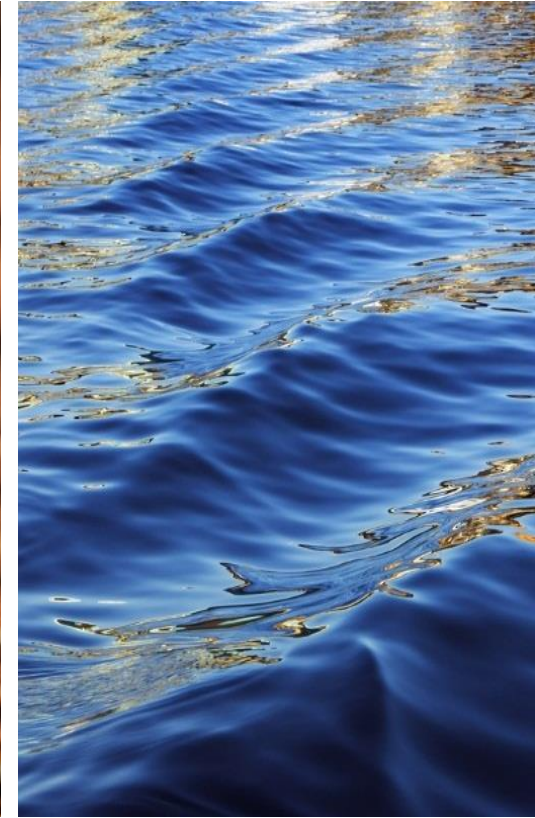




# Hidro Türbinlerin Deneysel ve Sayısal Yöntemler ile Tasarımı

Dr. ECE AYLI  
Çankaya Üniversitesi  
Makine Mühendisliği  
e-mail: [eceayli@gmail.com](mailto:eceayli@gmail.com)



# İÇERİK

---

Hidrolik Enerji –Nedir? –Tipleri? –  
Seçim Kriterleri?

