T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

Ebru ÖZBAY

Tez Yöneticisi:
Yrd. Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2009

T.C.

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

Ebru ÖZBAY

Tez Yöneticisi:
Yrd. Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU

Yüksek Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, ... tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU

Üye: Prof. Dr. Mehmet CEBECİ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Selçuk YILDIRIM

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince yol göstererek beni destekleyen ve katkılarını esirgemeyen, değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU ' na, Prof. Dr. Mehmet CEBECİ ' ye ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE 'ye, ilgi ve desteklerini her zaman hissettiğim tüm hocalarım ve arkadaşlarıma, her zaman ve her konuda beni destekleyen, güç veren ve sabır gösteren değerli aileme teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER I
ŞEKİLLER LİSTESİ III
TABLOLAR LİSTESİ V
SİMGELER VI
KISALTMALAR VIII
ÖZET IX
ABSTRACT X

1. GİRİŞ 1
2. HİDROELEKTRİK ENERJİ 3
2.1. Hidroelektrik Santraller 4
2.2. Hidroelektrik Enerji Potansiyeli 7
2.2.1. Hidroelektrik Potansiyelin Belirlenmesi 8
2.2.2. Türkiye 'nin Hidroelektrik Enerji Potansiyeli 8
2.2.3. Dünya 'nın Hidroelektrik Enerji Potansiyeli 12
2.3. Hidroelektrik Sistemlerin Tasarımı 14
2.3.1. Kapasite ve Talep Araştırması 14
2.3.2. Hidrolojik Çalışma ve Mevki Araştırması 15
2.3.3. Ön Fizibilite Çalışması 15
2.3.4. Tam Fizibilite Çalışması 15
2.4. Hidroelektrik Sistemlerin Sınıflandırılması 15
2.4.1. Düşülerine Göre HES 'ler 16
2.4.2 Ürettikleri Enerjinin Karakter ve Değerine Göre HES 'ler 16
2.4.3. Kapasitelerine Göre HES 'ler 16
2.4.4. Yapılışlarına Göre HES 'ler 17
2.4.5. Üzerinde Kuruldukları Suyun Özelliklerine Göre HES 'ler 17
2.4.6. Baraj Gövdesinin Tipine Göre HES 'ler 18
2.5. Türbin Çeşitleri 18
2.5.1. Reaksiyon Türbinleri 21
2.5.2. Aksiyon Türbinleri 23
2.6. Regülasyon Sistemi 25
3. KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLER 26
3.1. Küçük Hidroelektrik Santrallerin Genel Yapısı 28

3.2. Küçük Hidroelektrik Santrallerin Temel Elemanları 30
3.3. Santral Toplam Kapasite Tayini 34
3.4. Türbin ve Generatör Seçimi 35
3.4.1. Türbin 36
3.4.2. Generatör 42
3.5. Ölçü, Kontrol ve Koruma 44
3.6. Şebeke ve Şalt Sahası 45
3.7. KHES 'lerin Avantaj ve Dezavantajları 46
3.8. Türkiye 'de KHES Potansiyeli 47
4. HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN MODELLENMESİ 52
4.1. Doğrusal Model 53
4.1.1. İdeal Olmayan Türbin 55
4.2. Doğrusal Olmayan Model 56
4.2.1. Elastik Olmayan Su Yükü Modeli 56
4.2.2. Elastik Su Yükü Modeli 59
4.3. Denge Bacası Modeli 61
4.4. Regülatör Modeli 62
4.4.1. Hız Regülatörü Parametrelerinin Ayarlanması 63
4.4.2. PD, PI ve PID Hız Regülatörleri 64
5. KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN MODELLENMESİ 66
5.1. Giriş 66
5.2. Regülatör Modeli 66
5.3. Generatör Modeli 68
5.4. Türbin Modeli 68
5.5. KHES Modeli 70
5.6. Benzetim Sonuçları 72
5.6.1. Doğrusal Türbinli KHES Modeli için Benzetim Sonuçları 72
5.6.2. Doğrusal Olmayan Türbinli KHES Modeli için Benzetim Sonuçları 79
5.6.3. Uygulama 85
6. SONUÇ 88
KAYNAKLAR 89

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Hidrolik çevrim ... 3
Şekil 2.2. Basit bir HES 'in yapısı ... 4
Şekil 2.3. Yapı ve bileşenleri ile bir HES 'in blok diyagramı ... 4
Şekil 2.4. Hidrolik yüksekliğe bağlı olarak giriş ve çıkış gücü eğrileri ... 6
Şekil 2.5. Örnek bir nehir yatağı ve alternatif su akış güzergahı ... 7
Şekil 2.6. Türkiye 'nin hidroelektrik potansiyelinin dağılım ... 11
Şekil 2.7. Düşüye ve debiye göre türbin tiplerinin çalışma bölgeleri ... 20
Şekil 2.8. Kaplan türbin çarkı ve çalışma ilkesi ... 22
Şekil 2.9. Francis türbin çarkı ve çalışma ilkesi ... 23
Şekil 2.10. Pelton türbin çarkı ve çalışma ilkesi ... 24
Şekil 2.11. Cross-flow türbin çarkı ve çalışma ilkesi ... 24
Şekil 3.1. Küçük hidroelektrik santrallerin kullanım alanları ... 27
Şekil 3.2. Bir KHES 'in temel yapısı ... 29
Şekil 3.3. Bir KHES 'in elektromekanik aksamı ... 29
Şekil 3.4. Küçük su türbinlerinde debi-verim ilişkisi ... 31
Şekil 3.5. Küçük hidroelektrik santrallerde kullanılan küçük su türbinleri ... 32
Şekil 3.6. Örnek bir DSE ve kapasite tayini ... 34
Şekil 3.7. KHES 'ler için türbin düşü-debi abağı ... 36
Şekil.3.8. Net düşü miktarına bağlı N_s değerleri ... 37
Şekil 3.9. Hidrolik türbinlerin karakteristik verim eğrileri ... 38
Şekil 3.10. Türbin verim eğrileri ... 39
Şekil 3.11. Ampul tipi türbin ... 40
Şekil 3.12. Boru tipi türbin ... 40
Şekil 3.13. Dalgıç türbin ... 41
Şekil 3.14. Yatay şaftlı generatör ... 43
Şekil 4.1. Hız kontrolü genel modeli ... 52
Şekil 4.2. Doğrusal türbin modeli ... 55
Şekil 4.3. İdeal ve gerçek dağıtıcı açıklığı ... 58
Şekil 4.4. Elastik olmayan su yükü için doğrusal olmayan türbin modeli ... 59
Şekil 4.5. Elastik su yükü için doğrusal olmayan türbin modeli ... 60
Şekil 4.6. Kalıcı hız eğimi ile HES modeli ... 62
Şekil 4.7. Geçici hız eğimi ile hız regülatörü modeli ... 63

Şekil 5.1. PI regülatör modeli 67
Şekil 5.2. PID kontrolör modeli 67
Şekil 5.3. Servo-motor modeli 67
Şekil 5.4. Generatör modeli 68
Şekil 5.5. Doğrusal olmayan türbin modeli 69
Şekil 5.6. Doğrusal türbinli KHES modeli 70
Şekil 5.7. Doğrusal olmayan türbinli KHES modeli 70
Şekil 5.8. Yük eğrisi 71
Şekil 5.9. 4 farklı yük için doğrusal türbinli KHES modeli 71
Şekil 5.10. 0.05 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 73
Şekil 5.11. 0.05 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 73
Şekil 5.12. 0.25 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 74
Şekil 5.13. 0.25 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 74
Şekil 5.14. 0.50 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 75
Şekil 5.15. 0.50 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 75
Şekil 5.16. 0.75 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 76
Şekil 5.17. 0.75 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 76
Şekil 5.18. 0.95 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 77
Şekil 5.19. 0.95 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 77
Şekil 5.20. 4 farklı yüklenme durumunda, 0.75 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 78
Şekil 5.21. 4 farklı yüklenme durumunda, 0.75 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 78
Şekil 5.22. 0.05 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 80
Şekil 5.23. 0.05 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 80
Şekil 5.24. 0.25 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 81
Şekil 5.25. 0.25 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 81
Şekil 5.26. 0.50 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 82
Şekil 5.27. 0.50 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 82
Şekil 5.28. 0.75 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 83
Şekil 5.29. 0.75 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 83
Şekil 5.30. 0.95 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 84
Şekil 5.31. 0.95 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 84
Şekil 5.32. 0.75 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 86
Şekil 5.33. 0.75 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 86
Şekil 5.34. 0.75 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği 87
Şekil 5.35. 0.75 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği 87

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Türkiye 'deki havzalar 9
Tablo 2.2. Türkiye 'nin toplam ekonomik HES potansiyeli 11
Tablo 2.3. Dünya 'da teknik ve ekonomik hidroelektrik kapasitenin dağılımı 12
Tablo 2.4. Avrupa 'daki hidroelektrik kapasiteler 13
Tablo 2.5. Avrupa ülkelerinde hidroelektrik enerji kullanımı 13
Tablo 2.6. Düşü değerine göre türbinlerin sınıflandırılması 19
Tablo 2.7. Özgül hıza göre türbinlerin sınıflandırılması 20
Tablo 3.1. Ülkelere göre mikro, mini ve küçük HES tanımlamaları 26
Tablo 3.2. KHES 'leri düşü miktarına göre sınıflandırma 28
Tablo 3.3. Türkiye 'de işletilmekte olan bazı KHES 'ler 48
Tablo 3.4. Doğu Karadeniz Havzası 'ndaki inşa, fizibilite ve su kullanım hakkı aşamasındaki küçük hidroelektrik santraller 50
Tablo 5.1. Farklı yük değerleri için K_p ve K_i değerleri 69

SİMGELER

A: Cebri boru kesiti (m^2)

A_t: Türbin kazancı

A_s: Denge bacası kesit alanı (m^2)

a_g : Yerçekimi ivmesi (m/sn^2)

c_s: Denge bacası depolama sabiti

D_n: Türbin sönümleme etkisi

F: Sürtünme katsayı

f_p: Cebri boru duvarındaki su sürtünmesi

G: Dağıtıcı açıklığı (%)

G_0: İlk dağıtıcı açıklığı (%)

G_{fl}: Tam yükte ideal dağıtıcı açıklığı (%)

G_{nl}: Yüksüz durumda ideal dağıtıcı açıklığı (%)

g_{min} , g_{max} : Dağıtıcı açıklığı limitleri (pu)

H: Net hidrolik yükseklik (m)

H_0: İlk su yüksekliği (m)

H_f: Cebri boru yükseklik kaybı (m)

H_s: Denge bacası seviyesi (m)

H_m: Türbin eylemsizlik katsayısı

J: Eylemsizlik momenti

K_{pm}: Mekanik güç sabiti

K_u: Hız sabiti

K_p: PID kontrol oransal katsayısı

K_d: PID kontrol türevsel katsayısı

K_i: PID kontrol integral katsayısı

K_a: Servo motor kazancı

L: Cebri boru uzunluğu (m)

L_s: Su haznesinden denge bacasına olan tünel uzunluğu (m)

N: Türbin devir sayısı (dev/dak)

N_s: Türbin özgül hızı

N_p: Generatör kutup sayısı

P: Suyun harcadığı güç yada türbinden elde edilen güç (W)

P_m: Türbin çıkış gücü (W)

P_e: Generatörün ürettiği elektriksel güç (joule)

$P_{yük}$: Tükettilen güç (joule)

P_k: Hat kayıpları (joule)

R_p: Kalıcı hız eğimi

R_t: Geçici hız eğimi

T_w: Suyun hareket süresi (s)

T_e: Dalga hareket zamanı (s)

T_{st}: Türbin yük değişim ve maksimum dalganın meydana gelmesi arasındaki zaman süresi (s)

T_{mek}: Mekanik tork (tork)

T_{elk}: Elektriksel tork (tork)

T_r: Sıfırlama süresi (s)

T_M: Türbinin mekanik hareket süresi (s)

T_a: Servo motor zaman sabiti (s)

U: Cebri boru su hızı (m/s)

U_0: Suyun ilk hızı (m/s)

vg_{min} , vg_{max} : Dağıtıcı hızı limitleri (pu/s)

Z_0: Cebri boru normalize empedansı

η : Türbinin hidrolik verimi

ρ : Suyun özgül ağırlığı (kg/m^3)

Q: Suyun debisi (m^3/s)

Δn: Hız değişimi

Q_s: Denge bacasındaki debi (m^3/s)

w: Türbin açısal hızı (rad/s)

β : Hız sapması sönümleme katsayısı

KISALTMALAR

IHA: Uluslararası Hidrolik Enerji Birliği (International Hydropower Association)

UNIDO: Birleşmiş Milletler Sanayi ve Kalkınma Organizasyonu (United Nations Industrial Development Organization)

HES: Hidroelektrik Santral

KHES: Küçük Hidroelektrik Santral

DSE: Debi Süreklilik Eğrisi

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

Ebru ÖZBAY

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
2009, Sayfa : 95

Elektrik enerjisi talebinin hızla artması nedeniyle, küçük hidroelektrik santrallerin önemi gittikçe artmaktadır. Bu nedenle, bu santrallerin kurulabilme olanaklarının ve işletme koşullarının tespit edilmesi gerekir. Bu çalışmada, Türkiye'nin hidroelektrik enerji üretiminde, küçük hidroelektrik santrallerin önemi incelenmiştir. Küçük bir hidroelektrik santralin bilgisayar ortamında, yük-frekans kontrolünü yapabilmek amacıyla, türbin, generatör ve regülatör modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu modeller birleştirilerek, küçük bir hidroelektrik santral modeli elde edilmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan türbinli hidroelektrik santral modelleri, farklı yüklenme durumları için çalıştırılarak, güç ve frekansın zamana göre değişimleri elde edilmiştir. Ayrıca, ilimizde bulunan küçük bir hidroelektrik santral, gerçek parametreleri kullanılarak modellenmiş ve yük-frekans kontrolü yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Küçük Hidroelektrik Santral, Türbin, Generatör, Regülatör, Modelleme, Yük-Frekans Kontrolü.

ABSTRACT

Master Thesis

MODELLING AND SIMULATION OF SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANTS

Ebru ÖZBAY

Fırat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical-Electronics Engineering
2009, Page : 95

Importance of small hydroelectric power plants have been increasing more and more because of fast increasing electrical energy demand. Hence, operation conditions and constructible possibilities of the plants must be determined. In this thesis, the role of small hydroelectric power plants in hydroelectric energy production of Turkey has been investigated. In order to carry out load-frequency control of small hydroelectric power plants in computer environment, the models of turbine, generator, and governor have been generated. Small hydroelectric power plant model has been then obtained by being combined these models. Hydroelectric power plant models having linear and nonlinear turbines have been acquired the variations of power and frequency with respect to time by being operated for different load values. In addition, the small hydroelectric power plant in Elazığ has been modeled by being taken into consideration its real plant parameters as well and ultimately presented load-frequency control.

Keywords: Small Hydropower Plant, Turbine, Generator, Governor, Modelling, Load-Frequency Control.

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ve kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Elektrik enerjisi üretim oranları dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en büyük paya hidroelektrik enerji sahiptir. Türkiye ’de hızla artan elektrik enerjisi talebi, yeni santralleri zorunlu hale getirmiştir. Bu talebi karşılamak için yapımına başlanan büyük ölçekli santrallerin yanı sıra, küçük ve orta ölçekli hidroelektrik santral (HES) projeleri de gündeme gelmektedir. Özellikle artan petrol ve doğalgaz fiyatları, ülkemizde bulunan kömürün kalitesinin düşüklüğü gibi etkenler göz önüne alındığında, HES ’lerin cazip bir seçenek olarak ortaya çıktığı görülmektedir.

HES ’lerin son zamanda önem kazanan türlerinden biri de, küçük su kaynaklarını değerlendirmek amacıyla kurulan nehir tipi santrallerdir. Bu tip santraller yükleme havuzunun sınırlı kapasitesi sebebiyle, çok küçük bir su depolama potansiyeline sahiptir ve sadece nehirde enerji üretimine yetecek debi olduğunda çalışabilirler [1]. Küçük hidroelektrik santraller (KHES) için genel bir tanım bulunmamakla birlikte, 0,5–10 MW kapasitedeki, düşük debili ve küçük düşülü HES ’ler birçok ülkede küçük sınıfına girmektedir. KHES ’ler tesis edildiği bölgenin ulusal şebekeye bağımlılığını azaltmaktadır. Büyük HES ’lere göre ilk yatırım bedellerinin yüksek olmasına rağmen, toplam finansman ihtiyacının küçük olması, daha kısa bir süre içinde yapılabilmesi ve yıllık işletme giderlerinin çok düşük olması, KHES ’lere yatırım yapmayı çekici hale getirmiştir. Türkiye ’de son dönemde özel firmalar tarafından KHES yatırımlarına gösterilen yoğun ilgi, bunun en güzel kanıtıdır [2]. KHES ’lerin en önemli rolü, enerji veya güç açığını kapatmaktan çok, optimum enerji üretimini temin ederek, konvansiyonel termik santrallerin toplam enerji üretimindeki payını ve enerji ithalatını azaltmaktır. KHES ’lerin su depolama imkanı, barajlı tip HES ’lere göre oldukça kısıtlı olduğundan, nehirden gelen sudan maksimum enerji edilecek biçimde çalıştırılmaları gerekir. Bu özelliklerinden dolayı KHES ’ler nehir tipi santraller olarak da adlandırılmaktadır [1].

Genel olarak nehir tipi bir HES ’in iki farklı çalışma biçimi vardır. İlk çalışma şekli Şebekeye Bağlı çalışmadır. Bu durumda santral üretiminin tümü şebekeye iletilecektir. Dolayısıyla santralin işletme amacı, mümkün olan en yüksek enerjiyi üretmektir. Doğal koşullar tarafından belirlenen nehir debisinin santral işletmesi ile değişmeyeceği açıktır. Fakat türbin verimlilik eğrileri ve anlık nehir debisi göz önüne alınarak, yükleme havuzu seviyesi kontrol edilebilir ve nehir debisinin en verimli şekilde kullanılması sağlanabilir. Yükleme havuzunun seviyesinin kontrol edildiği bu işletim şekline seviye kontrol denir.

İkinci çalışma şekli olan İzole Ada modunda ise santral, şebekeden bağımsız olan bir bölgede elektrik ihtiyacını karşılar. Bu çalışma prensibi nehir tipi santraller için normalde tercih

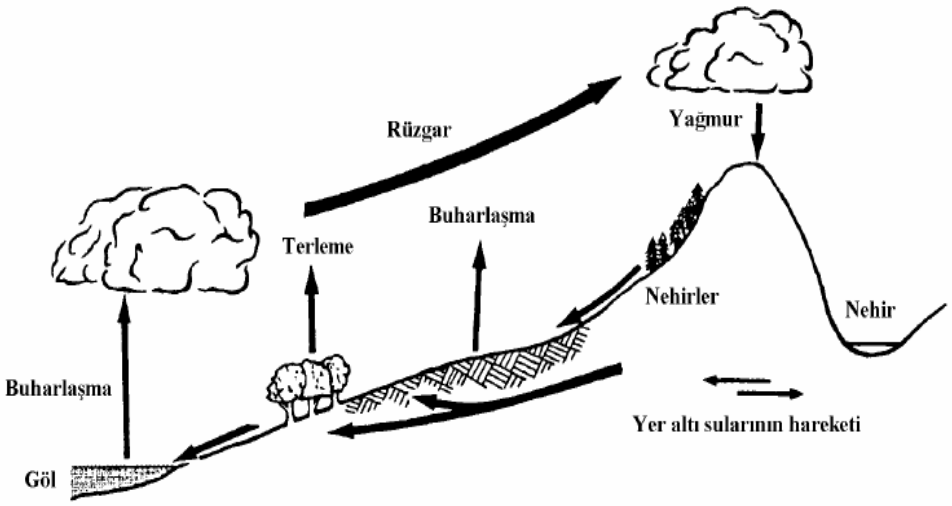
edilmeyip, ancak şebekede oluşacak bir arıza sonrasında ve santral tasarımı uygunsa kullanılabilir. Örneğin, santralin ve bölgesel yükün şebekeye tek bir iletim hattı ile bağlı olduğu durumlarda, santrali ve bölgesel yükü şebekeye bağlayan iletim hattında meydana gelecek bir arıza dolayısıyla iletim hattının kesici ile açılması sonrası, santral ve bölgesel yük bir izole ada oluşturabilir. Bu çalışma prensibinde santralin amacı enerji üretimini maksimize etmek veya nehir debisini verimli kullanmak değil, izole sistemin gerilimini ve frekansını belirli sınırlar içinde tutmaktır [3].

Suyun kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren HES 'lerde, gerekli hesaplamaların doğru bir şekilde yapılması ve verimi arttıracak yeni kontrol ve kumanda teknolojilerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla çeşitli araştırmacılar tarafından HES modelleri geliştirilmekte ve benzetim sonuçları elde edilmektedir [4].

Bu çalışmada; hidroelektrik enerji ve HES 'ler genel olarak araştırılmış, KHES 'ler ayrıntılı olarak incelenmiş ve HES modellerinden faydalanılarak, KHES 'ler için Matlab-Simulink yazılımında modeller geliştirilmiştir. Giriş bölümünde bu çalışmaların ve KHES 'lerin önemi belirtilmiş, ikinci bölümde ise hidroelektrik enerji ve hidroelektrik sistemlerin tasarımı hakkında genel bilgiler verilerek, türbin tipleri araştırılmıştır. Üçüncü bölümde KHES 'ler ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Dördüncü bölümde, doğrusal olan ve doğrusal olmayan türbin modelleri, regülatör modeli ve generatör modeli incelenmiştir. Beşinci bölümde ise, önce KHES 'i oluşturan kısımlar ayrı ayrı modellenmiş, daha sonra bu modeller birleştirilerek, bir KHES modeli elde edilmiştir. Farklı yüklenme durumları dikkate alınarak, çeşitli analizler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. HİDROELEKTRİK ENERJİ

Hemen hemen bütün enerji kaynakları, güneş ışınımının maddeler üzerindeki fiziksel ve kimyasal tesirinden meydana gelmektedir. Hidrolik enerji de güneş ışınımından dolaylı olarak oluşan bir enerji kaynağı olup, hidrolik çevrimi Şekil 2.1 'de verilmiştir. Deniz, göl veya nehirlerdeki sular güneş enerjisi ile buharlaşmakta, oluşan su buharı rüzgarın etkisiyle de sürüklenerek, dağların yamaçlarında yağmur veya kar halinde yer yüzüne ulaşmakta ve nehirleri beslemektedir. Böylelikle hidrolik enerji kendini sürekli yenileyen bir enerji kaynağı olmaktadır. Enerji üretimi ise suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi ile sağlanmaktadır [5].

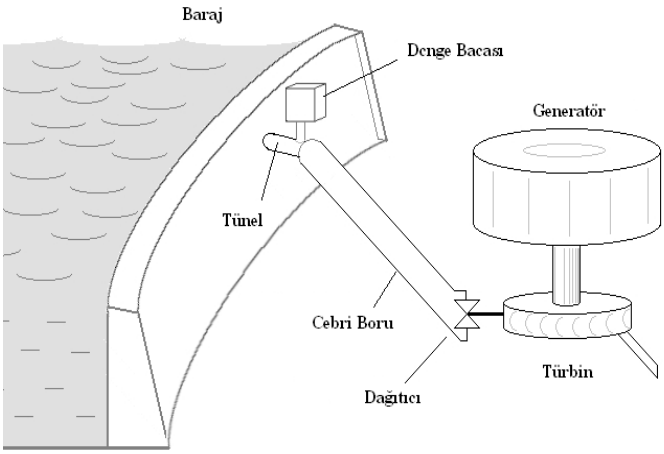


Şekil 2.1. Hidrolik çevrim

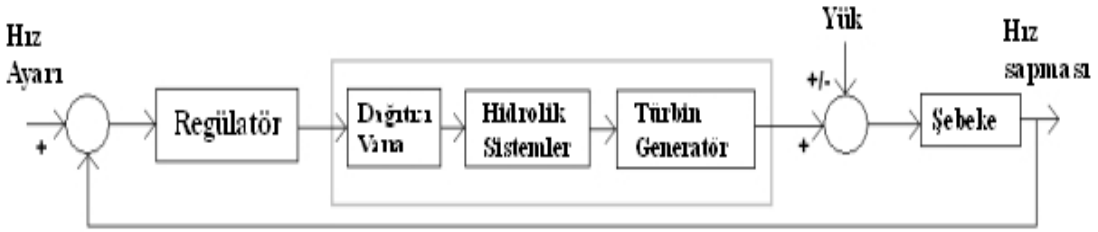
Hidrolik döngü; atmosfer, göl, deniz, okyanus, kara, yeraltı suları ve nehir arasında suyun döngüsel taşınması işlemidir. Buharlaşma ve yoğunlaşmada, güneş enerjisi ve yer çekimi kuvveti en etkili rolleri oynamaktadır. Hidrolik döngünün, zaman, hava ve toprak şartları, jeolojik konum vb. birçok bilinmeyen ve çok sayıda parametresi olduğundan, matematiksel olarak modellenmesi çok zordur. Uzun süreli çalışma periyotlarında ve tahminlerde, benzetim yaparken hidrolik döngünün önemi vardır. Ancak anlık, dinamik benzetimlerde hidrolik döngü dikkate alınmaz [6,7].

2.1. Hidroelektrik Santraller

HES 'lerin ana bölümleri; baraj seti arkasındaki rezervuar suyu, su giriş yapıları, tüneller, cebri borular, hidrolik türbinler, generatörler, transformatörler, türbinden geçtikten sonra suyun dışarı aktığı kısımlar ve su akışını ve elektrik enerjisi dağıtımını denetleyen yardımcı donanımlardır. HES 'lerde giriş gücü, suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden oluşmaktadır. Rezervuardan cebri boru içine akan su, sahip olduğu potansiyel enerji ve türbine kadar kazanmış olduğu kinetik enerji ile türbini çevirir ve çıkışta elektrik enerjisi elde edilir. Basit bir HES 'in yapısı Şekil 2.2 'de gösterilmiştir. Cebri borular, suyu türbinlere ileten büyük borular ya da tünellerdir. Türbinler, akan suyun hidrolik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürürler. Transformatörler, generatörler ile üretilen alternatif gerilimi uzak mesafelere iletmek üzere, gerilimi yükseltmek için kullanılırlar. Yapı ve bileşenleri ile bir HES 'in blok diyagramı Şekil 2.3 'de gösterilmiştir [8].



Şekil 2.2. Basit bir HES 'in yapısı



Şekil 2.3. Yapı ve bileşenleri ile bir HES 'in blok diyagramı

Izgaralar: Kanal tipi ve nehir tipi HES 'lerin tahrik suları, özellikle ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde ağaç yaprakları ve parçaları, ot, yosun vb. yabancı maddeleri de beraberinde sürükler. Bu yabancı maddeler, tünel ve cebri borulara, oradan da türbine giderek ayar kanatları ve çark kanatlarında büyük hasarlar meydana getirirler. Bu tahribatı önlemek amacıyla, tünele girmeden önce, suyun yabancı maddelerden arındırılması gerekir. Bunun için suyun tünele girdiği yerlere ızgaralar yerleştirilmiştir.

Su Alma Ağzı Kapakları: Gölde biriken suyun, gölden iş görmek için ilk çıktığı kısımdır.

Enerji Tünelleri: HES 'lerde, türbin tahrik suyunun iletimi için kullanılan tüneller; su yüzeyi havaya açık basınçsız tüneller, basınçlı tüneller ve cebri boru tünelleri olmak üzere üçe ayrılırlar. Üstü açık su iletim kanalları, don, heyelan, sel suları gibi tabiat şartlarından ve ağaç yaprakları gibi dış etkenlerden kolayca etkilendikleri ve büyük su basıncına dayanamadıkları için, büyük su basınçlarının ve debilerinin iletilmesinde, kanalların yerine enerji tünelleri kullanılır. Su iletim tünelleri çok sağlam, su sızdırmaz olarak ve iç yüzeyleri pürüzsüz olarak inşa edilmelidir.

Denge Bacaları: Yüksek düşülü ve uzun cebri borulu santrallerde, denge bacaları kullanılır. Su ile dolu olan ve içinden belirli bir hızda su akan her cebri borunun sonunda, kelebek veya küresel vana gibi bir kapama organı bulunur. Bu kapama organlarından sonra, türbin salyangozu ve ayar kanatları yer alır. Herhangi bir nedenle cebri borunun sonundaki kapama organı veya türbin ayar kanatlarının ani olarak kapanması anında, cebri boruda ve cebri boruya irtibatlı olan enerji tünelinde, ani olarak geçici bir basınç yükselmesi meydana gelir. Ya da türbin kanatları ani olarak % 100 açılacak olursa, cebri boru ve enerji tünelinde ani ve geçici bir basınç düşmesi meydana gelir. Ani olarak meydana gelen bu basınç düşmeleri ve yükselmeleri, suyun ataleti nedeniyle bazı tesislerde tehlikeli boyutlara ulaşarak, tahribata neden olacaktır. Bu durumun önüne geçmek için, HES 'lerde cebri borunun baş tarafına ve basınçlı tünelin sonuna denge bacaları yapılır. Tesis edilen bu denge bacaları yardımıyla meydana gelecek basınç değişmeleri nedeniyle su, denge bacası içerisinde yükselerek basınç darbeleri sönümlendirilmiş olur. Denge bacaları ya betonarme ya da çelik saclardan kaynak konstrüksiyonlu olarak yapılırlar. Denge bacaları, basınçlı ve basınçsız denge bacası olarak ikiye ayrılırlar. Basınçlı denge bacaları, yüksek düşülü ve cebri boru boyu uzun olan santrallerde kullanılırlar.

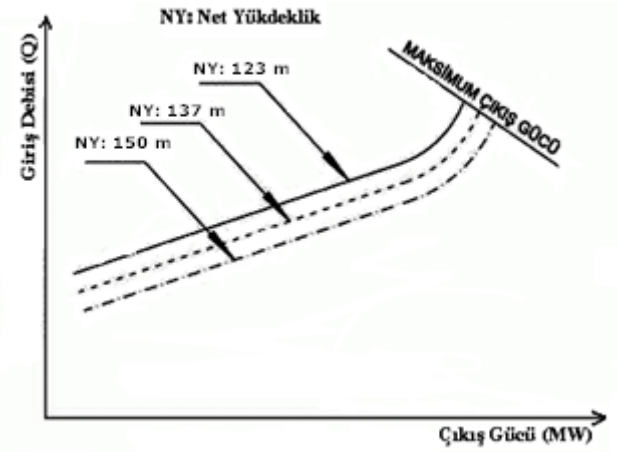
Cebri Borular: Tünel ile veya su alma tesisleri ile türbin salyangozu arasında tesis edilen ve genellikle çelik sac levhaların bükülüp kaynak edilmesiyle imal edilen, dairesel kesitli su iletim tesisleridir. Cebri borular, devamlı tam dolu ve basınç altında çalışabilecek şekilde imal edilirler. Düz veya meyilli olarak döşenirler. Kullanılan malzemelerin çekme, bükülme ve

çatlama zorlamalarına karşı dayanma özelliğinin olması gerekir. Cebri boruların iç yüzeylerinin pürüzsüz, iç ve dış yüzeylerinin paslanmaya karşı koruyucu bir kaplama ile kaplanmış olması gerekir. Ayrıca, cebri boruların ek yerlerinin su sızdırmaz ve sıcaklık değişimleri ile meydana gelen genleşmeleri zarar görmeden karşılayabilecek şekilde yapılmaları gerekir.

Havalandırma Sistemi: Herhangi bir nedenle türbin –generatör ünitelerinin devreden çıkması ve cebri borunun boşaltılması esnasında, cebri boru içinden boşalan suyun yerine yeterli miktarda havanın girmesi ve cebri boru içindeki basıncın atmosfer basıncı altına düşerek, cebri borunun zarar görmemesi için özel havalandırma donanımları kullanılır. Aynı şekilde, boş olan cebri boruya su doldurulması esnasında, cebri boru içindeki havanın sıkışmaması ve açık havaya atılması için de yine aynı havalandırma donanımının bulunması gerekir.

Kelebek ve Küresel Vanalar: Küçük düşülü, kanal tipi veya nehir tipi HES 'lerde türbinlerden önce kapama organı olarak sürgülü kızaklı kapakların kullanılması yeterlidir. Ancak, yüksek ve orta düşülü santrallerde, türbinlerden önce daha hızlı açılıp kapanabilen ve emniyetli kapama organlarına ihtiyaç vardır. Orta düşülü santrallerde, cebri borunun sonunda ve türbinden önce kapama organı olarak kelebek vanalar kullanılır. Yüksek düşülü ve uzun cebri borulu santrallerde ise, kapama organı olarak küresel vanalar kullanılır[9].

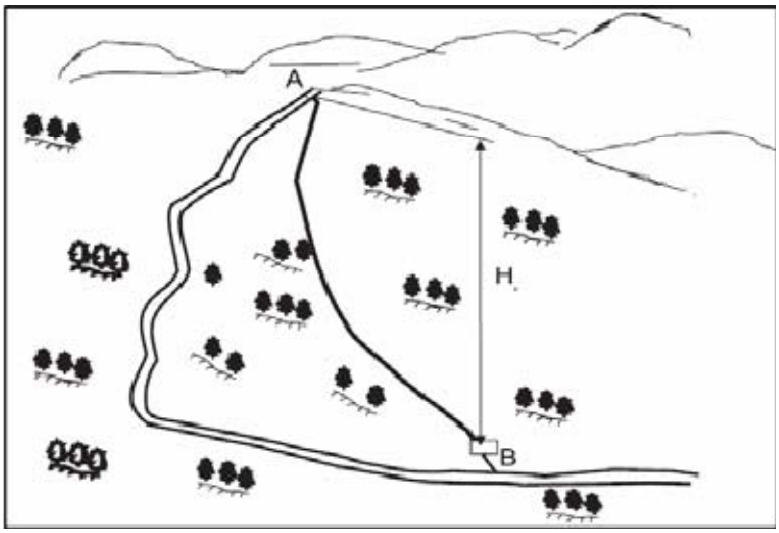
HES 'lerde üretilen güç, kritik bir değere kadar suyun net akış yüksekliğine, yani net hidrolik yüksekliğe ve cebri borudan akan suyun debisine bağlıdır. Rezervuar su seviyesi ile su çıkışı seviyesi arasındaki mesafe, brüt akış yüksekliği olarak tanımlanır. Net hidrolik yükseklik ise, kayıplardan dolayı brüt yükseklikten daha azdır. Farklı hidrolik yükseklikler için bir HES 'in giriş ve çıkış karakteristiği Şekil 2.4 'de gösterilmiştir [4].



Şekil 2.4. Hidrolik yüksekliğe bağlı olarak giriş ve çıkış gücü eğrileri [10]

2.2. Hidroelektrik Enerji Potansiyeli

HES 'lerde, suyun akım enerjisi su türbinleri vasıtasıyla mekanik enerjiye, bu mekanik enerji ise, su türbinlerinin tahrik ettiği generatörler ile elektrik enerjisine çevrilir. Suyun akım enerjisini oluşturmak için belirli miktarda suyun, belirli bir yükseklikten (düşü) düşürülmesi, başka bir deyişle, suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi gerekir [9]. Şekil 2.5 'de, A noktasından B noktasına H düşüsü ile akan nehrin yatağı ve nehirdeki suyu aynı yükseklikten B noktasındaki hidrolik türbine akıtabilecek alternatif bir cebri boru (veya su kanalı) gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Örnek bir nehir yatağı ve alternatif su akış güzergahı

Nehirdeki suyun akım enerjisi, güzergahtan bağımsız olarak aşağıdaki eşitlik ile belirlenir:

$$P = \eta . \rho . a_g . Q . H \tag{2.1}$$

Bu eşitlikte P suyun harcadığı güç yada türbinden elde edilen güç (W), η türbinin hidrolik verimi, ρ suyun özgül ağırlığı (kg/m^3), a_g yerçekimi ivmesi (m/sn^2), Q suyun debisi (m^3/s) ve H brüt yüksekliktir (m). Dolayısıyla, hidroelektrik güç, düşü ve debi ile doğrusal orantılıdır ve su akımından elde edilebilecek hidroelektrik enerji potansiyelini değerlendirebilmek için, su debisinde yıl içinde meydana gelebilecek değişimlerin ve elde edilebilecek düşünün bilinmesi gerekir. Enerji hesabına esas olan net düşü, suyun alındığı rezervuar su seviyesi ile santralden kuyruk suyuna deşarj edilen su seviyesi arasındaki düşey mesafeden, su yolunda meydana gelen kayıpların çıkarılması ile elde edilir [1].

2.2.1. Hidroelektrik Potansiyelin Belirlenmesi

Bir ülkedeki tüm akarsu havzaları için yapılan etütlerle, o ülkenin hidroelektrik potansiyeli belirlenmektedir. Hidroelektrik potansiyelin belirlenmesinde brüt potansiyel, teknik potansiyel ve ekonomik potansiyel kavramları önem taşımaktadır.

Akarsuların hidrolik potansiyeli, topoğrafik koşulların sağladığı düşü yüksekliğine ve suyun debisine bağlı olarak belirlenir. Bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin teorik üst sınırını gösteren brüt su kuvveti potansiyeli, mevcut düşü ve ortalama debinin oluşturduğu potansiyeli ifade etmektedir. Brüt potansiyel, maksimum teorik düzeyi göstermektedir. Brüt potansiyel, bütün doğal akışların deniz seviyesine, sınır aşan sularda sınıra kadar %100 türbin verimiyle elde edilebileceği varsayılan yıllık enerji potansiyelini ifade etmektedir.

Hidroelektrik enerji üretiminin teknolojik üst sınırını gösteren teknik yönden değerlendirilebilir su kuvveti potansiyeli, kullanılan teknolojiye bağlı olarak meydana gelebilecek düşü, akım ve dönüşümdeki kayıplar hariç tutularak hesaplanır. Teknik açıdan uygulanması mümkün su kuvveti projelerinin tümünün gerçekleştirilmesi sonucunda elde edilebilecek üretimin maksimum değerini gösteren teknik potansiyel, enerji değeri olarak brüt potansiyelin bir fonksiyonudur ve onun yüzdesi olarak ifade edilir [8].

Ekonomik olarak yararlanılabilir hidroelektrik potansiyel, bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin, ekonomik optimizasyonunun sınır değerini gösteren, gerek teknik açıdan geliştirilebilmesi mümkün, gerekse ekonomik yönden tutarlı olan tüm hidroelektrik projelerin toplam üretimi olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle ekonomik olarak yararlanılabilir hidroelektrik potansiyel, gelirleri giderlerinden fazla olan su kuvveti projelerinin hidroelektrik enerji üretimini göstermektedir.

