

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE TÜRBİN TASARIMI

Makine Müh. Ahmet Yasin DEMİRHAN

FBE Makine Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programında

Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özgen Ümit ÇOLAK

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	i
KISALTMA LİSTESİ.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	vi
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
2. TÜRKİYE’NİN HİDROELEKTRİK ENERJİ POTANSİYELİ	5
2.1 Giriş	5
2.2 Hidroelektrik Potansiyelimiz.....	5
2.3 Hidroelektrik Potansiyel Gelişiminin Bugünkü Durumu	7
3. HES PLANLAMA AŞAMALARI.....	8
3.1 İstikşaf Çalışmaları	8
3.2 Mastır Plan Çalışmaları.....	9
3.3 Planlama (Fizibilite-Yapılabilirlik) Çalışmaları.....	10
3.4 Kesin Proje Çalışmaları	11
4. HİDROLİK TÜRBİN TİPLERİ VE ÖN TASARIMLARI	12
4.1 Genel Açıklamalar	12
4.2 Hidrolik Türbinlerin Yapılış Şekilleri.....	12
4.2.1 Reaksiyon Türbinleri	13
4.2.2 Aksiyon Türbinleri.....	15
4.3 Hidrolik Türbinlerin Yapılış Şekillerine Ait Açıklamalar	17
4.3.1 Üst Basınç Türbinleri.....	18
4.3.1.1 Salyangozsuz üst Basınç Türbinleri.....	18
4.3.1.2 Beton Salyangozlu Üst Basınç Türbinleri.....	19
4.3.1.3 Boru Tipi Üst Basınç Türbinleri.....	20
4.3.1.4 Dairesel Kesitli Çelik Salyangoz Üst Basınç Türbinleri.....	22
4.3.2 Serbest Püskürtmeli Türbinler.....	24
4.3.2.1 Pelton Tipi Hidrolik Türbinler	24
4.4 Hidrolik Türbinlerin Kullanma Sahaları.....	28
4.5 Hidrolik Türbinleri Ön Tasarımları ve Bazı Karakteristik Değerleri ile Ana Boyutlarının Tespiti	29
4.5.1 Türbin Dizayn Düşüşünün Tespiti.....	29
4.5.1.1 Barajlı Hidroelektrik Santral Tesislerinde Türbin Dizayn Düşüşünün Tespiti	29

4.5.2	Türbin Gücünün ve Türbin Tipinin Tespiti.....	32
4.5.2.1	Türbin Gücünün Tespiti	32
4.5.3	Türbin Özgül Devir Sayısının Tespiti.....	32
4.5.3.1	Francis Tipi Hidrolik Türbinlerin Özgül Devir Sayısının Tespiti	32
4.5.3.2	Kaplan Tipi Hidrolik Türbinlerin Özgül Devir Sayısının Tespiti	33
4.5.4	Türbin Devir Sayısının Tespiti	33
4.5.5	Türbin Rotoru (Türbin Çarkı) Ana Boyutlarının Tespiti	39
4.5.5.1	Francis Tipi Hidrolik Türbin Rotoru Ana Boyutlarının Tespiti	39
4.5.5.2	Kaplan Tipi Hidrolik Türbin Rotorları Ana Boyutlarının Tespiti	40
4.5.6	Türbin Salyangozu Ana Boyutlarının Tespiti	41
4.5.6.1	Francis Tipi Hidrolik Türbin Salyangozu Ana Boyutları	42
4.5.6.2	Kaplan Tipi Türbin Salyangozu Ana Boyutları	43
4.5.6.3	Pelton Tipi Hidrolik Türbin Su Dağıtıcısı Ana Boyutları.....	45
4.5.7	Türbin Emme Borusu Ana Boyutların Tespiti	46
4.5.7.1	Francis Tipi Hidrolik Emme Borusu Ana Boyutları Tespiti.....	46
4.5.7.2	Kaplan Tipi Türbin Emme Borusu Ana Boyutları	48
4.5.8	Francis Tipi Türbinlerde Kaviteasyon Katsayısının ve Türbin Salyangozu Eksen Kotunun Tesbiti	49
5.	HİDROLİK TÜRBİNLERİN KONSTRÜKSİYONLARI.....	54
5.1	Francis Tipi Hidrolik Türbin Rotorları	54
5.1.1	Ana Ölçüleri	54
5.1.2	Çizimleri ve Konstrüksiyonlar	55
5.2	Kaplan Tipi Hidrolik Türbin Rotorları	61
5.2.1	Taşıyıcı Kanat Teorisi.....	61
5.2.2	Kaplan Tipi Türbin Rotorlarının Çizimleri ve Konstrüksiyonları.....	65
5.2.3	Kaplan Tipi Türbin Rotorları ile İlgili Diğer Bilgiler.....	71
5.3	Türbin Ayar Kanatları.....	75
5.3.1	Genel konular	75
5.3.2	Türbin Ayar Kanatlarına Etkiyen Kuvvetler.....	77
5.3.3	Türbin Ayar Kanatlarının İmal Edildikleri Malzemeler	77
5.4	Ayar Kanatları Ayarlama Çemberleri.....	80
5.4.1	Ayar çemberlerinin konstrüksiyonları	80
5.4.2	Ayar Kanatları İçten Ayarlanan Ayar Çemberleri.....	81
5.4.3	Ayar Kanatları Dıştan Ayarlanan Ayar Çemberleri	81
5.4.4	Kaplan Tipi Türbinlerde Ayar Kanatları ile Rotor Kanatlarının Birlikte Ayarlanması	81
5.5	Türbin Salyangozu.....	83
5.5.1	Genel Açıklamalar	83
5.5.2	Salyangoz Kesitlerinin Hesaplanması	84
5.6	Türbin Emme Borusu.....	90
5.7	Pelton Tipi Hidrolik Türbinlerin Konstrüksiyonları	92
5.7.1	Pelton Tipi Türbin Rotorları.....	92
5.7.1.1	Ana ölçüleri	92
5.7.2	Projelendirilmesi ve Konstrüksiyonları	93
5.7.3	Pelton Düzesi ve İğnesi (Pelton Enjektörü)	98
5.7.4	Pelton Düzesi Su Demeti Saptırıcı	101
5.7.5	Pelton Düzesi İğnesinin ve Su Demeti Saptırıcısının Ayarları	101
6.	ÖRNEK TÜRBİN SEÇİMİ.....	107
6.1	Proje Bölgesinin Tanıtılması.....	107

6.2	Santral Karakteristikleri	108
6.3	Türbin Gücünün Tespiti	108
6.4	Türbin Tipinin Seçimi.....	108
6.4.1	Francis Tipi Türbin Seçimi	108
6.4.1.1	Türbin Rotoru Ana Boyutları Tespiti	109
6.4.1.2	Türbin Salyangozu Ana Boyutları	109
6.4.1.3	Türbin Emme Borusu Ana Boyutları Tespiti	110
6.4.1.4	Türbin Eksen Kotunun Tespiti	111
6.4.2	Kaplan Tipi Türbin Seçimi.....	112
6.4.2.1	Türbin Rotoru Ana Boyutları Tespiti	112
6.4.2.2	Türbin Salyangozu Ana Boyutları	112
6.4.2.3	Türbin Emme Borusu Ana Boyutları Tespiti	113
6.4.2.4	Türbin Eksen Kotunun Tespiti	114
6.5	Optimum Türbinin Seçimi	115
6.6	Yıllık İşletme Raporlarının İncelenmesi.....	115
6.7	Kaplan Tipi Türbin Seçiminde Üretilebilecek Enerji.....	118
7.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	120
KAYNAKLAR.....		122
ÖZGEÇEMİŞ.....		123

SİMGE LİSTESİ

C_0	Pelton düzesinden fışkıran su hızı
C_1	Rotor girişindeki su hızı
C_2	Rotor çıkışındaki su hızı
C_3	Emme borusu çıkışı su hızı
D_1	Türbin rotoru giriş çapı
D_2	Türbin rotoru çıkış çapı
D_3	Türbin rotoru dış çapı
D_M	Kaplan türbin rotoru kanatlarının dıştan dışa çapı
D_m	Türbin rotoru göbeği çapı
D_S	Emme tüpü borusu tüpü başlangıç çapı
d_k	Düze iğnesi başı çapı
d_m	Düze memesi boğaz çapı
d_r	Düze gövdesi iç çapı
d_s	Düze şaftının çapı
d_w	Türbin şaftı çapı
f	Şebeke frekansı
H	Net hidrolik düşü
H_d	Türbin dizayn düşüsü
k_{ul}	Türbin rotoru özgül çevresel hızı
N	Güç
n	Türbin devir sayısı
n_n	Nominal işletme devir sayısı
n_s	Özgül hız
n_l	Birim devir sayısı
p	Kutup sayısı
S_n	Pelton dizesi iğnesi kurs boyu
S_l	Kanat kalınlığı
t_1	Kanat giriş aralığı
t_2	Kanat çıkış aralığı
z_l	Pelton türbini kepçe sayısı
σ	Kavitasyon katsayısı
φ_s	Kanat boyu açısı

φ_t	Kanat aralığı açısı
β_s	Rotor kepçesi su akımı kesme açısı

KISALTMA LİSTESİ

DSİ	Devlet Su İşleri
EİE	Elektrik İşleri Etüd İdaresi
EÜAŞ	Elektrik Üretim A.Ş
ETKB	Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı
HES	Hidroelektrik Santral
UNIDO	Birleşmiş Milletler Sanayi ve Kalkınma Organizasyonu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 4-1 Francis tipi bir türbinin prensip şeması ve rotoru.....	13
Şekil 4-2 Kaplan tipi bir türbinin rotor kanatları açık ve kapalı konumlardaki fotoğrafları....	14
Şekil 4-3 Ayar kanatlarındaki açıklıklarını ayarlayan ayar çemberi mekanizması.....	14
Şekil 4-4 Gelişmiş bir ayar çemberi mekanizması.....	15
Şekil 4-5 Pelton tipi bir hidrolik türbin rotoru fotoğrafı.....	15
Şekil 4-6 Pelton tipi hidrolik türbine ait pelton düzesi.....	16
Şekil 4-7 Michell-Banki tipi bir özel türbinin basit prensip şeması.....	17
Şekil 4-8 Yatay eksenli Francis tipi salyangozsuz bir türbin şeması.....	18
Şekil 4-9 Düşey eksenli Francis tipi salyangozsuz türbin şeması.....	19
Şekil 4-10 Beton salyangozlu Kaplan tipi türbin şeması.....	19
Şekil 4-11 Boru tipi üst basınç türbinli hidrolik santral şeması.....	20
Şekil 4-12 1200 kW gücünde boru tipi türbinli bir hidrolik santral şeması.....	21
Şekil 4-13 4650 kW gücünde boru tipi türbinli bit türbin - generatör ünitesi kesit resmi.....	21
Şekil 4-14 Boru tipi türbinli hidroelektrik santral şeması.....	22
Şekil 4-15 Dairesel kesitli çelik salyangozlu Kaplan tipi bir türbini tesisin kesit şeması.....	23
Şekil 4-16 Yatay eksenli ve küçük güçlü Francis tipi bir üst basınç türbini yarı kesit şeması.....	23
Şekil 4-17 Çelik salyangozlu, düşey eksenli Francis tipi bir üst basınç türbini.....	24
Şekil 4-18 Yatay eksenli Pelton tipi bir hidrolik türbin - generatör ünitesi.....	25
Şekil 4-19 Yatay eksenli 2 düzenli Pelton tipi hidrolik türbin - generatör ünitesi.....	26
Şekil 4-20 Düşey eksenli, 6 düzenli Pelton tipi bir türbin - generatör ünitesi.....	27
Şekil 4-21 Düşü ve debi değerlerine göre hidrolik türbinlerin kullanma sahaları.....	28
Şekil 4-22 Düşü ve debi değerlerine göre hidrolik türbinlerin kullanma sahaları.....	29
Şekil 4-23 Francis ve Kaplan tipi hidrolik türbinler için işletme düşüleri.....	31
Şekil 4-24 Düşey eksenli Francis tipi türbinler için düşü- debi - devir ilişkisi.....	35
Şekil 4-25 Yatay eksenli Francis tipi türbinler için düşü- debi- devir sayısı ilişkisi.....	36
Şekil 4-26 Kaplan tipi türbinler için düşü- debi- devir sayısı ilişkileri.....	37
Şekil 4-27 Pelton tipi türbinler için düşü- debi- devir sayısı ilişkileri.....	38
Şekil 4-28 Francis tipi türbin rotoru ana boyutları.....	39
Şekil 4-29 Kaplan tipi türbin rotoru ana boyutları.....	40
Şekil 4-30 Francis tipi türbin salyangoz ana boyutları.....	42
Şekil 4-31 Köşeli kesitli beton salyangoz ana boyutları.....	44
Şekil 4-32 Dairesel kesitli çelik saç salyangoz ana boyutları.....	45
Şekil 4-33 Pelton türbini su dağıtıcısı ana boyutları.....	46
Şekil 4-34 Francis tipi türbin emme borusu.....	47
Şekil 4-35 Kaplan tipi türbin emme borusu ana boyutları.....	49
Şekil 4-36 Salyangoz eksenli ve türbin emme yüksekliği.....	49
Şekil 4-37 Francis ve Kaplan tipi türbinlerde b mesafeleri.....	50
Şekil 4-38 Kaviteasyon katsayısı grafiği.....	53
Şekil 5-1 Francis tipi türbin rotoru aralıklarının çizimi.....	57
Şekil 5-2 Francis tipi türbin rotoru kanatlarının akım çizgileri.....	57
Şekil 5-3 Akım çizgilerin ve rotor profilinin çizimi.....	61
Şekil 5-4 Taşıyıcı Kanat.....	62
Şekil 5-5 ξ_a ve ξ_w katsayıları ve profil açıları.....	63
Şekil 5-6 Kaplan tipi türbin rotorunun eksenel taşıyıcı kanat aralıklarındaki kuvvetler ve giriş çıkış üçgenleri.....	64
Şekil 5-7 Kaplan tipi türbin rotorları kanat aralığı katsayıları.....	67
Şekil 5-8 Kaplan tipi hidrolik türbin rotorunun boylamsal akım çizgileri.....	69
Şekil 5-9 Kaplan tipi bir türbin- generatör ünitesinin komple kesiti.....	70
Şekil 5-10 Kanatları ayarlanabilen kaplan tipi türbin rotoru.....	71
Şekil 5-11 Uskur tipi kaplan türbin rotoru.....	72

Şekil 5-12 Kaplan tipi türbinlere ait karakteristik eğriler	73
Şekil 5-13 Rotor kanatları ayarlanabilen ve uskur tipi türbinlere ait karakteristik eğriler	74
Şekil 5-14 Kapalı durumdaki türbin ayar kanatlarına etkiyen kuvvetler	76
Şekil 5-15 Tübin ayar kanatları basit şeması.....	77
Şekil 5-16 Ayar kanatları çemberlerinin tertip şekilleri.....	80
Şekil 5-17 Kaplan tipi türbinlerin ayar kanatları ile rotor kanatları ayarlama mekanizması ...	82
Şekil 5-18 Kaplan tipi türbinlerin verim eğrileri.....	83
Şekil 5-19 Salyangoz kesitlerinin hesaplanmasında kullanılan işaretler	84
Şekil 5-20 Türbin emme borusu prensip şeması ve ana boyutları.....	91
Şekil 5-21 Pelton tipi türbin rotoru kepçelerinin ana ölçüleri	94
Şekil 5-22 Pelton tipi türbin rotoru kepçeleri ve rotor göbeğine tespit şekilleri	95
Şekil 5-23 Pelton tipi türbin rotoru kepçelerine etkiyen kuvvetler	97
Şekil 5-24 Pelton düzesi ve iğnesinin ana ölçüleri	99
Şekil 5-25 Pelton düzesi ve su debisi kontrol grafikleri	100
Şekil 5-26 Pelton düzesi su demeti saptırıcısı	102
Şekil 5-27 Pelton düzeleri ile su demeti saptırıcılarının genel görünümü	103
Şekil 5-28 Pelton düzesi iğnesi kuvvet dengelemesi prensip şeması	104
Şekil 5-29 Pelton tipi türbinin düze iğnesini ve su demeti saptırıcısının birlikte regülasyonu	105
Şekil 5-30 İçten ayarlı, hidrodinamik profilli bir pelton düzesi ve iğnesi	105
Şekil 5-31 Türbin verimleri karşılaştırması	106

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1-1 Barajlı ve nehir tipi bir santral ile doğalgaz çevrim santralinin ekonomik karşılaştırması	4
Çizelge 4-1 Atmosfer basıncı	51

Çizelge 4-2 Suyun buharlaşma basıncı	51
Çizelge 5-1 Kaplan tipi türbin rotorlarına ait karakterisrik değerler	74
Çizelge 5-2 Alaşimsız çelik döküm malzemeler	78
Çizelge 5-3 Düşük alaşımlı çelik döküm malzemeler	78
Çizelge 5-4 Yüksek alaşımlı çelik döküm malzemeler ve özellikleri	79
Çizelge 5-5 Yüksek alaşımlı çelik döküm malzemeler.....	79
Çizelge 5-6 ϕ' açıları ve ρ/r_4 oranları	87
Çizelge 5-7 ϕ' açıları ve ρ/r_4 oranları	88
Çizelge 5-8 ϕ' açıları ve ρ/r_4 oranları	89
Çizelge 5-9 ϕ' açıları ve ρ/r_4 oranları	90
Çizelge 5-10 Pelton türbinlerinde kepçe sayıları.....	98
Çizelge 5-11 Düze memesi malzemeleri.....	101
Çizelge 5-12 Kovada II HES pelton türbinlerine ait değerler	103
Çizelge 6-1 Berdan HES Karakteristik tablosu (EİE).....	107
Çizelge 6-2 Berdan HES ünite I yıllık çalışma raporu (EİE).....	116
Çizelge 6-3 Berdan HES ünite II yıllık çalışma raporu	117
Çizelge 6-4 Berdan HES ünite I alternatif enerji üretimi.....	118
Çizelge 6-5 Berdan HES ünite II alternatif enerji hesabı.....	119

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca beni yönlendiren Y.Doç Dr. Zehra YUMURTACI ve tez danışmanım Doç. Dr Ümit Özgen ÇOLAK'a bu çalışma boyunca bana her türlü kolaylığı sağlayan EİE Proje Dairesi Başkanı Maksut Saraç'a ve tecrübelerini benimle paylaşan Namık AKIN'a, maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

ÖZET

Küçük Hidroelektrik Santraller, Birleşmiş Milletler Sanayi ve Kalkınma Organizasyonu (UNIDO) sınıflamasına göre 1MW ile 10MW arası kurulu güçlere sahip santralleri kapsamaktadır. 1MW'dan daha küçük kapasiteli HES'lere Mini HES, 10MW'dan büyük kapasiteli HES'lere ise Orta Büyükle HES denilmektedir.

İşletme tarzlarına, yapılış şekillerine, hidrolik düşüye ve akımın rotordaki yönüne göre hidrolik türbinleri çeşitli sınıflandırmalara tabi tutmak mümkündür. Ancak genellikle hidrolik türbinler 'aksiyon türbinleri' ve 'reaksiyon türbinleri' olmak üzeri iki ana gruba ayrılırlar.

Bu çalışmada hidrolik türbin tasarımları incelenmiş ve 1996 yılından beri Alarko tarafından işletilmekte olan Berdan HES'in mevcut Francis tipi türbinleri ve alternatif olarak seçilebilecek Kaplan tipi türbinlerin hesapları yapılmış. EİE 2005 yıllık çalışma raporundaki düşü ve debi değerleri göz önüne alınarak aynı şartlarda Kaplan tipi bir türbin seçilmesi halinde üretilebilecek enerji hesaplanmıştır.

Sonuç olarak mevcut Francis tipi türbinler yerine kısmi yüklerde daha yüksek verimler veren Kaplan tipi bir türbin seçilmiş olsaydı 2005 yılı içinde 5974954 kWh daha fazla bir elektrik üretimi gerçekleştirilmiş olacağı ortaya konmuştur.

ABSTRACT

According to the classification of UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) small hydropower schemes include the schemes which have a power between 1 MW and 10 MW. The schemes with smaller capacity than 1 MW are called mini hydropower schemes and the schemes with a higher capacity than 10 MW are called the medium scaled hydropower schemes.

Hydrolic turbins can be classified according to the way of operation, the way of construction, net head, direction of flow through the runner. But hydrolic turbines has two main types such as “impuls turbines” and “reaction turbines”.

In this study the hydrolic turbin designs are observed and the calculations are made for Berdan HEPP which is being operated by Alarko since 1996 and has turbines of Francis type. In this study also the calculations for turbines of Kaplan type which may be an alternative to the Francis type are made according to the data of net head and flow that takes place in the study report of EIE in 2005 and the total energy output values under the same circumstances are calculated for both types of turbines, Francis and Kaplan.

As a result it is found out and shown that if the turbines of Kaplan type which are more efficient with partial loads have been used instead of Francis type, the total electricity output would have been 5974954 kW more in 2005.

1. GİRİŞ

Küçük Hidroelektrik Santraller, Birleşmiş Milletler Sanayi ve Kalkınma Organizasyonu (UNIDO) sınıflamasına göre 1MW ile 10MW arası kurulu güçlere sahip santralleri kapsamaktadır. 1MW'dan daha küçük kapasiteli HES'lere Mini HES, 10MW'dan büyük kapasiteli HES'lere ise Orta Büyükle HES denilmektedir.

10 Mayıs 2005 tarihinde kabul olunan 5346 Sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, küçük hidrolik kaynak olarak, kanal tipi veya nehir tipi veya rezervuar alanı 15 km²'nin altında olan hidroelektrik üretim tesislerini tanımlamıştır. Kanunun bu tanımına bağlı olarak bundan böyle hidroelektrik enerjinin resmi raporlarda ve kalkınma planlarında, klasik (ya da büyük) hidroelektrik enerji ve küçük hidroelektrik enerji olarak ayrılması, yasal bir zorunluluk olmuştur.

Ülkemizin Küçük HES potansiyeli bakımından oldukça zengin bir ülkedir. DSİ planlamalarına göre ülkemizde Küçük HES tanımlamasına giren 278 adet proje mevcuttur. Bu projelerin toplam kurulu gücü 1086 MW'a ulaşmaktadır. Ülkemizdeki Küçük HES potansiyelinden bugüne kadar inşaatı tamamlanarak işletmeye açılan santrallerin toplam gücü 154,1 MW ile potansiyelin %14'lük bir bölümünü oluşturmaktadır. Küçük HES'lerin bugüne kadar yeterince değerlendirilemeyişinin sebebi bu tip projeleri gerçekleştirmekle görevli Devlet kuruluşlarından DSİ'nin önceliklerini sulama, içme suyu ve taşkın kontrol faydası yüksek Barajlı projelere vermesidir. Hidroelektrik enerji potansiyelini geliştirmekle görevli diğer bir kuruluş olan EİE ise önceliklerini kurulu gücü yüksek HES'lere vermiştir.

Özel sektörün katkısını sağlamak maksadıyla Yap-İşlet-Devret (YİD) ve Yap-İşlet (Yİ) modelleri ülkemizde uygulanmaya başlamıştır.

Küçük HES'ler genellikle nehir veya kanal santrali olarak tasarlandıklarında ekonomik olmaktadır. Barajlı bir küçük HES'in ekonomik olabilmesi için projenin çok maksatlı olması, yani enerji faydasının yanı sıra sulama, içme suyu ve taşkından koruma faydalarının da bulunması gerekmektedir. Sadece enerji faydası olan bir küçük HES'in nehir santrali olarak tasarlanmasında fayda vardır.

Bir nehir tipi santrali tipik olarak regülatör ve çevirme yapıları, çökeltim havuzu, iletim kanalı ve enerji tüneli, biriktirme ve yükleme havuzu, cebri boru, santral binası, çıkış suyu yapısından oluşmaktadır.

Bütün bu yapılarda yer seçimi yapılması, projenin ekonomisini belirleyen çok önemli bir

aşamadır. Yer seçimi yapılırken aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır.

Yapılar alüvyon, şist yamaç molozu gibi gevşek zeminler üzerine oturtulmamalıdır.

Heyelanlı bölgelerden ve fay hatlarından kesinlikle uzak mahaller seçilmelidir.

Özellikle su alma yapısı, cebri boru ve santral binası sağlam kayaya oturacak şekilde yerleştirilmelidir.

Su alma yapısı ile enerji tüneli veya iletim kanallının eksenini topografik münhanilere dik gelecek şekilde yerleştirilmelidir.

Bu kriterlere ilave olarak bir küçük HES'in ekonomisini etkileyen diğer önemli faktörler:

Pınarlar veya yer altı suları ile beslenen, böylece minimum akımı ortalama akımına yakın değerlerde olan akarsular üzerindeki santraller diğerlerine göre daha ekonomik olurlar. Bu durumda santralin kapasite kullanım oranı artar, minimum akıma tekabül eden ünite sayısı azalır ve işletme esnasında türbinlerin daha yüksek verimli bölgede çalıştırılması mümkün olur.

Proje düşüşünün fazla olması, elektromekanik teçhizatın fiziki ebatlarını küçülterek birim teçhizat bedelinin azalmasını sağlar. Ayrıca, düşüşü 25 metrenin altında olan HES'lerde kullanılan Kaplan türbinleri, daha yüksek düşüşlerde kullanılan Francis Türbinlerine nazaran yüksek birim yatırım maliyetine sahiptir.

Küçük HES'lerin birim yatırım maliyeti projenin maliyeti projenin özelliklerine göre farklılık göstermekle birlikte, yaklaşık bir değer olarak 900-1500 \$/kW aralığında alınmaktadır. (EİE)

Yıllık işletme ve bakım gideri ise yaklaşık 50 \$/kW olarak kabul edilmektedir. (EİE)

Barajlı hidroelektrik santral ile nehir santrali ve doğalgazlı termik santrallere ait tipik değerler kullanılarak yapılan genel/ekonomik mukayese Çizelge 1.1'de verilmiştir. Gerek barajlı gerekse barajsız hidroelektrik santrallerin avantajları açıkça görülmektedir. Doğalgaz santralına oranla ilk yatırım tutarı daha yüksek ve yıllık çalışma süresi ile yıllık elektrik üretimi daha düşük olmasına rağmen, uzun ekonomik ömrü nedeniyle hidroelektrik santralin daha karlı ve fizibil yatırım oldukları açıkça görülmektedir. Örnek hidroelektrik santralin yıllık üretimi düşük olmasına rağmen, ekonomik ömrü boyunca ürettiği toplam elektrik miktarı 96.750 GWh benzer doğalgaz santralının ürettiğinin 54.375 GWh yaklaşık iki katıdır.

Barajlı bir hidroelektrik santral için toplam yatırım tutarı 360 milyon \$, aynı kapasitedeki doğalgaz santrali yatırım tutarının 180 milyon \$, yani iki katıdır. Buna karşın, hidroelektrik

santralin yıllık net geliri 82 milyon \$ iken doğalgaz santralının 21,5 milyon \$ dır.

Bir nehir santralının işletmesinde barajlı HES'lere nazaran birçok dezavantaj ile karşılaşilmektedir.

Taşkın dönemlerinde, erozyona bağlı olarak akarsu tarafından taşınan kum, kil ve çakıl gibi malzemeler regülatörde birikerek kısa zamanda regülatörün dolmasına sebep olur. Bunu önlemek için regülatörün, biriken malzemeleri yıkayıp atabilecek tarzda tasarlanması gerekmektedir.

Akarsu tarafından taşınan askılı yüzer maddelerin su alma yapısı ızgaralarını tıkamak suretiyle işletmeye sekte vurması çok muhtemeldir. Bunu önlemek için, su alma yapısına otomatik olarak kendini temizleyen taraklı ızgaralar konulması gerekir. Aksi takdirde, işletmeye sık sık ara verip ızgara temizlemek gerekir ki, bu işlem önemli bir üretim kaybı yaratabilir.

Akarsu tarafından taşınan kum ve kilin yükleme havuzunda birikerek işletmeyi aksatması ve türbin kanatlarına zarar vermesi tehlikesi vardır. Bunu önlemek için, regülatör mahallinde uygun ebatlı bir çökelme havuzu yapılmalıdır.

Küçük HES lerde türbin tipinin seçimi ve tasarımı yapılırken uzun süren ölçümler sonucu elde edilen su akım değerlerinden yararlanılarak farklı debiler için yapılan işletme çalışmaları sonucunda en uygun proje debisi ve elde edilebilecek enerji hesaplanır. Debinin mevsimsel değişimleri dikkate alınarak ünite sayısı belirlenir, burada amaç her bir türbinin nominal debide çalışmasını sağlamaktır.

Belirlenen ünite debileri ve düşü değeri için en uygun türbin tipi seçilir. Türbinin projelendirme aşamasında imal edilmek istenen esas türbin rotoruna geometrik olarak benzer olan ve $H=1\text{m}$ faydalı hidroelektrik düşüde $N_n=1\text{kW}$ güç veren model bir türbin rotorunun devir sayısı olan n_s özgül devir sayısı türbin boyutlarını belirlemektedir.

Özgül devir sayı tespit edildikten sonra her bir imalatçının kendisi için belirlediği ampirik formüller ile n_s den faydalanılarak türbinin projelendirilmesi yapılmaktadır.

Çizelge 1-1 Barajlı ve nehir tipi bir santral ile doğalgaz çevrim santralinin ekonomik karşılaştırması (BAKIR, Nadi., 2001)

	Hidroelektrik (Barajlı)	Hidroelektrik (Nehir)	Termik (D.gaz)
Kurulu Güç (MW)	300	30	300
Yapıların Ekonomik Ömrü (Yıl)	500	250	50
Elektromekanik Aksam Ekonomik Ömrü (Yıl)	75	75	25
Yıllık Ortalama Çalışma Süresi (saat)	4,300	3,900	7,250
<i>TEAŞ Santralleri Ort. Çalışma Süreleri</i>	<i>4,100</i>	<i>4,000</i>	<i>5,700</i>
Yıllık Üretim (GWh)	1,290	117	2,250
Birim Yatırım Maliyeti (\$/kW)	1,200	900	600
İlk Yatırım Tutarı (Milyon \$)	360.00	27.00	180.00
Yatırımda İthalat Oranı (%)	%30	%45	%75
Yatırımın Yabancı Para Kısım (Milyon \$)	108.00	12.15	135.00
Yatırımın Yerli Kısım (Milyon \$)	252.00	14.85	45.00
Birim Yakıt Gideri (cent/kWh)	0.00	0.00	3.70
Birim İşletme/Bakım Gideri (cent/kWh)	0.25	0.40	0.75
Yıllık Yakıt Gideri (Milyon \$)	0.00	0.00	80.48
Yıllık İşletme/Bakım Gideri (Milyon \$)	3.23	0.47	16.31
Toplam Yıllık Gider (Milyon \$)	3.23	0.47	96.79
Üretilen Elektriğin Değeri (cent/kWh)	7.25	4.75	6.00
Yıllık Gelir (Milyon \$)	93.53	5.56	130.50
Yıllık Gelir Gider Farkı (Milyon \$)	90.30	5.09	33.71
Yıllık Amortisman (Milyon \$)	4.8	0.36	7.2
Faiz Yüklü (%)	%70	%70	%70
Uyarlanmış Amortisman (Milyon \$)	8.16	0.612	12.24
Yıllık Net Gelir (Milyon \$)	82.14	4.48	21.47
Net Gelir/Yatırım Oranı (%)	%22.82	%16.58	%11.93
Yatırımın Yabancı Para Kısım (Milyon \$)	108.00	12.15	135.00
Yurtdışına Ödenecek Faiz (Milyon \$)	75.6	8.505	94.50
Yatırım için Toplam Döviz Ödem. (Milyon \$)	183.60	20.66	229.50
Ekonomik Ömrü Boyunca Üretim (GWh)	96,750	8,775	54,375
Yatırım için Döviz Ödemesi (cent/kWh)	0.19	0.24	0.42
İşletme için Döviz Ödemesi (cent/kWh)	0.00	0.00	4.08
Toplam Dışarıya Aktarılan Kaynak (cent/kWh)	0.19	0.24	4.50
Yatırımın Yerli Para Kısım (Milyon \$)	252.00	14.85	45.00
Yurtiçinde Ödenecek Faiz (Milyon \$)	176.4	10.395	31.50
Yatırımın Toplam Yerli Tutarı (Milyon \$)	428.40	25.25	76.50
Yatırım için Yurtiçi Harcama (cent/kWh)	0.44	0.29	0.14
İşletme için Yurtiçi Harcama (cent/kWh)	0.25	0.40	0.38
Toplam Yurtiçi Harcama (cent/kWh)	0.69	0.69	0.52
İçsel Karlılık Oranı (IRR) %	%16.20	%12.09	%11.72
Fayda/Maliyet Oranı (% 8 İskonto oranı kulln.)	1.97	1.48	1.30

2. TÜRKİYE’NİN HİDROELEKTRİK ENERJİ POTANSİYELİ

2.1 Giriş

Ülkemiz hızlı bir sosyal ve ekonomik gelişim göstermektedir. Bu gelişmeye paralel olarak gereksinim duyulan elektrik enerjisini; öncelikle yerli enerji kaynaklarından elde etmek üzere projeler geliştirmeli ve gerekli yatırımlar yapılmalıdır. Kesintisiz, kaliteli, güvenilir ve ekonomik enerji elde etmek üzere hazırlanan projelerin; çevreye olumsuz etkilerinin en az olmasına dikkat edilmelidir.

Elektrik enerjisi üretiminde; fosil ve nükleer yakıtlı termik ve doğalgazlı santraller yanında hidroelektrik santrallerin yenilenebilir ve puant çalışma gibi iki önemli özelliği mevcuttur.

Elektrik enerjisi tüketimi ekonomik gelişmenin ve sosyal refahın en önemli göstergelerinden biridir. Bir ülkede kişi başına düşen elektrik enerjisi üretimi ve/veya tüketimi o ülkedeki hayat standardını yansıtmaları bakımından büyük önem arz etmektedir.

2003 yılı başı itibariyle Türkiye’de kişi başına elektrik enerjisi tüketimi brüt 1903 kWh’ye ulaşmış olmasına rağmen, bu rakamın Avrupa’da yaklaşık 6500 kWh/kişi ve dünya ortalamasının ise 2350 kWh/kişi olduğu dikkate alınırsa; ülkemiz için kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketiminin oldukça düşük seviyede olduğu gözlenmektedir. Bu nedenle, başta hidrolik enerji olmak üzere, elektrik enerjisi arzının artırılmasının gereği ortadadır.

2.2 Hidroelektrik Potansiyelimiz

Hidroelektrik potansiyelin belirlenmesinde “brüt potansiyel” , “teknik potansiyel” ve “ekonomik potansiyel” kavramları önem taşımaktadır.

Bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin teorik üst sınırını gösteren brüt su kuvveti potansiyeli; mevcut düşü ve ortalama debinin oluşturduğu potansiyeli ifade etmektedir. Topoğrafya ve hidrolojinin bir fonksiyonu olan brüt hidroelektrik enerji potansiyeli, ülkemiz için 433 milyar kWh mertebesindedir.

Teknik yönden değerlendirilebilir su kuvveti potansiyeli; bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin teknolojik üst sınırını göstermektedir. Uygulanan teknolojiye bağlı olarak düşü, akım ve dönüşümde oluşabilecek kaçınılmaz kayıplar hariç tutulmaktadır. Bölgede planlanan hidroelektrik projelerin teknik açıdan uygulanabilmesi mümkün olan tümünün gerçekleştirilmesi ile elde edilecek hidroelektrik enerji üretiminin sınırlarını temsil etmektedir.

Bu niteliğiyle teknik yönden değerlendirilebilir hidroelektrik potansiyel, brüt potansiyelin bir fonksiyonu olmakta ve çoğunlukla onun yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Ülkemizin teknik yönden değerlendirilebilir hidroelektrik enerji potansiyeli 216 milyar kWh civarındadır.

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

Hidroelektrik santrallerin ekonomik yapılabilirliğinin hesaplanabilmesi için; enterkonnekte sistemde aynı enerjiyi üretecek kaynaklar gözden geçirilmekte ve en ucuz enerji kaynağı belirlenerek hidroelektrik santral (HES) projesi bu kaynakla mukayese edilmekte ve ancak daha ekonomik bulunursa önerilmektedir. Ekonomik HES potansiyeli içindeki tüm projeler; termik santrallara göre verimleri daha yüksek projelerdir.

Ülkemizin 2004 yılı başı itibariyle tesbit edilen teknik ve ekonomik hidroelektrik enerji potansiyeli 127,6 milyar kWh'dir. Bu potansiyel; en az ilk etüt seviyesindeki hidroelektrik projelerle, istikşaf (ön inceleme), master plan, fizibilite (planlama-yapılabilirlik), kesin proje, inşa ve işletme aşamalarından oluşan 674 adet hidroelektrik projenin toplam enerji üretim kapasitesini ifade etmektedir.

Havza gelişme planlarının farklı zamanlarda hazırlanmış olmalarından dolayı projeler sonraki tarihlerde ekonomik yönden tutarsız duruma gelebilmektedir. Bununla birlikte zaman içinde enerji fayda ve maliyetlerinde meydana gelen değişikliklere göre ekonomik bulunabilecek tesislerin, ilk etütlerde terkedilmiş olmalarına da rastlanılmaktadır. Bu nedenle havza gelişme planlarının belirli aralıklarla, özellikle enerji faydalarına esas teşkil eden alternatif referans santral grubundaki değişikliklerden sonra, tekrar gözden geçirilip değerlendirilmesi uygun olacaktır. Bunlara karşılık, su kaynaklarının geliştirilmesinde görev üstlenen EİE ve DSI gibi kuruluşların yapmış oldukları, yeni enerji kaynaklarının yaratılmasına yönelik ilk etüt çalışmalarıyla bu potansiyele her yıl ilaveler olabilmektedir. Bütün bu olumlu ve olumsuz etkilerin de dikkate alınmasıyla, Türkiye'nin ekonomik hidroelektrik potansiyeli yıldan yıla ufak farklılıklar göstermekle birlikte bugün için 127,6 milyar kWh civarında olduğu kabul edilebilir.

Türkiye 433 milyar kWh brüt teorik hidroelektrik potansiyeli ile dünya hidroelektrik

potansiyeli içinde %1 paya sahiptir. 127,6 milyar kWh ekonomik olarak yapılabilir potansiyeli ile Avrupa ekonomik potansiyeli içinde yaklaşık %15 hidroelektrik potansiyeline sahip bulunmaktadır.

2.3 Hidroelektrik Potansiyel Gelişiminin Bugünkü Durumu

2003 yılı sonu itibariyle Türkiye'nin toplam kurulu gücü 35.587 MW olup, bunun 20.888 MW 'ı termik, 37 MW 'ı jeotermal ve rüzgar, 12578,7 MW 'ı hidrolik santrallere aittir. 2003 yılı toplam elektrik enerjisi üretimi ise 140.580 GWh olup, bunun 105.100 GWh'i (%74,2) termik, 150 GWh'i jeotermal ve rüzgar (%0,1), 35.329 GWh'i (%24,9) hidroelektrik santrallerden sağlanmıştır.

Hidroelektrik santralların üretimi, yağış koşullarına bağımlı olduğundan her yıl toplam üretim içindeki payı değişim göstermekle birlikte, Türkiye'de elektrik enerjisinin yaklaşık %20-30'u sudan üretilmektedir.

Bugün için 127,6 milyar kWh olan ekonomik hidroelektrik potansiyelimizin %35'i (45.155 GWh) işletmede, %8'i (10.129 GWh) inşa halinde ve %57'si (72.339 GWh) ise çeşitli aşamalardan oluşan projeler (ilk etüt ön inceleme, master plan, planlama ve kesin proje) düzeyindedir.

127,6 milyar kWh'lik yıllık ortalama enerji üretim değerini oluşturan 674 adet hidroelektrik santralin 133'ü işletmede, 32'si inşa halinde ve 509 adedi ise proje seviyesindedir.

Türkiye'de hidroelektrik proje üretimiyle ilgili EİE ve DSİ gibi kuruluşların önemli görevlerinden biri de; ülkenin hidroelektrik potansiyelinin gelişimini temin edecek şekilde; tüm etüt ve proje hizmetlerinin ihtiyacı olan veri toplama faaliyetlerini yürüterek, havza master planlarını, baraj ve santrallerin ön inceleme, planlama ve proje çalışmalarını sürdürmektir. Hidroelektrik enerji potansiyelinin halen yararlanılmayan bölümünün gecikilmeden hizmete alınmasını sağlamak üzere ihtiyaç öncesinden yeterli miktarda projeyi hazır halde bulundurmak ilke olarak benimsenmiştir.

3. HES PLANLAMA AŞAMALARI

Su kaynaklarının geliştirilmesine ilişkin projelendirme çalışmaları genellikle 4 aşamada yapılır. Bunlar istikşaf (ön inceleme), master plan, planlama (fizibilite-yapılabilirlik) ve kesin proje aşamalarıdır.

3.1 İstikşaf Çalışmaları

Bu çalışmalar genellikle havza bazında ve havzanın potansiyelini tanımak için yapılırsa da, havza istikşafında yeralmayan ve proje fikri sonradan geliştirilen münferit bir ünite için de hazırlanabilirler. Bu maksatla önce havza içindeki toprak kaynaklarının miktarlarıyla özellikleri, bu topraklarda yetiştirilen ve yetiştirilebilecek bitkiler, pazar durumları, havza içinde ve civarındaki yerleşim yerleri, buradaki toplulukların ve endüstri tesislerinin su ihtiyaçları ile ilgili bilgiler derlenir. İklim ve akarsuyun hidrolojisine ait doneler belirlenir, ihtiyaçların ilerde nasıl gelişeceği veya daha ne gibi tesisler kurulabileceği tesbit edilir, daha sonra da büroda haritalar üzerinde ihtiyaçların karşılanması için yapılması gerekli tesisler belirlenerek boyutları saptanır, maliyetleri hesaplanır, ekonomileri incelenir ve müteakip aşamalarda ele alınması uygun görülenler için tavsiyelerde bulunulur. Proje sahasındaki ihtiyaç ve sorunlar ile bunları karşılayabilecek imkan ve tedbirlerin dökümünü veren istikşaf çalışmaları bir sonraki aşamada yapılacak çalışmalara da ışık tutar.

Münferiden ele alınan tali bir havza bazındaki projeler için gerçekleştirilen istikşaf çalışmaları sonunda, projenin teknik ve ekonomik yapılabilirliğe sahip olduğu gösterildiği takdirde, bu proje toplanacak daha ileri detay ve hassasiyette done temini çalışmaları ve etüdlere konu edilerek doğrudan planlama aşamasında ele alınır.

