

153897

**T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MOTORLARINDA
GENETİK ALGORİTMA İLE
TASARIM OPTİMİZASYONU**

**Mehmet ÇUNKAŞ
DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH. A.B.D.
Konya, 2004**

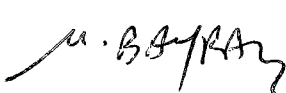
T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

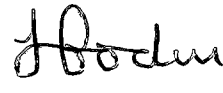
ELEKTRİK MOTORLARINDA
GENETİK ALGORİTMA İLE TASARIM OPTİMİZASYONU

Mehmet ÇUNKAŞ

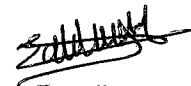
DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

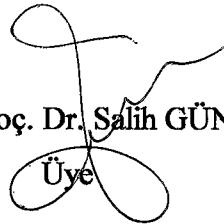
Bu tez 29/07/2004 tarihinde aşağıdaki juri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Mehmet BAYRAK
Üye


Prof. Dr. Hacı BODUR
Üye


Prof. Dr. Novruz ALLAHVERDİ
Üye


Yrd. Doç. Dr. Ramazan AKKAYA
Danışman


Yrd. Doç. Dr. Salih GÜNEŞ
Üye

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTRİK MOTORLARINDA GENETİK ALGORİTMA İLE TASARIM OPTİMİZASYONU

Mehmet ÇUNKAŞ

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Ramazan AKKAYA

2004, 173 sayfa

Jüri: : Prof.Dr. Mehmet BAYRAK
Prof.Dr. Hacı BODUR
Prof.Dr. Novruz ALLAHVERDİ
Yrd.Doç.Dr. Ramazan AKKAYA
Yrd.Doç.Dr. Salih GÜNEŞ

Bu çalışmada, asenkron motorların özel bir tipi olan Dalgıç Asenkron Motorların tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon algoritması olarak evrim algoritmaları içerisinde üstün özelliklere sahip olan Genetik Algoritmalar kullanılmıştır. Motorların magnetik alan analizi, ANSYS yazılım programıyla Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

Genetik Algoritmalarla tasarım optimizasyonu 30 kW ve 55 kW olmak üzere iki adet dalgıç asenkron motor üzerinde gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon metodu olarak biyolojik süreci en iyi şekilde modelleyen İkili Kodlu Genetik Algoritma tercih edilmiş ve amaç fonksiyonu olarak moment seçilmiştir. Genetik algoritmaların karakteristiği nedeniyle rasgele yapılan işlemlerden dolayı farklı sonuçlar elde edilmektedir. Yapılan çalışmada, bu dezavantajı ortadan kaldırmak için, her bir simülasyon yirmi kez tekrarlanarak sonuçlar alınmıştır. Farklı popülasyon sayıları, çaprazlama ve mutasyon oranları kullanılarak genetik algoritmalar test edilmiş ve sonuçları incelenmiştir. Mevcut motorların performans özellikleri ölçülmüş ve tasarım parametreleri optimize edilerek en uygun motor tasarımı elde edilmiştir.

Optimizasyon programı olarak geliştirilen genetik algoritma yazılımı, Delphi programlama dilinde yazılmıştır. Yazılım, çok az bir değişiklik ile farklı güçlerdeki kısa devre rotorlu tüm asenkron motorlara uygulanabilir esneklikte hazırlanmıştır. Tasarım parametrelerinin moment üzerindeki etkileri incelenmiş ve grafiklerle verilmiştir.

Motorların magnetik alan analizi, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Genetik algoritmalarla yapılan optimizasyon sonuçları, sonlu elemanlar yöntemiyle test edilmiş ve sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda dalgıç asenkron motorların, moment ve veriminde iyileşmeler olduğu, boylarının kısaltıldığı ve malzemeden tasarruf edilmesi nedeniyle de aynı güçteki mevcut dalgıç asenkron motorlara göre düşük maliyette üretilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Genetik Algoritmalar, Tasarım Optimizasyonu, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Dalgıç Asenkron Motor, Magnetik Alan Analizi, ANSYS



ABSTRACT

PhD Thesis

DESIGN OPTIMIZATION OF ELECTRIC MOTORS BY GENETIC ALGORITHMS

Mehmet CUNKAS

Selcuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assist.Prof.Dr. Ramazan AKKAYA

2004, 173 sayfa

Jury: Prof. Dr. Mehmet BAYRAK
Prof. Dr. Hacı BODUR
Prof. Dr. Novruz ALLAHVERDI
Assist. Prof. Dr. Ramazan AKKAYA
Assist. Prof. Dr Salih GUNES

Design optimisation of submersible motors, which are a special type of induction motors, has been carried out. Genetic algorithms have been used because of its superior features among other evolutionary algorithms. Magnetic field analysis of motors has been implemented with Finite Elements Method by using ANSYS software.

Genetic algorithms have been employed in design optimization of two 30 kW and 55kW submersible induction motors. Binary genetic algorithms that smoothly imitates biological process has been preferred and the torque has been chosen as an objective function. Because of the genetic algorithms characteristics, different results are obtained in randomly employed operations. In this study, to overcome this drawback, the results are obtained by repeating each simulation 20 times. Genetic algorithms have been tested by using different number of populations, crossover and mutation rates and the results are observed. Performance characteristics of existing motors have been measured and the most appropriate motor design by optimizing design parameters are obtained.

Genetic algorithm software, developed for optimisation program, has been implemented in Delphi programming language. With a little modification, the program can be applied to all squirrel cage induction motors in different power rates. The effects of design parameters on torque have been investigated and graphically represented.

Magnetic analysis of motor has been implemented with two-dimensional finite elements method by using ANSYS software. Optimisation results carried out by genetic algorithms have been tested by finite elements method and it has been seen that results are in compliance. Through the studies accomplished, it has been observed that submersible induction motors' torques and efficiencies improve, their length shortens, and hence some material savings are obtained.

Keywords: Genetic Algorithms, Design Optimisation, Finite Elements Method, Submersible Induction Motor , Magnetic Field Analysis, ANSYS



ÖNSÖZ

Son yıllarda elektrik makinalarının tasarım optimizasyonu, popüler bir konu haline gelmiştir. Elektrik makinalarında istatistiksel ve matematiksel metotlar kullanılarak gerçekleştirilen tasarım optimizasyonu, nonlinear çok değişkenli bir problemdir. Motorun geometrik yapısı ile elektriksel yapısı arasındaki karmaşık ilişkiler dikkate alındığında, Genetik Algoritmaların en iyi optimizasyon aracı olduğu anlaşılmaktadır. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak Genetik algoritmalarla ilgili çalışmalarda bir artış kaydedilmekte ve her geçen gün yeni uygulama alanlarına tatbik edildiği görülmektedir.

Elektrik motorlarının magnetik devresi lineer olmadığından analitik olarak özellikle, hava aralığı bölgesinde, momenti ve kayıpları doğru hesaplamak mümkün değildir. Ayrıca magnetik akı yoğunluğu ve akım yoğunluklarının hesaplanmasında, klasik motor eşdeğer devresi kullanılması hatalı sonuçlar vermektedir. Bu gibi olumsuz durumlar sonlu elemanlar yöntemiyle magnetik devre analizi yapılarak ortadan kaldırılabilir.

Elektrik motorları içerisinde asenkron motorlar, endüstride en çok kullanılan motorlardır. Bu motorlar yapıları itibariyle basit olması, bakıma az ihtiyaç duyması ve maliyetinin düşük olması gibi nedenlerden dolayı cazip hale gelmişlerdir. Son yıllardaki teknolojik gelişmelere paralel olarak devir sayısı kontrolünün kolaylıkla gerçekleştirilebilmesi asenkron motorları avantajlı konuma getirmiştir.

Bu çalışmada kullanılan Dalgıç Asenkron Motorlar, asenkron motorların özel bir tipi olup yapısı bakımından biraz farklılık göstermektedir. Şimdiye kadar yer altı kuyularından elde edilen sular, genelde dizel veya elektrikli motorlar tarafından tahrik edilen düşey milli türbin tipi pompalarla çıkarılmaktaydı. Düşey milli pompaların verimlerinin düşük olması ve çok sık mekanik arızalar meydana gelmesi nedeniyle kullanımı azalmıştır. Bunların yerine özellikle tarımsal sulamada daha az bakım gerektiren ve verimleri yüksek olan dalgıç asenkron motorların kullanımı yaygınlaşmıştır.

Dalgıç pompalarda kullanılan dalgıç asenkron motorların büyük bir kısmı, yurt dışından ithal edilmekte ve yurt içinde üretilen pompalar ile akuple edilerek satışa sunulmaktadır. Yapılan bu çalışma, dalgıç asenkron motorların üretiminin ülkemizde daha da yaygınlaşmasını sağlayacak ve ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır.

Doktora çalışmalarım süresince hiçbir yardımını esirgemeyen ve çalışmalarımı büyük bir titizlikle yönlendiren danışmanım Yrd.Doç.Dr. Ramazan AKKAYA 'ya, ANSYS programı konusunda bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim Selçuk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Yrd.Doç.Dr. Osman BİLGİN'e ve yoğun çalışmalarım esnasında bana destek veren değerli eşim ve kızıma teşekkür ederim.

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi Araştırma Fonu (SÜAF) tarafından desteklenmiştir. (Proje No:99/125)

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SİMGELER.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Konunun Tanıtımı.....	3
1.2 Çalışmanın Amacı ve Önemi.....	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	7
3. GENETİK ALGORİTMALAR İLE OPTİMİZASYON.....	11
3.1 Optimizasyon	11
3.2 Genetik Algoritmalar.....	15
3.2.1 İkili kodlu genetik algoritmalar.....	17
3.2.1.1 İkili kodlu genetik algoritmaların operatörleri.....	18
3.2.1.2 Amaç fonksiyonu ve parametreler.....	19
3.2.1.3 Parametrelerin tanımlanması.....	21
3.2.1.4 Başlangıç popülasyonu.....	22
3.2.1.5 Doğal seçim.....	23
3.2.1.6 Eşleştirme.....	25
3.2.1.7 Çaprazlama.....	27
3.2.1.8 Mutasyon.....	28
3.2.1.9 Gelecek nesil.....	29
3.2.1.10 Yakınsama.....	32
3.2.2 Gerçek kodlu genetik algoritma.....	33
3.2.2.1 Parametreler ve amaç fonksiyonu.....	34
3.2.2.2 Başlangıç popülasyonu.....	35
3.2.2.3 Doğal seçim.....	36

3.2.2.4 Eşleştirme.....	37
3.2.2.5 Çaprazlama.....	38
3.2.2.6 Mutasyon.....	41
 4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	 45
4.1 Sınır Değer Problemleri.....	46
4.2 Laplas ve Poisson Denklemleri.....	47
4.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Adımları.....	48
4.3.1 Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılması ve denklemlerinin yazılması.	48
4.3.2 Elemanların birleştirilmesi.....	52
4.3.3 Denklemler sisteminin çözülmesi.....	54
4.4 ANSYS Programı ile Sonlu Elemanlar Analizi.....	54
4.5 ANSYS Programı ile Dalgıç Asenkron Motorun Modellenmesi	56
4.5.1 Geometrik model oluşturulması.....	57
4.5.2 Malzeme özelliklerinin tanıtılması.....	59
4.5.3 Elektriksel devre modelinin oluşturulması.....	60
4.5.4 Çözümün başlatılması.....	62
4.5.5 Sonuçların değerlendirilmesi.....	63
 5. GENETİK ALGORİTMALARIN DALGIÇ ASENKRON MOTORLARIN TASARIM OPTİMİZASYONUNA UYGULANMASI.....	 64
5.1 Tasarım Parametreleri.....	64
5.2 Bağımlı Değişkenler ve Sınırları.....	66
5.3 Ceza Fonksiyonu.....	67
5.4 Optimizasyon Prosedürü ve Motor Performansının Hesaplanması.....	69
5.4.1 Dalgıç asenkron motorlar.....	70
5.4.2 Ana boyutların bulunması.....	73
5.4.3 Hava aralığı ve Carter katsayısı.....	75
5.4.4 Olukların boyutlandırılması ve iletken uzunluğu.....	76
5.4.5 Stator sargı direnci.....	77
5.4.6 Rotor direnci.....	78
5.4.7 Rotor akımı ve kayma.....	79

5.4.8 Hava aralığı, dış ve boyunduruk magnetik indüksiyonları.....	80
5.4.9 Stator ve rotor reaktansı.....	83
5.4.9.1 Oluk dağılma reaktansı.....	84
5.4.9.2 Bobin başı veya cephe bağlantısı dağılma reaktansı.....	86
5.4.9.3 Hava aralığı veya halkalanma dağılma reaktansı.....	87
5.4.10 Motor kayıpları	88
5.4.10.1 Boşta çalışma kayıpları.....	89
5.4.10.2 Yükte çalışma kayıpları.....	93
5.4.11 Toplam kayıplar ve verim.....	94
5.4.12 Nominal yükteki güç faktörü	94
5.4.13 Motor momenti.....	95
5.5 Amaç Fonksiyonu.....	97
 6. GENETİK ALGORİTMALARLA YAPILAN TASARIM OPTİMİZASYONU VE MAGNETİK ALAN ANALİZİ SONUÇLARI.....	 100
6.1 Genetik Algoritma ile Optimizasyon	100
6.1.1 Geliştirilen genetik algoritma yazılımının özellikleri ve yapısı.....	100
6.1.2 Tasarım parametrelerinin moment üzerindeki etkilerinin incelenmesi.....	107
6.1.3 Genetik algoritma ile yapılan optimizasyondan elde edilen sonuçlar.....	112
6.2 Dalgıç Asenkron Motorların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Magnetik Alan Analizinin Sonuçları	128
6.2.1 30 kW'lık motorla ilgili yapılan çalışmalar	129
6.2.2 55 kW'lık motorla ilgili yapılan çalışmalar	139
 7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	 149
7.1 Sonuçlar.....	149
7.2 Öneriler.....	152
 8. KAYNAKLAR.....	 154
 EK-A İki Parametrelili Fonksiyonu Optimize Eden Genetik Algoritma Yazılım Kodu.....	 159
EK-B Motor Magnetik Alan Analizi ANSYS Yazılım Kodu.....	168

SİMGELER

A_1	Çevresel akım yoğunluğu
B	Magnetik indüksiyon
B_δ	Hava aralığı indüksiyonu
$B_{\delta 1}$	Hava aralığı indüksiyonunun birinci harmonik genliği
B_{d1dip}	Stator dış dibi magnetik indüksiyonu
B_{d1ort}	Stator dış ortası magnetik indüksiyonu
$B_{d1baş}$	Stator dış başı magnetik indüksiyonu
B_{d2dip}	Rotor dış dibi magnetik indüksiyonu
B_{d2ort}	Rotor dış ortası magnetik indüksiyonu
$B_{d2baş}$	Rotor dış başı magnetik indüksiyonu
B_{j1}	Stator boyunduruk magnetik indüksiyonu
B_{j2}	Rotor boyunduruk magnetik indüksiyonu
B_{p1}	Stator indüksiyon pulzasyon genliği
B_{p2}	Rotor indüksiyon pulzasyon genliği
b_{k1}	Stator saç paketi kanal genişliği
b_{k2}	Rotor saç paketi kanal genişliği
C	Faydalanma katsayısı
C_j	Sınır değişkenlerinin hesaplanan değeri
DF	Dolgu faktörü
D_a	Stator dış çapı
D_i	Stator iç çapı
D_h	Kısa devre bileziği çapı
$D_{riç}$	Rotor iç çapı
d_{i2}	Rotor oluk çapı
$E_{çk}$	Çubuk gerilimi
E_{20}	Rotor sargısında indüklenen emk
e	Rotor oluk geçidi
f	frekans
G_d	Stator ve rotor dişleri toplam ağırlığı

G_{top}	Toplam ağırlık
δ	Hava aralığı
H	Magnetik alan şiddeti
h_1	Stator oluk yüksekliği
h_{ha}	Kısa devre bileziği yüksekliği
h_{j1}	Stator boyunduruk yüksekliği
h_{j2}	Rotor boyunduruk yüksekliği
I_{1k}	Kısa devre akımı
I_{1n}	Stator akımı
I_m	Mıknatıslanma akımı
J_1	Stator akım yoğunluğu
J_2	Rotor akım yoğunluğu
K	Yüksek harmonik gerilim katsayısı
k	Saç paketi işleme faktörü, özgül kayıplar
k_o	Sacın cinsine ve kalınlığına bağlı olarak iletkenler dışında kalan oluk kısmı için düzeltme faktörü
k_c	Carter faktörü
k_{c1}	Stator Carter faktörü
k_{c2}	Rotor Carter faktörü
K_{Hb}, k_{wb}	Magnetik alanın boyunduruk kesitine homojen olarak dağılmadığını gösteren düzeltme faktörü
k_d	Doyma faktörü
k_{Fe}	Demir doldurma faktörü
k_p	Saçların işlenmesinden kaynaklanan fuko kayıplarında büyüme oranı
$L_{\sigma o}$	Oluk dağılma indüktansı
L_i	Stator aktif demir uzunluğu
L_{ut}	Bir fazın ortalama iletken uzunluğu
L_{topl}	Stator saç paketinin toplam uzunluğu
ℓ_{bb}	Bobin başı iletkenlik katsayısı
$\ell_{\phi k}$	Rotor çubuk uzunluğu
ℓ_{j1}	Stator boyunduruğu kuvvet çizgisi yolu uzunluğu
M_{di}	Çalışma momenti

M_{dy}	Yol alma momenti
M_{dd}	Devrilme momenti
m_1	Stator faz sayısı
N_{par}	Parametre sayısı
n	Devir sayısı
n_s	Senkron devir sayısı
n_1	Stator oluk sayısı
n_2	Rotor oluk sayısı
p	Kutup sayısı
P_c	Çaprazlama oranı
P_i	Kümülatif ihtimal
P_m	Mutasyon oranı
P_n	Eşleştirme olasılığı
P_K	Toplam kayıplar
$P_{Kboş}$	Boştaki kayıplar
P_{cu2}	Rotor bakır kayıpları
P_{Kcu}	Toplam bakır kayıpları
P_{Kstme}	Sürtünme kayıpları
$P_{Kyüz}$	Yüzeysel kayıplar
P_{Kpulz}	Salınım kayıpları
P_{Kp1}	Stator dişlerindeki toplam pulzasyon kaybı
P_{Kp2}	Rotor dişlerindeki toplam pulzasyon kaybı
$P_{Kyük}$	Yükteki kayıplar
P_{Wd}	Dişlerdeki fuko kayıpları
P_{Fed}	Dişlerdeki demir kayıpları
P_{Feb}	Boyunduruktaki demir kaybı
P_{d1}	Stator döner alan gücü
P_m	Mekanik güç
P_{sn}	Sanal güç
P_w	Aktif güç
P_Q	Reaktif güç
q	Kutup ve faz başına düşen oluk sayısı

q_{cu1}	Stator iletken kesiti
q_h	Kısa devre bileziği kesiti
r	Ceza katsayısı
R_i	Stator iletken çapı
R_1	Stator direnci
R_2	Rotor direnci
R_2'	Statora indirgenmiş rotor direnci
R_m	Magnetik direnç
s	Kayma
T	Sıcaklık
U_1	Faz gerilimi
$\bar{u}_r$	Direnç indirgeme faktörü
w_{10}	Stator oluk ağız genişliği
w_{20}	Rotor oluk ağız genişliği
w_1	Stator faz sarım sayısı
w_2	Rotor faz sarım sayısı
w_a	Sargı kolundaki toplam sarım sayısı
w_{ha}	Kısa devre bileziği genişliği
w_s	Stator oluk genişliği
x_1	Stator faz sarım sayısı
x_2	Stator demir uzunluğu
x_3	Kısa devre halkası genişliği
x_4	Stator iç çapı
x_5	Stator oluk yüksekliği
x_6	Stator oluk genişliği
x_7	Hava aralığı
x_8	Rotor oluk geçidi
x_9	Rotor oluk çapı
X_{10}	Rotor dış çapı
$X_{\sigma 1}$	Stator reaktansı
$X_{\sigma 2}'$	Statora indirgenmiş rotor reaktansı

$X_{\sigma m}$	Magnetik reaktans
$X_{l\sigma o}$	Stator oluk dağılma reaktansı
$X_{l\sigma bb}$	Stator bobin başı dağılma reaktansı
$X_{l\sigma ha}$	Hava aralığı veya çift halkalanma reaktansı
$X_{\sigma 2k}$	Rotorda her bir çubuğun şebeke frekansına çevrilmiş oluk dağılma reaktansı
Z_1	Stator toplam iletken sayısı
Z_2	Rotor toplam iletken sayısı
z_{o1}, z_o	Oluktaki iletken sayısı
z_k	Kanal sayısı
τ_1	Düzeltilme faktörü
τ_p	Kutup taksimatı
τ_{o1}	Stator oluk taksimatı
τ_{o2}	Rotor oluk taksimatı
ξ_1	Stator sargı faktörünün birinci harmoniği
ξ_2	Rotor sargı faktörünün birinci harmoniği
σ	Özgül çevre kuvveti
σ_1	Dağılma faktörü
σ_H	Histeresiz kaybı ile ilgili malzeme sabiti
σ_w	Fuko kaybı ile ilgili malzeme sabiti
λ_{bb}	Bobin başı iletkenlik katsayısı
λ_{cu}	Bakırın özgül iletkenliği
$\lambda_{\sigma k}$	Rotor çubuk iletkenlik katsayısı
λ_h	Kısa devre bileziği iletkenlik katsayısı
λ_o	Oluk dağılma iletkenlik katsayısı
λ_{o1}	Stator olukları dağılma iletkenlik katsayısı
λ_{o2}	Rotor olukları dağılma iletkenlik katsayısı
$\wedge_o$	Oluk magnetik iletkenliği

$\wedge_{ha}$	Hava aralığı magnetik iletkenliği
∇	Nabla operatörü
θ	Magnetik gerilim
ν	Magnetik direnç
μ	Magnetik geçirgenlik
η	Verim
$\text{Cos}\varphi$	Güç faktörü
ω	Açısal hız



1. GİRİŞ

Elektrik makinalarının tasarım optimizasyonunda amaç; yüksek verim, düşük maliyet ve yüksek güç faktörlü motorlar elde etmektir. Dünyada üretilen elektriğin %60'ı elektrik motorları tarafından harcanmaktadır. Bu yüzden kayıplardaki küçük bir azalma; enerji tasarrufu, motorun toplam maliyetinin düşmesi ve motor ömrünün artırılması gibi önemli etkilere sahiptir.

Elektrik motorları içerisinde asenkron motorlar, endüstride en çok kullanılan motorlardır. Bu motorlar, yapıları itibariyle basit olması, bakıma az ihtiyaç duyması ve maliyetinin düşük olması gibi nedenlerden dolayı cazip hale gelmişlerdir. Son zamanlarda teknolojik gelişmelere paralel olarak devir sayısı kontrolünde kolaylık sağlanması asenkron motorları avantajlı konuma getirmiştir. İlk defa Nikola Tesla tarafından 1888 yılında asenkron motor patenti alınmış ve imalatı ise Westinghouse firmasında gerçekleştirilmiştir. Yapıldığı tarihten günümüze kadar gelişmelere paralel olarak ağırlığı ve fiyatı onda bire düşmüştür. Bu gün birkaç vattan 35000 kW'a kadar güçlerde imal edilen asenkron motorların gerilimi ise 110 V'dan 27 kV'a kadar değişmektedir (Güzelbeyoğlu 1992).

Asenkron motorlar kullanım yeri ve amacına göre değişik şekillerde tasarlanıp imal edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan Dalgıç asenkron motorlar (DASM), asenkron motorların özel bir tipi olup, tasarımı ve tipi biraz farklılık göstermektedir. DASM'lar dalgıç pompa ile birlikte su içerisinde çalıştığından motorun soğutulması hava yerine su ile yapılmaktadır. Bu yüzden stator ve rotor akım yoğunlukları oldukça yüksektir. Yüksek güçteki dalgıç motorların stator sargılarının çok iyi yalıtılması gerektiğinden vernikli tel yerine PVC izolasyonlu tel kullanılmaktadır. Dalgıç motorun iç kısmının, hava ile teması tamamen kesilmiştir. Sargılarda ve kısa devre sincap kafesli rotorda oluşan ısı, motorun içine dökülen yağ ya da gliserin ile uzaklaştırılmaktadır. Böylece motorun dönen kısımlarının da yağlanması sağlanmış olmaktadır.

Normal ASM'lerde, motor çapı ile boyu belirli bir oranda değişirken DASM'lerde motor çapı sabit kalır, ancak motor boyu uzatılabilir. Güç artışı

gerçekleştirmek için motor boyunun aşırı uzatılması, mekanik ve imalat yönünden bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Örneğin; motor boyu aşırı uzun olduğundan yataklama ve bobinlerin oluklara yerleştirilmesi oldukça zordur. DASM'lerde hava aralığının büyük değerlerde olması, mıknatıslanma akımının daha büyük olmasına dolayısıyla güç faktörünün düşmesine ve reaktif güç tüketiminin artmasına neden olmaktadır.

Dalgıç asenkron motorun rotor ağırlığı, motorun alt kısmına yerleştirilmiş olan karbon yataklar tarafından taşınmaktadır. Rotor dönmeye başladığı andan itibaren, karbon arasına giren yağın veya gliserinin ince bir film tabakası oluşturması sonucu sürtünme en aza inmektedir. Kuyudaki su basıncı ile motor içerisinde bulunan sıvının basıncı arasında oluşan basınç farkı, karbon yataklar tarafından genişleme diyaframı aracılığıyla dengelenmektedir.

Derin kuyu su pompaları, tarımsal sulama, içme suyu, jeotermal su temini gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Şimdiye kadar yer altı kuyularından elde edilen sular, genelde dizel veya elektrikli motorlar tarafından tahrik edilen düşey milli türbin tipi pompalarla çıkarılmaktaydı. Ancak düşey milli türbin tipi pompaların kolon milinde meydana gelen sürtünme, titreşim ve sarsıntılardan dolayı verimleri düşüktür. Ayrıca montaj zorluğu ve mekanik arızaların çok fazla meydana gelmesi dalgıç motorların kullanımını yaygınlaştırmıştır. Dalgıç motorların ilk yatırım maliyeti düşey milli türbin tipi pompalara göre yüksek olmakla beraber işletme masrafları oldukça düşüktür.

Tarımsal sulamanın yoğun olduğu bölgelerden biri olan Konya'da bu güne kadar yaygın olarak düşey milli türbin tipi pompalar kullanılmaktaydı. Ancak günümüzde yukarıda zikredilen dezavantajlarından dolayı bu pompaların yerine dalgıç pompalar daha fazla tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, asenkron motorların özel bir tipi olan dalgıç asenkron motorların tasarım optimizasyonu genetik algoritmalar ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut motorların performans özellikleri ölçülmüş ve tasarım parametreleri optimize edilerek en uygun motor tasarımı elde edilmiştir. Genetik algoritma ile elde edilen sonuçların doğruluğu sonlu elemanlar yöntemiyle test edilmiş ve optimizasyon sonucunda motorun gerçek değerlerine göre performansında oldukça önemli iyileştirmeler sağlandığı görülmüştür.

1.1 Konunun Tanıtımı

Elektrik motorunun boyutunu belirleyen en önemli faktörlerden birisi, istenen momenttir. Motor boyutu ile moment arasındaki ilişki karmaşık bir problemdir. Optimizasyon yapılarak daha küçük boyutta, aynı momenti veren motor elde etmek mümkündür. Benzer şekilde küçük boyutta, aynı mekanik gücü veren motor tasarımı da gerçekleştirilebilir.

Optimizasyon her zaman en uygun olanı arama sürecidir. Geçmişten günümüze, karşılaşılan problemlerin çözülmesi amacıyla bir çok optimizasyon teknikleri geliştirilerek değişik alanlara uygulanmıştır. Optimizasyon teknikleri uygulanış biçimine göre Deterministik Metotlar ve İstatistiksel Metotlar olmak üzere iki ana grupta toplanırlar.

Deterministik metotlar lokal maksimum veya minimuma yakınsayan optimizasyon algoritmaları kategorisindedirler. Bu metotlar, türevsel yaklaşımlar kullanırlar. İstatistiksel metotlar ise Tavlama Simülasyonu (simulated annealing) ve rasgele araştırma algoritmaları gibi optimizasyon tekniklerinden oluşur. Bu metotlar en uygun maksimuma veya minimuma ulaşmak için rasgele sayıları ve bazı stratejileri kullanırlar. Son yıllarda PC'lerin sayısal hesaplama güçlerinin artmasıyla, istatistiksel metotlar çoğu alanlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, optimizasyon algoritması olarak evrim algoritmaları içerisinde üstün özelliğe sahip olan Genetik algoritmalar (GA) kullanılmıştır. Genetik algoritmalar, doğal seçim mekaniğine ve doğal genetiğe bağlı araştırma algoritmalarıdır. Araştırma işlemi canlıların biyolojik gelişmesine benzemektedir. Canlılar, doğarlar ve üreyerek yeni nesillerini yetiştirirler. Doğal seçim mekaniğine bağlı olarak, canlı grubu içerisinde yapısı bakımından en uygun olan kromozom hayatta kalmaktadır. Genetik algoritmalar, "0" ve "1" bilgilerinden oluşmuş ikili düzendeki dizileri kullanmaktadır. Her yeni nesil, rasgele bilgi değişimi ile oluşturulan diziler içinden hayatta kalanların birleştirilmesi ile elde edilir.

Motorun magnetik devre analizi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile tasarım şekillerini değiştirerek gelişmiş motor modelleri elde etmek mümkündür. Bilgisayar ortamında motor karakteristiklerinin simülasyonu, gerçek motor üzerinde çalışmaktan hem daha hızlı

hem de daha ucuzdur. Aynı zamanda maddi zararlar karşılama durumu söz konusu değildir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tasarım aşamasındaki hatalar giderilebilir. Fakat kayıpların tam modellenememesi ve bazı simülasyon sürelerinin çok uzun olması gibi bazı dezavantajları da mevcuttur.

Bu çalışmada YERSUSAN A.Ş.'inde imalatı yapılan sekiz inç 30 kW ve 55 kW'lık dalgıç asenkron motorların tasarım optimizasyonu genetik algoritmalar ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. GA ile yapılan optimizasyon sonuçları sonlu elemanlar yöntemiyle test edilerek sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışması toplam sekiz bölümden oluşmaktadır.

Birinci Bölümde; tezin konusu genel olarak tanıtılmış, genetik algoritmalar ve sonlu elemanlar yöntemi ile birlikte tezin önemi ve amacı hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

İkinci Bölümde; bu konuda yapılan çalışmalarla ilgili literatür özeti sunulmuştur.

Üçüncü Bölümde; optimizasyon ve optimizasyon teknikleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. İkili kodlu genetik algoritmalar ile gerçek kodlu genetik algoritmaların çalışma ve işleyişi örneklerle açıklanmıştır.

Dördüncü Bölümde; sonlu elemanlar yöntemine ilişkin temel bilgiler verilmiştir. ANSYS paket programıyla dalgıç asenkron motorun modellenmesi ve magnetik alan analizi anlatılmıştır.

Beşinci Bölümde; tasarım optimizasyonunda kullanılan tasarım değişkenleri, bağımlı değişkenler, amaç fonksiyonu ve ceza fonksiyonu ayrıntılı olarak ele alınmış ve optimizasyon prosedürü hakkında bilgi verilmiştir. Tasarım değişkenleri ve bağımlı sınır değişkenlerinin değer aralıkları tanımlanmıştır. Ayrıca motor performans hesaplamalarında kullanılan eşdeğer devre parametrelerinin matematiksel çıkarımları yapılmış ve genetik algoritmaların dalgıç asenkron motorların tasarım optimizasyonuna uygulanması anlatılmıştır.

Altıncı Bölümde; Delphi programlama dilinde geliştirilen genetik algoritma tasarım optimizasyonu yazılımının özellikleri ve kullanımı anlatılmıştır. Tasarım parametrelerinin moment üzerindeki etkileri incelenmiş ve grafiklerle gösterilmiştir. Genetik algoritma ile yapılan optimizasyon sonuçları ayrıntılı olarak değerlendirilmiş

ve 30 kW ile 55 kW'lık motorlara ait optimizasyon sonuçları verilmiştir. Genetik algoritma seçim yöntemleri karşılaştırılmış, optimum çözüm bulunmasında çaprazlama ve mutasyon oranlarının hangi değerlerde olması halinde daha iyi sonuçlar alınacağı araştırılmıştır. Üretimi yapılan mevcut motorun boşa çalışma ve yüklü çalışma deney sonuçları verilmiştir. Mevcut motor ve optimize edilmiş motorlar için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS paket programıyla gerçekleştirilen magnetik alan analizi sonuçları yorumlanmıştır.

Yedinci Bölümde; yapılan tez çalışmasında elde edilen sonuçlar tartışılmış ve ileride bu konuda çalışma yapacak olan araştırmacılara bazı öneriler de bulunulmuştur.

Sekizinci Bölümde; tezde faydalanılan kaynaklar verilmiştir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışmada amaç; Genetik algoritmalar ve sonlu elemanlar yöntemiyle tasarım optimizasyonunu gerçekleştirerek en uygun dalgıç asenkron motoru elde etmektir. Elektrik makinalarının tasarım optimizasyonu, lineer olmayan çok değişkenli bir problem olduğundan geometrik yapı ile elektriksel yapı arasındaki karmaşık ilişkiler dikkate alınarak en iyi optimizasyon GA ve Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Optimizasyon algoritması olarak, evrim algoritmaları içerisinde üstün özelliğe sahip olan GA'lar kullanılmıştır. GA'lar sürekli ve ayrık parametreleri optimize eder, türevsel bilgiler gerektirmez. Amaç fonksiyonunu geniş bir spektrumda araştırır. Çok sayıda parametrelerle çalışma imkanı vardır. Paralel PC'ler kullanılarak çalıştırılabilir. Lokal minimum veya maksimumlara takılmadan, karmaşık amaç fonksiyonu parametrelerinin en uygun çözümleri elde edilebilir. Motorun performans özelliklerinin bulunması için, eşdeğer devre parametreleri ve boyutlarının hesaplanması gerekir. Parametrelerin doğru hesaplanmasında eşdeğer devrenin uygun seçilmesi önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada dalgıç asenkron motorun "T" eşdeğer devre modeli kullanılarak performans özellikleri hesaplanmıştır.

Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşaması; genetik algoritmalarla yapılan optimizasyondur. Bunun için motor eşdeğer devresi, motor parametreleri ve amaç fonksiyonun belirlenmesi gerekir. Amaç fonksiyonu olarak motor performans özelliklerini en iyi şekilde ifade eden “moment” parametresi seçilmiştir.

İkinci aşama; GA’dan elde edilen sonuçlara göre motorun magnetik alan analizinin, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmasıdır. Motorun magnetik devresi lineer olmadığından analitik olarak, özellikle hava aralığı bölgesinde momenti ve kayıpları doğru hesaplamak mümkün değildir. Ayrıca magnetik akı yoğunluğu ve akım yoğunluklarının hesaplanmasında, klasik motor eşdeğer devresi kullanılması hatalı sonuçlar vermektedir. Bu gibi olumsuz durumlar magnetik alan analizi yapılarak ortadan kaldırılabilir. Motorların magnetik alan analizi, ANSYS yazılım programıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

Ülkemizde dalgıç asenkron motor üreten firmaların, bu çalışmada elde edilen iyileştirmeleri ürünlerine yansıtmaları halinde, mevcut motorlara göre daha küçük boyutta aynı momenti veren ve yüksek verimli motorlar üretmeleri mümkündür.

Dalgıç pompalarda kullanılan dalgıç asenkron motorların büyük bir kısmı yurt dışından ithal edilmekte ve yurt içinde üretilen pompalar ile akupile edilerek satışa sunulmaktadır. Yapılan bu çalışma, dalgıç asenkron motorların üretiminin ülkemizde daha da yaygınlaşmasını sağlayacak ve ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Asenkron motorların tasarım optimizasyonu ile ilgili çalışmalar oldukça fazladır. Ancak dalgıç asenkron motorlarla ilgili pek az çalışmaya rastlanmaktadır. Tezde faydalanılan DASM ve ASM ile ilgili literatür özetleri aşağıda verilmiştir.

Choudhury ve Azizur Rahman (1992), PWM modülasyon tekniği kullanan sürücüyle DASM'nin yolalma anındaki performanslarını incelemişler. Yolalma akımlarının diğer asenkron motorlara göre daha yüksek olduğunu ve bazı elektromekanik problemlere sebep olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu yüzden DASM'lere, PWM inverter gibi sistemlerle yumuşak yol verilmesini tavsiye etmişlerdir. Geliştirdikleri üçgen modülasyonlu PWM inverteri dalgıç asenkron motorda kullanmışlar ve uygulama sonuçlarını vermişlerdir.

Üler ve ark. (1994), elektrik motorlarının magnetik kutup yüzeyinin optimizasyonunu, genetik algoritmalarla gerçekleştirmişlerdir. Kutup yüzeyinin elektromagnetik analizinde ise iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Genetik algoritmaların iyi bir optimizasyon aracı olduğunu göstermişlerdir.

Patterson (1996), DASM'yi bir sürücü devre ile akuple ederek yükte çalışma performansını ölçmüştür. Ölçülen bütün değerleri bilgisayar ortamına aktararak; motor verimini sabit tutup, akım, gerilim ve güç faktörü gibi diğer parametrelerin değişimlerini incelemiştir.

Williamson ve McClay (1996), sincap kafesli asenkron motorun verimini yükseltmek için rotor oluk tasarım optimizasyonunu, evrim algoritmaları ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapmışlardır. Optimizasyon çalışmalarını, özel amaçlı kullanılan 37 kW 4 kutuplu motor ile genel amaçlı kullanılan 150 kW 2 kutuplu motor üzerinde yürütmüşlerdir. En uygun rotor oluk geometrisini elde ederek motor verimini artırmayı başarmışlardır.

De Weerdts ve Tuinman (1997), sincap kafesli motorun kararlı durum analizini, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Hem statik hem de zamana bağılı harmonik çözümde, malzeme doyma özelliğini çözüme dahil etmişlerdir. Motor analizinde rotor oluk tipi; kapalı ve açık durumlarına göre ayrı ayrı incelenmiştir. Yüklü, boşta ve kısa devre çalışma koşullarını ele alarak hesaplamalar ve analizler yapmışlardır. Yapılan analizleri deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Dolarin ve ark. (1997), sincap kafesli asenkron motorun parametrelerini sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplamışlardır. Statik doğrusal olmayan çözümle, motor magnetik devresindeki doymayı çözüme dahil etmişlerdir. İndüktansların hesaplanmasında, zamana bağılı doğrusal harmonik çözüm kullanmışlardır. Bütün indüktansları, mıknatıslanma akımının fonksiyonu olarak belirlemişlerdir. Teorik çalışmalar deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Dong-Jong ve ark. (1997), sabit mıknatıslı senkron motorun verimini yükseltmek için optimum bir tasarım metodu geliştirmişlerdir. Bu metot, sonlu elemanlar yöntemi ve genetik algoritmaların birleşiminden oluşmaktadır. Genetik algoritmalarla optimizasyon sonucunda elde ettikleri parametreleri, sonlu elemanlar yöntemiyle test ederek en uygun motor tasarımını bulmaya çalışmışlardır. Üç fazlı, 4 kutuplu, 600 W'lık bir sabit mıknatıslı senkron motor üzerinde uygulama yaparak sonuçları incelemişlerdir.

Pillay ve ark. (1997), asenkron motor parametrelerinin belirlenmesinde genetik algoritmaları kullanmışlardır. Motor parametrelerini hesaplamak ve değerlendirmek için, mevcut motorun yol alma, devrilme ve nominal çalışma momentlerini kriter almışlar ve hata fonksiyonunu buna göre düzenlemişlerdir. Genetik algoritmaları Newton-Raphson optimizasyon metoduyla karşılaştırmışlardır.

Wurtz ve ark. (1997), elektrik makinalarının tasarımında kullanılan genetik algoritmaların özelliklerini incelemişler ve bazı kriterler hakkında ayrıntılı bilgi vermişlerdir. Genetik algoritmalar kullanılarak yapılan tasarımda, etkili sonuç almak için nelere dikkat edilmesi gerektiğini bir tasarım örneği üzerinde göstermişlerdir.

Bianchi ve Bolognani (1998), üç fazlı sabit mıknatıslı senkron motorun tasarım optimizasyonunu sonlu elemanlar yöntemi ve genetik algoritmaları kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak motor moment, verimi ve ağırlığını kullanmışlardır. Klasik optimizasyon tekniği olan direkt araştırma metodu

ile genetik algoritmaların karşılaştırmalarını yapmışlar ve genetik algoritmaların avantajlı olduğunu göstermişlerdir.

Wieczorek ve ark. (1998), asenkron motorların tasarım optimizasyonunu evrim algoritmaları ile gerçekleştirmişlerdir. Diğer klasik algoritmalarla kıyaslayarak evrim algoritmalarının üstünlüklerini incelemişlerdir.

Zhou ve ark. (1998), sincap kafesli asenkron motorun kararlı çalışma performansını, iki boyutlu karmaşık sonlu elemanlar yöntemini kullanarak tespit etmeye çalışmışlardır. Magnetik alan hesaplamalarında, malzeme doyması ve deri olayı çözüme dahil edilmiştir. Rotor çubuklarının kaydırılmış halini ve stator sargı sonu etkilerini, üç boyutlu olarak incelemişlerdir. Uygulama örneğiyle amaçlanan metodun etkinliğini göstermişlerdir.

Sames (2001), Genetik algoritmalar ve tavlama simülasyonu (simulated annealing) metodlarını asenkron motorun tasarım optimizasyonuna uygulamış ve aralarındaki farkları irdelenmiştir. Amaç fonksiyonu olarak motor verimini kullanmış ve maksimum verim elde etmeye çalışmıştır.

Çunkaş ve Akkaya (2002), İkili kodlu genetik algoritmalarla Gerçek kodlu genetik algoritmaların karşılaştırılmasını, örnek test fonksiyonları kullanarak yapmışlar. Gerçek kodlu genetik algoritmaların ikili kodlu genetik algoritmalarla göre daha hızlı çalıştığını göstermişlerdir.

Çunkaş ve ark. (2002), üç fazlı asenkron motorun oluk optimizasyonunu genetik algoritmalar kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Üç fazlı, 4 kutuplu, 22 kW'lık bir asenkron motor üzerinde uygulama yaparak sonuçları incelemişlerdir.

Weatherford ve Brice (2003), laboratuvarında test edilebilen düşük güçlü indüksiyon motorların parametrelerinin belirlenmesini genetik algoritmalarla gerçekleştirmişler. İndüksiyon motorun, akım, gerilim ve moment gibi değerlerinden hareketle diğer parametrelerinin bulunmasını sağlamışlardır. Motor parametrelerinin bulunmasında genetik algoritmaların etkili bir çözüm metodu olduğunu göstermişlerdir. Model çalışmalarını tek rotor çubuklu ve çift rotor çubuklu motor üzerinde yapmışlardır.

Çunkaş ve Akkaya (2004), Genetik algoritmalarla üç fazlı asenkron motorun tasarım optimizasyonunu yapmışlardır. Motor performans özelliklerini iyileştirerek ağırlığını düşürmüşlerdir. Uygulama örneğiyle Genetik algoritmaların elektrik makinaların tasarım optimizasyonunda etkinliğini göstermişlerdir.

Bu güne kadar yapılan çalışmalarda, üç fazlı asenkron motorlar ve sabit mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonu Genetik algoritmalar kullanılarak yapılmıştır. Asenkron motorların özel bir tipi olan Dalgıç asenkron motorların, Genetik algoritmalarla tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmemiştir.

Bu çalışmada, daha önce bu konuda yapılan çalışmalardan farklı olarak dalgıç asenkron motor tasarım optimizasyonu GA ve sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilecektir.



3. GENETİK ALGORİTMALAR İLE OPTİMİZASYON

3.1 Optimizasyon

Optimizasyon bir şeyin daha iyisini gerçekleştirme sürecidir. Bir mühendis veya bilim adamı yeni bir fikir ortaya koyar. Optimizasyon bu fikrin geliştirilmesine yardımcı olur.

Optimizasyon; fikirleri iletirmek için ortaya atılan bilgileri kullanarak, başlangıç kavramlarını (parametrelerini) değiştirmektir. Eğer fikri etkileyen parametreler elektronik formata dönüştürülürse bilgisayar mükemmel bir optimizasyon aracı olur. Bir takım bilgiler bilgisayara girilir ve bir çözüm elde edilir. Elde edilen bu çözümün değerlendirilmesi optimizasyon aracılığıyla gerçekleştirilir.

Bir problemin birden fazla çözümü varsa, en iyi çözümü bulmak gerekir. Aslında “en iyi” tanımlaması izafi kavramdır. Optimal çözüm, problemi formülize eden kişiye bağlıdır. Eğitim, fikirler, ideolojiler ve sosyal durumlar “en iyi” tanımlamasında etkili olan faktörlerdir. Bazı problemlerin tam cevabı bulunurken, bazıları optimal noktalar olarak bilinen, değişik minimum ve maksimum noktalarına sahiptir. İşte burada “en iyi” izafi olabilir.

Yer kürede yaşayan insanoğlunun hayatı, optimizasyon problemleri ve çözümleri ile doludur. Bununla ilgili birkaç örnek verilebilir. Hem işe zamanında gitmek, hem de uyku miktarını artırmak için ne zaman kalkılmalıdır?. İşe giderken en iyi yol neresidir?. Bir projeyi yürütürken ilk olarak nereden başlanmalıdır?. Bir şeyin uzunluğunu kısaltmak, ağırlığını azaltmak bir ürünün cazibesini artırmak ve maliyetini düşürmek optimizasyon tekniğinin ilgi alanı içerisinde. Optimizasyonun temel aşamaları Şekil 3.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Optimizasyonun temel aşamaları

Bir deney düzeneğinde, maksimum veya minimum sonuç/çıkış elde edebilmek için, cihazın giriş karakteristiklerinin ayarlanması işlemi de bir optimizasyon sürecidir. Bir fonksiyonun girişinde, çeşitli parametreler çıkışında, uygunluk veya maliyet değerleri vardır. Fonksiyon veya süreç; maliyet (cost) fonksiyonu, amaç (objective) fonksiyonu veya uygunluk (fitness) fonksiyonu olarak tanımlanır. Eğer süreç deneysel ise, giriş parametreleri fiziksel büyüklüklerden oluşur (Pierre 1992).

Hayat; tesadüf gibi görünen olaylarda, verilen kararlar nedeniyle çok ilginçtir. Kuantum teorisi, sonsuz boyut olduğunu ve her boyutun bir kararı temsil ettiğini söylemektedir. Hayat, lineer olmadığından kaos önemli bir rol oynar. Başlangıç şartlarında küçük bozucu etkiler, çok farklı ve tahmin edilemeyen çözümlere sebep olmaktadır. Bir ürün tasarımında yüksek dereceli karmaşıklıklar ortaya çıkmaktadır. Bilimin gelişmesiyle birlikte geçmişte çözilemeyen karmaşıklıkların yeni çözümleri üretilmiştir. Gelişmenin bu sürecinde optimizasyon önemli bir rol oynamıştır.

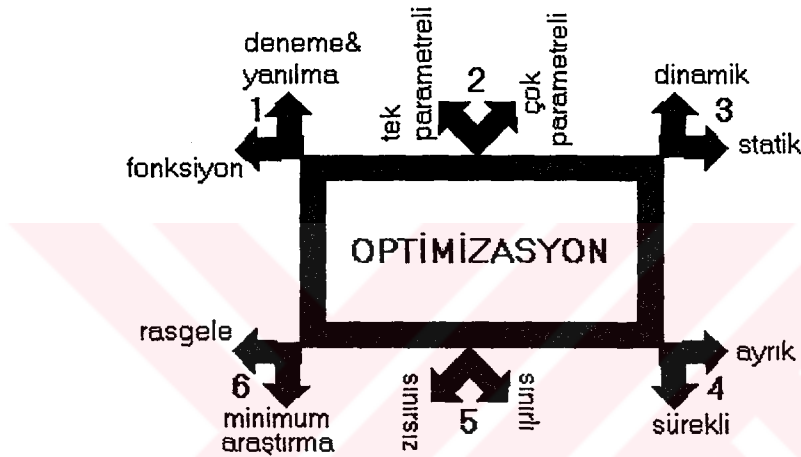
Çoğu optimizasyon metotları, kök veya sıfır araştırma işlemini kullanır. Matematiksel yaklaşımda, kök bulmak için fonksiyonun sıfır olduğu yerler araştırılırken, optimizasyon da türevin sıfır olduğu yerleri araştırmak gerekmektedir. Türev hesaplama her zaman kolay bir iş değildir. Teknik problemlerin bir çoğu, köklerini bulmak üzere formülize edilebilir. Fakat bir kısım optimizasyon yöntemleri bu kökleri bulmada yetersiz kalmaktadır

Optimizasyonda diğer bir zorluk; elde edilen bir sonucun, global veya lokal bir çözüm olup olmadığının belirlenmesidir. Örneğin; bulunan kökün optimal bir çözüm olduğunu anlamak zordur. Çünkü bütün kökler, fonksiyonu sıfır yapmaktadır.

Lineer olmayan bir fonksiyonun da minimumunu bulmak oldukça zordur. Bu tip problemler ya lineer bir yaklaşımla veya optimizasyon bölgesini küçük bir bölge ile sınırlamakla çözülür.

Optimizasyon algoritmaları Şekil 3.2’de gösterildiği gibi altı grupta ele alınabilir. Ancak kesin hatlarıyla altı gruba ayrıldığı söylenemez. Örneğin; dinamik optimizasyon problemi sınırlı veya sınırsız olabilir. Bazı parametreler ayrık veya sürekli olarak tanımlanabilir (Broyden 1965). Şekil 3.2’de verilen optimizasyon algoritmaları aşağıdaki gibi açıklanabilir.

- 1) *Deneme-yanılma optimizasyonu*; İşlem hakkında çok fazla bilgi olmaksızın çıkışı etkileyen parametrelerin ayarlanmasıdır. Örneğin TV 'de en iyi görüntü ve ses, deneme yanılma yoluyla ayarlanır. TV'deki görüntü ve sesin, antenin hangi eğiminde iyileşeceği anten uzmanları tarafından sadece tahmin edilir. Deneysel çalışma yapanlar ve çoğu büyük kaşifler bu yolu kullanmışlardır. Bunun aksine, matematiksel fonksiyonun optimizasyonunda, matematiksel formül ile süreç tanımlanır. Fonksiyonun optimum çözümünü bulmada değişik metotlar uygulanır. Bu yaklaşım teorisyenler tarafından tercih edilir.



Şekil 3.2 Optimizasyon algoritmalarının grupları

- 2) *Tek ve çok parametrelili optimizasyon*; Sadece bir parametre varsa, optimizasyon bir boyutludur. Birden fazla parametreye sahip fonksiyon için çok boyutlu optimizasyon gereklidir. Boyut sayısı artarsa, optimizasyonun zorluk derecesi de artar. Çok boyutlu optimizasyon metodunda, bir boyutlu optimizasyon metodu yaklaşımı kullanılır.
- 3) *Statik ve dinamik optimizasyon*; Statik optimizasyon zamandan bağımsızdır, dinamik optimizasyon ise zamana bağlı olarak çıkış üretir. Örneğin; bir şehrin kenar mahallesinde oturan bir insanın merkezdeki işine gitmesi için bir çok yol olduğunu kabul edilirse en iyi yolun hangisi olduğu sorgulanabilir. Mesafe açısından bakılacak olursa problem statiktir. Çözüm, haritayı ve arabanın kilometre/saat'i kullanılarak bulunabilir. Pratikte değişkenlerin çokluğu nedeniyle problem, pek de basit değildir. En kısa yol, en hızlı yol

değildir. En hızlı yolu bulmak dinamik bir problemdir ve zamana, havanın durumuna, kazalara vb. bağlıdır.

- 4) *Sürekli ve ayrık parametrelili optimizasyon*; Sürekli parametreler sonsuz değer alırken ayrık parametreler sınırlı değerler alır. Örneğin yapılacak işler bir liste halinde verilmiştir. Bu işlerin yapılması bir birinden bağımsız olduğundan ayrık parametrelili düşünülebilir. Ayrık parametrelili optimizasyon kombinasyonel bir optimizasyon olarak da adlandırılabilir. Bir çizgide $f(x)$ 'in minimum değerini bulmaya çalışmak, sürekli parametrelili optimizasyon olarak tanımlanır.
- 5) *Sınırlı ve sınırsız optimizasyon*; Sınırlı optimizasyon, parametreleri bir tanım aralığında değerlendirir. Sınırsız optimizasyonda ise parametreler her hangi bir değerde olabilir. Değişkenlerin sınırları kaldırılarak sınırlı parametreler sınırsız parametrelere çevrilirler. Çoğu nümerik optimizasyon rutinleri sınırsız parametrelerle çalışır. Örnek olarak $f(x)$ fonksiyonunu ele alalım ve sınırlar $-1 \leq x \leq 1$ arasında olsun. Bu fonksiyon $x = \sin(u)$ tanımı kullanılarak sınırsız optimizasyona dönüştürülür. Burada u 'nun değeri ne olursa olsun x , $(-1,1)$ aralığında değişecektir. Sınırlı optimizasyon, lineer denklemler ve lineer sınırlarla parametreleri optimize ettiği zaman, program lineer program olarak adlandırılır. Sınırlar ve maliyet denklemleri nonlinear ise, program da nonlinear programlama problemi olur.
- 6) *Rasgele ve minimum araştırma algoritmaları*: Bazı algoritmalar parametrelerin başlangıç değerlerini ayarlayarak uygunluk değerlerini minimize etmeye çalışır. Bu araştırma tekniği, hızlı olmakla beraber lokal minimumlara ulaşabilir. Bunlar nümerik metotlara dayanan klasik optimizasyon algoritmalarıdır. Bir parametreden hareketle diğer parametreyi tespit etmek, bazı deterministik adımlarla gerçekleştirilmektedir. Diğer taraftan rasgele metotlar; parametrelerin optimum çözümünü bulmada ihtimal hesaplarını kullanırlar. Bu metotlar yavaş olmakla birlikte global minimumu bulmada daha başarılıdır.

Yukarıdaki gruplandırmanın sonucunda optimizasyon metotları; Deterministik metotlar, İstatistiksel metotlar olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir (Haataja 1994). Deterministik optimizasyon metotları, lokal maksimum veya minimuma yakınsayan algoritmalarıdır. Türevsel hesaplamalar veya türevsel yaklaşımlar deterministik metotlara örnek verilebilir. Rasgele araştırma algoritmaları gibi istatistiksel metotlar ise global minimum veya maksimumu bulmada bazı stratejileri ve rasgele sayıları kullanırlar (Palko 1996). Son yıllarda PC'lerin hızlarındaki artış bu algoritmaların uygulama sahasında sıkça görülmesine neden olmuştur (Wurtz F. ve ark. 1997).

3.2 Genetik Algoritmalar

Genetik algoritma (GA)'nın terminolojisinin anlaşılması için “doğal seçim” in (seleksiyonun) anlaşılması gerekir. Dünyayı gözlemleyecek olursak, olup biten olaylarda doğal seçim göze çarpar. Birbirinden ayrı muazzam organizmalar ve bu organizmalardaki karmaşıklık, inceleme ve araştırma konusudur. Organizmaların niçin böyle olduğu ve nasıl bu aşamaya geldiği sorgulanabilir. Bir başka açıdan meseleye şöyle bakılabilir. Sanki bu günün dünyasında, çok büyük optimizasyon algoritmaları oluşturulmuş ve binlerce iterasyon sonunda yer yüzünde optimum çözüm elde edilmiştir. Amaç fonksiyonu, yaşam mücadelesini temsil eder. İnsanoğlu bunu maksimize etmek ister (Grant 1985). Adaptasyon ve uygunluğun seviyesi, dünyada uzun süre yaşayabilmenin göstergesi haline gelmiştir. Evrim süreci, hayat şartlarına en uygun olanın yaşamasını sağlayan büyük bir algoritmadır. Eğer çevreyi değiştirme zeka ve yeteneğine sahip olunursa hayatta, global maksimum elde edilebilir (Haupt 1998).

Gen, temel kalıtım birimidir. Organizmanın genleri; DNA (Deoxyribo Nucleic Acid) formunda bir çift kromozomdur. Organizmanın her bir hücresi benzer miktarda kromozomlar içerirler. Her bir vücut hücresindeki kromozom miktarı farklıdır. Örneğin; sivrisinek de 6, kurbağada 26, insanda 46 ve alabalıkta 94 adet kromozom vardır. Genler, her biri farklı karakteristiği temsil eden iki fonksiyonel formda meydana gelir. Bu formların her biri “allel” olarak bilinir (Curtis 1975). Örneğin allel değerine göre insanın gözünün biri mavi olurken diğeri kahverengi

olmaktadır. Kromozomlardaki allel'lerin kombinasyonları, fertlerin kişisel özellikleri belirler. Fert üzerinde allel'lerden biri baskın olurken diğeri pasif olmaktadır.

