

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

116627

KÜÇÜK GÜÇLÜ HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE  
DÜŞÜ, DEBİ, YÜK VE VERİM İLİŞKİLERİ

Mahmut Temel ÖZDEMİR

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ 2002

116627

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜÇÜK GÜÇLÜ HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE  
DÜŞÜ, DEBİ, YÜK VE VERİM İLİŞKİLERİ

Mahmut Temel ÖZDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 13.01.2003 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı /başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mehmet CEBECİ

Üye:

Üye: Doç. Dr. Mustafa Aoyraç

Üye: Yrd. Doç. Dr. Selçuk YILDIRIM

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15/01/2003 tarihinde ve 3/11 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

## TEŐEKKÖR

Bu tez çalıŐması sűresince ilgi ve yardımlarını esirgemeyen tez yűneticim, Sayın Prof.Dr. Mehmet CEBECİ 'ye katkılarından dolayı teŐekkűr ederim.

Maddi manevi tűm desteklerini benden esirgemeyen anneme, babama ve eŐim Ŭlkű ŐZDEMİR'e teŐekkűr ederim.



## İÇİNDEKİLER

<b>TEŞEKKÜR</b> .....	I
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	II
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	IV
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	VI
<b>SİMGELER</b> .....	VII
<b>ÖZET</b> .....	IX
<b>SUMMARY</b> .....	X
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Genel Bilgi .....	1
1.2. Türkiye'nin Hidrolik Potansiyeli .....	4
1.2.1. Brüt Potansiyel .....	4
1.2.2. Teknik Yönden Değerlendirilebilir Potansiyel.....	4
1.2.3. Ekonomik Olarak Yararlanılabilir Potansiyel .....	5
1.3. Türkiye'de Hidroelektrik Enerji Üretimi .....	7
<b>2. KÜÇÜK VE ÇOK KÜÇÜK GÜÇLÜ HİDROELEKTRİK SANTRALLER</b> .....	9
2.1. Hidroelektrik Santrallerin Sınıflandırılması .....	9
2.2. Küçük ve Çok Küçük Hidroelektrik Santrallerin Önemi .....	9
2.3. Küçük Hidroelektrik Santrallerin Olumlu ve Olumsuz Yönleri.....	10
2.4. Küçük Hidroelektrik Santrallerin Türkiye'deki Durumu .....	12
2.5. Küçük Hidroelektrik Santrallerin Dünyadaki Durumu.....	17
2.6. Küçük Hidroelektrik Santrallerin Sorunları .....	17
2.7. Değerlendirme .....	17
<b>3. HİDROLİK TÜRBİN MODELİ</b> .....	19
3.1. Hidrolik Kavramlar .....	19
3.1.1. Bernoulli Denklemi .....	19
3.1.2. Çevresel Kuvvet .....	19
3.1.3. Çevresel Kuvvetin Oluşturduğu Dönme Momenti .....	20
3.1.4. Türbin Mil Gücü.....	20
3.1.5. Euler Türbin Denklemi.....	20
3.1.6. Özgül Devir Sayısı .....	21

3.1.7. Karakteristikleri.....	22
3.1.7.1. Sabit Hız Karakteristiği .....	23
3.1.7.2. Sabit Açıklık Karakteristiği.....	24
3.1.7.3. Dağ Eğrileri .....	24
3.2. Hidrolik Türbin Tipleri .....	25
3.2.1. Pelton Tipi Hidrolik Türbin ve Özellikleri.....	26
3.2.2. Francis Tipi Hidrolik Türbin ve Özellikleri .....	32
3.2.3. Cross-Flow Tipi Hidrolik Türbin ve Özellikleri.....	34
3.2.4. Türbin Maliyetleri .....	39
3.3. Hidrolik Türbinlerin Modellenmesi .....	40
3.3.1. Pelton Tipi Hidrolik Türbinin Modeli .....	40
3.3.2. Francis Tipi Hidrolik Türbinin Modeli.....	41
3.3.3. Cross-Flow Tipi Hidrolik Türbinin Modeli.....	42
<b>4. HİDROLİK TÜRBİNLERİN BİLGİSAYAR BENZETİMİ.....</b>	<b>44</b>
4.1. Giriş.....	44
4.2. Pelton Tipi Hidrolik Türbinin Bilgisayar Benzetimi.....	44
4.3. Francis Tipi Hidrolik Türbinin Bilgisayar Benzetimi .....	50
4.4. Cross-Flow Tipi Hidrolik Türbinin Bilgisayar Benzetimi .....	54
<b>5. SONUÇ.....</b>	<b>60</b>

## KAYNAKLAR

## ÖZGEÇMİŞ

## ŞEKİLLER

Şekil 1.1	Türkiye'deki Havzaların Potansiyelleri .....	6
Şekil 3.1	$n-N_e$ Değişim Eğrisi .....	22
Şekil 3.2	Sabit Hız Karakteristiği.....	23
Şekil 3.3	Sabit Açıklık Karakteristiği .....	24
Şekil 3.4	Dağ Eğrilerinin Genel Formu .....	25
Şekil 3.5.	Micro Pelton Türbinlerinin Çalışma Bölgesi .....	27
Şekil 3.6	Pelton Türbinin Genel Görünüşü .....	28
Şekil 3.7	Pelton Türbinin Giriş ve Çıkış Hız Üçgeni .....	29
Şekil 3.8	Francis Türbinin Genel Görünüşü.....	32
Şekil 3.9	Francis Türbin Giriş ve Çıkış Hız Üçgenleri .....	33
Şekil 3.10	Cross-Flow Türbininin Genel Görünüşü .....	35
Şekil 3.11	Türbin İçerisindeki Hız Üçgenleri .....	36
Şekil 3.12	Cross-Flow Türbininin Yatay ve Düşey Kullanımları .....	36
Şekil 3.13	Pelton Türbinin Modeli.....	40
Şekil 3.14	Pelton Türbininin Sabit Hız Karakteristiği .....	41
Şekil 3.15	Francis Hidrolik Türbinin Modeli.....	41
Şekil 3.16	Francis Türbininin Sabit Hız Karakteristiği .....	42
Şekil 3.17	Cross-Flow Hidrolik Türbinin Modeli.....	42
Şekil 3.18	Cross-Flow Hidrolik Türbininin Sabit Hız Karakteristiği .....	43
Şekil 4.1	$P_1$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri .....	45
Şekil 4.2.	$P_1$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri .....	45
Şekil 4.3	$P_2$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri .....	46
Şekil 4.4	$P_2$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri.....	46
Şekil 4.5.	$P_3$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri.....	47

Şekil 4.6.	$P_3$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri .....	47
Şekil 4.7.	$P_4$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri .....	48
Şekil 4.8.	$P_4$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri.....	48
Şekil 4.9	$P_5$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri .....	49
Şekil 4.10	$P_5$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri.....	49
Şekil 4.11	$F_1$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri.....	51
Şekil 4.12	$F_1$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri .....	51
Şekil 4.13	$F_2$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri.....	52
Şekil 4.14	$F_2$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri .....	52
Şekil 4.15	$F_3$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri .....	53
Şekil 4.16	$F_3$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri.....	53
Şekil 4.17	$C_1$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri .....	55
Şekil 4.18	$C_1$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri.....	55
Şekil 4.19	$C_2$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri.....	56
Şekil 4.20	$C_2$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri .....	56
Şekil 4.21	$C_3$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri .....	57
Şekil 4.22	$C_3$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri .....	57
Şekil 4.23	$C_4$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri.....	58
Şekil 4.24	$C_4$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri .....	58
Şekil 4.25	$C_5$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Güç Eğrileri .....	59
Şekil 4.26	$C_5$ Türbini İçin Değişik Yükseltilerdeki Verim Eğrileri.....	59

## TABLOLAR

Tablo 1.1	Dünyada Hidroelektrik Potansiyel.....	1
Tablo 1.2	Türkiye'deki Havza Potansiyelleri .....	6
Tablo 1.3	Türkiyenin Enerji Üretim Yıllara Göre Dağılımı ve Hidrolik Enerjini Yeri .....	7
Tablo 2.1	Hidroelektrik Santrallerin Sınıflandırılması.....	9
Tablo 2.2	Türkiye'deki Küçük HES'lerin Durumları .....	12
Tablo 2.3	Türkiye'deki Mevcut Çok Küçük Hidroelektrik Santralleri .....	13
Tablo 3.1.	Hidrolik Türbin Tiplerinin Özgül Devir Sayıları .....	22
Tablo 3.2.	Değişik Özgül Devir Sayılarında $k_{II}$ ve $B/D$ değerleri.....	34
Tablo 3.4	Hidrolik Türbinlerin Generatör İle Birlikte Ünite Birim Maliyetleri.....	39
Tablo 4.1	İncelenecek olan Pelton Türbinlerinin Verileri.....	44
Tablo 4.2	İncelenecek olan Francis Türbinlerinin Verileri .....	50
Tablo 4.3	İncelenecek olan Cross-Flow Türbinlerinin Verileri .....	54

## SİMGELER

$\omega$	: Açısal hızı, (rd/sn)
$w$	: Akışkanın bağıl hızı (m/sn)
$U$	: Akışkanın çevresel hız (m/sn)
$C$	: Akışkanın mutlak hızı (m/sn)
$H_n$	: Brüt hidrolik (m).
$F_u$	: Çevresel kuvvet (N)
$\eta_Q$	: Debisel verim
$M_i$	: Dönme momenti (kg.m <sup>2</sup> /sn)
$P$	: Elde edilecek güç (Watt)
$F_1$	: Francis tipi hidrolik türbin
$B$	: Francis türbinde çarka su veren ağzın yüksekliği (cm)
$\eta_r$	: Genel verim
$\eta_G$	: Generatör verimi
$i$	: İletim oranı
$Q_c$	: Kaçan su debisi (m <sup>3</sup> /sn)
$\Sigma H_w$	: kayıpların toplamına (m).
$\eta_M$	: Mekaniksel verim
$H$	: Net düşü (m).
$P_1$	: Pelton tipi hidrolik türbin
$a$	: Pelton türbini kepçe açıklık genişliği (cm)
$b$	: Pelton türbini kepçe genişliği (cm)
$k$	: Pelton türbini kepçe ofseti (cm)
$Z$	: Pelton türbini kepçe sayısı

- $Q$  : Su debisi ( $m^3/sn$ )
- $d$  : Su jetinin çapı (cm)
- $\gamma$  : Suyun özgül ağırlığı ( $1 \text{ gr/cm}^3$ )
- $Q_t$  : Tahrik suyunun debisi ( $m^3/sn$ )
- $D$  : Türbin çapı (cm)
- $n$  : Türbin devir sayısı
- $\varphi$  : Türbin giriş ağızı sürtünme katsayısı
- $\eta_l$  : Türbin rotorunun iç verimi
- $n_d$  : Türbinin özgül devir sayısı (d/d)
- $n_s$  : Türbinin özgül devir sayısı (d/d)
- $\beta$  : U ile  $w$  arasındaki açı
- $\alpha$  : U ile C arasındaki açı
- $g$  : Yer çekim ivmesi ( $m/sn^2$ )
- $C_1$  : Cross-Flow tipi hidrolik türbin
- $B_{c_1}$  : Cross-Flow türbinin çark genişliğini (cm)

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KÜÇÜK GÜÇLÜ HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE DÜŞÜ, DEBİ, YÜK VE VERİM İLİŞKİLERİ

Mahmut Temel ÖZDEMİR

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2002, Sayfa: 63

Enerji üretiminde hidroelektrik santrallerin (HES) önemli bir yeri vardır. Ülkemizdeki hidrolik potansiyelin fazla olmasına karşın bu potansiyelin tam olarak kullanılmaması önemli bir eksikliktir. Küçük ve çok küçük HES'lerin yapılıp faaliyete geçirilmesi ile bu eksiklik giderilebilir. Böylece, tam olarak kullanılmayan hidrolik potansiyelimiz değerlendirilerek ekonomiye önemli katkı sağlanabilir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin hidrolik potansiyeli, küçük ve çok küçük HES'ler ile bu HES'lerde kullanılan türbinler hakkında bilgi verilmiştir. Hidrolik türbinlerin debi, düşü, verim ve yük ilişkilerini belirlemek amacıyla Pelton, Francis ve Cross-Flow türbinlerinin modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller yardımıyla ve MATLAB Programı kullanılarak, bu türbinlerin bilgisayar benzetimi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önceki çalışmalar dikkate alınarak irdelenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Küçük ve Çok Küçük HES, Hidrolik Türbin, Hidrolik Türbin Modeli, Düşü, Debi, Verim

## **SUMMARY**

**Master Thesis**

### **RELATION AMONG HEAD, FLOW, LOAD AND EFFICIENCY ON THE SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANT**

**Mahmut Temel ÖZDEMİR**

**Firat University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Electrical and Electronics Engineering**

**2002, Page: 63**

Hydroelectric power plants (HPP) have a considerable position in the energy production. In our country, there is a big hydraulic potential which is not used exactly, is an important deficiency. This absence can be remove with building and entering to activity the mini and micro Hydroelectric Power Plants. Thus, with utilizing hydraulic potential which is not used completely, can supply a big assistance to economy.

This study gives information about Turkiye's hydraulic potential, mini and micro HPP and turbines which are used in this Hydroelectric Power Plants. It is aimed to determine the relation of flow rate, head, efficiency and load of this hydraulic turbines and forming the models of Pelton, Francis and Cross-Flow turbines. These turbines simulations have been done using those formed models and MATLAB program. The obtained results have been examined with taking into considerations the previous studies.

**Key Words: Mini and Micro HPP, Hydraulic Turbine, Hydraulic Turbine Model, Flow Rate, Head, Efficiency**

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Genel Bilgi

Toplumların sosyo-ekonomik gelişmelerinde başlıca etkenin, o ülkede tüketimde kullanılan enerji miktarı olduğu kabul edilmektedir. 20. yüzyılın başından itibaren hızla gelişen teknoloji, enerji üretimi ve tüketiminin hızlı bir şekilde artmasına neden olmuştur. Gelişmelerin başlangıcında fosil kaynaklı birincil enerji kaynaklarının tükenir olmasına ve çevre kirliliği oluşturmasına karşın ucuz oluşu, bu enerji kaynaklarının kullanılmasına öncelik tanımıştır. Çevre kirliliğini oluşturmaması ve yenilenebilir olmasına karşın hidrolik kaynakların ilk yatırım maliyetlerinin pahalı olması ve uzun süreli araştırmaların gerektirmesi nedeniyle gereken önemi kazanmamıştır.

Teknolojik açıdan gelişmiş ülkeler, gelişmemiş ülkelerin birinci enerji kaynaklarını ucuz temin etmişlerdir. Bu durum petrole dayalı enerji üretimini önemli ölçüde arttırmıştır. Bu artış 1973-1974 yıllarına kadar sürmüştür. Bu yıllarda petrole yapılan yüksek zamlar bütün dünya ülkelerini bir enerji krizine sürüklemiştir. Bu olaydan sonra ülkeler kendi öz kaynaklarına dayalı enerji üretimine ağırlık vermeye başlamışlardır. Kalkınma planlarında dış ülkelere bağımlılığı azaltacak yönde tedbirler almışlardır. Bu çabaların sonucu olarak hidroelektrik enerjinin üretimi önemli ölçüde artmıştır. 1980 yılında dünya elektrik enerjisi üretiminin % 23'ü ve toplam enerji kullanımının % 5'i hidrolik enerjiden karşılanmıştır.

Tablo 1.1'de dünyada teknik yönden değerlendirilebilen hidroelektrik potansiyel verilmiş, bu potansiyelin kullanılan kısmı oranı gösterilmiştir[1][2].

**Tablo 1.1** Dünyada Hidroelektrik Potansiyel

Bölgeler	Brüt Teorik Hidroelektrik Potansiyel (GWh/Yıl)	Teknik Değerlendirilebilir Hidroelektrik Potansiyel (GWh/Yıl)	Ekonomik Değerlendirilebilir Potansiyel (GWh/Yıl)
Asya	19000000	6800000	3600000
G.Amerika	7400000	2600000	2300000
Afrika	4000000	1665000	1000000
K.ve O.Amerika	6000000	1500000	1100000
Avrupa	3150000	1225000	800000
Okyanusya	600000	270000	105000
Dünya Toplamı	40150000	14060000	8905000
Türkiye	433000	216000	122816

Ülkelerin gelişmesinde vazgeçilmez bir öneme sahip olan enerji çok değişik biçimlerde elde edilebilir. Mevcut kaynakları doğrultusunda her ülke enerji üretmek için bir yol takip eder.

Kırsal bölgelerin enerji ihtiyacını karşılamak ve dolayısı ile bu bölgelerin sosyo-ekonomik gelişmelerini sağlamak ülkelerin temel hedefleri arasındadır. Kırsal bölgelerin enerji ihtiyacını karşılamada, alternatif enerji kaynakları arasında küçük akarsulardan elde edilen hidroelektrik enerji ön sırayı almaktadır. Fazla harcama gerektirmemeleri, çabuk hizmete girebilmeleri ve kısa sürede kendilerini amorti etmeleri küçük HES'lerin tercih edilmelerini sağlamaktadır.

Bir hidroelektrik santralin (HES) kurulması için temel iki unsur olan su debisi ile hidrolik düşü değerleri üzerine, santral kurulacak olan nehrin, yağış alanının büyüklüğüne ve bu yağış alanına düşen yıllık yağış miktarına göre azalır veya çoğalır. Bir akarsu üzerine HES'in gücünün ve türbin generatör ünitelerinin sayısının tespitinde ortalama su debisinin iyi bir şekilde bilinmesi büyük bir önem taşır. Akarsu karakteristiğinin yanlış veya eksik bilinmesi, yapımı düşünülen HES için yanlış projelendirmeye neden olur.

Senenin yağışlı veya kurak geçmesine bağlı olarak su debisinin değişmesi sonucu su düşüsü de değişmektedir. Bu bilgileri elde edebilmek içinde uzun süre santral kurulacak alan içerisinde ön etütlerin ve gözlemlerin yapılması gerekir. Etütler neticesinde santralin kurulacak ünite adeti , gücü ve üretilebilecek olan güvenilir enerji miktarının tespiti yapılır.

Suyun enerji kaynağı olarak doğa ve teknikte görüntü şekilleri çok çeşitlidir. Su enerjisi nehir ve ırmaklarda kinetik enerji, yüksek dağlarda ve yaylalardaki doğal göllerde potansiyel enerji olarak karşımıza çıkmaktadır. Suyun akım enerjisi hidrolik santrallerdeki su türbinleri vasıtasıyla mekanik enerjiye, su türbinlerinin tahrik ettiği generatörler vasıtasıyla elektrik enerjisine çevrilmektedir.

Su türbinlerinden su kuvveti yardımıyla enerji üretebilmek için gerekli olan su hızının elde etmek üzere mutlaka bir düşme yüksekliğine (hidrolik düşüye) veya bu su düşüsüne uygun bir basınç farkının bulunmasına gerek vardır.

Su düşüsü veya hidrolik düşü deyiminde iki su yüzeyi arasındaki yükseklik farkı anlaşılır. Bir hidrolik santral tesisindeki düşü ise üst su yüzeyi ile alt su yüzeyi arasındaki,yani su girişi ile su çıkışı arasındaki yükseklik farkıdır. Bu su düşüsü brüt hidrolik düşüdür.

Su iletim tesislerinde, yani su iletim kanallarında; kuvvet tünelleri, cebri borular gibi tesisleri de su moleküllerinin sürtünmeleri nedeniyle kayıplar meydana gelir. Meydana gelen bu kayıpların toplamına  $\Sigma H_w$  ve tesisin brüt hidrolik düşüsüne  $H_n$  denilirse, net düşü; ( $H$ ) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$H = H_n - \Sigma H_w \quad (m) \quad (1.1)$$

Hidrolik tesislerde düşü kayıpları haricinde de kayıplar oluşur. Bu da genel verim içinde gösterilir. İç kayıplar suyun temas ettiği yüzeylere sürtünmesi boru dirseklerinde ve türbin içinde yön değiştirmesi, akış kesitlerindeki değişimler ve kayıpları nedenleri ile meydana gelmektedir.

Su debisi kayıpları, türbinlerde rotor dönme boşluklarında kaçan kaçak sular nedeniyle meydana gelmektedir. Türbin ayar kanatları arasından gelen su debisi  $Q$  ve rotorun çevresindeki dönme boşluklarından kaçan su debisi  $Q_c$  olduğuna göre türbin rotoru kanatları arasına giren tahrik suyunun debisi ( $Q_I$ )

$$Q_I = Q - Q_c = (1 - Q_c / Q)Q \quad (1.2)$$

kadardır.  $Q_c$  kaçak sular debisinin azaltılabilmesi için rotor dönme boşluklarının mümkün olduğu kadar küçük yapılması veya labirentler kullanılması yoluna gidilmektedir.

Hidrolik akım kayıpları, türbin ayar kanatlarının yerleştirildiği ayar kanatları çemberi kanalı, türbin rotoru kanatlarının aralıkları ve türbin emme borusu, hidrolik akım kayıplarının incelenmesi yönünden, düz bir boru donanımı ile kabaca mukayese edilebilirler. Bir türbinden geçen debi  $Q = 0$  ile  $Q_{maks} = 1,3Q_n$  değerleri arasında değişebilir. Su akımının ayar kanatları çemberi aralıkları ile ayar kanatlarında hızı artar, türbin rotoru kanatlarının aralıklarında hızı artar ve yönü değişir ve emme borusunda ise hızı yavaşlar ve yönü değişir. Su akımının ayar kanatları çemberi aralıklarında, ayar kanatları aralıklarında ve türbin rotoru kanatları aralıklarında ile emme borusunda sürtünmeler, yön değiştirmeler ve kötü enerji değişimi gibi nedenlerle meydana gelen hidrolik akım dirençlerini yenmesi gerekmektedir.

Türbinlerde meydana gelen sürtünme kayıpları ile dirsek kayıpları ve enerji kayıpları, genel olarak hidrolik akım sınır tabakasının kalınlığına bağlıdır. Bu sınır tabakası boru hatlarının iç yüzeylerinde ve türbinlerde ise suyun temas ederek geçtiği bütün yüzeylerde meydana gelmektedir. Bu sınır tabakasının değeri bilhassa hızlanan hidrolik akımların meydana geldiği yüzeylerin pürüzsüz hale gelmesi ile en aza indirgenebilir.

Çıkış kayıpları, artık bir daha kullanılmayacak olan su akımı ile türbin rotorunu terk eden akım enerjisi anlaşılmaktadır. Bu kayıplar emme borusu bulunmayan pelton tipi hidrolik türbinlerde tamamen kaybolmaktadır. Fakat emme borusu bulunan Francis ve Cross-Flow tipi hidrolik türbinlerde ise bir kısmı geri kazanılmaktadır.

Dış kayıplar, türbin rotorunun alt gövdesi ile üst gövdesinin, dönme boşluklarından kaçan kaçak suların içinde dönmesi dolayısıyla meydana gelen sürtünme kayıpları ile türbin kılavuz yatağında ve türbin salmastralarında meydana gelen sürtünme kayıplarının sebep olduğu güç kayıplarına "dış kayıplar" adı verilmektedir.

