

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇ ALANLI GÜÇ SİSTEMİNDE GENETİK ALGORİTMA İLE  
OTOMATİK ÜRETİM KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Burak TABAKOĞLU**

**Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği**

**Programı : Elektrik Mühendisliği**

**HAZİRAN 2009**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇ ALANLI GÜÇ SİSTEMİNDE GENETİK ALGORİTMA İLE  
OTOMATİK ÜRETİM KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Burak TABAKOĞLU  
504061005**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 4 Mayıs 2009  
Tezin Savunulduğu Tarih : 4 Haziran 2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ömer USTA (İTÜ)  
Prof. Dr. A. Coşkun SÖNMEZ (YTÜ)**

**HAZİRAN 2009**

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ayşen Demirören'e, yüksek lisans öğrenimim süresince desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a ve eğitim hayatımda her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Nisan 2009

Burak Tabakoğlu

Elektrik Müh.



## İÇİNDEKİLER

|                                                  | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------|--------------|
| ÖNSÖZ.....                                       | iii          |
| İÇİNDEKİLER.....                                 | v            |
| KISALTMALAR.....                                 | vii          |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                             | ix           |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                               | xi           |
| SEMBOL LİSTESİ.....                              | xiii         |
| ÖZET .....                                       | xv           |
| SUMMARY.....                                     | xvii         |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                            | <b>1</b>     |
| 1.1 Tezin Amacı.....                             | 1            |
| 1.2 Literatür Özeti .....                        | 2            |
| 1.3 Tezin İçeriği .....                          | 3            |
| <b>2. OTOMATİK ÜRETİM KONTROLÜ .....</b>         | <b>5</b>     |
| 2.1 Sistem Modeli .....                          | 6            |
| 2.1.1 Generatör modeli.....                      | 7            |
| 2.1.2 Yük modeli .....                           | 10           |
| 2.1.3 Tahrik makinesi.....                       | 11           |
| 2.1.4 Kazan modeli .....                         | 16           |
| 2.1.5 Devir sayısı regülatörü modeli.....        | 16           |
| 2.2 Paralel Birimler Arasında Yük Paylaşımı..... | 18           |
| 2.3 Enterkonnekte Güç Sisteminde OÜK.....        | 19           |
| 2.4 Ek Kontrol.....                              | 22           |
| <b>3. EKONOMİK DAĞITIM .....</b>                 | <b>25</b>    |
| 3.1 Üretim Biriminin Özellikleri.....            | 27           |
| 3.1.1 Isıl oran eğrisi .....                     | 28           |
| 3.1.2 Kararlı çalışma sınırları .....            | 28           |
| 3.1.3 Vana açma kapama etkisi .....              | 29           |
| 3.2 Kayıpların Modellenmesi .....                | 31           |
| <b>4. GENETİK ALGORİTMA.....</b>                 | <b>35</b>    |
| 4.1 Genetik Algoritmanın işleyişi .....          | 37           |
| 4.2 Genetik Terimler .....                       | 39           |
| 4.3 Kodlama.....                                 | 41           |
| 4.4 Başlangıç Popülasyonu.....                   | 42           |
| 4.5 Seçim .....                                  | 43           |
| 4.6 Genetik Operatörler .....                    | 44           |
| 4.6.1 Çaprazlama .....                           | 45           |
| 4.6.2 Mutasyon .....                             | 47           |
| 4.7 Yeni Nesil .....                             | 49           |
| 4.8 Sonlandırma .....                            | 48           |
| <b>5. ÜÇ ALANLI GÜÇ SİSTEMİNDE OÜK.....</b>      | <b>51</b>    |

|                                                |            |
|------------------------------------------------|------------|
| 5.1 Güç Sisteminin Simulink Modeli .....       | 51         |
| 5.2 PI Tipi Kontrolörle Tasarım .....          | 55         |
| 5.2.1 IAE başarıml ölçütü .....                | 56         |
| 5.2.2 ISE, ITAE, ITSE başarıml ölçütleri ..... | 65         |
| 5.3 PID Tipi Kontrolörle Tasarım .....         | 72         |
| 5.3.1 IAE başarıml ölçütü .....                | 73         |
| 5.3.2 ISE, ITAE, ITSE başarıml ölçütleri ..... | 82         |
| 5.4 Ekonomik Dağıtım Modeli.....               | 89         |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>               | <b>101</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                          | <b>103</b> |
| <b>EKLER .....</b>                             | <b>107</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                           | <b>109</b> |

## KISALTMALAR

|             |                                                  |
|-------------|--------------------------------------------------|
| <b>AB</b>   | : Alçak Basınç                                   |
| <b>ACE</b>  | : Alan Kontrol Hatası                            |
| <b>AGC</b>  | : Otomatik Üretim Kontrolü                       |
| <b>ED</b>   | : Ekonomik Dağıtım                               |
| <b>GA</b>   | : Genetik Algoritma                              |
| <b>IAE</b>  | : Mutlak hatanın integrali                       |
| <b>ISE</b>  | : Hatanın karesinin integrali                    |
| <b>ITAE</b> | : Mutlak hatanın zamanla çarpımının integrali    |
| <b>ITSE</b> | : Hatanın karesinin zamanla çarpımının integrali |
| <b>LFC</b>  | : Yük Frekans Kontrolü                           |
| <b>OB</b>   | : Orta Basınç                                    |
| <b>OÜK</b>  | : Otomatik Üretim Kontrolü                       |
| <b>P</b>    | : Oransal                                        |
| <b>PD</b>   | : Oransal-Türev                                  |
| <b>PI</b>   | : Oransal-Integral                               |
| <b>PID</b>  | : Oransal-Integral-Türev                         |
| <b>TF</b>   | : Transfer Fonksiyonu                            |
| <b>YB</b>   | : Yüksek Basınç                                  |
| <b>YFK</b>  | : Yük Frekans Kontrolü                           |





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 5.1 : PI katsayılarını bulunmasında kullanılan GA parametreleri..        | 58 |
| Çizelge 5.2 : PI kontrolör katsayıları (IAE).....                                | 58 |
| Çizelge 5.3 : Farklı başarımlar ölçütlerine göre PI kontrolör katsayıları .....  | 66 |
| Çizelge 5.4 : PID katsayılarını bulunmasında kullanılan GA parametreleri. ....   | 74 |
| Çizelge 5.5 : PID kontrolör katsayıları (IAE).....                               | 77 |
| Çizelge 5.6 : Farklı başarımlar ölçütlerine göre PID kontrolör katsayıları. .... | 82 |
| Çizelge 5.7 : Yakıt maliyet katsayıları. ....                                    | 91 |
| Çizelge 5.8 : Ekonomik dağıtım için kullanılan GA parametreleri. ....            | 93 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 : Generatörün yalıtılmış yükü beslemesi.....                             | 6  |
| Şekil 2.2 : Elektriksel ve mekanik güç ile açısal hız arasındaki TF.....           | 10 |
| Şekil 2.3 : Yük sönüm etkisinde güç ile açısal hız arasındaki blok diyagram.....   | 10 |
| Şekil 2.4 : Frekansa duyarlı yükte güç ile açısal hız arasındaki blok diyagram. .  | 11 |
| Şekil 2.5 : Ara ısıtıcısız tahrik makinası modeli. ....                            | 12 |
| Şekil 2.6 : Ara ısıtıcısız tahrik makinesi, generatör ve yük modeli .....          | 12 |
| Şekil 2.7 : Tek ara ısıtıcılı seri bağlı buhar santrali.....                       | 13 |
| Şekil 2.8 : Tıkaç tipi vana karakteristiği.....                                    | 14 |
| Şekil 2.9 : Buhar türbini modeli.....                                              | 15 |
| Şekil 2.10 :Ara ısıtıcılı buhar türbini transfer fonksiyonu.....                   | 16 |
| Şekil 2.11 :Kazanın detaylı gösterimi .....                                        | 17 |
| Şekil 2.12 :Proporsiyonel karakteristikli devir sayısı regülatörü.....             | 18 |
| Şekil 2.13 :Proporsiyonel devir sayısı regülatörü blok diyagramı.....              | 18 |
| Şekil 2.14 :Paralel birimler arasında yük paylaşımı.....                           | 19 |
| Şekil 2.15 :İki alanlı güç sistemi .....                                           | 20 |
| Şekil 2.16 :İki alanlı sistemin elektriksel eşdeğeri.....                          | 20 |
| Şekil 2.17 :İki alanlı güç sisteminin blok diyagramı (ilk hız kontrolü) .....      | 22 |
| Şekil 2.18 :Ek kontrol ile iki alanlı güç sisteminin blok diyagramı.....           | 23 |
| Şekil 3.1 : Ortak baraya bağlanan santraller.....                                  | 26 |
| Şekil 3.2 : Üretim biriminin giriş çıkış karakteristiği.....                       | 28 |
| Şekil 3.3 : Artan ısı oran eğrisi .....                                            | 29 |
| Şekil 3.4 : Vana etkisi ile giriş çıkış eğrisi .....                               | 30 |
| Şekil 3.5 : İletim şebekesi ve santraller .....                                    | 31 |
| Şekil 4.1 : GA akış diyagramı.....                                                 | 38 |
| Şekil 4.2 : Tek noktadan çaprazlama.....                                           | 45 |
| Şekil 4.3 : Çok noktadan çaprazlama .....                                          | 46 |
| Şekil 4.4 : Düzgün çaprazlama. ....                                                | 46 |
| Şekil 4.5 : Kes ve ekle operatörü .....                                            | 47 |
| Şekil 4.6 : İkilik tabanda mutasyon operatörü. ....                                | 48 |
| Şekil 5.1 : Üç alanlı güç sistemi modeli. ....                                     | 52 |
| Şekil 5.2 : Yük artışına frekans cevabı.....                                       | 55 |
| Şekil 5.3 : PI kontrolör blok diyagramı .....                                      | 56 |
| Şekil 5.4 : GA ile PI optimizasyonunda nesillere göre uygunluk değerleri. ....     | 59 |
| Şekil 5.5 : GA ile PI optimizasyonunda nesillere göre en iyi uygunluk değeri... .. | 59 |
| Şekil 5.6 : PI kontrolör ile 1. alandaki frekans cevabı. ....                      | 61 |
| Şekil 5.7 : PI kontrolör ile tüm alanlardaki frekans cevapları ... ..              | 62 |
| Şekil 5.8 : PI kontrolör ile 1. ve 2. alan arası güç akışı. ....                   | 63 |
| Şekil 5.9 : PI kontrolör tüm alanlar arası güç akışı. ....                         | 64 |
| Şekil 5.10 :PI kontrolör ile mekanik çıkışlardaki değişim. ....                    | 64 |
| Şekil 5.11 :PI kontrolör ile tüm alanlardaki mekanik güçteki değişim.....          | 65 |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 5.12 :</b> PI kontrolör için IAE ve ISE başarımlar ölçütleri karşılaştırılması. ....          | 67  |
| <b>Şekil 5.13 :</b> PI kontrolör için IAE ve ITAE başarımlar ölçütleri karşılaştırılması... .          | 68  |
| <b>Şekil 5.14 :</b> PI kontrolör için ITAE ve ISE+ITAE başarımlar ölçütleri karşılaştırılması . ....   | 69  |
| <b>Şekil 5.15 :</b> PI kontrolör için ITAE ve ITSE başarımlar ölçütleri karşılaştırılması . .          | 70  |
| <b>Şekil 5.16 :</b> PI kontrolör için ITAE ve ITSE+ITAE başarımlar ölçütleri karşılaştırılması . ....  | 71  |
| <b>Şekil 5.17 :</b> PID kontrolör blok diyagramı.....                                                  | 73  |
| <b>Şekil 5.18 :</b> GA ile PID optimizasyonunda nesillere göre uygunluk değerleri .....                | 75  |
| <b>Şekil 5.19 :</b> GA ile PID optimizasyonunda nesillere göre en iyi uygunluk değerleri. ....         | 76  |
| <b>Şekil 5.20 :</b> PID kontrolör ile 1. alandaki frekans değişimi .....                               | 77  |
| <b>Şekil 5.21 :</b> PID kontrolör ile tüm alanlardaki frekans değişimi.....                            | 78  |
| <b>Şekil 5.22 :</b> PID kontrolör 1. ve 2. alanlar arası güç akışı .....                               | 79  |
| <b>Şekil 5.23 :</b> PID kontrolör tüm. alanlar arası güç akışı.....                                    | 80  |
| <b>Şekil 5.24 :</b> PID kontrolör ile mekanik çıkışlardaki değişim. ....                               | 80  |
| <b>Şekil 5.25 :</b> PID kontrolör ile tüm alanlardaki mekanik güçteki değişim. ....                    | 81  |
| <b>Şekil 5.26 :</b> PID kontrolör için IAE ve ISE başarımlar ölçütleri karşılaştırılması. ....         | 83  |
| <b>Şekil 5.26 :</b> PID kontrolör için IAE ve ITAE başarımlar ölçütleri karşılaştırılması. .           | 85  |
| <b>Şekil 5.28 :</b> PID kontrolör için ITAE ve ISE+ITAE başarımlar ölçütleri karşılaştırılması . ....  | 85  |
| <b>Şekil 5.29 :</b> PID kontrolör için ITAE ve ITSE başarımlar ölçütleri karşılaştırılması             | 87  |
| <b>Şekil 5.30 :</b> PID kontrolör için ITAE ve ITSE+ITAE başarımlar ölçütleri karşılaştırılması . .... | 88  |
| <b>Şekil 5.31 :</b> PI ve PID kontrolör karşılaştırması.....                                           | 88  |
| <b>Şekil 5.32 :</b> Ekonomik dağıtım eklenmiş OÜK modeli. ....                                         | 90  |
| <b>Şekil 5.33 :</b> Üretim birimlerinin yakıt maliyet eğrileri. ....                                   | 92  |
| <b>Şekil 5.34 :</b> Ekonomik dağıtımda uygunluk değerlerinin değişimi .....                            | 93  |
| <b>Şekil 5.35 :</b> 1. alanda üretimdeki değişim .....                                                 | 95  |
| <b>Şekil 5.36 :</b> Tüm alanlarda üretimdeki değişimler.....                                           | 96  |
| <b>Şekil 5.36 :</b> Toplam talep ve kayıplardaki değişim .....                                         | 96  |
| <b>Şekil 5.37 :</b> İletim hatlarındaki güç akışları. ....                                             | 97  |
| <b>Şekil 5.38 :</b> Toplam üretimdeki değişim .....                                                    | 98  |
| <b>Şekil 5.39 :</b> Toplam maliyetteki değişim .....                                                   | 99  |
| <b>Şekil 5.40 :</b> Üç alanlı güç sisteminde ED sonucu frekans değişimleri .....                       | 100 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                 |                                                |
|-----------------|------------------------------------------------|
| $\Delta$        | : Sapma                                        |
| $o$             | : Sürekli hal değeri, nominal değer            |
| $\alpha$        | : Açısal ivme                                  |
| $\delta$        | : Faz açısı                                    |
| $\lambda$       | : Lagrange çarpanı                             |
| $\beta$         | : Frekans cevap karakteristiği                 |
| $B$             | : Alan yönelim faktörü                         |
| $B_{ij}$        | : Kayıp katsayıları                            |
| $C$             | : Kontrolör transfer fonksiyonu                |
| $D$             | : Yük sönüm sabiti                             |
| $f$             | : Frekans                                      |
| $f_T$           | : Elektriğin toplam maliyeti                   |
| $F_i$           | : i. santralin yakıt maliyet fonksiyonu        |
| $F_{HP}$        | : YB bölümündeki toplam türbin gücü sürtünmesi |
| $F_{IP}$        | : OB bölümündeki toplam türbin gücü sürtünmesi |
| $F_{LP}$        | : AB bölümündeki toplam türbin gücü sürtünmesi |
| $H$             | : Eylemsizlik sabiti                           |
| $I$             | : Eylemsizlik momenti                          |
| $K$             | : Kazanç                                       |
| $K_D$           | : Türevsel kontrolör katsayısı                 |
| $K_I$           | : Integral kontrolör katsayısı                 |
| $K_P$           | : Oransal kontrolör katsayısı                  |
| $L$             | : Lagrange fonksiyonu                          |
| $n$             | : Santral sayısı                               |
| $\Delta P_{xy}$ | : x ile y alanları arasındaki güç akışı        |
| $P_D$           | : Toplam yük talebi                            |
| $P_{elk}$       | : Elektriksel güç                              |
| $P_i$           | : i. santralin aktif güç üretimi               |
| $P_L$           | : Yük                                          |
| $P_{max}$       | : Maksimum türbin gücü                         |
| $P_{mek}$       | : Mekanik güç                                  |
| $P_{net}$       | : Mekanik ve elektriksel güç farkı             |
| $P_{vana}$      | : Vana konumu                                  |
| $R$             | : Regülasyon yüzdesi                           |
| $s$             | : Laplace dönüşümü                             |
| $t$             | : Zaman                                        |
| $T$             | : Bağlantı hattı senkronizasyon katsayısı      |
| $T_e$           | : Elektriksel moment                           |
| $T_{net}$       | : Mekanik ve elektriksel moment farkı          |
| $T_m$           | : Mekanik moment                               |
| $T_{CH}$        | : Türbin ana giriş zaman sabiti                |
| $T_{CO}$        | : Geçit borusu zaman sabiti                    |

|               |                                        |
|---------------|----------------------------------------|
| $T_G$         | : Devir sayısı regülatörü zaman sabiti |
| $T_{RH}$      | : Ara ısıtıcı zaman sabiti             |
| $\omega$      | : Açısal hız                           |
| $\omega_{FL}$ | : Tam yükte sürekli hal hızı           |
| $\omega_{NL}$ | : Yüzsüz durumda sürekli hal hızı      |
| $\omega_r$    | : Rotor hızı                           |
| $X_{eq}$      | : Eşdeğer reaktans                     |
| $X_T$         | : Hat reaktansı                        |

## ÜÇ ALANLI GÜÇ SİSTEMİNDE GENETİK ALGORİTMA İLE OTOMATİK ÜRETİM KONTROLÜ

### ÖZET

Günlük yaşamın her alanında kullanılan elektrik enerjisinin güvenilir, düşük maliyetli olarak üretilmesi ve tüketicilere talep edilen miktarda kaliteli, kesintisiz, ekonomik olarak ulaştırılması gerektiği yönetmeliklerde belirtilmiştir. Elektrik enerjisi talebinde gün içinde meydana gelen değişimler sonucu güç sistemindeki generatör çıkışlarının da talebe uygun olarak ayarlanması gerekir. Otomatik üretim kontrolü olarak tanımlanan bu işlem sonucunda sistemdeki aktif güç dengesi sağlanarak, şebeke frekansı nominal değere getirilir.

Bu yüksek lisans tezinde; üç alanlı bir güç sistemindeki türbin, kazan, devir sayısı regülatörü, vanalar, generatör, yük ve iletim hatlarının gerçeğe yakın modellenmesi yapılarak her alana ilişkin frekans cevapları ve alanlar arası güç akışları elde edilecektir. Alan kontrol hatası olarak tanımlanan bu kontrol işaretinden yararlanılarak frekansın sürekli durumda anma değeri 50 Hertz'te sabit kalması ve geçici hal cevabının iyileştirilmesi amaçlanır. Frekanstaki ve bağlantı hatlarındaki güç değişimi, mutlak hatanın integrali, hatanın karesinin integrali, mutlak hatanın zamanla çarpımının integrali, hatanın karesinin zamanla çarpımının integrali gibi farklı başarımlar ölçütlerine göre hesaplanarak, her üretim biriminde bu hatayı en düşük yapacak PI ve PID kontrolörlerin katsayıları genetik algoritma kullanılarak bulunacak ve bu kontrolörlerin geçici hal cevaplarının karşılaştırmaları yapılacaktır.

Genetik algoritma, evrimsel algoritmaların bir sınıfı olup, türlerin kökenini inceleyen bir bilim dalı olan evrimsel biyolojide kullanılan kalıtım, mutasyon, seçim ve çaprazlama gibi terimleri kullanan bir arama tekniği olarak tanımlanır. Genetik algoritma, türev bilgisine ihtiyaç duymaması, paralel olarak arama yapabilmesi ve rastlantısal arama yöntemi olması sayesinde günümüzde bilimsel ve mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yük frekans kontrolü ile generatör çıkışlarının ayarlanarak frekans ve alanlar arası güç alışverişi istenen değere getirildikten sonra toplam işletme maliyeti en düşük olacak şekilde yük talebi üretim birimleri arasında paylaştırılacaktır. Otomatik üretim kontrolünün ikinci amacı olan ekonomik dağıtım modelinde termik ve doğalgaz santralleri için sabit masraflar ve yakıt masrafları göz önüne alınarak ısı oran eğrileri ve yakıt maliyet eğrileri çıkartılacaktır. Vanaların devreye alınması sırasında süreksizlik noktaları içeren bu giriş-çıkış eğrileri hesaplamaya dayalı yöntemlerle çözülemeyeceğinden ekonomik dağıtım optimizasyon probleminin çözümünde de genetik algoritma kullanılmıştır. Ekonomik dağıtım sonucunda generatör çıkışları elektriğin birim maliyeti en düşük olacak şekilde ayarlanacaktır.





# **AUTOMATIC GENERATION CONTROL FOR THREE-AREA POWER SYSTEM USING GENETIC ALGORITHM**

## **SUMMARY**

Electrical energy, which is used in all areas of daily life, must be generated in a reliable and low-cost way. Also according to the regulations, it needs to be reached to the customers by meeting their demand, and have to be high in quality, uninterrupted and economic. As a result of the change in electrical energy demand within the day, the generator outputs of the power system should be adjusted according to load demand. This process is defined as automated generation control, which regulate frequency to its nominal value by maintaining active power balance in the system.

In this master's thesis; turbine, boiler, governor, valves, generator, load and transmission lines of the three-areas power system will be modeled as close to reality. As a result, frequency response for each area and tie-lines flows will be obtained. By using this control signal, which is defined as area control error, it is aimed that the frequency remains constant at its nominal value 50 Hertz in steady-state, and its transient response improves. This frequency and tie-lines power exchange are calculated with various performance criteria such as integral absolute error, integral square error, integral time absolute error, the integral time square error. In each generation unit, PI and PID controller coefficients, that minimize the error by using genetic algorithm, will be found and transient-response of these controllers will be compared.

Genetic algorithm, a class of evolutionary algorithms, is a search technique that uses terms in evolutionary biology, which investigates origin of species, such as heritance, mutation, selection and crossover. As the genetic algorithm does not require derivative information, utilize random search methods with parallel search capabilities, it is widely used nowadays in the solution of scientific and engineering problems.

After load-frequency control adjusts generator output and maintain frequency and power exchange between the areas, it is desired that load demand will be shared between generation units such that the total operating costs will be minimum. In the model of economic dispatch, which is secondary objective of automatic generation control, considering fuel costs and fixed costs of thermal and gas power plants heat rate curves and fuel cost curves will be obtained. As these input-output curves contains discontinuities during valve-points loading, it couldn't be solved with analytical methods. Therefore, genetic algorithm is used again for economic dispatch optimization problem. As a result of economic dispatch, generator outputs will be allocated to minimize unit cost of electricity.



## 1. GİRİŞ

Elektrik, 20. yüzyılın başlarında pek yaygın kullanılmamasına karşın günümüzde evlerde, sanayide, kısacası hayatın her alanında ihtiyaç duyulan bir enerji çeşidi olmuştur. Hatta uzun süreli elektrik kesintileri günlük yaşamı felç etmeye yetmektedir. Türkiye sınırları içinde ilk elektrik üretimi 1902 yılında Tarsus'ta 2 kW'lık bir generatörden kasabaya elektrik verilmesiyle gerçekleşmiştir. İlk kez geniş kitlenin elektriğe kavuşması ise 1913 yılında İstanbul Silahtarağa santralinin işletmeye alınmasından sonradır [1]. Diğer büyük şehirlerde kurulan elektrik santrallerinin bunu takip etmesi sonucu üç fazlı sistemlere geçilmiş ve enerji iletim hatlarının devreye sokulmasıyla birlikte yurt çapındaki tüm santraller birbirine bağlanmıştır. 1952 yılından itibaren Kuzeybatı Anadolu enterkonnekte şebekenin kurulması sonucunda güç sisteminin karmaşıklaşması elektrik enerji kalitesinde sorunları da beraberinde getirmiştir.

Günümüzde, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nca belirlenen yönetmeliklere göre “elektrik iletim sisteminin güvenilir ve düşük maliyetli olarak planlanması, işletilmesi ve tüketicilere kaliteli, yeterli ve düşük maliyetli elektrik enerjisi arz edilebilmesi” gerekmektedir [2]. Bunun sonucunda elektrik güç sistemlerinin tasarımı, analizi ve işletilmesinde otomatik üretim kontrolü (OÜK veya AGC) en önemli konulardan biri olmuştur [3].

### 1.1. Tezin Amacı

Bu yüksek lisans çalışmasında çok alanlı güç sisteminde OÜK yapılmıştır. OÜK'nin yük frekans kontrolü olarak (YFK veya LFC) da tanımlanan ilk amacı generatör çıkışlarının ayarlanarak frekansın sürekli durumda nominal değere getirilmesidir [4]. İkinci amacı, kontrol alanları arasındaki güç akışının önceden belirlenmiş çizelge değerleri içinde kalmasını sağlayan bağlantı hattı kontrolüdür [5]. Ekonomik dağıtım (ED) olarak adlandırılan OÜK'nin üçüncü amacı ise elektrik enerjisinin toplam

üretim maliyeti en düşük olacak şekilde yük talebinin üretim birimleri arasında paylaştırılmasıdır [6].

Kaliteli elektrik enerjisi için şebeke frekansı izin verilen işletme sınırlarını aşmamalıdır. Sistemin nominal frekansı TEİAŞ tarafından 49.8 - 50.2 Hz aralığında kontrol edilmekte olup sınır değerlerin 10 dakikadan uzun süreyle geçilemeyeceği yönetmeliklerde belirtilmiştir. OÜK için ise frekans hedefi 49.95 - 50.05 Hz arasında olmalıdır [2]. Sürekli halde frekansta en fazla %0.1'lik sapmaya izin verilmiştir. Bu yüksek lisans çalışmasında ise tüm alanlara %1'lik yük artışı uygulanarak frekanstaki sürekli hal hatasının giderilmesi ve geçici hal cevabının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Her alanın frekans ve bağlantı hatlarındaki güç akışları ayarlandıktan sonra ED yapılarak her generatörün aktif güç çıkışları ayarlanarak maliyetin en aza indirilmesi gerçekleştirilecektir.

## **1.2. Literatür Özeti**

Yük talebinde meydana gelen ve önceden tahmin edilemeyen değişimler sonucunda üretilen ve talep edilen güçler arasındaki denge bozulur. Bunun sonucunda frekansta ve alanlar arasındaki güç akışlarında salınımlar meydana gelir. Geçici haldeki bu salınımları en aza indirmek ve sürekli hal hatasının giderilmesi amacıyla kontrolör tasarımları önem kazanmış ve daha iyi sistem cevabı sağlayan kontrol stratejileri geliştirilmiştir.

Bilimsel kaynaklarda OÜK hakkında bulunan yayınların büyük bir çoğunluğu son 30 yıl içerisinde yazılmıştır [3, 6-12]. Optimal kontrol [6] gibi çoğu kontrol stratejisinde sistemin doğru modellenmesi önemli bir rol oynamasına karşın güç sisteminde parametrelerin, yük talebinin değişmesi ve modellemedeki hatalar buna engel olur. Parametredeki değişimler göz önüne alınarak değişken yapı [7-9] kontrol ve yapay sinir ağları [10, 11] gibi yöntemler önerilmiştir. Fakat bu yöntemlerde durum uzay modeli elde edilirken sistem durumlarının her zaman bilinmemesi sorun oluşturmaktadır. Bunlar dışında geçtiğimiz yıllarda adaptif kontrol [12, 13] ve dayanıklı kontrol [14, 15] yöntemleri OÜK modellenmesinde kullanılmıştır. Bulanık mantık [16, 17] tabanlı kontrolörlerde ise parametreler sistem dinamiklerine çok çabuk değişim gösterir ve doğrusal olmayan bu tip kontrolör tasarımlarında parametre tahmini yapmak gerekli değildir.

Bu tez çalışmasında, OÜK modeline diğer bilimsel kaynaklardan farklı olarak ED ekleneceğinden her iki optimizasyon probleminin çözümünde ortak bir yöntem kullanılması amacıyla GA seçilmiştir. GA, evrimsel algoritmaların bir sınıfı olup OÜK’nde en uygun kontrolör katsayılarının bulunmasında son yıllarda sıkça kullanılan bir arama yöntemidir [18-20].

### 1.3. Tezin İçeriği

Bu yüksek lisans çalışmasının ikinci bölümünde OÜK genel hatlarıyla anlatılacaktır. Bunun için öncelikle generatör, yük, tahrik makinesi, kazan, devir sayısı regülatörünün modelleri elde edilerek, transfer fonksiyonları çıkarılacaktır. Yükün frekansa bağlı karakteristiği ve paralel birimler arasındaki yük paylaşımından bahsedildikten sonra iki alanlı bir güç sistemin elektriksel eşdeğeri elde edilecektir. Son olarak enterkonnekte güç sisteminde ikincil kontrol dahil edilerek iki alanlı sistemin OÜK modeli elde edilecektir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, ED problemi tanıtilarak termik birimlerin çalışma sınırları ve vana açma kapama etkisi göz önüne alınarak ısı oran eğrileri ve yakıt maliyet eğrileri çıkarılacaktır. Ayrıca elektriğin santrale maliyeti, sabit masraflar ve üretim masrafları olarak ayrı ayrı incelenecektir. Kayıpların etkisi de göz önüne alınarak ED için klasik çözüm yöntemlerinden bahsedilecek, ve bu çalışmada kullanılan genetik algoritma (GA) ile karşılaştırılması yapılacaktır.

Dördüncü bölümünde, OÜK’de en iyi frekans cevabını sağlayan kontrolör katsayılarının bulunmasında ve ED optimizasyon probleminde toplam maliyetin en düşük yapan santrallerin aktif güç üretimlerinin hesaplanmasında kullanılacak yöntem olan GA anlatılacaktır. GA’nın tarihi ve kullanılan genetik terimler tanıttıldıktan sonra algoritmanın mühendislik problemlerine uyarlanması ele alınacak ve algoritmanın akış diyagramı çıkarılarak problemin çözümünde kullanılan kodlama, başlangıç popülasyonu, seçim, çaprazlama, mutasyon gibi genetik operatörler tanıtılacaktır.

Beşinci bölümde, üç alanlı örnek bir güç sisteminde OÜK simülasyonu yapılacaktır. Çalışmada enterkonnekte güç sisteminin, birbirlerine iletim hatları ile bağlı kontrol alanlarına bölündüğü ve her alandaki generatörlerin uyumlu bir grup olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca üç alandan oluşan güç sisteminin iki buhar türbini ve bir gaz türbini

içerdiği kabul edilerek kazan, devir sayısı regülatörü ve vanaların modellemeleri buna uygun olarak yapılacaktır. Simülasyon sırasında her alandaki yük talebi artırılarak, frekans ve bağlantı hatlarındaki güç değişimleri elde edilecektir. OÜK’de, frekansın nominal değere ayarlanması için katsayıları genetik algoritma ile optimize edilen oransal-integral (PI) ve oransal-integral-türev (PID) kontrolörler kullanılacaktır. Kontrol işareti olarak güç değişimi, frekans yönelim faktörü ve frekans hatasını içeren alan kontrol hatası, genetik algoritmada uygunluk fonksiyonu olarak ise frekanstaki ve bağlantı hatlarındaki güç değişiminindeki mutlak hatanın integrali, hatanın karesinin integrali, mutlak hatanın zamanla çarpımının integrali, hatanın karesinin zamanla çarpımının integrali gibi farklı başarımlı ölçütleri belirlenerek bulunan kontrolörlerin geçici ve sürekli durumdaki karşılaştırmaları yapılacaktır. Daha sonra otomatik üretim kontrolüne ekonomik dağıtım modeli eklenecektir. Termik birimlerdeki vanaların süreksizlik noktalarını içeren ısı oran eğrileri ve yakıt maliyet eğrileri Türkiye’deki santrallerin üretim kapasiteleri ve elektriğin kWsaat başına maliyeti göz önüne alarak hesaplanacaktır. Türevi alınamayan maliyet fonksiyonların optimizasyonunda genetik algoritma kullanılarak elektriğin üretim maliyetinin düşürülmesi amaçlanmaktadır. Burada gerçek bir güç sistemindeki yük talebinin sürekli değiştiği göz önüne alınarak ekonomik dağıtım belirli periyotlarla yapılacak ve aktif güç, frekans, kayıplar ve toplam maliyetin geçici durumdaki değişimleri elde edilecektir.

Son bölümde ise, otomatik üretim kontrolü için tasarlanan kontrolörlerin etkinliği ve ekonomik dağıtımın sisteme getirdiği avantajlar tartışılarak modelin geliştirilmesi için öneriler sunulacaktır.

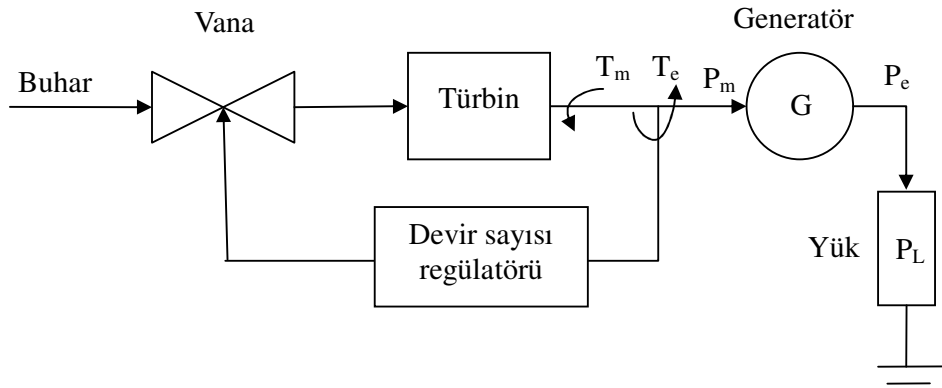
## 2. OTOMATİK ÜRETİM KONTROLÜ

Elektrik enerjisinin tüketicilere talep edilen miktarda kaliteli ve ekonomik olarak ulaştırılması gereklidir. Kaliteli bir elektrik enerjisi, nominal gerilim ve nominal frekansta olmalı, gerilim ve frekanstaki değişimlerin yönetmeliklerce belirlenen sınır değerlerin içinde kalmalıdır. Enerji iletim hatlarında 380 kV, 154 kV ve 66 kV olan nominal gerilimlerin normal işletme koşullarında  $\pm \%10$ 'dan fazla değişim göstermesi gerekmektedir. Sistemin nominal frekansı ise 50 Hertz (Hz) olup  $\pm 0.2$  Hz aralığında kontrol edilmeli ve bu sınırlar 10 dakikadan daha uzun süre geçilmemelidir. OÜK için ise hedeflenen sistem frekansı normal işletme koşullarında 49.95 - 50.05 Hz arasında olmalıdır [2]. Enerji iletim hatlarında aktif ve reaktif güç akışları birbirinden büyük oranda bağımsız olup büyük ölçekli problemler için gerilim ve frekans kontrolü ayrı olarak incelenmelidir. Aktif güç kontrolü frekansla, reaktif güç kontrolü ise gerilimle ilişkilendirilir [21]. Bu bölümde incelenecek yük frekans kontrolü, güç sisteminin performansı ve elektrik arzının kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Enterkonnekte güç sistemi çok sayıda kontrol alanına bölünmüş olup, her kontrol alanı kendi bölgesindeki yük ihtiyacını ve buna ek olarak diğer alanlarla arasındaki çizelgelendirilmiş değişimi karşılaması gerekir. Her bir alanın birbirine uyumlu generatör gruplarından oluştuğu ve generatörlerin salınım denklemlerine göre frekans sapmalarının eş olduğu kabul edilir [22]. Her alanda, sistem frekansında meydana gelen değişimlerin kontrol edilmesi ve bağlantı hatlarındaki yüklenmelerin çizelgelendirilmiş değerler içinde kalacak şekilde generatörlerin aktif güç çıkışlarının ayarlanması YFK veya OÜK olarak adlandırılır [23].

Güç sisteminde frekansın nominal değer çevresinde sabit kalması istenmektedir. Sistem frekansında önemli bir düşme, asenkron motorlarda ve transformatörlerde yüksek mıknatıslanma akımının oluşmasına yol açmaktadır. Frekansın zamanlama amaçlı yaygın kullanımı, frekansın integraliyle orantılı senkron zamanın doğru bakımını gerektirmektedir. Bu nedenle YFK'nde sadece frekansın değil, aynı zamanda integralinin de ayarlanması gerekir [4].

Sistem frekansı aktif güç dengesine bağlı olduğundan, yük talebindeki değişim sistem frekansına da yansiyacaktır. Elektrik enerjisi talebi gün içinde sürekli değişeceğinden, güç sistemindeki generatör çıkışlarının da talebe uygun olarak ayarlanması gerekmektedir. Her üretim birimindeki devir sayısı regülatörleri birinci kontrol hareketini sağlamakta, kontrol merkezi ise ek kontrol görevini üstlenerek yükü üretim birimleri arasında uygun olarak dağıtmaktadır. Yalıtılmış üretim biriminin yerel bir yükü beslediği Şekil (2.1)'de hız ayarının temelleri gösterilmektedir. Sistemde meydana gelen bir yük değişimi doğrudan generatörün elektriksel moment çıkışına yansır. Mekanik ve elektriksel moment arasında oluşam bu eşitsizlik sonucu hareket denkleminde belirlenen hız değişimlerine yol açar.



**Şekil 2.1:** Generatörün yalıtılmış yükü beslemesi

$T_m$  : Mekanik moment  
 $T_e$  : Elektriksel moment  
 $P_m$  : Mekanik güç  
 $P_e$  : Elektriksel güç  
 $P_L$  : Yük

Güç sistemindeki yük talebinin gün içinde sürekli değişeceğini göz önüne aldığımızda OÜK'nin ilk amacı generatör çıkışlarının talebi karşılayacak şekilde ayarlanarak frekansın sürekli durumda nominal değere getirilmesidir [4]. Yük frekans kontrolünün yapılması için öncelikle sistem modelinin elde edilerek, yükteki değişimlerin frekansa olan etkileri araştırılmalıdır.

## 2.1. Sistem Modeli

Güç sistemi generatör, yük, tahrik makinesi, kazan ve devir sayısı regülatörü modellerinden oluştuğundan OÜK için öncelikli olarak bu elemanların blok



diyagramları elde edilerek tek alanlı bir güç sistemi modeli çıkarılacaktır. Çok alanlı bir güç sisteminde ise ilk hız kontrolü paralel birimler arasında hızda azalma özelliğine sahip devir sayısı regülatörlerinin kullanılması ile yapılmaktadır. Hem regülatörlerin hız düşüşü, hem de yükün frekansa duyarlı karakteristiği nedeniyle yük talebinde gün içinde meydana gelen değişimler sürekli durum frekansının nominalden farklı bir değer almasına yol açar. Sistem frekansının tekrar 50 Hz değerine ulaşması amacıyla ikincil kontrol eklenerek yük ve üretim dengeye getirilmelidir.

### 2.1.1. Generatör modeli

Generatörler, genellikle elektromekanik indüksiyon kullanarak, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren cihazdır. Generatörün modelini elde etmek için sürekli hal değerlerindeki sapmalarla ilgilenilir. Çalışma boyunca kullanılan tüm semboller için sürekli hal değerleri alt simge olarak “0”, nominal değerlerden sapmalar ise “Δ” işareti ile gösterilmiştir.

Öncelikle, bir makineli sistem modelinde sürekli hal hızını  $\omega_0$ , faz açısını  $\delta_0$  alalım. Elektriksel ve mekanik bozucular nedeniyle moment dengesinin bozulması makinenin yavaşlamasına veya hızlanmasına yol açacaktır. Faz açısı sapması  $\Delta\delta$ ,  $\omega_0$  hızıyla dönen referans eksenini ile  $\alpha$  açısal ivmesi etkisindeki makine arasındaki faz farkına eşittir. Eğer makina hızlanıyorsa, açısal hız (2.1) ile olarak ifade edileceğinden faz açısındaki ve açısal hızdaki sapma (2.2) ve (2.3) eşikliklerle gösterilir.