HES 'lerin ekonomik yapılabilirliğinin hesaplanabilmesi için, enterkonnekte sistemde aynı enerjiyi üretecek kaynaklar gözden geçirilmekte ve en ucuz enerji kaynağı belirlenerek, HES projesi bu kaynakla mukayese edilmektedir ve ancak daha ekonomik bulunursa önerilmektedir. Ekonomik HES potansiyeli içindeki tüm projeler, termik santrallere göre verimleri daha yüksek olan projelerdir [11].

2.2.2. Türkiye 'nin Hidroelektrik Enerji Potansiyeli

Türkiye 'nin, deniz seviyesinden yüksekliği ortalama 1300 m 'dir. Ülkemizde yağışlar bölgeden bölgeye büyük farklılıklar göstermektedir. Yurdumuza düşen yıllık ortalama yağış miktarının 501 milyar m^3 ve bunun akarsulara dönüşen kısmının 186 milyar m^3 olduğu bilinmektedir. Türkiye için ortalama akış katsayısı % 37 'dir. Yağışlarla yeryüzüne düşen suyun

% 63 ’ü buharlaşma ve bitkisel terleme vb. nedenlerle yerüstü akış durumuna geçememektedir. Yıllık ortalama yağışın akış durumuna geçen 238 mm ’lik miktarına tekabül eden akış miktarı olan 186,05 km^3 olarak hesaplanan akarsularımızın tamamını kullanmak, yeterli ölçüde suyun akarsu yatağına bırakılması ve bazı topoğrafik ve jeolojik sınırlayıcı koşullar nedeniyle teknik yönden imkansızdır [12].

Türkiye, drenaj sahaları bakımından 26 havzaya ayrılmıştır. DSİ ve EİE tarafından, Türkiye ’nin mevcut 26 havzasında yapılan çalışmalar ve stokastik hesaplamalar neticesinde, brüt hidroelektrik enerji potansiyeli yaklaşık olarak 433 milyar kWh ’dır. Türkiye 433 milyar kWh brüt teorik hidroelektrik potansiyeli ile, Dünya hidroelektrik potansiyeli içinde %1 ’lik paya sahiptir. Tablo 2.1 ’de Türkiye ’deki havzaların kurulu güçleri ve potansiyelleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Türkiye ’deki havzalar [13]

Havza	Ortalama Akım (milyar m^3/yıl)	Stokastik Hesaplama (DSİ)				Yeni Kriterlerle Hesaplama		
		Teknik Potansiyel (GWh/yıl)	Ekonomik Kullanılabilir Potansiyel (GWh/yıl)	Kurulu Güç (MW)	Teknik Pot. Kullanma Oranı (%)	Ekonomik Kullanılabilir Potansiyel (GWh/yıl)	Kurulu Güç (MW	Teknik Pot. Kullanma Oranı (%)
Fırat	31.61	84.112	37.961	9.648	45.13	46.267	11.713	55
Dicle	21.33	48.706	16.751	5.051	34.39	24.353	6.165	50
Doğu Karadeniz	14.90	48.478	11.062	3.037	22.82	24.239	6.136	50
Doğu Akdeniz	11.07	27.445	5.029	1.390	18.32	12.350	3.127	45
Antalya	11.06	23.079	5.163	1.433	22.37	9.231	2.337	40
Batı Karadeniz	9.93	17.914	2.176	624	12.15	7.166	1.814	40
Batı Akdeniz	8.93	13.595	2.534	674	18.64	6.118	1.550	45
Marmara	8.33	5.177	….	….	….	….	….	….
Seyhan	8.01	20.875	7.571	2.001	36.27	9.394	2.378	45
Ceyhan	7.18	22.163	4.652	1.413	20.99	9.973	2.525	45
Kızılırmak	6.48	19.552	6.320	2.094	32.32	7.821	1.980	40

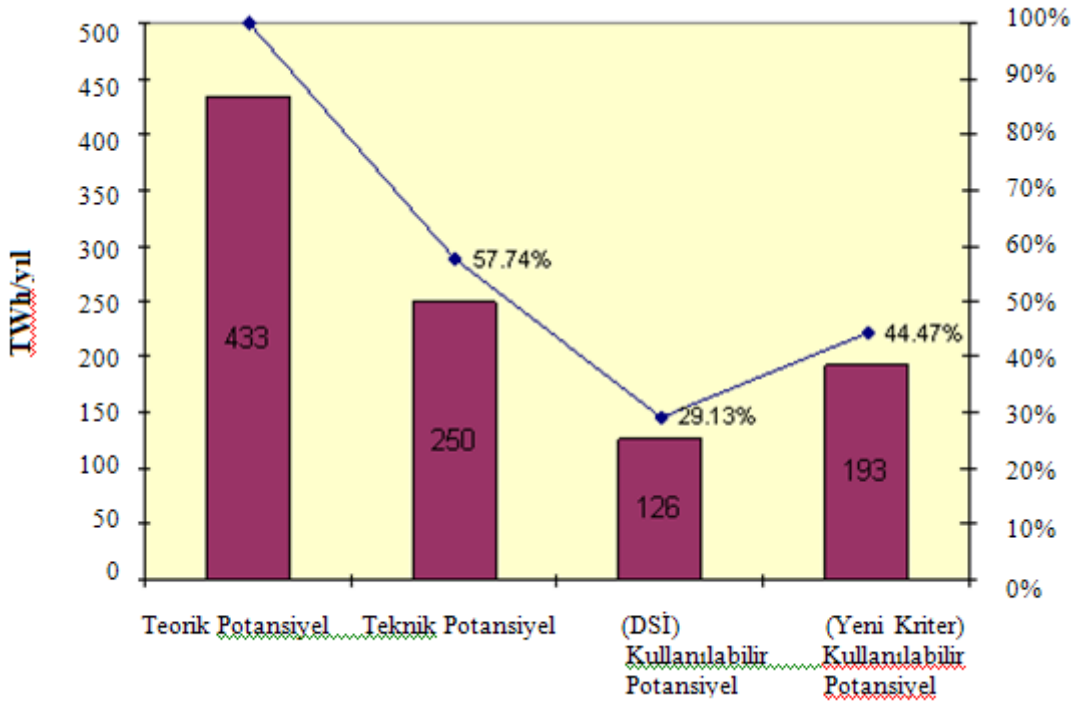
Sakarya	6.40	11.335	2.373	1.096	20.94	4.534	1.133	40
Çoruh	6.30	22.601	10.540	3.134	46.64	12.431	3.108	55
Yeşilırmak	5.80	18.685	5.297	1.259	28.35	8.408	2.129	45
Susurluk	5.43	10.573	1.602	507	15.15	2.643	669	25
Araş	4.63	13.114	2.287	588	17.44	5.901	1.494	45
Konya	4.53	1.218	104	32	8.54	104	32	8.54
Büyük Menderes	3.03	6.263	831	221	13.27	831	221	13.27
Van Gölü	2.39	2.593	257	62	9.91	257	62	9.91
Kuzey Ege	2.09	2.882	42	16	1.46	42	16	1.46
Gediz	1.95	3.916	243	94	6.21	243	94	6.21
Meriç Ergene	1.33	1	….	….	….	….	….	….
Küçük Menderes	1.19	1.375	143	48	10.40	143	48	10.40
Asi	1.17	4.897	102	37	2.08	102	37	2.08
Burdur Göller Böl	0.50	885	….	….	….	….	….	….
Akarçay	0.49	543	….	….	….	….	….	…..
Türkiye Toplamı	**186.06**	**432.976**	**126.109**	**35.559**	**29.13**	**192.551**	**48.768**	**44.47**

Ülkemizin teknik yönden değerlendirilebilir hidroelektrik enerji potansiyeli, 250 milyar kWh civarındadır. Türkiye bu potansiyeli ile Avrupa potansiyelinin yaklaşık olarak %20 'sine sahiptir. Bir başka açıdan bakıldığında Türkiye, Avrupa hidroelektrik potansiyelinde Rusya ve Norveç 'ten sonra üçüncü sırada gelmektedir. Türkiye, 126 milyar kWh ekonomik olarak yapılabilir potansiyeli ile, Avrupa ekonomik potansiyeli içinde yaklaşık %15 'lik bir potansiyel sahiptir [11].

Türkiye 'nin hidroelektrik kapasitesinin değerlendirilmesinde kullanılan ve herhangi bir tesisin ekonomik olarak yapılabilir olup olmadığı kararına mesnet teşkil eden kriterlerin daha yakından incelenmesi gerekir. Hesaplamalarda kullanılan kriterler, tamamen içsel maliyetler esas alınarak yapılmakta, HES 'lerin alternatifi olarak düşünülen termik santrallerin dışsal maliyetleri tümüyle göz ardı edilmektedir. Literatürde dışsal maliyetler, bu santrallerin sebep

olduğu sorunların (sera gazı emisyonları, asit yağmurları, atık maddelerin muhafazası, çevre kirliliği vb.) giderilmesi için gerekecek harcamalar olarak tanımlanmaktadır.

Ayrıca Türkiye genelinde henüz etüdü yapılmamış, 1–30 MW arası küçük tesislerden, minimum 10–15 milyar kWh/yıl, kanal ve barajlara konulacak türbinler yoluyla da 3-5 milyar kWh/yıl elektrik üretilebileceği düşünülmektedir. Bu kriterler göz önüne alındığında, ülkemizin ekonomik hidroelektrik üretim potansiyelinin 190 milyar kWh/yıl civarında olacağı ve kurulu güç değerinin 48000–50000 MW olacağı söylenebilir. DSİ tarafından stokastik metotlarla yapılan hesaplamalarla, belirtilen yeni kriterler ile yapılan hesaplamalar neticesinde varılan sonuçlar Şekil 2.6 'da gösterilmiştir. Tablo 2.2 'de, Tükiye 'nin toplam ekonomik HES potansiyeli görülmektedir.



Şekil 2.6. Türkiye 'nin hidroelektrik potansiyelinin dağılımı

Tablo 2.2. Türkiye 'nin toplam ekonomik HES potansiyeli (2007)

HES Durumu	HES Sayısı	Kurulu Güç (MW)	Ortalama Üretim (GWh/yıl)	Toplam Potansiyel İçindeki Payı (%)
İşletmede	148	13306	47590	32
İnşa halinde	158	6564	23620	16
Proje aşamasında	977	22260	79177	52
Toplam	1283	42480	150387	100

2.2.3. Dünya 'nın Hidroelektrik Enerji Potansiyeli

Uluslararası Hidrolik Enerji Birliği 'nin (International Hydropower Association-IHA) çalışmalarında, Dünya 'nın teknik hidroelektrik kapasitesi 14,2 trilyon kWh/yıl olarak hesap edilmektedir. Ekonomik hidroelektrik kapasite ise 8,1 trilyon kWh/yıl dır. Bu değerlerin dağılımı Tablo 2.3 'de görülmektedir.

Tablo 2.3. Dünya 'da teknik ve ekonomik hidroelektrik kapasitenin dağılımı

Kıta	**Teknik Kapasite**		**Ekonomik Kapasite**	
	GWh/yıl	**%**	GWh/yıl	**%**
Asya	6.800.000	47.8	3.600.000	44.4
Avrupa	1.035.000	7.3	793.000	9.8
Kuzey Amerika	1.665.000	11.7	1.000.000	12.3
Güney Amerika	2.700.000	19	1.600.000	19.8
Okyanusya (Avustralya)	270.000	1.9	107.000	1.3
Afrika	1.750.000	12.3	1.000.000	12.3
Toplam	**14.220.000**		**8.100.000**	

Tablo 2.3 'den, Dünya 'daki teknik kapasitenin %57 'sinin ekonomik kapasite olduğu ve en büyük kapasitenin Asya kıtasında olduğu, Asya kıtasını sırasıyla Güney Amerika, Afrika, Kuzey Amerika, Avrupa ve Okyanusya kıtalarının izlediği görülmektedir.

Avrupa 'nın teknik hidroelektrik potansiyeli, IHA 'nın çalışmalarına göre 1 trilyon kWh/yıl olarak kabul edilmiştir. Bu potansiyelin, yaklaşık %76,62 'sine tekabül eden 793 milyar kWh/yıl 'lık kısmı ekonomik potansiyel olarak kabul edilmektedir ve bu ekonomik kapasitenin %75 'i (595 milyar kWh/yıl) kullanılıyor durumdadır. Geriye kalan %25 'lik kısmının, 2000 MW 'ı inşa halindedir, 840 MW 'ın da planlaması yapılmıştır. Avrupa 'daki hidroelektrik kapasite ve dağılımı Tablo 2.4 'de verilmektedir. Avrupa kıtasında, bazı ülkelere ait, mevcut hidroelektrik kurulu güç ile elektrik üretiminin hidroelektrik kaynaklardan karşılanma oranı Tablo 2. 5 'de görülmektedir.

Tablo 2.4. Avrupa 'daki hidroelektrik kapasiteler

	Kapasite
Teknik potansiyel	1.035.000
Ekonomik potansiyel	793.000
Mevcut işletilen kapasite	595.000
Kullanılabilir kapasite	198.000
Mevcut işletmedeki kurulu güç (MW)	175.600
İnşa halinde kurulu güç (MW)	2000
Planlanmış kurulu güç (MW)	8400

Tablo 2.5. Avrupa ülkelerinde hidroelektrik enerji kullanımı

Ülke	**Mevcut Hidroelektrik Kurulu Güç (MW)**	**Elektrik Üretiminin Hidroelektrikten Karşılanma Oranı (%)**
Norveç	27.569	99.4
Fransa	25.200	15
İspanya	20.076	20
İsveç	16.200	55
İtalya	15.267	18.49
İsviçre	13.240	57.9
Avusturya	11.700	70.4
Romanya	5.860	34.8
Ukrayna	4.732	6.7
Almanya	4.525	2.6
Portekiz	4.394	27
Yunanistan	3.080	9.6
Yugoslavya	2.910	35
Bosna-Hersek	2.380	46
Finlandiya	2.340	21.5
Türkiye	12.494	25.21

Tablo 2.5 ’de, Norveç ’in elektrik ihtiyacının %99.4 ’ünü, Avusturya ’nın ise %70.4 ’lük kısmını hidrolik kaynaklardan karşılamasına rağmen, Almanya ’nın sadece %2.6 ’sının karşılaması dikkat çekmektedir. Türkiye ’de bu oran % 25 mertebesindedir [13].

HES ’ler ile elektrik üretimi, Dünya ’da toplam elektrik üretimine yaklaşık %23 oranında katkıda bulunmaktadır. HES ’ler ile enerji üretimi için uygun coğrafi koşulların sağlanması gerekmektedir. Türkiye, kurulması planlanan veya inşaatı süren HES ’ler ile Avrupa ’da Norveç ’ten sonra en fazla yıllık hidroelektrik enerji üretim potansiyeline sahip ikinci ülke sıfatını taşımaktadır. Bu potansiyel, Avrupa ülkelerinin toplam hidroelektrik potansiyelinin %16,5 ’i mertebesindedir. Bu oran Almanya, İsviçre, İzlanda, Avusturya, İtalya, İsveç, Polonya ve Norveç ’in üretiminden daha fazladır. Sadece GAP ’ın yıllık hidroelektrik enerji üretim potansiyeli, Avrupa ’nın toplam potansiyelinin % 3,5 ’i olarak, Arnavutluk, Belçika, Bulgaristan, Danimarka, Finlandiya, Almanya, Yunanistan, Macaristan, Portekiz, Romanya, Lüksemburg, İspanya, İngiltere, Hırvatistan, İrlanda gibi ülkelerin hidroelektrik potansiyelinin üstündedir [14].

Halen işletmede olan HES ’lerin kapasite sıralamasında ise GAP kapsamındaki Atatürk ve Karakaya HES ’leri Dünya ’da sırasıyla 23. ve 28. sırada, Avrupa ’da ise 8. ve 11. sırada yer almaktadır. Bu durum GAP ’ın büyüklüğünü ve önemini açıkça ortaya koymaktadır. GAP içinde yapılan barajlar Türkiye ’nin elektrik enerjisinin %40 ’ını karşılamaktadır. Çoruh nehri üzerinde yapımı planlanan barajlar da Türkiye ’nin elektrik gereksiniminin %13 ’ünü karşılayabilecek kapasitededir.

Avrupa enerji istatistiklerine göre, ülkemiz elektrik enerjisi üretimi yönünden dünya ülkeleri arasında 43., elektrik tüketimi yönünden ise 31. sıradadır. Kişi başına tüketimde ise 88. sırada bulunmaktadır. Türkiye ’nin enerji tüketimi yılda ortalama %5 civarında artış göstermektedir. 1980 yılında 31.9 milyon ton eşdeğeri petrol (MTEP) olan toplam enerji tüketimi, %100 civarında bir artışla 1993 yılında 61.1 MTEP ’e yükselmiştir [15,16].

2.3. Hidroelektrik Sistemlerin Tasarımı

Bir hidroelektrik sistemin tasarımı 4 aşamada gerçekleşir.

2.3.1. Kapasite ve Talep Araştırması

Bir enerjiye talep olduğunda, ne kadarlık bir enerjinin hangi amaç için istenildiği doğru olarak belirlenmelidir. Bu aşamada, kullanıcıların kullanım kapasitelerinin belirlenmesi de önemlidir. Kırsal bölgeler için, genelde mikro hidrolik sistemler planlanmaktadır.

2.3.2. Hidrolojik Çalışma ve Mevki Araştırması

Bu aşamada sistemin kurulacağı yerin hidrolik potansiyeli belirlenir. Akarsu debisinin yıl boyunca değişimi belirlenir, suyun en verimli ve en ucuz olarak alınacağı yer tespit edilir. Ayrıca, her dönem için ne kadarlık bir güç sağlanabileceği de tespit edilir. Hidrolojik çalışmada, suyun farklı amaçlarla kullanılması (mesela zirai sulama amaçlı) durumu da dikkate alınmalıdır.

2.3.3. Ön Fizibilite Çalışması

Bu çalışma hızlı bir fiyat belirleme çalışmasıdır. Hidrolik sistem tasarımcısı, talebi karşılayacak şekilde, genellikle üç veya dört farklı seçenek ortaya koyar. Bunların ilk ikisi, iki farklı hidrolik sistemin yerleştirilmesi, üçüncüsü merkezi enerji nakil sisteminin geliştirilmesi ve sonuncusu ise ihtiyacı karşılayacak şekilde bir dizel generatör kullanılması olabilir. Ön fizibilite çalışması, bu seçenekleri karşılaştırarak, önemli özelliklerini ortaya koyar. Tüketici, bu seçenekleri ve karşılaştırmalı fiyatları bilmek isteyecektir. Ayrıca, ön fizibilite çalışmasında, enerji talep çalışmalarının hidrolojik çalışma sonuçları ile karşılaştırılması da yapılır. Talep çalışması, güç değişimleri karşısında talebin nasıl olacağı, hidroloji çalışması ise güç değişimlerinin nasıl sağlanacağı hakkında bilgi verir.

2.3.4. Tam Fizibilite Çalışması

Ön fizibilite çalışmasında, hidrolik sistemin uygulanabilir olduğu belirlenirse, mühendislik hesapları ve maliyet hesapları detaylı olarak tam fizibilite çalışmasında yapılır. Ayrıca, ekonomik kriterleri kullanarak yapılan parasal çalışmalar ve işletme ve bakım masraflarının hesaplanması da önemlidir. Fizibilite çalışmasında, çalıştırma ve bakım birinci, ekonomi ve tesis faktörü ikinci, mühendislik tasarımı ise üçüncü önceliktedir. Ayrıca, fizibilite çalışmasında, detaylı kullanma tarifesi de belirtilmelidir. Yani kurulacak sistemden üretilecek elektrik enerjisi, hem ev elektriğinde ve hem de sanayide güç kaynağı olarak kullanılacaksa, bu koşullar ayrıntılı olarak belirtilmelidir. Aynı yolla, farklı amaçlı kullanıcılar için öncelik hakları (sulama ve hidrolik güç), net bir şekilde ortaya konmalıdır. Bu durum, daha sonra ortaya çıkabilecek zorlukları çözmeye yardım edecektir [5].

2.4. Hidroelektrik Sistemlerin Sınıflandırılması

Bir HES tesisi, kurulacağı yerin topoğrafik durumuna göre farklı yapılarda olabilir. HES ’leri farklı sınıflara ayırmak mümkündür. HES ’ler için yapılacak başlıca sınıflandırmalar;

düşülerine göre, ürettikleri enerjinin karakter ve değerine göre, kapasitelerine göre, yapılışlarına göre, üzerinde kuruldukların suyun özelliklerine göre ve baraj gövdesinin tipine göre yapılabilir.

2.4.1. Düşülerine Göre HES 'ler

Alçak Düşülü Santraller: Düşüsü 15 m 'den az olan, genellikle debisi büyük, düz arazilerde akan, yatak eğimi az nehirler üzerinde kurulan, çoğunlukla Kaplan tipi türbin kullanılan santrallerdir.

Orta Düşülü Santraller: Düşüsü 15–50 m olan, çeşitli debilerdeki nehirler üzerinde kurulan, uzun cebri boru sistemi olmayan, Kaplan veya Francis tipi türbin kullanılan santrallerdir.

Yüksek Düşülü Santraller: 50 m 'den büyük düşüsü olan, genellikle engebeli veya dağlık araziden akan nehirler veya barajlar üzerinde kurulan santrallerdir. Debiler değişiktir, yaklaşım kanalı ve tüneli vardır, uzun bir cebri borusu vardır, Francis veya Pelton tipi türbinler kullanılır.

2.4.2 Ürettikleri Enerjinin Karakter ve Değerine Göre HES 'ler

Baz Santraller: Devamlı olarak % 30 'un üzerinde kullanma faktörü (plant factor) ile enerji üreten santrallerdir.

Pik Santraller: Enerjinin en çok ihtiyaç duyulduğu sürelerde çalışan santrallerdir, kullanma faktörü % 30 'un altında olabilir [17].

2.4.3. Kapasitelerine Göre HES 'ler

Büyük Ölçekli Hidroelektrik Sistemler: Bu sistemlerin gücü 50 MW 'ın üzerindedir.

Orta Ölçekli Hidroelektrik Sistemler: Güç bölgeleri 10–50 MW arasındadır.

Küçük Hidroelektrik Sistemler: Güç bölgeleri 0,5–10 MW arasındadır.

Mini Ölçekli Hidroelektrik Sistemler: Bu sistemler ulusal enerji şebekesine daha az katkıda bulunurlar. Bunlar 100 – 500 kW güç bölgesinde çalışırlar.

Mikro Ölçekli Hidroelektrik Sistemler: Çok daha küçük ölçekte olurlar ve ulusal enerji şebekesine elektrik enerjisi sağlamazlar. Ana yerleşim bölgelerinden uzaktaki alanlarda, yani ulusal enerji şebekesinin ulaşmadığı bölgelerde kullanılırlar. Güçleri, genellikle sadece bir yerleşim yeri veya çiftlik için yeterlidir. Güç bölgeleri, 200 W 'dan başlayarak, bir grup evin

veya çiftliğin aydınlatma, pişirme ve ısınma enerjisini sağlayacak şekilde, 100 kW 'a kadar çıkabilir. Küçük fabrikaların veya balık çiftliklerinin enerji ihtiyacını karşılayacak şekilde ve ulusal enerji sisteminin bir parçası olmaksızın çalışabilirler. Mikro hidroelektrik sistemlerde, elektrik enerjisi üretimi de şart değildir. Birçok uygulamada, mekanik enerjisinden yararlanılarak değirmen sistemlerinde kullanılabilir. Her iki kullanım için de sistem özellikleri aynıdır.

Enerji literatüründe büyük HES 'ler, klasik yenilenebilir kaynak grubunda ele alınırken, küçük, mini ve mikro HES 'ler, yeni ve yenilenebilir kaynaklar grubuna sokulmaktadır. Küçük hidroelektrik sistemler çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Düşüye göre yapılan sınıflandırmada; 2- 20 m alçak düşü, 20–150 m orta düşü ve 150 m ve yukarısı yüksek düşü olarak kabul edilir. Genellikle düşük birim maliyeti nedeniyle orta ve yüksek düşülü sistemlerin yapılması tercih edilir [5].

Birleşmiş Milletler Sanayi ve Kalkınma Organizasyonu (UNIDO) 'nun sınıflamasına göre KHES 'ler, 1MW ile 10MW arası kurulu güçlere sahip santralleri kapsamaktadır. Dünya çapında kabul görmüş üst sınır 10 MW olmasına karşılık, Çin Halk Cumhuriyeti 'nde bu sınır 25 MW olarak kabul edilmiştir. Genel olarak KHES 'lerde 2 MW 'ın altındaki güçler mini, 500 kW 'ın altındaki güçler mikro-hidro ve 10 kW 'ın altındaki güçler ise piko-hidro olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma ülkelere göre farklılık göstermekle birlikte, temel prensipler küçük ve büyük ölçekli HES 'ler için aynıdır [18-20].

2.4.4. Yapılışlarına Göre HES 'ler

Yer Altı Santrali: Topoğrafik, jeolojik, ekonomik ve emniyet nedenleri ile santral yer altında yapılır. (Hasan Uğurlu HES, Doğankent II HES, Oymapınar HES vb.)

Yarı Gömülü veya Batık Santral: Açıkta yer yoksa santral dar ve kayalık bir vadide yapılacaksa, santralin yarısı yer altında, yarısı açıkta olabilir veya santral kot itibarı ile tamamen yer altında yapılabilir. (Keban HES, Yahşihan HES vb.)

Yer Üstü Santrali: Generatörler ve santral binası yerin üstündedir.

2.4.5. Üzerinde Kuruldukları Suyun Özelliklerine Göre HES 'ler

Nehir Santralleri: Yüksek debili akarsu yataklarında, suyun hızından dolayı kazanmış olduğu kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürerek elektrik enerjisi üretilir.

Kanal Santralleri: Bir regülatör vasıtasıyla suyun normal akış yatağından çevrilmesi ve iletim kanalı ve/veya iletim tüneli içinden taşınarak, düşü noktasına göre yükseklik kazandırılmasıyla elektrik enerjisi üretilir.

Baraj Santralleri: Bir bent arkasında suyun birikmesi sağlanarak, yükseklik kazandırılmasıyla oluşan potansiyel sayesinde elektrik enerjisi üretilir.

Pompaj Rezervuarlı Santraller: İki adet rezervuarı vardır. Elektriğin birim fiyatının ucuz olduğu saatlerde türbinler pompa olarak çalıştırılarak, alt rezervuardan üst rezervuara su basılır. Enerjiye ihtiyacın ve elektrik birim fiyatının yüksek olduğu pik saatlerde, üst rezervuardan bırakılan sular alt rezervuara geçer [17].

2.4.6. Baraj Gövdesinin Tipine Göre HES 'ler

HES 'ler baraj gövdesinin tipine göre, ağırlıklı beton gövdeli barajlı, beton kemer gövdeli barajlı, kaya dolgu gövdeli barajlı ve toprak dolgu gövdeli barajlı HES 'ler şeklinde sınıflandırılabilirler [9].

2.5. Türbin Çeşitleri

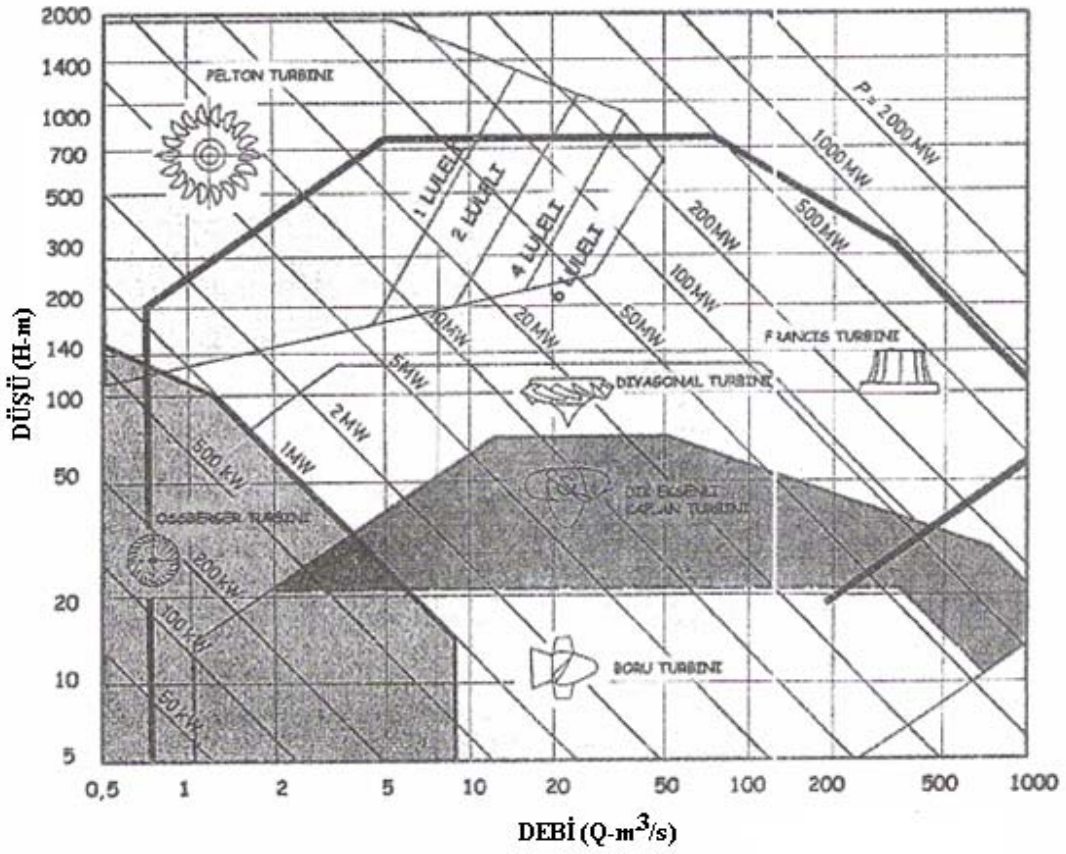
Hidrolik türbinler, suyun hidrolik enerjisini döner çarklar yardımı ile mekanik enerjiye çeviren hidrolik makinalardır. Hidrolik makinalar, su türbinleri ve su çarkları olmak üzere ikiye ayrılırlar. Su türbinleri dinamik hidrolik makinalardır, su çarkları ise su ağırlığı kuvveti makinalarıdır. Hidrolik türbinlerde, türbin rotorunun kanat aralıklarından geçirilen suyun basıncı, dönen türbin rotorunun kanat aralıklarında mekanik enerjiye dönüştürülür. Buna karşın su çarklarında, suyun mevcut olan potansiyel enerjisi, suyun çark kepçelerine dolması ve ağırlık tesiri ile çarkı döndürmesi suretiyle mekanik enerjiye dönüşür. Su türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisinin, iletim hatları ile uzak mesafelere iletilmesi ile birlikte daha büyük, daha güçlü ve birbirleri ile paralel olarak çalışan HES 'ler kurulmaya başlanmıştır. Modern anlamda otomatik olarak yük-frekans ayarlaması yapılabilen, Francis, Kaplan ve Pelton tipi hidrolik türbinler, 1920 'lerden itibaren kullanılmaya başlanmıştır ve bu tip türbinler hala çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Günümüzde imal edilen büyük güçlü hidrolik türbinlerin verimleri %95 'e kadar yükselmiştir. İşletme tarzlarına, yapılış şekillerine, hidrolik düşüye ve hidrolik akımın rotordaki yönüne göre, hidrolik türbinleri çeşitli sınıflandırmalara tabi tutmak mümkündür [4].

Değişik düşüler için farklı türbin tipleri kullanılmasının nedeni, türbin ile generatör arasındaki hız değişimini en aza indirmektir. Bu nedenle elektrik üretiminde, rotor hızının

mümkün olduğunca 1500 dev/dak 'ya yakın olması istenir. Herhangi bir türbinin hızı, düşü yüksekliğinin karekökü ile doğru orantılı olarak azalmaktadır. Bu nedenle alçak düşülü yerlerde daha hızlı türbinler tercih edilmektedir. Tablo 2.6 'da, düşü değerine göre türbinlerin sınıflandırılması görülmektedir [1]. Şekil 2.7 'de ise, düşüye ve debiye göre çeşitli türbin tiplerinin çalışma bölgeleri görülmektedir.

Tablo 2.6. Düşü değerine göre türbinlerin sınıflandırılması [18]

Düşü Sınıflandırması	**Türbin Tipi**	
	Aksiyon (Etki)	**Reaksiyon (Tepki)**
Yüksek Düşü (>50m)	Pelton Turgo Multi-jet Pelton	
Orta Düşü (15-50m)	Cross-flow Turgo Multi-jet Pelton	Francis (salyangozlu)
Düşük Düşü (<15m)	Cross-flow	Francis (açık su odalı) Propeller Kaplan



Şekil 2.7. Düşüye ve debiye göre türbin tiplerinin çalışma bölgeleri [21]

Herhangi bir yer için en uygun türbin tipinin seçimi, o yerin karakteristik özelliklerine bağlıdır. Ayrıca, düşü ve debi değerine bağlı olarak hesaplanan özgül hız değerlerine bakılarak da türbin tipi belirlenir. Bir türbinin özgül hızı (N_s), o türbine benzer olan ve aynı cins akışkanla 1 m net düşü altında çalışıp, en iyi verimle milinden 1 BG güç veren türbinin, dakikadaki devir sayısı olarak tanımlanır. Tablo 2.7 'de, özgül hız değerine göre türbin tiplerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.

Tablo 2.7. Özgül hıza göre türbinlerin sınıflandırılması

Türbin Tipi	**Özgül Hız (N_s-dev/dak)**
Pelton	12-30
Turgo	20-70
Cross-flow	20-80
Francis	80-400
Kaplan	340-1000

Türbin tipi seçiminde türbin veya generatörün hızı da önemlidir. Diğer bir kriter ise, türbinin kısmi debi koşullarında çalıştırılıp çalıştırılmayacağıdır. Tüm türbinler, bir güç-hız ve bir verim-hız karakteristiğine sahiptir. Türbin tarafından döndürülen generatörler, tipik bir türbinin optimum hızından daha yüksek bir devirde dönerler. Bu bağlantı kayış-kasnak, dişli mekanizması veya bir kavrama yardımıyla sağlanır. Burada, hız oranının minimum olması tercih edilir. Bu durumda bağlantı daha kolaydır ve maliyet daha düşüktür. Türbin hızının generatör hızında olması durumunda, generatör direkt olarak türbin miline bir kavrama ile bağlanır [5].

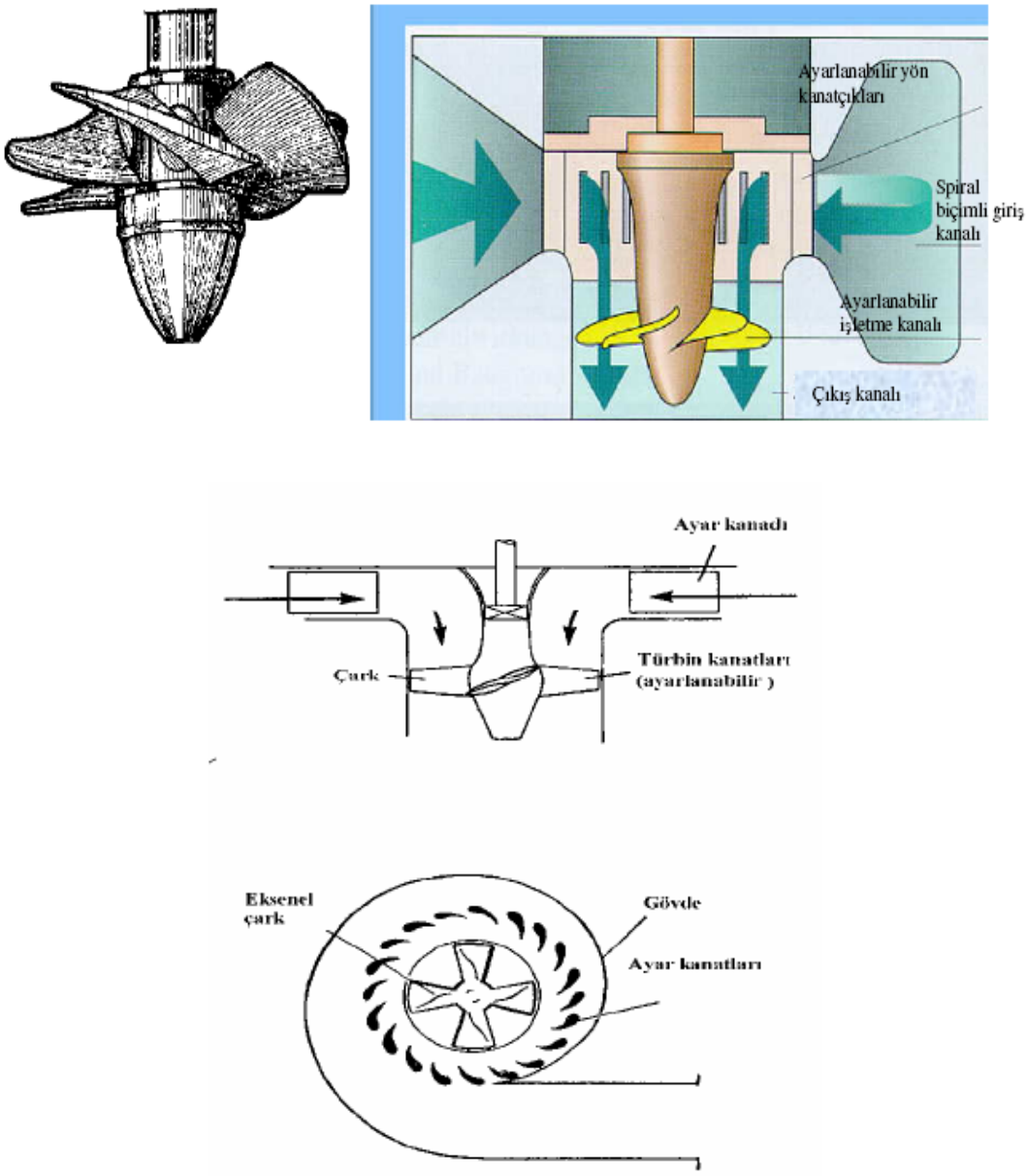
Genellikle hidrolik türbinler, aksiyon türbinleri ve reaksiyon türbinleri olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar.