Genetik algoritmalar, biyolojik süreci modelleyerek fonksiyonları optimize eden evrim algoritmalarıdır. GA parametreleri, biyolojideki genleri temsil ederken, parametrelerin toplu kümesi de kromozomu oluşturmaktadır. GA'ların her bir ferdi kromozomlar (bireyler) şeklinde temsil edilen popülasyonlardan oluşur. Popülasyonun uygunluğu, belirli kurallar dahilinde maksimize veya minimize edilir. Her yeni nesil, rasgele bilgi değişimi ile oluşturulan diziler içinde hayatta kalanların birleştirilmesi ile elde edilmektedir (Angeline 1995).

Bu metot, uzun çalışmaların neticesinde ilk defa John Holland (1975) tarafından uygulanmaya başlandı. En son onun öğrencisi olan David Goldberg popüler oldu. David Goldberg tezinde; gaz boru hattının kontrolünü içeren bir problemin çözümünü genetik algoritma ile gerçekleştirdi (Goldberg,1989).

GA'ların avantajları;

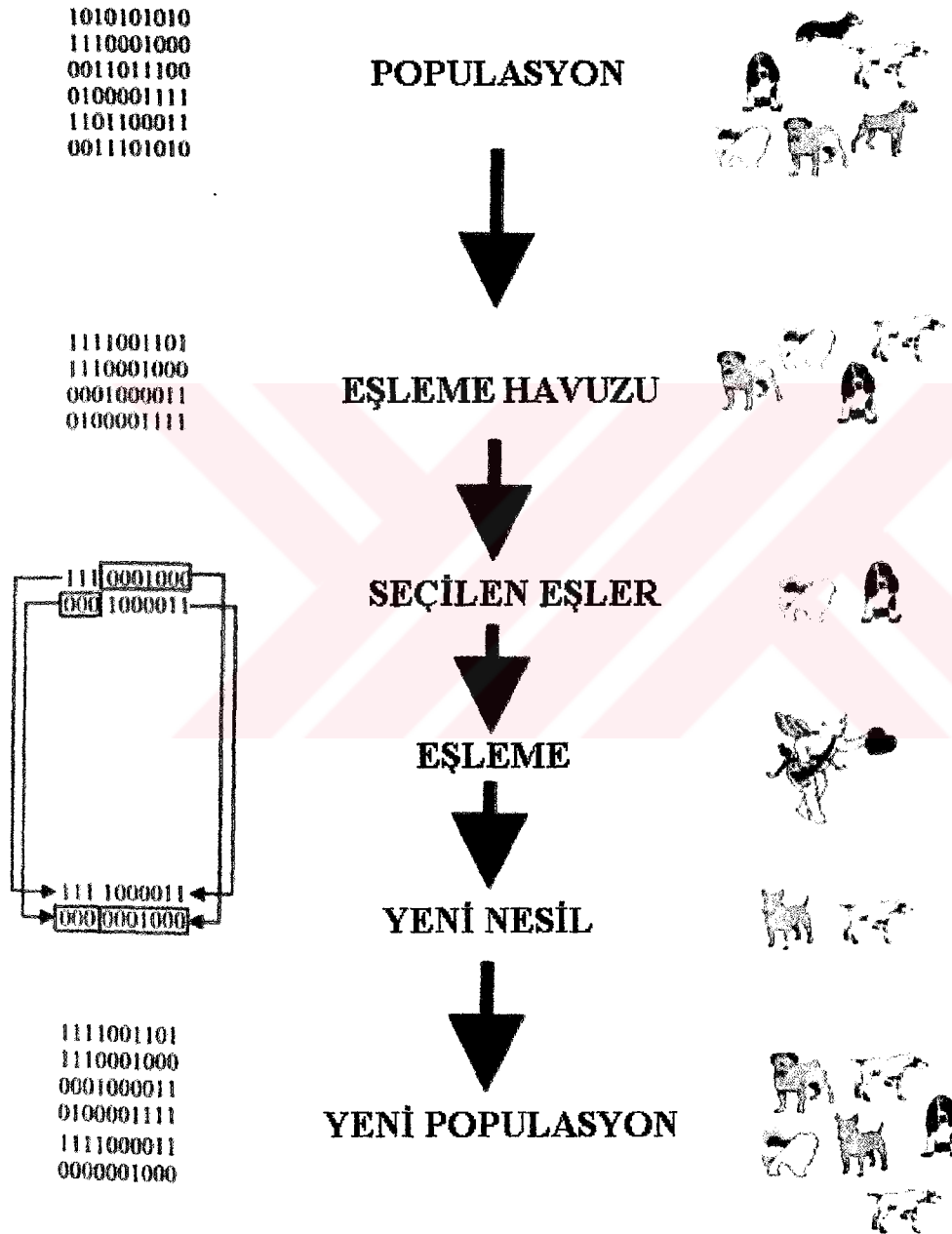
- Sürekli ve ayrık parametreleri optimize etmesi
- Türevsel bilgiler gerektirmemesi
- Amaç fonksiyonunu geniş bir spektrumda araştırması
- Çok sayıda parametrelerle çalışma imkanı olması
- Paralel PC 'ler kullanılarak çalıştırılabilmesi
- Karmaşık amaç fonksiyonu parametrelerini, lokal minimum veya maksimumlara takılmadan optimize edebilmesi
- Sadece tek çözüm değil, birden fazla parametrelerin optimum çözümlerini elde edebilmesi

olarak sıralanabilir.

Her problemin çözümü için GA kullanmak iyi bir yol değildir. Birkaç parametrelili analitik fonksiyonun çözümünde klasik metotlar daha hızlıdır. Böyle durumlarda, nümerik metotlar tercih edilmelidir. Paralel bilgisayarlar kullanılırsa GA daha hızlı sonuç verebilir. GA'lar çalışma mantığına göre, ikili kodlarla çalışan (ikili kodlu) GA ve gerçek kodlarla çalışan (gerçek kodlu) GA olmak üzere iki gruba ayrılır.

3.2.1 İkili kodlu genetik algoritmalar

Biyolojik evrim ile ikili kodlarla çalışan GA arasındaki benzerlik Şekil 3.3’de görülmektedir. Her ikisinde de popülasyonun üyeleri rasgele başlar. Köpeklerin her birinin karakteristik özellikleri, sol taraftaki satırlarda verilmiştir.

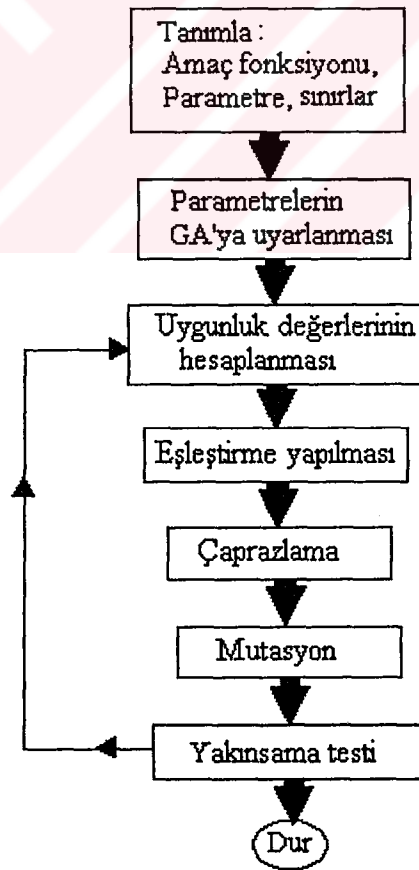


Şekil 3.3 İkili kodlu GA ile biyolojik evrim arasındaki benzetim (Haupt 1998)

En iyi havlayan köpekler üretilmek istenirse sadece birkaç köpeğin elde tutulması gerekir. Her bir köpek ikili sayı sistemiyle kodlanır. Yeni yavruların üretilmesi için bu popülasyonda rasgele iki adet köpek seçilir ve eşleştirilir. Eşleştirmenin sonucunda iyi havlayan köpeğin çıkma olasılığı yüksektir. Oluşan yeni nesil, eşleştirme havuzuna tekrar atılır. Başa dönülerek yeniden eşleştirme prosedürü tekrarlanır (Goldberg 1993). Bu işleme, en iyi havlayan köpek elde edilene kadar devam edilir.

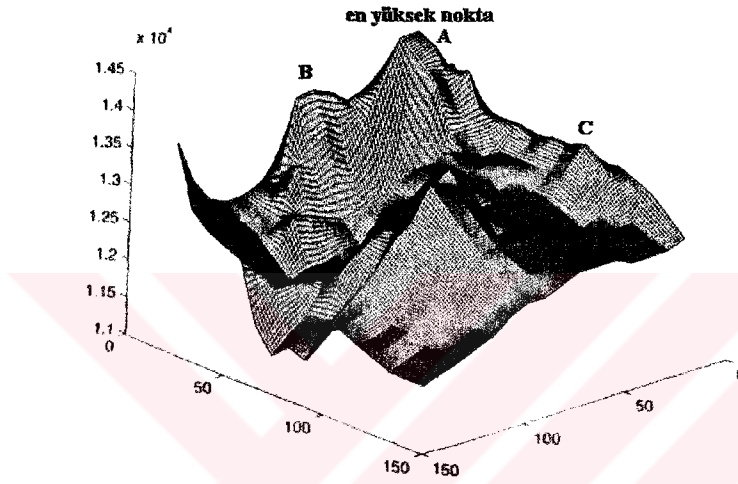
3.2.1.1 İkili kodlu genetik algoritmaların operatörleri

Diğer optimizasyon metotlarında olduğu gibi ikili kodlu GA'da da amaç fonksiyonu, parametreler ve sınırlar tanımlanır. Aynı şekilde yakınsama kontrol edilerek algoritma son bulur. İkili kodlu GA'nın akış diyagramı Şekil 3.4'de verilmektedir.



Şekil 3.4 İkili kodlu GA'nın akış diyagramı

GA ile topoğrafik haritadaki yükseltiler veya vadiler araştırılabilir. Optimizasyon algoritması vadiyi bulmak için, amaç fonksiyonunun minimum değerini ve en yüksek bölgeyi bulmak için amaç fonksiyonunun maksimum değerini arar. Şekil 3.5’de en yüksek tepe, deniz seviyesinden 14255 m yüksekliğinde olan A noktasıdır. B noktası 13281 m ve C noktası 11800 m yüksekliğindedir. A noktasına ulaşılıncaya kadar arada noktalar vardır. Bu yüzden klasik metotlarda en yüksek nokta olan A’yı bulmak zordur. GA ise bu noktayı rahatlıkla bulabilir.



Şekil 3.5 Dağın üç boyutlu görünümü (Haupt 1998)

3.2.1.2 Amaç fonksiyonu ve parametreler

Amaç fonksiyonu, giriş parametrelerine göre çıkış üreten bir fonksiyondur. Bu fonksiyon matematiksel veya deneysel olabilir. Burada amaç, giriş parametreleri için uygun değer bulununcaya kadar çıkış üretmektir. Örneğin banyo küveti doldurulurken farkında olmadan optimizasyon yapılır. Giriş parametreleri, sıcak ve soğuk su çeşmeleridir. Amaç fonksiyonu deneysel sonuçlardır. Çünkü el, suyun içine sokularak suyun sıcaklığı ayarlanır (Haupt 1998).

GA’ya, optimize edilecek parametre dizileri ve kromozomlar (bireyler) tanımlanarak başlanır. Kromozom, N_{par} adet parametreye sahip ise optimizasyon problemi N_{par} boyutlu olur. Parametreler $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{par}}$ ise;

Kromozom= $[P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{\text{par}}}]$ olarak tanımlanır.

Örneğin; topoğrafik bir haritayı ele alalım. Amaç fonksiyonu giriş parametreleri, enlem (x) ve boylam (y) kabul edilirse, kromozom= $[x,y]$ şeklinde tanımlanır. Burada $N_{\text{par}}=2$ ' dir. Her bir kromozom; P_1, P_2 parametrelerinin değerlerine göre hesaplanır.

$$F(\text{kromozom}) = F(P_1, P_2, \dots, P_{N_{\text{par}}})$$

Çoğu zaman amaç fonksiyonu oldukça karmaşıktır. Parametrelerin hangisinin önemli olduğuna karar verilmelidir. Parametreler çok fazla olursa GA, iyi sonuç vermeyecektir. Örneğin; arabalarda yakıt tasarrufu için önemli parametreler araba boyutları, motor boyutları ve malzeme ağırlıkları şeklinde belirlenebilir. Boya rengi veya koltuk tipi gibi diğer parametreler ya çok az etkili ya da hiç etkili değildir. Bazen parametrelerin seçimi ve değer tespiti, tecrübeyle veya deneme-yanılma yoluyla yapılır. Örneğin; $F(w, x, y, z) = 2x + 3y + z/100000 + \sqrt{w}/9876$ şeklinde analitik bir fonksiyonun parametrelerinin, 0-10 arasında değiştiğini kabul edelim. Amaç fonksiyonu içerisinde w ve z parametreleri yüksek değerlere bölündüğünden 0-10 arasında değişmesi, sonucu pek fazla etkilemeyecektir. Eğer w ve z parametreleri, ihmal edilirse, 4 boyutlu problem 2 boyutlu olarak modellenilebilir.

Optimizasyon problemlerinin çoğunda parametrelerin belirli sınırlar içerisinde kalması istenir. Örneğin; otomobilin ağırlığı sıfır olmayacak, boyu 10 m'yi geçmeyecek vb. sınırlamalar getirilebilir. Sınırsız parametreler ise herhangi bir değer alabilir. İki türlü sınır belirlenebilir. Birincisi; $0 \leq x \leq 10$ arasında değişen bir parametrede, eğer $x=11$ değerini alırsa $x=10$ yapılır ve $x= -1$ değerini alırsa $x=0$ yapılır. İkincisi; $x=5\sin y+5$ olarak tanımlanırsa, y'nin herhangi bir değerinde $0 \leq x \leq 10$ arası değişecektir. Böyle bir dönüştürmeyle sınırlı optimizasyon problemi sınırsız optimizasyon problemine çevrilmiş olur (Holland, J.H. 1992).

Bağımlı parametreler, optimizasyon algoritmaları için özel problemler meydana getirir. Çünkü bir parametrenin değişimi diğer parametreleri de etkileyecektir. Örneğin; arabanın boyunu artırmak, ağırlığını da artıracaktır. Fourier serisi katsayılarında olduğu gibi bağımsız parametreler birbirlerini etkilemezler. GA literatüründe parametre etkileşimi, "epistasis" olarak adlandırılır. Biyolojide

epistasis, genlerin birbirini etkilemesi olarak tanımlanır. Epistasis çok az olursa, minimum araştırma algoritmaları iyi sonuçlar üretir. GA'da Epistasis orta ve yüksek derecede olursa iyi sonuç vermektedir, çok yüksek veya çok düşük olursa iyi sonuç vermemektedir (Haupt 1998).

3.2.1.3 Parametrelerin tanımlanması

Optimizasyon için ikili kodlu GA'nın ideal bir özelliği, sınırlı parametre uzayıyla çalışmasıdır. GA, ikili kodlarla çalışır ancak, amaç fonksiyonu için gerçek parametre değerlerine ihtiyaç vardır. Amaç fonksiyonunun uygunluk değerinin hesaplanması için her iterasyonda kromozomun 10'luk sayı sistemine çevrilmesi gerekir. On bitlik genlerden oluşan bir kromozom örneği aşağıda verilmiştir.

$$\text{Kromozom} = [\underbrace{1111001001}_{\text{gen1}} \underbrace{0011011111}_{\text{gen2}} \dots \dots \dots \underbrace{0000101010}_{\text{genNpar}}]$$

Bu kromozomun bit sayısı, toplam $N_{\text{bit}} = N_{\text{gen}} \times N_{\text{par}}$ bit olarak bulunur. Şekil 3.5'de verilen topoğrafik harita, 128x128 değerlendirme noktasından oluşmaktadır. Eğer x ve y, iki gen olarak kodlanırsa her bir gen, "7" bittir ve x, y parametreleri, 2^7 'ye kadar değer alabilir. Bu değer aralıkları $(40^0.15') \leq y \leq (40^0.16')$ ve $(105^0.37'.30'') \geq x \geq (105^0.36')$ 'dir. Böylece kromozom aşağıdaki gibi ifade edilir (Haupt 1998).

$$\text{Kromozom} = [\underbrace{1100011}_x \underbrace{0011001}_y]$$

Genler, aşağıdaki denklem kullanılarak onluk sayı sistemine çevrilir. Buradaki ikili sayı, her bir gen için üretilen ikili sayıdır.

$$X_i = a_i + \text{decimal}(1001 \dots 001_2)(b_i - a_i) / (2^{m_i} - 1) \quad (3.1)$$

Burada;

a_i = Parametrelerin alt sınır değeri

b_i = Parametrelerin üst sınır değeri

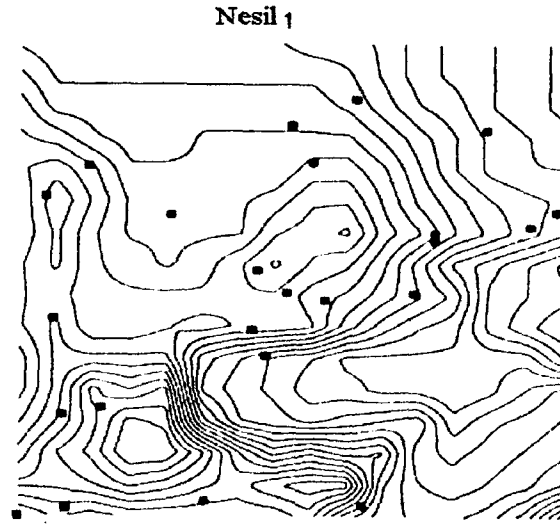
m_i = Gen'in bit sayısı'dır

3.2.1.4 Başlangıç popülasyonu

Kromozom, başlangıçta verilen popülasyon miktarına göre rasgele üretilir. Bu durumda $N_{ipop} \times N_{bit}$ adet bitlerle matris oluşturulur. N_{ipop} , başlangıç popülasyonunun toplam sayısıdır, N_{bit} 'de kromozomun bit sayısıdır. Matrisin her bir satırı, bir kromozomu temsil eder. Kromozomlar ise, enlem ve boylamları temsil eder. Rasgele üretilen popülasyondaki parametreler, amaç fonksiyonunda yerlerine konularak ve uygunluk değerleri hesaplanarak değerlendirilir. Yirmi dört adet kromozomun uygunluk değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Kromozomların yerleşimleri Şekil 3.6'da topoğrafik harita üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Başlangıç popülasyonunun sıralanışı (Haupt 1998)

Kromozomlar	Uygunluk değerleri
00000000000000	-13000
11111011010010	-11800
00010110000010	-13255
11000011001010	-12347
01111111101001	-12560
01000111010001	-12700
01010110000100	-13338
11101111001110	-11890
01111100111100	-12953
00100001011110	-12891
10001110111010	-12759
10111000111100	-12320
11011011101000	-11797
00100110011101	-13778
00010100011011	-13360
01110010101011	-12220
11000011001100	-12452
10011101110000	-12335
10100000000011	-12857
00001101010110	-13166
00010000110101	-13164
01101100110010	-12927
01101111000010	-13079
10001001011111	-12756



Şekil 3.6 Başlangıç popülasyonunun topoğrafik harita üzerinde dağılımı(Haupt 1998)

3.2.1.5 Doğal seçim

Başlangıç popülasyonu fazla ise bazı iteratif adımların uygulanması gerekir. Kromozom olarak en uygun olanı hayatta kalmalı diğerleri de yok olmalıdır. Doğal seçim, algoritmanın her bir iterasyonunda (jenerasyonunda) meydana gelir. Burada ne kadar kromozomun elde tutulacağına karar vermek biraz keyfidir. Kromozomlarda gelecek nesil içerisinde yer alma mücadelesi başlamaktadır. Popülasyon içerisinde bütün kromozomların seçilmesi gelecek nesle çok fazla katkısı olmamaktadır. GA'da değişik seçim metotları vardır.

- a) *Ağırlıklı seçim:* İlk olarak amaç fonksiyonunda, kromozomların uygunluk değerleri hesaplanır. Hesaplanan uygunluk değerleri en küçükten en büyüğe doğru sıraya konur. Çizelge 3.2 'de görüldüğü gibi $N_{pop} \leq N_{ipop}$ ise tutulur, geriye kalanlar atılır. Burada N_{pop} değeri N_{ipop} 'a kadar olabilir. Genelde popülasyonun %50'sinin seçilmesi ($N_{pop} = N_{ipop}/2$) uygun seçenektir. Seçilen N_{pop} 'un yarısı N_{iyi} , yarısı da $N_{kötü}$ olarak ayrılır. N_{iyi} olanlar eşleştirme havuzuna konurken $N_{kötü}$ olanlar eşleştirme havuzundan atılır. Toplam popülasyon sayısı $N_{ipop} = 24$ 'dür. GA'nın her bir iterasyonunda popülasyonun 12'si tutulur ve bu kromozomların altı tanesi eşleştirme havuzuna atılır. Doğal seçim sonuçları Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Bunlar amaç

fonksiyonunda hesaplanan uygunluk değerlerine göre sıralanmış olup ilk altı tanesi gelecek nesil için kopyalanacaktır.

- b) *Eşik değer seçim:* Eşik değerden küçük olan kromozomlar yaşamaya devam eder, eşik değeri aşan kromozomlar ölür. Bu tekniğin avantajı, popülasyonun sıralanmasına gerek olmamasıdır.
- c) *Rulet tekerleği seçim:* Rulet tekerleği seçim metodunun uygulanması için, ilk önce kromozomların toplam uygunluk değeri hesaplanır. Kromozomlar, toplam uygunluk değerine bölünerek her bir kromozom için 0-1 arasında değişen seçim ihtimalleri bulunur. Daha sonra, kümülatif ihtimaller hesaplanır. Popülasyon sayısı kadar “rasgele” 0-1 arasında sayılar üretilir. Üretilen rasgele sayı, birinci kromozomun kümülatif seçim ihtimalinden küçük ise, birinci kromozom seçilir. Eğer değilse, ikinci kromozomun veya diğerlerinin kümülatif ihtimalleriyle karşılaştırılarak hangisinden küçükse o kromozom seçilir. Böylece Rulet seçim metodu gerçekleştirilmiş olur.

Çizelge. 3.2 Kromozomların uygunluk değerlerine göre sıralanışı (Haupt 1998)

Kromozomlar		Uygunluk Değerleri
N _{pop}	N _{iyi}	00100110011101 -13778
		00010100011011 -13360
		01010110000100 -13338
		00010110000010 -13225
		00001101010110 -13166
		00010000110101 -13164
	N _{kötü}	01101111000010 -13079
		00000000000000 -13000
		01111100111100 -12953
		01101100110010 -12927
		00100001011110 -12891
		10100000000011 -12857
	N _{ipop}	10001110111010 -12759
		10001001011111 -12756
		01000111010001 -12700
		01111111101001 -12560
		11000011001100 -12452
		11000011001010 -12347
		10011101110000 -12335
		10111000111100 -12320
		01110010101011 -12220
		11101111001110 -11890
		11111011010010 -11800
		11011011101000 -11797

3.2.1.6 Eşleştirme

İki adet yeni nesil üretmek için N_{iyi} kromozomların bulunduğu eşleştirme havuzundan iki tane kromozom seçilir. Eşleştirme, seçilen kromozomlar arasında gerçekleştirilir. Eşleştirmenin değişik yöntemleri vardır.

- a. Yukarıdan aşağıya doğru eşleştirme: Listenin en üstünden başlanır ve eşleştirme için seçilen N_{iyi} kromozomların sayısına ulaşana kadar devam edilir. Böylece kromozom_{2i-1} ile kromozom_{2i} $i=1,2,3$ için eşleştirilir. Bu örnekte kromozom₁ ile kromozom₂, kromozom₃ ile kromozom₄ ve kromozom₅ ile kromozom₆ eşleştirildi. Bu metot, doğal bir yöntem olmamakla beraber yeni başlayanlar için kolay bir yoldur.
- b. Rasgele eşleştirme:. Kromozomların eşleştirilmesinde rasgele sayı üretici kullanılır. Kromozomlar 1'den başlayarak N_{iyi} 'ye kadar sıralanır. Birinci eşleştirmeyi bulmak için iki adet rasgele sayı üretilir.

$$\text{Kromozom} = \text{roundup}\{N_{iyi} \times \text{rasgele sayı}\}$$

Burada roundup fonksiyonu, sayıları en yüksek sayıya yuvarlar. Örneğin; rasgele olarak üretilen 6 sayı 0.1535, 0.6781, 0.0872, 0.1936, 0.7021 ve 0.3933 ise bu sayılar, 6 ile çarpılıp bir üst tamsayıya yuvarlanarak; 1, 5, 1, 2, 5, 3 değerleri elde edilir. Buna göre kromozom₁-kromozom₅, kromozom₁-kromozom₂ ve kromozom₅-kromozom₃ eşleştirilecektir.

- c. Ağırlıklı rasgele eşleştirme: Bu yöntem, eşleştirme havuzundaki kromozomların, amaç fonksiyonunda hesaplanan uygunluk değerlerine göre seçilme ihtimallerini dikkate alır. En düşük uygunluk değerine sahip kromozom, eşleştirme ihtimali en yüksek kromozom olurken en yüksek uygunluk değerine sahip kromozom eşleştirme ihtimali en düşük olarak düşünülür. Üretilen rasgele sayı, hangi kromozomun seçileceğini belirler. Bu yöntem kendi arasında ikiye ayrılır.

Sıra Ağırlık: Kromozomlar büyükten küçüğe doğru sıralanır ve denklem (3.2) kullanılarak kromozomların sıralamasındaki yerlerine göre P_n olasılıkları hesaplanır.

$$P_n = \frac{N_{iyi} - n + 1}{\sum_{n=1}^{N_{iyi}} n} = \frac{6 - n + 1}{1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6} = \frac{7 - n}{21} \quad (3.2)$$

Burada n , sıra sayısını göstermektedir. Bu yöntemle uygunluk değerlerinden bağımsız olarak, sadece sıralamayı dikkate alan P_n normalize değerleri elde edilmektedir. Bu metot uygulanarak alınan sonuç Çizelge 3.3 'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Eşleştirme olasılıkları (Haupt 1998)

n	Kromozom	Pn	$\sum_{i=1}^n P_i$
1	00100110011101	0.2857	0.2857
2	00010100011011	0.2381	0.5238
3	01010110000100	0.1905	0.7143
4	00010110000010	0.1429	0.8572
5	00001101010110	0.0952	0.9524
6	00010000110101	0.0476	1.0000

Kromozomların seçilmesinde kümülatif ihtimaller kullanılır. Rasgele olarak 0-1 arasında bir sayı üretilir. Bu sayı, kümülatif ihtimallerin en başından başlanarak sırayla karşılaştırılır. Kümülatif ihtimal değeri, üretilen rasgele sayıdan büyükse, eşleştirme havuzu için kromozom seçilir. Benzer tarzda 6 tane rasgele sayı üretilerek eşleştirme gerçekleştirilir. Üretilen rasgele sayılar 0.1535, 0.6781, 0.0872, 0.1936, 0.7021 ve 0.3933'dir. Bu sayılara göre kromozom₁-kromozom₃, kromozom₁-kromozom₁ ve kromozom₃-kromozom₂ eşleştirilirler. Kromozomlar kendisi ile eşleştirilirse, bu kromozomun gelecek nesilde daha etkin olarak yer aldığı söylenebilir. Bu yaklaşım tarzı doğaya daha uygundur.

Değer ağırlık: Kromozomların uygunluk değerleri amaç fonksiyonundan hesaplanır. Eşleştirme havuzunda N_{iyi+1} 'inci sırada bulunan kromozomun amaç fonksiyonunda hesaplanan uygunluk değeri, bütün eşleştirme havuzundaki kromozomlardan çıkartılır. N_{iyi+1} 'inci, sıradaki kromozomun uygunluk değeri -13079 'dur. Eşleştirme havuzundaki her bir

kromozomun normalize uygunluk değerleri ve seçilme ihtimalleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_n = f(\text{kromozom}_n) - f(\text{kromozom}_{N_{iyi}+1}) \quad (3.3)$$

$$P_n = \frac{C_n}{\sum_{p=1}^{N_{iyi}} C_p} \quad (3.4)$$

Buna göre Çizelge 3.4’de üstteki kromozomların daha ağırlıklı olarak sıralamada yer aldığı görülmektedir. Daha önce üretilen rasgele sayılar kullanılırsa kromozom₁-kromozom₃, kromozom₁-kromozom₁ ve kromozom₃-kromozom₁ eşleştiği görülür.

Çizelge 3.4 Eşleştirme havuzunda kromozomların sıralanışı (Haupt 1998)

n	Kromozom	C _n	P _n	$\sum_{i=1}^n P_i$
1	00100110011101	-13778+13079= -699	0.4401	0.4401
2	00010100011011	-13360+13079= -281	0.1772	0.6174
3	01010110000100	-13338+13079= -259	0.1632	0.7805
4	00010110000010	-13255+13079= -176	0.1109	0.8915
5	00001101010110	-13166+13079= -87	0.0547	0.9461
6	00010000110101	-13164+13079= -85	0.0539	1.0000

3.2.1.7 Çaprazlama

İki adet yeni nesil elde etmek için kromozomların bulunduğu eşleme havuzundan iki adet kromozom seçilir. Eşleme sürecinde, seçilen kromozomlardan bir ve birden fazla yeni nesil oluşturma olayına “çaprazlama” denir. En yaygın olarak kullanılan iki kromozomdan iki tane yeni nesil elde edilmesidir. Öncelikle kromozomun ilk biti ile son biti arasında çaprazlama noktası rasgele seçilir. Birinci kromozomun çaprazlama noktasının solundaki bitlerin hepsi ikinci kromozoma geçerken, benzer tarzda ikinci kromozomun çaprazlama noktasının solundaki bitler de birinci kromozoma geçerler. Sonuçta meydana gelen yeni kromozomlar, her iki

kromozomun karakterlerini içermektedirler. Çaprazlama oranı, bir popülasyonda ne kadar kromozomun çaprazlamaya tabi tutulacağını belirler.

$$\begin{array}{lcl}
 \text{Kromozom}_1 = \overbrace{00100110011}^{\text{yer deg i sec ek}} 101 & & \text{Nesil}_1 = 01010110000101 \\
 \downarrow \uparrow & & \text{Nesil}_2 = 00100110011100 \\
 \text{Kromozom}_2 = \overbrace{01010110000}^{\text{yer deg i sec ek}} 100 & &
 \end{array}$$

Sonuçta meydana gelen nesiller her iki kromozomun karakterlerini içermektedirler. Bu durum Çizelge 3.5 'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 Eşleştirmesi yapılan kromozom çiftleri (Haupt 1998)

İşlem Sırası	6xrasgele(2-1)	Kromozom
1	2-1	1
2	5-5	5
3	6-3	3
4	4-5	4
5	1-1	1
6	4-5	4

3.2.1.8 Mutasyon

GA operatörlerinin ikincisi olan mutasyon, kromozomdaki bitlerin küçük bir yüzdesini değiştirir. Mutasyon ile kromozomdaki bitler “1” ise “0”, “0” ise “1” yapılır. $N_{pop} \times N_{bit}$ ’lik bir popülasyon matrisinde, mutasyon noktaları rasgele seçilir. Mutasyonun % değeri artırılırsa, algoritma daha geniş parametre uzayını tarama yapar. Son iterasyonda mutasyon meydana gelmez. Verilen örneğe, en iyi kromozom hariç tutularak %5’lik mutasyon değeri uygulanırsa, rasgele sayı üretici 7 adet kromozom için, satır ve sütunlara karşılık gelecek tam sayılar üretir. Böylece üretilen tamsayılara göre dördüncü satır ve on birinci sütundaki (4-11) bit “0” iken “1” yapılır.

$$00010110000010 \rightarrow 00010110001010$$

(5-3), (2-2), (2-1), (5-14), (8-10) ve (5-8) satır ve sütun numaralarına göre altı kez meydana gelir. Çoğu mutasyonlar, kromozomların uygunluk değerini artırarak daha iyi sonuç elde edilmesine yardımcı olur.

3.2.1.9 Gelecek nesil

İterasyon sonucunda, çaprazlamaya ve mutasyona uğramış kromozomların uygunluk değerleri hesaplanarak Çizelge 3.6'da verilen yeni nesil elde edilir. İtalik yazılan bitler, mutasyona uğrayanlardır. Çizelge 3.7'de görüldüğü gibi bir sonraki adımda kromozomlar uygunluk değerlerine göre yeniden sıralanır ve eşleştirme havuzuna konur. Başlangıç popülasyonun ortalama değeri, -12738 iken birinci nesilden sonra bu değer, -13334'e ulaşmıştır. Çizelge 3.7'deki kromozomların topoğrafik harita üzerinde yerleşimi Şekil 3.7'de verilmiştir.

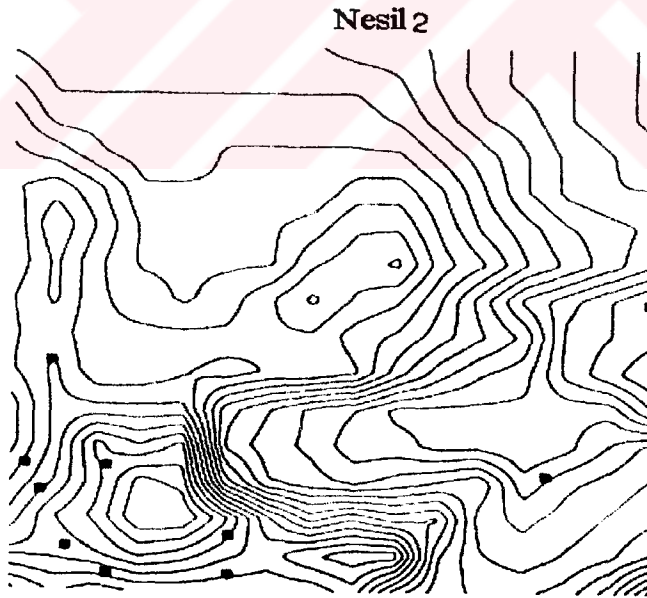
Eşleştirme havuzunda kromozomların sadece altı tanesi tutulmaktadır. Tekrar çaprazlama, mutasyon ve sıralamadan sonra elde edilen üçüncü nesil Çizelge 3.8'de gösterilmektedir. Üçüncü neslin sonunda popülasyon genel ortalaması -13403 olmaktadır. Dördüncü neslin sonunda ise -13676 ve yerleşimi Şekil 3.8' de görülmektedir.

Çizelge 3.6 Çaprazlamaya ve mutasyona uğramış yeni nesil (Haupt 1998)

Kromozomlar	Uygunluk değerleri
00100110011101	-13778
<i>11</i> 010100011011	-11956
01010110000100	-13338
0001011000 <i>1</i> 010	-13553
00001100 <i>0</i> 1011 <i>1</i>	-13289
00010000110101	-13164
00100110000100	-13372
0101011000 <i>0</i> 1101	-13632
00000110011101	-13036
00100110011101	-13778
00100110011101	-13778
01010110000100	-13338

Çizelge 3.7 İkinci nesilden sonra sıralama (Haupt 1998)

Kromozomlar	Uygunluk değerleri
00100110011101	-13778
00100110011101	-13778
00100110011101	-13778
01010110001101	-13632
00010110001010	-13552
00100110000100	-13372
01010110000100	-13338
01010110000100	-13338
00000110011101	-13036
00001100010111	-13289
00010000110101	-13164
11010100011011	-11956

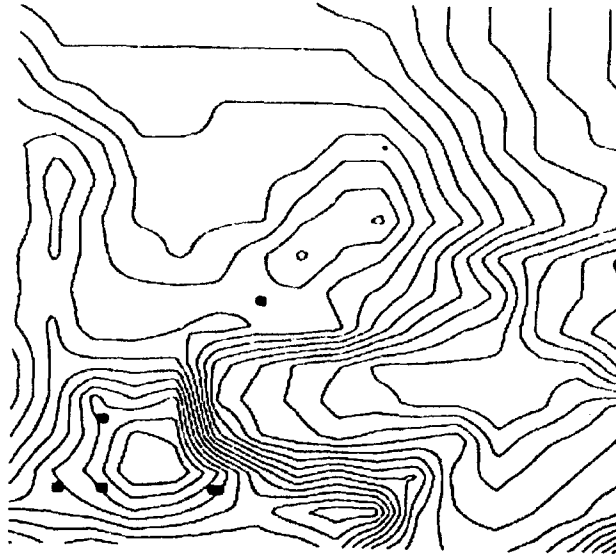


Şekil 3.7 İkinci neslin topoğrafik harita üzerinde dağılımı (Haupt 1998)

Çizelge 3.8 Üçüncü nesilden sonra sıralama (Haupt 1998)

Kromozomlar	Uygunluk Değerleri
00100110011101	-13778
00100110011101	-13778
00100110011101	-13778
00100110011101	-13778
00100110011101	-13778
01010110001101	-13632
00010110001100	-13584
00010110001010	-13553
01010110001010	-13539
00100111010100	-13921
01101111011101	-13602
01100110011101	-13255

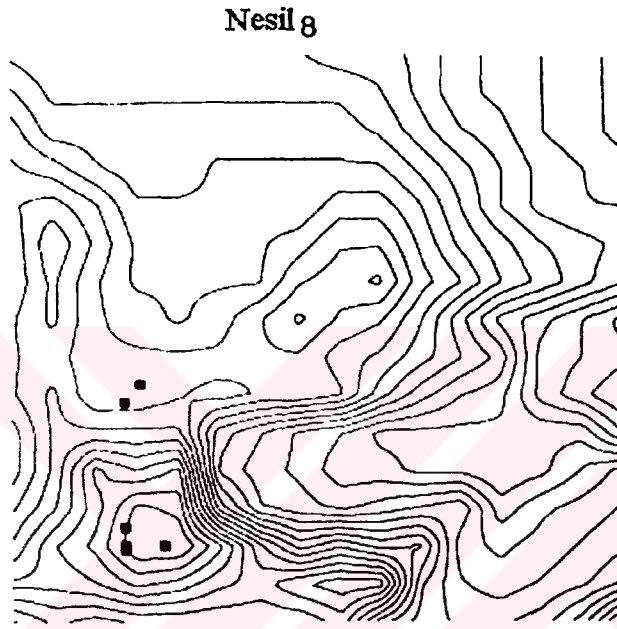
Nesil 4



Şekil 3.8 Dördüncü neslin topoğrafik harita üzerinde dağılımı (Haupt 1998)

3.2.1.10 Yakınsama

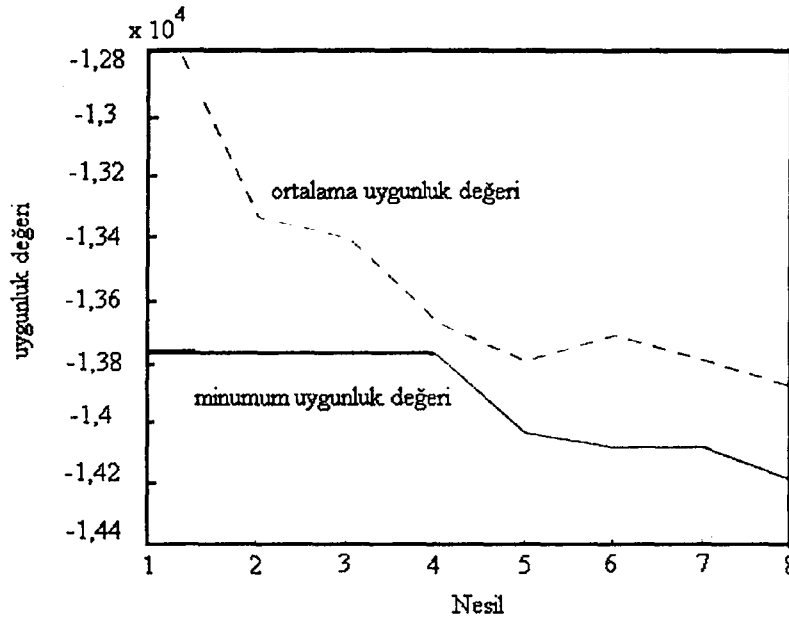
İterasyon sayısına veya uygun bir çözüme ulaşıncaya kadar işleme devam edilir. Bütün kromozomların uygunluk değerleri değişmiyorsa algoritma durdurulmalıdır. Çoğu GA'lar genel ortalama, standart sapma ve minimum uygunluk değeri gibi istatistikleri tutarlar. Bu istatistikler, yakınsama testi için bir ölçü olabilir.



Şekil 3.9 Sekizinci neslin topoğrafik harita üzerinde dağılımı (Haupt 1998)

Son popülasyondaki kromozomların yerleşimi Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Sekizinci neslin sonunda topoğrafik harita üzerinde iki minimum noktası etrafında yoğunlaşma görülmektedir. Örnekte dokuzuncu iterasyonun sonunda global minimum -14199 olarak elde edilmiştir.

Algoritmanın minimuma yakınsaması ve her bir neslin genel ortalaması Şekil 3.10'da verilmektedir. Popülasyonun ortalama uygunluk değeri, algoritmanın yakınsaması hakkında bilgi vermesi bakımından önemli bir kriterdir. Örneğin maksimizasyon probleminde, farklı iki seçim metodu karşılaştırılıyor ise ortalama uygunluk değeri yüksek olan seçim metodu daha iyi sonuç vermektedir denilebilir.

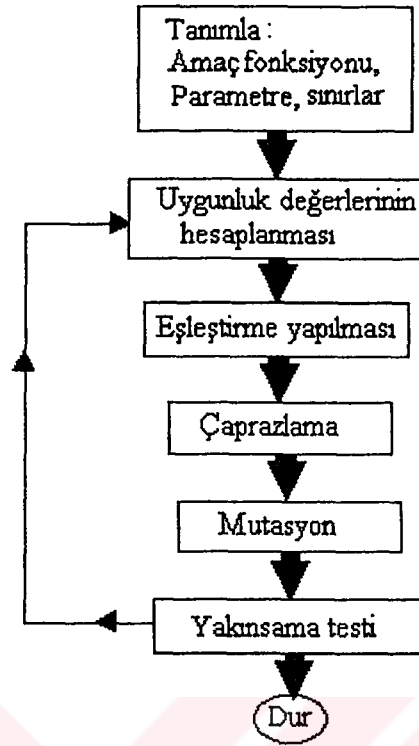


Şekil 3.10 İlk sekiz neslin ortalama ve minimum uygunluk değerleri (Haupt 1998)

3.2.2 Gerçek kodlu genetik algoritma

Problemlerin çözümünde rakamların hassasiyeti önemli bir yer tutmaktadır. İkili kodlu GA'da, parametrelerin "1" ve "0" larla ifade edilmesi, kromozomların boyutlarını oldukça artırdığından sınırlı hassasiyete sahiptir. Bunun yerine gerçek rakamlarla kodlama yapabilen, gerçek kodlu GA'yı kullanmak avantajlıdır. Gerçek kodlu GA, hem daha hassas hem de PC belleğinde daha az yer kaplamaktadır. Çunkaş ve Akkaya (2002), değişik test fonksiyonları kullanarak ikili kodlu GA ve gerçek kodlu GA'nın temel farklılıklarını irdelemişler. Gerçek kodlu GA 'ların ikili kodlu GA 'ya göre hızlı çalıştığını ve global optimumu daha kısa sürede bulduğunu göstermişlerdir.

Gerçek kodlu GA bazı literatürlerde "Sürekli Parametrelili GA" olarak da bilinmektedir. Bu çalışmada "Gerçek Kodlu GA" tanımlaması kullanılmıştır. Gerçek kodlu GA, ikili kodlu GA 'ya çok benzemektedir. Aralarındaki en önemli farklılık parametrelerin "1" ve "0" 'lar yerine gerçek rakamlarla ifade edilmesidir. Gerçek kodlu GA'nın akış diyagramı Şekil 3.11 'de verilmiştir.



Şekil 3.11 Gerçek kodlu GA'nın akış diyagramı

3.2.2.1 Amaç fonksiyonu ve parametreler

Optimizasyonda amaç, parametrelerin en uygun değerlerini bulmaktır. Optimize edilecek parametre değerleri, bir dizi haline getirilip kromozom şekline sokularak GA ile çözülür. N_{par} parametreye sahip bir kromozom $1 \times N_{\text{par}}$ boyutlu matris biçiminde yazılır.

$$\text{Kromozom} = [P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{\text{par}}}]$$

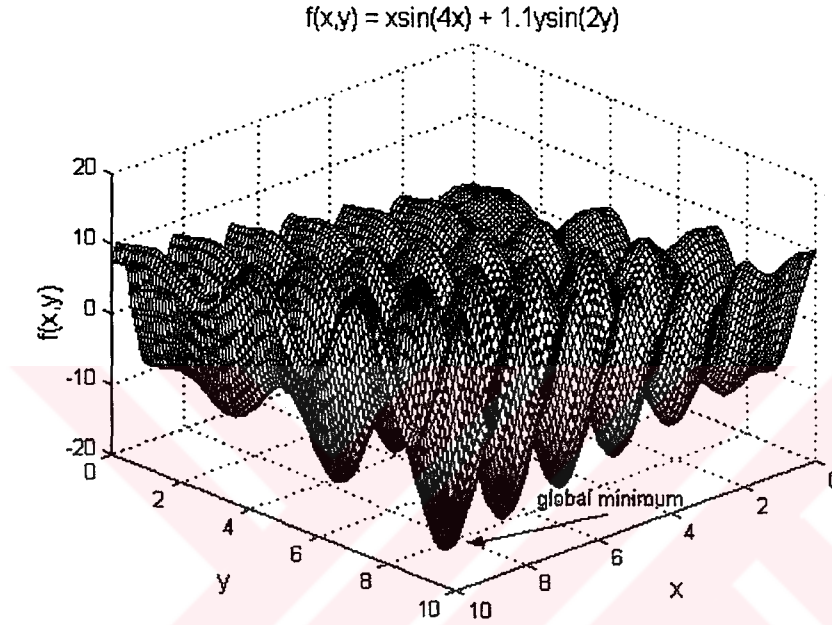
Gerçek kodlu GA'da parametrelerin hepsi “ondalık” rakamlarla ifade edilir ve her bir kromozomun bir uygunluk değeri (C) vardır.

$$C = f(\text{kromozom}) = f(P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{\text{par}}})$$

Örneğin; amaç fonksiyonu

$$C = f(x, y) = x \sin(4x) + 1,1 y \sin(2y)$$

ve parametre sınırları $0 \leq x \leq 10$, $0 \leq y \leq 10$ olarak tanımlanırsa Kromozom= $[x,y]$ şeklinde ifade edilebilir. Buradaki problem iki parametrelili bir optimizasyon problemi olup Şekil 3.12’de grafik olarak gösterilmiştir. Bu problem, Bölüm 3.2.1.2’deki örneğe göre daha zor bir optimizasyon problemidir ve klasik metotlarla bu fonksiyonun global minimumunu bulmak zordur. GA kullanılırsa global minimumu bulmak kolaylaşır.



Şekil 3.12 $f(x, y) = x \sin(4x) + 1.1 y \sin(2y)$ ’nin üç boyutlu görünümü

3.2.2.2 Başlangıç popülasyonu

GA’nın çalışmaya başlayabilmesi için, N_{ipop} kromozomdan oluşan başlangıç popülasyonuna ihtiyaç vardır. Popülasyonun kromozomları $N_{par} \times N_{ipop}$ ’luk bir matris ile temsil edilir. Kromozomlar denklem (3.5) kullanılarak rasgele üretilir.

$$IPOP = (P_H - P_L) \times \text{rasgele}\{N_{ipop}, N_{par}\} + P_L \quad (3.5)$$

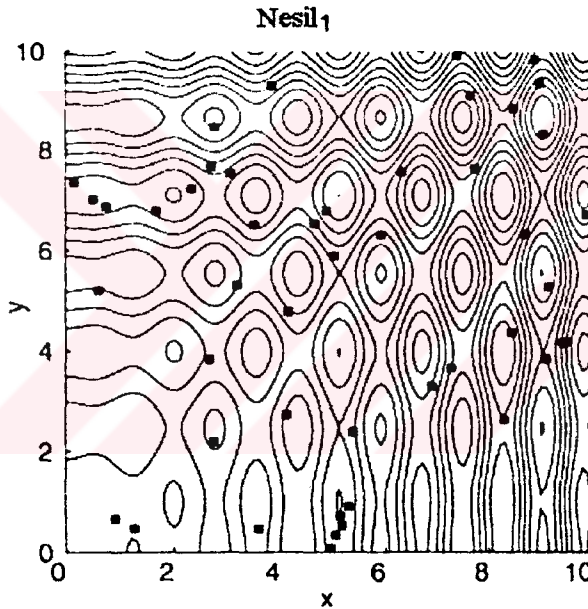
Burada;

$P_H \rightarrow$ Parametrenin üst sınır değeri

$P_L \rightarrow$ Parametrenin alt sınır değeri

$\text{rasgele}\{N_{ipop}, N_{par}\} \rightarrow N_{ipop} \times N_{par}$ olacak şekilde matris formunda 0-1 arasında üretilen rasgele sayıdır.

Bu tanımlamalar her parametre için kullanılabilir. Parametrelerin bu şekilde değerleri belirlendikten sonra amaç fonksiyonunda yerlerine konularak fertlerin uygunluk değerleri hesaplanır. Denklem (3.4)'de görüldüğü gibi x ve y den oluşan iki tane parametre vardır. Sınır değerleri $P_L = 0$ ve $P_H = 10$ dur. Amaç fonksiyonu biraz karmaşık olduğundan, başlangıç popülasyonunun yüksek tutulması iyi sonuç vermektedir. Başlangıç popülasyon sayısı $N_{ipop}=48$ seçilir ve bu durumda popülasyon matrisi 48×2 'dir. Başlangıç popülasyonun büyüklüğü araştırma uzayının daha geniş seçilmesini sağlar. Başlangıç popülasyonunun amaç fonksiyonunda hesaplanan uygunluk değerlerinin topoğrafik harita üzerinde dağılımı Şekil 3.13 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Birinci neslin topoğrafik harita üzerinde dağılımı (Haupt 1998)

3.2.2.3 Doğal seçim

Gelecek nesilde, hangi kromozomun yer alacağını belirlemek gerekir. İkili kodlu GA'da yapıldığı gibi kromozomlar, büyükten küçüğe doğru sıralanır. Gerçek kodlu GA'da gelecek iterasyonda kullanılmak üzere N_{pop} kadar kromozom tutulur ve geri kalanı dikkate alınmaz. Doğal seçim, en iyi kromozom uygunluk değeri bulununcaya kadar devam etmelidir. N_{pop} kromozomları, kendi aralarında N_{iyi} ve $N_{kötü}$ olarak büyükten küçüğe doğru sıralamaya tabi tutulur. N_{iyi} , eşleştirme havuzuna

atılırken, $N_{kötü}$ hariçte tutulur. Örnekte 48 adet kromozomun ortalama uygunluk değeri 0.9039 ve en iyi kromozomun uygunluk değeri -16.26'dır. Alt sıradan başlanarak 24 tanesi atılırsa, geri kalan kromozomların ortalama uygunluk değeri -4.27 olmaktadır. Çizelge 3.10'da gösterildiği gibi her bir iterasyonda $N_{pop}=24$ kromozom kullanılır ve bunun 12 tanesi N_{iyi} , 12 tanesi $N_{kötü}$ olarak tanımlanır.

Çizelge 3.10 Yirmidört adet kromozomun sıralanması (Haupt 1998)

No	x	y	Uygunluk Değerleri
1	9.0465	8.3097	-16.2555
2	9.1382	5.2693	-13.5290
3	7.6151	9.1032	-12.2231
4	2.7708	8.4617	-11.4863
5	8.9766	9.3469	-10.3505
6	5.9111	6.3163	-5.4305
7	4.1208	2.7271	-5.0958
8	2.7491	2.1896	-5.0251
9	3.1903	5.2970	-4.7452
10	9.0921	3.8350	-4.6841
11	0.6056	5.1942	-4.2932
12	4.1539	4.7773	-3.9545
13	8.4598	8.8471	-3.3370
14	7.2541	3.6534	-1.4709
15	3.8414	9.3044	-1.1517
16	8.6825	6.3264	-0.8886
17	1.2537	0.4746	-0.7724
18	7.7020	7.6220	-0.6458
19	5.3730	2.3777	-0.0419
20	5.0071	5.8898	0.0394
21	0.9073	0.6684	0.2900
22	8.8857	9.8255	0.3581
23	2.6932	7.6649	0.4857
24	2.6614	3.8342	1.6448

3.2.2.4 Eşleştirme

Kromozomların eşleştirilmesinde ikili kodlu GA'da tanımlanan Ağırlıklı eşleştirme metodu kullanılmış ve uygunluk değerlerine göre kromozomların seçilme ihtimalleri Çizelge 3.11'de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi eşleştirme

çoğunlukla yukarıdan aşağıya doğru yapılmaktadır. Çünkü sıralamanın altındaki kromozomların uygunluk değerleri küçüktür. Rasgele üretilen 6 tane sayı aşağıya sıralanmıştır. (0.4679,0.5344), (0.2872,0.4985), (0.1783,0.9554), (0.1537,0.7483), (0.5717,0.5546), (0.8024,0.8907). Üretilen bu sayılar kullanılarak eşleştirme aşağıdaki gibi gerçekleştirilir.

Anne=[3, 2, 1, 1, 4, 5]

Baba=[3, 3, 10, 5, 3, 7]

Çizelge.3.11 Kromozomların uygunluk değerlerine göre seçilme ihtimalleri

n	Pn	$\sum_{i=1}^n P_i$
1	0.2265	0.2265
2	0.1787	0.4052
3	0.1558	0.5611
4	0.1429	0.7040
5	0.1230	0.8269
6	0.0367	0.8637
7	0.0308	0.8945
8	0.0296	0.9241
9	0.0247	0.9488
10	0.0236	0.9724
11	0.0168	0.9892
12	0.0108	1.0000

3.2.2.5 Çaprazlama

Çaprazlama için çok farklı yaklaşımlar vardır. Adewuya (1996) ve Michalewicz (1994) tarafından ilginç metotlar ortaya konulmuştur. Kromozomun bir veya birden fazla yerinden bölünerek işaretleme yapılması ve işaretlenen yerlere göre kromozomun karşılıklı genlerinin yerlerinin değiştirilmesi “tek düzen metot” olarak adlandırılır. Aşağıdaki iki adet kromozom ele alınırsa;

$$\text{Kromozom}_1 = [P_{a1}, P_{a2}, P_{a3}, P_{a4}, P_{a5}, P_{a6}, \dots, P_{a_{N_{\text{par}}}}]$$

$$\text{Kromozom}_2 = [P_{b1}, P_{b2}, P_{b3}, P_{b4}, P_{b5}, P_{b6}, \dots, P_{b_{N_{\text{par}}}}]$$

Çaprazlama noktaları rasgele seçilir ve parametrelerin genleri karşılıklı değiştirilir.

$$\text{Nesil}_1 = [P_{a1}, P_{a2}, P_{b3}, P_{b4}, P_{a5}, P_{a6}, \dots, P_{a_{N_{\text{par}}}}]$$

$$\text{Nesil}_2 = [P_{b1}, P_{b2}, P_{a3}, P_{a4}, P_{b5}, P_{b6}, \dots, P_{b_{N_{\text{par}}}}]$$

Burada parametrelerin değerleri değişmemektedir ve parametreler sadece gelecek nesil içerisinde farklı yerlerde yer almaktadır. Bu işlem, ikili kodlu GA için iyi bir yöntem kabul edilmesine rağmen gerçek kodlu GA için iyi sonuç vermez.