Planlama sürecinin ilk aşamasını teşkil eden istikşaf çalışmalarında çok kapsamlı ve detaylı done toplama ve etüd faaliyetlerine girilmez. Bu çalışmalarda;

1/25 000 ölçekli topografik haritalar,

Yüzeysel gözlemlere dayalı, bazen muayene çukur ve hendekleri açılarak elde edilen jeolojik bilgiler,

Yüzeysel gözlemlere dayalı araştırmalar yapılarak, öngörülecek tesislerin muhtemel kazı yerlerinden veya civardaki ocaklardan temin edilebilecek yapı gereçlerinin cins, miktar ve inşaat sahalarına uzaklıkları hakkındaki ön bilgiler,

Toprak kaynakları için herhangi bir laboratuvar araştırmasına girilmeksizin mevcut amenajman

alışmalarından istifadeyle veya dar kapsamlı tutulan arazi çalışmaları sonucunda belirlenen toprak yapısının nicelik ve niteliklerinin tasnifini %75 doğruluk derecesiyle içeren bilgiler,

Su temini, değişik maksatlı su ihtiyaçları ve öngörülecek tesisler ile inşaat aşamasındaki geçici tesislerin taşkın risklerinin tayininin belirlenmesi amacıyla, asgari yeterlilikte bir gözlem periyodunu kapsayan veya sentetik yöntemlerle yapılan proje hidrolojisi alışmaları,

Proje kapsamındaki tesislerin, bazı kabullere dayalı olarak ve detay çalışmaları içermeden çıkarılan metrajlara göre bulunan keşif maliyetleri,

Proje faydalarının belirlenmesi amacıyla, kapsamlı anket ve araştırmalar yapılmadan derlenen istatistiki bilgilerle yetinilen tarımsal ekonomi etüdları,

Yeterli görülerek, istenen fonksiyonu görececek en ekonomik ve inşa kabiliyeti olan bir çözümüne gitmeye veya mümkün mertebe yaklaşılmaya çalışılır. İstikşaf aşamasında, aynı fonksiyonu sağlayacak alternatif araştırma çalışmaları ağırlık taşımazsa da, gerek genel formülasyon gerekse herhangi bir proje ünitesi için ekonomik karşılaştırma yapmadan karar verilemeyen durumlar için bu çalışmalara ihtiyaç duyulur.

3.2 Mastır Plan alışmaları

Havza çapında yapılan veya tali bir havza bazındaki münferit tesis ya da tesisler grubunu kapsayacak şekilde gerçekleştirilen istikşaf çalışmalarının müteakip aşaması, genellikle planlama çalışmaları olmaktadır. Ancak, planlama çalışmalarının büyük bir havza çapında yapılması, hem güçlükler arz edeceğinden ve hem de uygulama programlarının uzun periyotları kapsamısı nedeniyle ileride yeni donelerin ışığı altında revizyona ihtiyaç duyulacağından, bir bakıma gereksiz görülmektedir. Bundan dolayı, havza istikşafının gözden geçirilmesiyle bir Master Plan hazırlanması ve bu planda teklif edilen projelerin münferiden planlama aşamasında etüd edilmesi daha uygun olmaktadır.

Mastır Plan aşamasındaki çalışmaların mutlaka havza çapında yapılması gerekmez. Bazen birden fazla projenin birbiri ile yakın fiziki ilişki içinde bulunduğu durumlar söz konusu olmaktadır. Bu projelerden veya proje ünitelerinden bir tanesi ortadan kalkarsa, diğer projelerin birbiri ile ilişkilerini daha iyi belirlemeden veya grup içindeki projelerin yapılabilirliğini daha sağlıklı bir şekilde ortaya çıkarmadan planlama çalışmalarına geçilmemesi gerekmektedir. İşte bu maksatla yapılan çalışmalar da Mastır Plan alışmaları olarak ifade edilmektedir.

Bu çalışmalarda kullanılan done ve etüd çalışmalarının istikşaf aşamasındakilere kıyasla daha

ileri seviyede olmaları gerekmektedir. Done ve etüd imkanlarının yeterli düzeyde olması halinde istikşaf çalışmalarına gerek görülmeden Mastır Plan aşamasında çalışmalar yapılabilir. Mastır Plan aşamasında teknik ve ekonomik yapılabilirliğe sahip olduğu ortaya konan projeler, bir program dahilinde planlama aşaması çalışmalarına konu teşkil ederler. Ancak bu projelerden herhangi biri yeterli sayılabilecek done ve etüdle Mastır Plan kapsamında ele alınmış ve aynı zamanda diğer projelerin planlama aşamasında yapılacak fiziki boyutlandırmalarına bağlı olarak, söz konusu projenin belirlenen karakteristiklerinin değişmeyeceği kesinlikle ortaya konmuş ise, bu proje planlama çalışmalarına ihtiyaç görülmeksizin kesin proje çalışmalarına konu olacak ve uygulamaya teklif edilebilecektir.

3.3 Planlama (Fizibilite-Yapılabilirlik) Çalışmaları

Uzun bir süreci kapsayan, temini oldukça zor ve pahalı meteorolojik, hidrolojik, jeolojik, topoğrafik ve çok yönlü istatistiki bilgiyi içeren sistematik done toplama faaliyetleri ile her biri başlı başına bir mühendislik disiplini konusu etüd faaliyetlerine dayalı olarak gerçekleştirilen çalışmalardır. Bu çalışmalar sonucunda ele alınmış olan projenin teknik, ekonomik ve mali yapılabilirliği kesinlikle ortaya konur. Donelerin hacmi ve kapsadığı süreyle orantılı olarak, her ne kadar planlama çalışmasının güvenilirliği artarsa da varılan sonucu "Kesin doğru" değil "doğruya en yakın" yaklaşımıyla kabul etmek gerekir. Nitekim, planlaması tamamlanan, ancak ödenek yetersizliği nedeniyle uygulaması geciken bazı projelerin yeni donelerin ışığında yapılan planlama revizyon çalışmalarında bazen orijinal formülasyondan çok farklı çözümlere ulaşıldığı görülmektedir.

Planlama çalışmalarında ihtiyaç duyulan bilgiler şunlardır:

Rezervuar alanı için 1/5000, depolama tesisleri için 1/1000 ölçekli haritalar,

1/5 000 ölçekli harita üzerine rezervuar,

1/1 000 ölçekli harita üzerine işlenmiş baraj yeri yüzey jeolojileri; sondaj, galeri, çukur ve hendek açılarak belirlenen jeolojik kesitler, formasyonların fiziksel özellikleri ve hidrojeolojik bilgiler,

Doğal yapı gereçlerini laboratuar deneyleri de yapmak suretiyle cins, yer ve miktar olarak belirleyen araştırma sonuçları,

Toprak kaynaklarının yeri, derinliği, yapısı, drenaj kabiliyeti, erozyona mukavemeti yönlerinden niteliklerini belirleyen, uzun süreli arazi araştırmaları ve gözlemleri ile toprak numuneleri üzerinde yapılan laboratuar deneylerine dayalı %90 doğruluk derecesinde arazi

tasnif ve drenaj etüdleri,

Proje sahasındaki sosyal yapıyı, insan kaynağının nitelik ve niceliğini, projeli koşullara adaptasyon kabiliyetini, ekonomik ve idari yapının projeye yönelik etkilerini, projeli ve projersiz koşullardaki bitki desenlerinin, gelir durumlarını, pazar araştırmalarını içeren tarımsal ekonomi etüdleri,

Zaman faktörünün kaynak potansiyelini harekete geçirmede olumsuz bir parametre olduğu gerçeği dikkate alınarak, done toplama, etüd ve mühendislik faaliyetlerini gereğinden fazla süreyi kapsayacak şekilde uzatmadan, proje sahasındaki ihtiyaç ve sorunlar ile kaynak ve imkanlar optimum olduğu yargısına varılan bir çözümde birleştirilerek planlama çalışmaları ikmal edilmelidir.

3.4 Kesin Proje Çalışmaları

Yapılabilirlik çalışmaları sonucunda belirlenmiş olan tip ve boyutlara göre; baraj, regülatör ve ilgili yardımcı yapıların ve hidroelektrik santralın gerekli statik, betonarme, hidrolik ve diğer hesaplarının yapılmasına ilişkin rapor ile inşaat ve imalat yapılmasına esas detaylı proje çizimlerinin ve inşaat yapım kriterlerine ait teknik şartnamelerin hazırlanması hizmetleri, kesin proje çalışmaları kapsamındadır. Yapılan bu çalışmaların sonuçları proje raporları, teknik şartnameler ve proje albümü (çizimler) adı altında toplanmakta olup, inşaat ihalesi bu dökümanlara göre yapılmaktadır.

Bu çalışmalara ek olarak, projelerin gerçekleşmesi için gerekli olabilecek kredinin temini maksadıyla kesin proje safhasında "Kredi Aplikasyon Raporu" hazırlanmaktadır. Ayrıca kesin proje çalışmalarında gerektiği zamanlarda, hidrolik model deneyleri, zemin ve kaya mekaniği deneyleri ve diğer lüzumlu deneyler de özel etütler kapsamında yapılmaktadır. Kesin projeler için çalışma süresi genellikle 2-3 yıldır.

4. HİDROLİK TÜRBİN TİPLERİ VE ÖN TASARIMLARI

4.1 Genel Açıklamalar

Hidrolik türbinler, suyun hidrolik akım enerjisini devamlı olarak döner çarklar (rotorlar) yardımı ile mekanik enerjiye çeviren döner (dinamik) hidrolik makinelerdir. .

Hidrolik makineler su türbinleri (hidrolik türbinler) ve su çarkları olmak üzere ikiye ayrılırlar. Su türbinlerinin dinamik hidrolik makineler olmasına karşın su çarkları su ağırlığı kuvveti makineleridir.

Hidrolik türbinlerde türbin rotoru kanatlarının aralıklarından geçirilen suyun basınç enerjisi, dönen türbin rotorunun kanatlarının aralıklarında mekanik enerjiye dönüşürler. Buna karşın su çarklarında, suyun mevcut olan potansiyel enerjisi, suyun çark kepçelerine dolması ve ağırlık tesiri ile çarkı döndürmesi suretiyle mekanik enerjiye dönüşür.

Su türbinleri, yani hidrolik türbinler takriben 135 yıldan beri imal edilmektedir. 19. yüzyıl içinde FOURNEYRON, JONVAL, HENSCHL, SCHWAMKRUG, ZUPPINGER vs. tarafından geliştirilmiş olan basit ve küçük güçlü su türbinleri çok yayılmış ve su türbinlerinin tahrik ettiği generatörlerde üretilen elektrik enerjisi 1891 yılında OSKAR von MILLER tarafından enerji iletim hattı ile uzak yerlerdeki müşterilere nakledilmiştir.

Su türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisinin enerji iletim hatları ile uzak mesafelere iletilmesi ile birlikte daha büyük, daha güçlü ve birbirleri ile paralel olarak çalışan hidrolik santraller kurulmaya başlanmıştır.

Ancak, modern anlamda otomatik olarak yük-frekans ayarlaması yapılabilen Francis, Kaplan ve Pelton tipi hidrolik türbinler 1920'lerden itibaren yayılmaya başlamıştır. Artık bu tip türbinler çok yaygın olarak kullanılmakta, günümüzde imal edilen büyük güçlü hidrolik türbinlerin verimleri %93-95 mertebesine kadar yükselmiş bulunmaktadır.

Su türbinlerinin modernleşerek büyük bir gelişme gösterilmelerine karşın su çarkları fazla gelişmemiş ve çok küçük hidrolik düşümlü ve su debisi çok fazla değişen dağ köylerinde çok dar bir kullanma sahası içinde kalmışlardır.

4.2 Hidrolik Türbinlerin Yapılış Şekilleri

İşletme tarzlarına, yapılış şekillerine, hidrolik düşüme ve akımın (hidrolik akımın) rotordaki yönüne göre hidrolik türbinleri çeşitli sınıflandırmalara tabi tutmak mümkündür. Ancak, genellikle, hidrolik türbinleri 'aksiyon türbinleri' ve 'reaksiyon türbinleri' olmak üzere iki ana

gruba ayırmak mümkün görülmektedir.

4.2.1 Reaksiyon Türbinleri

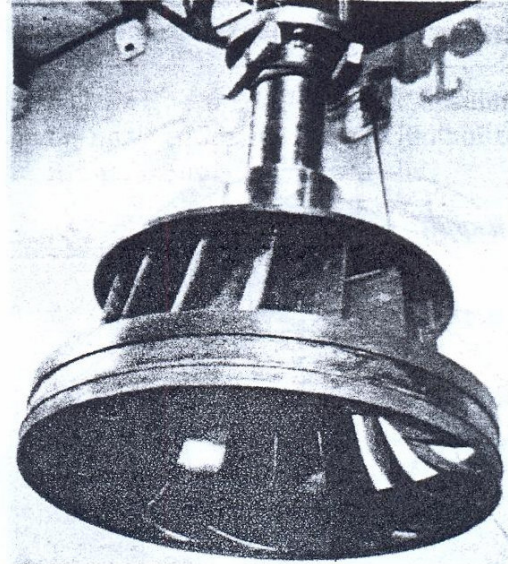
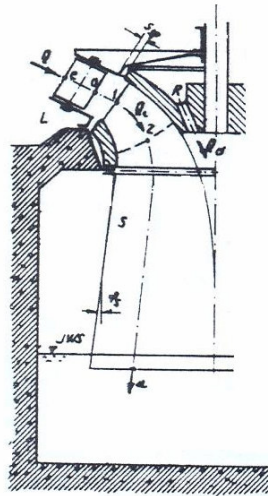
Reaksiyon türbinleri grubuna ‘Francis tipi hidrolik türbinler’ ile ‘ Kaplan tipi hidrolik türbinler’ girmektedir. Bu tip türbinlerde enerji değişimi için aşağıdaki Şekil4.1’de basit prensip şeması görülen R türbin rotorundan başka rotordan önce L ayar mekanizmasının ve rotordan sonra da S emme borusunun tesis edilmesi gerekmektedir.

Bu tip türbinlerde, türbin rotoru kanatlarının aralıklarında suyun giriş basıncında bir düşme meydana gelir ve su basıncında meydana gelen bu düşme, suyun ivmelenmesine yani hızlanmasına neden olur.

Francis tipi hidrolik türbinler ilk defa 1838 yılında Amerika ‘lı HOWD tarafından keşfedilmiş ve 1848 yılında yine Amerikalı FRANCIS tarafından geliştirilerek denenmiştir.

Kaplan tipi hidrolik türbinler ise 1912 yılında Prof. Dr . VIKTOR KAPLAN tarafından geliştirilerek bugünkü anlamda modernleştirilmiştir.

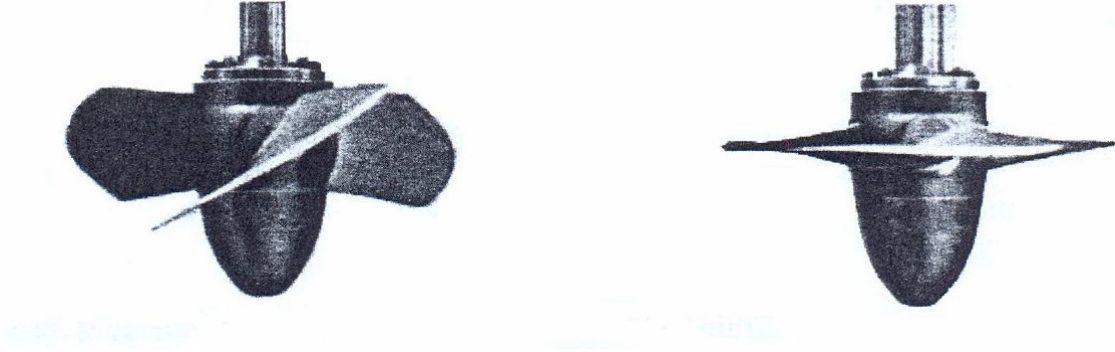
Şekil 4.1’de Francis tipi bir türbinin basit prensip şeması ve Francis tipi bir türbin rotorunun fotoğrafı. Şekil 4.2’de ise Kaplan tipi bir hidrolik türbin rotorunun fotoğrafları gösterilmiş bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Francis tipi bir türbinin prensip şeması ve rotoru (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

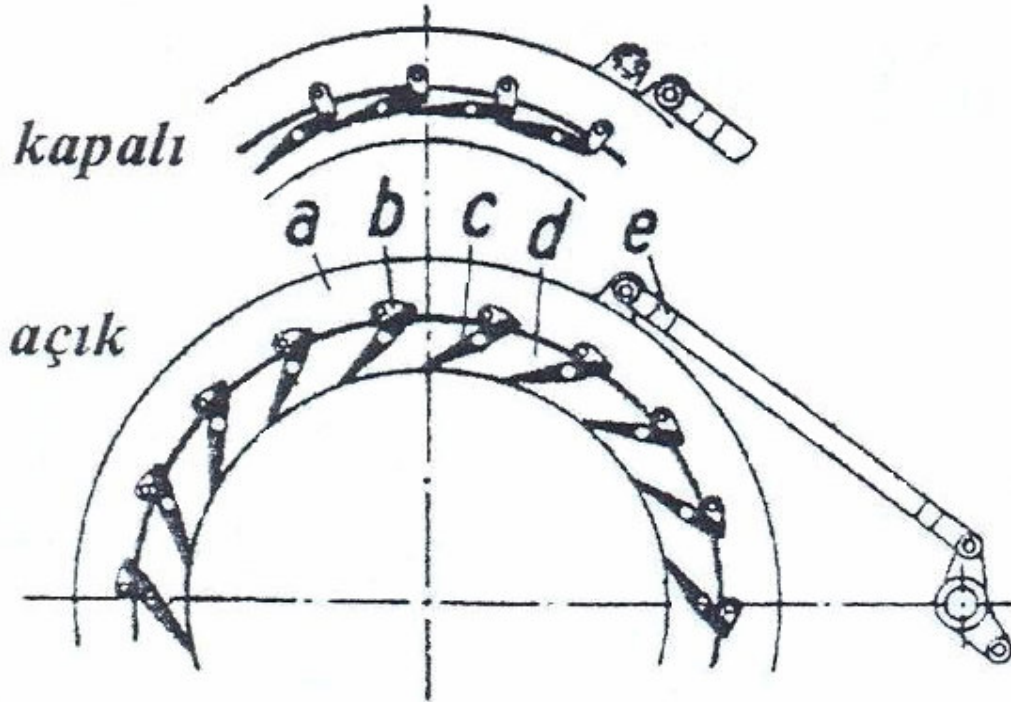
Hem Francis tipi hidrolik türbinlerde ve hem de Kaplan tipi hidrolik türbinlerde kullanılan türbin ayar kanatları ve ayar kanatlarını ayarlama çemberi mekanizması 1860 yılında Prof

FINK tarafından keşfedilmiş ve günümüze kadar gelişme göstermiştir. Bu tip türbinlerde kullanılan ayar kanatları ayarlama çemberi mekanizmasının prensibini açıklayıcı basit bir sistem Şekil 4.3’de ve daha gelişmiş bir ayar çemberi mekanizması ise Şekil 4.4’de fotoğrafları gösterilmiş bulunmaktadır.



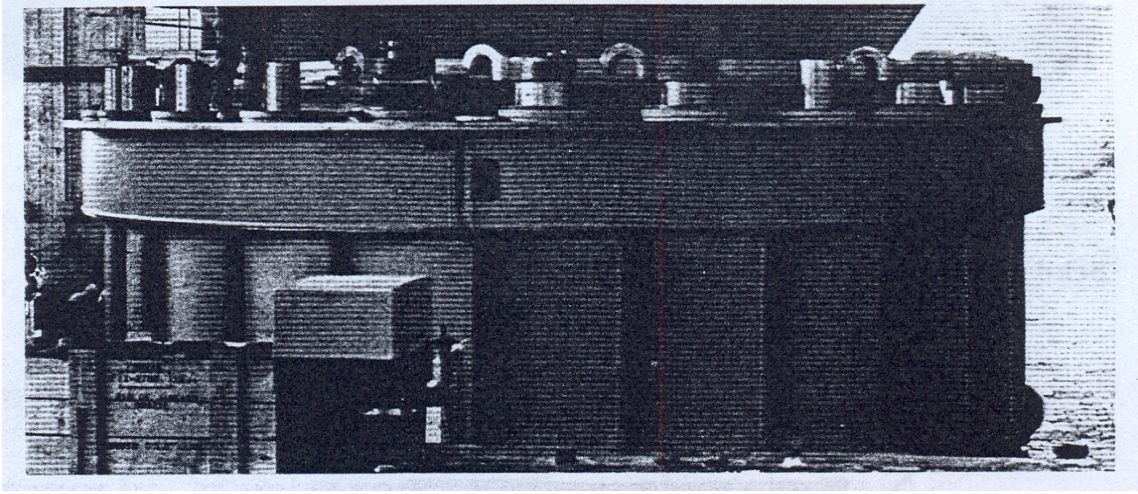
Şekil 4.2 Kaplan tipi bir türbinin rotor kanatları açık ve kapalı konumlardaki fotoğrafları
(BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

Francis tipi hidrolik türbinler $H=2\text{m}$ ile 600m hidrolik düşüler ve $N=2\text{ kW}$ ile 600 MW güçleri arasında imal edilmektedirler. Günümüzde, gücü $N = 800\text{ MW}$ olan Francis tipi hidrolik türbinler imal edilmiş bulunmaktadır.



Şekil 4.3 Ayar kanatlarındaki açıklıklarını ayarlayan ayar çemberi mekanizması

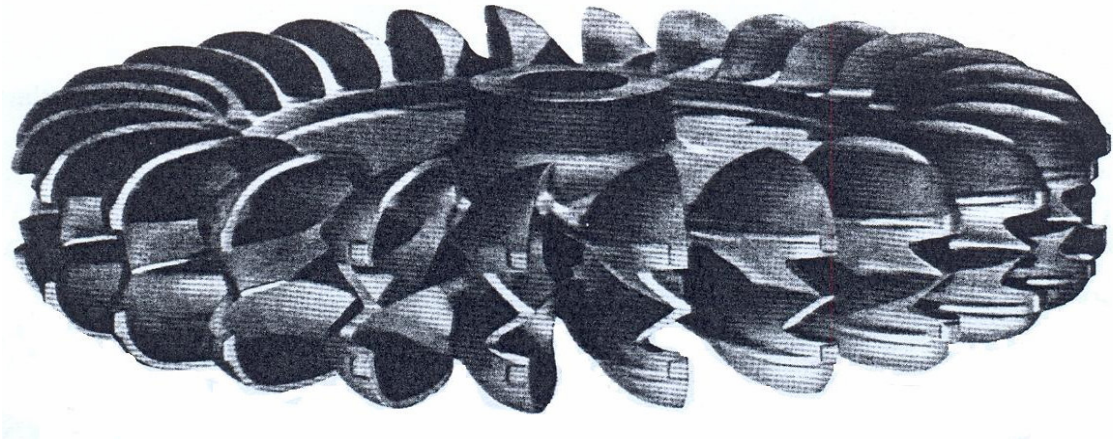
Kaplan tipi hidrolik türbinlerde $H = 2$ m ile 60 m hidrolik düşüler ve $N = 2$ kW ile 200 MW güçler arasında imal edilmektedirler. Günümüzde, gücü $N = 500$ MW olan Kaplan tipi türbinler imal edilmiş bulunmaktadır.



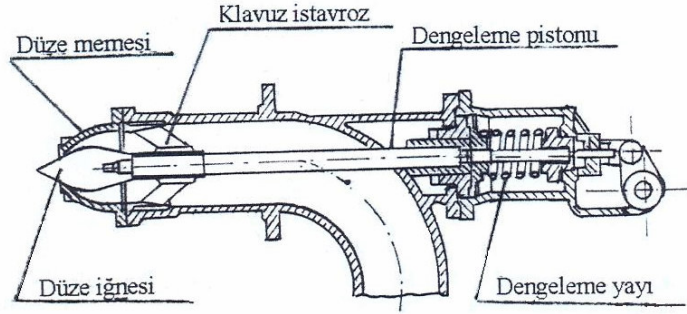
Şekil 4.4 Gelişmiş bir ayar çemberi mekanizması (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

4.2.2 Aksiyon Türbinleri

Bu tip türbinler 1880 yılında Amerika'lı PELTON tarafından keşfedilmiş ve gelişmeleri günümüze kadar devam etmiştir. Pelton tipi hidrolik türbinler çok yüksek hidrolik düşüler ve küçük su debileri için kullanılmaktadırlar. Şekil 4.5'de Pelton tipi bir hidrolik türbinin rotoru ve Şekil 4.6'da ise rotor kepçelerine su fışkırtan Pelton düzesinin basit bir prensip şeması gösterilmiş bulunmaktadır.



Şekil 4.5 Pelton tipi bir hidrolik türbin rotoru fotoğrafı (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)



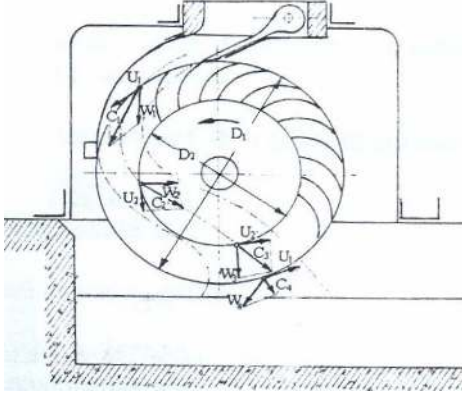
Şekil 4.6 Pelton tipi hidrolik türbine ait nozul.

Pelton tipi hidrolik türbinlerde düze memesinden fışkıran su Şekil 4.5’de görülen Pelton çarkının çevresindeki kepçelere teğetsel olarak çarpar. Bu çarpma ile suyun hız enerjisi (kinetik enerjisi) mekanik işe dönüşmüş olur ve türbin rotoru döner. Türbin rotorunun çevresindeki kepçelere suyun çarptırılması bir veya birkaç Pelton düzesi ile yaptırılabilir. Genellikle küçük güçlü Pelton tipi hidrolik türbinlerin 1 veya 2 düzesi olmasına karşın büyük güçlü Pelton tipi hidrolik türbinlerin 4 veya 6 adet düzesi bulunur.

Pelton tipi hidrolik türbinler $H = 60$ m ile 1.000 m hidrolik düşüler arasında ve $N = 2$ kW ile 100 MW arasındaki güçler için imal edilmektedirler. Günümüzde $N = 300$ MW gücünde Pelton tipi hidrolik türbinler imal edilmiş bulunmaktadır.

Michell-Banki tipi türbinler bu türbin sınıfına dahil edilebilirler. Bu tip türbinler 1903 yılında Avusturyalı Mühendis M.MICHELL tarafından keşfedilmiş ve 1917 yılında da Macar Prof D:BANKI tarafından geliştirilmiştir.

Bu tip özel türbinlerin kullanılma sahası çok dar olup, küçük güçlerde ve köylerin elektrikleştirilmesi için tatbikat alanı bulabilmektedirler.



Şekil 4.7 Michell-Banki tipi bir özel türbinin basit prensip şeması.

4.3 Hidrolik Türbinlerin Yapılış Şekillerine Ait Açıklamalar

Tahrik suyunun rotor girişindeki basıncına göre hidrolik türbinleri, Reaksiyon (Üst basınç) türbinleri ve Aksiyon (Serbest püskürtmeli) türbinleri olarak gruplara ayırmıştık.

Bunlar üst basınç türbinleri yani Francis ve Kaplan tipi hidrolik türbinleri yapılış şekillerine göre de, örneğin türbin salyangozunun şekline göre de aşağıda kaydedilen gruplara ayırmak mümkündür.

1.a-Salyangozsuz üst basınç türbinleri,

1.b-Beton salyangozlu üst basınç türbinleri,

1.c-Çelik salyangozlu üst basınç türbinleri,

1.d-Boru tipi (boru içine yerleştirilen) üst basınç türbinleri,

Ayrıca, Francis tipi hidrolik türbinleri eksen durumuna , Kaplan tipi hidrolik türbinleri rotor kanatlarının durumuna, Pelton tipi hidrolik türbinleri ise eksen durumuna ve düze (nozul) sayısına göre de aşağıda kaydedilen değişik gruplandırmalara ayırmak mümkündür.

Francis tipi türbinler: 1-Yatay eksenli Francis tipi hidrolik türbinler,

2-Düşey eksenli Francis tipi hidrolik türbinler.

Kaplan tipi türbinler: 1-Rotor kanatları sabit olan pervane tipi hidrolik türbinler,

2-Rotor kanatları ayarlanabilen Kaplan tipi hidrolik türbinler.

Pelton tipi türbinler: 1-Yatay eksenli Pelton tipi hidrolik türbinler,

1.1-Tek düzeli Pelton tipi hidrolik türbinler,

1.2-Birden fazla düzeli Pelton tipi hidrolik türbinler,

2-Düşey eksenli Pelton tipi hidrolik türbinler,

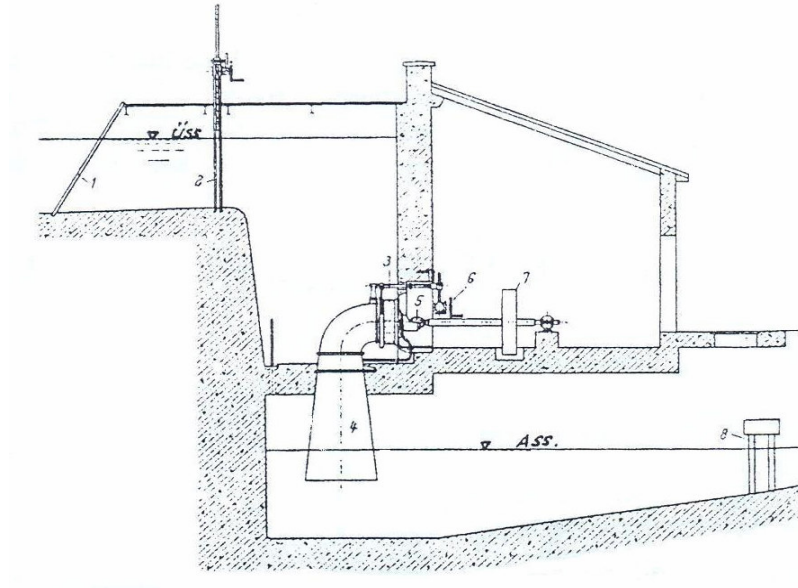
2.1-Tek düzeli Pelton tipi türbinler,

2.2-Birden fazla düzeli Pelton tipi türbinler.

4.3.1 Üst Basınç Türbinleri

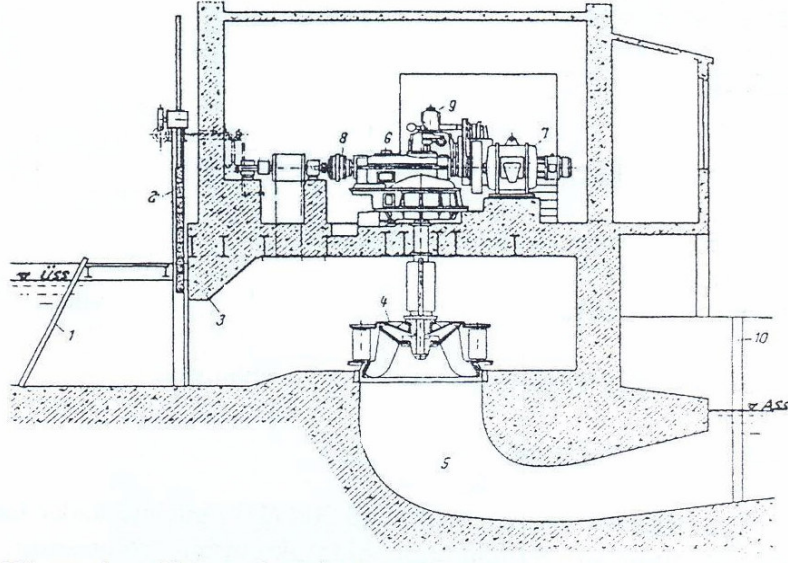
4.3.1.1 Salyangozsuz üst Basınç Türbinleri

Aşağıdaki Şekil 4.8 ve 4.9’da basit şemaları görülen bu tip türbinler $H = 5$ m hidrolik düşümlere ve $N = 500$ kW güçlere kadar imal edilen küçük güçlü ve eski tip türbinlerdir. 250 kW güçlere kadar yatay eksenli olarak ve 250-500 kw güçlere kadar da düşey eksenli olarak imal edilirler. Ancak günümüzde böyle küçük güçler için de modern hidrolik türbinler imal edilmektedirler.



Şekil 4.8 Yatay eksenli Francis tipi salyangozsuz bir türbin şeması. (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

1- Su giriş ızgarası, 2- su giriş kapağı, 3- Türbin rotoru, 4- Türbin emme borusu, 5- Türbin yatağı ve şaftı, 6- Türbin ayar kanatları ayarlama mekanizması, 7- Volan, 8- Çıkış suyu kapak yuvaları

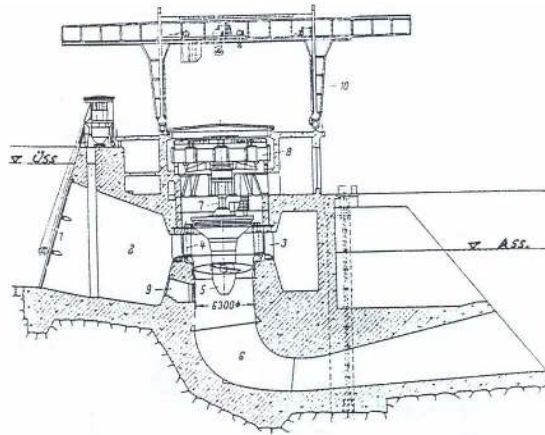


Şekil 4.9 Düşey eksenli Francis tipi salyangozsuz türbin şeması. (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

4.3.1.2 Beton Salyangozlu Üst Basınç Türbinleri

Bu tip türbinlerin kullanıldığı yerler büyük su debili ve hidrolik düşüşü $H = 10$ m kadar olan nehir tipi hidrolik santrallerdir. Beton salyangozlu üst basınç türbinlerinin salyangoz kesiti genellikle dikdörtgen trapez kesitli olarak betondan inşa edilirler ve salyangozların iç yüzeyleri ayrıca çelik saç konstrüksiyon ile kaplanmazlar.

Bu tip tesislerin basit bir şeması aşağıdaki Şekil 4.10'da gösterilmiş bulunmaktadır.



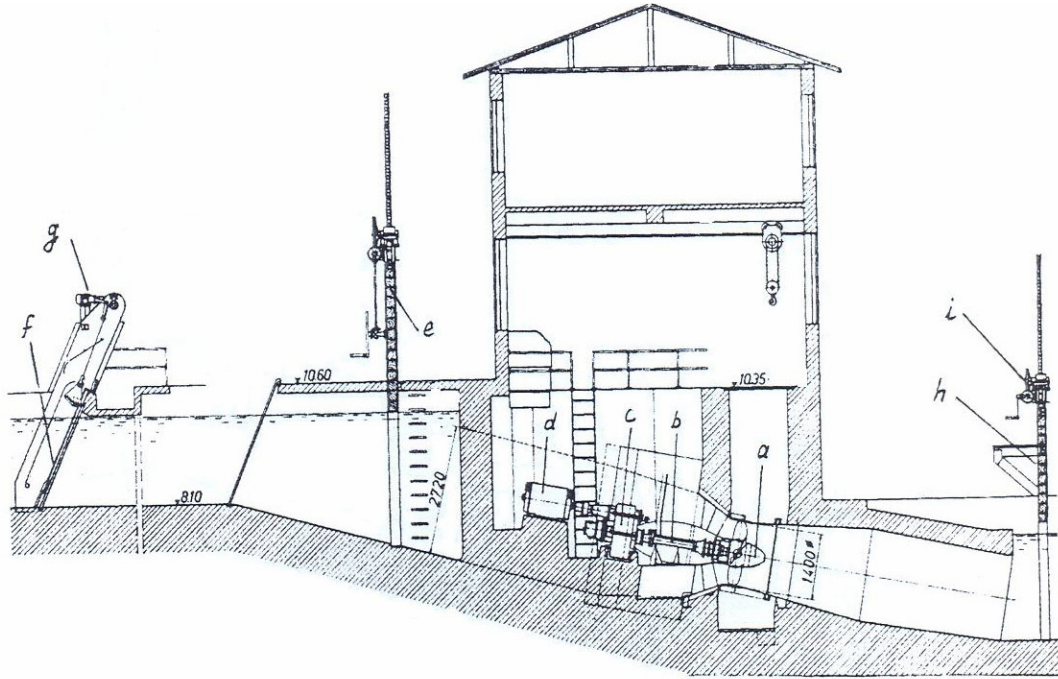
Şekil 4.10 Beton salyangozlu Kaplan tipi türbin şeması. (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

1- Su giriş ızgaraları, 2- Beton Salyangoz, 3- Yönlendirici sabit kanatlar, 4- Türbin ayar kanatları, 5- Türbin rotoru, 6- Türbin emme borusu, 7- Şaft, 8- Generator 9- Türbin emme borusuna giriş galerisi, 10- Gezer vinç.

4.3.1.3 Boru Tipi Üst Basınç Türbinleri

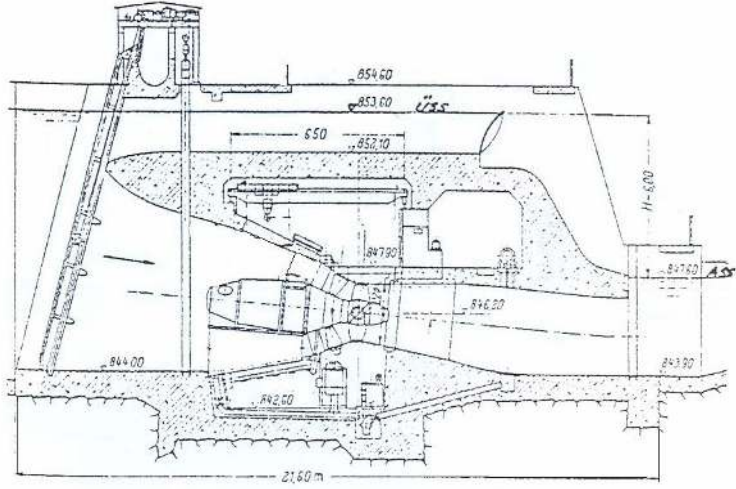
$H = 25$ m hidrolik düşüklere ve $N = 10$ MW güçlere kadar imal edilirler. Bu tip türbinlerin rotorları Kaplan tipi hidrolik türbin rotorlarıdır. Salyangozları bulunmadığı ve daha ziyade düzgün rejimli nehirlerde veya nehirlerin veya nehirlerin akım rejimi düzenlenmiş olan kısımlarında ve bir boru içine yerleştirilebilecek şekilde imal edildikleri için boru tipi türbin adını alırlar. Yatay eksenli veya eğik eksenli olabilirler.

Aşağıdaki Şekil 4.11, 4.12 4.13, 4.14, de değişik boru tipi türbinli nehir tipi hidrolik santral tesislerinin basit şemaları verilmiş bulunmaktadır.

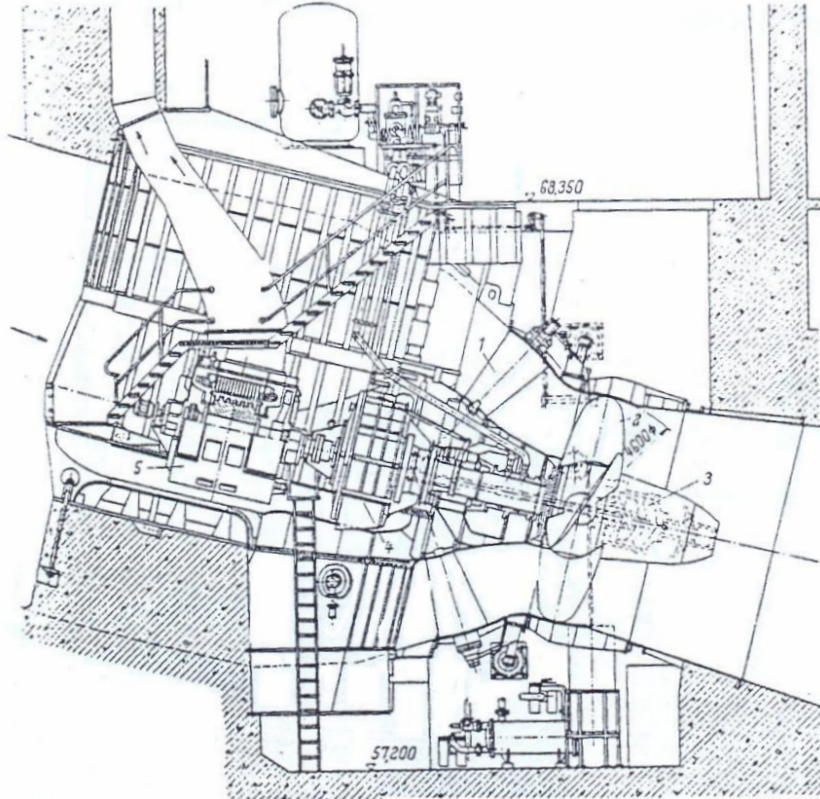


Şekil 4.11 Boru tipi üst basınç türbinli hidrolik santral şeması. (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

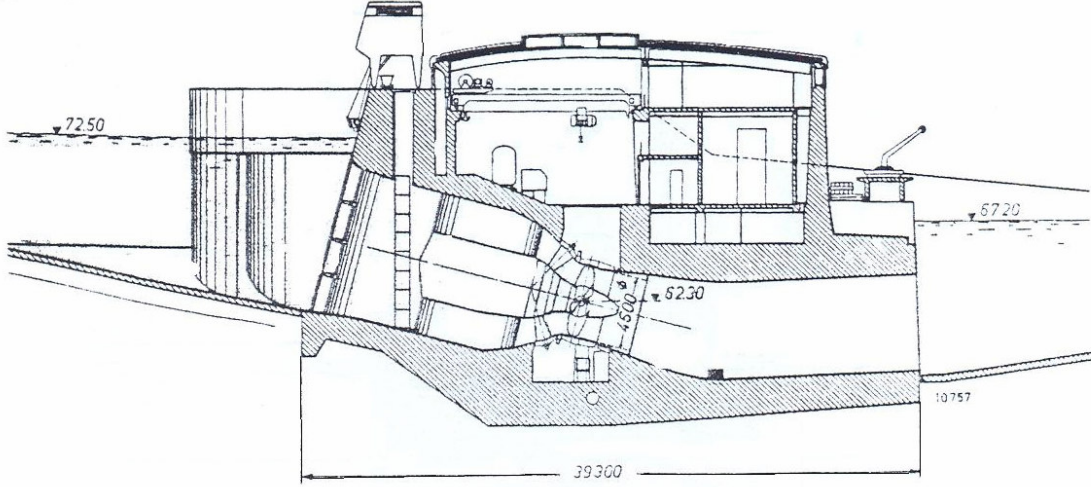
a- Türbin rotoru, b- Türbin shaftı, c- Şanzıman, d- Generatör, e- Su giriş kapağı, f- Su giriş ızgarası, g- Izgara temizleme tertibatı, h- Türbin çıkış suyu tertibatı, i- Çıkış suyu kapağı tahrik mekanizması



Şekil 4.12 1200 kW gücünde boru tipi türbinli bir hidrolik santral şeması. (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)



Şekil 4.13 4650 kW gücünde boru tipi türbinli bit türbin - generatör ünitesi kesit resmi. (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)



Şekil 4.14 Boru tipi türbinli hidroelektrik santral şeması. (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

4.3.1.4 Dairesel Kesitli Çelik Salyangoz Üst Basınç Türbinleri

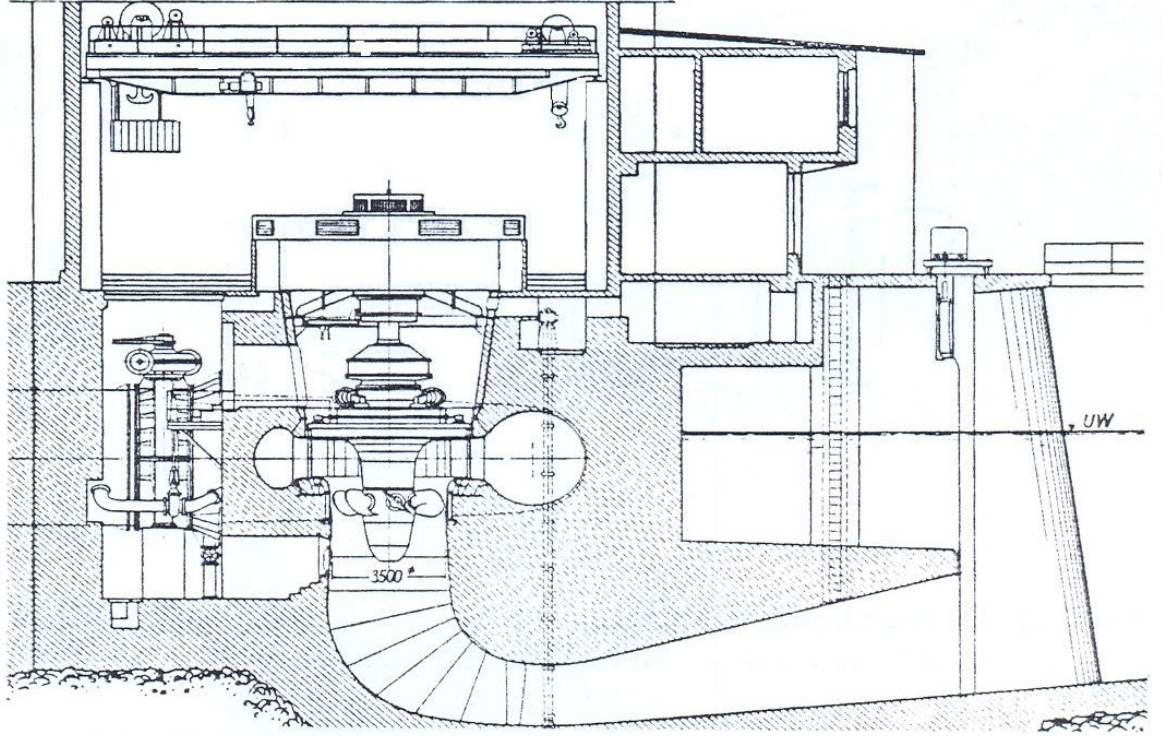
Dairesel kesitli çelik salyangozlu Kaplan tipi üst basınç türbinleri $H = 60$ m hidrolik düşülere ve $N = 500$ MW güçlere kadar imal edilmektedirler.