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (2.1)$$

$$\Delta\delta = \int (\omega_0 + \alpha t) dt - \int \omega_0 dt = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (2.2)$$

$$\Delta\omega = \alpha t = \frac{d}{dt} (\Delta\delta) \quad (2.3)$$

Makinenin temel bağıntılarından açısal hız ve faz açısındaki sapmaların hızlanma momenti ile ilişkisi (2.4) ifadesindeki gibidir.

$$T_{\text{net}} = I\alpha = I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) = I \frac{d^2}{dt^2}(\Delta\delta) \quad (2.4)$$

Transfer fonksiyonu tanımlayabilmek için açısal hız ve mekanik momentteki sapmaları, mekanik ve elektriksel güçle ilişkilendirmek gerekir. Net hızlanma gücü (2.5)'te verilen elektriksel ve mekanik güçler arasındaki farka eşittir. Ayrıca net güç, sürekli hal ve sapma değerlerinin toplamı olarak (2.6) şeklinde yazılabilir.

$$P_{\text{net}} = P_{\text{mek}} - P_{\text{elk}} \quad (2.5)$$

$$P_{\text{net}} = P_{\text{net0}} + \Delta P_{\text{net}} \quad (2.6)$$

Ayrıca, (2.5) eşitliğindeki güç dengesi sürekli halde ve sapma değerleri için ayrı ayrı yazılabilir.

$$P_{\text{net0}} = P_{\text{mek0}} - P_{\text{elk0}} \quad (2.7)$$

$$\Delta P_{\text{net}} = \Delta P_{\text{mek}} - \Delta P_{\text{elk}} \quad (2.8)$$

Net hızlanma gücünü, elektriksel ve mekanik güçlerin sürekli hal değeri ve değişimleri cinsinden (2.9)'daki gibi ifade edebilir. Net moment için de benzer şekilde (2.10)'daki gibi tanımlanır.

$$P_{\text{net}} = (P_{\text{mek0}} - P_{\text{elk0}}) + (\Delta P_{\text{mek}} - \Delta P_{\text{elk}}) \quad (2.9)$$

$$T_{\text{net}} = (T_{\text{mek0}} - T_{\text{elk0}}) + (\Delta T_{\text{mek}} - \Delta T_{\text{elk}}) \quad (2.10)$$

Güç, moment ve açısal momentum arasındaki ilişki temel ilişki (2.11)'de verilmiştir. Buna göre (2.1) ve (2.3) eşitliklerinden yararlanarak net gücü (2.12) ile ifade edilebilir.

$$P_{\text{net}} = \omega T_{\text{net}} = M\alpha \quad (2.11)$$

$$P_{\text{net}} = (\omega_0 + \Delta\omega)(T_{\text{net0}} + \Delta T_{\text{net}}) \quad (2.12)$$

Net güç ifadesine (2.7) ve (2.8) ifadelerini yerleştirdiğimizde sürekli hal değeri ve nominal değerden saplamalar cinsinden (2.13) eşitliği elde edilir.

$$(P_{\text{mek0}} - P_{\text{elk0}}) + (\Delta P_{\text{mek}} - \Delta P_{\text{elk}}) \quad (2.13)$$

$$= (\omega_0 + \Delta\omega)[(T_{mek0} - T_{elk0}) + (\Delta T_{mek} - \Delta T_{elk})]$$

Sürekli halde, kayıpları ihmal ettiğimiz durumda mekanik ve elektriksel güç ve momentler arasında eşitlik söz konusudur [24].

$$P_{mek0} = P_{elk0} \quad (2.14)$$

$$T_{mek0} = T_{elk0} \quad (2.15)$$

Ayrıca (2.13) ifadesindeki  $\Delta\omega$ ,  $\Delta T_{mek}$  ve  $\Delta T_{elk}$  çarpanlarından oluşan ikinci derece terimleri ihmal edilebileceğinden mekanik ve elektriksel güç farkında nominal değerden sapma (2.16) ifadesiyle tanımlanabilir [25].

$$\Delta P_{mek} - \Delta P_{elk} = \omega_0(\Delta T_{mek} - \Delta T_{elk}) \quad (2.16)$$

Net momentin hız değişimiyle ilişkisi sürekli haldeki mekanik ve elektriksel moment eşitliğinden yararlanarak (2.17) eşitliği elde edilir.

$$\Delta T_{mek} - \Delta T_{elk} = I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) \quad (2.17)$$

Son iki eşitlikten yararlanılarak güç farkı ile açısal momentum arasındaki bağıntı (2.18)'de çıkarıldıktan sonra bu eşitliğin Laplace dönüşümü (2.19)'daki gibi ifade edilir.

$$\Delta P_{mek} - \Delta P_{elk} = \omega_0 I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) = M \frac{d}{dt}(\Delta\omega) \quad (2.18)$$

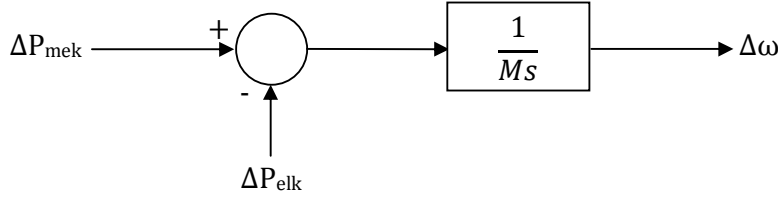
$$\Delta P_{mek} - \Delta P_{elk} = Ms\Delta\omega \quad (2.19)$$

Laplace dönüşüm ifadesinde çıkış  $\Delta\omega$ , girişler ise  $\Delta P_{mek}$  ve  $\Delta P_{elk}$  olarak yazıldığında güç ve açısal hız arasındaki transfer fonksiyonunu (2.20)'deki gibi bulunur.

$$\Delta\omega = \frac{1}{Ms}(\Delta P_{mek} - \Delta P_{elk}) \quad (2.20)$$

Generatör modeli blok diyagram olarak gösterilişi Şekil (2.2)'de verilmiştir. Bu blok diyagramındaki mekanik güç vana veya kapak durumunun fonksiyonu olup frekanstan bağımsızdır [21]. Güç sistemini oluşturan diğer elemanlarda sürekli hal

değerleri ve nominal değerdeki sapmalar ayrıntılı olarak incelenmeyecek olup transfer fonksiyonlarını veya blok diyagramı şeklinde ifade edilecektir.



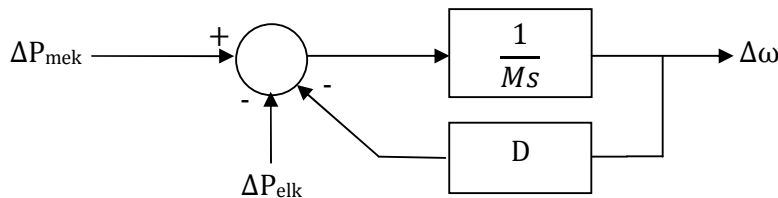
**Şekil 2.2:** Elektriksel ve mekanik güç ile açısal hız arasındaki transfer fonksiyonu

### 2.1.2. Yük modeli

Enerji sistemlerindeki yükler birbirlerinden farklı karakteristiklere sahip elektriksel cihazlardır. Bu yüklerden akkor lambalar, ısıtma alanlarda kullanılanlar ve birim güç faktöründe çalışan manyetik yükler dirençsel yük olup frekanstan bağımsızdır. Fan ve pompalar gibi motor yüklerinde ise elektriksel güç frekansa bağlı olarak değişmektedir [4]. Motor yükleri, enerji sistemindeki yüklerin büyük çoğunluğunu oluşturduğundan frekans değişiminin sistemden çekilen net yüke etkisinin modellenmesi gerekir [24]. Yükün frekansa bağlı karakteristiği aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta P_{elk} = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (2.21)$$

Bu ifadedeki  $\Delta P_L$  frekanstan bağımsız yükteki değişim,  $D\Delta\omega$  ise frekansa bağlı yük değişimidir.  $D$ , sönüm sabiti olup frekanstaki %1 değişim için yükteki % cinsinden değişime karşı gelmektedir. Yük sönümünü de dikkate aldığımızda elde edilen sistemin blok diyagramı Şekil (2.3)'te gösterilmiştir.



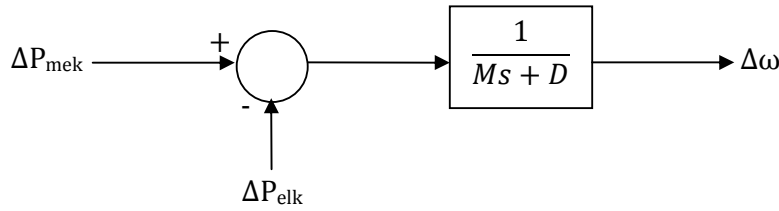
**Şekil 2.3:** Yük sönüm etkisinde güç ile açısal hız arasındaki blok diyagramı

Şekil 2.3'teki blok diyagramdan çıkış ve giriş arasındaki denklemi (2.22) eşitliğinde verilmiştir.

$$\Delta\omega = (\Delta P_{mek} - \Delta P_{elk} - D\Delta\omega) \frac{1}{Ms} \quad (2.22)$$

Açısal hızdaki tüm değişimleri eşitliğin sol tarafında yazıp denklemi yeniden düzenlendiğinde yükün frekansa duyarlılığını gösteren transfer fonksiyonunu (2.23) denklemi ve Şekil 2.4'teki gibi elde edilir..

$$\Delta\omega = (\Delta P_m - \Delta P_L) \frac{1}{Ms + D} \quad (2.23)$$



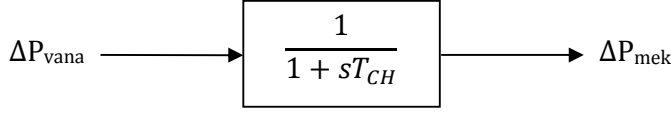
**Şekil 2.4:** Frekansa duyarlı yükte güç ile açısal hız arasındaki blok diyagram

Talep edilen yükte ani bir artış meydana geldiğinde, tahrik makinesinin mekanik çıkışı yük farkını karşılayacağından türbin dönüşü yavaşlayacak ve generatör frekansı düşecektir. Yükün frekansa duyarlılığının sonucu olarak talep edilen yük de belli oranda azalacağından tekrar yük dengesi sağlanmış olacaktır. Fakat kaliteli elektrik enerjisi için frekansın belli sınırlar dahilinde olması gerektiğinden frekans kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır.

### 2.1.3. Tahrik makinesi modeli

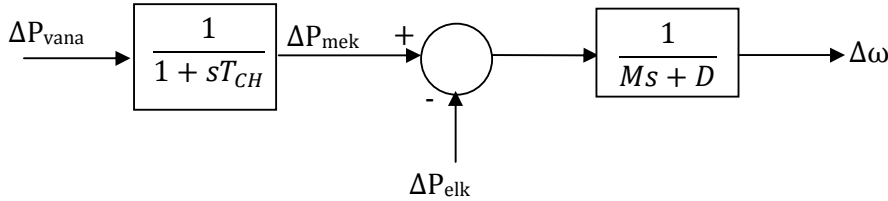
Generatörü süren tahrik makinesi buhar türbini, gaz türbini veya su türbini olabilir. Tahrik makinası modeli için buhar türbinlerinde buhar girişi ve kazan kontrol sistemi karakteristiği, su türbini için ise savak karakteristiği hesaba katılmalıdır [25]. Bu yüksek lisans çalışmasında iki buhar türbini ve bir gaz türbininden oluşan üç alanlı güç sistemi modellendiğinden su türbinlerinden bahsedilmeyecektir. Model kurulumunda öncelikle ara ısıtıcısız basit tahrik makinası tanıtılacak, daha sonra ara ısıtıcılı seri bağlı buhar santralinin modeli oluşturulacaktır.

Türbinin doldurma zaman sabiti  $T_{CH}$ , vana pozisyonunun nominale göre birim değer cinsinden değişimi  $\Delta P_{vana}$  ile gösterilen ara ısıtıcısız türbin modeli Şekil 2.5'te verilmiştir. Bu model buhar emisyonunu kontrol eden vana konumunun türbinin mekanik güç çıkışına bağıntısından oluşur.



**Şekil 2.5:** Ara ısıtıcısız tahrik makinası modeli

Tek üretim birimi için ara ısıtıcısız türbin, generatör ve yük modelinden oluşan, açısal hız değişimini vana konumundaki değişime bağlayan blok diyagram Şekil 2.6'daki gibi elde edilir.



**Şekil 2.6:** Ara ısıtıcısız tahrik makinesi, generatör ve yük modeli

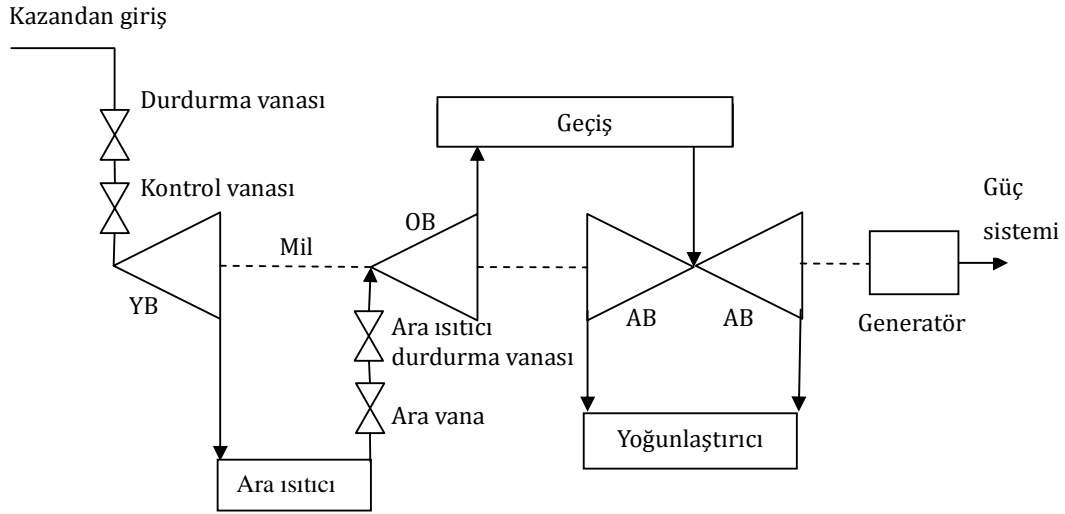
Buhar türbini yüksek basınç ve yüksek sıcaklıktaki buharda depolanan enerjiyi mekanik enerjiye çevirir. Bu enerji de daha sonra generatör tarafından elektrik enerjisine dönüştürülür. Buharı sağlayan ısı kaynağı kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtlar yakılan kazan veya nükleer reaktör olabilir.

Buhar türbinleri birimin boyutlarına ve buhar koşullarına bağlı olarak farklı ayarlarda üretilebilirler. Normalde seri bağlı iki veya daha çok türbin bölümünden oluşurlar. Her türbin bölümü kepçe olarak adlandırılan rotora bağlanmış hareketli kanatlar ve sabit vanalardan meydana gelmiştir. Sabit vanalar buharın yüksek hızlara ulaştığı geçitleri oluştururlar. Bu yüksek hızlı buharın kinetik enerjisi kepçeler yardımıyla mil momentine dönüştürülür [21].

Çok bölümlü bir türbin seri veya çapraz bağlı olabilir. Seri bağlı türbinde, tek generatör ile tüm bölümler aynı mil üzerindedir. Çapraz bağlı türbin ise her biri

generatöre bağlı iki milden oluşur. Bunlar bir veya daha fazla türbin bölümü ile tahrik edilebilir, fakat tek bir birim olarak tasarlanır ve işletilir. Çapraz bağlı buhar santrallerinde üretim kapasitesi ve verim daha fazladır. Fakat yüksek maliyeti nedeniyle günümüzde çoğunlukla seri bağlı birimler kullanılmaktadır [2].

Fosil yakıtlı birimler seri bağlı veya çapraz bağlı olarak tasarlanabilirler [1]. Seri bağlı birimler 3600 dev/dak hızla çalışırlar. Şekil 2.7’de tek ara ısıtıcılı seri bağlı buhar santrali görülmektedir.



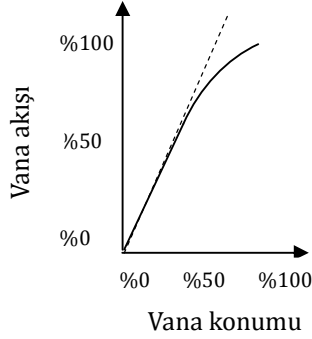
**Şekil 2.7:** Tek ara ısıtıcılı seri bağlı buhar santrali

Türbin yapısına bağlı olarak, fosil yakıtlı birimler yüksek basınçlı (YB), orta basınçlı (OB) ve düşük basınçlı (AB) ara ısıtmalı ve ara ısıtmasız türbin bölümlerinden oluşabilir. Ara ısıtmalı türbinde verim daha yüksek olup YB bölümünden çıkan buhar, OB bölümüne dönmeden önce kazana yollanarak ara ısıtıcıdan geçirilir.

OB bölümü ve ara ısıtıcı bulunmayan bazı birimlerse ise buhar doğrudan AB bölümüne geçer. Türbinden atılan buhar atmosfer basıncının altında bir basınca sahiptir, ve çevrimi tekrarlamak için kazana dönmeden önce yoğunlaştırıcıdan geçirilir.

Fosil yakıtlı birimler için büyük buhar türbinleri ana giriş kapama vanaları, kontrol vanaları, ara ısıtıcı kapama vanaları ve ara vanalar olmak üzere dört çeşit vana ile donatılmıştır. Normalde bu vanalardan en az iki tanesi paralel bağlanır. Kapama

vanaları sadece acil kapama durumları içindir, frekans-yük kontrolü için kullanılmazlar. Devir sayısı regülatörünün olduğu ana giriş kontrol vanası normal çalışma koşullarında türbindeki buhar akışını düzenler. Ara vanalar ve kontrol vanaları yükteki ani değişimlere cevap verirler. Kontrol vanaları genellikle tıkaç tipte olup bu vanaların karakteristikleri Şekil 2.8’de görüldüğü gibi doğrusal olmadığından türbin blok diyagramında bulunmalıdır.



**Şekil 2.8:** Tıkaç tipi vana karakteristiği

Ara ısıtıcılı seri bağlı türbin modelinde buhar kontrol vanası ve giriş borusundan geçerek YB kısmına girer. Önemli miktardaki buhar, buhar kazanı ve yüksek basınç bölümüne giriş borusunda depolanır. YB’den çıkan buhar sırasıyla ara ısıtıcı, ara ısıtıcı kesme vanası ve giriş borusundan geçerek OB bölümüne ulaşır. Geçit borusu yardımıyla OB bölümünden atılan buhar AB bölümüne geçer. Durdurma vanaları ise buhar akışını durdurmak için tasarlandıklarından, sistem incelenmesi sırasında modellenmeyecektir [21].

Kontrol vanaları normal işletme koşullarında aktif güç kontrolü için türbindeki buhar akışını ayarlar. Kontrol vanası açıldığında buhar akışının buna cevabı buhar kutusu ve YB bölümüne giriş borusu nedeniyle  $T_{CH}$  doldurma zaman sabitine bağlıdır. Genellikle 0.2 ile 0.3 saniye arasında değişen bu sabit bu çalışmada kullanılan modelde 0.3 saniye olarak alınmıştır.

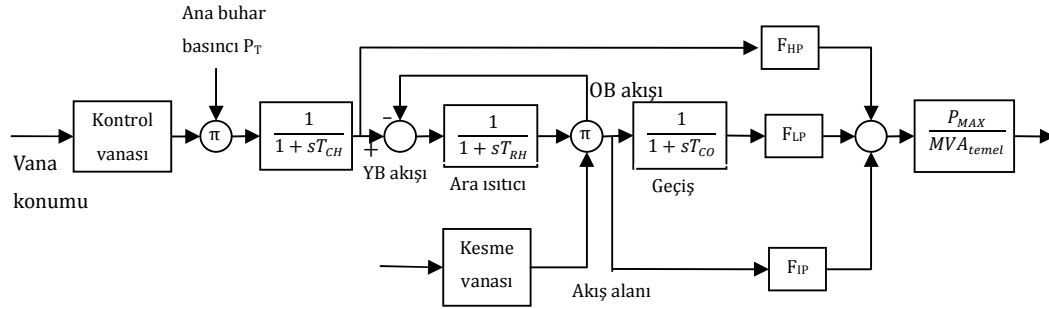
Ara vana, aşırı hızlanma durumunda türbin mekanik gücünün hızlı kontrolü için kullanılmasında etkilidir. Toplam türbin gücünün yaklaşık %70’ine karşı gelen AB ve OB bölümlerindeki buhar akışı ara vanalar ile kontrol edilir. Bu bölümlerdeki buhar akışı yalnızca ara ısıtıcı hacmindeki basıncın ayarlanmasıyla değişir. Ara ısıtıcıda fazla miktarda buhar bulunduğundan ara ısıtıcı zaman sabiti  $T_{RH}$  5 ile 10 saniye



arasında değerler almakta olup bu çalışmada 10 saniye olarak belirlenmiştir. AB bölümüne olan buhar akışı ise geçit borusu nedeniyle 0.5 saniye seçilen  $T_{CO}$  zaman sabiti etkisinde modellenmektedir.

Şekil 2.9’da ara ısıtıcılı seri bağlı türbinin blok diyagramı gösterilmiştir. Bu modelde giriş buhar kutusu, ara ısıtıcı ve kontrol vanaları ve tutucu vanalarının doğrusal olmayan özellikleri dikkate alınmıştır. Ara ısıtıcının gösterimi buhar kutusunun ve AB geçit borusundan farklı olması, ara ısıtıcı basıncının hesaplanmasına yöneliktir. Türbin parametreleri ve değişkenleri için uygun birim değer sistemine dikkat edilmelidir. Temel güç, anma ana buhar basıncında kontrol vanaları tamamen açık durumda iken maksimum türbin gücüne eşit olarak alınmaktadır. Ayrıca farklı türbin bölümlerinde güç sürtünmelerinin toplamı (2.25) ifadesinde bire eşit olmalıdır.

$$F_{HP} + F_{IP} + F_{LP} = 1 \quad (2.25)$$



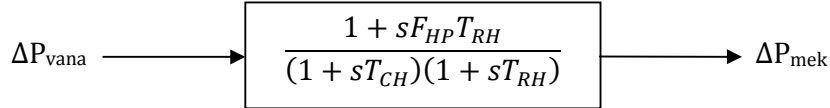
**Şekil 2.9:** Buhar türbini modeli

|              |                                              |
|--------------|----------------------------------------------|
| $T_{CH}$     | Ana giriş hacmi ve buhar kutusu zaman sabiti |
| $T_{RH}$     | Ara ısıtıcı zaman sabiti                     |
| $T_{CO}$     | Geçit borusu ve AB giriş hacmi zaman sabiti  |
| $T_m$        | Toplam türbin momenti (p.u)                  |
| $T_{mc}$     | Toplam türbin mekanik momenti (p.u)          |
| $P_{max}$    | Maksimum türbin gücü (MW)                    |
| $F_{HP}$     | YB bölümündeki toplam türbin gücü sürtünmesi |
| $F_{IP}$     | OB bölümündeki toplam türbin gücü sürtünmesi |
| $F_{LP}$     | AB bölümündeki toplam türbin gücü sürtünmesi |
| $MVA_{base}$ | Temel değer                                  |

Tek ara ısıtıcılı buhar türbini modeline ilişkin türbin gücü sürtünmeleri genel olarak  $F_{HP}=0.3$ ,  $F_{IP}=0.3$ ,  $F_{LP}=0.4$ , zaman sabitleri ise  $T_{CH}=0.3$ ,  $T_{RH}=7$ ,  $T_{CO}=0.5$  olarak seçilebilir. Ara ısıtıcı zaman sabiti  $T_{RH}$ , buhar akışının ve türbin gücünün kontrolünde karşılaşılan en önemli zaman sabiti olduğundan ara ısıtıcılı türbinlerin cevapları ara ısıtıcısız türbinlere oranla daha yavaştır [21].

Şekil 2.9'daki modelde  $T_{CO}$ 'nun  $T_{RH}$ 'a ihmal edilebilir olduğu ve kontrol vana karakteristiklerinin doğrusal olduğu kabulü yapılarak türbin momentinin kontrol vanası pozisyonunun değişimine bağlayan basitleştirilmiş transfer fonksiyonu (2.26)'daki blok diyagramı ise Şekil 2.10'daki gibi olacaktır.

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta V_{CV}} = \frac{F_{HP}}{1 + sT_{CH}} + \frac{1 - F_{HP}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} = \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} \quad (2.26)$$



**Şekil 2.10:** Ara ısıtıcılı buhar türbini transfer fonksiyonu

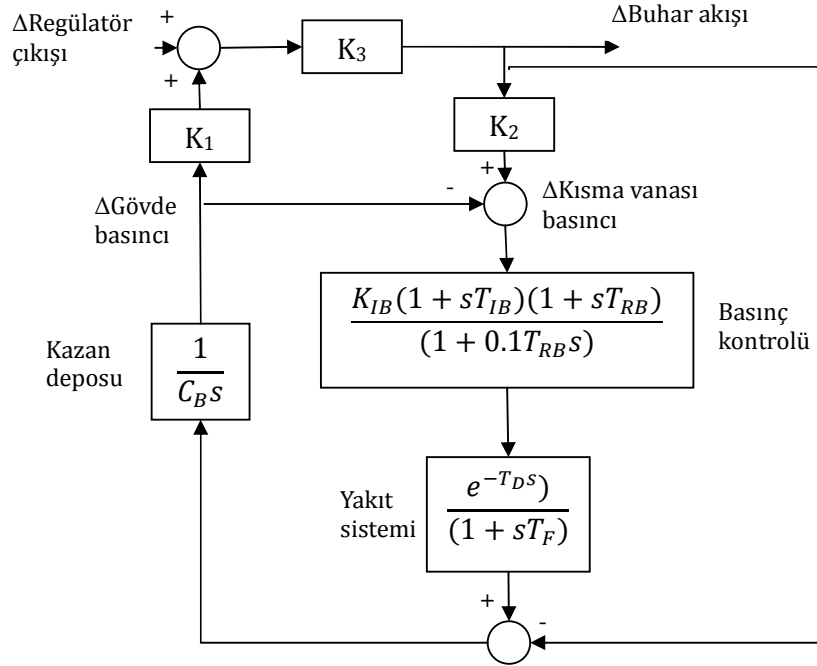
#### 2.1.4. Kazan modeli

Güç sistemindeki kazan dinamiklerini göstermek için kullanılan model Şekil 2.11'de gösterilmiş olup yakıt ve buhar akışındaki uzun süreli dinamikleri içermektedir. Bu model kömür, fuel-oil ve doğalgaz ateşlemeli enerji santrallerinde kullanılabilir [26] Geleneksel buhar birimlerinde, üretimdeki değişimler türbin kontrol vanaları ile başlatıldığından, kazan kontrolü buhar akışındaki ve basınçtaki sapmaları algılayarak gerekli kontrol hareketi hemen uygulamaktadır [16].

#### 2.1.5. Devir sayısı regülatörü modeli

Üretim birimlerinin mekanik çıkışlarının sabit olduğunu varsayıldığında, talep edilen yükte oluşabilecek herhangi bir değişim frekansa bağlı olan yükler tarafından karşılanacak, bu da sistem frekansının kabul edilen sınırlar dışında bir değere sürükleyecektir. Bu sorun makinenin hızını ölçen ve giriş vanalarının konumunu mekanik çıkış gücünü yük değişimlerini karşılayacak ve frekansı nominal değerine getirecek şekilde ayarlayan devir sayısı regülatörleri eklenmesiyle halledilebilir.

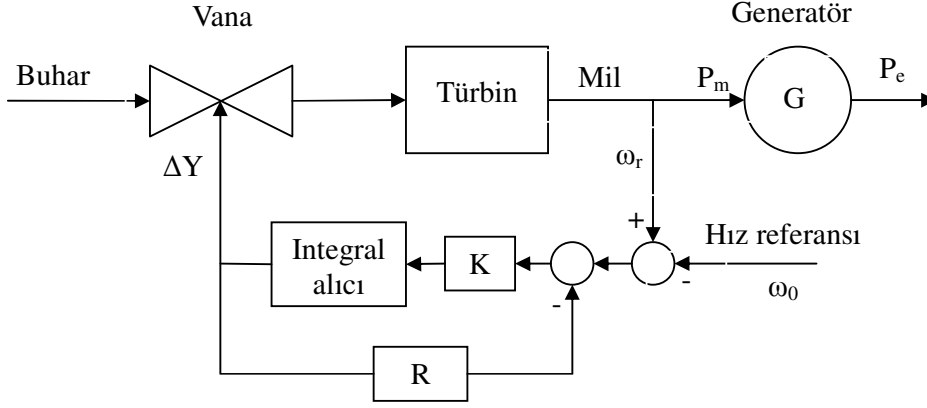
Günümüzde devir sayısı regülatörleri hız değişimini elektronik yöntemlerle ölçüp, vana konumlarındaki değişimleri elektronik, mekanik ve hidrolik araçların birleşimiyle yapmaktadır [25].



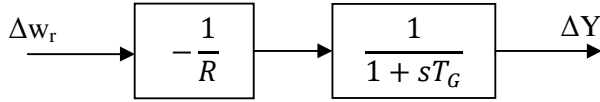
**Şekil 2.11:** Kazanın detaylı gösterimi

Entegral karakteristlikli devir sayısı regülatörleri, giriş vanasının konumunu frekansı nominal değere getirecek şekilde ayarlarlar. Aynı sisteme bağlı iki veya daha fazla birim olduğunda entegral karakteristlikli devir sayısı regülatörleri aynı hız ayarına sahip olmadıklarında tüm yük değişimini kendi üzerine almaya çalışacaklardır. Bu nedenle ikiden çok birimin paralel çalıştığı bir güç sistemde proporsiyonel devir sayısı regülatörleri kullanılmalıdır. Hızda azalma özelliğine sahip bu regülatörlerin modeli Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Şekilde  $\omega_r$  olarak ölçülen rotor hızı, referans hızı  $\omega_0$  ile karşılaştırılır. Hızdaki değişimi gösteren hata işareti kuvvetlendirildikten sonra integrali alınarak  $\Delta Y$  kontrol işareti elde edilir. Ayrıca integratöre geri besleme çevrimi eklenerek R regülasyon özelliği eklenir.  $\Delta Y$  kontrol işareti ana buhar vanalarının konumunu değiştirerek buhar veya su akışını düzenleyerek türbinin mekanik çıkış gücünü kontrol eder.

Proporsiyonel özelliğe sahip devir sayısı regülatörünün blok diyagramı indirgenmesiyle Şekil 2.13’te verilen kazancı  $-1/R$  olan proporsiyonel kontrolör elde edilir [2]. Burada devir sayısı regülatörünün zaman sabiti  $T_G$ ,  $1/KR$  olarak alınmış olup, güç sistemlerinin modellemelerinde çoğunlukla bu model kullanılmaktadır.



**Şekil 2.12:** Proporsiyonel karakteristikli devir sayısı regülatörü



**Şekil 2.13:** Proporsiyonel karakteristikli devir sayısı regülatör blok diyagramı

## 2.2. Paralel Birimler Arasında Yük Paylaşımı

Paralel birimler arasında yük paylaşımı anlatılmadan önce proporsiyonel devir sayısı regülatörlerindeki hız regülasyon yüzdesinden bahsedilmelidir. Frekanstaki değişimin çıkış gücündeki değişime oranı regülasyon olarak tanımlanıp (2.27) eşitliği ile gösterilmiştir.

$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (2.27)$$

Düşü genellikle yüzde olarak tanımlanıp yüksüz durumda sürekli durum hızı ile tam yükteki hızın farkının nominal hıza oranı ile verilir. Bu çalışmada ilk alandaki devir sayısı regülatörü için seçilen %2.4 hız regülasyonu, vana konumunda %100'lük değişimin frekansta %2.4'lük değişime karşılık geleceğini belirtmektedir.

$$\%R = \frac{\omega_{NL} - \omega_{FL}}{\omega_0} \quad (2.28)$$

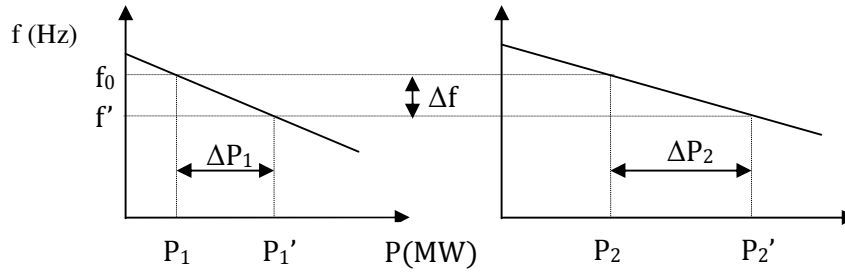
Birden fazla proporsiyonel özellikli devir sayısı regülatörü güç sistemine bağlandığında yük değişimini paylaşacakları tek bir ortak frekans olacaktır. Şekil

2.14'te iki üretim biriminden oluşan bir sistemin nominal frekansa  $f_0$ , başlangıçtaki aktif güçleri ise  $P_1$  ve  $P_2$  olarak kabul edilsin. Yük talebinde  $\Delta P_L$  kadar bir artış olduğunda devir sayısı regülatörünün çıkışları da yeni çalışma frekansı  $f'$  olana kadar arttırılır. (2.29) ve (2.30) eşitliklerinden yararlanarak elde edilen (2.31) ifadesinde yük artışını her birimin üzerine alma oranının hız düşü karakteristیکlerine bağlı olduğu görülür. Yük frekans kontrolünde, sürekli durum frekansının nominal değerde olması istenmektedir. Proporsiyonel özellikli devir sayısı regülatörlerinin kullanılmasıyla elde edilen frekansın, yük artışı olması halinde nominalden düşük bir değerde dengeye ulaştığına dikkat edilmelidir. Bu nedenle otomatik üretim kontrolünde ek kontrolörlere ihtiyaç vardır.

$$\Delta P_1 = P'_1 - P_1 = \frac{\Delta f}{R_1} \quad (2.29)$$

$$\Delta P_2 = P'_2 - P_2 = \frac{\Delta f}{R_2} \quad (2.30)$$

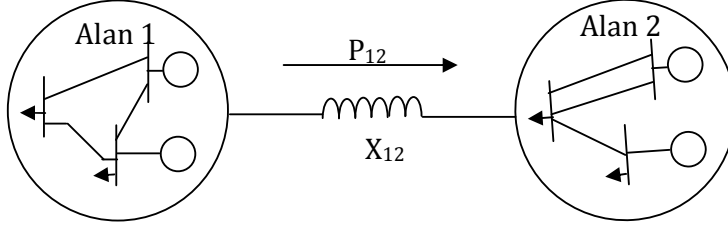
$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.31)$$



**Şekil 2.14:** Paralel birimler arasında yük paylaşımı

### 2.3. Enterkonnekte Güç Sisteminde OÜK

Şekil 2.15'te iki alandan oluşan ve  $X_T$  hat reaktansı ile birbirlerine bağlı enterkonnekte güç sistemi görülmektedir. Her alan eşdeğer üretim birimleri ile ifade edilerek frekanstaki değişim elde edilecektir.



**Şekil 2.15:** İki alanlı güç sistemi

Şekil 2.16'da ise bu güç sisteminin elektriksel eşdeğeri gösterilmektedir. Bağlantı hattındaki baradan bakıldığında her alan bir gerilim kaynağı ve eşdeğer reaktans ile ifade edilmiştir. Bu durumda 1. alandan 2. alana güç akışı (2.32) ifadesi ile verilir.

$$P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_T} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (2.32)$$

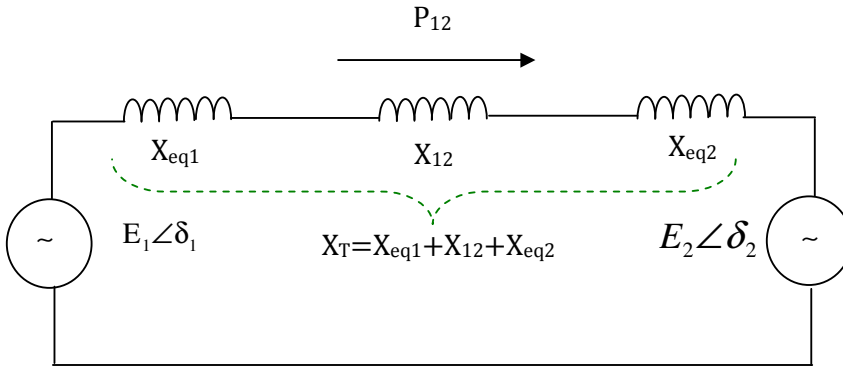
Başlangıç çalışma noktası civarında doğrusallaştırma yapılarak bağlantı hattındaki güç akışındaki değişim (2.33) olarak elde edilir.

$$\Delta P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_T} \cos(\delta_{10} - \delta_{20}) (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) \quad (2.33)$$

Burada bağlantı hattı senkronizasyon katsayısı  $T$ 'yi (2.34) olarak tanımlarsak alanlar arasındaki güç akışında değişimi (2.35) ile gösterebiliriz.

$$T = \frac{E_1 E_2}{X_T} \cos(\delta_{10} - \delta_{20}) \quad (2.34)$$

$$\Delta P_{12} = T(\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) = T \Delta \delta_{12} = T(\Delta \omega_1 - \Delta \omega_2) \quad (2.35)$$



**Şekil 2.16:** İki alanlı sistemin elektriksel eşdeğeri

Birincil kontrol dahil olarak elde edilecek iki alanlı güç sistemi blok diyagramı Şekil 2.17’de çizilmiştir. Blok diyagramda önceki bölümde elde edilen generatör, yük, türbin ve devir sayısı regülatörlerinin transfer fonksiyonları kullanılmıştır. Eşdeğer eylemsizlik  $M$  ve yük sönüm katsayısı  $D$ , hız düşüsü  $R$  değerlerinin alanlara göre farklılık göstereceği açıktır. Şekilde her alana ilişkin açısal frekanstaki değişimin integrali alınarak farklı hesaplanır. Bu değerler bağlantı hattı senkronizasyon katsayısıyla çarpımından alanlar arası güç akışındaki değişim elde edilir.  $\Delta P_{12}$  nin pozitif olması 1. alandan 2. alana güç transferinin arttığını gösterirken, negatif olması tersi yönde güç akışını simgeler. Bu nedenle  $\Delta P_{12}$  nin geri beslemesinde iki alan için zıt işaretler kullanılır.

Her alanın frekans cevapları geçici halde farklı olmasına karşın sürekli hal değerleri iki alan için de aynıdır.  $\Delta P_L$  yük değişiminde oluşan frekans sapması (2.36) ifadesiyle gösterilir.

$$\Delta f = \Delta \omega_1 = \Delta \omega_2 = \frac{\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} D_1 + D_2} \quad (2.36)$$

Her alandaki mekanik güç değişimleri frekanstaki değişimle doğru, hız regülasyon yüzdeleri ile ters orantılı olup (2.37) ve (2.38)’de belirtilmiştir.

$$\Delta P_{m1} = \frac{\Delta f}{R_1} \quad (2.37)$$

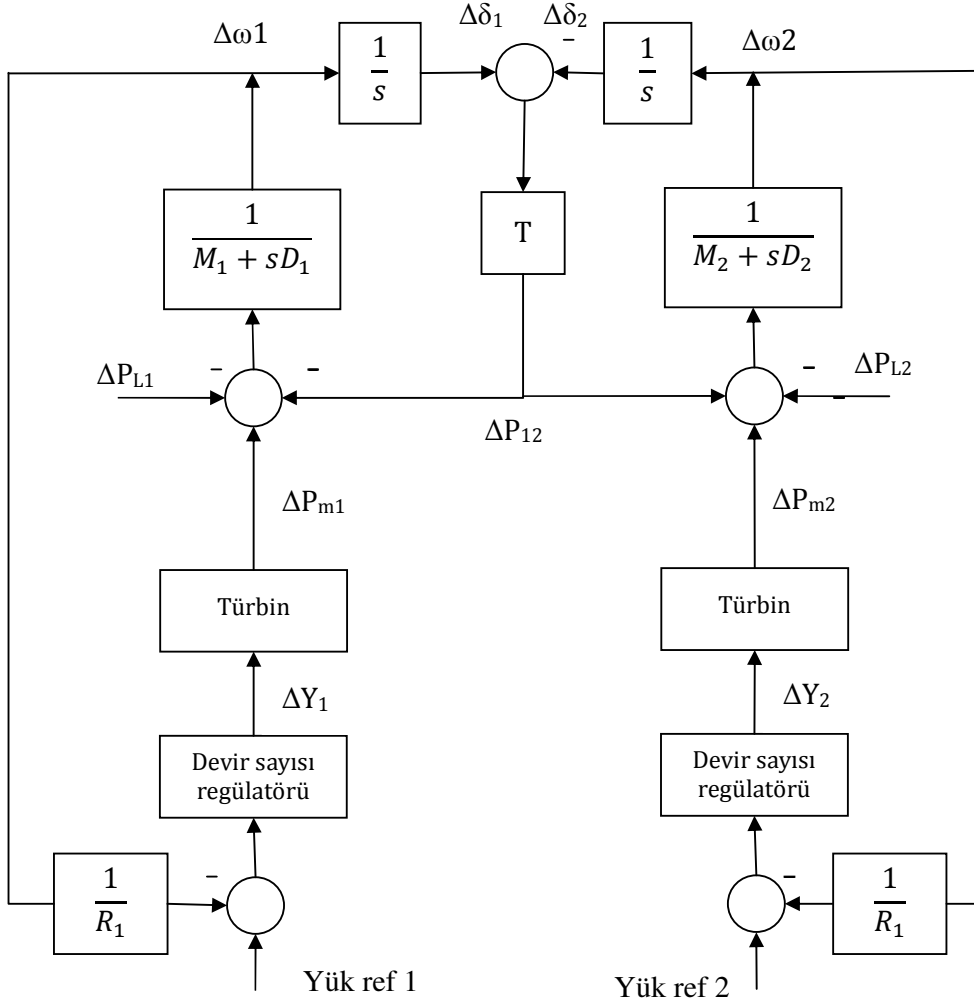
$$\Delta P_{m2} = \frac{\Delta f}{R_2} \quad (2.38)$$

Sadece bir alandaki yük talebinin değişmesi her iki alanda frekansın azalmasına ve bağlantı hattında güç akışına neden olacaktır. Sadece ilk alanda  $\Delta P_{L1}$  yük değişimi olması durumundaki, bağlantı hattındaki güç değişimi (2.39)’a eşit olacaktır.

$$\Delta P_{12} = \frac{\Delta P_{L1} \beta_2}{\beta_1 + \beta_2} \quad (2.39)$$

Bu ifadede  $\beta_1$  ve  $\beta_2$  alanların frekans cevap karakteristikleri olup (2.40) ifadesindeki yük sönüm katsayısı ve hız düşüsü cinsinden tanımlanır.