$\eta_Q$  debisel verim,  $\eta_I$  türbin rotorunun iç verimi,  $\eta_M$  mekaniksel verim,  $\eta_G$  generatör verimi ve  $\eta_T$  ise genel verim olmak üzere:

$$\eta_T = \eta_Q \cdot \eta_I \cdot \eta_M \cdot \eta_G \quad (1.3)$$

Bir su kuvvetinden elde edilebilecek olan güç aşağıdaki formül ile beygir gücü ve elektrik gücü cinsinde bulunabilir:

$$N = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H \cdot \eta_T}{75} \quad (HP) \quad (1.4)$$

$$P = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H \cdot \eta_T}{102} \quad (kW) \quad (1.5)$$

$$P = Q \cdot \gamma \cdot g \cdot H \cdot \eta_T \quad (W) \quad (1.6)$$

## 1.2. Türkiye'nin Hidrolik Potansiyeli

### 1.2.1 Brüt Potansiyel

Brüt su potansiyeli, bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin üst sınırını belirtir. Mevcut debi ve düşüdeki akarsuyun bir yılda oluşturduğu su kuvveti potansiyelidir. Bu potansiyel, bölgenin topografya ve hidrolojisinin fonksiyonu olmaktadır. Bu iki faktör yeterli duyarlılıkta değerlendirildiğinden zamanla değişmeyen bir gösterge olmaktadır. Ülkemizin brüt su potansiyeli 430 TWh/yıl civarındadır.[3]

### 1.2.2. Teknik Yönden Değerlendirilebilir Potansiyel

Bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin teknolojik üst sınırını gösteren, teknik yönden değerlendirilebilir su potansiyeli uygulanan teknolojiye bağlı olarak değişmektedir. Bu potansiyel, brüt potansiyelin bir fonksiyonudur ve çoğunlukla onun yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Su kuvveti teknolojisinde, yakın geçmişte ani değişimler olmadığı ve yine yakın gelecekte bu tür gelişmelerin beklenmediği dikkate alınır, teknik yönden değerlendirilebilir potansiyelin zamanla pek değişmediği kabul edilmektedir.

İletim kayıpları 0,7, türbin verimi 0,85 ve elektrik enerjisi sağlayan elemanların verimi de 0,8 alınır, kaçınılmaz kayıpların oluşturduğu etkinin değeri ortalama  $(0,7 \cdot 0,85 \cdot 0,8 = 0,476)$  mertebesinde olacaktır.

Bu duruma göre; teknik yönden değerlendirilebilir su kuvveti potansiyeli brüt potansiyelin yaklaşık olarak yansı kadar olmaktadır. Bu açıdan yaklaşıldığında Türkiye'nin teknik yeniden değerlendirilebilir su kuvveti potansiyeli 215 TWh/yıl civarında olmaktadır.[3]

Teknik yönden değerlendirilebilir olmakla beraber büyük yerleşim ve endüstri merkezlerini, geniş tarımsal arazileri sular altında bırakacak olan projeler hidrolik potansiyel değerlendirilmesinde hariç tutulmalıdır. Bu durum dikkate alınırsa söz konusu potansiyel daha küçük bir değer olmaktadır. Bu amaçla yapılan. ve ampirik formüllere dayanan çalışmalarda ise Türkiye için 130 TWh/yıl civarında sonuçlar bulunmuştur. [3]

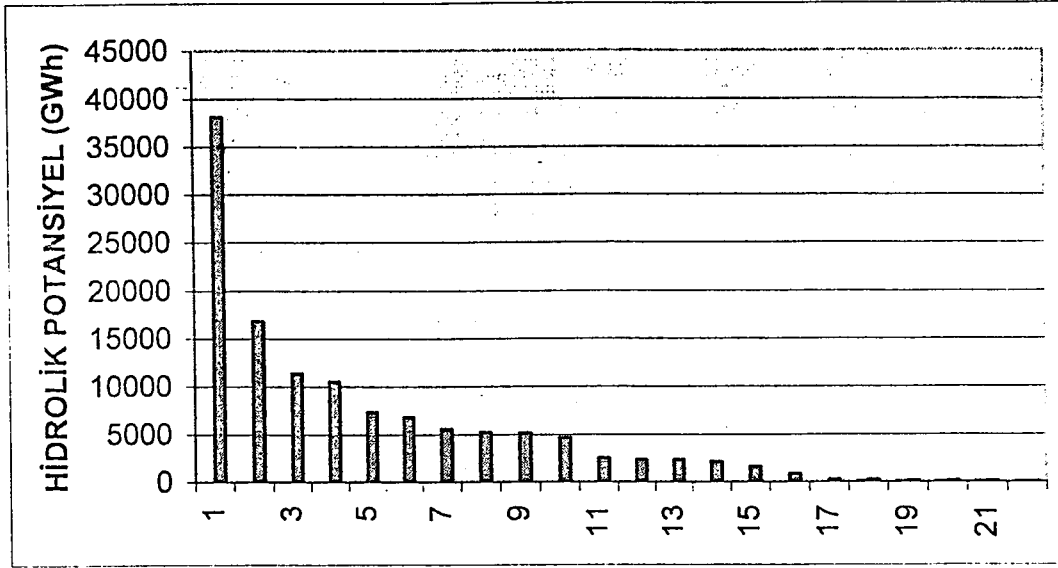
### 1.2.3. Ekonomik Olarak Yararlanılabilir Potansiyeli

Bu potansiyel bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin ekonomik olarak yararlanılabilir en üst sınır değerini gösteren, gerek teknik açıdan gerçekleştirilebilmesi mümkün ve gerekse ekonomik yönden tutarlı olan tüm su kuvveti projelerinin toplamı olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle ekonomik olarak yararlanılabilir hidroelektrik potansiyel, beklenen gelirleri, giderlerinden fazla olan hidroelektrik projelerin enerji üretimini göstermektedir. Bu potansiyelin master plan veya tercihen yapılabilirlik etüdü seviyesindeki havza gelişim planlarından belirlenmesi gerekmektedir.

Herhangi bir hidroelektrik tesisin geliştirilebilmesi için, gerçekleştirilebilir ekonomik bir potansiyeli, belirli bir enerji talebi ve uygun bir elektrik üretim fiyatının olması gerekir. Bu nedenle, bir akarsuyun ekonomik potansiyeli, sadece o nehir sistemi ve topografisine değil, aynı zamanda ekonomik şartlarına bağlı olarak bir ülkeden diğerine değişiklik arz etmektedir.

Hidroelektrik santrallerin ekonomik olarak hesaplanabilmesi için, ulusal şebekede aynı enerjiyi üretecek kaynaklar gözden geçirilmekte ve en ucuz enerji kaynağı belirlenerek hidroelektrik santral projesi bu kaynakla mukayese edilmekte ve ancak daha ekonomik bulunursa, önerilmektedir. Ekonomik yönden değerlendirilebilir potansiyel içindeki tüm HES projeleri termik santrallere göre uygulama ve işletme bakımından daha üstün projelerdir.

Çeşitli çalışmaların sonuçlarına göre; Türkiye'nin ekonomik yönden yararlanılabilir potansiyeline ait tahminler 47 TWh/yıl'dan 107 TWh/yıl'a kadar değişmiş ve tüm ülkeyi kapsayan havza gelişim planlarından hareketle 72 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Ancak daha sonra yapılan değerlendirmelere göre, bu değer 100 TWh/yıl'a kadar yükseltilebileceği görülmüştür.[3] Şekil 1.1 ve Tablo 1.2'de Türkiye'deki havzaların hidrolik potansiyel dağılımları verilmiştir. [4]



Şekil 1.1 Türkiye'deki Havzaların Potansiyelleri

Tablo 1.2 Türkiye'deki Havza Potansiyelleri

No	Havza Adı	Potansiyeli (GWh)
1	Fırat	38141
2	Dicle	16818
3	Doğu Karadeniz	11369
4	Çoruh	10507
5	Seyhan	7307
6	Kızılırmak	6810
7	Yeşilirmak	5573
8	Doğu Akdeniz	5253
9	Antalya	5173
10	Ceyhan	4662
11	Batı Akdeniz	2526
12	Sakarya	2341
13	Aras	2334
14	Batı Karadeniz	2111
15	Susurluk	1602
16	Büyük Menderes	853
17	Van Kapalı Havzası	257
18	Gediz	243
19	Küçük Menderes	143
20	Asi	120
21	Konya Kapalı Havzası	104
22	Kuzey Ege	42

### 1.3. Türkiye’de Hidroelektrik Enerji Üretimi

2001 yılında ilave edilen santrallerle birlikte kurulu güç 28.332,4 MW olmuştur.[5] Tablo 1.3’den görüleceği gibi ülkemizin ekonomik kriz dönemlerinde enerji tüketimi negatif bir şekilde büyümüştür.

Ortalama akış koşullarında Türkiye brüt hidrolik potansiyel 430 TWh/yıl, teknik yönden değerlendirilebilir hidrolik potansiyel 215 TWh/yıl ve ekonomik olarak değerlendirilebilecek hidrolik potansiyel ise 110 TWh/yıl olarak belirlenmiştir. Diğer fosil kaynaklarla beraber

Tablo 1.3 Türkiye’nin Enerji Üretim Yıllara Göre Dağılımı ve Hidrolik Enerjini Yeri

Yıllar	Hidrolik			Toplam	
	Üretim (Milyon kWh)	Katkı %	Artış %	Üretim (Milyon kWh)	Artış %
1970	2357,5	37,6	-	6272,9	-
1971	1911,9	24,5	-18,9	7802,1	24,4
1972	2291,1	25,1	19,8	9124,4	16,9
1973	2035,5	19,8	-11,2	10258,4	12,4
1974	2603,8	23,3	27,9	11188,9	9,1
1975	6644,2	44,8	155,2	14844,8	32,7
1976	7200,5	46,6	8,4	15454,2	4,1
1977	7427,5	43,1	3,2	17229,9	11,5
1978	8061,4	44,9	8,5	17968	4,3
1979	9133,7	48,2	13,3	18933,8	5,4
1980	10032,7	51,7	9,8	19414,5	2,5
1981	11124,7	54	10,9	20587,5	6,0
1982	12995	55,9	16,8	23261,5	13,0
1983	10146,7	42,8	-21,9	23688,9	1,8
1984	12259,8	45,9	20,8	26685,8	12,7
1985	10992	36,3	-10,3	30248,7	13,4
1986	10958,7	30,9	-0,3	35470,1	17,3
1987	17557,1	44,2	60,2	39679,3	11,9
1988	27450,2	63,8	56,3	43013,5	8,4
1989	17046,2	35,9	-37,9	47454,1	10,3
1990	22156,1	41,9	30	52854,2	11,4
1991	21392,9	38,6	-3,4	44460,7	-15,9
1992	24597	40	15	61533,3	38,4
1993	31728,1	47,3	29	67099,8	9,0
1994	28944,5	40,2	-8,8	71942,5	7,2
1995	33105,3	53,4	14,4	62026,6	-13,8
1996	37440,1	54,2	13,1	69123,6	11,4
1997	37341,6	51,5	-0,3	72486,8	4,9
1998	39601,4	50,4	6,1	78580,9	8,4
1999	31737,3	42,7	-19,9	74401,6	-5,3
2000	27771,8	37,6	-12,5	73941,8	-0,6
2001	20408,8	30,2	-26,5	67468,5	-8,8

Üretilen enerji, Őimdiki ve gelecek yıllardaki enerji ihtiyacını karŐılayacak bir durumda değildir. Ülkemizin geçirdiği ekonomik daralmadan dolayı tüketilen enerji ortalama % 8 artması gerekirken, 2000 yılında tüketilen enerji seviyelerindedir. Ekonomideki daralma, enerji sektöründe de üretim fazlalığı olarak kendini göstermiŐtir. Ama bu ülkemizde bir enerji sorunu olmadığı sonucunu da çıkarmaz.

Bu yüzden ülke ihtiyaçlarını karŐılayabilecek yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmekte büyük fayda vardır. Bu kaynaklar çok çeŐitlilik arz eder. Ülkelerin karakteristiklerine göre çok büyük farklılıklar göstermektedirler. Bunlar arasında, küçük ve çok küçük (mini ve mikro) hidroelektrik santraller, güneŐ enerjisi, biomas katı yakıt, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji ve deniz dalga enerjisi sayılmaktadır.



## 2. KÜÇÜK VE ÇOK KÜÇÜK GÜÇLÜ HİDROELEKTRİK SANTRALLER

### 2.1 Hidroelektrik Santrallerin Sınıflandırılması

Hidroelektrik santralleri değişik kriterlere göre sınıflandırmak mümkündür. Ülkelerin ekonomik yapılarındaki ve hidrolik potansiyellerindeki özelliklerin farklılıklar göstermesi tüm ülkeler için standart bir sınıflandırma sistemine gitmeyi engellemektedir. Bu nedenlerle çeşitli ülkelerde farklı sınıflandırma sistemleri kullanılmaktadır, sınıflandırmada şu kriterler göz önüne alınabilir.

- 1- Su ekonomisi yönünden sınıflandırma
- 2- Enerji ekonomisi yönünden sınıflandırma
- 3- Teknik özelliklerine göre sınıflandırma
- 4- Topoğrafik duruma göre sınıflandırma

Çeşitli ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de küçük hidroelektrik santrallerin sınıflandırması santralin kurulu gücüne göre yapılmaktadır. Ancak ülkelerin ekonomik ve teknolojik özelliklerine göre küçük hidroelektrik santrallerin tesis gücünün sınırlan değişik değerler almaktadır.

Ülkemizde Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Teşkilatı (UNIDO) tarafından yapılmış olan ve Tablo 2.1’de belirtilen sınıflandırma sistemi benimsenmiştir. [6]

Tablo 2.1 Hidroelektrik Santrallerin Sınıflandırılması

Büyüklüğü	Uygulama Yeri	Güç	Sınıfı
En küçük	Müstakil Ev	0-5 kW	Pico
Çok Küçük	Küçük yerleşim yerleri (köyler)	5-100 kW	Mikro
Orta	Yerel ağlar veya ulusal şebeke	100 kW-5 MW	Mini
Büyük	Ulusal şebeke	5 MW ve üzeri	Full-Scale

### 2.2 Küçük ve Çok Küçük Hidroelektrik Santrallerin Önemi

Ülkemizin topoğrafik ve hidrojeolojik yapısı ve bazı yörelerdeki yağış yoğunluğu büyük su potansiyeli yanında, küçük hidroelektrik su potansiyelinin de yaygın olarak bulunmasına olanak sağlamıştır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından yapılan bir araştırmaya göre küçük hidroelektrik santrallerden 13,9 TWh/yıl enerji üretilebileceği hesaplanmıştır.[7] Bu oran toplam ekonomik hidroelektrik potansiyelimizin % 12’sini oluşturmaktadır ve detaylı araştırmalarla bu oran daha da yükseltilebilir.

Küçük hidroelektrik santraller toplam enerji üretimine katkıları yanında politik ve sosyal açıdan da önemlidirler, Küçük yerleşim yerinin aydınlatılması ile birlikte enerjinin küçük sanayi tesislerinde, el sanatlarının geliştirilmesinde ve tarımda kullanılması sağlanarak bölgenin kalkınmasına büyük ölçüde katkıda bulunulmuş olunacaktır.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak için küçük hidroelektrik santrallere özel bir önem vermektedirler. Bu ülkelerde küçük hidroelektrik santralleri büyüklerin bir alternatifi olarak değil, tamamlayıcısı olarak düşünmektedirler. Kırsal kesim alanına giren köy, mahalle ve çiftlik gibi yerleşim ünitelerinin enerji ihtiyacının küçük akarsular üzerine kurulan küçük hidroelektrik santrallerden sağlanması ve üretime yönelik olan bu yatırımların yapılması daha ekonomik olmaktadır.

Büyük enerji üretim projelerinde kullanılan her türlü donanımın ithal edilmesi, mali kaynakları zorlamakta ve bu durum ülke ekonomisini olumsuz yönde etkilemektedir. Halbuki çok kısa bir sürede inşa edilebilecek ve tamamen yerli imkanlarla gerçekleştirilebilecek olan bu santraller derhal işletmeye açılarak üretime katkı sağlanabilir .

### **2.3 Küçük Hidroelektrik Santrallerin Olumlu ve Olumsuz Yönleri**

Küçük HES'ler büyük HES'lerin alternatifi değil, onların tamamlayıcısıdır. Bu santrallerin üstünlüklerini ve zayıf yönlerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

#### **a) Küçük HES'lerin Olumlu Yönleri**

1. Enerji konusu yurdumuz için hala güncelliğini korumakta ve daha uzun süre de koruyacak gözükmektedir. Bunun sebep alacağı olumsuz etkilerin giderilebilmesi için tüm enerji kaynaklarımızın değerlendirilmesi gereklidir. Küçük HES'ler bu konuda önemli bir açığı kapatabilirler.
2. Ulaşımı güç olan ve ulusal sistemden beslenemeyen kırsal bölgelerdeki köy ve diğer birimlerin enerji ihtiyacını karşılar. Böylece bu bölgelerin sosyo-ekonomik ve kültürel gelişimlerinin hızlanmasına yardım eder.
3. Kırsal bölgelerin yakıt bulma ve taşıma problemlerine çözüm getirir.
4. Yakıtlı santrallere nazaran düşük işletme maliyeti ile elektrik enerjisi üretir.
5. Bakımları kolay, ucuz ve hizmet süreleri ise uzundur.
6. Küçük hidroelektrik santrallerde üretilen enerji genellikle bölgede kullanıldığı için uzun iletim şebekelerine lüzum yoktur. Bu durum iletim hatlarındaki enerji kayıplarını ortadan kaldırmaktadır.

7. Çevre kirliliği, günümüzde önemli boyutlara ulaşmıştır. Küçük ve çok küçük hidroelektrik santrallerin çevreye etkileri yok denecek kadar azdır.
8. Küçük hidroelektrik santrallerin türbin-generatör gruplarının tipleştirilerek standart hale getirilmeleri kolaydır. Böylece makine yapımı ucuz olur. Bakım ve işletme sorunları en aza iner. Türbin-generatör ve transformatörün bir blok halinde ve otomatik işler şekilde yapılmasıyla aynı bölgedeki çok sayıda santral bir tek teknisyen tarafından kontrol edilebilir. Bunun sonucu olarak işletme maliyeti azalır.
9. Su türbinleri yapımı ile ilgili endüstri kurma çalışmaları günümüzde son aşamaya ulaşmıştır. küçük ve çok küçük hidroelektrik tesislerin makinelerin tümünün ülkemiz endüstri imkanlarıyla, döviz sarf etmeden inşa edilebileceği ispatlanmıştır. Küçük kapasiteli ünitelerin imal edilmesiyle bu konuda bilgi birikimi artacak ve yakın bir gelecekte daha büyük kapasiteli ünitelerin imalatı tamamen yerli imkanlarla gerçekleştirilebilecektir.
10. Büyük hidroelektrik projelerin inşa süresi ortalama 10 yıldır. Yabancı kredi temin sorunları ve devletin sınırlı imkanları nedeniyle büyük hidroelektrik santraller programlarına göre gecikerek devreye girmektedirler. Küçük hidroelektrik santraller, toplam yatırım bedelleri büyük meblağ tutmadığından kısa sürede inşa edilebilirler.

#### **b) Küçük HES'lerin Olumsuz Yönleri**

1. Küçük HES'lerde 1 KW kurulu güç için gerekli yatırım maliyeti büyük santrallere göre oldukça yüksektir.
2. Küçük HES'lerde enerji üretimi meteorolojik ve mevsimsel değişikliklere bağlı olarak dalgalanmalar gösterir. Ayrıca hidroelektrik santralın beslediği bölgelerdeki enerji ihtiyacı günün çeşitli zamanlarında değişmektedir. Bütün bu sebeplerden dolayı küçük HES'lerin verimleri düşük olur.
3. Küçük HES'lerin işletme giderleri büyük santrallere nazaran fazladır. Türbin, generatör ve transformatörde standardizasyona gidilerek işletme ve personel ücretlerinin, üretilen KWh enerji başına düşen miktarı azaltılmalıdır.
4. Yapılan yatırıma göre etütler için yapılan harcama masrafları fazladır. Bunu önlemek için tip projeler geliştirilmelidir.
5. Çok sayıda küçük santral yapmak yerine bir tane büyük santral yapmak ülke ekonomisi yönünden daha faydalıdır.
6. Üretimin devamı sistemin teknolojik özelliklerine bakım ve işletme politikalarına bağlıdır.

#### 2.4. Küçük Hidroelektrik Santrallerin Türkiye'deki Durumu

Türkiye deki modern anlamda ilk HES Trabzon ve Akçaabatlı ticaret adamlarının kurduğu Mahalli Tüccarlar Birliği, tarafından kurularak 1929 yılında kurularak işletmeye açılmıştır. Her biri 520 KW gücünde iki üniteden oluşan santral halen çalışmakta ve enerji üretimine devam etmektedir. Daha sonraki yıllarda değişik amaçlar için bu santrallerin yapımı sürdürülmüş ve bir çok mikro HES tesis edilmişlerdir (Tablo 2.2). 1990 yılı sonu itibariyle bu santrallerden elde edilen enerji, toplam hidrolik enerjinin % 3,44'nü oluşturmaktadır. Tablo 2.3'de Türkiye'deki mevcut çok küçük HES'lerin kurulduğu yerler ve özellikleri verilmiştir[3].