Dairesel kesitli çelik salyangozlu Francis tipi üst basınç türbinleri ise $H = 600$ m hidrolik düşülere ve $N = 600$ MW güçlere kadar imal edilmektedirler. Günümüzde $N = 800$ MW gücünde dairesele kesitli çelik salyangozlu Francis tipi hidrolik türbinler imal edilmiş bulunmaktadır.

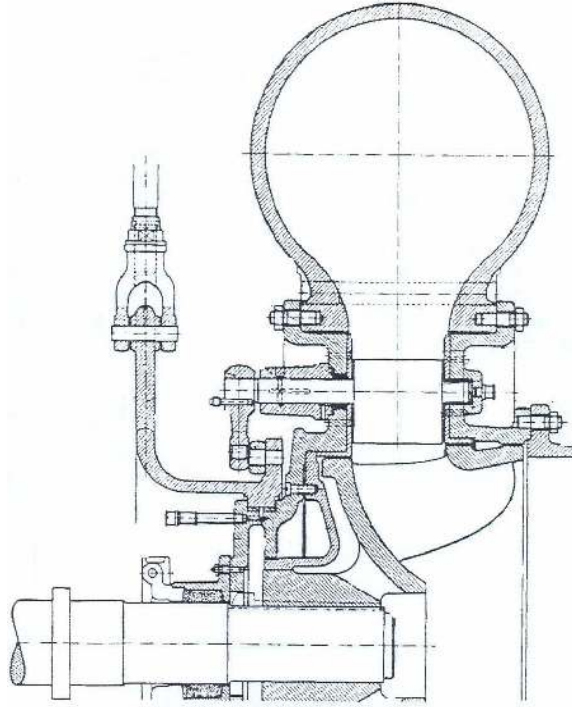
Bu tip türbinlerin dairesele kesitli çelik salyangozlarının çevresine betonarme demirli çok sağlam beton içinde kalan betonarme demirleri çelik salyangoza kaynak edilmek suretiyle bağlanırlar.

$H = 100$ m hidrolik düşülere kadar gri dökümden yapılan ve $H = 250$ m hidrolik düşülere kadar da çelik dökümden yapılan salyangozların kullanılması olanağı vardır. Ancak, günümüzde imal edilen büyük güçlü hidrolik türbinlerin salyangozları artık haddelenmiş çelik saçların uygun formlarda bükülüp kaynak edilmeleri yöntemi ile imal edilmektedirler.

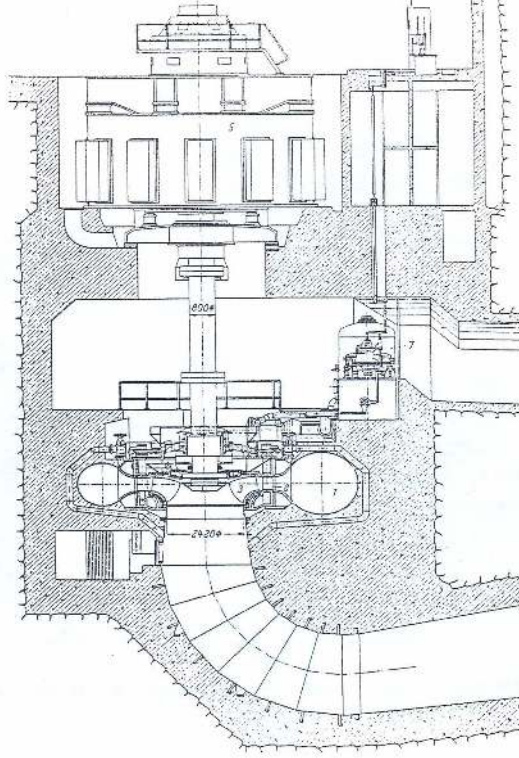
Aşağıdaki Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17’de dairesele kesitli çelik salyangozlu Kaplan ve Francis tipi üst basınç hidrolik türbinlerinin kesit şemaları gösterilmiş bulunmaktadır.



Şekil 4.15 Dairesel kesitli çelik salyangozlu Kaplan tipi bir türbini tesisin kesit şeması (EİE)



Şekil 4.16 Yatay eksenli ve küçük güçlü Francis tipi bir üst basınç türbini kesit şeması (EİE)



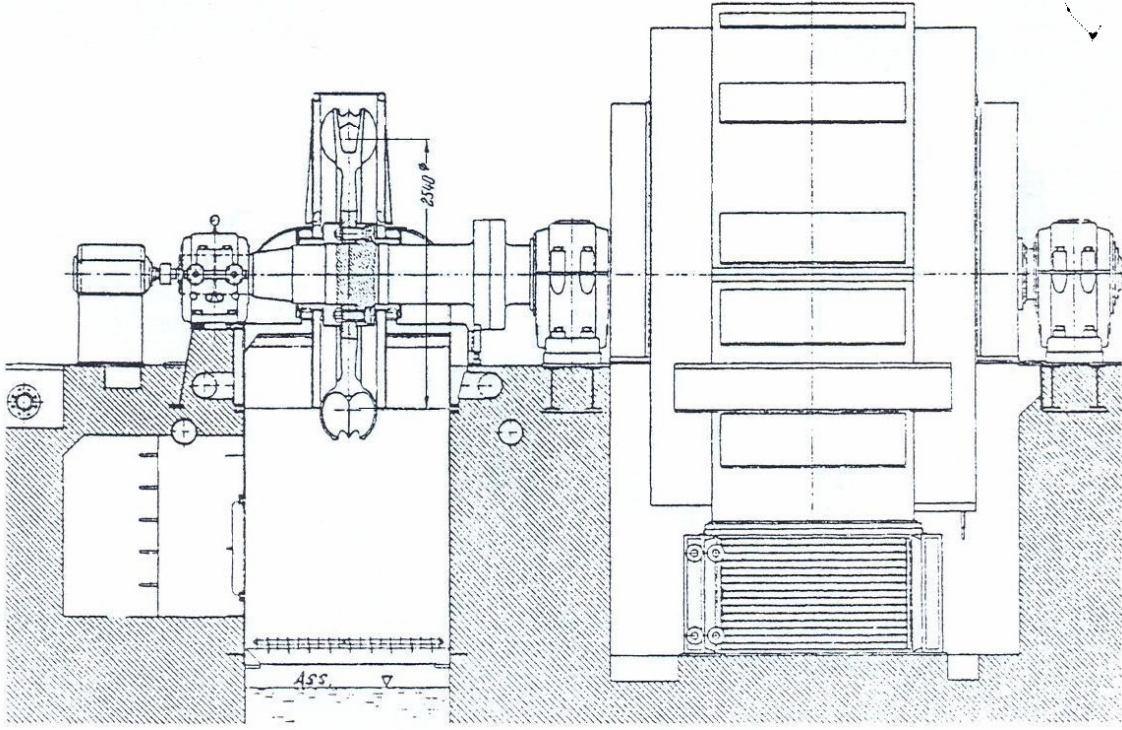
Şekil 4.17 Çelik salyangozlu, düşey eksenli Francis tipi bir üst basınç türbini (EİE)

4.3.2 Serbest Püskürtmeli Türbinler

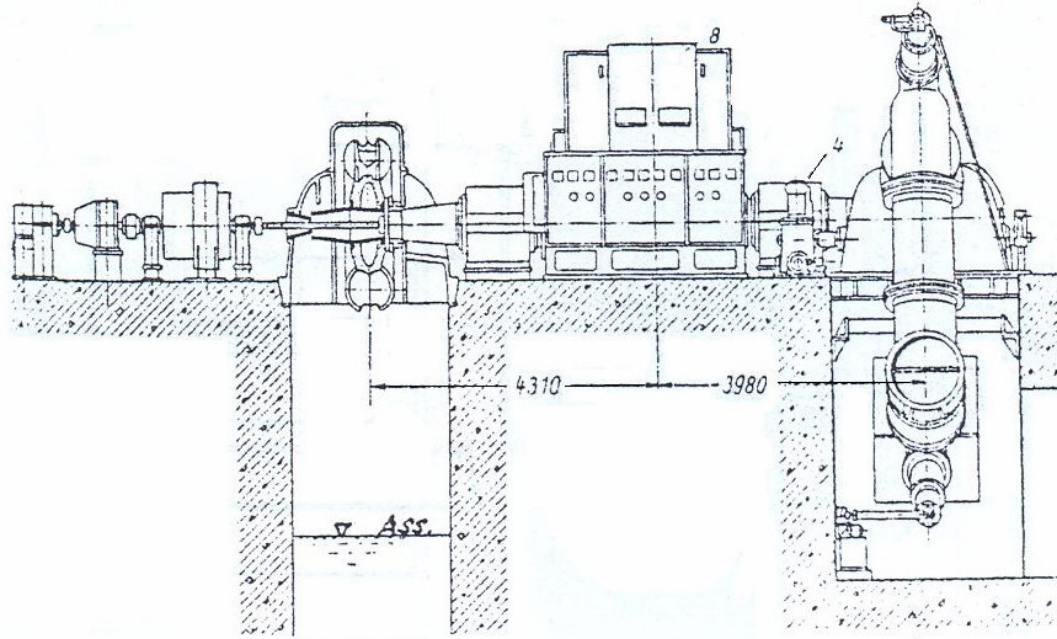
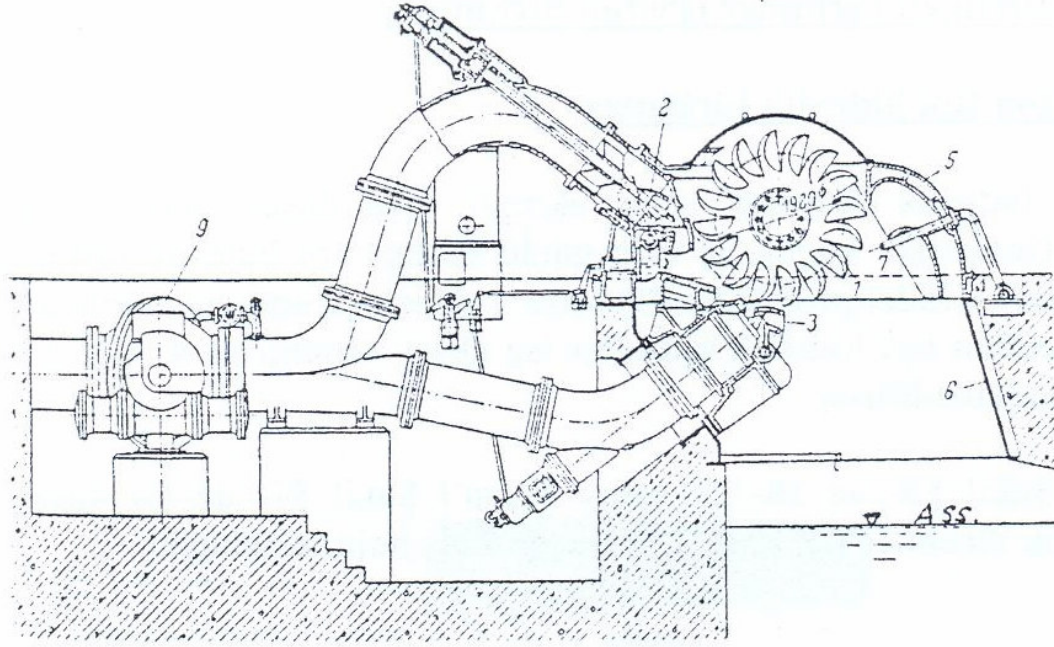
4.3.2.1 Pelton Tipi Hidrolik Türbinler

Pelton tipi hidrolik türbinler yatay eksenli veya düşey eksenli olarak imal edilmektedirler. Genellikle küçük ve orta güçlü Pelton tipi hidrolik türbinler yatay eksenli ve tek düzeli (1 adet püskürtücü) veya 2 düzeli (2 adet püskürtücü) olarak ve büyük güçlü pelton tipi hidrolik türbinler ise düşey eksenli ve 4 veya 6 adet gibi çok düzeli olarak imal edilirler.

Aşağıda Şekil 4.18 ve 4.19'da yatay eksenli Şekil 4.19'da ise düşey eksenli Pelton tipi hidrolik türbinler ile ilgili şemalar verilmiş bulunmaktadır.

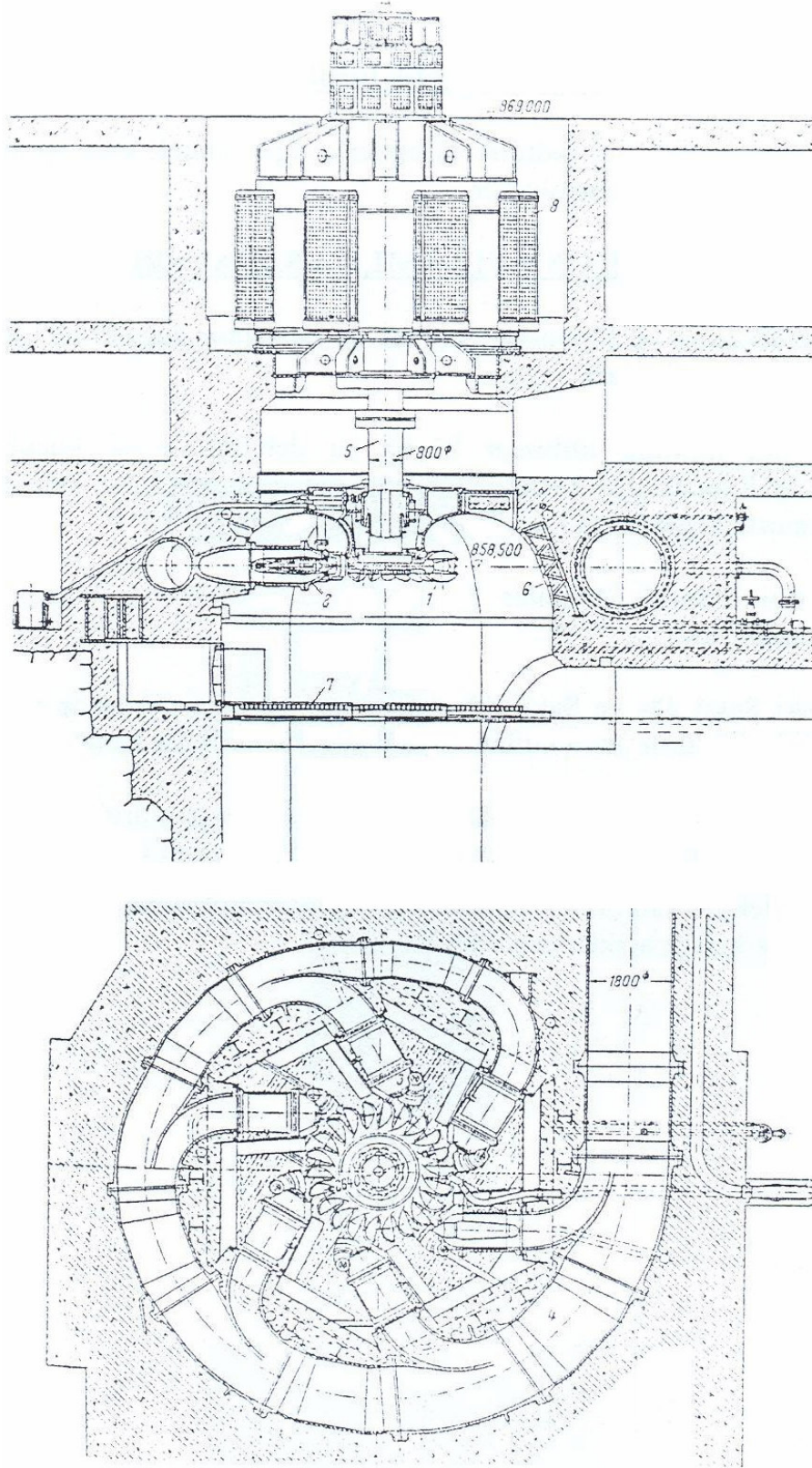


Şekil 4.18 Yatay eksenli Pelton tipi bir hidrolik türbin - generatör ünitesi. (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)



Şekil 4.19 Yatay eksenli 2 düzenli Pelton tipi hidrolik türbin - generatör ünitesi. (EİE)

1- Türbin rotörü, 2- Düze, 3- Su demeti sapırtıcısı, 4- Su demeti sapırtıcısı kumanda servomotoru, 5- Dış muhafaza, 6- Çıkış suyu, 7- Su freni düzesi, 8-Generatör, 9- Türbin küresel vanası



Şekil 4.20 Düşey eksenli, 6 düzenli Pelton tipi bir türbin - generatör ünitesi (EİE)

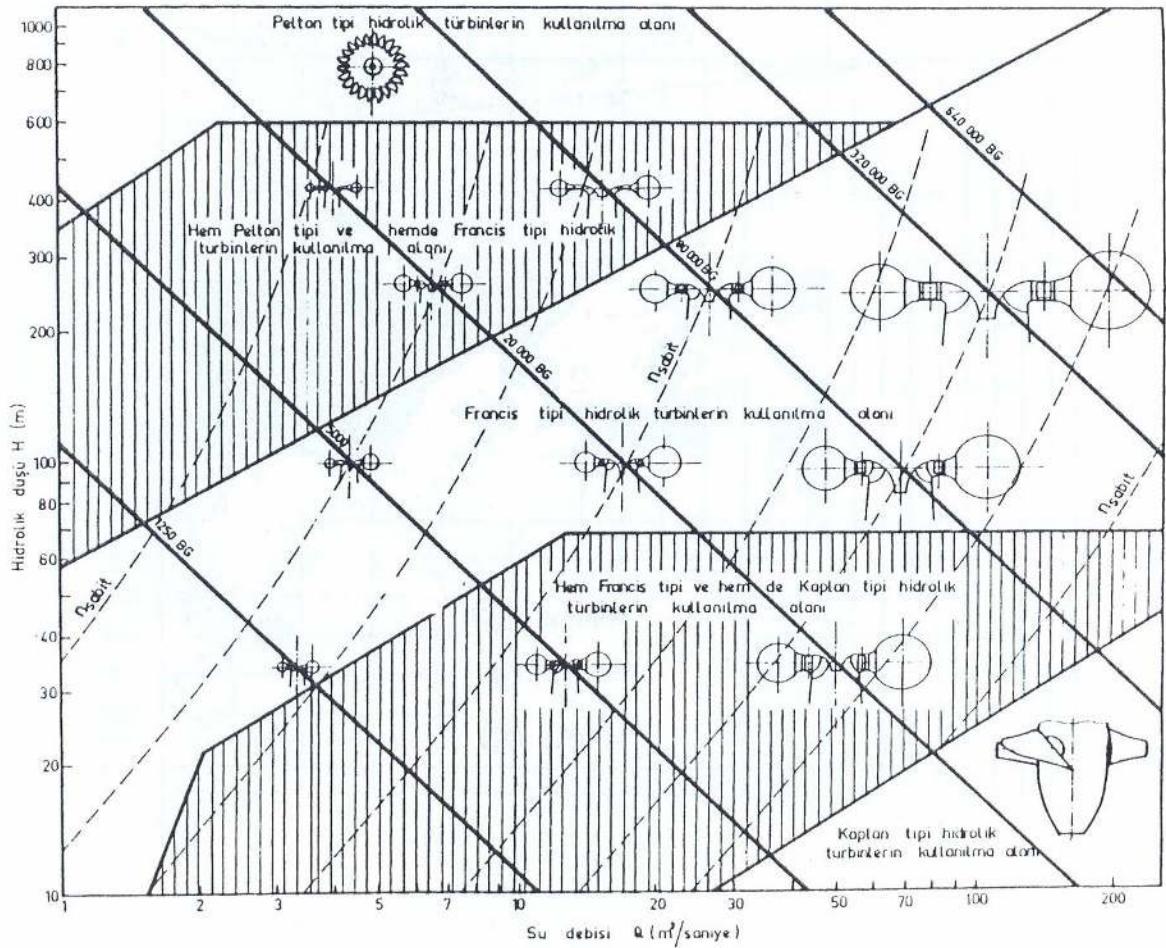
4.4 Hidrolik Türbinlerin Kullanma Sahaları

Hidrolik düşünün ve türbinden geçecek su debisinin değerlerine göre hidrolik türbinlerin kullanılma sahaları değişir.

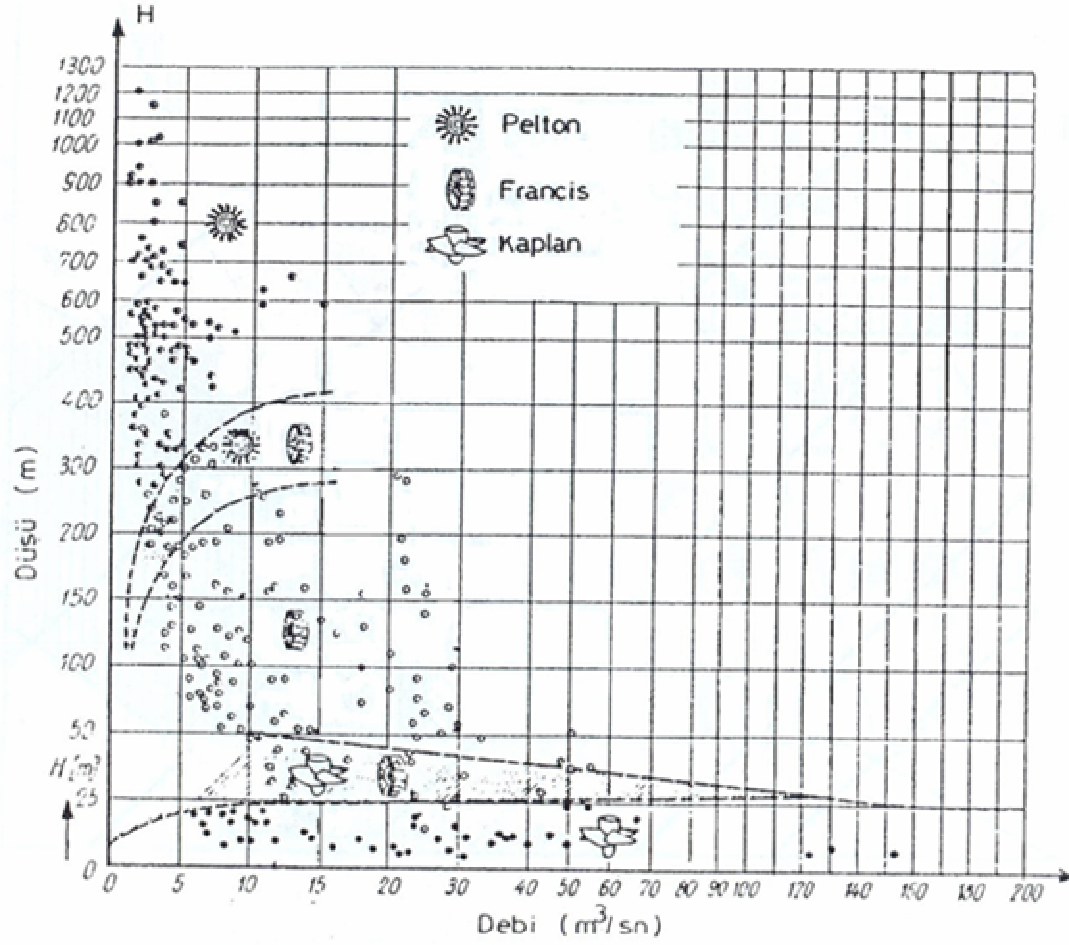
Kaplan tipi hidrolik türbinler büyük su debilerinde ve küçük düşülerde kullanılırlar iken Francis tipi hidrolik türbinler genel olarak orta yükseklikteki su düşülerinde ve orta değerlerdeki su debilerinde kullanılırlar.

Aşağıdaki Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'deki grafiklerde su düşüleri ve su debisine bağlı olarak hidrolik türbinlerin kullanılma sahaları gösterilmiş bulunmaktadır.

Şekil 4.21- ve Şekil 4.22- da verilen grafikler kullanılarak hangi hidrolik düşüde ve hangi su debisinde hangi tip hidrolik türbinin kullanılabileceğini tespit edebilmek için öncelikle hidrolik düşünün ve su debisinin tespit edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.21 Düşü ve debi değerlerine göre hidrolik türbinlerin kullanma sahaları (EİE)



Şekil 4.22 Düşü ve debi değerlerine göre hidrolik türbinlerin kullanma sahaları (EİE)

4.5 Hidrolik Türbinleri Ön Tasarımları ve Bazı Karakteristik Değerleri ile Ana Boyutlarının Tespiti

4.5.1 Türbin Dizayn Düşüsünün Tespiti

4.5.1.1 Barajlı Hidroelektrik Santral Tesislerinde Türbin Dizayn Düşüsünün Tespiti

Hidroelektrik santral tesislerinde kullanılan hidrolik türbinlerin projelendirilmeleri için dizayn düşüsünün tespit edilmesi çok büyük önem taşımaktadır. Özellikle barajlı HES tesislerine ait baraj göllerinin su seviyeleri mevsimlere göre değişiklikler gösterir. Bu duruma bağlı olarak da bu tip hidrolik santrallerin su düşüleri mevsimlere göre büyür veya küçülür. Bu nedenle barajlı HES tesislerinde kullanılacak hidrolik türbinler için öyle bir dizayn düşüsü seçilmesi gerekir ki baraj gölü seviyesi yükseldiği veya alçaldığı zamanlarda türbinler bu durumdan en az etkilensin ve yüksek verimle çalıştırılabilsin.

Barajlı HES tesislerinde baraj göllerinin su seviyelerine göre değişmekte olan maksimum ve

minimum brüt hidrolik düşüler ile su yollarındaki hidrolik kayıpları ve net hidrolik düşüler ile türbin dizayn düşüsünü tarif edebilmek için Şekil 4.23 da verilen şema düzenlenmiştir.

Maksimum Brüt Düşü

Baraj gölünün maksimum işletme seviyesi ile, sadece bir adet türbin yüksüz olarak çalışmakta iken, santral çıkış suyu seviyesi arasındaki kot farkı kadardır ki bu fark, yani maksimum brüt düşü, türbin dizayn düşüsünün %125'inden daha büyük olmamalıdır.

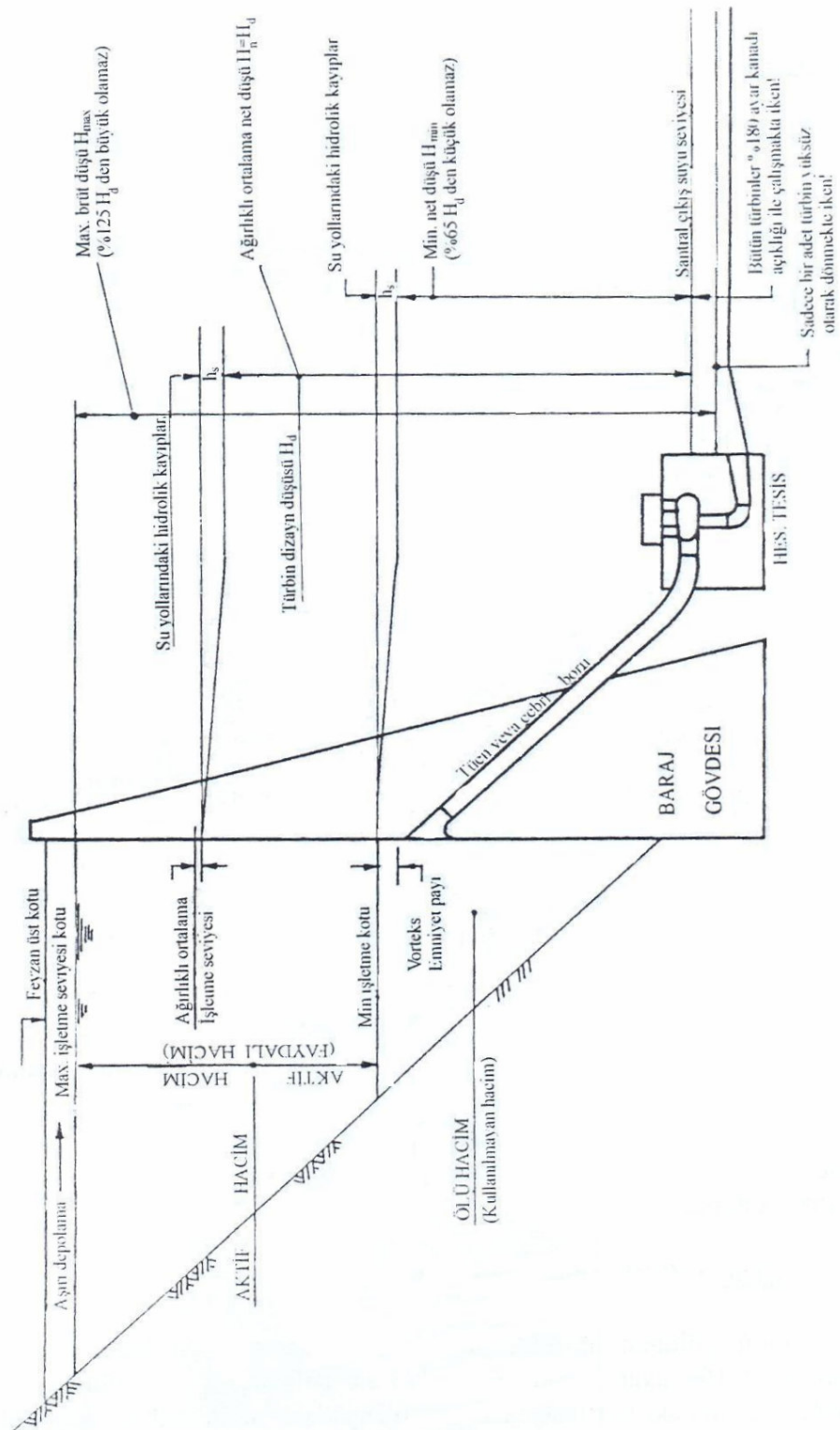
Minimum Brüt Düşü

Baraj gölünün minimum işletme seviyesi kotu ile, santraldeki bütün türbinler %100 ayar kanadı açıklıkları ile çalışmakta iken oluşan santral çıkış suyu seviyesi kotu arasındaki kot farkından, su yollarındaki bütün hidrolik kayıplar çıktıktan sonra kalan net düşüdür ki bu düşü, türbin dizayn düşüsünün %65'inden daha küçük olarak seçilemez.

Dizayn Düşüsü

Baraj gölünün ağırlıklı ortalama işletme seviyesi kotu ile santraldaki bütün türbinler %100 ayar kanadı açıklıkları ile çalışmakta iken oluşan santral çıkış suyu seviyesi arasındaki kot farkından, su yollarındaki bütün hidrolik kayıplar çıktıktan sonra kalan net düşüdür.

Bu tip hidroelektrik santral tesislerindeki su iletim kanalı, su iletim tüneli (basınçsız tünel) ve yükleme havuzu su seviyeleri ile santral çıkış suyu seviyeleri de çok büyük değişiklikler göstermemektedir. Bu nedenledir ki bu tip HES tesislerinde yükleme odası yollarındaki bütün hidrolik kayıplar çıkarıldıktan sonra kalan net düşü türbin dizayn düşüsü olarak tespit edilebilir.



Şekil 4.23 Francis ve Kaplan tipi hidrolik türbinler için işletme düşüleri (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

4.5.2 Türbin Gücünün ve Türbin Tipinin Tespiti

4.5.2.1 Türbin Gücünün Tespiti

Net hidrolik düşüşü ve debisi tespit edilmiş olan bir hidrolik türbinin tipi, bazı hidrolik türbin imalatçısı firmalar tarafından hazırlanmış olan ve birer örneği Şekil 58- ve Şekil 59- da verilen abaklardan yararlanmak suretiyle tespit edilebilir.

Hidrolik türbinlerin gücü aşağıda verilen formüller ile veya bazı hidrolik türbin imalatçısı firmalar tarafından hazırlanmış olan Şekil 4-24 Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de örnekleri verilen grafiklerden yararlanmak suretiyle de tespit edilebilir.

$$N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_d \cdot \eta_t}{75} \quad (\text{BG}) \quad \text{veya} \quad N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_d \cdot \eta_t}{102} \quad (\text{kW})$$

$$= 13,3 \cdot Q \cdot H_d \cdot \eta_t \quad (\text{BG}) \quad \text{veya} \quad = 9,81 \cdot Q \cdot H_d \cdot \eta_t \quad (\text{kW}) \quad (4.1)$$

4.5.3 Türbin Özgül Devir Sayısının Tespiti

Hidrolik türbinlerin özgül devir sayıları değişik imalatçı firmalar ve araştırmacılar tarafından hidrolik net dizayn düşüşüne bağlı olarak geliştirilmiş olan ve aşağıda kaydedilen ampirik formüllerden istifade edilerek tespit edilebilir.

4.5.3.1 Francis Tipi Hidrolik Türbinlerin Özgül Devir Sayısının Tespiti

A. Oesterlen’e göre :

$$n_s = \frac{3500}{(H_d)^{0,7}} \quad (4.2)$$

Voith’e göre :

$$n_s = \frac{4140}{(H_d)^{0,7}} \quad (4.3)$$

Kuarner Brug’a göre :

$$n_s = \frac{5000}{(H_d)^{0,7}} \quad (4.4)$$

Egyazarof’a göre :

$$n_s = \frac{5000}{(H_d)^{0,7}} \quad (4.5)$$

USA Bureau of Reclamataion'a göre :

$$n_s = \frac{2334}{(H_d)^{0,7}} \quad (4.6)$$

• F.Siervo ve F.Leva'ya göre :

$$n_s = \frac{3470}{(H_d)^{0,65}} \quad (4.7)$$

4.5.3.2 Kaplan Tipi Hidrolik Türbinlerin Özgül Devir Sayısının Tespiti

F. Keyl'e göre :

$$n_s = \frac{1750}{(H_d)^{0,4}} \quad (4.8)$$

Mazarof'a göre:

$$n_s = \frac{2200}{(H_d)^{0,57}} \quad (4.9)$$

USA Bureau of Reclamataion'a göre:

$$n_s = \frac{2702}{(H_d)^{0,5}} \quad (4.10)$$

F.Siervo ve F.Leva'ya göre:

$$n_s = \frac{2417}{(H_d)^{0,489}} \quad (4.11)$$

4.5.4 Türbin Devir Sayısının Tespiti

Hidrolik Türbinlerin ön projelendirilmesi esnasında türbin gücü, türbin ve özgül devir sayısı tespit edildikten sonra türbin devir sayısının tespiti için;

Özgül devir sayısından ile, bazı imalatçı firmalarca hazırlanmış olan ve takip eden sayfalarda Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'da verilmiş olan abaklardan ve frekans formülünden istifade ile türbin devir sayısı tespit edilebilir.

Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, hidrolik düşüden azami gücün elde edilmesi için özgül devir sayısı n_s 'in maksimum değeri ve türbin devir sayısı n 'in bir alt değeri seçilmelidir.

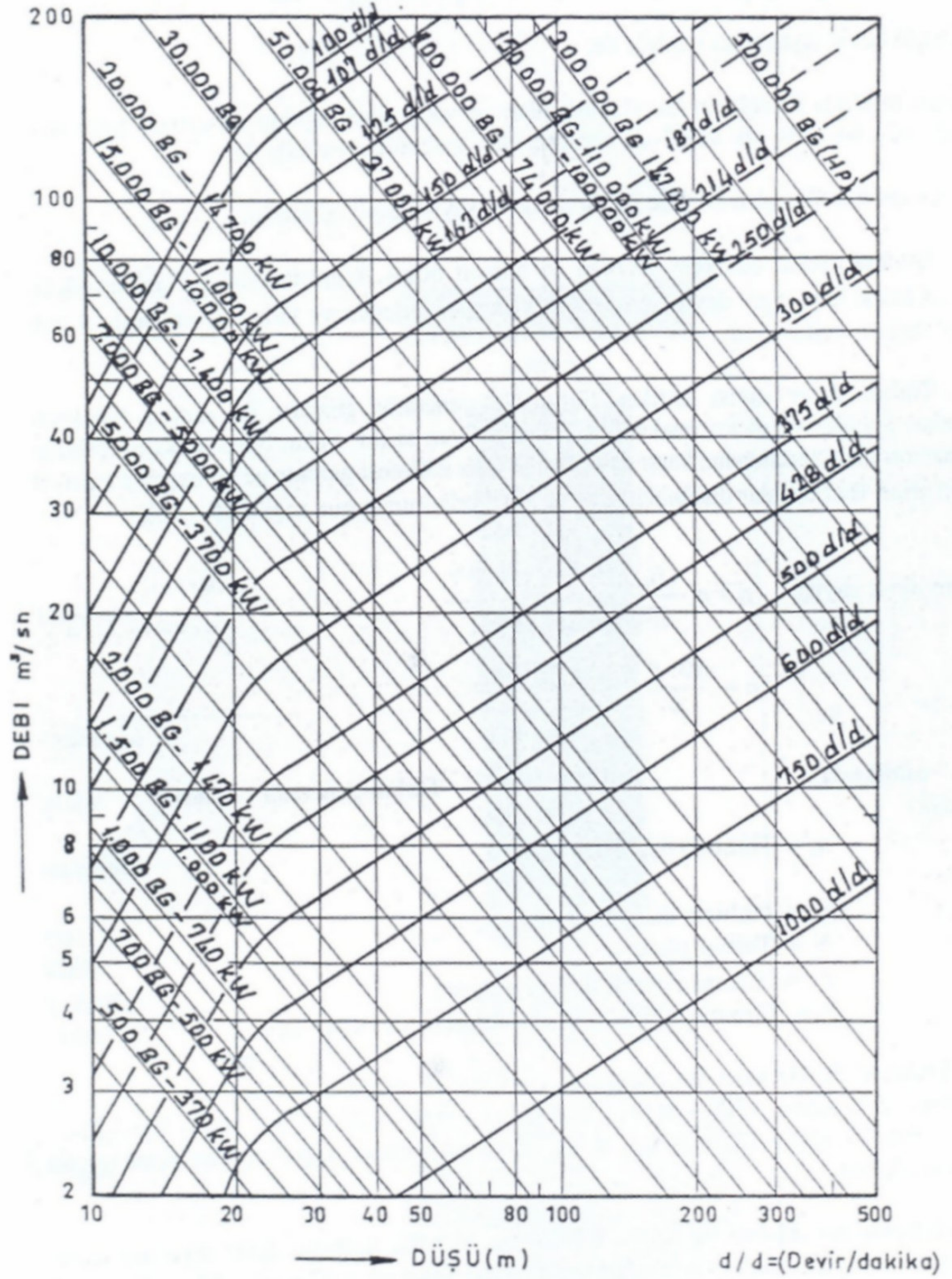
Türbin devir sayısı artıkça türbin ve generatör ebatları ile santral binasının boyutları küçülür ve elektromekanik teçhizatın fiyatı azalır. Fakat buna karşın türbinin kavitasyon olayı tehlikesine karşı daha derine tesis edilmesi gerekir ve bu nedenle hafriyat bedeli artar. Bu hususla düşünülerek n_s ve n değerlerinin uygun seçilmesi gerekir.