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{R} + D} \quad (2.40)$$



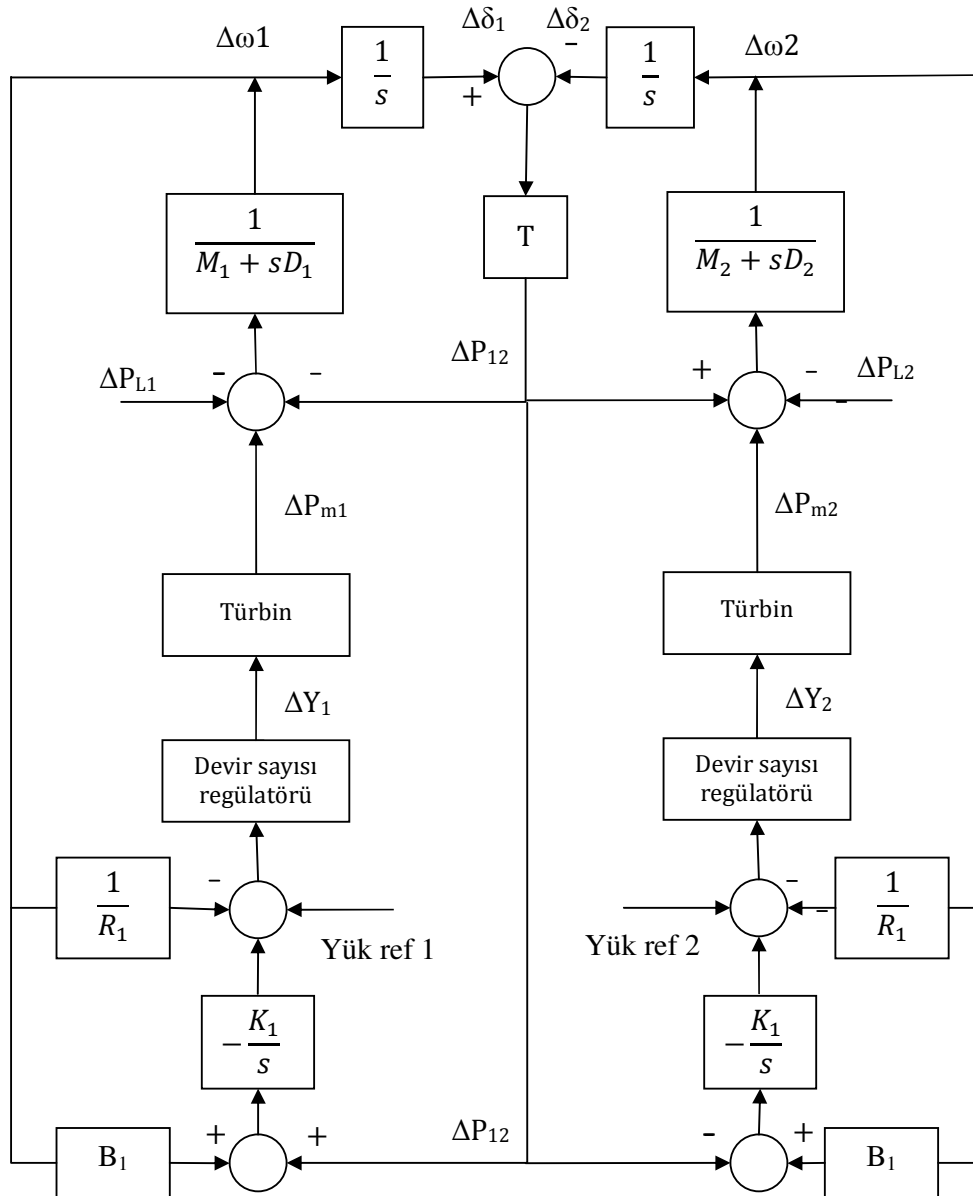
**Şekil 2.17:** İki alanlı güç sisteminin blok diyagramı (ilk hız kontrolü)

## 2.4. Ek Kontrol

Güç sistemindeki yük talebi gün içinde sürekli değişmektedir. Proporsiyonel özellikli devir sayısı regülatörlerindeki ilk kontrol hareketi sonucu aktif güç dengesi sağlanmasına karşın sürekli durum frekansı nominalden farklı değerde olacaktır. Bu nedenle her alana ikincil kontrol eklenerek frekansın tekrar nominal değerine dönmesi ve bağlantı hatlarındaki güç değişiminin çizelgelendirilmiş değerler içinde kalması sağlanmalıdır.



Her alana eklenen ek kontrol sadece bu alandaki değişimler için etki edecektir. İki alanlı bir güç sisteminde 1. alanda bir güç değişimi varsa yalnızca bu alana ek kontrol konulmalıdır. Fakat gerçek bir sistemde her alandaki yük talebi sürekli değişeceğinden her alanda ek kontrolün yapılması gereklidir.



**Şekil 2.18:** Ek kontrol ile iki alanlı güç sisteminin blok diyagramı

İki alanlı bir güç sisteminde kontrol işareti olarak (2.41) ve (2.42)'de verilen bağlantı hattındaki güç değişimi ve yönelim faktörü ile frekans sapmasının çarpımının

kullanılmasının istenen amaçları sağladığı görülür. Bu kontrol işareti alan kontrol hatası (AKH veya ACE) olarak adlandırılır.

$$ACE_1 = \Delta P_{12} + B_1 \Delta f \quad (2.40)$$

$$ACE_2 = \Delta P_{21} + B_2 \Delta f \quad (2.41)$$

Burada yönelim faktörleri  $B_1$  ve  $B_2$  nin seçimi için çeşitli bilimsel çalışmalar yapılmakla birlikte genel olarak alanlara ilişkin karma frekans cevap karakteristiklerine eşit seçilmesinin uygun olacağı kabul edilir [2].

Şekil 2.18’de iki alanlı güç sistemine ek kontrol dahil edilmiş blok diyagram bulunmaktadır. Buradaki integral kontrolör sürekli durumda ACE’yi sıfır değerine getireceğinden sürekli durumda frekansın nominal değere gelmesini ve bağlantı hatlarındaki güç akışlarının düzenlenmesini sağlar. Bu çalışmada ek kontrolör olarak katsayıları GA ile hesaplanan PI ve PID kontrolörler kullanılacaktır.

### 3. EKONOMİK DAĞITIM

Ekonomik dağıtım (ED) problemi elektrik enerjisinin toplam üretim maliyeti en düşük olacak şekilde santraller arasında paylaştırılmasını temel alır. OÜK’de sistem yükünde değişim meydana geldiğinde öncelikle frekansın ve alanlar arası bağlantı hatlarındaki güç akışları kontrol edilmelidir. OÜK’nin ikinci amacı ise bir kaç dakikalık aralıklarla ED yaparak her üretim biriminin en ekonomik yüklenmesini sağlamaktır.

Şekil 3.1’de verilen en basit ED modelinde tüm üretim birimlerinin ortak baraya bağlandığı ve iletim kayıplarının olmadığı varsayımı yapılmıştır. Güç sistemine bağlı santrallerin  $F_i(P_i)$  yakıt maliyet fonksiyonları bilindiği kabul edilirse, toplam maliyet her bir birimin maliyetinin toplamına eşit olup (3.1) ifadesiyle gösterilir. Sistemdeki toplam yük talebi  $P_D$  nin de  $n$  adet birimin aktif güç üretiminin toplamına eşit olması gerektiğinden ED sınırlandırılmış bir optimizasyon problemidir [24]. Amaç fonksiyonu, toplam maliyet olarak tanımlanacağından matematiksel ifadesi (3.1)’de verilmiş olup problemin (3.2)’deki kısıtlamayı sağlaması gerekmektedir.

$$f_T = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_n(P_n) = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (3.1)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D \quad (3.2)$$

$f_T$  : Elektriğin toplam maliyeti

$n$  : Santral sayısı

$P_i$  : i. santralin aktif güç üretimi

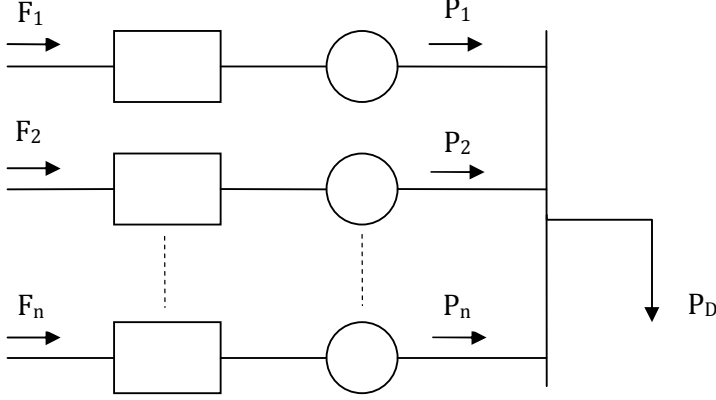
$F_i$  : i. santralin yakıt maliyet fonksiyonu

$P_D$  : Toplam yük talebi

Sınırlandırılmış optimizasyon problemi olan ED, Lagrange fonksiyonu gibi ileri matematiksel yöntemlerle çözülebilir. Bu problemin çözümüne genel yaklaşım

sınırlandırmaları Lagrange çarpanları kullanarak amaç fonksiyona (3.3) ifadesinde gibi eklemektedir.

$$\mathcal{L} = f_T + \lambda \left( P_D - \sum_{i=1}^n P_i \right) \quad (3.3)$$



**Şekil 3.1:** Ortak baraya bağlanan santraller

Lagrange fonksiyonunun her bağımsız değişkene göre kısmi türevlerini alarak (3.4) ifadesi sıfıra eşitlendiğinde sınırlandırılmamış fonksiyonun minimum noktası elde edilir [25].

$$\frac{d\mathcal{L}}{dP_i} = \frac{d\mathcal{L}}{d\lambda} = 0 \quad (3.4)$$

Denklem takımı \$n\$ adet santrallerin aktif güç çıkışı ve 1 adet Lagrange çarpanı \$\lambda\$ olmak üzere \$n+1\$ değişkene sahiptir. Lagrange fonksiyonunun aktif güçlere göre kısmi türev ifadesi (3.5) şeklinde olacaktır.

$$\frac{d\mathcal{L}}{dP_i} = \frac{df_T}{dP_i} + \lambda(0 - 1) = 0 \quad (3.5)$$

Burada elektriğin toplam maliyeti için (3.1) ifadesinin kullanılması halinde (3.5) ifadesi (3.6) şeklinde gösterilebilir.

$$\frac{df_T}{dP_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = \lambda \quad (3.6)$$

Termik birimlerden oluşan güç sistemindeki en düşük işletme maliyetinin bulunması için gerekli koşul, (3.7) ifadesinde verilen tüm santrallere ilişkin  $\lambda$  artan maliyet oranının eşit olmasıdır. Problemde ayrıca (3.8) ifadesindeki her bir birimin aktif güç çıkışlarının minimum ve maksimum güç değerleri arasında olması sınırlandırmasını ve her santralin aktif güç üretimleri toplamının yük talebine eşit olduğunu belirten (3.9) sınırlandırmasını sağlamalıdır.

$$\frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = \lambda \quad (3.7)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D \quad (3.9)$$

Burada bahsedilen en basit ekonomik dağıtım problemi yakıt maliyet eğrilerinin türevinin alınabildiği ve kayıpların olmadığı durum için analitik olarak çözülmektedir. Fakat gerçek güç sistemlerinde model daha karmaşık olacağından üretim biriminin özellikleri incelenmelidir.

### 3.1. Üretim Biriminin Özellikleri

Ekonomik dağıtımın probleminin temelinde buhar türbinlerinin ısı oran eğrisi denilen giriş-çıkış karakteristikleri bulunur. Santrale brüt giriş ton/saat cinsinden kömür veya linyit miktarı,  $m^3$ /saat cinsinden doğalgaz, L/saat cinsinden motorin, fuel oil olabilir. Katı, sıvı veya gaz tüm fosil yakıtlar için bu birimler saatte kullanılan enerji MJ/saat veya MBTU/saat şeklinde ortak olarak ifade edilmesi farklı tür santrallerin bulunduğu bir sistemin ED probleminin çözümünde kolaylık sağlar.

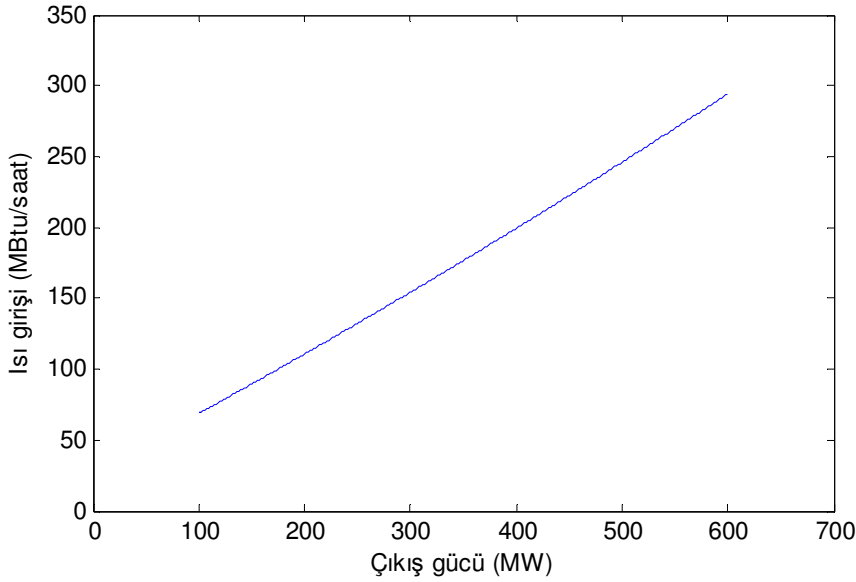
Türbin generatör grubunda üretilen elektrik enerjisinin %2 ile %6 arası kazan besleme pompaları, soğutucular ve yoğunlaştırıcılar için gerekli su pompaları gibi yardımcı güç ihtiyaçlarını karşılar. Bunun dışında kalan ve enterkonnekte şebekeye verilen elektrik enerjisi santralin net çıkışı olarak adlandırılır [21].

### 3.1.1. Isıl oran eğrisi

Giriş çıkış eğrisi için santralden elde edilen veriler doğrultusunda yaklaşık bir polinom belirlenebilir. En sık kullanılan basitleştirilmiş matematik modeli kullanıldığında dikey ekseninde saatte kullanılan ısı enerjisi  $H$ , yatay eksen ise elektriksel çıkış gücü  $P$  olmak üzere Şekil 3.2'deki gibi ikinci dereceden bir eğri elde edilir. Eğrinin ikinci dereceden sabit katsayısı, diğer katsayılarına göre oldukça küçük olduğundan ilk bakışta birinci dereceden fonksiyon izlenimi vermektedir.

Isıl oran eğrilerinin TL/saat cinsinden yakıt maliyet eğrilerine dönüştürüldüğünde, her santrale ilişkin yakıt maliyeti (3.10)'daki ikinci dereceden bir denklemle gösterilmektedir.

$$F_i(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + c_i P_i^2 \quad (3.10)$$



Şekil 3.2: Üretim biriminin giriş çıkış karakteristiği

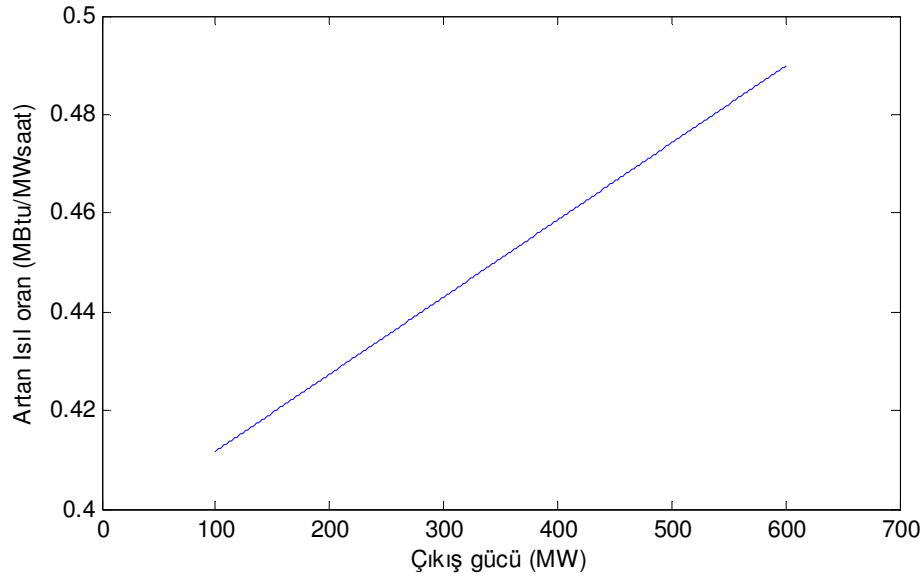
### 3.1.2. Kararlı çalışma sınırları

Herhangi bir generatörün güç çıkışı kurulu güç değerini geçemeyeceği gibi en düşük kararlı çalışma seviyesinin de altında olamaz. İzin verilen en düşük güç miktarı buhar generatörü, üretim çevrimi ve türbin parametrelerine bağlıdır. Bu güç miktarını yakıtın yanma kararlılığı ve kazanın (buhar generatörü) tasarım sınırlamaları önemli ölçüde etkiler. Kazanındaki tüpleri soğutmak için en kritik birimlerde kurulu güç kapasitesinin %30'unun altına inilmesi istenmez. Ayrıca türbindeki stator ve rotor

metal sıcaklık farkları, egzost sıcaklığı, stator ve rotor genleşmesi gibi etkenlerin de katkısı vardır [21]. Vanalarda maksimum debinin üzerine çıkılmayacağından türbinlerde aşırı yüklenme söz konusu olmaz. Buna ilişkin artan ısı oran eğrisi, giriş-çıkış karakteristiğinin türevinin alınması ile bulunur.

Dikey eksen MBtu/saat cinsinden saatteki ısı girişindeki değişimin MW cinsinden güç üretimindeki değişime oranı  $\Delta H/\Delta P$ , yatay eksen ise santralin çıkış gücü  $P$  olup Şekil 3.3'teki gibi birinci dereceden bir fonksiyondur. Artan ısı oran eğrisi, termik santralde kullanılan fosil yakıtın enerji değeri ve birim maliyetinin bilindiği takdirde ekonomik dağıtımında yaygın olarak kullanılan (3.11)'deki artan yakıt maliyet eğrisine çevrilebilmektedir. Artan yakıt maliyet eğrileri üretimde meydana gelen 1 MW artışın santrale ne kadar ek maliyet getirdiğinin hesaplanmasında kullanılır.

$$\frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = \beta_i + 2c_i P_i \quad (3.11)$$

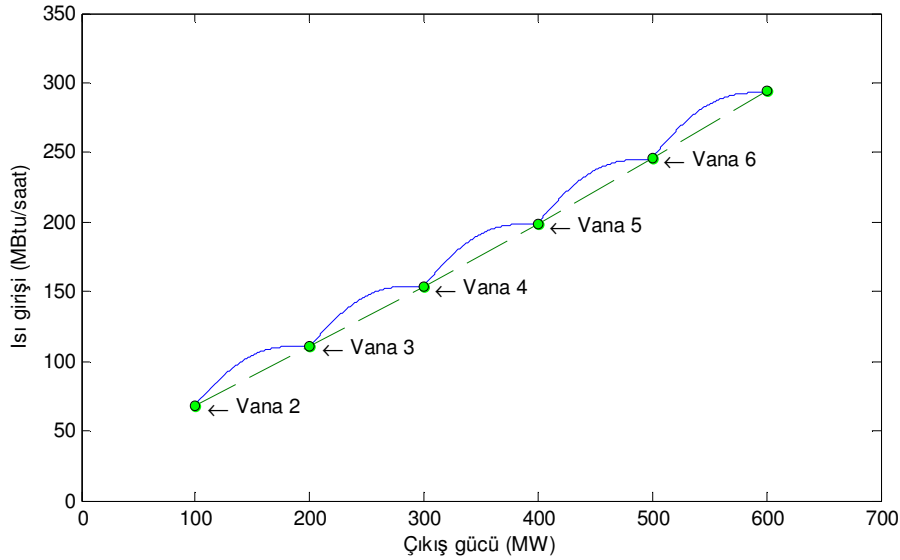


**Şekil 3.3:** Artan ısı oran eğrisi

### 3.1.3. Vana açma kapama etkisi

Isıl oran eğrileri, bilimsel yazılarda genellikle Şekil 3.2'de verilen ikinci bir dereceden polinomlar gösterilmelerine karşın gerçekte generatörün üretim sınırları arasında her zaman içbükey olmaz. Büyük buhar türbinlerinde, yük frekans kontrolü için buhar akışını düzenleyen kontrol vanaları ilk açıldığında kısılma kayıpları hızla

artarak, ısı oran değerinin ani yükselmesine neden olur. Bu da termik birimdeki giriş-çıkış eğrisinin Şekil 3.4'te görüldüğü gibi süreksizlik noktaları içermesine yol açtığından, doğrunun türev değerinden yararlanan Lagrange, Gradyan gibi geleneksel optimizasyon yöntemleriyle çözümü mümkün olmaz. Şekil 3.5'teki artan ısı oran özelliğinde vanaların devreye girme noktaları türev değerindeki ani artışlar görüleceğinden, ED dağıtım probleminin çözümünde GA'nın da dahil olduğu evrimsel algoritmaların kullanılabilir. Bu algoritmalar rastlantısal arama yöntemleri olacağından başlangıçta belirlenen amaç fonksiyonlarına göre çözüm uzayında arama yaptığından türev bilgisi gerektiren analitik ve sayısal optimizasyon yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.



**Şekil 3.4:** Vana etkisi ile giriş çıkış eğrisi

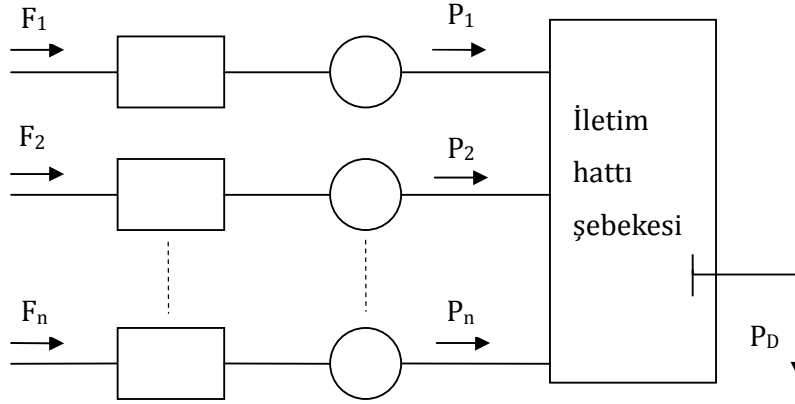
Üretim birimlerine ilişkin yakıt maliyet fonksiyonları vanaların açılma anlarındaki kayıpları da dikkate aldığımızda (3.12) ile verilen eşitlikle ifade edilir [28]. Burada a, b, c, e, f yakıt maliyet katsayıları olup elektrik enerjisinin maliyetine, santralin kaç birimden oluştuğuna ve vana karakteristiklerine göre değişmektedir. Optimizasyon probleminde kullanılacak amaç fonksiyonu olarak kullanılacak bu ifade (3.8) ve (3.9)'da verilen sınırlandırmaları sağlamalıdır.

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \times \sin(f_i(P_{i\min} - P_i))| \quad (3.12)$$



### 3.2. Kayıpların Modellenmesi

İletim hatlarının uzunluğu çok düşük ve yük yoğunluğu fazla olduğu durumlarda, iletim kayıpları ihmal edilerek tüm santrallerin artan yakıt maliyet eğrilerinin eşit değerlerinde olduğu varsayımıyla ED yapılabilir. Fakat büyük ölçekli enterkonekte şebekelerde, güç uzun mesafeler boyunca iletilip, düşük yük yoğunluğu olan bölgelere de dağıtım yapılacağından iletim kayıpları ED’de önemli bir etken olur [24]. Şekil 3.5’te iletim hattı ile eşdeğer yük barasına bağlı santraller görülmektedir. İletim şebekesi kayıpları da içerdiğinden problemin çözümünde kullanılan sınırlandırmalar değişecektir.



**Şekil 3.5:** İletim şebekesi ve santraller

İletim kayıplarının etkisinin dahil edilmesinde yaygın bir yöntem toplam iletim kayıplarının generatör güç çıkışlarının ikinci dereceden fonksiyonları olarak modellenmesi halinde kayıplar (3.13) ifadesi ile verilir.

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j \quad (3.13)$$

Kron kayıp formülü olarak adlandırılan (3.14)’teki daha genel kayıp formülü ise sabit ve doğrusal terimleri de içermektedir.

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_{0i} P_i + B_{00} \quad (3.14)$$

Bu ifadelerdeki  $B_{ij}$ ,  $B_{0i}$  ve  $B_{00}$ , kayıp katsayıları veya B katsayıları olarak tanımlanır. B katsayıları sabit olarak kabul edilmiş olup, belirli çalışma koşullarında

hesaplanması yapılmaktadır.

Kayıpların da dahil edilmesi durumunda ED problemi (3.15) ifadesindeki toplam üretim maliyetini en aza indirecek, aynı zamanda (3.16)'daki üretimin yük ile kayıpların toplamına eşitlik sınırlamasını ve (3.17)'deki her bir birimin aktif güç çıkışının minimum ile maksimum değerler arasında olmasını sağlayan eşitsizlik sınırlandırmalarını sağlamalıdır.

$$f_T = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) = \sum_{i=1}^n a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \times \sin(f_i(P_{i\min} - P_i))| \quad (3.15)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L \quad (3.16)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (3.17)$$

Sınırlandırmaları da ek terim olarak dahil edildiğinde elde edilen Lagrange fonksiyonu (3.18)'deki gibi olur.

$$\mathcal{L} = f_T + \lambda \left( P_D + P_L - \sum_{i=1}^n P_i \right) + \sum_{i=1}^n \mu_{i\max} (P_i - P_{i\max}) + \sum_{i=1}^n \mu_{i\min} (P_i - P_{i\min}) \quad (3.18)$$

Bu eşitlikteki  $\mu_{i\max}$  ve  $\mu_{i\min}$  santralin izin verilen en düşük ve en yüksek aktif güç üretiminin arasındaysa sıfır değerinde olacaktır. Bu sınırların dışına çıkıldığında aktif duruma geçecek ve amaç fonksiyonuna ceza etkisi yapacaktır.

$$\begin{aligned} \mu_{i\max} &= 0 \quad P_i < P_{i\max} \text{ ise} \\ \mu_{i\min} &= 0 \quad P_i > P_{i\min} \text{ ise} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Genel yakıt maliyet eğrileri kullanıldığında (3.18) ifadesinde belirtilen Lagrange fonksiyonun en düşük değeri tüm kısmi türevlerinin sıfıra eşit olduğu nokta olacaktır. Kron kayıp formülü ve B katsayılarının sabit olması ve değerlerinin çalışma noktası civarında hesaplanması nedeniyle bu yüksek lisans çalışmasındaki kayıplar OÜK modelinde elde edilen bağlantı hatlarındaki güç akışlarının fonksiyonu olarak kabul edilecektir. Bu sayede kayıpların generatörlerin aktif güç çıkışları yerine hat reaktansı ve iletim hatlarındaki güç akışı cinsinden daha doğru biçimde hesaplanması mümkün olacaktır.

ED probleminin çözüm yöntemlerinden en sık kullanılan Lambda iterasyon yönteminde her santralin artımsal maliyet karakteristikleri çizilerek grafiksel olarak çözmek veya bilgisayar algoritmasından yararlanılarak sonuca ulaşmak mümkündür. Birinci ve ikinci dereceden Gradyan yöntemleri, problem yapısının ve amaç fonksiyonlarındaki bağımsız değerlerin davranışlarının bilindiği optimizasyon problemleri için uygundur. Burada olası bir çözümünden başlanarak optimum çözüme ulaşılması hedeflenir [21]. Fakat tüm bu yöntemlerde yakıt maliyet eğrilerinin ikinci dereceden fonksiyon olarak kabul edilip, türev değerlerinden yararlanılmaktadır. Vana yükleme noktalarındaki süreksizlikler dahil edildiğinde ED probleminin türev bilgisine ihtiyaç duymayan ve tek bir nokta yerine noktalar kümesi ile arama yapan yöntemlerle çözümü mümkün olacaktır. Bu nedenle bu çalışmadaki ED probleminin çözümünde evrimsel algoritmaların bir alt sınıfı olan GA kullanılmıştır.



#### 4. GENETİK ALGORİTMALAR

GA, optimizasyon problemlerinin çözümünde evrime dayalı doğal seçim ve genetik ilkeleri temel alan arama tekniği olarak tanımlanır [29]. GA, evrimsel algoritmaların bir sınıfı olup, canlıların evrimini inceleyen bir bilim dalı olan evrimsel biyolojide kullanılan kalıtım, mutasyon, seçim ve çaprazlama gibi terimlerin optimizasyon problemlerine uyarlanmasıyla oluşmuştur. Evrimsel hesaplamalar üzerine yapılan ilk çalışma 1954 yılında Nils Aall Barricelli'nin günümüzde evrimsel algoritmalar olarak bilinen "Esempi Numerici di processi di evoluzione" adlı yazısıydı. Orijinal metni İtalyanca olan bu metin daha sonra İngilizceye çevrilerek evrim teorisinin bilgisayar simülasyonlarında kullanılmasına öncülük etmiştir [30]. Barricelli tarafından temelleri atılan yapay evrim stratejileri adlı optimizasyon tekniğiyle 1960'larda ve 1970'lerin başında ile Ingo Rechenberg ve Hans-Paul Schwefel karmaşık mühendislik problemlerini çözmeyi başarmıştır [31].

Evrimsel algoritmaların bir alt sınıfı olan GA'nın bilinmesi ise 1975'te Michigan Üniversitende öğretim üyesi olan John Holland tarafından yayınlanan "Doğal ve Yapay Sistemlerde Adaptasyon" adlı eser sayesinde olmuştur [32]. Evrim stratejileri ve evrimsel programlamanın tersine Holland'ın amacı belirli bir problemi çözmek değil, doğada meydana gelen adaptasyonun etkilerini araştırmak ve doğal adaptasyonu bilgisayar sistemlerine aktarmaktı [34]. 1980'lerin ortalarına kadar teoride kalan GA, Holland'ın öğrencisi olan David Goldner'ın bu yöntemi petrol boru hatlarının kontrolü ve iletimi üzerine hazırladığı doktora çalışmasındaki problemin çözümünde kullanarak algoritmanın pratikte kullanılabileceğini ispatlamış, aynı zamanda Holland'ın GA ile ilgili çalışmaları özetleyerek yaygınlaşmasına katkıda bulunmuştur [33].

GA, günümüzde bilimsel ve mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Optimizasyon, otomatik programlama, makine bilimi, elektronik devre tasarımı, bağışıklık sistemi, ekonomi, ekoloji, popülasyon genetiği, sosyal sistemler, müzik, kablosuz iletişim gibi hayatın çok farklı alanlarındaki problemin

çözümünde kullanılan GA, bilimsel kaynağı ve problem çözmedeki başarısı sayesinde son yıllarda hızla yaygınlaşmaktadır [34]. GA'nın yaygınlaşmasında etkili olan problemleri çözmedeki başarısını geleneksel yöntemlerle karşılaştırılarak daha iyi anlamak mümkündür.

Hesaba dayalı optimizasyon yöntemlerinde amaç fonksiyonunun türevinin sıfıra eşitlenmesiyle minimum veya maksimum noktalar bulunur. Türevi alınamayan fonksiyonların verilmesi halinde ise bu yöntemlerle problemin çözüm mümkün olmamaktadır. GA ise türev bilgisine ihtilaç duymağından türevi alınamayan problemlerin çözümünde kullanılabilir. Ayrıca fonksiyonun sürekli olması gerekmediğinden hem sürekli hem de ayırık değişkenlerin optimizasyonu yapılabilmektedir.

Birden çok yerel ekstremum noktasına sahip fonksiyonların geleneksel arama yöntemleri ile çözümünde başlangıçta seçilen noktaya bağlı olarak elde edilen nokta, mutlak minimum olabileceği gibi yerel ekstremum noktası da olabilir. Ayrıca problemin amaç fonksiyonuna bakarak bu noktanın yerel minimum noktası mı mutlak minimum olduğu belirlenemez. Özellikle Rastrigin fonksiyonu gibi çok sayıda yerel minimum noktasına sahip bir problemin çözümü geleneksel yöntemlerle mümkün olmaz. GA'da ise tek bir nokta yerine, popülasyon olarak adlandırılan noktalar kümesi oluşturulup, arama işlemi paralel olarak yürütülmektedir. Geniş bir alan üzerinde paralel olarak arama yapıldığından yerel ekstremum noktalarına takılma olasılığı çok düşüktür.

Karmaşık problemlerin çözümünde verilerin kodlanması, uygunluk değerinin hesaplanması gibi temel işlemler için gereken hesaplama zamanının çok fazla olması halinde tek bir bilgisayar ile bunu yapmak mümkün olmaz. Bu durumda GA için gereken veri paralel makinelerle ufak birimler halinde paylaştırılarak süreç hızlandırılabilir. GA'da her iterasyon sırasında popülasyon büyüklüğü kadar birey için problemin çözümü tekrar tekrar yapılacağından bu hesaplamaların bilgisayarlar arasında paylaştırılarak diğer optimizasyon yöntemlerinde paralel çalışmaya göre daha elverişlidir.

GA deterministik değil, rastlantısal operatörler içermektedir. Herhangi bir nedenden algoritmanın uygun bir çözüm bulamaması halinde, tekrar başlatılarak uygun bir

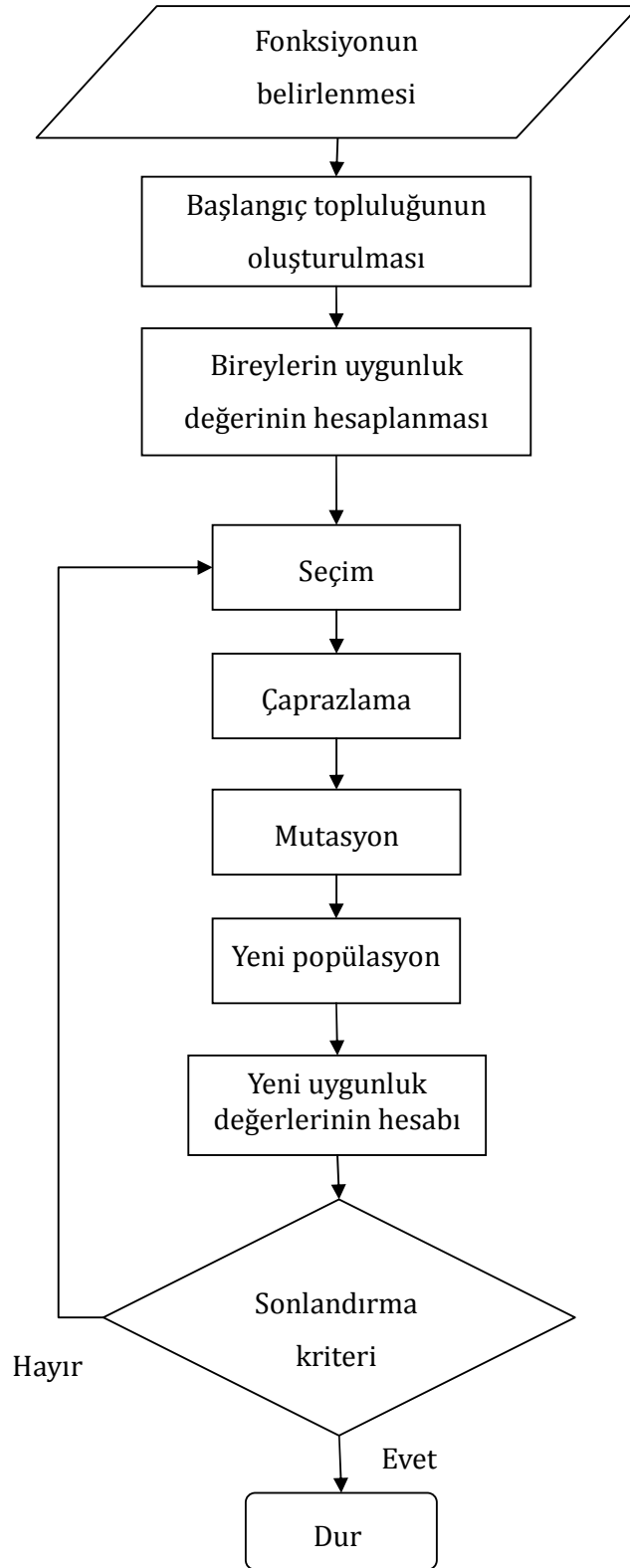
özüm aranabilir. Gerçek değerli kromozomların kullanılması durumu hariç tutulursa değişkenlerin kendisi yerine kodlanmış durumları üzerinden optimizasyon yapılır.

#### 4.1 Genetik Algoritmanın İşleyişı

En genel GA'nın akış diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir. Öncelikle problemde istenenlere göre bir matematiksel model elde edilerek amaç fonksiyonu belirlenmelidir. Daha sonra kaç tane değişkenin olduğu belirlenir ve sistem parametrelerine sayısal değerler verilir. Örneğin sistem cevabını en iyi hale getiren PI kontrolörü belirlenmesi probleminde değişken sayısı oransal (P) ve integral (I) kontrolör katsayıları olmak üzere iki tanedir. Ayrıca GA'ya ilişkin maksimum iterasyon sayısı, topluluktaki birey sayısı, çaprazlama, mutasyon oranları, elit birey sayısı gibi parametre değerleri de algoritmaya başlamadan önce belirlenmelidir.

Bundan sonra rastlantısal olarak önceden belirlenen kriterlere göre bir başlangıç popölasyonu oluşturulur. Örneğin popölasyonun 5 bireyden ve her bireyin 4 bittten oluştuğu kabul edilirse {0010, 0101, 0110, 1010, 1111} şeklinde bir çözüm grubu oluşturulabilir. Aksi belirtilmedikçe bu değerler tüm seçim uzayını kapsar. Sınırlandırılmış bir problemin çözümünde ise değişkenlerin değeri istenilen aralıklarda seçilmektedir. Ekonomik dağıtım probleminde generatör üretim sınırları belirlenerek en düşük üretim 0'lardan, en yüksek üretim ise 1'lerden oluşan bit dizisi şeklinde ifade edilir. Arama uzayının büyüklüğü istenilen çözüme ulaşmasında önemli bir etkidir. Arama uzayı sonsuz ise algoritmanın süresi uzayıp, küçük arama uzayında ise yerel ekstremum noktaları bulunabilir.

Her bireyin uygunluk değerleri hesaplandıktan sonra popölasyon içinden bağlı uygunluk değerlerine göre seçim işlemi yapılır. Seçimden sonra yeni neslin üremesi için çaprazlama ve mutasyon adlı genetik operatörler kullanılır. Çaprazlamada seçilen iki veya daha fazla bireyin genetik bilgilerinden yeni bir birey elde edilir. Mutasyon ise bireylerin genetik gösteriminde mutasyon olasılığına bağlı olarak değişime neden olur. İkili kodlama sisteminde, mutasyon tek bir bitin değerinin durumunu değiştirmesine yol açar.



**Şekil 4.1:** GA akış diyagramı



Çaprazlama ve mutasyon sonucu elde edilen bireyler yeni nesli oluşturur. Bu nesildeki bireylerin uygunluk değerleri hesaplandıktan sonra algoritmanın sonlandırma kriterinin sağlanıp sağlanmadığı test edilir. Eğer istenilen uygunluk değerine veya belirlenen maksimum nesil sayısına ulaşıldıysa döngü sonlandırılır ve en yüksek uygunluk değerli birey aynı zamanda problemin bulunabilen en iyi çözümüdür. Sonlandırma kriterleri sağlanmamışsa ise döngü en başa dönerek en uygun çözümün aranmasına devam eder.

#### **4.2. Genetik Terimler**

GA biyolojik evrim teorisini bilgisayar sistemlerine uyarladığından kullanılan terimler de genetikte yaygın kalıtsal kavramları içerir. Bu nedenle algoritmanın daha rahat anlaşılması için öncelikle bu kavramlar tanıtılacaktır.

**Popülasyon:** Belirli bir bölgede yaşayan aynı türden organizmalar topluluğuna popülasyon denir. GA'da bireylerden meydana gelen verilen optimizasyon probleminin olası çözüm kümesidir.

**Birey:** Ortak bir popülasyon içinde bulunan aynı coğrafi bölgede yaşamını sürdüren canlılardan her birine birey denir. GA'da ise popülasyon içerisindeki olası çözümlerden her biri olup kromozom olarak da adlandırılmaktadır.

**Kromozom:** Dezoksiribonükleik asit (DNA)'lerin "histon" denilen protein zincirlerinin etrafına sarılmasıyla oluşan ve canlılarda kalıtımı sağlayan genetik birimdir. Kromozomların sayısı canlı türlerine göre farklılık gösterir. Örneğin insanda 2 si eşeysel kromozom olmak üzere 46 kromozom bulunur. GA'da ise problemin çözümü için önerilen gen dizilerinden her birine denir. Kromozomlar topluluktaki bir çözümün tüm özelliklerini taşıdığından birey olarak da adlandırılır ve genellikle sayı dizileri ile gösterilirler.

**Genom:** Bir canlının kromozomlarında kayıtlı genetik şifrenin tamamını belirtir. GA'da her bireyin tek bir kromozomdan oluştuğu kabul edildiğinden, genom terimi kromozom yerine de kullanılmaktadır.

**Gen:** Kromozomlar üzerinde alt alta dizilen, bir karakterin ortaya çıkmasından sorumlu DNA kısmına denir. GA'da ise kromozomun üzerine bulunan anlamlı en küçük birim olup genellikle ikilik düzende 0 veya 1 rakamıyla gösterilir.

**Genotip :** Gen yapısı da denilen genotip, canlının kalıtsal karakterleri için taşıdığı genlerinin tamamına denir. Genotipte çekinik ve baskın genler beraber bulunabilir. GA'da ise genotip kromozomların değerini simgelemektedir.

**Fenotip:** Fiziksel özellikler, davranış gibi bir organizmanın gözlemlenebilir karakteristiklerine fenotip denir. Fenotipin ortaya çıkmasında canlının genleriyle beraber ortam şartları da önemli rol oynar. Örneğin kahverengi göz rengi olan bir insan düşünelim. İnsanda göz renginin iki farklı gen tarafından belirlendiğini ve kahverenginin baskın, yeşil ve mavinin çekinik genler olduğunu kabul edelim. Bu durumda bu kişinin dış görünüşü yani fenotipi kahverengi gözdür. Genotipi ise kahverengi-mavi, kahverengi-yeşil, kahverengi-kahverengi olabilir. GA'da fenotip kromozom gösteriminin karar değişkenlerinin uzayına aktarılmasıyla elde edilir. Kromozomlarda bulunan her dizinin kodu çözülerek kararlılık değişkeninin vektör değerine ve arama uzayındaki boyuta bağlı olarak satır vektörü şeklinde ifade edilir [35]. Kromozomlar hem genotip hem de fenotip işlevi görürler. Yani kromozomlar hem seçimin nesneleri, hem de değişime uğrayarak yeni nasıla aktarılan genetik bilginin koruyucularıdır.