Tablo 2.2 Türkiye deki Küçük HES'lerin Durumları

HES Sayısı		Çalışan		Çalışabilir durumda		Çalışamaz durumda	
		Adet	%	Adet	%	Adet	%
Mikro HES	73	7	9	33	45.5	33	45.5
Mini HES	112	68	61	20	18	24	21
Toplam	185	75	40.5	53	28.6	57	30.8

Tablo 2.3 Türkiye'deki Mevcut Çok Küçük Hidroelektrik Santraller

Sıra No	İli-İlçesi	Bulunduğu Yer	İşletmeye Açılışı	Debisi (m <sup>3</sup> /sn)	Düşüsü (m)	Ünite Adedi	Toplam Güç (KW)	Türbin Tipi
1	Adana	Feke	1961	1.250	7.15	2	68	Francis
2	Afyon	Dereçine				1	90	
3	Ankara	Elmadag				1	100	
4	Antalya	Arif Köyü	1977				51	
5	Antalya	Altinkaya Köyü	1980				36	
6	Antalya	Sinanhoca Köyü	1981				26	
7	Antalya-Finike	Gökbük Köyü	1974				60	
8	Artin	Hopa	1951	0.240	27.50	1	52	
9	Artvin	Ardanuç				1	53	
10	Artvin	Şavşat	1953	0.230	7.25	1	11	Kaplan
11	Aydın	Bozdoğan				2	68	
12	Balıkesir	Erdek				1	96	
13	Bolu	Akçakoca				1	65	
14	Bolu	Seben	1956	0.380	9.00	1	48	Kaplan
15	Bolu	Hacımubalar Köyü	1974				45	
16	Bursa	Orhangazi		0.250	40.00	1	74	Francis
17	Çankırı	Bayramören					36	

18	Çorum	Osmancık	1968				1	100	
19	Çorum-Merkez	Ahmetoğlan Köyü	1972					62	
20	Eskişehir	Çifteler		1.500	3.54	2		100	Francis
21	Eskişehir	Seyitgazi	1956	1.000	4.7	1		35	Francis
22	Gaziantep	İslahiye	1968			1		48	
23	Gümüşhane	Torul	1960	1.750	4.18	1		52	Francis
24	Hakkari	Karlıköyü						77	
25	Hakkari	Çığlı Köyü	1981					600	
26	Hakkari	Hanyürek Köyü						52	
27	Hakkari	Ortaklar Köyü	1981			1		20	
28	Isparta	Şakikaraağaç	1950	0.120	70.00	1		74	
29	Isparta	Uluborlu	1951	0.080	61.50	1		38	Pelton
30	İçel-Erdemli	Sorgun köyü	1981					72	
31	İçel-Gülpınar	Ilisu Köyü						52	
32	İzmir	Kiraz	1968			1		60	
33	İzmir	Kemalpaşa	1953	0.205	35.06	1		57	
34	İzmir	Birgi	1951	0.350		1		41	Pelton
35	K.maraş	Göksu	1960	1	11.09	1		80	Francis
36	Kars	Göle	1954	0.254	46.30	1		95	Francis
37	Kars	Arpaçay	1965	1.015	8.30	2		63	
38	Kars	Çıldır				1		45	

39	Kars	Posof	1953	0.024	119.00	1	21	Pelton
40	Kastamonu	Abana	1954	0.606	9.50	2	80	Francis
41	Kastamonu	Tosya				1	79	
42	Kastamonu	Devrekani	1958	0.12	42.30	2	77	Francis
43	Kastamonu	Taşköprü	1953	0.214	21.60	2	77	
44	Kastamonu	Araç				1	36	
45	Konya	Destegün				1	10	
46	Konya	Taşkent	1955			2	100	
47	Konya	Doğanbey	1962	0.700	7.5	2	92	Francis
48	Konya	Bozkır				2	76	
49	Konya	Çamlıca Köyü	1980				40	
50	Malatya	Polat	1958	0.60	13.05	1	64	
51	Malatya	Akçadağ	1960	0.168	40	1	53	
52	Malatya	Arapgir				1	35	
53	Mardin	Savur				1	93	
54	Niğde	Çamardı				1	63	
55	Niğde	Bor	1954	0.220	30.60	1	55	
56	Ordu	Mesudiye	1956	5.80	65.00	2	56	
57	Ordu	Perşembe		0.220	30.62		54	
58	Ordu	Gölköy	1964	0.700	7.90	1	40	Francis
59	Rize	Çamlıhemşin	1968			1	24	Francis

60	Rize	Fındıklı	1955	0.143	8.50	2	20	
61	Sakarya	Akyazı	1956			1	88	
62	Samsun	Alaçam	1952	0.340	30.00	1	72	Francis
63	Sinop	Boyabat	1952	0.340	45	1	96	
64	Tokat	Niksar	1935			1	48	
65	Trabzon	Vakfikebir	1961				72	
66	Trabzon	Maçka	1954	1.00	07.35	1	55	
67	Trabzon	Sürmene				1	50	
68	Trabzon	Çaykara		0.344	16.70		45	Francis
69	Trabzon	Görele					44	
70	Van	Üçgözler Köyü				1	20	

## 2.5 Küçük Hidroelektrik Santrallerin Dünyadaki Durumu

İster gelişmiş ülkeler olsun, ister gelişmekte olan ülkeler olsun enerji sorunlarının çözümünde tüm hidroelektrik enerji kaynaklarından yararlanmayı amaçlamaktadırlar. Bunların arasında mikro, mini ve küçük hidroelektrik santrallere de gereken önem gösterilmeye başlanmıştır. Gelişmiş ülkelerin çoğunda küçümsenmeyecek miktarda küçük hidroelektrik santral vardır. Bunların toplam enerji üretimindeki payı % 4 ile % 6 arasında bulunmaktadır. Dünya Bankası tarafından yapılan bir araştırmaya göre üçüncü dünya ülkelerindeki hidroelektrik potansiyellerin % 5 ile % 10'unun küçük hidroelektrik santraller tarafından üretilebileceği hesaplanmıştır. [8] [9]

## 2.6 Küçük Hidroelektrik Santrallerin Sorunları

Türkiye'deki küçük ve çok küçük tip HES'lerin her birinde değişik sorunlar bulunmakla birlikte genellikle hepsinde ortak olanları şu şekilde sıralanabilir.

1. Tesisin kurulmasından önce yeteri kadar etüt veya uygun proje yapılmamış olması,
2. Tecrübeli ve kalifiye işletme-bakım personelinin bulunmaması,
3. Tesislerin değişik belediyeler ve köyler tarafından işletilmiş olması,
4. Santral gücünün ve enerji üretiminin bölgenin ihtiyacını karşılayamaz hale gelmesi,
5. Belediye veya köylerin ulusal elektrik şebekesine bağlanması,
6. Tahrik suyunun değişik amaçlar için kullanılması,
7. Yedek parça, yenileştirme ve bakım sorunları,
8. Cebri boru ve kapama organlarının sorunları,
9. İş kanunu ve toplu iş sözleşmelerinin getirdiği zorluklar .

## 2.7 Değerlendirme

Küçük su potansiyelimizi yeni projelerle mümkün olan en kısa sürede değerlendirilebilir duruma getirmenin çareleri araştırılmalıdır. Çünkü bu potansiyel kullanılmadığı süre içerisinde boşa akmaktadır.

Tablo 2.2 'ye göre, çalışmayan çok küçük HES 'lerin 66 adedinin toplam kurulu gücü 2917 kW ve çalışmayan 54 adet küçük HES 'lerin toplam kurulu gücü 21270 kW'tır. Çalışmayan bu 110 santralin toplam gücü 24187 kW olmaktadır. Bu tip santrallerin yıllık çalışma süresi 7200 saat olarak kabul edilirse, bunların yıllık toplam enerjisi 174 GWh olur. Bu durumda ekonomimizin kaybı yaklaşık olarak 17.5 Milyon\$ 'dır. Bu büyük zararı önleyebilmek için bir an önce mevcut santrallerin işletilir duruma gelmesi gerekmektedir.



### 3. HİDROLİK TÜRBİN MODELİ

#### 3.1. Hidrolik Kavramlar

Hidrolik makineler konusunun daha iyi anlaşılması için bazı temel kavramların bilinmesi gerekmektedir. Bernoulli denklemi, Çevresel kuvvet, Euler Türbin Denklemi ve Özgül Devir Sayısı bunlardan bazılarıdır. Bu kavramlar aşağıdaki bölümlerde sırasıyla ele alınmıştır.

##### 3.1.1. Bernoulli Denklemi

İncelenen bir kesitteki suyun hızı zamana bağlı olarak değişmiyorsa ve sürtünmesiz bir akışta, borunun her yerindeki yerel yükseklik, basınç yüksekliği ve hız yüksekliği toplamı her an aynı değerinde sabittir. Genel yazılımı ise;

H yükseklik, C hız, p basınç, g yerçekimi ivmesi,  $\gamma$  su yoğunluğu olmak üzere

$$H_1 + \frac{p_1}{\gamma \cdot g} + \frac{C_1^2}{2 \cdot g} = H_2 + \frac{p_2}{\gamma \cdot g} + \frac{C_2^2}{2 \cdot g} \quad (3.1)$$

şeklindedir.

İçerisinden sıvı geçirilen kapalı bir boru içerisine her iki ucu açık bükülmüş bir boru, sıvının akışına karşı yerleştirilmiş olsun. Diğer yandan borunun cidarına bir delik açılarak başka bir boru monte edilsin. Eklenen borulardaki sıvı seviyelerinin eşit olmadığı görülecektir. Bunlar arasındaki yükseklik farkı  $\Delta H$  ise, suyun hızı aşağıdaki eşitlikten bulunabilir,

$$C = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad (3.2)$$

##### 3.1.2. Çevresel Kuvvet

Suyun belirli bir açısı ( $\alpha_1$ ) ve belirli hızda ( $C_1$ ) bir yapıya girip o yapıya,  $C_2$  hızı ve  $\alpha_2$  açısı ile terk etmesi durumunda, akışkanın ona etki ettirdiği kuvvet bulmak için;  $w$  akışkanın bağıl hızı,  $U$  çevresel hız,  $C$  mutlak hız olmak üzere bu hızlar arasında vektörel olarak genelde aşağıdaki ilişki vardır.

$$w = C - U \quad (3.3)$$

$$C = w + U \quad (3.4)$$

U ile C arasındaki açı  $\alpha$  işareti ile, U ile  $w$  arasındaki açı ise  $\beta$  ile gösterilecektir.

$$C_U = C \cdot \cos \alpha \quad (3.5)$$

$$w_{U1} = w \cdot \cos \beta \quad (3.6)$$

Eğer  $w_{r2}$  bileşeni  $w_{U1}$  bileşenine zıt yönde ise, o zaman kuvvet;

$$F_u = Q \cdot \gamma \cdot (w_{1u} + w_{2u}) \quad (3.7)$$

Eğer aynı yönde iseler;

$$F_u = Q \cdot \gamma \cdot (w_{1u} - w_{2u}) \quad (3.8)$$

### 3.1.3. Çevresel Kuvvetin Oluşturduğu Dönme Momenti

$r$  çevresel kuvvetin şafta olan uzaklığı olmak üzere, dönme momenti

$$M_t = F_u \cdot r \quad (3.9)$$

den hesaplanır. Denklem (3.8) denklem (3.9)'da yerine yazılırsa,

$$M_t = Q \cdot \gamma \cdot (r_1 \cdot w_{1u} - r_2 \cdot w_{2u}) \quad (3.10)$$

şeklinde sonuç bulunur. Aynı eşitlik

$$M_t = Q \cdot \gamma \cdot (r_1 \cdot c_{1u} - r_2 \cdot c_{2u}) \quad (3.11)$$

şeklinde de yazılabilir.

### 3.1.4. Türbin Mil Gücü

Açısal hızı  $\omega$ , çevresel hızı  $U = D \cdot \pi \cdot n$  olan türbinin mil gücü

$$P = M_t \cdot \omega = Q \cdot \gamma \cdot \omega \cdot (r_1 \cdot c_{1u} - r_2 \cdot c_{2u}) = Q \cdot \gamma \cdot (u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u}) \quad (3.12)$$

ile hesaplanır.

### 3.1.5. Euler Türbin Denklemi

Açısal hızı  $\omega$  ve çevresel hızı da  $u = D \cdot \pi \cdot n$  olan bir türbin milindeki güç;

$$P = Q \cdot \gamma \cdot \omega \cdot (r_1 \cdot c_{1u} - r_2 \cdot c_{2u}) \quad (3.13)$$

veya  $u = \omega \cdot r$  değerleriyle,

$$P = Q \cdot \gamma \cdot (u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u}) \quad (3.14)$$

eşitliğinden hesaplanır. Eğer debi ve düşü biliniyorsa bir hidroelektrik santralin gücü denklem (1.4) ile bulunabilir. Denklem (1.4) ile denklem (3.4)'ü birbirine eşitlersek;

$$Q \cdot \gamma \cdot g \cdot H \cdot \eta_T = Q \cdot \gamma \cdot (u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u}) \quad (3.15)$$

$$g \cdot H \cdot \eta_T = u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u} \quad (3.16)$$

denklemden H çekildiğinde,

$$H = \frac{(u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u})}{g \cdot \eta_T} \quad (3.17)$$

sonucu bulunur. Bu son eşitlik Euler Türbin Denklemi adını alır. Bu eşitlikte düşü ile çark kanatları arasında nasıl bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu denklemi bağıl hızların cinsinden şu şekilde de yazılabilir.

$$H = \frac{u_1 \cdot w_{1u} - u_2 \cdot w_{2u}}{g \cdot \eta_T} \quad (3.18)$$

### 3.1.6. Özgül Devir Sayısı

Özgül hız kavramının iki farklı tanımı ve hesabı vardır. Bunlar incelenecek olursa;  $H = 1$  m ve  $Q = 1$  m<sup>3</sup>/sn olarak çalışan bir çarkın  $n_q$  devir sayısıdır. Pratikte gerçekte çoğu kez, imal edilmek istenen esas türbin rotoruna geometrik olarak benzer olan ve  $H = 1$  m faydalı hidrolik düşüde,  $N_h = 1$  BG güç veren model bir türbin rotorunun devir sayısı olan  $n_s$  özgül devir sayısı kullanılmaktadır. Gerek  $n_q$  özgül devir sayısı ve gerekse  $n_s$  özgül devir sayısı, hidrolik türbinin tipinin seçilmesi ve hidrolik türbinin proje değerleri olan  $Q_n$ ,  $H_n$  ve  $n_n$  değerleri ile birlikte türbinin projesi için temel teşkil ederler.

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{\theta}}{\sqrt[4]{H^3}} \quad (3.19)$$

$$n_s = n \cdot \frac{\sqrt{N_h}}{\sqrt[4]{H^5}} \quad (3.20)$$

Tablo 3.1. Hidrolik Türbin Tiplerinin Özgül Devir Sayıları

Türbinler	Özgül Devir Sayısı ( $n_q$ )
Pelton	1-30
Cross-Flow	20-130
Francis	80-400

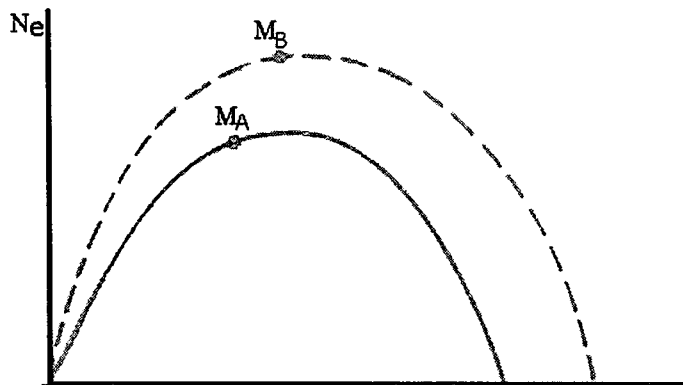
Türbin özgül hızı  $n_s$ , bazı imalatçılar tarafından net düşüye bağlı olarak amprik formüller halinde verilmiştir. Bunlardan hidrolik türbinler kısmında bahsedilecektir.

Müsaade edilen maksimum düşü, çarktaki kanat sayısı, B/D (B çarka su veren ağzın yüksekliği, D ise çarkın çapıdır) oranı, beklenen verim, işletme durumu ve diğer bilgiler hakkında karar verilmesinde en önemli etken  $n_q$  değerinin bilinmesidir.  $n_q$  büyük olursa kavitasyon ihtimali fazladır.

### 3.1.7. Karakteristikleri

Türbinlerin  $n$ ,  $Q$ ,  $H_0$ ,  $\alpha$ ,  $N_e$ ,  $\eta_g$  gibi karakteristik büyüklükleri arasındaki ilişkileri gösteren eğrilere karakteristik eğriler adı verilir.

Hidrolik türbinlerde genellikle iki grup karakteristik çizmek mümkündür. Bunlardan birinci grup, hız ve sabit açıklıktır (sabit debi). Bu suretle mevcut türbinin bütün özellikleri taranmış olmaktadır. Gerçekte yukarıda belirtilen büyüklüklerden ancak üçü keyfi olarak seçilebilir. Bunlardan sonra diğerleri tam olarak belirlenir.

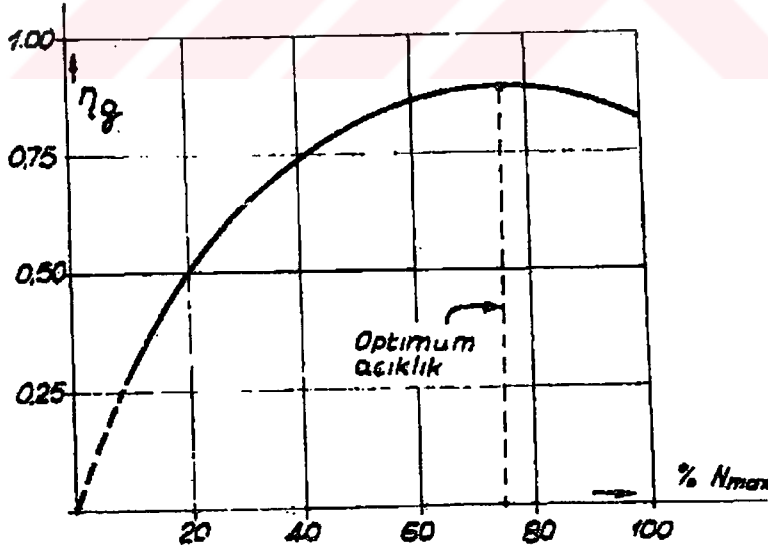


Şekil 3.1 n-N<sub>e</sub> Değişim Eğrisi

Örnek olarak  $n$ ,  $H_0$ ,  $\alpha$  değerlerini seçilmiş olsun. Bunlardan  $\alpha = \alpha_1$ ,  $H_0 = H_1$  değerlerini tespit edersek  $n$  devir sayısına bağlı olarak Şekil 3.1'deki  $N_e = f(n)$  eğrileri çizilebilir. Şimdi  $H_0$  değerinin her yeni değerine başka bir eğri tekabül edecektir. Bu şekilde sonsuz eğri mevcuttur fakat bunların hepsi yeni bir deneye başvurmadan birincisinden elde edilir. Çünkü benzerlik kanunu kullanılırsa A eğrisinin her  $M_n$  noktası B eğrisinin  $M_B$  noktasına tekabül eder. O halde çizerken işleri daha da kolaylaştırmak için  $H = 1$  metre alınarak çizim yapılır.

### 3.1.7.1. Sabit Hız Karakteristiği

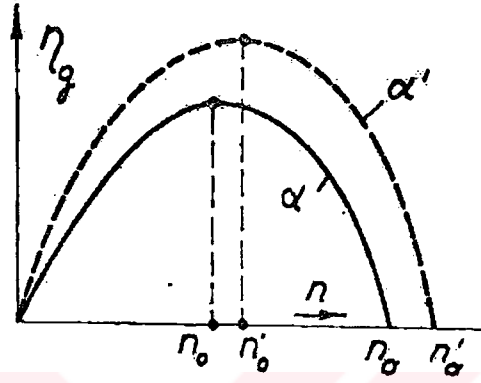
Türbin sabit devir sayısında, değişik kanat açıklıklarına tekabül eden  $\eta_g$  verim eğrisi genellikle sabit hız karakteristiği adı ile anılır.  $\alpha$  açısı ile  $Q$  debisi ve güç arasında belirli bir bağıntı olduğundan bu karakteristikte debiyi veya daha ziyade yükü absis olarak çizim yoluna gidilir. Bu deney esnasında türbinin net düşüsü sabit tutulmaya çalışılır. Sabit devir karakteristiğinin önemi, senkron bir generatöre bağlı olan türbin için önemlidir. Türbinin veriminin kısmi yüklerde ne kadar düştüğü görülür. Bu eğri ne kadar yatık ise kısmi yüklerdeki verimi o kadar iyi olacaktır. Şekil 3.2'de Francis türbine ait sabit hız karakteristiği görülmektedir.



Şekil 3.2 Sabit Hız Karakteristiği

### 3.1.7.2. Sabit Açıklık Karakteristiği

Türbin sabit bir düşü ve sabit bir debide çalıştırılır ve buna mukabil yük değiştirilirse, şüphesiz devir sayısı da değişecektir. Moment, hız büyüdükçe azalmaktadır. Bununla birlikte her kanat açıklığında farklı eğriler elde edilecektir. Şekil 3.3'de sabit açıklık karakteristiği verilmiştir.



Şekil 3.3 Sabit Açıklık Karakteristiği

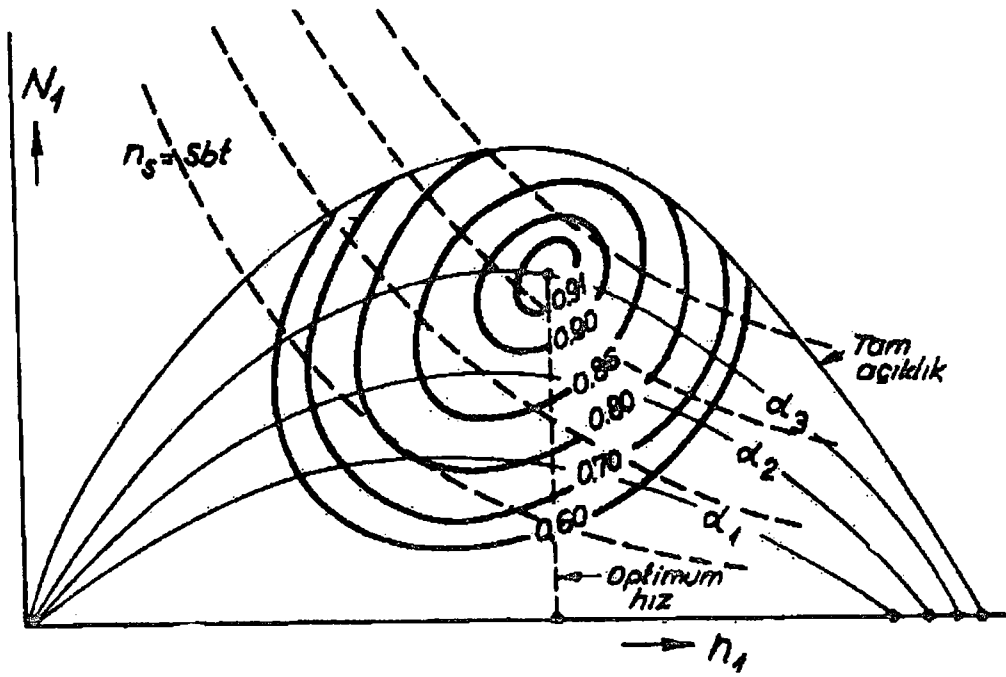
Güç eğrisi sıfırdan başlayıp yükselir ve sonra bir  $n_o$  değeri için tekrar sıfır olur. Bu değer aynı şekilde moment eğrisinde de benzerlik gösterir. Bu devir adedine türbinin Ambalman Hızı denir. Ambalman Hızı bir hidrolik türbinin üzerinde yük kalkınca türbinin boşa alacağı maksimum hızdır. Bu değer bilmesi gerekir ve şartnamelerde herhangi bir arıza durumunda sistemin bu hızda 2-5 dakika arasında dayanması istenmektedir.

Sabit açıklıkta çizilen bilhassa alçak düşümlü türbinlerde önemli bir karakteristik olan diğer bir karakteristik, düşüye göre gücün ve verimin değişimini gösteren eğrilerdir.

### 3.1.7.3. Dağ Eğrileri

Sabit hız karakteristikleri ile sabit açıklık karakteristikleri birlikte ele alınırsa  $n$ ,  $N_e$  gibi iki değişken cinsinden verimin değişimi çizilecektir. İki değişkeni aynı grafikte gösteren bu diyagrama, dağ eğrileri diyagramı denir. Bütün bu işlemlerde  $H_0$  net düşünün sabit tutulduğu kabul edilmelidir.

$H_0$  net düşünün her değeri için bu şekilde yeni bir diyagram çizileceğinden dağ eğrileri ailesinin sonsuz olduğu görülecektir. Yalnız birinden diğerine hesap yoluyla geçmek mümkündür. Bu nedenle  $H_0=1$  metre olarak alındığında çizilen eğri, tüm eğrileri temsil eder. Şekil 3.4'de bir Francis türbinin buna göre çizilmiş dağ eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Dağ Eğrilerinin Genel Formu

### 3.2. Hidrolik Türbin Tipleri

Hidrolik makineler, hidrolik türbinler (su türbinleri) ve su çarkları olmak üzere ikiye ayrılırlar. Hidrolik türbinlerin dinamik hidrolik olmasına karşılık su çarkları, su ağırlığı kuvveti makineleridir. Hidrolik türbinler suyun akım enerjisini devamlı olarak dönen çarklar (rotorlar) yardımı ile mekanik enerjiye çeviren döner (dinamik) hidrolik makinelerdir. Hidrolik türbinin rotor kanatlarının aralıklarından geçirilen suyun basınç enerjisi ile hız enerjisi, dönen türbin rotor kanatlarının aralıklarında mekanik enerjiye dönüşürler. Buna karşılık su çarklarında, suyun mevcut olan potansiyel enerjisi suyun çark kepeçlerine vurmak ve ağırlık tesiri ile çarkı döndürmek sureti ile mekanik enerjiye dönüşür.