Türbin devir sayısı:

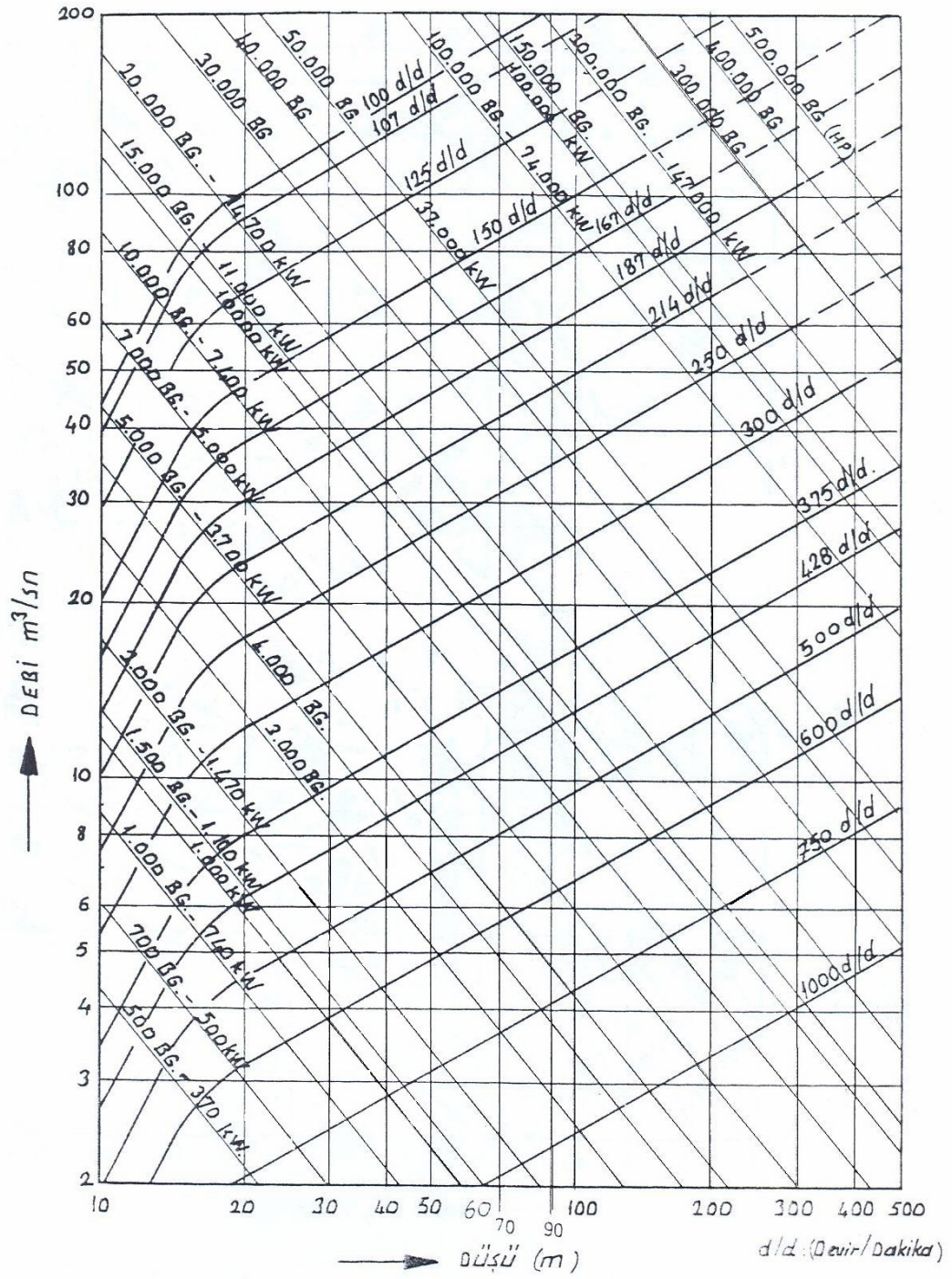
$$n = n_s \cdot \frac{(H_d)^{5/4}}{(N)^{1/2}} = n_s \cdot \frac{(H_d)^{1,25}}{(N)^{0,5}} \quad (4.12)$$

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (4.13)$$

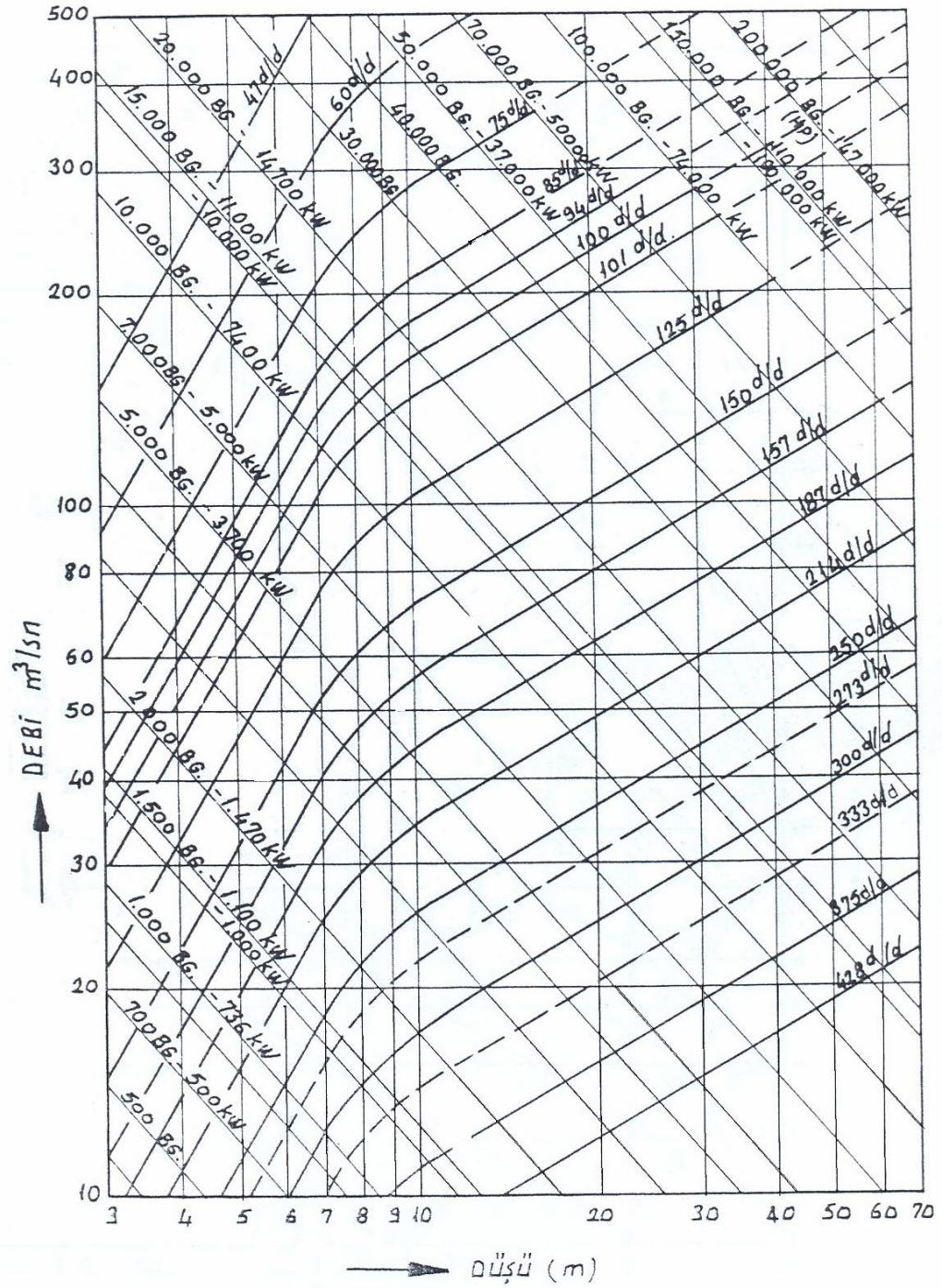
Frekansı 50 Hz olan bir enterkonnekte şebekeyi besleyecek olan türbin-generatör ünitesinin devir sayısı, 1500-1000-750-600-500-428-375-250-214-187,5-166,7-150-125-107-93,75-75 ve 60 *dev/dak* değerlerinden birine uygun olarak seçilebilir.



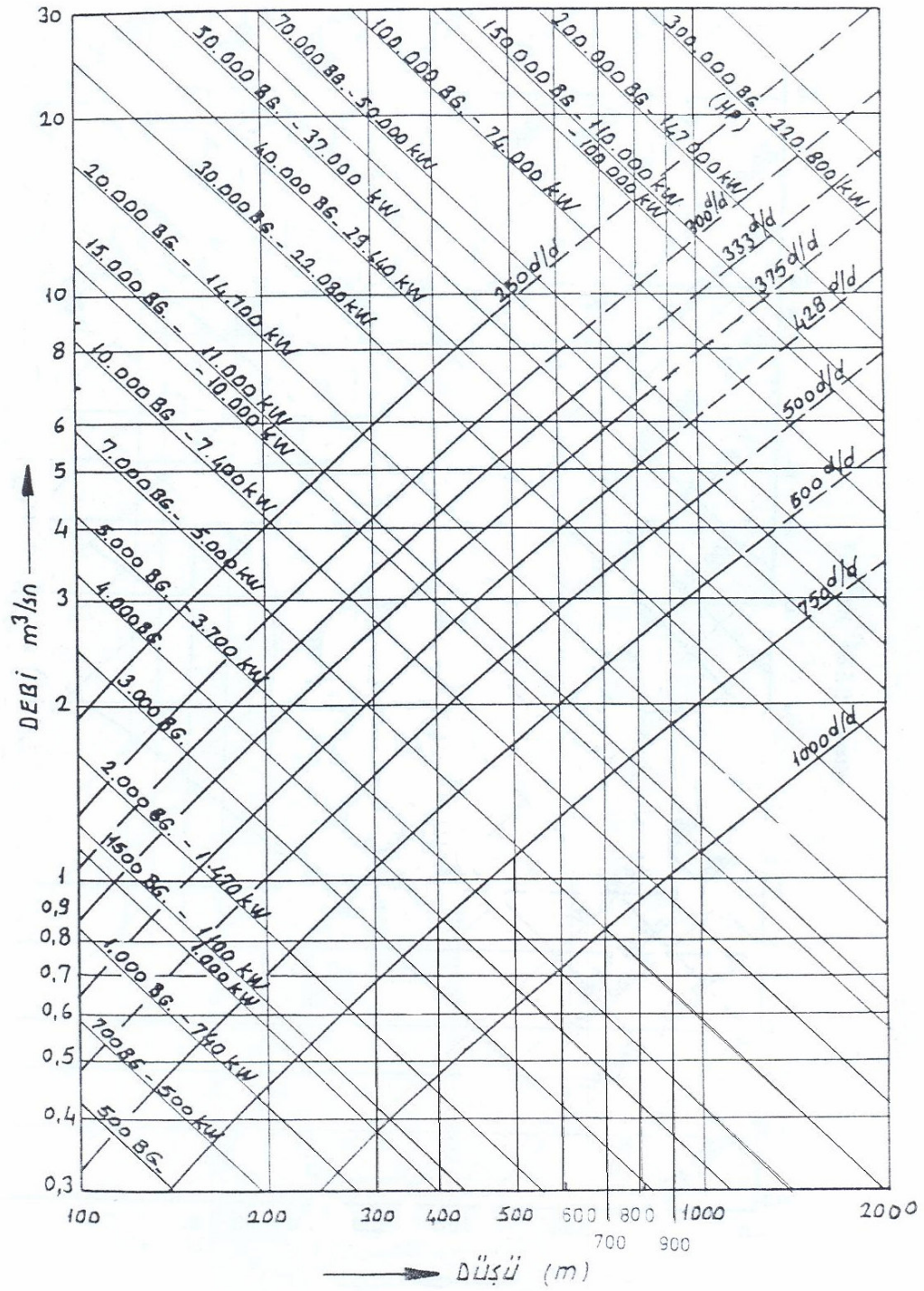
Şekil 4.24 Düşey eksenli Francis tipi türbinler için düşü- debi - devir ilişkisi. (EİE)



Şekil 4.25 Yatay eksenli Francis tipi türbinler için düşü- debi- devir sayısı ilişkisi. (EİE)



Şekil 4.26 Kaplan tipi türbinler için düşü- debi- devir sayısı ilişkileri. (EİE)



Şekil 4.27 Pelton tipi türbinler için düşü- debi- devir sayısı ilişkileri. (EİE)

4.5.5 Türbin Rotoru (Türbin Çarkı) Ana Boyutlarının Tespiti

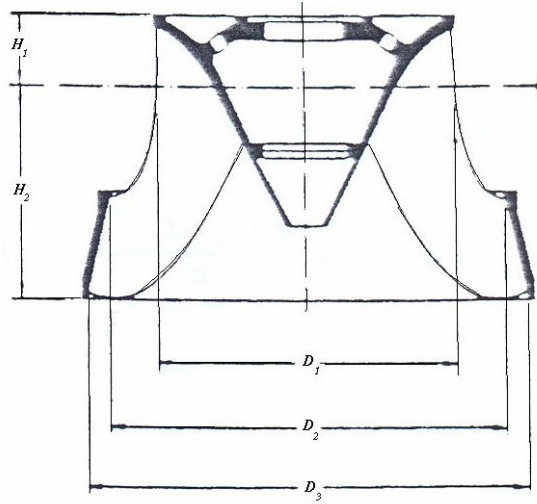
Değişik firmalar veya araştırmacılar tarafından türbinin özgül devir sayısına ve türbin rotoru çıkış çapına bağlı olarak geliştirilmiş olan ampirik formüllerden istifade edilerek türbin rotoru ana boyutlarının tespiti yapılır.

4.5.5.1 Francis Tipi Hidrolik Türbin Rotoru Ana Boyutlarının Tespiti

USA Bureau of Reclamation'a göre:

$$D_3 = \frac{84,47 \cdot \varphi_3 \cdot (H_d)^{0,5}}{n} \quad (4.14)$$

$$\varphi_3 = 0,0211 \cdot (n_s)^{0,67} \quad (4.15)$$



Şekil 4.28 Francis tipi türbin rotoru ana boyutları.

Siervo ve Leva'ya göre:

$$D_3 = \frac{84,5 \cdot k_u \cdot (H_d)^{0,5}}{n} \quad (4.16)$$

$$k_u = 0,31 + \frac{2,5 \cdot n_s}{1000} \quad (4.17)$$

Türbin rotoru orta giriş çapı :

$$D_1 = \left(0,4 + \frac{94,5}{n_s} \right) \cdot D_3 \quad (4.18)$$

Türbin rotoru alt giriş çapı :

$$D_2 = \frac{D_3}{0,96 + 0,00038.n_s} \quad (4.19)$$

$$H_1 = (0,94 + 0,000025.n_s).D_3 \quad (4.20)$$

$$H_2 = \left(0,05 + \frac{42}{n_s}\right).D_3 \quad 50 < n_s < 110 \text{ için} \quad (4.21)$$

$$H_2 = \frac{D_3}{3,16 - 0,0013.n_s} \quad 110 < n_s < 350 \text{ için} \quad (4.22)$$

4.5.5.2 Kaplan Tipi Hidrolik Türbin Rotorları Ana Boyutlarının Tespiti USA Bureau of Reclamation'a göre:

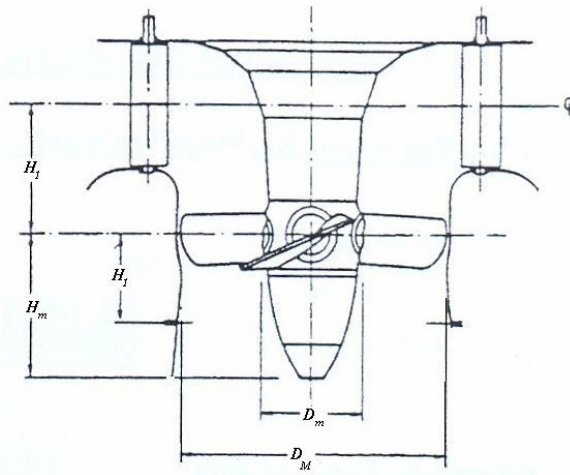
$$D_3 = \frac{84,47.\varphi_3.(H_d)^{0,5}}{n} \quad (4.23)$$

$$\varphi_3 = 0,0233.(n_s)^{0,67} \quad (4.24)$$

Siervo ve Leva'ya göre:

$$D_M = \frac{84,5.k_u.(H_d)^{0,5}}{n} \quad (4.25)$$

$$k_u = 0,79 + \frac{1,61.n_s}{1000} \quad (4.26)$$



Şekil 4.29 Kaplan tipi türbin rotoru ana boyutları.

Türbin rotoru göbeği çapı :

$$D_m = \left(0,25 + \frac{94,64}{n_s} \right) . D_M \quad (4.27)$$

$$H_m = \left(\frac{6,94}{n_s^{0,403}} \right) . D_M \quad (4.28)$$

$$H_1 = \left(0,38 + \frac{5,17.n_s}{10^5} \right) . D_M \quad (4.29)$$

4.5.6 Türbin Salyangozu Ana Boyutlarının Tespiti

Değişik firmalar veya araştırmacılar tarafından türbinin özgül devir sayısına ve Francis tipi türbinlerde rotorun (çarkın) D_3 çıkış çapına bağlı olarak geliştirilmiş olan ampirik formüllerden faydalanılarak tespit edilirler.

4.5.6.1 Francis Tipi Hidrolik Türbin Salyangozu Ana Boyutları

Siervo ve Leva'ya göre:

$$V_1 = \frac{84,4}{(n_s)^{0,44}} \quad (4.30)$$

$$A = \left(1,2 - \frac{19,56}{n_s} \right) . D_3 \quad (4.31)$$

$$B = \left(1,1 + \frac{54,8}{n_s} \right) . D_3 \quad (4.32)$$

$$C = \left(1,32 + \frac{49,25}{n_s} \right) . D_3 \quad (4.33)$$

$$D = \left(1,50 + \frac{48,8}{n_s} \right) . D_3 \quad (4.34)$$

$$E = \left(0,98 + \frac{63,6}{n_s} \right) . D_3 \quad (4.35)$$

$$F = \left(1,0 + \frac{131,4}{n_s} \right) . D_3 \quad (4.36)$$

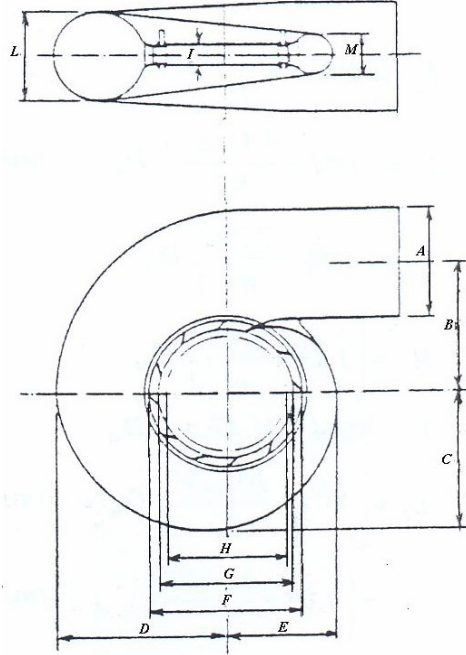
$$G = \left(0,89 + \frac{96,5}{n_s} \right) . D_3 \quad (4.37)$$

$$H = \left(0,79 + \frac{81,75}{n_s} \right) . D_3 \quad (4.38)$$

$$I = (0,1 + 0,00065 . n_s) . D_3 \quad (4.39)$$

$$L = (0,88 + 0,00049 . n_s) . D_3$$

$$M = (0,60 + 0,000015 . n_s) . D_3 \quad (4.40)$$



Şekil 4.30 Francis tipi türbin salyangoz ana boyutları.

4.5.6.2 Kaplan Tipi Türbin Salyangozu Ana Boyutları

Siervo ve Leva'ya göre :

a) Köşeli kesitli beton salyangoz ana boyutları:

Salyangoza su girişi hızı

$$V_1 = 2,44 - 1,19 . n_s / 1000 \quad (4.41)$$

$$B_2 = \frac{D_M}{0,76 + 8,92 . \frac{n_s}{10^5}} \quad (4.42)$$

$$C_2 = \frac{D_M}{0,55 + 1,48 \cdot \frac{n_s}{10^5}} \quad (4.43)$$

$$D_2 = \left(1,58 - \frac{9,05 \cdot n_s}{10^5}\right) \cdot D_M \quad (4.44)$$

$$E_2 = \left(1,48 - \frac{2,11 \cdot n_s}{10^5}\right) \cdot D_M \quad (4.45)$$

$$F_2 = \left(1,62 - \frac{3,18 \cdot n_s}{10^5}\right) \cdot D_M \quad (4.46)$$

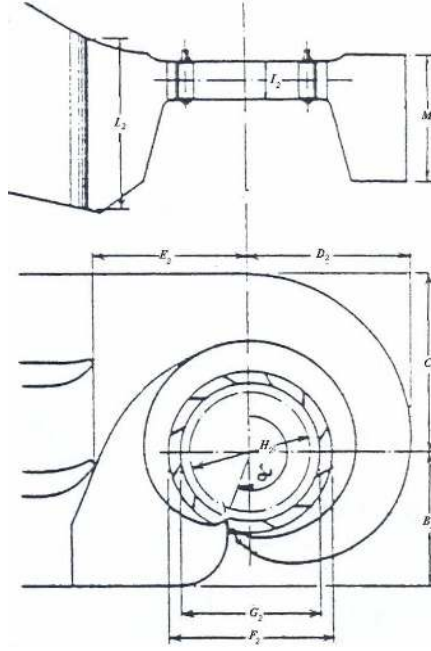
$$G_2 = \left(1,36 - \frac{7,79}{n_s}\right) \cdot D_M \quad (4.47)$$

$$H_2 = \left(1,19 - \frac{4,69}{n_s}\right) \cdot D_M \quad (4.48)$$

$$I_2 = (0,44 - 21,47 \cdot n_s) \cdot D_M \quad (4.49)$$

$$L_2 = \left(1,44 + \frac{105,29}{n_s}\right) \cdot D_M \quad (4.50)$$

$$M_2 = \left(1,03 - \frac{136,28}{n_s}\right) \cdot D_M \quad (4.51)$$



Şekil 4.31 Köşeli kesitli beton salyangoz ana boyutları.

b) Dairesel kesitli çelik saç salyangoz ana boyutları:

$$V_1 = 3,17 + \frac{729,21}{n_s} \quad (4.52)$$

$$A_1 = \left(0,40 \cdot (n_s)^{0,20}\right) D_M \quad (4.53)$$

$$B_1 = \left(1,26 + \frac{3,79 \cdot n_s}{10^4}\right) \cdot D_M \quad (4.54)$$

$$C_1 = \left(1,46 + \frac{3,24 \cdot n_s}{10^4}\right) \cdot D_M \quad (4.55)$$

$$D_1 = \left(1,59 + \frac{5,74 \cdot n_s}{10^4}\right) \cdot D_M \quad (4.56)$$

$$E_1 = \left(1,21 + \frac{2,71 \cdot n_s}{10^4}\right) \cdot D_M \quad (4.57)$$

$$F_1 = \left(1,45 + \frac{72,17}{n_s}\right) \cdot D_M \quad (4.58)$$

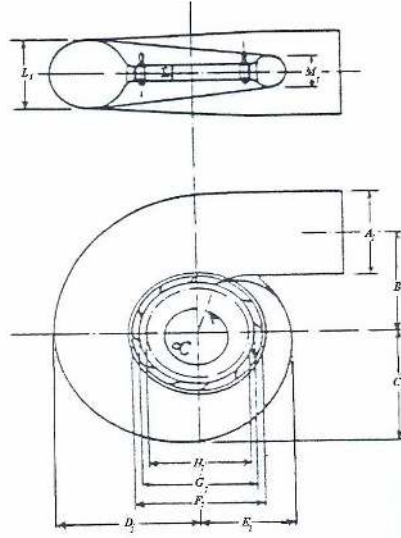
$$G_1 = \left(1,25 + \frac{4,63}{n_s} \right) . D_M \quad (4.59)$$

$$H_1 = \left(1,13 + \frac{31,86}{n_s} \right) . D_M \quad (4.60)$$

$$I_1 = \left(0,45 - \frac{31,80}{n_s} \right) . D_M \quad (4.61)$$

$$L_1 = \left(0,74 + \frac{8,7 . n_s}{10^4} \right) . D_M \quad (4.62)$$

$$M_1 = \frac{D_M}{2,06 - \frac{1,2 . n_s}{10^5}} \quad (4.63)$$



Şekil 4.32 Dairesel kesitli çelik saç salyangoz ana boyutları.

4.5.6.3 Pelton Tipi Hidrolik Türbin Su Dağıtıcısı Ana Boyutları

Siervo ve Leva'ya göre :

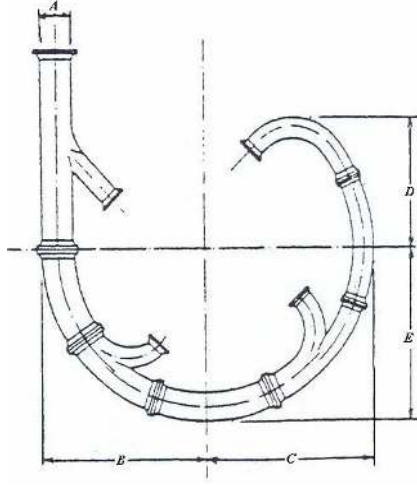
A = Cebri boru çıkışı ile küresel vana iç çapı

$$B = 0,595 + 0,694 . L \quad (4.64)$$

$$L = 0,78 + 2,06 D_3 \quad (4.65)$$

$$D = 0,219 + 0,70, L \quad (\text{m}) \quad (4.66)$$

$$E = 0,43 + 0,70.L \quad (4.67)$$



Şekil 4.33 Pelton türbini su dağıtıcısı ana boyutları.

Su dağıtıcısı girişindeki su hızı:

$$V_1 = 0,82 + 0,358.H_d \quad (4.68)$$

4.5.7 Türbin Emme Borusu Ana Boyutların Tespiti

Gerek Francis tipi ve gerekse Kaplan tipi hidrolik türbinlerin emme boruları ana boyutlarının tespiti de değişik firmalar ve araştırmacılar tarafından türbin rotoru çapına ve özgül sayısına bağlı olarak geliştirilmiş olan aşağıda kaydedilen ampirik formüllerden istifade ile tespit edilebilirler.

4.5.7.1 Francis Tipi Hidrolik Emme Borusu Ana Boyutları Tespiti

Siervo ve Leva'ya göre :

Emme borusu su giriş hızı:

$$V_2 = 8,74 + \frac{248}{n_s} \quad (4.69)$$

$$N = \left(1,54 + \frac{203,5}{n_s} \right) . D_3 \quad (4.70)$$

$$O = \left(0,83 + \frac{140,7}{n_s} \right) . D_3 \quad (4.71)$$

$$P = (1,37 - 0,00056.n_s).D_3 \quad (4.72)$$

$$Q = \left(0,58 + \frac{22,6}{n_s}\right).D_3 \quad (4.73)$$

$$R = \left(1,6 - \frac{0,0013}{n_s}\right).D_3 \quad (4.74)$$

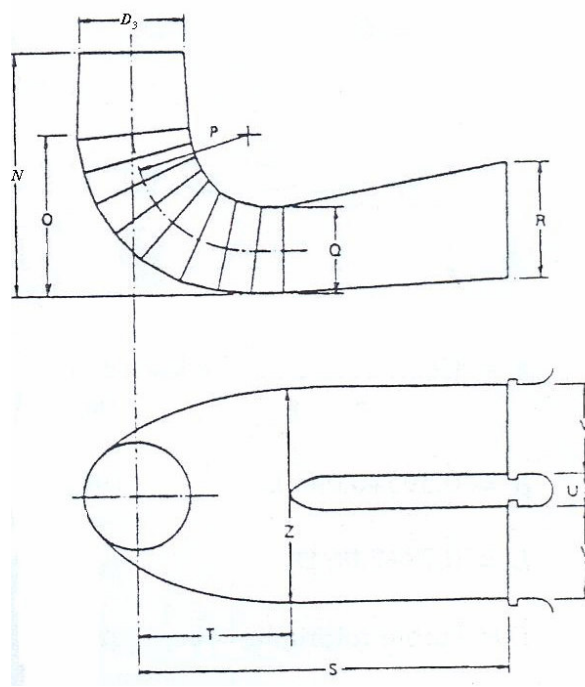
$$S = \left(\frac{n_s}{0,25.n_s - 9,28}\right).D_3 \quad (4.75)$$

$$T = \left(1,50 + \frac{0,00019}{n_s}\right).D_3 \quad (4.76)$$

$$U = (0,51 - 0,0007.n_s).D_3 \quad (4.77)$$

$$V = \left(1,10 + \frac{53,7}{n_s}\right).D_3 \quad (4.78)$$

$$Z = \left(2,63 + \frac{33,8}{n_s}\right).D_3 \quad (4.79)$$



Şekil 4.34 Francis tipi türbin emme borusu.

4.5.7.2 Kaplan Tipi Türbin Emme Borusu Ana Boyutları

Siervo ve Leva'ya göre :

Emme borusuna su giriş hızı:

$$V_2 = 8,42 + 250,25 / n_s \quad (4.80)$$

$$H_t = \left(0,24 + \frac{7,82.n_s}{10^5} \right) . D_M \quad (4.81)$$

$$N = \left(2,00 - \frac{2,14.n_s}{10^6} \right) . D_M \quad (4.82)$$

$$O = \left(1,40 - \frac{1,65.n_s}{10^5} \right) . D_M \quad (4.83)$$

$$P = \left(1,26 - \frac{16,35}{n_s} \right) . D_M \quad (4.84)$$

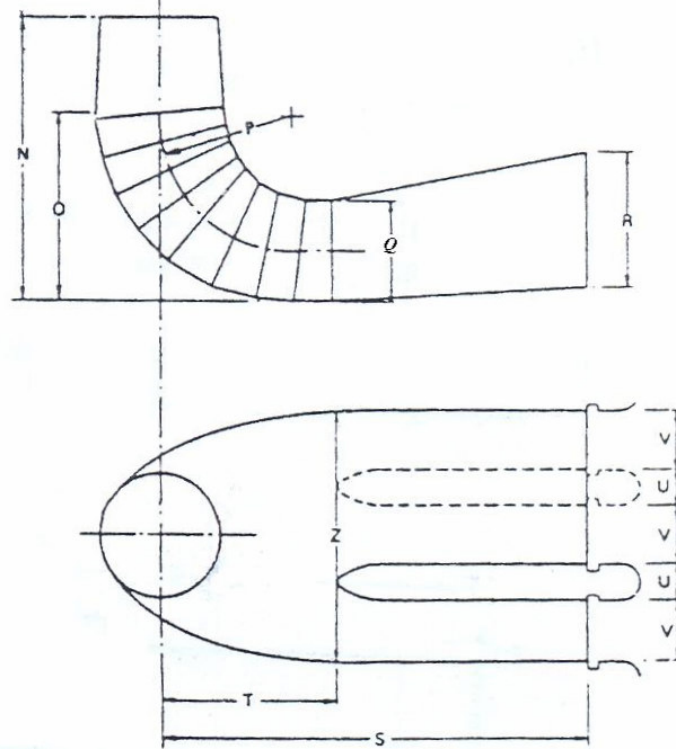
$$Q = \left(0,66 - \frac{18,40}{n_s} \right) . D_M \quad (4.85)$$

$$R = \left(1,25 - \frac{7,98.n_s}{10^5} \right) . D_M \quad (4.86)$$

$$S = \left(4,26 + \frac{201,5}{n_s} \right) . D_M \quad (4.87)$$

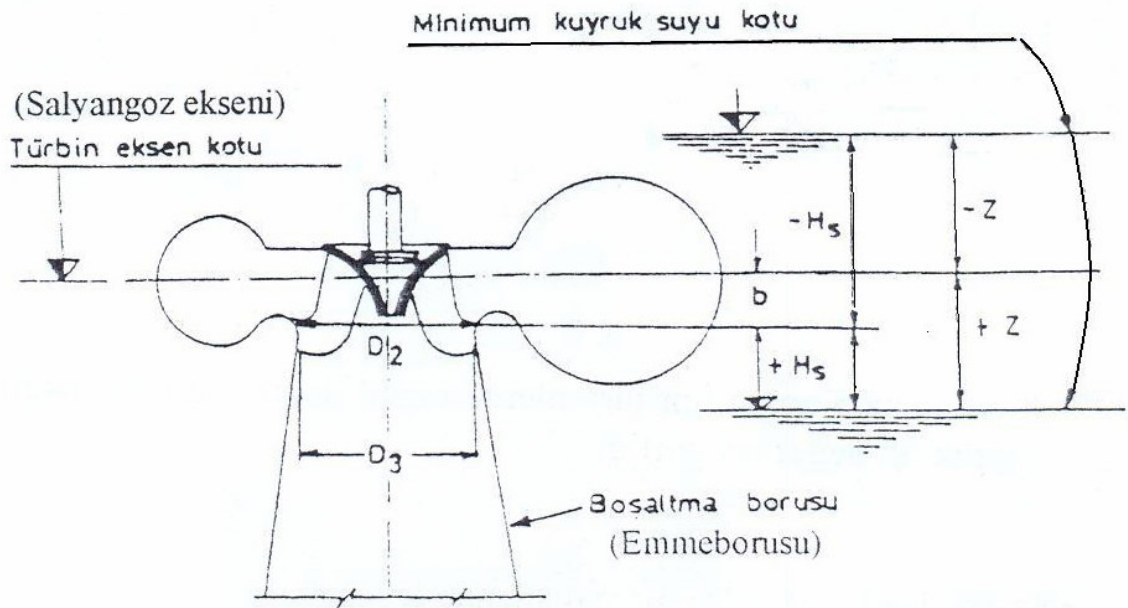
$$T = \left(1,20 + \frac{5,12.n_s}{10^4} \right) . D_M \quad (4.88)$$

$$Z = \left(2,58 + \frac{102,66}{n_s} \right) . D_M \quad (4.89)$$



Şekil 4.35 Kaplan tipi türbin emme borusu ana boyutları.

4.5.8 Francis Tipi Türbinlerde Kaviteasyon Katsayısının ve Türbin Salyangozu Eksen Kotunun Tesbiti



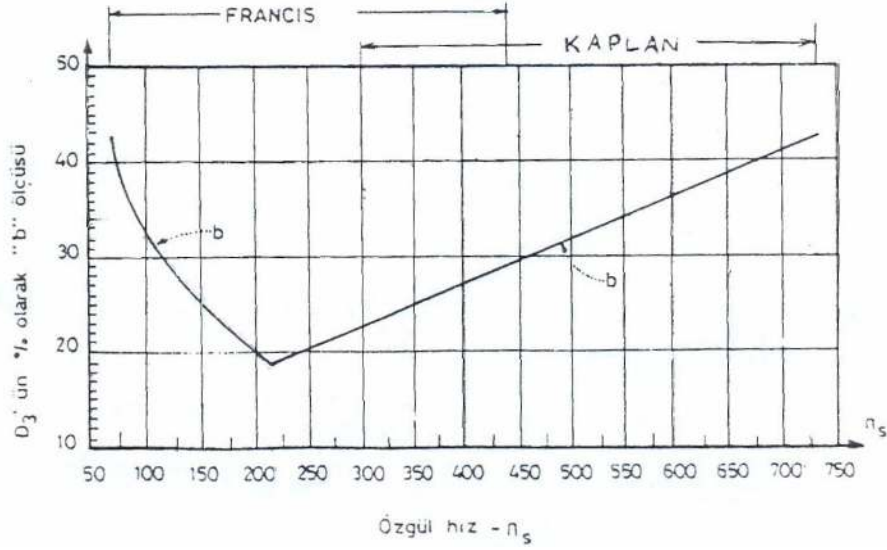
Şekil 4.36 Salyangoz eksen ve türbin emme yüksekliği (Vincent J. Zipparro ve Hasen Hans.

1993)

H_s = Santral çıkış suyu seviyesi ile rotor kanatları su girişi alt ucu arasındaki mesafe.

$Z = H_s + b$,türbin emme yüksekliği

b = Türbin rotoru kanatları girişi alt ucu ile salyangoz eksen kotu arasındaki mesafe.



Şekil 4.37 Francis ve Kaplan tipi türbinlerde b mesafeleri (EİE)

H_d = Türbin dizayn düşüsü

σ = Kavitasyon katsayısı

H_a = Tesisin bulunduğu yerdeki atmosfer basıncı (mss)

H_v = Tahrik suyunun buharlaşma basıncı (mss)

H_b = Tesisin bulunduğu yerdeki atmosfer basıncı ile türbini tahrik eden suyun buharlaşma basıncı arasındaki fark.

$$H_s = H_b - \sigma \cdot H_{kr} \quad (4.90)$$

$$H_b = H_a - H_v \quad (4.91)$$

Tesisin kurulacağı yerin rakımına göre değişen H_a atmosfer basıncı değerleri ile türbini tahrik edecek suyun sıcaklığına göre değişen H_v buharlaşma basıncı değerleri aşağıdaki çizelgelerde kaydedilmiştir.

Çizelge 4.1 Atmosfer basıncı

Deniz seviyesinden	H _a	H _a
Yükseklik: (m)	mm. Cıva sütunu	m. Su sütunu
0	760,00	10,351
500	715,99	9,751
1000	674,07	9,18
1500	634,14	8,637
2000	596,18	8,12
2500	560,07	7,628
3000	525,75	7,160
3500	493,15	6,716
4000	462,21	6,295

Çizelge 4.2 Suyun buharlaşma basıncı

SICAKLIK (C°)	H _v (m) ss
5	0,089
10	0,125
15	0,0174
20	0,239
25	0,324

Kavitasyon katsayısının tespiti için değişik firmalar ve araştırmacılar tarafından geliştirilmiş olan ampirik formüller.

USA Burceau of Reclamantion'a göre:

$$\sigma = \frac{(n_s)^{1,64}}{50327} \quad (4.92)$$

Masonry'e göre:

$$\sigma = 0,032 \cdot \left(\frac{n_s}{100} \right)^2 \quad (4.93)$$

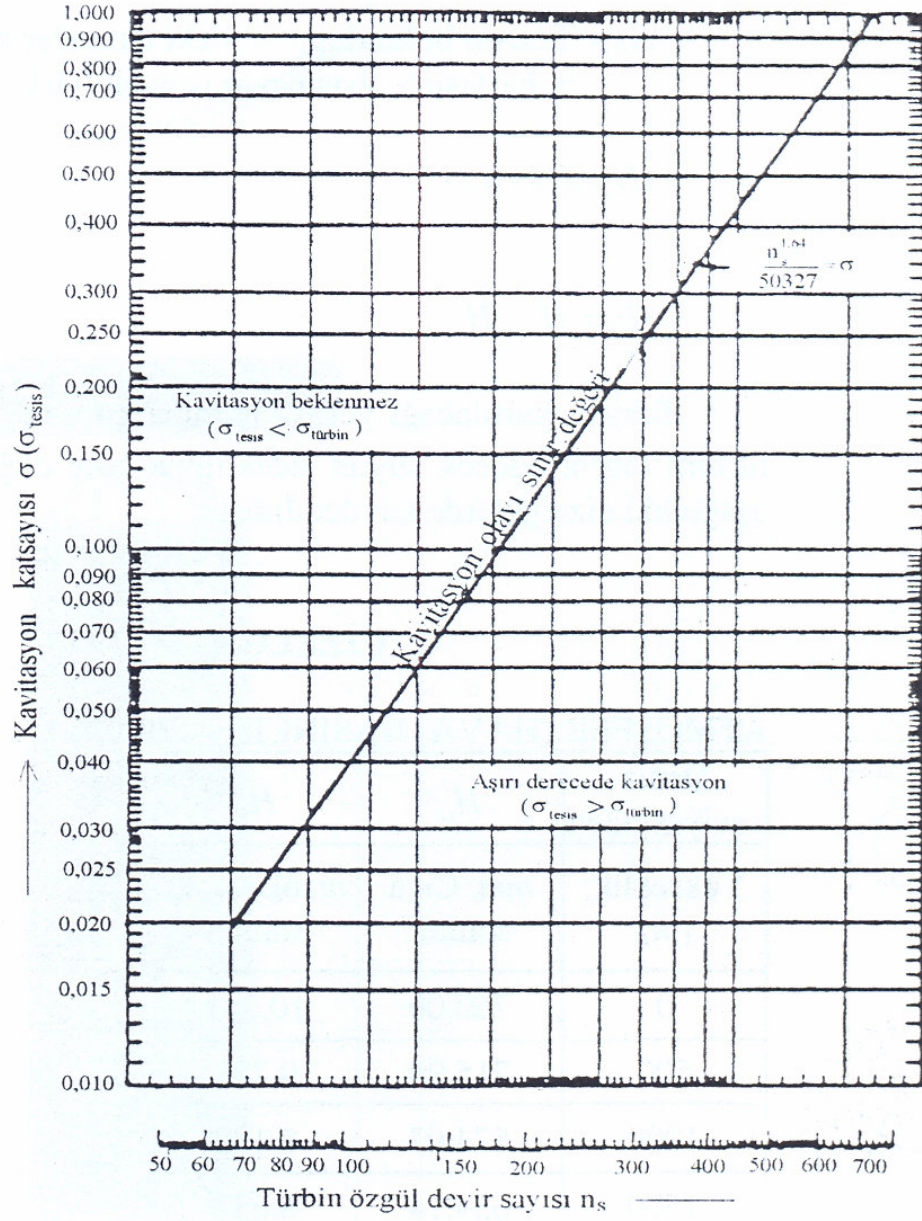
Siervo ve Leva'ya göre:

$$\sigma = 0,754 \cdot \frac{(n_s)^{1,41}}{10^4} \quad (4.94)$$

Türbin dizaynı esnasında öyle bir σ kavitasyon katsayısı tespit edilmeli ve öyle bir türbin

eksen kotu tespit edilmelidir ki işletme esnasında kavitasyon olayı meydana gelmesin. Bunun için türbin eksen kotu ile santral çıkış suyu seviyesi arasındaki Z farkı, yani türbin eksen kotu, türbinin öz dizaynı esnasında kavitasyonsuz bir işletme yapılabilecek şekilde tespit edilmelidir.

İşletme esnasında meydana gelen fiili H_s veya Z emme yükseklikleri değerleri hesap edilenden farklı ve özellikle $+H_s$ ve Z emme yüksek değerlerde gerçekleşirse türbinde aşırı derecede kavitasyon olayı ile birlikte vuruntular ve titreşimler meydana gelir. Bu durum türbin rotorunun tahrip olmasına ve türbin-generatör ünitesinin döner kısımlarının, özellikle generatör rotoru kutupları bağlantılarının tahrip olmasına sebep olur. Bu nedenlerle türbinin ön dizayn esnasında H_s ve Z emme yükseklikleri ile σ kavitasyon katsayısının doğru olarak tespit edilmesi büyük önem taşır.