**Seçim (Seçilim) :** Bir popülasyonda ortama en iyi uyum sağlayan bireylerin, diğer bireylere oranla sonraki nasıla daha çok sayıda döl vermesi sonucu türün bazı özelliklerinin yaygınlaşmasına seçilim denir. GA'da seçilim yerine genellikle seçim kavramı kullanılmakta olup, üreme için seçilecek bireylerin uygunluk değerlerine göre belirlendiği aşama olarak tanımlanır.

**Mutasyon:** Bir canlının genetik bilgisinde meydana gelen değişimler olup hücre bölünmesi sırasında genetik bilginin kopyalanması sırasında oluşan hatadan kaynaklanmaktadır. GA'da ise genetik çeşitliliğin korunması için kromozom değerinin rastlantısal olarak değiştirilmesidir.

**Uygunluk:** Belirli bir genotipteki bireyin üreme yeteneği olup, bireyin genlerinin sonraki nesildeki tüm genlerine oranı olarak belirtilir. Yüksek uygunluğa sahip genotipin nesiller sonunda yaygınlaşması ise doğal seçilim olarak bilinir. GA'da uygunluk matematiksel ifade verildiğinden uygunluk fonksiyonu denilir. Çözümün ne kadar iyi olduğunu belirleyen amaç fonksiyonunun özel bir türü olup, bir bireyin diğer bireylere oranla ne kadar uygun olduğunun belirlenmesinde kullanılır.

### 4.3. Kodlama

Bir problemin GA ile çözülmesi sırasında gerçek değerleri biyolojik terimler cinsinden ifade ederiz. Rastlantısal olarak oluşturulan topluluktaki çözümlerden her biri birey olarak adlandırılır. Kromozom da denilen bu bireyler gen dizilerinden oluşmaktadır. Bu gen dizilerinin biçimine ise kodlama denir. John Holland tarafından bulunan ilk GA'da kromozomlar ikili düzende 0 ve 1'ler şeklinde kodlanmıştı [29]. Günümüzde halen ikili düzende gösterim en yaygın kullanılan yöntem olmakla beraber genleri permütasyon kodlama, doğrudan değer kodlama ve ağaç kodlama yöntemleri de bulunmaktadır. Tüm kodlama yöntemlerinde kromozom  $p_1, p_2, \dots, p_n$  olmak üzere  $n$  adet değişkene sahipse,  $n$  elemanlı satır vektör olarak gösterilmektedir.

$$\text{kromozom} = [p_1, p_2, \dots, p_n] \quad (4.1)$$

İkili düzende kodlamada kromozomdaki her gen 0 veya 1 değerini alabilmektedir. Örneğin 2 değişkene sahip ve her geni 5 bitten oluşan bir A kromozomu  $A = [00101, 11001]$  şeklinde gösterilebilir. Permütasyon kodlama yönteminde ise 0-9 arasındaki tüm rakamlar kullanılabilir. Yukarıdaki gibi 2 değişkenli ve her geni 5 bitten oluşan A kromozomu  $A=[59253, 24763]$  olarak yazılabilir. Bu yöntem gezgin satıcı problemi veya sıralama gerektiren optimizasyon problemleri için daha uygundur. Doğrudan değer kodlanması yönteminde kromozomlar gerçek sayılar, harfler veya başka herhangi bir nesnenin dizisi biçiminde ifade edilebilir. A, B, C kromozomları  $A=[1.364 \ 0.246 \ 2.630]$ ,  $B=[agd, brc, kmo]$ ,  $C=[yukarı, sol, sağ]$  gibi gösterilebilir. Bu yöntemin kullanılması halinde bazı nesneler sayısal olarak ifade edilemeyeceğinden üreme sırasında kullanılan genetik operatörlerdeki kurallarının yeniden yazılması gereklidir. Ağaç kodlama yöntemi ise genetik programlamadaki ifadeleri ve nesneleri içerir. Programlama dilindeki komut veya fonksiyon tanımlarından oluşur. Bu yöntemdeki A kromozomu  $A=[do\_until \ step \ wall]$  şeklindedir. Bu yöntem de ağaç şeklinde kodlanabilen yapılarda kullanılmaktadır [36].

Kısaca kromozomların ikili sistemde, rakamlarla, gerçel sayılarla, harflerle veya nesnelerle gösterimi mümkündür. Michalewicz kayan nokta gösteriminin ikili düzene göre daha hassas ve kararlı sonuçlar verdiğini, daha geniş bir çözüm uzayının gösterilebildiğini uygulamalarında göstermiştir [37]. Kayan nokta gösterimi kesirlerin gösterimi için kullanılan rakam dizilerinden oluşan bir sistem olarak

tanımlanır ve bu gösterimde her kromozom vektörü çözüm vektörüyle aynı uzunlukta kayan sayılarla modellenir. Örneğin 8 rakamdan oluşan bir dizinin ondalık noktası tam ortası kabul edilirse 00123456 rakamının değeri 12.3456 şeklinde olacaktır. İkili düzendeki bit sayısını arttırarak hassaslığını yükseltmek de mümkün olmakla birlikte, bunun algoritmayı oldukça yavaşlattığı gözlenir. Bu nedenlerden dolayı bu tez çalışmasında kromozomların kodlanması sırasında kayan nokta gösterimi kullanılacaktır.

#### 4.4. Başlangıç Popülasyonu

Bireylerin nasıl kodlanacağına karar verdikten sonra, ilk adım başlangıç topluluğunu oluşturmaktır. Bunun için kromozomlardan meydana gelen bir popülasyon yaratılır. Popülasyon'un sözlükte Türkçe karşılığı nüfus olmasına karşın, bu çalışma dahilinde genetik terimi ifade ettiğinden bilimsel adları kullanımı uygun görülmüştür.

Bir popülasyondaki kromozom sayısı  $N_{pop}$  ve her kromozomdaki gen sayısı  $N_{bit}$  olarak ifade edilirse, ikili düzende kodlanmış bir popülasyon rastgele 0 ve 1'lerden meydana gelmiş  $N_{pop} \times N_{bit}$  boyutlu bir matris olarak gösterilir.

Popülasyonun büyüklüğü problemi çözecek kişinin belirlemesi gereken en önemli parametrelerden biridir. Eğer birey sayısı çok az seçilirse algoritma çabuk yakınsayacak, gerektiğinden fazla seçilmesi halinde ise hesaplamalar çok uzun sürecektir. Genetik aramada popülasyon farklılığı ve seçim baskısı gibi etkenler popülasyon büyüklüğünden etkilenmektedir [38]. Goldberg, optimizasyon problemin çözümü için en uygun popülasyon büyüklüğünü kuramsal analizlerini yapmıştır [39]. Deneysel çalışmalar neticesinde aramanın etkinliği popülasyon büyüklüğü veya diğer parametrelere değil, problemin uygunluk fonksiyonun özelliklerine bağlı olduğu sonucu çıkarılmıştır. Genellikle GA'da popülasyon büyüklüğü başlangıçta sabit bir değer olarak belirlenmesine karşın değişken popülasyon değerleri için de makaleler bulunur [40].

Bu tez çalışmasında popülasyonun, en uygun kontrolör katsayılarının belirlenmesi problemleri için 100 arasında, en düşük maliyetle elektrik enerjisinin dağıtım problemi için 20 bireyden oluştuğu kabul edilmiş ve bu değerler algoritma boyunca sabit tutulmuştur. Kontrolör katsayıları başlangıçta rastlantısal olarak belirlendiği için bu katsayıların bir bölümü için sistem cevabı kararsız olmaktadır. Bu nedenle ilk

topluluktaki birey sayısı fazla tutularak daha fazla sayıda kararlı çözüm üzerinden arama yapılması amaçlanmıştır.

#### 4.5. Seçim

Seçim, yeni neslin oluşturulması sırasında mevcut popülasyondaki bireylerden üreme için kullanılacak adayların belirlendiği aşamadır. GA'daki seçim Darwin'in evrim teorisindeki doğal seçilime karşılık gelmektedir. Doğal seçimde, ortam şartlarına en iyi uyum gösteren bireylerin hayatta kalarak genlerini yeni nesillere aktarabilme şansı daha yüksektir. Karakterler kalıtsal ve çevresel etkilerle ortaya çıkmakla beraber, yalnızca kalıtsal karakterler oğul bireylere dolayısıyla sonraki nesillere aktarılmaktadır. Dış ortama uyum sağlamakta başarısız olan bireyler ise türlerini sürdüremeyerek topluluktan elenmektedir. Bunun sonucunda başarısız bireylerin sahip olduğu kalıtsal özelliklerin yeni nesillere aktarılması önlenmiş olarak ortama daha iyi uyum gösteren karakterler yaygınlaşır. GA'da ise bireylerin bit dizilerinden oluştuğundan, kromozomların tüm özellikleri kalıtsal olarak kabul edilerek bütün özellikleri sonraki nesillere aktarılabilir.

Doğal seçimin temelinde en uygunun veya en güçlünün hayatta kalması prensibi yatmaktadır. Matematikte ise en uygunun belirlenmesi gerçek hayata göre daha kolay bir şekilde yapılabilir. Örneğin  $x$  değişkenine bağlı  $f(x)$  fonksiyonun maksimum değerinin bulunması probleminde, seçilen  $x$  değerleri için fonksiyon değeri hesaplanır. Daha büyük değere karşı gelen bir sayının uygunluk değeri de daha yüksek olacağından sonraki nesillerde arama uygunluk değeri yüksek noktalar üzerinde yoğunlaşır. Popülasyon nesiller boyunca gelişerek yaşama şansı yüksek olan daha iyi bireyler üretir. Olası çözümleri göstermek için kullanılan genetik kod rastlantısal genetik operatörler yardımıyla işlenerek yeni bireyler elde edilir.

Seçim aşamasında, algoritma yeni nesil için aile bireylerini seçer. Çevresel baskının etkisindeki popülasyondan en uygun bireylerin seçimi yapılır. En önemli seçim yöntemleri rastlantısal düzgün örnekleme, turnuva seçimi, uygunluk orantılı ve uygunluk sıralı seçim yöntemleridir.

Rastlantısal düzgün örnekleme, en basit seçim yöntemi olup uygunluk değerlerinden bağımsız olarak popülasyondaki tüm bireylerin aynı seçilme sahip olduğu yöntemidir. Popülasyon büyüklüğünün az olduğu durumlarda kullanılabilir [41]

Turnuva seçim yönteminde, bireylerden yüksek uygunluk değerine sahip olanların seçilme olasılığı daha yüksektir. Popülasyon içinden rastgele iki birey belirlenir. Bu bireylerden yüksek uygunluk değerine sahip olan seçilir.

Uygunluk orantılı seçim en sık kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde bireylerin seçilme olasılığı uygunluk fonksiyonlarının değerleriyle orantılıdır. Rulet tekerleği seçim yönteminde, bu kategoriye dahil olup, popülasyondaki tüm olası çözümlere uygunluk fonksiyonuna bağlı olarak bir uygunluk değeri atar. Bu değer her bireyin seçilme olasılığını belirtir. N adet bireyden oluşan bir toplulukta i bireyine ait seçilme olasılığı  $p_i$ , uygunluk değeri  $f_i$  olmak üzere (4.2) eşitliğiyle ifade edilir. Tüm bireylerin seçilme olasılığını bir çark üzerinde düşünersek, her adayın çarkta kapladığı yer bu bireyin seçilme olasılığına karşı gelir. Topluluktan N adet birey seçilmesi için çarkın N kere çevrilmesi gerekir.

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (4.2)$$

Uygunluk sıralı seçim yöntemleri sıra tabanlı bir işleyişe sahiptir. Popülasyon uygunluk değerlerine göre sıralanır ve doğrusal sıralama fonksiyonu her bireye sırasına bağlı olarak bir değer atar. Seçilme olasılıkları bireylerin düzeltilmiş sıra değerleri ile orantılıdır [41].

Bu yöntemlerden biri kullanılarak bireylerin seçimi yapıldıktan sonra çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile sonraki nesil için çocuk bireyler üretilir.

#### 4.6. Genetik Operatörler

Seçilen bireylerden çözüm kümesi olarak adlandırılan yeni bir nesil yaratılması sırasında çaprazlama ve mutasyon olarak iki genetik operatör kullanılır. Bu genetik operatörler, genetik çeşitliliğin korunmasını sağlar. Çaprazlama iki veya daha fazla aile bireyinin genlerinden yeni bir birey yaratırken, mutasyon tek bir bireyin özelliğini değiştirmektedir.

Üretilcek her yeni çözüm için, seçim sürecinde belirlenen bireylerden iki tanesi “ebeveyn” olarak adlandırılarak üreme için seçilir. Bu ebeveynlerden çaprazlama ve mutasyon genetik operatörleri kullanılarak “çocuk” denilen yeni çözümler elde edilir. Ebeveynleriyle çoğu özellikleri ortak olan çocuklar, önceden belirlenmiş topluluk büyüklüğü elde edilene kadar üretilmeye devam ederler. Bu süreçte yaratılan her yeni

çocuk için ebeveynlerin seçimi tekrar yapılmalıdır. Bir topluluktan elde edilen çocukların kümesi yeni nesil olarak adlandırılır ve kromozomları başlangıçta seçilen topluluktan farklılık gösterir. Bu işlem sonucunda, topluluğun ortalama uygunluk değeri artarak daha iyi bireyler elde edilir. Bu nesilde elde ettiğimiz çocuk bireyler bir sonraki neslin yaratılması sırasında ise ebeveyn olarak tanımlanarak üreme için seçilirler. Algoritma başarılı bir şekilde sonlandırılmış ise son nesildeki bireyler arasında uygunluk fonksiyonunun değeri en yüksek olan çözüm aynı zamanda problemin de istenen çözümü olacaktır.

#### 4.6.1. Çaprazlama

GA'da yeni bireylerin yaratılması için temel operatördür. Doğadaki gibi, çaprazlama sonucu üretilen birey ebeveynlerinin her ikisinin de bazı genetik özelliklerini taşımaktadır. Çaprazlama yöntemleri olarak tek veya çok noktadan çaprazlama, düzgün veya yarı düzgün çaprazlama ile kes ekle yöntemleri ile yapılabilir. Çaprazlama yöntemlerinin daha kolay anlaşılabilmesi için örnekte bireyler ikili tabanda kodlanarak verilecektir. Simülasyonda ise gerçek değerli bireylerin kullanılması durumunda ikilik sisteme göre daha iyi sonuçlar elde edilir.

##### Tek noktalı çaprazlama

Her iki aile bireyinden tek bir çaprazlama noktası seçilir. Bu noktadan sonra gelen tüm gen değerleri iki aile bireyi arasında yer değiştirerek yeni oluşturulan canlılara yani çocuklara aktarılır. İkilik kodlama sisteminde 10 bitten oluşan iki ebeveyn  $E_1$ : 1100110011,  $E_2$ : 1010101010 olarak seçilmiş olsun. Çaprazlama noktası 3. genin sonu olarak seçildiğinde, Şekil 4.2'de ebeveynler ve çaprazlama sonucu üreyen çocukların kromozomları görülmektedir.

|            |           |                    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|------------|-----------|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ebeveynler | $E_1$     | 1                  | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
|            | $E_2$     | 1                  | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
|            |           | Çaprazlama noktası |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Çocuklar   | $\zeta_1$ | 1                  | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
|            | $\zeta_2$ | 1                  | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |

**Şekil 4.2:** Tek noktadan çaprazlama

Çok noktalı çaprazlama: Her iki aile bireyinden en az iki adet çaprazlama noktası seçilir. Bu noktalar arasında kalan tüm gen değerleri aile bireyleri arasında yer değiştirilerek çocuk bireyler elde edilir. aktarılır. Yukarıdaki örnektekiyle aynı  $E_1$ ,  $E_2$  bireyleri ve 3. ve 8. genler çaprazlama noktaları olarak seçilirse yeni üreyen çocuklar Şekil 4.3'teki gibi olmaktadır.

|                      |                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----------------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ebeveynler           | $E_1$           | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
|                      | $E_2$           | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Çaprazlama noktaları |                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Çocuklar             | $\mathcal{C}_1$ | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
|                      | $\mathcal{C}_2$ | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |

**Şekil 4.3:** Çok noktadan çaprazlama

#### Düzgün ve yarı düzgün çaprazlama

Düzgün çaprazlamada aile bireyleri arasındaki genlerin değerleri karşılaştırılarak farklı olan bit değerleri belirlenir. Bu değerler sabit bir olasılıkla aile bireyleri arasında değiştirilerek yeni birey elde edilir. Yarı düzgün mutasyon da bireyler arasındaki farklı bitlerin tam yarısı değiştirilir. Şekil 4.4'te görüleceği üzere,  $E_1$ ,  $E_2$  bireylerine ek olarak aynı sayıda bitten oluşan rastgele bir çaprazlama maskesi seçilir. Maske bitinin 0 olduğu durumda  $E_1$ , 1 olduğu durumda ise  $E_2$  ebeveyninin bit değeri alınarak çocuk bireyler oluşturulur.

|            |                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ebeveynler | $E_1$           | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
|            | $E_2$           | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Maske      | M               | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Çocuklar   | $\mathcal{C}_1$ | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
|            | $\mathcal{C}_2$ | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |

**Şekil 4.4.** Düzgün çaprazlama

#### Kes ve ekle (Cut and splice)

Kesme operatörü bir sayı dizisini, dizinin uzunluğuna bağlı olarak artan bir olasılıkla iki parçaya ayırır. Ekleme operatörü ise bir dizinin başını diğer dizinin sonuna ekler.



Goldberg, Deb ve Kargupta tarafından bulunan düzensiz GA’da yaygın çaprazlama operatörü yerine kes ve ekle operatörü kullanılmaktadır. Bu yöntemde sabit kromozom uzunluğu olmadığından arama yöntemi standart GA’dan farklılık gösterir [39].  $E_1$  bireyinde 3.,  $E_2$  bireyinde 5. gen kesim noktaları olarak belirlendiğinde elde edilen çocukların bit uzunlukları Şekil 4.5’te gösterildiği gibi aynı olmaz.

|            |           |                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |
|------------|-----------|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|
|            |           | ← Kesim noktası |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |
| Ebeveynler | $E_1$     | 1               | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |     |
|            | $E_2$     | 1               | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |     |
|            |           | Kesim noktası → |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |
| Çocuklar   | $\zeta_1$ | 1               | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |   |   |     |
|            | $\zeta_2$ | 1               | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 1 |

**Şekil 4.5:** Kes ve ekle operatörü

Yapılan çalışmalara göre popülasyon büyüklüğü fazla seçildiğinde genetik çeşitlilik olacağından tek ve çok noktalı çaprazlamalar kullanılması, az sayıda bireyden oluşan popülasyonlar için ise kesitsel bir arama için düzgün çaprazlama seçilmesi uygun olacaktır.

#### 4.6.2. Mutasyon operatörü

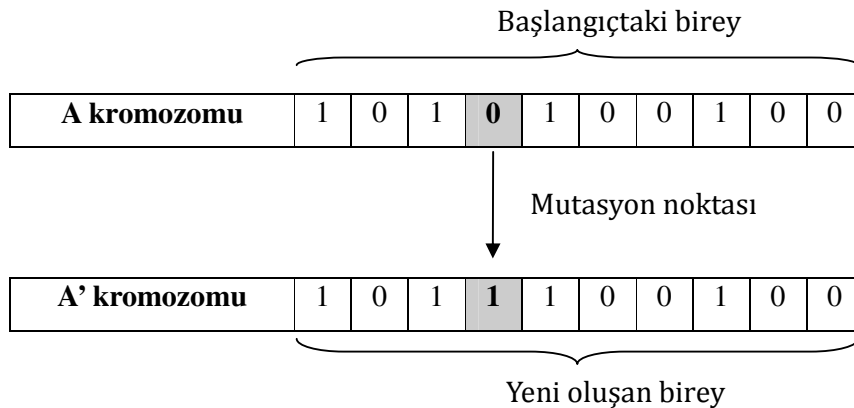
Mutasyon, doğal evrimde genin bir alelini yeni bir genetik yapı oluşturacak şekilde değişmesine yol açan rastlantısal bir işleyiş olarak tanımlanmaktadır. Genetik algoritmada ise kromozomdaki bir genin değerini değiştiren operatördür.

Mutasyon başlangıç topluluğunda bulunmayan özellikleri ortaya çıkarır, algoritmanın yerel minimum veya maksimum noktasına yakınsamasını önleyerek arama uzayının genişletir. Mutasyon olasılığının ideal değeri arama uzayının büyüklüğü ve kromozomdaki bit sayısına bağlı olarak değişmektedir.

Mutasyon olasılığına iterasyon sayısına, uygunluk değerine göre farklı değerler atamak mümkündür. Düşük uygunluk değerine sahip bireylere mutasyon olasılığını arttırmak iyi bireylerin özelliklerini kaybetmesine neden olmadan arama uzayını genişletmektedir. Sabit mutasyon olasılığı genellikle  $10^{-2}$  ile  $10^{-3}$  aralığında seçilerek bir topluluktaki bireylerin genlerine rastlantısal olarak uygulanır [35]. Mutasyon sayısını artırılması algoritmanın mevcut arama uzayı dışına çıkmasına veya en uygun çözüme yakınsamasını geciktirebilir [42].

Çaprazlama olmadığını varsayarsak, sadece mutasyona bağlı olarak meydana gelen rastlantısal değişimler ilk nesildeki en iyi bireyin uygunluk değerinin gelişmesinde yetersiz kalır. Bireylerin genlerindeki mutasyon sonucu oluşan olumlu değişimler çaprazlama olmadığından en iyi bireyin genleriyle birleşerek sonraki nesillere aktarılamadığından optimal çözüme yaklaşılamaz. Bu nedenle mutasyon, arka plan operatörü olarak düşünülür ve çaprazlamaya oranla düşük bir olasılığa sahiptir [35]. İkilik tabanda mutasyon etkisi Şekil 4.6’da gösterilmektedir. Buna göre 10 bitten oluşan A kromozomunun 4. geni mutasyona uğradığında bitin değeri 0’dan 1’e dönüşerek yeni A’ kromozomu elde edilmiştir. Mutasyon noktasına ve amaç fonksiyonuna bağlı olarak yeni elde edilen bireyin uygunluk değeri eskisine göre daha iyi veya daha kötü olabilir. İkilik taban dışındaki kodlama sistemlerinde mutasyon, gen değerinin değiştirilmesi veya izin verilen sınırlar içinde yeni değer atanması ile yapılabilir. Gerçek değerle kodlanmış genetik algoritmada yüksek mutasyon oranları, ikilik sisteme göre yakınsama karakteristiğine olumsuz etkiye bulunmadan arama uzayı genişletmektedir [43].

Popülasyonun kayan nokta gösterimini ile ifade edildiği evrimsel algoritmaların çoğu uygulamalarında mutasyon operatörü olarak Gaussian mutasyon kullanılır. Gaussian mutasyon, ortalaması 0, standart sapması  $\sigma$  olan Gauss dağılım fonksiyonundan rastgele bir değeri bireylerin her genine ekleyerek yeni çocuk bireyler elde edilmesini sağlar. Fonksiyon 0 değerinde yoğunlaştığından bireylerin uygunluk değerlerini çok fazla değiştirmeden genetik çeşitliliği sağlar.



**Şekil 4.6.** İkilik tabanda mutasyon operatörü

#### 4.7. Yeni Nesil

Genetik operatörler kullanılarak elde edilen yeni bireylerin daha sonraki nesillerde kullanılması için eski popülasyondaki bireyler ile yer değiştirmesi gereklidir. Nesilsel yaklaşımda popülasyon büyüklüğü kadar çocuk üretilir, ve tüm çocuklar sonraki nesilde ebeveyn olarak alınır. Bu durum en iyi uygunluk değerine sahip kromozomların kaybedilme veya genlerinin bir kısmının değişmesi riskini de beraberinde getirir. Elitist strateji olarak tanımlanan yöntem ile toplulukta en iyi uygunluk değerine sahip bireyler, çaprazlama ve mutasyon sonucu elde edilen çocuk bireylerden uygunluk değeri en kötü olanlarla yer değiştirir. Böylece problem çözümünde o ana kadar bulunan en iyi çözümler kaybedilmemiş olur, bu bireylere tekrar üreme şansı tanınarak algoritmanın daha iyi çözüme yakınsaması amaçlanır. Sonraki aşama ise yeni neslin, yani yeni üreyen çocuk bireyler ve bir önceki nesildeki en iyi bireylerden oluşan topluluğun, sonlandırma kriterlerini sağlayıp sağlamadığının kontrol edilmesidir.

#### 4.8. Sonlandırma

GA stokastik arama yöntemi olduğundan yakınsama kriterlerini önceden belirlemek zordur. Topluluğun uygunluk değeri, daha iyi bir birey bulunamadığında nesiller boyunca sabit kalabileceğinden geleneksel sonlandırma kriterlerini belirsizlik unsuru içeren bu tür algoritmaların sonlandırılmasında kullanmak sorun yaratabilir [1].

GA'nın da içinde bulunduğu evrimsel algoritmalar, ne zaman ve nerede sonlanması gerektiğine karar veremezler. Bu nedenle kullanıcının maksimum nesil sayısı gibi bir sonlandırma kriterini önceden belirlemesi gerekmektedir. Araştırmalarda en sık olarak kullanılan sonlandırma kriterleri maksimum nesil sayısı, mutlak minimum veya maksimuma olma kriterini sağlayan çözüm bulunması, en iyi bireyde gelişme olmadan ulaşılan maksimum ardışık nesil sayısı gibi durumlar olabilir. Gerçek dünyadaki problemlerde bunların haricinde belirlenen hesaplama zamanı veya bu iş için ayrılan bütçeye ulaşılması halinde de algoritma sonlandırılabilir.

Verilen optimizasyon probleminin en etkili çözümü için nesil sayısının sabit olması gerektiği hipotezi üzerine çalışmalar neticesinde uygunluk fonksiyonunun topluluğun büyüklüğünden faydalandığı durumlarda problemin en iyi çözümü için sabit bir nesil sayısının var olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu tez çalışmasında, frekans cevabı elde

edilirken bulunan kontrolör parametrelerinin arasında etkileşim olduğundan, en iyi sistem cevabı için sabit bir nesil sayısı kullanılacak, algoritma önceden belirlenmiş nesil sayısına ulaşıldığında sonlandırılacaktır.

## 5. ÜÇ ALANLI GÜÇ SİSTEMİNDE OÜK

Otomatik üretim kontrolü (OÜK) probleminde, enterkonnekte şebekeye bağlı birimlerin paralel çalışmasında önemli bir yere sahiptir. Bu tez çalışmasında, iki buhar türbini ve bir gaz türbininden oluşan ve iletim hatlarıyla birbirlerine bağlı üç alanlı bir güç sisteminin modellenmesi yapılmıştır. Talep edilen yükteki değişimler sonucunda, yükün frekansa bağlı özelliği nedeniyle frekansta da değişim görülecek, generatör çıkışları ayarlanarak yük eşitliği sağlanmasıyla frekans tekrar anma değerine getirilecektir. OÜK'nin öncelikli amacı frekanstaki sürekli hal hatasının giderilmesi ve geçici hal hatasının iyileştirilmesidir.

### 5.1. Güç Sisteminin Simülink Modeli

Kontrolör, devir sayısı regülatörü, ara ısıtıcılı türbin, kazan, generatör ve yükten oluşan üç alanlı enterkonnekte bir güç sisteminin MATLAB Simulink programında benzetimi yapılmış olup Şekil 5.1'de görülmektedir. Sistemde kullanılan verilere Ek 1'den ulaşılabilir. Modelin A4 sayfaya sığdırılabilmesi amacıyla kontrolör, kazan ve türbin modelleri alt sistem olarak tasarlanmıştır. Tasarımda kullanılan PI ve PID kontrolörlerinin modeli bölümün devamında verilecek olup, diğer kullanılan alt sistemlere ilişkin ayrıntılı modeller ise ikinci bölümdeki Otomatik Üretim Kontrolü başlığı altında bulunmaktadır.

Şekil 5.1'de her birime ilişkin frekans yönelim faktörü ve alanlar arası güç akışının değerleri toplamı alan kontrol hatasını oluşturmakta olup kontrol girişlerini oluşturmaktadır. Kontrolör çıkışı, ilk hız kontrolünü sağlayan hız regülasyon oranları ile toplanarak devir sayısı regülatörlerine iletilir. Buhar veya gaz türbini ve buna ilişkin kazan modellerinin çıkışında ise mekanik güçteki değişim elde edilir. Sisteme uygulanan rampa veya basamak şeklindeki yük talebinin ve iletim hatlarındaki güç akışı ile mekanik güç değişimin farklı alınarak, dönme eylemsizliği ve yükün frekansa bağlı davranışını içeren hız ve güç arasındaki transfer fonksiyonu yardımıyla frekanstaki sapma elde edilmektedir.



OÜK'nin öncelikli amacı frekansı belirlenen anma değerine ayarlamaktır. Modelde tüm alanlara uygulanacak %1'lik bozucu yük etkisinde her alanın  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$ ,  $\Delta f_3$  frekans değişimleri ile bağlantı hatlarındaki  $\Delta P_{12}$ ,  $\Delta P_{23}$ ,  $\Delta P_{31}$  güç akışının geçici durumdaki değişimleri elde edilecektir. Bu değerlerin zamana göre değişimlerinin elde edilmesi, ve geçici hal cevabının iyileştirilmesi amacıyla algoritmada kullanılacak değişkenler olacağından MATLAB çalışma alanına aktarılmıştır. Kullanılacak PI ve PID kontrolörlere ilişkin en uygun katsayılarını bulmak amacıyla GA kullanılmıştır.

GA rastlantısal bir arama yöntemi olup, bir topluluk içerisinde bulunan çözümlerin diğerlerin göre ne kadar iyi olduğunu uygunluk fonksiyonu ile belirlenir. Üç alanlı güç sisteminin benzetim modelinde frekansı anma değerine ayarlamak ve geçici hal cevabının iyileştirilmesi istendiğinden optimizasyon probleminde kullanılacak uygunluk fonksiyonu frekans hatasını ve alanlar arası güç akışını içermelidir. Hatanın tek bir anda değil, modelin çalıştırıldığı süre boyunca en düşük değeri bulunması istendiğinden uygunluk fonksiyonu her alandaki frekanstaki sapma ve bölgeler arasındaki güç akışındaki değişiminin integrali olarak (5.1)'deki ifade ile tanımlanır. Frekans değişiminin sürekli halde sıfır, geçici halde en az, alanlar arası güç akışının ise çizelgelendirilmiş değerde olması gerektiğinden uygunluk fonksiyonunun en düşük değerine karşılık gelen kontrolör katsayıları sistem en uygun katsayıları olacaktır.

$$f(t) = \int_{t=0}^{ts} (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta f_3| + |\Delta P_{12}| + |\Delta P_{23}| + |\Delta P_{31}|) dt \quad (5.1)$$

Kontrolör katsayılarının optimizasyonu için GA kullanılmış olup uygunluk fonksiyonu olarak frekanstaki mutlak hatanın integrali (IE), hatanın karesinin integrali (ISE) , mutlak hatanın zamanla çarpımının integrali (ITAE), ISE ve ITAE toplamı, hatanın karesinin zamanla çarpımının integrali (ITSE), mutlak hatanın ve karesinin zamanla çarpımının integrali (ITAE+ITSE) gibi farklı başarımlar ölçütlerine göre uygunluk fonksiyonu değerleri hesaplanacaktır. Her bir başarımlar ölçütünde bulunan en iyi uygunluk değeri, frekans cevabını ve alanlar arası güç akışlarını en iyi duruma getiren PI ve PID kontrolörler katsayılarını verecektir.

Güç sisteminde yükteki değişimler sonucu (5.2)'de tanımlanan yükün frekansa bağlı karakteristiği nedeniyle frekansta da değişim görülür.

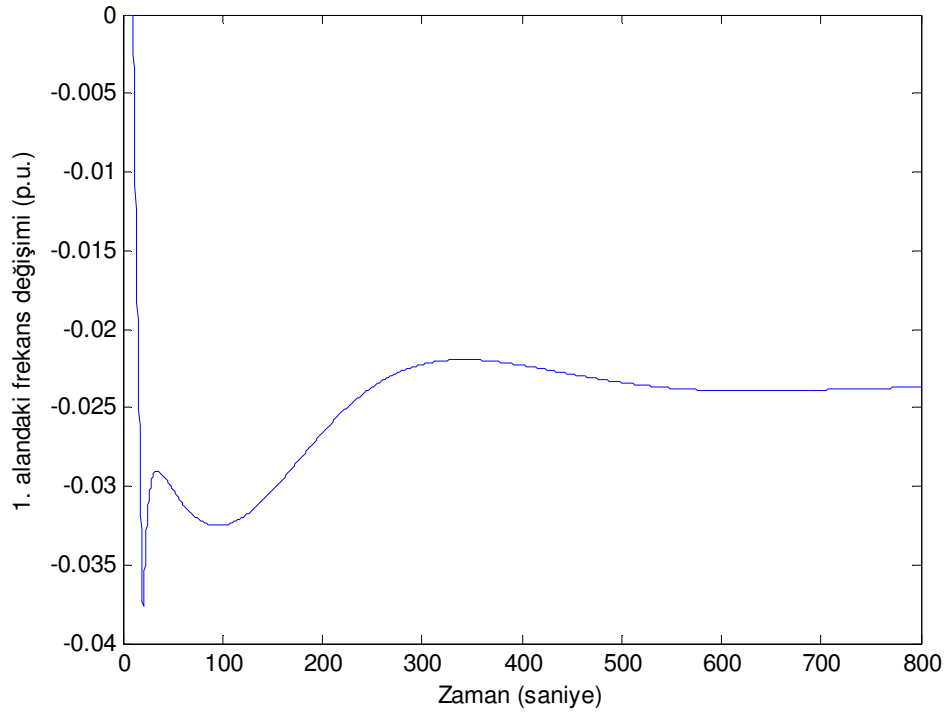
$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega_r \quad (5.2)$$

Burada D, frekanstaki %1’lik değişimin yükte ne kadar değişime yol açtığını gösteren yük sönüm sabitidir. Herhangi bir hız kontrolü olmadığı durumda talep edilen yükte bir artış olduğunda tahrik makinasının mekanik çıkışı aradaki farkı karşılar. Bunun sonucunda türbinin dönüşünü yavaşlayarak generatör frekansının düşmesine yol açacaktır. Benzetilen modeldeki sistemin yük sönüm sabiti 1/120 olarak belirlenmiştir.

Üç alanlı bir güç sisteminde, paralel çalışan birimler arasında yük artarken hızda azalma özelliğine sahip proporsiyonel devir sayısı regülatörleri kullanılmalıdır. İlk termik birime ait hız regülasyon yüzdesi R=2,4 olarak seçilmiştir. Bu değer frekansta %2,4’lük değişim sonucu güç çıkışında %100’lük bir değişim olacağını belirtir. Yük frekans kontrolü yapılmadığı ve güç sisteminin sadece tek bir termik birimden oluştuğu durumda ilk saniye sonunda sisteme %1’lik bir yük artışı uyguladığımızda Şekil 5.2’den görüldüğü gibi frekansta sürekli halde -0,02367 p.u. değerinde olmaktadır. Seçilen hız regülasyon yüzdesine göre 0,024 p.u. düşüş olması beklendiğı halde, frekansa duyarlı yük değişimleri nedeniyle bu değerden daha düşük bir sapma görülür.

OÜK’nde amaç frekansın sürekli halde 50 Hz değerine getirmek olduğundan kullanılacak olan kontrolörün sürekli hal hatasını gidermesi beklenir. Yine Şekil 5.2’de yük artışı uygulandıktan sonra bu alandaki frekansın sürekli hal değerine ulaşması için 600 saniyeden uzun bir süre geçmesi gerekmektedir. Bu nedenle kontrolörün sürekli halde frekans meydana gelen değişimleri tekrar sıfır değerine getirmesinin yanında yerleşme zamanı azaltması da beklenmektedir. Yük değişimi uygulandıktan sonraki maksimum aşım -0.038p.u. değeri 1.9 Hz’ye karşılık geleceğinden, kontrolörün elektrik enerjisinin kalitesini korumak için frekansındaki ani düşme ve yükselmelerini engellemesi de gerekmektedir. İstenen koşulları sağlanması amacıyla PI ve PID tipindeki kontrolörler GA yöntemiyle farklı amaç fonksiyonları uygulanarak tasarlanacaktır.





**Şekil 5.2:** Yük artışına frekans cevabı

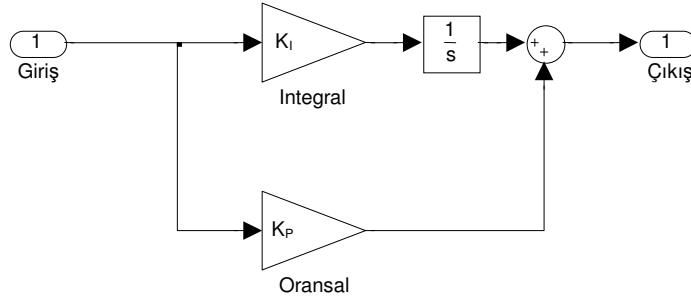
## 5.2. PI Tipi Kontrolör ile Tasarım

Üç alanlı güç sisteminde frekans cevabı ve alanlar arası güç iletiminin düzenlenmesi için öncelikle PI tipi kontrolör önerilecektir. PI kontrolörler  $K_P$  oransal kazanç ve  $K_I$  integral kazancı bileşenlerini içerir. Sistemin sönümünün düzeltilmesi, aşımın azaltılması ve kararlı hal hatalarının giderilmesi amacıyla kullanılacak PI kontrolörün transfer fonksiyonu (5.3)'de verilmiştir.

$$C_{PI}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (5.3)$$

Güç sistemi üç alandan oluştuğundan ve her alandaki kontrolörlerde  $K_I$  ve  $K_P$  olmak üzere iki adet kontrolör katsayısı bulunduğu için, altı değişkenli optimizasyon probleminin çözülmesi gerekir. Sistemde meydana gelen yük değişimleri önceden bilinemeyeceğinden frekans cevabındaki maksimum aşım, yükselme zamanı, yerleşme zamanı gibi zaman tanım bölgesi kriterlerinin değeri önceden belirlenemez. Bu nedenle arama uzayı içinde her alandaki frekans hatasını ve iletim hatlarındaki güç akışını en aza indirecek kontrolör katsayılarının bulunması gerekir. Güç

sistemindeki doğrusal olmayan karakteristikler ve birden çok giriş ve kontrolör bulunması nedeniyle katsayıların elle ayarlanması veya köklerin yer eğrisi tekniğiyle bulunması mümkün değildir. PI kontrolörün Simulink'te kullanılan blok diyagramı Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Bu kontrolöre ilişkin en uygun  $K_I$  ve  $K_P$  kontrolör katsayısının bulunmasında evrimsel temellere dayalı bir optimizasyon yöntemi olan GA kullanılmıştır.



**Şekil 5.3:** PI kontrolör blok diyagramı

### 5.2.1. IAE başarımlı ölçütü

Benzetim modeli 100 saniye boyunca çalıştırılmış olup, tüm alanlara birinci saniye sonunda %1'lik bir yük artışı uygulanmıştır. Simülasyondaki  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$ ,  $\Delta f_3$  frekans değişimleri ve alanlar arasındaki  $\Delta P_{12}$ ,  $\Delta P_{23}$ ,  $\Delta P_{31}$  güç akışlarının geçici durumda en düşük olmasını sağlayan PI kontrolör katsayılarının bulunması amaçlanmıştır. GA ile bulunacak bu optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu her alanlardaki frekanstaki sapma ve alanlar arasındaki güç değişimindeki hatanın mutlak değerinin T periyodu boyunca integrali alınarak IAE başarımlı ölçütüne göre (5.4) deki gibi ifade edilir.

$$f_{IAE}(t) = \int_{t=0}^T (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta f_3| + |\Delta P_{12}| + |\Delta P_{23}| + |\Delta P_{31}|) dt \quad (5.4)$$

OÜK'de birimlere ilişkin üretim değerleri, bağlantı hattı üzerindeki akış ve sistem frekansı kontrol merkezine iletilmelidir. Bu veriler bitlerle ifade edilen sayısal kelimelerle kodlanmakta olup aynı kanallardan hem telemetrik bilgiler, hem kontrol bilgisi aktarılır [4]. Pratikte frekans hata işareti telemetrik uzak istasyonlardan merkeze 1-2 saniyelik örnekleme periyotları ile iletilir. Bu nedenle GA'da

kullanılacak frekans hatasını ve bağlantı hatlarındaki değişimleri içeren uygunluk fonksiyonunun (5.5) ifadesindeki gibi ayrık verili modellenmesi daha doğru olacaktır.

$$F_{IAE} = \sum_{k=0}^n \left( \sum_{i=1}^3 |\Delta f_i(kT)| + |\Delta P_{12}(kT)| + |\Delta P_{23}(kT)| + |\Delta P_{12}(kT)| \right) \quad (5.5)$$

Burada örnekleme periyodu T, 10 ms olarak belirlenmiştir. Simülasyonun çalıştığı süre boyunca her alana ilişkin frekanstaki sapma ve alanlar arası güç akışlarının mutlak hatalarının T periyodu ile alınan değerleri toplanarak GA'da kullanılan uygunluk fonksiyonun değeri elde edilir. Altı değişkenin 100 saniye boyunca örnekleme yapıldığından sadece bir bireyin uygunluk fonksiyonun değerinin hesaplanmasında 60 bin sayı kullanılmaktadır.