Hidrolik türbinler takriben 150 yıldan beri imal edilmektedir. 19. yüzyıl içinde Fourneyron, Jonval, Henschel, Schwamkruo, Zuppinger vs tarafından geliştirilmiş olan basit ve küçük güçlü su türbinleri çok çabuk yapılmış ve su türbinlerinin tahrik ettiği generatörlerde üretilen elektrik enerjisi 1891 yılında Oscar von Miller tarafından enerji iletim hattı ile uzak yerlerdeki tüketim alanlarına nakledilmiştir. Su türbinlerinde elde edilen elektrik enerjisinin enerji iletim hatları ile uzak mesafelere iletilmesi ile birlikte daha büyük, daha güçlü ve birbirleri ile paralel olarak çalışan HES'ler kurulmaya başlanmıştır. Ancak modern anlamda otomatik olarak yük-frekans ayarlaması yapılabilen hidrolik türbinler 1920'lerden itibaren yayılmaya başlamışlardır. Artık bu tip türbinler çok yaygın olarak kullanılmakta, günümüzde

imal edilen büyük güçlü hidrolik türbinlerin verimleri %93 ila %95 mertebesine kadar yükselmiş bulunmaktadır.

Hidrolik türbinler birkaç şekilde sınıflandırmak mümkündür. Türbin rotor girişindeki basınca göre sınıflandırma şöyle yapılabilir:

Üst basınç türbinleri:	Francis tipi hidrolik türbin
	Kaplan tipi hidrolik türbin
Serbest püskürtmeli türbinler:	Pelton tipi hidrolik türbin
	Cross-Flow tipi hidrolik türbin

Hidrolik Türbinler, aksiyon tipi veya reaksiyon tipi türbinler olarak sınıflandırılır. Aksiyon tipindeki Pelton ve Cross-Flow türbinlerinde su, hızı ile etkir. Yani burada türbini girişi ile çıkışı arasındaki enerji farkı esas itibariyle kinetik enerji farkına tekabül etmektedir. Diğer bir deyişle bu türbinlerde giriş ve çıkış basınçları eşittir. Bu bakımdan reaksiyon derecesi sıfırdır. Bu türbinlerin özgül hızları küçük olup reaksiyon türbinlerine oranla yüksek düşülerde kullanılırlar. Buna karşılık debileri küçüktür. Cross-Flow hidrolik türbin, bir aksiyon türbin olarak tanımlanır; ama yapılan çalışmalar sonucunda reaksiyon derecesinin sıfır olmadığı görülmüş ve hem aksiyon hem de reaksiyon sınıflarına dahil edilmiştir.[10]

Reaksiyon tipi hidrolik türbinlerde; türbin rotor kanatlarının aralıklarında suyun giriş basıncında bir düşme meydana gelir ve bu düşme suyun ivmelenmesine yani hızlanmasına neden olur. Hızlanan su türbinden çıkarken bir kuvvet oluşturur ve türbin dönmeye başlar. Türbin, suyun oluşturduğu bu kuvvet ile çalışır.

Bu çalışmada hidrolik türbinler incelenirken küçük ve çok küçük HES'lerde faydalanabilirliklerine göre değerlendirilmiştir. Bu HES'ler yani küçük debi yüksek düşü ya da küçük düşü yüksek debi bölgesinde yer almaktadır. Kurulu güçleri 100 kW'tan az olan santrallere küçük HES'ler denildiği için bu bölgede iki parametrenin de büyük olması gücün fazla olmasını gerektirir. Dolayısı ile Pelton, Francis, Cross-Flow türbinleri bu bölgelerde çalışabilecek türbinlerdir ve bu yüzden sadece bunlar incelenmiştir.

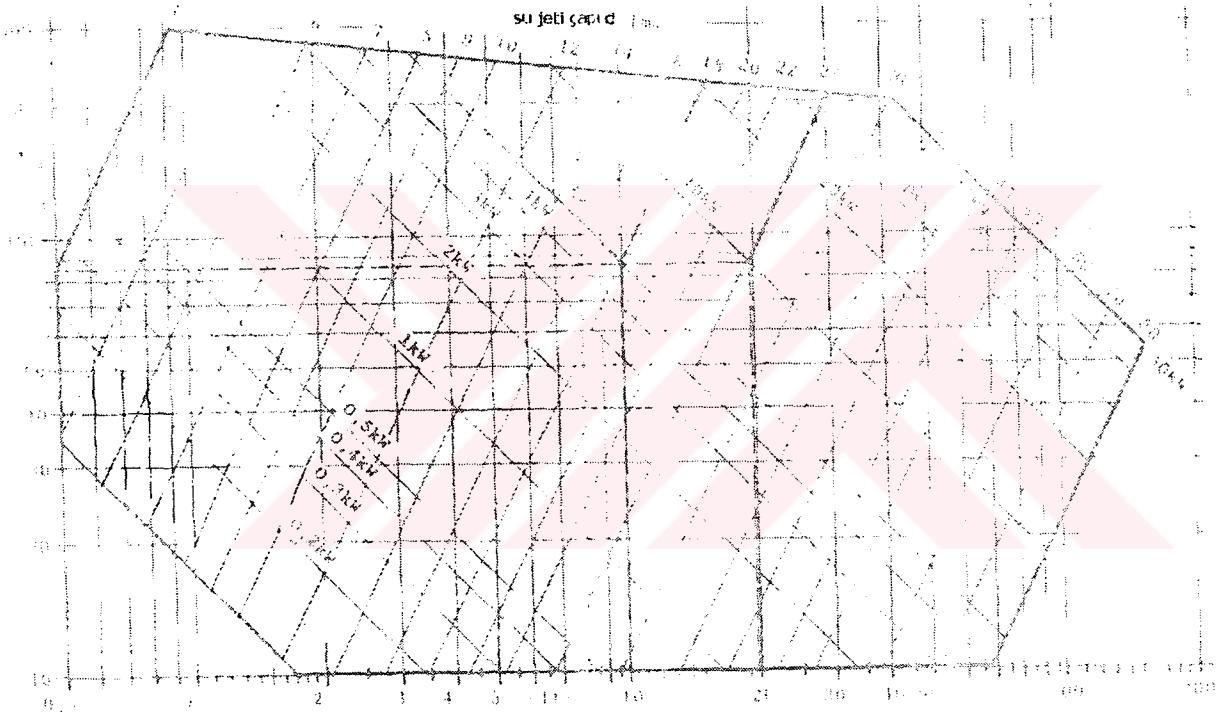
Hidrolik türbinlerde verimin genel denklemi,

$$\eta_h = \frac{U_1 C_1 \cos \alpha_1 - U_2 C_2 \cos \alpha_2}{g.H} \quad (3.21)$$

### 3.2.1. Pelton Tipi Hidrolik Türbin ve Özellikleri

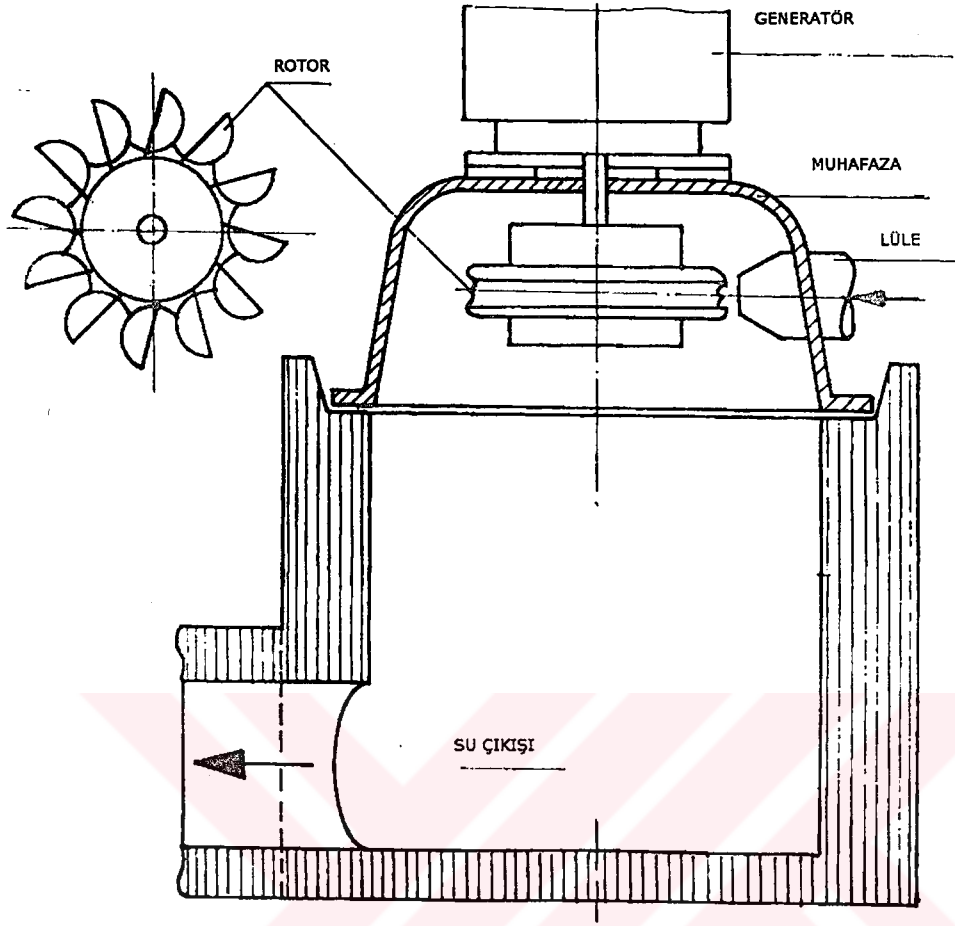
1880 yılında Lester Pelton tarafından ana prensipleri ortaya konulan ve patenti alınan pelton türbininin yapısı biraz değişerek günümüze kadar gelmiştir. Bu türbin, önce yüksek basınçlı suyu atmosfer basıncına püskürtmekte ve bu suretle elde edilen yüksek hızlı su jetinin kinetik enerjisini kepçeli olan çarkları vasıtası ile türbin miline intikal ettirmektedir.

Bir pelton türbinini karakterize eden boyutlar; türbinin özgül hızı  $n_s$ , su jetinin çapı  $d_0$  ve jet ekseninin teğet olduğu çark çapı  $D_0$  değerleridir. Uygulamada  $d_0/D_0$  oranı 1/100 ile 1/6 arasında değişen değerler alırlar.  $d_0$  değeri küçük ve  $D_0$  değeri büyük olursa, suyun püskürtücüden çıkış ile çark keçesine giriş arasındaki kat edeceği mesafe büyüyecek ve jet dağılmaya başlayacaktır. Bu hal verim üzerinde negatif bir tesir oluşturacaktır. Aksine olarak,  $d_0/D_0$  oranı çok küçükse keçeler içinde akış şartları, keççe başına debinin büyük oluşu dolayısı ile verimi düşürecektir. Birinci hal küçük  $n_s$  değerleri ve ikinci hal ise büyük  $n_s$  değerleri için mevcuttur. Pelton türbinlerinde en başarılı  $n_s$  değerleri 1-30 d/d arasındadır.[19]



Şekil 3.5. Micro Pelton Türbinlerinin Çalışma Bölgesi

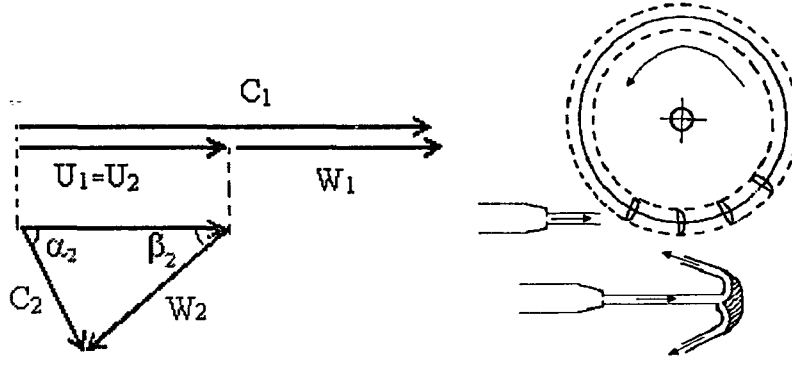
Şekil 3.5'de günümüzde imal edilen micro pelton türbinlerin çalışma bölgeleri verilmiştir. Görüldüğü gibi debi 0,5-0,15 lt/s, düşü 10-300 m ve güç ise 0,1-100 kW arasında değişmektedir.[12]



Şekil 3.6 Pelton Türbinin Genel Görünüşü

Şekil 3.6'da gösterilen sistemin çalışması şöyledir: Düzeden yüksek  $C_1$  hızı ile çıkan su, kepçeye çarparak hız enerjisini kaybetmektedir. Kepçeye  $C_1$  mutlak hızı ile giren suyun çarkı  $C_2$  mutlak hızı ile terk ettiği düşünülürse giriş ve çıkış üçgenleri Şekil 3.7'de olduğu gibidir. Giriş hız üçgeni bir doğru parçasından ibaret olacaktır.  $U_1$  sürüklenme hızı çıkıştaki  $U_2$  hızına eşittir ( $U_1 = U_2 = U$ ). Çıkışta  $W_2$  bağıl hızı çarka teğet olacağından,  $\beta_2$  aynı zamanda hız üçgeninin açısı olacaktır. Buradan moment ifadesi şu şekil yazılır:

$$M = \frac{\gamma}{g} Q \cdot r \cdot (C_1 - C_2 \cdot \cos \alpha_2) \quad (3.22)$$



Şekil 3.7 Pelton Türbinin Giriş ve Çıkış Hız Üçgeni

Güç ifadesi ise,

$$N_h = \frac{M \cdot \omega}{75} = \frac{\gamma Q r \omega}{g \cdot 75} \cdot (C_1 - C_2 \cdot \cos \alpha_2) \quad (3.23)$$

$$N_h = \frac{Q \cdot \gamma}{75 \cdot g} \cdot (C_1 U_1 - C_2 \cdot U_1 \cos \alpha_2) \quad (3.24)$$

olarak basitleştirilir. Buradan hidrolik verim hesaplanacak olursa,

$$\eta_h = \frac{U(C_1 - C_2 \cdot \cos \alpha_2)}{g \cdot H} \quad (3.25)$$

bulunur. Maksimum verim ise,

$$C_1 = U + w_1 \quad (3.26)$$

$$C_2 \cdot \cos \alpha_2 = U - w_1 \cdot \cos \beta_2 \quad (3.27)$$

Bu denklemler 3.24'de yerine yazılarak,

$$\eta_h = \frac{U(w_1 + w_2 \cdot \cos \beta_2)}{g \cdot H} \quad (3.28)$$

şeklinde hesaplanır.

Kepçe içindeki akış sürtünmesiz olursa, yani bu akışta herhangi bir kayıp olmazsa bağlı hız değişmez yani  $w_1 = w_2$  olacaktır. Gerçekte az da olsa bir kayıp meydana gelecektir. Bu durumda,

$$w_1 = \varphi \cdot w_2 \quad (3.29)$$

yazılır. Burada  $\varphi$ , 1'den küçük olmak üzere bir katsayıdır. B eşitlik göz önüne alınarak denklem (3.28) yerine konulursa

$$\eta_h = \frac{Uw(1 + \varphi \cdot \cos \beta_2)}{g \cdot H} \quad (3.30)$$

yazılır. Bu denklemde düşü ve kepçe formu sabit bırakılarak devir sayısı değiştirilirse, bu durumda verim değişecektir. Verimin maksimum yapan devir sayısı değeri araştırılırsa,

$$\frac{d\eta_h}{dU} = 0 \text{ şartından}$$

$$U = \frac{C_1}{2} \quad (3.31)$$

sonucu bulunur. Şu halde, pelton türbinlerinde en iyi verimin elde edilebilmesi için, çarkın su jeti (hüzme) hızının yarı hızıyla çevrilmesi gerekmektedir.

Küçük ve çok küçük HES'lerde kullanılan pelton türbinlerin hesaplamaları genel itibari ile aşağıdaki denklemlerle yapılmaktadır.

$$C_1 = \phi_a \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (3.32)$$

$\phi_a = 0,96 \dots 0,98$  arasında değişmektedir.

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot C_1}} \quad (3.33)$$

$$U_1 = k_u \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (3.34)$$

$$k_u = 0,45 \dots 0,49$$

$$b = (2,5 \dots 3,2)d \quad (3.35)$$

$$D = \frac{60 \cdot U_1 \cdot i}{\pi \cdot n} \quad (3.36)$$

Türbin çark çapı  $D$  ile belirtilirse  $i$ : iletim oranı (türbin, generatöre direk akuple bağlı ise 1 alınır)  $n$ : türbin devir sayısı

$$a \approx 1,2d$$

$$k = (0,1 \dots 0,17)D$$

$$Z = \frac{D\pi}{2d} \quad (3.37)$$

Yukarıda belirtilen eşitlikler doğrultusunda bir pelton türbinin kontrüksiyonunun hesabı yapılabilir. Net düşüşü 86 m, akuple bağlı generatörün gücü 10 kW, dakikadaki devir sayısı 1500 ve genel verimi % 60 olan bir pelton türbinin hesabı yapılırsa; denklem (1.5)'den debi hesaplanır,

$$Q = \frac{P.1000}{\gamma.g.H.\eta_T} = \frac{10.1000}{86.9,81.1000.0,6} = 0,01975 \text{ m}^3/\text{s} = 19,75 \text{ lt/sn} \approx 20 \text{ lt/s}$$

daha sonra hız üçgen büyüklüklerinden  $C_1$  ve  $U_1$  hesaplanır.

$$C_1 = \phi_a \sqrt{2.g.H} = 0,97 \sqrt{2.9,81.86} = 39,84 \text{ m/s}$$

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi.C_1}} = \sqrt{\frac{4.0,02}{\pi.39,84}} = 0,0253 \text{ m} = 25,3 \text{ mm}$$

$$U_1 = k_u \sqrt{2.g.H} = 0,46 \sqrt{2.9,81.86} = 18,9 \text{ m/s}$$

bu değerlere göre çark çapı,

$$D = \frac{60.U_1}{\pi.n} = \frac{60.18,9}{\pi.1500} = 0,2406 \text{ m} = 24,06 \text{ cm}$$

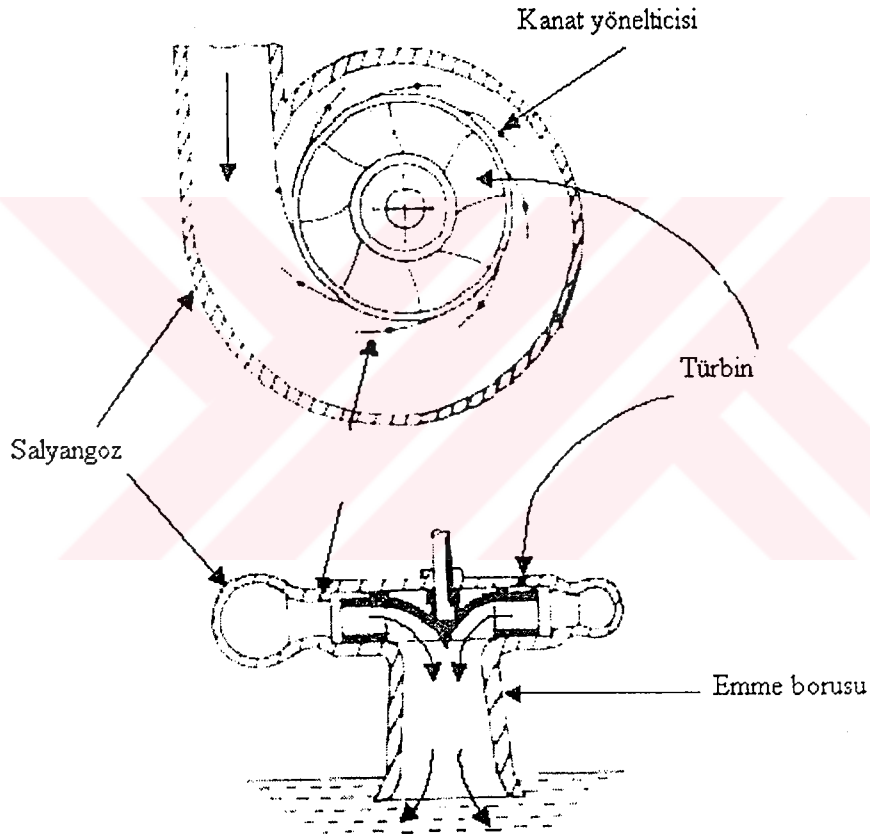
$$b = 2,85d = 2,85.25,3 = 72,1 \text{ mm}$$

$$Z = \frac{D\pi}{2d} = \frac{240,6\pi}{2.25,3d} = 14,94 \text{ yani, 15 kepçeli olur.}$$

### 3.2.2. Francis Tipi Hidrolik Türbin ve Özellikleri

Francis tip hidrolik türbinler ilk olarak 1838 yılında Amerikalı HOWD tarafından keşfedilmiş ve 1848 yılında Francis tarafından geliştirilerek denenmiştir.

Yüksek basınçlı (reaksiyon) türbinlerindendir. Döner çarka su girdiği esnada toplam düşünün bir kısmı kanatlar içerisinde giriş hızı olarak kullanılır. Düşünün arta kalan kısmı çark içerisinde işlenir. Gücü 50 KW-500 MW arasında olan Francis türbinler yapılmıştır. Üst basınçlı türbinler sınıfına giren Francis türbinleri salyangoz adı verilen yapılar ile kullanılır. Salyangoz ve Francis türbinin genel görünüşü Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8 Francis Türbinin Genel Görünüşü

Özgül devir sayıları 80-400 arasında değişmektedir [19][20]. Bu türbinler debinin ve düşünün az olmadığı yerlerde kullanılırlar. Özgül devir sayısını bulunması için bazı amprik formüller vardır ve bunlar şöyledir [3] :

A.Öesterlen

$$\text{Maksimum } n_s = \frac{3500}{H_n^{0.7}} \quad (3.38)$$

Voith  $\text{Maksimum } n_s = \frac{4140}{H_n^{0,7}} \quad (3.39)$

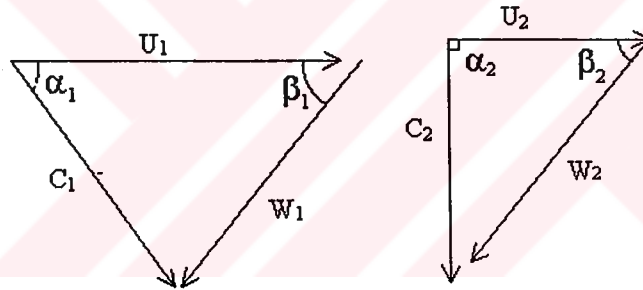
Kuarner Grug  $\text{Maksimum } n_s = \frac{5000}{H_n^{0,7}} \quad (3.40)$

Exayazarof  $\text{Maksimum } n_s = \frac{5000}{H_n^{0,75}} \quad (3.41)$

USA Bureau of Reclamation  $\text{Maksimum } n_s = \frac{2334}{H_n^{0,5}} \quad (3.42)$

F.Sierruo ve F.Lervo  $\text{Maksimum } n_s = \frac{3470}{H_n^{0,65}} \quad (3.43)$

Denklem (3.21)'de hidrolik türbinlerin genel verim denklemi verilmiştir. Reaksiyon türbinlerinde nominal çalışma durumunda çıkış mutlak hızının teğetsel bileşeni ( $\alpha_2 = 90^\circ$ ) Şekil 3.9'a bakılacak olursa sıfırdır.