2.5.1. Reaksiyon Türbinleri

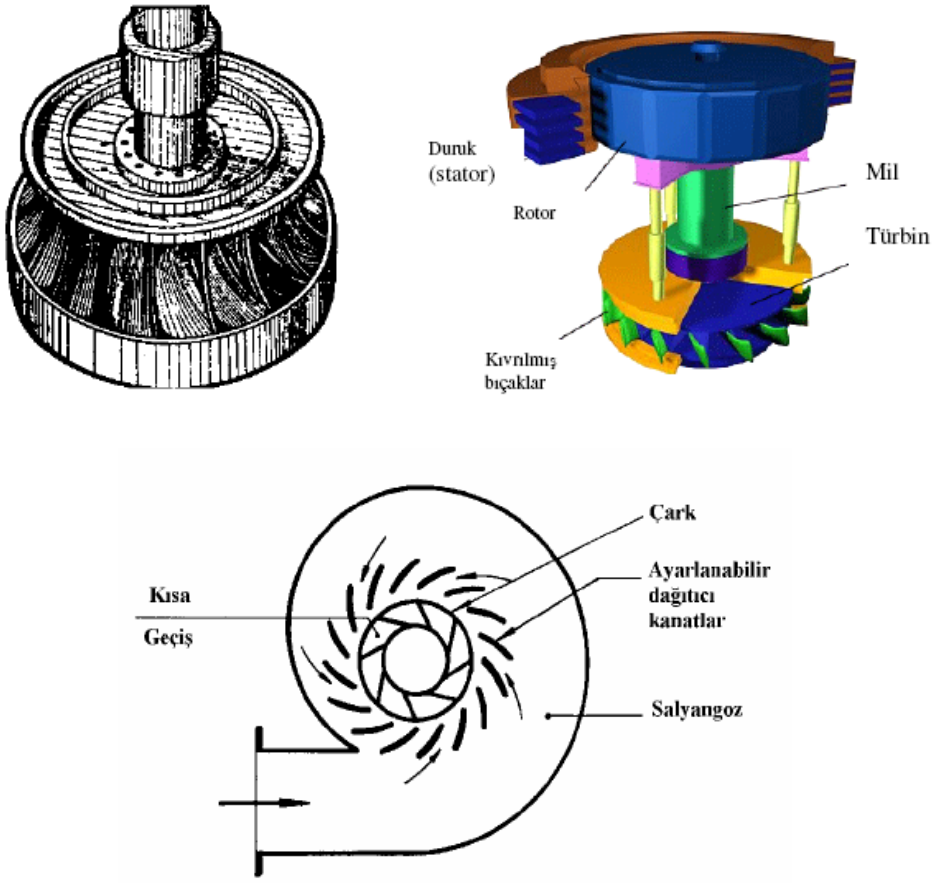
Reaksiyon türbinleri tamamen suyun içinde olup, gövdeleri basınca dayanıklı olarak imal edilmişlerdir. Türbinin kanatlarında oluşan basınç farkı rotorun dönmesini sağlamaktadır. Reaksiyon türbinleri grubuna, Francis tipi hidrolik türbinler ile Kaplan tipi hidrolik türbinler girmektedir. Bu tip türbinlerde, türbin rotoru kanatçıkları arasındaki suyun giriş basıncında bir düşüş meydana gelir. Su basıncında meydana gelen bu düşüş, suyun ivmelenmesine, yani hızlanmasına neden olur. Hidrolik düşünün ve türbinden geçecek su debisinin değerlerine göre, hidrolik türbinlerin kullanım alanları değişmektedir. Kaplan tipi hidrolik türbinler, büyük su debilerinde ve küçük düşülerde kullanılırlar. Francis tipi hidrolik türbinler ise, genel olarak orta yükseklikteki su düşülerinde ve orta değerlerdeki su debilerinde kullanılırlar [4].

Reaksiyon türbinlerinin imalatında, sabit ve hareketli kısımlardaki kanat ve yüzeylerin çok daha hassas işlenmesi gerektiğinden, bu türbinler aksiyon türbinlerine göre daha ileri üretim teknikleri gerektirirler. Bununla birlikte, alçak düşülü yer sayısının daha fazla ve bu merkezlerin daha fazla elektrik enerjisi talep edilen yerlere yakın olması, bu türbinlerin daha basit şekilde imal edilmeleri için yapılan çalışmaları arttırmıştır. Reaksiyon türbinlerinde, basınç altındaki su, türbine girmeden tamamen hıza çevrilir. Kaplan türbinlerinde, stator ve rotor kanatları ayarlanabilirken, Francis türbinlerinde sadece stator kanatları ayarlanabilir. Francis türbinlerinde su, spiral şeklinde ve kanatları yönlendirilebilen bir gövde içinde, rotorun eksenel olarak dönmesini sağlar. Reaksiyon türbinlerinin en büyük avantajı, alçak düşülerde, modern generatörler için gerekli devir sayısını sağlayabilmeleridir [19].

Şekil 2.8 ’de Kaplan türbini için, Şekil 2.9 ’da ise Francis türbini için, türbin çarkı ve çalışma ilkesi gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Kaplan türbin çarkı ve çalışma ilkesi [22]

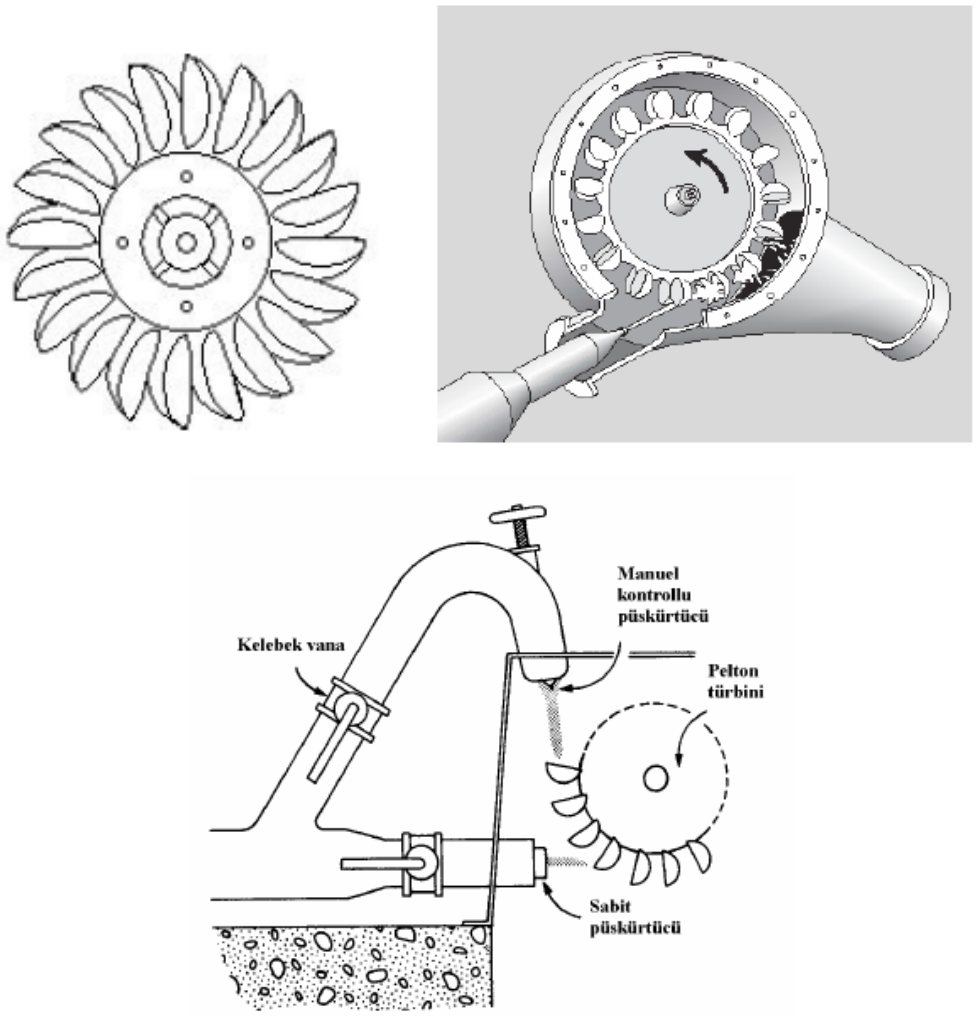


Şekil 2.9. Francis türbin çarkı ve çalışma ilkesi [22]

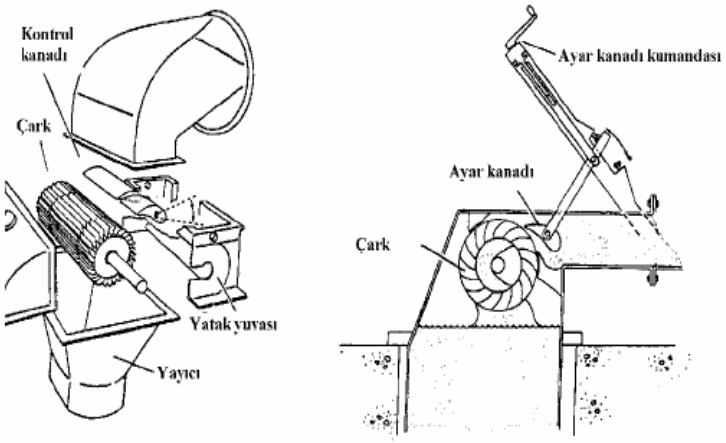
2.5.2. Aksiyon Türbinleri

Aksiyon türbinlerinde kanatlar, reaksiyon türbinlerinden farklı olarak hava içindedir ve püskürtülen basınçlı su ile çalışmaktadırlar. Su, kanatlara temastan önce ve sonra, aynı atmosfer basıncında kalmaktadır [10]. Bu tip türbinler, 1880 yılında Pelton tarafından keşfedilmiş ve gelişmeleri günümüze kadar devam etmiştir. Pelton tipi hidrolik türbinler, çok yüksek hidrolik düşüler ve küçük su debileri için kullanılmaktadırlar. Michell-Banki (cross-flow) tipi türbinler de bu türbin sınıfına dahil edilebilirler. Bu tip türbinler, 1903 yılında M.Michell tarafından keşfedilmiş ve 1917 yılında D.Banki tarafından geliştirilmiştir. Bu tip özel türbinlerin kullanılma sahası çok dar olup, genellikle küçük güçlü, nehir tipi santrallerde tercih edilmektedirler [11].

Aksiyon türbinlerinden Pelton ve Crossflow türbinlerinin verimleri, nominal debilerinin % 20 'sine kadar çok az değişmektedir. Bu türbinlerin verimleri, nominal çalışma değerleri içinde, reaksiyon türbinlerinden daha düşüktür. Şekil 2.10 'da Pelton türbini için, Şekil 2.11 'de ise Cross-flow türbini için türbin çarkı ve çalışma ilkesi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Pelton türbin çarkı ve çalışma ilkesi



Şekil 2.11. Cross-flow türbin çarkı ve çalışma ilkesi [22,5]

2.6. Regülasyon Sistemi

Regülatörler, türbin hızını denetlemek için kullanılırlar. Regülatörün görevi, mekaniksel veya elektriksel olarak türbin milindeki hızı ayarlamaktır. Daha fazla güce gereksinim duyulduğunda, türbin girişine daha fazla su verilir. Benzer olarak daha az güce gereksinim duyulduğunda ise, türbin girişi kısılarak, daha az miktarda suyun türbine girişi sağlanır. Mesela, 4 kutuplu bir generatör, 50 Hz için, 1500 dev/dak ile dönmelidir. Bu hızın artması veya azalması durumunda, üretilen frekans da artar veya azalır. Hidrolik sistemde kullanılan regülatörler iki grupta incelenir. Bunlar geleneksel ve geleneksel olmayan regülatörlerdir. Geleneksel olanlar, yüksek standartta olup, tüm sistem boyutlarında kullanılırlar. Bu regülatörler karmaşık ve pahalıdırlar. Son zamanlarda küçük sistemler için, yük denetim regülatörleri kullanılmaya başlanmıştır. Bunların yapısı çok daha basittir. Maliyetin düşük olması istenen bütün mikro hidrolik sistemlerde, yük denetim regülatörleri tercih edilir. Yük denetimi bir elektronik aygıt olup, kullanıcı yükünün değişmesi durumunda bile, generatör de sabit bir elektrik yükü sağlar [23].

Türbinde, debi akış kontrol cihazına ve regülatör sistemine ihtiyaç duyulmaz. Türbin debisi, sürekli aynı değerde sabit tutulur. Yük kontrolü, generatörde daima sabit bir elektrik yükünü garanti eder. Türbin çıkış gücü sabittir, dolayısıyla hız da sabit olacaktır. Yük kontrolü, ana yük tarafından istenmeyen ikinci bir yükü sağlayarak, sabit bir generatör çıkışı sağlar. Daha az yüke ihtiyaç olduğu anda, türbin hızı ve frekans düşmeye başlayacaktır. Bu durum yük kontrolü tarafından algılanacak ve ilave yükü sağlamak üzere dirençler devreye girecektir. Böylece kullanıcı yükünün değişmesi durumunda da generatördeki toplam yük sabit kalacaktır. Yük kontrolü ile normalde frekans veya gerilim sürekli ölçülerek, türbin hızı kontrol edilecektir. Bu sistemin en büyük avantajı, ucuzluğu ve basitliğidir. Tamir ve hareketli parça gerektirmez [5].

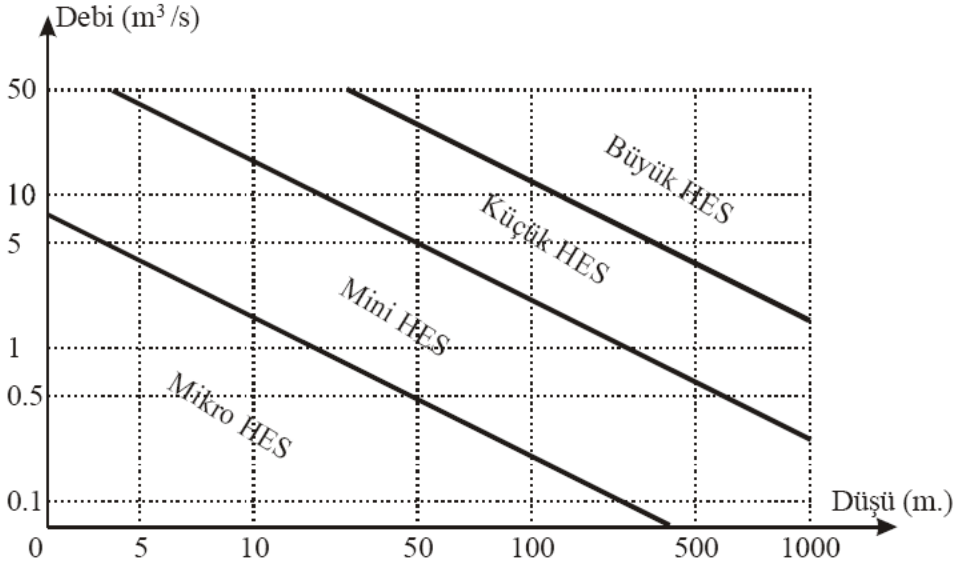
3. KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLER

KHES 'lere ilişkin sınıflandırma ülkelere göre değişiklik göstermektedir. Tablo 3.1 'de bazı ülkeler için, mikro, mini ve küçük HES 'lere ait güç sınırları görülmektedir. Bu konuda Dünya ülkeleri arasında tam bir görüş birliği yoktur. Ancak Dünya 'da 100 'den fazla ülkede mini, mikro ya da küçük HES adı altında sistemler kullanılmaktadır [24]. Özellikle Avrupa ve Kuzey Amerika 'da, ekonomik olarak değerlendirilebilecek su potansiyelinin önemli bir kısmı kullanılmaktadır. Buna paralel olarak, Avrupa pazarında hidroelektrik sistemlere ilave yapabilmenin en iyi yolunun KHES olduğu söylenebilir. Nitekim, Avrupa Komisyonu, 2010 yılına kadar Avrupa Birliği ülkelerindeki toplam KHES kapasitesini %50 arttırarak, 4200 MW 'a yükseltme kararı almıştır [25].

KHES 'ler, 2 m 'den yüksek su düşülerini kullanırlar ve yeryüzünde bilinen en eski elektrik üretim tesisleridir. Bu sistemler enterkonnekte sistemin ulaşamadığı, yakıt temininde zorluk bulunan bölgelerde, bağımsız olarak elektrik üretim imkanı sağlarlar. Bunun yanında sulama ve kullanma suyu temin etme gibi faydaları da vardır. Büyük HES 'lerin kurulmaya başlaması ile bir ara önemlerini kaybetmişlerse de, petrole alternatif enerji bulma çabaları içinde, yenilenebilir enerji kaynaklarından mümkün olduğunca fazla yararlanma politikaları, bu santralleri tekrar gündeme getirmiştir [26]. Şekil 3.1 'de mikro, mini, küçük ve büyük HES 'lerin, debi ve düşü değerlerine göre kullanım alanları gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Ülkelere göre mikro, mini ve küçük HES tanımlamaları [27]

Ülke	Mikro HES (kW)	Mini HES (kW)	Küçük HES (MW)
A.B.D.	<100	100–1000	1–30
Çin	-	<500	0.5–25
Fransa	5–5000	-	-
Hindistan	<100	101–1000	1–15



Şekil 3.1. Küçük hidroelektrik santrallerin kullanım alanları [28]

Küçük HES 'lerin en büyük dezavantajı, birim tesis bedelinin, dolayısıyla elektrik maliyetinin fazla olmasıdır. Küçük HES 'lerin maliyeti, genellikle düşü ile ters orantılı olarak artar. Belirli bir gücü üretebilmek için, düşü az olduğu zaman debinin büyük olması gerekir. Dolayısıyla daha büyük ve daha pahalı türbinlere ihtiyaç duyulur. Genellikle H< 20 m için Kaplan tipi, H> 40 m için ise Francis tipi türbinler kullanılır. H>100 m olduğu zaman, çok küçük debilerde Pelton tipi tercih edilir [29].

Nehir tipi santrallerin en büyük özellikleri, su depolama imkanı kısıtlı olduğu için, enerji üretim miktarının nehirdeki su akışına bağlı olmasıdır. Genel olarak ülkemizde de uygulanmakta olan ve nehir tipi santraller grubuna giren KHES 'ler tesis biçimine göre, aşağıdaki gibi sınıflandırılırlar:

- Kontrolsüz olarak akan bir nehrin suyunu, bir regülatör ile kontrol altına alarak ve hidrolik potansiyeli uygun bir yere su iletim tesisleri (kanal, cebri boru, yükleme havuzu vb.) ile çevirerek, bu noktada hidrolik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren tesisler.
- Daha önce bir baraj ile su regülasyonu sağlanmış, kontrollü akan bir nehir yatağı üzerine, seviye kontrolü yapan savaklama ve santral binası tesislerini inşa etmek sureti ile gerçekleştirilen tesisler.
- Sulama mevsimi dışında, sulama için ayrılacak suyu ihlal etmeden çalışan, fakat sulama mevsiminde de sulamadan dönen suları kullanmak üzere çalışan, sulama kanallarının

ucuna yükleme havuzu, cebri boru, santral binası gibi tesisleri inşa etmek sureti ile gerçekleştirilen tesisler.

KHES 'ler, kapasite (MW) ve tesis biçimlerinin yanı sıra, düşü miktarına göre de sınıflandırılabilirler. Tablo 3.2 'de, KHES 'lerin düşü miktarına göre sınıflandırılması verilmiştir. Bunların dışında, KHES 'leri projelendirilmelerine göre, kompakt ve kompakt olmayan şeklinde ikiye ayırmak da mümkündür. Çalışma prensipleri büyük HES 'lerden çok farklı olmayan KHES 'lerin mühendislik hizmetlerini azaltmak, ünite imalat sürelerini kısaltmak ve daha makul teçhizat fiyatları teklif edebilmek amacı ile, imalatçılar standart kompakt üniteler yapmak yolunu seçmişlerdir.

Tablo 3.2. KHES 'leri düşü miktarına göre sınıflandırma

KHES Tipi	Düşü (m)
Yüksek düşülü	H>100
Orta düşülü	H=30–100
Düşük düşülü	H=2–30

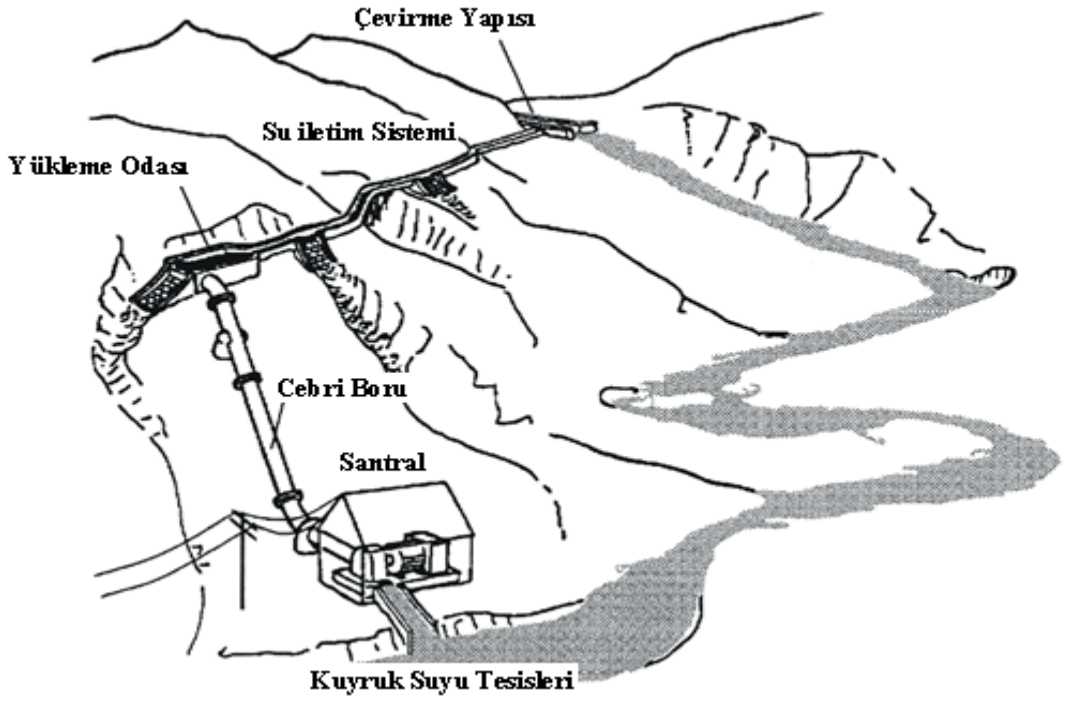
KHES 'ler genellikle şebeke ile paralel çalışacak şekilde, yani ürettiği enerjiyi bağlı bulunduğu indirici merkez üzerinden şebekeye aktaracak biçimde tasarlanırlar. Diğer yandan, KHES 'ler istenildiği ve gerekli koşullar yerine getirildiği takdirde, izole-ada olarak çalışmak suretiyle de bulunduğu bölgedeki yükleri, şebekeden bağımsız bir şekilde besleyebilirler. Bir KHES 'in izole yükte çalışma özelliği sayesinde, şebekeden kaynaklı bir elektrik kesintisinde (örneğin indirici merkezde bir trafo arızası), bölgedeki kritik yükler santral tarafından beslenmeye devam edebilir. Bu durum, hem kritik yüklerin elektrik kesintisine maruz kalmaması (ya da çok kısa süreli maruz kalması), hem de nehirden gelen suyun enerjiye çevrilmesi, yani boşa gitmemesi açısından önemli bir ekonomik kazanım sağlar[3].

3.1. Küçük Hidroelektrik Santrallerin Genel Yapısı

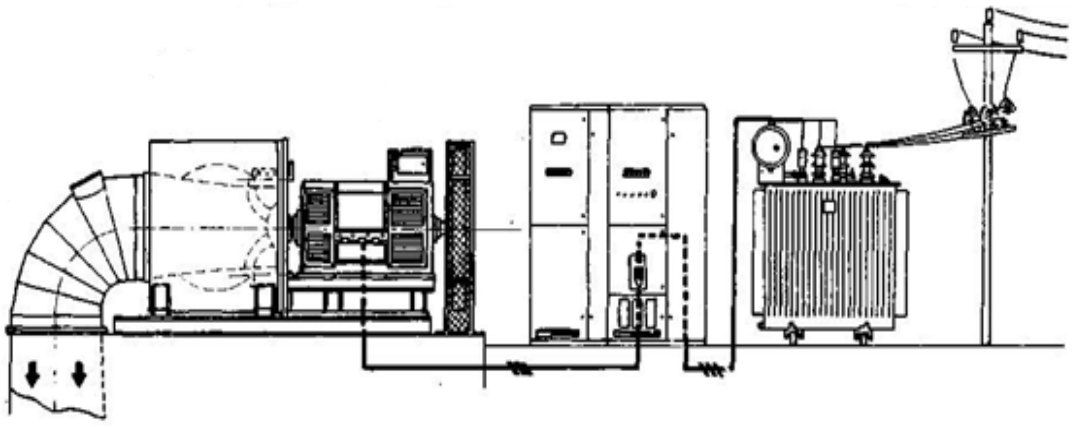
Şekil 3.2 'de bir KHES 'in temel yapısı, Şekil 3.3 'te ise bir KHES 'de olabilecek elektromekanik teçhizatlar gösterilmiştir.

KHES 'lerin belli başlı üniteleri; akım dengesini oluşturma, taşkın debisini santrale zarar vermeden kontrol edebilme, sediment ve yatak malzemesini tutma ve sonra temizleme amacıyla kabartma, düzenleme ve depolama yapıları, su alma yapısı, galeri, tünel veya iletim kanalı, yükleme havuzu veya denge bacası, cebri boru, santral binası, santral çıkış suyu tesisleri

ile su boşaltma tesisleridir. Bu yapıların yanı sıra, santral binası içine yerleştirilecek belli başlı elektromekanik aksam ise, hidrolik türbin, generatör, transformatör, salt sahası tesisleri, hız ve gerilim regülasyon tesisleri, kumanda, kontrol ve koruma tesisleri, yardımcı teçhizat ve diğer teçhizatlardır.



Şekil 3.2. Bir KHES 'in temel yapısı [29]



Şekil 3.3. Bir KHES 'in elektromekanik aksamı [30]

KHES ’ler genellikle nehir veya kanal santrali olarak tasarlandıklarında ekonomik olmaktadırlar. Barajlı bir KHES ’in ekonomik olabilmesi için projenin çok maksatlı olması, yani enerji faydasının yanı sıra sulama, içme suyu ve taşkından koruma gibi amaçlarının da olması gerekmektedir. Sadece enerji faydası olan bir KHES ’in, nehir santrali olarak tasarlanmasında fayda vardır. Nehir tipi bir santral tipik olarak, regülatör ve çevirme yapıları, çökeltme havuzu, iletim kanalı ve enerji tüneli, biriktirme ve yükleme havuzu, cebri boru, santral binası ve çıkış suyu yapısından oluşmaktadır. Bütün bu yapılarda yer seçimi yapılması, projenin ekonomisini belirleyen çok önemli bir aşamadır. Yer seçimi yapılırken aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

Yapılar alüvyon ve moloz gibi gevşek zeminler üzerine oturtulmamalıdır. Heyelanlı bölgelerden ve fay hatlarından kesinlikle uzak durulmalıdır. Özellikle su alma yapısı, cebri boru ve santral binası sağlam kayaya oturacak şekilde yerleştirilmelidir. Su alma yapısı ile enerji tüneli veya iletim kanalının ekseni, topoğrafik münhanilere dik gelecek şekilde yerleştirilmelidir.

Bu kriterlere ilave olarak bir KHES ’in ekonomisini etkileyen diğer önemli faktörler şunlardır:

Pınarlar veya yer altı suları ile beslenen, böylece minimum akımı ortalama akımına yakın değerde olan akarsular üzerindeki santraller, diğerlerine göre daha ekonomik olurlar. Bu durumda santralin kapasite kullanım oranı artar, minimum akıma tekabül eden ünite sayısı azalır ve işletme esnasında türbinlerin daha yüksek verimli bölgede çalıştırılması mümkün olur. Proje düşüsünün fazla olması, elektromekanik teçhizatın fiziki ebatlarını küçülterek birim, teçhizat bedelinin azalmasını sağlar. Ayrıca, düşüsü 20 metrenin altında olan HES ’lerde kullanılan Kaplan türbinleri, daha yüksek düşülerde kullanılan Francis türbinlerine göre, yüksek birim yatırım maliyetine sahiptir. KHES ’lerin birim yatırım maliyeti, projenin özelliklerine göre farklılık göstermekle birlikte, yaklaşık olarak 900–1500 $/kW aralığında alınmaktadır. Yıllık işletme ve bakım giderleri ise, yaklaşık 50 $/kW olarak kabul edilmektedir [11].

3.2. Küçük Hidroelektrik Santrallerin Temel Elemanları

Küçük hidroelektrik santraller, yapı ve özellikleri genellikle yerel şartlara göre belirlenen, aşağıdaki elemanları içerir:

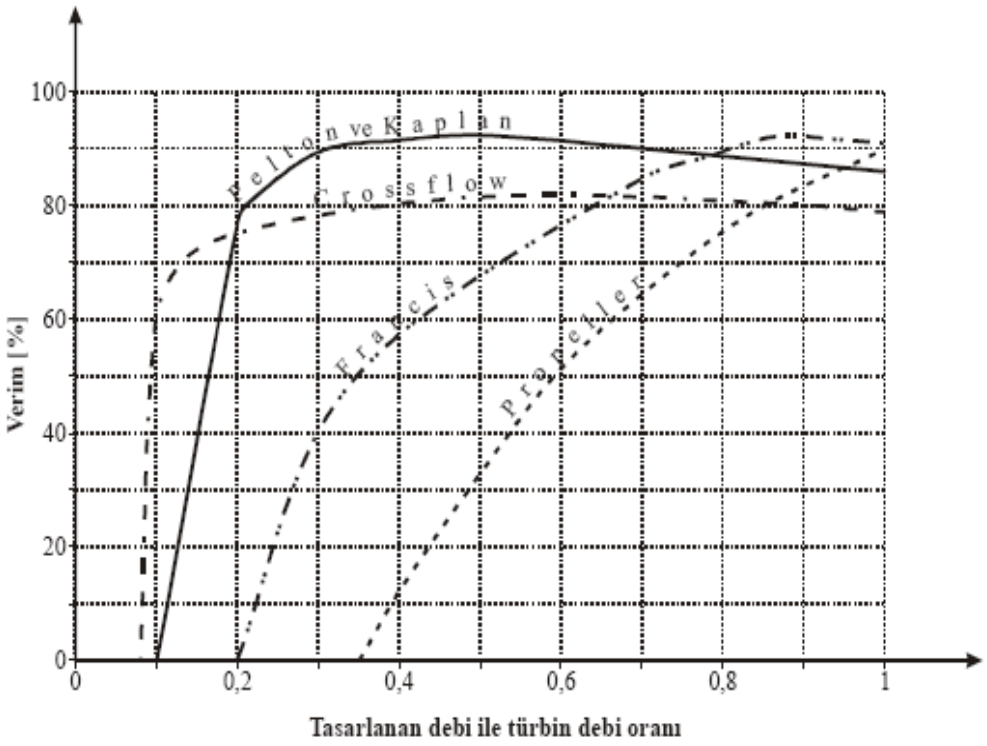
Giriş Ağzı veya Su Alma Seti: Genellikle şekli ve boyutları yerel şartlara göre değişir. Beton, kaya dolgu, toprak veya yerel materyallerle üretilmiş tuğladan imal edilen bir baraj seti ile giriş ağzına sürekli su sağlanır.

Giriş Kanalı veya Cebri Boru: Giriş kanalı betondan veya topraktan yapılabilir. Eğer toprak kullanılırsa, suyun hızı 0,8 m/s değerini aşmamalıdır. Beton kanallarda ise, 1,5 m/s 'ye kadar çıkılabilir. Elektrik üretimi için, giriş ağzı bir sulama kanalı veya içme suyu kaynağı üzerinde olabilir. Cebri boru ise genellikle, çelik veya polietilen borudan yapılır ve 3,8 m/s 'lik su hızına dayanabilir.

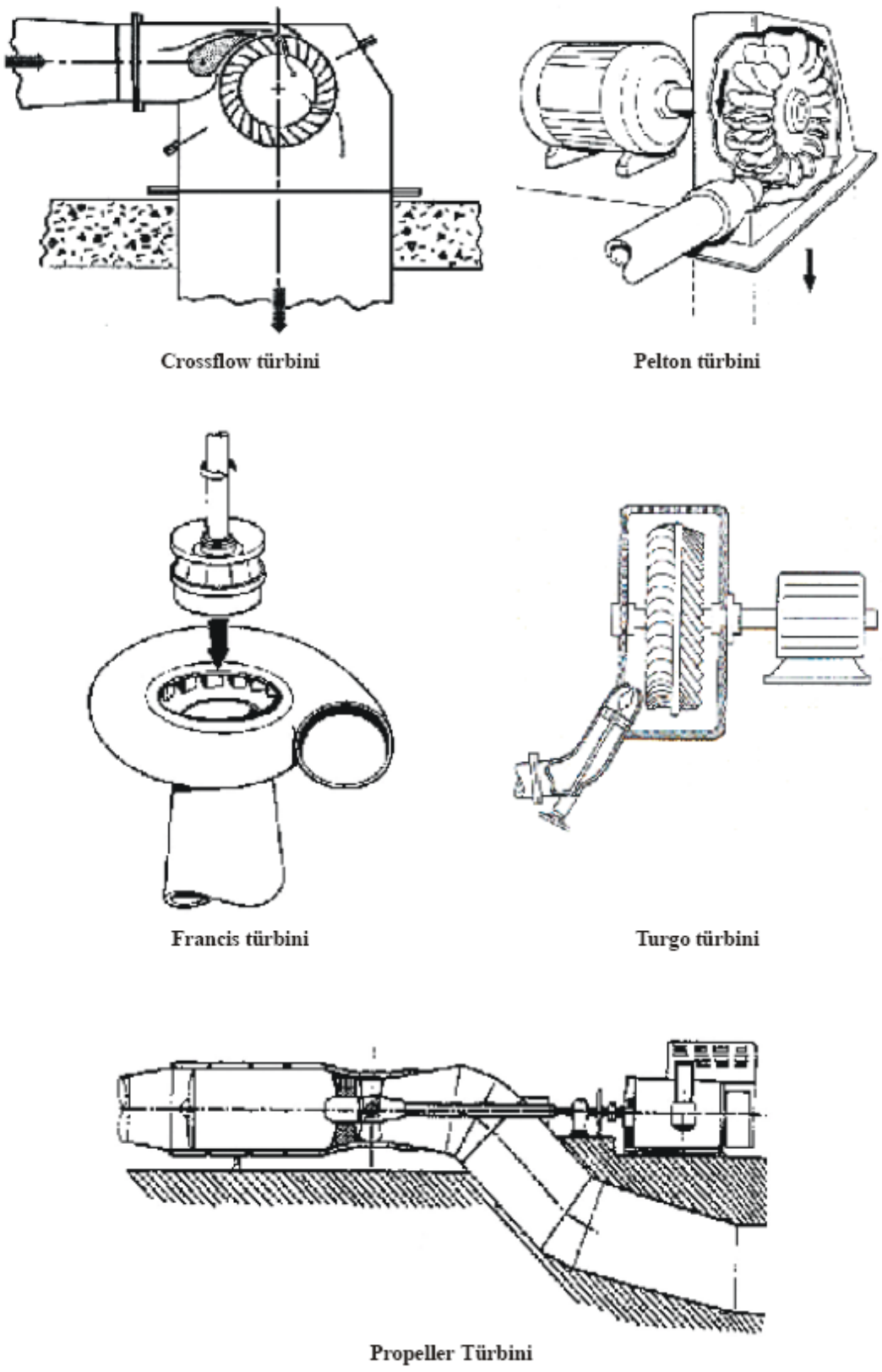
Giriş Izgarası ve Yükleme Havuzu: Türbinin, nehir tarafından taşınan çeşitli materyallerden korunması gerekir. Bu işlem, elle veya greyderle temizlenen bir ızgara sistemi ile yapılır. Yükleme havuzu da, su ana sisteme girmeden önce içindeki küçük parçaların çökmesini sağlar. Böylece türbine mümkün olan en temiz suyun girmesi sağlanır.

Savak Kapakları: Çeşitli tiplerde yapılan bu kapaklar, türbini ve ana kanalı değişen hava şartlarında nehirdeki su seviyesinin yükselmesine karşı korumak için kullanılırlar.

Türbinler: Türbin seçimi düşü miktarına bağlıdır. Ayrıca sistemin ulusal bir şebekeye bağlı olarak çalışması veya sadece yerel bir sistemi beslemesi, türbin seçimini etkiler. Türbin seçimi toplam enerji verimi üzerinde de oldukça etkilidir. Bir HES 'de yapılan çalışmada, türbin veriminin %1 arttırılmasının, toplam santral kazancında %1,25 oranında bir artışa neden olduğu saptanmıştır [31]. Şekil 3.4 'de çeşitli türbinlere ait verim-debi karakteristikleri gösterilmiştir. Şekil 3.5 'de ise KHES 'lerde kullanılan küçük su türbinleri görülmektedir.



Şekil 3.4. Küçük su türbinlerinde debi-verim ilişkisi [19,24]



Şekil 3.5. Küçük hidroelektrik santrallerde kullanılan küçük su türbinleri

Regülatör: Regülatörler türbin hızını, değişen güç talebine karşı sabit tutmak için kullanılırlar. Mekanik veya elektriksel olarak çalışan tipleri vardır. Mekanik sistemler, türbine giren su miktarını ayarlarlar. Değişen güç talebine göre, türbine giren suyu kontrol ederek, sabit bir devir sağlamaya çalışırlar. Elektriksel tiplerde ise, genellikle pasif direnç elemanları (dump-load) kullanılarak, enerjideki değişimler elimine edilmeye çalışılır.

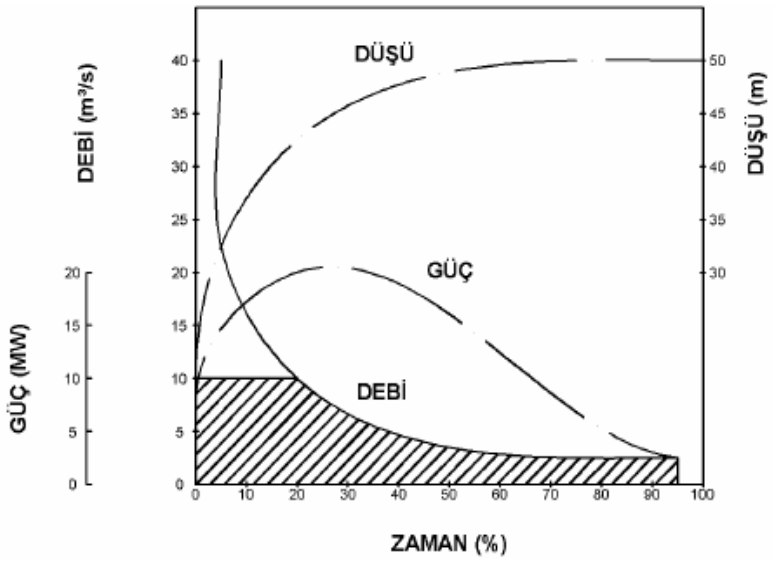
Alternatör: KHES 'lerde elektrik üreteci olarak senkron ve asenkron generatörler kullanılabilir. Asenkron generatörler motor olarak çalışma durumunda, devir sayılarının senkron hızın üzerine çıkarılması sonucunda, bağlı bulundukları şebekeye aktif güç vermeye başlarlar. Fakat bu anda uyartımları için gerekli olan endüktif akımı şebekeden çekmektedirler. Asenkron makinanın generatör olarak çalışabilmesi için, makinanın bu endüktif akımı alması ya da aynı büyüklükteki kapasitif akımı vermesi gerekir. Asenkron generatörün kendi kendine enerji üretebilmesi için, makinaya paralel olarak çalışan ve generatörün vereceği kapasitif akımı alabilecek uygun değerde kapasitelerin ya da senkron generatörlerin bulunması gerekir. Bu şartların oluşmaması durumunda, senkron hızın üzerinde döndürülse bile asenkron makina generatör olarak çalışamaz. Asenkron generatör yapı bakımından senkron generatöre göre daha basit ve az arıza yapma eğiliminde olsa da, yukarıda belirtilen kapasitif güç koşulu nedeniyle kullanımı oldukça sınırlanmaktadır. Bu makinalarda hava aralığı çok küçük olduğundan, büyük güçlerde yataklama problemi önem kazanmaya başlar. Ayrıca güç katsayısı senkron makinada olduğu gibi ayarlanamamaktadır [32]. Bu nedenle, asenkron makinalar ancak 500 kW 'dan daha küçük güçlü, mini veya mikro HES 'ler için ve genellikle enterkonnekte sisteme paralel bağlı olarak enerji üreten küçük HES 'ler için uygun olabilir. Senkron generatörler ise tek başına (stand-alone) çalışabilir ve bu nedenle de küçük HES 'ler için en iyi alternatör seçimidir.