Karışırma metotları, gerçek kodlu GA için daha iyi sonuç vermektedir. Burada iki parametrenin değerleri karışırılır ve aşağıdaki formül kullanılarak yeni nesil elde edilir (Radcliff 1991).

$$P_{\text{yeni}} = \beta P_{\text{an}} + (1 - \beta) P_{\text{bn}} \quad (3.6)$$

$\beta = 0$ ve 1 arasında üretilen rasgele sayı

P_{an} = Anne kromozomun n. parametresi

P_{bn} = Baba kromozomun n. parametresi

İkinci nesil, β yerine $1 - \beta$ konularak ve birinci neslin tümleyeni alınarak bulunur. $\beta = 1$ ise, P_{an} baskın gelir ve P_{bn} ölür. $\beta = 0$ ise P_{bn} baskın gelir ve P_{an} ölür. $\beta = 0.5$ olduğu zaman (Davis, 1991), sonuç iki parametrenin ortalaması olarak ortaya çıkar. Bu metodun iyi işlediği Michalewicz (1994) tarafından gösterilmiştir. Karışırma işlemi için hangi parametrenin seçileceği belirlenmelidir. Bazen aprazlama noktalarının solundan veya sağından başlanarak bütün parametreler için lineer bir kombinasyon işlemi yapılır. Çaprazlama noktası rasgele seçilebilir. Parametreler, farklı β değerleri kullanılarak karışırılabilir. Parametrelerin sınır aralıkları kullanılırsa, iki kromozomun bilgileri etkili olarak karışırılır. Gerçek kodlu GA karışırma metotlarının en basiti, “lineer çaprazlama metodu” dur (Wright, 1991). Bu metotla iki kromozomdan üç tane nesil üretilir.

$$P_{\text{yeni1}} = 0.5 P_{\text{an}} + 0.5 P_{\text{bn}} \quad (3.7)$$

$$P_{\text{yeni2}} = 1.5 P_{\text{an}} - 0.5 P_{\text{bn}} \quad (3.8)$$

$$P_{\text{yeni3}} = -0.5 P_{\text{an}} + 1.5 P_{\text{bn}} \quad (3.9)$$

Parametre sınırları dışında kalan herhangi bir nesil dikkate alınmaz. Sonraki popülasyonda kromozomun hayatını diğer iki nesil devam ettirir. Dikkat edilecek olursa β pek fazla değişmemektedir.

Diğer bir çaprazlama metodu olan “Heuristic çaprazlama” da ise β , 0-1 arasında değer almaktadır ve yeni nesil aşağıdaki formüle göre elde edilir (Michalewicz 1994).

$$P_{\text{yeni}} = \beta(P_{\text{an}} - P_{\text{bn}}) + P_{\text{an}} \quad (3.10)$$

Her parametre için farklı β değeri üretilerek yeni nesiller elde edilir. Denklem (3.10) göre, izin verilen bazı değerlerin dışında üretilen yeni nesiller ihmal edilir. Algoritma, yeni β değeri üreterek işleme devam eder.

“Karma çaprazlama metodu” (blend crossover, BLX- α) bazı parametrelerin α değerlerini belirleyerek işleme başlar (Eshelman ve Shafter 1993). α değeri, parametrelerin dış sınırlarını belirler ve bu sınırlara göre yeni nesiller üretilir.

“Kuatratik çaprazlama” gibi metotlar amaç fonksiyonu için sayısal uygunluk gerçekleştirmeye çalışırlar. Sayısal uygunluğun gerçekleştirilebilmesi için üç adet kromozoma ihtiyaç duyulmaktadır (Adewuya 1996).

Heuristik çaprazlama metoduyla extrapolasyon metodunun kombinasyonundan oluşan metot, en çok kullanılanıdır (Haupt 1998). Bu metotla, ikili kodlu GA’daki çaprazlamaya daha çok yaklaşılmaktadır. Burada ilk olarak çaprazlama noktası rasgele seçilir.

$$\alpha = \text{roundup}\{\text{rasgele} \times N_{\text{par}}\} \quad (3.11)$$

$$\text{Kromozom}_1 = [P_{a1}, P_{a2}, \dots, P_{a\alpha}, \dots, P_{aN_{\text{par}}}]$$

$$\text{Kromozom}_2 = [P_{b1}, P_{b2}, \dots, P_{b\alpha}, \dots, P_{bN_{\text{par}}}]$$

Burada m ve n indisleri anne ve baba kromozomlarını tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu metotta, denklem (3.12) ve denklem (3.13) kullanılarak yeni nesiller elde edilir.

$$P_{\text{yeni1}} = P_{a\alpha} - \beta[P_{a\alpha} - P_{b\alpha}] \quad (3.12)$$

$$P_{\text{yeni2}} = P_{b\alpha} - \beta[P_{a\alpha} - P_{b\alpha}] \quad (3.13)$$

Burada β , 0-1 arasında bir değerdir. Üretilen bu yeni nesiller kromozomda yerlerine konularak işlem tamamlanır.

$$\text{Nesil}_1 = [P_{a1}, P_{a2}, \dots, P_{\text{yeni1}}, \dots, P_{bN_{\text{par}}}]$$

$$\text{Nesil}_2 = [P_{b1}, P_{b2}, \dots, P_{\text{yeni2}}, \dots, P_{a_{N_{\text{par}}}}]$$

Eğer kromozomun birinci parametresi seçilirse, seçilen parametrenin sağındaki parametreler değiştirilir. Kromozomun en son parametresi seçilirse, seçilen parametrenin solundaki parametreler değiştirilir. Bu yöntemde $\beta > 1$ 'den büyük olmadıkça sınır değerleri aşan herhangi bir parametre üretilmemektedir. Örneğin;

$$\text{Kromozom}_2 = [5.2693, 9.1382] \quad \text{Kromozom}_3 = [9.1032, 7.6151]$$

kromozomlarını ele alalım. Rasgele sayı olarak üretilen $\alpha=1$ için çaprazlama noktası olarak 1. parametre seçilmektedir. İkinci rasgele sayı olarak $\beta=0.7147$ üretilmektedir. Denklem (3.12) ve (3.13)'göre yeni nesil aşağıdaki gibi bulunur.

$$\text{Nesil}_3 = [5.2693 - 0.7147 \times 5.2693 + 0.7147 \times 9.1032, 7.6151] = [8.0094, 7.6151]$$

$$\text{Nesil}_4 = [9.1032 + 0.7147 \times 5.2693 - 0.7147 \times 9.1032, 9.1382] = [6.3631, 9.1382]$$

Diğer kromozomlara da aynı kurallar uygulanarak yeni nesiller elde edilir.

3.2.2.6 Mutasyon

Genetik algoritmalar, bazen çok hızlı yakınsarlar. Yakınsama sonucunda global maksimum bulunursa sonuç iyi, lokal minimumlar bulunursa beklenen sonuç elde edilememiş demektir. Hızlı yakınsamadan kurtulmanın yolu, araştırma uzayında, mutasyon aracılığıyla yeni çözümler elde etmektir. İkili kodlu genetik algortmada'da, mutasyon oranı %1-%5 arasında değiştirilirse iyi sonuçlar elde edilir (Çunkaş ve Akkaya 2004). Gerçek kodlu GA'da mutasyon oranı ise daha yüksektir. Parametrelerin toplam sayısı ile mutasyon oranı çarpılarak mutasyona girecek parametre sayısı tespit edilir. Bir matriste, satır ve sütunu ifade edecek şekilde rasgele rakamlar üretilerek mutasyon gerçekleştirilir. Örneğin; mutasyon değerini $\mu=0.04$ olarak alınırsa, mutasyona uğrayacak parametre sayısı $0.04 \times 24 \times 2 = 2$ olarak hesaplanır.

Çizelge 3.10'daki kromozom₇'nin birinci parametresi ile kromozom₂₂'nin ikinci parametresi mutasyona uğrarsa, kromozom₇'nin birinci parametresi ile kromozom₂₂'nin ikinci parametresi silinir ve yerine 0-10 arasında yeni bir rasgele sayı üretilerek konur.

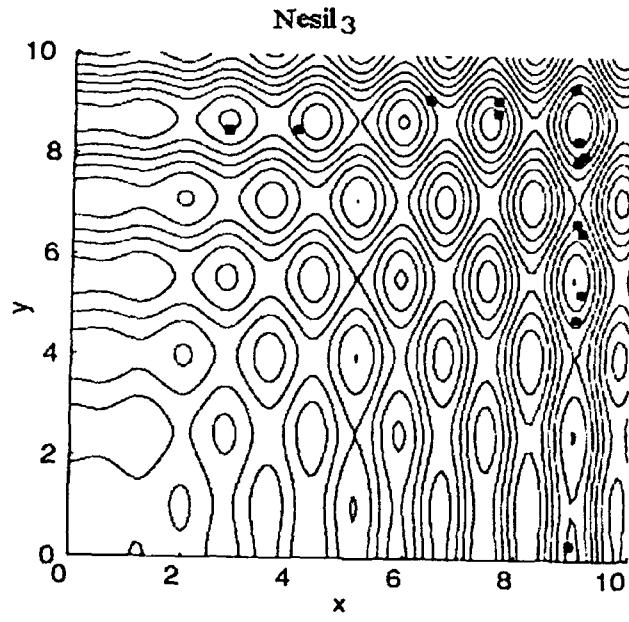
$$\text{Kromozom}_7=[4.1208, 2.7271] \Rightarrow \text{Kromozom}_7=[8.6750, 2.7271]$$

Mutasyon süreci tamamlandıktan sonra, yeni popülasyonun sıralaması Çizelge 3.12'deki gibi olur. Algoritma, yedinci iterasyondan sonra minimum uygunluk değerini -18.5 olarak bulmaktadır. Popülasyon üyelerinin topoğrafik harita üzerinde dağılımı Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

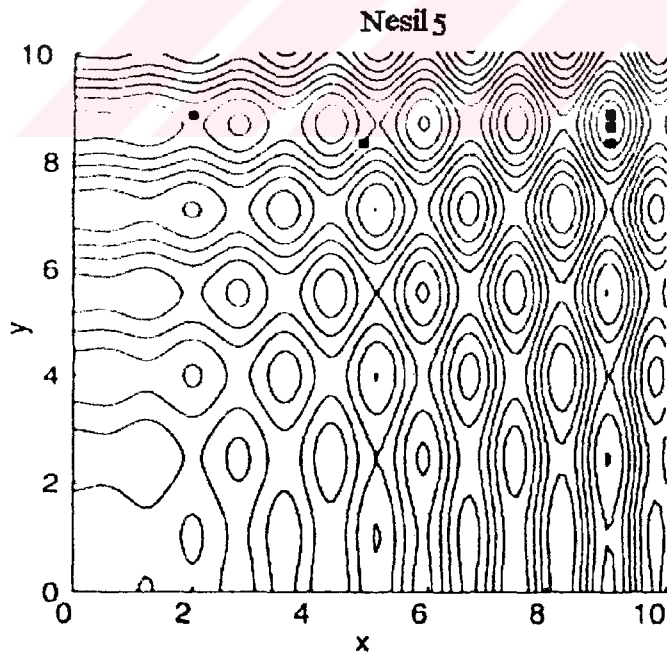
Şekil-3.14 'de görüldüğü gibi popülasyon üyeleri üçüncü iterasyondan sonra iki minimum etrafında toplanmaya başlamaktadır. Şekil 3.15'de görüldüğü gibi beşinci iterasyondan sonra, bir minimum etrafında toplanmakta ve Şekil 3.16'daki gibi nihayet yedinci iterasyondan sonra global minimuma (-18.5) ulaşmaktadır. Şekil 3.17'de gerçek kodlu GA'nın yakınsama grafiği verilmiştir.

Çizelge 3.12 Gerçek kodlu GA'nın ikinci nesilden sonraki sıralanışı (Haupt 1998)

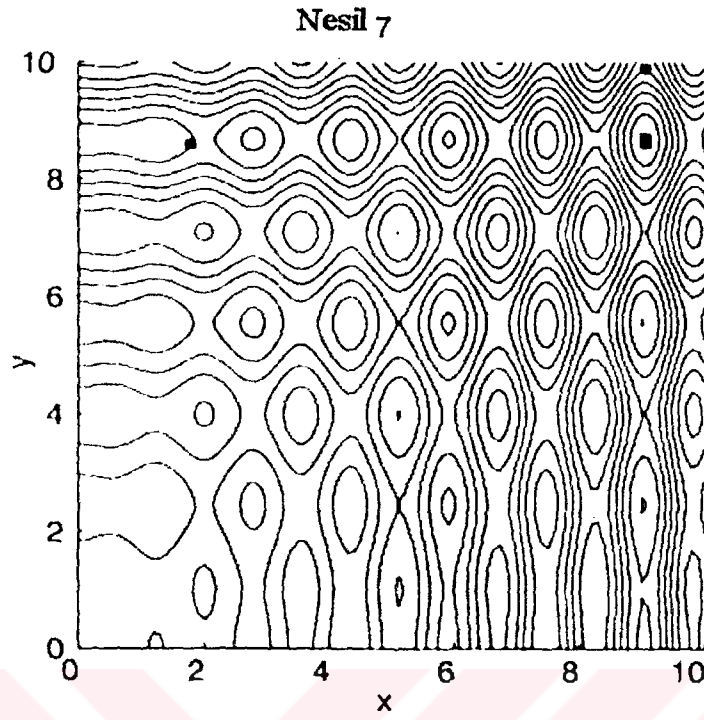
No	x	y	Uygunluk değerleri
1	9.0465	8.3128	-16.2929
2	9.0465	8.3097	-16.2555
3	9.1382	5.2693	-13.5290
4	7.6151	9.1032	-12.2231
5	7.6151	9.1032	-12.2231
6	7.6151	9.1032	-2.2231
7	2.7708	8.4789	-11.6107
8	2.7708	8.4617	-11.4863
9	9.1382	8.0094	-11.0227
10	8.9766	9.3438	-10.4131
11	8.9766	9.3469	-10.3505
12	9.0465	7.9346	-9.8737
13	1.5034	9.0860	-6.6667
14	4.4224	9.3469	-5.6490
15	5.9111	6.3163	-5.4305
16	7.6151	6.3631	-5.1044
17	9.0921	4.2422	-5.0619
18	2.7491	2.1896	-5.0251
19	3.1903	5.2970	-4.7452
20	9.0921	3.8350	-4.6841
21	0.6956	5.1942	-4.2932
22	4.1539	4.7773	-3.9545
23	8.6750	2.7271	-3.4437
24	4.1208	3.1754	-2.6482



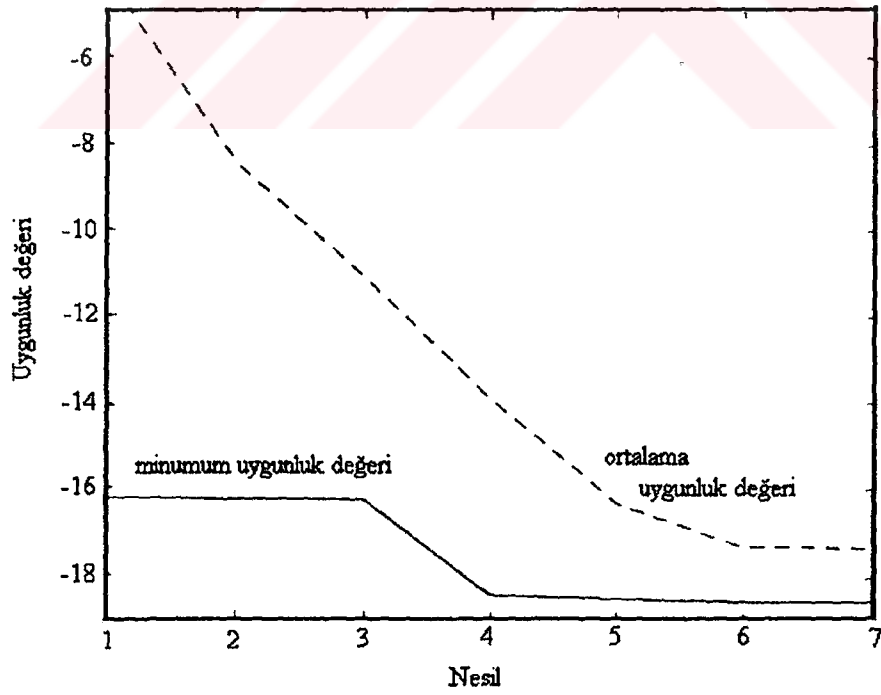
Şekil 3.14 Üçüncü neslin topoğrafik harita üzerinde dağılımı (Haupt 1998)



Şekil 3.15 Beşinci neslin topoğrafik harita üzerinde dağılımı



Şekil 3.16 Yedinci neslin topoğrafik harita üzerinde dağılımı



Şekil 3.17 Yedi tane neslin ortalama ve minimum uygunluk değerleri (Haupt 1998)

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Herhangi bir elektromagnetik problemin matematiksel modeli, Maxwell denklemlerinden yararlanılarak bulunabilir. Kısmi türevli denklemin analitik çözümü, çok özel durumlar dışında zor, zaman alıcı ve hatta imkansız olabilir. Böyle durumlarda, sayısal yöntemler kullanmak kaçınılmaz olur. Elektromagnetik alan incelemelerinde, farklı sayısal metotlardan yararlanılır. Bunlardan bazıları; Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Monte Carlo Yöntemi, Sınır Elemanları Yöntemi ve Yük Benzetim Yöntemi'dir. Problemi en kısa sürede çözen ve doğru sonucu veren, kolayca programlanabilen bir sayısal yöntemin tercih edilmesine dikkat edilmelidir.

Sonlu elemanlar yöntemi, fiziksel olayların matematiksel modellenmesinde sınır değer problemleri için yaklaşık çözümler elde etmek amacıyla kullanılan bir sayısal yöntemdir. Bu yöntem, 1940'lı yıllarda önerilmiş, 1950'li yıllarda uçak tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonraki yıllarda, sürekli olarak geliştirilmiş ve başta yapı analizi ile ilgili problemler olmak üzere pek çok alandaki problemlerde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde, sonlu elemanlar yöntemi mühendislik ve matematik problemlerinin çözümünde geniş uygulama alanına sahip genel bir yöntem olarak bilinmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi, bütün denklem sistemlerinde olduğu gibi sistemdeki sonlu sayıdaki bilinmeyen büyüklüklerin, bilinenler cinsinden yazılarak çözülmesine dayanır. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle beraber, sonlu elemanlar gibi sayısal çözüm metotlarıyla, başlangıç ve sınır değer problemlerinin çözümü daha kolaylaşmış ve çözüm hassasiyeti artmıştır. .

İlk olarak, 1960'lı yılların başlarında makine mühendisliği alanında sonlu elemanlar yöntemiyle optimizasyon yapılabileceği gösterildi. 1960 yılında L.A. schmit sonlu elemanlar yöntemiyle optimizasyonu gerçekleştirdi. 1960'lı yılların sonu ve 1970'li yılların başlarında diğer mühendislik alanlarında optimizasyon tekniği olarak kullanılmaya başlandı (Dwyer ve ark. 1971). 1967'de Halbach, magnet kutup şekillerini sonlu elemanlar yönetimini kullanarak optimize etti (Russenschuck 1995).

Wath ve ark. (1970), optimizasyon problemlerinin doğruluğu üzerinde çalışmışlardır. Girdinio ve ark. (1978), Lindholm (1983), Cendes ve ark. (1985), Luomi ve ark. (1988) tarafından değişik mesh (ağ) teknikleri ve otomatik mesh (ağ) oluşturma prosedürleri geliştirildi. Pereis ve Ziegler (1990) elektromagnetik alan hesaplamalarını, Takahashi (1990) mıknatıs (magnet) kutup şekillerini, Cheng ve Sykulski (1994) selenoid ve aktuatörlerin sonlu elemanlar yöntemiyle optimizasyonunu gerçekleştirdiler. Pyrhönen ve Kurronen (1994), asenkron motor stator dış şekillerinin optimizasyonunu yaptılar. Russenschuck (1990), sabit mıknatıslı senkron motor optimizasyonunda sonlu elemanlar yöntemini diğer optimizasyon algoritmalarıyla birleştirerek kullandı.

4.1 Sınır Değer Problemleri

Fiziksel matematiğin önemli bir konusu, fiziksel sistemlerin matematiksel modellenmesidir. Tipik bir sınır değer problemi, bir Ω bölgesinde, bölgeyi kuşatan S sınırı üzerindeki sınır şartları ile birlikte;

$$D\phi=f \quad (4.1)$$

temel diferansiyel denklemiyle tanımlanır. Denklem (4.1)'de D bir diferansiyel operatör, f uyarıcı veya kaynak fonksiyonu ve ϕ ise bilinmeyen büyüklüktür. Magnetik alan teorisinde, böyle bir eşitlik, basit bir Laplas veya Poisson ya da karmaşık dalga eşitliklerinden biri olabilir. Bunun yanında sınır koşulları, basit Dirichlet ve Neumann koşullarından karmaşık empedans ve radyasyon koşullarına kadar hatta daha karmaşık yüksek dereceli koşullara kadar değişebilir.

Sınır değer problemlerinin analitik yöntem ile çözülmesi istenir ancak, analitik yöntem ile çözüm elde etmek çoğu durumda mümkün olmamaktadır. Örneğin, sonsuz geniş paralel düzlemsel elektrotlar arasındaki alanın hesabı; dikdörtgen, silindirik ve küresel boşluklardaki boşluk rezonansları ve boşluk düzlemler; kamalar, dairesel silindirler, kürelerden dalga saçınım problemlerini analitik yöntemlerle çözmek mümkün değildir. Mühendislik alanında diğer bir çok problemin analitik çözümü zordur veya yoktur. Bu tip problemlere çözüm getirebilmek için Ritz ve Galerkin metotları gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Özoğlu 1995 ve Bilgin 2002).

4.2 Laplas ve Poisson Denklemleri

Enerji bağıntısından faydalanılarak enerjiyi minimum yapan vektör potansiyel değerlerini bulabilmek için öncelikle, katsayıları bilinmeyen ve basit fonksiyonların toplamından oluşmuş bir $A(x,y)$ vektör potansiyel yaklaşım fonksiyonunun tanımlanması gerekir. Tanımlanan bu vektör potansiyel fonksiyonun, bölge içinde sürekli olduğu ve sonlu sayıda türevi bulunduğu dikkate alınmalıdır.

Magnetik alan içindeki kaynaklar J ile ve magnetik direnç ν ile gösterilirse, böyle bir Poisson alanında kartezyen koordinatlar sisteminde enerji fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

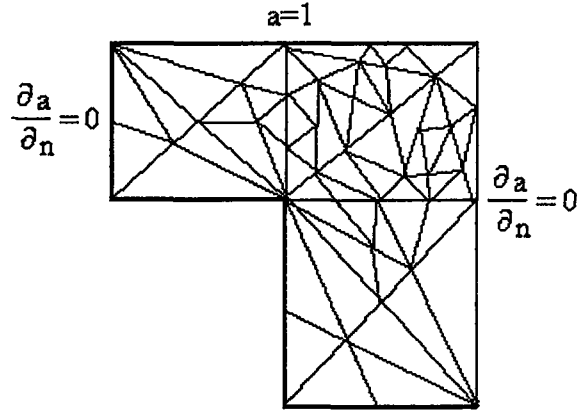
$$W = \iint_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \nu |\nabla A|^2 - JA \right] dx dy \quad |\nabla A|^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'deki enerji bağıntısında $\frac{1}{2} \nu |\nabla A|^2 - JA$ terimi, $d\Omega = dx dy$ yüzeyindeki enerji yoğunluğunu göstermektedir. Bir çözüm bölgesi için birden fazla vektör potansiyel elde etmek mümkündür, ancak bunlardan bir tanesi;

$$\nabla^2 A = \nabla A = \frac{1}{\nu} J = \mu J \quad (4.3)$$

poisson denklemini verir ve bu fonksiyon tektir. Poisson denklemini veren bu çözüm, aynı zamanda bölge içindeki vektör potansiyel enerjiyi minimum yapan çözümdür. Bunun tersi de söylenebilir, bölge içinde enerjiyi minimum yapan vektör potansiyel çözümü, poisson denklemini veren vektör potansiyel çözümdür. Poisson denklemini çözmek için, $\nabla^2 A = 0$ yapılarak Laplas denklemine dönüştürülür.

Elektrik mühendisliğinde bir çok problem, iki boyutlu Laplas denklemi olarak ifade edilir ve çözülür. Şekil 4.1'de elektrik makinasının oluk adınının yarısı gösterilmektedir. Motor analizinde, hava aralığındaki magnetik skaler potansiyel dağılımının bilinmesi gerekir. Sınır şartları, elektrik potansiyel problemlerindeki gibidir. Skaler potansiyel, demir yüzeyler boyunca sabittir ve simetrik yüzeylerde normal türev ortadan kalkar.



Şekil 4.1 Elektrik makinasının oluk adımının yarısının sonlu elemanlar ağı

Bu tip problemler için iki çeşit sınır şartı vardır. Bunlar, Şekil 4.1’de koyu çizgi ile belirtilmiş olup iletken metal yüzey boyunca sabit potansiyel değerleri ile tanımlanan Dirichlet sınır şartları ile simetrik yüzeyler boyunca normale göre alınan türevlerin sıfıra eşit olduğu Neumann sınır şartlarıdır.

4.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Adımları

Kapalı bir bölgenin sonlu elemanlara bölünmesi, boyutları, konumları ve şekilleri isteğe bağlı olarak seçilen elemanlarla yapılır. Bu elemanlar, bir boyutlu problemlerde doğru parçaları; iki boyutlu problemlerde üçgen, dörtgen veya çokgen; üç boyutlu problemlerde küp, prizma gibi şekillerde tanımlanabilir. Bölge içinde eleman sayısı ve dağılımı, çözümün doğruluğuna etki eden faktörlerdendir. Sonlu elemanlar yöntemi üç adımda gerçekleştirilir. Bunlar;

- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılması ve denklemlerinin yazılması
- Elemanların birleştirilmesi
- Denklem sisteminin çözülmesi

4.3.1 Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılması ve denklemlerinin yazılması

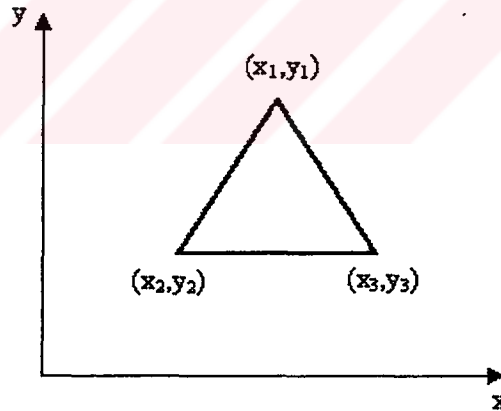
Sonlu elemanlar yöntemiyle yaklaşık bir çözüm oluşturmak için çözüm bölgesi Şekil 4.1’de üçgen bölgelere ayrıldığı gibi elemanlara ayrılır. Her bir elemanın vektör potansiyellerinin, belirli bir bağıntı ile değiştiği kabul edilerek bütün

elemanlardaki vektör potansiyel dağılımları birbiriyle birleştirilir. Bunun sonucunda yaklaşık bir çözüm elde edilir. Bir elemandaki vektör potansiyelin değişimi olarak alınan vektör potansiyel fonksiyonuna, “yaklaşım fonksiyonu” veya “interpolasyon fonksiyonu” adı verilir. Bu fonksiyon genellikle bir polinom şeklindedir. Şekil 4.2’de gösterilen tipik bir üçgen eleman için iki boyutlu yaklaşım fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$A(x,y)=a+bx+cy \quad (4.4)$$

Seçilen polinomların derecesi ne kadar yüksek ise doğru çözüme o kadar iyi yaklaşılr. Ancak yüksek dereceli polinomlar hesap süresini, bellek ihtiyacını ve karmaşıklığı artırır.

Polinom fonksiyonları karmaşık durumların daha iyi tanımlanmasını sağlarken, türev alma işlemlerini de kolaylaştırır. Polinomun katsayıları, eleman üzerinde ve içinde seçilmiş düğümlerin vektör potansiyelleri cinsinden bulunabilir. Polinomun derecesinin yüksek olması, daha fazla düğüm tanımlama imkanı verir. Algoritmaların çoğunda basitleştirmek amacıyla birinci dereceden yaklaşım fonksiyonları kullanılır.



Şekil 4.2 Birinci dereceden bir sonlu eleman

Denklem (4.4)’de a , b ve c sabit birer katsayı, x ve y ’de kartezyen koordinatlardır. Bu polinomda katsayıları belirleyebilmek için, üçgen elemanların üç köşe (düğüm) noktasına ilişkin koordinatlarının ve vektör potansiyel değerinin bilinmesi gerekir. Birinci dereceden bir yaklaşımla, $A(x,y)$ ’nin eleman içinde ve kenarlarında doğrusal olarak değiştiği kabul edilir. Bu vektör potansiyelin bulunduğu

konuma göre değeri, eleman içinde sıfırdan farklı, eleman dışında ise sıfırdır. Eleman içinde vektör potansiyelin doğrusal olarak değişmesi, vektör potansiyel bağıntısından x 'e ve y 'ye göre türevler alınarak bulunan alan yoğunluğunun eleman içinde sabit olması anlamını taşır. Sonuç olarak bu durumda, bir eleman içinde vektör potansiyel doğrusal değişir ve alan yoğunluğu sabittir denebilir. Buradan anlaşıldığı gibi gerçek çözümün yerini parça-parça doğrusal bir fonksiyon almaktadır. Eğer tanımlanan bölgedeki elemanların köşe noktaları ortak ise vektör potansiyel değişimi, iki elemanın arasındaki sınırdaki sürekli olmaktadır. Bu sınırlar arasında aralık olmadığından çözüm olarak bulunan $A(x,y)$, parça-parça fakat tüm bölge içinde sürekli olan bir çözümdür.

Denklem (4.4)'deki a , b ve c katsayıları, A_1 , A_2 , A_3 noktalarındaki vektör potansiyel denklemlerinden bulunur. A_1 , A_2 ve A_3 vektör potansiyelleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$A_1=A(x_1,y_1)=a+bx_1+cy_1 \quad (4.5)$$

$$A_2=A(x_2,y_2)=a+bx_2+cy_2 \quad (4.6)$$

$$A_3=A(x_3,y_3)=a+bx_3+cy_3 \quad (4.7)$$

Denklem (4.5), (4.6) ve (4.7), denklem (4.4) 'de yerine konulup yeniden düzenlenirse;

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Denklem (4.8)'deki katsayılar matrisinin determinantı, üçgen alanının iki katına eşit büyüklükte tanımlanabilir. Denklem (4.8) çözülerek a , b ve c katsayıları belirlenir. Sonuçlar denklem (4.4) 'de yerine konulduğunda;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

bulunur. Buradaki ters katsayılar matrisi ve x,y birleştirilerek pozisyonun yeni denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$A = \sum_{i=1}^3 A_i \alpha_i(x, y) \quad (4.10)$$

Burada;

$$\alpha_i = \frac{1}{2S} \{ (x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y \} \quad (4.11)$$

pozisyonun doğrusal bir fonksiyonudur ve S üçgenin yüzey alanını temsil eder.

Üçgen elemanın içindeki enerji, denklem (4.2) kullanılarak belirlenebilir.

Üçgen elemanın içindeki potansiyel;

$$\nabla A = \sum_{i=1}^3 A_i \nabla \alpha_i \quad (4.12)$$

olur ve elemandaki enerji aşağıdaki gibi bulunur.

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \int |\nabla A|^2 ds \quad (4.13)$$

Denklem (4.11), denklem (4.12)'de yazılırsa;

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_i \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j ds A_j \quad (4.14)$$

elde edilir. Katsayılar matrisi aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır.

$$C_{ij}^{(e)} = \int \nabla_{\alpha_i} \nabla_{\alpha_j} ds \quad (4.15)$$

Burada üst indis "e" eleman anlamında kullanılmıştır. Denklem (4.14) matris formunda yeniden düzenlenirse;

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} A^T C^{(e)} A \quad (4.16)$$

Burada üst indis "T", matrisin transpozisini göstermektedir.

$$A^T = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \text{ ve } C^{(e)} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Buna göre, örneğin C_{12} katsayısı aşağıdaki gibidir.

$$C_{12}^{(e)} = \frac{1}{4S} \{ (y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3) \} \quad (4.18)$$

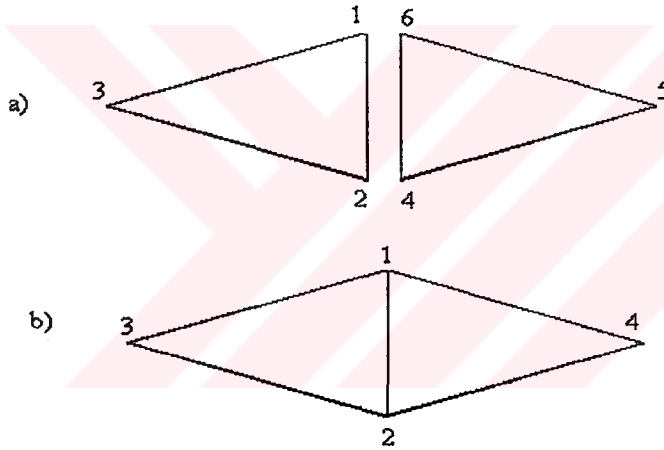
Diğer katsayılar da benzer şekilde elde edilebilir.

4.3.2 Elemanların birleştirilmesi

Elemanların birleştirilmesi halinde toplam enerji, tüm elemanların enerjilerinin toplanmasından oluşur.

$$W = \sum_{e=1}^n W^{(e)} \quad (4.19)$$

Burada e ; eleman sayısını n ; düğüm sayısını göstermektedir. Üçgen elemanlar, birleştirilerek bir üçgen haline getirilebilir. Buradan anlaşılmaktadır ki eleman sayısı ne kadar fazla olursa olsun tüm elemanlar birleştirilerek üçgen yapılmaya çalışılmaktadır. Şekil 4.3.a'da iki tane ayrı üçgen eleman görülmektedir. Şekil 4.3.b'de üçgenlerin nasıl birleştirildikleri görülmektedir.



Şekil 4.3 a) İki ayrı üçgen eleman b) Birleştirilmiş üçgen elemanlar

Elemanlar birleştirilmeden önceki vektör potansiyellerin sütun matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir. Buradaki “ay” indisi birleşmeden önceki durumu ifade etmek amacıyla kullanılmıştır.

$$A_{ay}^T = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4 \ A_5 \ A_6] \quad (4.20)$$

Üçgen çiftinin toplam enerjisi;

$$W = \frac{1}{2} A_{ay}^T C_{ay} A_{ay} \quad (4.21)$$

şeklindedir. Burada C_{ay} , katsayılar matrisi (dirichlet matrisi)'dir ve

$$C_{ay} = \begin{bmatrix} C_{11}^{(1)} & C_{12}^{(1)} & C_{13}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21}^{(1)} & C_{22}^{(1)} & C_{23}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31}^{(1)} & C_{32}^{(1)} & C_{33}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44}^{(2)} & C_{45}^{(2)} & C_{46}^{(2)} \\ 0 & 0 & 0 & C_{54}^{(2)} & C_{55}^{(2)} & C_{56}^{(2)} \\ 0 & 0 & 0 & C_{64}^{(2)} & C_{65}^{(2)} & C_{66}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

olarak yazılabilir. Üçgenler birleştirildiğinde, $A_1=A_6$ ve $A_3=A_4$ olmaktadır. Aşağıda “ay” indisi, ayrı durumdaki potansiyelleri ve “b” indisi birleşik durumdaki potansiyelleri göstermektedir. Buna göre vektör potansiyeller;

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{bmatrix}_{ay} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix}_b \quad (4.23)$$

olarak yazılır. Toplam enerji ise;

$$W = \frac{1}{2} A_b^T C A_b \quad (4.24)$$

Burada;

$$C = B^T C_{ay} B \quad (4.25)$$

şeklindedir. B, bağlantı matrisini vermektedir. Şekil 4.3.b’deki birleştirilmiş elemanlar için katsayılar matrisi, denklem (4.26)’daki gibidir. Katsayılar matrisi simetrik ve kare şeklindedir. Burada üst indisler eleman sayısını gösterirken alt indisler düğüm numaralarını göstermektedir.

$$C = \begin{bmatrix} C_{11}^{(1)} + C_{66}^{(2)} & C_{12}^{(1)} + C_{64}^{(2)} & C_{13}^{(1)} & C_{65}^{(2)} \\ C_{21}^{(1)} + C_{46}^{(2)} & C_{22}^{(1)} + C_{44}^{(2)} & C_{23}^{(1)} & C_{45}^{(2)} \\ C_{31}^{(1)} & C_{32}^{(1)} & C_{33}^{(1)} & 0 \\ C_{56}^{(2)} & C_{54}^{(2)} & 0 & C_{55}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

4.3.3 Denklem sistemlerinin çözülmesi

Bütün elemanların toplam enerjisi, denklem (4.24)'de ifade edilmişti. Birleştirilmiş elemanda Laplas denkleminin çözümü, depolanmış enerjiyi minimum yaparak elde edilir. Buna göre, her bir düğüm noktasındaki kısmi türev sıfır olmaktadır.

$$\frac{\partial W}{\partial A_k} = 0 \quad (4.27)$$

Burada k, indisi vektör potansiyelinin hangi düğüm noktasına ait olduğunu göstermektedir. Buna göre denklem (4.27) yeniden düzenlenirse;

$$\frac{\partial W}{\partial A_i} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n C_{ij} A_j + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n C_{ki} A_k - W_i \quad (4.28)$$

Burada n, düğüm sayısını i ve j düğüm noktalarını göstermektedir. İndislere göre gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$\frac{\partial W}{\partial A_i} = \sum_{j=1}^n C_{ij} A_j - W_i \quad (4.29)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, n$$

Böylece aşağıdaki doğrusal denklem sistemi elde edilir.

$$C A = W \quad (4.30)$$

Her düğümde A için bu denklem sistemi çözülür, daha sonra bütün bölge için A değerleri elde edilir.

4.4 ANSYS Programı ile Sonlu Elemanlar Analizi

ANSYS programı, bir yapı ya da bir makinanın modelini, bilgisayarda oluşturmaya, onları etkileyen yükleri uygulamaya ve gerilme seviyeleri ya da sıcaklık dağılımları gibi fiziksel cevapları incelemeye imkan tanır. Tasarım mühendisleri, prototip üretip onları denemek yerine, bilgisayar ortamında analizler yaparak yaklaşık aynı sonucu elde edebilirler. Tasarım aşamasında bir hatayı giderebilir veya optimum bir geometriyi gerçekleştirilebilirler. Bilgisayar ortamında

motor karakteristiklerinin simülasyonu, gerçek motor üzerinde çalışmaktan hem daha hızlı hem de daha ucuzdur. Aynı zamanda, maddi zararlar karşılama durumu söz konusu değildir

ANSYS programı ile motor üç değişik şekilde modellenerek analiz edilebilir.

- Statik analiz
- Harmonik analiz
- Geçici durum (transient) analizi

Statik analiz: Kaynağın doğru akım olduğu problemlerin incelendiği durumdur. Statik analizde, sabit mıknatısların, doğru akım ve gerilim kaynaklarının ve harici alanların etkileri hesaplanmaktadır. Bu analizde, zamana bağlı çözümler yapılmaz. Ancak hem doğrusal, hem de doğrusal olmayan çözümler yapmak mümkündür. İki boyutlu statik analiz yapılırsa, vektör potansiyel formülasyonları kullanılır. Üç boyutlu statik analiz yapılırsa, skaler formülasyonları veya vektör potansiyel formülasyonları ya da sınır eleman formülasyonlarından birini kullanmak gerekir. Optimizasyon problemlerinin çoğu üç boyutlu olmakla birlikte iki boyutlu olarak ifade etmek mümkündür. İki boyutlu çalışmak hem daha kolay hem de daha az zamanda çözüm elde etme imkanı sağlar. vardır. Statik analiz aşağıdaki adımlar izlenerek gerçekleştirilir.

- Fiziksel özelliklerin belirlenmesi
- Eleman tipinin belirlenmesi ve ağ oluşturulması
- Sınır şartları ve yüklerinin tanımlanması
- Çözüm yapılması
- Çözümünden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

Harmonik analiz: Harmonik yüklerin incelendiği analiz tipidir. Harmonik analizin kullanıldığı yerler, transformatörler, endüksiyon motorları, fuko-akımlı fren sistemleri ve alternatif akımla çalışan diğer elektromagnetik sistemler olarak sıralanabilir. Sabit mıknatıslı sistemlerin harmonik analizi yapılmadığından bu tip malzeme histerezis etkileri ihmal edilir. Magnetik doymanın az olduğu yerlerde, zamana bağlı doğrusal harmonik analiz kullanılır. Magnetik doymanın etkin olduğu yerlerde, zamana bağlı doğrusal olmayan harmonik analiz kullanılmalıdır. Harmonik analizde aşağıdaki büyüklükler incelenebilir.

- Fuko akımları
- Deri olayları
- Fuko akımlarının neden olduğu güç kayıpları
- Kuvvet ve momentler
- Empedans ve İndüktanslar

Geçici hal (transient) analizi: Akım veya gerilim kaynağının zamana bağlı olarak değiştiği problemlerin incelendiği analiz tipidir. Geçici durum analizi ile fuko akımları, fuko akımlarının neden olduğu güç kayıpları, fuko akımlarının indüklediği kuvvet ve momentler hesaplanmaktadır.

4.5 ANSYS Programı ile Dalgıç Asenkron Motorun Modellenmesi

Bu çalışmada, katı model kullanılarak motorun harmonik magnetik analizi yapılmıştır. Katı modellemeye amaç, geometrinin bütün bölgelerini, nokta ve çizgileri kullanarak alanlarla tanımlamaktır. Eğer üç boyutlu bir model düşünülseydi, bütün bölgelerin “hacim” ile tanımlanması gerekirdi. ANSYS programında, iyi bir sonlu elemanlar modeli için katı modelin, çok iyi düşünülerek oluşturulması gerekmektedir. Oluşturulan katı modelden sonlu elemanlar modeline geçileceği için, yüksek hassasiyetli bölgelerin düzgün ve küçük alanlarla az hassasiyetli bölgelerin ise yine düzgün ama büyük alanlarla belirlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde katı modeldeki bozukluklar sonlu elemanlar modelini zorlaştırmaktadır.

Hava aralığı ve ona komşu bölgeler yüksek hassasiyetli bölgeler olduğu için, bu kısımlarda küçük ama düzgün alanlar tanımlanmalıdır. Geometrik modelin bütün bölgelerinin süreksizlik olmayacak şekilde alanlarla tanımlanması gerekir. Ayrıca alanlar üst üste çakışık olmamalıdır, aksi takdirde elemanlar oluşturulurken hatalar olur. Dalgıç asenkron motorun modeli oluşturulurken aşağıdaki adım izlenir.

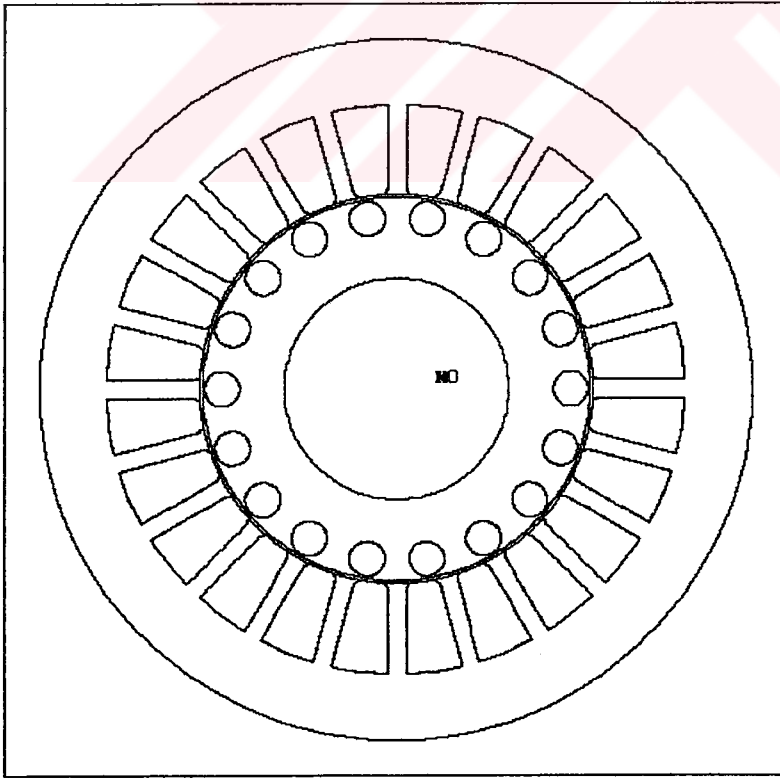
- Geometrik model oluşturulması
- Malzeme özelliklerinin tanıtılması
- Elektriksel devre modelinin oluşturulması
- Çözümün başlatılması
- Sonuçların değerlendirilmesi

4.5.1 Geometrik model oluşturulması

İlk olarak motorun gerçek geometrisi çizilmelidir. Bu izim ANSYS programı aracılığıyla yapılabileceği gibi bir çok CAD programı aracılığıyla da yapılması mümkündür. CAD programıyla çizim tamamlandıktan sonra IGES formunda kaydedilip ANSYS programına aktarılmalıdır. Çizim programı kullanılarak motor geometrisini oluşturmak daha kolay olmaktadır. şekil 4.4’de 55 kW’lık motora ait geometrik model görülmektedir.

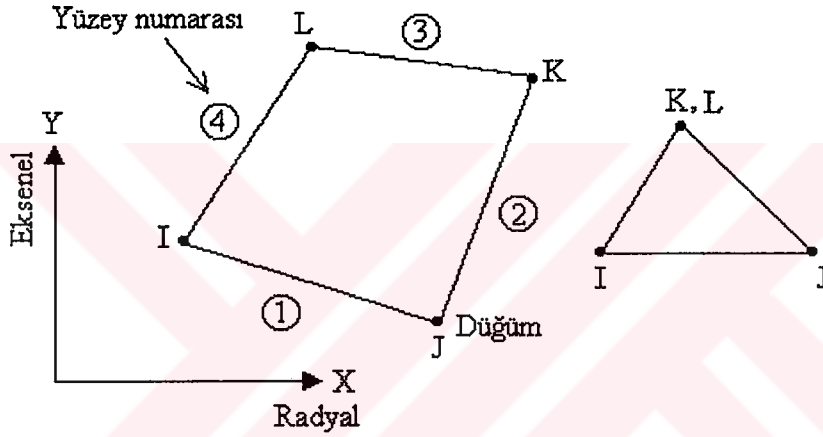
Motor geometrisi, tasarım özelliklerine uygun olarak bölgelere ayrılır. Bu bölgeler genel olarak aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Stator olukları
- Rotor olukları
- Hava aralığı
- Stator boyunduruk ve dişleri
- Rotor boyunduruk ve dişleri



şekil 4.4 55 kW’lık DASM’nin geometrik modeli

Ayrılan bölgelerin malzeme özellikleri tanımlanır. Daha sonra uygun eleman tipi seçilerek sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Sonlu elemanlar analizinde, eleman tipinin belirlenmesi çok önemlidir. İki boyutlu magnetostatik analizde, PLANE53 ve PLANE13 olmak üzere iki çeşit eleman tipi vardır. PLANE53 sekiz düğümlü dörtgen eleman, PLANE13 dört düğümlü dörtgen elemandır. Yüksek hassasiyet gerektiren problemlerde PLANE53, düşük hassasiyet gerektiren durumlarda ise PLANE13 kullanılmaktadır. PLANE53 elemanı, vektör potansiyel formulasyonu üzerine kurulmuştur. Şekil 4.5’de PLANE53 elemanının geometrisi görülmektedir. Her düğüm için bir “DOF”(serbestlik derecesi) vardır ki bu “AZ”dir (AZ; z doğrultusundaki vektör potansiyel). Koordinatlar düzlemsel veya eksenel olabilir.



Şekil 4.5 PLANE53 elemanı

Bir eleman için bilinmeyen değişkenler düğüm potansiyel “AZ” dir. Eleman davranışı, o eleman içindeki potansiyelin nasıl değiştiğini tanımlayan şekil fonksiyonları ile karakterize edilir. Bir elemanın düğümleri arttıkça doğru alan değerlerine daha fazla yaklaşılır.

PLANE53 içerisinde KEYOP(1)=0,1,2,3,4 elemanların serbestlik derecesini belirler. Herbir bölge için serbestlik derecesi farklıdır. Stator ve rotor demir bölgeleri için KEYOPT(1)=0 (AZ) statik bölge, fuko akımlarının indüklendiği bölgedir. Stator olukları için KEYOPT(1)=3 (AZ, CURR, EMF), rotor olukları için KEYOPT(1)=4 (AZ, CURR, EMF) olarak seçilir. Elektrik eşdeğer devresinde; KEYOPT(1)=3 stator sargılarını, KEYOPT(1)=4 rotor çubuklarını ve KEYOPT(1)=0 hava aralığını ifade

etmektedir. Burada AZ, VOLT, CURR, EMF serbestlik derecelerini tanımlamaktadır.

Çözüm sonuçları düğümler üzerinde veya elemanlar üzerinde izlenebilmektedir. Magnetik devre üzerinde; akı yoğunluğu değerleri (B), magnetik alan şiddeti (H), magnetik geçirgenlik (μ_r), stator ve rotorun akım yoğunlukları, düğüm ve eleman bazında görülebilmektedir. Elektrik eşdeğer devresinde ise her bir eleman için akım, gerilim ve güç değerleri okunabilmektedir.

4.5.2 Malzeme Özelliklerinin tanıtılması

Geometrik çizim tamamlandıktan sonra motor, tasarım özelliklerine göre bölgelere ayrılmıştır. Her bir bölgenin malzeme özelliklerinin ayrı olarak tanıtılması gerekmektedir. Malzeme özellikleri; bağıl geçirgenlik, magnetik koersif kuvvet gibi “doğrusal” veya BH eğrisi gibi “doğrusal olmayan” bir karakteristik gösterebilir.

Malzeme özelliklerinin tanıtılmasında birinci adım, birim sisteminin belirlenmesidir. Kullanılan birim sistemi, geometri ve yükler için kullanılan birim sistemi ile aynı olmalıdır.

Magnetik doymanın olduğu bölgeler, geçirgenliğe veya doyma oranına bağlı olarak doğrusal yada doğrusal olmayan özellikte tanıtılabilir. Magnetik doymanın az veya geçirgenliğin sabit olduğu bölgelerin, doğrusal özellikte olduğu düşünülmektedir. Magnetik doymanın fazla olduğu bölgeler ise doğrusal olmayan karakterde tanımlanmaktadır. BH mıknatıslanma eğrisi doğrusal olmayan özellik taşır ve modellenmesinin çeşitli yöntemleri vardır. Bunlardan üç tanesi aşağıda verilmiştir.

- Akı yoğunluğunun karesinin fonksiyonu olarak magnetik direnç;
 $\nu = \nu(B^2)$
- Akı yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak magnetik alan şiddeti;
 $H = H(B)$
- Magnetik alan şiddetinin bir fonksiyonu olarak magnetik geçirgenlik;
 $\mu = \mu(H^2)$

olarak modellenebilir.

Sayısal olarak malzeme karakteristiği tanımlanırken, fonksiyonlardaki bağımsız değişkenlerin karelerinin kullanılmasının iki önemli sebebi vardır. Birincisi; bu değişkenler (B ve H) vektörel olarak elde edilirler. Vektörel formdaki bu büyüklüklerin karelerinin toplamının genliklerini bulmak için karekökü alınması gerekir. En başta karesi alındığı için, çözüm sırasında karekök alma işlemleri yapılmaz ve böylece çözüm süresinin kısalmasına katkı sağlanmış olur. İkinci önemli sebebi ise sayısal kararlılık sağlanmasıdır. Matematiksel modeli ne olursa olsun, kullanılan her analiz programının BH mıknatıslanma eğrisini tanımlayan verilere ihtiyacı vardır.

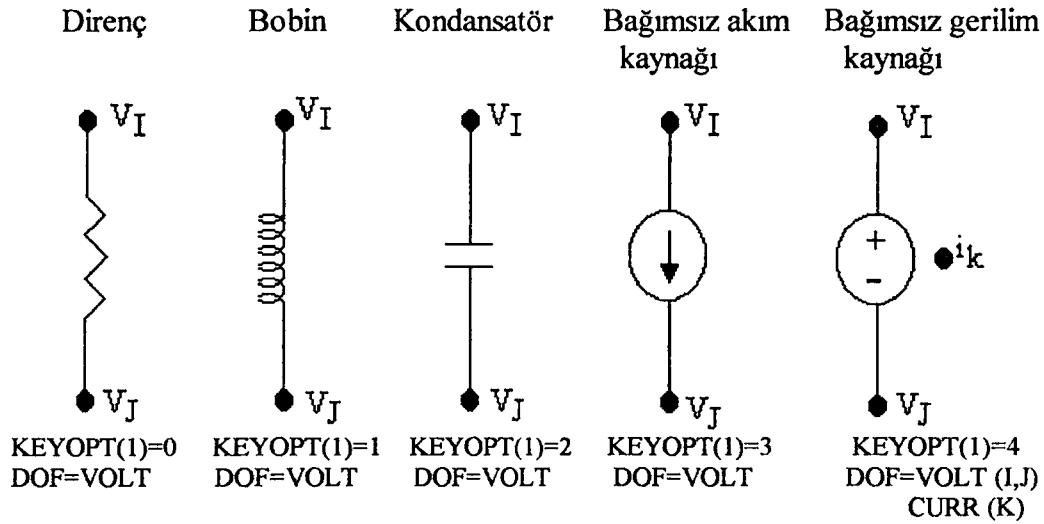
Stator ve rotor iletkenleri sadece bağıl geçirgenlik değeri ile tanımlanır ve doğrusal özellik gösterirler. Hava aralığı, magnetik geçirgenlik değeri ile tanımlanarak gösterilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan motorun, stator ve rotorunda dinamo sacı, milinde ise dökme çelik kullanılmıştır. Bunlara ait mıknatıslanma (BH) eğrileri, beşinci bölümde Şekil 5.5’de verilmiştir. Stator sargıları ile rotor çubukları bakır iletken yapıldıklarından 65°C’deki özgül dirençleri $R_{svx}=2.10^{-8}$ ’dir. Stator sargısı, rotor çubukları ve hava magnetik geçirgenlikleri $\mu_{rx}=1$ olarak alınmıştır.

4.5.3 Elektriksel devre modelinin oluşturulması

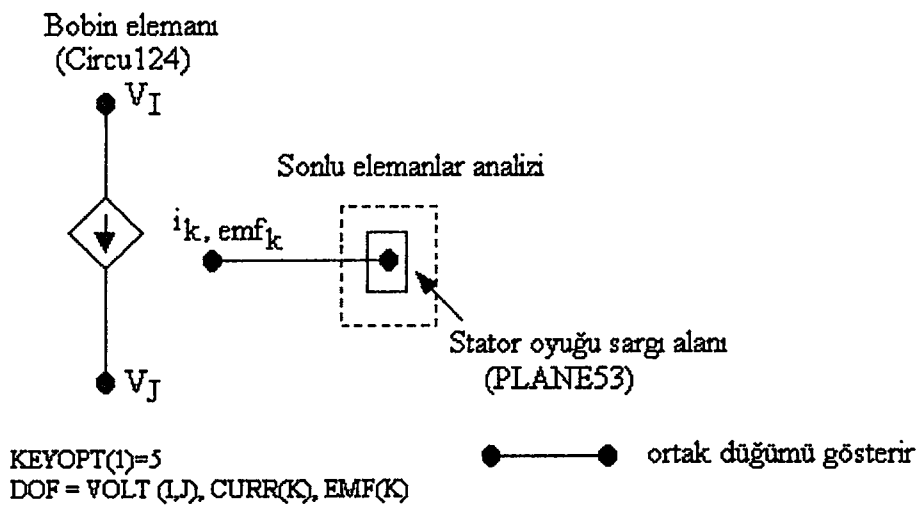
Elektrik devresinde akım ve gerilimin değişimi ANSYS programının elektrik devre analiziyle izlenebilmektedir. Uygulanan kaynağın cinsine göre analiz tipi değişmektedir. Örneğin; AC kaynak kullanılıyorsa analiz tipi harmonik, DC kaynak kullanılıyorsa statik ve zaman değişkenli kaynak kullanılıyorsa geçici durum olmaktadır.

ANSYS programında doğrusal devre elemanlarını simüle etmek için Circu124 elemanı kullanılmıştır. Elektrik devreleri direnç, indüktans, kapasitans, ortak indüktans, gerilim kaynağı, akım kaynağı gibi devre elemanlarından oluşmaktadır. Bunların tamamı Circu124 elemanı ile modellenebilir. Circu124 elemanında KEYOPT(1)=1,2,3,4,..... seçilerek devre elemanları modellenebilir. Şekil 4.6’da bazı temel elektrik devre elemanları görülmektedir.



Şekil 4.6 Circu124 devre elemanları

Elektrik eşdeğer devre elemanları ile sonlu elemanlar modelindeki magnetik eşdeğer devre elemanlarının birleştirilmesi gerekir. Şekil 4.7’de böyle birleştirme gösterilmektedir. Magnetik ve elektrik eşdeğer devrelerinde serbestlik dereceleri (DOF) CURR, EMF, VOLT ‘dur. CURR ile bobinden geçen akım, EMF ile bobinde indüklenen gerilim ifade edilmektedir. Ancak bobinden sadece akım geçmekte ve bobin üzerinde bir gerilim düşümü olmaktadır. Bu nedenle sonlu elemanlar analizinin katı modelindeki bobin bölgesine ait bütün noktalar seçilerek CURR ve EMF serbestlik dereceleri ile tanımlanmalıdır (Bilgin 2002).