Şekil 4.38 Kavitasyon katsayısı grafiği (EİE)

5. HİDROLİK TÜRBİNLERİN KONSTRÜKSİYONLARI

5.1 Francis Tipi Hidrolik Türbin Rotorları

5.1.1 Ana Ölçüleri

Bu tip türbin generatör rotorlarının projelendirilmesi ve konstrüksiyonu için rotorun D_1 giriş çapı ile b_1 su giriş yüksekliği ile D_2 çıkış çapı veya D_s emme borusu başlangıç çapı ana ölçüleri teşkil etmektedirler

Dizayn hidrolik düşüsü H_d (m), nominal devir sayısı n , çevresel hız $U_1 = k_{1u} \cdot \sqrt{2gH_d}$ (m/san) olduğuna göre $U_1 = \pi \cdot D_1 \cdot n / 60$ (m/san) ifadesinden yararlanarak rotorun D_1 giriş çapını:

$$D_1 = \frac{60 \cdot \sqrt{2g}}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{H_d}}{n} \cdot k_{1u} \quad (5.1)$$

Birim devir sayısı:

$$n_1 = n / \sqrt{H_d} \quad (5.2)$$

Yukarıdaki ifadede gerekli sadeleştirmeleri de yaparak türbin rotorunun D_1 giriş çapını aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz:

$$D_1 = \frac{84,6 \cdot k_{1u}}{n_1} \quad (5.3)$$

Enerjinin devamlılığı şartlarına göre $Q = C_{1m} \cdot F_1$ (m³/san) olduğundan türbin rotorunun D_1 giriş çapındaki F_1 su girişi kesiti:

$$F_1 = \pi \cdot D_1 \cdot b_1 \quad (5.4)$$

Hidrolik akımın rotor girişindeki hız değeri:

$$C_{1m} = k_{1u} \cdot \sqrt{2gH_d} \quad (5.5)$$

olduğundan rotorun girişindeki b_1 su yüksekliğinin yani türbin ayar kanatlarının yüksekliği:

$$b_1 = \frac{Q_n}{\pi \cdot D_1 \cdot k_{1u} \cdot \sqrt{2gH_d}} \quad (5.6)$$

Birim su debisi :

$$Q_1 = Q / \sqrt{H_d} \quad (5.7)$$

$$b_1 = \frac{0,072.Q_1}{D_1}. \quad (5.8)$$

Türbin rotorunun D_2 çıkış ile emme borusunun D_s başlangıç çapı:

$$D_2 = D_s = 0,536. \sqrt{\frac{Q_1}{C_s}} \quad (5.9)$$

Küçük güçlü ve yatay eksenli bazı türbinlerde türbin şaftı emme borusu içinden geçecek şekilde imal edilebilir bu gibi durumlarda türbin şaftının çapını d_w ile gösterecek olursak emme borusunun F_s başlangıç kesitini ve D_s başlangıç çapını aşağıdaki eşitliklerde kaydedildiği gibi hesaplayabiliriz.

$$F_s = \frac{\pi}{4} \cdot (D_s^2 - d_w^2) = \frac{Q}{C_s} = \frac{Q}{\sqrt{2gH_d} \cdot k_{2u}} \quad (5.10)$$

Q_1 birim su debisi kullanıldığı takdirde:

$$D_s = \sqrt{0,287 \cdot \frac{Q_1}{C_s}} + d_w^2 \quad (5.11)$$

Türbin rotorunun döndürme momenti M_d (kg.cm) olduğuna ve türbin şaftının imal edildiği malzeme için müsaade edilebilir burulma zorlaması τ_{dz} (kg/cm²) olduğuna göre türbin şaftının d_w çapı aşağıda kaydedildiği gibi hesaplanır:

$$d_w = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi \cdot \tau_{dz}} \cdot M_d} \quad (5.12)$$

5.1.2 Çizimleri ve Konstrüksiyonlar

Bilinen çok geniş teorik bilgilere rağmen, Francis tipi türbin rotorlarının üç boyutlu olarak şekillendirilen kanatlarının arasındaki türbülanslı ve üç boyutlu hidrolik akımın matematik yolla tam olarak hesaplanması bugün için mümkün olmamakla ve bazı yaklaşık hesaplamalar yapılmaktadır. Bu yüzden bu tip türbinlerin rotor kanatlarının ve kanat aralıklarının çiziminde kanat formları büyük ölçüde n_s devir sayısına bağlı kalmakta ve hidrolik akım teorilerin

basitleştirilmiş bazı temel esaslarından ve çizim geometrisinden yararlanılmakla yetinilmek durumunda kalınmaktadır.

Bu durum, rotorların projelendirilmesinde önce kural olarak değişik çizimler yapmayı ve kesin çizim için en yüksek verim elde edilebilecek ve garantili ve güvenilir bir işletme sağlayacak şekilde model deneylerinin yapılmasını ve model deneyleri esnasında rotor kanatlarının formlarında gerekli düzeltmelerin gerçekleştirilmesini gerektirmektedir.

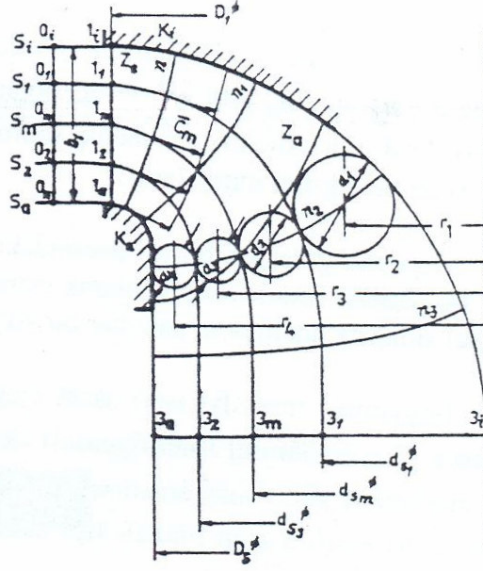
Hidrolik laboratuvarlarında yapılan geniş kapsamlı model deneylerinden alınan sonuçlara göre kesin çizim ve projelendirmelerin yapılması ve rotor konstrüksiyonunun, matematiksel hesaplamaların yanında model deneyleri sonuçlarına da dayandırılması zorunlu olmaktadır.

Francis tipi hidrolik türbin rotorlarının kanat formlarını ile aralıklarının çizimi için, kanatlar boylamsal ve enlemsel akım çizgileri ile markalanarak, rotorlar küçük türbinlere ayrılmakta ve türbin ayar kanatlarından emme borusuna kadar simetrik akım çizgileri çizilerek küçük türbinlerin kanatlarının girişlerindeki ve çıkışlarındaki su hızlarına ait hız üçgenleri ve kanat profilleri çizilmektedir.

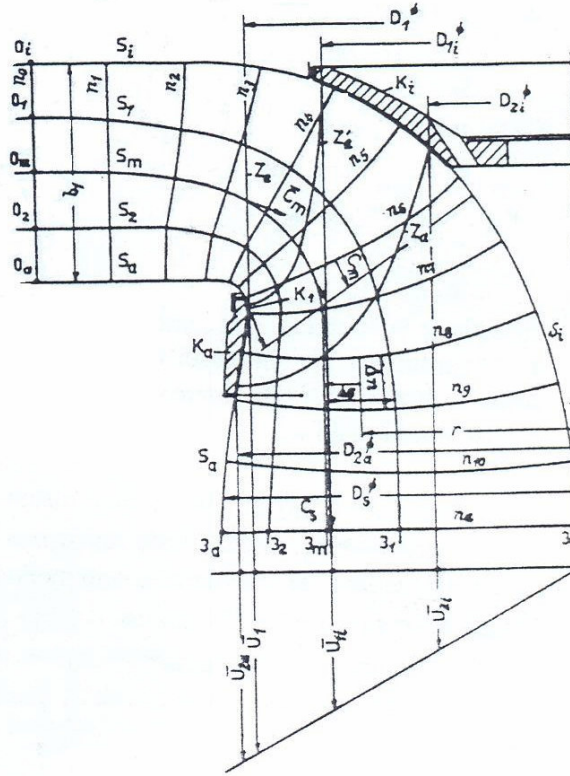
Genel olarak rotor kanatlarının ve kanat aralıklarının 1:1 ölçek ile çizilmesi daha isabetli sonuçların alınmasını kolaylaştırmaktadır.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü gibi Francis tipi hidrolik bir türbin rotorunun boylamsal kesitinin taslak projesi, rotorun K_i üst gövdesini izleyen S_i akım çizgisi ve K_a alt gövdesini S_a akım çizgileri ile sınırlandırılmış bulunmaktadır. Bu S_i ve S_a akım izi çizgileri, türbin ayar kanatlarından emme borusuna kadar bir daire yayı veya daire yayına yakın yaylar teşkil edecek şekilde çizilmeli ve öyle bir yol izlenmelidir ki suyun k_{2u} ortalama boylamsal akım hızı devamlı olarak emme borusunun başlangıcında $k_{su} = k_{2u}$ çıkış akımına dönüşebilsin.

Özgül devir sayısı $n_s > 175$ olan Francis tipi türbin rotorlarının çiziminde K_a alt gövdesinin girişteki boğaz dirseği D_1 giriş çapına eşit dairesel bir silindir şeklinde tertiplenmeli ve mümkün olduğu kadar büyük yarı çaplı bir yay ile kavislendirilmelidir.



Şekil 5.1 Francis tipi türbin rotoru aralıklarının çizimi



Şekil 5.2 Francis tipi türbin rotoru kanatlarının akım çizgileri.

Hidrolik akımın S_i ve S_a iz çizgileri ile sınırlandırılmış olan boyamsal kesit, su akımının bir düzlem üzerindeki görüşünü ifade etmektedir. Bu düzlem üzerinde, Şekil 5.3'de görüldüğü gibi S_i , S_1 , S_m , S_2 S_a boyamsal (meridyensel) akım çizgileri (meridyensel) iki akım

çizgisi arasında kalan simetrik dairesel her boşluk küçük kısmi bir türbin olarak incelenmektedir.

$S_i, S_1, S_m, S_2, \dots, S_a$ boylamsal akım çizgileri çizildikten sonra bu defa da $n_0, n_1, n_2, \dots, n_a$ gibi enlemsel (potansiyel) akım çizgileri çizilerek rotorun K_i üst gövdesi ile K_a alt gövdesi arasındaki hidrolik akım ortamı boylamsal ve enlemsel akım çizgileri ile bir ağ gibi markalanır.

Meydana getirilen bu ağ üzerindeki her akım çizgisi bir döner alanın izini ifade eder. Boylamsal olarak çizilen her iki hidrolik akım çizgisi arasında kalan dairesel simetrik hacimden, yani her bir küçük-kısmi türbinden eşit miktarda su geçer.

Boylamsal akım çizgileri arasındaki enlemsel çizgiler boyunca k_{um} boylamsal akım hızının sabit kaldığı kabul edilir. Gerçekte k_{um} boylamsal akım hızı enlemsel akım çizgileri boyunca sabit kalmaz. Ancak, özgül devir sayısı $n_s < 175$ olan Francis tipi türbin rotorlarının kanat aralıklarının çizimi için bu kabul yapılabilir.

Bu durumda, b_1 su giriş yüksekliği ve $D_2 = D_s$ emme borusu başlangıç çapı uygun aralıklarla n sayıda parçaya ayrılır. Su giriş yüksekliğinin b_1 değerinin büyük olması halinde, bu ayırım daha çok sayıda n parça ve b_1 değerinin düşük olması halinde ise daha az sayıda n parça olur. Böylece hidrolik akım hem türbin rotoruna girmeden önce ayar kanatları arasında ve hem de türbin rotoruna girdikten sonra rotor kanatlarının arasındaki dairesel boşlukta n parçaya bölünmüş ve rotor kanatlarına girmeden önce $n+1$ adet hidrolik akım çizgisi elde edilmiş olur.

$S_i, S_1, S_m, S_2, \dots, S_a$ gibi bu akım çizgilerinin emme borusunun başlangıç noktasındaki $3_i, 3_1, 3_m, 3_2, \dots, 3_a$ gibi noktaları enerjinin sürekliliği kuralına göre tespit edilir ve 3_1 noktasındaki çap $d_{s1} = \sqrt{1/n} \cdot D_s$; 3_m noktasındaki çap $d_{sm} = \sqrt{2/n} \cdot D_s$ ve 3_2 noktasındaki çap ise $d_{s2} = \sqrt{3/n} \cdot D_s$ kadar olur.

O_1-3_1 ; O_m-3_m ; O_2-3_2 noktaları arası göz kararı ile ve uygun yay çizgileri ile birleştirilir ve sonrada, göz kararı ile çizilen bu çizgilerin aralıkları Şekil 5.2’de da görülen a.r çarpımları ile her enlemsel çizgi boyunca sabit olacak şekilde kontrol edilerek düzeltilirler. Bu kontroller için 3 ila 5 adet enlemsel akım çizgisi yeterli olabilir.

Özgül devir sayısı $n_s > 175$ olan türbin rotorları için yukarıda açıklanan basit çizim tarzı yeterli olmaz. Özgül devir sayısı $n_s > 175$ olan türbin rotorlarındaki akım çizgileri dirsekleri nedeni ile meydana gelen merkezkaç kuvvetlerinin dikkate alınması gerekir.

Genel olarak yüksek özgül devir sayılı Francis tipi türbin rotorları kanatlarının Şekil 5.6'da gösterilen A çıkış ucu kenarları boylamsal bir düzlem üzerinde bulunurlar. Yani yüksek özgül devir sayılı Francis tipi türbin rotorları kanatlarının gerek giriş kenarları ve gerekse çıkış kenarları u çevresel hız vektörüne diktir. Buna karşın düşük özgül devir sayılı Francis tipi türbin rotorları kanatlarının giriş kenarları ile çıkış kenarları u çevresel hız vektörüne dik değildirler ve boylamsal düzlemlerle Ψ gibi bir açı teşkil ederler. Bu durum, düşük özgül devir sayılı Francis tipi türbin rotorları kanatlarının boylarının daha uzun fakat daha az bükümlü olmasını sağlar.

Türbin rotorlarına hem merkezkaç kuvvetler ve hem de eksenel kuvvetler etkiye bulunurlar. Merkezkaç kuvvetler rotor alt gövdesi, rotor kanatları ve rotor üst gövdesi tarafından karşılanır. Eksenel kuvvetler (türbin rotoru kanatlarına etkiyen hidrolik yük) ise, türbin rotoru üst gövdesi ve türbin şaftı üzerinden taşıyıcı yatağa intikal eder ve taşıyıcı yatak tarafından karşılanır.

Kabul olunabilir en yüksek H hidrolik düşüşündeki çevresel hız değeri $U_1=60$ m/s'den daha büyük olamayacağı için statik ve dinamik dengesi sağlanmış, yani statik ve dinamik balansı iyi yapılmış ve türbin kanatlarının formları ile giriş ve çıkış açıları birbirine eşit olarak imal edilmiş bütün türbin rotorlarında merkezkaç kuvvetlerinin fazla bir etkisi yoktur. Ancak, su akış yönündeki şaft eksenine paralel eksenel kuvvetlerin etkisi oldukça fazladır. Eksenel kuvvetlerin değerini tecrübelerle dayanarak tespit edilen aşağıdaki ampirik formül ile büyük bir doğrulukla hesaplayabiliriz:

$$A_s = n_s \cdot D_1^2 \cdot H \quad (5.13)$$

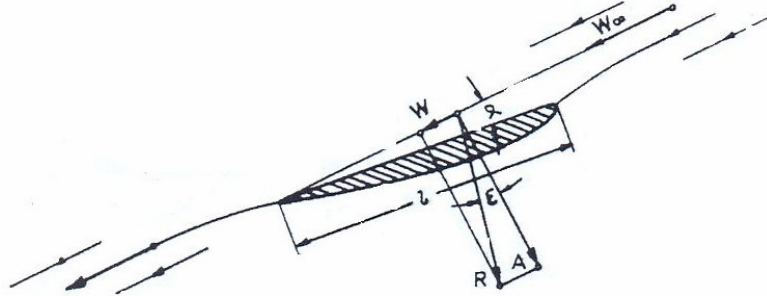
Küçük güçlü Francis tipi türbin rotorlarında meydana gelen eksenel hidrolik itme kuvvetini rotorun üst gövdesine uygun şekilde deliklerle delerek, rotorun üzerindeki kaçak suların basıncına türbin emme borusunun merkez bölgesine irtibatlandırmak sureti ile azaltmak mümkündür.

Türbin rotoru üzerine geçirilen döner labirentler ile bu labirentlerin karşısındaki çapsal dönme boşlukları $S_p=D_1/500$ ile $D_1/100$ arasında değişir. Labirentlerin S_p dönme boşluklarından kaçan kaçak suların türbin rotoru üzerinde ilave bir hidrolik itme kuvveti yaratmaması ve emme borusuna geçişinin sağlanması için türbin rotorunun üst gövdesine delinen deliklerin toplam kesiti veya kaçak suyu emme borusuna boşaltan tahliye borusunun kesiti S_p çapsal dönme boşluklarının toplam kesitinin 4 ila 5 kat daha büyük olmalıdır.

$H = 30$ m ye kadar nominal hidrolik düşüler için kullanılan Francis tipi türbin rotorlarının kanatları çelik saçlardan alt ve üst gövdeleri ise gri dökümden imal edilebilirler. Çelik saçtan imal edilen rotor kanatlarının alt ve üst gövdeleri ise gri dökümden imal edilebilirler. Çelik saçtan imal edilen rotor kanatlarının alt ve üst gövdeleri ile birleşen kenarlarına Şekil 5.4' de görüldüğü gibi kırlangıç kuyruğu dişler açılır. Alt ve üst gövdeleri döküm işlemi ile birleşen çelik saçtan kanatlara böylece sağlamlık kazandırılmış olur. Çelik saçtan imal edilen rotor kanatlarının, kazanılan tecrübelerle göre rotorun alt ve üst gövdelerinin S et kalınlıkları çelik saç kanadın S_1 kalınlığından en az 6 ila 7 kat daha kalın olmalı ve çelik saç kanadın gövde içine girecek olan derinliği ise S_1 kanat kalınlığının yaklaşık 3 katı olmalıdır.

$H=100$ m hidrolik düşülere kadar kullanılan küçük ve orta güçlü Francis tipi türbin rotorları yüksek kaliteli gri dökümden de imal edilebilirler. Ancak daha yüksek hidrolik düşülerde kullanılan küçük ve orta güçlü Francis tipi türbin rotorları ile her düşüde çalışan büyük güçlü Francis tipi türbin rotorlarının yüksek kaliteli çelik dökümden imal edilmeleri şarttır.

Kaplan tipi hidrolik türbin rotorlarının projelendirilmesinde taşıyıcı kanat teorisi ana esası teşkil eder. Taşıyıcı kanat teorisi sınırsız bir paralel akım ortamı içinde l boyundaki ve b genişliğindeki taşıyıcı bir kanadın Şekil 5.8’de örüldüğü gibi α akım açısında ve W_∞ akım hızı ile hareket ettirilmesi esasına dayanır. Şekil 5.8’de görülen α akım açısı, kanat yüzeyleri ile W_∞ akım hızı arasındaki açıdır.



Şekil 5.4 Taşıyıcı Kanat

Şekil 5.4 de görülen taşıyıcı kanat üzerine W_∞ akım hızına dik A kaldırma kuvveti ile W karşı koyma kuvveti etkide bulunur. Bu taşıyıcı kanatın bombeli olan sırt yüzeyindeki basınç ile düz olan yüzeyi arasındaki basınç farkı A kaldırma kuvvetinin meydana gelmesine sebep olur ve A kuvveti taşıyıcı kanadı kaldırmaya yarar. W kuvveti ise taşıyıcı kanat profilinin W_∞ hızındaki akımla sürtünme sonucu meydana gelen sürtünme kuvvetini yenmeğe hizmet eder.

Birimsiz olan ξ_a kaldırma katsayısı ve ξ_w direnç katsayısı göz önünde tutulduğunda alanı $F=b.l$ olan taşıyıcı kanat yüzeyi için kaldırma kuvveti:

$$A = \xi_a \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot b \cdot l \cdot \frac{W_\infty^2}{2} \quad (5.15)$$

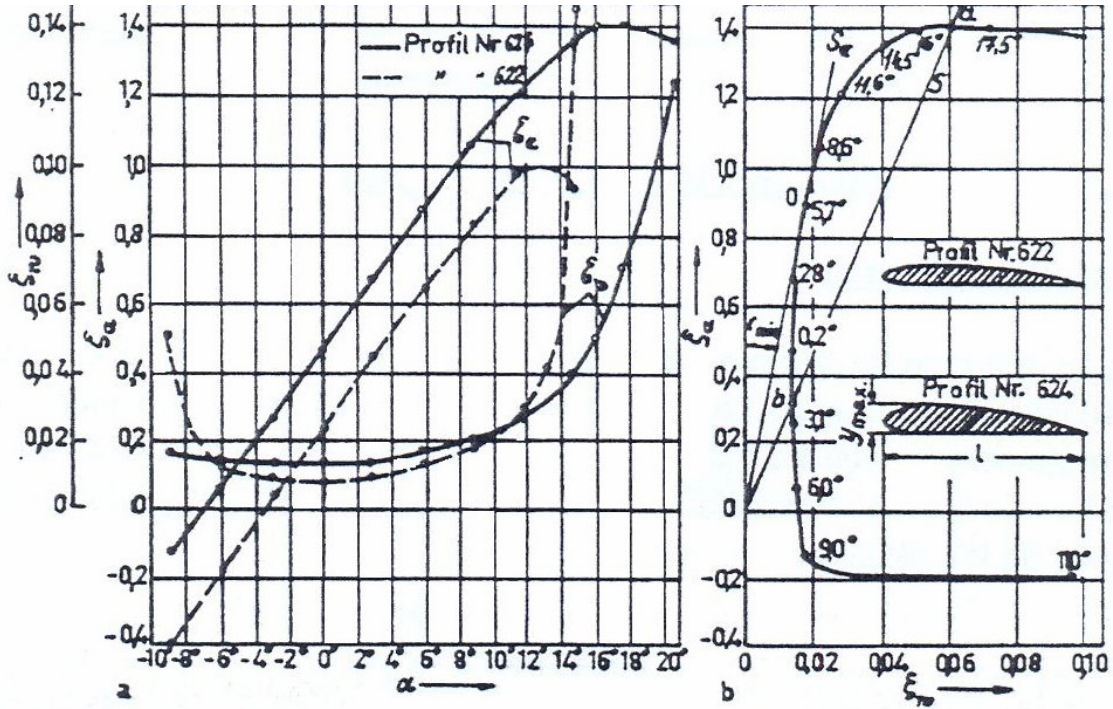
Direnç kuvveti:

$$A = \xi_w \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot b \cdot l \cdot \frac{W_\infty^2}{2} \quad (5.16)$$

Bileşke kuvveti:

$$R = \sqrt{A^2 + W^2} \quad (5.17)$$

Bu eşitliklerdeki ξ_a ve ξ_w katsayıları model deneyleri ile tespit edilirler ve α açısının fonksiyonu olarak aşağıdaki Şekil 5.5 da görüldüğü gibi grafiklerde verilirler.



Şekil 5-5 ξ_a ve ξ_w katsayıları ve profil açıları.

Taşıyıcı kanadın akıma karşı kuvvetinin kaldırma kuvvetine oranı kayma sayısı olarak isimlendirilir. Kayma sayısı, taşıyıcı kanadın akım tekniği özelliklerini belirtir.

Kayma sayısı:

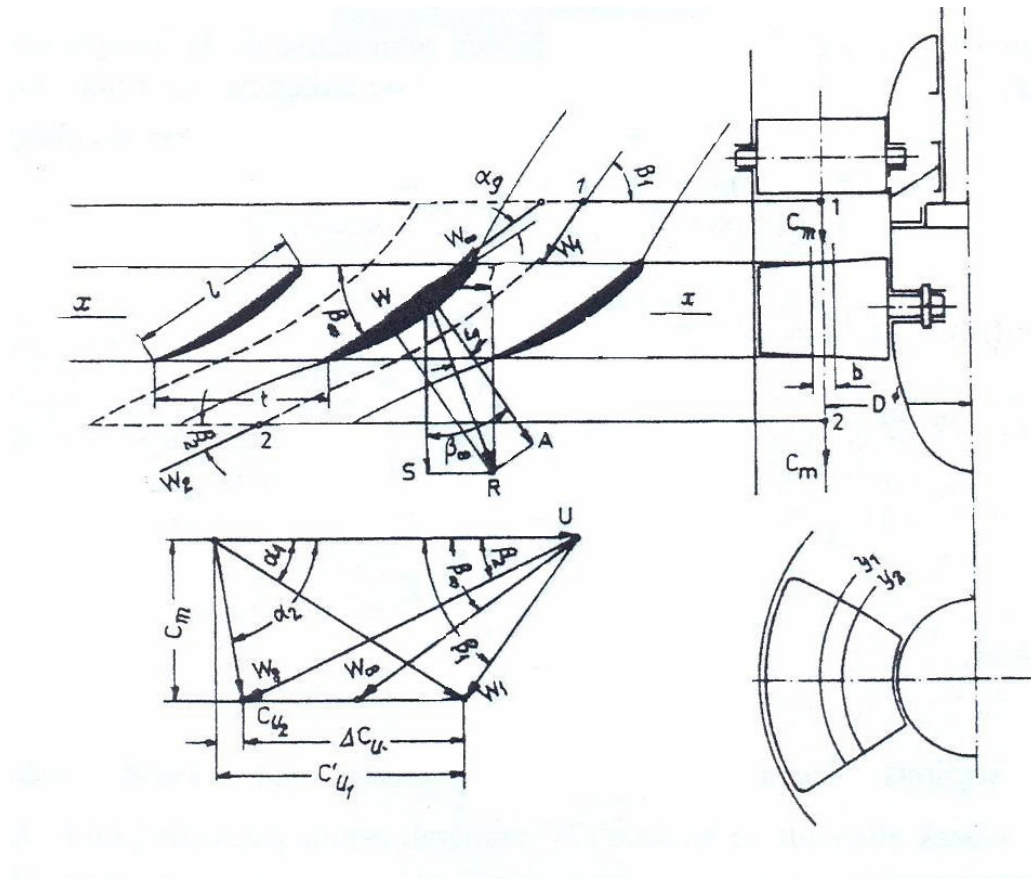
$$\tan \varepsilon = \frac{W}{A} = \frac{\xi_w}{\xi_a} \quad (5.18)$$

Kayma sayısı küçüldükçe A kaldırma kuvvetinin W karşı koyma kuvvetine oranı büyür. Şekil 5.5'de kayma sayısı S akımı ile dik eksen arasındaki ε açısı ile belirtilmiştir. Taşıyıcı bir kanatın kullanma sahası Şekil 5.9'da de görülen a ve b noktaları ile sınırlı bulunmaktadır. Şekil 5.5'de görülen a noktasından daha yukarı değerlerde çalışma, akımın taşıyıcı kanattan ayrılması nedeni ile taşıyıcı kanat için tehlikelidir. Şekil 5.9'daki a noktasının üstünde ve b noktasının altında $\tan \varepsilon$ kayma sayılarının değerleri büyür. En uygun olan $\varepsilon_{\min}$ kayma açısı 0 noktasına teğet olan S_0 akım noktası ile dik eksen arasındaki açıdır.

ξ_a ve ξ_w katsayıları α açısına ve taşıyıcı kanadın profil şekline bağlıdır. Şekil 5.9'da görülen 622 numaralı GÖTTINGER profili küçük ξ_a katsayısına ve 624 numaralı kalın GÖTTINGER profili ise daha büyük ξ_a katsayısına sahiptir.

Taşıyıcı bir kanat için geçerli olan yukarıda kaydedilen esaslar, Kaplan tipi hidrolik türbin rotorunun aksel kanat aralıklarına β_1 açısı ile giren ve rotor kanatlarının aralıklarından β_2 açısı ile çıkan su akımı içinde hareket eden rotor kanatları için de geçerlidir.

Kaplan tipi hidrolik türbin rotorlarında kanat aralıklarına W_1 hızı ile giren ve kanatların aralıklarından W_2 hızı ile çıkan su akımının geometrik ortalama hızı W olarak alınır. Şekil 5.6'da görüldüğü gibi y_1 ve y_2 gibi iki dairesel düzlemle sınırlı olan silindirik kesitin genişliği b kısmi aralıkları küçük kısmi türbinler veya birim türbinler olarak incelenirler. Aralık genişliği b olan bu küçük kısmi türbinlerin $t_1 = \pi.D/Z_1$ olan kanat aralıkları aşağıdaki Şekil 5.6'da görüldüğü gibi, bir düzlem üzerine açınımları yapı olarak incelenebilir.



Şekil 5-6 Kaplan tipi türbin rotorunun aksel taşıyıcı kanat aralıklarındaki kuvvetler ve giriş çıkış üçgenleri (ÖZGÜR. Cahid. 1973)

Taşıyıcı kanat teorisindeki ξ_a ve ξ_w katsayıları ve ε kayma açısı yerine Kaplan tipi türbin rotorları kanatları için ξ_{ag} ve ξ_{wg} katsayıları ile ε_g açısı kullanılacak olursa Şekil 5.6'da görüldüğü gibi kanatların aralıklarındaki teğetsel T kuvvetinin değeri :

$$T = R \cdot \sin(\beta_{\infty} - \varepsilon_g) \quad (5.19)$$

W_{∞} akım hızına dik olan A kaldırma kuvveti:

$$A = \xi_{ag} \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot b \cdot \lambda \cdot \frac{W_{\infty}^2}{2} \quad (5.20)$$

$$R = \frac{A}{\cos \varepsilon_g}$$

$$T = \xi_{ag} \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot b \cdot \lambda \cdot \frac{\sin(\beta_g - \varepsilon_g)}{\cos \varepsilon_g} \cdot \frac{W_{\infty}^2}{2} \quad (5.21)$$

T kuvveti suyun çevirme gücü eşitliğinden yararlanılarak hesaplanırsa :

$$T = (\gamma \cdot q / g) \cdot (C_{1u} - C_{2u}) \quad \text{veya} \quad T = (\gamma \cdot q / g) \cdot b \cdot t \cdot W_{\infty} \sin \beta_{\infty} \cdot (C_{1u} - C_{2u}) \quad (5.22)$$

(5.21) ve (5.22) numaralı denklemlerin birbirine eşitlenmesi ile kanatların projelendirilmesi için çok önemli olan B_g yükleme sayısı elde edilir.

$$B_g = \frac{\xi_{ag} \cdot \lambda}{t} = \frac{2 \cdot (C_{u1} - C_{u2})}{W_{\infty}} \cdot \frac{\sin \beta_{\infty}}{\cos \varepsilon_g \cdot \sin(\beta_{\infty} - \varepsilon_g)} \quad (5.23)$$

İyi seçilmiş kanat profilinde ε_g açısı çok küçük olduğu için $\varepsilon_g = 1$ olarak alınabilir ve böylece (5.23) numaralı denklem sadeleştirilebilir. Kaplan tipi türbin rotorlarındaki çevresel hız $U=U_1=U_2$ olduğu ve hidrolik verim $\eta_h = 2k_{1u} \cdot (k_{1cu} - k_{2cu}) = 2k_{1u} \cdot \Delta k_{cu}$ olduğu için (5.23) numaralı eşitlikteki B_g yükleme sayısını aşağıdaki gibi sadeleştirebiliriz:

$$B_g = \frac{\xi_{ag} \cdot \lambda}{t} = \frac{\eta_h}{k_u \cdot \bar{W}_{\infty}} \cdot \frac{\sin \beta_{\infty}}{\sin(\beta_{\infty} - \varepsilon_g)} \quad (5.24)$$

ε_g açısının ihmal edilmesi halinde B'_g yükleme sayısının değeri:

$$B'_g = \frac{\xi_{ag} \cdot \lambda}{t} = \frac{\eta_h}{k_u \cdot \bar{W}_{\infty}} \quad (5.25)$$

5.2.2 Kaplan Tipi Türbin Rotorlarının Çizimleri ve Konstrüksiyonları

Francis tipi türbin rotorlarında olduğu gibi Kaplan tipi türbin rotorlarının çiziminde de Şekil 5.1'de verilen grafiklerden yararlanılır. Rotorun D_1 çapı (5.3) numaralı eşit denklemden ayar

kanatlarının b yüksekliği (5.8) numaralı denklemden ve göbek çapı D_n ise $D_n = \overline{U}_n / \overline{U}_1 \cdot D_1$ oranından yararlanılarak hesaplanır, daha sonra da akım şeması çizilir. Kaplan tipi hidrolik türbin rotorları en yüksek verime isabet eden işletme sahasında çalıştırılmaları esnasında rotor kanatlarının önünde ve arkasında su akımı ortamında $C_m = C_{1m} = C_{2m}$ boylamsal hızlarının sabit olduğu kabul edilebilir. Bu yüzden Şekil 5.8’de görülen sadece S_i , S_m ve S_a akım çizgilerinin D_1 ve D_n çaplarındaki akım hızları ile ilgili hız üçgenlerinin çizilmesi yeter olur.

Kaplan tipi hidrolik türbin rotorların çizimi için S_i akım çizgisi ile S_a akım çizgisi arasındaki küçük kısmi türbinlerden eşit su debisi geçecek şekilde S_i , S_m ve S_2 akım çizgilerinin yerleri belirlenir. Yani Şekil 5.8’de görülen S_i , S_m ve S_2 akım çizgileri öyle çizilir ki S_i - S_1 , S_1 - S_m , S_m - S_2 ve S_2 - S_a akım çizgileri arasında kalan her bir küçük kısmi türbinden eşit su debisi geçer ve kısmi su debilerinin toplamı türbinin su debisine eşit olur.

Şekil 5.8’de Kaplan tipi bir hidrolik türbinin ve bu türbinin tahrik ettiği generatörün komple kesit resmi, Şekil 5.8’de ise sadece türbin rotoru ile ayar kanatlarının prensip şeması ve rotor kanatlarının aralıklarındaki S_i , S_1 , S_m , S_2 ve S_a gibi akım çizgileri ile bu çizgilerce sınırlanan teorik kısmi türbinlerin dairesel çizgileri gösterilmiş bulunmaktadır.

Rotor kanatlarının projelendirilmesi için, hız üçgenleri ile B_g yükleme sayısı ve içinde, en iyi Kaplan tipi türbin rotorunun elde edilebileceği deneylerde tespit edilmiş kanat profilinin ölçüleri ile çeşitli karakteristik değerlerinin grafiklerinin bulunduğu profil kataloglarının elde olması gerekir. Sayısı rotor boyutlarına göre değişen kısmi türbinlerin hız üçgenleri, $q=1$ tam su debisi için ve her kısmi türbinin η_h hidrolik veriminin birbirine eşit olduğu kabul edilerek çizilirler.

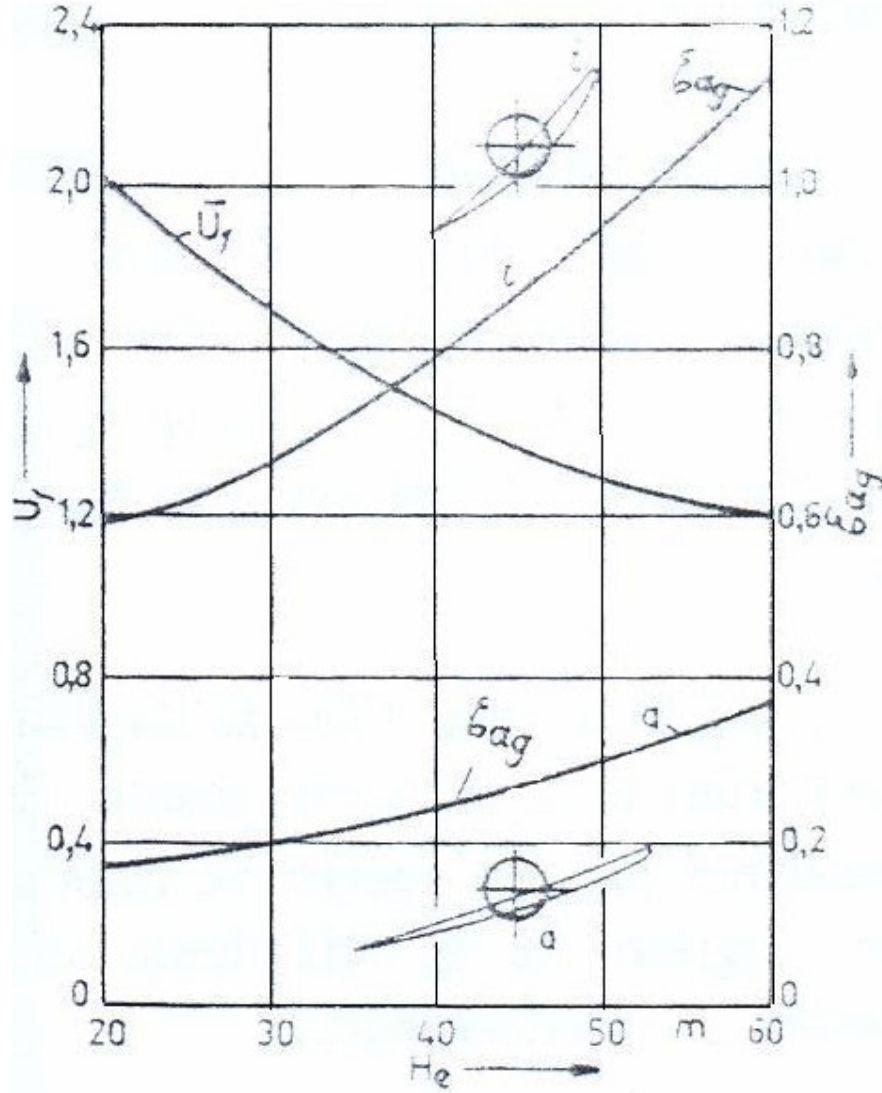
En iyi kanat profilinin kullanılması halinde kayma açısı çok küçüldüğü için B_g yükleme sayısı (5.25) numaralı eşitlikten yararlanılarak tespit edilebilirler.

Ancak Kaplan tipi türbin rotorlarının göbek kısmı çok kalın olduğu için kavitasyon olayı yönünden tehlike ile karşılaşılma olasılığı büyüktür.

Kaplan tipi türbin rotorları çok değişken hidrolik düşülerde çalışmak durumunda olduklarından kanat profilinin seçiminde kavitasyon olayından kaçınmak için en yüksek H_n hidrolik düşü için kabul edilebilir ξ_{ag} değeri aşılmamalıdır ve ayrıca, kayma sayısı olan $\tan \varepsilon = \xi_w / \xi_a$ değeri küçük kalmalıdır.

Kaplan tipi türbin rotorlarının kanat profilinin seçiminde aşılmaması gereken ξ_{ag} değerleri

Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5-7 Kaplan tipi türbin rotorları kanat aralığı katsayıları

Kaplan tipi türbin rotorlarının kanat sayısı, hidrolik düşüye ve özgül devir sayısına bağlı olarak $Z_1=4$ ile 8 arasında değişir. Özgül devir sayısı yüksek olan Kaplan tipi türbin rotorlarında k_u hızları büyük ve özgül devir sayısı küçük olan Kaplan tipi türbin rotorlarında ise k_u hızları küçük oldukları için ve hidrolik düşüye arttıkça özgül devir sayısı azalmakta buna karşın Şekil 5.7'de görüldüğü gibi ξ_{ag} değerleri arttığı için özgül devir sayısı küçük olan Kaplan tipi türbin rotorları B_g yükleme değerleri ile l/t oranları büyük; buna karşın özgül devir sayısı büyük olan Kaplan tipi türbin rotorlarının B_g yükleme değerleri ile l/t oranları küçük olacaktır. Bu yüzden özgül devir sayısı küçük olan Kaplan tipi türbin rotorlarının kanat

aralıkları büyük olacak ve rotor kanatları büyük yüklerle yüklenmeye elverişli olacaktır. Buna karşın özgül devir sayısı büyük olan Kaplan tipi türbin rotorlarının kanat aralıkları daha küçük olacak ve rotor kanatları da daha az yüklenmeye elverişli olacaktır.

B'_g, ξ_{ag} ve $t = \pi.D / Z_1$ değerlerinden yararlanılarak her bir küçük kısmi türbin profili için 1 kanat boyu hesaplanmak suretiyle kanat aralıkları tespit edilebilecektir.

Kaplan tipi türbin rotorları kanatlarının projelendirilmesi öyle bir yol izlenir ve öyle hareket edilir ki her bir küçük kısmi türbin için seçilen kanat aralıkları profilleri silindirik kesitler olarak çizilir ve bu silindirik kesitler kanat profili sırtı ile $\beta_\infty - a_g$ açısı teşkil edecek ve kanatların son uçları ise eksenel bir düzlemde bulunacak şekilde yerleştirilirler.

Kanat profilinin iyi seçilmesi halinde Şekil 5.9'da görüldüğü gibi ξ_{ag} nin değeri a_g açısının değeri ile doğrusal orantılı olarak yükseldiği için a_g açısının değeri aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanabilir:

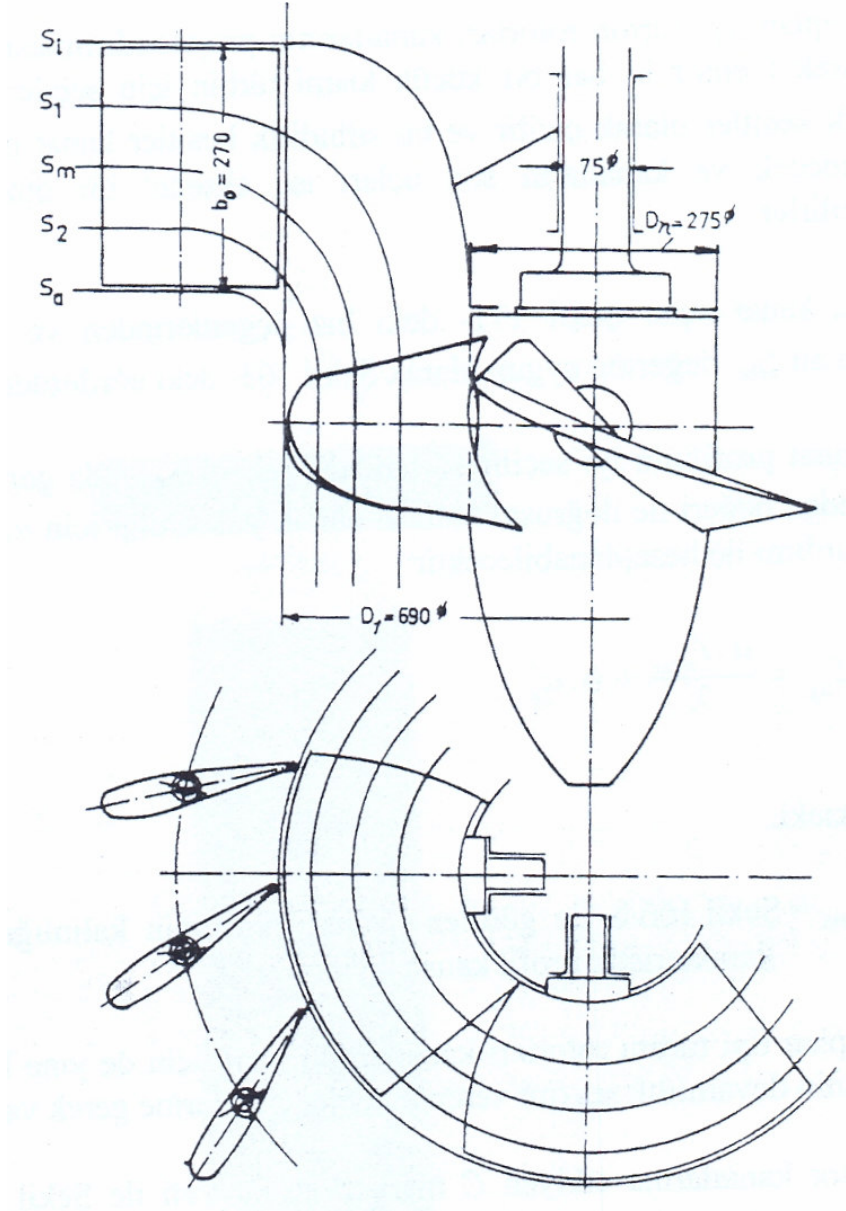
$$\xi_{ag} = \frac{a.Y_{\max}}{\lambda} + b.a_g^o \quad (5.26)$$

$Y_{\max}$ = Şekil 5.9'da görülen kanat profilinin kalınlığı a ve b değerleri ise karakteristik profil kanat sayılarıdır.