İletim ve Dağıtım Sistemleri: Yerel bir bölgeyi besleyen santrallerin çıkış gerilimi, üç fazlı alçak gerilim olarak tüketiciye ulaştırılır. Eğer, üretilen enerji 1 km 'den uzağa iletilecekse, genellikle alçak gerilimin orta gerilim kademesine yükseltilmesi tercih edilir. Bu da yükseltici ve düşürücü transformatör merkezleri kurulmasını gerektirir ki, enerji maliyeti önemli oranda artar [33].

Diğer Elemanlar: KHES 'lerde, yerel şartlara ve yapım özelliklerine bağlı olarak, türbin ve generatör arasında, hız ayarlama elemanları, türbin için acil su kesme valfi, nehir bypass sistemi ve valfi, kontrol sistemleri, güç yedekleme sistemleri ve akü grupları gibi elemanlar da kullanılabilir [27].

3.3. Santral Toplam Kapasite Tayini

Su akımı, akarsu üzerinde kurulmuş olan akım gözlem istasyonlarının günlük verileri değerlendirilerek saptanır. Akarsu debisi genellikle geniş limitler arasında değişmektedir. Kanal santrallerinde enerji üretimi, su akım rejimine bağlı olarak değişmektedir. Bunun için debi süreklilik eğrisi (DSE) hazırlanır [35]. Suyun debisini ölçmek ve DSE 'yi çıkarmak, KHES projelerinin ilk adımıdır. Debiyi ölçmek için en basit ve yaygın yöntem hız-alan yöntemidir [34]. Nehrin uygun bir bölgesindeki kesit (m^2) ve suyun ortalama hızı (m/s) ölçülerek debi hesaplanır. Yeterli debi ölçümü sonrası (mesela 1 yıl), DSE çıkarılabilir. Şekil 3.6 'da DSE, debinin belirli bir değerin üzerinde olduğu toplam zamanı, toplam ölçüm zamanının oranı şeklinde gösterir [1].



Şekil 3.6. Örnek bir DSE ve kapasite tayini

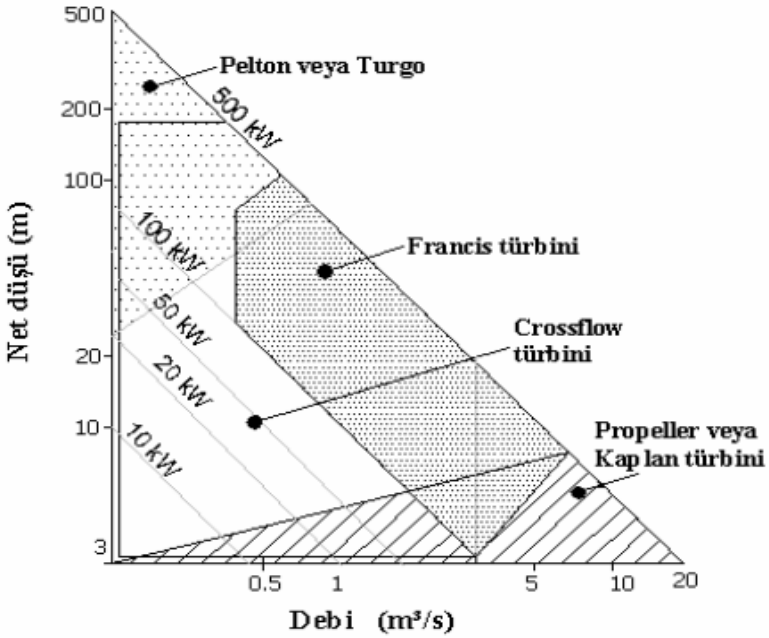
KHES 'lerin kurulu güç üretim kapasitesi, birçok önemli parametrenin dikkatle değerlendirilmesi ile, kW veya MW olarak ifade edilir. Santral kurulu gücü ve yıllık enerji üretimi, uzun süreli su gözlem (rasat) kayıtlarına dayalı debi değerlerinin, zamanın fonksiyonu olarak tertiplenmiş yıllık DSE 'lerinden faydalanılarak tayin edilir. Mesela Şekil 3.6 'da zamanın %20 'sine karşılık gelen debi, santral kurulu güç debisi olarak seçilmiş olup, bu değerin DSE ile kesiştiği noktanın altında kalan taralı alan, yıllık enerji üretimini belirler. Daha kısa süreli debi (mesela %15), dizayn debisi olarak seçildiğinde ise, kurulu güç debisi artacağından, santral kurulu gücünün ve enerji üretiminin artmasıyla birlikte, kurulu gücün artması ile türbin ve generatör gibi elektromekanik teçhizatın bedelleri de yükselir. Şekil 3.6 'dan görüldüğü gibi, küçük debilerde su yolu kayıpları ve kuyruk suyu seviyeleri azalacağından,

bu debilerde santral düşüsü yükselmesine rağmen, üretim gücü azalır. Optimum kurulu güç veya debinin tespiti için, yukarıda belirtilen hesap yöntemi, göz önüne alınan her debi için tekrarlanarak yapılır. Diğer yandan, ünite tipinin minimum çalışma koşulları da göz önüne alınmalıdır. KHES 'lerin dizayn debisinin, ünite kapasitesi/sayısının ve enerji üretim projeksiyonunun belirlenmesinde, DSE 'ler çok kritik bir rol oynar. Dolayısıyla, bir KHES 'in gerek fizibilite aşamasında, gerekse işletme sırasındaki üretim programları belirlenirken, DSE çıkarmak için gerekli gözlem merkezinin kurulması gerekir. Başlangıç olarak hidrolik kaynağı ve bu kaynağın uzun vadeli, günlük debi gözlem değerlerinden faydalanılarak kullanılacak nehir debisi tayin edilir. Daha sonra, seçilen kurulu güce göre ünite sayısı da göz önüne alınarak, üretilecek enerji miktarı, yatırım bedeli, faiz, amortisman, tesis süresi, işletme ve bakım giderleri vb. masrafları içeren bir ekonomik analiz yapılır. Bir sonraki aşamada ise, türbin ve generatörlerin performans karakteristiklerinin tespiti ile, santral binası boyutlarının ve bedelinin tahmininde kullanılacak türbin ve generatör ile birlikte, santral binasını etkileyecek diğer teçhizatın boyutlarının tayin edilmesi gerekir [1].

3.4. Türbin ve Generatör Seçimi

KHES 'lerde türbin tipinin seçimi ve tasarımı yapılırken, uzun süren ölçümler sonucu elde edilen su akım değerlerinden yararlanılarak, farklı debiler için yapılan işletme çalışmaları sonucunda en uygun proje debisi ve elde edilebilecek enerji hesaplanır. Debinin mevsimsel değişmeleri dikkate alınarak, ünite sayısı belirlenir. Burada amaç, her bir türbinin nominal debide çalışmasını sağlamaktır. Belirlenen ünite debileri ve düşü değeri için en uygun türbin tipi seçilir. Türbinin projelendirme aşamasında, imal edilmek istenen esas türbin rotoruna geometrik olarak benzer olan ve H = 1m faydalı hidroelektrik düşüde, 1kW güç veren model bir türbin rotorunun devir sayısı (özgül devir sayısı), türbin boyutlarını belirlemektedir. Özgül devir sayısı (N_s) tespit edildikten sonra, her bir imalatçının kendisi için belirlediği ampirik formüller ile türbinin projelendirilmesi yapılmaktadır [11].

KHES uygulamalarında, uygun türbin tipi ve gücünün seçilebildiği abak, Şekil 3.7 'de verilmiştir. Enerji üretilecek barajın net düşü yüksekliği ve debisi bilindiği takdirde, Şekil 3.7 'deki abak kullanılarak santral için uygun türbin tipi ve gücü bulunabilir.



Şekil 3.7. KHES 'ler için türbin düşü-debi abağı [18]

3.4.1. Türbin

Şekil 3.8 'de net düşü ve ortalama debi değerlerine göre türbinlerin kullanım sınırları gösterilmiştir. Türbinlerin seçim kriterleri şunlardır:

- Türbin seçiminde verimin %80 civarında olması (Şekil 3.9),
- Türbin ünite adedinin belirlenmesinde, maliyeti düşünerek az sayıda türbin seçmek, buna karşın akımdaki değişkenlik dolayısı ile birden fazla ünite ile çalışma serbestliği,
- Türbin devir sayısının belirlenmesi,
- Türbin devir sayısına en yakın standart eşzaman sayısının belirlenmesi (generatör üreticilerinin standartlarına uygunluk).

Akımlardaki değişkenlik dolayısı ile enerji üretiminden en iyi şekilde yararlanabilmek amacıyla, birden fazla ünite seçimi gerekli olmaktadır. Türbin devir sayısı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

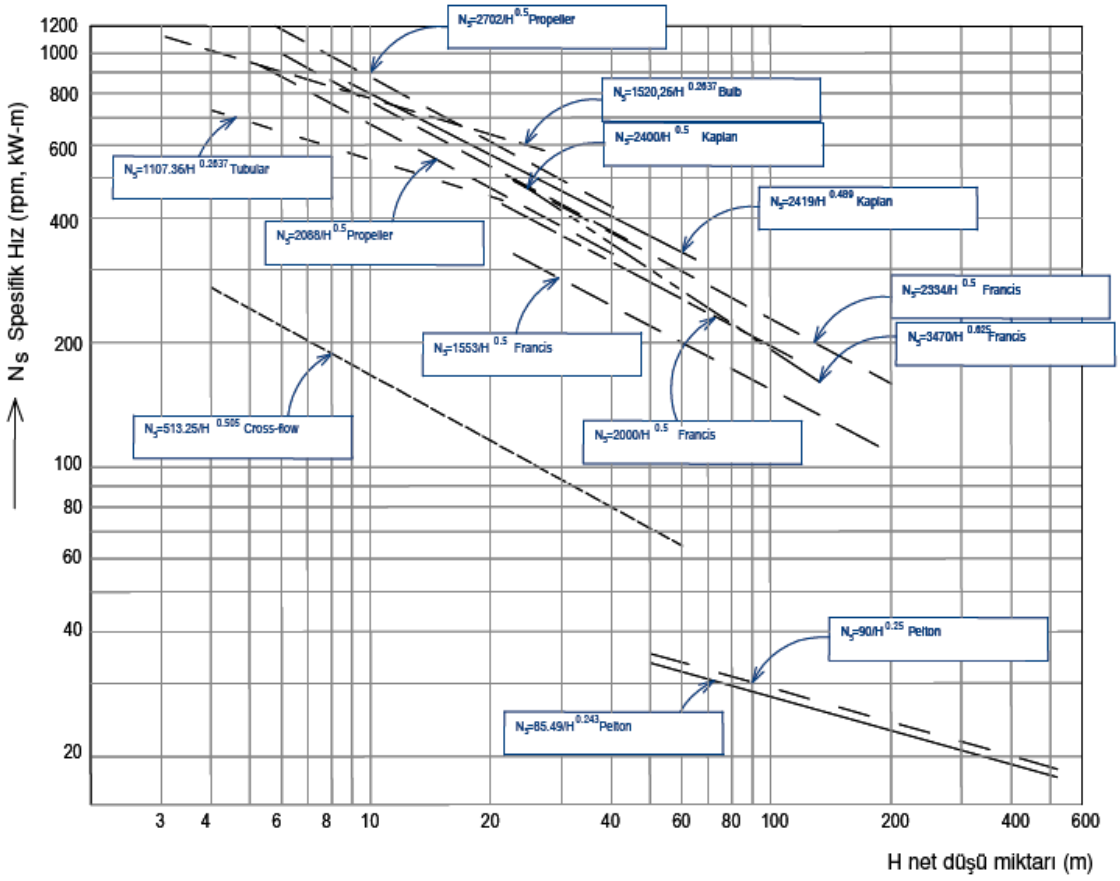
$$N = N_s \frac{H^{1,25}}{P_m^{0,5}} \tag{3.1}$$

Burada; N türbin devir sayısı (dev/dak), N_s türbin özgül hızı (m-KW) (imalatçılar tarafından net düşüye bağlı olarak abaklar halinde verilir) (Şekil 3.8), H net düşü (m) ve P_m; türbin çıkış gücü (W) 'dür.

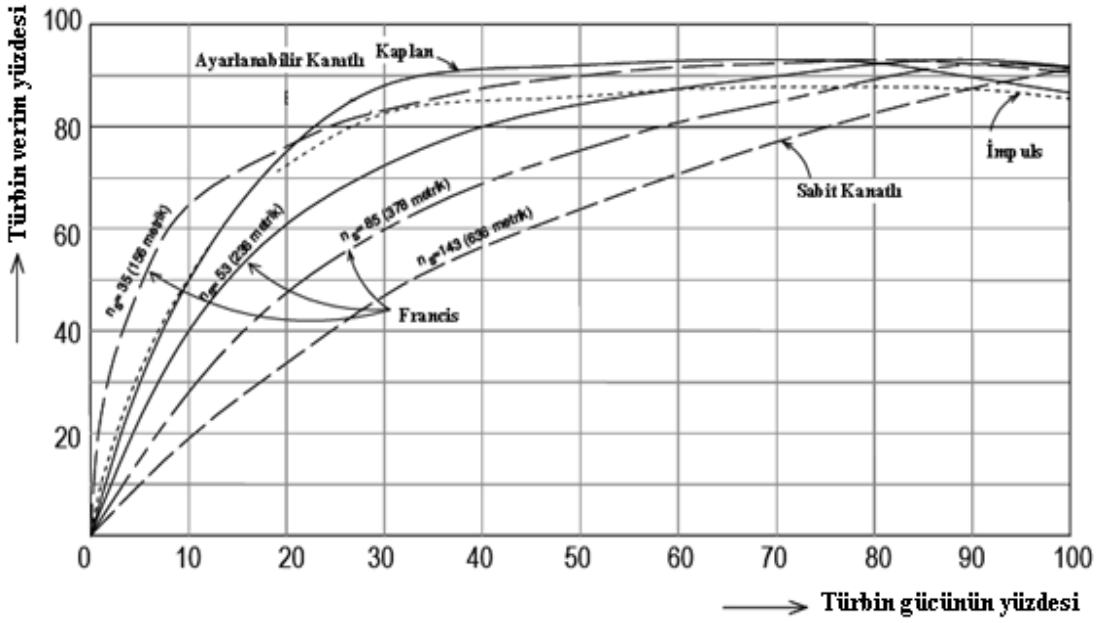
Ön seçim için önerilen N_s değerinden yararlanarak, türbin devir sayısı hesaplanır. Hesapla bulunan N değerine en yakın standart eşzaman hızı seçilir. Standart eşzaman hızı,

$$N = \frac{120.f}{N_p} \tag{3.2}$$

bağıntısı ile bulunur. Burada; N standart eşzaman hızı (dev/dk), F frekans (Hz) ve N_p generatörün kutup sayısıdır [22].



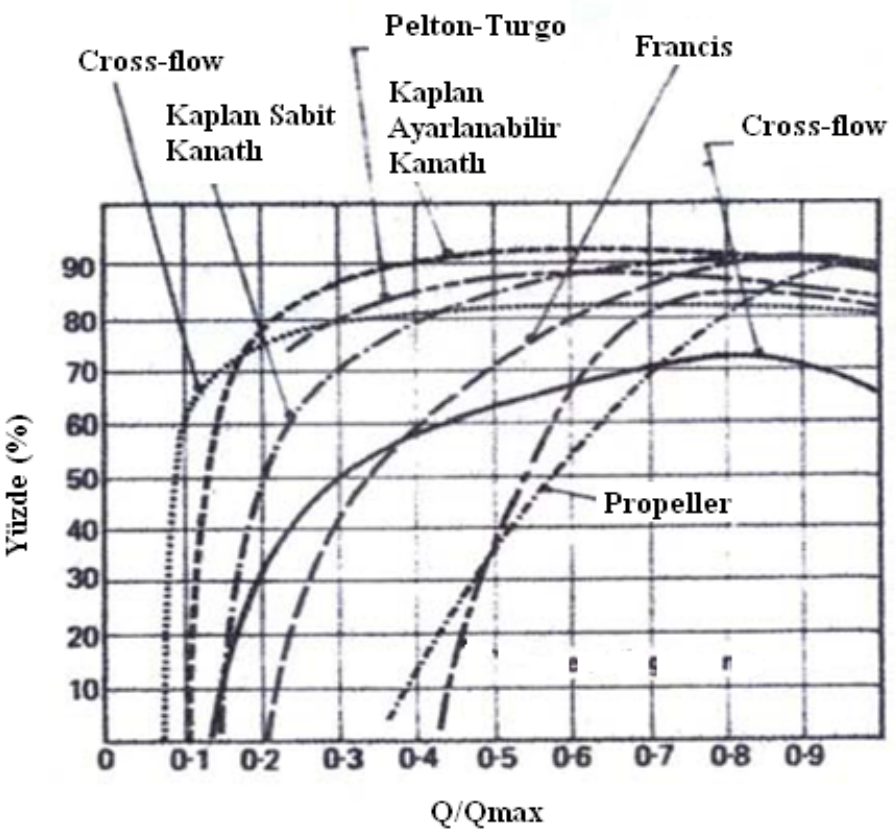
Şekil.3.8. Net düşü miktarına bağlı N_s değerleri



Şekil 3.9. Hidrolik türbinlerin karakteristik verim eğrileri [22]

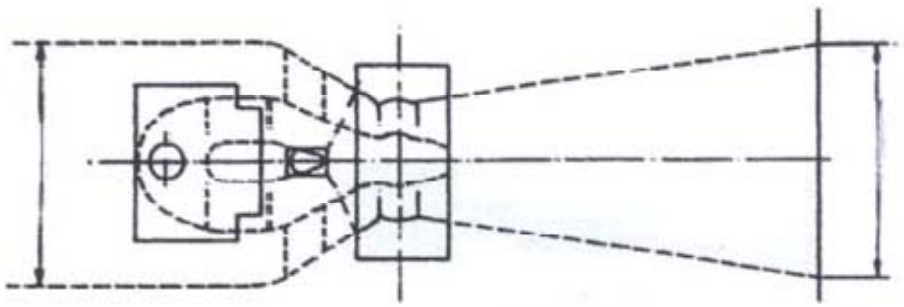
Eğer seçilecek türbin tipi tek bir türbin tipi sınırları içinde kalıyor ise, optimum kapasite tayini için, DSE göz önüne alınarak, teknik/ekonomik değerlendirmenin yapılması gerekir. Tek bir türbin tipi yerine iki ayrı tip türbin seçmek mümkün olabiliyor ise, değerlendirmenin her bir türbin tipi için fayda/maliyet göz önüne alınarak yapılması gerekir.

Yaygın türbin tiplerinin verim eğrileri Şekil 3.10 'da verilmiştir. Francis tipi türbinlerde nominal debilerinin %50 'si, Kaplan türbinlerde ise %25 'i işletme alt sınırları olarak göz önüne alınabilir. Başka bir deyişle Kaplan türbinlerinin, Francis türbinlere göre daha küçük debileri türbinleyebildiği söylenebilir. Yüksek devirli Francis türbinlerinin kısmi yüklerde verimleri, düşük devirli Francis türbinlerine oranla daha hızlı düşüş gösterir. Diğer yandan, düşük düşülü KHES 'lerde kullanılan eksenel akışlı pervaneli türbinlerin yaygın olanları ise aşağıda tanıtılmıştır.



Şekil 3.10. Türbin verim eğrileri

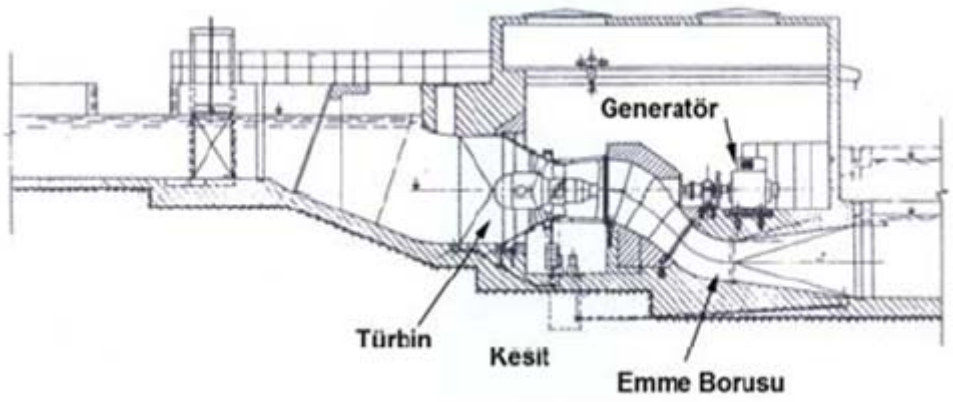
Kuyu (Pit) ve Ampul (Bulb) Tipi Türbinler: Minimum 3 m düşüye kadar, eksenel akışlı pervaneli tip türbinlerin kullanıldığı bu tip türbinlerin ayar kanatları, hem sabit, hem de ayarlanabilir olabildiği gibi, çark kanatları da hem sabit, hem de ayarlanabilir olabilir. Bu tip ünitelerde, türbin çarkı su içine daldırılmış ampul şeklinde, çelik veya beton bir muhafazanın içerisinde bulunan yüksek hızlı generatörü, hız yükselten konik bir dişli ile tahrik etmektedir. Ampul tipi (bulb) türbinlerin özgül hızlarının dikey eksenli kaplan türbinlerinin özgül hızlarına göre takriben %20 yüksek olması, daha yüksek hızlı senkron generatör kullanılmasına müsaade eder. Sonuç olarak, fiziksel boyutları daha küçük olan türbin ve generatör elde edilebilir. Şekil 3.11 'de ampul tipi türbinlerin yapısı gösterilmiştir. Generatörü dişli kutusu olmadan direkt olarak tahrik eden ampül tipi türbinler, 25 m düşüye kadar kullanılmaktadır.



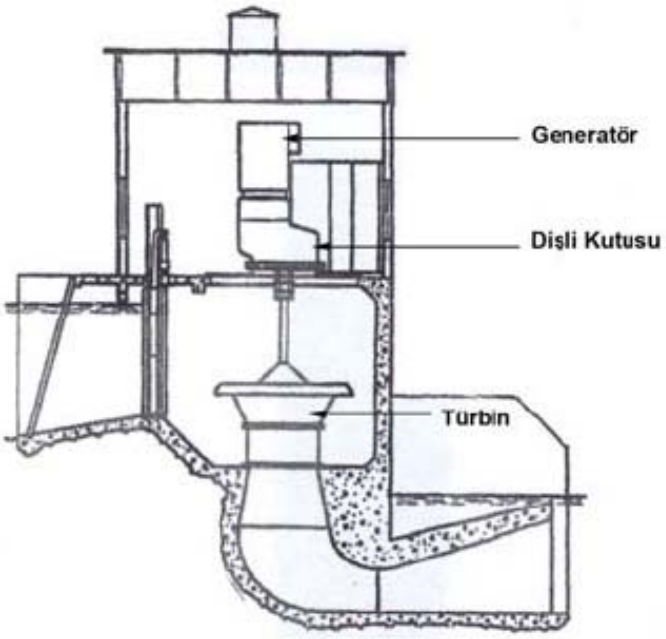
Şekil 3.11. Ampul tipi türbin

S-Tipi (Boru Tipi) Türbinler: Boru tipi türbin, generatörün boyutları nedeniyle ampul şeklindeki metal muhafazanın içine yerleştirilmesine imkan olmayan hallerde, generatörün konik dişli kutusu ile boru dışına alınmasıyla geliştirilen türbin tipidir. Küçük ünitelerin orta güçte olanları da kullanılabilir. Şekil 3.12 'de boru-tipi türbin yapısı gösterilmiştir.

Dalgıç Türbinler: Çok küçük düşülerde (3 m) kullanılan bu türbinlerin salyangozları olmayıp, suya daldırılmış olarak çalışırlar. Bazı hallerde betondan yapılmış yarım veya tam salyangoz yapılarının içinde kullanılırlar. Şekil 3.13 'de dalgıç tipi türbinin yapısı gösterilmiştir [1] .



Şekil 3.12. Boru tipi türbin



Şekil 3.13. Dalgıç türbin

Elektronik yük kontrolörlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, ulusal şebekeden ayrı çalışan türbinlerde, hız ve frekansın sabit tutulması sağlanmıştır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, pelton ve cross-flow türbinlerinin üretimi yerel üreticilerce gerçekleştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu türbinlerin avantajları; sudaki kum ve diğer partiküllere daha toleranslı olması, kolayca hareketli parçalara ulaşılması, yapısının basit, üretim ve bakımının kolay, düşük akış veriminin daha iyi olması, ayrıca yüksek basınca dayanıklı gövde ve contalar gerektirmemesi olarak sıralanabilir [19,36].

Aksiyon türbinleri, düşük hızlarından dolayı alçak düşülü uygulamalar için uygun değildir. Bu durumda iletim hattına bağlı standart bir generatöre bağlanabilmeleri için, türbin hızının oldukça yükseltilmesi gerekmektedir. Küçük uygulamalarda, cross-flow türbinleri, 4 m ’ye kadar, turgo veya multi-jet pelton türbinleri 20 m ’ye kadar alçak düşüler de kullanılabilmektedirler [19].

Geniş bir yelpazedeki düşü yüksekliği ve güçlerde tasarlanabilen ve imalatı oldukça basit olan cross-flow türbinleri bu iki önemli özelliğinden dolayı mikro HES uygulamalarında daha fazla tercih edilmiştir. Tepki türbinleri içinde francis, kaplan ve propeller tipi türbinler en çok kullanılan türbin tipleridir [19, 36, 37].

3.4.2. Generatör

KHES ’lerde, kurulacak santralin büyüklüğüne göre indüksiyon veya senkron makinalar kullanılmaktadır. İndüksiyon makinası, senkron üstü bir devirde çalıştırıldığında, aktif güç üretebilmesi için, şebekeden reaktif güç çekerek sargılarında manyetik alan oluşturur. Makinanın çalışma frekansı, bağlı olduğu şebeke tarafından belirlenmektedir. Türbin hızında meydana gelen değişme, generatör çıkış gücünü doğrudan etkilerken, generatör frekansını doğrudan etkilememektedir. Üretilen gerilim büyük ölçüde generatörün bağlı olduğu şebekenin etkisindedir. Generatörün çıkış gücünde, dolayısıyla şebekeye verilen akımda büyük bir değişme olduğunda, generatörün gerilimi çok az değişmektedir [38].

Daha çok mini ve mikro HES uygulamalarında kullanılan indüksiyon generatörleri, çıkış gücünden bağımsız olarak hemen hemen sabit reaktif güç çekerler. Giriş gücündeki herhangi bir değişmede ise, güç faktörü etkilenir. İndüksiyon generatörleri şebekeden ayrı olarak da çalıştırılabilirler. Fakat bu durumda generatöre bağlı olan yüklerin frekans ve gerilimlerini kararlı hale getirmek gerekir. Bu işlemi yapmak için karmaşık ve pahalı olan ekipmana ihtiyaç vardır.

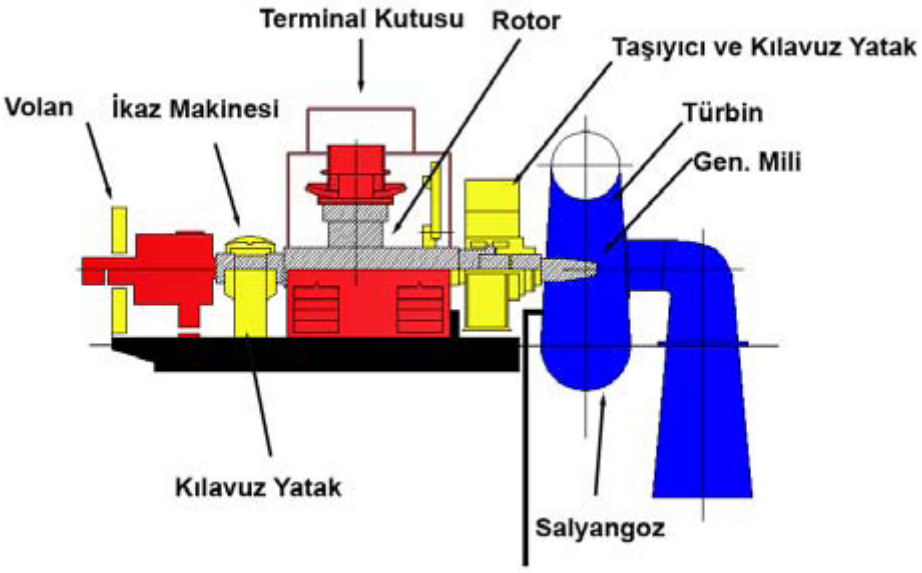
HES uygulamalarında çok sık olarak kullanılan senkron generatörler, kendinden uyartımlıdırlar. Senkron generatörler ileri veya geri güç faktöründe, sıcaklık ve kararlılık sınırları içinde, ulusal şebekeye bağlı veya bağımsız olarak çalıştırılabilirler. Makinaya bağlı bir yükün frekansı, türbin hızı değiştirilerek ayarlanır. Sabit bir şebeke frekansı için, generatörün hızı senkron hızda sabit tutulmalıdır. Gerilim kontrolü, otomatik gerilim regülatörü kullanılarak ve uyartım sargılarının akımı ayarlanarak yapılır. Şebekeden ayrı çalışmada ise, makinanın hızı ve gerilim seviyesi kontrol edilmelidir. Ulusal şebekeyle paralel çalışmada, frekans ve faz sırasına göre senkronlama yapılır. Makina şebekeye bağlandığında, şebeke frekansına göre senkron hızda döner ve generatörün stator sargılarının uçlarında, şebeke gerilimine bağlı olarak bir gerilim oluşur [38, 39].

KHES ’lerin ulusal şebekeye uzak olmaları ve kapasitelerinin büyük güçlü geleneksel santrallere göre sınırlı büyüklükte olması nedeniyle, genellikle 10 kV veya 34,5 kV ’luk yerel dağıtım şebekesine bağlanmaları tercih edilmektedir. Radyal beslemeli hatlarda indüksiyon makinası kullanılması durumunda, çekilen reaktif mıknatıslama akımından dolayı, bağlantı noktasında gerilimin önemli ölçüde düşmesi kaçınılmazdır. Böyle durumlarda, zaten iyi olmayan gerilim regülasyonu, indüksiyon generatörü kullanımından dolayı daha kötü olmaktadır. Radyal dağıtım hatlarında meydana gelen gerilim düşümleri, özellikle hat sonuna doğru artarak devam eder. Bu tür hatlara bağlı dağıtım transformatörlerinin kademe ayarı yapılarak, tüketiciye verilen gerilim müsaade edilen sınırlar içinde tutulmaktadır. Radyal dağıtım hattının sonuna KHES bağlanması (radyal dağıtım hattına bağlı senkron generatörler,

bağlandıkları noktalardaki gerilimin yükselmesine yol açacakları için), kademe ayarı yükseltilmiş ve sabit kademe ayarlı transformatörün sekonder geriliminin, müsaade edilebilir değerinin üzerine çıkmasına yol açacaktır [36, 38, 39].

Yatay şaftlı generatörler genellikle tek parça olup, şaft ucuna türbin çarkı herhangi bir kavrama mekanizması olmadan bağlanmaktadır. Şekil 3.14 'de yatay şaftlı bir generatörün yapısı verilmiştir.

Generatör şaftının türbin ile tahrik edilen tarafında, taşıyıcı ve kılavuz yataktan oluşan kombine bir yatak sistemi bulunur. Taşıyıcı yatak her iki eksenel itme kuvvetini taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Generatör şaftının diğer ucuna sadece kılavuz yatak koymak yeterli olmaktadır. Kompakt standart küçük generatörlerde, genellikle 428 / 500 / 600 / 750 ve 1000 dev/dk senkron devir sayıları kullanılmaktadır. Bu generatörlerin rotor çaplarının küçük ve ağırlıklarının da az olması, doğal atalet momenti sabitlerinin küçük olmasına neden olmaktadır. İzole yükte çalışması istendiğinde veya hız artırımını sınırlamak gerektiğinde, generatör mili üzerine volan koyma ihtiyacı olmaktadır [3]. 1 MVA 'nın altındaki yüksek devirli generatörlerde, alçak gerilim kullanılması ekonomik olmaktadır. Generatörler 1–4 MVA arasında, 690 V 'a kadar alçak gerilimde, 6,6 kV ve 13,8 kV 'a kadar orta gerilimde olmak üzere, standart gerilimlerde üretilebilmektedir. 4 MVA 'nın üzerinde ise genellikle 6,6 veya 13,8 kV gerilim kademeleri kullanılmaktadır.



Şekil 3.14. Yatay şaftlı generatör

Daha az bakıma ihtiyaç gösteren fırçasız ikaz sistemi, generatör ikaz sisteminde kullanılan yaygın bir uygulamadır. Bu ikaz sisteminde ikaz makinası, endüvisi generatör mili

üzerine monte edilmiş alternatif akım generatörü olup, üretilen ikaz gerilimi generatör miline monte edilmiş redresör ile doğru akıma çevrildikten sonra rotor kutuplarını beslemektedir. Bazı üreticiler, stator sargıları için müsaade edilebilir sargı sıcaklık yükselmesi 80 °C olan "F" sınıfı izolasyon sınıfı yerine, daha yüksek sıcaklık yükselmesi 125 °C olan "H" sınıfı izolasyon kullanmaktadırlar.

3.5. Ölçü, Kontrol ve Koruma

Gelişen dijital teknoloji ile birlikte, elektromanyetik röleler yerlerini dijital teknolojiye göre çalışan elektronik devrelere bırakmıştır. Elektronik kontrol sistemi, geleneksel kontrol sistemine göre daha geniş ölçekte ve kolaylıkla bilgi toplama, değerlendirme, saklama ve kayıt etme imkanlarını vermektedir. Ayrıca, bilgisayar ekranında santral konumunu, işletme şeklini, arızaların nerede ve hangi sıra ile olduğunu izleme imkanını vermektedir. Elektronik kontrol sistemi; analog ve dijital girdi ve çıktıların yapıldığı, değerlendirildiği ve mantık devrelerinin programlanabildiği işlem kontrol ünitesinden (PLC), frekans regülatöründen, gerilim regülatöründen, otomatik senkronizasyon cihazından, operatör ve uzak (remote) terminal ünitelerinden, dijital elektronik koruma rölelerinden, bilgisayar ile yazıcılardan ve bu elektronik cihazlar arasındaki haberleşmeyi temin eden iletişim sisteminden oluşmaktadır. Elektronik kontrol sistemleri, belirtilen bu imkanlara ilave olarak, santral kablajını önemli miktarda azaltması, tesisat süresini kısaltması ve şantiye tecrübelerine getirdiği kolaylıklar yanında aşağıdaki sorunları da beraberinde getirmektedir:

Her cihazın programlanması ve ayar değerlerinin değiştirilebilmesi, kendine özgü lisanslı yazılım araçlarının kullanılmasını gerektirmektedir. Ne kadar tecrübeli olursa olsun, işletme personeline o santrale özgü detaylı bir eğitim verilme zorunluluğu vardır. Elektronik cihazın kendisinde veya kartlarında meydana gelen bir arızanın teşhisi çok zordur ve bu hususta doğrudan imalatçı ile temasa geçilme zorunluluğu vardır.

Dış ortam şartlarından etkilenme (özellikle de topraklama sisteminden) sorunu yaşanabilir. Santralin ürettiği enerjinin şebekeye enjekte edildiği noktada, iki bağımsız ölçü hücresine sahip, iki adet, çift yönlü maksimum yük talebi ölçümü de yapabilen sayaçlar istenmektedir. Bu noktadaki elektrik ölçü aletlerinin de çift yönlü ölçü yapabilen tipte olmaları gerekmektedir.

Santralin işletme periyotlarının yapılacak işletme örneklerine esas teşkil etmesi ve santralin havzasında ileride yapılacak yeni santraller için sağlıklı veri sağlanması bakımından, ölçü kontrol sistemi, debi ölçümünü de içermelidir. İndeks metodu ile türbin verim kontrolü yapmak için, türbin salyangozunda gerekli tedbirler alınmalıdır. Nehir tipi HES ’ler yükleme

havuzunun sabit su seviyesinde (seviye kontrol) çalıştıklarında, analog su seviyesi ölçüm cihazı mutlaka temin edilmelidir.

Üniteye yol verilirken, aşağıdaki her iki ana yöntemin de kullanılabilmesi gerekir:

Otomatik Yol Verme: Üniteye, önceden tayin edilmiş yük set değerine herhangi bir müdahale yapılmadan yol verilir.

Kademe Kademe Yol Verme: Ünite, önceden seçilmiş kademeyi operatörün tercihine göre gerçekleştirir. Bu kademeler; boşta döndürme, ikaz verme ve gerilim üretme, paralel işletmeye alma ve yük almadır.

Üniteyi durdurma ise aşağıda belirtilen her üç şekilde de yapılabiliyor olmalıdır:
Normal Durdurma: İhtiyaca göre operatör tarafından yapılır.

Çabuk Durdurma: Mekanik teçhizatta meydana gelebilecek bir arızada, ünitenin mevcut yükünü atması ile meydana gelecek hız artımı mevcut arızayı ilerletebileceğinden, bu durdurma yöntemi mekanik arızalar için kullanılır. Başka bir deyim ile hız artımsız durdurma yöntemidir.