Şekil 4.7 Stator sargıları için Circu124 ile PLANE53’ün birleştirilmesi

Sargıda, fuko akımları meydana gelmez. Magnetik vektör potansiyel ve sargının içinden geçen akım, sargı gerilimini belirlemektedir. Bu bağıntı aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\Delta V = R_c + \partial\psi/\partial t \quad (4.30)$$

$$\Delta V = R_c + \frac{n_c}{S_c} \int \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \cdot d\bar{S} \quad (4.31)$$

Burada R_c , sargı direnci n_c , sarım sayısı S_c , sargı yüzey alanıdır. Masif iletken bağlantılarında deri olayı dikkate alınır. Bu iletkenlerde, magnetik vektör potansiyel ve gerilim toplam akımı belirlemektedir. Toplam akım aşağıdaki gibi bulunur.

$$J = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \frac{\partial V}{\partial t} \quad (4.32)$$

$$i(t) = - \int_s \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \cdot d\bar{S} + \int_s \frac{\sigma}{L_c} \Delta V \cdot d\bar{S} \quad (4.33)$$

Burada L_c , iletken uzunluğunu ΔV , gerilim düşümünü göstermektedir.

4.5.4 Çözümün başlatılması

Çözüm aşaması; sınır şartların uygulanması, yüklerin uygulanması ve çözüm stratejisinin belirlenmesinden meydana gelmektedir. Analizde, motorun ilk önce yüksüz durumu incelenmeli ve sonra yüklü durum incelenmelidir. Sınır koşulları yüklü ve yüksüz durumlar dikkate alınarak tanımlanmalıdır.

Boşta çalışma durumunda çalışma frekansı 50Hz'dir ve kayma teorik olarak sıfır kabul edildiğinden rotorda gerilim indüklenmemektedir. Burada dikkat edilmesi gereken bir husus, motor katı modeli, iki boyutlu olarak modellendiğinden stator sargı sonu direnci ve sargı sonu kaçak reaktansı modelde gösterilememektedir. Benzer şekilde kısa devre halkası da modele dahil edilememektedir. Motor eşdeğer devresi çizilirken stator sargı sonu direnci ve kaçak reaktansı ile rotor kısa devre halkası direnci ve reaktansının seri olarak ilave edilmesi gerekir. Bu direnç ve reaktanslar analitik olarak hesaplanıp ilave edilebilir.

4.5.5 Sonuçların değerlendirilmesi

Magnetik analiz ile her düğümde magnetik vektör potansiyel hesaplanır. Bu sonuçlar, arabirim vasıtasıyla kullanıcının istediği sonuçlara çevrilir. Genel olarak magnetik alan çözümlerinden; çekilen güç, kuvvet, moment, güç faktörü, kayıplar, indüktans ve direnç gibi sonuçlar elde edilir. Bunlara ilaveten, akı çizgileri, magnetik alan şiddeti gibi dağılımları model üzerinde izlemek ve yorumlamak mümkündür.

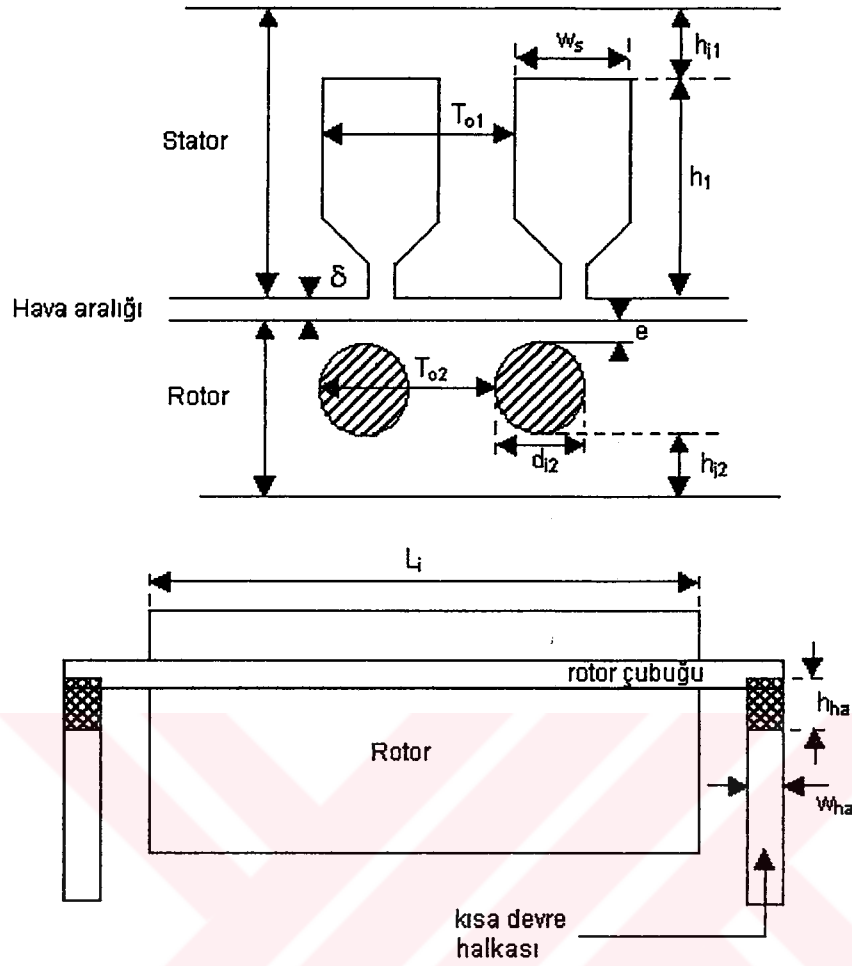


5. GENETİK ALGORİTMALARIN DALGIÇ ASENKRON MOTORLARIN TASARIM OPTİMİZASYONUNA UYGULANMASI

Bu çalışmada, evrim algoritmaları içerisinde en üstün özelliğe sahip olan genetik algoritmalar kullanılmıştır. GA'da temel fikir, evrimi bilgisayarda modelleyerek bundan faydalanmaktır. Bu algoritmanın bir üstünlüğü de diğer bazı algoritmalar gibi çok özel kurallar gerektirmemesidir. İki temel operatörü olan mutasyon ve çaprazlama serbest olarak değiştirilebilir (de Jong 1993). Genetik algoritmalar 1990'dan itibaren özellikle pek çok motor optimizasyonunda ve tasarım problemlerinde kullanılmıştır. Örneğin; Moahmmmed O.A. ve Üler G.F. (1994), elektromagnetik devrelerin optimizasyonunda genetik algoritmaları kullanmıştır. Bianchi N. ve Bolognani S. (1998), sabit mıknatıslı senkron motorların optimizasyonunu, GA ve sonlu elemanlar metodunu kullanarak yapmışlardır. Dong-Joon ve ark. (1997) sabit mıknatıslı senkron motorun verim optimizasyonunu GA ile gerçekleştirmişlerdir. Hamarat ve arkadaşları (1998) elektrik makinalarının tasarım optimizasyonunda deterministik algoritmaları ve deterministik olmayan algoritmaları kullanarak, karşılaştırmalarını yapmışlardır. Çunkaş ve Akkaya (2002) Genetik algoritmalarla, üç fazlı asenkron motorun oluk optimizasyonunu gerçekleştirmişler. Aynı yazarlar Çunkaş ve Akkaya (2004), üç fazlı asenkron motorların tasarım optimizasyonunu genetik algoritma kullanarak yapmışlardır. Chai (2002), GA ile anahtarlama relüktans motorların ağırlık optimizasyonunu gerçekleştirmiştir.

5.1 Tasarım Parametreleri

Elektrik makinalarının tasarım parametreleri oldukça fazla olduğundan, bu değişkenler özelliklerine göre birinci derece ve ikinci derece olarak sınıflandırılırlar. Bu çalışmada, tasarım parametreleri olarak dalgıç asenkron motorun birinci dereceden ana geometrisini etkileyen ve çoğu literatürde kullanılan 10 adet parametre seçilmiştir. Tasarım değişkenleri amaç fonksiyonunda 10-boyutlu bir vektör $f(x_1, x_2, \dots, x_{10})$ olarak yer almaktadır. Değişkenlerin birbirleriyle bağlantıları dikkate alınarak alt ve üst sınır aralıkları belirlenmiştir. Şekil 5.1'de dalgıç asenkron motor geometrisi ve Çizelge 5.1'de seçilen tasarım parametreleri görülmektedir.



Şekil 5.1 DASM'nin stator ve rotor geometrisi

Çizelge 5.1 Tasarım parametreleri

x_1	w_1	Bir fazın sarım sayısı
x_2	L_i	Stator demir uzunluğu
x_3	w_{ha}	Kısa devre halkası genişliği
x_4	D_i	Stator iç çapı
x_5	h_1	Stator oluk yüksekliği
x_6	w_s	Stator oluk genişliği
x_7	δ	Hava aralığı
x_8	e	Rotor oluk geçidi
x_9	d_{i2}	Rotor oluk çapı
x_{10}	D_a	Stator dış çapı

5.2 Bağımlı Değişkenler ve Sınırları

Yukarıda sözü edilen tasarım parametrelerinin alt ve üst sınırlarının belirlenmesine ilave olarak bazı değişkenlerinde, mevcut üretim standartları, malzeme özellikleri ve müşteri istekleri bakımından belirli sınır şartlarını yerine getirmesi gerekir.

Çizelge 5.2’de b_j ; $j = 1,2,\dots,10$ ’a kadar sınırları tanımlamaktadır. Dolgu faktörü(a), stator sargılarının oluklara yerleştirilmesindeki doluluk oranını vermektedir. Mekanik ve elektriksel şartlar dikkate alınarak bu faktörün belirli bir değerde tutulması gerekmektedir. Rotor akım yoğunluğu (b), makinanın yüklenme kabiliyetini etkiler.

Çizelge 5.2 Bağımlı değişkenler

	Bağımlı değişkenler	Sınırları
(a)	Dolgu faktörü	$DF \leq b_1$
(b)	Rotor akım yoğunluğu	$J_2 \leq b_2$
(c)	Kayma	$s \leq b_3$
(d)	Stator boyunduruk indüksiyonu	$B_{j1} \leq b_4$
(e)	Rotor boyunduruk indüksiyonu	$B_{j2} \leq b_5$
(f)	Stator dış indüksiyonu	$B_{d1} \leq b_6$
(g)	Rotor dış indüksiyonu	$B_{d2} \leq b_7$
(h)	Güç faktörü	$\cos\phi \geq b_8$
(i)	Kısa devre akımının nominal akıma oranı	$I_{1k} / I_{1n} \leq b_9$
(j)	Devrilme momentinin çalışma momentine oranı	$M_{dd} / M_{di} \geq b_{10}$

Rotordan alınan güç, mekanik güç ve rotor bakır kayıplarından oluşmaktadır. Rotor bakır kayıpları, doğrudan kayma ile ilgili olduğundan kaymanın (c) yüksek olması istenmez.

Maksimum magnetik zorlanmalar ve magnetik doyma dikkate alındığında boyunduruktaki ve dişlerdeki magnetik endüksiyonlar (d)(e)(f)(g), belirli değerler arasında olmalıdır. Magnetik akı yoğunluğunu etkileyen faktörler, stator demir uzunluğu ile rotor ve stator dış genişlikleridir. Yüksek akı yoğunluğu, demir kayıplarının artmasına dolayısıyla magnetik reaktansı azaltarak magnetik akımın büyümesine sebep olur. Stator ve rotor oluklarının büyütülmesi, dış genişliklerini

küçülteceğinden dişlerin çok yüksek magnetik akı yoğunluğuna maruz kalmasına ve mekanik olarak zayıflamasına sebep olur. Diğer taraftan olukların büyütülüp dişlerin küçültülmesi, kaçak reaktansın artmasını sağlar. Bu yüzden, magnetik akı zorlanmalarının belirli değerler arasında kalmasına özen gösterilmelidir.

Güç faktörünün düşük olması, reaktif güç tüketiminin yüksek olması demektir. Bu nedenle güç faktörünün (h) çok düşük olması istenmez. Kısa devre akımının nominal akıma oranı, stator ve rotor dirençleriyle ilgilidir. Bu oranın (i) belirli bir sınırdan tutulması gerekmektedir.

Çalışma momenti yükselirken yol alma ve devrilme momentinin azalmaması gerekir (j). Moment optimizasyonunda, eşdeğer rotor direnci önemli bir etkiye sahiptir. Bu direnç, rotor çubukları ve kısa devre halkası dirençlerinden oluşmaktadır. Normal çalışma şartlarında çalışma momentinin yükseltilmesi için düşük rotor direnci istenir. Ancak düşük rotor direnci yol alma momentinin düşmesine ve yol alma akımının yükselmesine sebep olur. Asenkron motor tasarım optimizasyonunda hem yol alma momentinin çok fazla düşmesine müsaade edilmemeli hem de çalışma momentinin yükseltilmesi sağlanmalıdır. Rotor oluk çapı ve kapalı oluk geçidi, rotor direncini ve motor hızını etkilemektedir. Duran rotorda, rotor frekansı ile şebeke frekansı (50Hz) birbirine eşit ve dolayısıyla rotor direnci oldukça yüksektir. Normal çalışma şartlarında rotor frekansı çok düşük (1-3Hz) dolayısıyla rotor eşdeğer direnci küçük olduğundan nominal çalışma momenti yüksek olmaktadır. Tasarım değişkenlerinden rotor oluk çapı, kısa devre halkası ve rotor demir uzunluğunun uygun değerleri seçilerek en ideal rotor direnci bulunmalıdır.

5.3 Ceza Fonksiyonu

Ceza fonksiyonu aracılığı ile sınırlar kaldırılarak, sınırlı problemler sınırsız probleme dönüştürülür. Bu işlem aşağıdaki denklemlerle gerçekleştirilir.

$$F'(x) = \begin{cases} F(x) - P(g_j(x), r) & \text{Eger } F(x) - P(g_j(x), r) > 0 \\ 0 & \text{Eger } F(x) - P(g_j(x), r) \leq 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

Burada $F(x)$; motor moment, r ; ceza katsayısıdır. Değişkenlerin sınır değerleri fonksiyon olarak aşağıdaki ifadelerle tanımlanır.

$$\begin{aligned}
g_1(x) &= DF - b_1 \leq 0 & g_6(x) &= B_{d1} - b_6 \leq 0 \\
g_2(x) &= J_2 - b_2 \leq 0 & g_7(x) &= B_{d2} - b_7 \leq 0 \\
g_3(x) &= s - b_3 \leq 0 & g_8(x) &= \text{Cos}\varphi - b_8 \geq 0 \\
g_4(x) &= B_{j1} - b_4 \leq 0 & g_9(x) &= I_{1k}/I_{1n} - b_9 \leq 0 \\
g_5(x) &= B_{j2} - b_5 \leq 0 & g_{10}(x) &= M_{dd}/M_{di} - b_{10} \geq 0
\end{aligned}$$

Burada b_j parametre sınırlarını, $P(g_j(x), r)$; ceza terimi olarak kullanılan fonksiyonu göstermektedir. Ceza terimi sınırlara göre şöyle tanımlanır.

$$P(g_j(x), r) = \frac{1}{2} r \sum_j [\max(0, g_j)]^2 \quad j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 \quad (5.2)$$

$$P(g_j(x), r) = \frac{1}{2} r \sum_j [\min(0, g_j)]^2 \quad j = 8, 10 \quad (5.3)$$

Denklem (5.2) ve (5.3)'e göre, değişkenlerin sınır değerleri aşılmıyorsa ceza fonksiyonunun herhangi bir etkisi olmaz. Ancak sınır değerleri aşılsa amaç fonksiyonunun uygunluk değeri, sonraki iterasyonlarda daha iyi sonuç vermesi amacıyla bir miktar azaltılır. Dolayısıyla daha geniş parametre uzayı araştırılarak optimum çözüm elde edilmeye çalışılır. Bağımlı sınır değişkenlerinin büyüklükleri birbirinden farklıdır. Örneğin devrilme momentinin çalışma momentine oranı (M_{dd}/M_{di}) 1.9 iken kayma $s = 0.06$ sınır değerleri ile ifade edilmiştir. Bu yüzden sınır değerleri fonksiyonlarının, amaç fonksiyonuna bağlı olarak normalizasyona ihtiyacı vardır. Bu işlem yapılarak bir sınır şartının diğer sınır şartına baskın gelmesi önlenmiş olur. Bu normalizasyon aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir.

$$g_{j\text{norm}}(x) = k_{j(\text{norm})} - 1 \quad j = 1, 2, 3, \dots, 10 \quad (5.4)$$

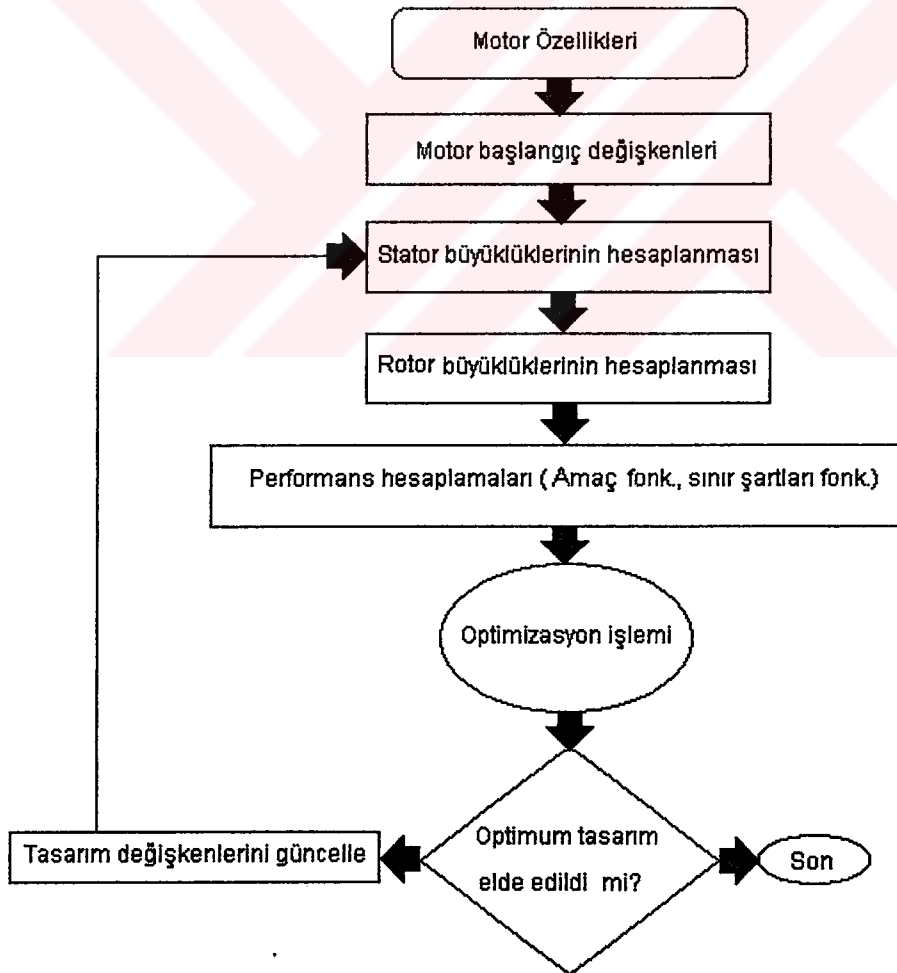
$$k_{j(\text{norm})} = \frac{C_j}{b_j}$$

C_j :sınır değişkenlerinin hesaplanan değeri

5.4 Optimizasyon Prosedürü ve Motor Performansının Hesaplanması

İlk olarak, optimizasyonu yapılacak motorun temel özellikleri (güç, faz gerilimi, frekansı vs.) belirlenir. Sonra, tasarım değişkenleri ve sınır değerleri belirlenir. Stator büyüklükleri, rotor büyüklükleri ve amaç fonksiyonunun uygunluk değerleri hesaplanır. Genetik algoritma ile optimizasyon süreci başlatılır ve optimum çözüm elde edilene kadar işleme devam edilir. Tasarım optimizasyonu prosedürünü tanımlayan akış diyagramı Şekil 5.2’de verilmiştir.

Motorun performansının bulunması için, eşdeğer devre parametreleri ve boyutlarının hesaplanması gerekir. Parametrelerin doğru hesaplanmasında eşdeğer devrenin uygun seçilmesi önemli bir etkindir. Bu çalışmada kullanılan bazı metot ve yaklaşımlarda Boduroğlu (1988), Alger (1965), Singh (1982) ve Veinott (1959)’ un kitaplarından istifade edilmiştir.



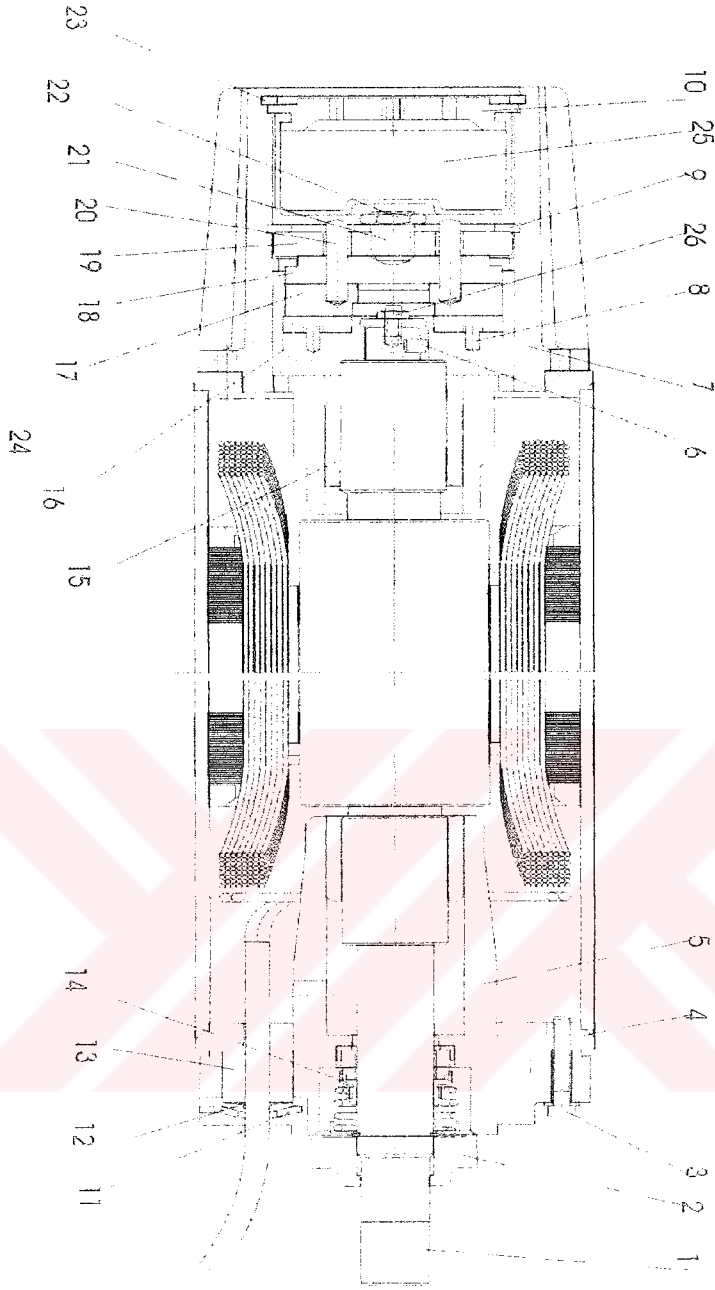
Şekil 5.2 Motor tasarım optimizasyonu akış diyagramı

5.4.1 Dalgıç asenkron motorlar

Dalgıç Asenkron Motorlar (DASM), asenkron motorların özel bir tipi olup, tasarımı ve özellikleri biraz farklılık göstermektedir. DASM'lar, dalgıç pompa ile birlikte su içerisinde çalıştığından motorun soğutulması, hava yerine su ile yapılmaktadır. Bu yüzden stator ve rotor akım yoğunlukları oldukça yüksektir. Yüksek güçteki dalgıç asenkron motorların stator sargılarının çok iyi yalıtılması gerektiğinden, vernikli tel yerine PVC izolasyonlu tel kullanılmaktadır. Dalgıç motorun içinin, hava ile teması tamamen kesilmiştir. Sargılarda ve kısa devre sincap kafesli rotorda oluşan ısı, motorun içine dökülen yağ ya da gliserin ile uzaklaştırılmaktadır. Böylece motorun dönen kısımlarının da yağlanması sağlanmış olmaktadır. Şekil 5.3'de DASM'nin kesiti görülmektedir.

Normal ASM'lerde, motor çapı ile boyu belli bir oranda değişirken DASM'lerde motor çapı sabit kalır ancak motor boyu uzatılabilir. Güç artışı sağlamak için motor boyunun aşırı uzatılması, mekanik ve imalat yönünden bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Örneğin; motor boyu aşırı uzun olduğundan, yataklama ve bobinlerin oyuklara yerleştirilmesi oldukça zordur. DASM'lerde hava aralığının büyük değerlerde olması, mıknatıslanma akımının daha büyük olmasına dolayısıyla güç faktörünün düşmesine neden olmaktadır.

Dalgıç motorun rotor ağırlığı, motorun alt kısmına yerleştirilmiş olan karbon yataklar tarafından taşınmaktadır. Rotor dönmeye başladığı andan itibaren, karbon arasına giren yağın veya gliserinin ince bir film tabakası oluşturması sonucu sürtünme en aza indirgenmektedir. Karbon yataklar, genişleme diyaframı aracılığıyla kuyudaki su basıncı ile motor içerisinde bulunan sıvının basıncı arasında oluşan basınç farkını dengelemektedir. Maksimum sızdırmazlığın sağlanması ve katı maddelerin motora girmemesi için Mekanik keçe (Karbon/Seramik) kullanılmaktadır. Radyal yataklarda yatak burçları; karbon, mil burçları; dış yüzeyi sert krom kaplanmış yüksek mukavemetli çelik; aksel (Mitchell) yatak ise karbon ve sertleştirilmiş paslanmaz çelik malzemeden imal edilmektedir. Gücü 7.5 kW' a kadar olan DASM'lara "direkt", 11 kW ve daha büyük güçte olan DASM'lara "yıldız-üçgen" yol verilmektedir.



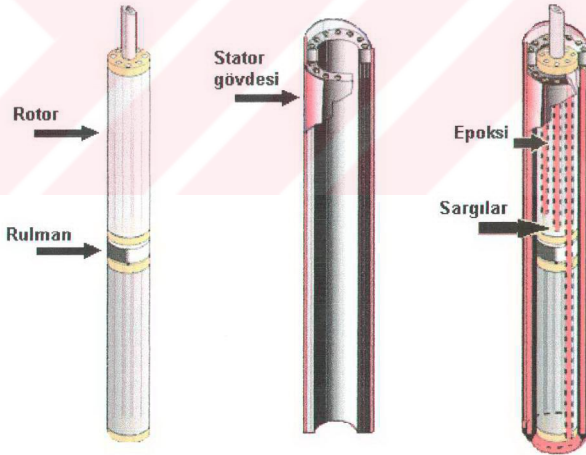
Şekil 5.3 Dalgıç Asenkron Motorun kesiti

- | | | |
|------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1 Rotor mili | 10 Motor alt kapağı | 19 Disk ayar plantesi |
| 2 Sızdırmazlık lastiği | 11 Sıktırma pulu | 20 Disk merkezlenme pimi |
| 3 Sabitleme vidası | 12 Pul | 21 Disk ayar plen. Vidası |
| 4 Üst flanş | 13 Kablo sız. elemanı | 22 Disk ayar plen. somunu |
| 5 Motor üst yatak | 14 Mekanik saltmastra | 23 Motor alt kapak segmanı |
| 6 Silindirik kama | 15 Radyal karbon yatak | 24 Eksenel karbon |
| 7 Motor alt yatağı | 16 Eksenel karbon yatak | 25 Diyafram |
| 8 Merkezlenme pimi | 17 Motor disk | 26 Eksenel karbon yatak |
| 9 İç segman | 18 Motor disk tutucu | sabit vidası |

Standart DASM'ler 30 °C ve daha düşük su sıcaklıklarında çalışmak üzere tasarlanmaktadır. Ancak yüksek sıcaklıklarda çalışabilen dalgiç motorlarda mevcuttur. Bunlar genelde petrol kuyularında kullanılmak için geliştirilmiştir. Daha yüksek sıcaklıklara dayanabilecek pahalı malzemeler kullanılarak üretilen bu motorlar, 140 °C sıcaklığa kadar kullanılabilir. Bu motorların üzerinde motor gövdesinden daha büyük bir sızdırmazlık ve genişleme bölümü vardır. Büyük güçlü olan bu tip motorlar, iletkenlerdeki kayıpları azaltmak için yüksek gerilimli olarak üretilirler (380-5000 V).

API standartlarına göre açılmış kuyulara girebilmesi için motor dış çapları 89-190 mm. arasında yapılmaktadır. Rotorlar genellikle 300-600 mm uzunlukta olup, gücü arttırmak için motorlar birbirine Şekil 5.4'deki gibi eklenmektedir. Örneğin, 300 kW gücünde bir motorun uzunluğu 9 metre civarındadır. 550 kW gücündeki bir tandem motorun uzunluğu 27 m olmaktadır.

Motorların soğutulması için motor dışından geçen akışkan hızının 0.3 m/s'den daha fazla olması sağlanmalıdır



Şekil 5.4 DASM görünümü

DASM'lar dalgıç pompalarla akuple edilerek kullanılmaktadır. Dalgıç pompaların, uzun milleri bulunmadığı için bağıl uzama, bir problem teşkil etmez. Pompaların basma yüksekliklerinin gereğinden fazla olması halinde pompalarda oluşan aksel kuvvetin yönü, yukarıya doğru olmaktadır. Bu durumda motorun içinde bulunan ters yöndeki aksel yük yatağı, bir kaç dakika içerisinde görevini yapamaz hale gelmekte ve motoru arızalandırmaktadır. Pompaların aksel yüklerini azaltmak için de çarklara etki eden aksel hidrolik kuvvetlerin dengelenmesi gerekir. Belirli bir debi için dengelenen çarklar, tasarım debisinden daha fazla debide çalıştırıldıkları takdirde yukarı doğru, tasarım debisinden daha az debilerde çalıştırılırlarsa aşağı doğru itilirler. Pompanın girişinden önce gaz ayırıcı bölüm, açığa çıkan gazların pompaya girişini önleyerek pompanın sağlıklı çalışmasını sağlamaktadır.

Düşey milli türbin tipi pompaların kolon milinde meydana gelen sürtünme, titreşim ve sarsıntılardan dolayı verimleri düşüktür. Ayrıca montaj zorluğu ve mekanik arızaların çok fazla meydana gelmesi dalgıç pompaların kullanımını yaygınlaştırmıştır. Dalgıç pompaların ilk yatırım maliyeti düşey milli türbin tipi pompalara göre yüksek olmakla beraber işletme masrafları oldukça düşüktür.

5.4.2 Ana boyutların bulunması

Dalgıç asenkron motorun stator iç çapı aşağıdaki gibi yazılır.

$$D_i = \sqrt{\frac{P_{sn}}{C.L_i.n}} \quad (5.5)$$

Burada P_{sn} sanal güç, L_i etkin stator uzunluğu, C faydalanma katsayısı ve n senkron devir sayısıdır. C faydalanma katsayısına "Esson Güç Katsayısı" da denir. Makinadan ne derece faydalanıldığını gösteren bu değer, makinanın birim hacminden bir dakikada alınabilecek enerjiyi vermektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \xi_1 B_{\delta 1} 10^{-3} \left[\frac{\text{kVA.dakika}}{\text{m}^3} \right] \quad (5.6)$$

Hacimsel enerji yoğunluğunun bir ölçüğü olan C ; döndürme momenti M_{di} ile döndürme kuvveti σ ' dan elde edilir. σ makinaı döndürmeye çalışan özgül çevre kuvveti olup, Newton olarak stator oluğu yüzeyinin 1 cm^2 'sindeki kuvveti verir ve aşığıdaki bağıntı ile hesaplanır (Boduroğlu 1988).

$$\sigma = \frac{M_{di}}{\frac{\pi}{2} D_i^2 L_i} \left[\frac{N}{\text{cm}^2} \right] \quad (5.7)$$

Burada nominal döndürme momenti M_{di} (Ncm), D_i (cm) ve L_i (cm) olarak alınmıştır.

Kutup adımı τ_p , makinanın kutup başına düşen gücünü vermektedir ve aşığıdaki gibi ifade edilir.

$$\tau_p = \frac{\pi x_4}{2p} \quad (5.8)$$

Gerçek stator saç paketinin toplam uzunluğu L_{topl} , etkin saç paketi uzunluğundan büyüktür. Normal asenkron motorlarda soğutmanın daha etkili olması için 16 cm 'den uzun saç paketlerinde radyal soğutma kanalları açılır. Bu soğutma kanallarının genişliği b_k , genellikle 10 mm bazen de 15 mm olarak alınır. Kanal sayısı z_k ile gösterilirse değişik stator uzunluğu için kanal sayısı aşığıdaki yöntemle bulunur.

Stator uzunluğu 16 cm 'den başlamak üzere 20 cm de bir, 24 cm de iki ve 28 cm de üç kanal açılır. 32 cm ve bunun üstündeki stator uzunluklarında kanal sayısı aşığıdaki bağıntıdan bulunur.

$$z_k \approx \frac{L_{topl} - 5}{6} \quad (5.9)$$

Denklem (5.9)'da L_{topl} , cm olarak yazılmalıdır. Stator ve rotordaki radyal soğutma kanalları birbirlerine nazaran kaydırılmış veya kaydırılmamış olabilir.

δ hava aralığı genişliği ve b_{k1} ile b_{k2} stator ve rotor saç paketlerindeki radyal soğutma kanal genişlikleri ve z_{k1} ile z_{k2} de kanal sayıları olduğuna göre, kanalları kaydırılmamış makinanın L_{topl} endüvi uzunluğu aşığıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$L_{topl} = x_2 + \frac{1}{2}(z_{k1} b'_{k1} + z_{k2} b'_{k2}) \quad (5.10)$$

$$b'_{k1} = b_{k1} - \frac{5b_{k1}}{5 + \frac{b_{k1} + b_{k2}}{\delta}}$$

$$b'_{k2} = b_{k2} - \frac{5b_{k2}}{5 + \frac{b_{k1} + b_{k2}}{\delta}}$$

Burada; b'_{k1} ve b'_{k2} kanal genişliklerinin indirgenmiş değerleri olup, makina uzunluğu bu genişliklerin toplamı kadar kayba uğrar.

Radyal kanalların kaydırılmış olması durumunda ise endüvinin L_{topl} uzunluğu aşağıdaki gibi hesaplanır (Boduroğlu 1988).

$$L_{topl} = x_2 + (z_{k1} b'_{k1} + z_{k2} b'_{k2}) \quad (5.11)$$

$$b'_{k1} = b_{k1} - \frac{5b_{k1}}{5 + \frac{b_{k1} + b_{k2}}{\delta}}$$

$$b'_{k2} = b_{k2} - \frac{5b_{k2}}{5 + \frac{b_{k1} + b_{k2}}{\delta}}$$

şeklindedir.

5.4.3 Hava aralığı ve Carter katsayısı

Hava aralığı, mekaniksel ve elektriksel özellikler dikkate alınarak uygun seçilmelidir. Hava aralığının küçük seçilmesi, mıknatıslanma akımı ve güç faktörünü olumlu yönde etkiler. Büyük seçilmesinin ise ilave demir kayıplarının küçültülmesi, gürültünün azaltılması gibi olumlu etkileri vardır. Hava aralığının büyük seçilmesi, verimi pek fazla etkilememektedir.

Stator ve rotor oluklarının geometrik yapısı, hava aralığı genişliğini Carter Faktörü kadar artırarak hava aralığı relüktansının artmasına neden olur (Singh 1982). Bu katsayı ilk kez Carter tarafından bulunduğu için “Carter Faktörü” adını almıştır. Motor reaktansı hesaplamalarında önemli bir etkiye sahip olan Carter faktörü, Stator ve rotor için aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır (Veinott 1959).

$$k_{c1} = \frac{\tau_{01}(5x_7 + w_{10})}{\tau_{01}(5x_7 + w_{10}) - w_{10}(0,5x_7 + w_{10})} \quad (5.12)$$

$$k_{c2} = \frac{\tau_{02}(5x_7 + w_{20})}{\tau_{02}(5x_7 + w_{20}) - w_{20}(0,5x_7 + w_{20})} \quad (5.13)$$

Burada x_7 hava aralığı, w_{10} ve w_{20} stator ve rotor oluk ağzı genişliği τ_{01} ve τ_{02} stator ve rotor oluk adımıdır. Stator ve rotor oluk adımları aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\tau_{01} = \frac{\pi x_4}{n_1} \quad (5.14)$$

$$\tau_{02} = \frac{\pi x_4}{n_2} \quad (5.15)$$

Burada; x_4 stator iç çapı, n_1 ve n_2 sırasıyla stator ve rotor oluk sayısıdır.

5.4.4 Olukların boyutlandırılması ve iletken uzunluğu

Oluk boyutları, stator iç çapı D_i ile oluk sayısına bağlıdır. Büyük güçlü makinalarda, ağzı açık stator olukları kullanılırken alçak gerilimli küçük ve orta güçteki makinalarda, ağzı yarı kapalı olan oluklar kullanılır.

Oluk yüksekliğinin uygun seçilmemesi makinanın verebileceği güç üzerine olumsuz etki yapar. Örneğin; küçük güçlü makinalarda oluk yüksekliğinin büyük seçilmesi, stator boyunduruk yüksekliği ile kutup adımı küçültür ve dolayısıyla stator iç çapı D_i küçülür. Denklem (5.5)'den görüldüğü gibi D_i 'nin küçülmesiyle makinanın verebileceği güç de küçülür. Diğer taraftan oluk yüksekliğinin küçük seçilmesi, oluk hacminin küçülmesine ve bununla birlikte çevre akım yoğunluğu A_1 'in de küçülmesine yol açacaktır. Buda makinanın yüklenme kabiliyetinin azalması demektir. Bu yüzden oluk yüksekliği seçilirken en uygun olan değer seçilmelidir.

Oluk genişliği w_s , oluk adımı τ_{01} 'e bağlıdır. Genel olarak oluk adımının yarısı dişe ve geriye kalan yarısı, içine iletkenleri alacak oluğa ayrılır.

Stator sargısının ortalama iletken uzunluğu, dolayısıyla yarı sarım uzunluğu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L_{ut} = f_{L_{topl}}(x_2) + b_1 + b_2 + 2c + \frac{y \cdot \tau_{om}}{\sqrt{\tau_{om}^2 - (b_b + a)^2}} + \pi(r + \frac{h_b}{2}) + 4 \text{ [cm]} \quad (5.16)$$

Burada;

- b_2 : Uzun kılıfın baskı parmaklarından itibaren dışarı taşma miktarı [cm]
- b_1 : Kısa kılıfın baskı parmaklarından itibaren dışarı taşma miktarı [cm]
- c : Baskı parmağı kalınlığı [cm]
- τ_{om} : Oluk ortasındaki oluk adımı [cm]
- y : Oluk ortasından ölçülmüş olan bobin genişliği [cm]
- b_b : Yalıtılmış olan bobin başı genişliği [cm]
- a : Bobin başında bobinler arasındaki hava aralığı [cm]
- r : Bobin başı kıvrımının yarı çapı [cm]
- h_b : Bobin yüksekliği [cm]

5.4.5 Stator sargı direnci

Stator sargısının toplam iletken sayısı, yarı sargı uzunluğu ve iletken kesiti bulunduğundan sonra direnç, aşağıdaki bağıntıdan bulunur.

$$R_1 = \frac{Z_1 L_{ut}}{m_1 q_{cu1} \lambda_{cu}} \text{ [ohm]} \quad (5.17)$$

Burada Z_1 ; statorun toplam iletken sayısı olup $Z_1 = 2m_1 x_1$ 'den ve q_{cu1} mm² olarak faz sargısı iletken kesiti olup $q_{cu1} = \pi(R_i/2)^2$ 'den bulunur. L_{ut} ; metre olarak ortalama faz sargısı iletken uzunluğu, m_1 ; faz sayısı ve λ_{cu} ; m/mm²Ω olarak bakırın özgül iletkenliğidir.

Çizelge 5.1'de x_1 ; bir fazın sarım sayısı ve x_2 ; stator demir uzunluğu olarak verilmişti. Buna göre stator sargı direnci, tasarım parametreleri kullanılarak aşağıdaki şekilde yeniden yazılır.

$$f_{R_1}(x_1, x_2) = \frac{f_{Z_1}(x_1) f_{L_{ut}}(x_2)}{m_1 q_{cu1} \lambda_{cu}} \quad (5.18)$$

Bakırın 20 °C'deki özgül iletkenliği 57 m/mm²'dir. Motorun nominal çalışma sargı sıcaklığı 65 °C kabul edilirse bakırın özgül iletkenliği aşağıdaki formül kullanılarak 48,45 m/mm²Ω olarak hesap edilir.

$$\lambda_{t^0} = \lambda_{20^0} \frac{20 + T}{t^0 + T} \quad (5.19)$$

Burada bakır için T=235 ve t⁰ çalışma sıcaklığıdır.

5.4.6 Rotor direnci

Sincap kafesli asenkron motorun rotor direnci, rotor çubukları ve kısa devre halkalarının dirençleri toplamından meydana gelmektedir. Buna göre rotor direnci aşağıdaki bağıntı kullanılarak belirlenir.

$$R_2 = \frac{\ell_{\text{çk}}}{q_{\text{çk}} \lambda_{\text{çk}}} + \frac{D_h n_2}{2\pi p^2 q_h \lambda_h} \quad (5.20)$$

Burada $\lambda_{\text{çk}}$; çubukların iletkenliği ve λ_h ; halkaların iletkenliğidir. Doğal olarak çubuk ve halkaların aynı iletken yapılmaması halinde iletkenlikler birbirine eşit olacaktır. n_2 rotor oluk sayısını, D_h halka çapını, $q_{\text{çk}}$ ve q_h sırasıyla çubuk ve kısa devre halkasının kesitlerini göstermektedir.

$$\ell_{\text{çk}} = k_{\text{ç}} x_2, \quad q_{\text{çk}} = \pi \left(\frac{x_9}{2} \right)^2 \quad (5.21a)$$

$$q_h = h_h x_3, \quad D_h = x_4 - (x_3 + 2x_7) \quad (5.21b)$$

Burada, $k_{\text{ç}}$; rotor çubuğu katsayısı h_h ; kısa devre halkası yüksekliğidir. Buna göre denklem (5.20) tasarım parametreleri kullanılarak yeniden düzenlenirse;

$$f_{R_2}(x_2, x_3, x_4, x_7, x_9) = \frac{f_{\ell_{\text{çk}}}(x_2)}{f_{q_{\text{çk}}}(x_9) \lambda_{\text{çk}}} + \frac{f_{D_h}(x_3, x_4, x_7) n_2}{2\pi p^2 f_{q_h}(x_3) \lambda_h} \quad (5.22)$$

olur. Rotor direncinin statora çevrilmesinde kullanılan indirgeme faktörü aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$\ddot{u}_r = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 \xi_1}{w_2 \xi_2} \right)^2 \quad (5.23)$$

Burada; m_2 , rotor fazı ve n_2 , rotor oluk sayısıdır. Stator ve rotorun bir fazının sarım sayısı sırasıyla w_1 , w_2 ve sargı faktörleri de ξ_1 , ξ_2 'dir. Eğer rotor olukları eğik olursa ; denklem (5.23) deki $w_2 \xi_2$ ifadesi, $f_{egik} = \frac{\sin b \pi / 2 \tau_p}{b \pi / 2 \tau_p}$ ifadesi ile çarpılarak yerine yazılır. Burada $b \pi / 2 \tau_p$, eğik oluşun başlangıç ve sonu arasındaki radyan cinsinden faz farkıdır.

Bu çalışmada primere indirgeme faktörü için $w_1=x_1$, $m_2=N_2$, $w_2=1/2$ ve $\xi_2=1$ kabul edilerek aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$\ddot{u}_r = 4 \frac{m_1}{N_2} (x_1 \xi_1)^2 \quad (5.24)$$

5.4.7 Rotor akımı ve kayma

Rotorun bir çubuğunda indüklenen emk ;

$$E_{\phi k} = (U_1 - I_m X_{\sigma 1}) \frac{w_2 \xi_2}{w_1 \xi_1} [V] \quad (5.25)$$

olarak ifade edilir. Burada; $w_2 = 1/2$, $\xi_2=1$, $(U_1 - I_m X_{\sigma 1})$ yerine $U_1 \frac{1}{1 + \sigma_1}$ yazılarak denklem aşağıdaki gibi yeniden düzenlenir.

$$E_{\phi k} = U_1 \frac{1}{1 + \sigma_1} \frac{1}{2 p q_1 z_{o1} \xi_1} \quad (5.26)$$

Burada; U_1 faz gerilimi, σ_1 heyland dağılma faktörü, q_1 kutup ve faz başına düşen oluk sayısı, z_{o1} bir oluktaki iletken sayısıdır. Çubuk akımı;

$$I_{\phi k} \approx \frac{P_m + P_{Kstme} + P_{Kyüz} + P_{Kpulz}}{n_2 E_{\phi k} (1-s)} \quad (5.27)$$

Burada; P_m ; motorun milinden alınan güç, P_{Kstme} ; sürtünme kayıpları, $P_{Kyüz}$; yüzeysel kayıplar, P_{Kpulz} ; salınım kayıplarıdır. P_{cu2} , rotor bakır kayıpları olmak üzere kayma aşağıdaki denklemden bulunur.

$$S = \frac{P_{cu2} + P_{Kstme}}{P_m + P_{cu2} + P_{Kstme}} \quad (5.28)$$

5.4.8 Hava aralığı, dış ve boyunduruk magnetik indüksiyonları

Hava aralığı magnetik indüksiyonu aşağıdaki bağıntı kullanılarak bulunur.

$$B_\delta = \frac{60\sqrt{2} P_{sn}}{\pi^2 \xi_1 A_1 D_i^2 L_i n} \quad (5.29)$$

Çevre akım yoğunluğu $A_1 = \frac{Z_1 I_{ln}}{\pi D_i}$ denklem (5.29)'da yerine yazılırsa;

$$B_\delta = \frac{60\sqrt{2} P_{sn}}{\pi I_{ln} \xi_1 Z_1 D_i L_i n} \quad (5.30)$$

olur ve tasarım değişkenleri kullanılarak aşağıdaki gibi yeniden düzenlenir.

$$f_{B_\delta}(x_1, x_2, x_4) = \frac{60\sqrt{2} P_{sn}}{\pi I_{ln} \xi_1 f_{Z_1}(x_1) x_4 x_2 n} \quad (5.31)$$

Stator dağılma akısı, statorun boyunduruk ve dişlerinden geçtiğinden, kuvvet çizgileri yolunun bir kısmı için daha büyük akılar söz konusu olacaktır. Hesaplamayı basitleştirmek için $X_{\sigma 1}$ reaktansından dolayı meydana gelen gerilim ihmal edilir, uç gerilimi U_1 'e tekabül eden magnetik akı kullanılarak hesaplar yapılır. Stator ve rotor magnetik indüksiyonları aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanır.

Stator için;

$$\left. \begin{aligned} B_{d1dip} &= \frac{L_i \tau_{ol}}{k_{Fe} L b_{d1dip}} B_\delta (1 + \sigma_1) \\ B_{d1ort} &= \frac{L_i \tau_{ol}}{k_{Fe} L b_{d1ort}} B_\delta (1 + \frac{2}{3} \sigma_1) \\ B_{d1bas} &= \frac{L_i \tau_{ol}}{k_{Fe} L b_{d1bas}} B_\delta (1 + \frac{1}{3} \sigma_1) \end{aligned} \right\} \quad (5.32)$$

Rotor için;

$$\left. \begin{aligned} B_{d2dip} &= \frac{L_i \tau_{o2}}{k_{Fe} L b_{d2dip}} B_\delta \\ B_{d2ort} &= \frac{L_i \tau_{o2}}{k_{Fe} L b_{d2ort}} B_\delta \\ B_{d2bas} &= \frac{L_i \tau_{o2}}{k_{Fe} L b_{d2bas}} B_\delta \end{aligned} \right\} \quad (5.33)$$

Burada; L_i ; stator aktif demir uzunluğunu, k_{Fe} ; demir doldurma faktörünü, b_{d1} stator dış genişliklerini, b_{d2} rotor dış genişliklerini τ_{o1} , τ_{o2} sırasıyla stator ve rotor oluk adını göstermektedir.

Boyunduruktaki magnetik akı ϕ , stator saç paketinin aksiyal yöndeki saf demir uzunluğu $k_{Fe} \cdot L$, boyunduruk yüksekliği h_j olmak üzere stator ve rotora ait boyunduruktaki magnetik indüksiyon aşağıdaki gibi elde edilir.

$$B_{j1} = \frac{\phi (1 + \sigma_1)}{2k_{Fe} L h_{j1}} \quad (5.34)$$

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2k_{Fe} L h_{j2}} \quad (5.35)$$

Ortalama stator boyunduruğu kuvvet çizgisi yolu uzunluğu aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır

$$\ell_{j1} = \frac{\pi(D_a - h_{j1})}{2p} \quad (5.36)$$

Burada D_a stator dış çapıdır. Ortalama rotor boyunduruğu kuvvet çizgisi yolu uzunluğu;

$$\ell_{j2} = \frac{\pi(D_{riç} + h_{j2})}{2p} \quad (5.37)$$

Devresini stator ve rotor üzerinden tamamlayan esas alana ait ortalama kuvvet çizgisi yolunun toplam magnetik gerilimi;

$$\theta_{\text{tam devre}} = \theta_1 + \theta_{j1} + \theta_{j2} \quad (5.38)$$

$$\theta_i = 2\theta = 2(\theta_s + \theta_{d1} + \theta_{d2}) \quad (5.39)$$

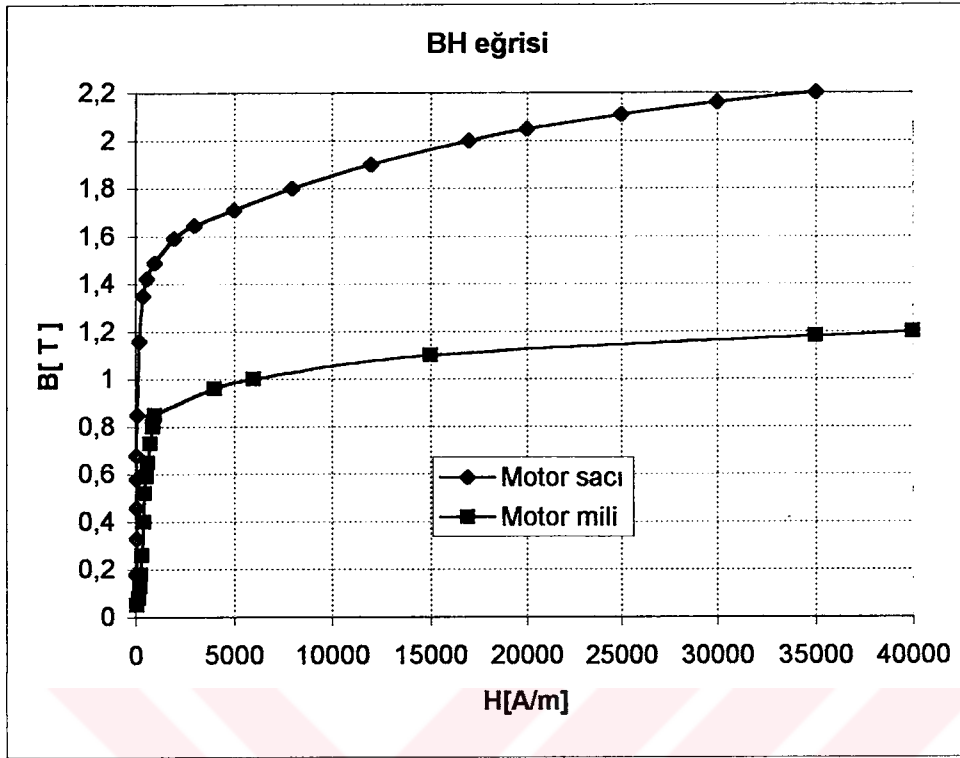
$$\theta_{\text{tam devre}} = \sum \theta = 2\theta_s + 2\theta_{d1} + 2\theta_{d2} + \theta_{j1} + \theta_{j2} \quad (5.40)$$

Çizelge 5.3’de bu çalışmada kullanılan motorlara ait malzeme mıknatıslanma değerleri ve Şekil 5.5’de bu değerlere ilişkin BH eğrisinin değişimi verilmiştir. Mıknatıslanma akımının efektif değeri için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$I_m = \frac{p \sum \theta}{0,9 m_l w_l \xi_l} [A] \quad (5.41)$$

Çizelge 5.3 Motor sacının ve milinin BH değerleri

Sac BH değerleri		Mil BH değerleri	
B [T]	H [A/m]	B [T]	H [A/m]
0.18	40	0,05	80
0.33	50	0,08	160
0.46	60	0,13	220
0.58	70	0,18	280
0.68	80	0,26	340
0.85	90	0,4	420
0.85	100	0,52	480
1.16	200	0,59	560
1.35	400	0,65	640
1.422	600	0,73	760
1.488	1000	0,8	880
1.59	2000	0,82	920
1.644	3000	0,85	1000
1.71	5000	0,96	4000
1.80	8000	1	6000
1.9	12000	1,1	15000
2	17000	1,18	35000



Şekil 5.5 Motor sacının ve milinin mıknatıslanma (BH) eğrisi

5.4.9 Stator ve rotor reaktansı

Stator sargı reaktansı; oluk dağılma reaktansı $X_{1\sigma o}$, bobin başı dağılma reaktansı $X_{1\sigma bb}$ ve hava aralığı veya çift halkalanma dağılma reaktansı $X_{1\sigma ha}$ 'nın toplamından oluşmaktadır.

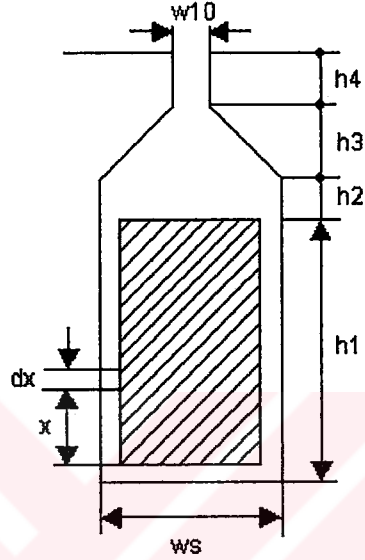
Rotor sargı reaktansı da aynı şekilde, oluk dağılma reaktansı $X_{2\sigma o}$, bobin başı dağılma reaktansı $X_{2\sigma bb}$ ve hava aralığı veya çift halkalanma dağılma reaktansı $X_{2\sigma ha}$ 'nın toplamından oluşmaktadır. Bu reaktanslara ilişkin ifadeler aşağıdaki gibi verilebilir.

$$X_{1\sigma} = X_{1\sigma o} + X_{1\sigma bb} + X_{1\sigma ha} \quad (5.42)$$

$$X_{2\sigma} = X_{2\sigma o} + X_{2\sigma bb} + X_{2\sigma ha}$$

5.4.9.1 Oluk dağılma reaktansı

Bu çalışmada kullanılan stator oluğu Şekil 5.6'da görülmektedir. İçerisinden akım geçen oluğun dağılma akısına ait kuvvet çizgileri, bir kısmı saç paketinden ve bir kısmı da oluk içinden geçerek devrelerini tamamlarlar.