Kaplan tipi türbin rotorları kanatlarının imali için de yine kanat sırtı yüzeyleri ile iç yüzeylerinin devamlılık seyrini veren modelci çizgilerine gerek vardır.

Rotor kanatlarına etkiyen C merkezkaç kuvveti ile Şekil 5.10'da görülen T ve S hidrolik kuvvetleri rotor kanatlarının M_s ayar momentini verirler. Rotor kanatlarındaki basınç dağılımına ve T ve S kuvvetlerinin bileşkesi olan R kuvvetinin kanat hareket eksenine mesafesine göre değişen bu M_s ayar momentini model deneyleri ile ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla tam olarak tespit edebilmek mümkün olmaktadır.

$$M_s = m.D_1^3.H_n \quad (5.27)$$

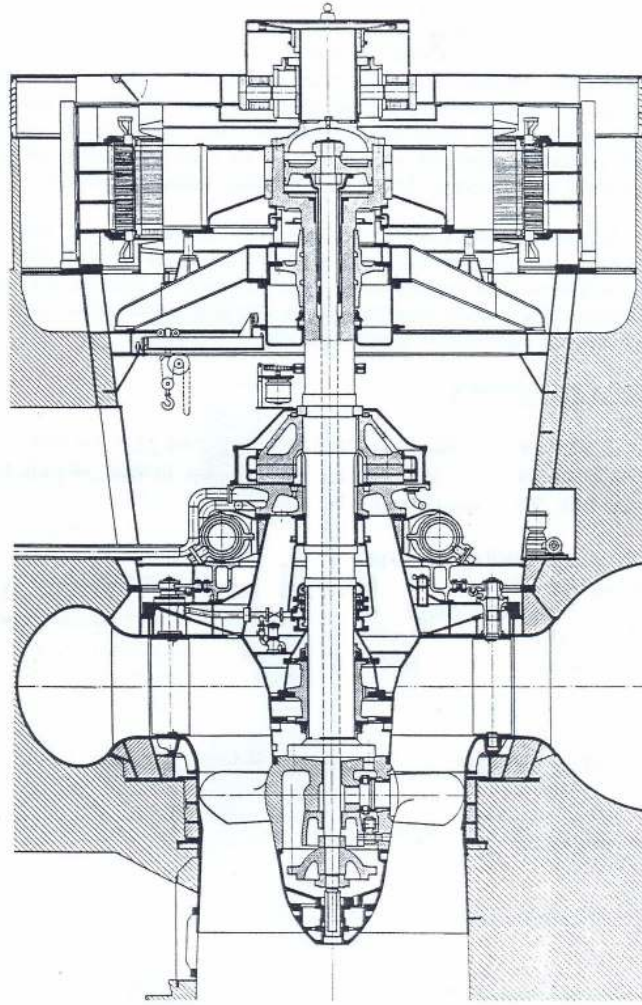


Şekil 5-8 Kaplan tipi hidrolik türbin rotorunun boylamsal akım çizgileri

Model deneyleri ile bu ifadedeki m değeri belirlendikten sonra D_1 ve H_d değerleri (m) birimi ile (5.27) numaralı denklemdeki yerlerine konulduğunda M_s ayar momenti hesaplanabilecektir. Rotor kanatlarının çekme, eğilme ve burulma gibi zorlamalara maruz kalan muylularının da tespit edilip boyutlandırılması önemli bir konudur.

Rotor kanatlarının ayarlanması için gerekli kuvvetlerin meydana getirilmesi için, kural olarak, basınçlı yağ ile çalışan ve içi boş olan türbin-generatör şaftının içinden geçen bir şaft yardımı ile rotor kanatlarına ayarlama kuvveti temin eden hidrolik servomotorlar kullanılır. Şekil 5.13 de böyle bir servomotor ile içi boş olan türbin-generatör şaftı ve servomotor pistonu koluna

bağlı olan küçük çaplı hareket iletim şaftı basit olarak gösterilmiş bulunmaktadır.



Şekil 5-9 Kaplan tipi bir türbin- generatör ünitesinin komple kesiti. (Vincent J. Zipparro ve Hasen Hans. 1993)

Küçük güçlü Kaplan tipi türbin rotorları kanatları ile kanat muyluları gri dökümden, büyük güçlü Kaplan tipi türbin rotorlarının kanatları ile kanat muyluları ise yüksek alaşımlı paslanmaz çelik dökümden imal edilirler. Döküm işleminden sonra kanat yüzeylerinin kopya freze tezgahlarında işlenmesi ve sonra da taşlanması gerekir. Kaplan tipi türbinlerde boğaz kavitasyonu ve rotor dönme boşluğu kavitasyonu olarak anılan kavitasyon olayından sakınmak amacı ile rotor kanatlarının çalıştığı bölgedeki türbin emme borusu çevresel yüzeyi de krom-nikelli malzeme ile kaplanır.

Kaplan tipi türbin rotorlarının göbekli iki parça olarak edilirler. Gri dökümden veya çelik dökümden imal edilen bu parçalardan bir tanesi türbin şaftına tespit edilir ve üzerine rotor

kanatlarının muyluları bağlanır. Bu parçanın iç kısmına da rotor kanatlarının ayar tertibatı yerleştirilir. Rotor göbeğinin ikinci parçası ise birinci parçanın kapağı ve rotor kepi görevini görür ve birinci parçaya bağlanır.

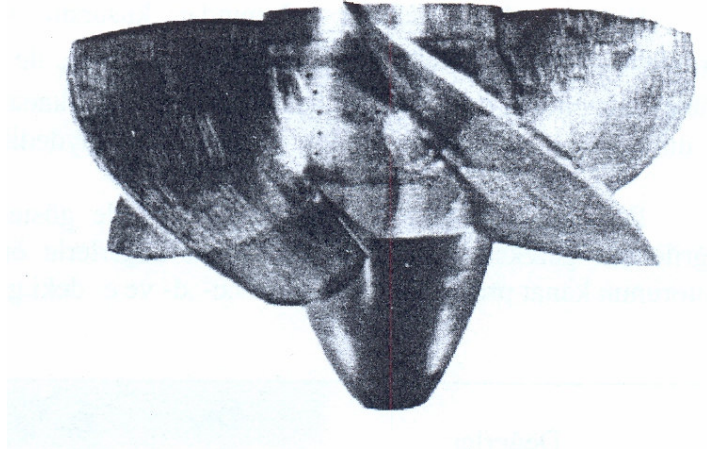
5.2.3 Kaplan Tipi Türbin Rotorları ile İlgili Diğer Bilgiler

Kaplan tipi hidrolik türbin rotorları, ayarlanabilir kanatlı ve sabit kanatlı olmak üzere iki tip olarak imal edilirler. Sabit kanatlı Kaplan tipi türbin rotorlarının ‘uskur tipi Kaplan türbinler’ adı da verilmektedir. Uskur tipi Kaplan türbin rotorlarının kanatların rotor göbeğine belirli açıda sabit olarak yerleştirilmiş olup su debisi ve yük değişse de rotorun kanatlarının açısını değiştirme olanağı yoktur. Şekil 5.10’de kanatları ayarlanabilen kaplan tipi türbin rotorunun fotoğrafı, Şekil 5.11’de ise kanatları ayarlanamayan uskur tipi bir Kaplan türbin rotorunun fotoğrafı görülmektedir.

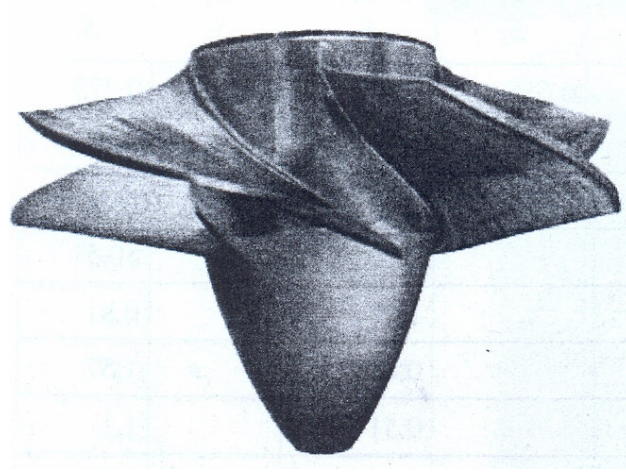
Kaplan tipi hidrolik türbinler düşük hidrolik düşülerde ve genellikle nehir tipi hidrolik santrallerde kullanılırlar. Ancak, nehirlerin taşıdığı su debileri mevsimlere göre değişir.

Su debisinin çok değişmesi halinde, türbini en iyi verimle çalıştırabilmek için rotor kanatlarının açılarının da değiştirilmesi gerekir. Bu gibi durumlarda uskur tipi Kaplan türbinleri rotorları kullanışlı değildir.

Nehir tipi hidrolik santrallerde kanatları ayarlanamayan uskur tipi Kaplan türbinlerin kullanılması halinde nehir sularının arttığı mevsimlerde sudan yeterince yararlanabilmek için santraldeki uskur tipi Kaplan türbinlerinin sayısının fazla olması gerekir. Bu durum santralin tesis masrafı ile işletme ve bakım masraflarının artmasına neden olur.



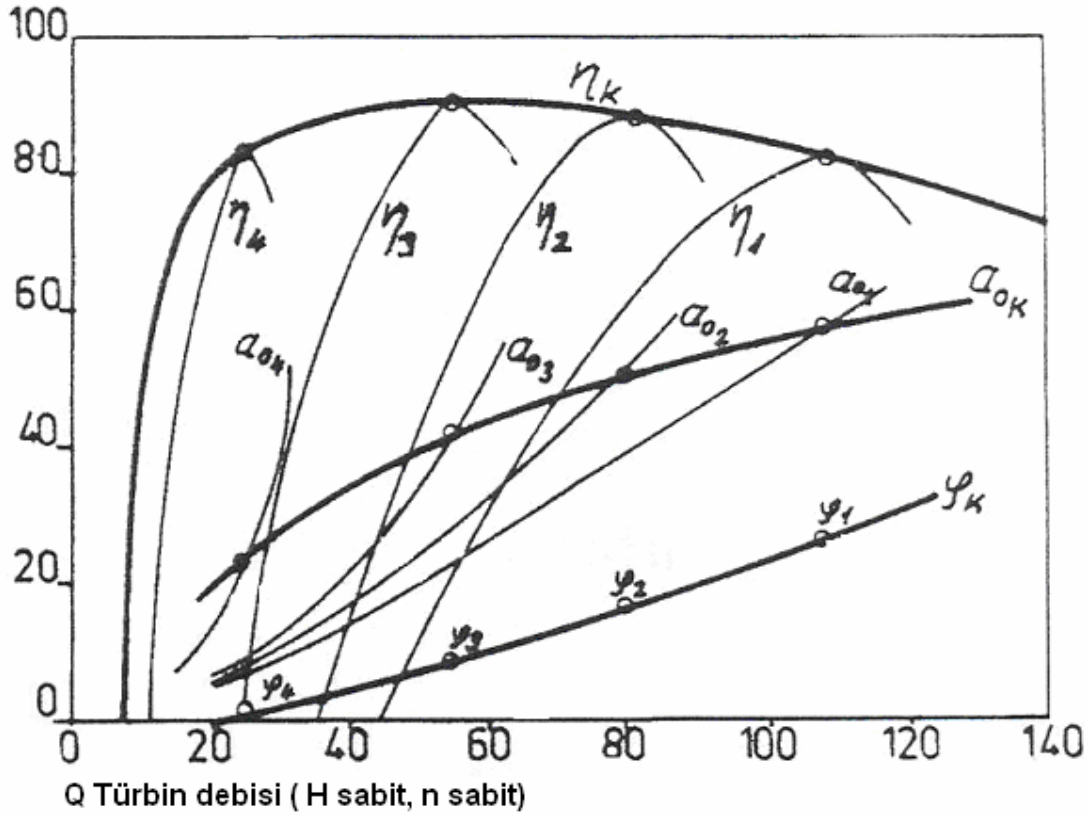
Şekil 5-10 Kanatları ayarlanabilen kaplan tipi türbin rotoru. (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)



Şekil 5-11 Uskur tipi kaplan türbin rotoru. (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

Uskur tipi kaplan türbinlerinin yukarıda kısaca kaydedilen sakıncaları yönlerinin bulunması nedeni ile kanatları ayarlanabilen Kaplan tipi türbin rotorları geliştirilmiştir. Kaplan tipi hidrolik türbin rotorlarının kanatlarının şekillerinde istenildiği şekilde ayarlanabilme özelliğine sahip olmanın dışında uskur tipi Kaplan türbin rotorlarına ait kanatlardan farklı bir durum bulunmamaktadır.

Şekil 5.12’de kanatları ayarlanabilen Kaplan tipi türbin rotorlarına ait verim, güç ve su debisi karakteristik eğrileri ile kanatları ayarlanamayan Kaplan tipi türbin rotorlarına ait verim, güç ve su debisi karakteristik eğrileri verilmiş bulunmaktadır. Şekil 5.13’de ise her iki türbin rotoruna ait güç-su debisi karakteristik eğrileri verilmiştir.



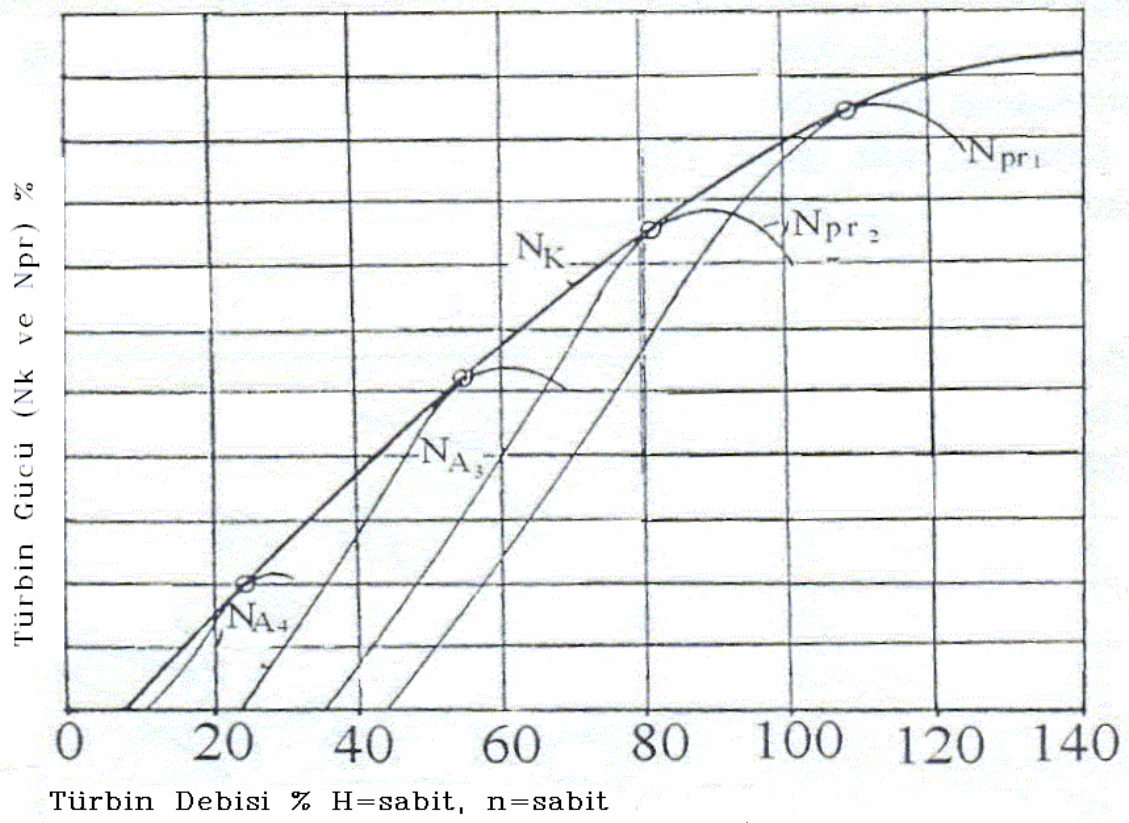
Şekil 5-12 Kaplan tipi türbinlere ait karakteristik eğrileri. (BAŞEŞME, Hidayet. (2003)

Kaplan tipi hidrolik türbin rotorlarına ait η_k verim eğrisi, değişik debiler için imal edilmiş olan sabit kanatlı Kaplan tipi türbin rotoruna ait $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ gibi verim eğrilerini içine alan bir eğridir. Bu durum kanatları ayarlanabilen Kaplan tipi bir türbin rotorunun kanatları ayarlanamayan birçok Kaplan tipi türbin yerine kullanılabileceğini ve kanatları ayarlanabilen Kaplan tipi türbin rotorlarının daha kullanışlı ve modern rotorlar olduğunu ifade etmektedir.

Keza, kanatları ayarlanabilen Kaplan tipi bir türbin rotoruna ait olup Şekil 5.13- de görülen N_k güç eğrisi de, değişik debiler için imal edilmiş olan sabit kanatlı Kaplan tipi türbin rotoruna ait $N_{pr1}, N_{pr2}, N_{pr3}, N_{pr4}$ gibi güç eğrilerini içine alan bir eğridir. Bu durumda kanatları ayarlanabilir Kaplan tipi türbin rotorlarının sabit kanatlı Kaplan tipi türbin rotorlarından daha kullanışlı olduğunu ifade etmektedir.

Kaplan tipi türbin rotorlarına ait bazı karakteristik büyüklükler için tanzim edilmiş olan Çizelge 5.1'deki değerlerden yararlanılarak, en uygun düşüdeki en uygun yüke tekabül eden, yani en iyi verim elde edilebilen yükteki Q_{opt} debisi için rotor kanatlarının arasından geçen su akımının C_m ortalama hızını aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplamak mümkün olabilecektir.

$$C_m = \frac{Q_{opt}}{\frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_N^2)} \quad (5.29)$$



Şekil 5-13 Rotor kanatları ayarlanabilen ve uskur tipi türbinlere ait karakteristik eğriler
(BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

Çizelge 5-1 Kaplan tipi türbin rotorlarına ait karakterisrik değerler.

n_s	Rotor tipi	H_{max} (m)	$\left[\frac{C_2^2}{2g} \right] \cdot \frac{1}{H}$ *	$\frac{C_{2m}}{\sqrt{H}}$ (m/sn)	$\frac{D_N}{D_1}$	$\frac{b_0}{D_1}$	η	η	$\frac{U_{1a}}{\sqrt{H}}$ (m/sn)	Rotor kanat sayısı
							$D_1 \geq$	3m.		
450	Uskur tipi ve Kaplan tipi rotorlar	30	0,20	1,80	0,4 ile 0,5	0,37	0,89	0,95	6,0	7 - 6
500		25	0,22	1,92			0,885	0,945	6,5	7 - 6
600		16	0,26	2,15			0,87	0,925	7,5	6 - 5
700		11	0,29	2,35			0,85	0,895	8,5	5 - 4
800		7,5	0,32	2,50			0,82	0,87	9,5	4
900		5	0,37	2,65			0,795	0,835	10,5	4

5.3 Türbin Ayar Kanatları

5.3.1 Genel konular

Francis ve Kaplan tipi hidrolik türbinlerde kullanılan türbin ayar kanatları, türbin salyangozunun içindeki sabit yönlendirici kanatlardan geçen tahrik suyunu türbin rotoru kanatlarına yönlendirmeye ve tahrik suyunun debisini ayarlamaya yararlar.

Türbin ayar kanatları hidrodinamik kesitli olarak imal edilirler ve türbin rotorunu çevreleyen ve yüksekliği türbin rotorunun b_0 su giriş yüksekliğine eşit olan özel bir çember üzerine dizilirler.

Alt ve üst muylulardan hareket edebilecek şekilde tespit edilen ayar kanatlarının üst uçları ayar çemberi tertibatı üzerindeki özel kollara bağlanır.

Düşük hidrolik düşülerde çalışan Francis ve Kaplan tipi türbinlere ait ayar kanatları çelik dökümden veya çelik sacların şekillendirilip kaynak edilmesi ile imal edilebilirler. Ancak orta ve yüksek hidrolik düşülerde çalışan Francis tipi türbinlerde büyük güçlü Francis ve Kaplan tipi türbinlere ait ayar kanatlarının yüksek kaliteli çelik dökümün dövülmesi suretiyle imal edilmeleri gerekmektedir.

Türbin ayar kanatlarının projelendirilmesi türbinin Q optimum debisine göre yapılır. Türbin ayar kanatları profilinin baş ucundan ve son ucundan geçen profil ekseninin C_1 gerçek su hızı yönü ile aynı olacak ve profillerinin kuyruklarından geçen daire çapının, türbin rotorunun D_1 giriş çapından çok az büyük olacak şekilde yerleştirilirler. Türbin ayar kanatlarının kuyruk kısmındaki β_s profil açısının 10° ile 15° arasında seçilmesi yeterli görülür.

Türbin ayar kanatlarının l_0 boyları, ayar kanatlarının Z_0 sayısına göre değişir. Türbin ayar kanatlarının Z_0 sayısı genellikle 4'e bölünebilen bir sayı olarak seçilirler. Türbin ayar kanatlarının Z_0 sayısının az olması ayar çemberinin ucuza imal edilmesine olanak verir. Ancak, az sayıda ayar kanadına sahip olan ayar çemberini ayarlama kuvveti çok daha büyük olur. Bu yüzden az sayıda ayar kanadı yerine çok sayıda ayar kanadının kullanılması tercih edilir.

Türbin ayar kanatlarının her bir aralığının kesiti:

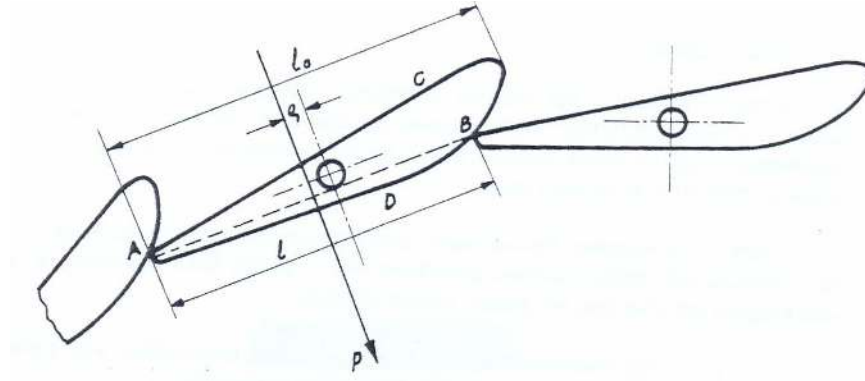
$$f_0 = b_0 \cdot a_0 = Q_n / Z_0 \cdot k_{c1} \cdot \sqrt{2gH_d} \quad (5.30)$$

Çok sayıda ayar kanadı ile su debilerinin kusursuz bir şekilde ayarlamak veya kapatmak olarak dahilindedir. Ayrıca, ayar kanatlarının sayısının çoğaltılması ile boyutlarını küçültmek

ve imalatları ile işleme, taşıma ve montaj işlerinde kolaylıklar sağlamak mümkün olabilmektedir.

Ayar kanatları kapandıkları zaman birbiri ile temas eden ve Şekil 5.14 da A ve B ile gösterilen noktalarındaki dikey yüzeylerin su sızdırmayacak şekilde ve birbirine tam paralel olarak çok büyük bir özenle işlenmeleri gerekmektedir.

Türbin ayar kanatlarının açıldıkları zaman üzerlerine etkiyen hidrolik yüklerin mertebesi azalır. Kapalı vaziyetteki bir türbin ayar kanadına etkiyen hidrolik yükün mertebesi, açık vaziyetteki ayar kanadına etkiyen hidrolik yükten daha büyüktür. Bu yüzden, türbin ayar kanatları kapalı durumda iken, üzerine etkiyen en büyük hidrolik yük göz önüne alınarak boyutlandırılırlar.



Şekil 5-14 Kapalı durumdaki türbin ayar kanatlarına etkiyen kuvvetler

Türbin ayar kanatlarına gövde kısımlarının profilleri hidrolik düşüye, türbinin gücüne ve özgül devir sayısına göre değişirler. Şekil 5.15 de görülen ayar kanatları düşük özgül devir sayılı Francis tipi türbinlerde görülen ayar kanatları ise yüksek ve normal özgül devir sayılı Francis ve Kaplan tipi hidrolik türbinlerde kullanılmaktadır.

Çizelge 5.2 Alaşımsız çelik döküm malzemeler

İşaretler	Mekanik özellikler				Kimyasal İçeriği				
	Min. akma sınırı (kp/mm ²)	Çekme mukavemeti (kp/mm ²)	L=5d boydaki min. Uzama (%)	Min. çentik darbe mukavemeti (kp/mm ²)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P _(max) (%)	S _(max) (%)
Stg40.97	20	40-50	20	6	0,15-0,20	0,30-0,50	0,50-0,80	0,04	0,04
Stg45.97	23	45-55	17	5	0,20-0,28	0,30-0,50	0,50-0,80	0,04	0,04
Stg50.97	25	50-60	14	4	0,28-0,36	0,30-0,50	0,50-0,80	0,04	0,04

Çizelge 5.3 Düşük alaşımlı çelik döküm malzemeler

İşaretler	Mekanik özellikler				Kimyasal içeriği							
	Min. Akma sınırı (kp/mm ²)	Çekme Mukavemeti. (kp/mm ²)	L=5d boydaki min. uzama (%)	Min. çentik darbe mukavemeti (kp/mm ²)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P _(max) (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)
Stg L1	35	55 - 70	18	4	0,18-0,26	0,30-0,70	1,3-1,7	0,035	-	-	-	-
Stg L2	35	55 - 70	18	4	0,18-0,26	0,30-0,70	0,6-0,7	0,035	1,8-2,2	-	-	-
Stg L3	40 - 60	60 - 85	14 - 18	5 - 8	0,22-0,30	0,30-0,50	0,5-0,8	0,03	-	0,9-1,2	0,25-0,45	-
Stg L4	30 - 70	55 - 95	14 - 18	6 - 18	0,10-0,40	0,30-0,50	0,5-0,9	0,03	0,25-1,50	2,0-3,75	0,20-0,80	≤0,15
Stg L5	50 - 65	70 - 95	6 - 12	6 - 12	0,15-0,35	0,30-0,50	0,5-0,8	0,03	2,80-3,50	2,80-3,50	0,25-0,45	≤0,15

Çizelge 5.4 Yüksek alaşımlı çelik döküm malzemeler ve özellikleri

İşaretler	Mekanik özellikler				Kimyasal içeriği							
	Min. Akma sınırı (kp/mm ²)	Çekme Mukavemeti. (kp/mm ²)	L=5d boydaki min. uzama (%)	Min. çentik darbe mukavemeti (kp/mm ²)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
	Min	Min	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
Stg Lh1	45	65 - 80	15	4	0,04-0,18	≤0,35	0,30-0,80	0,035	0,035	0,0-1,25	13,0-14,0	-
Stg Lh2	65	90 - 105	5	1	0,06-0,14	≤0,35	0,20-0,60	0,035	0,035	0,0-1,25	12,5-13,3	0,0-0,8
Stg Lh3	60	75 - 90	10	35	0,08-0,16	≤0,35	0,30-0,80	0,035	0,035	1,5-2,0	12,0-13,0	-
Stg Lh4	18	50 - 60	30	20	0,04-0,10	0,30-0,80	0,30-0,80	0,035	0,035	9,0-13,0	16,0-19,0	-
Stg Lh5	35 - 55	60 - 80	25 - 35	10 - 18	≤0,06	0,30-0,80	0,30-0,80	0,035	0,035	7,0-9,0	19,0-21,0	0,5-2,75
Stg Lh6	50 - 60	65 - 80	8 - 16	2 - 6	≤0,07	0,60-1,00	2,5-3,0	0,035	0,035	2,25-2,75	19,0-22,0	2,25-2,75

Çizelge 5.5 Yüksek alaşımlı çelik döküm malzemeler

Malzeme özellikleri	1. Malzeme	2. Malzeme	3. Malzeme	4. Malzeme
Çekme mukavemeti (kp/mm ²)	70 - 75	90 - 100	104	110
Akma sınırı muk. (kp/mm ²)	50 - 55	70 - 80	97	75
Uzama L ₀ =5d boyda (%)	20 - 25	16 - 20	17	10 - 13
Çentik darbe muk. (kpm/mm ²)	10 - 15	11 - 16	9 - 10	3 - 5
Yüzey serliği HBr. (kp/mm ²)	200 - 220	280 - 300	300 - 310	350
Karbon miktarı (%C)	0,05 - 0,07	0,04 - 0,07	0,05 - 0,07	0,05 - 0,07
Krom miktarı (%Cr)	12 - 13	12 - 13	12 - 13	16 - 17
Nikel miktarı (%Ni)	1,3 - 1,5	3,7 - 4,3	3,8 - 4,2	3,8 - 4,2
Molibden miktarı (%Mo)	0,3 - 0,4	0,3 - 0,4	0,4 - 0,6	0,8 - 0,12

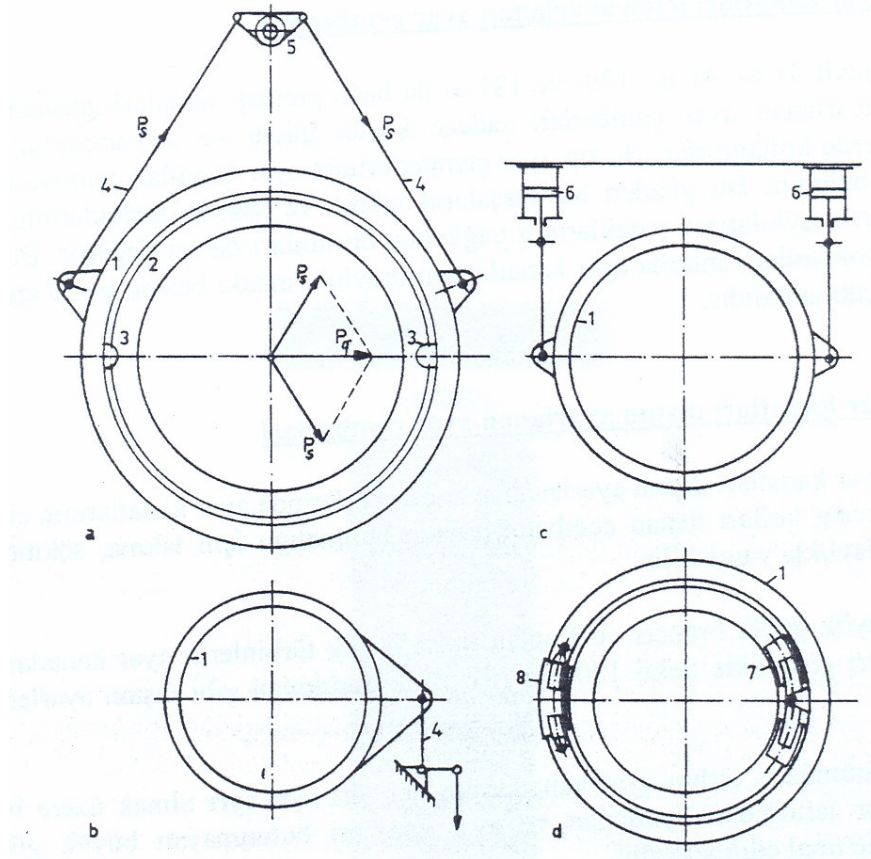
5.4 Ayar Kanatları Ayarlama Çemberleri

5.4.1 Ayar çemberlerinin konstrüksiyonları

Türbin ayar kanatları ayar çemberlerinin görevi, türbin için gerekli olan giriş momentini getirmek, her işletme durumu için gerekli olan su debisini ayarlamak ve bir kapama organı rolü oynamaktadır. Bu şartlar, Prof FİNK tarafından geliştirilmiş olan ve türbin ayar kanatların işletme şartlarına göre ayarlanabilen ayar çemberi vasıtası ile gerçekleştirilebilmektedir.

Küçük güçlü ve küçük boyutlu Kaplan ve Francis tipi hidrolik türbinlerin ayar çemberleri çelik döküm ve gri dökümden imal edilirler. Buna karşın büyük güçlü ve büyük boyutlu Francis ve Kaplan tipi türbinlere ait ayar çemberleri çelik sac ve kaynak konstrüksiyonlu olarak imal edilirler.

Türbin ayar kanatlarının açıklıklarını ayarlamaya yarayan ayar çemberleri çeşitli şekillerde tertip edilirler. Şekil 5.16'da ayar çemberlerinin tertip şekilleri basit prensip şemaları ile açıklanmış bulunmaktadır.



Şekil 5.16 Ayar kanatları çemberlerinin tertip şekilleri

5.4.2 Ayar Kanatları İçten Ayarlanan Ayar Çemberleri

Ayar kanatları sadece içten ayarlanan ayar çemberleri sadece küçük güçlü ve salyangozsuz Francis tipi türbinlerde kullanılırlar. Bu tip ayar çemberlerinde ayar kanatları manivela kolları suyun içinde bulunur. Bu yüzden bu parçaların takma ve sökme zorluklarının yanında ayar kanatları muylularının yataklarının yağlama durumları da iyi değildir. Bu sebeptendir ki bu tip konstrüksiyonlarda ayar kanatlarının muylularındaki basınç $p=50 \text{ kp/cm}^2$ den daha yukarı çıkmamalıdır.

5.4.3 Ayar Kanatları Dıştan Ayarlanan Ayar Çemberleri

Ayar kanatları dıştan ayarlanan ayar çemberlerinde ayar kanatlarının emniyet kolları ile manivela kolları dıştan çember üzerinde bulunduğu için takma, sökme ve yağlama işleri kolaylıkla yapılabilir.

Büyük güçlü Francis ve Kaplan tipi hidrolik türbinlerin ayar kanatlarını ayarlama çemberleri genellikle Şekil 5.16'da görüldüğü gibi dıştan ayarlanır tipte imal edilirler.

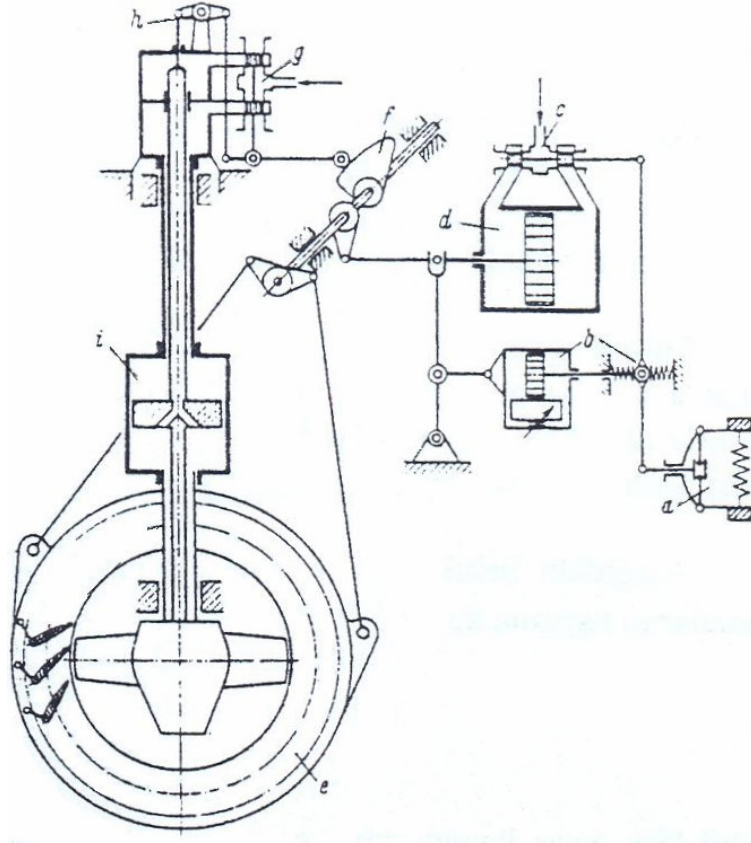
Günümüzde türbin ayar kanatlarının her biri ayrı olmak üzeri birer hidrolik servomotor tarafından ayarlanan ve ayar çemberi bulunmayan büyük güçlü hidrolik türbinlerde imal edilmektedir.

5.4.4 Kaplan Tipi Türbinlerde Ayar Kanatları ile Rotor Kanatlarının Birlikte Ayarlanması

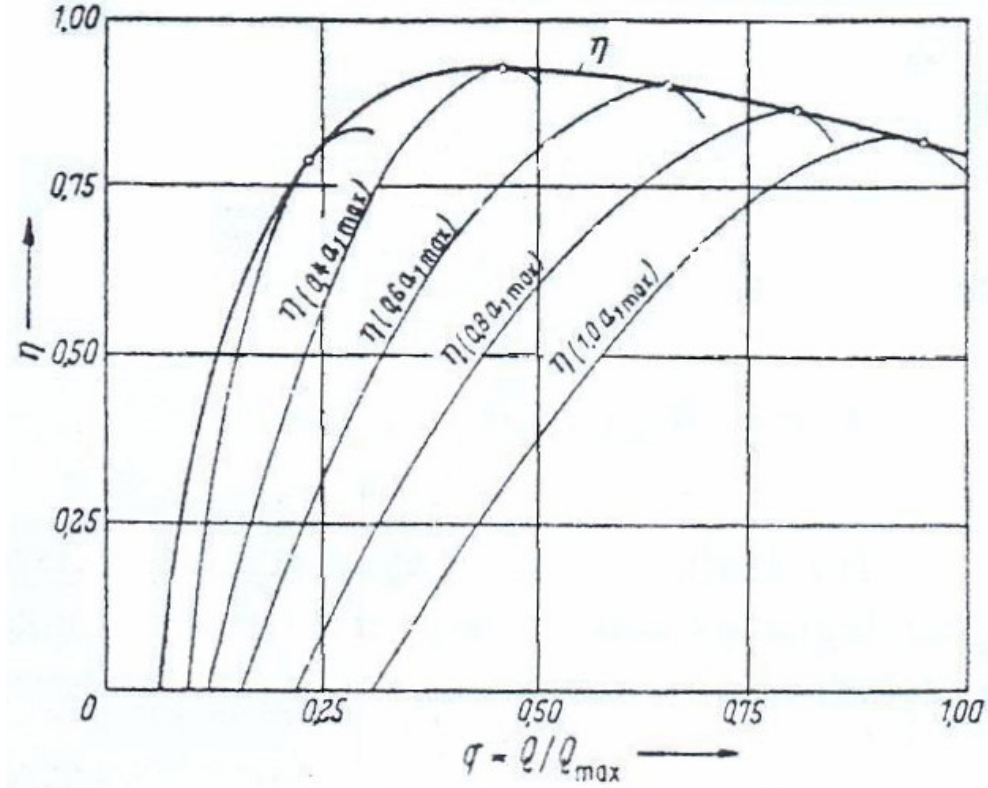
Kaplan tipi hidrolik türbinlerde ayar kanatları ile birlikte aynı anda rotor kanatlarının açıklıklarının da en yüksek verim elde edilecek şekilde ayarlanması gerekmektedir.

Şekil 5.17'de Kaplan tipi türbinlere ait ayar kanatları ile rotor kanatlarının aynı anda birlikte ayarlanmasını sağlayan ayar çemberi tertip tarzı ile çiftli regülasyon devresinin basit prensip şeması gösterilmiştir.

Şekil 5.18'de ise türbin ayar kanatları ile rotor kanatlarının en büyük a_1 açıklığının $0,4a_1$; $0,6a_1$; $0,8a_1$; ve $1,0a_1$ katı açıklıklarındaki türbin verimleri $q=Q/Q_{\max}$ debilerinin fonksiyonu olarak karakteristik eğrilerle gösterilmiş bulunmaktadır.



Şekil 5.17 Kaplan tipi türbinlerin ayar kanatları ile rotor kanatları ayarlama mekanizması.



Şekil 5.18 Kaplan tipi türbinlerin verim eğrileri. (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

5.5 Türbin Salyangozu

5.5.1 Genel Açıklamalar

Francis ve kaplan tipi hidrolik türbinlerde kullanılan salyangozların görevi tahrik suyunun türbin rotorunun çevresine eşit basınç ve eşit hızlarla 360 derece dağıtmak ve tahrik suyunun ayar kanatlarının yönlendirmektir.

Türbin salyangozunda eşit basınç ve hızlarla 360 derece dağıtılarak türbin ayar kanatlarının aralıklarına yönlendirilen su, ayar kanatlarında türbin rotorunun kanatlarının aralıklarına intikal eder.

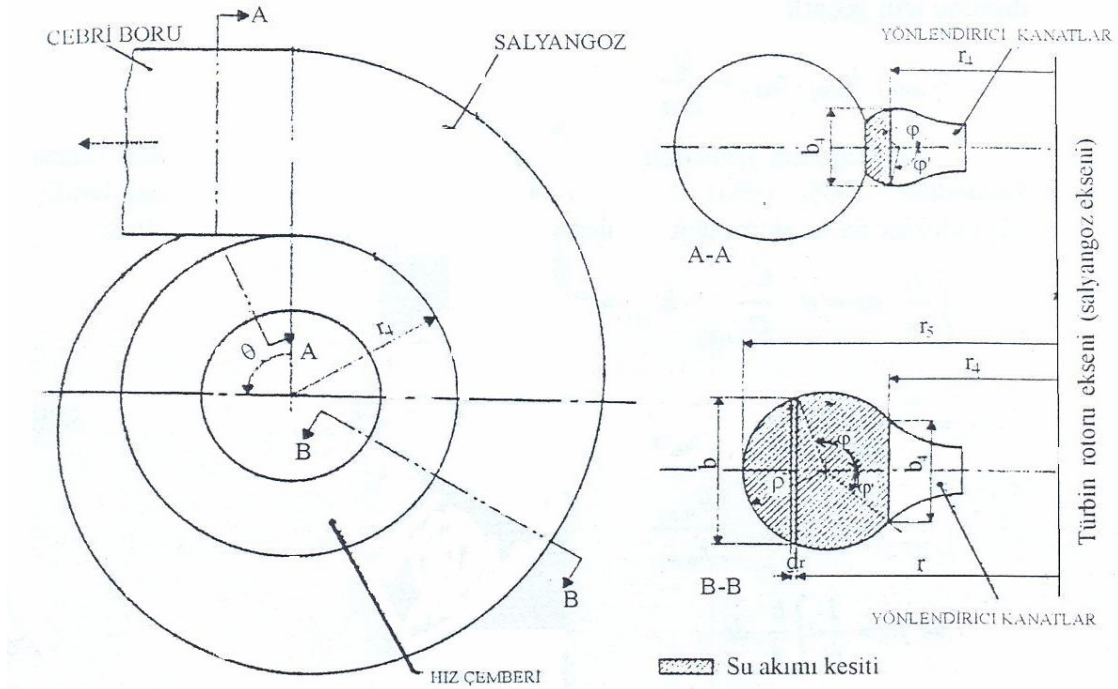
Türbin salyangozu girişindeki su hızı, hidrolik düşüye bağlı olarak $C = 0,9H$ (m/sn) olarak hesaplanır. Ancak, hidrolik düşünün çok yüksek olması halinde salyangoz girişindeki su hızının $C = 11-12$ (m/sn) değerinin üzerine çıkmaması için önlemler alınır. Türbin salyangozunun öyle uygun şekillendirilmesi gerekir ki, türbin ayar kanatlarının her bir aralığına eşit basınçta, eşit hızlarda ve eşit debide su intikal etsin.