Şekil 3.9 Francis Türbin Giriş ve Çıkış Hız Üçgenleri

Bu duruma göre verimin son hali,

$$\eta_h = \frac{U_1 C_1 \cos \alpha_1}{g \cdot H} \quad (3.44)$$

olarak elde edilir. Buradan şu tanımlamalar yapılırsa,

$$k_U = \frac{U}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H_0}} \quad (3.45)$$

$$k_W = \frac{W}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H_0}} \quad (3.46)$$

$$k_{C1} = \frac{C}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H_0}} \quad (3.47)$$

bu tanımlamalar denklem (3.21)'de yerine yazılırsa,

$$\eta_h = 2K_{U1}K_{C1} \cos \alpha_1 \quad (3.42)$$

olarak elde edilir.

Francis türbinin boyutları hakkında genel bilgiye sahip olmak açısından Tablo 3.2 yararlı olacaktır.  $B$  Francis türbininin giriş ağız yüksekliği olmak üzere,

Tablo 3.2. Değişik özgül sayılarında  $k_{U1}$  ve  $B/D$  değerleri

$n_s$	$k_{U1}$	$B/D$
80	0,64	0,08
100	0,65	0,13
150	0,70	0,24
200	0,74	0,35
300	0,85	0,55
400	0,96	0,65

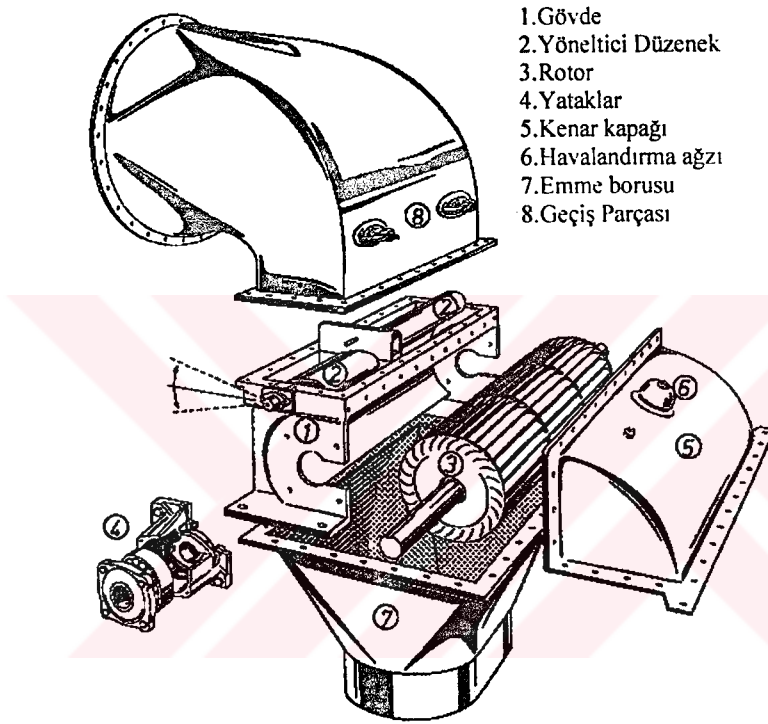
### 3.2.3. Cross-Flow Tipi Hidrolik Türbin ve Özellikleri

Küçük hidrolik tesisleri için basitliği ve işletme özellikleri yüzünden, hala klasik türbinler arasında kullanılan bir tiptir. Diğer bütün çark ve türbinlerin aksine, burada su çarkı iki defa geçer. Serbest su püskürtmeli hidrolik sınıfına giren bu türbin çeşidi, 1903 'de Avusturyalı mühendis M.Michell tarafından ortaya atılmıştır. 1917 'de Almanya'da Macar profesör Donat Banki tarafından türbinin teorisi kurulmuş ve Banki adına patent alınmıştır.[13] Literatürde adı Cross-Flow, Osberger, Cink, Michell-Banki türbini olarak geçmektedir.

Cross-Flow türbini esas olarak bir aksiyon türbini sayılırsa da, son senelerdeki gelişimi ile birinci kademede küçük bir reaksiyon derecesi elde edilmiştir. Yani birinci kademede suyun girişi ile çıkışı arasında hafif bir basınç farkı vardır. İkinci kademede, su kanatları tam doldurmadığından reaksiyon derecesi sıfırdır. Bu türbin özgül devir sayısı yönünden Francis ile Pelton türbinleri arasında yer alır. Diğer klasik türbinlerden farklı bir yapısı olan Cross-Flow türbinin teorisinin ortaya atılmasından sonra Sonnek [14], Macmore ve Merryfield[15] gibi araştırmacılar kendi hesap yöntemlerini bu teoriden faydalanarak deneysel sonuçlarla birlikte-

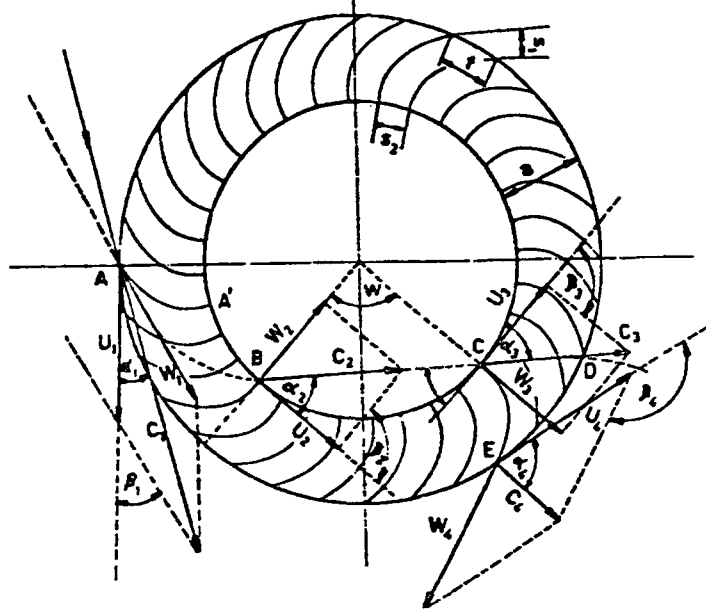
vermişlerdir. Türkiye’de Özgür [16], Yazıcı [17], Başeşme,[11] gibi yazarlar kitaplarında bu türbine yer vererek tanıtmışlardır.

Genel görünüşü Şekil 3.10’da verilen Cross-Flow türbinin en önemli iki parçası, çark ve su hüzmesini çarka gönderen su giriş ağızıdır. Giriş ağızı dikdörtgenel bir kesite sahip olup çarka belirli bir açıda jeti gönderecek şekilde tasarlanmıştır. Giriş ağızı içersinde jeti kesitini değiştirerek debi ve güç ayarını sağlayan bir ayar mekanizması vardır.



Şekil 3.10 Cross-Flow Türbininin Genel Görünüşü

Çark iki paralel dairesel diskin bir dizi eğrisel kanatla birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Giriş ağızını terk eden su jeti, Şekil 3.11’den de görüleceği gibi çarka önce A noktasında girmekte A<sup>1</sup> noktasından çark içerisindeki boşluğa geçmektedir. Daha sonra C noktasında tekrar ikinci defa kanat dizisine girmekte ve E noktasından çarkı terk etmektedir. Böylece hüzme çarka iki defa girmiş olmaktadır.

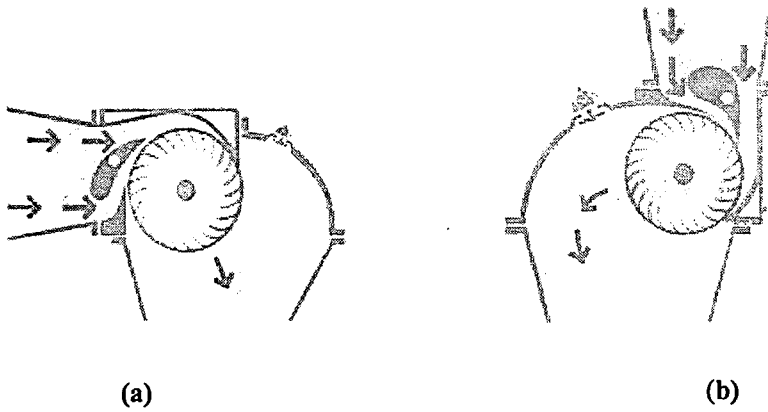


Şekil 3.11 Türbin İçerisindeki Hız Üçgenleri

Şekil 3.12.a ve Şekil 3.12.b'de ise su giriş ağızı farklı olan iki Cross-Flow türbin verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde görülecektir ki; basınçlı bir boru ile dikdörtgen kesitli lüleyle sevk edilen su, çarkın eksen seviyesine yakın seviyeden çarka gönderilir. Burada üst basınca maruz kalan ilk kademede elde edilen güç ile ikinci kademede elde edilen güçlerin oranı, Bernoulli denklemleri yardımı ile 4,6 olarak hesaplanmıştır. Özgül hız için,  $B_c$  çark genişliğini göstermek üzere,

$$n_s = (75 \text{ ile } 120) \sqrt{\frac{B_c}{A}} \quad (3.43)$$

ifadesi bir fikir vermektedir. Burada B çark genişliği göstermektedir ve çark çapının 3,5 katına kadar çıkartılabilmektedir. Özgül hız 40 ile 200 arasında değişir. Çark çapları 20-80 cm arasında değişir.[18]



Şekil 3.12 Cross-Flow Türbininin Yatay ve Düşey Kullanımları

Şekil 3.11'e göre Cross-Flow türbin çarkına A noktasından giren su jetinin mutlak hızı  $C_1$  ile çevresel hız  $U_1$  arasındaki açı  $\alpha_1$ 'dir. A noktasındaki  $C_1$  şu şekilde hesaplanır:

$$C_1 = \phi_a \sqrt{2.g.H} \quad (3.44)$$

Burada,  $C_1$ : Su hüzmesinin mutlak hızı

$H$ : Net düşü

$\phi_a$ : Giriş ağzı geometrisine bağlı bir katsayıdır.

A noktasında, suyun bağıl hızı  $W_1$  ile çarkın çevresel hızı  $U_1$  arasındaki açı kanat açısı olup,  $\beta_1$  ile gösterilmektedir. Şekil 3.10'da AA' eğrisiyle çarkın bir kanadı gösterilmiştir. Çarkın B noktasındaki bağıl hız  $W_2$ , çevresel hız  $U_2$  ile  $\beta_2$  açısını yapmaktadır. Bu noktada suyun mutlak hızı  $C_2$  ile  $U_2$  çevresel hızı arasındaki açı  $\alpha_2$ 'dir. Hüzmenin çark içersindeki boşluğu geçip tekrar çark iç çemberi üzerindeki C noktasına ulaştığı sürede mutlak hızın değeri değişmemektedir. Su hüzmesi CD mutlak yörüngesini takip ederek D noktasında çarkı terk eder. Böylece  $\alpha_2 = \alpha_3$ ,  $\beta_2 = \beta_3$ ,  $\beta_1 = \beta_4$  olur.

Bütün su türbinleri için geçerli temel denklem Euler denklemi olup en genel haliyle denklem 3.16 da belirtilmişti, türbinin hidrolik gücü,

$$N_h = \gamma.Q.\eta_h.H \quad (3.45)$$

şeklinde yazılıp  $\eta_h.H$  bağıntısı denklem (3.16)'den çekilip denklem (3.45)'de yerine yazılırsa hidrolik güç için ,

$$N_{fr} = \gamma.Q.(U_1C_1 \cos \alpha_1 - U_2C_2 \cos \alpha_2) / g \quad (3.46)$$

eşitliği elde edilir. Serbest akım türbinleri, seri bağlı iki türbin gibi düşünüldüğünde hidrolik güç  $N_h$  için ( $\gamma = \rho.g$ ),

$$N_h = \rho.Q.(U_1C_1 \cos \alpha_1 - U_2C_2 \cos \alpha_2) + \rho.Q.(U_3C_3 \cos \alpha_3 - U_4C_4 \cos \alpha_4) \quad (3.47)$$

eşitliği elde edilir. Gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$N_h = \rho.Q.(U_1C_1 \cos \alpha_1 - U_4C_4 \cos \alpha_4)$$

bağıntısı elde edilir. Şekil 3.10'daki hız üçgenlerinden,

$$C_4 \cos \alpha_4 = U_4 - W_4 \cos(180 - \beta_4)$$

$$C_1 \cos \alpha_1 = U_1 + W_1 \cos \beta_1$$

eşitlikleri yazılır.  $\beta_1 = 180^\circ - \beta_4$ ,  $W_4 = \phi_b W_1$  bağıntılarıyla (3.49) ve (3.50) denklemleri kullanılarak hidrolik güç,

$$N_h = \rho \cdot Q \cdot U_1 (C_1 \cos \alpha_1 - U_1) (1 + \phi_b) \quad (3.51)$$

halini alır. Denklemdaki  $\phi_b$ , kanat geçişlerindeki sürtünmeyi dikkate alan bir katsayıdır. Türbin girişindeki teorik güç,

$$N_0 = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (3.52)$$

olarak yazılır.  $H$  net düşünün denklemleri (3.44)'deki değeri denklemleri (3.52)'de yerine yazılırsa,

$$N_h = \gamma \cdot Q \cdot C_1^2 / 2 \cdot g \phi_a^2 \quad (3.53)$$

elde edilir. Türbini hidrolik verimi için

$$\eta_h = \frac{N_h}{N_0} \quad (3.54)$$

yazılır ve gerekli eşitlikler yerine konulursa hidrolik verim için,

$$\eta_h = 2 \cdot \phi_a^2 \cdot (1 + \phi_b) \left( \frac{U_1}{C_1} \right) \left( \cos \alpha_1 - \left( \frac{U_1}{C_1} \right) \right) \quad (3.55)$$

bağıntısı elde edilir. Maksimum verim şartı olarak

$$\frac{d\eta_h}{d\left(\frac{U_1}{C_1}\right)} = 0 \quad (3.56)$$

şartı için gerekli kısaltmalar yapılırsa,

$$\frac{U_1}{C_1} = \frac{\cos \alpha_1}{2} \quad (3.57)$$

elde edilir. Bu bağıntı verim eşitliğinde yerine yazıldığında,

$$\eta_h = \phi_a^2 \cdot (1 + \phi_b) \cos^2 \alpha_1 / 2 \quad (3.58)$$

bulunur. Bu eşitlik bize hidrolik verimin,  $\alpha_1$  giriş açısına,  $\phi_a$  giriş ağızı sürtünme katsayısına ve  $\phi_b$  kanat sürtünme katsayısına bağlı olduğunu göstermektedir.  $\phi_a$  ve  $\phi_b$  katsayılarının 1 olabilmesi ancak, giriş ağızındaki ve kanat geçişlerindeki kayıpların sıfır olması halinde mümkündür. O halde ideal şartlarda hidrolik verim,

$$\eta_h = \frac{\cos^2 \alpha_1}{2} \quad (3.59)$$

olacaktır.  $\alpha_1$  giriş açısının küçük değerlerinde hidrolik verim artar. Genelde bu açı  $16^\circ$  civarında seçilir. Daha küçük seçilmesi halinde, su jeti çarka girmeyerek kaçak debiye neden olur.

### 3.2.4 Türbin Maliyetleri

Yapımı planlanan küçük ve çok küçük HES'ler için gereken hidrolik türbinlerin seçiminde düşü, debi ve verim ile birlikte boyutlar ve maliyet de en önemli etkenlerdir. Tablo 3.1'de hidrolik türbinlerin tüm üniteleri ile maliyetleri verilmiştir [21].

**Tablo 3.4 Hidrolik Türbinlerin Generatör İle Birlikte Ünite Birim Maliyetleri (x1000\$)**

Çıkış Gücü (kW)	Cross-Flow Türbini	Francis Türbini	Tek Düzeli Pelton Türbini	Çok Düzeli Pelton Türbini
5	2-6	8-10	2-8	2-6
10	2-10	15-20	2-15	2-10
20	3-14	20-30	3-20	3-15
50	5-30	25-70	5-50	5-30
100	30-50	40-100	40-80	15-60

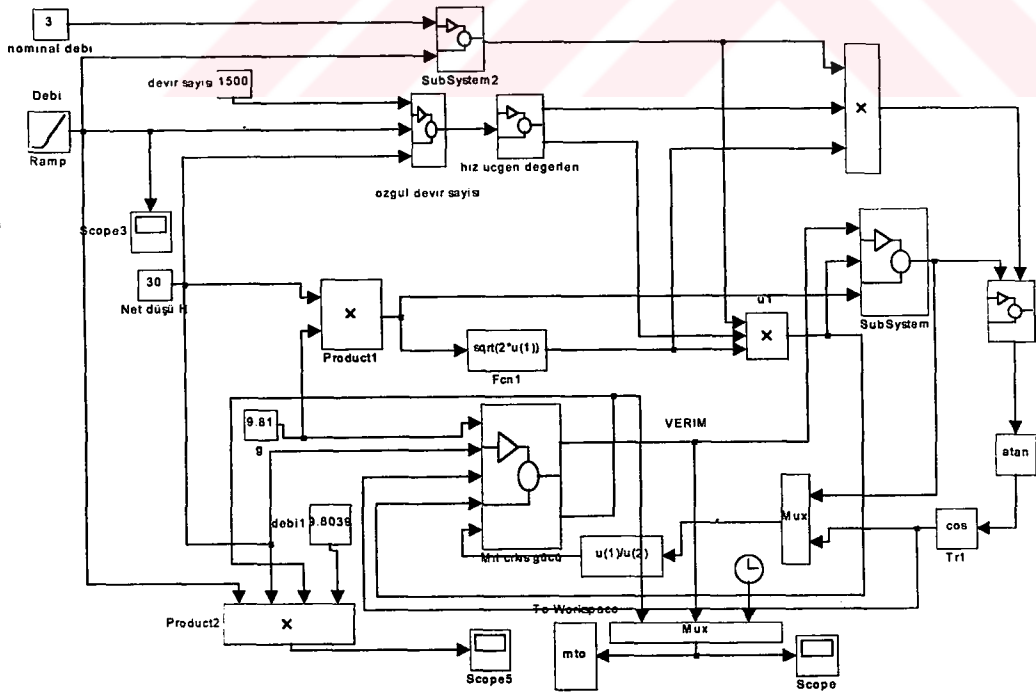
### 3.3 Hidrolik Türbinlerin Modellenmesi

Küçük ve çok küçük hidroelektrik santrallerde kullanılan türbinler hakkında bilgi, bölüm 3.2'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Bu türbinlerin hangi hidrolik düşüde nasıl bir verime sahip olduğu, nasıl bir çıkış gücü verdiğini bilgisayar ortamında görebilmek amacıyla türbin modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller MATLAB/Simulink'te hazırlanmıştır. Aşağıdaki bölümlerde bu modeller sırası ile incelenmiştir.

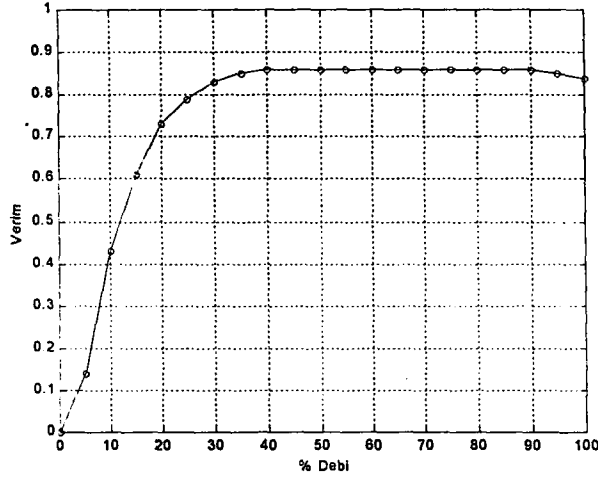
#### 3.3.1. Pelton Tipi Hidrolik Türbinin Modeli

Genel özellikleri ve denklemleri bölüm 3.2.1'de incelenen pelton türbinin modeli şekil 3.13'de verilmiştir. Model, değişik çark çaplarındaki türbinlerin farklı düşü ve debilerde nasıl davranacağını incelemek için oluşturulmuştur.

Model çalıştırılmadan önce çalışma bölgesi tayin edilmesi gerekir. Bu  $H = 50$  m,  $Q = 0.5$  m<sup>3</sup>/sn'lik bir debi, ve 250 d/d şeklindeki değerlerdir. Bu değerlere göre pelton türbinin sabit hız karakteristiği çizdirilirse, şekil 3.14'deki eğri elde edilir. Çalışma bölgesi tanımlanan pelton türbinin değişik düşü ve debilerde nasıl bir davranış sergileyeceği çıkış büyüklüklerinden anlaşılır. Bu çıkış büyüklükleri moment, verim, güç şeklinde sıralanabilir.



Şekil 3.13 Pelton türbinin modeli

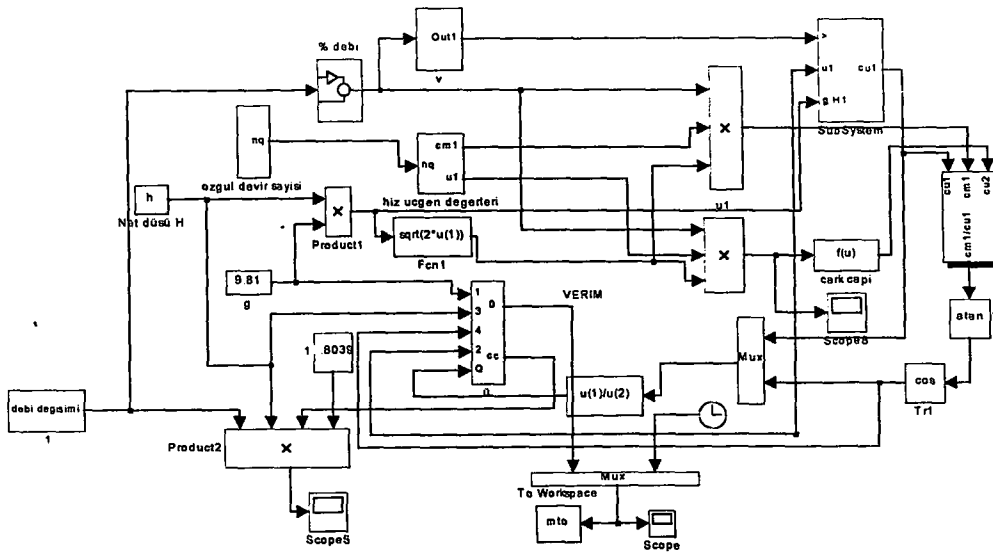


Şekil 3.14 Pelton Türbininin Sabit Hız Karakteristiği

İlerleyen bölümlerde pelton türbininin değişik hidrolik düşü ve debilerdeki davranışı incelenecektir. Bu incelemeler sonucunda pelton türbininin, küçük ve çok küçük ölçekli HES'lerde nasıl bir karakteristiğe sahip olduğu görülecektir.