Acil Durdurma: Genellikle elektrikli arızaların sebep olduğu durdurma yöntemidir. Bu durdurma, ünite kontrol panosunda, mevcut acil durdurma butonuna basılmak sureti ile operatör tarafından veya generatör koruma sistemi tarafından otomatik olarak yerine getirilir.

3.6. Şebeke ve Şalt Sahası

KHES ’ler genellikle orta gerilim (OG) şebekelerinin uç noktalarına, ya en yakın 154 kV ’luk indirici trafo merkezi ya da yakındaki bir OG dağıtım merkezi üzerinden, OG enerji nakil hattı tesis etmek suretiyle bağlanmaktadırlar. Santral bağlantı noktası, mevcut dağıtım merkezi veya 154 kV ’luk indirici merkezler içerisinde, optimum yük akışını sağlayan noktalardan seçilmelidir. KHES ’ler mevcut şebeke ile paralel çalıştıklarından, işletme gerilimi ve frekansı şebeke tarafından belirlenir [3]. Santral ancak ayarlanabilen sabit güç faktörü regülasyonu yaparak çalışır. Belirlenen yönetmeliklere göre [2], santral ile bağlantı noktası arasındaki enerji nakil hattı, işletmeyi yapan TEDAŞ tarafından enerjilenmedikçe, santralin paralele girmesine müsaade edilmez. OG dağıtım şebekesi, indirici trafo merkezlerinden radyal fider ile beslenen pasif şebekelerden oluşmaktadır. KHES ’lerin bağlanması ile pasif olan dağıtım şebekeleri aktif hale gelmektedir. Dolayısı ile KHES ’ler, dağıtım şebekesine aşağıda belirtilen önemli etkileri yapmaktadırlar.

Tek yönlü olan güç akışı, çift yönlü olmaktadır. Şebekedeki mevcut röle koordinasyonunun yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Diğer yandan, santralin şebekeye

bağlandığı noktadaki koruma rölelerinin eski tip elektromanyetik mekanik rölelerden oluşması, röle koordinasyonununda önemli sorunlar meydana getirmektedir.

KHES 'ler şebekeye bağlandığı noktadaki kısa devre kapasitesini arttırdıkları için, şebekedeki mevcut koruma ekipmanlarının değiştirilmesi gerekebilir. Ayrıca, şebekenin enerji nakil hatlarının termik taşıma kapasitelerinin yeniden kontrolü gerekmektedir.

Lokal generatörler, şebekeye bağlandığı noktaya ve işletme prensibine bağlı olarak, şebekenin gerilim regülasyonunu hem olumlu hem de olumsuz etkileyebilirler. Eğer santralin çıkış barasındaki gerilim, ± %5 sınırlarına yakın çalıştırılıyorsa, dağıtım şebekesinin gerilim profilini bozucu yönde etki gösterebilir. Örneğin, OG dağıtım merkezine bağlı olan ve sabit güç faktörü prensibinde çalışan bir generatörün, şebekeye verdiği reaktif güç desteği sayesinde, şebeke geriliminin düştüğü saatlerde, sistem gerilim profilinin kabul edilebiliir sınırlar içerisinde kalmasına katkı sağlayacağı açıktır. Diğer yandan, eğer generatör şebeke geriliminin yükseldiği saatlerde de aynı çalışma prensibinde çalıştırılırsa, bu sefer şebeke geriliminde sınırların dışına taşabilen artışlara neden olabilir.

KHES 'ler devreye girdiğinde, indirici merkezdeki bara geriliminin artışı/düşüşü nedeniyle tedbir alınması zorunluluğu, ülkemizde rastlanan problemlerden biridir. Özellikle generatörün uzun hatlar ile şebekeye bağlandığı durumlarda, bağlantı noktasına kapasitör eklenmesi veya 154 /34,5 kV indirici trafoların tap ayarlarının yeniden düzenlenmesi gibi tedbirlerin alınması gerekebilir [1].

3.7. KHES 'lerin Avantaj ve Dezavantajları

KHES 'lerin özellikle baraj tipi santrallere göre bazı üstünlükleri vardır. Bunların en önemlileri aşağıda sıralanmıştır:

- Kuruluş ve işletme maliyetleri düşüktür. Baraj tipi santrallerde, baraj gölü inşası toplam maliyet içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Halbuki nehir tipi santrallerde, baraj inşası ve arazi istimlak bedelleri gibi maliyet artırıcı unsurlar yoktur.
- Kuruluş süreleri kısadır. Proje işlemleri tamamlandıktan sonra, malî koşulların uygun olması halinde çok kısa sürede inşa edilebilirler. Halbuki baraj tipi santrallerin yapımı en az birkaç yıl sürmekte, hatta inşa sürecinde ortaya çıkan teknik ve mali sorunlar nedeniyle bazen on yılı dahi aşmaktadır.
- Finansmanları kolaydır. Ayrıca ekonomik geri dönüşümü, baraj tipi santrallere göre çok daha kısadır. Bu özelliğinden dolayı, mali kaynakları sınırlı özel sektör kuruluşları dahi, bu tür santralleri kolaylıkla kurabilir ve işletebilirler.

- Baraj tipi santraller gerek kuruluş, gerekse işletme aşamasında, çevresel etkileri nispeten fazla olan tesislerdir. Özellikle baraj gölü, kurulduğu bölgenin ekolojik, ekonomik ve yerleşme özellikleri üzerinde büyük etkiler yapmaktadır. Hatta bazı barajların uluslar arası politik etkileri dahi söz konusudur.
- Çevresel Etki Değerlendirmesi Yönetmeliği esaslarına tabidir. Buna karşın, çoğunlukla küçük ölçekli işletmeler olan nehir tipi santrallerin kuruluşunda, sadece seçme eleme kriterleri uygulanmaktadır [40].
- Bu tip santrallerin özellikle kırsal kesimde istihdam olanakları ve kalkınma üzerinde olumlu etkileri vardır.
- Bütün bu avantajlarından dolayı, AB ülkelerinin büyük bir bölümünde, yenilenebilir enerji kaynakları kategorisinde değerlendirilmekte ve teşvik edilmektedir [41].

Diğer yandan bu tip santrallerin bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajları şu şekilde sıralamak mümkündür.

- Kurulu güçleri itibarıyla, barajlı santrallere göre nispeten düşük kapasiteli tesislerdir. Hatta baraj tipi büyük bir santral, onlarca küçük ölçekli nehir tipi santralden çok daha fazla elektrik üretebilmektedir.
- Depolama özelliği olmayan diğer santraller gibi, elektrik tüketiminde gün ve yıl içerisinde meydana gelen frekans dalgalanmalarına yanıt verme hususunda yetersizdirler.
- Bu tip santrallerin en önemli dezavantajı, akarsu akımında meydana gelen değişmelerden doğrudan etkilenmeleridir. Elektik üretiminde yıl içerisinde ve yıllar arasında aşırı farklılıklar görülebilir. Buna rağmen, bu tip santraller projelendirilirken, akarsu yatağında 60 gün su akışının olması yeterli sayılmaktadır [42].
- Özellikle yerleşim alanlarından ve ana iletim sistemlerinden uzak dağlık sahalarda kurulmaları ve işletilmeleri nispeten güçtür. Ulaşım sorunu bu güçlüklerin başında gelir. Türkiye 'de nehir tipi santral potansiyelinin büyük bir bölümünün Karadeniz, Akdeniz ve Doğu Anadolu bölgelerinin dağlık kesimlerinde yoğunlaştığını belirtmek gerekir [43].

3.8. Türkiye 'de KHES Potansiyeli

Yapılan çalışmalar sonucunda [44], Türkiye genelinde yağış alanı 1000 km^2 'yi geçmeyen küçük akarsu havzalarındaki teknik yönden üretilebilecek enerjinin, toplam üretilebilecek enerji miktarının yaklaşık %5 'i olduğu saptanmıştır [45].

Dünya ’da sadece KHES ’lerden üretilebilecek elektrik enerjisinin, toplam hidroelektrik üretimi içerisindeki payı % 10 ’dur. Akarsu etütlerinin henüz tamamlanmamış olmasına karşın, Türkiye ’deki mevcut potansiyelin dünya ortalamasına yakın olduğu tahmin edilmektedir. Nitekim EİE tarafından akım ölçümleri yapılan, yüzölçümü 1000 km² ’den küçük 1515 havzada, 0.1-10 MW arası kurulu güçle çalışacak santrallerle, 33000 GWh/yıl enerji üretilebileceği öngörülmektedir. Bir başka araştırmada ise, ülkemiz akarsularında 0.1-5 MW kurulu güce sahip santrallerle, 20000 GWh/yıla yakın elektrik üretilebileceği hesaplanmıştır. Büyük ölçüde nehir tipi santrallerle değerlendirilmesi gereken bu potansiyel, Türkiye ’nin mevcut hidroelektrik üretiminin yarısından fazladır [46].

Türkiye ’deki HES ’lerin toplam kurulu güçleri, yaklaşık 11000 MW ’dır. Bu santrallerden bazıları ve kurulu güçleri Tablo 3.3 ’de verilmiştir.

Ülkemiz akarsularında büyük ölçekli nehir tipi HES kurabilme potansiyeli sınırlı olup, bu potansiyelin bir bölümü değerlendirilmiş, bir bölümü ise değerlendirme ya da projelendirme aşamasındadır. Buna karşın akarsularımızda, orta ve küçük ölçekli nehir tipi HES kurmaya elverişli büyük bir potansiyel söz konusudur [43].

Tablo 3.3. Türkiye ’de işletilmekte olan bazı KHES ’ler

Havza	**Akarsu**	**Santral**	**Bulunduğu İl**	**İşl.Açılış Tarihi**	**Kurulu Güç (MW)**	**Üretim (GWh/yıl)**
Basra	Fırat	Girlevik	Erzincan	1954	3	17
	Fırat	Kernek	Malatya	1964	0.8	3
	Fırat	Hazar II	Elazığ	1967	10	64
	Fırat	Derme	Malatya	1951	4.5	10
	Fırat	Ahiköy I	Sivas	1999	2.1	11
	Fırat	Ahiköy II	Sivas	2000	2.5	11
	Dicle	Botan	Siirt	1957	1.6	6
Toplam					**24.5**	**122**
Akdeniz	Ceyhan	Ceyhan	K.Maraş	1958	3.6	12
	Ceyhan	Ceyhan-Maraş	K.Maraş	1958	3.6	12
	Ceyhan	Kısık	K.Maraş	1993	9.6	32
	Ceyhan	Suçatı	K.Maraş	2000	7	28
	Seyhan	Seyhan II	Adana	1992	7.5	33
	Asi	Dörtyol	Hatay	1954	0.3	1
	D.Akdeniz	Yerköprü	Konya	1959	10.6	65
	D.Akdeniz	Yüreğir	Adana	1972	6	21

	D.Akdeniz	Anamur	Mersin	1967	0.6	3
	D.Akdeniz	Silifke	Mersin	1966	0.4	2
	D.Akdeniz	Bozyazı	Mersin	1973	0.4	1
	D.Akdeniz	Zeyne	Mersin	1971	0.3	2
	D.Akdeniz	Berdan	Mersin	1996	10	47
	B.Akdeniz	Kovada I	Isparta	1960	8.3	35
	B.Akdeniz	Kepez II	Antalya	1986	5.8	21
	B.Akdeniz	Bereket II	Denizli	1998	3.2	13
	B.Akdeniz	Sütçüler	Isparta	1998	2	12
Toplam					**79.2**	**340**
Karadeniz	Yeşilırmak	Durucasu	Amasya	1955	0.8	3
	Çoruh	Murgul	Artvin	1951	4.7	10
	D.Karadeniz	Visera	Trabzon	1929	1	3
	B.Karadeniz	Hasanlar	Düzce	1991	9.4	40
	Kızılırmak	Sızır	Sivas	1961	6.7	35
	Kızılırmak	Bünyan	Kayseri	1951	1.4	4
	Kızılırmak	Molu	Kayseri	2000	5	22
	Sakarya	Pamukova	Sakarya	2000	9.3	42
Toplam					**38.3**	**159**
Marmara Denizi	Susurluk	Kayaköy	Kütahya	1960	3.8	12
	Gönen Ç.	Gönen	Balıkesir	1998	10.6	47
Toplam					**14.4**	**59**
Ege Denizi	B.Menderes	Denizli	Denizli	1949	1.2	10
	B.Menderes	Dinar I	Afyon	1951	1.1	3
	B.Menderes	Dinar II	Afyon	2000	3	16
	B.Menderes	Çal	Denizli	2001	2.2	12
Toplam					**7.5**	**41**
Hazar	Aras	Kiti	Iğdır	1966	2.7	6
Toplam					2.7	6
Kapalı Havza	Van Gölü	Engil	Van	1968	4.6	14
	Konya	İvriz	Konya	1986	1.1	2
Toplam					**5.7**	**16**
Genel Toplam					**169.6**	**737**

Doğu Karadeniz Havzası, KHES ’ler açısından verimli bir bölgedir. Topoğrafik olarak dağların denize paralel uzandığı ve yıllık ortalama yağışın 1291 mm olduğu Doğu Karadeniz Havzası, diğer havzalara oranla daha düzenli akım rejimi ve coğrafi özellikleri nedeniyle,

KHES 'lere oldukça uygun görülmektedir [47]. Bu bölgede, genelde homojen bir dağılım gösteren akım miktarlarında, karların erimeye başladığı ilkbahar mevsiminde artmalar görülmektedir. Yapılan incelemelerde, ortalama ve maksimum akım değerleri arasındaki farkın Ordu-Giresun arasındaki ırmaklarda, Trabzon-Artvin arasındaki ırmaklara oranla daha fazla olduğu belirlenmiştir [45]. 4628 Sayılı Elektrik Piyasası Kanunu 'nun yürürlüğe girmesiyle, enerji santral başvurularıyla bu havzadaki potansiyel devreye sokulmaya başlanmıştır. Doğu Karadeniz Havzası 'ndaki inşa, fizibilite ve su kullanım hakkı aşamasındaki küçük hidroelektrik santrallerin sayıları, toplam kurulu güçleri ve üretecekleri enerji miktarları Tablo 3.4 'de verilmiştir.

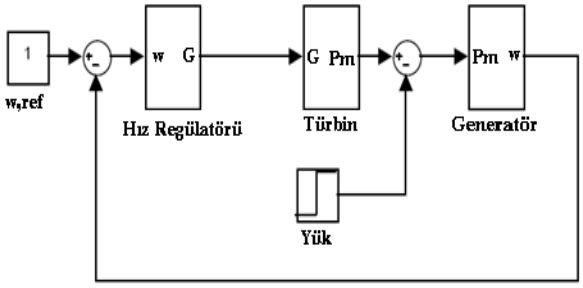
Tablo 3.4. Doğu Karadeniz Havzası 'ndaki inşa, fizibilite ve su kullanım hakkı aşamasındaki küçük hidroelektrik santraller [47]

İli	**Durumu**	**Adet**	**Kurulu Güç (MW)**	**Toplam Enerji (GWg/yıl)**
Giresun	Su kullanma antlaşması yapılmış	2	41.40	122.81
	Fizibilitesi hazır	31	427.07	1514.72
	Yapım aşamasında	20	579.34	2091.40
Toplam		**53**	**1047.81**	**3728.93**
Trabzon	Su kullanma antlaşması yapılmış	7	98.02	443.40
	Fizibilitesi hazır	43	349.41	1163.19
	Yapım aşamasında	34	438.28	1676.29
Toplam		**84**	**885.71**	**3282.88**
Rize	Su kullanma antlaşması yapılmış	2	18.80	87.91
	Fizibilitesi hazır	25	366.57	1511.03
	Yapım aşamasında	21	548.57	2162.53
Toplam		**48**	**933.94**	**3761.47**
Gümüşhane	Su kullanma antlaşması yapılmış	2	12.83	43.33
	Fizibilitesi hazır	9	110.20	312.31
	Yapım aşamasında	3	6.30	21.21
Toplam		**14**	**129.33**	**376.85**
Artvin	Su kullanma antlaşması yapılmış	0	0	0
	Fizibilitesi hazır	14	155	673
	Yapım aşamasında	0	0	0
Toplam		**14**	**155**	**673**
Genel Toplam		**213**	**3151.79**	**11823.13**

Ülkemiz KHES potansiyeli bakımından oldukça zengin bir ülkedir. DSİ planlamalarına göre, ülkemizde KHES tanımlamasına giren 278 adet proje mevcuttur. Bu projelerin toplam kurulu gücü 1086 MW 'a ulaşmaktadır. Türkiye 'de, bugüne kadar inşaatı tamamlanarak işletmeye açılan santrallerin toplam gücü 154,1 MW ile toplam potansiyelin %14 'lük bir bölümünü oluşturmaktadır. KHES 'lerin bugüne kadar yeterince değerlendirilemeyişinin sebebi, DSİ 'nin önceliklerini sulama, içme suyu ve taşkın kontrol amaçlı, yüksek barajlı projelere vermesidir. Hidroelektrik enerji potansiyelini geliştirmekle görevli diğer bir kuruluş olan EİE ise, önceliklerini kurulu gücü yüksek HES 'lere vermiştir. Özel sektörün katkısını sağlamak maksadıyla Yap İşlet Devret ve Yap İşlet modelleri ülkemizde uygulanmaya başlanmıştır [11].

4. HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN MODELLENMESİ

Hidroelektrik santral modelleri genel olarak doğrusal modeller ve doğrusal olmayan (doğrusallaştırılmış) modeller şeklinde sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma, modelin içerdiği denklemlerin karmaşıklığına bağlıdır. Modeller kendi içerisinde, cebri borudaki elastik su yükü modeli ve elastik olmayan su yükü modeli şeklinde de sınıflandırılabilirler. Doğrusallaştırılmış modeller, kontrol sistem kararlılığı veya küçük sinyal kararlılığı çalışmalarında kullanılırlar. Şekil 4.1 'de bir HES için hız kontrolünün genel modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Hız kontrolü genel modeli [6]

HES 'lerin modellenmesi ve kontrolör tasarımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Modelleme ile ilgili olarak Oldenburger, elastik su yükü etkilerini kapsayan çalışmasında, doğrusal olmayan dinamikleri çalışma noktasında doğrusallaştırmıştır. Undrill [48], geçici gerilim düşümlerini hesaplamak için takip edilmesi gereken prosedürleri belirlemiştir. IEEE çalışma grubu [49,50], HES 'in farklı modellerini ve güç üretimi kontrolü için gerekli teknikleri rapor etmiştir. Bu çalışmada, doğrusal ve doğrusal olmayan modellerde, elastik olan ve olmayan su yükü etkileri incelenmiştir. Ramey [51], Luqing [52], Wozniak [53], Malik [54] ve Vournas [55] çalışmalarında, ideal ve elastik olmayan su yükünü dikkate alarak, çalışma noktasında doğrusallaştırılmış klasik bir türbin modelinden bahsetmişlerdir. Benzer şekilde Sanathanan [56], uzun cebri borulu durumda, hidro türbinler için azalan düzenli türev modelini önermiş, benzer bir sistem için doğrusal türbin karakteristikleri modellerinin yetersiz kaldığını kanıtlamıştır. Kundur [57], bir santralin modellenmesinde, doğrusal olmayan elastik su yükü etkisi dinamikleri üzerinde durmuştur. Fangtong [58], regülatör sistem tasarımı için, hidro türbin-generatör ayarlamalarının modellemesinde, parametre tahmin teknikleri ve santral tanımlama üzerinde durmuştur. Qijuan [59], tekrarlanan en küçük kareler tahmin algoritmasını kullanan, lokal yük ile hidro türbin-generatörün dinamik modellemesini tanıtmıştır. Vournas [60], ortak cebri boruyu paylaşan hidrolik türbinler için transfer fonksiyonunu geliştirmiştir. Bu çalışmada, cebri borunun hem elastik olan hem de olmayan modeli üzerinde çalışılmıştır.

Benzer bir çalışmada, Hannet [61] ve Jaeger [62] aynı çalışmayı, alan test temelli modelde denemişlerdir.

Araştırmacıların çoğu, uzun cebri boruda sıkıştırma ve elastik etkilerin dinamiklerini kapsayan çok yönlü araştırmalar üzerinde durmamışlardır. Bu etkiler hidrolik yapıdaki irrasyonal terim olan e^{-2sT_e} 'nin ertelemesini gösterir. Burada T_e dalga hareket zamanıdır. İrrasyonel terimli transfer fonksiyonunun çözümü zordur ve bazen kararlılık çalışmalarında doğrudan kullanılamayabilir [63].

4.1. Doğrusal Model

Doğrusal modellemede, hidrolik direnç (hidrolik kayıplar) ihmal edilebilir, cebri boru elastik yapıda değildir ve su sıkıştırılamaz. Suyun hızı, türbin dağıtıcı açıklığı ve net hidrolik yüksekliğin karekökü ile, türbin mekanik gücü ise, hidrolik yükseklik ve su hızının çarpımı ile doğru orantılıdır. Türbin ve cebri boru karakteristikleri cebri boru su hızı, türbin mekanik gücü ve su yükü ivmesi olmak üzere üç temel eşitlik ile belirlenir.

Cebri boru su hızı, türbin dağıtıcı açıklığı ve net hidrolik yüksekliğin karekökü ile doğru orantılı olduğu için

$$U = K_u G\sqrt{H} \tag{4.1}$$

yazılabilir. Burada K_u hız sabitidir.

Çalışma noktasından küçük bir sapma olduğu durumda, hız değişimi, hidrolik yüksekliğe ve dağıtıcı pozisyonuna bağlı olarak oluşan hız değişimlerinin toplamıdır.

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial H}\Delta H + \frac{\partial U}{\partial G}\Delta G \tag{4.2}$$

Kısmi türevlere sürekli çalışma rejimindeki anma değerleri yerleştirilirse,

$$U_0 = K_u G_0\sqrt{H_0} \tag{4.3}$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta H}{2H_0} + \frac{\Delta G}{G_0} \tag{4.4}$$

elde edilir. Baz değer olarak, anma değerleri seçilirse, eşitlik (4.4) pu sistemde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta\overline{U} = \frac{1}{2}\Delta\overline{H} + \Delta\overline{G} \tag{4.5}$$

Türbin çıkış gücü, hidrolik yükseklik ve su hızının çarpımı ile doğru orantılı olduğu için,

$$P_m = K_{pm} H U \tag{4.6}$$

yazılabilir. Burada K_{pm} mekanik güç sabitidir.

Çalışma noktasından küçük bir sapma olduğu durumda, mekanik güç değişimi, hidrolik yüksekliğe ve suyun hızına bağlı olarak oluşan mekanik güç değişimlerinin toplamıdır.

$$\Delta P_m = \frac{\partial P_m}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial P_m}{\partial U} \Delta U \tag{4.7}$$

Kısmi türevlere sürekli çalışma rejimindeki anma değerleri yerleştirilirse,

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m0}} = \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{\Delta U}{U_0} \tag{4.8}$$

elde edilir.

Baz değer olarak, anma değerleri seçilirse, eşitlik (4.8) pu sistemde aşağıdaki gibi olur.

$$\Delta \overline{P_m} = \overline{\Delta H} + \overline{\Delta U} \tag{4.9}$$

(4.9) eşitliği kullanılarak, (4.10) ve (4.11) elde edilir.

$$\Delta \overline{P_m} = 1.5 \overline{\Delta H} + \overline{\Delta G} \tag{4.10}$$

$$\Delta \overline{P_m} = 3 \overline{\Delta U} - 2 \overline{\Delta G} \tag{4.11}$$

Newton ’un ikinci hareket yasasına göre, hareketli bir sistemde kinetik enerji ile potansiyel enerji toplamı daima sabittir. Bu nedenle, rezervuardaki suyun cebri borunun giriş noktasındaki hızının sıfır olduğu kabul edilirse, türbin girişinde suyun kazandığı kinetik enerji, potansiyel enerji değişimine eşittir.

Su kütlesi ρLA, türbin giriş basınç değişimi $\rho a_g \Delta H$ olmak üzere;

$$\rho L A \frac{d}{dt} \Delta U = -A \rho a_g \Delta H \tag{4.12}$$

$$\frac{L U_0}{a_g H_0} \frac{d}{dt} \Delta \overline{U} = -\Delta \overline{H} \tag{4.13}$$

yazılabilir. Eşitlik (4.13) ’deki türevsel terimin sol tarafı suyun hareket süresi (T_w) olarak adlandırılır. Suyun hareket süresi, hidrolik yükseklik H_0 iken, cebri borudaki suyun U_0 hızına

ulaşmasına kadar geçen süredir. Bu süre, yüke bağlı olarak değişmektedir. Suyun hareket süresi, uygulamada, tam yükteki anma değerlerine göre belirlenir.

$$T_w \frac{d}{dt}\Delta\overline{U} = -\Delta\overline{H} \tag{4.14}$$

$$T_w = \frac{LU_0}{a_g H_0} = \frac{LQ_0}{a_g A H_0} \tag{4.15}$$

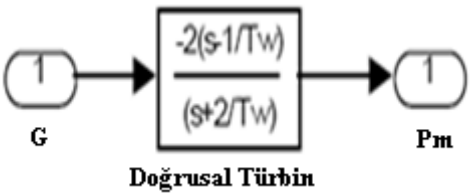
Su hızının dağıtıcı pozisyonuna göre değişimi incelenirse;

$$T_w \frac{d}{dt}\Delta\overline{U} = 2(\Delta\overline{G} - \Delta\overline{U}) \rightarrow \Delta\overline{U} = \frac{1}{1+\frac{1}{2}T_w s}\Delta\overline{G} \tag{4.16}$$

$$\frac{\Delta\overline{P_m}}{\Delta\overline{G}} = \frac{1-T_w s}{1+\frac{1}{2}T_w s} \tag{4.17}$$

elde edilir. Bu eşitlik hidrolik türbinin klasik transfer fonksiyonudur.

Yukarıdaki eşitlikler dikkate alınarak oluşturulmuş doğrusal türbin modeli Şekil 4.2 ’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Doğrusal türbin modeli [6]

4.1.1. İdeal Olmayan Türbin

İdeal olmayan türbinin transfer fonksiyonu su hızı ve türbin gücünün bozulmuş değerleri için aşağıdaki genel ifadeden elde edilir;

$$\Delta\overline{U} = a_{11}\Delta\overline{H} + a_{12}\Delta\overline{n} + a_{13}\Delta\overline{G} \tag{4.18}$$

$$\Delta\overline{P_m} = a_{21}\Delta\overline{H} + a_{22}\Delta\overline{n} + a_{23}\Delta\overline{G} \tag{4.19}$$

Burada $\Delta\overline{w}$ pu olarak hız değişimidir. Büyük sistemler için küçük olduğundan ihmal edilir.

$$\Delta\overline{U} = a_{11}\Delta\overline{H} + a_{13}\Delta\bar{G} \tag{4.20}$$

$$\Delta\overline{P_m} = a_{21}\Delta\overline{H} + a_{23}\Delta\bar{G} \tag{4.21}$$

Burada, a_{11} ve a_{13} katsayıları düşü ve dağıtıcı açıklığına göre akışkan hızının kısmi türevleri olup, a_{21} ve a_{23} katsayıları ise düşü ve dağıtıcı açıklığına göre türbin çıkış gücünün kısmi türevleridir. Makinanın yüklenmesine bağlı olarak a katsayıları çalışma noktalarında değerlendirilir. Eşitlik (4.20) ve (4.21) ile verilen bağıntılar eşitlik (4.5) ve (4.11) da yerine konulursa;

$$\frac{\Delta\overline{P_m}}{\Delta\bar{G}} = \frac{1+(a_{11}-a_{13}a_{21}/a_{23})sT_w}{1+a_{11}sT_w} \tag{4.22}$$

elde edilir. Francis türbininde $a_{11} = 0.5$, $a_{13} = 1$, $a_{21} = 1.5$ ve $a_{23} = 1$ olarak alınmıştır.

4.2. Doğrusal Olmayan Model

4.2.1. Elastik Olmayan Su Yükü Modeli

Bu modelde, cebri boru modellenirken, elastik yapıda olmadığı ve suyun sıkıştırılamaz bir akışkan gibi davrandığı düşünülmüştür. A kesit alanlı ve L uzunluğundaki rijit boru göz önüne alınırsa, cebri boru yükseklik kaybı, cebri boru duvarındaki su sürtünmesi ile debinin karesinin çarpımıdır.

$$\mathrm{H_f} = \mathrm{f_p Q^2} \tag{4.23}$$

Newton ’un ikinci hareket yasasını kullanarak cebri borudaki debi değişim oranı şöyle tarif edilir:

$$\frac{\mathrm{dQ}}{\mathrm{dt}} = (\mathrm{H_0 - H - H_f})\frac{\mathrm{A.a_g}}{\mathrm{L}} \tag{4.24}$$

Bu denklem birim değer olarak;

$$\frac{\mathrm{d\bar{Q}}}{\mathrm{dt}} = \frac{(1-\bar{\mathrm{H}}-\overline{\mathrm{H_f}})}{\mathrm{T_w}} \tag{4.25}$$

şeklinde elde edilir.

Net debi ile yüksüz durumdaki debinin farkı efektif debiyi verir. Efektif debinin yükseklikle çarpımı mekanik gücü verir. Mekanik güç doğal olarak % 100 değildir. Dağıtıcı

açıklığının bir fonksiyonu olan türbin sönümleme etkisi de ilave edilirse, birim değer türbin gücü;

$$\overline{P_m} = A_t\overline{H}(\overline{Q} - \overline{Q_{nl}}) - D_n\overline{G}\Delta\bar{n} \tag{4.26}$$

olarak bulunur. Türbin gücü (MW) baz güç olarak alınır. Dağıtıcılar tam açık (dağıtıcı pozisyonu = 1) kabul edilerek Q_{baz} türbin debisi seçilmiştir. H_{baz} su yüzeyinin statik yüksekliğini (H_0) gösterir. D_n türbin verimindeki hız değişiminin (Δn) etkisini gösteren bir katsayıdır ve değeri 0.5 ile 2 arasında değişir.

Türbin karakteristiği, debi, dağıtıcı pozisyonu ve yükseklik arasındaki ilişkilerle baz debiyi belirler. Türbindeki birim değer debi miktarı;

$$\overline{Q} = \overline{G}\sqrt{\overline{H}} \tag{4.27}$$

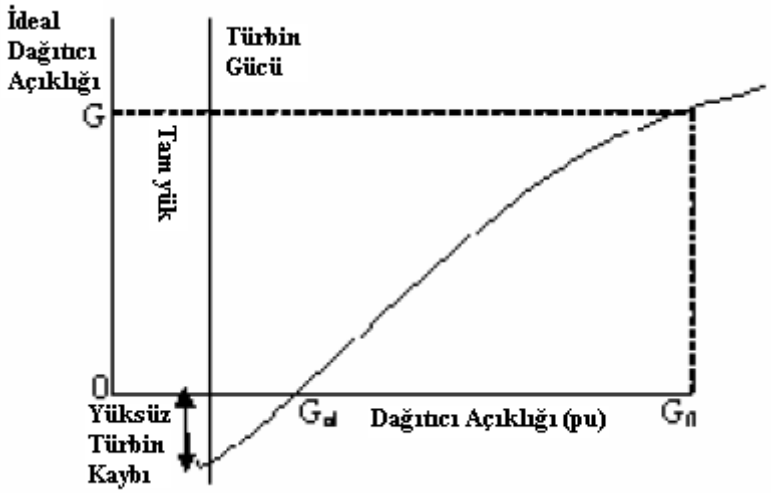
ile bulunur.

Türbin kazancı, türbin kapağı açıklık oranının kazanca yaptığı etki olarak;

$$A_t = \frac{1}{G_{fl} - G_{nl}} \text{ x } \frac{\text{Türbin MW}_{\text{nominal}}}{\text{Generatör MW}_{\text{nominal}}} \tag{4.28}$$

şeklinde gösterilir. Burada;
G_{fl}: Tam yükteki dağıtıcı pozisyonunu,
G_{nl}: Yüksüz durumdaki dağıtıcı pozisyonunu
ifade eder.

İdeal ve gerçek dağıtıcı açıklığı pozisyonu arasındaki bağlantı Şekil 4.3 ’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. İdeal ve gerçek dağıtıcı açıklığı

Türbinin doğrusallaştırılmış gösterimi, sistemin test edilmesiyle elde edilen türbin datalarının kullanılmasıyla olur. Türbin davranışı; debi ve çıkış torkunun, hıza, dağıtıcı açıklığı ve yüksekliğe bağlı değişimiyle karakterize edilebilir. Türbin çalışma noktası etrafındaki küçük değişimler, debi ve tork için, yükseklik, hız ve dağıtıcı pozisyonuna bağlı olarak doğrusal Taylor serisi yaklaşımı ile ifade edilirse;

$$\Delta Q = a_{11}\Delta H + a_{12}\Delta n + a_{13}\Delta G \tag{4.29}$$

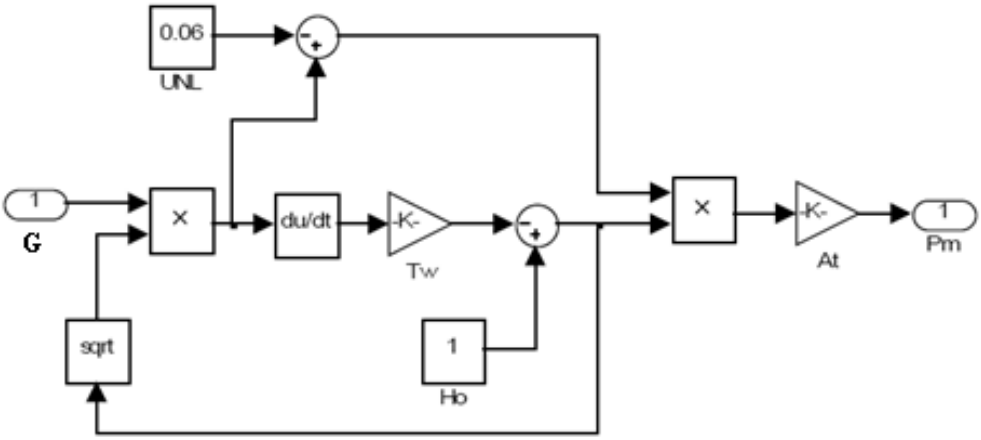
$$\Delta T = a_{21}\Delta H + a_{22}\Delta n + a_{23}\Delta G \tag{4.30}$$

bağıntıları elde edilir. Burada a_{ij}, debi ve torkun, yükseklik, hız ve dağıtıcı pozisyonlarıyla ilgili olan kısmi türev parametreleridir. Bunlar çalışma noktası etrafındaki değişimlere karşı sabit kalırlar. Nominal hızdaki debi değişimi (a_{12}), çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. a_{22} hızlı mekanik tork sapması, negatif olan ama mutlak değerle yer alan türbin regülasyonu olarak bilinir.

Cebri borudaki sürtünme kayıplarının ihmali ile elastik olmayan su yükü için doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonu;

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta G} = \frac{1-G_0 T_w s}{1+\frac{G_0 T_w s}{2}} \text{ x } A_t \tag{4.31}$$

şeklinde elde edilir. Şekil 4.4 ’de elastik olmayan su yükü için doğrusal olmayan türbin modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Elastik olmayan su yükü için doğrusal olmayan türbin modeli [6]

4.2.2. Elastik Su Yükü Modeli

Cebri borunun hassas dinamiği için hidrolik hat karakteristiğinin meydana getirdiği su koçunu da hesaba katmak gerekir. Su koçu, cebri borudaki basınç değişimlerinin sonucudur. Dağıtıcının aniden açılması veya kapanması, akan suyun hızının azalmasına veya artmasına neden olur. Herhangi bir nedenle su hızının hızlı değişimi, su koçuna sebep olur. Bu olay, pozitif ve negatif basınç dalga serileri ile karakterize edilebilir. Basınç dalgası, sürtünmeyle sönümlenene kadar cebri boru içinde, ileri geri hareket devam eder. Dağıtıcının ani kapanmasıyla bütün su aniden durur, bu durum hızda çok büyük değişimlere neden olur. Newton 'un ikinci hareket yasasına göre, bu durumda kuvvetin sonsuza ulaşması beklenir. Ancak pratikte bu durumun gerçekleşmesi imkansızdır. Aslında, su bir derece sıkıştırılabilirse, tanecikler de aynı şekilde hızlanmaz ve dağıtıcıdaki hızlı kapanma, su yükünün ani duruşuna neden olmaz. İlk önce, sadece dağıtıcı ile temas eden su tanecikleri durur, daha sonra diğerleri durur.

Rijit cebri boru göz önüne alınarak dağıtıcının aniden kapanması ve dağıtıcıdan yukarı doğru basıncın aniden artmasıyla, baraj üstünde (veya denge bacasında) aşırı basınç dalgası oluşur. Dağıtıcı yanındaki su tanecikleri, üstlerindeki suyla sıkıştırılır. Su normal hızıyla hareket eder ve suyun birbirini izleyen tanecikleri sıkıştırılır. Bu sıkıştırma hareketi dalga hareketine benzer ve yukarı doğru hareket eder. Serbest su yüzeyine ulaşana kadar basınç dalgası hızla hareket eder. Basınç dalgasının serbest su yüzeyinden cebri boru uzunluğu içindeki hareketine kadar geçen süreye, dalga hareket zamanı (T_e) denir.

$$T_e = \frac{L}{A} \tag{4.32}$$

Hareketli suyun kinetik enerjisi, suyun sıkıştırılmasıyla ve cebri borunun gerilmesiyle elastik enerjiye çevrilir. Diğer elemanların orijinal halini takip etmesiyle, son su taneciğinin serbest su yüzeyine yayılması, negatif basınç dalgasına sebep olur. Dalganın aşağı doğru hareketiyle, dalganın t=2*Te zamanında dağıtıcıya erişmesiyle, artan su basıncı normal basıncına döner. Dağıtıcıdan uzaklaşarak hareket eden su, basınç azalmasına neden olur. Negatif basınç dalgası yukarı doğru serbest su yüzeyine hareket eder.