Francis ve Kaplan tipi hidrolik türbinlerin salyangozları üzerinde yapılan model deneyleri

göstermiştir ki, salyangozun dairesel kesitlerindeki hidrolik akımlar sabit hız, moment ve basınç kuralına uygun olarak tasarlanmalıdır.

5.5.2 Salyangoz Kesitlerinin Hesaplanması

Francis ve Kaplan tipi hidrolik türbinlerin salyangozlarının kesitlerinin hesaplanmasında grafiksel veya nümerik integral yada trigonometrik integral metotları kullanılır. Aşağıda trigonometrik integral metodu ile salyangoz kesitlerinin hesaplanması açıklanmıştır ve bu hesaplamada kullanılan işaretlerde Şekil 5.24 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.19 Salyangoz kesitlerinin hesaplanmasında kullanılan işaretler.

Hidrolik bir türbine ait bir salyangozun en geniş kesitinden giren su akımının debisi Q ve su akımının salyangoz içinde dönüş açısı (katettiği yol açısı) θ derece olduğuna göre genel debi ifadesi :

$$Q_0 = \frac{Q}{2\pi} \cdot \theta \quad (5.32)$$

Herhangi bir θ açısındaki kesitten geçecek olan suyun debisi:

$$Q_0 = \int_{r_4}^{r_5(o)} C_u \cdot b \cdot dr \quad (5.33)$$

C_u = Suyun salyangoz içindeki C gerçek hızının k_u çevresel hız yönündeki bileşeni;

b =Su akım kesitinin genişliği

r_4 =Salyangoz iç çapı

r_5 =Herhangi bir kesitte salyangozun dış çapı.

Sabit hız- moment kuralına göre salyangozun her kesitinden geçen su debisi için geçerli olan (5.33) numaralı denklemi aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$Q_n = \int_{r_4}^{r_4(\theta)} \frac{C_{4u(\theta)} \cdot r_{4(\theta)}}{r} \cdot b \cdot dr = C_{4u(\theta)} \cdot r_{4(\theta)} \cdot \int_{r_4}^{r_5(\theta)} \frac{b}{r} \cdot dr \quad (5.34)$$

Salyangozun en geniş kesitinden giren suyun debisi, salyangozun yönlendirici kanatlarının aralıklarından geçen debilerin toplamına eşit olacağı ve her bir yönlendirici kanat aralığına eşit olarak dağılacığı için (5.35) numaralı denklem her işletme durumu için geçerli olacaktır.

$$C_{4u(\theta)} \cdot b_{4(\theta)} \cdot r_{4(\theta)} = \frac{Q}{2\pi} \quad (5.35)$$

Salyangoz yönlendirici kanatlarının açılarını a ile gösterecek olursak ve (5.33) , (5.34) ve (5.35) numaralı denklemlerden yararlanılarak geometrik büyüklükler ile su akımı değişkenleri arasında aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz.

$$\int_{r_4}^{r_5(\theta)} \frac{b}{r} \cdot dr = \theta \cdot \frac{C_{4m(\theta)}}{C_{4u(\theta)}} \cdot b_{4(\theta)} = \theta \cdot \tan \alpha_{4(\theta)} \cdot b_{4(\theta)} \quad (5.36)$$

(5.36) numaralı eşitliğin her iki tarafını $r_{4(\theta)}$ ile bölecek olursak bu taktirde birimsiz olan aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$f_{1(\phi)} = \theta \cdot \tan \alpha_{4(\phi)} \cdot \frac{b_{4(\phi)}}{r_{4(\phi)}} \quad (5.37)$$

$$f_1 = \frac{1}{r_4} \cdot \int_{r_4}^{r_5} \frac{b}{r} \cdot dr \quad (5.38)$$

Francis tipi hidrolik türbinlerin salyangozlarının kesitleri kural olarak Şekil 5.19'da görüldüğü gibi dairesel kesitlidirler. Bu dairesel kesitten yönlendirici kanatların bulunduğu hız çemberine geçiş de mukavemet tekniği ve imalat kolaylığı yönlerinden teğetsel bir eğri ile yapılmaktadır. Bu yüzden (5.37) numaralı eşitliğe ρ/r_4 değerini dahil etmek mümkün

olabilmektedir.

Şekil 5.19’da görüldüğü gibi $b = 2.\rho.\sin \varphi$ ve $r = r_4 + \rho(\cos \varphi' - \cos \varphi)$ dır. Ayrıca r yarıçapları ile φ açıları arasında aşağıdaki ilişkiler vardır.

$$r = r_4 \text{ iken } \varphi = \varphi' \text{ ve } r = r_5 \text{ iken } \varphi = \pi$$

Bu duruma göre; $dr = \rho.\sin \varphi.d\varphi$

Yukarıda kaydedilen b , r ve dr değerlerini (5.38) numaralı denklemde yerine koyacak olursak aşağıdaki eşitlik elde edilecektir.

$$f_1 = 2.\left(\frac{\rho}{r_4}\right)^2 \int_{\varphi'}^{\pi} \frac{\sin^2 \varphi}{1 + \frac{\rho}{r_4}(\cos \varphi' - \cos \varphi)} .d\varphi \quad (5.40)$$

Bu ifadedeki f_1 integralinin değerinin hesaplanmasını kolaylaştırmak için değişik φ' açıları ve ρ/r_4 oranları için hazırlanmış olan sayısal değerler Çizelge 5.6, 5.7, 5.8 ve 5.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 ϕ' açıları ve ρ/r_4 oranları.

ϕ'	ρ/r_4					
	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13
0°	2746-2	7484-2	1440-1	2339-1	3433-1	4711-1
30°	2677-2	7307-2	1409-1	2291-1	3369-1	4634-1
40°	2581-2	7053-2	1361-1	2217-1	3264-1	4494-1
50°	2433-2	6658-2	1287-1	2098-1	3092-1	4263-1
60°	2233-2	6118-2	1184-1	1933-1	2853-1	3937-1
70°	2232-2	5447-2	1056-1	1726-1	2551-1	3525-1
80°	1985-2	4676-2	9075-2	1486-1	2199-1	3043-1
90°	1702-2	3848-2	7479-2	1226-1	1818-1	2519-1
100°	1398-2	3013-2	5865-2	9630-2	1429-1	1983-1
110°	1093-2	2222-2	4332-2	7122-2	1058-1	1470-1
120°	8059-3	1521-2	2969-2	4887-2	7271-2	1011-1
130°	3424-3	9457-3	1846-2	3042-2	4531-2	6310-2
140°	1868-3	5127-3	1003-2	1655-2	2466-2	3437-2
150°	8164-4	2265-3	4436-3	7325-2	1093-2	1525-2
160°	2507-4	6961-4	1364-3	2253-3	3364-3	4697-3
170°	3268-5	9076-5	1779-4	2940-4	4392-4	6133-4

Çizelge 5.7 ϕ' açıları ve ρ/r_4 oranları.

ϕ'	ρ/r_4					
	0,15	0,17	0,19	0,21	0,25	0,29
0°	6173-1	7801-1	9592-2	1154-0	1587-0	2075-0
30°	6078-1	7694-1	9474-1	1141-0	1574-0	2064-0
40°	5900-1	7475-1	9213-1	1111-0	1535-0	2015-0
50°	5603-1	7107-1	8768-1	1058-0	1465-0	1927-0
60°	5182-1	6580-1	8128-1	9821-1	1362-0	1796-0
70°	4465-1	5906-1	7304-1	8835-1	1228-0	1622-0
80°	4015-1	5112-1	6330-1	7666-1	1068-0	1414-0
90°	3328-1	4242-1	5259-1	6377-1	8907-1	1182-0
100°	2623-1	3349-1	4157-1	5047-1	7066-1	9396-0
110°	1948-1	2489-1	3093-1	3760-1	5277-1	7033-1
120°	1341-1	1716-1	2135-1	2599-1	3655-1	4882-1
130°	8376-1	1073-1	1336-1	1628-1	2295-1	3071-1
140°	4566-2	5862-2	7298-2	8899-2	1258-1	1685-1
150°	2028-2	2602-2	3247-2	3963-2	5605-2	7526-2
160°	6250-3	8024-3	1002-2	1223-2	1732-2	2329-2
170°	8164-4	1049-3	1310-3	1600-3	2267-3	3049-3

Çizelge 5.8 ϕ' açıları ve ρ/r_4 oranları.

ϕ'	ρ/r_4					
	0,33	0,37	0,41	0,45	0,49	0,53
0°	2613-0	3199-0	3828-0	4498-0	5207-0	5952-0
30°	2606-0	-	-	-	-	-
40°	2549-0	-	-	-	-	-
50°	2441-0	3005-0	3615-0	4269-0	4965-0	5701-0
60°	2279-0	2810-0	3386-0	4005-0	4665-0	5365-0
70°	2063-0	2549-0	3077-0	3645-0	4253-0	4998-0
80°	1802-0	2230-0	2698-0	3202-0	3742-0	4317-0
90°	1509-0	1872-0	2268-0	2697-0	3158-0	3649-0
100°	1203-0	1495-0	1815-0	2162-0	2536-0	2936-0
110°	9021-1	1123-0	1367-0	1632-0	1918-0	2224-0
120°	6275-1	7831-1	9547-1	1142-0	1345-0	1562-0
130°	3955-1	4946-1	6041-1	7239-1	8548-0	9939-0
140°	2177-1	2723-1	3331-1	4006-1	4733-1	5518-1
150°	9725-2	1216-1	1495-1	1797-1	2127-1111	
160°	3012-2	3783-2	4641-2	5586-2	6617-2	-
170°	3947-3	4961-2	6091-3	7336-3	8696-3	-

Çizelge 5-9 ϕ' açıları ve ρ/r_4 oranları

ϕ'	ρ/r_4					
	0,57	0,61	0,65	0,69	0,73	0,77
0°	6731-0	7542-0	8383-0	9254-0	1015+1	1107+1
50°	6475-0	7286-0	8131-0	9010-0	9920-0	1086+1
60°	6101-0	6874-0	7681-0	8522-0	9390-0	1030+1
70°	5579-0	6294-0	7043-0	7824-0	8636-0	9477-0
80°	4924-0	5564-0	6235-0	6936-0	7666-0	8424-0
90°	4170-0	4719-0	5296-0	5900-0	6530-0	7186-0
100°	3361-0	3810-0	4283-0	4778-0	5297-0	5837-0
110°	2550-0	2896-0	3261-0	3645-0	4046-0	-
120°	1795-0	2042-0	2303-0	-	-	-

5.6 Türbin Emme Borusu

Türbin rotoru kanatlarının çıkışındaki $C_2^2/2g$ çıkış enerjisinin değeri n_s özgül devir sayısının değeri ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu yüzden özellikle Kaplan tipi türbin rotorlarının kanatlarının çıkışındaki $C_2^2/2g$ çıkış enerjisi, türbin rotoruna giren enerji miktarının %50'sine yaklaşabilir.

Ancak, deneysel araştırmalar ve ölçmeler ile türbin emme borusuna ve emme borusu direğine uygun bir formun verilmesi ile türbin rotoru kanatlarından çıkan enerjinin büyük bir kısmı tekrar geri kazanılabilir ve böylece türbinin toplam verimi yükseltilebilir.

Türbin rotoru kanatlarının çıkışında daima mevcut olan ve şiddeti türbin debisine çok bağlı olan çıkış girdabı (vorteksi) yüzünden rotor çıkışındaki C_2 gerçek su hızının yönü ve büyüklüğü ile bu C_2 hızının boylamsal bileşenlerinin yönleri ve büyüklükleri çok değişik olur.

F_3 = Emme borusu çıkış ağzı kesiti

C_3 = Emme borusu çıkış ağzındaki suyun gerçek hızı

Sadece dairesel kesitli ve düzgün konik olarak imal edilen emme borularının boyları $L= 5D_s$ veya $8(\sqrt{F_3} - \sqrt{F_2})$ olarak ve genişleme açısı ise $\varphi = 8^\circ - 10^\circ$ arasında seçildiğinde emme borusunun $\eta_s = \%70 - \%80$ 'e kadar yükselebilir.

Ancak, emme borusunun çıkış kesitindeki suyun en büyük hızı $C_3=1$ (m/sn) değerini geçmemesi gerektiğinden, emme borusunun boyu çok uzun olur. Bu durum çok büyük kazı işlemi gerektireceğinden, emme borusu ve tesis çok pahalı olur. Ayrıca, bu tip emme borularında kavitasyon olayı tehlikesi çok artar. Bu yüzden, dairesel kesitli düzgün konik emme boruları yerine Şekil 5.20'de prensip şeması görülen dirsekli emme boruları tercih edilirler. Dirsekli emme borularında iyi bir verim elde edilebilmesi için dairesel kesitten dikdörtgen kesite geçiş bölgesindeki dirsek kısmında çok iyi bir basınç dağılımının sağlanması ve emme borusunun dikdörtgen kesitli bölgelerinde ters akımların meydana gelmesinden sakınılması ve F_3 çıkış kesitindeki maksimum su hızının 1 (m/sn) civarında bulunması; $C_3= 1$ (m/sn) den büyük olmaması gerekmektedir.

Şekil 5.20'de prensip şeması görülen dirsekli emme borusunun, şekil üzerinde kaydedilen boyutlarda imal edilmesi halinde $\eta_s = \%85$ e kadar yükselmektedir.

Emme borularının dairesel kesitli düzgün konik olan $T_1=0,8 D_s$ yüksekliğindeki kısımları çelik sac ile kaplanırlar ve bu çelik kaplamalar beton kısmın içindeki betonarme demirlerine çok sağlam bir şekilde kaynakla tespit edildikten sonra dış çevrelerinden betonla kaplanırlar.

5.7 Pelton Tipi Hidrolik Türbinlerin Konstrüksiyonları

5.7.1 Pelton Tipi Türbin Rotorları

5.7.1.1 Ana ölçüleri

Pelton tipi türbin rotorlarının ana ölçüleri, Pelton düzesi memesinden fışkıran su demetinin d_0 çapına ve rotor kepçelerinin ortasından geçen D_1 çapına göre belirlenmektedir. Pelton tipi türbin rotorlarının özgül çevresel hızı $k_{u1} = 0,45$ ile 0,48 arasındadır. Bu duruma göre (5.3) numaralı eşitlikten yararlanılarak D_1 çapını aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplayabiliriz:

$$D_1 = \frac{84,6.k_{u1}}{n_1} = \frac{38}{n_1} \approx \frac{40}{n_1} \quad (5.41)$$

Bu eşitlikte n_1 birim devir sayısı değeri $n_1 = n / \sqrt{H_d}$ dir.

Pelton düzesi memesinden fışkıran su demetinin kesiti $f_0 = \pi.d_0^2 / 4$ (m^2) olduğundan ve iyi tertip edilmiş bir Pelton düzesinden fışkıran su hızının değeri $C_0 = 0,98.\sqrt{2g.H_d}$ (m/sn) olduğundan $Q_n = C_0.F_0$ enerjinin sürekliliği kuralı ile su demeti çapı için aşağıdaki eşitliği kullanabiliriz.

$$d_o = 0,543.\sqrt{Q_1} \quad (5.42)$$

Pelton tipi türbinlerde $U_1 \cong C_1 / 2$ ve $W_1 = C_1 - U_1$ olduğundan $W \cong U_1 = C_1 / 2$ olarak yazılabilir. Ayrıca $W_1 = W_2$ ve $U_1 = U_2$ dir.

Pelton tipi türbin rotoru kepçelerindeki β_2 kanat açısı $\beta_2 = 4^\circ - 10^\circ$ arasında değişmektedir.

5.7.2 Projelendirilmesi ve Konstrüksiyonları

Pelton tipi türbin rotorlarının projelendirilmesi için su demetinin d_0 çapından ve D_1 püskürtme dairesi çapından başka rotor kepçelerinin boyutlarına ve sayısına da gerek vardır.

Pelton tipi türbinlerin rotor kepçeleri elipsoid biçimli simetrik iki yarım parçadan meydana gelmektedir. Elipsoid biçimli simetrik parçadan meydana gelen Pelton rotoru kepçelerinden, içine püsküren su demetinin enerjisini tam olarak alması beklenir. Pelton düzesinden fışkıran su demetinin enerjisinin tam olarak alınabilmesi için rotor kepçelerinin sürekli bükümlü, iç yüzeyleri çok itinalı taşlanmış ve elipsoid biçimli iki yarı parçanın tam simetrik olması ve ayrıca, kepçeler arası t_1 aralıklarının suyun enerjisi boşa gitmeyecek şekilde uygun olarak seçilmesi gerekir.

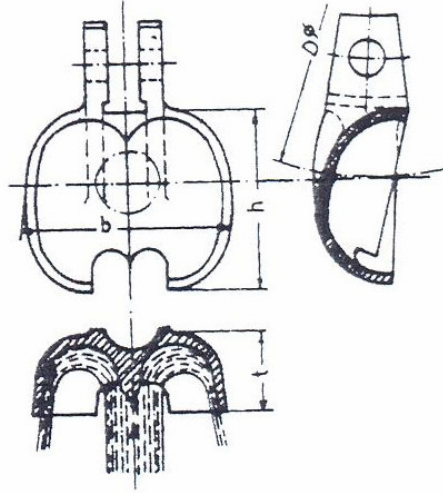
Pelton tipi türbin rotorlarının yüksek verim elde edilebilmesi için rotor kepçelerinin, Şekil 5.21'de görülen ana ölçüleri aşağıdaki gibi seçilmelidir.

$$h = (2,8 - 3,2).d_0 \quad (5.43)$$

$$b = (2,8 - 3,2).d_0 \quad (5.44)$$

$$t = 0,8.d_0 \quad (5.45)$$

Rotor kepçelerinde görülen β_s su akımı kesme açısı $\beta_s = 7^\circ - 15^\circ$ ve yan kenar açısı (kanat çıkış açısı) ise $\beta_2 = 4^\circ - 8^\circ$ arasında seçilmelidir.



Şekil 5-21 Pelton tipi türbin rotoru kepçelerinin ana ölçüleri.

Pelton tipi türbinin düşük yüklerde çalıştırılması esnasında türbin veriminin en yüksek olması isteniyorsa, rotor kepçeleri ana ölçüleri için yukarıda verilen değerlerin küçük olanları seçilmeli; buna karşın türbinin yüksek yüklerde çalıştırılması esnasında türbin veriminin en yüksek olması isteniyorsa yukarıda verilen değerlerin büyükleri seçilmelidir.

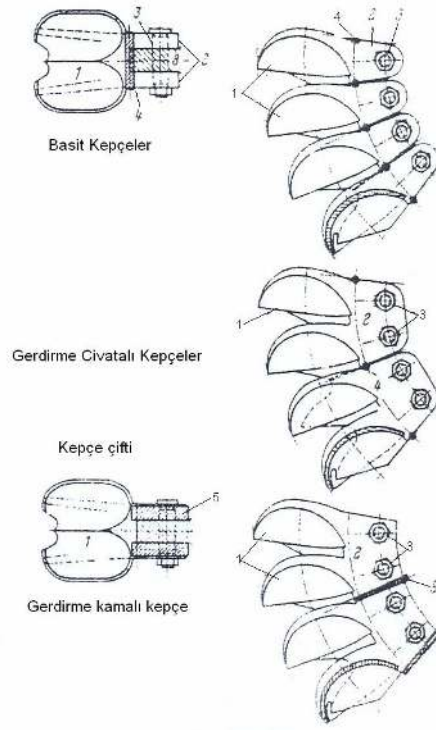
Şekil 5.22’de görüldüğü gibi rotor kepçeleri ayrı ayrı tek parçalı ve tek kepçeli olarak da imal edilebilirler. Tek kepçeli veya iki kepçeli olarak imal edilen bu parçalar Şekil 5.22’de görüldüğü gibi rotor diski üzerine özel cıvatalar ve pimler veya cıvatalar ve kamalar yardımı ile tespit edilirler. Bu tespit işinin çok sağlam ve emniyetli olması, ayrıca darbeleri zorlamalara karşı dayanıklı yapılması gerekir.

Pelton türbini düzesinden fışkıran su demetinin d_0 çapının D_1 püskürme çapına oranının yani d_0/D_1 oranının çok büyük olması halinde tek tek imal edilen kepçelerin rotor diskine sağlam ve kusursuz bir şekilde tespit edilmesi pek mümkün değildir. Bu yüzden d_0/D_1 oranının çok büyük olması halinde ikişer kepçe bir arada tek bir parça olarak imal edilen konstrüksüyon şeklinin seçilmesi daha uygun olur.

Fazla zorlaya maruz kalmayan küçük güçlü pelton tipi rotor diski ile birlikte tek parçalı olarak gri döküm malzemeden imal edilebilirler. Büyük zorlamalara maruz kalan büyük güçlü Pelton Pelton rotorlarının ise gerek kepçeleri ve gerekse göbekleri ayrı ayrı ve alaşımlı çelik döküm malzemelerden imal edilirler.

Türbin rotorunun dönmesi esnasında Pelton düzesinin memesinden püsküren su demetinin kepçeler tarafından parçalanmaması için kepçelerin uç kısımları Şekil 5.21 ve 5.22’de görüldüğü gibi oyulurlar. Kepçeler arası bölüm aralığı t_1 mesafesi, suyun enerjisi boşa

gitmeyecek ve sudan tam olarak yararlanılacak şekilde seçilir.



Şekil 5-22 Pelton tipi türbin rotoru kepçeleri ve rotor göbeğine tespit şekilleri

Pelton tipi türbin rotorlarındaki kepçe sayısı:

$$Z_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{t_1} \quad (5.46)$$

$$t_1 = (2/3 - 3/4) \cdot t_s ; b_s = 1,1 \cdot d_0 \text{ ve } e = (1,1 - 1,2) \cdot d_0 \quad (5.47)$$

Rotor kepçelerinin S kesme ağzı kenarı ile K yan kenarlarının yükseklikleri aynı düzlem üzerinde bulunacak şekil imal edilmeli ve ayrıca, tek düzeli Pelton tipi türbinlerde düzenin memesinden fışkıran kepçelere çarptıktan sonra parçalanarak takriben 180° geri dönen suyun diğer düzelerden fışkıran su demetlerine çarpmaması veya zarar vermemesi için iki düze arasındaki açı 50° daha küçük olmamalıdır.

Pelton tipi türbin rotorlarının kepçelerine iki kuvvet etki eder. Bunlardan bir tanesi C merkezkaç kuvveti, diğeri ise diğeri ise P_s püskürtme kuvvetidir. Büyük hidrolik düşüler için imal edilen büyük güçlü Pelton türbinlerinin kepçeleri ve su basıncı büyük olur. Bu yüzden C ve P_s kuvvetlerinin mertebeleri de çok yükselir. Bu duruma göre $2R_s$ çapındaki çevresel hız $U'_s = U_1$ kadardır ve her biri G ağırlığında olan her kepçeye etki eden merkez kuvvetinin

mertebesi aşağıdaki eşitlik yardımı ile bulunacak değer kadardır.

$$C = \frac{m.U_s'^2}{R_s} = \frac{2.G.U_1^2}{g.D_1} \quad (5.48)$$

Devir sayısı $n=0$ olduğu zaman C merkezkaç kuvvetinin etkisi yok olur ve devir sayısı n_d ambalman hız değerine çıktığı zaman ise en yüksek değere ulaşır. Nominal n_n işletme devir sayısındaki çevresel hız değeri $U_1 = 0,48.\sqrt{2g.H_d}$ (m/sn) olduğu için n_n devir sayısında merkezkaç kuvvetinin C_n değeri eşitlikteki kadardır;

$$C_n = 0,9.\frac{G.H_d}{D_1} \quad (5.49)$$

Ambalman devir sayısı $n_d=1,8.n_n$ alındığında ambalman hızındaki C_d merkezkaç kuvvetinin değeri aşağıdaki mertebeye ulaşır.

$$C_d \cong 3.\frac{G.H_d}{D_1} \quad (5.50)$$

Herhangi bir n ara devir sayısındaki merkezkaç kuvvetinin C değeri:

$$C = (n/n_n)^2.C_n \quad (5.51)$$

Suyun çevirme gücü ifadesinden yararlanılarak Pelton düzesi iğnesinin tam açıklığında yani $q=Q/Q_n=1$ tam debide düze mememsinden fışkıran suyun rotor kepçelerine etkileyen P_s püskürme kuvvetini:

$$P_s = \frac{\gamma.Q_n}{g}.(C_{1u} - C_{2u}) \quad (5.52)$$

Devir sayısı $n=0$ olduğu zaman P_s püskürme kuvvetinin değeri en büyük ve $n_n=n_d$ olduğu zaman (ambalman devir sayısında) ise sıfırdır. Türbin shaftı tam olarak frenlendiğinde ($n=0$ olduğunda) $C_{2u} = -C_{2u} \cong C_0$ olacağından meydana gelecek olan en büyük püskürtme kuvvetinin değeri:

$$P_{s\max} = 2.\frac{\gamma.Q_n}{g}.C_0 \quad (5.53)$$

Nominal n işletme devir sayısında su demetinin C_0 hızı u çevresel hızına tam dik olduğunda rotor kepçelerinin çıkışında suyun C gerçek hızının u çevresel hız yönündeki C_{2u} bileşeninin

değeri $C_{2u} = 0$ dır. Bu sebeptendir ki n_n nominal devir sayısında rotor kepçelerine etkiyen P_{Sn} püskürme kuvvetinin değeri:

$$P_{Sn} = \frac{\gamma \cdot Q_n}{g} \cdot C_0 \quad (5.54)$$

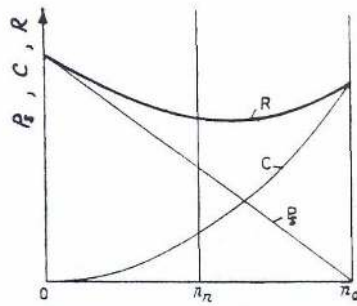
Pelton düzesinden fışkıran suyun C hızının kepçeye girişte çevresel hız yönündeki değeri $C_{1u} = C_0 = 0,98 \cdot \sqrt{2g \cdot H_d}$ (m/sn) ve nominal debi değeri $Q = (\pi \cdot d_0^2 / 4) \cdot C_0$ (m³/sn) olarak alınarak (5.53) ve (5.54) numaralı eşitliklerdeki P_{smax} ve P_{Sn} püskürme kuvvetlerini aşağıdaki ifadeler yardımı ile daha kolay hesaplayabiliriz;

$$P_{smax} \cong 3000 \cdot d_0^2 \cdot H_d \quad (5.55)$$

$$P_{Sn} \cong 1500 \cdot d_0^2 \cdot H_d \quad (5.56)$$

Bu eşitliklerdeki d_0 su demeti çapı ve H_d dizayn net hidrolik düşü olarak alınmalıdır.

Pelton türbini rotoru kepçelerine etkiyen merkezkaç kuvvetinin değeri C ve püskürme kuvvetinin değeri P_s olduğuna göre kepçelere etkiyen R bileşke kuvvetinin değeri; $R = \sqrt{C^2 + P_s^2}$ (kp) dır. Bu kuvvetlerden C merkezkaç kuvveti, kepçeleri devamlı olarak çekme zorlamasına ve kepçe bağlantı cıvataları ile pimlerini devamlı olarak kesme zorlamasına maruz bırakır. P_s püskürme kuvveti ise kepçeleri periyodik aralıklı olarak darbeli eğme zorlamasına ve kepçe bağlantı cıvataları ile pimlerini darbeli kesme zorlamasına maruz bırakır.



Şekil 5.23 Pelton tipi türbin rotoru kepçelerine etkiyen kuvvetler

Kepçelerin rotor diskine bağlanmasına yarayan kuyruk kısımlarına etkisi altında bırakan R bileşke kuvveti kuyruk kısmında etkisi altında bırakılan R bileşke kuvveti kuyruk kısmında çok büyük gerilme zorlamasını doğurur. C ve P_s kuvvetlerinin bileşkesi olan R kuvvetinin en

yüksek değerinin hangi devir sayısında meydana geldiği Şekil 5.29 da devir sayısının fonksiyonu olarak gösterilmiş bulunmaktadır.

Pelton tipi türbinlerin rotor kepçeleri bağlantıları, çekme, eğme, kesme gibi değişik darbeleri zorlamalara karşı çok sağlam ve emniyetli bir şekilde rotor diskine bağlanmalıdırlar.

Çizelge 5.10 Pelton türbinlerinde kepçe sayıları

n_s	Rotor çapı	$H_{\max}$ (m)	$\frac{C_2^2}{2g}$	$\frac{C_2}{\sqrt{H}}$	D_1 / d_0	η $d_0 > 55$ mm (%)	η_h $d_0 < 55$ mm (%)	η_h $d_0 > 55$ mm (%)	Rotor Kepçe Sayısı Z_1
4	Küçük özgül devir sayılı Pelton tipi Türbin rotorları	1800	0,0125 ile 0,05	0,5 ile 1,0	50	0,83	0,82	0,85	40
6		1300			38,3	0,84	0,835	0,875	37
8		1100			28,8	0,855	0,853	0,893	34
10		1000			23,3	0,865	0,863	0,903	30
12	Normal özgül devir sayılı Pelton tipi Türbin rotorları	850			1,6	0,875	0,870	0,910	28
14		750			17,1	0,882	0,875	0,915	26
18		650			13,1	0,883	0,877	0,917	22
22	Yüksek özgül devir sayılı Pelton tipi Türbin rotorları	500			10,4	0,875	0,880	0,910	20
26		450			8,5	0,865	0,870	0,90	17
32		400			6,4	0,84	0,855	0,885	15

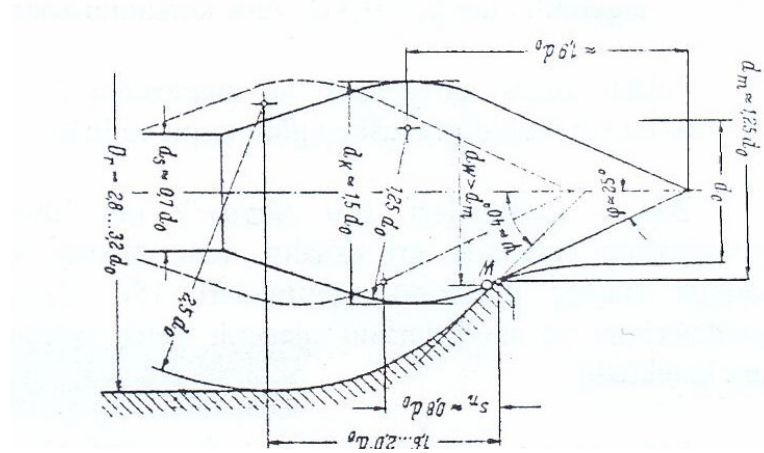
5.7.3 Pelton Düzesi ve İğnesi (Pelton Enjektörü)

Şekil 5.25 ve 5.26’da prensip şeması görülen Pelton düzesi ve iğnesinden, kusursuz bir kapama, her değişik açıklıkta pürüzsüz ve türbülanssız ve dairesel kesitli su demetinin fışkırmasına olanak sağlama ve istenilen her değişik debide çok az bir enerji kaybına sebep olacak şekilde su debisinin ayarlanmasına olanak vermesi gibi görevler beklenir. Bu yüzden Pelton düzeleri iğnelerinin türbülans meydana gelmeyecek şekilde çok iyi merkezlenmiş ve çok uygun olarak profillendirilmiş ve ayrıca düze gövdesi içindeki kaburgaların ortasında çok iyi yataklanmış olması gerekmektedir. Bunlara ek olarak Pelton düzelerinin su çıkış ağızları kavislerinin yarıçaplarının büyük olması ve Pelton düzesi memelerden fışkıran su demetinin

hızının memeden çıkarken çok yükselebilmesi, ayrıca Pelton düzesi iğnesinin çok hassas bir ayarlama tertibatına sahip olması ve iğnelerin ayarlanması için gerekli olan kuvvetin küçük olması gerekmektedir.

Pelton tipi hidrolik türbinlerde kullanılan pelton düzeleri ve iğneleri için Şekil 5.25’de gösterilen ana ölçüler imalatı esas alınır. Şekilde gösterilen küçük değerler $H_e < 400$ (m) net faydalı hidrolik düşüler için, büyük değerler ise $H_e > 400$ (m) net faydalı hidrolik düşüler için geçerlidir.

Doğru olarak ölçülen Pelton düzelerinde su debisinin, iğnesinin S kursu ile takriben doğrusal orantılı olarak değiştiği görülür. Bu durum Şekil 5.26’da grafiksel olarak gösterilmiş bulunmaktadır.



Şekil 5.24 Pelton düzesi ve iğnesinin ana ölçüleri

Şekil 5.25’de görüldüğü gibi Pelton düzesi ve iğnesinin projelendirilmesi için iğne kursu $S_n \approx 0.8 d_0$ olarak alınmıştır. Ancak, bu kursun, Şekil 5.26 daki grafiklerle benzer su debisi grafiklerinin çizilmesi ile kontrol edilmesi ve gerekiyorsa düzeltme yapılması gerekmektedir.

Düze memesinin boğaz halkası, düze iğnesinin profilendirilmiş baş kısmı ve şaftı, korozyon, erozyon ve kavitasyon tahribatlarına karşı dayanıklı olan Çizelge 5.11’de kaydedilmiş yüksek Cr-Ni alaşımlı çelik döküm malzemeden imal edildikten sonra üst yüzeylerinin sertleştirilerek taşlanması gerekmektedir.

Çizelge 5.11 Düze memesi malzemeleri

Malzeme cinslerinin özellikleri			
Karbon %	0,04-0,07	0,05-0,07	0,05-0,07
Krom %	12-13	12-13	16-17
Nikel %	3,7-4,3	3,8-4,2	3,8-4,2
Molibden %	0,3-0,4	0,4-0,6	0,8-1,2
Çekme mukavemeti	90-100 kp/mm ²	104kp/mm ²	110kp/mm ²
Akma sınırı	70-80 kp/mm ²	97kp/mm ²	75kp/mm ²
Uzama %	16-20	17	10-13
Çentik darbe muk.	11-16 kp/cm ²	9-10 kp/cm ²	3-5 kp/cm ²
Sertlik derecesi	280-300 Brinell	300-310 Brinell	350 Brinell

5.7.4 Pelton Düzesi Su Demeti Saptırıcı

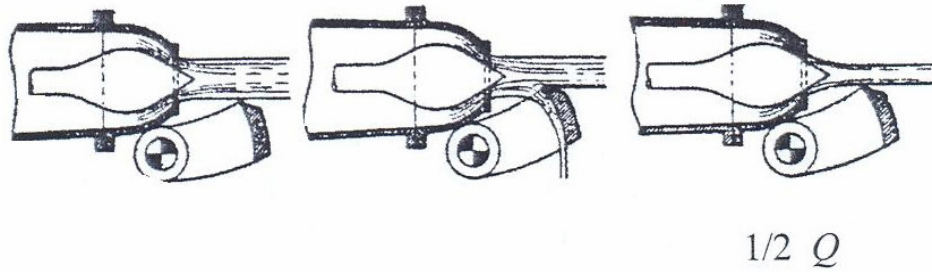
Pelton düzesi su demeti saptırıcısının görevi, düze iğnesinin kapanması esnasında düze memesinden fışkıran suyun rotor kepçelerine çarpmasını ve rotorun devir sayısının belirli bir değerin üzerine çıkmasını önlemektir.

Bu duruma göre Pelton düzesi su demeti saptırıcısının kapanma hızının, düze iğnesinin kapanma hızından yüksek olması gerekmektedir.

5.7.5 Pelton Düzesi İğnesinin ve Su Demeti Saptırıcısının Ayarları

Pelton tipi hidrolik türbinler çok yüksek hidrolik düşüler için kullanılmaktadır. Bu yüzden bu tip türbinlerde su ileten cebri boruların boyları çok uzun olmaktadır. Ani yük değişimleri meydana gelmesi esnasında cebri borularda meydana gelecek olan ani geçici basınç dalgalanmaları cebri borular için tehlike oluşturacak mertebelere ulaşır.

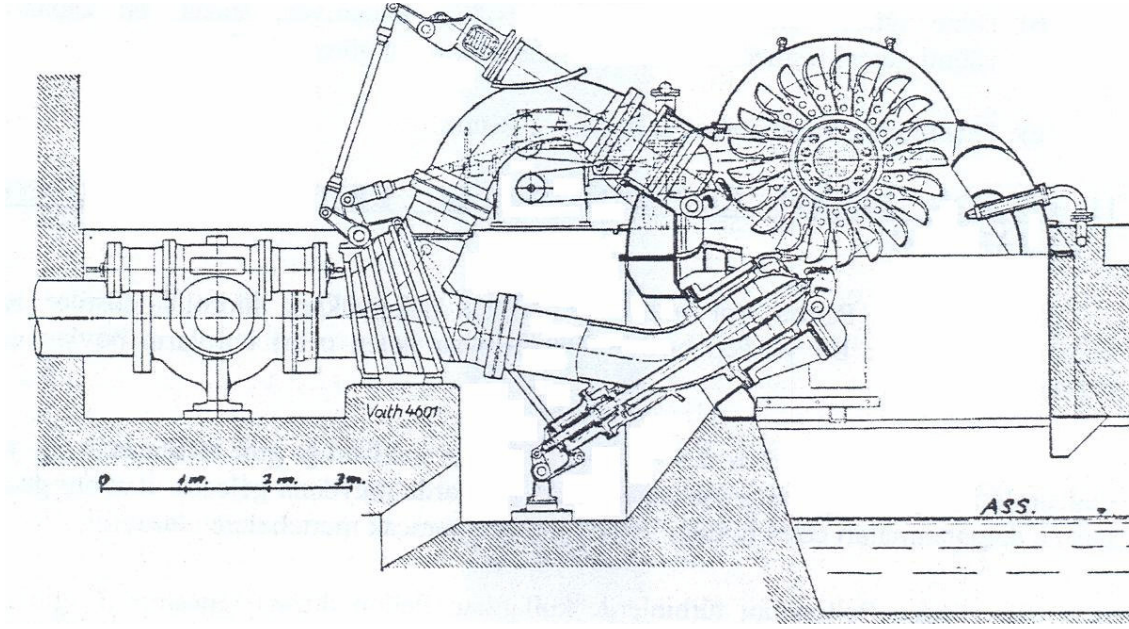
Bu yüzden Pelton tipi türbinlerde kullanılan Pelton düzesi iğnesinin T_s gibi bir kapama süresine uygun olarak yavaş kapanması gerekmektedir. Ancak, Pelton düzesi iğnesinin T_s gibi bir kapama süresine uygun olarak yavaş kapanması esnasında türbin devir sayısının belirli bir değerde fazla yükselmemesi için düze memesinden fışkıran su demetinin rotor kepçelerine çarpmasının önlenmesi gerekmektedir. Bu işin yapılabilmesi, yani düze iğnesinin yavaş kapanması esnasında düze memesinden fışkıran suyun yolunun saptırılması ve böylece devir sayısının belirli bir değerinin üzerine çıkmamasın önlenmesi için kullanılan ve ‘su demeti saptırıcısı’ olarak isimlendirilen organlar kullanılırlar. Düze memesi dışında yer alan ve Şekil 5.32 da basit prensip şeması görülen su demeti saptırıcısının kapanma süresi düze iğnesinin kapanma süresinden çok kısa olmalıdır. Cetvel 5.13’de Kovada II Hidroelektrik Santraline ait su demeti saptırıcısına ve düze iğnesine ait kapanma süreleri verilmiştir.



Şekil 5.26 Pelton düzesi su demeti saptırıcısı

Şekil 5.27 ve 5.28 de basit prensip şeması görülen su demeti saptırıcısı, türbin yükünün her azalması esnasında Pelton düzesi iğnesinden daha hızlı hareket ederek su demetini saptırarak iğneden önce düze memesinden püsküren suyu azaltacak ve türbin yükünün her çoğalması esnasında ise yine düze iğnesinden daha hızlı hareket ederek düze memesinden püsküren su demetine engel teşkil etmeyecek şekilde geri çekilecektir.

Bu sayede ani yük değişimleri esnasında hem türbin devir sayısında meydana gelebilecek aşırı değişimlerin ve hem de cebri boruda meydana gelebilecek olan ani basınç dalgalanmalarının önüne geçmek ve cebri borunun yeter derecede güvenilir bir et kalınlığı ile imal edilerek tesis masraflarını azaltmak mümkün olabilecektir.