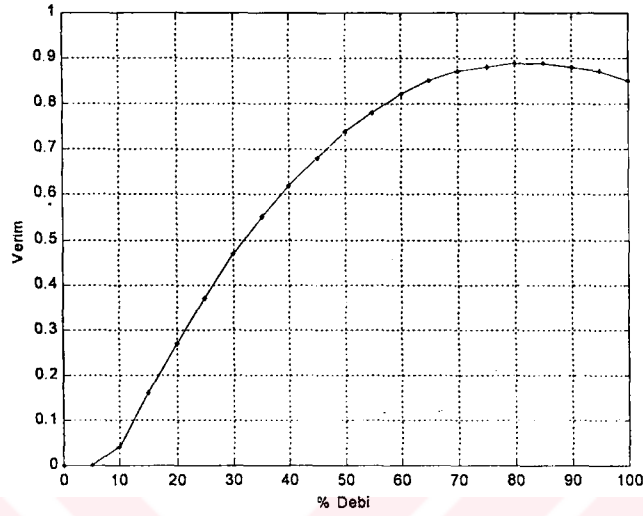
### 3.3.2. Francis Tipi Hidrolik Türbinin Modeli

Genel özellikleri ve denklemleri bölüm 3.2.2'de incelenen Francis türbinin modeli şekil 3.15'de verilmiştir. Francis türbin modeli oluşturulurken  $n_x$  özgül devir sayısına göre hız üçgenlerinin değişimi look-up table oluşturularak iterasyona katılmıştır.



Şekil 3.15 Francis Hidrolik Türbinin Modeli

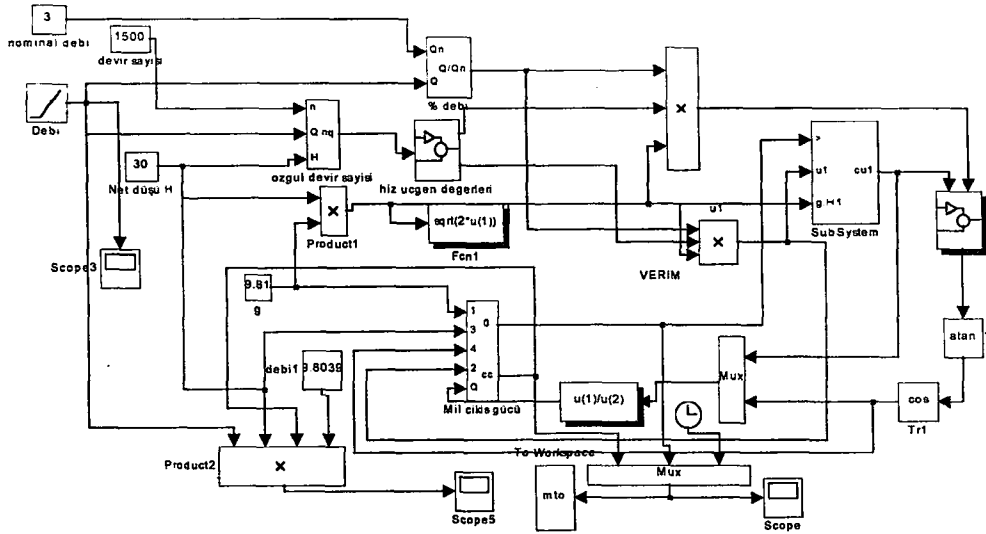
Francis türbine ait bir çalışma bölgesi tanımlaması Pelton türbini için tanımlanan bölge olsun.  $H = 50$  m,  $Q = 0.5$  m<sup>3</sup>/sn'lik bir debi, ve 250 d/d. Bu değerler doğrultusunda tasarlanan francis türbininin sabit hız karakteristiği Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16 Francis Türbininin Sabit Hız Karakteristiği

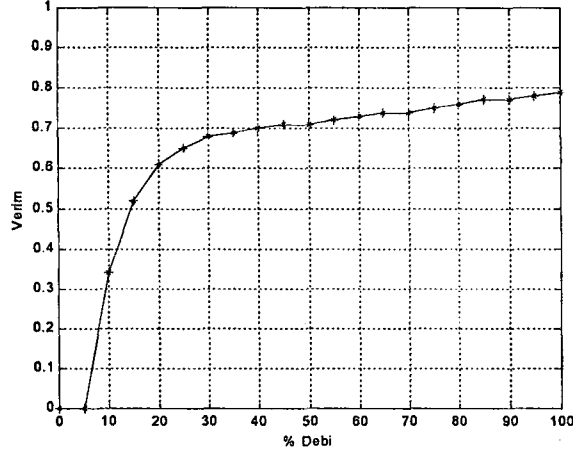
### 3.3.3. Cross-Flow Tipi Hidrolik Türbin Modeli

Genel özellikleri ve denklemleri bölüm 3.2.3'de incelenen Cross-Flow türbinin modeli Şekil 3.17'de verilmiştir. Cross-flow türbin modeli oluşturulurken verim denklemindeki (denklem 3.55) sürtünme katsayıları look-up table oluşturularak iterasyona katılmıştır.



Şekil 3.17 Cross-Flow Hidrolik Türbin Modeli

Bölüm 3.2.1 ve 3.2.2’de tanımlanan bölgede Cross-Flow türbin kullanılırsa, bu türbinin sabit hız karakteristiği Şekil 3.18’deki gibi olur.



Şekil 3.18 Cross-Flow Hidrolik Türbininin Sabit Hız Karakteristiği

## 4. HİDROLİK TÜRBİNLERİN BİLGİSAYAR BENZETİMİ

### 4.1 Giriş

Kurulacak HES'ler değişik yapılarda olabilir. Bunlar kullandıkları suyun durumuna göre biriktirmeli (Reservoir) veya biriktirmesiz (Run-of-river) santral olabilirler. Biriktirmeli HES'lerde debinin değişimi azdır, ancak biriktirmesiz HES'lerde bu değişim fazladır. Debi değişimleri, hidrolik türbinlerin verimlerinde ve çıkış güçlerinde değişimlere neden olur. Biriktirmesiz HES'lerin projelendirilmesinde maksimum ve minimum debinin göz önüne alınması gereklidir. Yapılan modellemelerdeki amaç, bu değişimlerde hidrolik türbinlerin nasıl etkilendiklerine cevap bulabilmektir.

Değişik düşü ve debi bölgelerinde elde edilen türbin karakteristikleri, değerlendirme ve seçim için tek başına baz teşkil etmez. Türbinlerin çalışma bölgelerinin örtüşmesi halinde türbin seçim kriterleri; devir sayısı, suyun türbine giriş ve çıkışındaki akış tekniği, kısmi yükte çalışma halindeki verim, yer ihtiyacı, tesisin tüm maliyeti, işlenen suyun durumu, tamirat ve bakım kolaylıklarıdır.

Modellenen hidrolik türbinlerin düşü, debi, yük ve verim ilişkilerini ortaya çıkarmak için sabit hız karakteristikleri kullanılacaktır. Önce değişik düşü durumlarında çıkış gücünün nasıl değiştiği gözlenecek, daha sonra bu düşülerdeki türbinlerin verimleri incelenecektir. Hesaplanan çıkış güçlerinde generatör verimi  $\eta_G = 0,95$  alınmıştır.

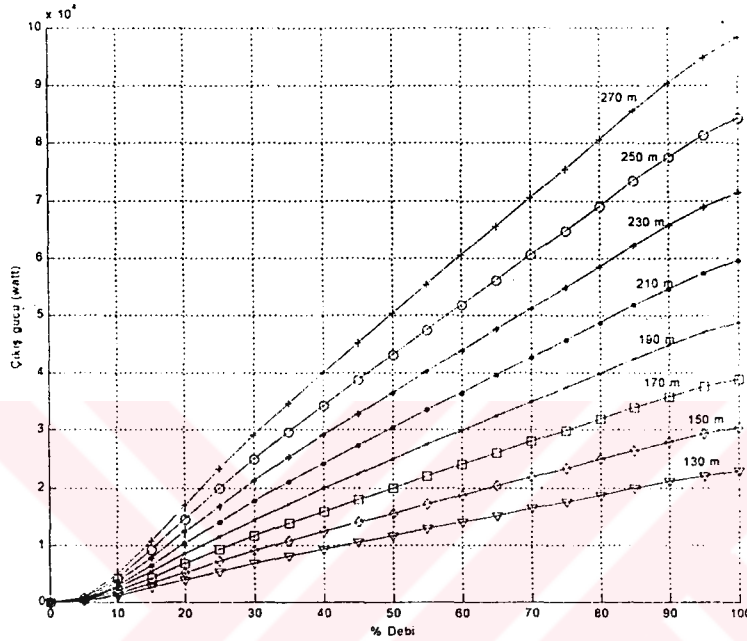
### 4.2 Pelton Tipi Hidrolik Türbinin Bilgisayar Benzetimi

Pelton tipi hidrolik türbininin çalışma bölgesi; debinin az, düşünün fazla olduğu yerlerdir. Bu çalışmada, sırası ile 100, 50, 20, 10 ve 5 kW gücündeki Pelton türbinlerinin çalışma bölgelerindeki davranışları incelenmiştir. Ele alınan Pelton tipi hidrolik türbinler ve bunlara ait veriler üretici firmaların katalog değerleri olarak Tablo 4.1'de verilmiştir.

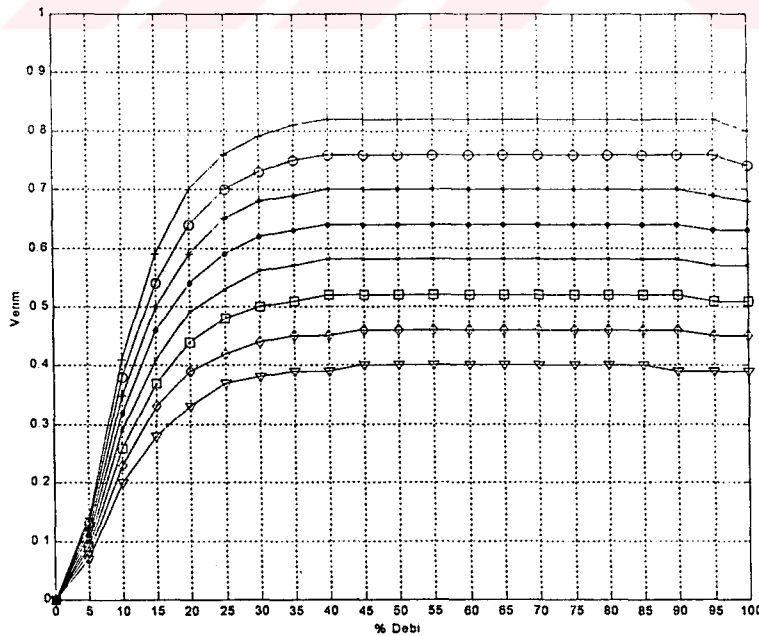
Tablo 4.1 İncelenen Pelton Türbinlerinin Verileri

Tipi	Düşü (m)	Debi ( $m^3 / sn$ )	Türbin çapı (cm)	Devir sayısı (d/d)	Çıkış gücü (kW)
P <sub>1</sub>	270	0,055	100	250	100
P <sub>2</sub>	100	0,085	75	250	50
P <sub>3</sub>	60	0,05	60	250	20
P <sub>4</sub>	80	0,02	50	250	10
P <sub>5</sub>	70	0,01	35	250	5

$P_1$  tipi türbinin sabit hız karakteristikleri, düşü azaltılarak elde edilmiştir. Burada düşü ve debi en-küçük HES'ler için tanımlı bölgenin maksimum sınır değeri olan 100 kW esas alınarak seçilmiştir. Bu değerlere uygun Pelton türbininin çark çapı  $\approx 100$  cm olmaktadır. Bu çark çapı, debi, düşü ve devir sayısındaki  $P_1$  türbini için farklı düşülerdeki debi-çıkış gücü değişimi Şekil 4.1'de, verim eğrileri ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

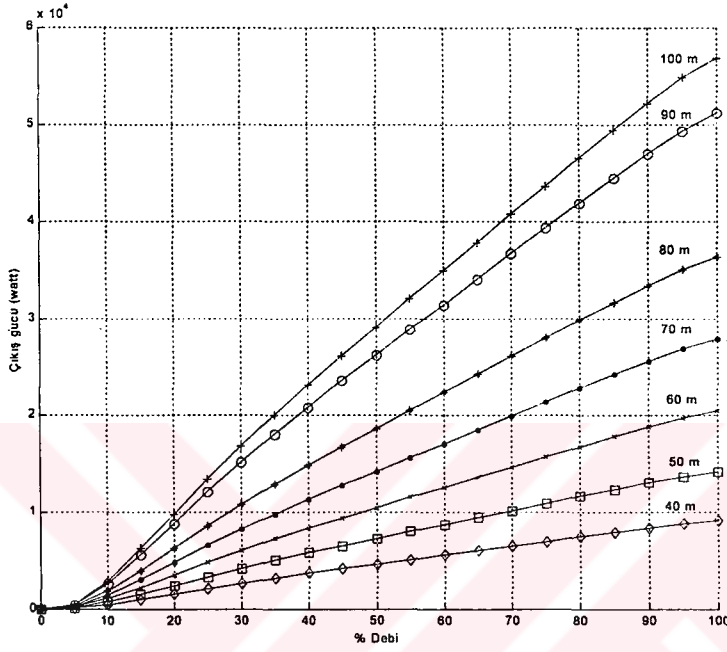


Şekil 4.1.  $P_1$  Türbini İçin Farklı Düşülerdeki Güç Eğrileri

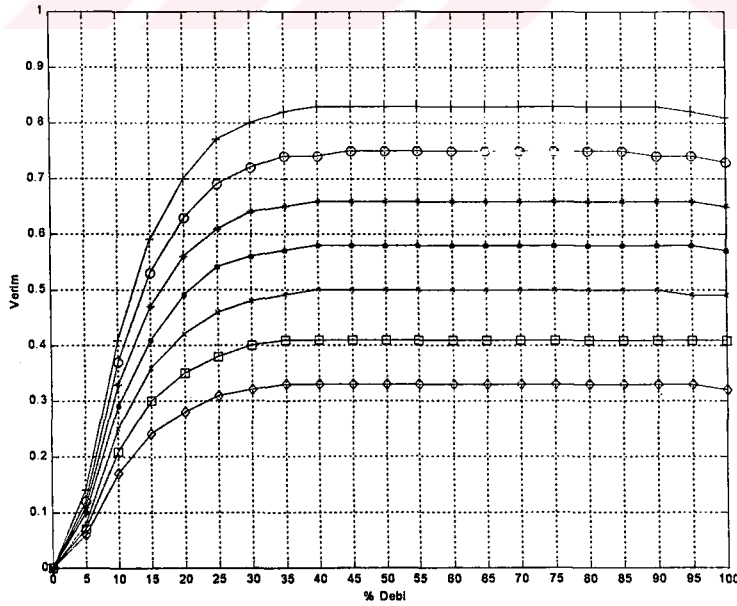


Şekil 4.2.  $P_1$  Türbini İçin Farklı Düşülerdeki Verim Eğrileri

$P_2$  türbininin, düşüsü azaltılarak sabit hız karakteristikleri elde edilirse, bu türbine ait sabit hız karakteristiği Şekil 4.3.'de, bu durumdaki verim değişimleri ise Şekil 4.4'deki gibi elde edilmiştir.  $P_2$  türbinin verimi en fazla % 82 olmaktadır. Kısmi debilerdeki verimi tam debideki verimine yakındır ve fazla bir değişim göstermemektedir.  $P_1$  türbininde olduğu gibi verim düşünün bir fonksiyonu olarak azalmakta ve oransal olarak yaklaşık aynı olmaktadır.

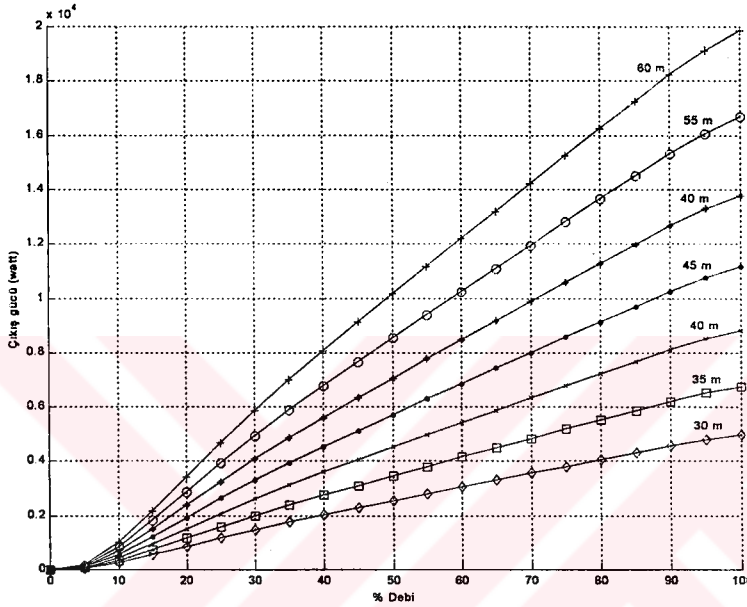


Şekil 4.3  $P_2$  Türbinini İçin Farklı Düşülerdeki Güç Eğrileri

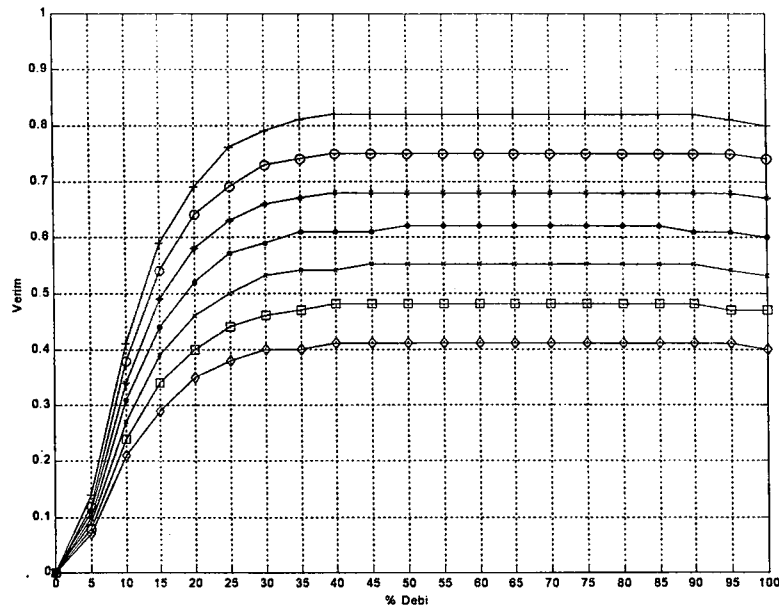


Şekil 4.4  $P_2$  Türbinini İçin Farklı Düşülerdeki Verim Eğrileri

$P_3$  türbinin, sabit hız karakteristiği Şekil 4.5.'de, verim değişimleri ise Şekil 4.6'da verilmiştir.  $P_3$  türbininde verimin maksim değeri  $P_1$  ve  $P_2$ 'de olduğu gibi % 82 olmaktadır. Kısmi debilerdeki verimi tam debideki verimine yakındır ve fazla bir değişim göstermemektedir. Yine  $P_1$  ve  $P_2$  türbininde olduğu gibi verim, düşünün bir fonksiyonu olarak azalmakta ve oransal olarak yaklaşık aynı olmaktadır. Düşününün % 25 azaltıldığı durumda, verim eğrisinde % 27'lik bir azalma meydana gelmiştir.

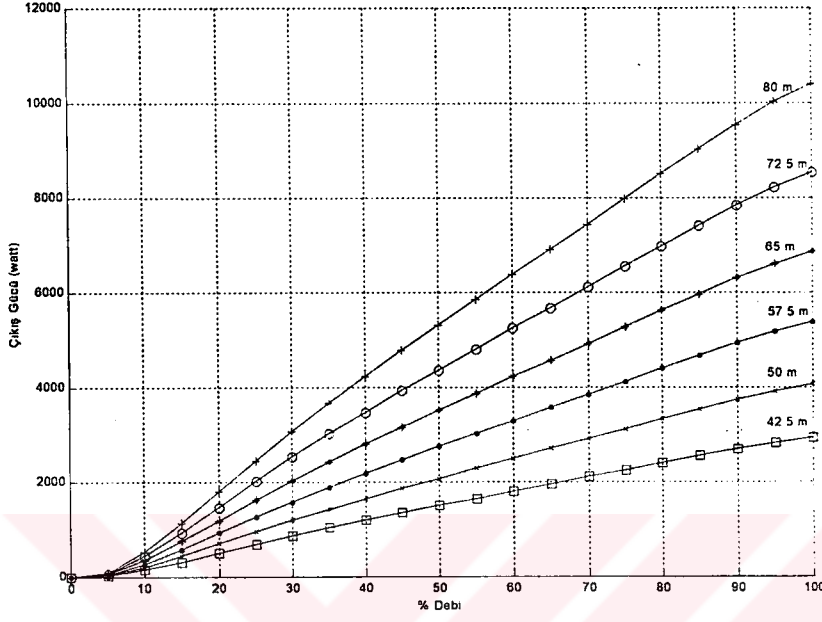


Şekil 4.5.  $P_3$  Türbini için Farklı Düşülerdeki Güç Eğrileri

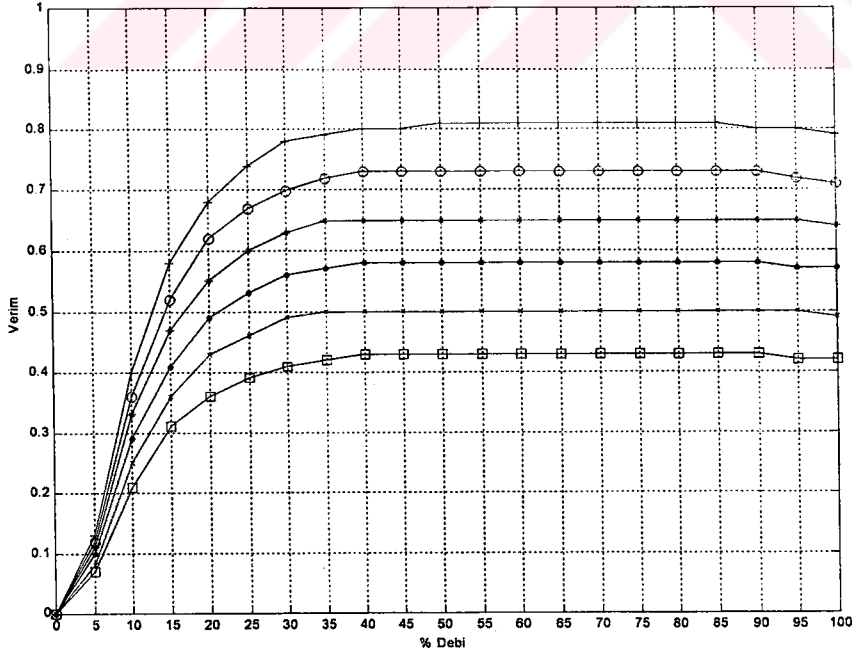


Şekil 4.6.  $P_3$  Türbini için Farklı Düşülerdeki Verim Eğrileri

$P_4$  türbininin, sabit hız karakteristiği Şekil 4.7.'de, verim değişimleri ise Şekil 4.8'de verilmiştir. Türbinin verimi en fazla % 81 olmaktadır. Diğer  $P$  serisi türbinler gibi verimi tam debideki verimine yakındır ve fazla bir değişim göstermemektedir.