Şekil 5.6 Stator yarı kapalı oluğu

z_o sarım sayısındaki bir bobinin oluk çapraz akısına tekabül eden endüktansı;

$$\left. \begin{aligned} L_{oo} &= \sum z_x \phi_x = \sum z_x 0,4\pi z_x 2\ell_o \lambda_2 \\ L_{oo} &= 0,8\pi \sum z_x^2 \lambda_x = 0,8\pi \ell_o z_o^2 \lambda_o \end{aligned} \right\} \quad (5.43)$$

Burada, $\lambda_o = \frac{1}{z_o^2} \sum z_x \lambda_o$ olup, her bir kuvvet çizgisinin içindeki z_o ,

iletkeninin tümü ile halkalanmış olan bir oluğun her bir cm uzunluğunun, magnetik iletkenlik katsayısıdır. Buna *oluk sabiti* de denebilir. Her bir kutbunda q oluğu bulunan bir sargı kolu için indüktans, aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$L_{oo} = 0,8\pi z_o^2 p q \ell_o \lambda_o 10^{-8} [H] \quad (5.44)$$

Bir sargı kolundaki toplam sarım sayısı $w_a = z_o p q$ olduğuna göre;

$$L_{\sigma o} = 0,8\pi \frac{w_a^2}{pq} \ell_o \lambda_o 10^{-8} [H] \quad (5.45)$$

olur ve bir faz sargısının oluk dağılma reaktansı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$X_{1\sigma o} = 2\pi f L_{\sigma o} = 1,6\pi^2 f \frac{w_a^2}{p} \ell_o \frac{\lambda_o}{q} 10^{-8} = 1,6\pi^2 f \frac{w_a^2}{p} \Lambda_o 10^{-8} [\Omega] \quad (5.46)$$

Burada; $\Lambda_o = \frac{\ell_o \lambda_{ol}}{q}$ olup ℓ_o etkin uzunluğundaki oluğun magnetik iletkenliğidir.

Değişik oluk geometrilerine göre çoğu araştırmacılar (Alger 1965, Singh 1982, Puncstein 1954, Vickers 1950) oluk sabiti hesapları yapmışlardır. Bu çalışmada Singh (1982)'nin yaptığı hesaplamalar kullanılmıştır. Buna göre Şekil 5.6'daki stator yarı kapalı oluğunun sabiti;

$$\lambda_{ol} = \frac{h_1}{3w_s} + \frac{h_2}{w_s} + \frac{h_3}{\left(\frac{w_s + w_0}{2}\right)} + \frac{h_4}{w_0} \quad (5.47)$$

olur ve stator oluk dağılma reaktansı tasarım parametreleriyle aşağıdaki gibi yazılır.

$$f_{X_{1\sigma o}}(x_1, x_2, x_5, x_6) = 1.6\pi^2 f \frac{f_{w_a}^2(x_1) f_{\Lambda_o}(x_2, x_5, x_6)}{p} \quad (5.48)$$

Şekil 5.7'de rotorun kapalı oluk geometrisi görülmektedir. Buna göre rotor oluk sabiti aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

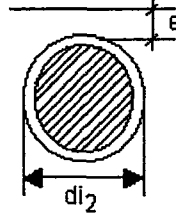
$$\lambda_{o2} = 0.66 + \frac{B_g e}{1.78 I z_o} \quad (5.49)$$

Burada z_o ; oluk içindeki iletken sayısı, I ; iletken akımı, e ; cm olarak geçit yüksekliği ve B_g 'de geçitteki magnetik indüksiyondur. Kısa devre kafesli rotorun $m_2=n_2$ ve $w_2=1/2$ için bir fazının yani her bir çubuğun şebeke frekansına çevrilmiş oluk dağılma reaktansı;

$$X_{2\sigma o} = 0,8\pi^2 f_1 \ell_{o2} \lambda_{o2} 10^{-8} [\Omega] \quad (5.50)$$

olarak bulunur. Oluk dağılma reaktansı tasarım değişkenleri kullanılarak aşağıdaki gibi yazılır.

$$f_{x_{2ro}}(x_1, x_2, x_4, x_8) = 0.8\pi^2 f_1 x_2 f_{\lambda_{o2}}(x_1, x_2, x_4, x_8) 10^{-8} \quad (5.51)$$



Şekil 5.7 Rotor kapalı oluğu

5.4.9.2 Bobin başı veya cephe bağlantısı dağılma reaktansı

Bobin başı dağılma reaktansının hesabı aşağıdaki bağıntı kullanılarak yapılmıştır.

$$X_{obb} = 1,6\pi^2 f w_a^2 p \Lambda_{bb} 10^{-8} \quad (5.52)$$

Bobin başı dağılma iletkenliği Λ_{bb} 'nin tam olarak hesaplanması hemen hemen imkansızdır, ancak yaklaşık olarak bulunabilir. Bunun nedeni, bobin başları şekilleri ve bunların yakınında bulunan komşu iletkenlerle, diğer faz sargıları ve demirin kuvvetli etkileri sonucunda karmaşık durum almasındandır (Boduroğlu 1988).

Nürnberg, imal edilmiş makinalar üzerinde yapılmış olan ölçüm sonuçlarından stator ve rotor sargılarının her ikisi için geçerli olan dağılma iletim değerlerini ve iletkenlik katsayılarını cetvel halinde vermiştir. Bu değerler Richter tarafından verilen değerlerle uyushmaktadır (Boduroğlu 1988). Bobin başı dağılma iletkenliği Λ_{bb} , bobin başı uzunluğu ℓ_{bb} ile iletkenlik katsayısı λ_{bb} 'nin çarpımına eşittir.

$$\Lambda_{bb} = \ell_{bb} \lambda_{bb} \quad (5.53)$$

Bobin başı dağılma iletkenliği tasarım parametreleriyle aşağıdaki gibi yazılır.

$$f_{x_{obb}}(x_1, x_2) = 1.6\pi^2 f f_{wa}^2(x_1) p f_{\lambda_{bb}}(x_2) 10^{-8} \quad (5.54)$$

5.4.9.3 Hava aralığı veya halkalanma dağılma reaktansı

Hava aralığı dağılma reaktansı, asenkron makinanın hava aralığında meydana gelen dağılma reaktansıdır. Buna “halkalanma dağılma reaktansı” denilmesinin nedeni, burada söz konusu dağılma çizgilerinden bir kısmının hem primer, yani stator sargısından, hem de sekonder, yani rotor sargısından geçerek devresini tamamlamasıdır. Hava aralığı dağılma reaktansı iki kısma ayrılır. Bunlardan biri halkalanma dağılması, diğeri dış başı dağılmasıdır. Asenkron makinalarda hava aralığının çok küçük olması nedeni ile çift halkalanma dağılmasının önemi, dış başı dağılmasına nazaran çok büyüktür. Senkron makinalarda hava aralığı büyük olduğundan bu durum tam tersidir. Hava aralığı reaktansı hesabında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$X_{ha} = 1.6\pi^2 f \frac{w_a^2}{p} \Lambda_{ha} 10^{-8} \quad (5.55)$$

$$\Lambda_{ha} = \tau_p L_i \frac{m}{\pi^2} \frac{1}{k_c k_d \delta} K \quad (5.56)$$

Burada, k_c ; Carter faktörü ve k_d ; doyma faktörüdür. K , yüksek harmonik gerilim katsayısı olup değeri m fazlı sargılarda aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K = \sum \left(\frac{\xi_v}{v} \right)^2 = \sum \left(\frac{\xi_{zv} \xi_{sv}}{v} \right)^2 = \sum \left(\frac{1}{v} \frac{\sin \frac{v\pi}{2m}}{q \sin \frac{v\pi}{2mq}} \sin v \frac{s}{\tau_p} \frac{\pi}{2} \right)^2 \quad (5.57)$$

Burada;

v ; harmonik derecesi

ξ_v ; toplam sargı faktörünün v ’ üncü harmoniği

ξ_{zv} ; sargı yayılma faktörünün v ’ üncü harmoniği

ξ_{sv} ; sargı kırılenme faktörünün v ’ üncü harmoniği

s ; kırılenme miktarı

olarak tanımlanır ve stator halkalanma reaktansı, tasarım parametreleri kullanılarak aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$f_{x_{ha}}(x_1, x_2, x_4, x_7) = 1.6\pi^2 f f_{wa}^2(x_1) p f_{\Lambda_{ha}}(x_2, x_4, x_7) 10^{-10} \quad (5.58)$$

Kısa devre kafesli rotorda her bir rotor fazı için halkalanma dağılma reaktansı, $m_2=n_2$ ve $w_2=1/2$ için;

$$X_{ha2} = 0.8\pi^2 \frac{f}{p} \Lambda_{ha2} 10^{-8} \text{ [ohm]} \quad (5.59)$$

Burada; Λ_{ha2} , halkalanma dağılma iletkenliği aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$\Lambda_{ha2} = \frac{Z_2}{2pm_1} \frac{m_1}{\pi^2} \frac{\tau_p L_i}{k_c k_d \delta} K_2 \quad (5.60)$$

$$K_2 = \sum_v \left(\frac{1}{\frac{Z_2}{2p} v \pm 1} \right)^2 \quad (5.61)$$

Rotor halkalanma reaktansı tasarım parametreleriyle aşağıdaki gibi yazılır.

$$f_{x_{ha2}}(x_2, x_4, x_7) = 0.8\pi^2 \frac{f}{p} f_{\Lambda_{ha2}}(x_2, x_4, x_7) 10^{-8} \quad (5.62)$$

5.4.10 Motor kayıpları

Motorda meydana gelen kayıplar genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Stator bakır kayıpları
- Rotor bakır kayıpları
- Demir kayıpları
- Rüzgar ve sürtünme kayıpları
- Rotor ve stator yüzey kayıpları

Stator ve rotor bakır kayıplarını azaltmak için stator iletken kesiti ve rotor çubuk kesitinin büyütülmesi gerekir. Fakat küçük rotor direnci, yol alma momentinin düşmesine sebep olacağı için belirli sınır değerlerde kalmasına dikkat edilmelidir.

Demir kayıpları, magnetik akı yoğunluğu ve frekansa bağlıdır. Rotordaki demir kaybı kayma frekansının çok küçük olmasından dolayı, statora göre oldukça düşüktür. Demir kayıplarının azaltılması için stator ve rotor dış şekillerinin optimize edilmesi gerekir.

Rüzgar ve sürtünme kayıpları, motor fanında ve yataklarında meydana gelmektedir. Tasarım esnasında çeşitli alternatif çözümler üretilerek bu kayıplar azaltılabilir. Rüzgar ve sürtünme kayıpları genel olarak çıkış gücünün %1-2 si olarak kabul edilir.

Stator ve Rotor yüzey kayıplarını etkileyen bir çok faktör vardır ve oldukça karmaşıktır. Bu kayıplara, oluk şekilleri ve doyum nedeniyle dalga şeklinin bozukluğu, ayrıca hava aralığındaki mekanik kusurlar sebep olmaktadır. Bunu hesaplamak ve ölçmek oldukça zor olduğundan, bu kayıplar genel olarak çıkış gücünün %1-2 si olarak kabul edilir. Burada asenkron motor kayıpları, boştaki kayıplar ve yükteki kayıplar olarak iki ana başlık altında incelenecektir.

5.4.10.1 Boşta çalışma kayıpları

Motorun boştaki kayıpları, demir kayıpları ve sürtünme kayıplarından oluşmaktadır. Demir kayıpları, sürtünme kayıplarına nazaran daha önemlidir. Dönen ve periyodik olarak yön değiştiren mıknatıslanma, aktif demir kısımlarında fuko ve histerezis kayıpları meydana getirir. Hava aralığı magnetik indüksiyonunda oluk ve dişlerin karşılıklı olarak sürekli yer değiştirmesinden dolayı salınımların meydana gelmesi, rotor ve statorda demir kayıplarının artmasına sebep olur. Salınımları bastırmak için, stator ve rotorda ağzı yarı kapalı olukları tercih etmek gerekir. Salınım sonucunda meydana gelen demir kayıpları şebekeden karşılanmaz. Makinanın miline mekanik fren olarak etki yaptığından, bu kayıplar rotor tarafından mekanik olarak karşılanmaktadır. Buna göre mekanik güç, rotor sargı kayıpları ile sürtünme kayıpları kadar daha küçük olacaktır. Ancak hesapları basitleştirmek amacı ile normal demir kayıplarına, bu kayıplar ilave edilerek şebekeden karşılandığı düşünülebilir (Boduroğlu 1988).

a) Demir kayıpları

Mıknatıslanma akımının sürekli yön değiştirmesinden dolayı saç paketinde meydana gelen demir kayıpları, histerezis ve fuko kayıplarından oluşur. Saniyede bir kg ağırlığındaki saç paketinde magnetik yön değiştirmeden dolayı açığa çıkan enerji;

$$P_{Fe} = \sigma_H \frac{f}{100} B^2 + \sigma_w \left(\frac{f}{100} \right)^2 B^2 \text{ [w/kg]} \quad (5.63)$$

olur. Bu bağıntıda birinci terim; histerezis kayıplarını, ikinci terim; fuko kayıplarını vermektedir. σ_H ve σ_w malzeme sabitleri olup saç kalınlığına bağlıdır.

b) Dişlerde meydana gelen demir kayıpları

Dişlerde periyodik mıknatıslanmanın oluşturduğu toplam histerezis kayıpları aşağıdaki denklemden bulunur.

$$P_{Hd} = \sigma_H (f/100) B^2 G_d \text{ [Watt]} \quad (5.64)$$

Burada G_d , dişlerin toplam ağırlığıdır. Dişlerdeki ortalama indüksiyon, B_{dort} alınarak bütün diş boyunca indüksiyonun sabit olduğu kabul edildiğinden dişlerdeki demir kaybının değeri bir miktar küçülmüş olur. Bu değer ihmal edilecek kadar küçük bir değerdir. Dişlerdeki fuko kayıpları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_{wd} = \sigma_w (f/100)^2 B^2 G_d \text{ [Watt]} \quad (5.65)$$

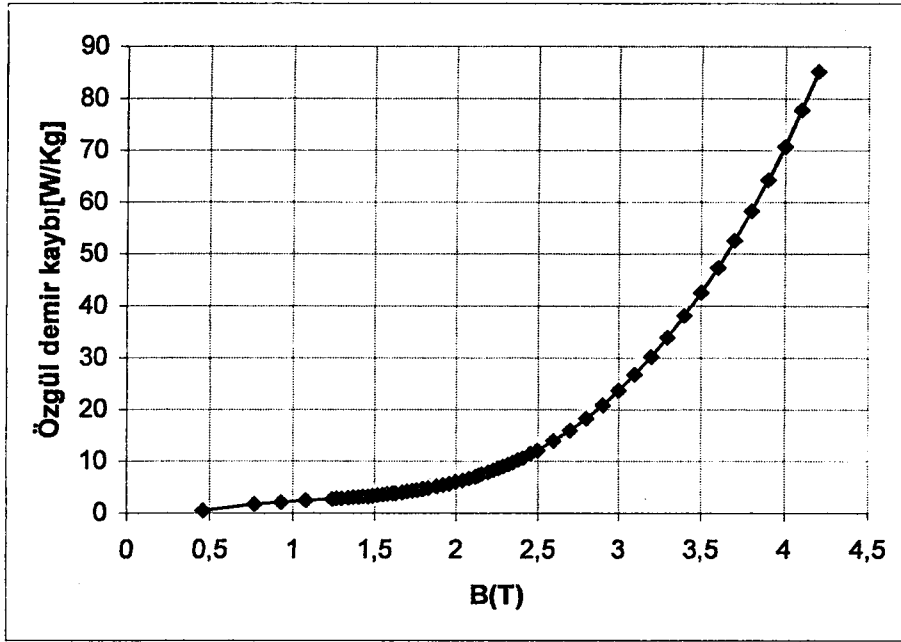
Denklem (5.65) bağıntısı, alan eğrisinin sinüs biçiminde olması halinde geçerlidir. Eğer alan eğrisi sinüsten farklı ise fuko kayıpları aşağıdaki oranda büyür.

$$k_{wd} = \frac{B_1^2 + 4B_2^2 + 9B_3^2 + \dots}{B_\sigma} \quad (5.66)$$

Özgül demir kaybının bilinmesi halinde dişlerin bir kilogramında meydana gelen demir kaybı aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır.

$$P_{Fed} = p_1 B_{dort}^2 \text{ [w/kg]} \quad (5.67)$$

Şekil 5.8'de özgül demir kaybının, magnetik indüksiyona bağlı olarak değişimi görülmektedir. Motorun stator ve rotorundaki magnetik indüksiyon dağılımına bağlı olarak oluşan özgül demir kaybı, Şekil 5.8'den belirlenir. Örneğin; motorun stator boyunduruğunda meydana gelen demir kaybı, boyunduruk ağırlığı ile özgül demir kaybının çarpımına eşittir. Motorun diğer kısımlarındaki demir kayıpları aynı şekilde hesaplanabilir.



Şekil 5.8 Motor sacı için özgül demir kaybı

c) Boyunduruktaki demir kayıpları

Boyunduruktaki toplam demir kayıpları dişlerde olduğu gibi, histerezis ve fuko kayıplarından oluşmaktadır ve aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$P_{Feb} = k[k_{Hb}\sigma_H(f/100) + k_{wb}\sigma_w(f/100)^2]B_b^2G_b \text{ [Watt]} \quad (5.68)$$

Burada k katsayısı genelde 1.3 civarındadır. k_{Hb} ve k_{wb} magnetik akının boyunduruk kesitine homojen olarak dağılmadığını gösteren düzeltme faktörleridir. Bunların değerleri boyunduruğun iç ve dış çapına ve çift kutup sayısına bağlı olarak değişir.

d) Yüzey kayıpları

Stator ve rotor oluklarında meydana gelen yüzey kayıpları sırasıyla aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$P_{ky1} = \frac{k_o}{2} \left(\frac{n_2 n}{10000} \right)^{1.5} \left(\frac{\tau_{o2} \beta'_2 k_{c2} B_\delta}{0,1} \right)^2 \pi D_i \frac{\tau_{o1} - w_{10}}{\tau_{o1}} k_{Fe} L_1 [\text{Watt}] \quad (5.69)$$

$$P_{ky2} = \frac{k_o}{2} \left(\frac{n_1 n}{10000} \right)^{1.5} \left(\frac{\tau_{o1} \beta'_1 k_{c1} B_\delta}{0,1} \right)^2 \pi D_r \frac{\tau_{o2} - w_{20}}{\tau_{o2}} k_{Fe} L_2 [\text{Watt}] \quad (5.70)$$

Burada; rotor oluk sayısı n_2 , devir sayısı n , stator oluk adımı τ_{o1} , hava aralığındaki magnetik akı B_δ 'dır. k_o sacın kalınlık ve cinsine bağlı bir faktördür. Ağzı açık endüvilerde 0.5 mm kalınlığındaki dinamo saçlarında yapılan deneysel araştırmalardan 2.5 olarak bulunmuştur. β , w_s/δ 'ye bağlı olarak değişen bir faktördür. w_s stator oluk genişliği ve δ hava aralığı genişliğidir. L_1 ve L_2 stator ve rotorun eksenel uzunluğudur.

e) Dış salınım kayıpları

Asenkron makinalarda dişlerin karşılıklı olarak periyodik yer değiştirmeleri, diş akısını da değiştirmektedir. Dişlerdeki bu alan değişimi ilave kayıplara yol açmaktadır, bu kayıplara “diş salınım kayıpları” denir. Stator ve rotordaki salınım kayıpları sırasıyla aşağıdaki gibi denklemlerden bulunur.

$$P_{kp1} = \frac{k_p}{2} \sigma_w \frac{1}{36} \left(\frac{n_2 n}{10000} \frac{B_{p1}}{0.1} \right)^2 G_{d1} [\text{Watt}] \quad (5.71)$$

$$P_{kp2} = \frac{k_p}{2} \sigma_w \frac{1}{36} \left(\frac{n_1 n}{10000} \frac{B_{p2}}{0.1} \right)^2 G_{d2} [\text{Watt}] \quad (5.72)$$

Burada $n_2.n$ stator dişlerindeki salınım frekansına eşittir. Rotor dişlerindeki salınım frekansı $n_1.n$ 'dir. σ_w , malzeme sabiti, sacın kalınlığına bağlıdır. k_p , saçların işlenmesi nedeniyle fuko kayıplarındaki artmayı kapsayan bir faktör olup değeri 1.8-2 arasında değişir. B_{p1} ve B_{p2} indüksiyon salınımının genliğidir ve değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2\tau_{o1}} B_{d1ort}$$

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2\tau_{o2}} B_{d2ort}$$
(5.73)

Burada B_{d1ort} , B_{d2ort} , stator ve rotordaki ortalama diş indüksiyonudur. w_{01}, w_{02} stator ve rotor oluk ağız genişliğı, δ hava aralığı genişliğı olmak üzere, γ_1 ve γ_2 aşağıdaki denklemlerden bulunur.

$$\gamma_2 = \frac{(w_{02}/\delta)^2}{5 + w_{02}/\delta}$$

$$\gamma_1 = \frac{(w_{01}/\delta)^2}{5 + w_{01}/\delta}$$
(5.74)

f) Sürtünme kayıpları

Hava ve yatak sürtünmesinden meydana gelen kayıplar, makinanın yapılış ve havalandırma şekline çok bağıdır. Düşük hızlı çok kutuplu makinalarda bu kayıplar, normal gücün % 0.2 ila 0.3' ü kadardır. Yüksek hızlı az kutuplu makinalarda ise normal gücün % 1.5 civarındadır.

5.4.10.2 Yüklü çalışma kayıpları

Motor çalışırken meydana gelen bakır kayıpları, yük kayıpları olarak düşünülür. Bakır kayıpları, boşta çalışma esnasında küçük, yüklü çalışmada ise oldukça büyüktür. Sargıların doğıru akımla ölçülen direnci, motorun nominal çalışma sıcaklığına çevrilir ve bakır kayıpları bu değırlere göre hesaplanır.

İlave yük kayıpları, ilave demir kayıpları ile ilave bakır kayıplarından oluşur. Bu kayıplar, orta ve büyük güçteki asenkron makinalarda tam yükte nominal gücün % 0.5'i kadar olup, akımın karesi ile değışir. Genellikle küçük güçteki makinalarda ilave kayıplar bir miktar daha büyük olur.

5.4.11 Toplam kayıplar ve verim

Toplam kayıplar boşa çalışma ve yükte çalışma esnasında meydana gelen kayıpların toplamından oluşmaktadır.

$$\sum P_k = P_{kboş} + P_{kyük} \quad (5.75)$$

Boştaki kayıplar;

$$P_{kboş} = P_{kd} + P_{kb} + P_{ky} + P_k + P_{kstme} \quad (5.76)$$

Yükteki kayıplar;

$$P_{kyük} = P_{kcu} + P_{kilave} \quad (5.77)$$

Asenkron motorun milinden alınan güç P_m kabul edilirse, motorun verimi;

$$\% \eta = \frac{P_m}{P_m + \sum P_k} 100 \quad (5.78)$$

olarak elde edilir.

5.4.12 Nominal yükteki güç faktörü

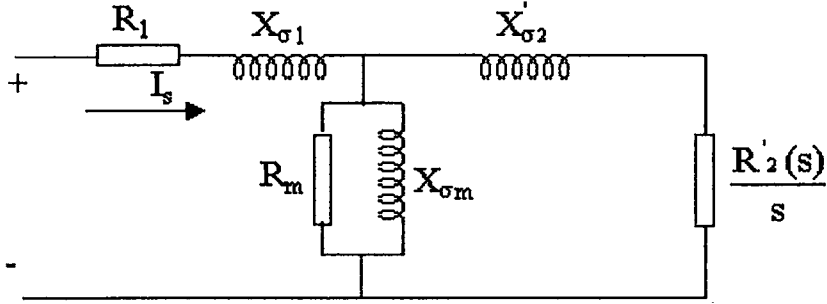
Sanal güç, aktif güç ile reaktif gücün vektörel olarak toplamından meydana gelmektedir. Aynı zamanda aktif güç ile sanal güç arasındaki oran, güç faktörüne eşittir. Sanal güç, aktif ve reaktif güç cinsinden yazılırsa güç faktörü aşağıdaki bağıntıdan bulunur.

$$\cos \varphi = \frac{P_w}{\sqrt{P_w^2 + P_Q^2}} \quad (5.79)$$

Burada; P_w , motorun nominal yükte şebekeden çektiği aktif güçtür. Şekil 5.9'daki eşdeğer devreden görüldüğü gibi, motorun şebekeden çektiği reaktif güç P_Q , reaktansların tükettiği reaktif güçlerin toplamına eşittir (Boduroğlu 1988).

$$P_Q = m(E_1 I_m + X_{1\sigma} I_1^2 + X_{2\sigma}' I_2'^2) \quad (5.80)$$

Burada; E_1 , yüklü durumda stator sargısında indüklenen EMK olup bunun efektif değeri I_m mıknatıslanma akımının X_m reaktansı üzerindeki gerilim düşümüne eşittir. E_1 yaklaşık olarak $0.9-0.95 U_1$ 'dir.



Şekil 5.9 Üç fazlı DASM eşdeğer devresi

5.4.13 Motor momenti

Statordan rotora geçen toplam elektromagnetik güç için aşağıdaki denklem yazılır.

$$P_{d1} = \frac{m_2 E_{20}^2}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}^2} \frac{R_2}{s} \quad (5.81)$$

Burada; m_2 , rotorun faz sayısıdır. Denklem (5.81)'de görüldüğü gibi rotordan statora geçen güç, kaymaya bağlıdır. Diğer taraftan stator döner alan gücü P_{d1} aşağıdaki gibi de yazılabilir.

$$P_{d1} = \omega_1 M_{di} \quad (5.82)$$

Burada $\omega_1 = 2\pi n_1/60$ 'dir. Bu değer ile P_{d1} 'in (5.81)'deki değerleri yerlerine konulursa, döndürme momenti için;

$$M_{di} = \frac{60}{2\pi n_1} m_2 \frac{E_{20}^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}^2} \frac{R_2'}{s} \quad (5.83)$$

ifadesi bulunur. P_{d1} Şekil 5.9'daki eşdeğer devreye göre aşağıdaki gibi yeniden düzenlenir.

$$P_{dl} = m_2 I_2^2 \frac{R_2}{s} = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s} \quad (5.84)$$

Burada I_2' akımı;

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\tau_1 R_1 + \tau_1^2 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (\tau_1 X_{1\sigma} + \tau_1^2 X_{2\sigma}')^2}} \quad (5.85)$$

I_2' akımı, denklem (5.84)'de yerine yazılırsa elde edilen P_{dl} döndürme momenti için aşağıdaki bağıntı elde edilir (Boduroğlu 1988).

$$M_{di} = \frac{P_{dl}}{\omega_1} = \frac{60}{2\pi n_1} m_1 \frac{(\tau_1 U_1)^2}{\left(\tau_1 R_1 + \tau_1^2 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (\tau_1 X_{1\sigma} + \tau_1^2 X_{2\sigma}')^2} \frac{R_2'}{s} \quad (5.86)$$

Pay ve payda τ_1^2 ile bölünerek döndürme momentinin son hali bulunur.

$$M_{di} = \frac{60}{2\pi n_1} m_1 \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \tau_1 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + \tau_1 X_{2\sigma}')^2} \frac{R_2'}{s} \quad (5.87)$$

Senkron hız civarında döndürme momenti, kaymanın doğrusal bir fonksiyonudur. Denklem (5.87)'nin s 'e göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse ($\partial M_d / \partial s = 0$), stator döner alan gücünün ve dolayısıyla döndürme momentinin maksimum olduğu kayma elde edilir. Buna “Devrilme Kayması” denir. Bu kaymada indüklenen döndürme momentine de “Devrilme Momenti” denir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$M_{dd} = \frac{60}{2\pi n_1} \frac{m_1}{2} \frac{U_1^2}{\tau_1 (R_1 + X_{1\sigma} + \tau_1 X_{2\sigma}')} \quad (5.88)$$

Yol alma momenti, $s=1$ yazılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$M_{dy} = \frac{60}{2\pi n_1} m_1 \frac{U_1^2}{(R_1 + \tau_1 R_2')^2 + (X_{1\sigma} + \tau_1 X_{2\sigma}')^2} R_2' \quad (5.89)$$

5.5 Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonu olarak farklı büyüklükler seçilebilir. Motor ağırlığı ve maliyetinin minimize edilmesi seçilebileceği gibi, kayıpları azaltarak motor veriminin yükseltilmesi de amaç fonksiyonu olarak seçilebilir. Bu çalışmada kullanılan amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$F'(x) = \begin{cases} F(x) - P(g_j(x), r) & \text{Eger } F(x) - P(g_j(x), r) > 0 \\ 0 & \text{Eger } F(x) - P(g_j(x), r) \leq 0 \end{cases} \quad (5.90)$$

$$F(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_9) = \frac{60}{2\pi n_1} m_1 \frac{U_1^2}{\left(f_{R_1} + \tau_1 \frac{f_{R_2}}{s} \right)^2 + (f_{x_{1\sigma}} + \tau_1 f_{x_{2\sigma}})^2} \frac{f_{R_2}}{s} \quad (5.91)$$

Burada; τ_1 , primer devrenin dağılma faktörüdür ve asenkron motorlarda 1.04.....1.08 arasında kabul edilir (Güzelbeyoğlu 1992). $F(x)=F(x_1, x_2, \dots, x_9)$, motor momentidir. $P(g_j(x), r)$, ceza terimidir. $f_{R_1}, f_{R_2}, f_{x_{1\sigma}}, f_{x_{2\sigma}}$ fonksiyonlarının tasarım parametrelerine $(x_1, x_2, \dots, x_{10})$ bağlı olarak nasıl hesaplanacağı önceki bölümlerde verilmiştir.

Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5’de sırasıyla bu çalışmada kullanılan 30 kW ve 55 kW’lık motorlar için tasarım parametrelerinin sınır aralıkları verilmiştir. Ayrıca GA kromozomlarının hassasiyet olarak kaç bit ile temsil edildiği gösterilmiştir. Parametrelerin sayısal değerlerindeki hassasiyet, bit sayısı artırılmak suretiyle sağlanır. Bir kromozomdaki toplam bit sayısı 100’dür. Optimizasyon sırasında popülasyon sayısının 100 seçilmesi halinde, 100x100 ‘lük bir matris ile işlem yapılmaktadır. Motorlar 8 inç’lik olduğu için dış çapı, her iki motor için 18 cm’dir. Normal asenkron motor optimizasyonu yapılırken dış çapın farklı olabileceği dikkate alınarak, optimizasyon programına dış çap parametresi değiştirilebilecek şekilde ilave edilmiştir.

Çizelge 5.4 30 kW DASM ile ilgili parametreler ve sınırları

	Değişkenler	Sınırlar	Bit Sayısı	Birim
x ₁	Bir fazın sarım sayısı	$44 \leq w_1 \leq 68$	12	-
x ₂	Stator demir uzunluğu	$40 \leq L_i \leq 55$	12	cm
x ₃	Kısa devre halkası genişliği	$10 \leq w_{ha} \leq 30$	12	mm
x ₄	Stator iç çapı	$8 \leq D_i \leq 10,5$	12	cm
x ₅	Stator oluk yüksekliği	$15 \leq h_i \leq 25$	8	mm
x ₆	Stator oluk genişliği	$10 \leq w_s \leq 15$	8	mm
x ₇	Hava aralığı	$0.6 \leq \delta \leq 0.8$	12	mm
x ₈	Rotor oluk geçidi	$0.4 \leq e \leq 0.65$	8	mm
x ₉	Rotor oluk çapı	$7,5 \leq d_{i2} \leq 10$	8	mm
x ₁₀	Stator dış çapı	$18 \leq D_a \leq 18$	8	cm

Çizelge 5.5 55 kW DASM ile ilgili parametreler ve sınırları

	Değişkenler	Sınırlar	Bit Sayısı	Birim
x ₁	Bir fazın sarım sayısı	$28 \leq w_1 \leq 44$	12	-
x ₂	Stator demir uzunluğu	$60 \leq L_i \leq 90$	12	cm
x ₃	Kısa devre halkası genişliği	$14 \leq w_{ha} \leq 30$	12	mm
x ₄	Stator iç çapı	$8 \leq D_i \leq 10,5$	12	cm
x ₅	Stator oluk yüksekliği	$15 \leq h_i \leq 25$	8	mm
x ₆	Stator oluk genişliği	$10 \leq w_s \leq 15$	8	mm
x ₇	Hava aralığı	$0.6 \leq \delta \leq 0.8$	12	mm
x ₈	Rotor oluk geçidi	$0.4 \leq e \leq 0.65$	8	mm
x ₉	Rotor oluk çapı	$7,5 \leq d_{i2} \leq 10$	8	mm
x ₁₀	Stator dış çapı	$18 \leq D_a \leq 18$	8	cm

Çizelge 5.6'da asenkron motorların bağımlı değişkenleri ve sınırları nominal değerler için verilmiştir. Bu sınır değerler aşıldığında ceza fonksiyonu devreye girmekte ve amaç fonksiyonunun uygunluk değeri bir miktar azaltılarak çözüme katkı yapması sağlanır. Kromozom sınır değeri aştığı halde devre dışı bırakılmamakta ve yeni bir şans daha verilerek eşleştirme havuzunda tutulmaktadır. Böylece, ceza fonksiyonuyla sınırlı problemler, sınırsız probleme dönüştürülerek çözüm alanı daha geniş tutulmaktadır.

Çizelge 5.6 DASM ile ilgili bağımlı değişkenler ve sınırları

Bağımlı Değişkenler	Sınırlar	Birim
Dolgu Faktörü	$DF \leq 0.2$	-
Rotor akım yoğunluğu	$J_2 \leq 13.5$	A/mm^2
Kayma	$s \leq 0.06$	-
Stator boyunduruk indüksiyonu	$B_{j1} \leq 1.7$	T
Rotor boyunduruk indüksiyonu	$B_{j2} \leq 1.7$	T
Stator dış indüksiyonu	$B_{d1} \leq 2.1$	T
Rotor dış indüksiyonu	$B_{d2} \leq 2.2$	T
Güç faktörü	$\cos\phi \geq 0.77$	-
Kısa devre akımının nominal akıma oranı	$I_{lk}/I_{ln} \leq 4.5$	-
Devrilme momentinin çalışma momentine oranı	$M_{dd}/M_{di} \geq 1.9$	-

6. GENETİK ALGORİTMALARLA YAPILAN TASARIM OPTİMİZASYONU VE MAGNETİK ALAN ANALİZİ SONUÇLARI

6.1 Genetik Algoritma ile Optimizasyon

Bu çalışmada YERSUSAN A.Ş.'inde imalatı yapılan sekiz inç 30 kW ve 55 kW'lık dalgıç asenkron motorların tasarım optimizasyonu Genetik Algoritmalar ve Sonlu Elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

Optimizasyon metodu olarak gerçek kodlu genetik algoritmalar hızlı olmasına rağmen, biyolojik evrim sürecini en iyi şekilde modellenmesi sebebiyle ikili kodlu genetik algoritmalar kullanılmıştır.

Optimizasyon programı olarak geliştirilen GA yazılımı, kısa devre rotorlu tüm asenkron motorlara uygulanabilir esneklikte hazırlanmıştır. Tasarım parametrelerinin moment üzerindeki etkileri incelenmiş ve grafiklerle verilmiştir.

6.1.1 Geliştirilen genetik algoritma yazılımının özellikleri ve yapısı

Üç fazlı dalgıç asenkron motor tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmek için Delphi programlama dilinde bir yazılım geliştirilmiştir. Çizelge 6.1'de yazılımın bölümleri ve satır sayıları verilmiştir.

Çizelge 6.1 Geliştirilen yazılımın bölümleri

Bölümler	Satır sayısı
Tasarım optimizasyonu arayüzü	1278
Motor analiz arayüzü	574
Yakınsama sonuçları arayüzü	131
Tasarım parametreleri arayüzü	98
Mıknatıslanma eğrisi arayüzü	135
Demir kayıpları eğrisi arayüzü	133
Moment-akım eğrisi arayüzü	140
Verim-güç faktörü eğrisi arayüzü	192
Toplam	2681

Yazılımın “exe” dosyası 1.3 Mbayt olmak üzere toplam kapasitesi 2.7 Mbayt’dır. Çalıştırılıp üzerinde değişiklik yapılabilmesi için en az 80486 işlemci, 16 Mbayt RAM ve Delphi 4 programlama diline ihtiyaç vardır. Bilgisayar ekran kartı VGA’yı desteklemelidir.

Şekil 6.1 ’de görüldüğü gibi gerçekleştirilen yazılımın, tasarım optimizasyonu arayüzünde; iterasyon sayısı, popülasyon sayısı, seçim metotları, çaprazlama oranı ve mutasyon oranı kullanıcı tarafından girilebilmektedir.

Parametre	Hesaplanan değerler	Birim
Çalışma Momenti	84,6715627380662	Nm
Yol alma Momenti	201,142889089486	Nm
Devrilme Momenti	85,5509872436523	%
Verim(%)	0,867381155490875	-
Güç Faktörü	34,7368918681587	A
Faz Akımı	662,931528273912	A
Çukuk Akımı	248,786054967781	A
Kısa Devre Akımı	12,608344078064	A/mm2
Stator Akım Yoğunluğu	10,2434358596802	A/mm2
Rotor Akım Yoğunluğu	2850	d/dk
Devir Sayısı	0,733296272581069	ohm
Stator Direnci	0,485132321706514	ohm
Rotor Direnci	1,19322001375876	ohm
Stator Reaktansı	1,05047796445051	ohm
Rotor Reaktansı	1,71940588951111	T
Stator Dış End.	1,2226494560705	T
Rotor Dış End.	1,54943358898163	T
Stator Boyund. End.	1,24849200248718	T
Rotor Boyund. End.	77,4826085165161	kg
AĞIRLIK	0,173033848404884	-
Dolgu Fak.	1,90000021457672	mm
İletken Çapı		

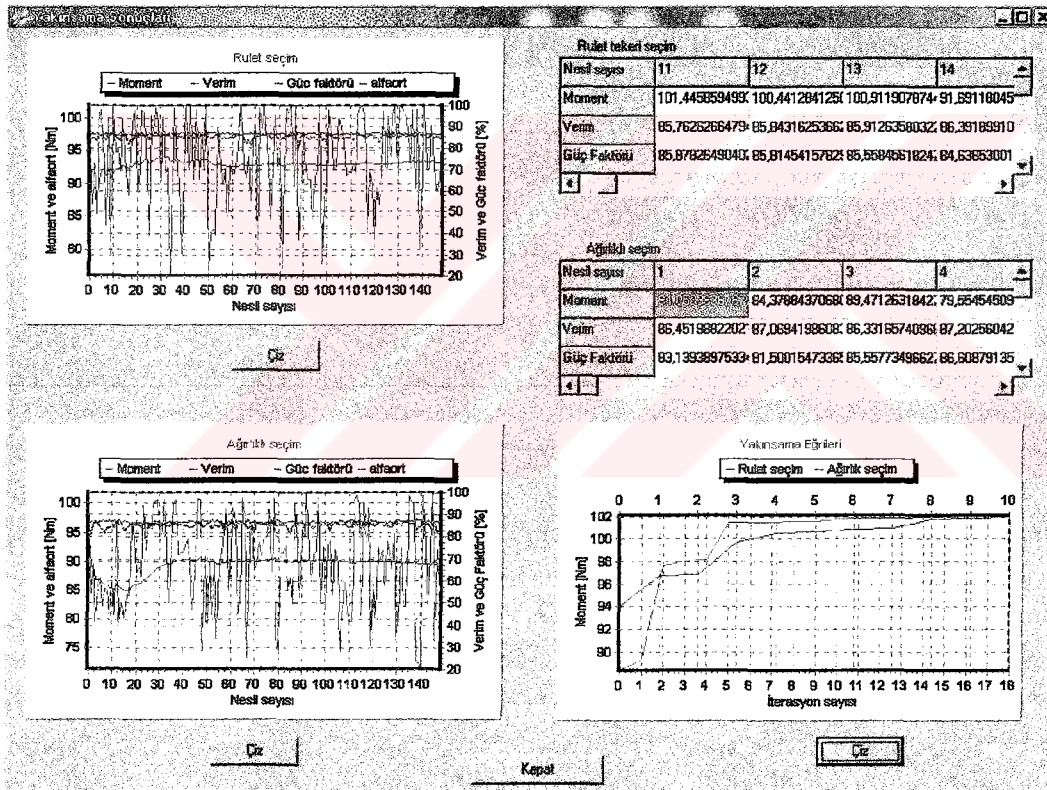
Şekil 6.1 Tasarım optimizasyonu arayüzü

Program başlatılmadan önce parametreler arayüzünde tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları ile motor özellikleri girilmelidir. Daha sonra kullanılacak BH eğrisi ve W/Kg eğrisi tanımlanmalıdır. Program, “Başla” komutuyla çalıştırılır. Programın çalışması, girilen iterasyon sayısına kadar devam eder. İterasyon sayısı

tamamlandıktan sonra motorun, tasarım parametrelerini, geometrik, magnetik ve elektriki özelliklerinin simülasyon sonuçlarını detaylı olarak izleme imkanı vardır. Sonuçlar tatmin edici bulunmazsa sınır şartları ve GA operatörleri tekrar gözden geçirilerek simülasyon yeniden başlatılmalıdır. En uygun çözüm elde edilinceye kadar işleme devam edilmelidir.

Tasarım optimizasyonu arayüzü, aynı zamanda yazılımın ana menüsünü oluşturmaktadır. Bu arayüzden diğer arayüzlere geçiş sağlanmaktadır.

Yakınsama sonuçları arayüzü Şekil 6.2’de görülmektedir. Bu arayüzde, Rulet tekeri ve ağırlıklı seçim metodlarının nesil sayısına ve iterasyon sayısına göre yakınsama sonuçlarını incelemek mümkündür.



Şekil 6.2 Yakınsama sonuçları arayüzü

Şekil 6.3’deki motor analiz arayüzünde, motorun nominal değerleri ve bunların hesaplanması görülmektedir. Motorun etiket değerleri girilerek analitik tasarım gerçekleştirilmektedir. Stator ve rotorun oluk boyutlarının kullanıcı tarafından ayrıca verilmesi gerekmektedir. Yol alma momenti, devrilme momenti,

nominal moment ve verim gibi önemli temel değişkenler ayrıca gösterilerek takip ve izleme bakımından kolaylık sağlanmıştır. “Hesapla” butonuna basıldığında ise motorun analitik olarak tasarım sonuçları elde edilir. Böylece, analitik değerler ile optimize değerleri arasında karşılaştırma imkanı sağlanmaktadır.

The screenshot displays the 'Motor analiz arayüzü' (Motor Analysis Interface) with two main sections: 'Etiket Değerleri' (Label Values) and 'Hesaplanan Değerler' (Calculated Values).

Etiket Değerleri (Label Values):

Motor Gücü	29440	W
Faz Genliği	380	V
Bağlantı Şekli	Üçgen	
Güç Faktörü	0,84	
Verim	0,86	
Senkron Devir Sayısı	3000	d/dk
Kutup Sayısı	1	
Hava Ara. Mag. End.	0,5	T
Paralel Kut Sayısı	1	
Stator iç çapı	8,325	cm
Faydalanma Katsayısı	3,1	
Dagılma Faktörü	1,08	
Stator Dış Çapı	18	cm
Kut. Örtme Fak.	0,84	
Mil Çapı	5,8	cm
Rot. Bilezik Geniş.	14	mm
Rot. Bilezik Yüksek.	18	mm
Kayma	0,05	
Hava aralığı	0,75	mm
Rotor oluk sayısı	18	
Motor boyutu(linc)	8	
İletken çapı		mm

Hesaplanan Değerler (Calculated Values):

Stator Demir Uz.	0,550124108791351	Çalışma Momenti	95,0022543647078
Öyük. İlet. Say.	13	Devrilme Momenti	189,58126864794
Güç Faktörü	0,849922299385071	Yol Alma Momenti	69,8034244079665
Verim (%)	83,0479354858398		

Değerler (Values):

	Değerler	Birim
İletken Çapı		mm
Faz akımı	35,7482872009277	A
Hat akımı(yeni)	59,1970825195313	A
Öyük akımı	567,527954101563	A
Kısa Devre Akımı	228,519320116225	A
Stator Akın Yoğ.	11,379035949707	A/mm2
Rotor Akın Yoğ.	11,2906122207642	A/mm2
Stator Direnci	0,645521819591522	ohm
Rotor Direnci	0,466380576515198	ohm
stator Reaktansı	1,35780489444733	ohm
Rotor Reaktansı	0,934673017968298	ohm

At the bottom, there are buttons for 'Hesapla' (Calculate) and 'Kapat' (Close), and a label 'Stator ve Rotor Öyük Boyutları' (Stator and Rotor Peak Dimensions).

Şekil 6.3 Motor analiz arayüzü

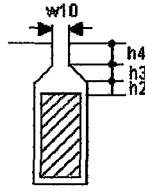
Şekil 6.4’deki tasarım parametreleri arayüzünde, optimize edilecek motorun tasarım parametreleri değer aralıkları ve diğer gerekli değişkenler görülmektedir. Stator reaktansını etkileyen stator oluk geometrik yapısı bilgilerinin (w_{10} , h_4 , h_3 , h_2) ayrıca girilmesi gerekmektedir.

Motor tasarım optimizasyonu programının başlatılabilmesi için ilk önce, mıknatıslanma eğrisi (BH) ile malzeme demir kayıpları eğrisinin (W/kg–B) seçilmesi gerekmektedir. Daha sonra parametreler arayüzüne geçilip, tasarım parametreleri ve motora ait diğer özelliklerin girilmesi gerekmektedir.

DASIM Etiket Değerleri

Motor Gücü	29440
Faz Gerilimi[V]	380
Bağlantı Şekli	Üçgen
Güç Faktörü	0,84
Verim	0,86
Senkron Devir Sayısı	3000
Rotor Devir Sayısı	2850
Çift Kutup Sayısı	1
Hava Ara. Mag. End.[T]	0,5
Parelel Kol Sayısı	1
Şaft Çapı[mm]	5,8
Sta. oluk eğri w10[mm]	6
h4[mm]	0,5
h3[mm]	1
h2[mm]	0
Dağılım Faktörü	1,08
Motor Boyutu[Inç]	8
İletken Çapı[mm]	2

Stator oluk şekli



Optimizasyon parametreleri tanımlama aralıkları

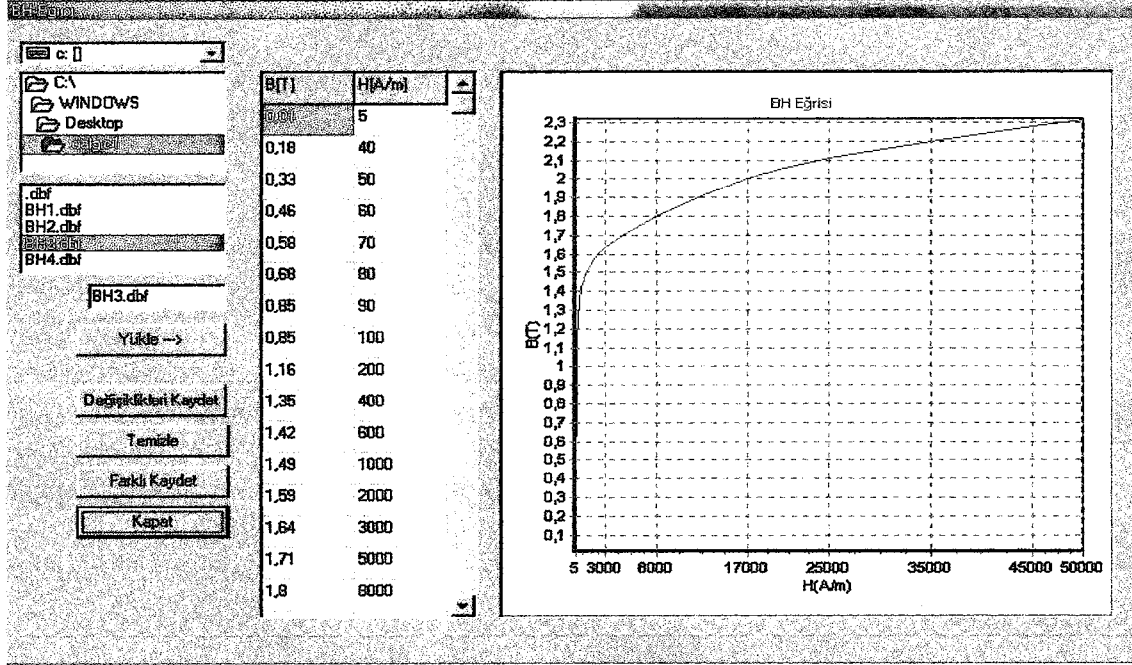
	Minimum	Maksimum
Faz Sarın Sayısı	32	68
Stator demir Uz.[cm]	40	50
Bilezik genişliği[mm]	10	20
Stator iç çapı[cm]	8	10,5
Stator oluk yüksek.[mm]	15	25
Stator oluk geniş.[mm]	10	15
Hava Aralığı[mm]	0,6	0,8
Rotor oluk geçidi[mm]	0,3	0,65
Rotor oluk çapı[mm]	8	10
Stator Dış çapı[cm]	18	18

Tamam Kapat

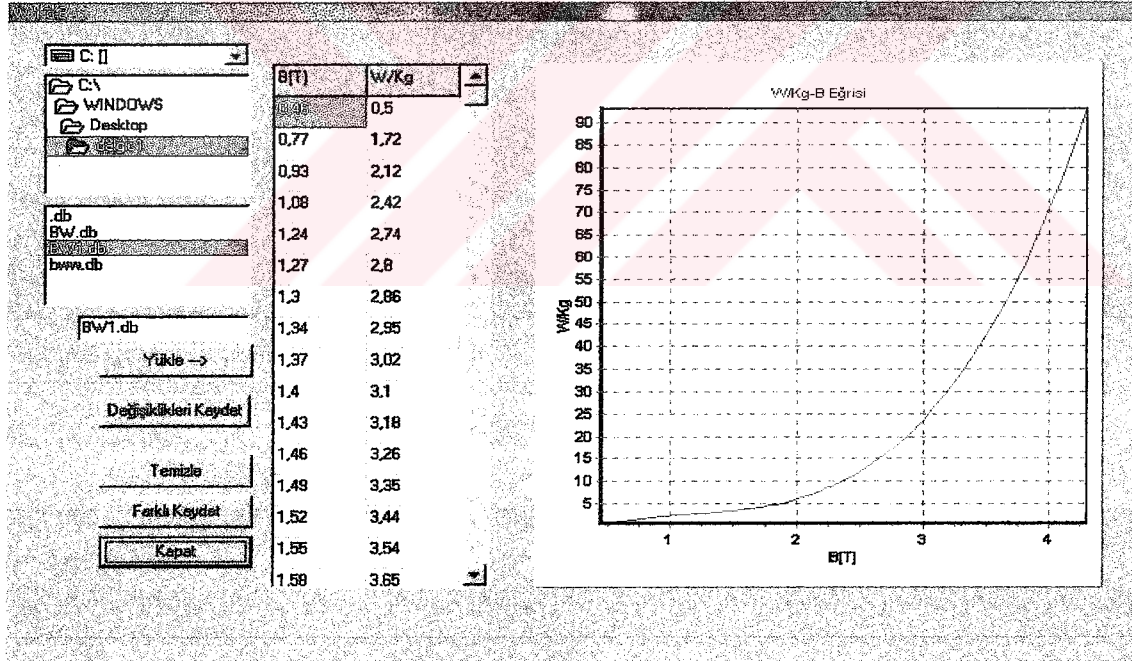
Şekil 6.4 Tasarım parametreleri arayüzü

Şekil 6.5’de dalgıç asenkron motorun, stator ve rotorunda kullanılan sacın mıknatıslanma (BH) eğrisi görülmektedir. Daha önce girilmiş BH değerleri kullanılabileceği gibi, kullanıcı yeniden BH değerlerini girebilir veya mevcut BH eğrisi üzerinde verileri değiştirerek kaydedebilir. Yeni mıknatıslanma eğrisi oluşturulurken, magnetik indüksiyon (B) birimi “Tesla” (T) ve magnetik indüksiyon şiddeti (H) biriminin “Amper/metre” (A/m) olmasına dikkat edilmelidir. Motor tasarım optimizasyonu arayüzü ile motor analiz arayüzü, malzeme mıknatıslanma eğrisi (BH) değerlerini kullanarak mıknatıslanma akımı ve demir kayıplarını hesaplarlar.

Şekil 6.6’da magnetik indüksiyon değerlerine göre motorda kullanılan sacın kilogramında meydana gelen Watt kayıpları görülmektedir. Kullanıcı, daha önce girilmiş demir kayıpları (W/kg-B) değerlerini seçebilir veya yeni demir kayıpları değerlerini girerek optimizasyonu başlatır. Ayrıca kullanıcı, mevcut demir kayıpları üzerinde değişiklik yaparak bu değişiklikleri kaydetmek suretiyle tekrar kullanma imkanına sahiptir.

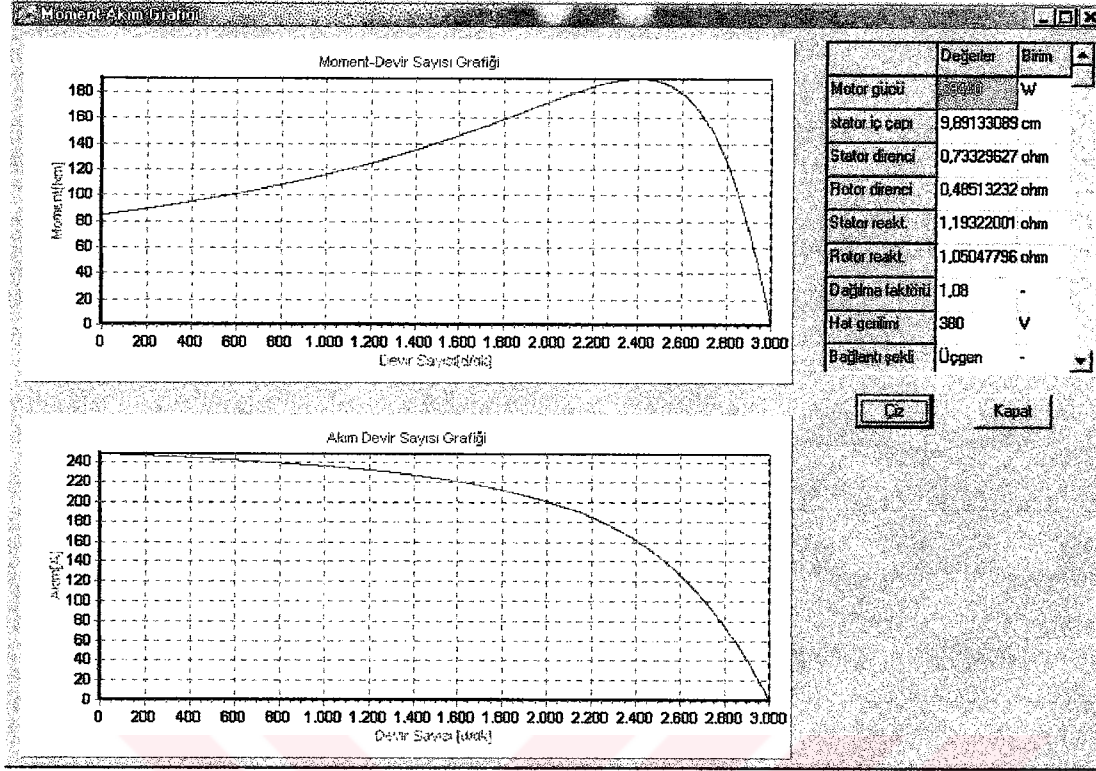


Şekil 6.5 Mıknatıslanma eğrisi (BH) arayüzü

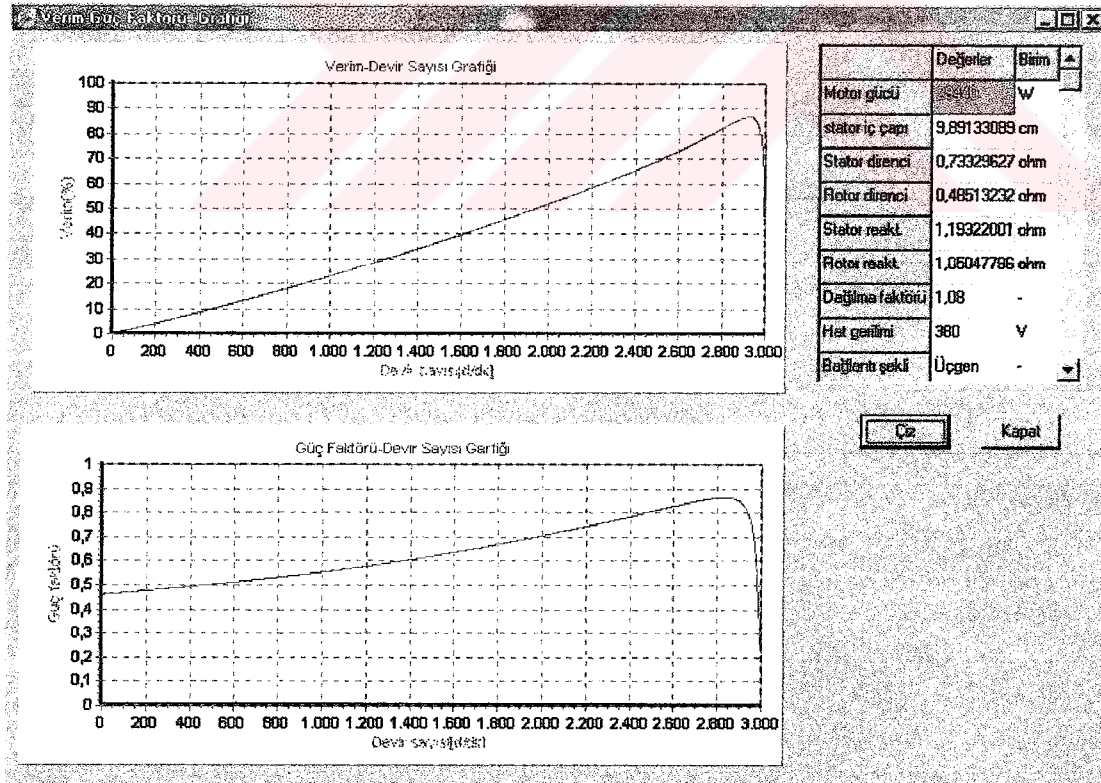


Şekil 6.6 Demir kayıpları grafiği arayüzü

Şekil 6.7’de motorun moment-devir sayısı ve akım-devir sayısı grafiği arayüzü görülmektedir. Burada optimize edilmiş değerler için moment ve akım grafikleri izlenebilir. Şekil 6.8’de dalgıç asenkron motorun optimize edilen değerleri için, verim-devir sayısı ve güç faktörü-devir sayısı grafikleri görülmektedir.