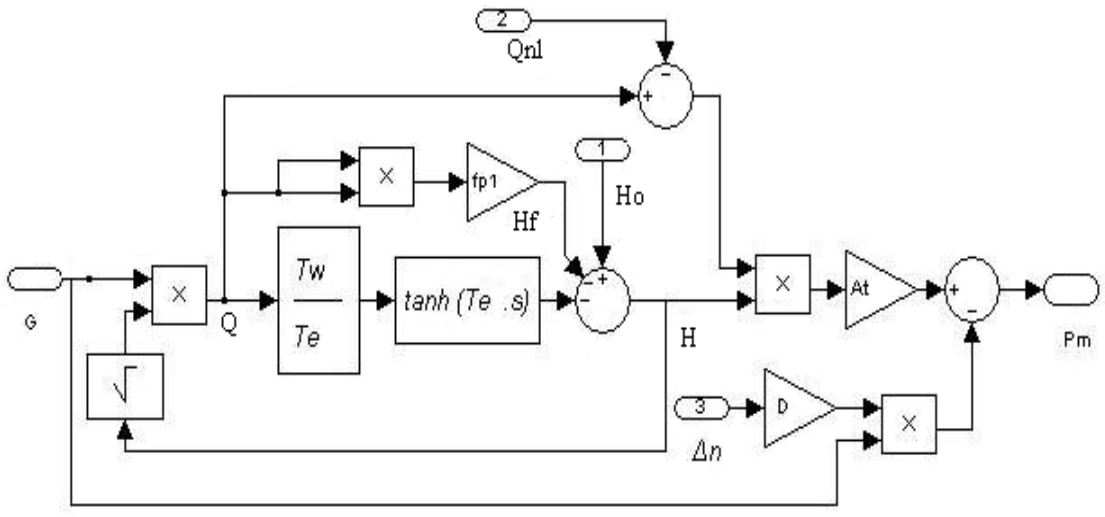
Cebri boru büyük barajdan beslenen bir kanal olarak kabul edilirse, türbin girişindeki yükseklik ve debi bağıntısı transfer fonksiyonunu verir. Burada F, cebri borudaki sürtünme kayıpları ve s Laplace kompleks değişkenini ifade eder.

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = -\frac{T_w}{T_e}\tanh\left(T_e s + F\right) \tag{4.33}$$

İdeal türbin parametreleri kullanılarak ve sürtünme katsayısı (F) sıfır kabul edilerek, sürtünme kayıpları ihmal edilirse;

$$\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta G(s)} = \frac{1 - Z_0 \tanh(T_e)}{1 + 0.5 Z_0 \tanh(T_e)} \tag{4.34}$$

elde edilir. Burada, $Z_0 = \frac{T_w}{T_e}$, cebri boru normalize empedansıdır. Şekil 4.5 ’de elastik su yükü için doğrusal olmayan türbin modeli verilmiştir [6, 7, 50, 57, 61, 62, 64-71].



Şekil 4.5. Elastik su yükü için doğrusal olmayan türbin modeli [7]

4.3. Denge Bacası Modeli

Daralan ağız tipli denge bacası göz önüne alındığında, sistemde alçak basınç tüneli, yüksek basınç tüneli ve denge bacası bulunur. Denge bacasındaki debi, denge bacası alanı (A_s) ve denge bacası seviyesinin (H_s) değişimine bağlıdır. Bu ifade;

$$Q_s = A_s \frac{dH_s}{dt} \tag{4.35}$$

olarak ifade edilir. Birim değer denge bacası su seviyesi;

$$H_s = \frac{Q_s}{C_s s} \tag{4.36}$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada C_s denge bacası depolama sabitidir.

$$C_s = \frac{A_s H_{baz}}{Q_{baz}} \tag{4.37}$$

Denge bacası ağzındaki yükseklik kaybı, debi ve nominal frekans (f_0) ile orantılıdır. Alçak cebri borudaki yükseklik, denge bacası seviyesi ile ağızdaki yükseklik kaybı arasındaki farktır. Denge bacası seviyesi, alçak cebri boru üzerindeki yükseklikle tanımlanır. Denge bacasının eklenmesi, su haznesi ile tank arasındaki zayıf sönümlü salınımların artmasına neden olur. Her dönem için birkaç dakika olan bu salınım genelde çok yavaştır. Yük frekans kontrolü ve denetleyici kullanılarak bu salınım ihmal edilebilir.

Lump sistem teorisine göre, eğer her iki tünel ve ağızdaki yükseklik kaybı ihmal edilirse, denge bacasındaki denge osilasyonlarının T_{st} gibi bir periyodu olur. Bu süre, türbin yük değişimi ve maksimum dalganın meydana gelmesi arasındaki zaman süresidir. Bu periyot;

$$T_{st} = 2\pi \sqrt{\frac{L_s A_s}{gA}} \tag{4.38}$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada, L_s su haznesinden denge bacasına olan tünel uzunluğunu, A_s denge bacası kesit alanını ve A tünel kesit alanını ifade eder [7].

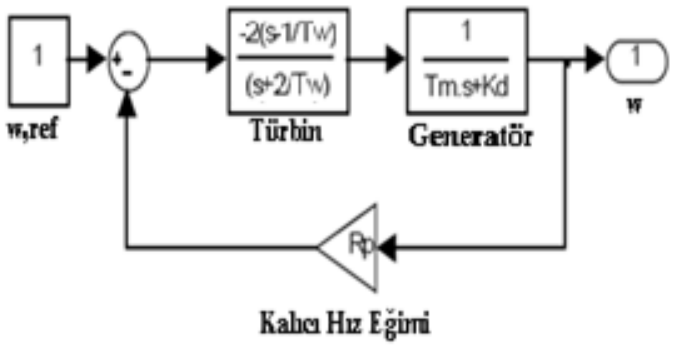
4.4. Regülatör Modeli

Bir generatörün ürettiği elektriksel güç, elektriksel yük ile iletim kayıplarının toplamına eşit olmalıdır. Aksi takdirde, türbin şaftına etki eden toplam tork, yani mekanik ve elektriksel tork farkı, üretilen gücün hat kayıpları ile tüketilen gücün toplamına eşit olana kadar türbinin hızlanmasına veya yavaşlamasına neden olur.

$$P_{\text{üretilen}} = P_e = P_{\text{yük}} + P_k \tag{4.39}$$

$$T_{\text{mek}} - T_{\text{elk}} = J\frac{d}{dt}w \tag{4.40}$$

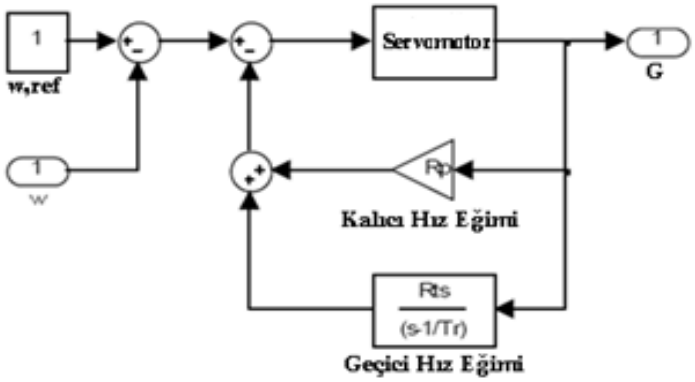
Elektriksel hız, mekanik hız ile doğru orantılı olduğu için, güç sistemindeki elektriksel hız ve frekans değişecektir. Kaliteli bir güç sisteminde, frekansın kabul edilebilir bir aralıkta sabit olması istendiği için, hız kontrolü yapılır. Hız regülatörü, hem hızı hem de üretilen elektrik gücünü ayarlar. Hız, referans hıza göre geri besleme yaptırılarak, hız regülatörünün dağıtıcı pozisyonunu değiştirmesine ve sırasıyla, mekanik ve elektriksel gücün değişmesine neden olacaktır. Geri besleme için kabul edilen maksimum hız değişimine göre, kalıcı hız eğimi kullanılır. Kalıcı hız eğimi, bağlı olunan şebeke yönetmeliklerine göre, genellikle % 4-5 arasında seçilir. %5 hız eğiminin kullanılması, hızın %5 değişmesi durumunda, dağıtıcı pozisyonunda veya çıkış gücünde %100 değişimin elde edileceği anlamına gelir. Şekil 4.6 'da kalıcı hız eğimi kullanılarak elde edilen HES modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Kalıcı hız eğimi ile HES modeli [6]

Hidrolik türbinlerde suyun ataletinden dolayı, dağıtıcı pozisyonundaki bir değişiklik, ters yönde ilk türbin gücü değişimini oluşturur. Ani değişiklik, sistemin dengesiz çalışmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, kalıcı hız eğimi etkisini kompanze etmek için, büyük geçici hız eğimi ve uzun sıfırlama süresi gerekir. Geçici hız eğimi, dağıtıcı pozisyonundaki değişimi

kontrol altında tutarak, suyun akışındaki değişimin güç değişimini yakalamasını ve eş zamanlı hareket etmesini sağlar. Şekil 4.7 'de geçici hız eğimli bir HES modeli gösterilmiştir. Sonuç olarak, hız regülatörü, yüksek hız dalgalanmasında yüksek hız eğimi (düşük kazanç) ve normal çalışma rejimindeki küçük hız dalgalanmalarında ise düşük hız eğimi (yüksek kazanç) sağlar [6].



Şekil 4.7. Geçici hız eğimi ile hız regülatörü modeli [6]

4.4.1. Hız Regülatörü Parametrelerinin Ayarlanması

Hız regülatörü parametrelerinin belirlenmesinde, aşağıdaki üç durum dikkate alınmalıdır:

- Sistem ada bağlantılarında dengeli çalışma veya izole çalışma
- Senkron generatörün yük alma ve atmasında, kabul edilebilir hız aralığında çalışma
- Yük alma ve atma sırasında belirli süre içinde hızı sabitleme

Ada bağlantılarında dengeli bir çalışma rejimi için geçici hız eğimi; sıfırlama süresine (Tr), suyun hareket süresine (Tw) ve geçici hız eğimi sabitine (Rt) ve türbinin mekanik hareket süresine (T_M) bağlıdır. Türbinin mekanik hareket süresi, türbinin eylemsizlik katsayısı ile orantılıdır.

$$R_t = [2{,}3 - (T_w - 1).\,0{,}15]\frac{T_w}{T_M} \tag{4.41}$$

$$T_M = 2H_m \tag{4.42}$$

Burada H_m, türbin eylemsizlik katsayısıdır.

$$\frac{1}{R_t} \leq 1{,}5\frac{H_m}{T_w} \tag{4.43}$$

$$T_r = [5 - (T_w - 1).\,0{,}5]T_w \tag{4.44}$$

Ayrıca, servomotor kazancı, pratik uygulama elverdiği ölçüde olabildiğince yüksek seçilmelidir. Enterkonnekte sistem operasyonlarında, yukarıda belirtilen ayarlar yavaş tepki verir. Bu nedenle, geçici hız eğimi sıfırlama süresi (Tr), 1 'den küçük, tercihen 0,5 saniyeye yakın seçilmelidir [6].

4.4.2. PD, PI ve PID Hız Regülatörleri

Orantı etkiye türev etki ilavesi ile elde edilen PD (oransal-türevsel) kontrol, kalıcı durum hatasını sıfırlayamamakla beraber, bozucu girişten doğan kalıcı durum hatasının fazla önemsenmediği, fakat buna karşılık orantı etkiye göre geçici durum davranışının iyileştirilmesi istenen, konum servo mekanizmalarında tercih edilir. Türev etki ilavesi, kararsız veya kararsızlığa yakın bir sisteme sönüm ilave ederek, sistemi daha kararlı hale getirir. Türev etki ilavesinin en önemli sakıncası, kontrol sinyallerinin yanında sistemde ortaya çıkan bozucu sinyalleri de kuvvetlendirmesidir. Bunun sonucu olarak, kontrol organı çıkışında salınımlı bir hareket meydana gelir.

PI (oransal-integral) tipi kontrol organı yapısı nispeten basit olup, özellikle basınç, seviye ve akış kontrolünde kullanılır. İntegral etki, kontrol edilen çıkış büyüklüğünde meydana gelebilecek kalıcı durum hatalarını ortadan kaldırır. İntegral etkinin kullanım amacı, sistemin değişen talepleri üzerinde yeterli bir kontrol etkisi sağlamaktır. Eğer sistemden istenen talep, yalnız başına P (orantı) etkisine I (integral) etkisi ilave edilecek olursa, kontrol organı çıkışında sürekli artan (integre olan) kontrol etkisi elde edileceğinden, motor elemanının, hatanın ortadan kalkmasını sağlayacak kadar hareket etmesi temin edilmiş olur. Bu işlem sonucu, kontrol edilen çıkış büyüklüğünde ortaya çıkan sapma sıfırlanmış olur.

PID (oransal-integral- türevsel) kontrol, üç temel kontrol etkisinin üstünlüklerini, tek bir birim içinde birleştiren bir kontrol etkisidir. İntegral etki, sistemde ortaya çıkabilecek kalıcı durum hatasını sıfırlarken, türev etki ise yalnızca PI kontrol etkisi kullanılması haline göre, sistemin aynı bağıl kararlılığı için cevap hızını artırır. Buna göre PID kontrol organı, sistemde sıfır kalıcı durum hatası olan hızlı bir cevap sağlar. Sıcaklık, ph, yoğunluk, karışım vb. ölçümlerinde ortaya çıkan ölü zamanın gecikmeleri, PID tipi kontrol organı kullanılarak telafi edilebilir. PI kontrolörü ile ayarlanan bir sisteme, geniş zaman aralıkları içerisinde, büyük şiddetli bozucu girişler etki edecek olursa, PI etki tek başına hatada meydana gelen değişimleri izlemeye ve düzeltmeye yeterli olamaz. Bu durumda, bir türev etki ilavesi, orantı kazancı

ayarının daha yüksek tutulmasını sağlayarak kontrol organı tepki süresini hızlandıracaktır. Böylece PID kontrol organı ile bir taraftan kalıcı durum hatası sıfırlanırken, diğer taraftan da sistemin geçici-durum davranışı iyileştirilmiş olur [7].

Bazı hız regülatörleri, PID kontrollü olarak kullanılır. PID kontrollü hız regülatörleri, hızlı tepkime süresi vermeye olanak sağlar. Türevsel eleman, yüksek suyun hareket etme süresi olan türbinlerde izole çalışma için fayda gösterir. Ancak, türevsel eleman, enterkonnekte bir sistemde çalışan generatörde dalgalanmalara neden olarak sistemin dengesiz çalışma rejimine geçmesine yol açar. Bu nedenle, PID kontrolörler PI olarak çalıştırılırlar. PID parametreleri, geçici hız eğimi, kazanç ve sıfırlama sürelerine göre tespit edilir [6].

5. KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN MODELLENMESİ

5.1. Giriş

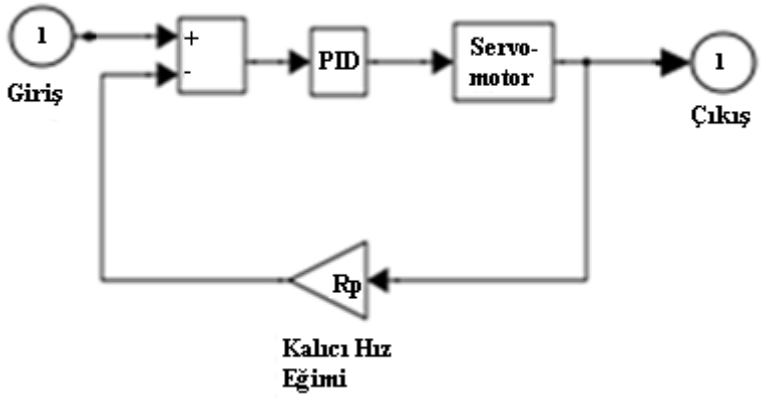
Bu çalışmanın amacı, şebekeden bağımsız olarak çalışan bir KHES için yük-frekans kontrolü yapmaktır. Ayrıca tipik bir KHES 'in kontrol sisteminin şebekeden bağımsız (izole ada -frekans kontrolü) çalışma koşullarının analiz edilmesi, santralin kararlı çalışmasına etki eden temel değişkenlerin belirlenmesi ve kararlı çalışma sınırlarına karşılık gelen PI kontrolörün (regülatör) ayar aralıklarını belirlemektir.

Bir güç sisteminin kararlı çalışabilmesi için, frekansın sabit kalması gerekir. Bir sistemin sabit frekansta çalışabilmesi ise, aktif güç dengesi ile sağlanabilir. Sistemde üretilen aktif gücün toplamı; aktif yüklerin, kayıpların ve bağlantı hatları üzerindeki güçlerin toplamına eşit olmalıdır. Bu denge bozulduğu zaman sistem frekansı değişmeye başlar. Talep edilenden fazla üretim, sistem frekansını arttırırken, az üretim ise frekansı azaltacaktır. Sistem frekansı ise generatörün rotor hızı ile belirlenir. Bu nedenle frekans kontrolü generatör-türbin kontrolüne eşdeğerdir.

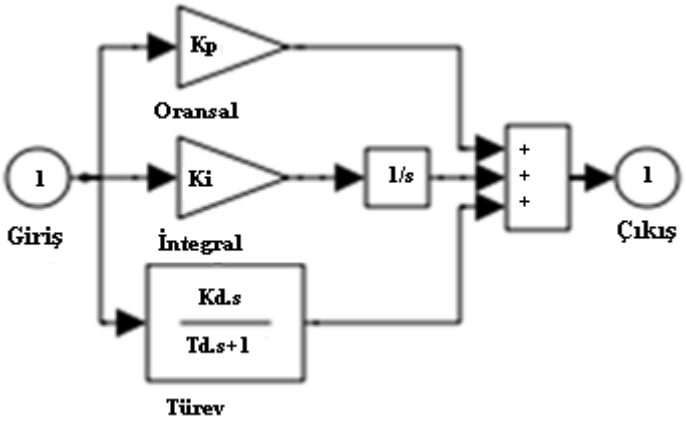
Bu çalışmada bir KHES 'in ana bölümleri modellenmiştir. Modelleme yaparken, KHES ile büyük HES arasında çok büyük farklılıkların olmadığı görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan tüm benzetimler, Matlab-Simulink yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Benzetimlerde kullanılan modeller, doğrusal türbin modeli ve elastik olmayan su yükü için doğrusal olmayan türbin modelidir. Doğrusal ve doğrusal olmayan türbin modelleri ile oluşturulan iki ayrı KHES modeli; regülatör, türbin ve generatör modellerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur.

5.2. Regülatör Modeli

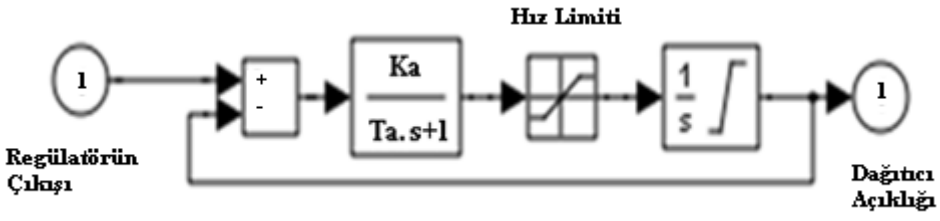
Regülatör modeli, PID kontrolör ve kalıcı hız eğimi kullanılarak oluşturulmuştur. PID regülatörün, oransal kazancı K_p, integral kazancı K_i ve türevsel kazancı K_d 'dir. K_d sıfır olarak alınmıştır. Yüksek frekanslardaki PID kazancı, birinci dereceden alçak geçiren filtre zaman sabiti T_d (s) ile sınırlandırılmıştır. Regülatörün statik kazancı geri besleme çevriminde kalıcı hız eğiminin tersine eşittir. Hız sapması sönümleme katsayısı (β) sıfır olarak verilmiştir. PI regülatör (K_d=0), referans hız değeri ile generatör çıkışındaki hız değerinin farkına göre, dağıtıcı açıklığını servo-motor ile ayarlamaktadır. Şekil 5.1 'de PI regülatör modeli, Şekil 5.2 'de PID kontrolör modeli ve Şekil 5.3 'de servo-motor modeli gösterilmiştir,.



Şekil 5.1. PI regülatör modeli



Şekil 5.2. PID kontrolör modeli



Şekil 5.3. Servo-motor modeli

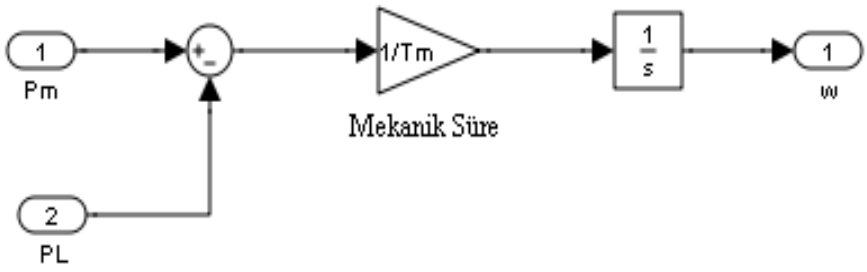
Şekil 5.3 'deki servo-motor modeli birinci dereceden sistem gösterimidir. Burada K_a servo motor kazancı ve T_a ise zaman sabitidir. Dağıtıcı açıklığı limitleri g_{min} (pu) ve g_{max} (pu) olarak, dağıtıcı hızı limitleri ise, vg_{min} (pu/s) ve vg_{max} (pu/s) olarak verilmiştir.

Aşağıda modellerde kullanılan parametre değerleri verilmiştir. Geri çevrim girişi, dağıtıcı açıklığı veya elektriksel güç sapmasıdır. Dağıtıcı açıklığı 1 'e, elektriksel güç sapması ise 0 'ayarlanmıştır.

Servo-motor [K_a $T_a(s)$] : [10/3 0.07]
Dağıtıcı açıklığı limitleri [g_{min}, g_{max} (pu) vg_{min} ,vg_{max} (pu/s)] : [0.01 0.97518 -0.1 0.1]
Kalıcı hız eğimi ve regülatör [R_p T_d (s)] : [0.05 0.01]
Hidrolik Türbin [Beta $T_w(s)$] : [0 2.67]
Hız eğimi referansı [0=güç hatası,1=dağıtıcı açıklığı]: [0]
Başlangıç mekanik gücü [pu] : [0.7516]

5.3. Generatör Modeli

Generatör için temel hareket denklemi kullanılarak, generatör modeli oluşturulmuştur. Şekil 5.4 'de generatör modeli gösterilmiştir.



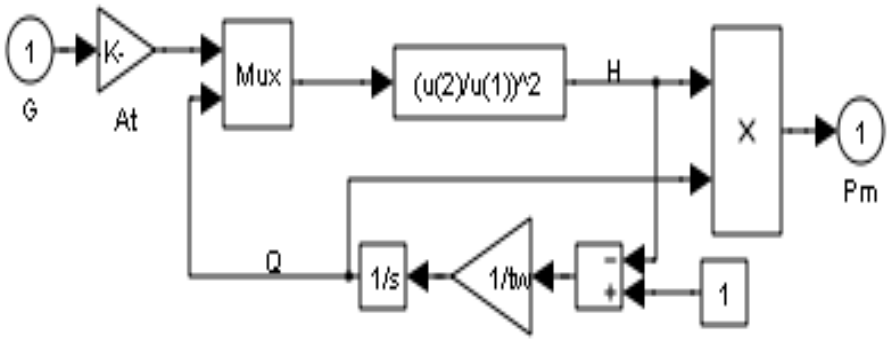
Şekil 5.4. Generatör modeli

5.4. Türbin Modeli

HES 'lerde türbin modeli oluşturulurken, doğrusal olan ve doğrusallaştırılmış türbin modelleri kullanılır. Doğrusallaştırılmış türbin modeli de, elastik olan ve elastik olmayan su yükü şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Bu çalışmada, doğrusal türbin modeli ve elastik olmayan su yükü için, doğrusal olmayan türbin modeli oluşturulmuştur. KHES 'ler genellikle kısa cebri borulu sistemlerdir. Kısa cebri borulu sistemlerde denge bacası kullanılmadığından, bu çalışmada denge bacası modeli oluşturmaya gerek görülmemiştir.

Şekil 4.2 ’de gösterilen doğrusal türbin modeli oluşturulurken, denklem (4.17) ’de verilen transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Model oluşturulduktan sonra, farklı yük değerleri için çıkışlar incelenmiştir. Her bir yük değeri için, optimum K_p ve K_i değerleri elde edilerek, güç-zaman ve frekans- zaman grafikleri çizdirilmiştir.

Doğrusal olmayan türbin modeli için, bazı düzenlemeler yapılarak, Matlab-Simulink yazılımında yer alan hidrolik türbin modeli kullanılmıştır. Bu model, elastik olmayan su yükü için doğrusal olmayan türbin modelidir. Bu çalışmada, elastik su yükü için doğrusal olmayan türbin modeli oluşturulmamıştır. Doğrusal türbin modelinde olduğu gibi, her bir yük değeri için, optimum K_p ve K_i değerleri elde edilerek, güç-zaman ve frekans- zaman grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 5.5 ’de doğrusal olmayan türbin modeli gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Doğrusal olmayan türbin modeli

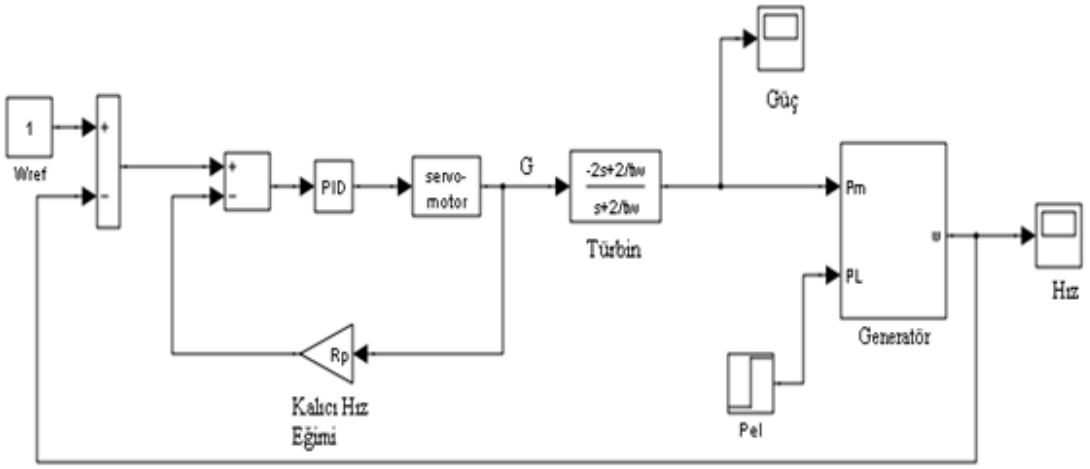
Doğrusal ve doğrusal olmayan türbin modellerinde, farklı yük değerleri için, elde edilen en uygun K_p ve K_i değerleri, Tablo 5.1 ’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Farklı yük değerleri için K_p ve K_i değerleri

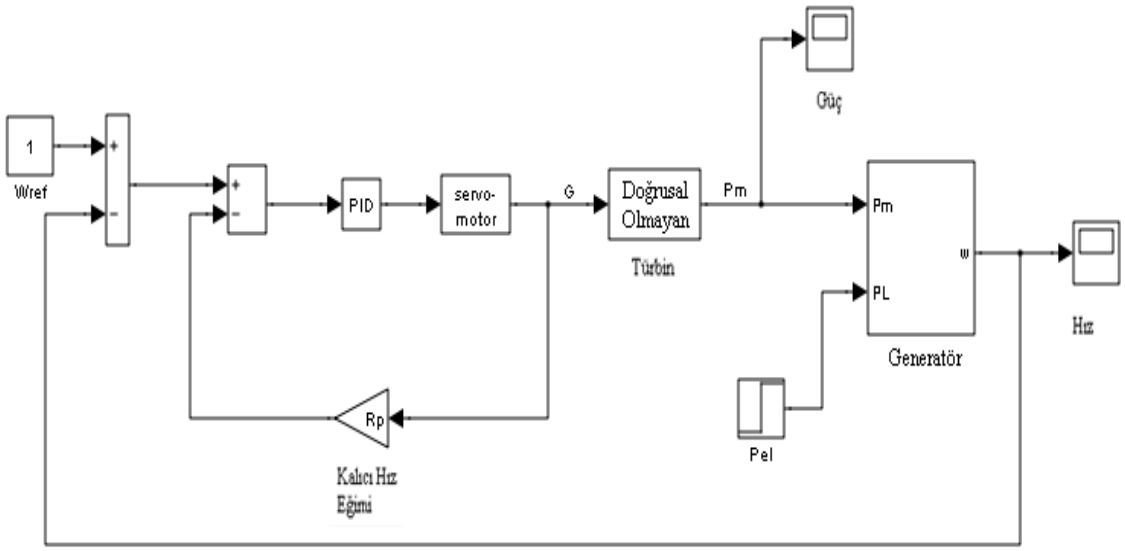
Yük	**Doğrusal Model**		**Doğrusal Olmayan Model**	
	K_p	**K_i**	**K_p**	**K_i**
0.05 (pu)	0.85	0.0001	1.2	0.0001
0.25 (pu)	0.9	0.0025	1.1	0.0025
0.50 (pu)	0.85	0.025	1	0.025
0.75 (pu)	0.75	0.05	0.6	0.066
0.95 (pu)	0.85	0.07	1	0.09

5.5. KHES Modeli

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 ’de, doğrusal ve doğrusal olmayan türbinli KHES modelleri gösterilmiştir. Bu modellerde, tek bir yük dikkate alınarak, Tablo 5.1 ’de gösterilen 5 farklı yüklenme durumu için benzetim sonuçları elde edilmiştir.

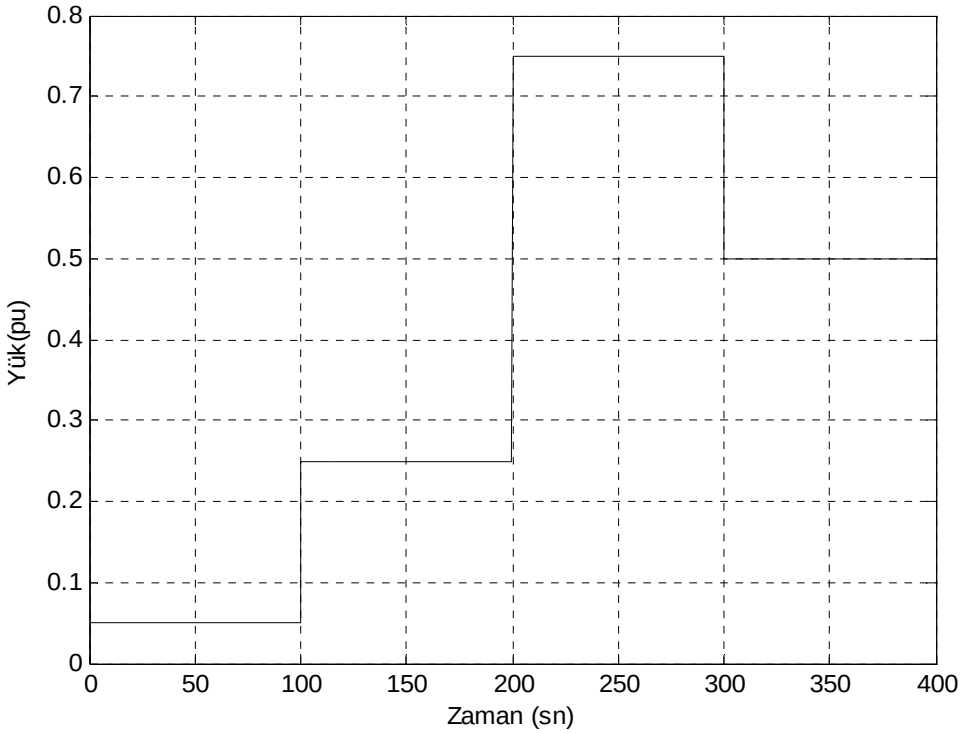


Şekil 5.6. Doğrusal türbinli KHES modeli

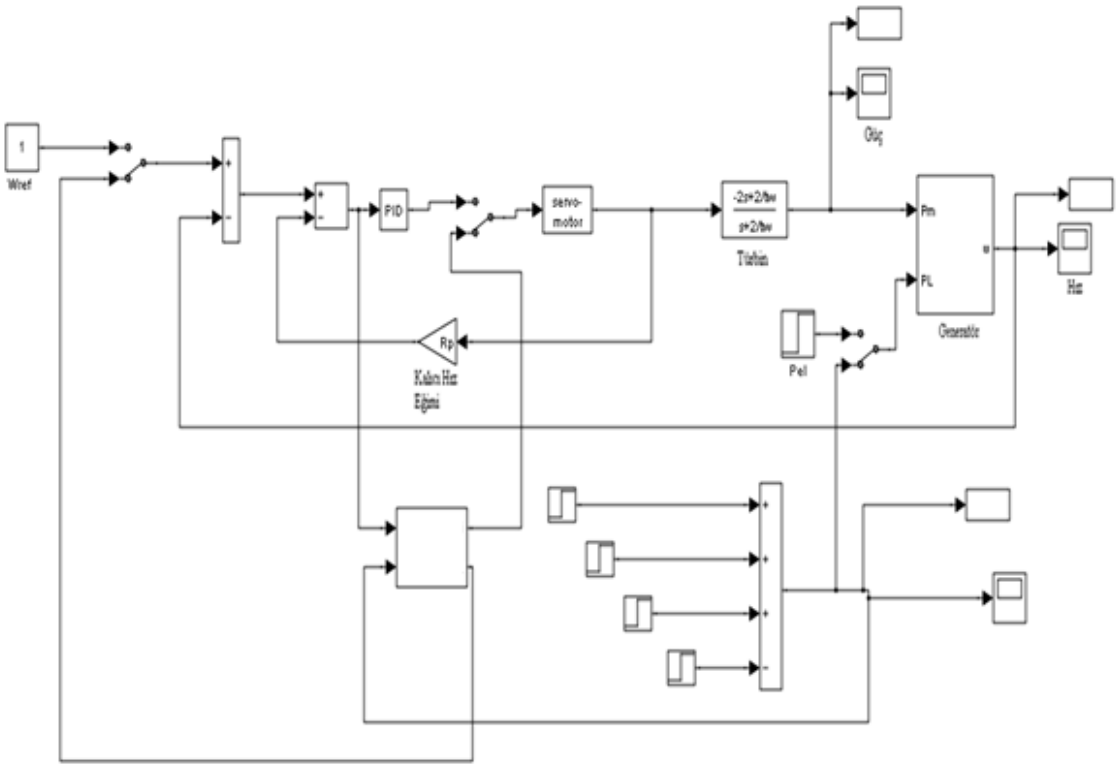


Şekil 5.7. Doğrusal olmayan türbinli KHES modeli

Belirli zaman aralıklarında, ardı ardına uygulanan 4 farklı yük için (Şekil 5.8), doğrusal türbinli KHES modeli, Şekil 5.9 ’da gösterilmiştir. Şekil 5.8 ’den görüldüğü gibi sisteme,0-100 s aralığında 0.05 (pu), 100-200 s aralığında 0.25 (pu), 200-300 s aralığında 0.75 (pu) ve 300-400 s aralığında 0.50 (pu) olacak şekilde değişken bir yük uygulanmıştır.



Şekil 5.8. Yük eğrisi



Şekil 5.9. 4 farklı yük için doğrusal türbinli KHES modeli

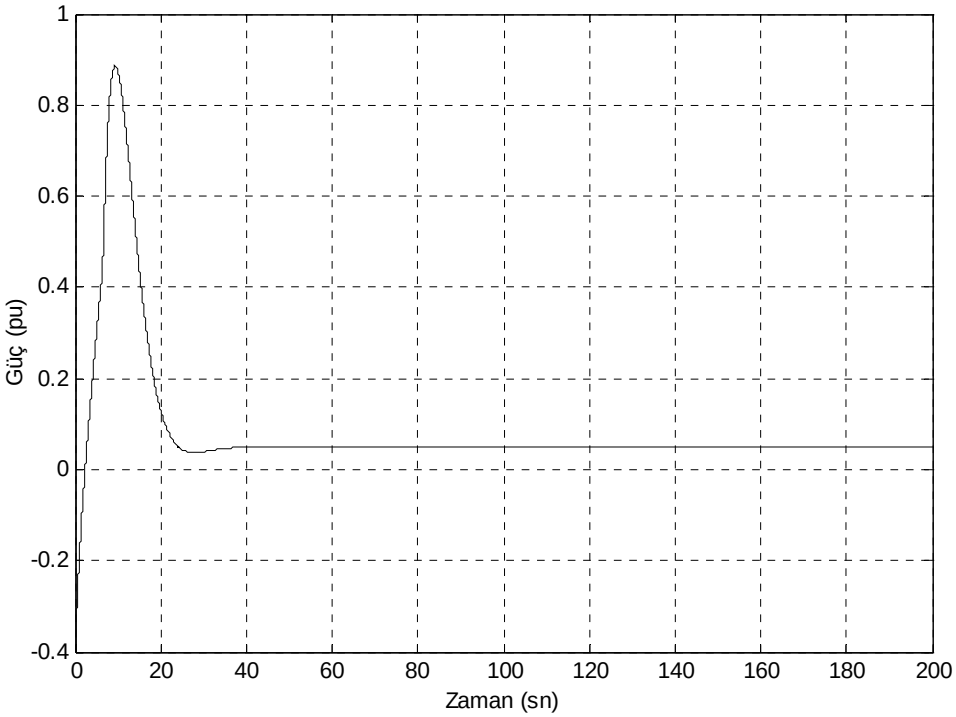
5.6. Benzetim Sonuçları

5.6.1. Doğrusal Türbinli KHES Modeli için Benzetim Sonuçları

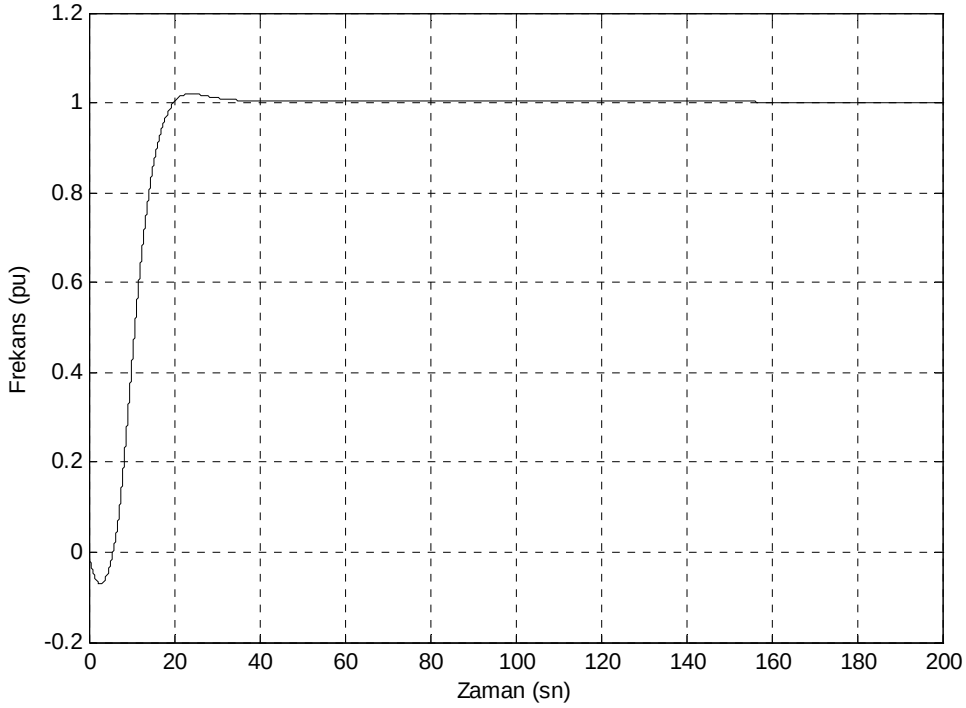
Doğrusal türbinli KHES modeli için, Tablo 5.1 'de gösterilen beş farklı yük ve K_p ve K_i değerlerine göre, benzetim sonuçları elde edilmiştir. 0.05 (pu) yük değeri için, güç-zaman ve frekans- zaman grafikleri sırasıyla, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 'de gösterilmiştir.