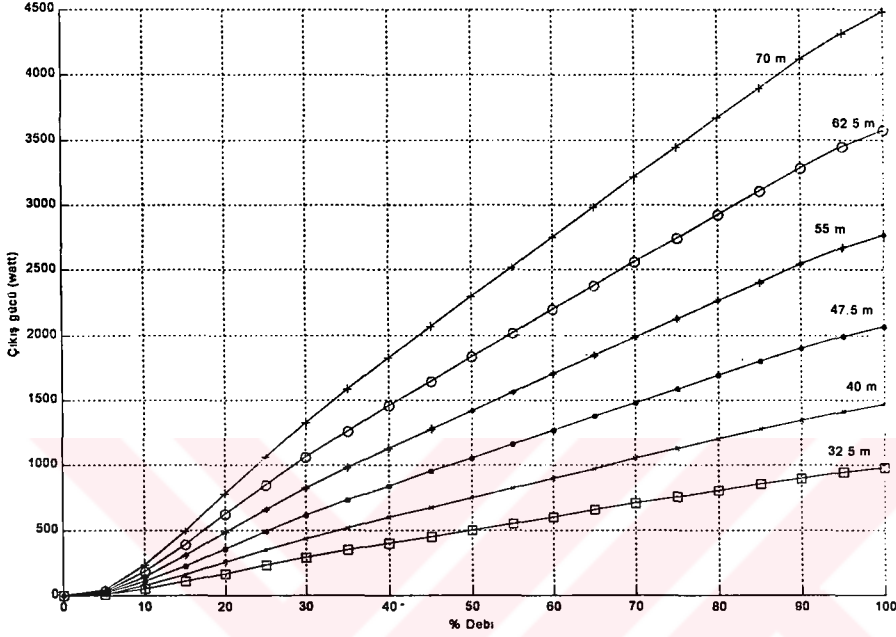


Şekil 4.7.  $P_4$  Türbinini İçin Farklı Düşülerdeki Güç Eğrileri

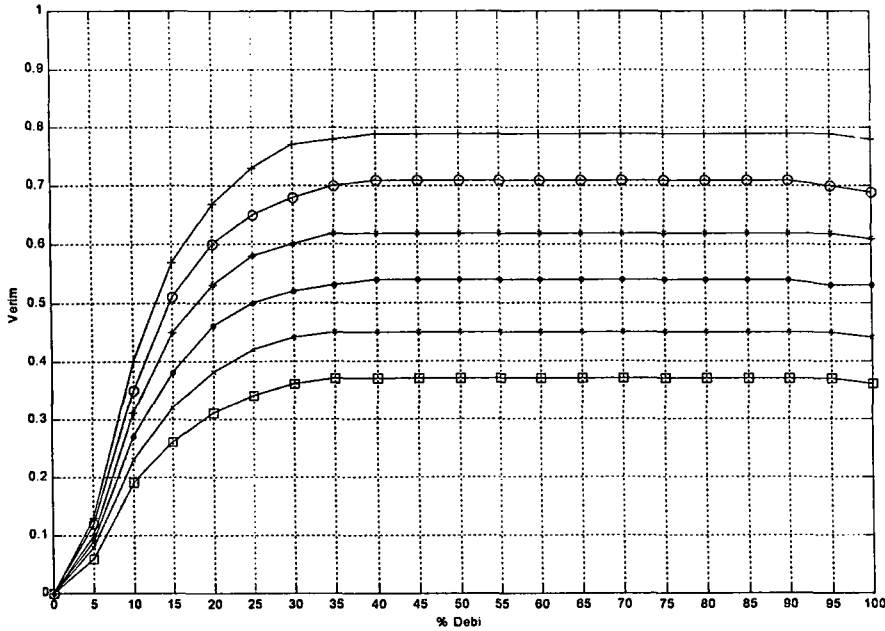


Şekil 4.8.  $P_4$  Türbinini İçin Farklı Düşülerdeki Verim Eğrileri

$P_5$  türbininin, sabit hız karakteristiği Şekil 4.9.'de, verim değişimleri ise Şekil 4.10'da verilmiştir.  $P_5$  türbinin verimi en fazla % 82 olmaktadır. Kısmi debilerdeki verimi tam debideki verimine yakındır ve fazla bir değişim göstermemektedir. Düşününün % 50 azaltılması halinde verim değeri % 40'ın altına düşmektedir.



Şekil 4.9  $P_5$  Türbinini İçin Farklı Düşülüklerdeki Güç Eğrileri



Şekil 4.10  $P_5$  Türbinini İçin Farklı Düşülüklerdeki Verim Eğrileri

#### 4.3 Francis Tipi Hidrolik Türbinin Bilgisayar Benzetimi Sonuçları

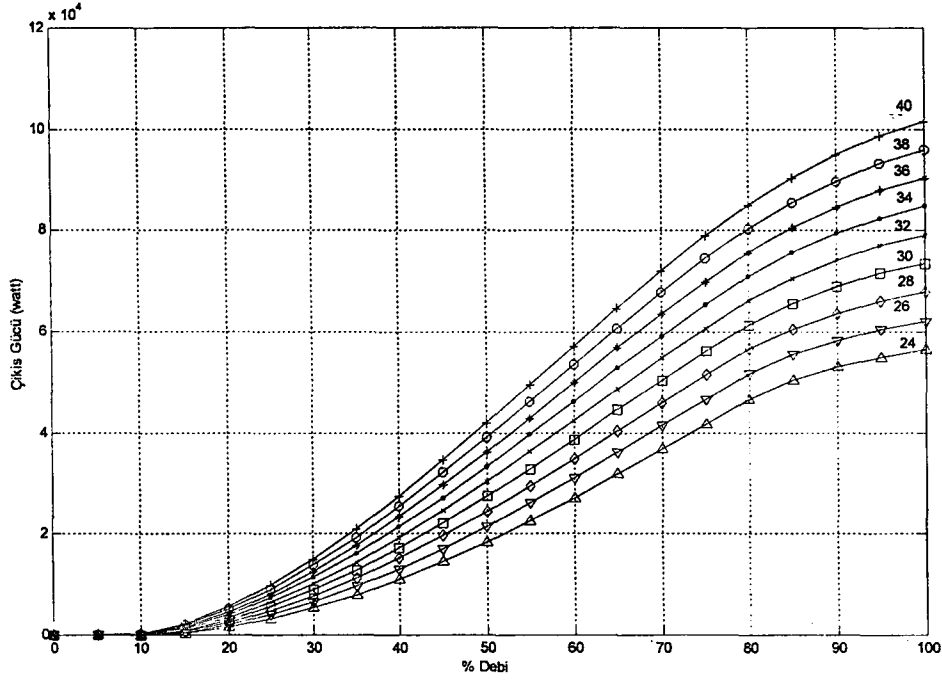
Francis tipi hidrolik türbinler, büyük düşü ve debi gerektiren yerlerde kullanılır. Yani çalışma bölgelerinde düşünün ve debinin çok küçük olmaması gerekmektedir.

Burada sırası ile 100, 50, 20, gücündeki Francis tipi türbinlerin çalışma bölgelerindeki davranışları incelenmiştir. Ele alınan Francis tipi hidrolik türbinler ve bunlara ait veriler Tablo 4.2'de verilmiştir.

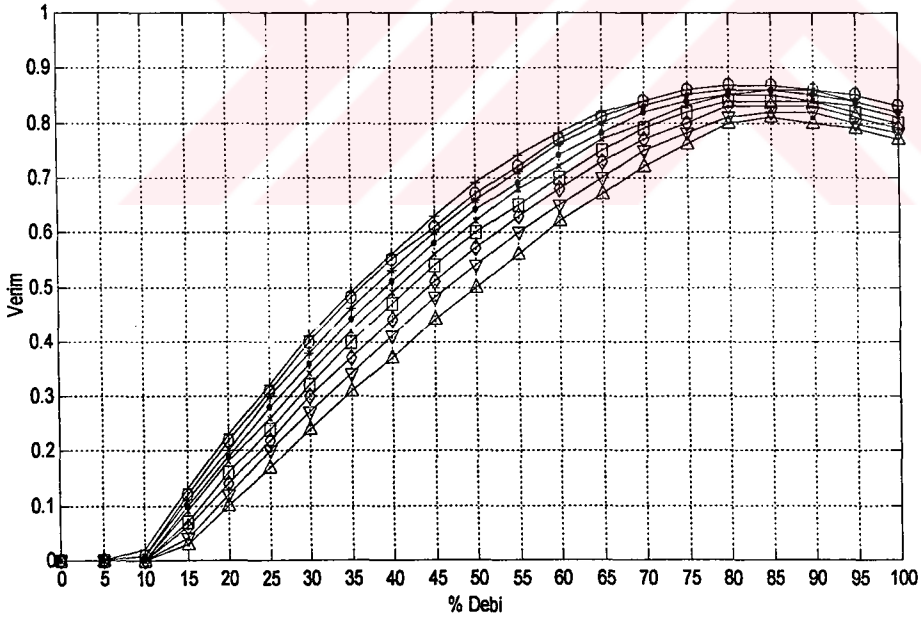
Tablo 4.2 İncelenen Francis Türbinlerinin Verileri

Tipi	Düşü (m)	Debi ( $m^3 / sn$ )	Türbin çapı (cm)	Devir sayısı (d/d)	Çıkış gücü (kW)
$F_1$	40	0,37	74	500	100
$F_2$	30	0,25	70	1000	50
$F_3$	20	0,18	80	1000	20

Düşü azaltılarak  $F_1$  türbinin sabit hız karakteristikleri elde edilmiştir. Değerlere bağlı olarak elde edilen grafikler Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Bu değerlere uygun Francis türbinin çark çapı  $\approx 74$  cm olmaktadır. Bu çark çapı, debi, düşü ve devir sayısındaki Francis türbinin farklı düşülerdeki çıkış gücünün değişimleri Şekil 4.11'de, verim değişimi ise Şekil 4.12'de verilmiştir.  $F_1$  türbinin verimi en fazla % 88 olmaktadır. Kısmi debilerdeki verimi tam debideki verime göre düşüktür. Bu durum, Francis türbinlerinin genel karakteristiğidir. Su debisinin fazla değişmediği yerlerde kullanıldıklarında verimleri iyi olur. Düşüdeki değişime bağlı olarak verim eğrisinde de bir miktar değişim olmaktadır.



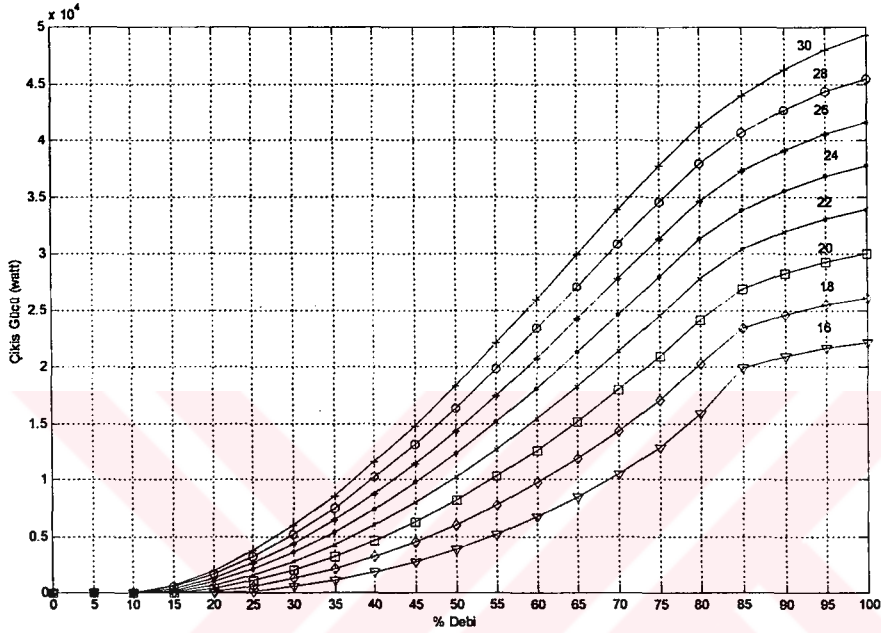
Şekil 4.11  $F_1$  Türbini için Farklı Düşülerdeki Güç Eğrileri



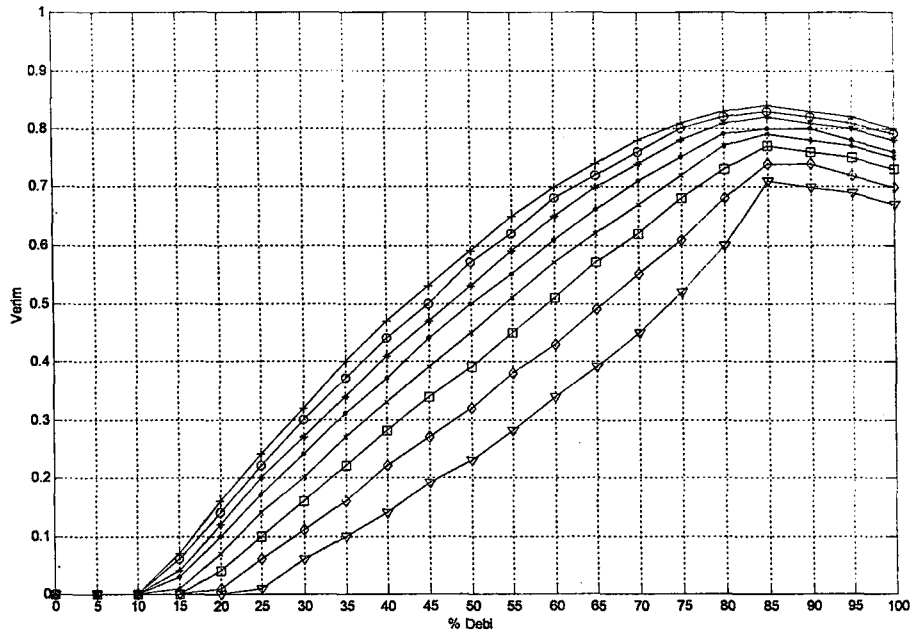
Şekil 4.12  $F_1$  Türbini için Farklı Düşülerdeki Verim Eğrileri

$F_2$  türbininin farklı düşülerdeki çıkış gücü değişimleri Şekil 4.13'de verim değişimleri ise Şekil 4.14'de verilmiştir. Bu türbinin verimi en fazla % 85 olmaktadır. Kısmi debilerdeki verim, nominal debideki verime nazaran oldukça küçüktür. Debinin % 30 azalması halinde çıkış

gücü; tam düşü için % 35, % 50 düşü için de % 80 azalma göstermektedir. Debinin % 25'ten fazla azalma göstermesi halinde (düşüdeki azalma % 50)  $F_2$  türbini % 50'den daha az bir verime sahip olmaktadır. Düşüdeki % 40'lık bir azalmadan sonra  $F_2$  türbininin veriminde aşırı bir bozulma olmaktadır. Bu durum  $F_2$  türbinin bu bölge dışında çalıştırılması halinde avantaj sağlamayacağını göstermektedir.



Şekil 4.13  $F_2$  Türbini için Farklı Düşülerdeki Güç Eğrileri



Şekil 4.14  $F_2$  Türbini için Farklı Düşülerdeki Verim Eğrileri

#### 4.4. Cross-Flow Tipi Hidrolik Türbinin Bilgisayar Benzetimi

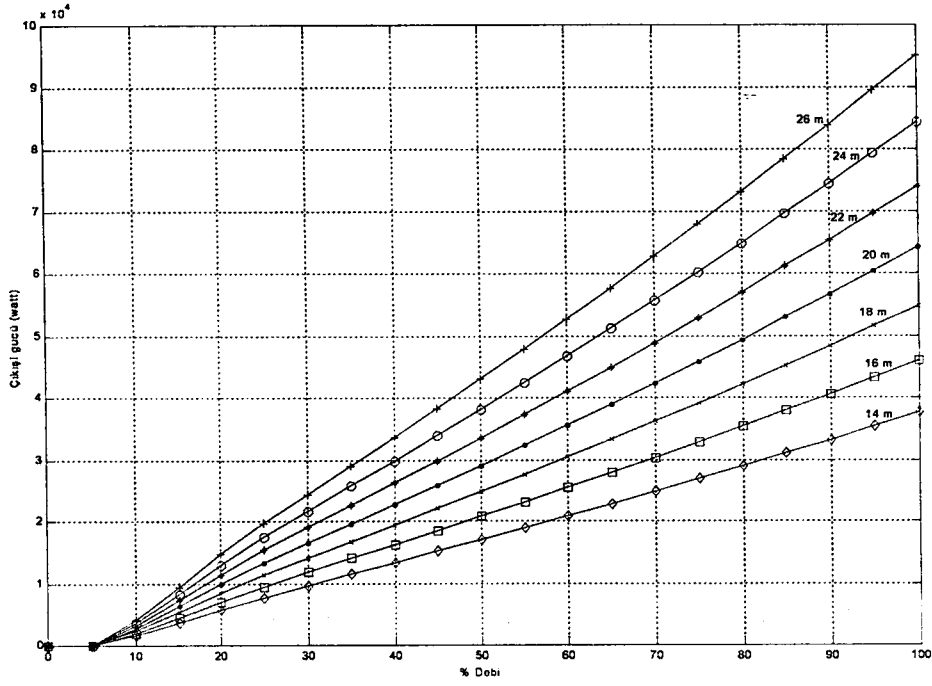
Cross-Flow tipi hidrolik türbininin çalışma bölgesi, debinin ve düşünün az olduğu yerlerdir. Önce debi sabit tutulup, farklı düşülerde Cross-Flow türbinin nasıl bir karakteristik sergilediği incelenecektir. Sonra düşü sabit tutulup debide değişiklik yapılarak karakteristiği belirlenecektir.

Bu çalışmada sırası ile 100, 50, 20, 10 ve 5 kW gücündeki Cross-Flow türbinlerinin çalışma bölgelerindeki davranışları incelenmiştir. Ele alınan Cross-Flow türbinlerinin verileri, üretici firmaların katalog değerleri olarak Tablo 4.3'de gösterilmiştir.

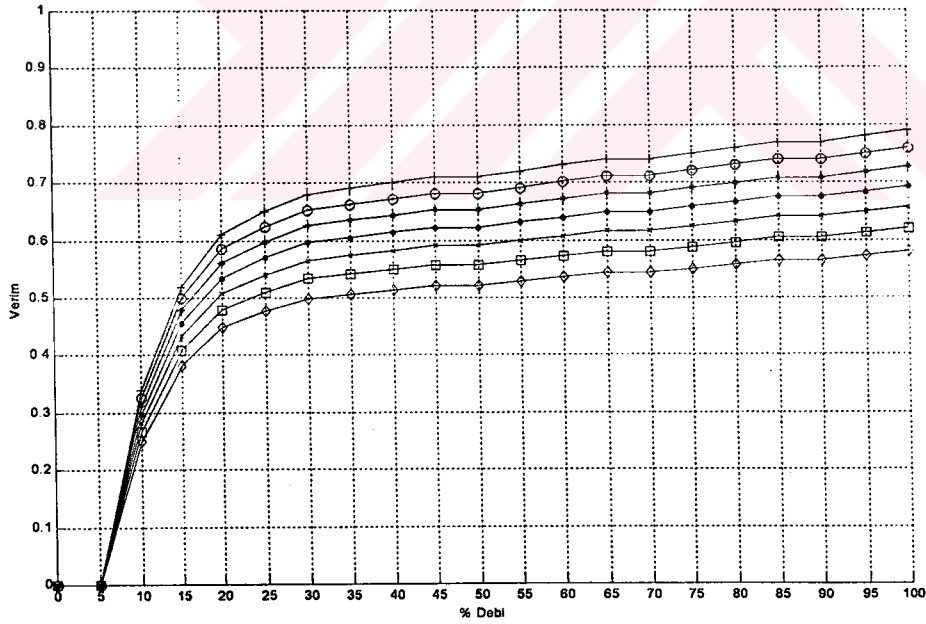
Tablo 4.3 İncelenen Cross-Flow Türbinlerinin Verileri

Tipi	Düşü (m)	Debi (m <sup>3</sup> /sn)	Türbin çapı (cm)	Devir sayısı (d/d)	Çıkış gücü (kW)
C <sub>1</sub>	26	0,258	40	95	100
C <sub>2</sub>	12	0,268	40	95	50
C <sub>3</sub>	40	0,0632	20	190	20
C <sub>4</sub>	5	0,562	55	69	10
C <sub>5</sub>	2.6	0,561	55	69	5

C<sub>1</sub> türbininin sabit hız karakteristikleri, düşü azaltılarak elde edilmiştir. Hesaplanan değerler Şekil 4.17'de verilmiştir. Burada düşü ve debi çok küçük HES'ler için tanımlı bölgenin maksimum güç değeri olan 100 kW sınır değerine uygun olarak seçilmiştir. C<sub>1</sub> türbinin farklı düşülerdeki çıkış güç değişimleri Şekil 4.17'de ve verim eğrileri ise Şekil 4.18 de verilmiştir. C<sub>1</sub> Türbini verimi en fazla % 78 olmaktadır. Kısmi debilerdeki verimi, tam debideki verimine yakındır ve fazla bir değişim göstermez. Nominal debiye yaklaştıkça, verim de maksimum değerine doğru yaklaşır. Verim düşüye bağlı olarak P tipi türbinlerden daha az oranda azalmaktadır.



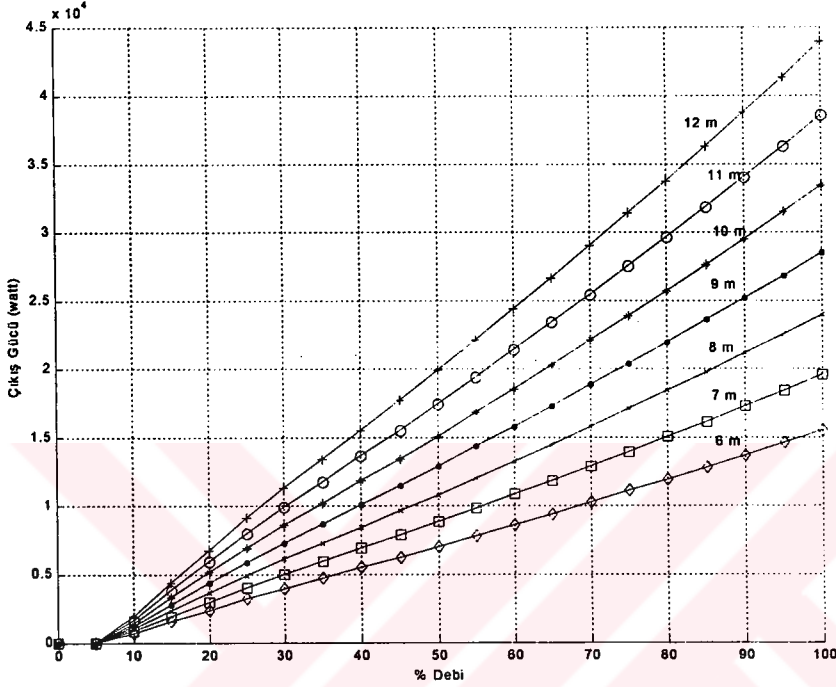
Şekil 4.17 C<sub>1</sub> Türbini İçin Farklı Düşülerdeki Güç Eğrileri



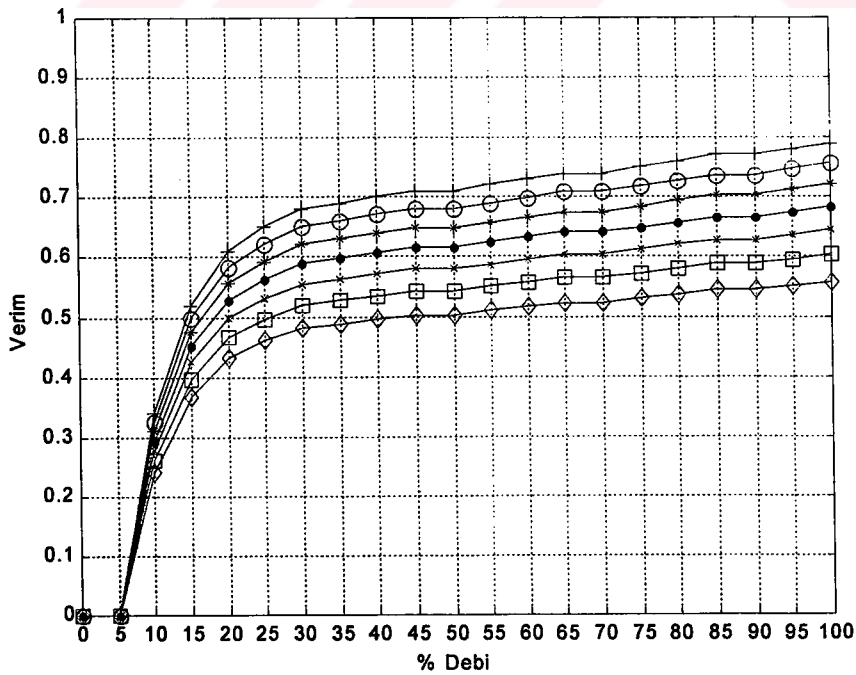
Şekil 4.18 C<sub>1</sub> Türbini İçin Farklı Düşülerdeki Verim Eğrileri

C<sub>2</sub> türbininin farklı düşülerdeki çıkış gücü değişimleri Şekil 4.19'da ve verim eğrileri ise Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Türbinin verimi en fazla % 78 olmaktadır. Kısmi debilerdeki

verimi tam debideki verimine yakındır. Düşü ve debideki azalmalara bağlı olarak çıkış gücünde büyük oranda azalma meydana gelir. % 50 debi azalması tam düşüde çıkış gücünün % 60 küçülmesine, % 50 düşüde ise çıkış gücünün % 86 küçülmesine neden olur. Debini % 50 azalması halinde % 50'ye kadar azalan tüm düşülerde verimdeki azalma sadece % 6 kadardır.