Şekil 6.7 Moment ve akım grafiği arayüzü



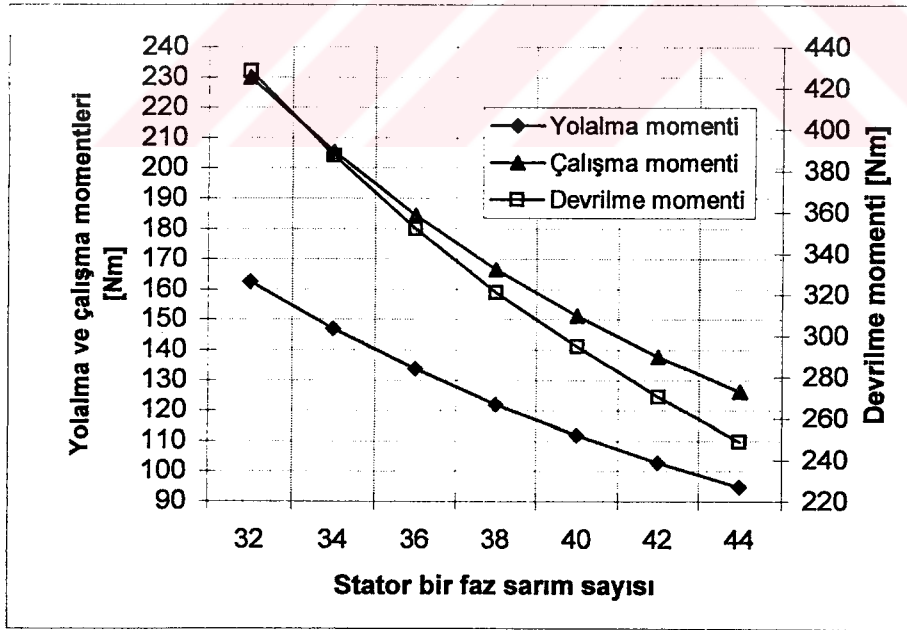
Şekil 6.8 Verim ve güç faktörü grafiği arayüzü

6.1.2 Tasarım parametrelerinin moment üzerindeki etkilerinin incelenmesi

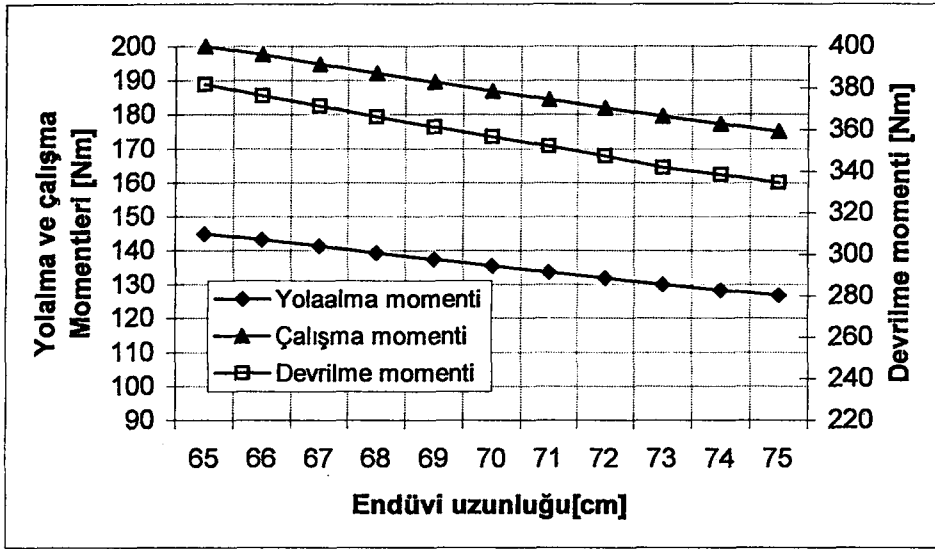
Dalgıç asenkron motor optimizasyonunda kullanılan tasarım parametrelerinin; çalışma momenti, yol alma momenti ve devrilme momenti üzerindeki etkileri bu bölümde incelenmiştir. Değişimlerin ayrıntılı görülebilmesi için bazı grafik çizimleri iki adet “y” değer eksenini kullanılarak yapılmıştır.

Diğer tasarım parametreleri sabit tutulup sadece sarım sayısı değiştirilerek elde edilen sonuçlara ilişkin değişimler Şekil 6.9’da görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi sarım sayısının artırılması, dirençleri artıracığından moment değerleri azalmaktadır. Yol alma momenti ve çalışma momenti yavaş değişim gösterirken devrilme momentinde hızlı bir düşüş gözlenmektedir.

Şekil 6.10’da stator demir uzunluğu ile moment değişimleri verilmiştir. Motor moment değerleri endüvi uzunluğu artıktıkça azalmaktadır. Çünkü diğer parametreler sabit tutulup sadece endüvi uzunluğu artırılırsa stator ve rotor dirençleri artacağından moment değerleri doğal olarak azalacaktır.

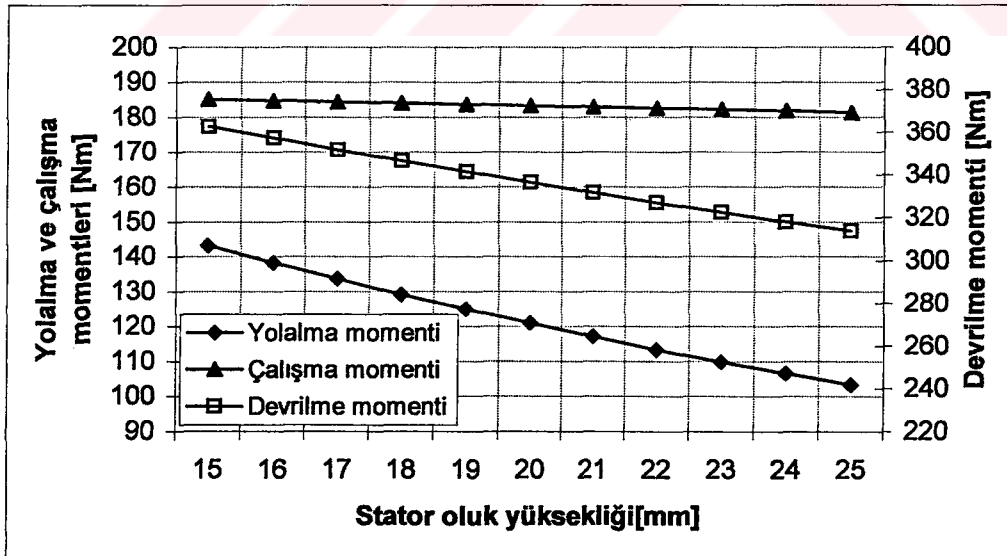


Şekil 6.9 Sarım sayısına bağlı olarak momentlerin değişimi



Şekil 6.10 Endüvi uzunluğuna bağlı olarak momentlerin değişimi

Şekil 6.11'de stator oluk yüksekliğine bağlı olarak moment değişimleri verilmiştir. Stator oluk yüksekliği artırılırsa yol alma momenti ve devrilme momenti azalmaktadır. Çalışma momentinin diğerlerine göre daha az değişim gösterdiği görülmektedir.

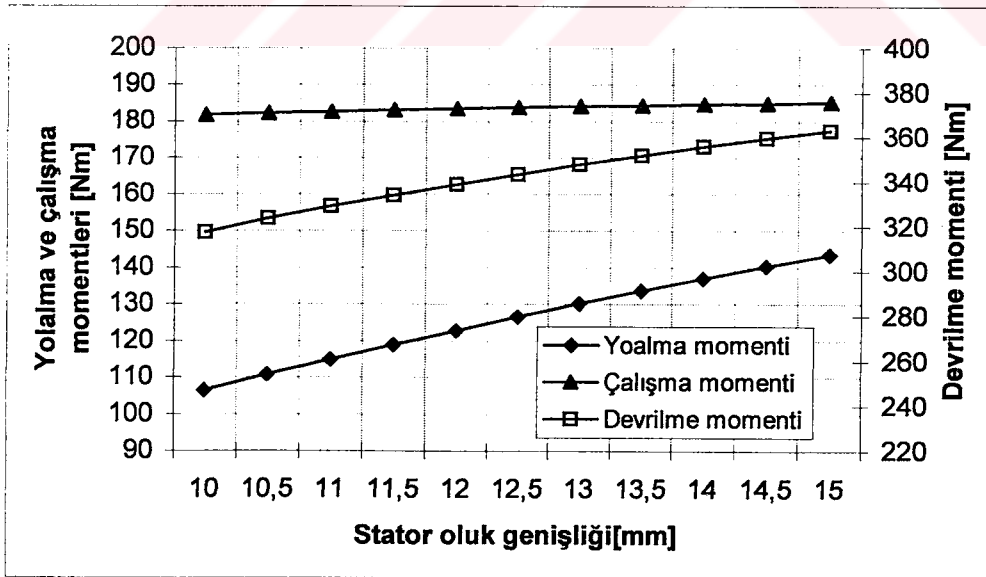


Şekil 6.11 Stator oluk yüksekliğine bağlı olarak momentlerin değişimi

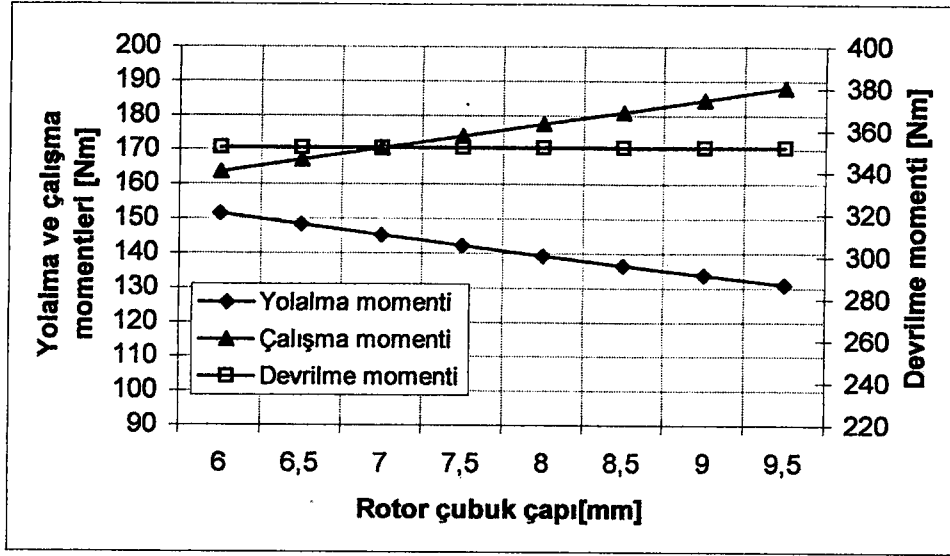
Şekil 6.12’de stator oluk genişliği artırılırsa, yol alma momenti ve devrilme momentinin Şekil 6.11’deki durumun tersine olarak arttığı gözlenmektedir. Bu durumda da çalışma momentinin daha az değişim gösterdiği görülmektedir. Optimizasyon sürecinde, çalışma momenti ve devrilme momentinin belirli sınır değerlerin altına düşmemesine dikkat edilmelidir. Çalışma momentini artırmak için stator oluk yüksekliğinin azaltılması gerekir. Sargı dolgu faktörünün izin verdiği ölçüde bu yapılabilir. Stator dişlerinin magnetik doymasının izin verdiği ölçüde stator oluk genişliği artırılabilir.

Şekil 6.13’de tasarım optimizasyonunun önemli parametrelerinden olan rotor oluk çapı ile moment değişimleri görülmektedir. Şekilden rotor oluk çapı arttıkça yol alma momentinin azaldığı, çalışma momentinin arttığı ve devrilme momentinin ise değişim boyunca sabit kaldığı gözlenmektedir.

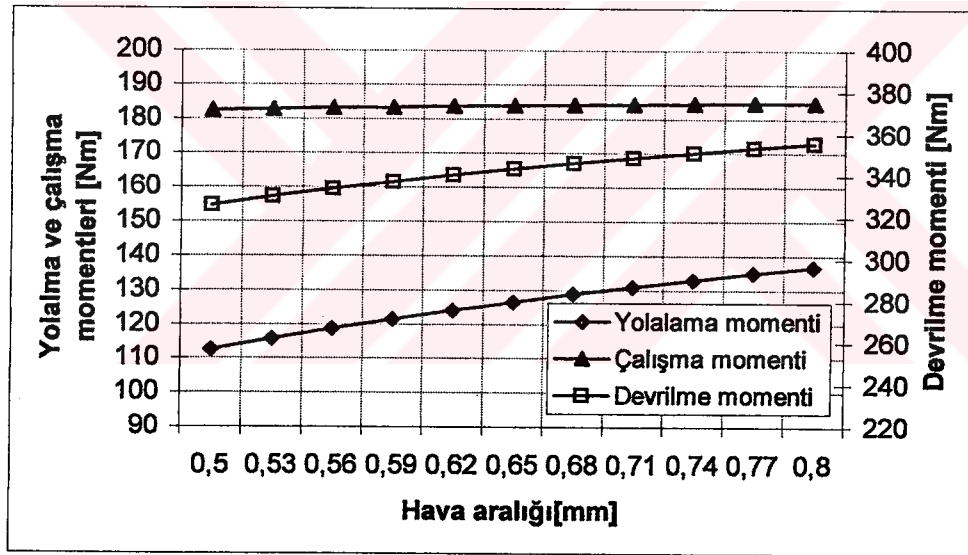
Şekil 6.14’de hava aralığı ile moment değişimleri verilmiştir. Hava aralığı artırıldığında, devrilme momenti ve yol alma momentinin çalışma momentine göre daha fazla artış kaydettiği görülmektedir. Ancak hava aralığının yüksek olması, magnetik kayıpların artmasına ve güç faktörünün düşmesine neden olduğundan belirli sınırlar arasında kalmasına dikkat edilmelidir.



Şekil 6.12 Stator oluk genişliğine bağlı olarak momentlerin değişimi



Şekil 6.13 Rotor oluk çapına bağlı olarak momentlerin değişimi

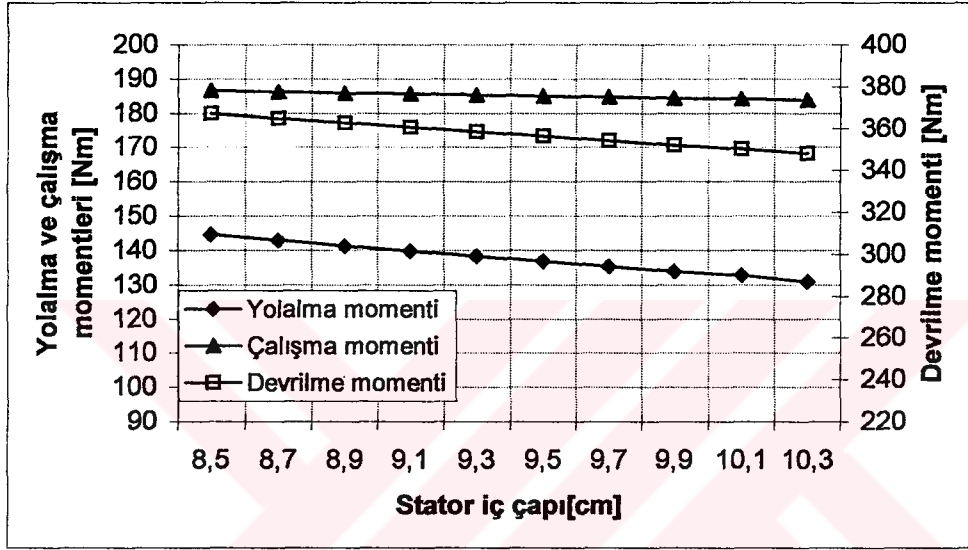


Şekil 6.14 Hava aralığına bağlı olarak momentlerin değişimi

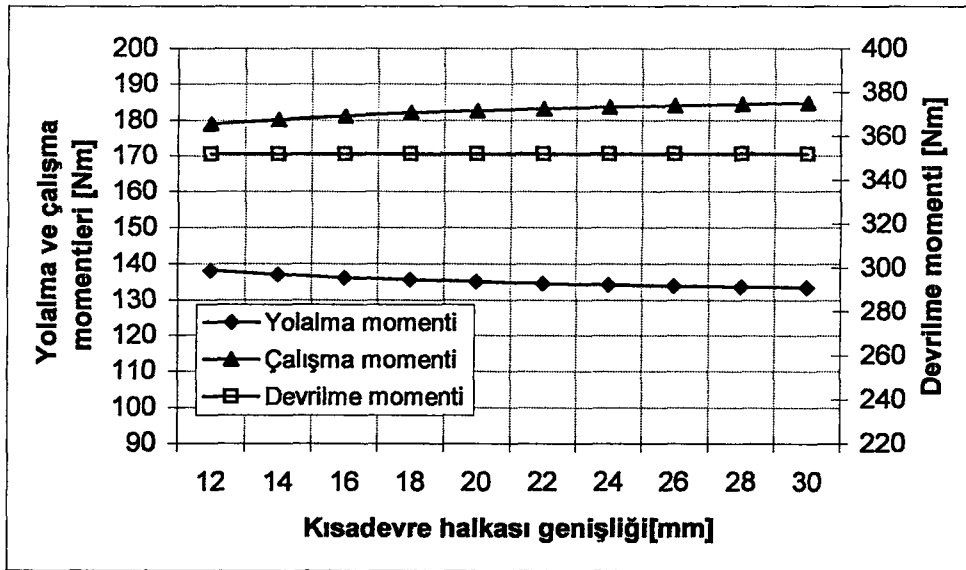
Şekil 6.15’de stator iç çapı ile moment değişimleri görülmektedir. Diğer parametreler sabit tutulup stator iç çapı artırılırsa, stator direnci artacak ve dolayısıyla momentlerde azalma meydana gelecektir. Şekilden görüldüğü gibi stator iç çapının artırılması, çalışma momentinin çok az düşmesine, yol alma momenti ve devrilme momentinin, yol alma momentine göre daha çok azalmasına sebep

olmaktadır. Ancak stator iç çapı artırılırsa, motorun gücü ile stator iç çapı arasında $P \approx D_i^2 L_i$ orantısı olduğundan gücü sabit tutmak için motorun boyu azaltılmalıdır.

Son olarak Şekil 6.16'da rotor kısa devre halkası genişliğine bağlı olarak momentlerin değişimleri verilmektedir. Rotor kısa devre halkası genişliğinin artırılmasıyla çalışma momenti artmakta, yol alma momenti azalmakta ve devrilme momentinde herhangi bir değişim meydana gelmemektedir.



Şekil 6.15 Stator iç çapına bağlı olarak momentlerin değişimi



Şekil 6.16 Kısa devre halkasına bağlı olarak momentlerin değişimi

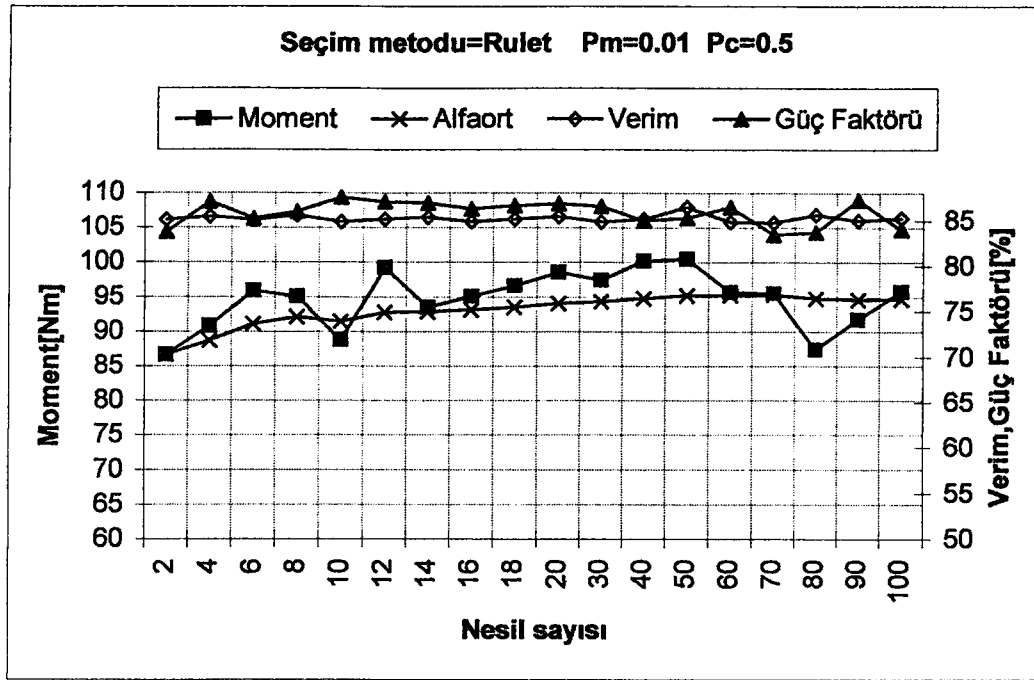
6.1.3 Genetik algoritma ile yapılan optimizasyondan elde edilen sonuçlar

GA metodunun karakteristiği itibariyle, rasgele işlemlerden (doğal seçim, çaprazlama, mutasyon) dolayı farklı sonuçlara ulaşılabilir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için, her bir simülasyon 20 kez çalıştırıldıktan sonra sonuçlar alınmıştır. Farklı popülasyon sayıları, çaprazlama ve mutasyon oranları kullanılarak genetik algoritmalar test edilmiş ve sonuçları incelenmiştir. GA'ların çalışma ve işleyişi ile ilgili sonuçlar 30 kW'lık motor üzerinde gösterilmiştir.

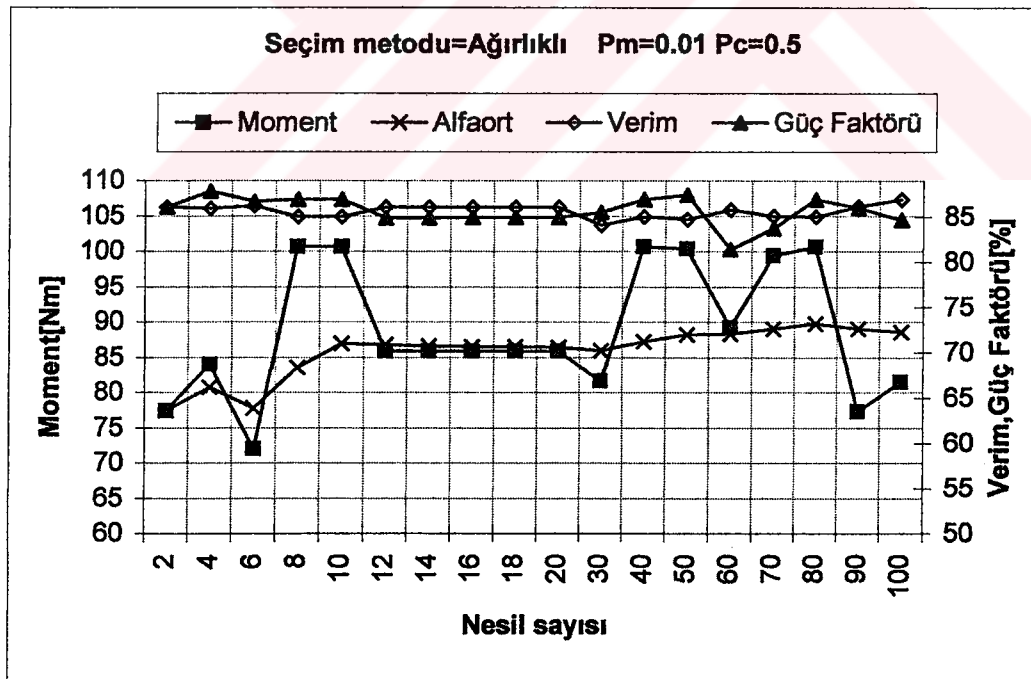
Seçim metodu olarak kullanılan Rulet ve Ağırlıklı seçim metotları karşılaştırılmıştır. *Ağırlıklı seçimde*; ilk olarak amaç fonksiyonu kullanılarak kromozomların uygunluk değerleri hesaplanır. Hesaplanan uygunluk değerleri en küçükten en büyüğe doğru sıralamaya konur ve uygunluk değeri yüksek olanlar tutulur, uygunluk değeri düşük olanlar atılır. Genelde popülasyonun %50'sinin seçilmesi uygun seçenektir.

Rulet tekerleği seçim metodunun uygulanması için, ilk önce kromozomların toplam uygunluk değeri hesaplanır. Kromozomlar, toplam uygunluk değerine bölünerek her bir kromozom için 0-1 arasında değişen seçilme ihtimalleri bulunur. Daha sonra, kümülatif ihtimaller hesaplanır. Popülasyon sayısı kadar 0-1 arasında rasgele sayılar üretilir. Üretilen rasgele sayı, birinci kromozomun kümülatif seçim ihtimalinden küçük ise, birinci kromozom seçilir. Eğer değilse, ikinci kromozomun veya diğerlerinin kümülatif ihtimalleriyle karşılaştırılarak hangisinden küçükse o kromozom seçilir. Böylece Rulet seçim metodu gerçekleştirilmiş olur.

Şekil 6.17'den Şekil 6.20'ye kadar sırasıyla "rulet seçim" ve "ağırlıklı seçim" metotları için nesil sayısına göre moment, verim ve güç faktörü değişimleri görülmektedir. Burada alfaort, popülasyondaki kromozomların ortalama uygunluk değerlerini göstermektedir. Farklı popülasyon sayılarında (Pop=50, 100, 200, 300), çaprazlama oranı ($P_c=0.5$) ve mutasyon oranı ($P_m=0.01$) sabit tutularak kromozomların uygunluk değerlerinin değişimleri incelenmiştir. Rulet seçim metodunda, farklı popülasyon sayılarında, ortalama uygunluk değeri (alfaort) 90-95 arasında değişirken, ağırlıklı seçim metodunda ortalama uygunluk değerinin 85-90 arasında değiştiği görülmektedir.

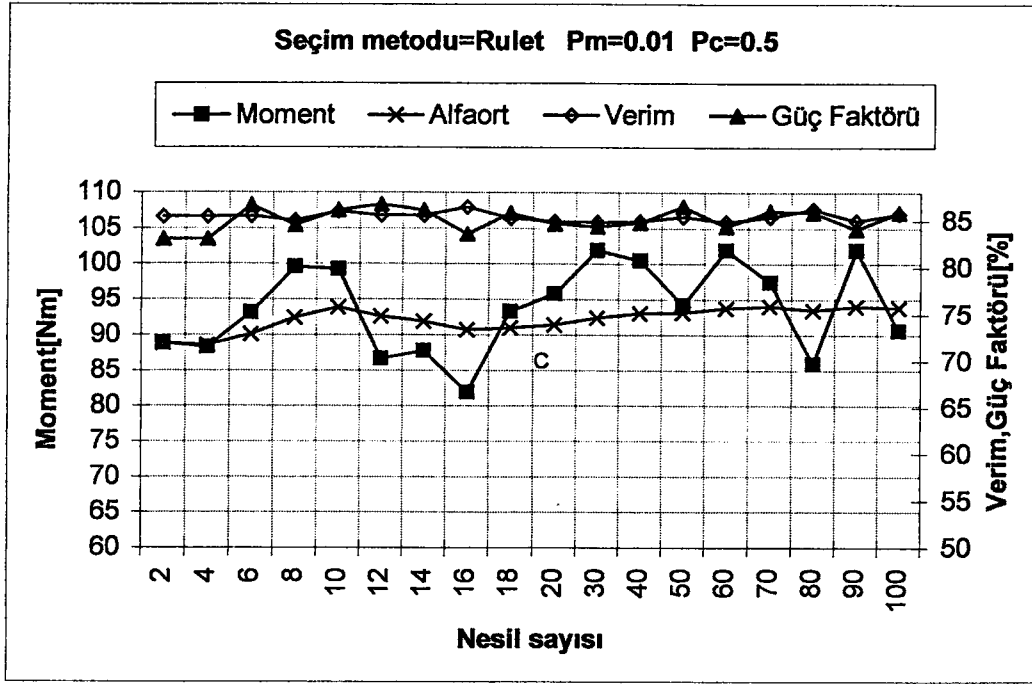


(a)

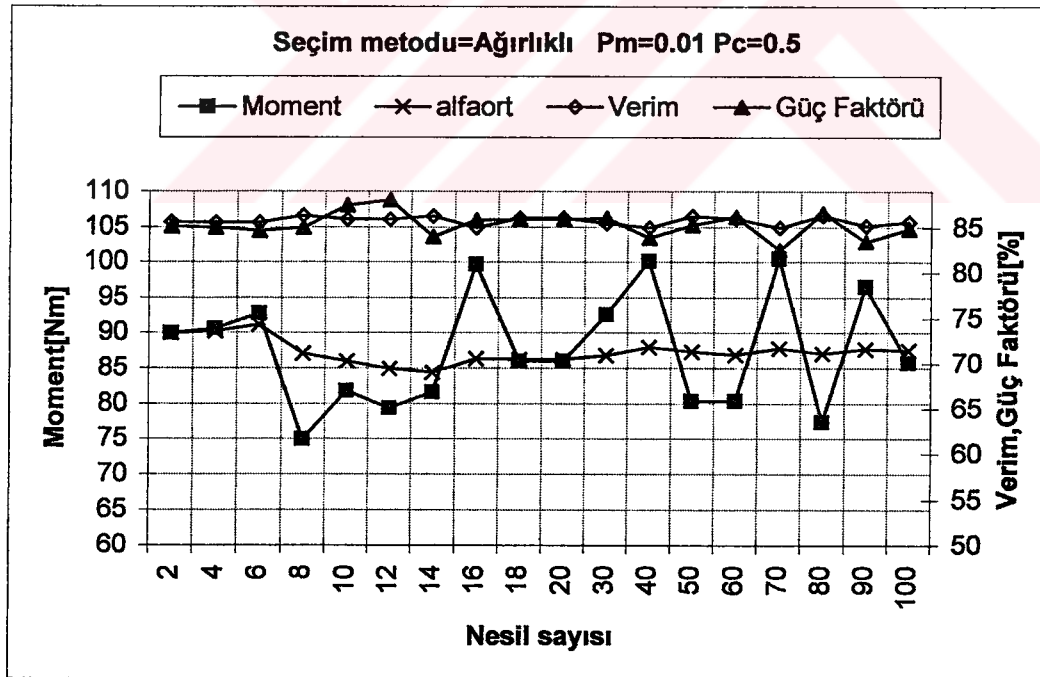


(b)

Şekil 6.17 Popülasyon sayısı Pop=50 için moment, verim ve güç faktörü değişimleri
 (a) Rulet seçim metodu (b) Ağırlıklı seçim metodu

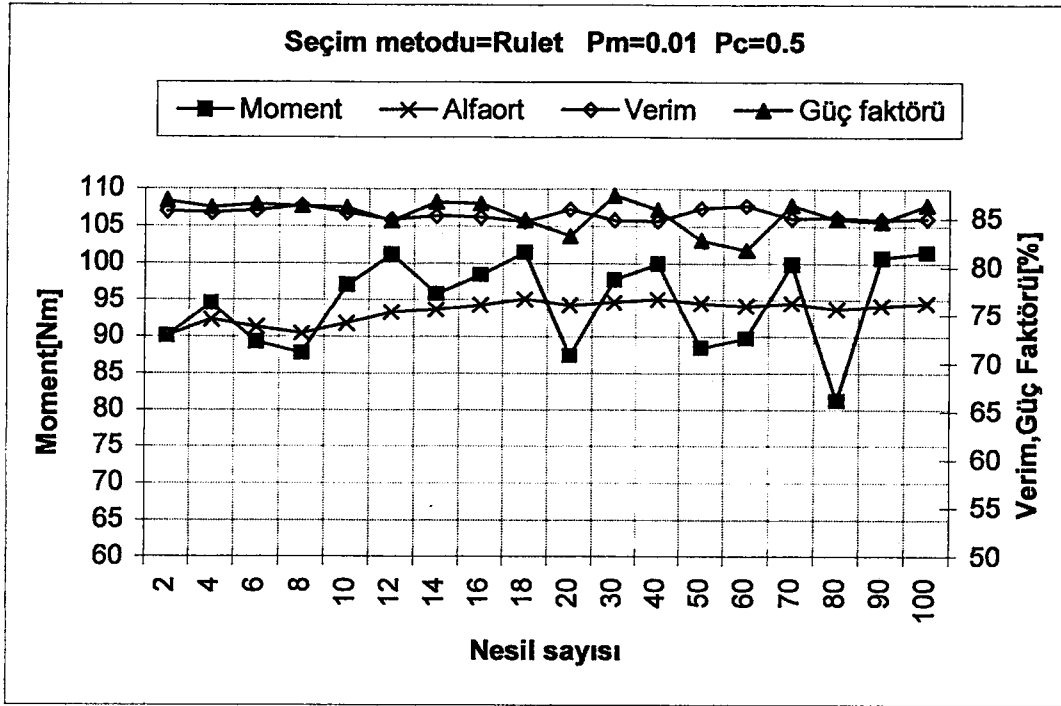


(a)

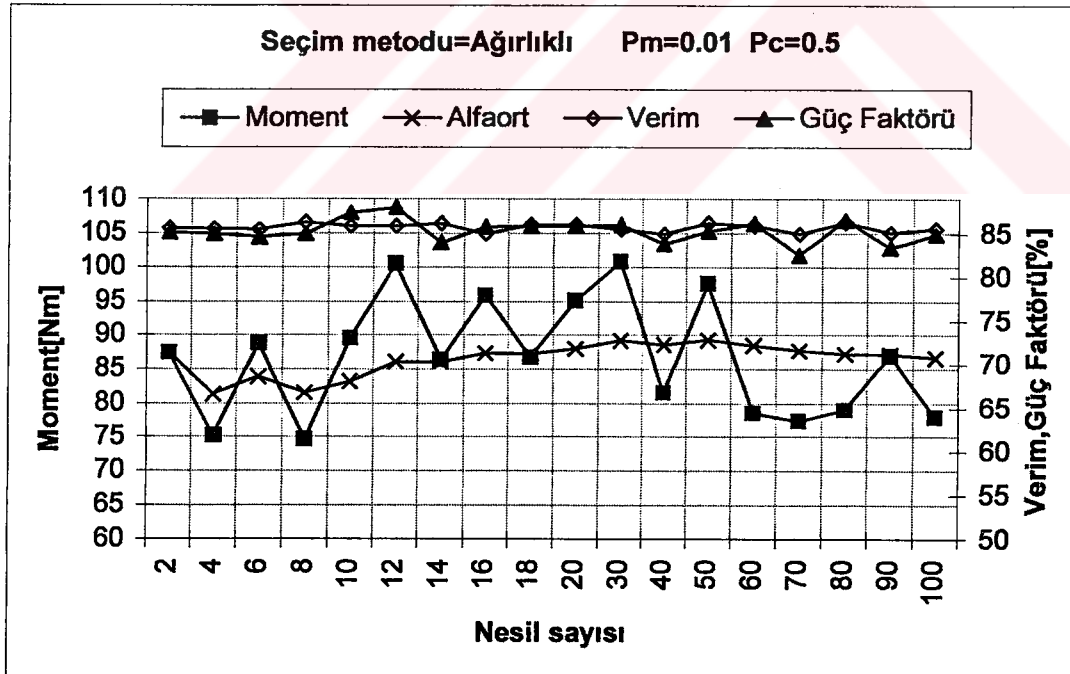


(b)

Şekil 6.18 Popülasyon sayısı $Pop=100$ için moment, verim ve güç faktörü değişimleri
 (a) Rulet seçim metodu (b) Ağırlıklı seçim metodu

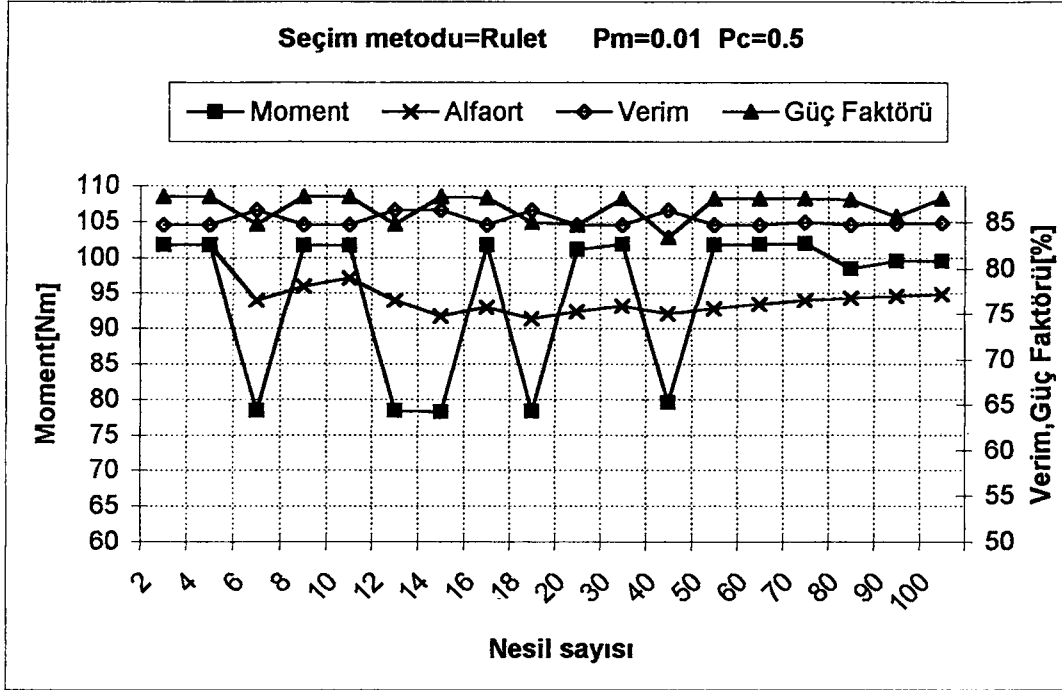


(a)

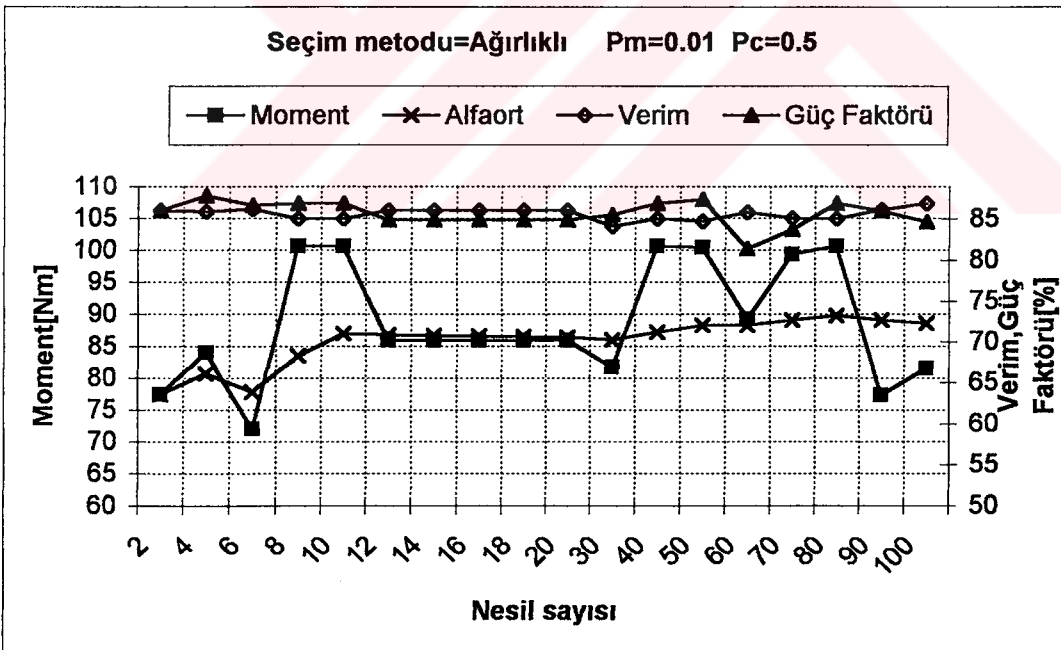


(b)

Şekil 6.19 Popülasyon sayısı Pop=200 için moment, verim ve güç faktörü değişimleri
(a) Rulet seçim metodu (b) Ağırlıklı seçim metodu



(a)



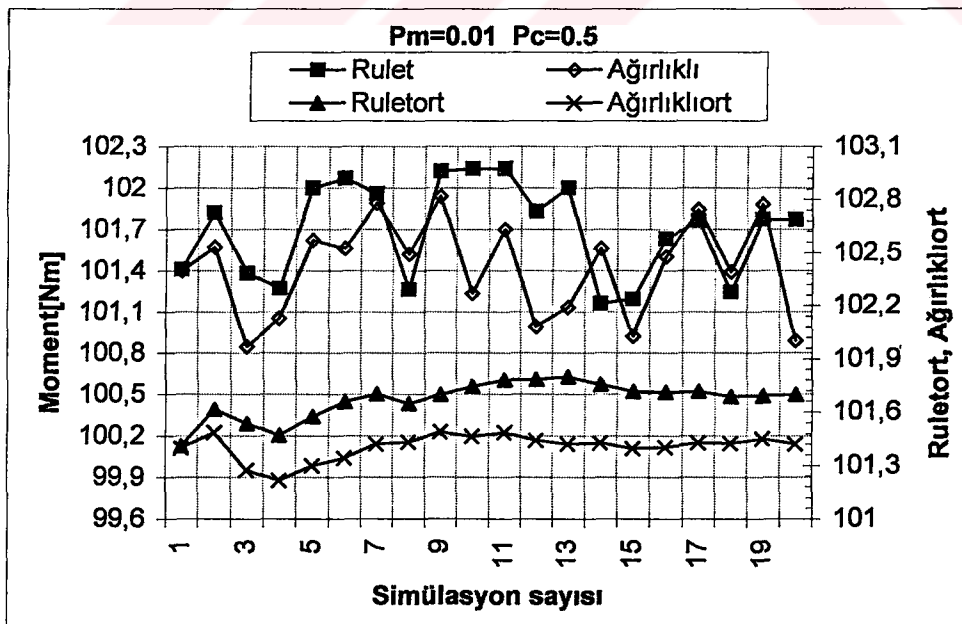
(b)

Şekil 6.20 Popülasyon sayısı Pop=300 için moment, verim ve güç faktörü değişimleri
(a) Rulet seçim metodu (b) Ağırlıklı seçim metodu

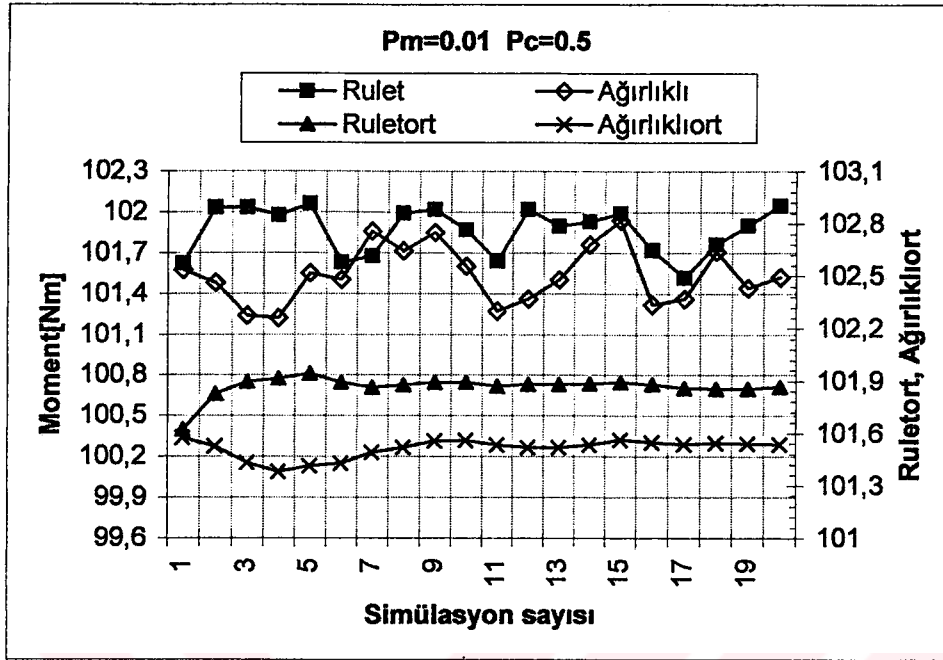
Şekil 6.21'den Şekil 6.24'e kadar simülasyon sayısına göre, değişik popülasyon sayılarında ($Pop=50, 100, 200, 300$) rulet seçim metoduyla ağırlıklı seçim metodunun karşılaştırılması görülmektedir. Mutasyon oranı ($P_m=0.01$) ve çaprazlama oranı ($P_c=0.5$) sabit tutulmuştur. Rulet seçim metodunun ortalama uygunluk değeri "Ruletort" ve ağırlıklı seçim metodunun ortalama uygunluk değeri "Ağırlıklıort" olarak gösterilmiştir.

Popülasyon sayısı 50 ile 200 arasında Ruletort ve Ağırlıklıort'da bir artış meydana gelmektedir. Buna göre popülasyon sayısının artırılmasıyla daha iyi sonuç alınacağı söylenebilir. Ancak popülasyon sayısının 200'den sonraki değerlerinde (örneğin; 300), Ruletort ve Ağırlıklıort azalmaktadır. Bu nedenle, popülasyon sayısının çok fazla artırılmasının çözüme katkı sağlamadığı görülmüştür.

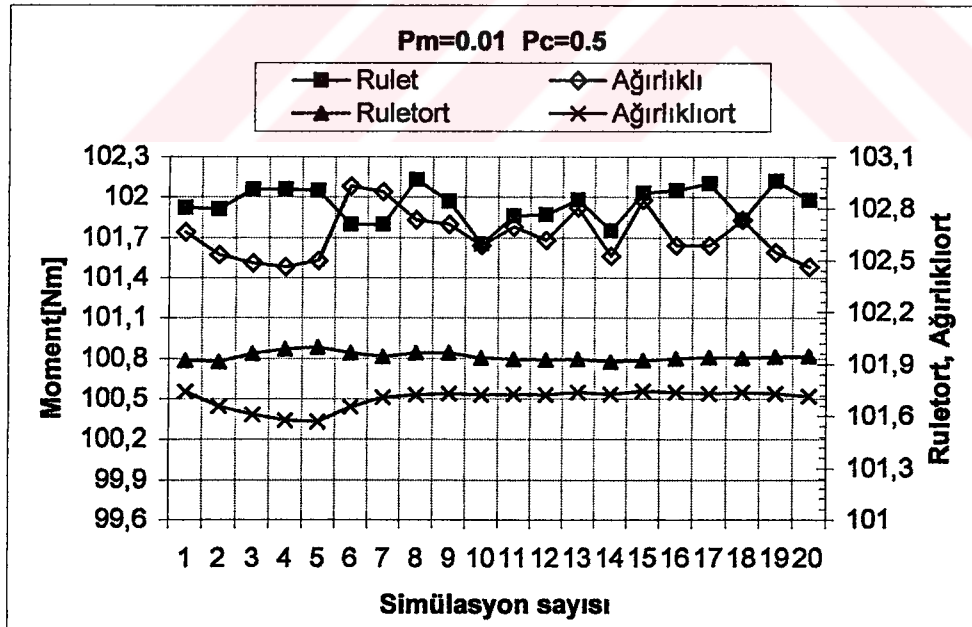
Şekil 6.21'den Şekil 6.24'e kadar olan grafiklerde seçilen bütün popülasyon değerlerinde ($Pop=50, 100, 200, 300$), rulet seçim metodunun ortalama uygunluk değerinin, ağırlıklı seçim metodunun uygunluk değerinden yüksek olduğu görülmüştür. Ağırlıklı seçim metodunda bilinçli olarak uygunluk değeri, yüksek seçilmesine rağmen Rulet seçim metoduna göre ortalama uygunluk değerleri, daha düşük kalmaktadır. Rulet seçim metodunun Ağırlıklı seçim metoduna göre daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.



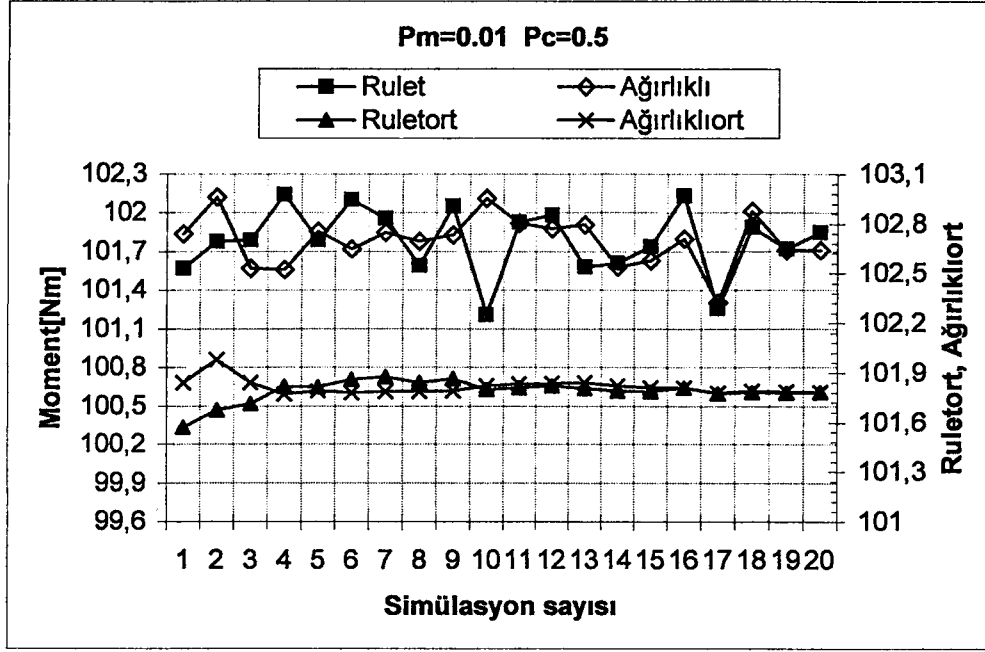
Şekil 6.21 Popülasyon sayısı $Pop=50$ için seçim metotlarının karşılaştırılması



Şekil 6.22 Popülasyon sayısı Pop=100 için seçim metotlarının karşılaştırılması



Şekil 6.23 Popülasyon sayısı Pop=200 için seçim metotlarının karşılaştırılması



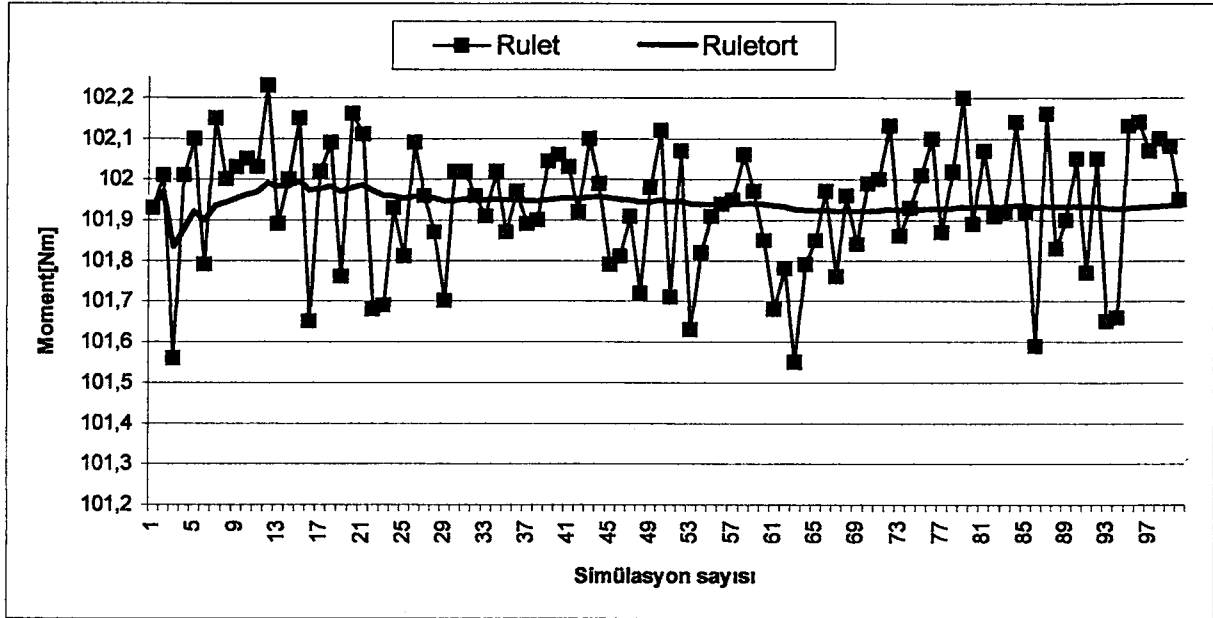
Şekil 6.24 Popülasyon sayısı $Pop=300$ için seçim metotlarının karşılaştırılması

Simülasyon sayısı 100 yapılarak elde edilen sonuçlar, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da verilmektedir. Simülasyon sayısının artmasıyla sonuçların daha kararlı hale geldiği görülmektedir. Burada Rulet seçim metodunun ortalama uygunluk değerinin, 101.9 üzerinde ve Ağırlıklı seçim metodunun ortalama uygunluk değerinin, 101.6'nın üzerinde seyrettiği söylenebilir.

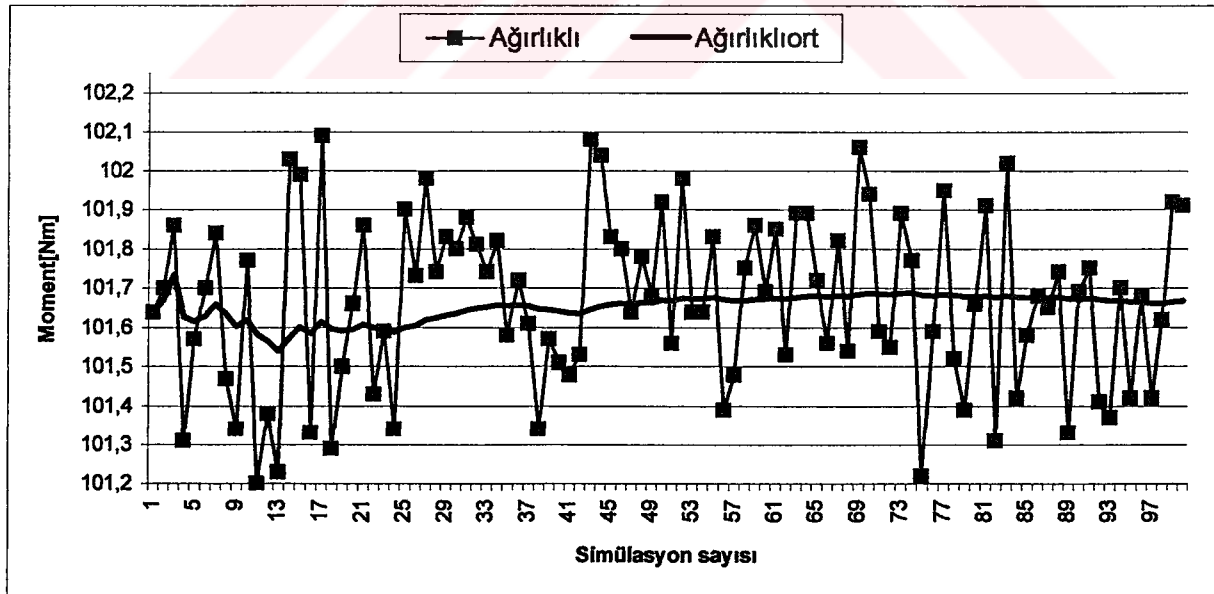
Şekil 6.27'de çaprazlama oranı $P_c=0.25$ ve $P_c=0.5$ 'e göre moment değişimleri verilmiştir. $P_c=0.25$ 'in ortalama uygunluk değeri " Ort_1 " ve $P_c=0.5$ 'in ortalama uygunluk değeri " Ort_2 " ile gösterilmiştir. Çaprazlama oranı $P_c=0.25$ yerine $P_c=0.5$ yapılırsa, daha iyi sonuç elde edileceği Ort_2 'ye bakılarak anlaşılabılır.