Optimizasyonda kullanılan GA parametreleri Çizelge 5.1'deki gibi seçilmiştir. Burada popülasyonu büyüklüğü 100 olarak belirlenmiş olup, popülasyondaki her birey kontrolörlere ilişkin PI kontrolör katsayılarını içermektedir. İlk popülasyon rastgele oluşturulduğundan, ilk nesillerde sistem cevabı kararsız çıkabilmektedir. Baştaki kararlı sistem cevabı veren iyi uygunluk değerine sahip bireylerin sonraki nesillerde de korunması amacıyla elit sayısı 5 olarak belirlenmiştir. Genetik çeşitliliğin sağlanarak daha geniş bir arama uzayında arama yapılması için çaprazlama ve mutasyon katsayıları ise sırasıyla 0.8 ve 0.05 olarak seçilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda en iyi uygunluk değerine sahip bireylerin 60. nesilden sonra pek gelişme göstermediğinden simülasyonun süresinin kısıtlanması amacıyla maksimum nesil sayısı 65 olarak belirlenmiştir. Ayrıca algoritmanın sonlandırma kriteri olarak maksimum nesil sayısına ulaşması seçilmiştir. PI kontrolör katsayılarının bulunması için kullanılan güç sisteminin yüksek dereceden doğrusal olmayan sistemler olduğundan modellenmedeki alan sayısı, kontrolör sayısı ve çeşidi değiştiğinde kullanılan GA parametrelerinin yeniden ayarlanması gerekir.

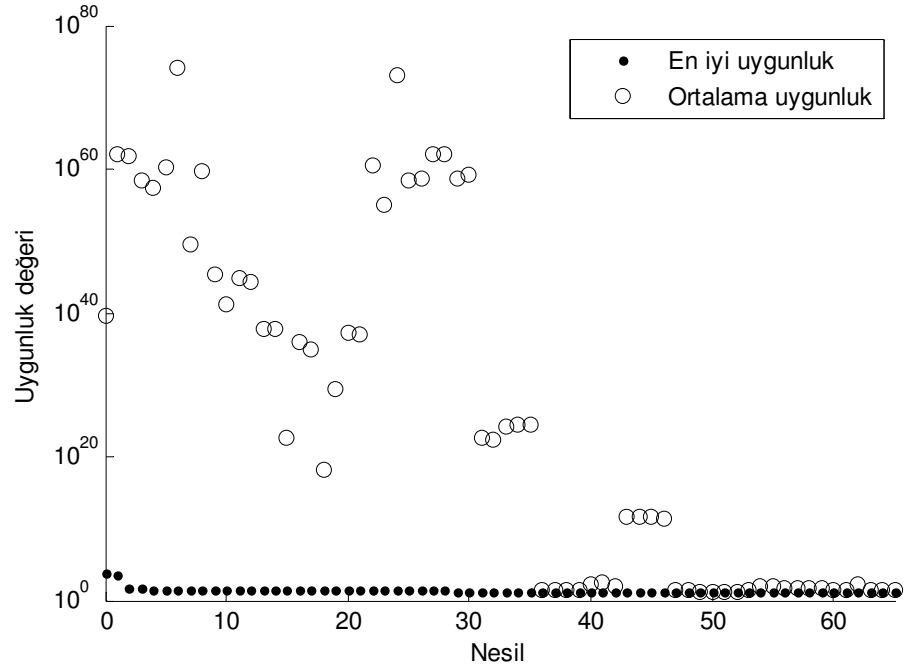
**Çizelge 5.1 :** PI katsayılarının bulunmasında kullanılan GA parametreleri

|                      |      |
|----------------------|------|
| Popülasyon büyüklüğü | 100  |
| Nesil sayısı         | 65   |
| Çaprazlama katsayısı | 0,8  |
| Mutasyon katsayısı   | 0,05 |
| Elit birey sayısı    | 5    |

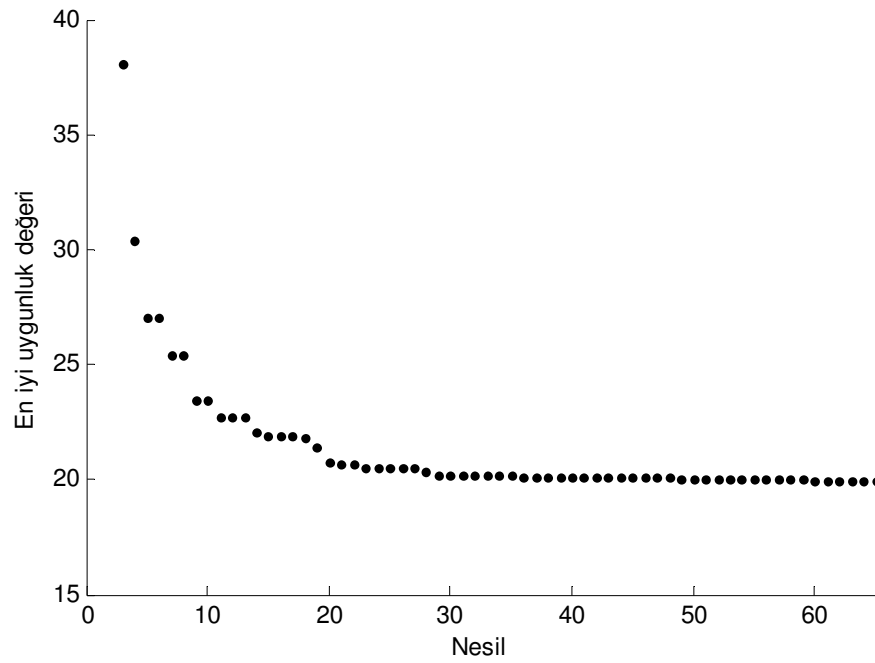
Şekil 5.4'te uygunluk değerinin nesillere göre değişimleri gösterilmiştir.. Başlangıç popülasyonu için bireyler rastlantısal olarak oluşturulduğundan ilk nesildeki bireylerin uygunluk fonksiyonun ortalama değeri  $10^{40}$  mertebesindedir. Bu ilk nesillerdeki kontrolör parametrelerinin de kararsız olmasına yol açmaktadır. Kararsız durumlar için (5.5) ile verilen uygunluk fonksiyonun değerinin fazla olacaktır. Ayrıca sonraki nesillerde mutasyon ve çaprazlama ile daha iyi bireylerin aranması aşamasında kararsız bireyler elde edilme olasılığı da bulunur. Özellikle 20 ve 30. nesiller arasında popülasyonun ortalama değerindeki ani yükselmeler genetik operatörler sonucu bulunan popülasyondaki bazı PI katsayılarının kararsız sistem cevabı vermesinden kaynaklanır. Fakat nesiller ilerledikçe popülasyonun ortalama uygunluk değerinde genel olarak bir azalma söz konusudur. Şekilde kararlı ve kararsız PI katsayılarının uygunluk değerlerinin aynı ölçekte gösterilmesi amacıyla y eksenini logaritmik olarak seçilmiştir. Son iterasyon için ortalama uygunluk değeri 20.37 olarak bulunmuş olup, en iyi bireyin uygunluk değeri 19.97'dir.

**Çizelge 5.2 :** IAE başarımlı ölçütüyle bulunan PI kontrolör katsayıları

| Kontrolör katsayıları | Alan 1  | Alan 2  | Alan 3  |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| $K_P$                 | -0.6805 | 0.3232  | 0.0116  |
| $K_I$                 | -0.4977 | -0.2343 | -1.0475 |



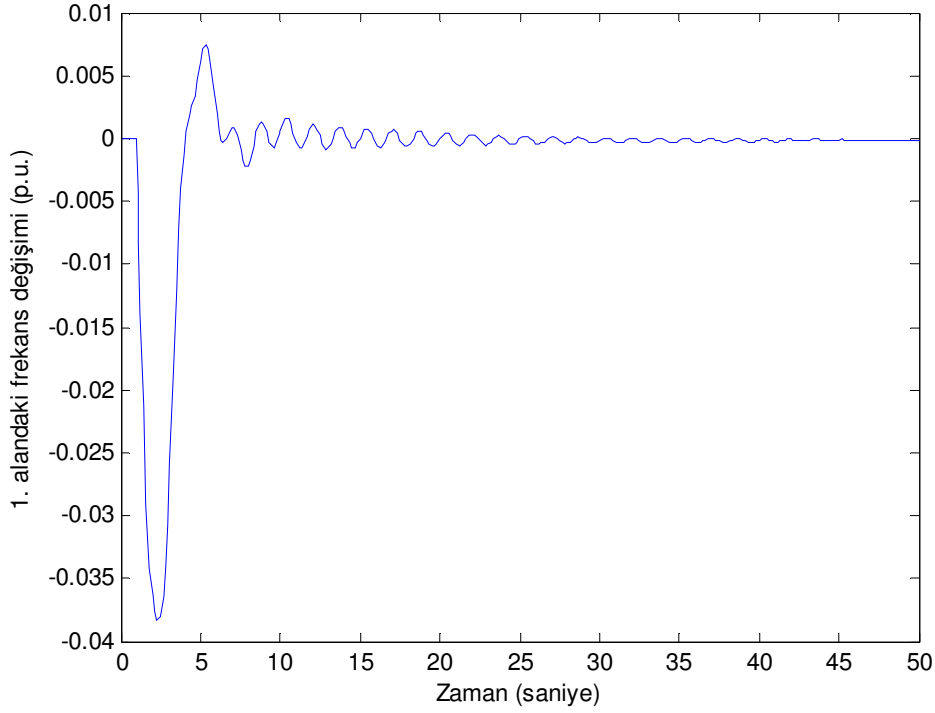
Şekil 5.4: GA ile PI optimizasyonunda nesillere göre uygunluk değerleri



Şekil 5.5: GA ile PI optimizasyonunda nesillere göre en iyi uygunluk değerleri

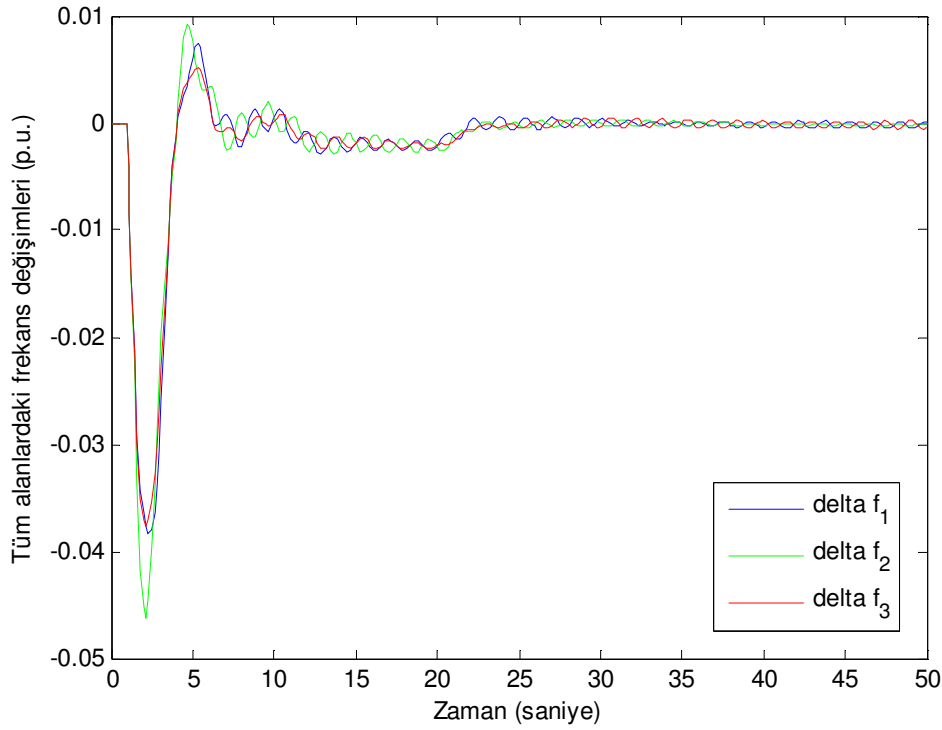
GA'da amaç nesiller ilerledikçe daha iyi uygunluk değerine sahip bireylerin bulunmasıdır. Şekil 5.5'te en iyi uygunluk değerine sahip bireyin nesil sayısına göre değişimi gösterilmektedir. Her nesil 100 bireyden oluştuğundan, bir popülasyondaki 100 birey içindeki en iyi sonuçlar görülmektedir. Maksimum nesil sayısı da 65 olarak seçildiğinden, GA işleyişinde modelin 6500 farklı katsayılarla denendiği çıkarılabilir. Bu nedenle üç alanlı güç sistemindeki kontrolörlerin elle ayarlanması iyi sonuçlar vermemektedir. Ayrıca her birimin modellenmesinde türevi alınamayan ifadeler bulunduğundan türev bilgisine ihtiyaç duyan optimizasyon yöntemleri ile de çözümü mümkün olmaz. Sistemdeki uygun kontrolör katsayılarının tek bir nokta ile arama yapan yöntemlerle bulunması için çok zaman gerektireceğinden, popülasyon olarak adlandırılan noktalar kümesi oluşturulup, arama işleminin paralel olarak yürütüldüğü GA kullanılmıştır. En iyi uygunluk değerli bireyin nesiller arttıkça geliştiği görülmektedir. Son nesildeki popülasyon içinde en iyi bireyin uygunluğu olan 19.97, başlangıçta verilen amaç fonksiyonun değerine eşittir. Bu bireyin kromozomları her üç alana ilişkin en uygun PI kontrolör katsayılarını içerir. Çizelge 5.3'te uygunluk fonksiyonu olarak IAE başarımlar ölçütü kullanılarak GA ile bulunmuş her alanlara ilişkin oransal ve integral kontrolör katsayıları verilmiştir.

Üç alanlı güç sistemindeki PI kontrolör katsayılarının Çizelge 5.2'deki gibi seçilmesi halinde birinci alandaki frekans değişimi  $\Delta f_1$  Şekil 5.6'daki gibi olmaktadır. Her alanda yük artışı meydana geldiği ilk saniyeden sonra sistem frekansında azalma meydana gelir. Frekanstaki en büyük sapma 2.4 saniye sonundaki  $-0.038 \text{ p.u.}$ luk ( $-1.9 \text{ Hz}$ ) değere ulaşır. Sistemin geçici durum cevabındaki aşımaların zamanla giderek azaldığı ve sürekli durumda sistem frekansındaki değişimin tekrar sıfır değerine döndüğü görülmektedir. IAE başarımlar ölçütüne göre katsayıları bulunan PI kontrolörünün  $2 \cdot 10^{-4} \text{ p.u.}$ luk bölge içine 43 saniye sonunda girmektedir. Burada kullanılan PI kontrolörün sönümü düzeltip aşımı azalttığı sonucuna varılır.



**Şekil 5.6:** PI kontrolör ile 1. alandaki frekans cevabı

Birbirine iletim hatları ile bağlı güç sistemindeki tüm alanların frekans değişimleri ise Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Yük talebindeki artıştan sonra tüm alanların frekansında azaltma görülmektedir. İlk negatif aşım değerinin 1. alanda -0.038, 2. alan için -0.045, 3. alanda ise -0.037 p.u. olduğu görülmektedir. Bu aşım değerlerinin alanlar arasında farklılık göstermesi devir sayısı regülatörünün hızda azalma özelliğine, türbin ve kazan modellemelerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Diğer alanlardaki buhar türbinleri kullanılmasına karşın ikinci alanda gaz türbini bulunması ve hızda azalma özelliğinin daha yüksek seçilmesi frekansta en büyük sapmanın bu bölgede olmasına yol açar. Ayrıca frekansın geçici durumdaki salınımlarının genliklerinin de 2. alanda daha yüksek olduğu şekilden görülmektedir. Her alandaki frekans değişiminin sürekli halde sıfır değerine ulaştığı görülmekle beraber,  $2 \cdot 10^{-4}$  p.u’luk bölge içine girmesi için 40-45 saniye arasında bir süre geçmesi gerekir. Frekans cevabında 20 saniyeden sonraki salınımlar çok düşük genlikli olduğundan elektrik kalitesi açısından bir sorun oluşturmaz. Fakat sonraki aşamada tasarlanacak PID kontrolörler ile karşılaştırılması açısından 0.01 Hz’lik bölge içine girme zamanı kriter olarak alınmıştır.

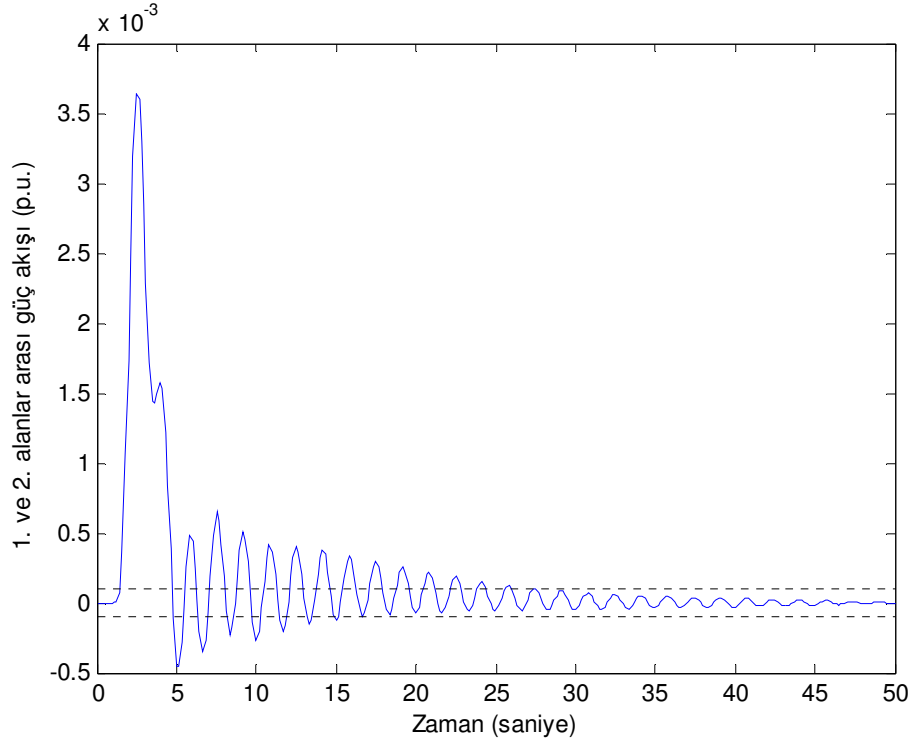


**Şekil 5.7:** PI kontrolör ile tüm alanlardaki frekans cevapları  
( $\Delta P_{L1} = \Delta P_{L2} = \Delta P_{L3} = 0.01 \text{ p.u.}$ )

Sistemde yük talebindeki artış sonucunda tüm alanların da frekansın azaldığı yukarıda görülmüştü. Yükün değişmesi üç alanı birbirine bağlayan bağlantı hatlarında  $\Delta P_{12}$ ,  $\Delta P_{23}$ ,  $\Delta P_{31}$  güç akışına neden olur. 2. alandan 1. alana güç akışı olması durumunda, 1. alandan 2. alana güç akışının ters işaretlisi  $-\Delta P_{12}$  olarak gösterileceğinden sistemde üç güç akışı bulunmaktadır. Şekil 5.8’de ilk iki alan arasındaki güç akışı görülmektedir. Başlangıç anında sıfır olarak kabul ettiğimiz alanlar arası  $\Delta P_{12}$  güç transferinin, her alana uygulanan %1’lik yük artışı sonucunda 0.036 p.u.’luk pozitif aşım yapması geçici durumda ilk alandan ikincisine güç akışı olduğunu gösterir. Geçici durumda her iki bölge arasındaki güç işareti değişmekte ve  $10^{-4}$  p.u.’luk bölge içine 26 saniye almaktadır. OÜK’nde her alanda oluşan yük değişimleri o alandaki üretim birimleri tarafından karşılanacağından 1. ve 2. alanlar arası güç akışının sürekli durumda tekrar sıfır değerine döndüğü görülür. Üç alanlı güç sistemindeki tüm bağlantı hatlarındaki güç akışları Şekil 5.9’da verilmiştir. Şekilde  $\Delta P_{23}$ ’ün negatif aşım yapması 3. alandan 2. alana güç akışı olduğunu gösterir. Sistemde kullanılan gaz türbini ve kazan modelinin parametreleri termik birimlere göre daha geç tepki verdiği için yük artışıyla beraber, geçici durumda hem 1. hem de 3. alandan, 2. alana doğru yük akışı görülür. Hatlardaki güç değişiminin  $10^{-4}$  genlikli

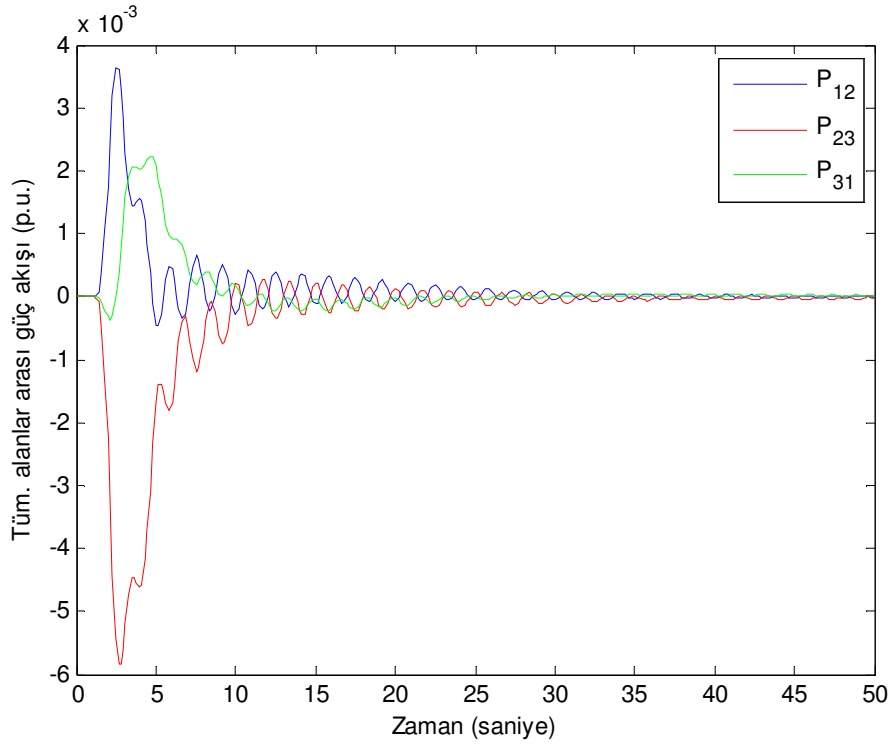


bölge içine girmesi için alanlara göre sırasıyla 27, 22, 29 saniye geçmesi gerekir. Sürekli durumda alanlar arasındaki bağlantı hatlarındaki değişim tekrar sıfır değerine döneceğinden, her üretim biriminin kendi alanındaki yük artışını karşılayabildiği sonucuna varılır.

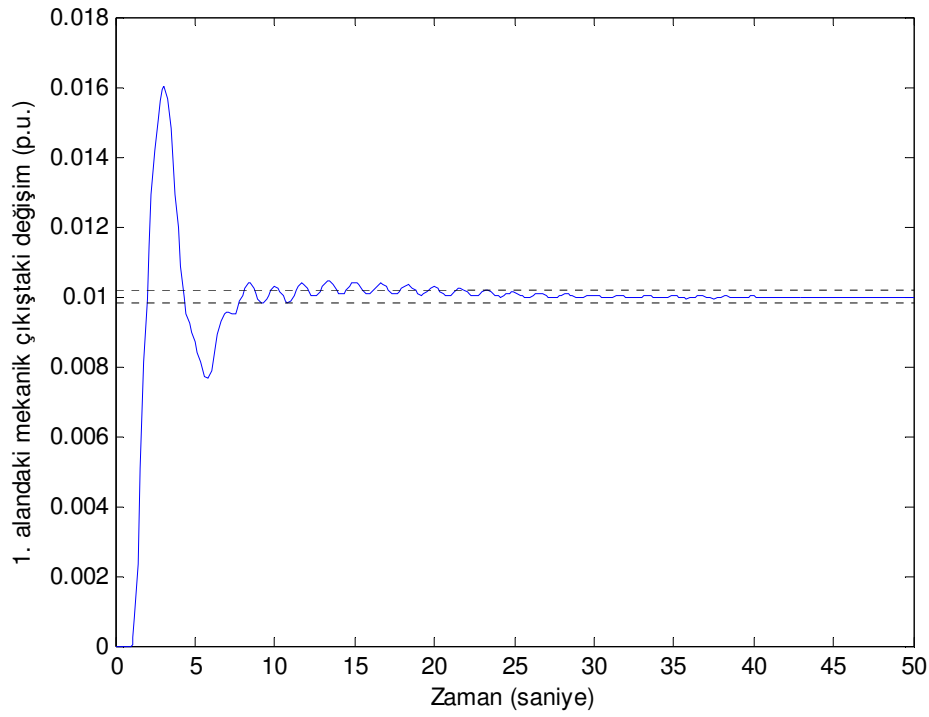


**Şekil 5.8:** PI kontrolör ile 1. ve 2. alan arası güç akışı ( $\Delta P_{L1}=\Delta P_{L2}=\Delta P_{L3}=0.01$  p.u)

Ara ısıtıcılı türbin transfer fonksiyonlarının çıkışı, mekanik güçteki değişimi verir Şekil 5.10’da her alana uygulanan yük artışı sonucu 1. alandaki mekanik güçteki değişimler görülmektedir.. Yük artışından sonra devir sayısı regülatörlerinin vana konumunu ayarlaması sonucunda geçici durumda mekanik çıkışta %60 aşım görülür ve yaklaşık 22 saniye sonunda ise mekanik güç değeri 0.0102 ile 0.0098 arasındaki bölgeye girer. Kontrolör kullanılmadığı durumda yükün frekansa duyarlı karakteristiği nedeniyle mekanik güçteki artış yük artışından daha az olacaktır. PI kontrolörler ise sürekli durumda frekans hatasını sıfırlayacağından mekanik gücün sürekli durumdaki değeri o alandaki yükteki artışa eşit olarak 0.01 p.u. değerindedir.

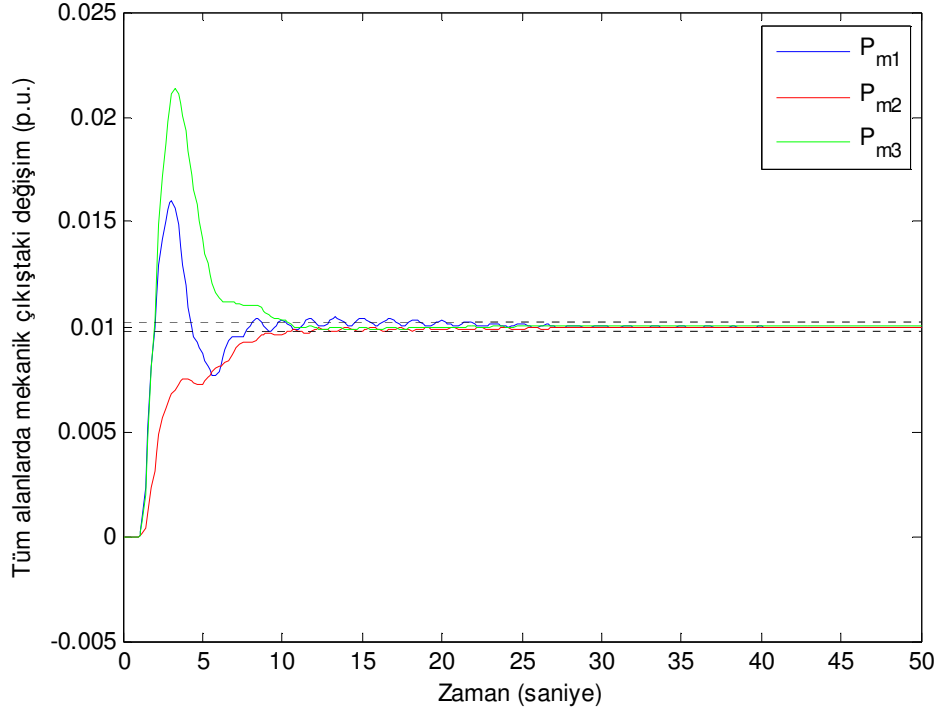


**Şekil 5.9:** PI kontrolör tüm. alanlar arası güç akışı ( $\Delta P_{L1}=\Delta P_{L2}=\Delta P_{L3}=0.01$  p.u)



**Şekil 5.10:** PI kontrolör ile mekanik çıkışlardaki değişim

Üç alana ilişkin mekanik güçteki değişimlerin zaman göre grafikleri Şekil 5.11’de verilmiştir. Yük artışından sonraki 1. alanda %60, 3. alanda %110 aşım yaptığı, 2. alanda ise aşım yapmadan sürekli hal değerine ulaştığı görülmektedir. Gaz türbininin mekanik çıkışı sönüm oranı olmakla birlikte yükselme zamanı daha fazladır.



**Şekil 5.11:** PI kontrolör ile tüm alanlardaki mekanik güçteki değişim

Mekanik çıkışların sürekli hal değerinin %2 değişimi arasındaki bölgeye girmesi için girmesini sağlayan yerleşme zamanları 1. alan için 21.8, 2. alan için 13.3, 3. alan için 10.4 saniyedir. Kontrolör katsayılarındaki, türbin ve kazan modelleri, devir sayısı regülatörlerinin karakteristiği, hız düşülerinin farklı oluşu ve iletim hatlarındaki farklılıklar nedeniyle yerleşme zamanları her alanda farklı değerdedir. Her alana %1 yük artışı uygulandığından ve alanlar arası güç akışı olmadığından sürekli durumda tüm alanlardaki mekanik çıkışlar 0.01 p.u. değerinde olacaktır.

### 5.3.2. ISE, ITAE, ITSE başarımlı ölçütleri

PI kontrolör katsayılarının GA ile bulunmasında kullanılan uygunluk fonksiyonunun seçimi büyük önem taşır. Başlangıçta belirlenen IAE başarımlı ölçütü, üç alandaki frekans değişimi ve bağlantı hatlarındaki güç akışlarının mutlak değerlerinin toplamı

olarak tanımlanmıştır. GA'daki popülasyondaki her bireye uygunluk değeri atanır. Algoritma sonlandığında en iyi uygunluk değerine sahip bireyin kromozomları PI kontrolörünün katsayılarını oluşturmaktadır. OÜK'nin amacı frekans hatasını ve alanlar arası güç akışını düzeltmek olduğundan seçilen uygunluk fonksiyonu bu değerleri içermelidir. Çizelge 5.3.'te frekans ve güç akışlarındaki hata işaretlerini belirlemede IAE, ISE, ITAE, ISE+ITAE, ITSE, ITSE+ITAE başarımlı ölçütleri kullanılarak bulunan PI kontrolör katsayıları verilmiştir. Burada kullanılan integral katsayıların negatif çıkması yük talebindeki artış sonucu frekansta düşüş görülmesi ve OÜK blok diyagramındaki frekans hatası ve alanlar arası güç akışındaki geri beslemenin pozitif işaretli olmasından kaynaklanır. IAE başarımlı ölçütünde seçilen GA parametreleri, sistem modelindeki veriler sabit tutularak diğer ölçütlerle karşılaştırılması yapılacaktır. Sistemdeki üç alana ilişkin frekanstaki sapma, mekanik çıkışlardaki değişim ve alanlar arası güç akışları gibi farklı grafikler elde edilmesine karşın başarımlı ölçütlerinin karşılaştırılmasında yalnızca 1. alanın frekans değişim grafikleri gösterilecektir.

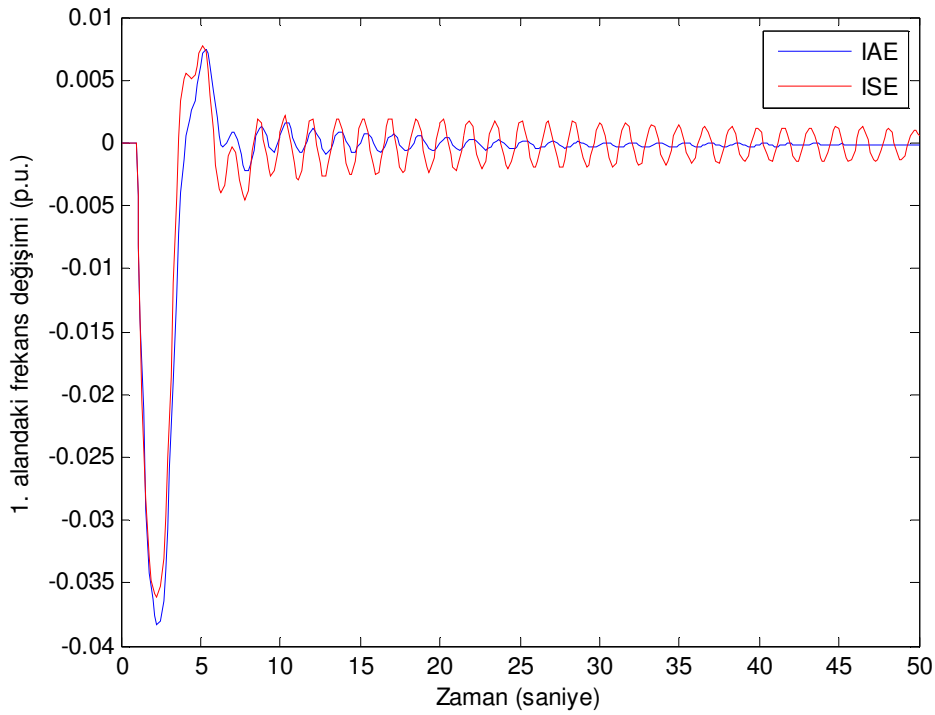
**Çizelge 5.3 :** Farklı başarımlı ölçütlerine göre PI kontrolör katsayıları

| <b>Kontrolör katsayıları</b> | <b>IAE</b> | <b>ISE</b> | <b>ITAE</b> | <b>ISE + ITAE</b> | <b>ITSE</b> | <b>ITAE + ITSE</b> |
|------------------------------|------------|------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------|
| $K_{P1}$                     | -0.6805    | -0.8862    | 0.1171      | 0.0016            | 0.1268      | -0.6396            |
| $K_{P2}$                     | 0.3232     | 0.1555     | 0.0818      | 0.1313            | 0.1399      | 0.3777             |
| $K_{P3}$                     | 0.0116     | -0.1510    | -0.0450     | -0.0273           | -0.3152     | 0.0348             |
| $K_{I1}$                     | -0.4977    | -0.2658    | -0.7688     | -0.7218           | -1.5174     | -0.5849            |
| $K_{I2}$                     | -0.2343    | -0.5533    | -0.2786     | -0.3352           | -0.2039     | -0.2647            |
| $K_{I3}$                     | -1.0475    | -0.8433    | -0.5988     | -0.6016           | -0.4493     | -1.0940            |

Uygunluk fonksiyonu olarak hatanın karesinin kullanıldığı ISE başarımlı ölçütü (5.6)'da görülür. Güç sistemindeki her alanın frekans hatası ve alanlar arasındaki bağlantı hattı güçlerindeki değişimin her örnekleme zamanında karesi alınarak, 100 saniye boyunca elde edilen değerler toplanarak uygunluk fonksiyonun değeri elde edilir. Şekil 5.11'de ISE ve IAE karşılaştırılması görülmektedir. En büyük aşım yakınındaki örnekleme zamanların karesinin uygunluk fonksiyonuna etkisi fazla olacağından ISE başarımlı ölçütündeki en büyük aşım değeri 0.038'den 0.036'ya azalmıştır.  $2.10^{-3}$  p.u. genliğindeki salınım genlikleri 50 saniye sonunda  $10^{-3}$  p.u.'ya

düşmekle birlikte diğer tasarım ölçütlerine kıyasla sürekli hal değerine oldukça geç ulaştığı gözlenir.  $2.10^{-4}$ 'lük bölge olarak kabul edilen yerleşme zamanına IAE'de 43 saniye olmasına karşın 50 saniyede ISE ile bu bölge içine girilememiştir. Bu nedenle ISE ölçütünün OÜK'nde kontrolör katsayılarının bulunmasında kullanılması önerilmez.

$$F_{ISE} = \sum_{k=0}^n \left( \sum_{i=1}^3 \Delta f_i^2(kT) + \Delta P_{12}^2(kT) + \Delta P_{23}^2(kT) + \Delta P_{31}^2(kT) \right) \quad (5.6)$$

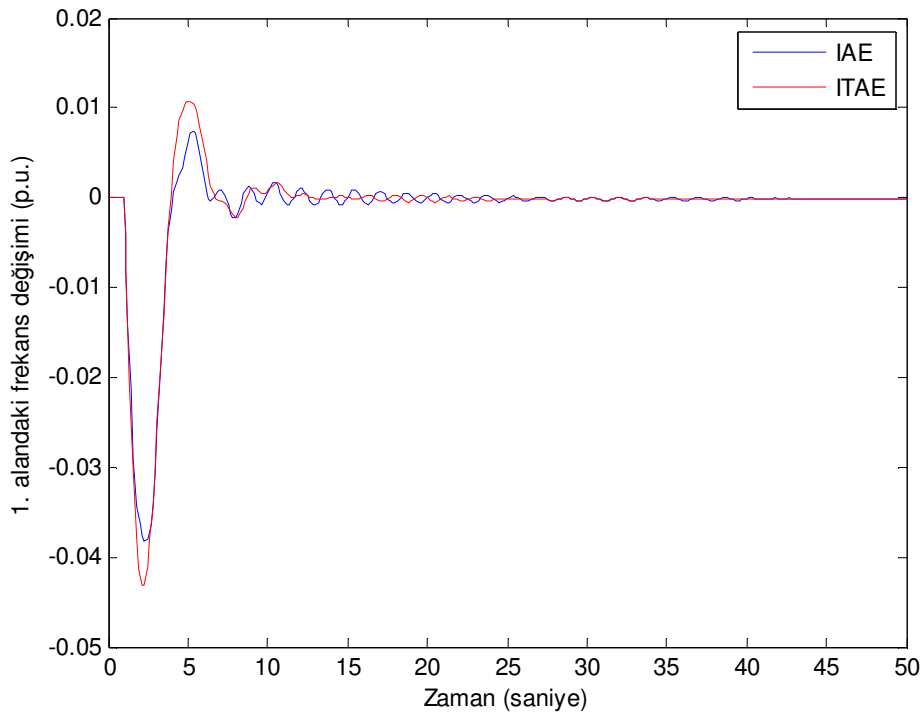


**Şekil 5.12:** PI kontrolör için IAE ve ISE başarımları karşılaştırılması

ISE başarımlı ölçütünde yerleşme zamanının fazla olduğu ve salınımlarının genliklerinin çok yavaş azaldığı görülmüştür. Bu nedenle (5.7)'de mutlak hatanın zamanla çarpımını temel alan ITAE başarımlı ölçütü verilmiştir. Başlangıçta simülasyon zamanı az olduğundan uygunluk fonksiyonu da küçük değerler alacaktır. Fakat süre ilerledikçe süre ve hatanın çarpımının büyümesi, ITAE başarımlı ölçütünde sürekli hal frekansına daha kısa sürede ulaşmayı sağlar. Şekil 5.13'te üç alanlı güç sistemindeki GA ile PI kontrolör katsayılarının bulunmasında uygunluk fonksiyonu olarak seçilen ITAE ve IAE karşılaştırılması verilmiştir. Frekanstaki en büyük aşım

değeri ITAE ile 0.043 p.u. olup, IAE'ye göre %13 daha fazla aşım karşılık gelir. Frekans salınım değerinin  $2.10^{-4}$  p.u.luk (0.01 Hz) bölge içine girmesi için gerekli süre ITAE'de IAE'den 9 saniye daha iyi olup 34 saniyedir. Bu karşılaştırmadan ITAE'nin IAE'ye göre aşımı bir miktar arttırmasına karşın yerleşme zamanını iyileştirdiği görülür.

$$F_{ITAE} = \sum_{k=0}^n kT \left( \sum_{i=1}^3 |\Delta f_i(kT)| + |\Delta P_{12}(kT)| + |\Delta P_{23}(kT)| + |\Delta P_{31}(kT)| \right) \quad (5.7)$$

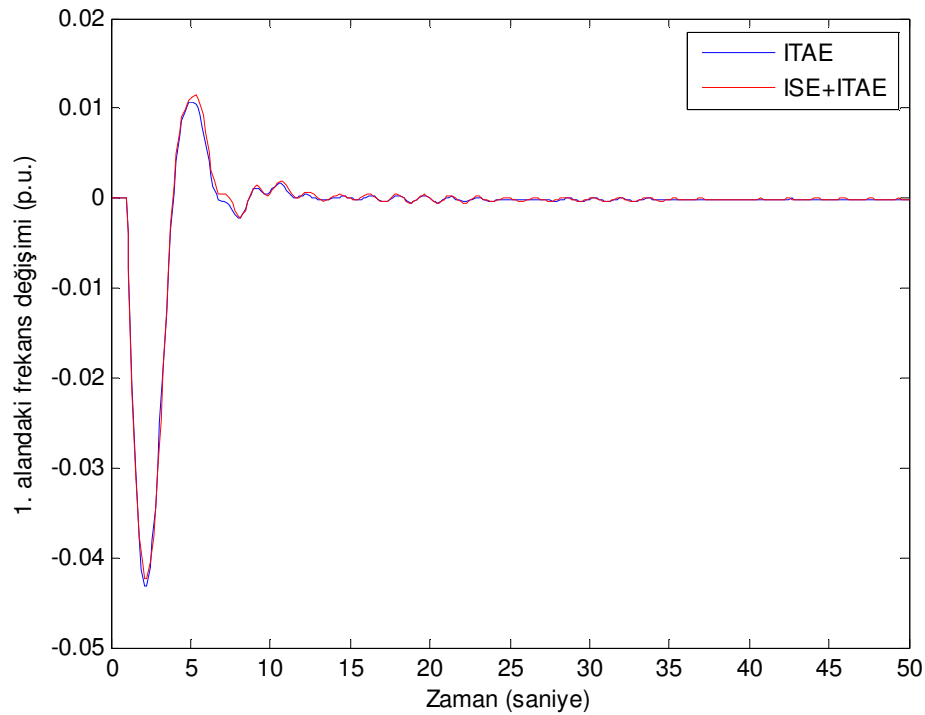


**Şekil 5.13:** PI kontrolör için ITAE ve IAE başarımlı ölçütleri karşılaştırılması

ITAE başarımlı ölçütünde en iyi yerleşme zamanı, ISE'de ise en düşük aşımın elde edildiğinden, bu iki uygunluk fonksiyonunun toplamı olarak ISE+ITAE olarak yeni bir başarımlı ölçütü tanımlamak mümkündür. Kullanılan uygunluk fonksiyonunda, ISE'de  $10^{-2}$  mertebesinde sayıların karesinin alınması sonucu ITAE'ye daha düşük çıkacağından 100 ile çarparak ölçeklendirme yapılmıştır. ISE+ITAE başarımlı ölçütüyle belirlenen uygunluk fonksiyonu (5.8)'de verilmiştir. Bu uygunluk fonksiyonunun GA ile PI katsayılarının bulunması sonucu elde edilen 1. alana ilişkin frekans değişimi ise Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Bu iki başarımlı ölçütü için frekans

cevaplarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. ISE+ITAE’de maksimum aşım miktarı  $10^{-3}$  daha az olurken, buna karşılık  $2.10^{-4}$  p.u.luk bölge içine girmesi olarak kabul edilen yerleşme zamanı yaklaşık 1 saniye daha fazladır. Buradan uygunluk fonksiyonu olarak farklı iki farklı başarım ölçütü kullanmanın sistem cevabında her zaman iyileştirme sağlamadığı sonucu çıkarılır.