Şekil 5.10 'da görüldüğü gibi generatörün giriş gücü, girilen sabit yük değerini (0.05 pu) sürekli durumda takip etmektedir. Aynı şekilde, sürekli durumda generatörün giriş gücünün, 0.25 (pu) yük değerini Şekil 5.12 'de, 0.50 yük değerini Şekil 5.14 'de, 0.75 yük değerini Şekil 5.16 'da ve 0.95 yük değerini Şekil 5.18 'de takip ettiği görülmektedir. Sisteme Şekil 5.8 'de görülen değişken yükün uygulanması durumunda Şekil 5.20 ve Şekil 5.21 'deki güç ve frekans grafikleri elde edilmiştir. Şekil 5.20 'den görüleceği üzere generatörün giriş giriş gücü 0-100 s aralığında 0.05 (pu) yük değerini, 100-200 s aralığında 0.25 yük değerini, 200-300 s aralığında 0.75 yük değerini, 300-400 s aralığında 0.50 yük değerini takip etmektedir.

Şekil 5.11 'den görüleceği üzere, 0.05 yük değeri için, generatörün çıkış frekansı, sürekli durumda girilen referans frekans değerini takip etmektedir. 0.25 (pu) yük değeri için Şekil 5.13 'de, 0.50 yük değeri için Şekil 5.15 'de, 0.75 yük değeri için Şekil 5.17 'de ve 0.95 yük değeri için Şekil 5.19 'da generatörün çıkış frekansı, sürekli durumda girilen referans frekans değerini takip etmektedir.

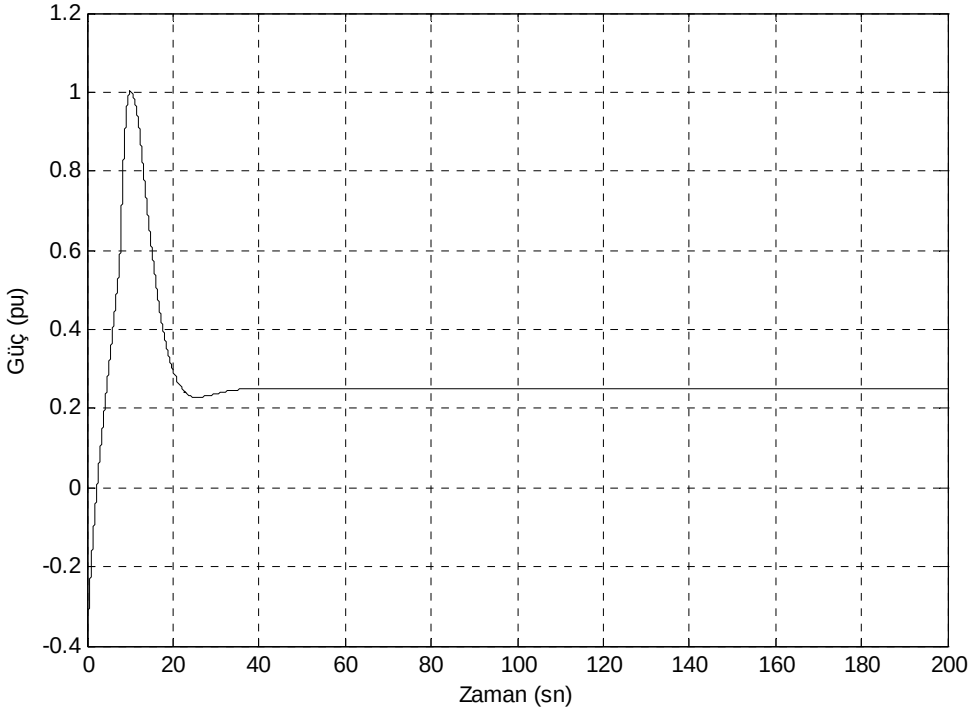


Şekil 5.10. 0.05 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği

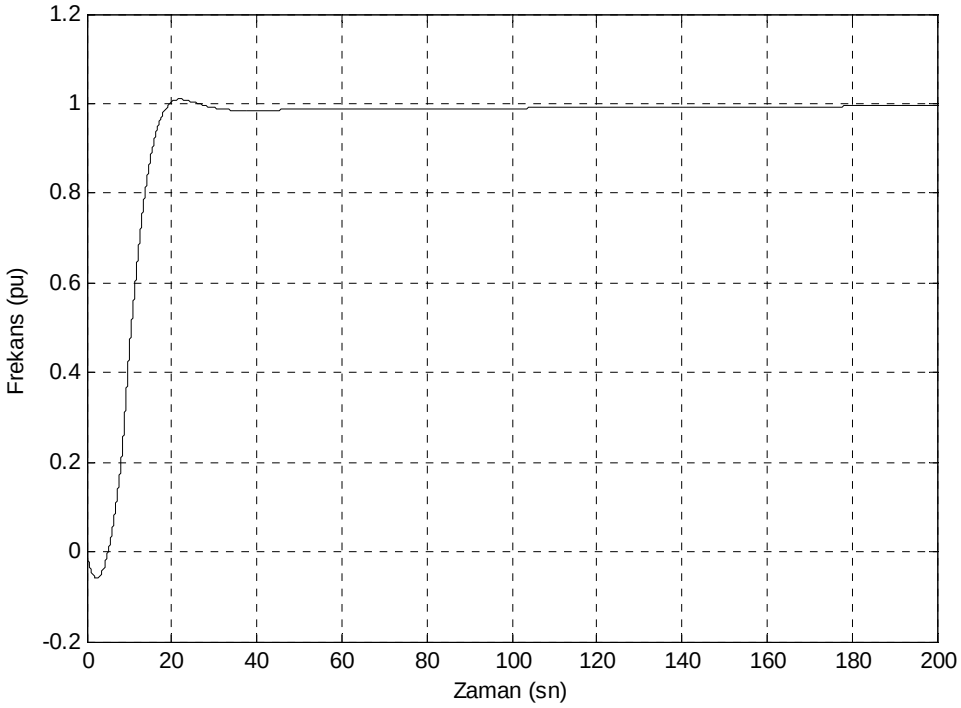


Şekil 5.11. 0.05 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

0.25 (pu) yük değeri için, güç-zaman ve frekans- zaman eğrileri sırasıyla, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 ’de gösterilmiştir.

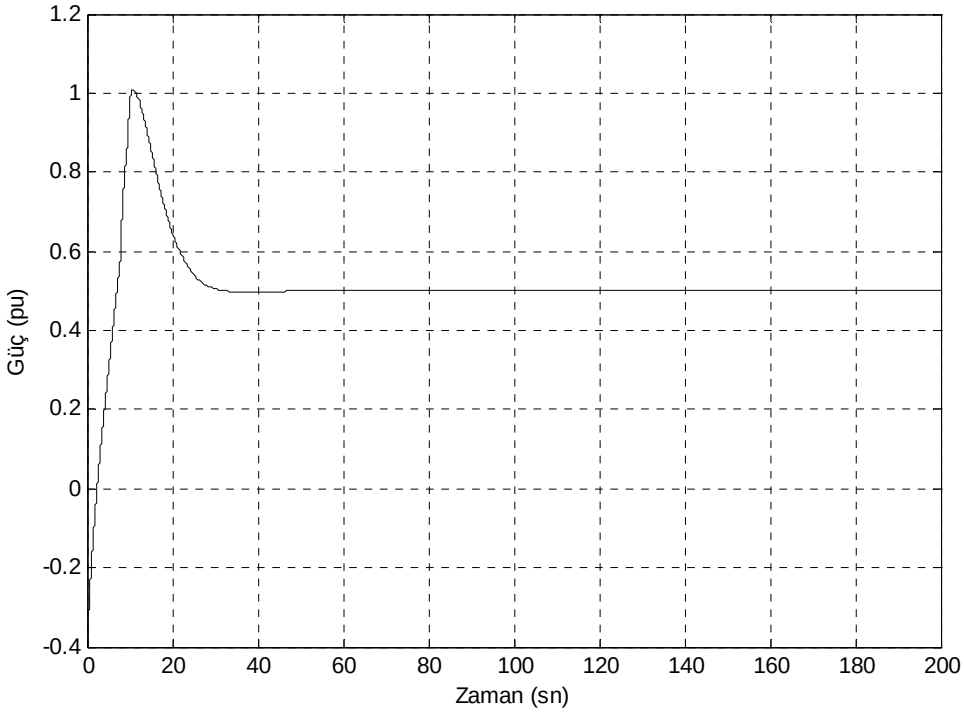


Şekil 5.12. 0.25 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği

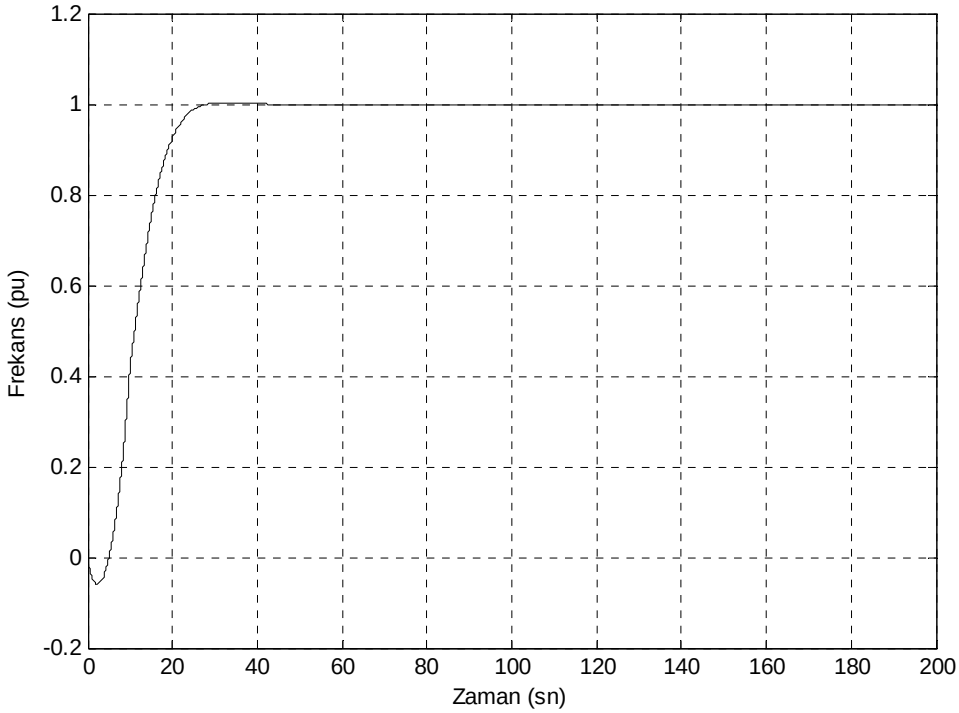


Şekil 5.13. 0.25 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

0.50 (pu) yük değeri için, güç-zaman ve frekans- zaman eğrileri sırasıyla, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 ’de gösterilmiştir.

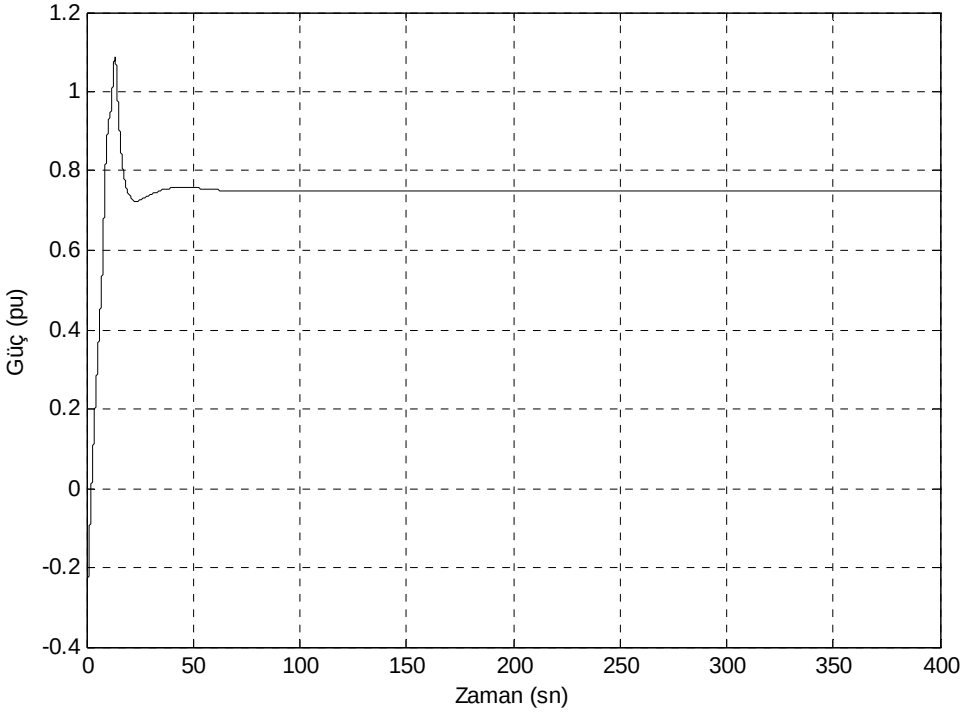


Şekil 5.14. 0.50 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği

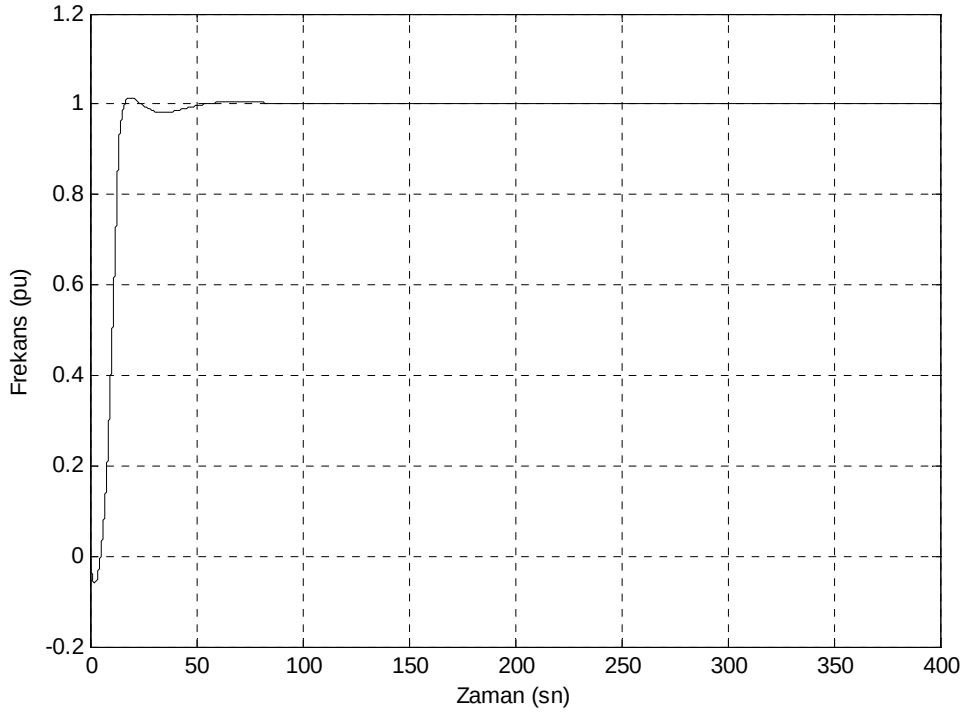


Şekil 5.15. 0.50 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

0.75 (pu) yük değeri için, güç-zaman ve frekans- zaman eğrileri sırasıyla, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17 ’de gösterilmiştir.

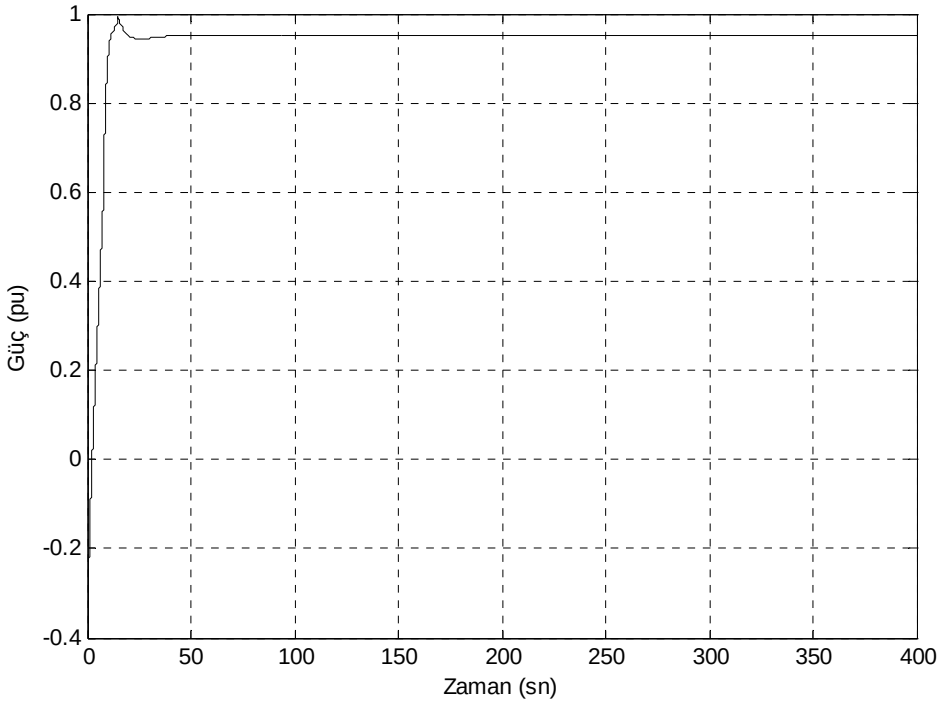


Şekil 5.16. 0.75 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği

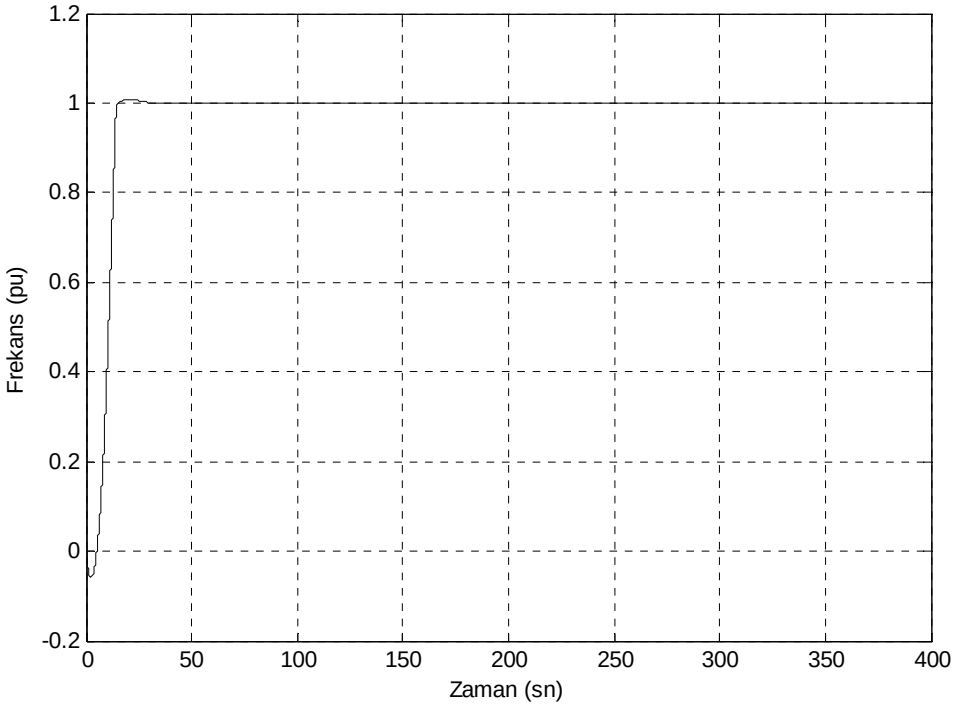


Şekil 5.17. 0.75 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

0.95 (pu) yük değeri için, güç-zaman ve frekans- zaman eğrileri sırasıyla, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19 'da gösterilmiştir.

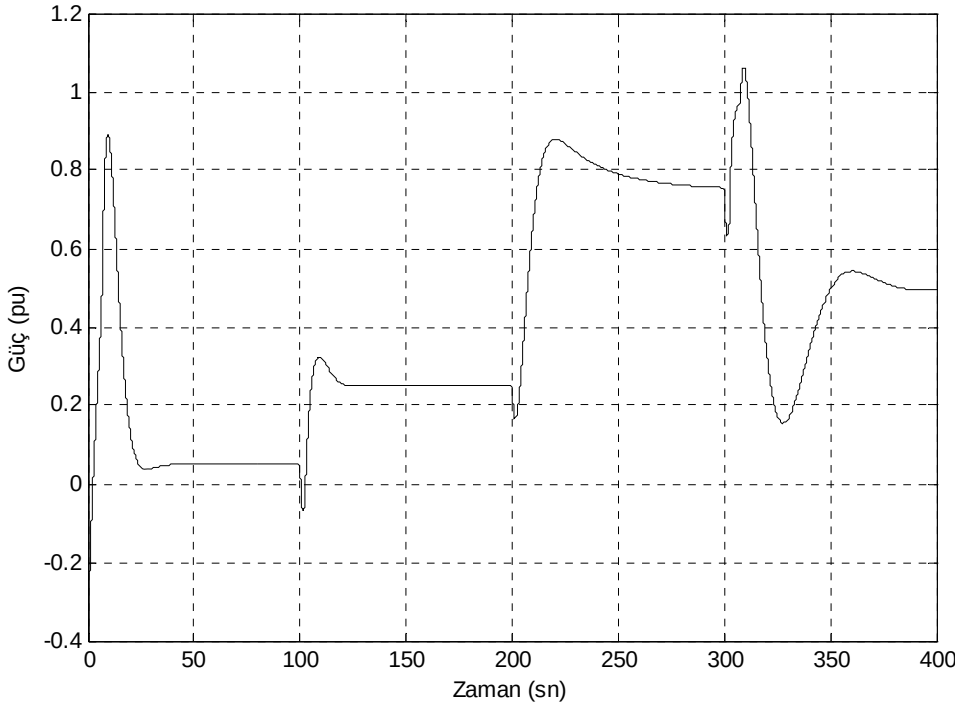


Şekil 5.18. 0.95 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği

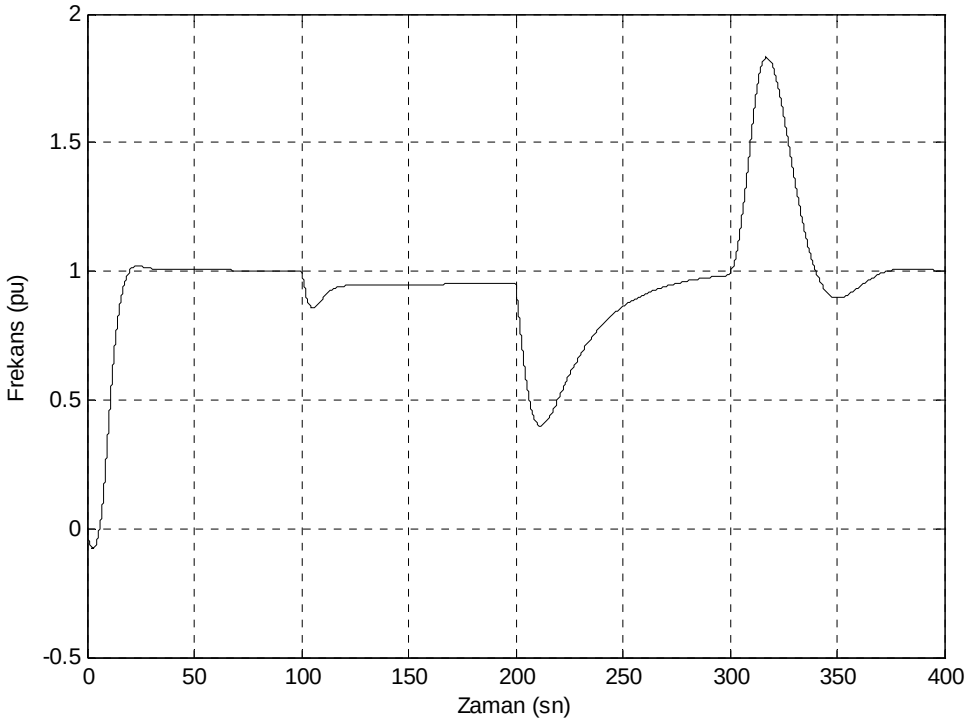


Şekil 5.19. 0.95 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

Belirli zaman aralıklarında, ardı ardına uygulanan 4 farklı yük için elde edilen sonuçlar Şekil 5.20 ve Şekil 5.21 ’de gösterilmiştir.



Şekil 5.20. 4 farklı yüklenme durumunda, 0.75 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği



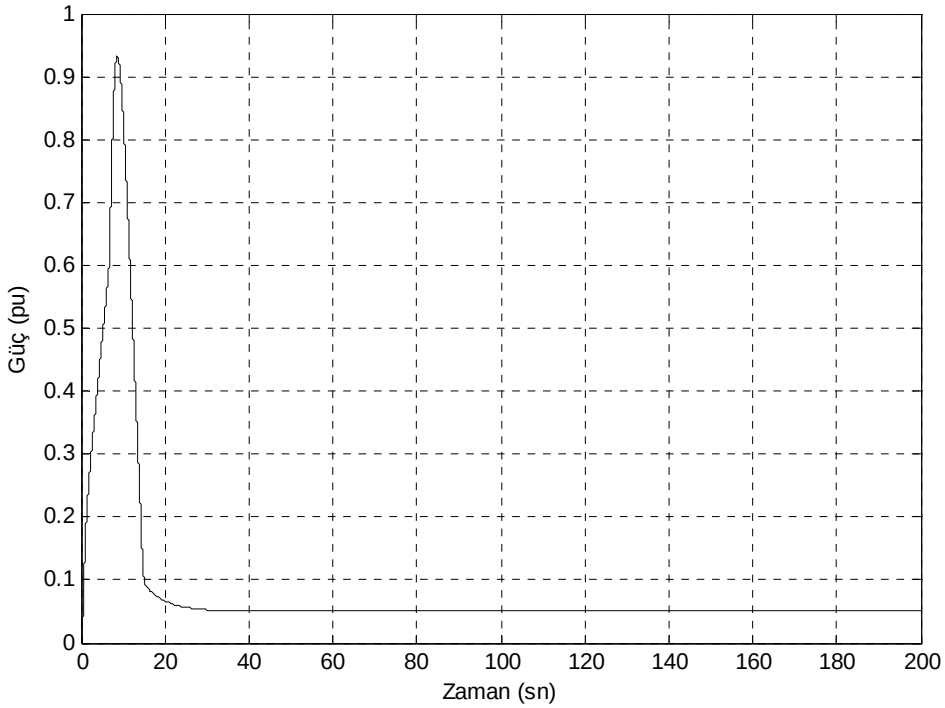
Şekil 5.21. 4 farklı yüklenme durumunda, 0.75 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

5.6.2. Doğrusal Olmayan Türbinli KHES Modeli için Benzetim Sonuçları

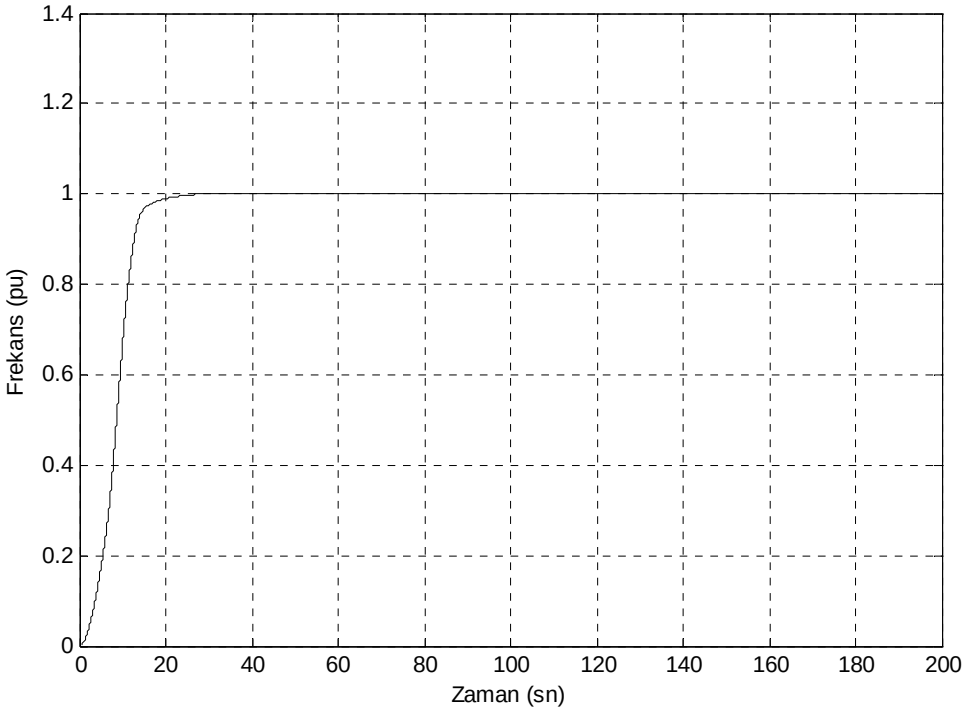
Doğrusal olmayan türbinli KHES modeli için, Tablo 5.1 ’de gösterilen beş farklı yük ve Kp ve Ki değerlerine göre benzetim sonuçları elde edilmiştir. 0.05 (pu) yük değeri için, güç-zaman ve frekans- zaman eğrileri sırasıyla, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23 ’de gösterilmiştir.

Şekil 5.22 ’de görüldüğü gibi generatörün giriş gücü, girilen sabit yük değerini (0.05 pu) sürekli durumda takip etmektedir. 0.25 (pu) yük değeri için Şekil 5.24 ’de, 0.50 yük değeri için Şekil 5.26 ’da, 0.75 yük değeri için Şekil 5.28 ’de ve 0.95 yük değeri için Şekil 5.30 ’da generatörün giriş gücünün, girilen sabit yük değerini sürekli durumda takip ettiği görülmektedir.

Şekil 5.23 ’den görüleceği üzere, 0.05 yük değeri için, generatörün çıkış frekansı, sürekli durumda girilen referans frekans değerini takip etmektedir. 0.25 (pu) yük değeri için Şekil 5.25 ’de, 0.50 yük değeri için Şekil 5.27 ’de, 0.75 yük değeri için Şekil 5.29 ’da ve 0.95 yük değeri için Şekil 5.31 ’de generatörün çıkış frekansı, sürekli durumda girilen referans frekans değerini takip etmektedir.

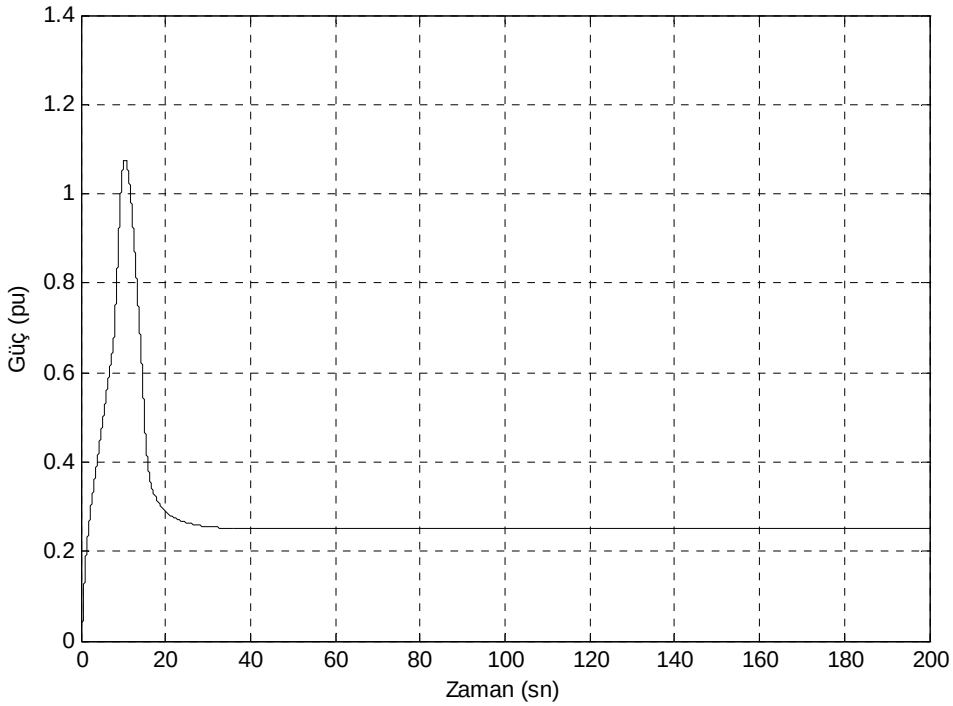


Şekil 5.22. 0.05 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği

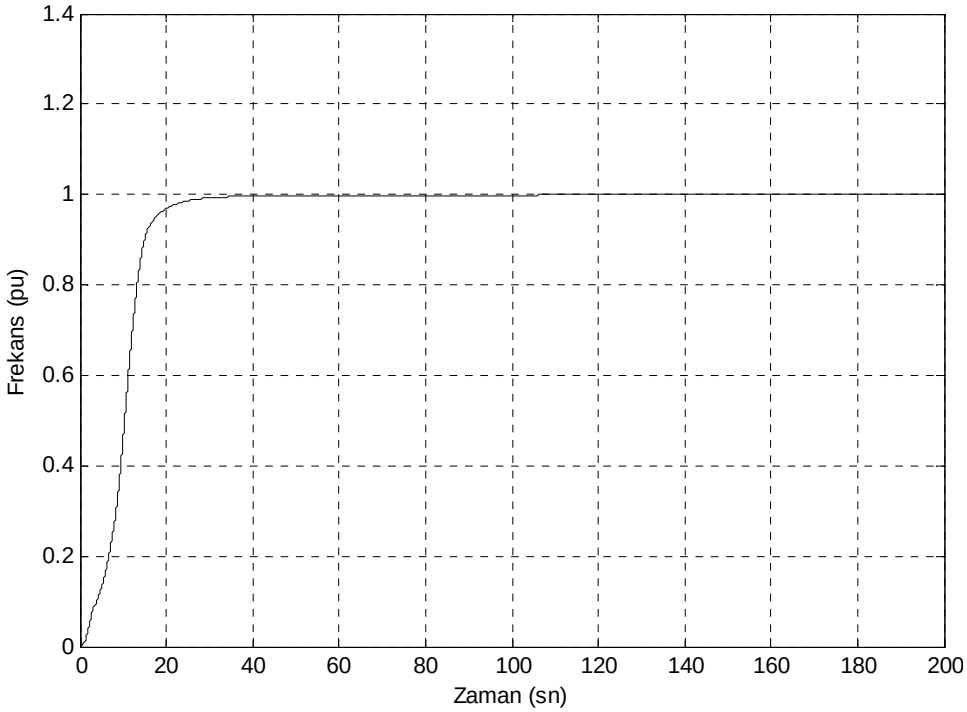


Şekil 5.23. 0.05 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

0.25 (pu) yük değeri için, güç-zaman ve frekans- zaman eğrileri sırasıyla, Şekil 5.24 ve Şekil 5.25 ’de gösterilmiştir.

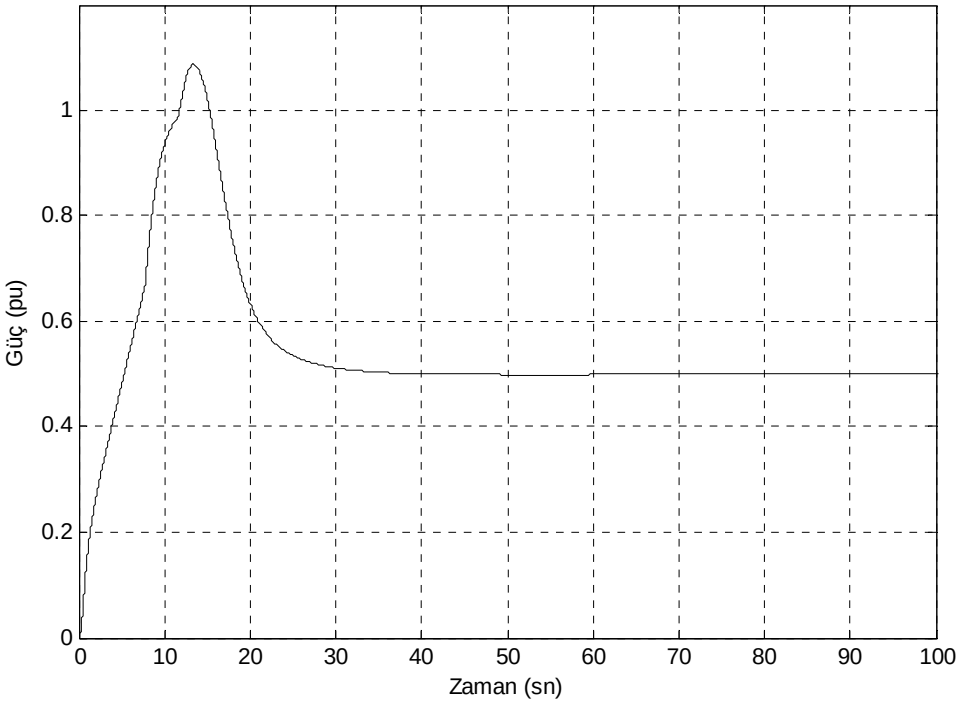


Şekil 5.24. 0.25 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği

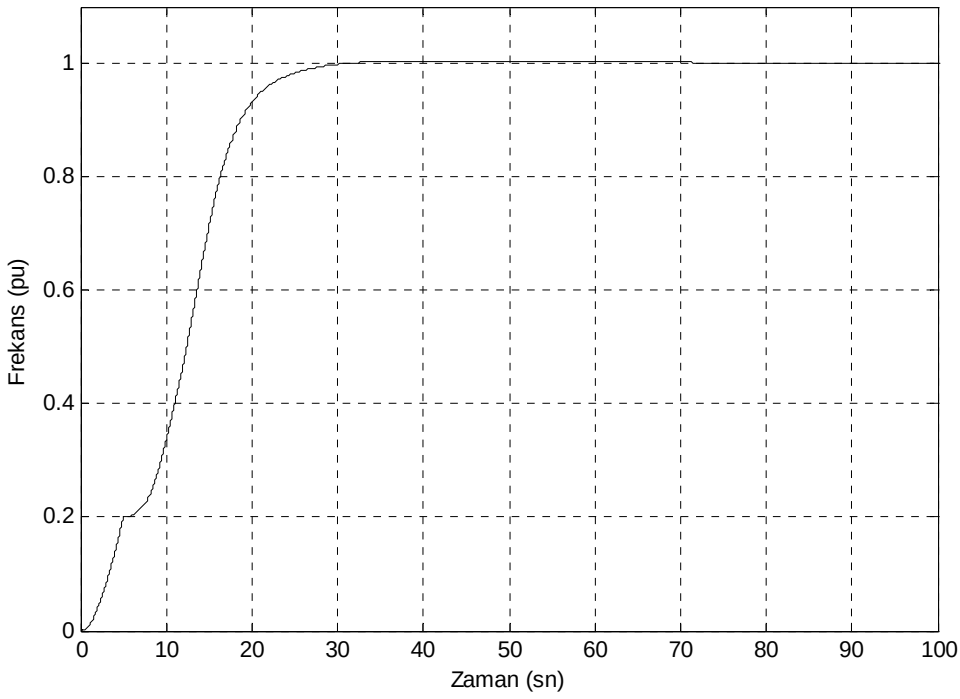


Şekil 5.25. 0.25 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

0.50 (pu) yük değeri için, güç-zaman ve frekans- zaman eğrileri sırasıyla, Şekil 5.26 ve Şekil 5. 27 ’de gösterilmiştir.

