörlere ilişkin açıklamalar aşağıda verilmiştir.

1) MATLAB klasörü**:** Bu klasör içinde 4 adet MATLAB m dosyası (amac. m, asm_opt.m, data.m, boyutsuz_sayilar.m, DATA.m), bir adet MATLAB mat dosyası (tasarim.mat) bulunmaktadır. MATLAB ortamında, *asm_ op.m* dosyası, *amac.m* ve *tasarim.mat* dosyalarını kullanarak, asenkron motorun tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmektedir.

amac.m dosyası asenkron motorun işletme büyüklüklerini ve sıcaklık dağılımını hesaplamaktadır.

tasarim.mat dosyası motorun mıknatıslanma eğrisini içermektedir.

data.m dosyası mevcut motor tasarımına ilişkin bazı geometrik büyüklükleri içermektedir.

boyutsuz_sayilar.m dosyası, motorun taşınım katsayılarını hesaplamaktadır.

2) FEMM Klasörü**:** Bu klasörde asenkron motorun anma yükünde ve boşta çalışma durumunda sıcaklık dağılımını belirlemek üzere hazırlanmış iki adet FEMM–4.2 FEH dosyası ve bu dosyalardan elde edilen sonuçları içeren iki adet FEMM–4.2 HWIEW dosyası bulunmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Filiz Gürgöze

Doğum Yeri ve Tarihi: Trabzon, 01/03/1972

Adres: Uzuncaova C. Akşit A. No:19/8, Beşiktaş,İSTANBUL.

Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 1996.

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, 2003.