$$F_{ISE+ITAE} = \sum_{k=0}^n \frac{kT \left( \sum_{i=1}^3 |\Delta f_i(kT)| + |\Delta P_{12}(kT)| + |\Delta P_{23}(kT)| + |\Delta P_{31}(kT)| \right)}{+100 \left( \sum_{i=1}^3 \Delta f_i^2(kT) + \Delta P_{12}^2(kT) + \Delta P_{23}^2(kT) + \Delta P_{31}^2(kT) \right)} \quad (5.8)$$

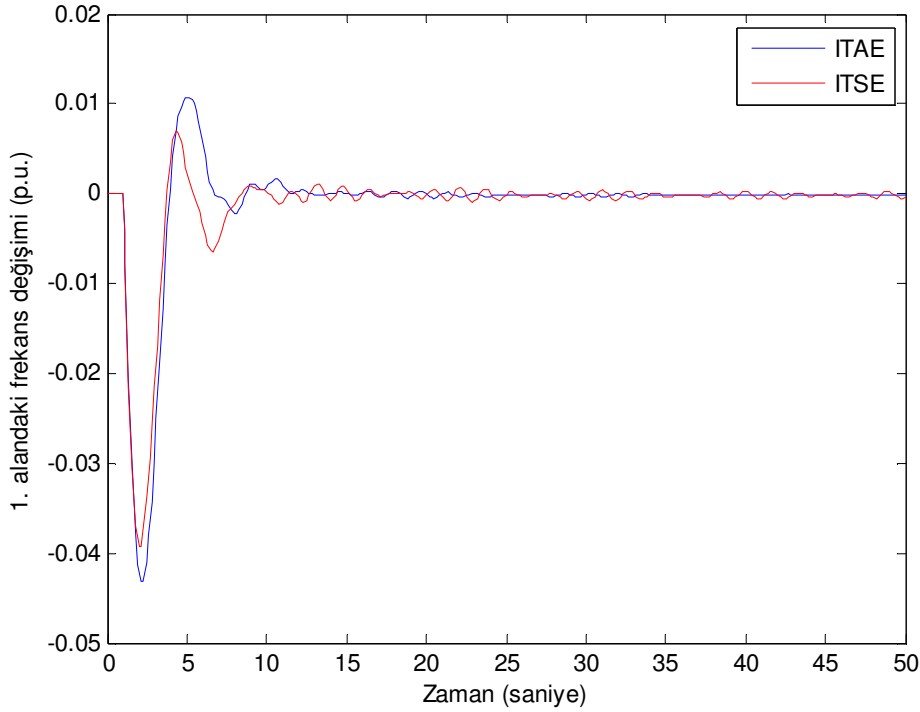


**Şekil 5.14:** PI kontrolör için ITAE ve ISE+ITAE başarım ölçütleri karşılaştırılması

Hatanın karesinin aşımı azalttığı, zamanla çarpımının ise yerleşme zamanını azalttığı görülmüştü. ITSE başarım ölçütünde ise hata değerlerinin zamanla çarpımının karesi hesaplanmaktadır. (5.9)’daki eşitlikte GA ile PI katsayılarının ITSE başarım ölçütü ile bulunması için kullanılacak uygunluk fonksiyonu verilmiştir. Şekil 5.15’te ITAE ve ITSE uygunluk fonksiyonları kullanılarak elde edilen 1. alandaki frekans cevapları görülmektedir. Yük artışından sonra frekanstaki en büyük aşım değerleri ITSE’de 0.038 p.u. olduğundan ITAE’ye göre %11.6 daha azdır. Aşımdaki bu azalma

uygunluk fonksiyonunun değerinin hesaplanmasında hatanın karesini içermesinden kaynaklanır. Frekansın sürekli halde sapması sıfır değerinde olmasına karşın  $2.10^{-4}$  p.u.luk (0.01 Hz) bölgeye girmesi 70 saniye gibi uzun bir zaman alacaktır. Yerleşme zamanının çok fazla artması nedeniyle PI kontrolör tasarımı ITSE ölçütü ile iyi sonuçlar elde edilmediği görülür.

$$F_{ITSE} = \sum_{k=0}^n kT \left( \sum_{i=1}^3 \Delta f_i^2(kT) + \Delta P_{12}^2(kT) + \Delta P_{23}^2(kT) + \Delta P_{31}^2(kT) \right) \quad (5.9)$$



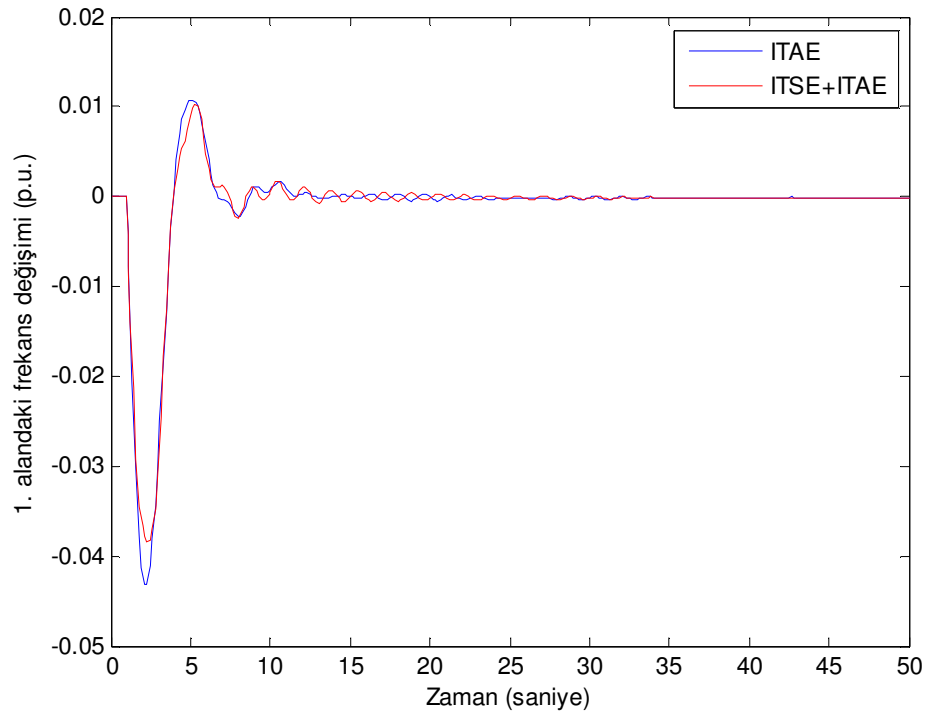
**Şekil 5.15:** PI kontrolör için ITAE ve ITSE başarımları karşılaştırılması

Son olarak, hatanın hem karesinin hem de mutlak değerinin zamanla çarpımının dikkate alındığı ITAE+ITSE başarımları ölçütü incelenecektir. GA ile bulunacak PI kontrolör katsayılarının bulunmasında (5.10)'da uygunluk fonksiyonu verilen bu ölçütün kullanılması halinde, 1. alandaki frekans cevabı Şekil 5.16'da verilmiştir. Her alana %1 yük artışı uygulanmasından sonra frekanstaki en büyük sapma ITAE+ITSE ile -0.038 p.u ile ITAE'den daha iyidir. Önceki ITSE ölçütünün aksine, ilk pozitif ve negatif aşımından sonraki frekans salınımlarının oldukça küçük genlikte olduğu görülür.  $2.10^{-4}$  p.u.luk (0.01 Hz) bölgeye girilmesi için gerekli sürenin 36



saniye olup ITAE'den 2 saniyeye kadar fazladır. Aşımdaki azalma dikkate alındığında yerleşme zamanındaki artış önemsiz kalır. Bu nedenle üç alanlı güç sisteminde GA ile PI kontrolör katsayılarının bulunmasında uygunluk fonksiyonu ITSE+ITAE başarımların ölçütünün en iyi geçici hal cevabını sağladığı sonucuna varılmıştır.

$$F_{ITSE+ITAE} = \sum_{k=0}^n kT \left( \sum_{i=1}^3 (\Delta f_i^2(kT) + |\Delta f_i(kT)|) + \Delta P_{12}^2(kT) + |\Delta P_{12}(kT)| + \Delta P_{23}^2(kT) + |\Delta P_{23}(kT)| + \Delta P_{31}^2(kT) + |\Delta P_{31}(kT)| \right) \quad (5.10)$$



**Şekil 5.16:** PI kontrolör için ITAE ve ITSE+ITAE başarımların ölçütleri karşılaştırılması

Kaliteli bir elektrik enerjisi için frekanstaki sapmanın 0.2 Hz içinde kalması yeterli görülmekle beraber, PI kontrolör tasarımında güç sistemindeki üç alana uygulanan yük artışından sonra yerleşme zamanı olarak frekansın 0.01 Hz içinde olması hedeflenmiştir. Bu değerin gerçek hayattaki güç sistemlerine düşük tutulmasındaki amaç PID kontrolör tasarımında geçici halde sistem cevabındaki iyileşmenin PI kontrolörle ile eşit koşullarda karşılaştırılması içindir. Güç sistemindeki her alana ilişkin frekans cevabının ve bağlantı hatları arasındaki güç akışının kullanılan

uygunluk fonksiyonu ve başarımlı ölçütlerine göre farklılık gösterdiği açıktır. Hatanın karesini içeren uygunluk fonksiyonların en büyük aşımın, zamanla çarpımını içeren fonksiyonlarda ise yerleşme zamanının azaldığı görülür. PI kontrolör kullanıldığında frekans cevabındaki en uygun geçici hal kriterleri ITSE+ITAE başarımlı ölçütü ile elde edilmiştir. PID kontrolör kullanılması durumunda üç alanlı güç sisteminde OÜK sonraki bölümde incelenecektir.

### 5.3. PID Kontrolör ile Tasarım

Üç alanlı güç sisteminde frekansta meydana gelen geçici hal salınımlarının azaltılması ve sürekli hal hatasının giderilmesi için yazılı eserlerde PID kontrolör ile tasarımlar önerilmiştir. [44, 45]. Endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan PID kontrolörler  $K_P$  oransal kazanç,  $K_I$  integral kazancı ve  $K_D$  türevsel kazanç bileşenlerini içerir. PID kontrolörün çıkışı bu üç terimin toplamından oluşur. PD kontrolöründeki sürekli hal davranışının düzeltmemesi, PI kontrolörün ise sistemin yükselme zamanını arttırması nedeniyle bu iki kontrolörün iyi özelliklerini taşıyan PID kontrolörün kullanılması daha iyi sonuçlar vermektedir. PID kontrolörün transfer fonksiyonu (5.11) şeklinde yazılır.

$$C_{PID}(s) = K_P + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad (5.11)$$

$K_I$  : Integral kontrolör katsayısı

$K_P$  : Oransal kontrolör katsayısı

$K_D$  : Türevsel kontrolör katsayısı

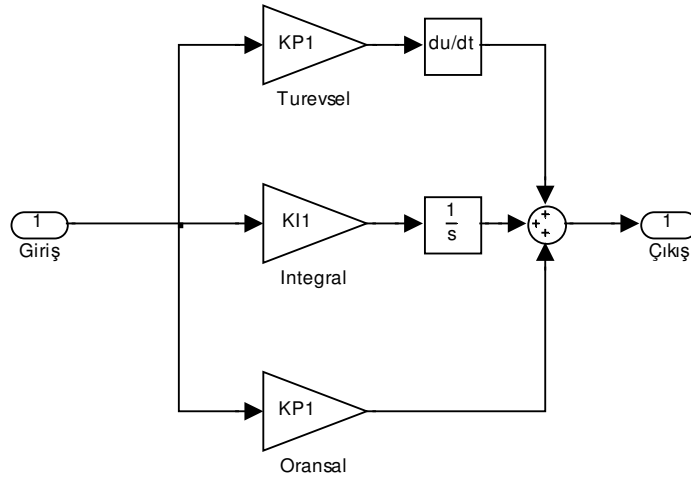
Bu transfer fonksiyonu seri bağlı PI ve PD kısımlarından oluştuğu düşünülerek (5.12) ile de ifade edilebilir.

$$C_{PID}(s) = (1 + K_{D1}s) \left( K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s} \right) \quad (5.12)$$

Zaman tanım bölgesi kriterleri verildiği durumlarda PID kontrolör tasarımında önce PD kontrolörü ile gerçekleştirilerek istenilen yükselme ve yerleşme zamanını sağlayacak  $K_{D1}$  değeri bulunur. Daha sonra PI kontrolörün  $K_{I2}$  ve  $K_{P2}$  oranının belirlenmesiyle tüm kontrolör katsayıları hesaplanabilir [46].

Güç sisteminde yükte oluşacak değişimler önceden tahmin edilemeyeceği için frekans cevabındaki istenilen aşım, yükselme zamanı, yerleşme zamanı gibi zaman tanım bölgesi kriterlerinin kesin değeri bilinmez. Bununla birlikte arama uzayı içinde üç alandaki frekans hatasını en aza indirecek kontrolör katsayılarının bulunması amaçlanmaktadır. Güç sistemindeki tüm birimlerin transfer fonksiyonu ile ifade edilemeyeceğinden ve önceden tasarım kriterleri verilmemiş olduğundan bu katsayıların elle ayarlanması veya geleneksel hesap yöntemleriyle bulunması mümkün değildir. Bu nedenle PID kontrolör katsayılarının bulunmasında optimizasyon problemlerinde bir arama yöntemi olan GA kullanılacaktır.

Üç alanlı güç sistemindeki, her alandaki kontrolörlere ilişkin en uygun  $K_I$ ,  $K_P$  ve  $K_D$  kontrolör katsayısının bulunması istendiğinden, sistem dokuz değişkenli optimizasyon problemi olarak düşünülecektir. Simulink'teki benzetim modelinde kontrolör olarak Şekil 5.17'deki PID kontrolör modeli kullanılmıştır.



**Şekil 5.17:** PID kontrolör blok diyagramı

### 5.3.1. IAE başarımlı ölçütü

Sistemdeki tüm alanlara birinci saniye sonunda %1'lik bir yük artışı uygulanmış olup, 100 saniyelik zaman diliminde çalıştırılan modeldeki tüm alanlara ilişkin  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$ ,  $\Delta f_3$  frekans değişimlerinin ve alanlar arasındaki  $\Delta P_{12}$ ,  $\Delta P_{23}$ ,  $\Delta P_{31}$  güç akışının geçici durumdaki değişimlerini en iyi hale getiren PID kontrolör katsayılarının bulunması istenir. IAE başarımlı ölçütüne göre frekans hataları ve güç akışlarının her

örnekleme zamanındaki mutlak hatasını içeren uygunluk fonksiyonunun (5.13) ifadesindeki gibi ayrık verili olarak verilmiştir.

$$F_{IAE} = \sum_{k=0}^n \left( \sum_{i=1}^3 |\Delta f_i(kT)| + |\Delta P_{12}(kT)| + |\Delta P_{23}(kT)| + |\Delta P_{12}(kT)| \right) \quad (5.13)$$

Örnekleme periyodu önceki bölümdeki gibi T, 10 ms seçilmiştir. Simülasyonun çalıştırıldığı 100 saniye boyunca IAE başarımlı ölçütüne göre alanlara ilişkin mutlak frekans değişimi ve güç akışlarının mutlak değerleri 10 ms'lik aralıkla toplanmıştır. Her hata bileşenine ilişkin  $10^4$  değer toplamından oluşan uygunluk fonksiyonunun en küçük değeri, sistem cevabını en iyi hale getiren PID katsayılarını oluşturur.

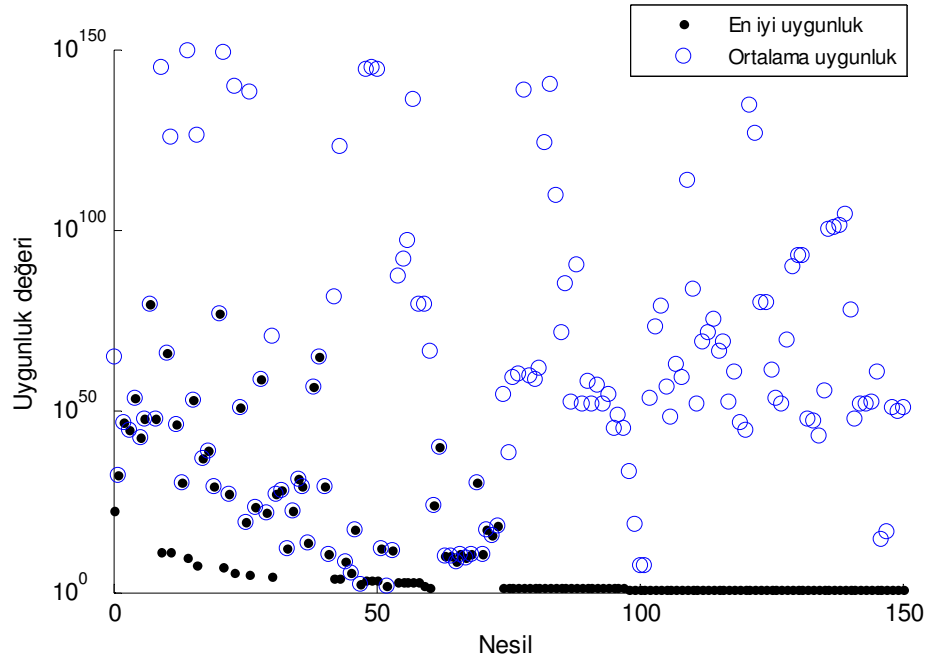
Optimizasyonda kullanılan GA parametreleri Çizelge 5.4'te gösterilmiştir. PID kontrolör katsayılarının bulunması problemi, en iyi sistem cevabını veren PI kontrolörün oransal ve integral kazanç değerlerinin bulunmasına göre 3 adet daha fazla değişken içerdiğinden problem daha geniş bir arama uzayını içerir. Her bir nesildeki birey sayısı 100 ile sınırlı tutulmuş olup, 150 nesil boyunca algoritma sürdürüldüğünde, 15 bin farklı PID kontrolör katsayısı için deneme yapılmış olur. Bu nedenle güç sistemindeki kontrolörlerin elle ayarlanması mümkün olmaz. Deneme sürecinde kullanılacak genetik operatörlerden çaprazlama katsayısı 0.8, mutasyon katsayısı ise 0.05 seçilerek genetik çeşitliliğin korunması sağlanmıştır. Ayrıca bu operatörlerin kullanılması sonucu sistemi kararsız hale getiren PID katsayılarının tüm popülasyona yayılmasını engellemek için mevcut nesil içinden en iyi uygunluk değerine sahip 5 elit birey seçilerek sonraki nesillere aktarılması sağlanmıştır.

**Çizelge 5.4 :** PID katsayılarının bulunmasında kullanılan GA parametreleri

|                      |      |
|----------------------|------|
| Popülasyon büyüklüğü | 100  |
| Nesil sayısı         | 150  |
| Çaprazlama katsayısı | 0,8  |
| Mutasyon katsayısı   | 0,05 |
| Elit birey sayısı    | 5    |

Uygunluk değerinin nesillere göre değişim grafiği Şekil 5.18'de gösterilmiştir. Sistem frekansının salınım yaptığı veya kararsız olduğu durumlarda uygunluk fonksiyonunun değeri çok fazla olacaktır. Bir nesil içerisinde tek bir bireyin bile

sistemi kararsız yapan PID kontrolör katsayılarını içermesi popülasyonun ortalama uygunluk değerinin çok büyük olmasına yol açar. Bu nedenle popülasyonun uygunluk değerinin en iyi bireye yaklaşması mümkün olmaz. Örneğin başlangıçta belirlenen uygunluk fonksiyonun değerini en küçük yapan 150. nesil sonundaki bireyin uygunluk değeri 7.465 olduğu halde bu nesil için popülasyon ortalaması  $10^{50}$  mertebesinde. Bunun nedeni algoritmada genetik çeşitliliği sağlamak için kullanılan çaprazlama ve mutasyon operatörleri sonucu kararsız bireyler elde edilme olasılığının bulunmasıdır. Sistem cevabını kararlı yapan katsayılar ile kararsız yapanların aynı grafikte gösterilmesi için uygunluk değerini gösteren y eksenini logaritmik seçilmiştir. Böylece en iyi bireyin  $10^0$  ile  $10^1$  arasındaki uygunluk değeri ile kararsız bireylerin  $10^{150}$ 'ye kadar olan uygunluk değeri aynı eksende görülebilir.

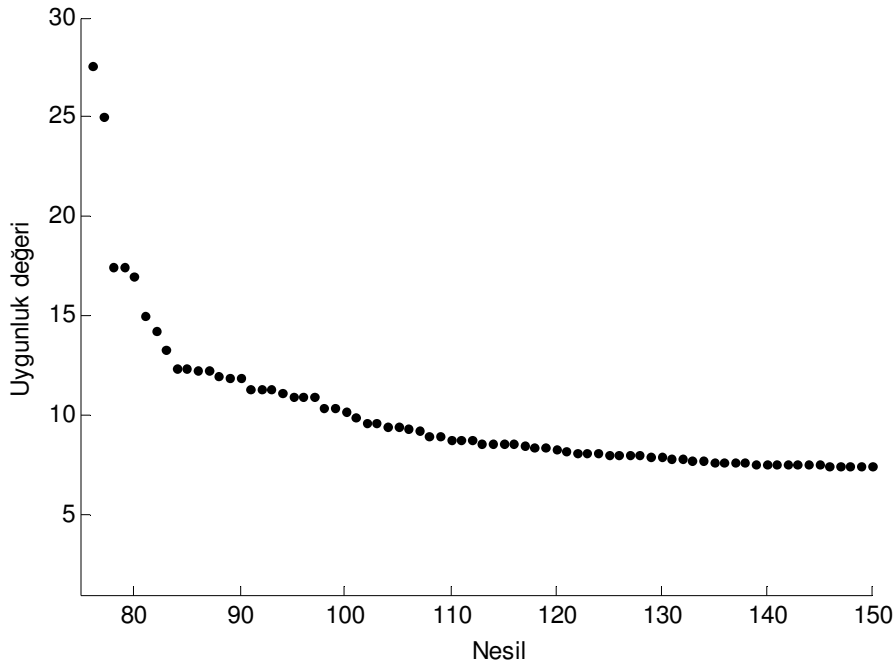


**Şekil 5.18:** GA ile PID optimizasyonunda nesillere göre uygunluk değerleri

Yüksek dereceden doğrusal olmayan enerji sisteminin modellenmesinde arama sırasında kararsız PID kontrolör katsayılarının bulunması algoritmanın daha geniş bir arama uzayında arama yaparak, yerel minimum noktasına ulaşmasını engellemeyen genetik operatörlerinin sonucudur. Mutasyon ve çaprazlama sonucu popülasyon ortalamasını yükselmesi algoritmanın başarı ölçütü olarak değerlendirilemez.

Nesiller ilerledikçe daha iyi uygunluk değerine sahip bireylerin ortaya çıkması GA'nın başarı ölçütü olarak değerlendirilebilir. Algoritmanın başlangıcında

rastlantısal olarak oluşturulan ilk popülasyondaki tüm bireylerin kararsız olduğu en iyi uygunluk değerinin  $10^{20}$  mertebesinde olmasından anlaşılabılır. En iyi uygunluk değerlerinin gelişimini görmek için 150 nesilden oluşan algoritmasının son 75 nesli Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Uygunluk değerinin  $10^1$  değerine ulaşması için yaklaşık 100 nesil geçmiştir. Her nesilde 100 birey bulunduğundan, bu uygunluk değerine 10000 adet denemeyle ulaşılmıştır. Bu nedenle güç sistemindeki kontrolör katsayılarının bulunmasında elle ayarlamamanın veya tek noktadan arama yapan yöntemlerle pek mümkün olamayacağı görülebilir. 100. nesilden sonra ise uygunluk fonksiyonundaki değişme oranı azalmıştır. Son nesildeki popülasyon içinde en iyi bireyin uygunluğu 7.465 başlangıçta belirlenen IAE başarımlı ölçütüne göre tanımlanan amaç fonksiyonunun değerini verecektir. En iyi bireyin kromozomları ise her alana ilişkin kontrolörlerin oransal, integral ve türev katsayılarını temsil eder. Bu katsayılar Çizelge 5.5’te görülmektedir. Bulunan katsayıların negatif işaretli olması



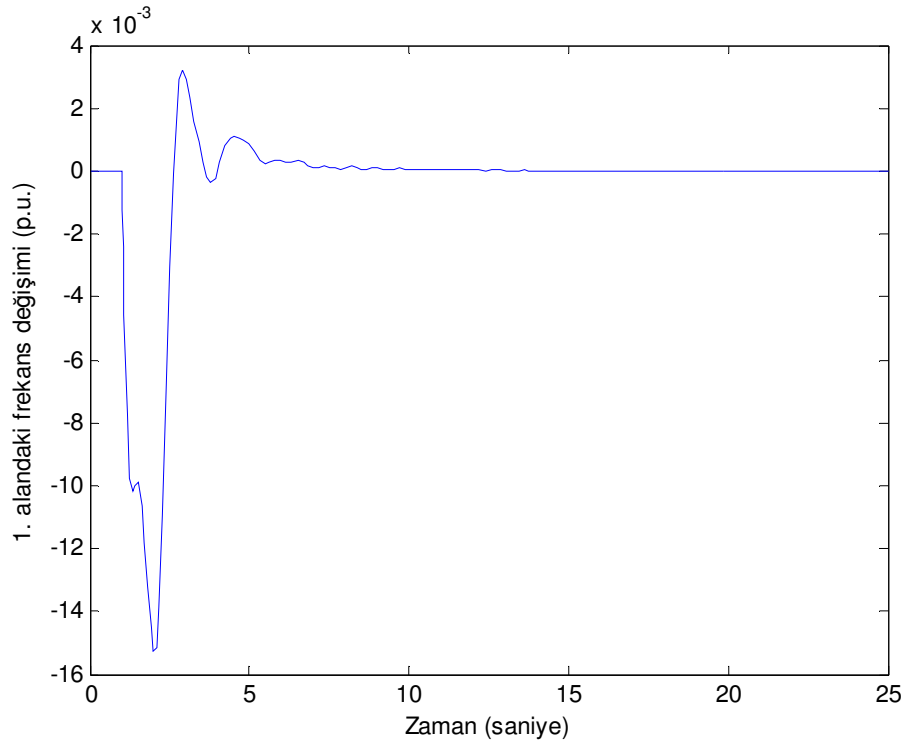
**Şekil 5.19:** GA ile PID optimizasyonunda nesillere göre en iyi uygunluk değerleri

OÜK blok diyagramında ACE’yi oluşturan alanlar arası güç akışı ve frekans değişimi geri beslemesinin pozitif yapılmış olmasındandır. Yukarıdaki çizelgede verilen katsayıların kullanılması durumunda birinci alandaki frekans değişimi  $\Delta f_1$ , Şekil 5.20’de çizilmiştir. Üç alanlı güç sisteminin başlangıçta anma frekansında çalıştığı ve alanlar arasındaki güç akışının olmadığı kabul edilmiştir. Tüm alanlara birinci saniye

sonunda %1'lik yük artışı uygulandığında proporsiyonel karakteristikli devir sayısı regülatörlerinin hız-düşü karakteristiklerine bağlı olarak frekansta düşüş gözlenir. İlk alanda yük değişiminden sonra frekans azalmaya başlamış ve 2. saniye sonunda -0.015 p.u. değerinde negatif aşım yapmıştır. En fazla aşım değeri türevsel kontrolör eklendiğinden PI kontrolöre göre daha azdır. Kullanılan PID tipindeki kontrolör frekansın tekrar 50Hz değerine getirerek sürekli hal hatasının giderilmesini amaçlar. Birinci alandaki frekansın 7 saniye sonunda  $10^{-4}$  lik bölge içine girdiği görülür. Yerleşme zamanının da PI kontrolörden daha iyi olduğu görülür.

**Çizelge 5.5 :** PID kontrolör katsayıları (IAE)

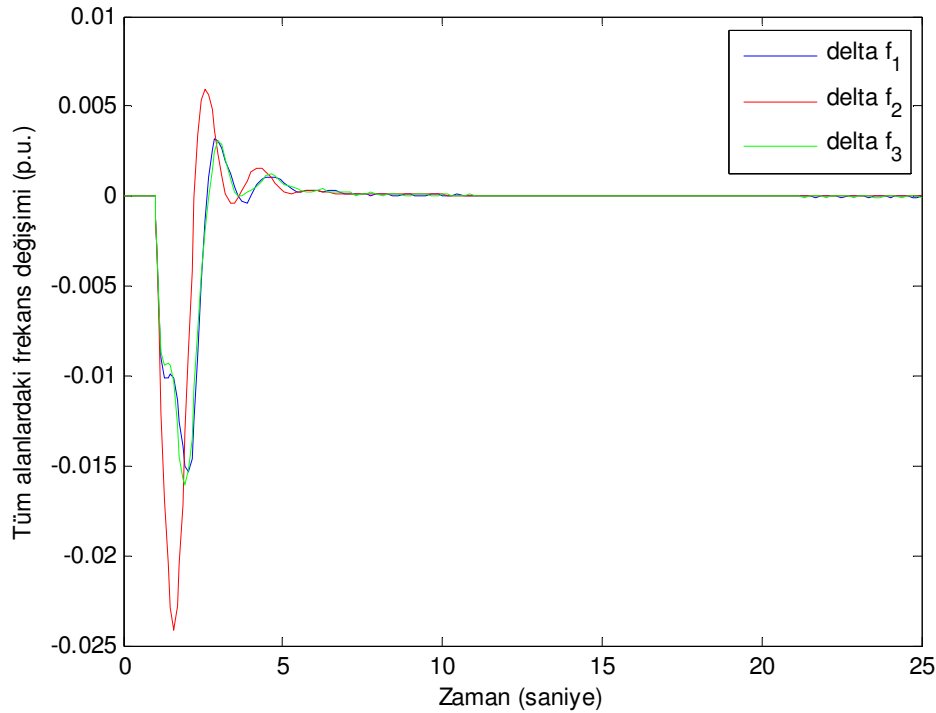
| Kontrolör katsayıları | Alan 1  | Alan 2  | Alan 3  |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| $K_P$                 | -5.0080 | -0.2698 | -4.7123 |
| $K_I$                 | -5.7995 | -0.9856 | -4.2331 |
| $K_D$                 | -1.3822 | -0.1589 | -1.1367 |



**Şekil 5.20:** PID kontrolör ile 1. alandaki frekans değişimi  
( $\Delta P_{L1}=\Delta P_{L2}=\Delta P_{L3}=0.01$  p.u)

Diğer alanlardaki zamana göre frekans değişimleri Şekil 5.21'de gösterilmiştir. Tüm alanlarda birinci saniye sonunda %1'lik yük artışı olduğundan her alana ilişkin

frekansta geçici azalma olacaktır. İlk negatif aşım değeri 1. ve 3. alanlardaki termik birimlerde -0.015 civarında, 2. alandaki gaz biriminde ise yaklaşık -0.023 olduğu görülür. En büyük aşım değerlerinin birimler arasında farklılık göstermesi devir sayısı regülatörünün hızda azalma özelliği ile türbin ve kazan modellemelerindeki farklılıktan kaynaklanır. Her alandaki frekans değişiminin ilk 10 saniye içinde sürekli hal değeri olan sıfıra ulaştığı açıktır. Güç sisteminde yük talebi sürekli değiştiğinden frekansın anma en kısa sürede tekrar anma değerine dönmesi büyük önem taşır. PID kontrolör kullanıldığı durumda tüm alanlardaki frekans cevabı PI kontrolöre kıyasla daha az aşım, yükselme ve yerleşme zamanına sahip olması nedeniyle tercih edilmelidir

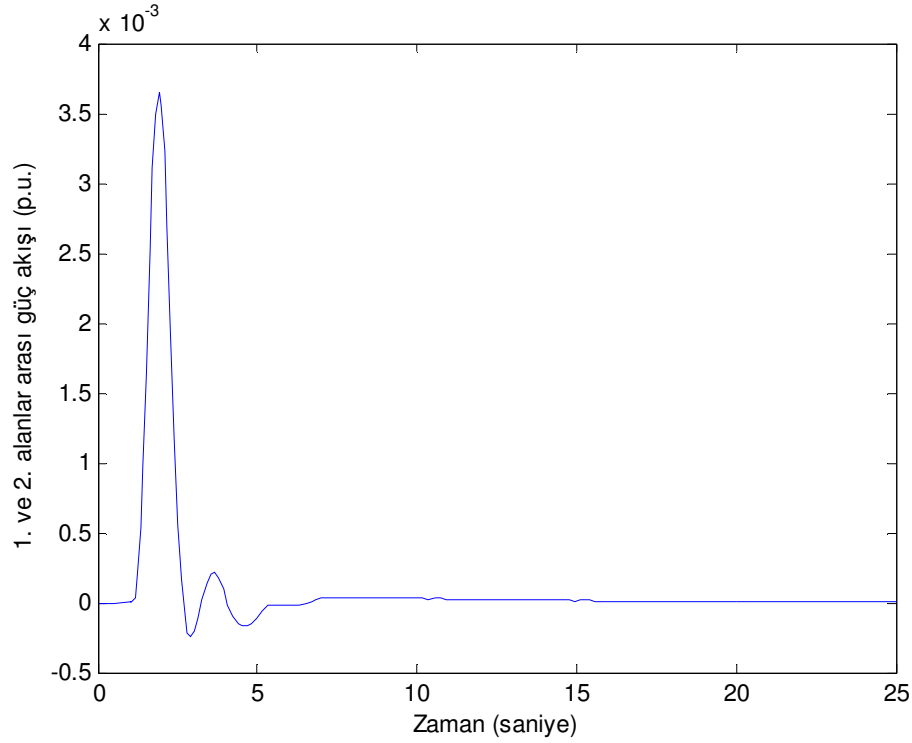


**Şekil 5.21:** PID kontrolör ile tüm alanlardaki frekans değişimleri  
( $\Delta P_{L1}=\Delta P_{L2}=\Delta P_{L3}=0.01$  p.u)

OÜK'nde komşu sistemler arasındaki her bağlantı hattı üzerindeki güç akışı en düşük düzeyde olmalıdır. Birinci alan ile ikinci alan arasındaki bağlantı hattındaki  $\Delta P_{12}$  güç değişimi Şekil 5.22'de gösterilmiştir. Tüm alanlara uygulanan 0.01 p.u.'luk yük artışı sonucu ilk iki alan arasındaki en büyük güç akışı 0.0036 p.u. değeri ile 2. saniye sonunda elde edilir. Her alanda yükte oluşacak değişimler bu alandaki üretim

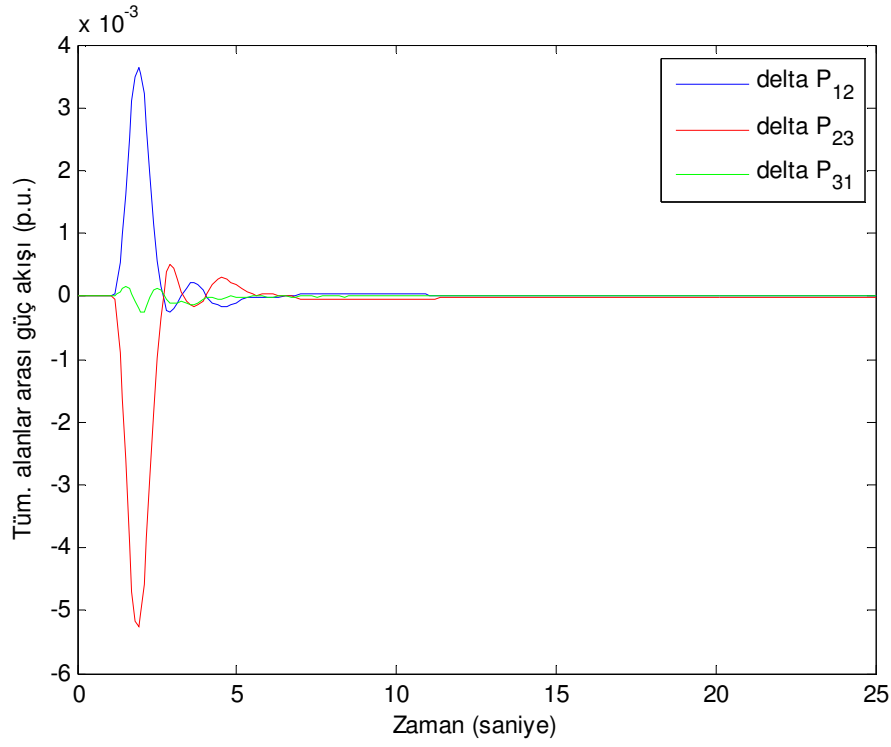


birimleri tarafından karşılanacağından ilk iki alan arasındaki güç akışı 7. saniye sonunda tekrar sıfır değerine döner.

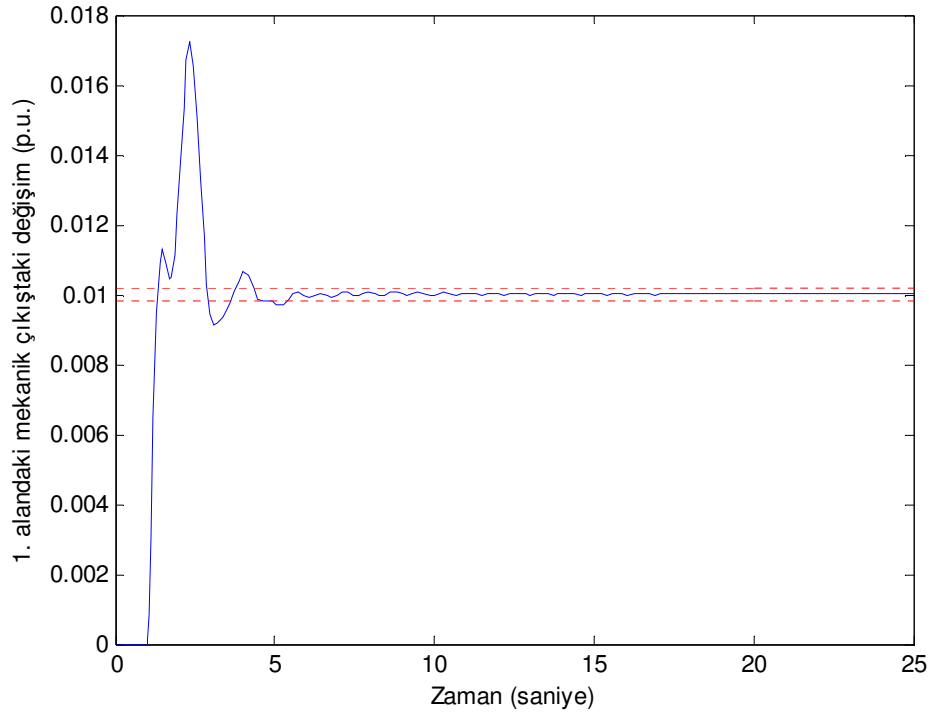


**Şekil 5.22:** PID kontrolör ile 1. ve 2. alan arası güç akışı  
( $\Delta P_{L1}=\Delta P_{L2}=\Delta P_{L3}=0.01$  p.u)

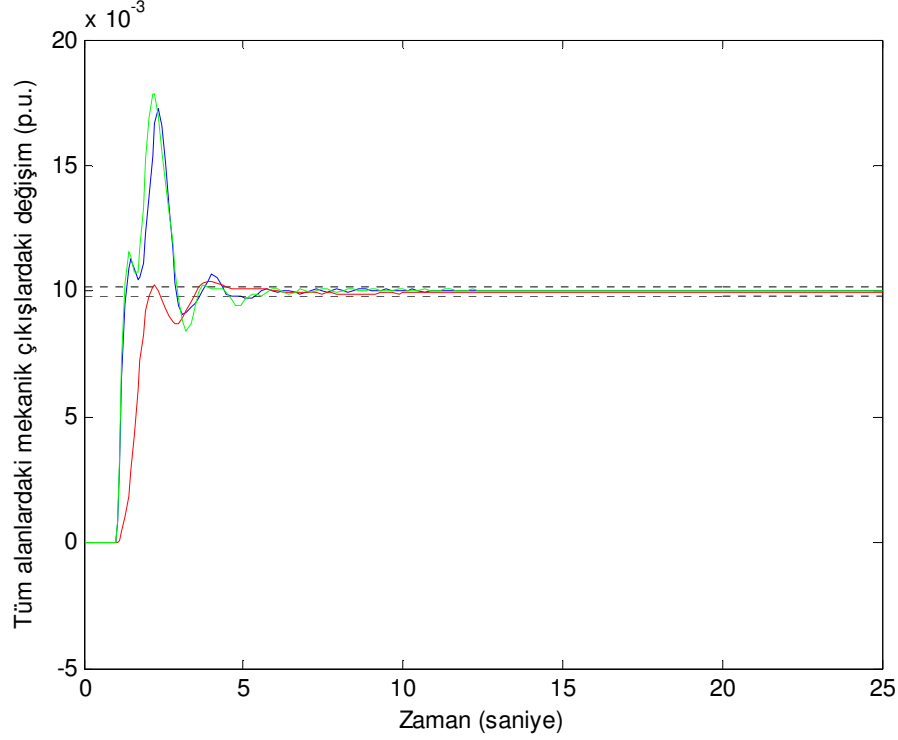
Tüm bağlantı hatları üzerindeki güç akışının zamana göre grafiği Şekil 5.23’de görülmektedir. Yük tüm alanlarda birinci saniye sonunda 0.01 p.u. kadar arttığında alanlar arası güç değişiminin çizelge değerlerinde olması gerekir. Alan kontrol hatası, frekans sapması ile bağlantı hattı gücünün değişimini içerdiğinden sürekli halde sistem frekansı 50 Hz’de, bağlantı hattı güçleri ise bu bölgedeki üretim birimlerinin kurulu güçleri yük artışını karşılayabildiği durumda sıfır değerinde olmalıdır. Sistemde kullanılan gaz türbini ve kazan modelinin parametreleri nedeniyle termik birimlere göre daha geç tepki verir. Bu nedenle tüm alanlarda aynı oranda güç artışı olmasına karşın geçici durumda 1. ve 3. alanlardan 2. alana bir güç akışı görülür. Burada  $\Delta P_{23}$ ’ün negatif aşım yapması 3. alandan 2. alana güç akışı olduğunu gösterir. 7 saniye içinde  $-10^{-4}$  ile  $+10^{-4}$  arasındaki bölgeye girmektedir. Sürekli durumda alanlar arasındaki bağlantı hatlarındaki değişimin sıfır değerinde olduğundan her alandaki yük artışının bu alandaki üretim birimlerince karşılandığı anlaşılmaktadır.