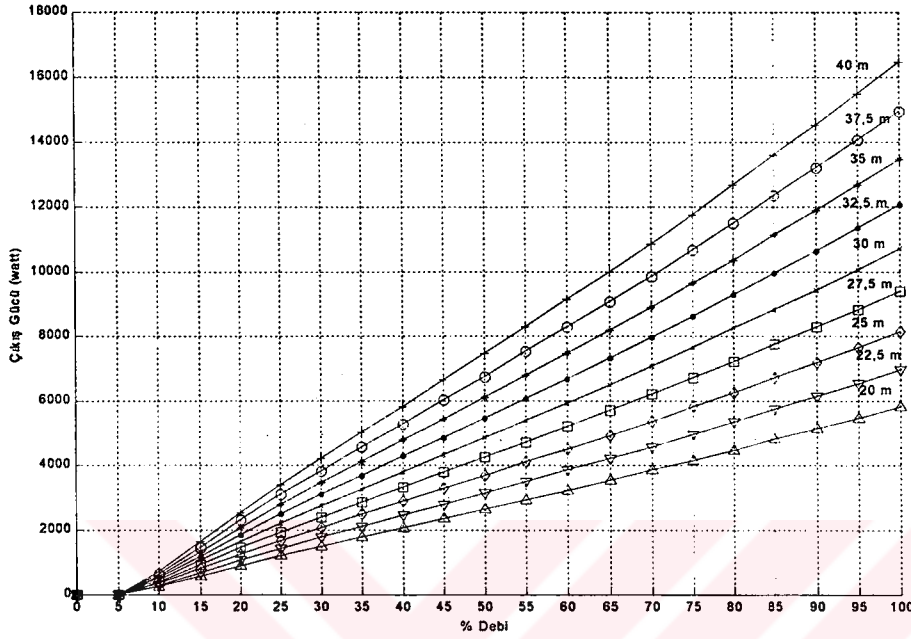


Şekil 4.19 C, Türbini İçin Farklı Düşülerdeki Güç Eğrileri

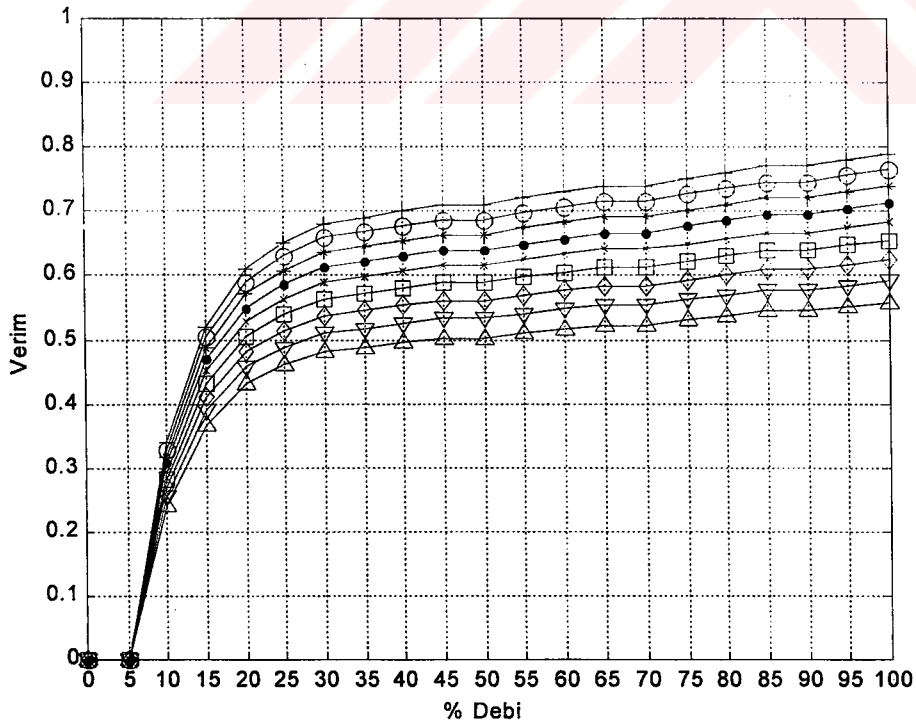


Şekil 4.20 C<sub>2</sub> Türbini İçin Farklı Düşülerdeki Verim Eğrileri

$C_3$  türbininin farklı düşülerdeki çıkış gücü değişimleri Şekil 4.21'de ve verim eğrileri ise Şekil 4.22'de verilmiştir.  $C_3$  türbinin verimi en fazla % 78 olmaktadır. Kısmi debilerdeki verimi tam debideki verimine yakındır.

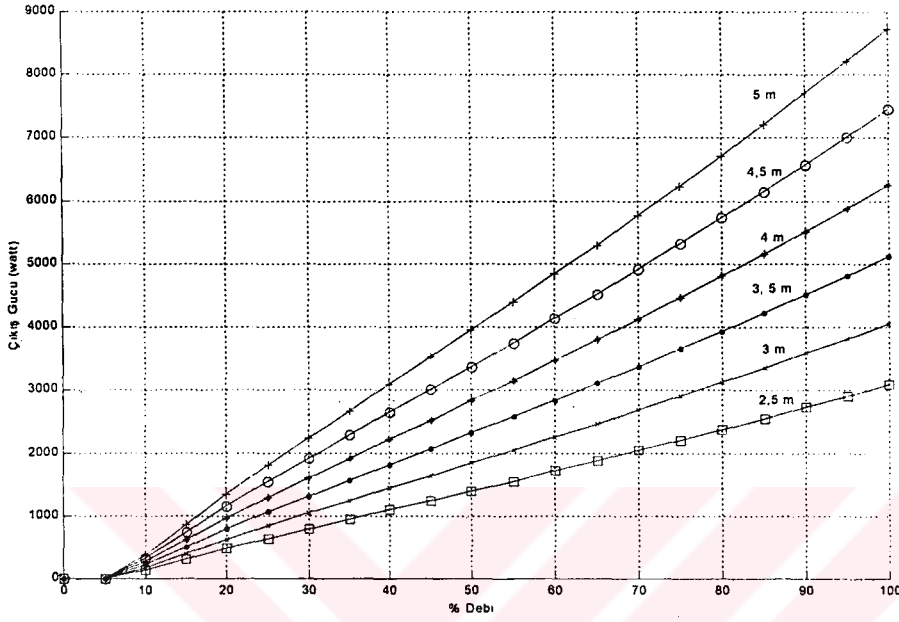


Şekil 4.21  $C_3$  Türbinini İçin Farklı Düşülerdeki Güç Eğrileri

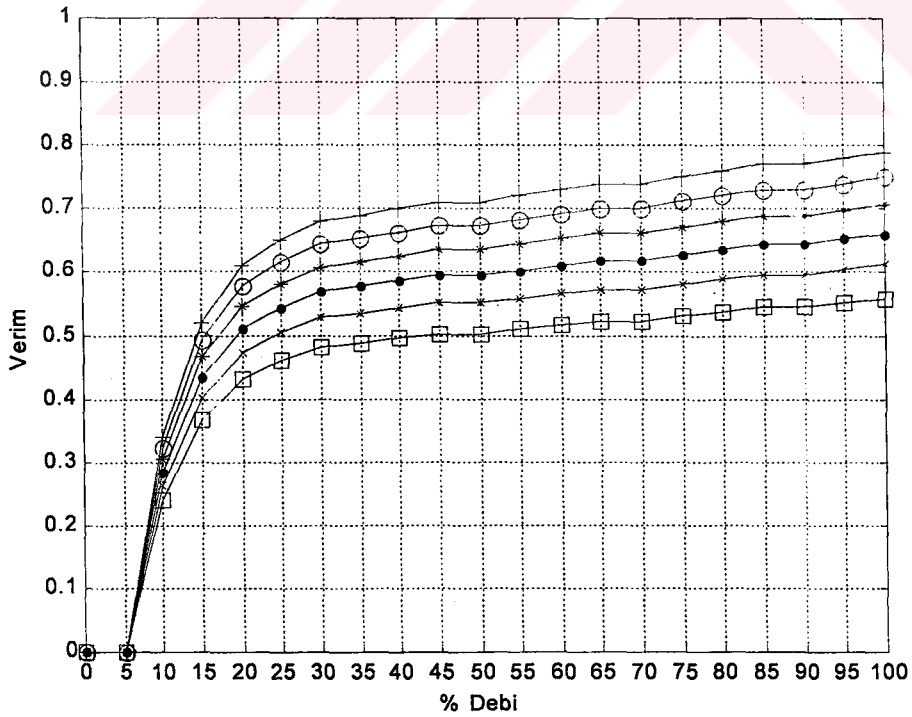


Şekil 4.22  $C_3$  Türbinini İçin Farklı Düşülerdeki Verim Eğrileri

$C_4$  türbinin farklı düşülerdeki çıkış gücü değişimleri Şekil 4.23'de ve verim eğrileri ise Şekil 4.24'de gösterilmiştir. Türbinin verimi en fazla % 79 olmaktadır. Bu verim değeri  $C_1$ ,  $C_2$  ve  $C_3$  türbinlerinden daha yüksektir. Kısmi debilerdeki verimi tam debideki verimine yakındır

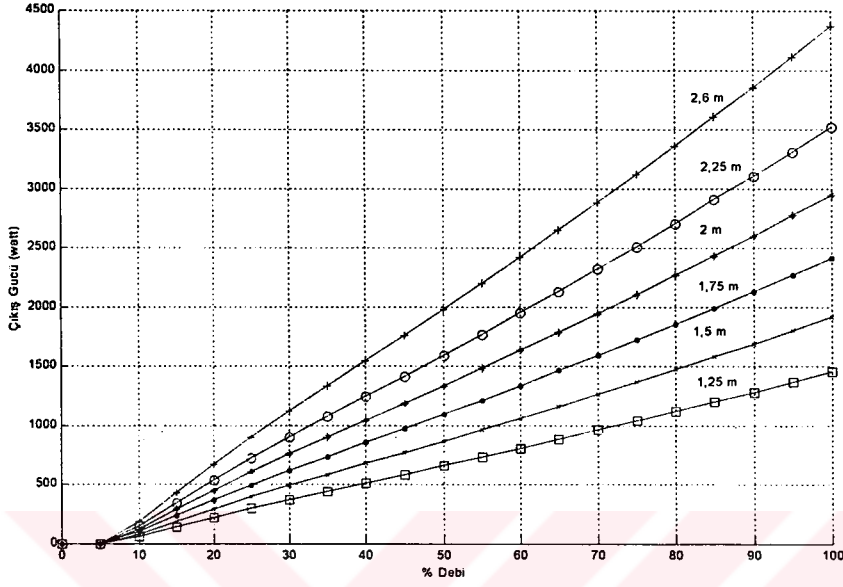


Şekil 4.23  $C_4$  Türbinini İçin Farklı Düşülerdeki Güç Eğrileri

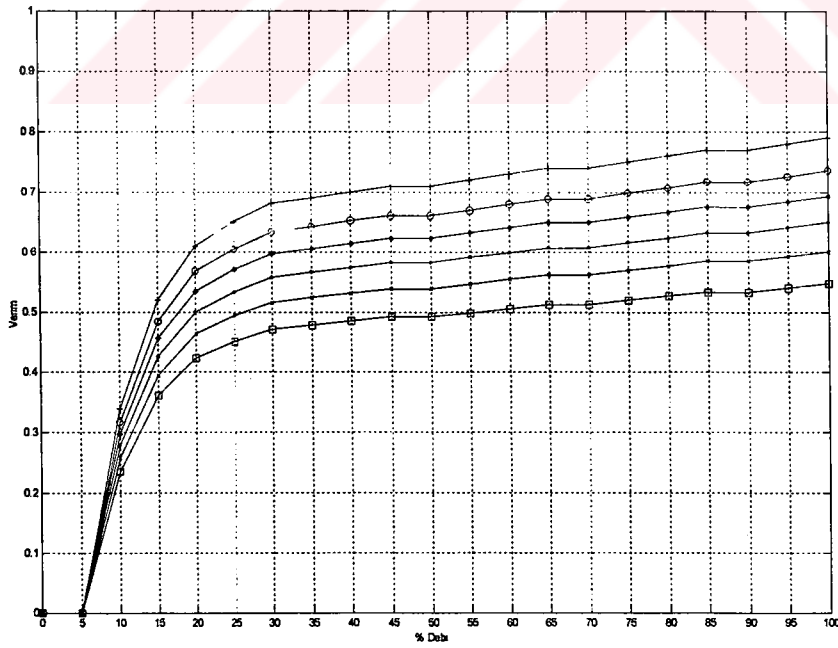


Şekil 4.24  $C_4$  Türbinini İçin Farklı Düşülerdeki Verim Eğrileri

$C_5$  türbinin farklı düşülerdeki çıkış gücü değişimleri Şekil 4.25’de ve verim eğrileri ise Şekil 4.26’da gösterilmiştir.  $C_5$  türbinin verimi de en fazla % 79 olmaktadır. Kısmi debilerdeki verimi tam debideki verimine yakındır



Şekil 4.25  $C_5$  Türbinini İçin Farklı Düşülerdeki Güç Eğrileri



Şekil 4.26  $C_5$  Türbinini İçin Farklı Düşülerdeki Verim Eğrileri

## 5. SONUÇLAR

Türkiye'nin elektrik enerjisi üretiminde hidrolik enerji önemli bir yere sahiptir. Ülkemizde ortalama akış koşullarında brüt hidrolik potansiyel 430 TWh/yıl, teknik yönden değerlendirilebilir hidrolik potansiyel 130 TWh/yıl ve ekonomik olarak değerlendirilebilir hidrolik potansiyel ise 100 TWh/yıl olarak belirtilmiştir. Bu potansiyelin değerlendirilen kısmı 20,4 TWh/yıl olup, bu değer toplam ekonomik olarak değerlendirilebilir potansiyelin % 20'sine tekabül etmektedir. Yani hidrolik potansiyelimizin büyük bir kısmı kullanılamamaktadır. Kullanılmayan potansiyelin 13,9 TWh/yıl'lık kısmı, küçük ve çok küçük hidroelektrik santraller yapılarak kullanılabilir hale getirilebilir.

Ülkemizde kurulu olduğu halde işletmede olmayan 110 adet küçük ve çok küçük HES bulunmaktadır. Bu HES'lerin faaliyete geçirilmesi halinde, üretilen enerji yoluyla ülkemiz ekonomisine katkısı 17.5 Milyon \$ olacaktır.

Küçük ve çok küçük HES'ler için hidrolik türbin seçiminde, türbinin hangi düşü ve debide nasıl bir karakteristiğe sahip olacağının bilinmesi gereklidir. Buna ilave olarak türbin boyutları, maliyet, imalat, bakım ve onarım özellikleri de türbin seçiminde önemli etkenlerdir.

Bu çalışmada; hidrolik türbinlerin debi, düşü, verim ve yük ilişkilerini belirlemek için Pelton, Francis ve Cross-Flow türbinlerinin modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller yardımıyla ve MATLAB Programı kullanılarak, bu türbinlerin bilgisayar benzetimi yapılmıştır.

Yapılan bilgisayar benzetimi sonuçlarına göre, 100 kW değerindeki hidrolik türbinlerin en yüksek verimleri, *P* tipi türbinin % 82, *F* tipi türbinin % 88 ve *C* tipi türbinin % 78 olduğu görülmüştür. Verimi en yüksek *F* türbinin diğer türbinlere göre daha üstün olduğu sonucu çıkmamaktadır. Türbinin boyutları, türbin-generatör sisteminde kullanılacak elemanların yapımı, elde edilmesi ve bunların maliyeti göz önüne alınırsa, *C* tipi hidrolik türbinin daha avantajlı olduğu sonucu çıkar.

50 kW gücündeki hidrolik türbinlerin en yüksek verimleri, *P* türbinin % 82, *F* tipi türbinin % 85 ve *C* tipi türbinin % 78 olmaktadır. *P* tipi türbin, % 65'lik debi değişimine kadar veriminde pek değişim olmamaktadır. Daha düşük debilerde verim çok düşmektedir. Düşüdeki % 40'lık bir azalmadan sonra *F* türbininin veriminde aşırı bir bozulma olmaktadır. Bu durum *F* türbinin bu bölge dışında çalıştırılması halinde avantaj sağlamayacağını göstermektedir. *C* tipi türbinde debini % 50 azalması halinde % 50'ye kadar azalan tüm düşülerde verimdeki azalma sadece % 6 kadardır.

20 kW gücündeki hidrolik türbinlerin verimleri, *P* türbinin % 82, *F* tipi türbinin % 76 ve *C* tipi türbinin % 78 olmaktadır. *P* türbinin verim eğrisi diğer *P* tipi türbinlere yakın bir değişim göstermektedir. *F* tipi hidrolik türbinlerde güç azaldıkça verim eğrisinde aşırı azalma

meydana gelmektedir. Bölge olarak 20 kW'ın altında çalıştırıldığında veya çalıştırılmak istendiğinde performansının iyi olmadığı görülmüştür. Daha küçük güçlerde ise türbinin boyutları artacak ve yapımı mümkün olmayacaktır.

10 kW gücündeki hidrolik türbinlerin verimleri, *P* türbinin % 81 ve *C* tipi türbinin % 79 olmaktadır. Bu bölgede *P* türbinin verim eğrisi diğer *P* tipi türbinlere yakın bir değişim göstermesine karşın *C* tipi türbinin verimi artmaya başlamıştır.

5 kW gücündeki türbinlerin verimleri, *P* türbinin % 82 ve *C* türbinin % 79 olmaktadır. Bu bölgedeki *P* türbinin veriminde % 1'lik bir artma olmuştur. *C* türbinin verimi yüksek güçlü *C*'lere göre yüksektir.

Anma çalışma şartlarında sağlanan güç azaldıkça *C* tipi hidrolik türbinlerin verimlerinde yükselme olmaktadır. Ayrıca bu türbinlerin verim eğrileri yatık olduğu için kısmi debilerde verimleri iyidir. Maliyetleri 10 kW'a kadar en düşük türbindir. 10 kW'ın üzerindeki güçlerde *C* ve *P* tipi hidrolik türbinler maliyetleri *F* tipi hidrolik türbinlere göre yine düşüktür. Ama 50 kW ve üzerinde *F* tipi hidrolik türbinlerin verimleri *C* ve *P*'ye nazaran yüksektir.

## KAYNAKLAR

1. ÖNCEL, B., 1977, 10.Dünya Enerji Konferansının Ardından, E.İ.E.İ yayınları.
2. ÖZİŞ, Ü., 1985,Türkiyenin Hidroelektrik Potansiyeli ve Enerji Üretimi. Hidroelektrik Enerji Sempozyumu Tebliğleri.
3. AVŞAR, E.. 1994, Küçük Hidroelektrik Santrallerin Türkiyedeki Yeri. Önemi ve Hesaplama Esasları, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, .
4. ALTAŞ, M., ÖZKAN H.F., ÇELEBİ, E., AKSOY, F., 2000, Enerji İstatistikleri, Türkiye 8. Enerji Kongresi, 61s.
5. <http://www.tedas.gov.tr>, 2002, Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminin Üretici Kuruluşlara Göre Yıllar İtibariyle Gelişimi.
6. ÇEÇEN, K., 1983, Küçük HES'ler Hakkında Araştırma, TÜBİTAK, KÜHTÜ Kesin Raporu 1.
7. TÜRKSOY, M., Türkiyede Küçük Hidroelektrik Potansiyelin Geliştirilmesi. Elektrik İşleri Etüd İdaresi.
8. KÖSSLER, E.,1982, Installed and Planed Mini Hydro (Water Power and Dams) Power, Osstruction.
9. UNIDO, 1984, Small Hydro Power, Bulletin
10. OLGUN, H., 1990, Banki (Cross-Flow) Türbinin Tasarım Parametrelerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
11. BAŞEŞME, H., 1980, Hidroelektrik Santraller, Ankara
12. EİSENİRİNG, M., 1991, Micro Pelton Turbines, MHPG Series Harnessing Water Power on a Small Scale, Volume 9, Gallen Switzerland

15. MACMORE, C.A., MERYFIELD, F., 1949, The Banki Water Turbine, Engineering Experiment Station, Oregon State College.
16. ÖZGÜR, C., 1964, Su Makinaları Dersleri, İTÜ Yayınları, İstanbul.
17. YAZICI, H.F., 1966, Su Makinaları Problemleri, İTÜ Yayınları, İstanbul.
18. NAKARMI, K., ARTER, A., WIDMER, R., EISENRING, M., 1993. Cross Flow Turbine Design and Equipment Engineering, MHPG Series Harnessing Water Power on a Small Scale, Volume 3, Gallen Switzerland.
19. JIANDONG, T., NAIBO, Z., XIANHUAN, W., JING, H., HUISHES, D., 1997, Mini Hydro Power, Canada
20. INVERSIN, R., A., 1995, Micro Hydro Power Sourcebook, United States of America
21. HARVEY, A., BROWN, A., HETTIARACHI P., INVERSIN, A., 1998, Micro-Hydro Design Manual a Guide to Small-Scale Water Power Schemes. Intermediate Technology Publications, London, England

## ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Tokat/Reşadiye’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimi Tokat/Reşadiye’de yaptı. 1995 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğini 1999 yılında bitirdi. 2000 yılında F.Ü. Elektrik-Elektronik Mühendisliğinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2000 yılında F.Ü. Elektrik-elektronik Mühendisliğinde Yüksek Lisansı kazandı. Halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.

Mahmut Temel ÖZDEMİR