Şekil 6.28'de çaprazlama oranı $P_c=0.75$ ve $P_c=0.9$ için moment değişimleri verilmiştir. $P_c=0.75$ 'in ortalama uygunluk değeri, " Ort_3 " ve $P_c=0.9$ 'in ortalama uygunluk değeri, " Ort_4 " ile gösterilmiştir. $P_c=0.75$ 'lik çaprazlama oranı, $P_c=0.9$ 'lık çaprazlama oranına göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

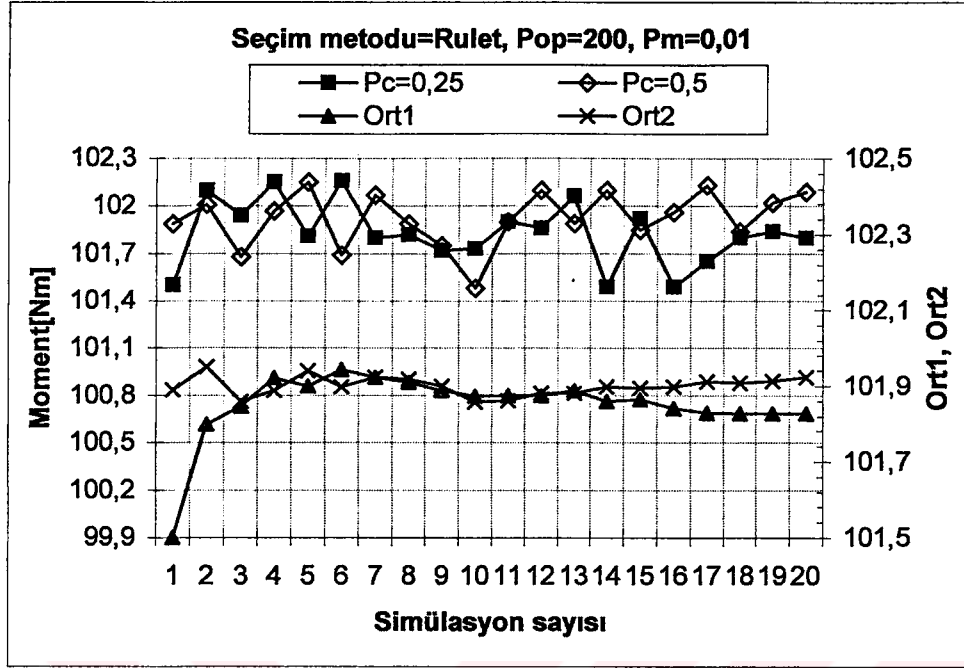
GA'nın çaprazlama oranının fazla yüksek tutulması, kromozomların yapısını bozarak kısa zamanda yakınsamasına, düşük tutulması ise araştırma uzayında yeni çözümler bulamamasına neden olmaktadır. Şekil 6.27 ve Şekil 6.28 incelendiğinde GA'nın çaprazlama oranı 0.5-0.75 aralığında daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.



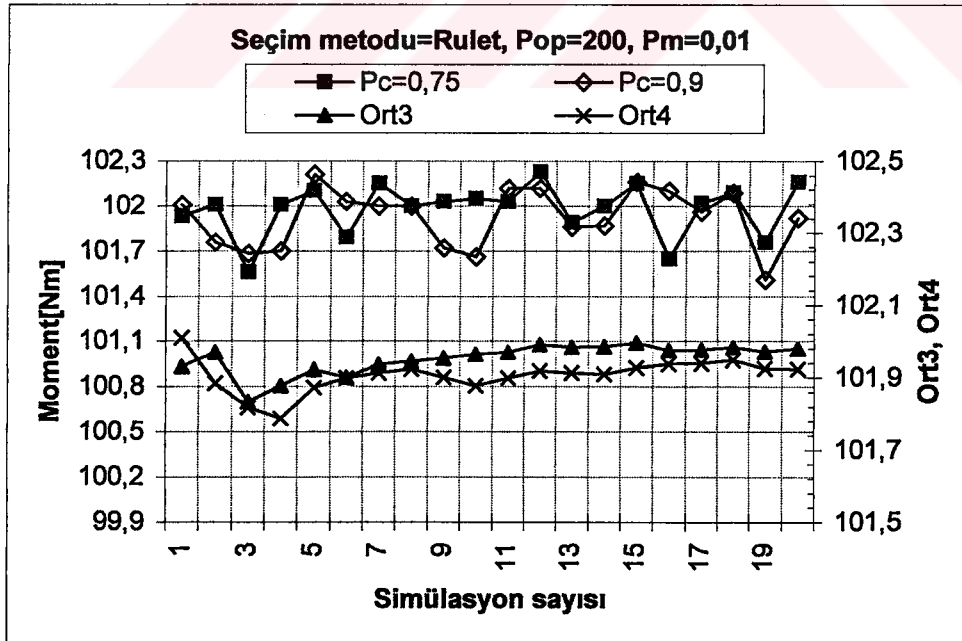
Şekil 6.25 Rulet seçim metodu için moment değişimi
(Pop=200, Pm=0.01 Pc=0.75)



Şekil 6.26 Ağırlıklı seçim metodu için moment değişimi
(Pop=200, Pm=0.01 Pc=0.75)



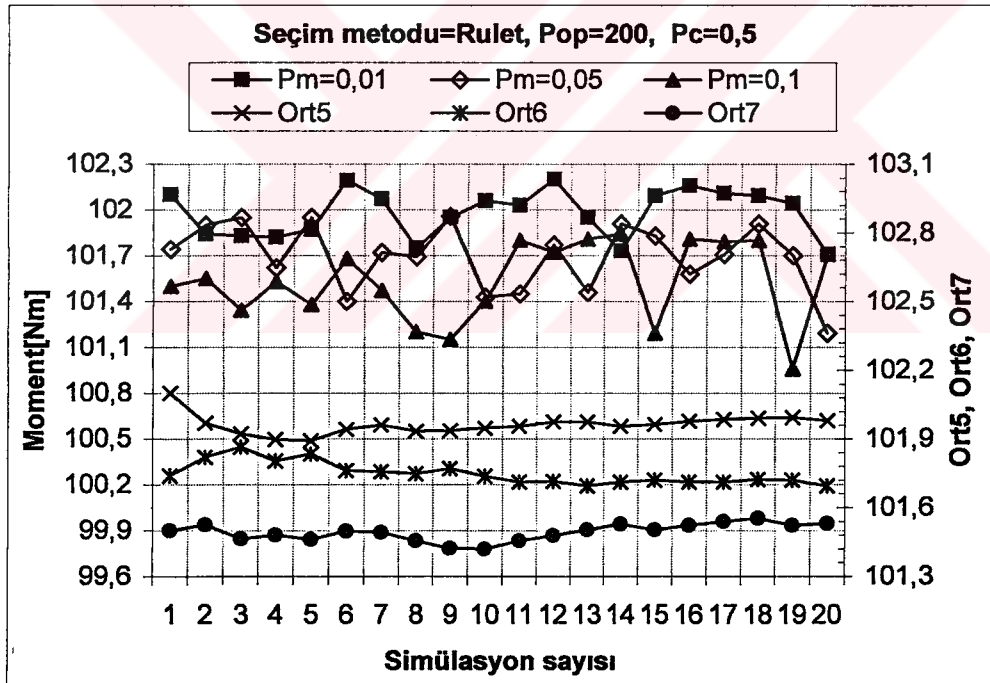
Şekil 6.27 $P_c=0,25$ ve $P_c=0,5$ çaprazlama oranlarının karşılaştırılması



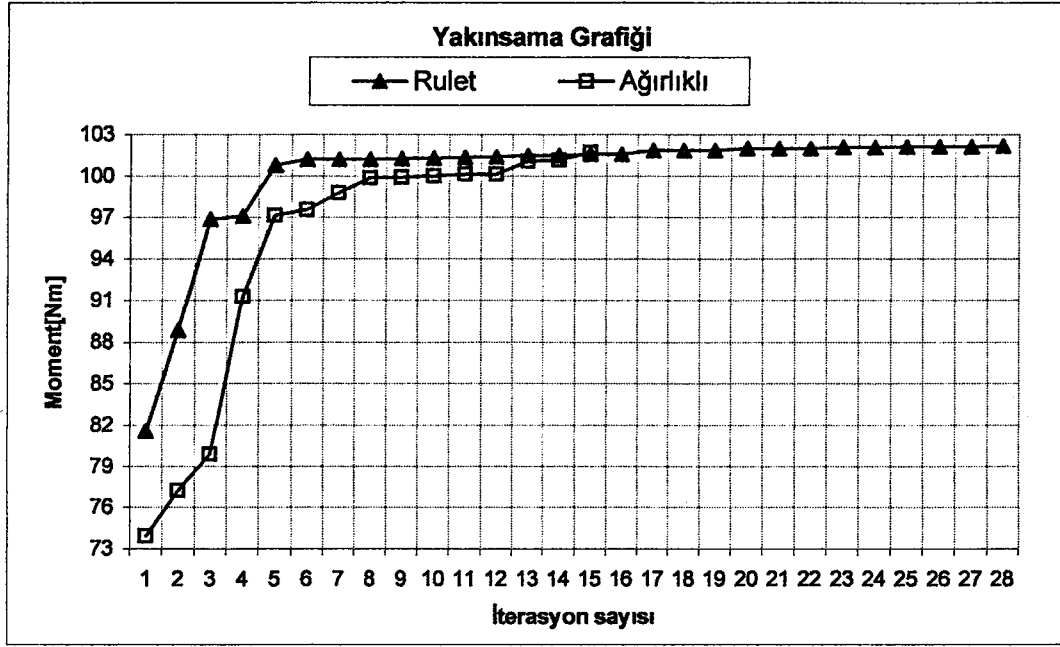
Şekil 6.28 $P_c=0,75$ ve $P_c=0,9$ çaprazlama oranlarının karşılaştırılması

Şekil 6.29’da değişik mutasyon oranları ($P_m=0.01$, $P_m=0.05$ $P_m=0.1$) karşılaştırılmıştır. $P_m=0.01$ ’in ortalama uygunluk değeri “Ort₅”, $P_m=0.05$ ’in ortalama uygunluk değeri “Ort₆” ve $P_m=0.1$ ’in ortalama uygunluk değeri “Ort₇” ile gösterilmiştir. Mutasyon oranı artıkça, popülasyonun ortalama uygunluk değerlerinin düştüğü görülmekte ve GA’nın kısa zamanda yakınsamasına neden olmaktadır. Bu yüzden mutasyon oranı 0.01-0.05 arasında tutulmalıdır.

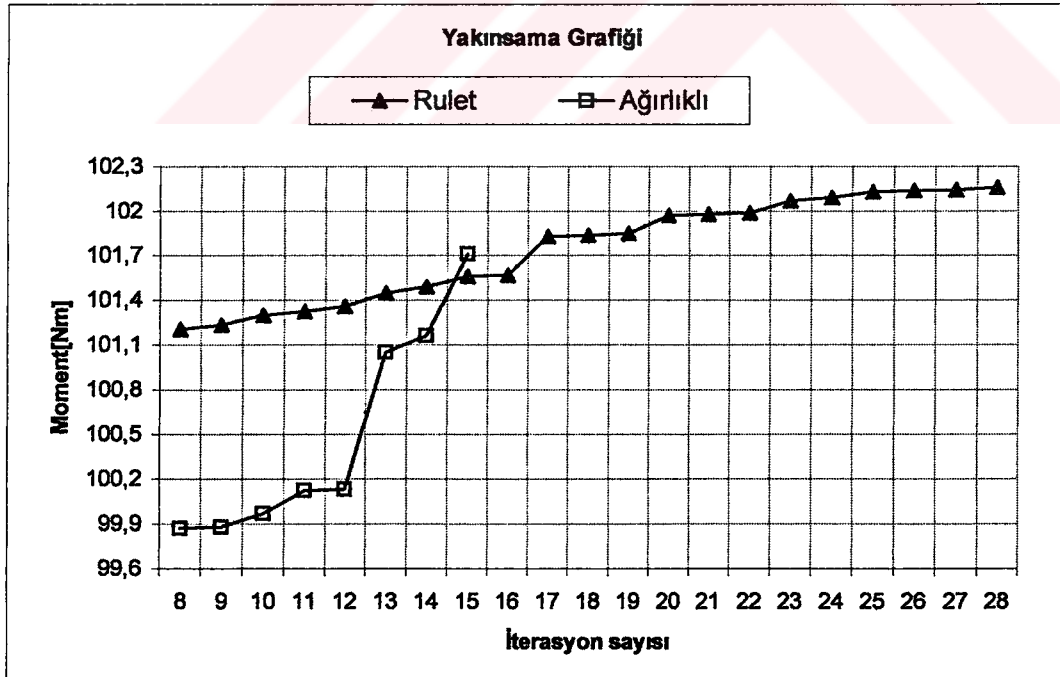
Şekil 6.30 ve Şekil 6.31’de rulet ve ağırlıklı seçim metotlarının yakınsama eğrileri görülmektedir. Şekil 6.31’de yakınsama eğrilerinin, genişletilmiş hali verilmiştir. Ağırlıklı seçim metodu 15. iterasyonda yakınsarken, Rulet seçim metodu 28. iterasyonda yakınsamaktadır. Ağırlıklı seçim metodunun çok erken yakınsaması bu metodun dezavantajlarından sayılır. Bu durum araştırma uzayında başka çözüm bulunamamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.29 Mutasyon oranlarının karşılaştırılması



Şekil 6.30 Rulet ve Ağırlıklı seçim metotlarının yakınsaması
(Pop=200, Pm=0.01 Pc=0.5)



Şekil 6.31 Rulet ve Ağırlıklı seçim metotlarının yakınsama eğrilerinin genişletilmiş hali (Pop=200, Pm=0.01 Pc=0.5)

Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3’de sırasıyla 30 kW ve 55 kW’lık motorların, optimizasyon sonucunda elde edilen tasarım parametrelerinin değerleri verilmiştir. GA optimizasyonu sonuçları incelendiğinde, mevcut motorun değerlerine göre sarım sayısı artmış, buna karşılık stator endüvi uzunluğu kısalmıştır. Bu şekilde magnetik akı yoğunluğu dengelenmeye çalışılmıştır. Diğer taraftan, stator iç çapı ve rotor çubuk çapı artmıştır. Stator oluk yüksekliği azalmış, stator oluk genişliği ise yaklaşık sabit kalmıştır. Mevcut motorların dolgu faktörü küçük olduğu için motor momenti üzerinde olumsuz etki yaptığı gözlenmiştir. Optimize edilen motorlarda ise sarım sayısı artırılıp oluk hacmi küçültüldüğü için dolgu faktörü artmış ve motor momentinin iyileştirilmesine katkı sağlanmıştır.

Çizelge 6.2 30 kW’lık motorun tasarım parametreleri optimizasyon sonuçları

Sembol	Tanımlama	Mevcut motor değerleri	GA	Birim
$x_1 = w_1$	Bir fazın sarım sayısı	52	59.99	-
$x_2 = L_i$	Stator demir uzunluğu	55	44.796	cm
$x_3 = w_{ha}$	Kısa devre halkası genişliği	14	18.981	mm
$x_4 = D_i$	Stator iç çapı	8.925	9.883	cm
$x_5 = h_1$	Stator oluk yüksekliği	21.5	16.529	mm
$x_6 = w_s$	Stator oluk genişliği	13	13.313	mm
$x_7 = g$	Hava aralığı	0.75	0.691	mm
$x_8 = e$	Rotor oluk geçidi	0.5	0.476	mm
$x_9 = d_{i2}$	Rotor oluk çapı	8	8.966	mm
$x_{10} = D_a$	Stator dış çapı	18	18	cm

Çizelge 6.3 55 kW'lık motorun tasarım parametreleri optimizasyon sonuçları

Sembol	Tanımlama	Mevcut motor değerleri	GA	Birim
$x_1 = w_l$	Bir fazın sarım sayısı	36	35.81	-
$x_2 = L_i$	Stator demir uzunluğu	77	72.322	cm
$x_3 = w_{ha}$	Kısa devre halkası genişliği	28	29.13	mm
$x_4 = D_i$	Stator iç çapı	8.925	9.927	cm
$x_5 = h_l$	Stator oluk yüksekliği	21.5	16.921	mm
$x_6 = w_s$	Stator oluk genişliği	13	13.098	mm
$x_7 = g$	Hava aralığı	0.75	0.73	mm
$x_8 = e$	Rotor oluk geçidi	0.5	0.45	mm
$x_9 = d_{i2}$	Rotor oluk çapı	8	8.935	mm
$x_{10} = D_a$	Stator dış çapı	18	18	cm

Mevcut motorlar için analitik olarak hesaplanan değerler ve GA ile optimizasyondan elde edilen değerler Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5'de verilmiştir. Stator iç çapı yükseltildiği için, stator boyunduruğundaki magnetik akı yoğunluğu yükselmiş, buna karşılık rotor boyunduruğundaki magnetik akı yoğunluğu düşmüştür. Stator ve rotor dişlerindeki magnetik akı yoğunluğu biraz artmıştır. Yol alma, devrilme ve çalışma momentlerinde artış kaydedilmiştir. Ayrıca güç faktörü ve verim iyileştirilmiştir.

30 kW'lık motorda çalışma momenti, %7.34 artmış ve motor ağırlığı ise %13.61 azalmıştır. Stator sargısı akım yoğunluğu biraz artmış, rotor çubukları akım yoğunluğu düşmüştür. Çevresel akım yoğunluğu mevcut motora göre biraz artmıştır.

55 kW'lık motorda çalışma momenti, %8.99 artmış ve motor ağırlığı ise %4.28 azalmıştır. Çevresel akım yoğunluğu düşmüştür. Mevcut motor 2 mm iletken çapında 9 paralel sarımla yapıldığı için stator akım yoğunluğu, optimize edilmiş motora göre düşüktür. Buna karşılık mevcut motorun rotor akım yoğunluğu fazladır. Optimize edilmiş motorun stator iletken çapı 2.5 mm'dir. Stator ve rotor akım yoğunlukları uygun değerlerdedir.

Çizelge 6.4 30 kW motor için hesaplanan değerler ve GA'ya göre elde edilen sonuçlar

Sembol	Tanımlama	Birim	Mevcut motorun hesaplanan değerleri	GA
P	Aktif güç	kW	29440	29440
V _n	Nominal gerilim	V	380	380
2p	Kutup çifti		2	2
n _s	Senkron dönme hızı	d/dak	3000	3000
S	Kayma		0.05	0.05
n ₁	Stator oluk sayısı		24	24
n ₂	Rotor oluk sayısı		18	18
Q	Faz başına düşen oluk sayısı		4	4
z ₀	Bir oluktaki iletken sayısı		13	15
DF	Dolgu Faktörü		0.137	0.1696
I _n	Nominal akım	A	59.19	60.10
I _{1k}	Kısa devre akımı	A	233.11	245.95
A	Çevresel akım yoğunluğu	A/cm	397.78	412.74
J ₁	Stator sargısı akım yoğunluğu	A/mm ²	11.37	12.6
J ₂	Rotor çubukları akım yoğunluğu	A/mm ²	11.21	10.3
R _i	Stator sargısı iletken çapı	mm	2	1.9
B _{d1}	Stator dış akı yoğunluğu	T	1.543	1.774
B _{d2}	Rotor dış akı yoğunluğu	T	1.394	1.227
B _{j1}	Stator boyunduruğu akı yoğunluğu	T	1.472	1.554
B _{j2}	Rotor boyunduruğu akı yoğunluğu	T	2.06	1.268
B	Hava aralığı akı yoğunluğu	T	0.592	0.563
P _{ktop}	Toplam kayıplar	W	4993.02	3565.1
T	Sıcaklık	°C	65	65
η	Verim	%	83.04	87.89
Cosφ	Güç Faktörü		0,843	0.862
G_{top}	Toplam ağırlık	kg	89.22	77.07
M _{dy}	Yolalma momenti	Nm	69.80	82.61
M _{dd}	Devrilme Momenti	Nm	189.58	198.99
M_{di}	Nominal moment	Nm	95.002	101.97
Ağırlıktaki düşme yüzdesi				%13.61
Momentteki artış oranı				%7.34

Çizelge 6.5 55 kW motor için hesaplanan değerler ve GA'ya göre elde edilen sonuçlar

Sembol	Tanımlama	Birim	Mevcut motorun hesaplanan değerleri	GA
P	Aktif güç	kW	55200	55200
V _n	Nominal gerilim	V	380	380
2p	Kutup çifti		2	2
n _s	Senkron dönme hızı	d/dak	3000	3000
s	Kayma		0.05	0.05
n ₁	Stator oluk sayısı		24	24
n ₂	Rotor oluk sayısı		18	18
q	Faz başına düşen oluk sayısı		4	4
z ₀	Bir oluktaki iletken sayısı		9 (paralel)	9
DF	Dolgu Faktörü		0.1898	0.1744
I _n	Nominal akım	A	106.37	109.96
I _{lk}	Kısa devre akımı	A	422.28	444.61
A	Çevresel akım yoğunluğu	A/cm	473.54	438.24
J ₁	Stator sargısı akım yoğunluğu	A/mm ²	10.06	12.887
J ₂	Rotor çubukları akım yoğunluğu	A/mm ²	13.088	11.61
R _i	Stator sargısı iletken çapı	mm	2	2.5
B _{d1}	Stator dış akı yoğunluğu	T	1.593	1.699
B _{d2}	Rotor dış akı yoğunluğu	T	1.439	1.259
B _{j1}	Stator boyunduruğu akı yoğunluğu	T	1.519	1.658
B _{j2}	Rotor boyunduruğu akı yoğunluğu	T	2.13	1.291
B	Hava aralığı akı yoğunluğu	T	0.611	0.587
P _{ktop}	Toplam kayıplar	W	7954.32	7021.4
T	Sıcaklık	°C	65	65
η	Verim	%	85.59	87.28
Cosφ	Güç Faktörü		0.837	0.842
G _{top}	Toplam ağırlık	kg	128.21	122.72
M _{dy}	Yolalma momenti	Nm	132.22	148.75
M _{dd}	Devrilme Momenti	Nm	344.44	367.82
M _{di}	Nominal moment	Nm	171.38	186.79
Ağırlıktaki düşme yüzdesi				%4.28
Momentteki artış oranı				%8.99

6.2 Dalgıç Asenkron Motorların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Magnetik Alan Analizinin Sonuçları

Bu çalışmada, motor magnetik alan analizi ANSYS paket programı kullanılarak yapılmıştır. Motorların elektriksel eşdeğer devreleri Circu124 elemanı ile simüle edilmiş ve Plane53 elemanı kullanılarak iki boyutlu magnetik alan analizi yapılmıştır.

Motor modeli iki boyutlu olduğundan stator sargı sonu direnci ve kaçak reaktansı modele dahil edilmemiştir. Ancak bu iki değer, analog olarak hesaplanıp motor eşdeğer devresine ilave edilmiştir.

Motorun magnetik akı dağılımını görmek ve şebekeden çektiği elektriksel bilgileri incelemek açısından zamana bağlı nonlinear harmonik çözüm yapılmıştır. Bu çözümde, şebekeden çekilen aktif güç ve aktif akım, reaktif güç ve reaktif akım olmak üzere reel ve imajiner iki bileşen elde edilmektedir. Bu değerler kullanılarak güç faktörü, verim ve şebekeden çekilen akım bulunmuştur. Ayrıca programdan motor momenti kolayca hesaplanabilmektedir.

Rotorda meydana gelen deri olayının hesaba dahil edilmesi için stator büyüklükleri rotora indirgenerek çözümler yapılmıştır. Bu nedenle çözüm sonucunda bulunan güç değerleri, kaymaya bölünüp üç ile çarpılarak motorun şebekeden çektiği güç bulunmaktadır. Sistem dengeli kabul edildiği için bütün fazlardan çekilen güçler birbirine eşittir.

Model oluşturulurken rotor çubukları eğimsiz kabul edilmiştir. Deri olayı rotorda hesaba dahil edilirken iletkenlerde dahil edilmemiştir. Ayrıca stator oluk ve iletkenlerinde girdap akımlarının meydana getirdiği kayıplar ANSYS programının özelliğinden dolayı modellenememiştir.

Stator ve rotor iletkenleri doğrusal özellik gösterdiğinden sadece bağlı geçirgenlik değeri ile tanımlanmıştır. Hava aralığı da aynı şekilde magnetik geçirgenlik tanımlanarak gösterilmiştir. Motorun stator, rotor ve milinde kullanılan malzemelerin magnetik özelliklerine göre değişen mıknatıslanma eğrileri kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan motorların, sacı ve mili için BH eğrileri beşinci bölümde Şekil 5.5’de verilmiştir.

6.2.1 30 kW'lık motorla ilgili yapılan çalışmalar

Üretimi yapılan mevcut motorun özellikleri Çizelge 6.6'da verilmiştir. Boşta çalışma deneyi Çizelge 6.7'de, yükte çalışma deneyi Çizelge 6.8'de görülmektedir. Deneysel çalışmaların sonuçlarından da anlaşılacağı üzere motorun hem verimi düşük hem de milinden alınan moment istenen seviyede değildir.

Mevcut motor; Çizelge 6.2'deki tasarım parametrelerinin değerleri ve Çizelge 6.6'da verilen özelliklere göre ANSYS'de modellenmiş ve magnetik alan analizi yapılmıştır. 30 kW'lık motor için ANSYS programıyla hesaplanan değerler Çizelge 6.9'da verilmiştir. Aynı devir sayısında, hesaplanan ve ölçülen değerler karşılaştırıldığında, hesaplanan değerlerin bir miktar büyük çıktığı görülmektedir. Bunun nedeni, pratikte; şebeke geriliminin dengesizliği, motorun montajı ve motor parçalarının işlenmesi sırasındaki hatalar ve toleranslardan kaynaklanmaktadır. Bilgisayarda model oluşturulurken şartların ideal olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 6.6 30 kW'lık mevcut DASM'nin özellikleri

Tanım	Değerler	Birim
Faz sayısı	3	
Faz gerilimi	380	V
Frekans	50	Hz
Kutup sayısı	2	
Çıkış gücü	29440	W
Stator oluk sayısı	24	
Oluktaki iletken sayısı	13	
Rotor oluk sayısı	18	
Devir sayısı	2850	d/dk
Stator dış çapı	18	cm
Stator iç çapı	8.925	cm
İletken çapı	2	mm
Saç paket boyu	55	cm
Mil çapı	5.8	cm

Çizelge 6.7 30 kW'lık mevcut DASM'nin boşta çalışma deneyi

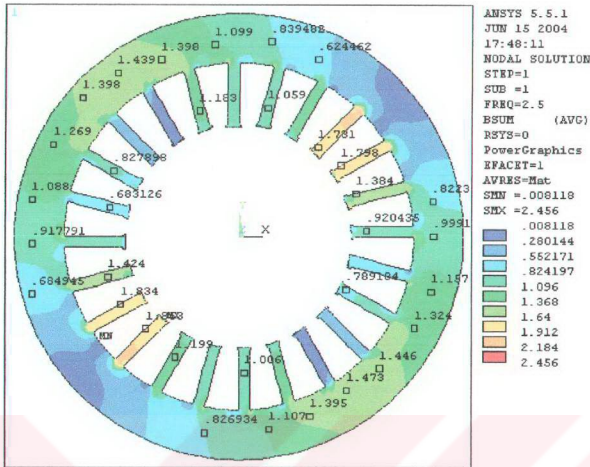
Gerilim (V)	Akım (A)	Pgiriş (W)	Cosφ	D.sayısı (d/dk)	Pçıkış (W)	Verim (%)
396	26.9	6700	0,21	2976	3890	58

Çizelge 6.8 30 kW'lık mevcut motorun yükte çalışma deneyi

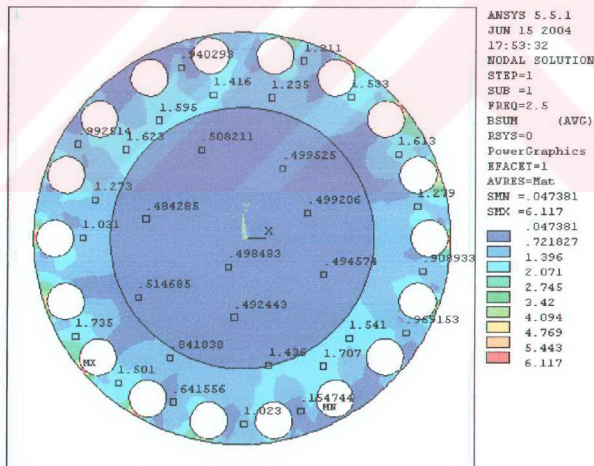
De.say. (d/dk)	Gerilim (V)	Akım (A)	Cosφ	Pgiriş (W)	Kuvv. (N)	Mdi (Nm)	Pçıkış (W)	Verim (%)
2848	389	61.8	0.84	35100	748.72	89.84	26779	76.2
2858	389	55	0.82	30700	548.8	65.85	19698	64.1
2840	388	63.1	0.84	34700	666.4	79.96	23768	68.4
2838	390	62.3	0.84	36100	774.2	92.9	27594	76.4
2841	390	62.1	0.84	35500	764.4	91.72	27273	76.8
2822	388	66.4	0.85	38500	749.7	89.96	26570	69.0
2826	389	65.6	0.85	36300	720.3	86.43	25564	70.4
2843	391	65	0.85	37000	727.16	87.22	25963	70.1
2846	386	60.7	0.84	34500	764.4	94.40	28120	81.5
2860	389	59.2	0.83	33600	690.9	82.9	24816	73.8
2860	389	58.4	0.83	33000	686	82.32	24640	74.6

Çizelge 6.9 30 kW'lık mevcut motor için hesaplanan değerler

Sıra No	De.say. (d/dk)	Gerilim (V)	Akım (A)	Cosφ	Pgiriş (W)	Moment (Nm)	Pçıkış (W)	Verim (%)
1	0	380	235.011	0.407	64292	71.28	0	0
2	500	380	232.939	0.44	67404.68	83.97	4403.219	6.532512
3	1000	380	229.2487	0.473	71263.06	100.6	10550.53	14.80504
4	1500	380	219.3781	0.526	75722	123.12	19329.84	25.52738
5	2000	380	197.4269	0.61	79213.51	152.6	31960.24	40.34695
6	2200	380	181.6199	0.661	78700.75	164.32	37871.82	48.12129
7	2300	380	170.5067	0.69	77262.17	169.27	40926.1	52.97042
8	2400	380	159.2055	0.72	75032	171.34	43040.61	57.363
9	2500	380	143.7749	0.755	70898.8	170.21	44573.91	62.86978
10	2650	380	114.5549	0.805	60318.97	156.23	43365.7	71.89397
11	2750	380	90.00356	0.834	49197.59	133.56	38457	78.16846
12	2800	380	75.5665	0.842	41863.64	116.02	34025.88	81.27789
13	2850	380	61.72408	0.836	33945	95.22	28404.13	83.67691
14	2900	380	44.48536	0.815	24081.82	68.15	20692.93	85.92761
15	2970	380	23.93722	0.556	8487	22.4	6963.264	82.0462



Şekil 6.33 30 kW'lık mevcut motorun stator akı yoğunluğu [Tesla]



Şekil 6.34 30 kW'lık mevcut motorun rotor ve mil akı yoğunluğu [Tesla]

Genetik algoritmalar ile optimizasyon sonucunda elde edilen Çizelge 6.2'deki tasarım parametreleri değerleri ve Çizelge 6.10'da verilen motor özellikleri kullanılarak ANSYS programında hesaplanan değerler Çizelge 6.11'de verilmiştir.

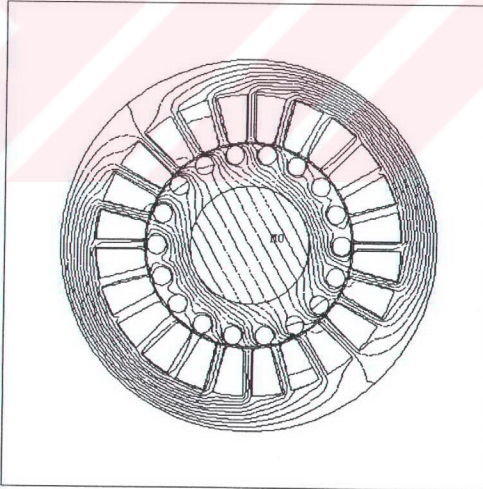
Şekil 6.35'de optimize edilmiş motorun magnetik alan çizgileri dağılımına bakılarak kutuplanmanın normal olduğu söylenebilir. Optimize edilmiş motorun stator ve rotor magnetik akı dağılımları Şekil 6.36, Şekil 6.37 ve Şekil 6.38'de görülmektedir. Stator boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğu 1.83 T ve rotor boyunduruğundaki maksimum magnetik akı yoğunluğu 1.48 T'dır. Stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu, nominal akı yoğunluğundan (1.7 T) bir miktar büyüktür ve rotor akı yoğunluğu ise nominal değerden küçüktür. Mevcut motorla kıyaslandığında, optimize edilen motorun stator iç çapı arttığından, stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu artmış ve rotor boyunduruğundaki akı yoğunluğu azalmıştır. Stator dışlarındaki maksimum akı yoğunluğu 1.86 T ve rotor dışlarındaki maksimum akı yoğunluğu 1.58 T 'dır. Stator ve rotor dışlarındaki akı yoğunluğu, nominal değerlerin (2.1 T) altındadır. Mevcut motorla karşılaştırıldığında stator dışlarındaki akı yoğunluğu pek fazla değişmemiş, rotor dışlarındaki akı yoğunluğu ise azalmıştır. Motor milindeki akı yoğunluğu 0.4 T'dır ve mevcut motorun mil akı yoğunluğundan küçüktür.

Çizelge 6.10 30 kW'lık optimize edilmiş motorun özellikleri

Tanım	Değerler	Birim
Faz sayısı	3	
Faz gerilimi	380	V
Frekans	50	Hz
Kutup sayısı	2	
Çıkış gücü	29440	W
Stator oluk sayısı	24	
Oluktaki iletken sayısı	15	
Rotor oluk sayısı	18	
Devir sayısı	2850	d/dk
Stator dış çapı	18	cm
İletken çapı	1.9	mm
Saç paket boyu	45	cm
Mil çapı	5.8	cm

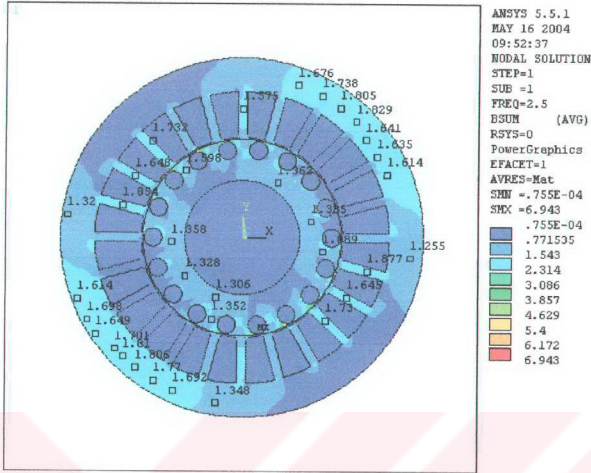
Çizelge 6.11 30 kW'lık optimize edilmiş motor için hesaplanan değerler

Sıra No	De.say. (d/dk)	Gerilim (V)	Akım (A)	Cosφ	Pgiriş (W)	Moment (Nm)	Pçıkış (W)	Verim (%)
1	0	380	245.2522	0.433	70284	84	0	0
2	500	380	242.6116	0.46	73250.42	98.55	5167.765	7.054929
3	1000	380	238.4052	0.49	76979.28	118.35	12412.07	16.12392
4	1500	380	225.0045	0.549	81150	143.55	22537.35	27.77246
5	2000	380	200.1474	0.637	83857.66	173.56	36350.06	43.34733
6	2300	380	172.181	0.715	80908.7	186.3	45043.61	55.67215
7	2400	380	160.1475	0.746	78285	186.3	46798.56	59.77973
8	2430	380	156.8396	0.752	77131.58	185.7	47230.94	61.23424
9	2500	380	145.612	0.776	74065.66	182.97	47915.45	64.69321
10	2600	380	125.2257	0.813	66787.22	172.8	47042.73	70.43672
11	2750	380	90.00198	0.856	50573.49	140	40311.32	79.70839
12	2800	380	75.54942	0.87	43270	122.85	36028.96	83.26544
13	2850	380	59.97603	0.868	34261.2	100.26	29907.56	87.29279
14	2900	380	43.44306	0.855	24569.09	72.06	21880.15	89.05561
15	2970	380	21.29124	0.584	8658	23.56	7323.862	84.59069

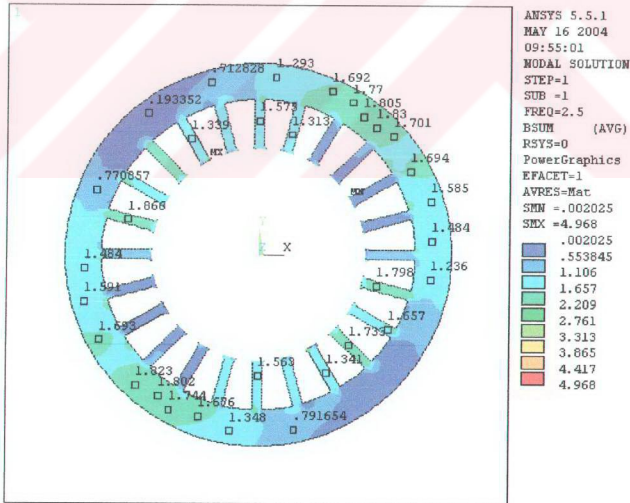


ANSYS 5.5.1
MAY 16 2004
10:01:24
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
FREQ=2.5
AZ
RSYS=0
SMN =-.030596
SMX =.030594
-.029463
-.027196
-.02493
-.020398
-.018131
-.015865
-.011333
-.009066
-.0068
-.002267
-.115E-05
.004531
.006798
.009064
.013597
.015863
.018129
.022662
.024928
.02946

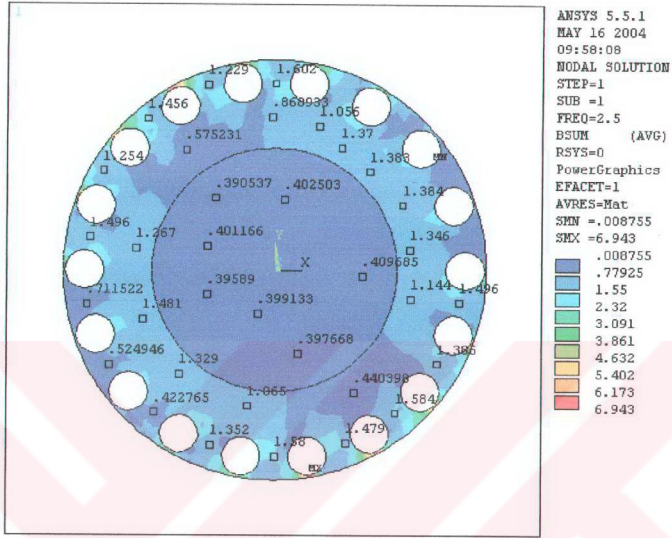
Şekil 6.35 30 kW'lık optimize edilmiş motorun alan çizgileri dağılımı



Şekil 6.36 30 kW'lık optimize edilmiş motorun akı yoğunluğu [Tesla]

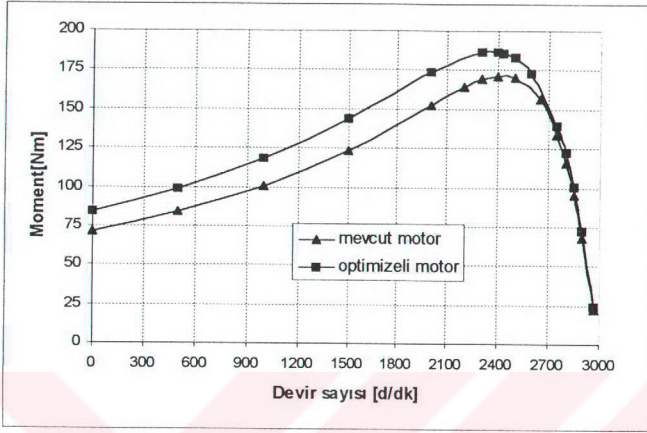


Şekil 6.37 30 kW'lık optimize edilmiş motorun stator akı yoğunluğu [Tesla]

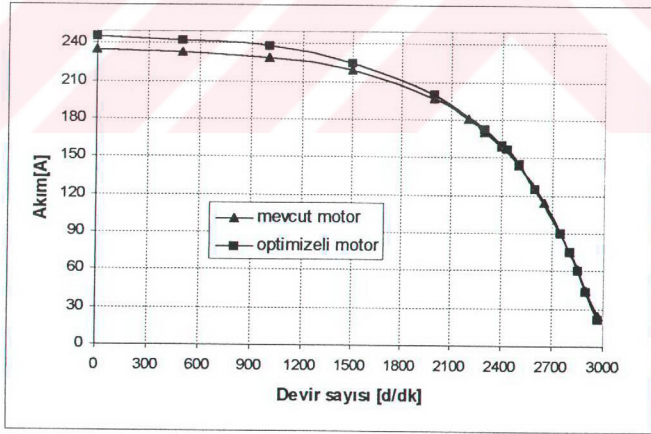


Şekil 6.38 30 kW'lık optimize edilmiş motorun rotor ve mil akı yoğunluğu [Tesla]

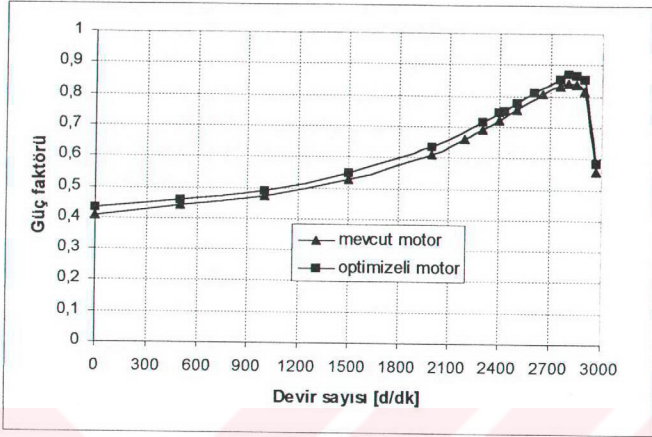
30 kW'lık mevcut motor için hesaplanan değerlerin verildiği Çizelge 6.9 ve optimize edilmiş motor için ANSYS programında hesaplanan değerlerin verildiği Çizelge 6.11'e göre performans eğrileri çizilmiştir. Şekil 6.39'dan Şekil 6.42'ye kadar olan değişimler, mevcut motor ve optimize edilmiş motor için; moment, akım, güç faktörü ve verim eğrileridir. Değişimler incelendiğinde, optimize edilmiş motorun moment, güç faktörü ve veriminde önemli ölçüde iyileşme sağlandığı görülmüştür.



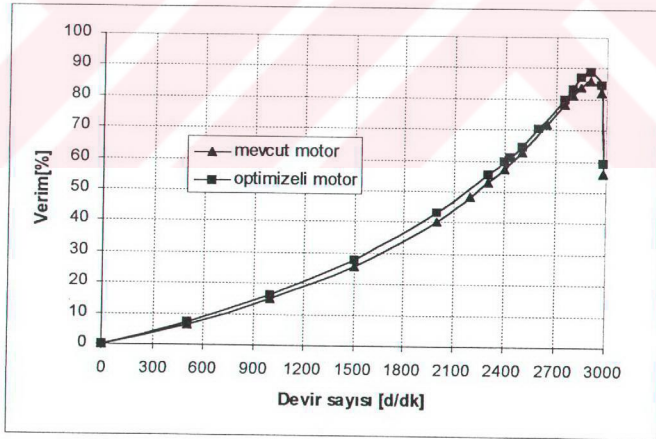
Şekil 6.39 30 kW'lık motorun moment eğrisi



Şekil 6.40 30 kW'lık motorun akım eğrisi



Şekil 6.41 30 kW'lık motorun güç faktörü eğrisi



Şekil 6.42 30 kW'lık motorun verim eğrisi

6.2.2 55 kW'lık motorla ilgili yapılan çalışmalar

Mevcut motor, Çizelge 6.3'deki tasarım parametrelerinin değerleri ve Çizelge 6.12'de verilen özelliklerine göre ANSYS programında modellenmiş ve hesaplanan değerler Çizelge 6.13'de verilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda motor momentinin çok düşük olduğu gözlenmiştir

Analitik olarak hesaplanan değerlerle ANSYS programında hesaplanan değerler arasında farklılıklar vardır. Bunun nedeni analitik metotlarla akı yoğunlukları ve kayıplar tam olarak hesaplanamamaktadır. ANSYS programıyla magnetik alan analizi yapıldığından kayıplar ve akı yoğunlukları daha doğru hesap edilmektedir.

Motor, 2 mm çapında 9 paralel iletkenle sarılmış olup saç boyu 77 cm'dir. Tasarım değişkenlerinde herhangi bir değişiklik yapılmadan sarım sayısının yüksek tutulması, momentin düşmesine sebep olmaktadır.

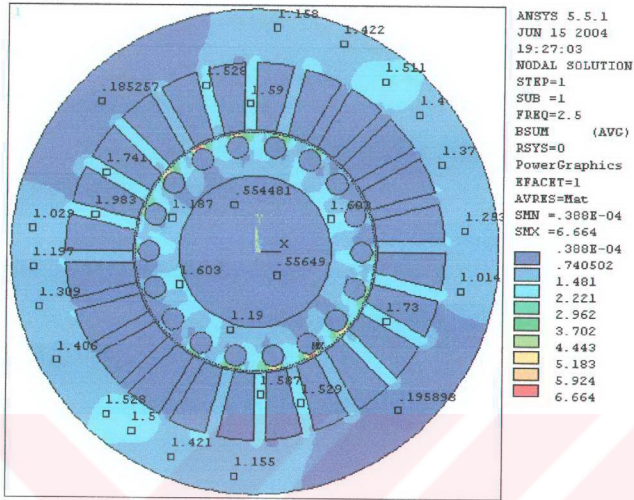
Çizelge 6.12 55 kW'lık mevcut motorun özellikleri

Tanım	Değerler	Birim
Faz sayısı	3	
Faz gerilimi	380	V
Frekans	50	Hz
Kutup sayısı	2	
Çıkış gücü	55200	W
Stator oluk sayısı	24	
Oluktaki iletken sayısı	9 (paralel)	
Rotor oluk sayısı	18	
Devir sayısı	2850	d/dk
Stator dış çapı	18	cm
Stator iç çapı	8.925	cm
İletken çapı	2	mm
Saç paket boyu	77	cm
Mil çapı	5.8	cm

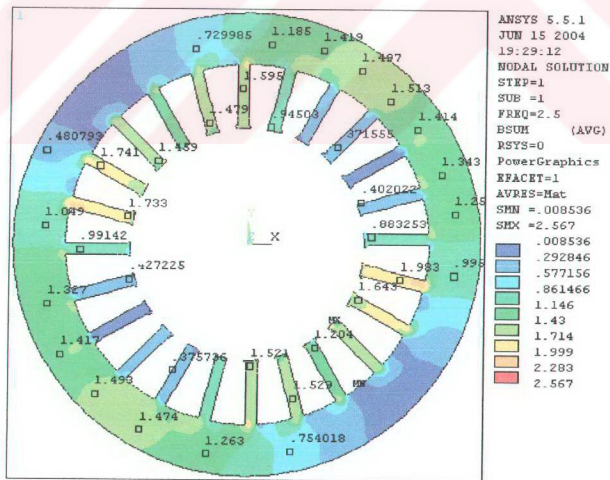
Çizelge 6.13 55 kW'lık mevcut motor için hesaplanan değerler

Sıra No	De.say. (d/dk)	Gerilim (V)	Akım (A)	Cosφ	Pgiriş (W)	Moment (Nm)	Pçıkış (W)	Verim (%)
1	0	380	422.9599	0.35	96422	131.2	0	0
2	500	380	411.1462	0.375	101411.4	150.2	7876.188	7.76657
3	1000	380	401.4007	0.412	108629.7	181.69	19054.92	17.54117
4	1500	380	385.6873	0.467	118432	223.93	35157.01	29.6854
5	2000	380	348.0799	0.56	128323.4	279.18	58470.9	45.56526
6	2200	380	321.2677	0.615	129783.5	302.08	69622.19	53.64489
7	2300	380	302.1907	0.649	128626.5	309.53	74838.16	58.18253
8	2400	380	283.5393	0.683	127177	316.5	79504.8	62.51508
9	2500	380	255.1207	0.715	119763.9	308.01	80660.43	67.34956
10	2650	380	199.0148	0.789	103359.5	282.92	78531.8	75.97929
11	2750	380	160.3147	0.811	85314.46	242.34	69778.89	81.79023
12	2800	380	134.8838	0.826	73354.55	210.78	61816.72	84.27114
13	2850	380	107.4788	0.8267	58425.4	171.57	51179.33	87.59774
14	2900	380	78.35328	0.813	42010.91	123.6	37529.66	89.33312
15	2970	380	39.13766	0.558	14632	40.42	12564.96	85.87316

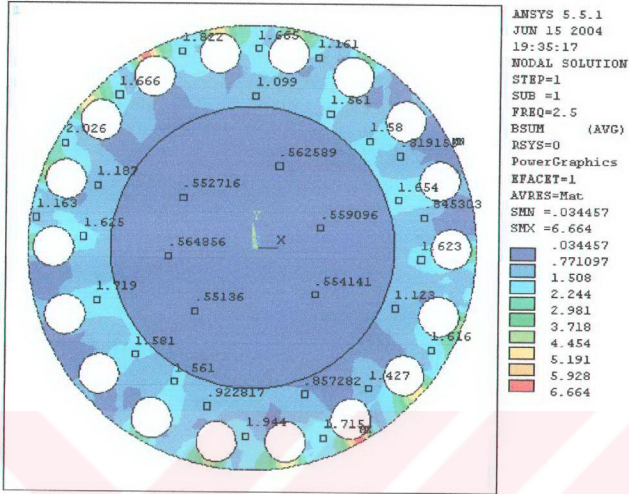
Şekil 6.43, Şekil 6.44 ve Şekil 6.45'de mevcut motorun stator ve rotor magnetik akı dağılımları görülmektedir. Stator boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğu 1.5 T iken rotor boyunduruğundaki maksimum magnetik akı yoğunluğu 1.65 T 'dir. Stator ve rotor boyunduruğundaki akı yoğunluğu, nominal akı yoğunluğundan (1.7 T) küçüktür. Stator dişlerindeki maksimum akı yoğunluğu 1.9 T ve rotor dişlerindeki maksimum akı yoğunluğu ise 1.82 T'dır. Stator ve rotor dişlerindeki akı yoğunluğu, nominal değerlerin (2.2 T) altındadır. Motor mili çözüme dahil edildiğinden, magnetik alan çizgilerinin bir kısmı milden geçmektedir ve burada magnetik akı yoğunluğu 0.56 T olduğu görülmektedir.



Şekil 6.43 55 kW'lık mevcut motorun akı yoğunluğu [Tesla]



Şekil 6.44 55 kW'lık mevcut motorun stator akı yoğunluğu [Tesla]



Şekil 6.45 55 kW'lık mevcut motorun rotor akı yoğunluğu [Tesla]

Genetik Algoritmalar ile yapılan optimizasyondan elde edilen Çizelge 6.3'deki tasarım parametreleri değerlerine ve Çizelge 6.14'de verilen motor özelliklerine göre ANSYS programında modellenen DASM'da, hesaplanan değerler Çizelge 6.15'de verilmiştir.

Optimize edilmiş motorun magnetik alan çizgileri dağılımı Şekil 6.46'da, verilmiştir. Stator ve rotor magnetik akı dağılımlarının değişimleri ise Şekil 6.47, Şekil 6.48, Şekil 6.49 ve Şekil 6.50'de görülmektedir. Rotor boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğu 1.41T iken stator boyunduruğundaki maksimum magnetik akı yoğunluğu 1.88 T 'dir. Stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu, nominal akı yoğunluğundan (1.7 T) bir miktar büyüktür. Rotor akı yoğunluğu nominal değerinin altındadır. Mevcut motorla kıyaslandığında, optimize edilen motorun stator iç çapı artırıldığından, stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu artmış ve rotor boyunduruğundaki akı yoğunluğu azalmıştır.

Stator dışlarındaki maksimum akı yoğunluğu 1.9 T ve rotor dışlarındaki maksimum akı yoğunluğu 1.73 T'dir. Stator ve rotor dışlarındaki akı yoğunluğu, nominal değerlerin (2.1 T) altındadır. Mevcut motorla karşılaştırıldığında, stator

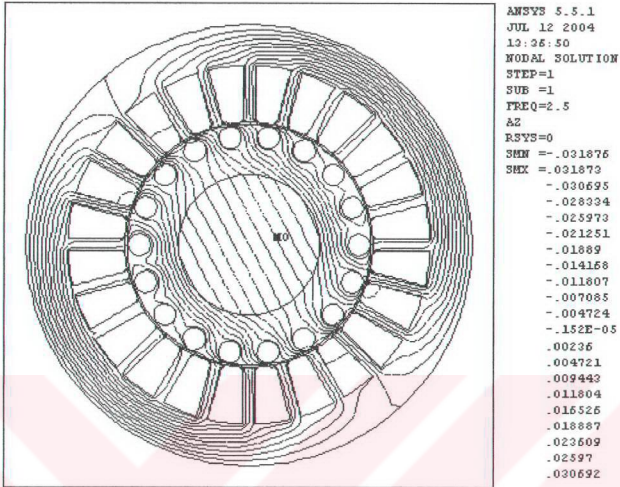
dişlerindeki akı yoğunluğu pek fazla değişmemiş, rotor dişlerindeki akı yoğunluğu azalmıştır. Motor milindeki akı yoğunluğu 0.43 T'dır ve mevcut motorun mil akı yoğunluğundan küçüktür.