**Şekil 5.23:** PID kontrolör tüm. alanlar arası güç akışı ( $\Delta P_{L1}=\Delta P_{L2}=\Delta P_{L3}=0.01$  p.u)



**Şekil 5.24:** PID kontrolör ile 1. alandaki mekanik güçteki değişim ( $\Delta P_{L1}=\Delta P_{L2}=\Delta P_{L3}=0.01$  p.u)



**Şekil 5.25:** PID kontrolör ile tüm alanlardaki mekanik güçteki değişim  
 $(\Delta P_{L1}=\Delta P_{L2}=\Delta P_{L3}=0.01 \text{ p.u.})$

Her alana uygulanan uygulanan %1’lik yük artışı sonucu, 1. alana ilişkin türbin çıkışındaki mekanik güçteki değişim Şekil 5.24.’de görülmektedir. Yük değişiminden sonra buhar türbininde vanaları besleyen kontrol işareti yükselmesi sonucu türbin çıkışı %70 aşım yapmıştır. Yük uygulanmasından 4.4 saniye sonra ise yanıt 0.0102 ile 0.0098 arasındaki bölgeye alttan giriş yapmıştır. Mekanik çıkıştaki değişimin sürekli durum değeri ise bu bölgeye uygulanan yük artışına eşit olup 0.01 p.u.’dur.

Diğer alanlardaki mekanik güç çıkışındaki değişimler Şekil 5.25’te gösterilmiştir. Yük değişiminden sonra en büyük aşım değerlerini karşılaştırdığımızda 1. alandaki buhar türbininin %70, 3. alandaki buhar türbininin %75, gaz türbininin ise en fazla %5 pozitif aşım yaptığı görülür. Gaz türbininin mekanik çıkışı sönüm oranı daha yüksek bir sistem davranışı göstermekte olup, yükselme zamanı daha fazla, en yüksek aşım değeri ise diğer türbinlere göre daha az olmaktadır. Mekanik çıkışların sürekli hal değerinin %2 değişimi arasındaki bölgeye girmesi için girmesini sağlayan yerleşme zamanları 1. alan için 4.4, 2. alan için 3.4, 3. alan için 4.2 saniyedir. Buhar türbinleri arasındaki fark kontrolör katsayılarının aynı olmamasından, gaz türbinindeki fark ise türbin ve kazan modellerinin buhar türbinlerine göre farklı olmasından kaynaklanır. Sürekli durumda tüm alanlardaki mekanik çıkışlar ise bu

alanlara uygulanan yük artışına eşit olacaktır. Her alana 1. saniye sonunda 0.01 p.u. yük artışı uygulandığından, mekanik çıkışlardaki değişim de sürekli durumda bu değere ulaşır.

### 5.3.2. ISE, ITAE, ITSE başarımlı ölçütleri

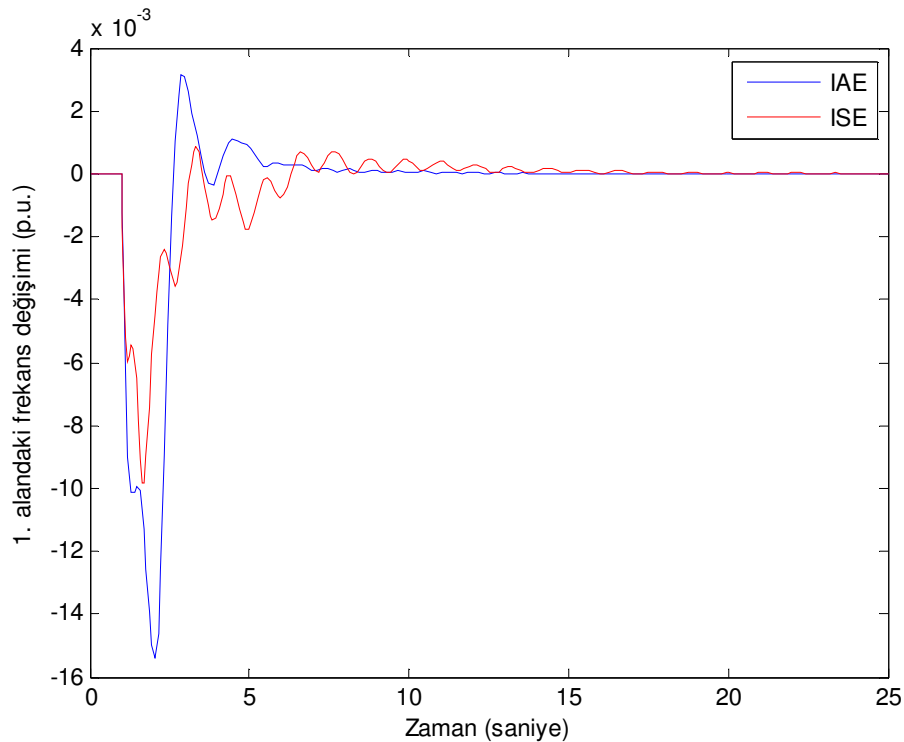
GA başlatılırken belirlenen amaç fonksiyonu her alandaki frekans hatası ve alanlar arasındaki güç akışlarının mutlak değerinin toplamı olarak tanımlanan IAE başarımlı ölçütü seçilmişti. Çoğu kontrol sistemi için düzeltilmek istenen değerleri temel alan bir başarımlı ölçütü belirlenir. Mutlak hatanın integrali yerine, hatanın karesinin integrali, mutlak değerinin zamanla çarpımı, hatanın karesinin zamanla çarpımı gibi farklı başarımlı ölçütleri kullanılabilir. Algoritmada amaç fonksiyonu olarak farklı başarımlı ölçütlerinin kullanılması durumunda bulunacak kontrolör katsayıları da değişecektir. Çizelge 5.6'da IAE, ISE, ITAE, ITE+ITAE, ITSE, ITSE+ITAE başarımlı ölçütlerine göre GA kullanılarak bulunan tüm alanlara ilişkin PID kontrolör katsayıları verilmiştir. IAE başarımlı ölçütüne göre PID kontrolör parametrelerinin bulunması önceki bölümde anlatılmış ve her alana ilişkin frekans cevabı, güç akışı ve mekanik çıkıştaki değişimler şekiller ile gösterilmişti. Buradaki hesaplamalarda da karşılaştırmanın daha doğru yapılabilmesi için GA parametreleri aynı seçilmiş, sadece kullanılacak amaç fonksiyonu değiştirilerek yeni kontrolör katsayıları elde edilmiştir. Tüm katsayıların negatif olması OÜK blok diyagramındaki frekans hatası ve alanlar arası güç akışındaki geri beslemenin pozitif olması nedeniyledir.

**Çizelge 5.6 :** Farklı başarımlı ölçütlerine göre PID kontrolör katsayıları

| Kontrolör katsayıları | IE      | ISE     | ITAE    | ISE + ITAE | ITSE     | ITAE + ITSE |
|-----------------------|---------|---------|---------|------------|----------|-------------|
| $K_{P1}$              | -5.0080 | -5.4714 | -4.4906 | -3.1164    | -5.3250  | -4.5511     |
| $K_{P2}$              | -0.2698 | -0.9118 | -0.6369 | -0.6458    | -0.6994  | -0.4790     |
| $K_{P3}$              | -4.7123 | -4.5075 | -3.3045 | -3.2784    | -8.7420  | -3.9165     |
| $K_{I1}$              | -5.7995 | -2.2124 | -6.9433 | -4.7854    | -12.8890 | -6.7921     |
| $K_{I2}$              | -0.9856 | -4.9694 | -1.5843 | -2.8195    | -2.2038  | -1.5615     |
| $K_{I3}$              | -4.2331 | -2.5945 | -6.9193 | -5.2043    | -9.7838  | -7.0894     |
| $K_{D1}$              | -1.3822 | -3.4335 | -2.4147 | -2.4555    | -1.7897  | -1.3032     |
| $K_{D2}$              | -0.1589 | -1.1312 | -0.3640 | -0.5451    | -0.8640  | -0.2355     |
| $K_{D3}$              | -1.1367 | -4.1737 | -0.9221 | -1.1688    | -2.3909  | -1.2886     |

Hatanın karesinin integralinin alındığı ISE başarımlı ölçütünün ifadesi (5.14)'te verilmiştir. Bu ölçüte göre her örnekleme zamanındaki frekans hataları ve güç akışındaki değişimlerinin karesi alınarak, simülasyonun çalıştığı süre boyunca tüm örnekleme zamanlarındaki değerler toplanır. Her değerin karesi alındığı için en büyük aşım civarındaki örneklemelerin diğer noktalara bağlı oranı IAE'ye göre daha fazla olacaktır. Bu nedenle ISE başarımlı ölçütünün en büyük aşım değerini azaltması beklenir. Şekil 5.26'da ise IAE ile ISE uygunluk fonksiyonları kullanılarak bulunan PID katsayılarına göre 1. alandaki frekans değişimi görülmektedir. Buna göre tüm alanlara uygulanan yük artışından sonra frekansta meydana gelen en büyük negatif aşım değeri IAE ile  $-15,4 \cdot 10^{-3}$  p.u. iken ISE endeksinde  $-9,9 \cdot 10^{-3}$ 'e inmiştir. Buna karşın bu bölgedeki frekans salınım değerinin  $2 \cdot 10^{-4}$  p.u.luk (0.01 Hz) bölge içine girmesi için gerekli süre ISE'de 13.3 iken IAE'de 6.8 saniye gibi daha düşük bir değer olmuştur. Bu nedenle ISE ölçütünün en büyük aşım değerini azalttığı halde yerleşme zamanını artırdığı görülmür.

$$F_{ISE} = \sum_{k=0}^n \left( \sum_{i=1}^3 \Delta f_i^2(kT) + \Delta P_{12}^2(kT) + \Delta P_{23}^2(kT) + \Delta P_{31}^2(kT) \right) \quad (5.14)$$

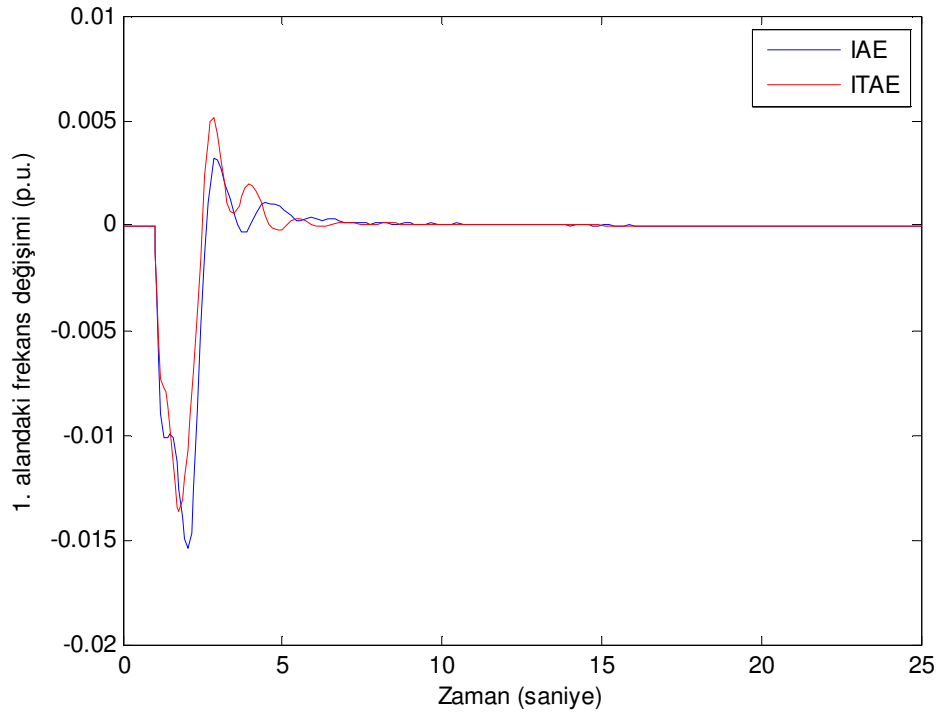


**Şekil 5.26:** PID kontrolör için IAE ve ISE başarımlı ölçütleri karşılaştırılması

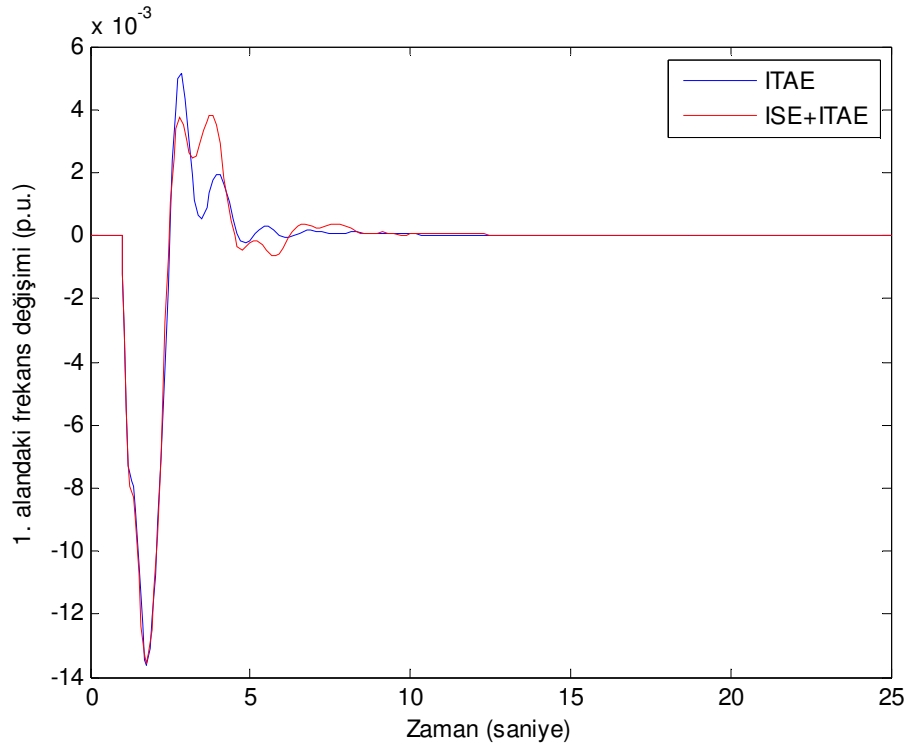
Mutlak hatanın zamanla çarpımının dikkate alındığı ITAE başarımlı ölçütünün ifadesi (5.15)'de verilmiştir. Bu ölçüte göre her örnekleme zamanındaki frekans hataları ve güç akışındaki değişimlerin mutlak değerlerinin toplamı zamanla çarpılmıştır. Simülasyondaki süre ilerledikçe t değeri artacağından, hatanın değeri de daha büyük olacaktır. Bu nedenle ITAE başarımlı ölçütünün frekansın sürekli hal değerine daha kısa sürede ulaşmasını sağlaması beklenir. Şekil 5.27'de IAE ve ITAE ile bulunmuş PID kontrolör katsayılarının 1. alandaki frekans cevabı görülmektedir. Şekle göre her alana %1 yük artışından sonra frekanstaki en büyük sapma IAE ile  $-15,4 \cdot 10^{-3}$  p.u., ITAE ile  $-13,6 \cdot 10^{-3}$  değerindedir. ITAE'nin frekans salınım değerinin  $2 \cdot 10^{-4}$  p.u.luk (0.01 Hz) bölge içine girmesi için gerekli süre IAE'de 6.8 saniye iken ITAE'de 5.7 gibi daha düşük bir değer bulunmuştur. Bu karşılaştırmadan ITAE'nin IAE'ye göre hem en büyük aşımı, hem de yerleşme zamanını iyileştirdiği görülür. Bu nedenle bundan sonraki başarımlı ölçütlerinin karşılaştırılmasında ITAE kullanılacaktır.

$$F_{ITAE} = \sum_{k=0}^n kT \left( \sum_{i=1}^3 |\Delta f_i(kT)| + |\Delta P_{12}(kT)| + |\Delta P_{23}(kT)| + |\Delta P_{31}(kT)| \right) \quad (5.15)$$

En düşük aşım miktarı ISE, en iyi yerleşme zamanının ise ITAE başarımlı ölçütünün kullanılması sonucu elde edilmişti. Uygunluk fonksiyonu, ISE ve ITAE'nin toplamı olarak da belirlenebilir. Burada ISE ölçütünde  $10^{-2}$  mertebesinde sayıların karesinin alınması sonucu uygunluk fonksiyonun değeri ITAE'ye daha düşük çıkar. Bu fonksiyonları ölçeklenmesi amacıyla ISE uygunluk fonksiyonunun 100 ile çarpılarak kullanılmıştır. Şekil 5.28'de ITAE ve ISE+ITAE uygunluk fonksiyonları kullanılarak bulunan PID katsayılarına göre 1. alandaki frekans değişimi görülmektedir. Yük değişiminden sonraki en büyük negatif aşım her iki ölçütte de  $-13,6 \cdot 10^{-3}$  değerindedir. Buna karşın ISE+ITAE'nin daha küçük genlikli en büyük pozitif aşımı azalttığı görülür. Frekanstaki değişimin  $2 \cdot 10^{-4}$  p.u.luk bölge içine girmesi için ITAE'deki 5.7 saniyeden ISE+ITAE'de 8.4'e çıkmıştır. Bu nedenle ISE+ITAE ölçütünün en büyük aşım değerinde bir azalma sağlamamasına rağmen yerleşme zamanını arttırdığı görülür.



**Şekil 5.27:** PID kontrolör için IAE ve ITAE başarımlı ölçütleri karşılaştırılması



**Şekil 5.28:** PID kontrolör için ITAE ve ISE+ITAE başarımlı ölçütleri karşılaştırılması

$$F_{ISE+ITAE} = \sum_{k=0}^n kT \left( \sum_{i=1}^3 |\Delta f_i(kT)| + |\Delta P_{12}(kT)| + |\Delta P_{23}(kT)| + |\Delta P_{31}(kT)| \right) + 100 \left( \sum_{i=1}^3 \Delta f_i^2(kT) + \Delta P_{12}^2(kT) + \Delta P_{23}^2(kT) + \Delta P_{31}^2(kT) \right) \quad (5.16)$$

Hatanın zamanla çarpımının karesinin hesaplandığı ITSE başarımlı ölçütünün ifadesi (5.17)'de verilmiştir. Bu ölçüte göre her örnekleme zamanındaki frekans hataları ve güç akışındaki değişimlerin karelerinin zamanla çarpımı toplanır. Hatanın değeri zamanla çarpımına bağlı olduğundan frekansın yerleşme zamanının daha kısa olması, hatanın karesi alındığından aşım da azalma görülmesi beklenir. Şekil 5.29'da ITSE ile bulunmuş kontrolör katsayılarının 1. alandaki frekans cevabının ITAE ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekle göre her alana %1 yük artışından sonra frekanstaki en büyük sapma ITSE ile  $-8,5 \cdot 10^{-3}$  p.u., ITAE ile  $-13,6 \cdot 10^{-3}$  değerindedir. ITSE başarımlı ölçütü en büyük aşımı ITAE'ye göre %37,5 azaltmıştır. Bu değerin ISE'de bulunmuş aşımından da daha az olduğundan şimdiye kadar bulunmuş en küçük aşımdır. Frekans salınım değerinin  $2 \cdot 10^{-4}$  p.u.luk (0.01 Hz) bölge içine girmesi için gerekli süre de ITAE'de 5.7 iken ITSE'de 7.6 saniyedir. Yerleşme zamanını çok fazla arttırmadan aşımı düzeltmesi nedeniyle ITSE başarımlı ölçütünün üç alanlı güç sistemindeki PID kontrol katsayılarının bulunmasında iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.

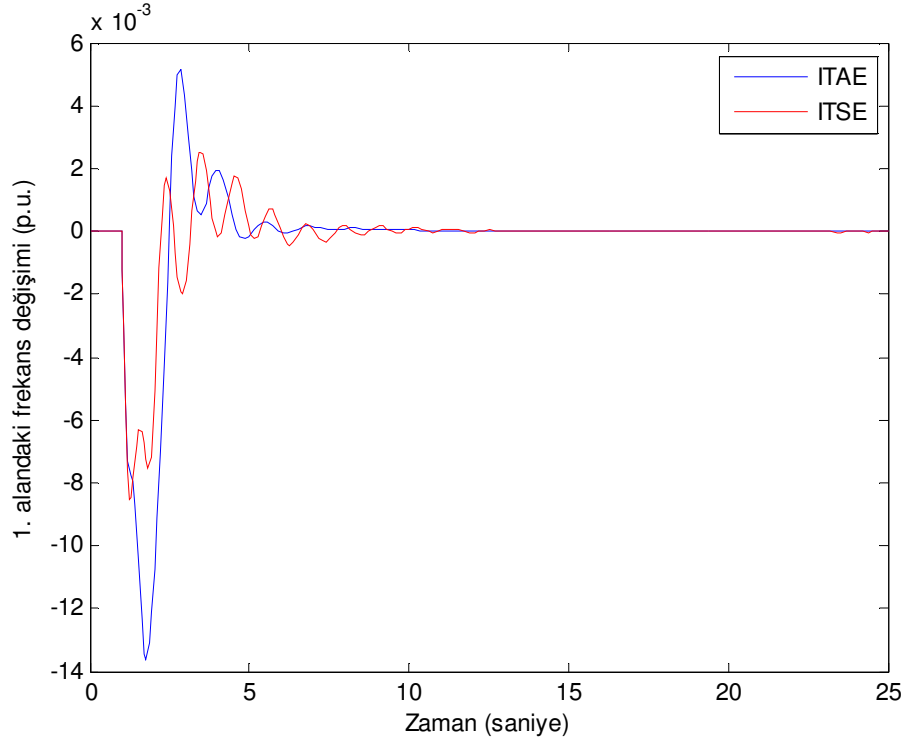
$$F_{ITSE} = \sum_{k=0}^n kT \left( \sum_{i=1}^3 \Delta f_i^2(kT) + \Delta P_{12}^2(kT) + \Delta P_{23}^2(kT) + \Delta P_{31}^2(kT) \right) \quad (5.17)$$

Hatanın karesi ile mutlak değerinin toplamının zamanla çarpımının hesaplandığı ITAE+ITSE başarımlı ölçütünün ifadesi (5.18)'de verilmiştir. Şekil 5.30'da ITAE ve ITAE+ITSE ile bulunmuş PID kontrolör katsayılarının 1. alandaki frekans cevabı görülmektedir. Her alana %1 yük artışı uygulanmasından sonra frekanstaki en büyük sapma ITAE+ITSE ile  $-13,2 \cdot 10^{-3}$  p.u ile ITAE'den çok az bir miktar daha iyidir. Fakat frekans salınım değerinin  $2 \cdot 10^{-4}$  p.u.luk (0.01 Hz) bölge içine girmesi için gerekli sürenin 5.7'den 6.2 saniyeye çıkmıştır. Bu nedenle uygunluk fonksiyonun iki farklı başarımlı ölçütünün toplamı olarak kullanılması güç sistemindeki PID kontrolör katsayılarının bulunmasında avantaj sağlamadığı görülür. Bu tip kontrolörler için en



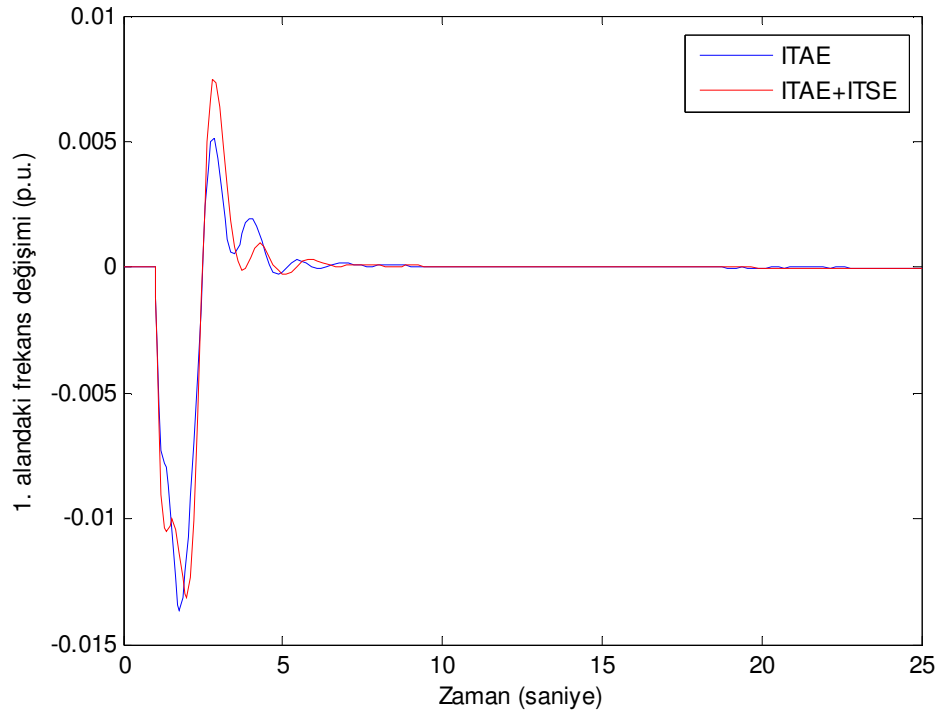
iyi aşım değerinin yerleşme zamanını fazla arttırmadan ITSE başarıım ölçütünde elde edilmiştir.

$$F_{ITSE+ITAE} = \sum_{k=0}^n kT \left( \sum_{i=1}^3 (\Delta f_i^2(kT) + |\Delta f_i(kT)|) + \Delta P_{12}^2(kT) + |\Delta P_{12}(kT)| + \Delta P_{23}^2(kT) + |\Delta P_{23}(kT)| + \Delta P_{31}^2(kT) + |\Delta P_{31}(kT)| \right) \quad (5.18)$$

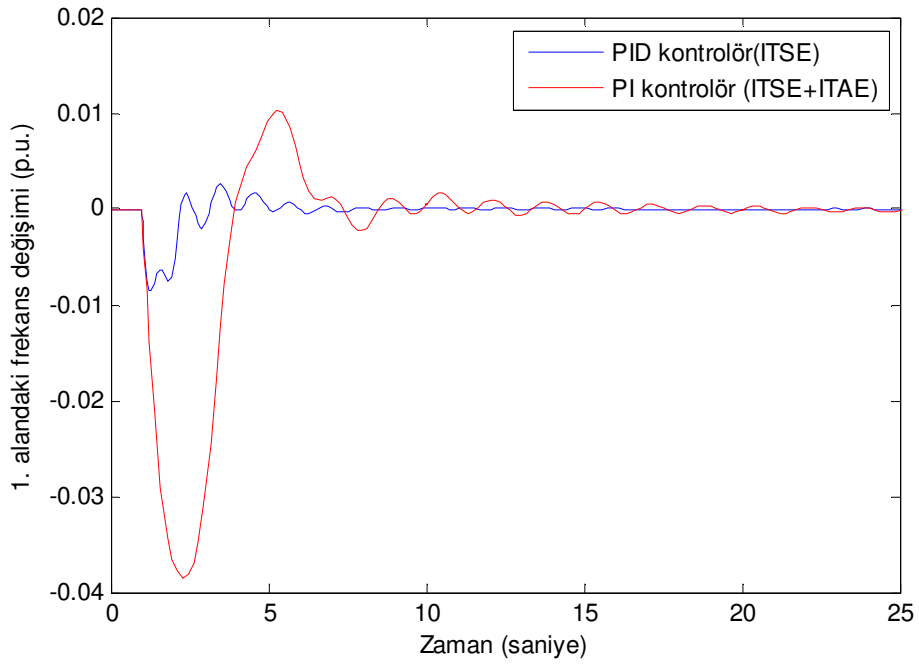


**Şekil 5.29:** PID kontrolör için ITAE ve ITSE başarıım ölçütleri karşılaştırılması

Önceki bölümde PI tipi kontrolörde en iyi frekans cevap karakteristiğinin ITSE+ITAE amaç fonksiyonu kullanıldığı durumda elde edilmişti. Bu PI kontrolörleri PID kontrolörler ile karşılaştırıldığında 1. alandaki frekans değişimi Şekil 5.31'deki gibi olmaktadır. Buna göre her alana %1 yük artışı uygulandıktan sonra frekanstaki en büyük sapmanın PID kontrolör ile  $-8,5 \cdot 10^{-3}$  p.u. değerinde olup PI kontrolöre oranla %80 daha az olduğu görülmektedir. Benzer çekilde frekansın 0.01 Hz bölgesi içine girmesi PID kontrolör ile 5.7 saniye iken PI kontrolörde 36 saniye civarındadır. Sürekli durumda her iki kontrolör ile de nominal frekans değerine ulaşmasına karşın, PID kontrolörün geçici durumdaki frekans cevabı ile PI kontrolörden üstündür. Bu nedenle bundan sonraki ekonomik dağıtım modellemesinde PID kontrolör kullanılacaktır.



**Şekil 5.30:** PID kontrolör için ITAE ve ITAE+ITSE başarımlı ölçütleri



**Şekil 5.31:** PI ve PID kontrolör karşılaştırması

#### 5.4. Ekonomik Dağıtım Modeli

ED problemi, elektrik enerjisinin toplam üretim maliyeti en düşük olacak şekilde üretim birimleri arasında paylaştırılmasını amaçlar. Klasik çözüm yöntemlerinden Lambda iterasyon, Gradyan ve Newton yöntemlerinde Lagrange fonksiyonunun türevinden yararlanılır. Fakat termik birimlerin modelinde vanaların açma-kapama anlarında meydana gelen kısılma kayıpları nedeniyle giriş-çıkış eğrileri gerçekte süreksizlik noktaları içermektedir. Bu nedenle türevi alınamayan maliyet fonksiyonların oluşan ED probleminin çözümünde genetik programlama gibi arama algoritmaları kullanılmalıdır.

Bu yüksek lisans çalışmasında yapılan üç alanlı güç sisteminde ED eklenmiş OÜK, Matlab Simulink programında Şekil 5.25'teki gibi modellenmiştir. Güç sistemindeki birimlerin  $P_1$ ,  $P_2$  ve  $P_3$  kazançları olarak gösterilen MW cinsinden üretimler değişken olarak atanmış ve yakıt maliyet eğrilerine giriş olarak verilmiştir. Yakıt maliyet eğrileri olarak belirtilen  $f(u)$  blok diyagramlarında TL/saat cinsinden her santrale ilişkin maliyetleri hesaplar. Güç sistemindeki her üretim biriminin maliyetleri toplanarak ise toplam üretim maliyeti bulunur. Bu maliyet çıkış Matlab çalışma ortamına aktarılmış olup GA ile  $P_1$ ,  $P_2$  ve  $P_3$  kazançlarının bulunmasındaki uygunluk fonksiyonunun değeri olarak kullanılır.

OÜK modelinde frekans, bağlantı hattı gücü, mekanik güç çıkış gibi değerlerin değişimler elde edileceğinden, santrallerin başlangıç anındaki üretim değerlerinin verilmesi gerekir. Bu değerler sabit olarak Şekil 5.32'deki blok diyagramda gösterilmiştir. Simülasyonun çalıştırıldığı andaki bu üretimler, santrallerin yakıt maliyet fonksiyonları dikkate alınarak GA ile bulunmuş olup çözüme ilişkin ayrıntılar ileride verilmiştir. Değerleri yine GA ile hesaplanan maliyeti en aza indiren üretim birimlerine ilişkin  $P_1$ ,  $P_2$  ve  $P_3$ , başlangıç anındaki değerlerle karşılaştırılarak üretimde ne kadar değişme olacağı bulunur. MW cinsinden değişimler p.u. değerine çevrilmiş ve 30 saniyelik periyotlarla OÜK blok diyagramına giriş olarak verilmiştir. Güç sistemlerinde ED normal olarak 5-30 dakikalık periyotlarla yapılmaktadır. Simülasyonda yük değişimleri, frekanstaki, mekanik çıkışlardaki, bağlantı hatlarındaki ve toplam maliyetteki değişimlerin daha iyi görülebilmesi amacıyla 50 saniye boyunca çalışmış olup, ED'nin 30. saniyede sisteme etki etmesi istenmiştir.

Üretim birimlerine ilişkin yakıt maliyet fonksiyonları vanaların açılma anlarındaki kayıpları da dikkate aldığımızda (5.19)'de verilen eşitlikle ifade edilir. İki buhar bir

gaz türbininden oluşan sistemdeki üç üretim birimine ilişkin katsayıların bulunmasında [48, 49] nolu referanslardaki makaleler, Türkiye’deki elektrik enerjisinin güncel birim üretim maliyetleri, Ambarlı, Seyitömer ve Soma B termik santrallerinin kurulu güç ve birimlerin üretim kapasiteleri göz önüne alınmış olup, bulunan değerler Çizelge 5.7’te verilmiştir.

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \times \sin(f_i(P_{imin} - P_i))| \quad (5.19)$$

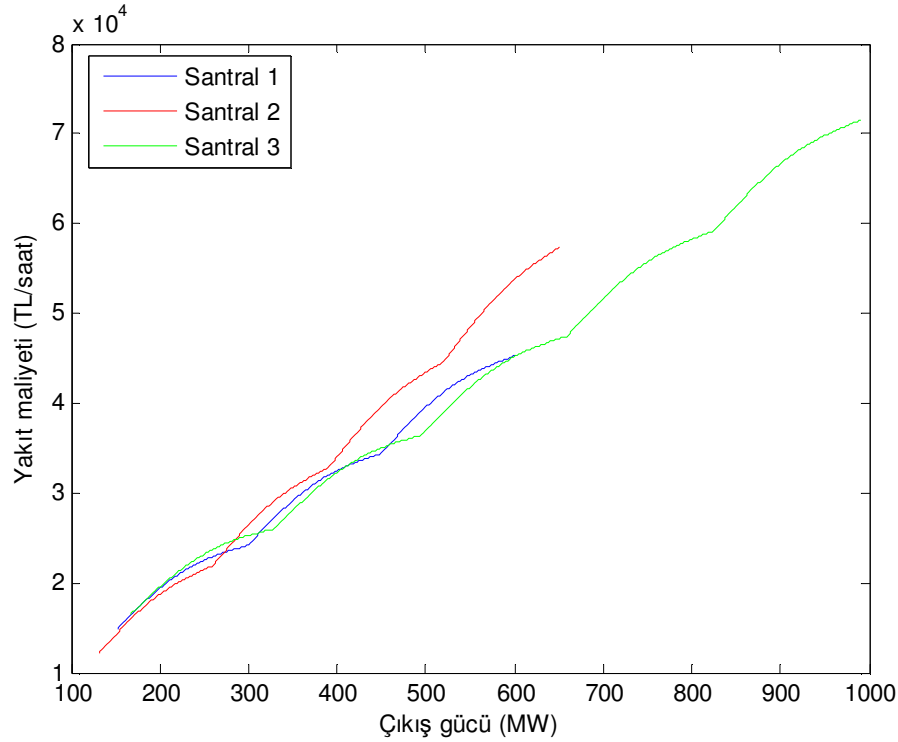
**Çizelge 5.7 : Yakıt maliyet katsayıları**

|           | $a_i$ | $b_i$ | $c_i$   | $e_i$ | $f_i$  | $P_{imin}$ | $P_{imax}$ |
|-----------|-------|-------|---------|-------|--------|------------|------------|
| Santral A | 5770  | 56.95 | 0.01458 | 1800  | 0.0209 | 150        | 600        |
| Santral B | 2920  | 65.76 | 0.02756 | 1500  | 0.0242 | 130        | 650        |
| Santral C | 6608  | 53.40 | 0.01172 | 1950  | 0.0190 | 165        | 990        |

Üretim birimlerine ilişkin Çizelge 5.7’de verilen katsayıların yakıt maliyet eğrileri Şekil 5.33’teki gibi olmaktadır. 1. santral 150 MW’lık 4 birimden, 2.si 130 MW’lık 5 birimden, 3.sü ise 165 MW’lık 6 birimden oluşmaktadır. Kararlı çalışma için her santralde ilk birimin devrede olması gerektiği kabul edilerek minimum güçler belirlenmiştir. Şekilden her santraldeki yeni birimin devreye girmesi sırasında süreksizlik noktaları görülmektedir. Santrallerin izin verilen en düşük güçte çalıştığı durumda yakıt maliyetinin 2 nolu gaz türbinli santralde en düşük olduğu görülür. Bunun sebebi kurulum maliyetinin buhar türbinli santrallere göre daha düşük düzeyde olmasındandır. Santrallerde yüklenme oranı arttıkça birim maliyetin düşecektir. Tam güçle çalışırken elektriğin birim maliyeti sırasıyla santrallerde sırasıyla 75.4, 88.2, 72.2 TL/MWsaat olarak hesaplanmıştır. Burada gaz türbinli 2 nolu termik santralde üretim maliyetinin en yüksek, buhar türbinli 3 nolu santralde ise en düşük olacağı sonucu çıkarılır.

OÜK, değişimlerle ilgilendiğinden başlangıçtaki santral üretimlerinin verilmesi gerekir. Kullanılan yakıt maliyet katsayılarına göre toplam üretimin 445 ile 2240 MW arasında değerler aldığı görülecektir. Başlangıçta toplam üretim kapasitesinin %67’sinin kullanıldığı varsayımı yapılarak 1500 MW’lık bir yük talebinin olduğu kabul edilmiştir. Üç alanlı güç sisteminde, 1. saniye sonunda sistemdeki her alana uygulanan %1’lik yük artışı sonucu geçici haldeki alanlar arası güç akışındaki değişimin daha iyi görülebilmesi amacıyla başlangıçta her alandaki üretimin yük

talebine eşit olduğu, alanlar arası güç akışı olmadığı kabulü yapılmıştır. Kullanılacak amaç fonksiyonu (5.20)'de verilmiş olup her üretim birimine ilişkin yakıt maliyet fonksiyonlarının toplamı olarak tanımlanmıştır. Bu amaç fonksiyonunun (5.21)'te verilen her santralin üretimleri toplamının, yük talebine eşitlik sınırlaması ve (5.22)'da verilen santrallerin aktif güç üretimlerinin izin verilen değerler arasında olacağını belirten eşitsizlik sınırlaması altında en düşük değerinin bulunması istenmektedir.



**Şekil 5.33:** Üretim birimlerinin yakıt maliyet eğrileri

$$f_T = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) = \sum_{i=1}^n a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \times \sin(f_i(P_{i\min} - P_i))| \quad (5.20)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D \quad (5.21)$$

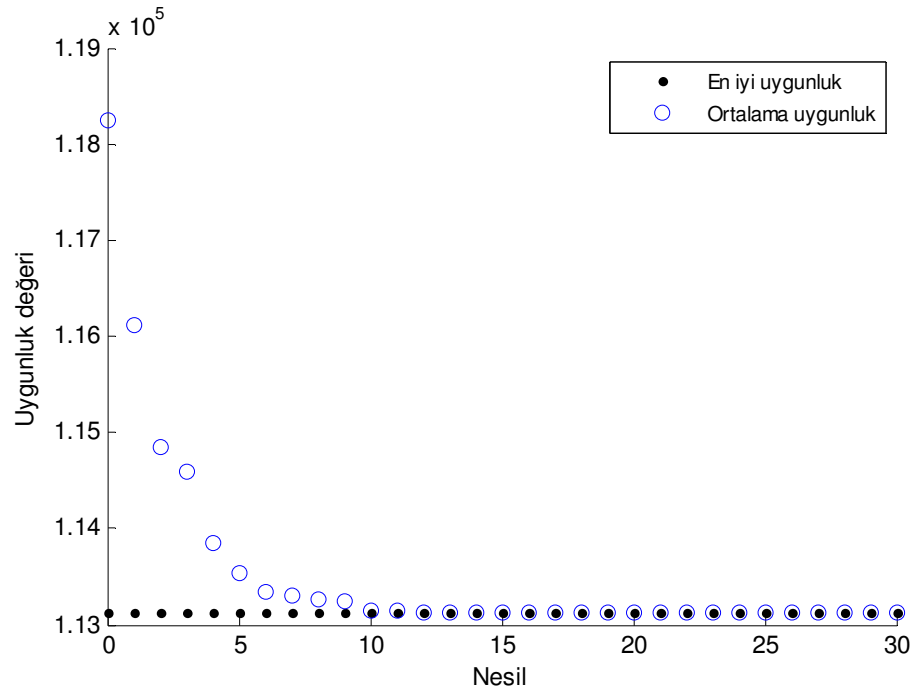
$$P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i\max} \quad (5.22)$$

Optimizasyonda kullanılan GA parametreleri ise Çizelge 5.8'deki gibi seçilmiştir. Değişken sayısı her üretim biriminin aktif güç üretimi olmak üzere 3 tanedir. PI veya

PID kontrolör katsayılarının bulunması problemine göre hem değişken sayısının azlığı, hem de bulunan üretim değerlerine göre fonksiyonun kararsız olma gibi bir olasılık bulunmasından popülasyonu büyüklüğü 20, nesil sayısı 30 ile sınırlı tutulmuştur. Popülasyon büyüklüğü azaldığından elit birey sayısı 2'ye indirilmiş olup, çaprazlama ve mutasyon oranlarında değişiklik yapılmamıştır.