Şekil 5.27 Pelton düzeleri ile su demeti saptırıcılarının genel görünümü (BAŞEŞME, Hidayet. 2003)

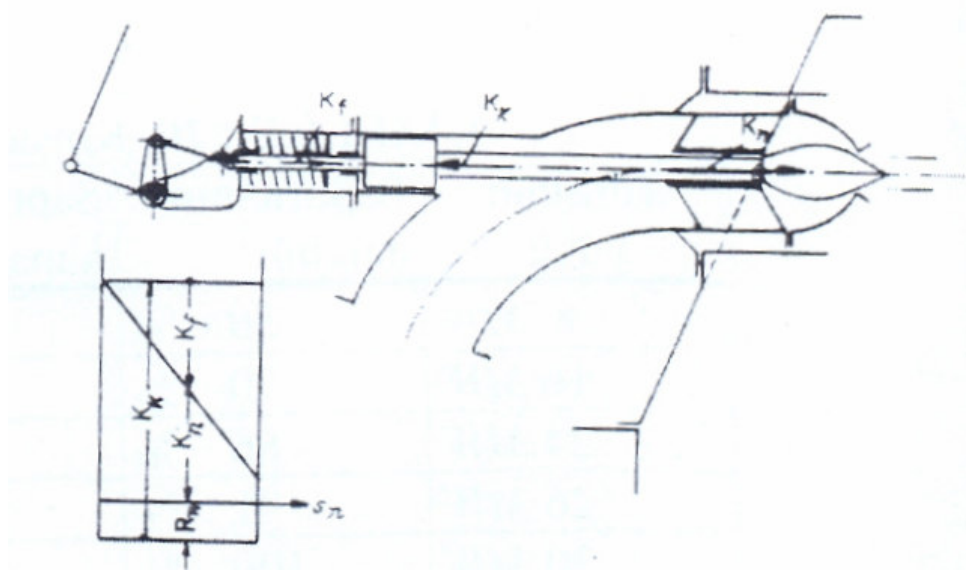
Çizelge 5.12 Kovada II HES pelton türbinlerine ait değerler

Türbinin yükü	Saptırıcının açıklığı	Saptırıcının kapanma süresi	Düze iğnesinin açıklığı	Düze iğnesinin kapanma süresi
8 MW	50 %	1,5 sn	17 %	9 sn
16 MW	70 %	1,8 sn	39 %	23 sn
24 MW	86 %	2,0 sn	71 %	43 sn
26 MW	91 %	2,2 sn	78 %	49 sn
30 MW	100 %	2,5 sn	100 %	57 sn

Pelton tipi türbinlere ait Pelton düzesi iğnesinin Şekil 5.29’da görülen K_n kapanma kuvveti düze iğnesinin tam kapalı olması halinde en yüksek K_{nmax} değerine ulaşır ve iğnenin S hareket kursu ile takriben doğru orantılı olarak değişerek S_n tam kurs boyunda en küçük K_{nmin} değerine düşer.

Pelton düzesi iğne başının en uygun profilde yapılması ile K_n kuvvetinin değerini düşürmek

mümkün olabilmektedir.



Şekil 5-28 Pelton düzesi iğnesi kuvvet dengelemesi prensip şeması

Düze memesi boğaz halkasının çapı ' d_m ' , düze iğnesi şaftının çapı ' d_s ' ve kapalı olan düzedeki suyun statik basıncı $P = H_c/10$ (kp/cm²) olduğuna göre düze iğnesini kapatmaya çalışan en büyük K_{nmax} kuvvetinin değeri:

$$K_{nmax} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_m^2 - d_s^2) \cdot P \quad (5.57)$$

Düze iğnesinin ayarlanması için gerekli olan R_n kuvvetinin sabit ve mümkün olduğu kadar küçük elde edilebilmesi için, K_f kuvveti düze iğnesinin S_n kursu ile doğrusal ters orantılı olarak değişen bir yay, K_k kuvveti sabit ve düze içindeki su basıncı ile çalışan bir servomotor kullanılır. Bu servomotorun çapı D_k , düze iğnesi şaftını çapı d_s olduğuna göre düze iğnesine devamlı olarak açık tutmak isteyen K_k kuvvetinin değeri:

$$K_k = \frac{\pi}{4} \cdot (D_k^2 - d_s^2) \cdot P \quad (5.58)$$

Düze iğnesinin ayarlama işinin mertebesi ise aşağıdaki gibidir:

$$A_n = R_n \cdot S_n \quad (5.59)$$

Pelton tipi bir türbinde düze memesinden püsküren su demetinin çapı d_0 , faydalı net hidrolik düşü H_e ve su demetini saptırıcı sayısı Z_a olduğuna göre, bir saptırıcı ayarlamak için gerekli

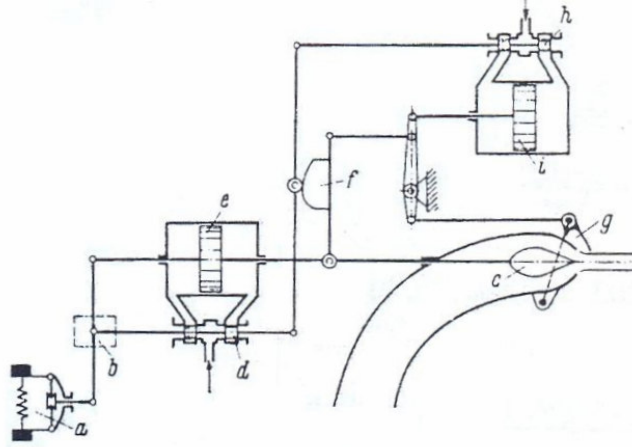
olan işin değeri deneysel tecrübelerle göre $\approx d_0^3 \cdot H_d / 2600$ (kp.m) ve Z_a sayıdaki saptırıcıyı ayarlamak için gerekli iş :

$$A_{ab} = Z_a \cdot \frac{d_0^3 \cdot H_e}{2600} \quad (5.60)$$

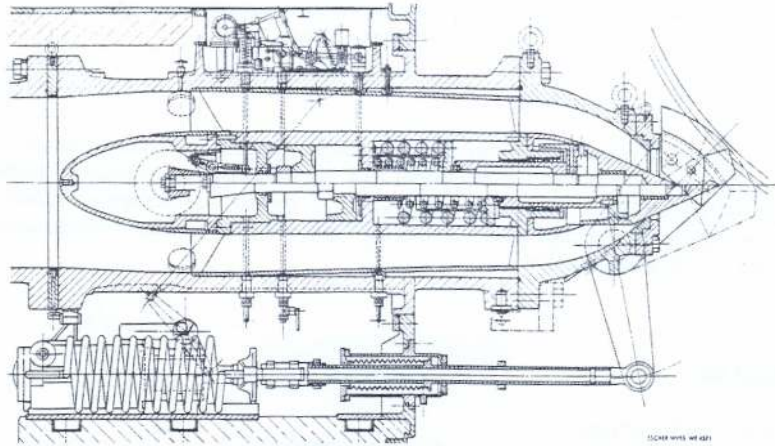
Pelton düzesi iğnesi ile su demeti saptırıcısını ayarlamak için gerekli olan toplam iş miktarı:

$$A_r = A_n + A_{ab} \quad (5.61)$$

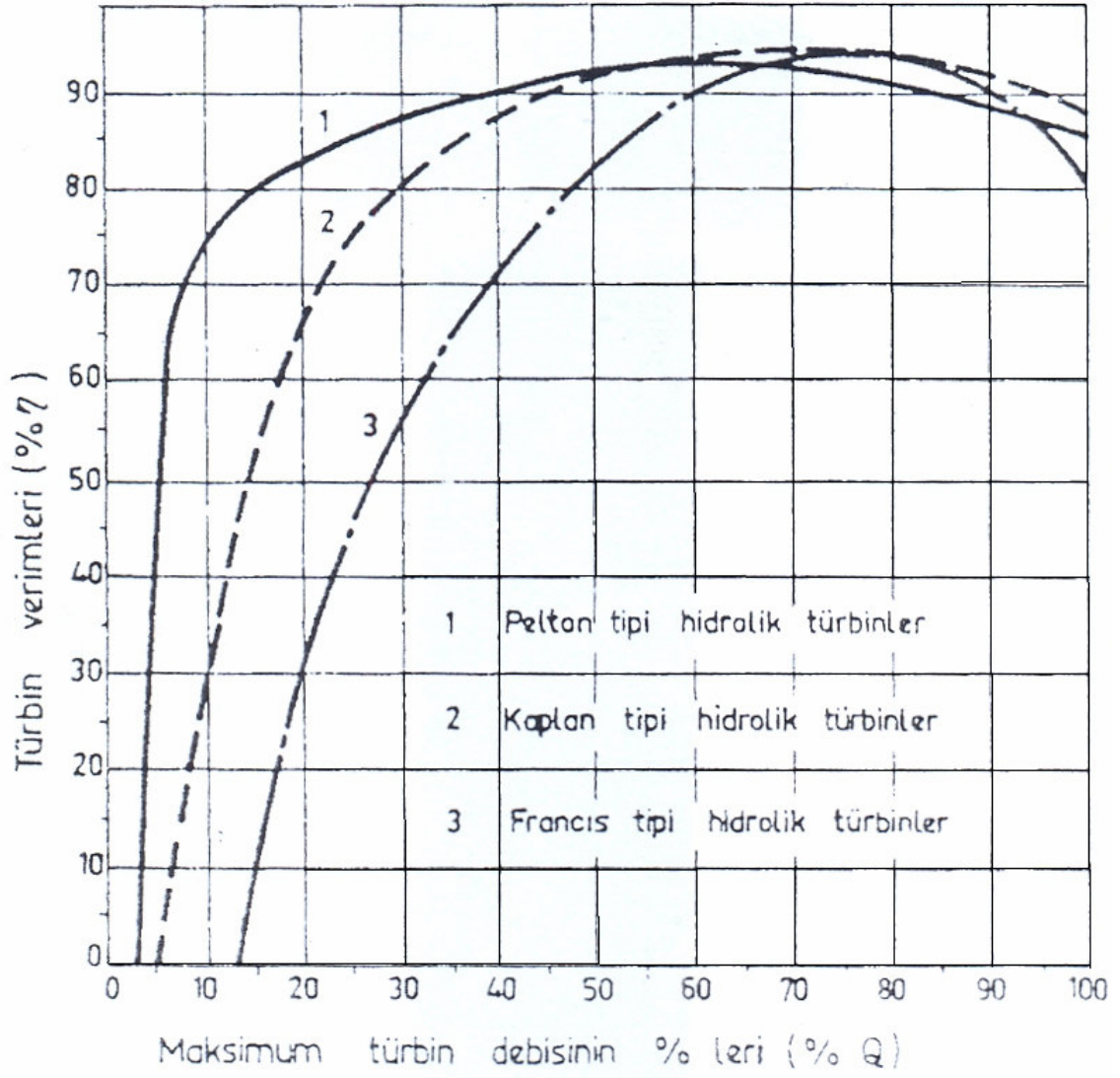
Pelton türbinlerinde kullanılan Pelton düzesi iğnesinin ayarlanması ile su demeti saptırıcısının ayarlanması çift regülasyonlu hız regülatörü tarafından gerçekleştirilmektedir. Düzelerin iğneleri ile su demeti saptırıcılarının birbirleriyle uyum içinde ayarlanması ile ilgili basit prensip şeması Şekil 5.30 da gösterilmiştir.



Şekil 5-29 Pelton tipi türbinin düze iğnesini ve su demeti saptırıcısının birlikte regülasyonu



Şekil 5-30 İçten ayarlı, hidrodinamik profilli bir pelton düzesi ve iğnesi (BAŞEŞME, Hidayet.



Şekil 5-31 Türbin verimleri karşılaştırması (EİE)

6. ÖRNEK TÜRBİN SEÇİMİ

6.1 Proje Bölgesinin Tanıtılması

İçel ili Tarsus ilçesi sınırları içinde Berdan nehri üzerinde bulunan Berdan HES, YİD modeli çerçevesinde 1996 yılından buyana Altek Alarko Elektrik Santralleri Tesis İşletme ve Ticaret A.Ş tarafından işletilmektedir.

Berdan HES 5.2 MW gücünde iki adet Düşey Eksenli Francis türbininden oluşmaktadır ve toplam kurulu gücü 10.4 MW'dır.

Çizelge 6-1 Berdan HES Karakteristik tablosu (EİE)

İli	İçel
İlçesi	Tarsus
Nehir İsmi	Berdan Nehri
Baraj Tipi	Toprak Dolgu
Ünite Kapasitesi	5.28 MW
Ünite Sayısı	2
Kurulu Güç	10.56 MW
Yıllık Toplam Enerji Üretimi	47.50 GWh
Türbin Tipi	Düşey Eksenli Francis
Cebri Boru Sayısı	2
Cebri Boru Çapı	3.45 m
Net Düşü	24 m
Temelden Yükseklik	64.6 m. (talvegden yük: 41.60m .)
Kret Kotu	71.60 m.
Kret Uzunluğu	525 m.
Baraj Göl Alanı	6.7 milyon m ²
Baraj Göl Hacmi	Kot : 56,00 için 87,50 milyon m ³ Kot : 68,95 için 192,00 milyon m ³
İşletmeci	ALTEK ALARKO ELK. SANT.TESİS. İŞL.VE TİC. A.Ş.
Bakanlık Denetimi	EİE
Üretime Başlama Yılı	ARALIK 1996
Toplam Yatırım Bedeli	9.195.000 \$
Ort. Enerji Satış Fiyatı	4.99 cent/kWh

6.2 Santral Karakteristikleri

Dizayn net düşüsü:	24,00
Normal minimum net düşüsü:	15,60
Extrem minimum net düşüsü:	15,00
Toplam proje debisi:	48 m ³ /s

6.3 Türbin Gücünün Tespiti

Proje 2 ünite olarak tasarlanmıştır. Ünite debileri 24 m³/s ve türbin verimi $\eta_t = 0,92$ alınmıştır. Dizayn net düşüsü ise $H_d = 24$ m olarak hesaplanmıştır. Kuyruk suyu kotu çift ünite çalışırken (2x24 m³/s) 29,5 olarak hesaplanmıştır. (ALARKO)

$$N = 9,81 \cdot Q \cdot H_d \cdot \eta_t$$

$$N = 9.81 \cdot 24 \cdot 24 \cdot 0,92 = 5200 \text{ kW}$$

Tek bir ünitenin gücü 5200 kW olarak hesaplanmış ve toplam kurulu güç 10400 kW olarak hesaplanmıştır.

6.4 Türbin Tipinin Seçimi

Türbin normal olarak normal maksimum 26,40 m ile normal minimum 15,60 m net düşüler arasında çalışacaktır. Taşkın anında ise 28,60 m net düşüde çalışabilecektir. Barajda su kotu 44,00 m'ye düştüğünde tek ünite 15,00 m net düşüde kontrollü olarak çalışabilecektir. (Alarko)

Türbin tipinin seçiminde, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 ye bakıldığında verilen karakteristikler için Kaplan veya Francis türbini seçilmesi mümkün görülmektedir.

6.4.1 Francis Tipi Türbin Seçimi

(4.7) numaralı eşitlik yardımıyla türbin sepesifik hızı n_s hesaplanmıştır.

$$n_s = \frac{3470}{(H_d)^{0,65}} = 435$$

Genellikle Francis türbinleri 350 n_s değeriyle sınırlıdır.

$H_d = 24$ m ve $Q = 24$ m³/s değerleri için Şekil 4.24'den okunan türbin devir sayısı $n = 250$ d/d

dır. Aşağıdaki eşitlikte Şekil 4.24'den okunan türbin devir sayısı yerine konulursa;

$$n_s = \frac{N^{0,5}}{H^{1,25}} \cdot n \quad (6.1)$$

$n_s = 340$ olarak hesaplanır ve Francis bölgesi sınırları içindedir.

6.4.1.1 Türbin Rotoru Ana Boyutları Tespiti

Türbin rotoru ana boyutları Siervo ve Leva'ya göre hesaplanmıştır.

$$k_u = 0,31 + \frac{2,5 \cdot n_s}{1000} = 0,31 + \frac{2,5 \cdot 340}{1000} = 1,16$$

$$D_3 = \frac{84,5 \cdot k_u \cdot (H_d)^{0,5}}{n} = \frac{84,5 \cdot k_u \cdot (24)^{0,5}}{250} = 1,92$$

$D_3 = 1,9$ m alındı.

Türbin rotoru orta giriş çapı :

$$D_1 = \left(0,4 + \frac{94,5}{n_s} \right) \cdot D_3 = \left(0,4 + \frac{94,5}{340} \right) \cdot 1,9 = 1,288 \text{ m}$$

Türbin rotoru alt giriş çapı :

$$D_2 = \frac{D_3}{0,96 + 0,00038 \cdot n_s} = \frac{1,9}{0,96 + 0,00038 \cdot 340} = 1,744 \text{ m}$$

$$H_1 = (0,094 + 0,00025 \cdot n_s) \cdot D_3 = (0,094 + 0,00025 \cdot 340) \cdot 1,90 = 1,744 \text{ m}$$

$$H_2 = \frac{D_3}{3,16 - 0,0013 \cdot n_s} = \frac{1,90}{3,16 - 0,0013 \cdot 340} = 0,70 \text{ m}$$

6.4.1.2 Türbin Salyangozu Ana Boyutları

Türbin salyangozu ana boyutları Siervo ve Leva'ya göre hesaplanmıştır.

$$V_1 = \frac{84,4}{(n_s)^{0,44}} = \frac{84,4}{340^{0,44}} = 6,5 \text{ m/s}$$

$$A = \left(1,2 - \frac{19,56}{n_s} \right) \cdot D_3 = \left(1,2 - \frac{19,56}{340} \right) \cdot 1,90 = 2,17 \text{ m}$$

$$B = \left(1,1 - \frac{54,8}{n_s}\right).D_3 = \left(1,1 - \frac{54,6}{340}\right).340 = 2,39 \text{ m}$$

$$C = \left(1,32 + \frac{49,25}{n_s}\right).D_3 = \left(1,32 + \frac{49,25}{340}\right).1,90 = 2,78 \text{ m}$$

$$D = \left(1,50 + \frac{48,8}{n_s}\right).D_3 = \left(1,5 + \frac{48,8}{340}\right).1,90 = 3,12 \text{ m}$$

$$E = \left(0,98 + \frac{63,6}{n_s}\right).D_3 = \left(0,98 + \frac{63,6}{340}\right).1,90 = 2,21 \text{ m}$$

$$F = \left(1,0 + \frac{131,4}{n_s}\right).D_3 = \left(1,0 + \frac{131,4}{340}\right).1,90 = 2,63 \text{ m}$$

$$G = \left(0,89 + \frac{96,5}{n_s}\right).D_3 = \left(0,89 + \frac{96,5}{340}\right).1,90 = 2,23 \text{ m}$$

$$H = \left(0,79 + \frac{81,75}{n_s}\right).D_3 = \left(0,79 + \frac{81,75}{340}\right).1,90 = 1,95 \text{ m}$$

$$I = (0,1 + 0,00065.n_s).D_3 = (0,1 + 0,00065.340).1,90 = 0,61 \text{ m}$$

$$L = (0,88 + 0,00049.n_s).D_3 = (0,88 + 0,00049.340).1,90 = 1,98 \text{ m}$$

$$M = (0,60 + 0,000015.n_s).D_3 = (0,60 + 0,000015.340).1,90 = 1,14 \text{ m}$$

6.4.1.3 Tübin Emme Borusu Ana Boyutları Tespiti

Türbin emme borusu ana boyutları Siervo ve Leva'ya göre hesaplanmıştır

Emme borusu su giriş hızı:

$$V_2 = 8,74 + \frac{248}{n_s} = 8,74 + \frac{248}{340} = 9,47 \text{ m/s}$$

$$N = \left(1,54 + \frac{203,5}{n_s}\right).D_3 = \left(1,54 + \frac{203,5}{340}\right).1,90 = 4,06 \text{ m}$$

$$O = \left(0,83 + \frac{140,7}{n_s}\right).D_3 = \left(0,83 + \frac{140,7}{340}\right).1,90 = 2,36 \text{ m}$$

$$P = (1,37 - 0,00056.n_s).D_3 = (1,37 - 0,00056.340).1,90 = 2,24 \text{ m}$$

$$Q = \left(0,58 + \frac{22,6}{n_s}\right).D_3 = \left(0,58 + \frac{22,6}{340}\right).1,90 = 1,22 \text{ m}$$

$$R = \left(1,6 - \frac{0,0013}{n_s}\right).D_3 = \left(1,6 - \frac{0,0013}{340}\right).1,90 = 3,03 \text{ m}$$

$$S = \left(\frac{n_s}{0,25.n_s - 9,28}\right).D_3 = \left(\frac{340}{0,25.340 - 9,28}\right) = 8,53 \text{ m}$$

$$T = \left(1,50 + \frac{0,00019}{n_s}\right).D_3 = \left(1,50 + \frac{0,00019}{340}\right) = 2,97 \text{ m}$$

$$U = (0,51 - 0,0007.n_s).D_3 = (0,51 - 0,0007.340).1,90 = 0,516 \text{ m}$$

$$V = \left(1,10 + \frac{53,7}{n_s}\right).D_3 = \left(1,10 + \frac{53,7}{340}\right).1,90 = 2,39 \text{ m}$$

$$Z = \left(2,63 + \frac{33,8}{n_s}\right).D_3 = \left(2,63 + \frac{33,8}{340}\right).1,90 = 5,18 \text{ m}$$

6.4.1.4 Türbin Eksen Kotunun Tespiti

Atmosferik basınç H_a ve suyun buharlaşma basıncı H_v , Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 yardımıyla tespit edilir.

$$H_a = 10,29$$

$$H_v = 0,32$$

σ katsayısı 4.29 nolu eşitlik yardımıyla Siervo ve Leva'ya göre tespit edilir.

$$\sigma = 0,756 \cdot \frac{(n_s)^{1,41}}{10^4} = 0,756 \cdot \frac{(340)^{1,41}}{10^4} = 0,28$$

$$H_2 = 0,70 \text{ m}$$

$$H_s = H_a - H_v - \sigma.H_d = 10,29 - 0,32 - 0,37.24 = 1,09$$

Türbin eksen kotu= Kuyruk suyu seviyesi + H_s + H_2

Türbin eksen kotu= 29,50+1,09+0,70=31,29 m

Kuyruk suyundaki dalgalanmalar dikkate alınarak türbin eksen kotu 30,00 m seçilmiştir.
(Alarko)

6.4.2 Kaplan Tipi Türbin Seçimi

(4.11) numaralı eşitlik yardımıyla türbin spesifik hızı n_s hesaplanır.

$$n_s = \frac{2417}{(H_d)^{0,489}} = \frac{2417}{(24)^{0,489}} = 511$$

Kaplan tipi türbinler 300 ile 750 sınırları arasındadır.

$$n = n_s \cdot \frac{(H_d)^{1,25}}{(N)^{0,5}} = 511 \cdot \frac{(24)^{1,25}}{(5200)^{0,5}} = 376$$

Türbin devir sayısı $n = 375$ d/d olarak seçilmiştir.

6.4.2.1 Türbin Rotoru Ana Boyutları Tespiti

Türbin rotoru ana boyutları Siervo ve Leva'ya göre hesaplanmıştır.

$$k_u = 0,79 + \frac{1,61 \cdot n_s}{1000} = 0,79 + \frac{1,61 \cdot 511}{1000} = 1,61$$

$$D_M = \frac{84,5 \cdot k_u \cdot (H_d)^{0,5}}{n} = 1,76 \text{ m}$$

Türbin rotoru göbeği çapı :

$$D_m = \left(0,25 + \frac{94,64}{n_s} \right) \cdot D_M = \left(0,25 + \frac{94,65}{511} \right) \cdot 1,76 = 0,76$$

$$H_m = \left(\frac{6,94}{n_s^{0,403}} \right) \cdot D_M = \left(\frac{6,94}{511^{0,403}} \right) \cdot 1,76 = 0,715$$

$$H_1 = \left(0,38 + \frac{5,17 \cdot n_s}{10^5} \right) \cdot D_M = \left(0,38 + \frac{5,17 \cdot 511}{10^5} \right) \cdot 1,76 = 0,64 \text{ m}$$

6.4.2.2 Türbin Salyangozu Ana Boyutları

Türbin salyangozu ana boyutları Siervo ve Leva'ya göre hesaplanmıştır.

$$V_1 = 3,17 + \frac{729,21}{n_s} = 3,17 + \frac{729,21}{511} = 4,59$$

$$A_1 = (0,40.(n_s)^{0,20})D_M = (0,40.(511)^{0,20})1,76 = 2,45$$

$$B_1 = \left(1,26 + \frac{3,79.n_s}{10^4}\right).D_M = \left(1,26 + \frac{3,79.511}{10^4}\right)1,76 = 2,55$$

$$C_1 = \left(1,46 + \frac{3,24.n_s}{10^4}\right).D_M = \left(1,46 + \frac{3,24.511}{10^4}\right)1,76 = 2,86$$

$$D_1 = \left(1,59 + \frac{5,74.n_s}{10^4}\right).D_M = \left(1,59 + \frac{5,74.511}{10^4}\right)1,76 = 3,01$$

$$E_1 = \left(1,21 + \frac{2,71.n_s}{10^4}\right).D_M = \left(1,21 + \frac{2,71.511}{10^4}\right)1,76 = 2,37$$

$$F_1 = \left(1,45 + \frac{72,17}{n_s}\right).D_M = \left(1,45 + \frac{72,17}{511}\right)1,76 = 2,8$$

$$G_1 = \left(1,25 + \frac{4,63}{n_s}\right).D_M = \left(1,25 + \frac{4,63}{511}\right)1,76 = 2,21$$

$$H_1 = \left(1,13 + \frac{31,86}{n_s}\right).D_M = \left(1,13 + \frac{31,86}{511}\right)1,76 = 2,1$$

$$I_1 = \left(0,45 - \frac{31,80}{n_s}\right).D_M = \left(0,45 - \frac{31,80}{511}\right)1,76 = 0,68$$

$$L_1 = \left(0,74 + \frac{8,7.n_s}{10^4}\right).D_M = \left(0,74 + \frac{8,7.511}{10^4}\right)1,76 = 2,08$$

$$M_1 = \frac{D_M}{2,06 - \frac{1,2.n_s}{10^5}} = \frac{1,76}{2,06 - \frac{1,2.511}{10^5}} = 0,85$$

6.4.2.3 Tübin Emme Borusu Ana Boyutları Tespiti

Türbin salyangozu ana boyutları Siervo ve Leva'ya göre hesaplanmıştır.

$$V_2 = 8,42 + 250,25/n_s = 8,42 + 250,25/511 = 8,9 \text{ m/s}$$

$$N = \left(2,00 - \frac{2,14.n_s}{10^6} \right).D_M = \left(2,00 - \frac{2,14.511}{10^6} \right).1,76 = 3,51 \text{ m}$$

$$O = \left(1,40 - \frac{1,65.n_s}{10^5} \right).D_M = \left(1,40 - \frac{1,65.511}{10^5} \right).1,76 = 2,45 \text{ m}$$

$$P = \left(1,26 - \frac{16,35}{n_s} \right).D_M = \left(1,26 - \frac{16,35}{511} \right).1,76 = 2,16 \text{ m}$$

$$Q = \left(0,66 - \frac{18,40}{n_s} \right).D_M = \left(0,66 - \frac{18,40}{511} \right).1,76 = 1,09 \text{ m}$$

$$R = \left(1,25 - \frac{7,98.n_s}{10^5} \right).D_M = \left(1,25 - \frac{7,98.511}{10^5} \right).1,76 = 1,48 \text{ m}$$

$$S = \left(4,26 + \frac{201,5}{n_s} \right).D_M = \left(4,26 + \frac{201,5}{511} \right).1,76 = 8,19 \text{ m}$$

$$T = \left(1,20 + \frac{5,12.n_s}{10^4} \right).D_M = \left(1,20 + \frac{5,12.511}{10^4} \right).1,76 = 2,57 \text{ m}$$

$$Z = \left(2,58 + \frac{102,66}{n_s} \right).D_M = \left(2,58 + \frac{102,66}{511} \right).1,76 = 4,89 \text{ m}$$

6.4.2.4 Türbin Eksen Kotunun Tespiti

Atmosferik basınç H_a ve suyun buharlaşma basıncı H_v Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 yardımıyla tespit edilir.

$$H_a = 10,29$$

$$H_v = 0,32$$

σ katsayısı 4.29 nolu eşitlik yardımıyla Siervo ve Leva'ya göre tespit edilir.

$$\sigma = 0,756 \cdot \frac{(n_s)^{1,41}}{10^4} = 0,756 \cdot \frac{(511)^{1,41}}{10^4} = 0,50$$

$$H_1 = 0,64 \text{ m}$$

$$H_s = H_a - H_v - \sigma.H_d = 10,29 - 0,32 - 0,50.24 = -2,03$$

Türbin eksen kotu= Kuyruk suyu seviyesi + H_s + H_2

Türbin eksen kotu= 29,50-2,03+0,64=28.11 m

Türbin eksen kotu 28.00 m olarak alınmıştır.

6.5 Optimum Türbinin Seçimi

Barajda normal üretim 49,00 m - 56,00 m - 58,00 m kotları arasında yapılacağından, düşü değişimi çok farklı olmayacaktır. Bu nedenle Francis türbini daha komplike ve arıza ihtimali daha yüksek olan Kaplan türbinine tercih edilmiştir. Kaplan tipi türbin seçilmesi halinde eksen kotu ve hafriyat kotu daha yüksek seçildiğinden inşaat masrafları daha yüksektir.

Ayrıca santral iki ünite olarak tesis edildiğinden kısmi yüklerde çalıştırma çok sınırlı kalacaktır. Sonuç olarak düşey milli Francis türbini seçilmiştir. (ALARKO)

6.6 Yıllık İşletme Raporlarının İncelenmesi

Berdan HES'e ait 2005 yıllık çalışma özeti aşağıdaki Çizelge 6.2, Çizelge 6.3 verilmiş bulunmaktadır.

2005 yılında Berdan HES toplam 18.552.030 kWh üretim yapmıştır. 2005 yılı içerisinde ünite I 3.094, ünite II ise toplam 3.045 saat çalışmıştır. Ünite verimleri %84,76 ile %57,69 arasında değişmiştir.

Çizelge 6.2 Berdan HES ünite I yıllık çalışma raporu (EİE)

Ay	SU DEĞERLERİ						ÜRETİLEN ENERJİ			VERİM
	Brüt Düşü	Kayıp	Net Düşü	Enerjiye Sarfedilen Su		Özgül Su Faktörü	Aktif	Reaktif	Çalışma Süresi	
	m	m	m	m ³	m ³ /s	m ³ /kWh	kWh	kVarh	saat	
Oca	23,40	0,04	23,36	6.707.260	5,72	21,32	314.543	201.702	325,73	73,67%
Şub	20,81	0,11	20,70	11.278.900	10,24	20,93	538.990	214.410	305,95	84,72%
Mart	21,50	0,25	21,25	21.886.310	14,44	21,46	1.019.753	280.409	421,13	80,46%
Nis	26,21	0,28	25,93	24.107.390	16,89	19,95	1.208.518	280.732	396,43	70,95%
May	40,45	0,52	39,93	19.196.340	21,45	15,93	1.205.077	164.409	248,60	57,69%
Haz	35,29	0,56	34,73	29.673.800	21,91	14,87	1.995.061	213.389	376,20	71,04%
Tem	34,87	0,37	34,50	18.674.010	17,66	15,66	1.192.661	179.637	293,78	67,94%
Ağu	32,10	0,25	31,85	14.702.210	15,70	16,21	907.051	187.571	260,13	71,08%
Eyl	28,69	0,18	28,51	10.589.750	13,30	19,42	545.253	131.153	221,13	66,27%
Eki	24,80	0,11	24,69	8.738.790	9,88	21,04	415.279	149.919	245,62	70,63%
Kas			0,00		0,00	0,00				
Ara			0,00		0,00	0,00				
Top.				165.554.760			9.342.186	2.003.331	3.094,72	
Max.	40,45	0,56	39,93	29.673.800	21,91	21,46	1.995.061	280.732		
Min.	20,81	0,04	0,00	6.707.260	0,00	0,00	314.543	131.153		
Ort.	28,81	0,27	23,79	16.555.476	14,86	17,72	934.219	200.333		

Çizelge 6.3 Berdan HES ünüte II yıllık çalışma raporu (EİE)

Ay	SU DEĞERLERİ						ÜRETİLEN ENERJİ				VERİM
	Brüt Düşü	Kayıp	Net Düşü	Enerjiye Sarfedilen Su		Özgül Su Faktörü	Aktif	Reaktif	Yol Verme Sayısı	Çalışma Süresi	
	m	m	m	m ³	m ³ /sn	m ³ /kWh	kWh	kVarh		saat	
Oca	20,57	0,04	20,53	7.513.920	6,47	21,31	352.670	227.809	7	322,47	83,90%
Şub	20,81	0,11	20,70	12.103.040	9,42	20,92	578.556	236.510	7	356,83	84,74%
Mart	21,50	0,22	21,28	17.251.930	13,61	21,50	802.417	251.627	13	352,20	80,21%
Nis	26,21	0,36	25,85	19.222.110	17,14	19,88	967.134	212.319	9	311,43	71,43%
May	40,45	0,50	39,95	24.084.540	21,19	15,95	1.510.211	215.411	10	315,75	57,60%
Haz	35,29	0,53	34,76	24.561.780	22,24	14,69	1.672.029	188.262	8	306,75	71,87%
Tem	34,87	0,36	34,51	22.633.280	18,43	15,54	1.456.509	294.247	8	341,07	68,43%
Ağu	32,10	0,23	31,87	14.596.030	14,69	16,05	909.582	181.552	17	276,03	71,76%
Eyl	28,69	0,19	28,19	11.908.810	13,16	19,33	616.002	161.706	16	251,35	67,34%
Eki	24,80	0,11	24,69	7.685.850	10,07	21,19	362.734	133.255	19	211,95	70,15%
Kas			0,00		0,00	0,00					
Ara			0,00		0,00	0,00					
Top.				161.561.290			9.227.844	2.102.698	114	3.045,83	
Max.	40,45	0,53	39,95	24.561.780	22,24	21,50	1.672.029	294.247			
Min.	20,57	0,04	0,00	7.513.920	0,00	0,00	352.670	133.255			
Ort.	28,53	0,27	23,53	16.156.129	14,73	17,51	922.784	210.270			

6.7 Kaplan Tipi Türbin Seçiminde Üretilebilecek Enerji

Kaplan tipi türbinlere ait Şekil 5.17'deki karakteristik eğrilerden Berdan HES'e ait EİE yıllık işletme çalışma raporunda yer alan aylık ortalama ünite debilerine takübül eden verimler okunmuştur.

Üretilebilecek enerji = $9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta$.Çalışma süresi (saat) eşitliğinden hesaplanmış.

2005 yılı çalışma raporlarında verilen düşü H ve debi Q değerleri için Kaplan tipi türbin seçilmesi halinde üretilebilecek enerji Çizelge 6.4'den görüldüğü gibi ünite I için 12.709.196kWh ve ünite II için 11.835.788 kWh olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.4 Berdan HES ünite I alternatif enerji üretimi

			Francis Türbini		Kaplan Türbini			
Net Düşü	Enerjiye Sarfedilen Su		Üretim	Çalışma Süresi	Verim	Üretilebilecek Enerji	Fark	Parasal Değeri
m	m ³	m ³ /sn	kWh	saat	η	saat	kWh	\$
23,36	6.707.260	5,72	314.543	325,73	0,85	362.910	48367	2.413
120,70	11.278.900	10,24	538.990	305,95	0,90	609.612	70622	3.524
21,25	21.886.310	14,44	1.019.753	421,13	0,90	882.224	-137529	-6.862
25,93	24.107.390	16,89	1.208.518	396,43	0,90	1.259.648	51130	2.551
39,93	19.196.340	21,45	1.205.077	248,60	0,90	2.463.108	1258031	62.775
34,73	29.673.800	21,91	1.995.061	376,20	0,90	2.188.396	193335	9.647
34,50	18.674.010	17,66	1.192.661	293,78	0,90	1.751.848	559187	27.903
31,85	14.702.210	15,70	907.051	260,13	0,90	1.438.013	530962	26.495
28,51	10.589.750	13,30	545.253	221,13	0,90	1.090.675	545422	27.216
24,69	8.738.790	9,88	415.279	245,62	0,85	662.762	247483	12.349
0,00		0,00						
0,00		0,00						
Toplam	165.554.760		9.342.186	3.094,72		12.709.196	3.367.010	168.013

Çizelge 6.5 Berdan HES ünite II alternatif enerji hesabı

Net Düşü	Enerjiye Sarfedilen Su		Üretim	Çalışma Süresi	Verim	Üretililecek Enerji	Fark	Parasal Değeri
m	m ³	m ³ /sn	kWh	saat	η	kWh	kWh	\$
23,36	7.513.920	6,47	352670	322,47	0,85	406560	53890	2.689
20,70	12.103.040	9,42	578556	356,83	0,90	614432	35876	1.790
21,25	17.251.930	13,61	802417	352,20	0,90	899095	96678	4.824
25,93	19.222.110	17,14	967134	311,43	0,90	1222398	255264	12.738
39,93	24.084.540	21,19	1510211	315,75	0,90	2358559	848348	42.333
33,96	24.561.780	22,24	1672029	306,75	0,90	2045675	373646	18.645
33,81	22.633.280	18,43	1456509	341,07	0,90	1876730	420221	20.969
31,85	14.596.030	14,69	909582	276,03	0,90	1140127	230545	11.504
28,51	11.908.810	13,16	616002	251,35	0,90	832673	216671	10.812
24,69	7.685.850	10,07	362734	211,95	0,85	439540	76806	3.833
0,00		0,00						
0,00		0,00						
Toplam	161561290		9.227.844	3.045,83		11.835.788	2.607.944	130.136

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

DSİ Türkiye'nin hidroelektrik kalitesine ilişkin çalışmayı havza başına ve ölçülen sulara dayandırarak yapmıştır. Türkiye'nin birçok bölgesinde DSİ tarafından etüt edilmeyen birçok su da vardır. Etüdü bugüne kadar yapılmamış bu sular üzerinde de tek tek küçük kapasiteli ama toplamında oldukça önemli üretim değerlerine ulaşan birçok hidroelektrik tesis kurulabilir. Bu tesisler büyük çoğunlukla nehir tipi santraller olarak ve özel sektör tarafından küçük yatırımlarla gerçekleştirilecek ölçekte tesislerdir. Türkiye'nin bu anlamda değerlendirilmeyi bekleyen önemli bir potansiyele sahiptir. Türkiye genelinde henüz etüdü yapılmamış bu küçük (1-30 MW) tesisler yoluyla yıllık en az 10-15 milyar kWh elektrik üretilebileceği düşünülmektedir.

Bunu bir örnekle açıklamak istersek ön etüdü ve fizibilitesi özel sektör tarafından yapılmış ETKB ile otoprodüktör sözleşmesi imzalanan Dağpazarı regülatörü ve Birkapı HES'ine ait bilgileri incelediğimizde. Mersin ili Mut ilçesinde bulunan Pirinç suyu üzerindeki bu tesis Dağpazarı beldesinden sonra yaklaşık bin metre düşüden yararlanılarak elektrik üretimini öngörmektedir. Regülatör, iletim tünelleri, iletim kanalı, yükleme havuzu, 1000 metre düşülü cebri boru ve Birkapılı mevkiinde yer alan santral yapılarından oluşmakta olan bu tesisin kurulu gücünün 24,5 MW, ortalama yıllık üretiminin de 74,8 milyon kWh olacağı hesaplanmıştır. Elektrik üretiminin, suyun başka bir gaye ile kullanılmadığı kış bahar (Kasım Mayıs) aylarında yapılacağı düşünülmüştür. Su debisinin küçük ve yalnızca kış-bahar aylarında olması (küçük debi-düzensiz rejim) böyle bir tesisin ilk bakışta göz ardı edilmesine neden olmaktadır. Nitekim DSİ de birkaç yıllık bir akım ölçümünden sonra devamını gereksiz görmüştür. Ancak düşünün büyüklüğü (1000m) böyle bir tesisi ekonomik olarak yapılabilir ölçeklere getirmektedir. Proje debisi 2,68 m³/s olan bu suyu örnek olarak alırsak. Türkiye'de benzer yüzlerce suyun olduğu ortaya çıkacaktır.

Hidrolik türbin seçiminde ve tasarlanmasında spesifik hız belirleyici olmak taktır. n_s 300 m-kW ile 400 m-kW değerleri arası ise Francis ve Kaplan tipi türbinler arası geçiş bölgesini oluşturmakta ve her iki türbinde seçilebilmektedir.

Bu seçim yapılırken işletme planının göz önünde tutulması önemlidir. Eğer türbin tasarımı yapılacak olan santral sadece puant saatlerde çalışması düşünülüyor ise veya çok büyük bir rezervuar hacmine sahipse yani kısmi yüklerde çalıştırılmayacak ise proje debisinde verim $\eta = 0,95$ değerlerine kadar ulaşabilen Francis tipi bir türbinlerin seçimi daha uygundur.

Buna karşın eğer tasarlanmakta olan santral gelen akımlara göre çalışan nehir tipi bir HES ise

veya rezervuar alanı sürekli olarak türbinlerin proje debisinde çalışmasına müsaade etmeyecek kadar ufaksa, kısmi yüklerde Francis türbinlere nazaran çok daha yüksek verimler veren Kaplan tipi bir türbinlerin seçilmesi gerekmektedir.

Bölüm 6'da 1996 yılından beri işletilmekte olan 10.4 MW kurulu gücündeki Berdan HES'in türbin hesapları irdelenmiş ve alternatif olarak Kaplan tipi türbin için ana boyutlar hesaplanmıştır.

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de verilen tablolardan 24m düşü ve $24\text{m}^3/\text{s}$ ünite debisi için seçilecek türbinin Kaplan – Francis geçiş bölgesinde olduğu görülmüş ve Francis tipi 2 üniteden oluşan santral için alternatif Kaplan tipi türbin seçilmesi halinde EİE 2005 yılı çalışma raporundan alınan değerlerle üretilebilecek enerji hesaplanmıştır.

Sonuç olarak 2005 yılı içinde Kaplan tipi türbin seçilmesi halinde 24.544.984 kWh elektrik üretilebileceği hesaplanmıştır. Bu üretilebilecek değer 2005 yılında santralin gerçekleştirdiği üretimden 5.974.954 kWh daha fazla olduğu gözlenmiş ve üretilebilecek fazla enerjinin parasal karşılığı ise EİE'den alınan elektrik satış fiyatıyla çarpıldığında (4,99 cent/ kWh) ise 298.150 \$ olarak hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

BAKIR, Nadi., (2001) Türkiye'nin Hidroelektrik Potansiyelinin Yeniden Değerlendirilmesi ERE Mühendislik ve İnşaat ve Ticaret A.Ş, 21-33.

BAŞEŞME, Hidayet. (2003) Hidroelektrik Santraller ve Hidroelektrik Santral Tesisleri.EÜAŞ Yayınları, Ankara

EİE İşletme Denetim Kriterleri, (2006).

EİE Fizibilite İnceleme Kriterleri, (2006).

EİE Berdan HES 2005 Yıllık Çalışma Raporu, (2006).

EİE Fizibilite Hazırlama Kriterleri, (2005).

GÜNAY, T. (2000), 'Küçük Hidroelektrik Santraller ve Ekonomisi', 8.Enerji Kongresi, Mayıs. 2000, Ankara

RAMOS. Helena, A.Betamio de Almeida, M. Manuela Portela. (1996), Guidelines for Design of Small Hydropower Plants, Lisbon.

ÖZGÜR. Cahid. (1973), Su Makineleri Dersleri, Çağlayan Basımevi, İstanbul.

Vincent J. Zipparro ve Hasen Hans. (1993) Davis' Handbook of Applied Hydraulics, McGraw-Hill, New York.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 10.10.1982

Doğum yeri Sakarya

Lise 1997-2000 Hüseyin Avni Sözen Anadolu Lisesi

Lisans 2000-2004 Yıldız Üniversitesi Makina Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2004-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Konstrüksiyon Anabilim Dalı.

Çalıştığı kurum

2004-2006 EİE Genel Müdürlüğü.