Çizelge 6.14 55 kW'lık optimize edilmiş motorun özellikleri

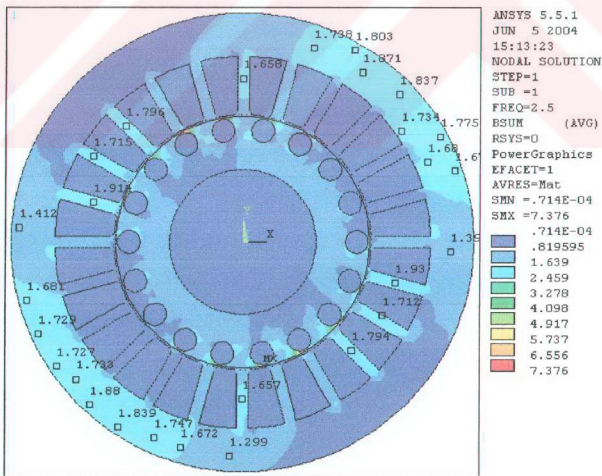
Tanım	Değerler	Birim
Faz sayısı	3	
Faz gerilimi	380	V
Frekans	50	Hz
Kutup sayısı	2	
Çıkış gücü	55200	W
Stator oluk sayısı	24	
Oluktaki iletken sayısı	9	
Rotor oluk sayısı	18	
Devir sayısı	2850	d/dk
Stator dış çapı	18	cm
İletken çapı	2.5	mm
Saç paket boyu	72	cm
Mil çapı	5.8	cm

Çizelge 6.15 55 kW'lık optimize edilmiş motor için hesaplanan değerler

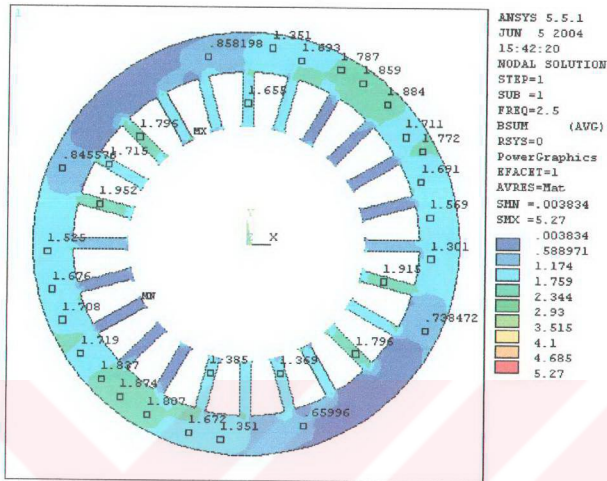
Sıra No	De.say. (d/dk)	Gerilim (V)	Akım (A)	Cosφ	Pgiriş (W)	Moment (Nm)	Pçıkış (W)	Verim (%)
1	0	380	445.0396	0.4	118166	147.13	0	0
2	500	380	432.7927	0.421	120532.1	171.2	8977.386	7.448131
3	1000	380	421.14	0.45	124733.3	208.3	21845.67	17.139
4	1500	380	398.9186	0.502	131516	255.9	40176.3	30.5486
5	2000	380	360.6038	0.603	142868.5	315.24	66023.24	46.2126
6	2200	380	332.2854	0.655	143347.4	336.3	77509.08	54.07081
7	2300	380	312.086	0.69	141460.9	343.92	83152.98	58.78161
8	2400	380	292.589	0.725	139241	350.52	88050.62	63.23613
9	2500	380	264.0664	0.759	131717.5	342.36	89655.87	68.0668
10	2650	380	209.374	0.814	111836.2	311	86326.14	77.18979
11	2750	380	164.2785	0.849	91616.87	266.28	76672.13	83.68779
12	2800	380	137.9087	0.863	78445.45	230.34	67553.19	86.11486
13	2850	380	109.4342	0.8616	62084	185.78	55418.17	89.26321
14	2900	380	79.4106	0.843	44319.09	133.2	40444.58	91.2577
15	2970	380	39.72539	0.569	15056	43.2	13429.15	89.19469



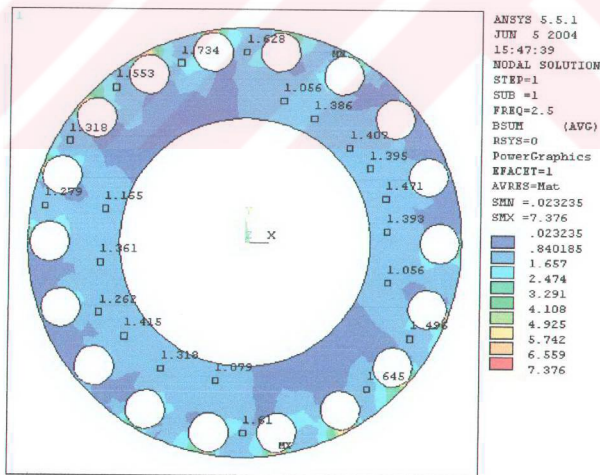
Şekil 6.46 55 kW'lık optimize edilmiş motorun alan çizgileri dağılımı



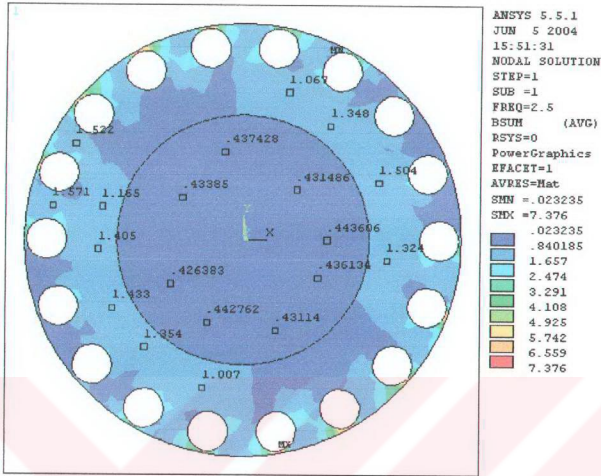
Şekil 6.47 55 kW'lık optimize edilmiş motorun akı yoğunluğu [Tesla]



Şekil 6.48 55 kW'lık optimize edilmiş motorun stator akı yoğunluğu [Tesla]

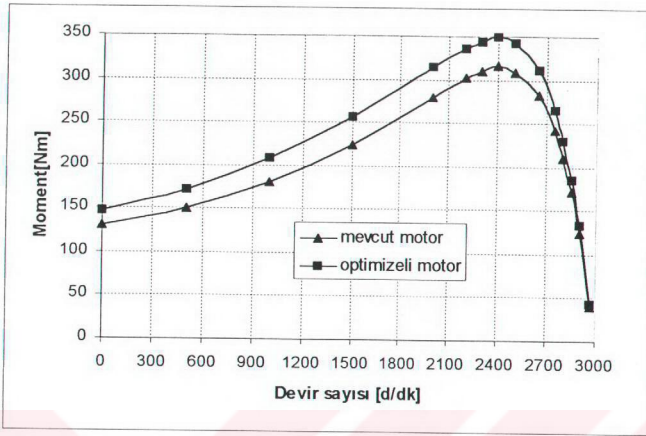


Şekil 6.49 55 kW'lık optimize edilmiş motorun rotor akı yoğunluğu [Tesla]

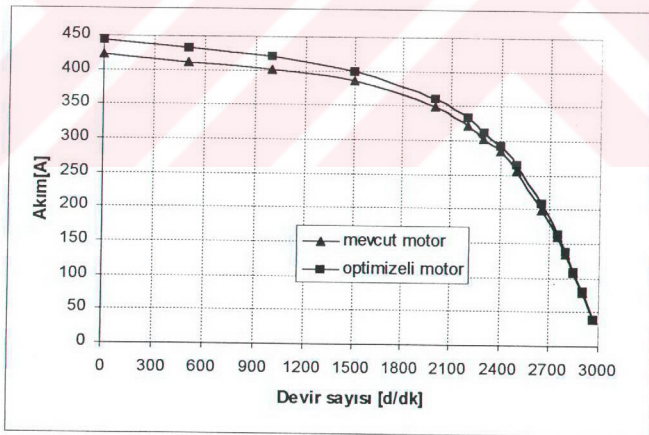


Şekil 6.50 55 kW'lık optimize edilmiş motorun rotor ve mil akı yoğunluğu [Tesla]

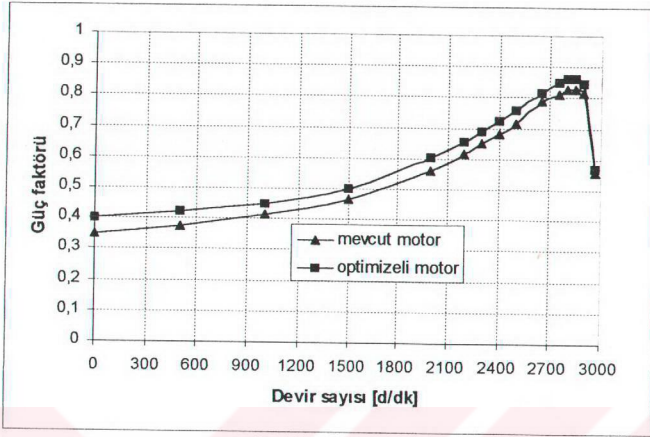
55 kW'lık mevcut motor için hesaplanan değerlerin verildiği Çizelge 6.13 ve optimize edilmiş motor için ANSYS programında hesaplanan değerlerin verildiği Çizelge 6.15 kullanılarak performans eğrileri çizilmiştir. Şekil 6.51'den Şekil 6.54'e kadar olan karakteristikler, mevcut motor ve optimize edilmiş motor için; moment, akım, güç faktörü ve verim eğrileridir. Değişimler incelendiğinde, optimize edilmiş motorun moment, güç faktörü ve veriminde iyileşmeler sağlandığı görülmektedir.



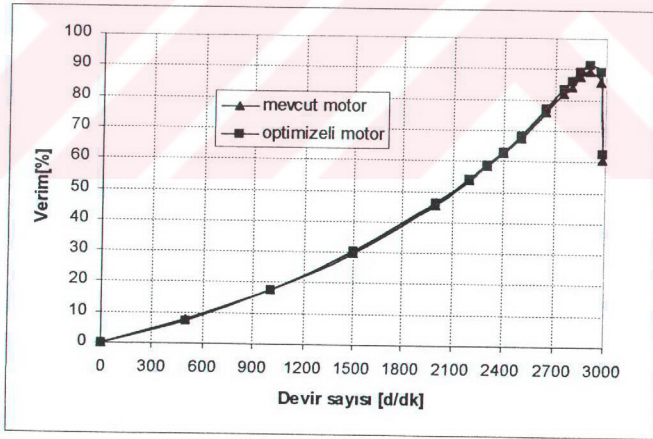
Şekil 6.51 55 kW'lık motorun moment eğrisi



Şekil 6.52 55 kW'lık motorun akım eğrisi



Şekil 6.53 55 kW'lık motorun güç faktörü eğrisi



Şekil 6.54 55 kW'lık motorun verim eğrisi

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, asenkron motorların özel bir tipi olan dalgıç asenkron motorların tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon algoritması olarak evrim algoritmaları içerisinde üstün özelliğe sahip olan Genetik Algoritmalar (GA) kullanılmıştır. GA'lar sürekli parametreleri ve ayrık parametreleri optimize eder, türevsel bilgiler gerektirmez. Amaç fonksiyonunu geniş bir spektrumda araştırır. Çok sayıda parametrelerle çalışma imkanı vardır. Paralel PC'ler kullanılarak çalıştırılabilir. Karmaşık amaç fonksiyonu parametrelerinin, lokal minimum veya maksimumlara takılmadan en uygun çözümlerini elde edebilir.

Optimizasyon metodu olarak, biyolojik süreci en iyi şekilde modelleyen ikili kodlu GA tercih edilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak moment parametresi seçilmiş, GA'ların çalışma ve işleyişi ile ilgili sonuçlar 30 kW'lık motor üzerinde gösterilmiştir. GA metodunun karakteristiği itibariyle rasgele işlemlerden (doğal seçim, çaprazlama, mutasyon) dolayı farklı sonuçlara ulaşılabilirdiğinden bu dezavantajı ortadan kaldırmak için, her bir simülasyon 20 kez tekrarlanarak sonuçlar alınmıştır. Farklı popülasyon sayıları (Pop=50, 100, 200, 300) kullanılarak GA test edilmiş ve sonuçları incelenmiştir.

Çaprazlama oranının $P_c=0.25$, $P_c=0.5$, $P_c=0.75$, $P_c=0.9$ ve mutasyon oranının $P_m=0.01$, $P_m=0.05$, $P_m=0.1$ gibi değişik değerleri denenmiştir. GA'nın çaprazlama oranının fazla yüksek olması, kromozomların yapısını bozarak kısa zamanda yakınsamasına, düşük tutulması araştırma uzayında yeni çözümler bulamamasına neden olmaktadır. Yapılan incelemelerde çaprazlama oranının 0.5-0.75 arasındaki değerlerde iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Aynı şekilde mutasyon oranının çok fazla artırılması da, popülasyonda kromozomların yapısını bozarak algoritmanın erken yakınsamasına neden olmaktadır. Mutasyon oranının 0.01-0.05 arasındaki değerlerde uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca popülasyon sayısının çok fazla artırılması, kromozomların uygunluk değerlerinin düşmesine ve algoritmanın

erken yakınsamasına neden olduğundan çözüme pek fazla katkı sağlamadığı görülmüştür.

Rulet tekeri ve ağırlıklı seçim metotları karşılaştırılmış ve Rulet tekeri seçim metodunun daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Tasarım değişkenlerinin, alt ve üst sınırlarına ilave olarak bazı değişkenlerinde, mevcut üretim standartları, malzeme özellikleri ve müşteri istekleri bakımından belirli sınır şartlarını yerine getirmesi gerekir. Bu çalışmada, 10 adet bağımlı sınır şartı dikkate alınarak tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Ceza fonksiyonu aracılığıyla, bağımlı sınır şartları kaldırılarak sınırsız hale dönüştürülmüştür. Bağımlı sınır şartlarının sayısal büyüklükleri birbirinden farklıdır. Örneğin devrilme momentinin çalışma momentine oranı (M_{dd}/M_{di}) 1.9 iken kayma $s = 0.06$ sınır değerleri ile ifade edilmiştir. Bu yüzden sınır değerleri fonksiyonlarının, amaç fonksiyonuna bağlı olarak normalizasyonu yapılmıştır. Böylece bir sınır şartının diğer sınır şartına baskın gelmesi önlenmiştir.

Optimizasyon programı olarak Delphi programlama dilinde geliştirilen genetik algoritma yazılımının toplam kapasitesi 2.7 Mbayt olup 2681 satır ve sekiz bölümden meydana gelmektedir. Programı çalıştırabilmek ve üzerinde değişiklik yapabilmek için en az 80486 işlemci, 16 Mbayt RAM ve Delphi 4 programlama diline ihtiyaç vardır. Yazılım çok az bir değişiklikle farklı güçlerdeki kısa devre rotorlu tüm asenkron motorlara uygulanabilir esneklikte hazırlanmıştır. Kullanıcı; programda GA'ya ait popülasyon sayısı, çaprazlama ve mutasyon oranlarını değiştirerek yakınsama eğrilerini inceleyebilir. Ayrıca GA ile optimizasyondan elde edilen sonuçları analitik tasarım arayüzünde test edebilir, mıknatıslanma eğrisi (BH) ve demir kayıpları eğrisini motor özelliklerine göre dışarıdan girebilir, optimizasyonu yapılan motora ait performans karakteristiklerini, grafik arayüzü aracılığıyla inceleyebilir.

Motorun magnetik alan analizi, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motor modeli iki boyutlu olduğundan stator sargı sonu direnci ve kaçak reaktansı modele dahil edilmemiştir. Ancak bu iki değer analog olarak hesaplanıp motor eşdeğer devresine ilave edilmiştir. Motorun magnetik akı dağılımını görmek ve şebekeden çektiği elektriksel

bilgileri incelemek açısından nonlineer harmonik çözüm yapılmıştır. Model oluşturulurken, rotor çubukları eğimsiz (düz) kabul edilmiştir. Rotorda meydana gelen deri olayının hesaba dahil edilmesi için stator büyüklükleri rotora indirgenerek çözümler yapılmıştır. Deri olayı rotorda hesaba dahil edilirken, iletkenlerde dahil edilmemiştir. Ayrıca stator oluk ve iletkenlerinde, girdap akımlarının meydana getirdiği kayıplar modellenememiştir. Stator ve rotor iletkenleri, doğrusal özellik gösterdiğinden sadece bağlı geçirgenlik değeri ile tanımlanmıştır. Hava aralığı da aynı şekilde magnetik geçirgenlik tanımlanarak gösterilmiştir. Motorun stator, rotor ve milinde kullanılan malzemelerin magnetik özelliklerine göre mıknatıslanma eğrileri kullanılmıştır.

Tasarım parametreleri olarak motorun birinci dereceden geometrisini etkileyen ve literatürde kullanılan 10 adet parametre seçilmiştir. Parametrelerin doğru hesaplanmasında eşdeğer devre olarak "T" eşdeğer devre modeli kullanılmıştır. Mevcut motorların performans özellikleri ölçülmüş ve tasarım parametreleri optimize edilerek en uygun motor tasarımı elde edilmiştir. Bu çalışmada, daha önce bu konuda yapılan çalışmalardan farklı olarak asenkron motorların özel bir tipi olan dalgıç asenkron motor optimizasyonu, GA ve sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Mevcut motor ve optimize edilmiş motor için farklı devir sayılarına göre bütün motor büyüklükleri hesaplanmış ve performans karakteristikleri grafiklerle gösterilmiştir.

30 kW ve 55 kW'lık iki adet dalgıç asenkron motorun gerçek verileri kullanılarak GA ile tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen veriler kullanılarak motorların magnetik alan analizi sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS programında gerçekleştirilmiştir. GA ile elde edilen sonuçların doğruluğu sonlu elemanlar yöntemiyle test edilmiş ve optimizasyon sonucunda motorun gerçek değerlerine göre performansında oldukça önemli iyileştirmeler sağlandığı görülmüştür.

Deneysel çalışmalar ve hesaplanan değerler sonucunda, mevcut motorların momentinin ve veriminin düşük olduğu tespit edilmiştir. Mevcut motorların rotora göre stator magnetik akı yoğunluklarının daha az olduğu görülmüş ve yapılan optimizasyon sonucunda stator magnetik akı yoğunluğunun arttığı ve rotor

boyunduruğundaki magnetik akı yoğunluğunun azaldığı tespit edilmiştir. Optimize edilen her iki motorda da stator boyunduruğundaki magnetik akı yoğunluğunun sınır değerleri dikkate alınarak, stator iç çapı artırılmış ve dolayısıyla boyları kısaltılmıştır. Mevcut motorların dolgu faktörü küçük olduğu için motor momenti üzerinde olumsuz etki yaptığı gözlenmiştir. Optimize edilen motorlarda ise, sarım sayısı artırılıp oluk hacmi küçültüldüğü için dolgu faktörü artmış ve motor momenti iyileştirilmiştir. Ayrıca her iki motorun rotor oluk çapları artırılarak nominal momentin yükseltilmesine katkı sağlanmıştır. Yapılan tasarım optimizasyonu neticesinde, 30 kW'lık motorda çalışma momenti %7.34 artırılmış ve motor ağırlığı %13.61 azaltılmıştır. 55 kW'lık motorda ise çalışma momenti %8.99 artırılmış ve motor ağırlığı da %4.28 azaltılmıştır.

Yapılan optimizasyon sonucunda, motorların boyları kısaltılmış ve malzemeden tasarruf edilmiştir. Ayrıca nominal devir sayısında motorların moment ve verimi iyileştirilmiştir.

7.2 Öneriler

Ülkemizde özellikle de Konya bölgesinde dalgıç asenkron motor üreten firmaların, bu çalışmada elde edilen iyileştirmeleri ürünlerine yansıtmaları halinde, mevcut motorlara göre daha küçük boyutta aynı momenti veren ve yüksek verimli motorlar üretmeleri mümkündür.

Bundan sonraki çalışmalarda, amaç fonksiyonu olarak moment 'den başka, ağırlık ve verim gibi büyüklükler seçilip dalgıç asenkron motorların ve diğer motorların optimizasyonu yapılabilir. Gerçekleştirilen programda küçük bir değişiklik yapılarak endüstride en çok kullanılan kısa devre rotorlu asenkron motorların performansında bazı iyileştirmeler yapılabilir.

Motor tasarım optimizasyonu, magnetik özellikleri iyileştirilmiş malzemeler kullanılarak yapılabilir. Değişik malzemelere göre tasarlanan motorların üretim maliyetleri incelenebilir.

Bu çalışmada, stator oluk şekli trapez ve rotor oluk şekli yuvarlak seçilmiştir. Stator ve rotor için farklı oluk şekilleri kullanılarak motor performansı üzerindeki etkileri incelenebilir.

Motor eşdeğer devre parametrelerinin tahmini, GA ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılabilir.

Ayrıca motorun harmonik magnetik analizi; iki boyutlu yerine üç boyutlu modellenerek sargı sonu ve rotor kısa devre bileziği etkileri çözüme dahil edilir.



8. KAYNAKLAR

- Adeyuya, A.A 1996. New methods in Genetic Search with Real Valued Chromosomes. Master's Thesis, Cambridge:Massachusetts Institute of Technology.
- Alger, P.L. 1965. The Nature of Induction Machines. Gordon and Breach.
- Angeline, P.J. 1995. Evolution revolution: An introduction to the special track on genetic and evolutionary programming. IEEE Expert Intelligent Systems and their Applications 10, June pp.6-10
- Ansys User Manuel, Ansoft corporation New York.
- Bianchi,N., Bolognani S. 1998. Design optimization of Electric motors by Genetic algorithm. IEE Proc.-Electr. Power Appl. Vol. 145, No. 5, pp.475-483.
- Bilgin, O. 2002. Dalgıç asenkron motorların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi ve performansının iyileştirilmesi. Doktora Tezi, Selçuk Ün., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Boduroğlu, T. 1988. Elektrik Makinaları Dersleri. 2. baskı, Beta Yayınları, İstanbul.
- Broyden, G.C. 1965. A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations. Math. Comput., pp.577-593.
- Cendes, Z.J., Shenton, D.N. 1985. Adaptive mesh refinement in the finite element computation of magnetic fields. IEEE Trans. On Magn., Vol.MAG-21, No. 5, pp. 1181-1186:
- Chai, K.S. 2002. Using genetic algorithms in design optimization of the flux switching motor. IEE Conference Publication, n 487, pp. 540-545.
- Cheng, Y.B., Sykulski, J.K. 1994. CAD and optimization of electromagnetic actuators. ICEM'94 Proceedings, Paris, france. Vol. 3, pp. 187-192.
- Choudhury, M.A., Azizur Rahman, M. 1992. Starting performances of Delta-Modulated inverter-fed submersible induction motors. IEEE Trans. on Industry App., Vol. 28, No. 3, pp. 685-693.
- Curtis, H. 1975. Biology, 2nd Ed., New York: Worth publisher.
- Çunkaş, M., Akkaya R. 2002. İkili ve gerçek kodlu genetik algoritmaların karşılaştırılması. S.Ü. Müh. Mim. Fak. Derg. c. 7, sayı 2, s. 11-17 Konya.

- Çunkaş, M., Çelebi M., Akkaya R. 2002. Slot optimization of induction motor by Genetic algorithm. 3rd International Conference on Mathematical & Computational Applications, Konya, Turkey, pp. 334-341.
- Çunkaş, M., Akkaya R. 2004. Design optimization of three-phase induction motors by using Genetic algorithm. International Agean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, Istanbul, Turkey, pp. 408-413.
- Davis, L. 1991. The Handbook of Genetic Algorithms. New York: Van Nostrand Reinhold, pp. 61-71.
- Dolinar, D., Weerd, R.D., Belmans, R., Freeman, E.M. 1997. Calculation of two axis induction motor model parameters using finite elements. IEEE Trans. on Energy Conv., Vol. 12, No. 2, pp. 133-140.
- Dong-Joon, S., Dong-Hyeok, C., Jang-Sung, C., Hyun-Kyo J.ve Tae-Kyoung C. 1997. Efficiency optimization of interior permanent magnet synchronous motor using genetic algorithms. IEEE Trans. On Mag., Vol. 33, No. 2, pp. 1880-1883.
- Dwyer, W.J., Emerton, R.K., Ojalvo, I.U. 1971. An automated procedure for the optimization of practical aerospace structures. Edition 1. Wright-Patterson Air Force Base (OH).
- Eshelman, L.J., Shafter D.J. 1993. Real-coded genetic algorithms and interval-schemata, in D.L. Whitley (Ed.), Foundations of Genetic Algorithms 2, San Mateo, CA: Morgan Kaufman, pp.187-20
- Girdinio, P., Molfino, P., Molinari, G., Puglisi, L., Viviani, A. 1978. Finite difference and finite element grid optimization by grid iteration method. IEEE Trans. on Magn. MAG-19, No.6, pp. 2543-2546.
- Goldberg, D.E.1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. New York: Addison Wesley.
- Goldberg, D.E. 1993 Feb. Making genetic algorithms fly: A lesson from the Wright brothers. Adv. Technol. Dev. 2, pp.1-8.
- Grant, V. 1985. The Evolutionary Process. New York: Columbia University Press.
- Güzelbeyoğlu, N. 1992, Elektrik Makinaları I,II. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Haataja,1994. Solving Optimization Problems. CSC- Center for Scientific Computing Ltd, Yliopistopaino. ISBN 952-9821-02-6. Ed. 1. p.232
- Hamarat S. 1997. Design optimization of three-phase induction motors. Ms Thesis, Middle East Tech. Univ., Ankara.

Hamarat S, Leblebicioğlu K., Ertan H.B., 1998. Comparison of Deterministic and Non-deterministic Optimization Algorithms for Design Optimization of Electrical Machines, **ICEM**, İstanbul, Turkey, pp.1477-1482.

Haupt Randy L., Haupt Sue E. 1998. Practical Genetic Algorithms. A Wiley-Interscience Publication, USA

Holland, J.H. 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor: The University of Michigan Press.

Holland, J.H., 1992 july. Genetic Algorithms. Sci. Am. pp. 66-72

de Joing , K.A. 1993. Genetic algorithms are NOT function optimizers, Foundation of Genetic Algorithms 2. Amsterdam:Nort-Holland, pp. 3-13.

Lindholm, D. 1983. Automatic triangular mesh generation on surfaces of polyhedra. IEEE Trans. on Magn. Vol. 19, No. 6 pp. 2539-2542.

Luomi, J., Rouhiainen, H. 1988. adaptive mesh refinement for magnetic field problems involving saturable ferromagnetic parts. IEEE Trans. on Magn. Vol.24, No.1, pp. 311-314.

Michalewicz, Z. 1994. Genetic Algorithms + Data structures = Evolution Programs. 2nd ed., New York: Springer-Verlag.

Mohammed, O.A., Üler, G.F. 1997. A hybrid technique for the optimal design of electromagnetic devices using Direct Search and Genetic algorithms. IEEE Trans. On Mag., Vol. 33, pp. 1931-1934.

Özoğlu, Y. 1995. Sonlu elemanlar metodu ile doğru akım motorunun manyetik alan incelemesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enst., İstanbul.

Palko S., 1996. Structural optimization of induction motor using a genetic algorithm and a finite element method. Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series No. 4, Helsinki.

Patterson M.M. 1996. On the efficiency of electrical submersible pumps equipped with variable frequency drives. A Field Study, SPE Production Facilities, pp.61-64.

Pierre, D.A. 1992. Optimization in McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology 12, New York: McGraw-Hill, pp.476-482

Pillay, P., Nolan, R., Haque, T. 1997. Application of genetic algorithms to motor parameter determination for transient torque calculations. IEEE Trans on Industry App., Vol. 33, No. 5, pp. 1273-1282.

- Preis, K., Ziegler, A. 1990. Optimal design of electromagnetic devices with evolution strategies. COMPEL- The International Journal for Computation and mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.9, Supplement A. pp. 119-122.
- Puchstein, A.F. 1947. Calculation of slot constraint. Trans, AIEE, pp. 1315-1322.
- Pyrhönen, J., Kuruonen, P. 1994. Increasing efficiency of high-speed solid rotor induction machines. Proceedings of ICEM'94. Paris, France. Vol.1, pp. 47-52.
- Radcliff, N.J. 1991. Formal analysis and random respectful recombination. In Proc. of Fourth International Conference on Genetic Algorithms, San Mateo, CA: Morgan Kauffman.
- Russenschuck, S.1990. Mathematical optimization techniques for the design of permanent magnet synchronous machines based on numerical field calculation. IEEE Trans. on Magn., Vol. MAG-26, p.6-9
- Russenschuck, S.1995. Mathematical optimization techniques in computational electromagnetics. International Compumag Society Newsletter. Vol. 2, No.1, pp. 3-7.
- Sames, M. 2001. Optimization of induction motor design. 37th International Symposium of Electrical Machines. Ustron, Poland. n 176, pp.103-110.
- Singh, B. 1982. Electrical Machine Design, Vikas Publishing House.
- Takahashi, N. 1990. Optimal design method of magnetic circuit. COMPEL- The International Journal for Computation and mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 9, Supplement A. pp. 101-106.
- Üler, F.G., Mohammed, O.A., Koh, C.S. 1994. Utilizing genetic algorithms for the optimal design of electromagnetic devices. IEEE Trans. on Magn., Vol. 30, No. 6, pp.4296-4298.
- Veinott, C.G. 1959. Theory and Design of Small Induction Motors, McGraw-Hill Book Company.
- Vickers, H. 1950. The Induction Motor. Pitman Publishing Corporation, Newyork.
- Watz, J.E., Fulton, R.E., Cyrus, N.J., Epping, R.T. 1970. Accuracy of finite approximations to structural problems. NASA Technical Note D-5728.
- Weatherford, H.H, Brice, C.W. 2003. Estimation of induction motor parameters by a Genetic Algorithm. Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp.21-28
- Wieczorek, J.P., Göll, Ö., Michalewicz, Z. 1998. An evolutionary algorithm for the optimal design of Induction motors. IEEE Transactions On Magnetics. Vol. 34, No. 6, pp.3882-3887

Williamson, S., McClay, C.I. 1996. Optimization of the geometry of closed rotor slots for cage induction motors. IEEE Trans. on Industry App., Vol. 32, No.3., pp. 560-568.

Wright, A., 1991. Genetic algorithms for real parameter optimization. in G.J.E. Rawlins (Ed.), Foundations of Genetic algorithms 2, San Mateo, CA: Morgan Kaufman, pp. 205-218

Wurtz F., Richomme M., Bignon J., Sabonnadiere J.C. 1997. A few results for using genetic algorithms in design of electrical machines. IEEE Transactions on Magnetics, Vol.33, No.2, pp.1892-1895.

Zhou, P., Gilmore, J., Badics, Z., Cendes, Z.J. 1998. Finite element analysis of induction motors based on computing detailed equivalent circuit parameters. IEEE Trans. on Mag., Vol. 34, No. 5, pp. 3499-3502.

EK A: İKİ PARAMETRELİ FONKSİYONU OPTİMİZE EDEN GENETİK ALGORİTMA YAZILIM KODU

```

unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs,
  StdCtrls, Grids, Spin, Gauges, Menus;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    GroupBox1: TGroupBox;
    Edit1: TEdit;
    Label1: TLabel;
    StringGrid1: TStringGrid;
    GroupBox2: TGroupBox;
    Label2: TLabel;
    Edit2: TEdit;
    StringGrid2: TStringGrid;
    GroupBox3: TGroupBox;
    Label3: TLabel;
    SpinEdit1: TSpinEdit;
    Gauge1: TGauge;
    Label4: TLabel;
    Edit3: TEdit;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Edit4: TEdit;
    MainMenu1: TMainMenu;
    Dosya1: TMenuItem;
    Hakkndal: TMenuItem;
    k1: TMenuItem;
    Deikenler1: TMenuItem;
    Edit5: TEdit;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    Edit6: TEdit;
    SpinEdit3: TSpinEdit;
    Button2: TButton;
    SpinEdit2: TSpinEdit;
    Label9: TLabel;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure HakkndalClick(Sender: TObject);
    procedure k1Click(Sender: TObject);
    procedure Deikenler1Click(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

```

```

var
  Form1: TForm1;

implementation

uses Unit2, Unit3;

{$R *.DFM}
(*Genetik algoritmalarla bir fonksiyonun maksimum noktalarını
bulunması*)

{$n+,g+}

function fonksiyon(x1,x2:extended):extended;
(* fonksiyon *)
var d : extended;
begin
  d := 21.5+x1*sin(x1*4*pi)+x2*sin(x2*20*pi);
  fonksiyon := d;
end;

function ex(w:byte):longint;
(* 2 nin kuvvetini alma *)
var d : longint;
begin
  if w = 0 then
    begin
      ex := 1;
      exit;
    end;
  if w = 1 then
    begin
      ex := 2;
      exit;
    end;

  d := 1;
  for w := w downto 1 do
    d:=d*2;
  ex := d;
end;

function bitsize(w:longint):byte;
(* degiskenin toplam bit hacmini hesapla *)
label 1;
var
  tp : byte;
begin
  tp := 1;
1:
  if ((w > ex(tp)) and (ex(tp+1) > w)) or (ex(tp+1)=w) then
    begin
      bitsize := tp+1;
      exit;
    end else
    begin
      inc(tp);
      goto 1;
    end;
end;

```

```

end;

type
  krT = array[0..100] of byte; (* kromozom yapısı *)

var
  hass : longint; { hassasiyet }

  kr : array[0..1000] of KrT;

  s1x1,s2x1,s1x2,s2x2 : extended;

  bx1,bx2 : byte;

  popsize : word;

  mkrt : byte;

function randomf:extended;
{ tahmini extended sayı }
begin
  randomf := random(32768)*random(32768)/1073676289;
end;

procedure randomkr(krn:byte);
var tp : byte;
begin
  for tp := 0 to mkrt do
    kr[krn][tp] := random(2);
  end;

function deskkr(krn:byte;b,krb:byte):longint;
{ kromozomlardan hesapla }
var
  tp : byte; d : longint;
begin
  d := 0;
  for tp := b to b+krb-1 do
    d := d+ (ex(tp-b) * kr[krn][tp]);
  deskkr := d;
end;

function calckr2(krn:byte):extended;
{ x2 yi hesapla }
var d : extended;
begin
  d := s1x2+(deskkr(krn,18,bx2)*(s2x2-s1x2)/(ex(bx2)-1));
  calckr2 := d;
end;

function calckr1(krn:byte):extended;
{ x1 yi hesapla }
var d : extended;
begin
  d := s1x1+(deskkr(krn,0,bx1)*(s2x1-s1x1)/(ex(bx1)-1));
  calckr1 := d;
end;

```

```

var f:extended;

restabx : array[0..1000] of extended;
restaby : array[0..1000] of extended;

fn : array[0..1000] of extended;

selp : array[0..1000] of extended;
kumq : array[0..1000] of extended;
rand : array[0..1000] of extended;
selc : array[0..1000] of extended;
seln : byte;

minp : extended;mink : krt;
maxp : extended;maxk : krt;

pc,pm : extended;
piter : integer;

procedure genrandomnum;

var tp,t1 : byte;
begin
  for t1 := 1 to popsize do
    rand[t1] := randomf;

  seln := 1;
  for t1 := 1 to popsize do
    for tp := 1 to popsize do
      if (rand[t1] > kumq[tp]) and (rand[t1] < kumq[tp+1]) then
        begin
          selc[seln] := rand[t1];
          inc(seln);
        end;

    if seln >= popsize then exit;

  for t1 := 1 to popsize do
    rand[t1] := randomf;

  for t1 := 1 to popsize do
    for tp := 1 to popsize do
      if (rand[t1] > kumq[tp]) and (rand[t1] < kumq[tp+1]) then
        begin
          selc[seln] := rand[t1];
          if seln = popsize then break;
          inc(seln);
        end;

  end;

  end;

  (***** caprazlama operatoru islemleri *****)

var
  randomselection : array[0..1000] of boolean;
  n1,n2:byte;

  krs,krd : KRT;
  randkr : array[0..1000] of krt;
  cros : array[0..1000] of krt;

```

```

cron      : byte;

pckrm     : krt;

procedure int2kr(w:extended;var kr : krt);
var
  tp : byte;
  e  : longint;
begin
  e := round(w * 1000000000);
  for tp := 0 to mkrt do
    kr[tp] := byte(e and ex(tp) > 0);
end;

function kr2int(kr : krt):extended;
(* kromozomlari sayilara donusturuyor *)
var
  e : longint;tp : byte;
begin
  e := 0;
  for tp := 0 to mkrt do
    e := e + kr[tp]*ex(tp);
  kr2int := e/1000000000;
end;

procedure getrandomselc;
(* tahmini secim *)
label 1,2;
begin
1:
  n1 := random(cron)+1;
  if randomselection[n1] then
    goto 1;

  randomselection[n1] := true;
2:
  n2 := random(cron)+1;
  if randomselection[n2] then
    goto 2;

  randomselection[n2] := true;
end;

procedure randomkrm(var kr:krt);
(* rasgele kromozon dondure *)
var
  tp : byte;
begin
  for tp := 0 to mkrt do
    kr[tp] := random(2);
end;

procedure exckr(var krs,krd:krt;ref:byte);
(* caprazlama yapilir *)
var
  tmp : krt; tp : byte;
begin
  ref := 5;
  for tp := 0 to ref do
    tmp[tp] := krd[tp];

```

```

for tp := 0 to ref do
  krd[tp] := krs[tp];

for tp := 0 to ref do
  krs[tp] := tmp[tp];

for tp := 0 to mkrt-ref do
  krd[tp] := krs[ref+tp];
end;

procedure gencrossover;
(* caprazmanın ana işlemleri *)
var
  ref : byte;
  t1 : byte;
begin
  for t1 := 1 to popsize do
    randomkrm(randkr[t1]);

  cron := 1;
  for t1 := 1 to popsize do
    if (kr2int(randkr[t1]) < pc) then
      begin
        cros[cron] := randkr[t1];
        inc(cron);
      end;

  for t1 := 0 to popsize do
    randomselection[t1] := false;

  randomkrm(krs);
  randomkrm(krd);

  for t1 := 1 to cron div 2 do
    begin
      ref := random(mkrt)+1;
      getrandomselc;
      exckr(cros[n1],cros[n2],ref);
    end;
  end;

procedure genmut;
var
  c,c1,r,r1 : byte;
begin
  for r := 0 to popsize-1 do
    for c := 0 to mkrt do
      if randomf < pm then
        begin
          c1 := random(1000)+1;
          r1 := random(popsiz)+1;
          cros[r1,c1] := cros[r1,c1] xor 1;
        end;
    end;
  end;

(*****başlangıç*****)

```

```

var done : boolean;

procedure start;
var
  tp,t1,iter : word;
  miniter,maxiter:word;

begin
  {/ disaridan girilmesi gereken degerler }
  done := false;
  with form3.stringgrid1 do
    begin
      slx1 := strtofloat(cells[1,1]);    (* x1 nin min deŞeri *)
      sx1 := strtofloat(cells[2,1]);    (* x1 nin max deŞeri *)

      slx2 := strtofloat(cells[1,2]);    (* x2 nin min deŞeri *)
      sx2 := strtofloat(cells[2,2]);    (* x2 nin max deŞeri *)
    end;

  hass := Form1.Spinedit2.Value; (* hassasiyet *)
  popsize := Form1.Spinedit3.Value;

  pc := strtofloat(form1.Edit3.Text);
  pm := strtofloat(form1.Edit4.Text);
  piter := Form1.Spinedit1.Value; { iterasyon sayisi }
  miniter := 0 ;
  maxiter := 0 ;
{ / }

  bx1 := bitsize(round((sx1-slx1)*hass));
  bx2 := bitsize(round((sx2-slx2)*hass));

  mkrt := bx1+bx2;

  restabx[1] := calckr1(1);    (* x1'i hesapla *)
  restaby[1] := calckr2(1);    (* x2'i hesapla *)

  f := fonksiyon(restabx[1],restaby[1]);
  maxp := f;
  maxk := kr[1];
  minp := f;
  mink := kr[1];

  for tp := 0 to popsize do
    randomkr(tp);

  for tp := 1 to popsize do    (* ilk degerler aliniyor *)
    begin
      restabx[tp] := calckr1(tp);    (* x1'i hesapla *)
      restaby[tp] := calckr2(tp);    (* x2'i hesapla *)

      f := fonksiyon(restabx[tp],restaby[tp]);

      if f > maxp then            (* maksimum mu? *)
        begin
          maxiter:= iter;
          maxp := f;

```

```

        maxx := kr[tp];
    end;

    fn[tp] := f;
end;

iter := 1;
repeat

    f := 0;
    for tp := 1 to popsize do          (* uygunluk degeri hesaplanir *)
        f := f + fn[tp];

    for tp := 1 to popsize do          (* seleksiyon ihtimali hesaplaniyor *)
        selp[tp] := fn[tp] / f;

    kumq[1] := 0;
    for tp := 1 to popsize do          (* kumulatif ihtimaller hesaplanir *)
        for t1 := 1 to tp do
            kumq[tp] := kumq[tp] + selp[t1];

    genrandomnum;
    gencrossover;
    genmut;

    for tp := 1 to popsize do
        kr[tp] := cros[tp];

    for tp := 1 to popsize do
        begin
            restabx[tp] := calckr1(tp);
            restaby[tp] := calckr2(tp);

            f := fonksiyon(restabx[tp],restaby[tp]);

            if f > maxp then
                begin
                    maxiter:= iter;
                    maxp := f;
                    maxx := kr[tp];
                end;
            end;

        end;

    inc(iter);
    Form1.Gaugel.Progress := round(iter / piter * 100);

    kr[1] := maxx;
    Form1.Edit1.Text := floattostr(maxp);
    Form1.Edit5.Text := inttostr(maxiter);
    Form1.StringGrid1.Cells[1,0] := floattostr(calckr1(1));
    Form1.StringGrid1.Cells[1,1] := floattostr(calckr2(1));
{
    kr[1] := mink;
    Form1.Edit2.Text := floattostr(minp);
    Form1.Edit6.Text := inttostr(miniter);
    Form1.StringGrid2.Cells[1,0] := floattostr(calckr1(1));
    Form1.StringGrid2.Cells[1,1] := floattostr(calckr2(1));
}

```

```

    form1.refresh;
    form1.edit5.refresh;
    application.ProcessMessages;
    if done then break;
    until iter = piter;
end;

(***** ana menu *****)

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    button2.Enabled := true;
    start;
    button2.Enabled := false;
end;

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
    randomize;

    StringGrid1.Cells[0,0] := 'x1';
    StringGrid1.Cells[0,1] := 'x2';

    StringGrid2.Cells[0,0] := 'x1';
    StringGrid2.Cells[0,1] := 'x2';
end;

procedure TForm1.Hakknda1Click(Sender: TObject);
begin
    aboutbox.show;
end;

procedure TForm1.k1Click(Sender: TObject);
begin
    form1.close;
end;

procedure TForm1.Deikenler1Click(Sender: TObject);
begin
    form3.show;
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
    done := true;
    button2.enabled := false;
end;

end.

```

EK B: MOTOR MAGNETİK ALAN ANALİZİ ANSYS YAZILIM KODU

```

/BATCH
/COM,ANSYS RELEASE 5.5 UP19981001.1
14:43:20 10/05/2004
/input,menust,tmp,,,,,,,,,,,,,1
/GRA,POWER
/GST,ON
/NOPR
/PMETH,OFF
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,1
KEYW,MAGNOD,1
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULT1,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to
display:
/COM, Magnetic-Nodal
!*
/REP7
!*
ET,1,PLANE53
!*
CYL4,,.90e-3
CYL4,,.73e-3
CYL4,,.50e-3
CYL4,,.28.5e-3
RECTNG,48e-3,.75e-3,2.3e-3,-2.3e-3,
CYL4,48e-3,.3.2e-3
/ZOOM,1,RECT,0.738491,0.064674,0.894508,-
0.114130
ADELE,6,,1
CYL4,49e-3,.3.2e-3
/PNUM,KP,0
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,1
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/NUM,0
!*
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
!*
/REPLOT
FLST,2,6,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6
AOVLAP,P51X
/DIST,1,1.371742,1
*do,anum,59,76,1
asel,s,,,anum
esla
nsle
nsel,u,cp,,1,2e3
cp,next,curr,all
cp,next,emf,all
asel,all
esel,all
nsel,all
*enddo
EPlot
hiz=2850
kayma=((3e3-hiz)/3e3)
*SET,rs,kayma*.270
*SET,ls,3.5e-3
R,1,39e-4,15,.45,,18,
R,3,6.35e-5,,.44,,
csys,0
*SET,nn,111500
n,nn,,2,,15
n,nn+1,,25,,1
*rep,11,1,,-.01
n,nn+12,,25,,1
n,nn+101,,2,,1
*rep,11,1,,-.01
n,nn+112,,2,,1
n,nn+201,,15,,1
*rep,11,1,,-.01
n,nn+212,,15,,1
n,nn-1,,2,,-.1
et,8,124,4
r,8,kayma*311,0
type,8
real,8
e,nn,nn+2,nn+12
et,9,124,4
r,9,kayma*311,-120
type,9
real,9
e,nn,nn+102,nn+112
et,10,124,4
r,10,kayma*311,-240
type,10
real,10
e,nn,nn+202,nn+212
et,11,124,5
r,11,1
type,11
real,11
nmin,90
e,nn+2,nn+3,_nmin
nmin,8
e,nn+4,nn+3,_nmin
nmin,89
e,nn+4,nn+5,_nmin
nmin,7
e,nn+6,nn+5,_nmin

```

```

AOVLAP,P51X
SAVE
/AUTO, 1
/REP
/REPLOTT,RESIZE
ADELE, 4,,1
SAVE
WPSTYLE,,,,,1
WPSTYL, STAT
wpstyle,0.05,0.1,-1,1,0.003,0,0,,5
wpstyle,0.5,0.1,-1,1,0.003,0,0,,5
wpstyle,0.15,0.15,-1,1,0.003,0,0,,5
wpstyle,0.15,0.15,-1,1,0.003,0,0,,5
/ZOOM,1,RECT,-0.258411,0.078748,-0.065421,-
0.094574
/AUTO, 1
/REP
/ZOOM,1,RECT,0.745794,0.068937,0.974766,-
0.117465
CYL4,,49.5e-3
CYL4,,49.75e-3
FLST,2,72,5,ORDE,8
FITEM,2,1
FITEM,2,-8
FITEM,2,10
FITEM,2,21
FITEM,2,33
FITEM,2,45
FITEM,2,59
FITEM,2,-118
AOVLAP,P51X
wpstyle,0.15,0.15,-1,1,0.003,0,0,,5
/DIST, 1,1.371742,1
/REP,FAST
LSTR, 344, 21
LSTR, 21, 61
LSTR, 61, 9
/AUTO, 1
/REP
/ZOOM,1,RECT,0.274766,-0.431405,0.415421,-
0.555673
LSTR, 347, 60
LSTR, 60, 74
LSTR, 74, 12
/AUTO, 1
/REP
/ZOOM,1,RECT,-0.219159,0.046045,-0.107944,-
0.074952
LSTR, 11, 73
LSTR, 73, 23
LSTR, 23, 346
/AUTO, 1
/REP
/ZOOM,1,RECT,0.287850,0.559468,0.441589,0.412309
LSTR, 10, 62
LSTR, 62, 22
LSTR, 22, 345
/AUTO, 1
/REP
UIMP,5,SONC,, , ,
UIMP,5,MURX,, ,1,
UIMP,5,MGXX,, , ,
UIMP,5,RSVX,, , ,
UIMP,5,PERX,, , ,
!*
UIMP,6,ENTH,, , ,
UIMP,6,HF,, , ,
UIMP,6,QRATE,, , ,
UIMP,6,VISC,, , ,
UIMP,6,SONC,, , ,
UIMP,6,MURX,, ,100,
UIMP,6,MGXX,, , ,
UIMP,6,RSVX,, , ,
UIMP,6,PERX,, , ,
!*
UIMP,20,ENTH,, , ,
UIMP,20,HF,, , ,
UIMP,20,QRATE,, , ,
UIMP,20,VISC,, , ,
UIMP,20,SONC,, , ,
UIMP,20,MURX,, ,100,
UIMP,20,MGXX,, , ,
UIMP,20,RSVX,, , ,
UIMP,20,PERX,, , ,
!*
!*
UIMP,7,ENTH,, , ,
UIMP,7,HF,, , ,
UIMP,7,QRATE,, , ,
UIMP,7,VISC,, , ,
UIMP,7,SONC,, , ,
UIMP,7,MURX,, ,100,
UIMP,7,MGXX,, , ,
UIMP,7,RSVX,, , ,
UIMP,7,PERX,, , ,
!*
FLST,5,24,5,ORDE,5
FITEM,5,2
FITEM,5,7
FITEM,5,-8
FITEM,5,77
FITEM,5,-97
CM_Y,AREA
ASEL,, , , 9
CM_Y1,AREA
CMSEL,S_Y
!*
CMSEL,S_Y1
AATT, 20,, 1, 0
CMSEL,S_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CM_Y,AREA
ASEL,, , ,P51X
CM_Y1,AREA
CMSEL,S_Y
!*

```

```

CM,_Y,AREA
ASEL, , , P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, , 5, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
/PNUM,KP,0
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,1
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/NUM,0
!*
/PNUM,MAT,1
/REPLOT
!*
/PNUM,KP,0
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,1
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/NUM,0
!*
/PNUM,MAT,1
/REPLOT
!*
/ZOOM,1,RECT,-0.228055,0.038043,-0.113896,-
0.034239
/AUTO, 1
/REP
/REPLOT,RESIZE
asel,s,mat,,5
aplot
lplot
/ZOOM,1,RECT,-0.256068,0.060283,-0.037164,-
0.093238
/PNUM,KP,0
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,1
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/NUM,1
!*
/PNUM,MAT,1
/REPLOT
!*
!*
LESIZE,ALL, , , 45,1,1

/AUTO, 1
/
/REP
/ZOOM,1,RECT,-
0.664469,0.008020,0.374504,-0.919636
!*
AMAP,17,23,346,60,347
!*
!*
AMAP,16,73,23,60,74
!*
!*
AMAP,23,73,11,12,74
!*
/AUTO, 1
/REP
LPLOT
/ZOOM,1,RECT,0.384306,0.556774,-
0.236464,-0.001779
!*
LESIZE,ALL, , , 15,1,1
!*
LESIZE,ALL, , , 8,1,1
!*
LESIZE,ALL, , , 5,1,1
/ZOOM,1,RECT,-
0.050233,0.507779,0.332030,0.243201
/AUTO, 1
/REP
APLOT
MSHKEY,0
!*
FLST,5,3,5,ORDE,3
FITEM,5,20
FITEM,5,23
FITEM,5,-24
CM,_Y,AREA
ASEL, , , P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
CMDEL,_Y2
!*
/ZOOM,1,RECT,-0.664469,0.047217,-
0.442299,-0.067107
/AUTO, 1
/REP
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 22
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
FITEM,5,-547

```

CMDEL,_Y
 FITEM,5,29
 FITEM,5,31
 FITEM,5,-32
 FITEM,5,38
 FITEM,5,-39
 FITEM,5,44
 FITEM,5,50
 FITEM,5,52
 FITEM,5,55
 FITEM,5,71
 FITEM,5,-72
 FITEM,5,127
 FITEM,5,-128
 FITEM,5,141
 FITEM,5,211
 FITEM,5,-212
 FITEM,5,225
 FITEM,5,295
 FITEM,5,-296
 FITEM,5,309
 FITEM,5,458
 FITEM,5,-459
 FITEM,5,461
 FITEM,5,463
 FITEM,5,465
 FITEM,5,467
 FITEM,5,469
 FITEM,5,471
 FITEM,5,473
 FITEM,5,475
 FITEM,5,477
 FITEM,5,479
 FITEM,5,481
 FITEM,5,483
 FITEM,5,485
 FITEM,5,487
 FITEM,5,489
 FITEM,5,491
 FITEM,5,493
 FITEM,5,495
 FITEM,5,497
 FITEM,5,499
 FITEM,5,502
 FITEM,5,-503
 FITEM,5,508
 FITEM,5,-509
 FITEM,5,513
 FITEM,5,-514
 FITEM,5,518
 FITEM,5,521
 FITEM,5,-522
 FITEM,5,527
 FITEM,5,-528
 FITEM,5,533
 FITEM,5,-534
 FITEM,5,538
 FITEM,5,-539
 FITEM,5,543
 FITEM,5,546

FITEM,5,10
 FITEM,5,21
 FITEM,5,33
 FITEM,5,45
 FITEM,5,98
 FITEM,5,-114
 FITEM,5,116
 CM,_Y,AREA
 ASEL,, ,P51X
 CM,_Y1,AREA
 CHKMESH,'AREA'
 CMSEL,S,_Y
 !*
 ACLEAR,_Y1
 AMESH,_Y1
 !*
 CMDEL,_Y
 CMDEL,_Y1
 CMDEL,_Y2
 !*
 ACLEAR, 116
 FLST,5,24,4,ORDE,24
 FITEM,5,29
 FITEM,5,44
 FITEM,5,50
 FITEM,5,458
 FITEM,5,-459
 FITEM,5,461
 FITEM,5,463
 FITEM,5,465
 FITEM,5,467
 FITEM,5,469
 FITEM,5,471
 FITEM,5,473
 FITEM,5,475
 FITEM,5,477
 FITEM,5,479
 FITEM,5,481
 FITEM,5,483
 FITEM,5,485
 FITEM,5,487
 FITEM,5,489
 FITEM,5,491
 FITEM,5,493
 FITEM,5,495
 FITEM,5,497
 CM,_Y,LINE
 LSEL,, , ,P51X
 !*
 CM,_Y1,LINE
 CMSEL,,_Y
 LESIZE,_Y1, , ,6,1,
 CMDEL,_Y
 CMDEL,_Y1
 asel,s,mat,,1,6,6
 aplot
 /AUTO, 1
 CMDEL,_Y
 et,3,53,4
 asel,s,mat,,3

```

/REP
asel,s,mat,,3
aplot
MSHKEY,1
!*
CM,_Y,AREA
ASEL,,,, 69
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
CMDEL,_Y2
!*
MSHKEY,0
!*
CM,_Y,AREA
ASEL,,,, 71
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
CMDEL,_Y2
!*
ACLEAR, 71
asel,s,mat,,7
esla
nsle
aplot
ACLEAR, 118
LPLOT
!*
LESIZE,ALL,,002,,15,1,1
FLST,5,4,4,ORDE,2
FITEM,5,13
FITEM,5,-16
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,002,,,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
!*
CM,_Y,AREA
ASEL,,,, 118
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
nsel,all

```

```

aatt,3,3,3
amesh,all
et,6,53,0
asel,s,mat,,6
aatt,6,6,6
amesh,all
et,20,53,0
asel,s,mat,,20
aatt,20,20,20
amesh,all
et,1,53,3
asel,s,mat,,1
aatt,1,1,1
amesh,all
*create,nmin,mac
asel,s,,,arg1
esla
nsle
et,6,53,0
asel,s,mat,,6
aatt,6,6,6
amesh,all
*get,_nmin,node,,num,min
asel,all
esel,all
nsel,all
*end
*do,anum,77,97,1
asel,s,,,anum
esla
nsle
nsel,u,cp,,1,2e3
cp,next,curr,all
cp,next,emf,all
asel,all
esel,all
nsel,all
*enddo
*do,anum,7,8,1
asel,s,,,anum
esla
nsle
nsel,u,cp,,1,2e3
cp,next,curr,all
cp,next,emf,all
asel,all
esel,all
nsel,all
*enddo
asel,s,,,2
esla
nsle
nsel,u,cp,,1,2e3
cp,next,curr,all
cp,next,emf,all
asel,all
esel,all
*rep,36,1,,-.01
ngen,2,100,mm+1,mm+136,1,,1
et,14,124,0

```

```

nmin,88
e,nn+6,nn+7,_nmin
nmin,2
e,nn+8,nn+7,_nmin
nmin,87
e,nn+8,nn+9,_nmin
nmin,78
e,nn+10,nn+9,_nmin
nmin,77
e,nn+102,nn+103,_nmin
nmin,83
e,nn+104,nn+103,_nmin
nmin,97
e,nn+104,nn+105,_nmin
nmin,84
e,nn+106,nn+105,_nmin
nmin,96
e,nn+106,nn+107,_nmin
nmin,85
e,nn+108,nn+107,_nmin
nmin,95
e,nn+108,nn+109,_nmin
nmin,86
e,nn+110,nn+109,_nmin
nmin,82
e,nn+202,nn+203,_nmin
nmin,91
e,nn+204,nn+203,_nmin
nmin,81
e,nn+204,nn+205,_nmin
nmin,92
e,nn+206,nn+205,_nmin
nmin,80
e,nn+206,nn+207,_nmin
nmin,93
e,nn+208,nn+207,_nmin
nmin,79
e,nn+208,nn+209,_nmin
nmin,94
e,nn+210,nn+209,_nmin
et,12,124,0
r,12,rs
type,12
real,12
e,nn+10,nn+11
e,nn+110,nn+111
e,nn+210,nn+211
et,13,124,1
r,13,ls
type,13
real,13
e,nn+11,nn+102
e,nn+111,nn+202
e,nn+211,nn+2
rr=6.01e-6
lr=8.4e-10
*SET,mm,111800
n,mm+1,-.3,.15

```

```

r,14,rr
type,14
real,14
e,mm+1,mm+2
*rep,18,2,2
e,mm+101,mm+102
*rep,18,2,2
et,16,124,1
r,16,lr
type,16
real,16
e,mm+2,mm+3
*rep,17,2,2
e,mm+102,mm+103
*rep,17,2,2
e,mm+1,mm+36
e,mm+101,mm+136
et,17,124,6
r,17,1
type,17
real,17
nmin,59
e,mm+1,mm+101,_nmin
nmin,60
e,mm+3,mm+103,_nmin
nmin,61
e,mm+5,mm+105,_nmin
nmin,62
e,mm+7,mm+107,_nmin
nmin,63
e,mm+9,mm+109,_nmin
nmin,64
e,mm+11,mm+111,_nmin
nmin,65
e,mm+13,mm+113,_nmin
nmin,66
e,mm+15,mm+115,_nmin
nmin,67
e,mm+17,mm+117,_nmin
nmin,68
e,mm+19,mm+119,_nmin
nmin,69
e,mm+21,mm+121,_nmin
nmin,70
e,mm+23,mm+123,_nmin
nmin,71
e,mm+25,mm+125,_nmin
nmin,72
e,mm+27,mm+127,_nmin
nmin,73
e,mm+29,mm+129,_nmin
nmin,74
e,mm+31,mm+131,_nmin
nmin,75
e,mm+33,mm+133,_nmin
nmin,76
e,mm+35,mm+135,_nmin
SAVE

```