**Çizelge 5.8 :** Ekonomik dağıtım için kullanılan GA parametreleri

|                      |      |
|----------------------|------|
| Popülasyon büyüklüğü | 20   |
| Nesil sayısı         | 30   |
| Çaprazlama katsayısı | 0,9  |
| Mutasyon katsayısı   | 0,05 |
| Elit birey sayısı    | 2    |



**Şekil 5.34:** Ekonomik dağıtımda uygunluk değerlerinin değişimi

Amaç fonksiyonu, sınırlamaları ve GA parametreleri belirlenen optimizasyon probleminde nesillere göre en iyi ve ortalama uygunluk değerlerinin değişimleri Şekil 5.34'teki gibi elde edilir. PID kontrolör katsayılarının bulunması problemine kıyasla uygunluk fonksiyonu daha basit olup, genetik operatörler sonucu kararsız değerler bulunmadığından ortalama uygunluk değeri nesiller ilerledikçe en iyi bireye

yaklaştığı görülmektedir. Buna göre 30. nesilde en iyi uygunluk değeri 113125 TL/saat olarak bulunmuştur. Bu uygunluk değerini veren santrallerin aktif güç üretimleri ise  $P_1$  551.02.4,  $P_2$  130,  $P_3$  818.98 MW olarak bulunmuştur.

Başlangıç anındaki santrallerin hesaplanan üretim değerleri ED eklenmiş OÜK modelinde sabit olarak kullanılmıştır. Tüm alanlarda birinci saniye sonunda %1'lik yük artışı olduğunda, her santral kendi alanındaki yük değişimini karşılayarak frekansı tekrar nominal düzeye getirmektedir. Simülasyonun 30. saniyesinde ED'nin devreye girerek toplam üretim maliyeti en düşük olacak şekilde yük talebi ve kayıpların santraller arasında paylaştırılması istenir. ED'de kayıplar genellikle santral üretimlerinin ikinci dereceden fonksiyonu veya B kayıp katsayılarını içeren Kron kayıp formülü gibi yöntemlerle hesaplanabilir [24]. Fakat bu katsayılar belirli işletme koşullarında yaklaşımla elde edilen sabit değerler olduğundan bu tez çalışmasında iletim hatlarındaki kayıpların anlık değerleri kullanılmıştır. Simulink ortamında yaratılan OÜK modelinde alanlar arasındaki güç akışlarının zaman göre değişimi elde edildiğinden kayıplar da bu alanlar arasındaki güç akışı ve iletim hatlarının uzunluklarından yararlanılarak hesaplanmıştır.

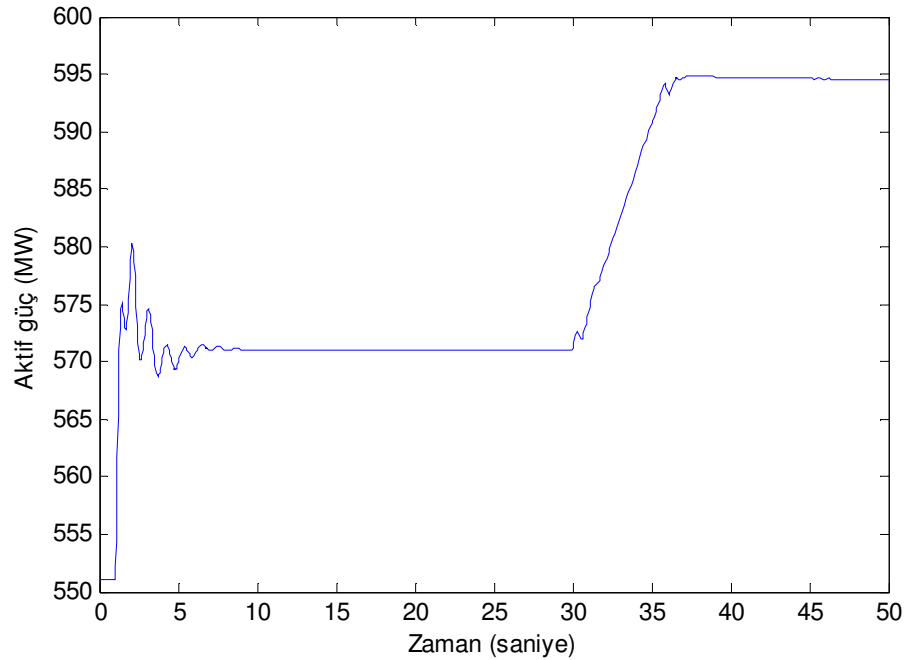
Uygunluk fonksiyonu (5.20)'de verilen yakıt maliyet fonksiyonlarının toplamı olacaktır. Burada santralin üretim değeri (5.22)'daki eşitsizlik sınırlamasını sağlamalı, ayrıca toplam üretim (5.23)'deki yük talebi ve kayıpların toplamına eşit olmalıdır. Şekil 5.35'te verilen ED eklenmiş OÜK modelinde seçilen  $P_1$ ,  $P_2$  ve  $P_3$  aktif güç üretimleri, yakıt maliyet fonksiyonlarına aktararak toplam maliyet bulunmuştur. Matlab'da çalışma ortamına aktarılmış bu uygunluk değeri, GA'daki her bireyler için simülasyon çalıştırılarak tekrarlanmıştır. Simülasyon başlangıcındaki yük talebi, sisteme uygulanan yük değişimleri ve iletim hatlarındaki kayıplarla toplanır ve bu değer de çalışma ortamına aktararak santrallerin toplam üretiminin belirlenmesinde sınırlandırma koşulu olarak belirlenir.

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L \quad (5.23)$$

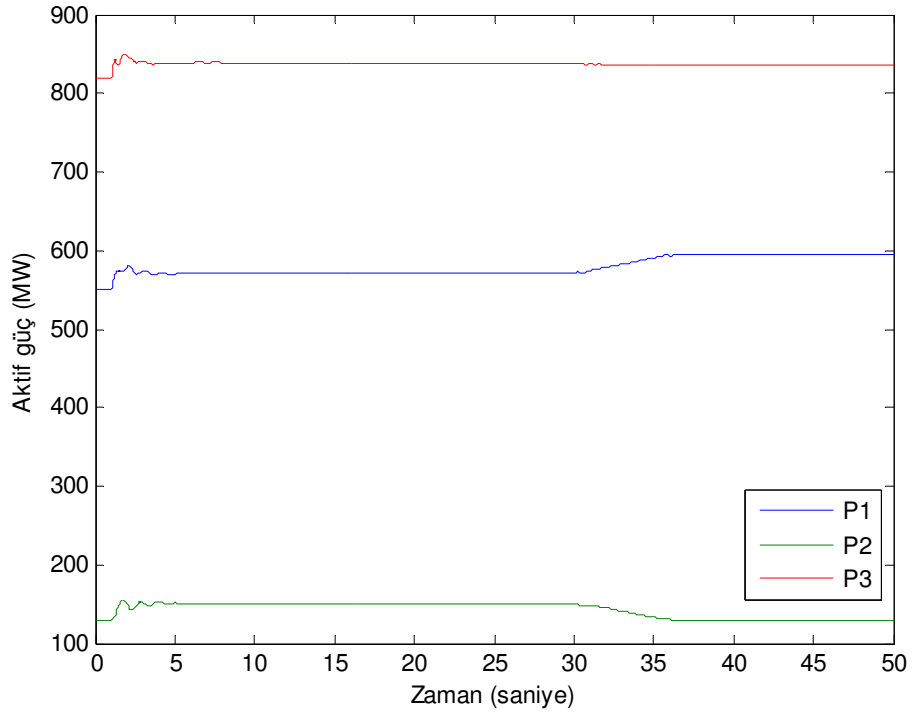
Başlangıçta toplam yük talebinin 1500 MW olduğu kabul edilerek santrallerin aktif güç üretimleri ED sonucu  $P_1$  551.02.4,  $P_2$  130,  $P_3$  818.98 MW olarak belirlenmişti. Temel değeri 2000 MVA seçilen güç sisteminde 1. saniye sonunda her alanda 0.01



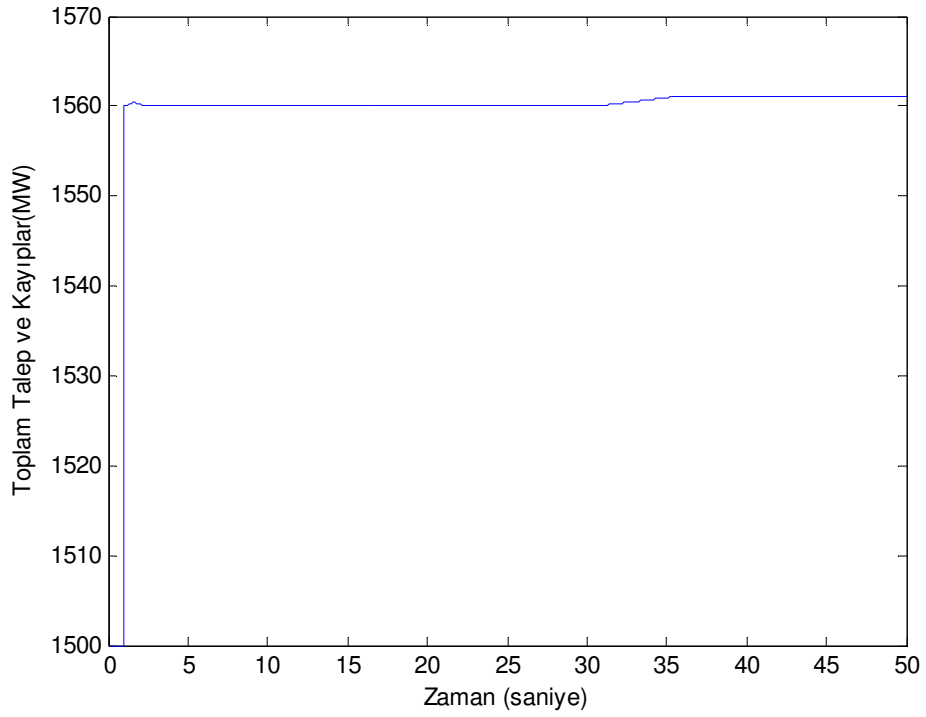
p.u. yük artışı, santrallerin üretiminde 20 MW artışa karşılık gelecektir. Şekil 5.28’de önceki bölümde ITSE başarımlı ölçütüne göre bulunan PID kontrolör katsayılarının kullanılması durumunda 1. alanda aktif güç üretiminin 7.6 saniye içinde 571.02 MW değerine ulaştığı görülür. 30. saniye sonunda ise ED devreye sonucu ilk saniyede uygulanan yük artışı santrallerin arasında ekonomik olarak paylaştırılacaktır. Güç sisteminde yük değişimleri önceden tahmin edilemeyip ani artışlar şeklinde olabildiğinden geçici halde salınımlara yol açar. ED’de ise planlanmış olan bu değişimler her santralde en fazla 4 MW/s olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu nedenle Şekil 5.35’deki zamana göre aktif güç değişim grafiğinde, 1. saniyedeki yük artışına oranla düzgün ve aşırımsız bir sistem cevabı elde edilmiştir. ED sonucu bulunan her santrale ilişkin aktif güç değerleri sırasıyla 594.6, 130.1, 835.6 olarak bulunmuş olup tüm santrallerin üretiminin zaman göre değişimleri Şekil 5.36’ten görülmektedir. OÜK modelinde ilk yük artışıyla oluşan sistem cevabı ayrıntılı olarak incelenmiştir. ED eklenmiş modeli ise ilk modelden farklı olarak 30. saniyeden sonra üretimlerin, toplamı yük ve kayıpları karşılayarak maliyeti en düşük seviyeye getirmektedir.



**Şekil 5.35:** 1. alanda üretimdeki değişim

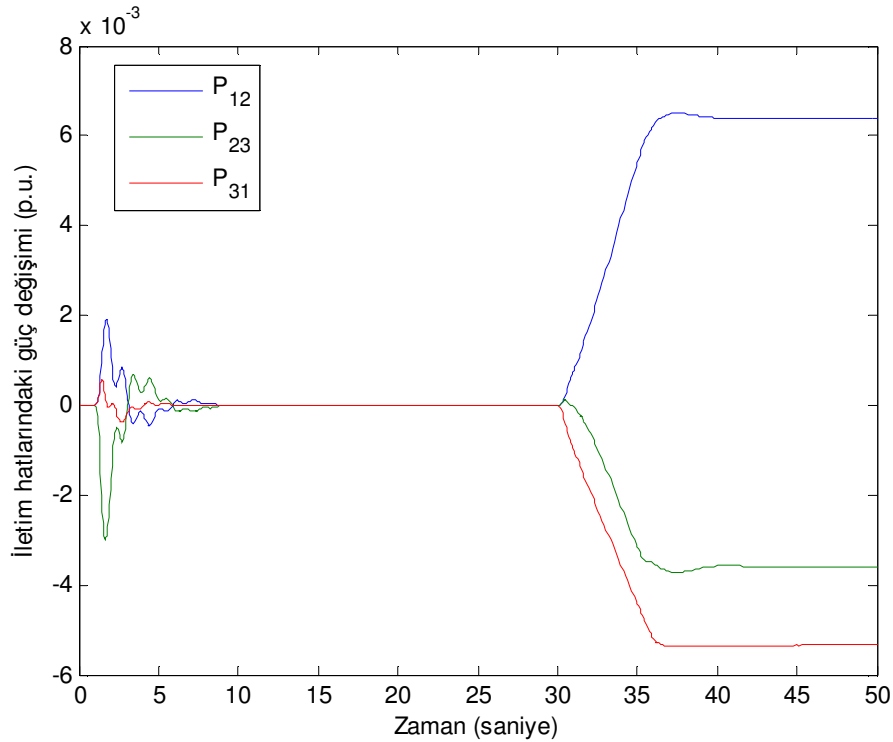


**Şekil 5.36:** Tüm alanlarda üretimdeki değişimler



**Şekil 5.37:** Toplam talep ve kayıplardaki değişim

Toplam talep ve kayıpların zaman göre değişim Şekil 5.37’de verilmiştir. Başlangıçta yük talebi 1500 MW olarak belirlenmiş, ve alanlar arası güç akışı olmayacak şekilde üretim birimleri arasında paylaştırılmıştı. İlk saniye sonunda her bölgeye 0.01 p.u. yük artışı meydana geldiğinden 2000 MVA temel değer için her bölgede 20 MW ve toplamda 60 MW güç artışı görülür. Her bölgedeki güç artışını buradaki üretim birimleri karşılayacağından sürekli durumda alanlar arası güç akışı görülmez. Fakat 1. saniye sonundaki geçici durumda, yük artışına üretim birimlerinin cevaplarının farklı olması nedeniyle iletim hatlarında güç akışı olur. Bu sürede oluşan geçici kayıplar nedeniyle talep ve kayıplar toplamının aşım yaparak 1560 MW’nin biraz üzerine çıktığı görülmüştür. 30. saniye itibariyle ED modeli devreye girdiğinde, elektrik enerjisinin üretim maliyeti en düşük olacak şekilde santraller arasında paylaştırıldığından alanlar arası güç akışı meydana gelir. İletim hatlarındaki kayıplar 50. saniye sonundaki 0.76 MW olup, sisteme uygulanan yük artışının %1,26’sı kadardır Bunun sonucunda yük talebi ve kayıpların toplamı 1560.76 MW’ya çıkmıştır.

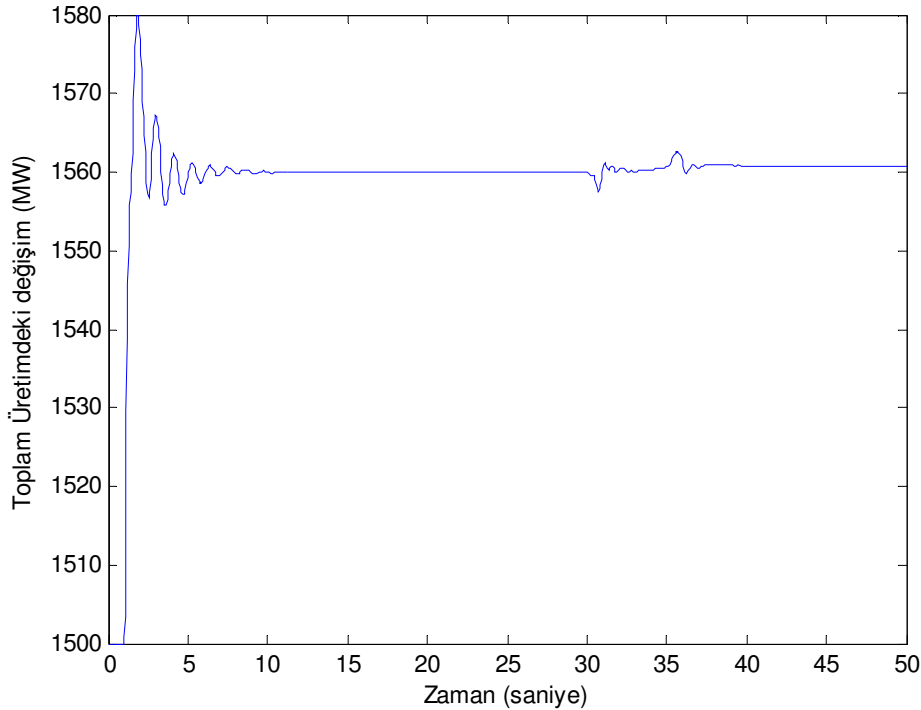


**Şekil 5.38:** İletim hatlarındaki güç akışları

Alanlar arası güç akışının grafiği Şekil 5.38’de verilmiştir. Bu grafiğin ilk 30 saniyelik bölümündeki geçici salınımlar OÜK modelinde anlatılmıştır. P<sub>12</sub> nin pozitif

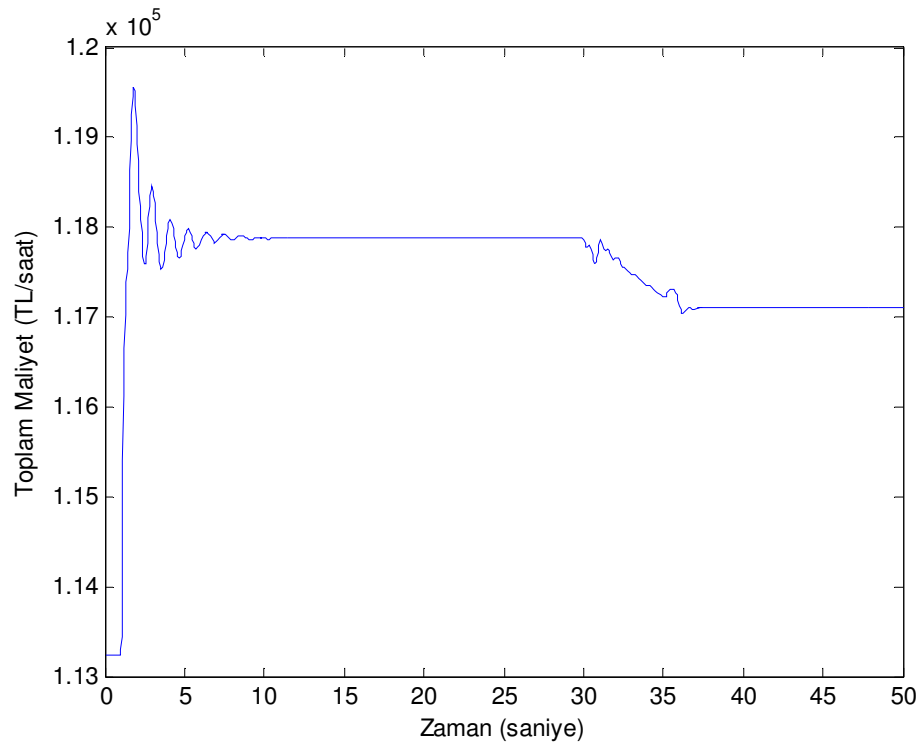
değerli olması 1. alandan 2. alana güç akışı olduğunu göstermektedir. Negatif değerler ise ters yönde güç akışını simgeler. 30. saniye itibariyle ED'nin uygulanması sonucu 1. alandan diğer iki alana, 3. alandan ise 2. alana güç akışı görülmektedir. Bu güç akışlarındaki değişimler üretim birimlerindeki planlanan değişimleri sınırlandırılması ve PID kontrolör kullanılması sonucunda doğrusala yakın bir yol izleyerek, çok az bir aşım ile sürekli hal değerine ulaşırlar.  $P_{12}$ ,  $P_{23}$ ,  $P_{31}$  güç akışlarının sürekli hal değerinde sırasıyla  $6,39 \cdot 10^{-3}$ ,  $-3,60 \cdot 10^{-3}$ ,  $-5,34 \cdot 10^{-3}$  p.u. olmaktadır.

Toplam üretimdeki değişim ise Şekil 5.39'da gösterilmiştir. Başlangıçta 1500 MW olarak belirlenen yük talebinin üretime eşit olduğu görülür. İlk saniyeden sonra her alana 20 MW yük artışı sonucu her alana ilişkin alan kontrol hataları sıfırdan farklı değer alacaktır. ITSE başarımlı ölçütüyle tasarlanan PID kontrolör, geçici hal salınımlarını azaltır ve sürekli halde toplam üretimi yük değişimlerini de karşılayacak şekilde 1560 MW'a yükseltir. ED'nin devreye girdiği 30. saniye meydana gelen üretimdeki değişimler 2.5 MW genlikli negatif ve pozitif aşım yaparak değerini 1560.76 MW sürekli hal değerine ulaşır. Buradaki 0.76 MW'lık güç artışının nedeni bağlantı hatlarında meydana gelen kayıplardır.



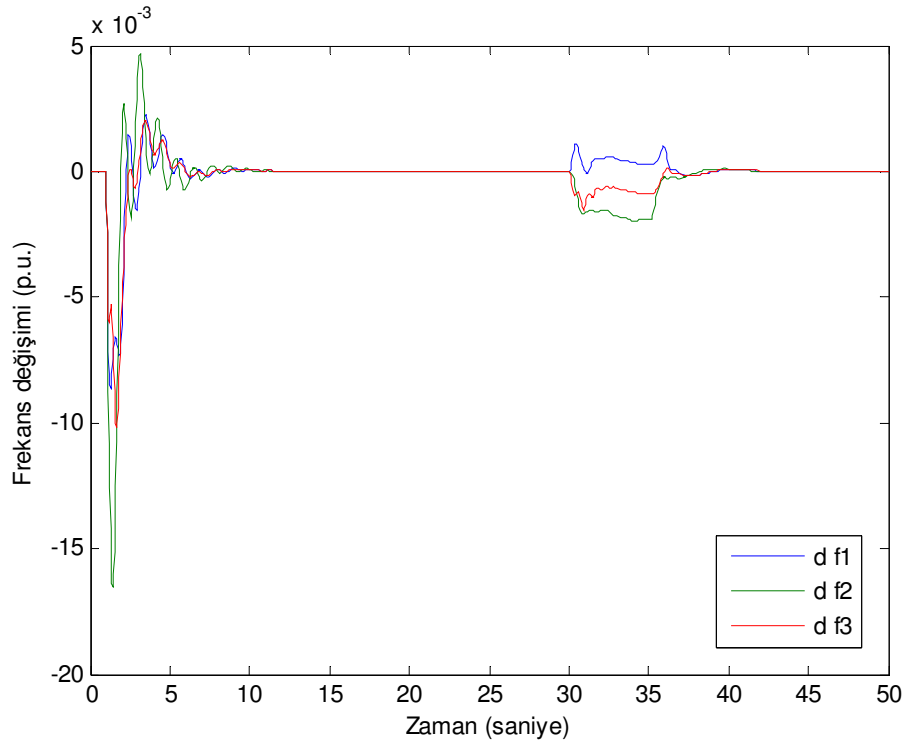
**Şekil 5.39:** Toplam üretimdeki değişim

Şekil 5.40'ta ise toplam maliyetteki değişim verilmiştir. Başlangıçta santrallerin üretimleri ve yakıt maliyet fonksiyonlarına göre 113242 TL/saat olarak belirlenen toplam maliyet ilk saniye sonunda 60 MW yük artışıyla birlikte 117880 TL/saate yükselmektedir. Bu yük talebinin karşılanırken vanaların açılması ve buhar ve gaz girişindeki artış sırasında geçici olarak anlık maliyetin daha yüksek değerleri çıktığı görülmüştür. ED devreye girmesiyle birlikte ise 117129 TL/saate düştüğü görülür. Maliyetteki azalma yaklaşık doğrusal olmakla beraber vanaların açılması sırasında aşım yaptığı görülmektedir. 60 MW yük artışının getirdiği ek maliyet ED sonucu %16,2 oranında azaltılmıştır.



**Şekil 5.40:** Toplam maliyetin değişimi

Sistem frekansı aktif güç dengesine bağlı olup üretim miktarı, yük ve kayıpların toplamına eşit olacağından frekans tekrar anma değerine gelecektir. Şekil 5.41'de ED sonucu her alandaki frekans değişimleri görülmektedir. Buna göre ED'nin frekansa etkisinin yük değişimine oranla oldukça az olduğu görülebilir. Üç alandaki frekans değişimlerinin de ED neticesinde  $10^{-3}$  p.u. bölgesi içinde kaldığından frekanstaki sapma 0.05 Hz'yi geçmeyecektir. Bunun sonucunda ED'nin üretilen elektrik kalitesini koruyarak toplam maliyette önemli ölçüde azalma sağladığı sonucuna varılır.



**şekil 5.41:** Üç alanlı güç sisteminde ED sonucu frekans değişimleri

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üç alanlı güç sisteminin genetik algoritma kullanılarak yük-frekans kontrolü ve ekonomik dağıtım yapılmıştır. Otomatik üretim kontrolünde farklı başarımlar ölçütlerine göre her alana ilişkin PI ve PID kontrolörler genetik algoritma ile tasarlanmış, ve bu kontrolörlerin frekans ve bağlantı hatlarındaki güçler üzerine etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ekonomik dağıtım modelinde ise yakıt maliyet eğrileri çıkarılan üretim birimleri, çeşitli sınırlandırmalar altında sistemin toplam maliyetini en aza indirecek şekilde ayarlanmıştır.

Otomatik üretim kontrolü ile ilgili yayınlanmış eserlerde evrimsel algoritmalar önemli bir yere sahiptir. Genellikle termik ve hidrolik birimlerden oluşan iki veya üç alanlı güç sistemlerinin otomatik üretim kontrolünde genetik algoritma, particle swarm optimizasyonu gibi evrime dayanan yöntemler dışında bulanık mantık kontrolörlerde katsayıların bulunmasında kullanılır. Ekonomik dağıtım probleminin vana açma kapama noktalarındaki süreksizlikler dikkate alınan modelinde türev bilgisi gerektiren yöntemlerle çözülemeyeceğinden, genetik algoritma gibi yaklaşık sonuçları bulunmasına imkan veren arama yöntemleri kullanılmalıdır.

Çalışmada öncelikle iki termik, bir gaz türbininden oluşan üç alanlı güç sisteminin kazan, vana ve ara ısıtılı türbin modelleri kullanılarak otomatik üretim kontrolü yapılmıştır. Bu modelde frekans değişimi ve alanlar arası güç akışlarının belli sınırlar içinde kalmasını sağlamak amacıyla genetik algoritma ile çeşitli başarımlar ölçütlerine göre PI ve PID kontrolörler tasarlanmıştır. Genetik algoritmada popülasyon içerisindeki bireylerin temsil ettiği kontrolör katsayılarının, çaprazlama ve mutasyon operatörleri sonucu kimi zaman kararsız çıkması simülasyon süresinin oldukça uzamasına yol açmıştır. Her alanda meydana gelecek 0.01 p.u yük artışlarına göre bulunan kontrolör katsayıları, frekans sapması ve alanlar arası güç değişiminin istenilen değerler içinde bulunmasını sağlamıştır. Her iki kontrolör de integral işlevini içerdiğinden sürekli durumda frekans anma değerinde, alanlar arasında güç akışı ise sıfır değerinde olduğu görülür. Geçici hal cevaplarını karşılaştırdığımızda ITSE başarımlar ölçütünün maksimum aşımı azalttığı, ITAE'nin ise yerleşme zamanını

iyileştirmektedir. Tüm geçici zaman kriterlerine baktığımızda PID kontrolörlerin PI kontrolörlere oranla daha iyi bir frekans ceabı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, santrallere ilişkin yakıt maliyet eğrilerini çıkarılarak, otomatik üretim kontrolüne ekonomik dağıtım modeli eklenmiştir. Toplam yük talebi, sistemdeki temel değere göre başlangıçta belirlenmiş olup maliyeti en düşük seviyeye getirecek santrallerin üretim değerleri genetik algoritma ile hesaplanmıştır. İlk modelde, her alandaki yük artışı sonucunda, frekans ve alanlar arası güç değişimi kontrol edilmesine rağmen maliyet ile ilgili ayarlama söz konusu değildir. Başlangıçtaki yük talebi, simülasyon süresince oluşan yük artışları ve iletimde meydana gelen kayıpların toplamı santrallerin toplam üretimine eşit olacak şekilde, santrallerin en düşük ve en yüksek üretim değerleri sınırlaması altında genetik algoritma yöntemiyle elektrik enerjisinin birim maliyetini en ekonomik yapacak MW cinsinden her santralin aktif güç üretimleri bulunmuştur. Ekonomik dağıtım planlanan bir yük değişimi olduğundan tüm alanlara ilişkin frekanstaki değişimlerin genlikleri, ani yük artışlarına oranla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Buradan otomatik üretim kontrolüne ekonomik dağıtımının ilave edilmesiyle elektrik kalitesini bozmadan önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanacağı sonucuna ulaşılır.

Tasarlanan kontrolörler sabit katsayılı olduğundan farklı işletme koşullarında en uygun çözümleri sağlamayabilir. Bu nedenle belirli periyotlarla kontrolör parametrelerinin yeniden hesaplanması veya adaptif kontrol, bulanık mantık, yapay sinir ağları gibi yöntemlerin güç sistemine uyarlanmasıyla aşılabılır. Ekonomik dağıtım modelinin ise zehirli gazların emisyonu ve çevreye olan etkilerinin dahil edilerek geliştirilmesi mümkündür.



## KAYNAKLAR

- [1] **Boduroğlu, T.**, 1965. *Elektrik Ekonomisi*, İTÜ Yayınları, İstanbul
- [2] **Enerji Piyasası Yönetmelikleri**, 2004. Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği, *Resmî Gazete*, Sayı: 25639
- [3] **Shayeghi, H., Shayanfar, H.A.**, 2004. Automatic Generation Control of Interconnected Power System Using ANN Technique Basend on  $\mu$  Sysntethesis, *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 55, No. 11-12, s. 306–313
- [4] **Kundur, P.**, 1994. *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Professional, New York
- [5] **Machowski J., Bumby J.R.**, 1997. *Power system dynamics and stability*, John Wiley and Sons, New York
- [6] **Kothari, M.L., Nanda J.**, 1998. Application of optimal control strategy to automatic generation control of a hydrothermal system, *Control Theory and Applications*, IEE Proceedings D, Vol. 135, s. 268 - 274
- [7] **Al-Hamouz, Z. M., Al-Duwaish, H.N.**, 2000. A new Load Frequency Variable Structure Controller Using Genetic Algorithms, *Electric Power Systems Research* 55, No. 1, s.1–6.
- [8] **Das, D., Kothari, M.L.**, 1991. Variable structure control strategy to automatic generation controlof interconnected reheate thermal system, *Control Theory and Applications*, IEE Proceedings D, Vol. 138, No. 6, s. 579 - 585
- [9] **Okafor F.N.**, 2001. Variable Structure Unit Vector Control of Electric Power Generation, *African Journal of Science and Technology: Science and Engineering Series*, Vol. 1, No.4, s. 78-86
- [10] **Demirören, A., Zeynelgil, H. L., Şengör, N. S.**, Automatic Generation Control Using ANN Technique for Multi-Area Power System with SMES Units, *Electric Power Components and Systems*, Vol. 32, No. 2, s.193-213
- [11] **Beaufays, F. , Abdel-Magid, Y., Widrow, B.**, 1994. Application of Neural Networks to Load Frequency Control in Power System, *Neural Networks*, Vol. 7, No. 1, s. 183-194
- [12] **Pan, C. T., Liaw, C. M.**, 1998. An Adaptive Controller for Power System Load-Frequency Control, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 4 No. 1, s. 122-128.
- [13] **Kazemi, M. H., Karrari, M., Mentaj, M. B.**, 2002. Decentralized Robust Adaptive-Output Feedback Controller for Power System Load Frequency Control, *Electrical Engineering*, Vol. 84, No. 2, s. 75-83.
- [14] **Karrari, M., Mentaj, M. B.**, 1999. H-Y Theory for Interconnected Power Systems Load Frequency Control, *Proceedings of the Eighteenth International*

- Conference on Modeling, Identification and Control*, Vol. 1, s. 199-203, Innsbruck
- [15] **Shayeghi, H., Shayanfar, H. A.**, 2002.  $\mu$  Controller Design for Interconnected Power Systems Load Frequency Control, *Proc. of the International Conference on PES*, No. 352-158, s. 751-758, California.
  - [16] **Yeşil, E., Demirören, A.**, 2004. Automatic Generation Control with Fuzzy Logic Controller in the Power System including Three Areas, *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 26, No. 4, s. 291-305
  - [17] **Saraçoğlu, H.**, 2007, *Enterkonnekte şebekede bulanık mantık algoritma ile çok alanlı otomatik üretim kontrolü*, İTÜ Yüksek Lisans Tezi
  - [18] **Roy, R., Ghoshal S.P.**, 2005, Hybrid Genetic Algorithm / Particle Swarm Optimization - Fuzzy based Automatic Generation Control, *Energy and Power Systems*, 18-20 Nisan, Krabi, Tayland
  - [19] **Demirören, A., Kent, S., Günel, T.**, 2002. A genetic approach to the optimization of automatic generation control parameters for power systems, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 12, No. 4, s. 275-281
  - [20] **Sinha, N., Loi, L.L., Rao, V.G.**, 2008, GA optimized PID controllers for automatic generation control of two area reheat thermal systems under deregulated environment, *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies - Third International Conference*, Vol 1, s. 1186-1191
  - [21] **Demirören, A., Zeynelgil, L.**, 2004, *Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması*, Birsan Yayınevi, İstanbul
  - [22] **Elgerd, O.I.**, 1971, *Electrical Energy Systems Theory: An Introduction*, Tata McHraw Hill, Yeni Delhi
  - [23] **Ramakrishna, K.S.S., Bhatti, T.S.**, 2007. Sampled-data Automatic Load Frequency Control of a Single Area Power System with Multi-source Power Generation, *Electric Power Components and Systems*, Vol. 35, No. 8, s 955-980
  - [24] **Saadat, H.**, 2002. *Power Systems Analysis*, McGraw-Hill Primis Custom Publishing, New York
  - [25] **Wood, A.J., Wollenberg, B.F.**, 1996. *Power Generation, Operation, and Control*, Wiley-Interscience, New York
  - [26] **Tripathy, S.C., Balasubramanian, R., Chandramohan, P.S.N.**, 1992, Effect of Superconducting Magnetic Energy Storage on Automatic Generation Control considering Governor Deadband and Boiler Dynamics, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 3, s. 1266-1273
  - [27] **Kehlhofer, R., Nielson, H., Warner, J.**, 1999. *Combined-cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*, Pennwell Books, Oklahoma
  - [28] **Sewtohil, L.G., Ah King, R.T.F., Rughooputh, C.S.**, 2004. Genetic Algorithms for Economic Dispatch with Valve Point Effect, *IEEE International Conference on Networking, Sensing & Control*, Vol.2, s. 1358-1363
  - [29] **Goldberg, D.E.**, 2002. *The Design of Innovation: Lessons from and for Competent Genetic Algorithms*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht

- [30] **Fogel, D.B.**, 2006, Nils Barricelli - Artificial life, Coevolution, Self-adaptation, *Computational Intelligence Magazine*, IEEE Vol. 1, No. 1, s. 41-45
- [31] **Droste, S., Jansen, T.**, 2003. Theory of Evolutionary Algorithms and Genetic Programming, *Natural Computing Series*, No. 4, s. 107-144
- [32] **Holland, J. H.**, 1992, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, Londra
- [33] **Goldberg, D.E.**, 2002. *The Design of Innovation Lessons from and for Competent Generic Algorithms*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- [34] **Mitchell, M.**, 1998, *An introduction to genetic algorithms*, 1998, MIT Press, Londra
- [35] **Chipperfield, A., Fleming, P., Pohlheim, H., Fonseca, C.**, 1994. *Genetic Algorithm Toolbox For Use with MATLAB*, Department of Automatic Control and Systems Engineering, Sheffield
- [36] **Küçüktezcan, F.**, 2008. *Genetik algoritma ile optimize edilmiş bulanık güç sistemi kararlı kılıcısının sistem kararlılığına etkisi*, İTÜ Yüksek Lisans Tezi
- [37] **Michalewicz, Z.**, 1992, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer Verlag, New York
- [38] **Janikow, C. Z., Michalewicz, Z.**, 1991. An Experimental Comparison of Binary and Floating Point Representations in Genetic Algorithms, *Proceedings of the 4th International Conference on Genetic Algorithms*, Vol. 4, s. 31-36
- [39] **Goldberg, D. E.**, 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley Publishing Company, New Jersey
- [40] **Koumousis, V.K., Katsaras, C.P.**, 2006. A saw-tooth genetic algorithm combining the effects of variable population size and reinitialization to enhance performance. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions*, Vol. 10, s. 19-28
- [41] **Liptak, G. B.**, 2005. *Instrument Engineers' Handbook: Process control and optimization*, , Taylor&Francis CRC, Londra
- [42] **Haupt, R.L., Haupt S.E.**, 2002. *Practical Genetic Algorithms*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey
- [43] **Michalewicz, Z., Vignaux, G.A., Groves, L.**, 1989, Genetic Algorithms for Approximation and Optimization Problems, *Proceedings of the 11th New Zealand Computer Conference*, Wellington, s. 211-223
- [44] **Sinha, N., Loi L.L., Rao, V.G.**, 2008. GA optimized PID controllers for automatic generation control of two area reheat thermal systems under deregulated environment, *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies Third International Conference*, Vol. 6, s. 1186 - 1191
- [45] **Ghoshal, S.P., Roy, R.**, 2006, Optimization of Proportional-Integral-Derivative Gains by Evolutionary Programming in Fuzzy based AGC, *Instituion of Engineers*, No. 87, s. 26-35
- [46] **Kuo, B., Bir., A.**, 2004. *Otomatik Kontrol Sistemleri*, Literatür Yayınevi, İstanbul
- [47] **Ihc M.D, Galiana F.D., Fin L.H.**, 1998. *Power Systems Resturcturing: Engineering and Economics*, Springer, Massachusetts

- [48] **Sinha N., Chakrabarti R., Chattopadhyay P.K.**, 2001. Improved Fast Evolutionary Program for Economic Load Dispatch with Non-smooth Cost Curves, *International Journal of Engineering Education*, Vol. 17, s. 110-114
- [49] **Sewtohul, L.G., Ah King, R.T.F., Rughooputh, C.S.**, 2004. Genetic Algorithms for Economic Dispatch with Valve Point Effect, *Networking, Sensing and Control, IEEE International Conference*, Vol. 2, s. 1358 - 1363

## EKLER

### EK A. 1: Otomatik Üretim Kontrolü Modeli Verileri

$T_{G1} = T_{G2} = T_{G3} = 0.08$   
 $T_{T1} = T_{T2} = T_{T3} = 0.3$   
 $K_{R1} = K_{R2} = K_{R3} = 0.5$   
 $K_{P1} = K_{P2} = K_{P3} = 120$   
 $T_{P1} = T_{P2} = T_{P3} = 120$   
 $T_{R1} = T_{R2} = T_{R3} = 10$   
 $B_1 = 0.425, B_2 = 0.361, B_3 = 0.564$   
 $R_1 = 2.4, R_2 = 3.6, R_3 = 1.8$   
 $T_{12} = 0.086, T_{23} = 0.129, T_{31} = 0.115$   
 $K_1 = 0.95, K_2 = 0.095, K_3 = 0.92$   
 $K_{IB} = 0.019, T_{IB} = 90, T_{RB} = 69$   
 $X = 0.6, Y = 1$   
 $T_{CR} = 0.01$   
 $T_{F2} = 0.23$   
 $T_{CD2} = 0.2$   
 $T_{Dgaz} = 0$   
 $T_{Fgaz} = 10$   
 $K_{Igaz} = 0.030$   
 $T_{Igaz} = 26$   
 $T_{Rgaz} = 69$

### EK A. 2: Ekonomik Dağıtım Modeli Verileri

|           | $a_i$ | $b_i$ | $c_i$   | $e_i$ | $f_i$  | $P_{imin}$ | $P_{imax}$ |
|-----------|-------|-------|---------|-------|--------|------------|------------|
| Santral 1 | 5770  | 56.95 | 0.01458 | 1800  | 0.0209 | 150        | 600        |
| Santral 2 | 2920  | 65.76 | 0.02756 | 1500  | 0.0242 | 130        | 650        |
| Santral 3 | 6608  | 53.40 | 0.01172 | 1950  | 0.0190 | 165        | 990        |



## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Burak Tabakoğlu

**Doğum Yeri ve Tarihi:** 24 Şubat 1983 / İstanbul

**Adres:** -

**Lisans Üniversitesi:** İTÜ, Kontrol Mühendisliği (2006)

İTÜ, Elektrik Mühendisliği (2007)

**Yayın Listesi:** -