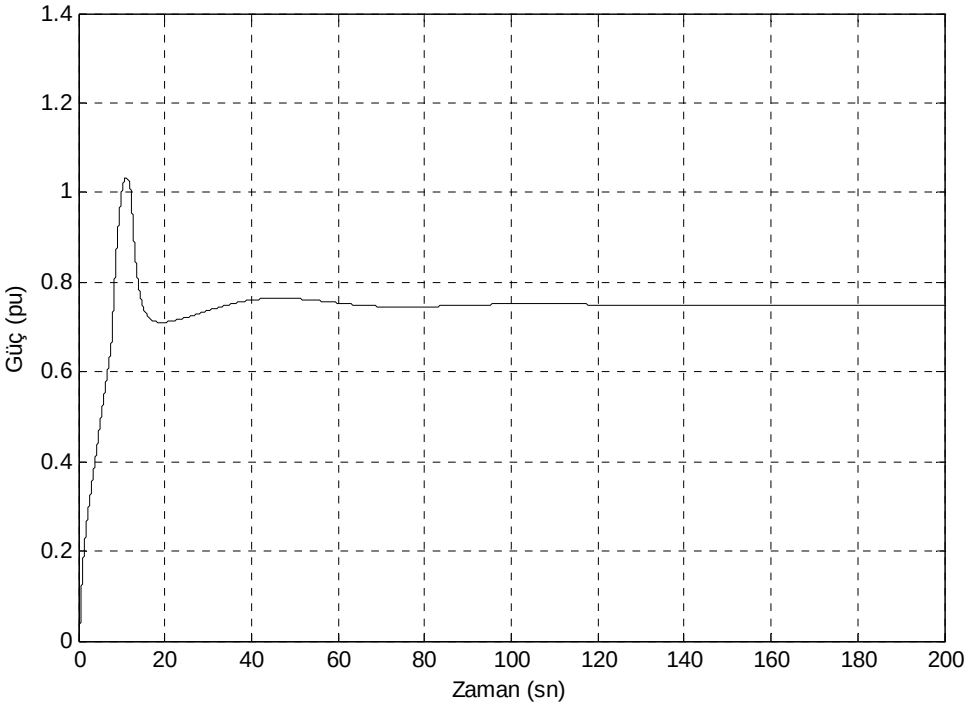


Şekil 5.26. 0.50 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği

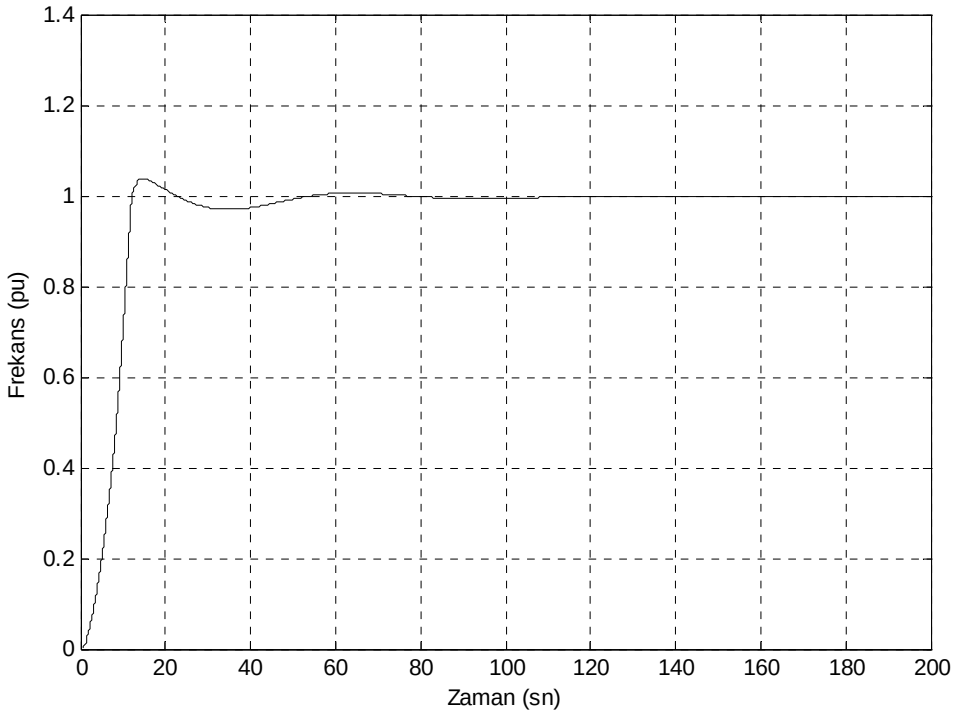


Şekil 5.27. 0.50 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

0.75 (pu) yük değeri için, güç-zaman ve frekans- zaman eğrileri sırasıyla, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29 'da gösterilmiştir.

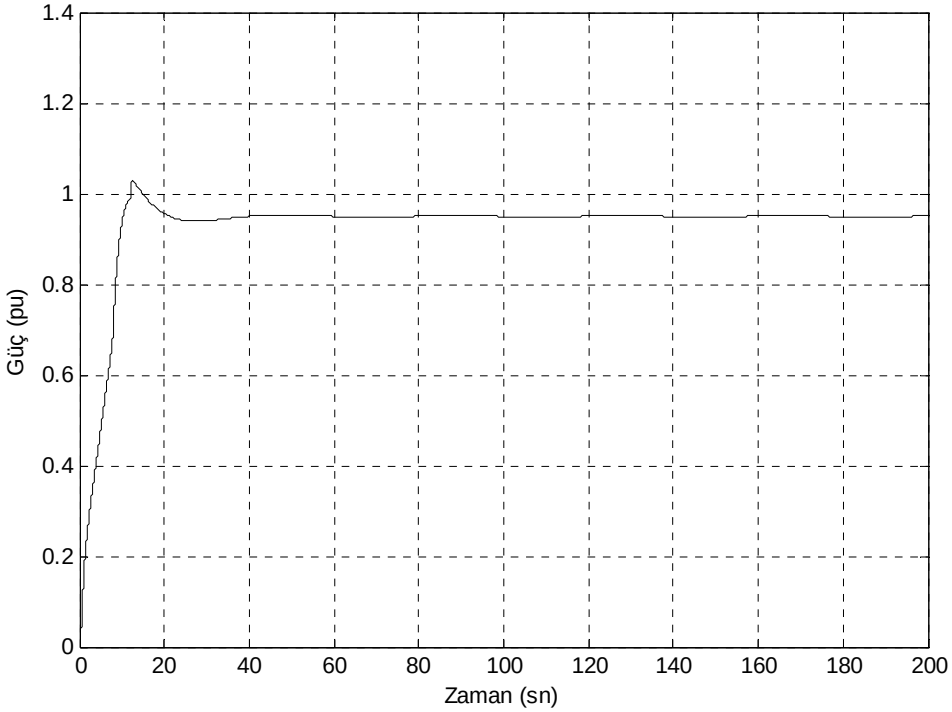


Şekil 5.28. 0.75 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği

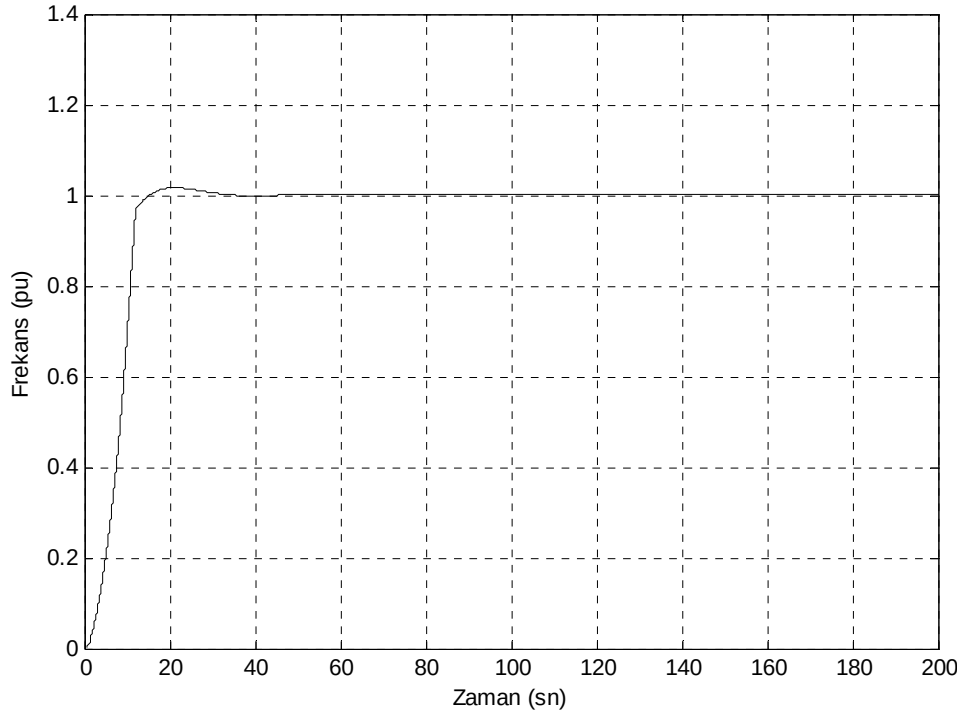


Şekil 5.29. 0.75 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

0.95 (pu) yük değeri için, güç-zaman ve frekans- zaman eğrileri sırasıyla, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31 ’de gösterilmiştir.



Şekil 5.30. 0.95 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği



Şekil 5.31. 0.95 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

5.6.3. Uygulama

Elazığ 'da bulunan ve KHES sınıfına giren, Hazar-II HES 'in gerçek değerleri kullanılarak modelleme yapılmıştır. Hazar-II HES, Hazar-I HES 'in tahliyesinden çıkan suyun 74 m 'lik bir yükseklikten düşürülmesiyle, 2x5 MW 'lık güç üretmektedir. Hazar-I HES 'den çıkan su 83,60 m^3 'lük bir biriktirme havuzuna alınmakta ve buradan 750 m uzunluğunda ve 2,9 m çaplı bir tünele geçirilerek, cebri boru ile Hazar-II HES 'e verilmektedir. Santralin debisi 8,5 m^3/sn 'dir ve santral, düşey eksenli Francis tipi türbinlerin kullanıldığı iki üniteden oluşmaktadır. Tevzi çalışmaları 1967 yılında tamamlanmış olup, 1967 yılında üretime başlanmıştır. Kurulduğu yıldan itibaren, 1975 yılına kadar tam kapasite ile çalıştırılmıştır. Keban HES 'in devreye girmesi ile, 1975 yılından itibaren puant santrali olarak çalışmaya başlamıştır.

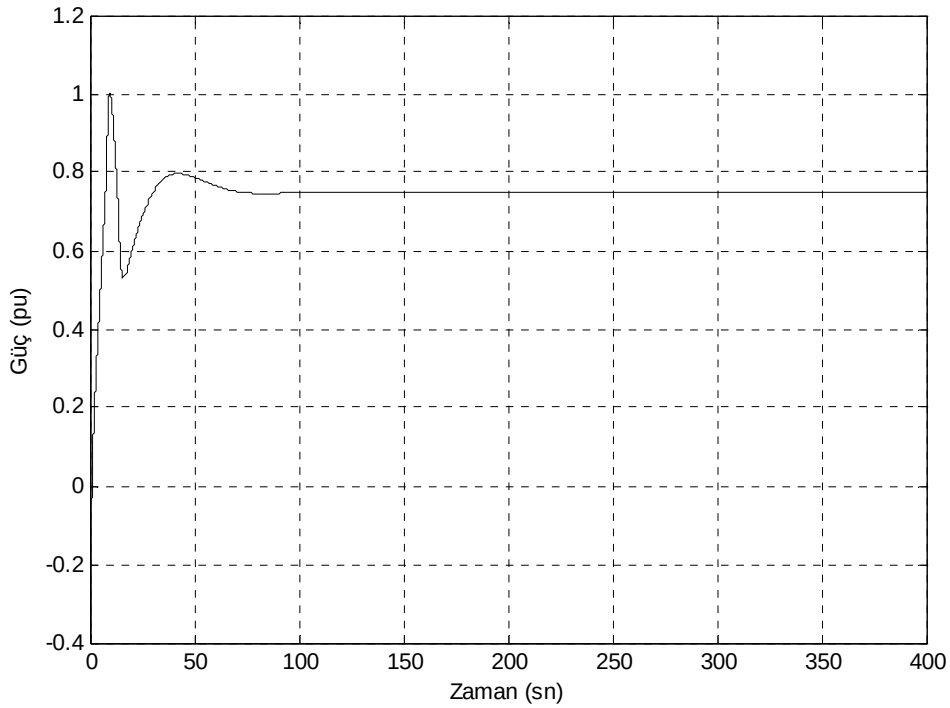
Santralin gerçek parametreleri kullanılarak, (4.15) eşitliği ile T_w değeri ($T_w = 1.3309\ s$) hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer, doğrusal olan ve doğrusal olmayan KHES modellerinde kullanılarak, yük frekans kontrolü yapılmıştır.

Doğrusal türbinli KHES modelinde, 0.75 (pu) yük değeri için K_p ve K_i değerlerine göre benzetim sonuçları elde edilmiştir. Güç-zaman ve frekans- zaman eğrileri sırasıyla, Şekil 5.32 ve Şekil 5. 33 'de gösterilmiştir.

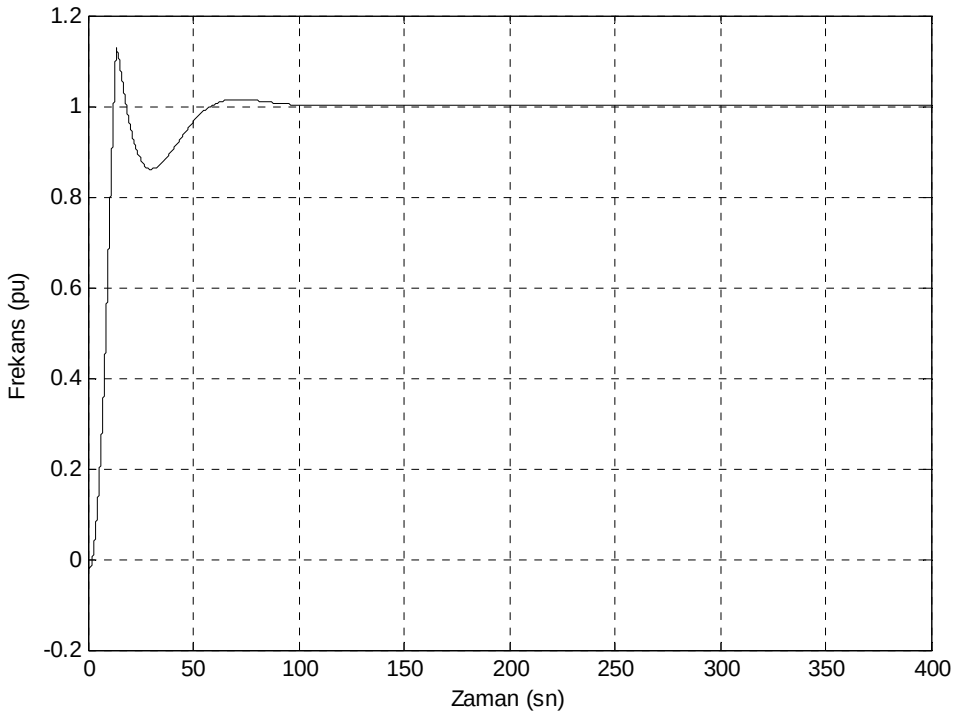
Şekil 5.32 'de görüldüğü gibi generatörün giriş gücü, girilen sabit yük değerini (0.75 pu) sürekli durumda takip etmektedir. Şekil 5.33 'de, 0.75 yük değeri için, generatörün çıkış frekansının, sürekli durumda girilen referans frekans değerini takip ettiği görülmektedir.

Doğrusal olmayan türbinli KHES modelinde, 0.75 (pu) yük değeri için, aynı K_p ve K_i değerlerine göre benzetim sonuçları elde edilmiştir. Güç-zaman ve frekans- zaman eğrileri sırasıyla, Şekil 5.34 ve Şekil 5.35 'de gösterilmiştir.

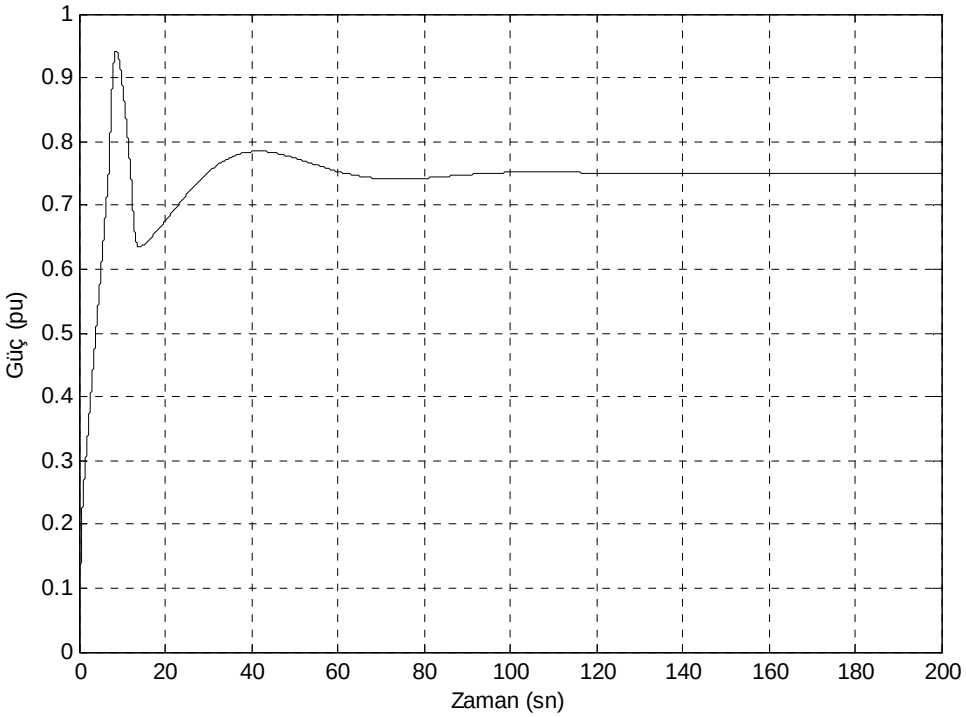
Şekil 5.34 'de görüldüğü gibi generatörün giriş gücü, girilen sabit yük değerini (0.75 pu) sürekli durumda takip etmektedir. Şekil 5.35 'de, 0.75 yük değeri için, generatörün çıkış frekansının, sürekli durumda girilen referans frekans değerini takip ettiği görülmektedir.



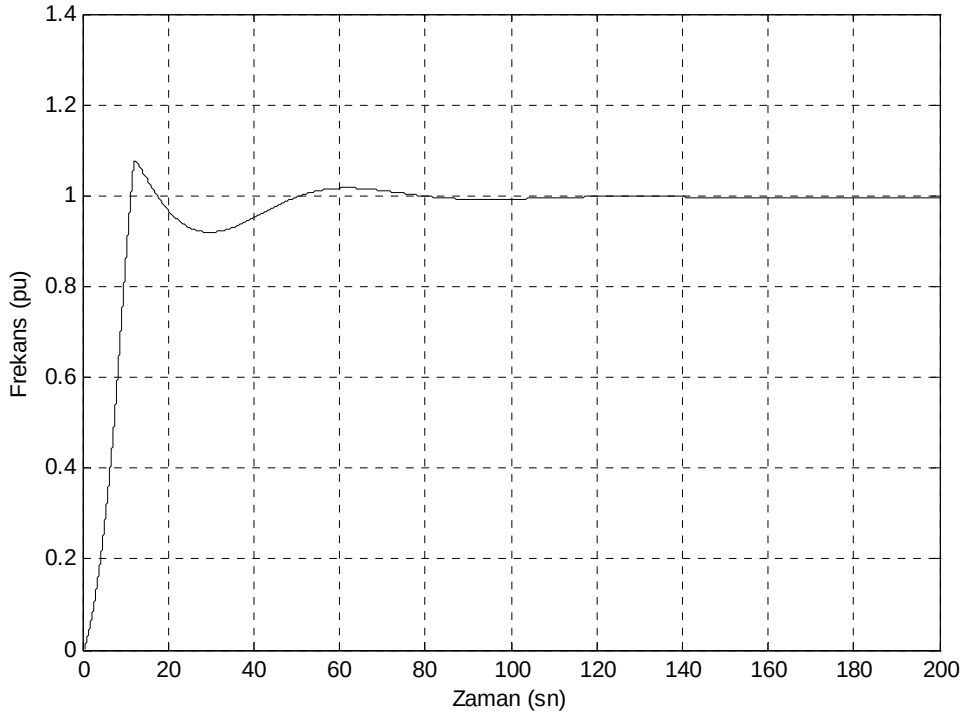
Şekil 5.32. 0.75 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği



Şekil 5.33. 0.75 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği



Şekil 5.34. 0.75 (pu) yük değeri için güç-zaman grafiği



Şekil 5.35. 0.75 (pu) yük değeri için frekans-zaman grafiği

6. SONUÇ

Türkiye 'nin elektrik enerjisi talebi hızla artmakta olup, önümüzdeki yıllarda elektrik enerjisine olan ihtiyacın katlanarak artacağı öngörülmektedir. Günümüz koşullarında ülkemizin kurulu gücü mevcut tüketimi dahi karşılayamamakta, soruna doğalgaz çevrim santralleri ile çare aranmaktadır. Dolayısıyla Türkiye 'nin yeni elektrik santrallerine ihtiyacı vardır. Türkiye 'nin hidroelektrik enerji potansiyelinin yaklaşık olarak % 10–15 'i küçük ölçekli nehir tipi santrallerle değerlendirilebilecek niteliktedir. Özellikle Karadeniz ve Akdeniz havzalarındaki kısa boylu akarsular, yüksek su düşüsüne olanak tanıyan yatak eğimleri ve akım özellikleriyle, bu tip santrallerin kurulmasına oldukça elverişlidirler. Ayrıca bazı akarsularımızda orta ve büyük ölçekli yeni nehir tipi santraller kurmak da mümkündür. Nehir tipi santraller, kuruluş ve işletme giderleri düşük, çevresel etkileri sınırlı, kısa sürelerde inşa edilebilen, büyük ölçüde yerli ve ekonomik geri dönüşümü kısa süren tesislerdir. Özellikle depolamalı santrallerde, baraj gölünün inşasında karşılaşılan güçlüklerin pek çoğuna, bu santrallerde rastlanmaz. Diğer yandan, ülke geneline yayılmış çok sayıda küçük santral, kırsal kalkınma ve istihdam açısından birkaç büyük santralden çok daha işlevsel olacaktır. KHES 'ler aynı zamanda kâr marjı yüksek tesislerdir. Pek çok özel sektör kuruluşu bu tip santraller kurmak için projeler geliştirmeye başlamışlardır. Küçük akarsularda hidroelektrik potansiyeli belirleme çalışmalarının henüz tamamlanmamış olması, KHES 'lerin kuruluşunu olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun en önemli nedeni ise, bazı akarsularımıza ait akım ölçüm verilerinin bulunmayışıdır.

Bu çalışmada, doğrusal türbin kullanan KHES modeli ve doğrusal olmayan türbin kullanan KHES modeli kurulmuştur. Her iki modelde de, yükteki herhangi bir artış veya azalış durumunda, belirli bir süre sonunda, şebeke frekansının ve generatör giriş gücünün (türbin çıkış gücü) ilk değerine geri döndüğü ve sabit kaldığı görülmüştür. Gerçek santral parametreleri kullanılarak yapılan modellemede de, değişen yüke rağmen frekansın ve gücün sabit kaldığı görülmüştür.

Doğrusal türbinli KHES modelinin benzetim sonuçları incelendiğinde, frekansın başlangıçta negatife gittiği, daha sonra arttığı, gücün ise negatiften başlayarak arttığı ve sürekli durumda sabit kaldığı görülmektedir. Doğrusal olmayan türbin modelinde ise bu durumun oluşmadığı görülmektedir. İki türbin modeli karşılaştırıldığında, doğrusal olmayan türbin modelinin, benzetim sonuçları açısından doğrusal türbin modeline göre daha iyi bir performans gösterdiği söylenebilir.

Bu çalışmada kullanılan modellerden faydalanılarak, uzun cebri borulu KHES 'ler için denge bacası modeli de eklenebilir. Ayrıca PI kontrolör yerine, fuzzy kontrol, genetik algoritma vb. kontrol yöntemleri kullanılarak farklı kontrol teknikleri denenebilir

KAYNAKLAR

1. Güner, E., Altın, M., Nadar, A., Tör, O.B., 2008, Küçük Hidrolik Santrallerin Projelendirilmesinde Göz Önünde Bulundurulması Gereken Bazı Temel Hususlar, Eleco 2008, Bursa, s. 7-13.

2. Enerji Piyasası Denetleme Kurumu, http://www.epdk.gov.tr/lisans/elektrik/lisansdatabase/basvuruuretimHES.asp.

3. Cebeci, M.E., Tör, O.B., Yılmaz O., Nadar, A., Güner, E., 2008, Nehir-Tipi Hidroelektrik Santrallerin Kararlı ve Güvenli Çalışma Sınırlarını Belirleyen Faktörler, Eleco 2008, Bursa, s. 1-6.

4. Özbay, E., Gençoğlu, M.T., 2009, Hidroelektrik Santrallerin Modellenmesi, V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Diyarbakır, s. 108-115.

5. Hidro Elektrik Enerji, http://www. harran.edu.tr.

6. Kılıçkap, E., Hidrolik Santralin Dinamik Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.

7. Eke, İ., Hidroelektrik Santrallerin Modellenmesi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.

8. Yumurtacı Z., Öztürk R., Hidroelektrik Enerji, Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

9. Başeşme H., 2003 , Hidroelektrik Santraller ve Hidroelektrik Santral Tesisleri, (Geliştirilmiş ve Genişletilmiş 2. Baskı), EÜAŞ Hidroelektrik Santraller Dairesi Başkanlığı, Ankara.

10. Wollenberg, B.F.,Wood, A.J., 1996, Power System Generation Operation and Control, 2nd Ed., J. Willey&Sons**,** New York, 20-23, p. 131-138.

11. Demirhan, A. Y., 2006, Küçük Hidroelektrik Santrallerde Türbin Tasarımı, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

12. Küçük, İ., 1996, Türkiye ’de Hidroelektrik Potansiyeli Üzerine Bir Değerlendirme, TMMOB 1. Enerji Sempozyumu, Ankara.

13. Türkiye ’nin Hidroelektrik Potansiyeli, http://www.hesiad.org.tr.

14. Alam, M. K., Mirza, M. R., Maughan, O.E., 1995, Constraints and Opportunities in Planning for the Wise Use of Natural Resources in Developing Countries: Example of a Hydropower Project,EnvironmentalConservation,22(4), p. 352–358.

15. Kibaroglu, A., Klaphake, A. Kramer, A., Scheumann, W., Carius, A., 2005, Cooperation on Turkey 's transboundary waters, Status Report commissioned by the German Federal Ministry for Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, F+E , Project No. 903 19 226.

16. Berkün, M., Aras, E., Koç, T., 2008, Barajların ve Hidroelektrik Santrallerin Nehir Ekolojisi Üzerinde Oluşturduğu Etkiler, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 452.

17. Çelenk, H., DSİ 23. Bölge Müdürlüğü Proje ve İnşaat Şube Müdürü, Gündoğan, G., DSİ 23. Bölge Müdürlüğü İnşaat Mühendisi, ve Kastamonu 'nun Hidroelektrik Enerji Potansiyeli.

18. Aslan, Y., Yaşar, C., Karabörk, M.Ç., 2004, Bir Mikro-Hidro Örneği: Kayaboğazı Barajı, Eleco 2004, Bursa, s. 21-25.

19. Paish, O., 2002, Small Hydro Power: Technology and Current Status, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol.6, p. 537-556.

20. Frey, G. W., 2002, Hydropower as a Renewable and Sustainable Energy Resource Meeting Global Energy Challenges in a Reasonable Way, Energy Policy, Vol.30, p.1261-1265.

21. Gümüşel, S., 2007, Hidroelektrik Santral Kurulumu İçin Fizibilite Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

22. Erdem, M., 2006, Küçük Hidroelektrik Santrallerin Tasarım Ölçütleri, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

23. Demirci, E., Şenlik, İ., Atalay, T., 2007, Hidroelektrik Enerji Üretimi İçin Bir Uygulama Çalışması, IV. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Gaziantep, s. 90-94.

24. Voros, N.G., Kıranoudıs, C.T., Maroulıs, Z.B., 2000, Short-cut Design of Small Hydroelectric Plants", Renewable Energy, Vol.19, p. 545-563, Elsevier Science Ltd.

25. Kaldellis, J. K., Vlachou, D. S., Korbakıs, G., 2005, Techno-economic Evaluation of Small Hydro Power Plants in Greece: a Complete Sensitivity Analysis, Energy Policy, Vol.33, Iss.15, p. 1969-1985, Elsevier Science Ltd.

26. Güney, İ., Terzi, Ü. K., 1997, Ülkemizin Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi, Türkiye 7. Enerji Kongresi (Enerji Politikaları ve Planlama), Cilt.1, O.D.T.Ü., Ankara, s.351-363.

27. Dragu, C., Sels, T. and Belmans, R., 2001, Small Hydro Power – State of Art and Applications, International Conference Power Generation and Sustainable Development (AIM), p. 265-270, Liege Belgium.

28. Aybers, N., Şahin, B., 1995, Enerji Maliyeti, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, Yayın No.299, İstanbul, s.182-232.

29. Onat, N., 2005, Mini Hidroelektrik Santraller için Güneş Pilleri ile Uyartılan Senkron Generatör Tasarımı, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

30. Gürer, İ., Törk, K., 1990, Küçük Kapasiteli Hidroelektrik Santrallerinin Hidrolojik Planlaması, Elektrik Mühendisliği Dergisi, Sayı 372, s.31.

31. Yuangqıan L., Luqıng, Y., Inug, B., Xıulıang, L., Yuanchu, C., Gerard, M., Chuang, F., 2003, Economic Performance Evaluation Method for Hydroelectric Generating Units, Energy Conversion and Management, Vol.44, p.797-808, Elsevier Science Ltd.

32. Sarıoğlu, K., 1983, Elektrik Makinalarının Temelleri: Asenkron Makinalar, Cilt.3, Çağlayan Basımevi, İstanbul, s.140-142.

33. Monition, L., Le Nir, M., Roux, J., 1984, Micro Hydroelectric Power Stations, John Wiley & Sons Ltd. Paris.

34. Layman 's Guidebook, 1998, How to Develop a Small Hydro Site, European Small Hydropower Association.

35. Gulliver, J. S., Arndt, R. E. A., 1991, Hydropower Engineering Handbook,McGRAW-HILL, USA, 658.

36. Jiandong, T., 2003, Challenges and Opportunities in China, Renewable Energy World, Volume 6 Number 3, London, p. 38-42.

37. Hearn, I. R., Graber, B. W., 1992, A Rugged Simplistic Reliable Micro Hydro Generation System, Proceedings of the Conference E-II 92, IEEE, p. 434-437.

38. Wallace, A. R., Stapleton, S. A., 1995, Renewable Energy Generation Schemes Embedded in Rural Grid Systems, Proceedings of the 30th Universities Power Engineering Conference, p.609-612, Greenwich.

39. Scott, N. C., 2002, Use of Load Control to Regulate Voltage on Distribution Networks With Embedded Generation, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.17, No.2.

40. http://www.eie.gov.tr/turkce/HESproje/

41. Durak, M., 2002, Avrupa Ülkelerinde Rüzgar Enerjisi Projelerine Verilen Teşvikler ve Türkiye İçin Öneriler, İstanbul.

42. Ünsal, İ., 2003, Turkey 's Hydroelectrıc Potentıal And Energy Policiıes, Stradigma.Com, E-Journal of Strategy and Analysis, Issue 6, s. 1-19.

43. Akpınar, E., 2005, Nehir Tipi Santrallerin Türkiye 'nin Hidroelektrik Üretimindeki Yeri, Erzincan Eğitim Fakültesi Dergisi, Cilt : 7, Sayı: 2.

44. Türksoy, M., Özgün, A.G., 1985 , Türkiye 'de küçük akarsularda hidroelektrik enerji üretim imkanları, EİE, Hidroelektrik Ener. Semp. Teb., s.129-157.

45. Gürer, İ., 1979, Feasibility of small capacity hydro_ povver system in Turkey, a case study, İzmir International Symposium 2. on Solar Energy Fundementels and Applications, Reprint 20 p., İzmir Turkey.

46. Ültanır, M. Ö., 2001, Türkiye 'nin Hidroelektrik Potansiyeli Ne Kadar?, Dünya-Enerji, s. 50-53.

47. Uzlu, E., Filiz, M.H., Kömürcü, M.İ., Akpınar, A., Yavuz, O., 2008, Doğu Karadeniz Havzası 'ndaki Küçük Hidroelektrik Santrallerin Durumu, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Utes 2008, İstanbul.

48. Undrill, J., Woodward, J., 1967, Nonlinear Hydro Governing Model and İmproved Calculation for Determining Temporary Droop, IEEE Trans on Power Appar Syst, 86:228–33.

49. IEEE Committee, 1973, Dynamic Models for Steam And Hydro Turbines in Power System Studies, IEEE Trans on Power Appar Syst, 92:1904–15.

50. IEEE Working Group, 1992, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies, IEEE Trans on Power Syst, 7:167–79.

51. Ramey, D.G., Skooglund, J.W., 1970, Detailed Hydro Governor Representation for System Stability Studies, IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 89:106–12.

52. Luqing, Y.E., Shouping, W.E.I., Malik, O.P., Hope, G.S., 1989, Variable And Time Varying Parameter Control for Hydroelectric Generating Unit, IEEE Trans Energy Conv, 4:293–9.

53. Wozniak, L.A.,1990, Graphical Approach to Hydrogenerator Tuning. IEEE Trans Energy Conv, 5:417–21.

54. Malik, O.P., Hope, G.S., Hancock, G., Zhaohui, L., Luqing, Y.E., Shouping, W.E.I., 1991, Frequency Measurement for Use with A Microprocessor-Based Water Turbine Governor, IEEE Trans Energy Conv, 6:361–6.

55. Vournas, C.D., 1990, Second Order Hydraulic Turbine Models for Multimachine Stability Studies, IEEE Trans Energy Conv, 5:239–44.

56. Sanathanan, C.K., 1988, A Frequency Domain Method for Tuning Hydro Governors, IEEE Trans on Energy Conv, 3:14–7.

57. Kundur P., 1994, Power System Stability and Control, New York: Mc Graw-Hill.

58. Fangtong, Xu., Yonghua, Li., Qijuan, C., 1995, Study of The Modeling of Hydroturbine Generating Set. In: International IEEE/IAS Conference on Industrial Automation and Control: Emerging Technologies, p. 644-647.

59. Qijuan, C., Zhihuai, Xiao., 2000, Dynamic Modeling of Hydroturbine Generating Set. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, p. 3427–3430.

60. Vournas, C.D., Zaharakis, A., 1993, Hydro Turbine Transfer Functions with Hydraulic Coupling. IEEE Trans Energy Conv, 8:527–32.

61. Hannet, L., Fardanesh, B., Feltes, J., 1994, Field Tests to Validate Hydro Turbine-Governor Model Structure and Parameters. IEEE Trans on Power Systems, 9:1744–51.

62. De Jaeger, E., Janssens, N., Malfliet, B., De Meulebroeke, FV., 1994, Hydro Turbine Model for System Dynamic Studies. IEEE Trans on Power Systems, 9:1709–15.

63. Kishora, N., Sainia, R.P., Singhb, S.P., 2007, A Review on Hydropower Plant Models and Control, Science Direct, Renewable and Sustainable Energy Reviews, p. 776-796.

64. Demirören, A., Zeynelgil, L., 2004, Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması, Birsen Yayınevi, İstanbul.

65. Jadid, S., Salami, A., 2004, Accurate Model of Hydroelectric Power Plant for Load Pickup during Power System Restoration, TENCON 2004, 2004 IEEE Region 10 Conference, 3: 307-310.

66. Ng, T.B., G.J. Sargison, W. and J.E., 2004, Modelling of Transient Behaviour in a Francis Turbine Power Plant, 15th Australasian Fluid Mechanics Conference The University of Sydney, Sydney, Australia.

67. Frick, P.A., 1981, Automatıc Control Of Small Hydroelectrıc Plants, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 5.

68. Hanmandlu, M., Goyal, H., 2008, Proposing a New Advanced Control Technique for Micro Hydro Power Plants, Electrical Power and Energy Systems, p. 272–282.

69. Oldenburger, R., Donelson, J., 1962, Dynamic Response of A Hydroelectric Plant, Vol.81, p. 403-418.

70. Fang, H., Chen, L., Dlakavu, N. And Shen, Z., 2008, Basic Modeling and Simulation Tool for Analysis ofHydraulic Transients in Hydroelectric Power Plants, IEEE Transactıons on Energy Conversıon, Vol. 23, No. 3.

71. Choo, Y. C., Muttaqi, K. M., Negnevitsky, M., Modelling of Hydraulic Governer-Turbine for Control Stabilisation, 2008, EMAC 2007, p. 681-698.

ÖZGEÇMİŞ

Ebru ÖZBAY, 1983 yılında Elazığ 'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ 'da tamamladıktan sonra 2002 yılında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2006 yılında mezun oldu ve aynı yıl Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2007 yılından itibaren, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.