---

HAD Yöntemleri& Deneysel Yöntemler  
ile Tasarım

---

Dünyadaki Test Merkezleri

---

ETÜ Hidro

---

Yerli Kaynaklar ile yapılan Çalışmalar

---

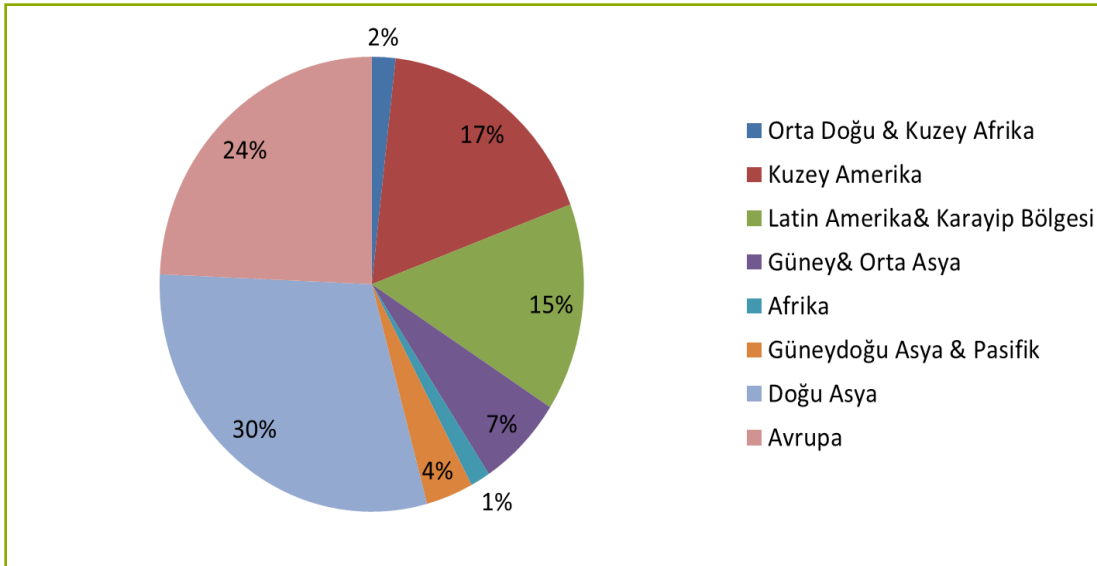
Türbin Çalışma Prensipleri

---

# DÜNYADA HİDROLİK ENERJİ



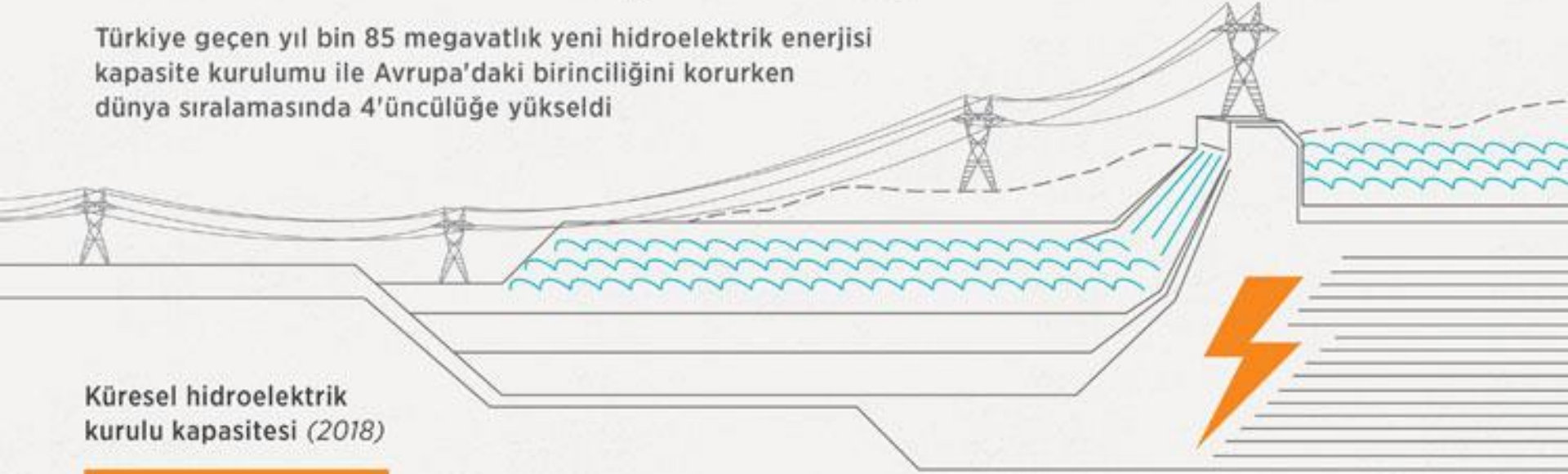
2016 yılında elde edilen bilgilere göre; petrol, dünya çapında enerji tüketiminde %33,3'ü ile en yüksek miktarda olmaktadır. Petrolü takip ederek, dünya genelinde enerji tüketiminde ikinci sırada kömür %28,1'ini, doğalgaz ise %24,1'ini hidrolik enerji %6,9'unu, nükleer enerji %4,5'ini ve son olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından %3,2'sini tüketilmektedir



Şekil'de 2018 verileri için Dünya'da bölgesel olarak kurulu hidroenerji kaynakları gösterilmiştir. Bu grafiğe göre hidro enerji kapasitesinden en çok yararlanan bölge Doğu Asya bölgesi olarak görülmektedir. Ortadoğu ise %2'lik bir oranla kurulu hidroelektrik gücüne sahiptir.

# Türkiye hidroelektrikte dünya sıralamasında yükseliyor

Türkiye geçen yıl bin 85 megavatlık yeni hidroelektrik enerjisi kapasite kurulumu ile Avrupa'daki birinciliğini korurken dünya sıralamasında 4'üncülüğe yükseldi



Küresel hidroelektrik kurulu kapasitesi (2018)

**1 MİLYON  
292 BİN  
MEGAVAT**



**21 BİN 800**

2018'de 48 ülke toplam **21 bin 800 megavatlık yeni hidroelektrik enerjisi kapasitesi** oluşturdu

**KANADA  
401**

**NORVEC  
419**

**TÜRKİYE  
BİN 85**

**TACİKİSTAN  
605**

**ÇİN  
8 BİN 540**

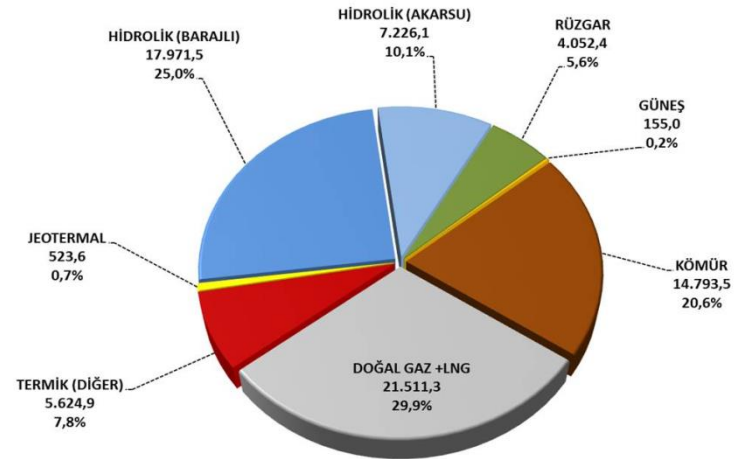


# TÜRKİYE'DE HİDROLİK ENERJİ

Ülkemizdeki 26 adet hidrolojik havzada bulunan irili ufaklı çok sayıda nehrin yıllık ortalama akımları toplamı olan 193 (186 + 7) milyar m<sup>3</sup> yüzey suyunun hidroelektrik enerji potansiyelinin belirlenmesinde “teorik potansiyel”, “teknik yapılabilir potansiyel” ve “ekonomik yapılabilir potansiyel” olmak üzere üç farklı şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir

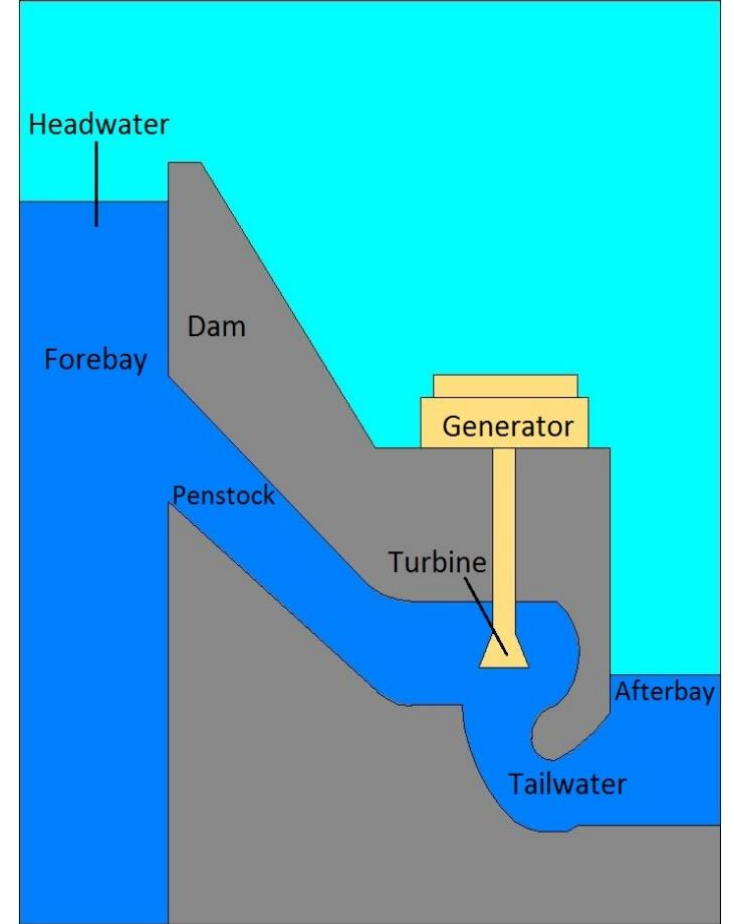
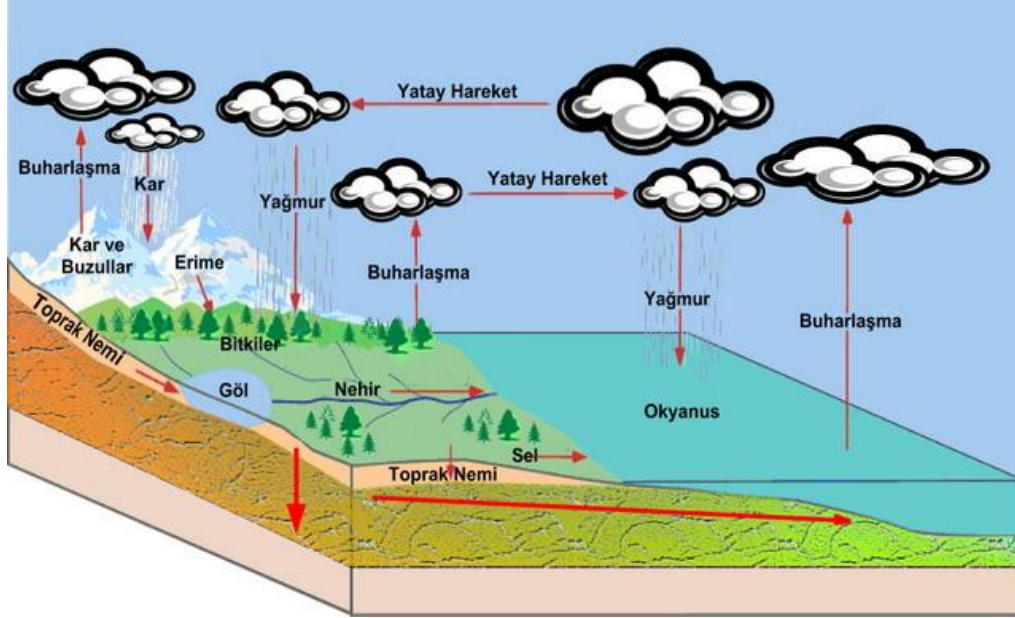
Bölge	Brüt Hidroelektrik Enerji Potansiyeli (GWh/yıl)	Teknik Hidroelektrik Enerji Potansiyeli (GWh/yıl)	Teknik ve Ekonomik Hidroelektrik Enerji Potansiyeli (GWh/yıl)
Afrika	4.000.000	1.665.000	1.000.000
Asya	19.000.000	6.800.000	3.600.000
Avustralya / Okyanusya	600.000	270.000	105.000
Avrupa	3.150.000	1.225.000	800.000
Kuzey ve Orta Amerika	6.000.000	1.500.000	1.100.000
Güney Amerika	7.400.000	2.600.000	2.300.000
Dünya	40.150.000	14.060.000	8.905.000
Türkiye	433.000	210.000	127.820
Türkiye/Dünya (%)	1,07	1,54	1,84

## TÜRKİYE'DE ELEKTRİK ENERJİSİ KURULU GÜCÜ (31 AĞUSTOS 2015)



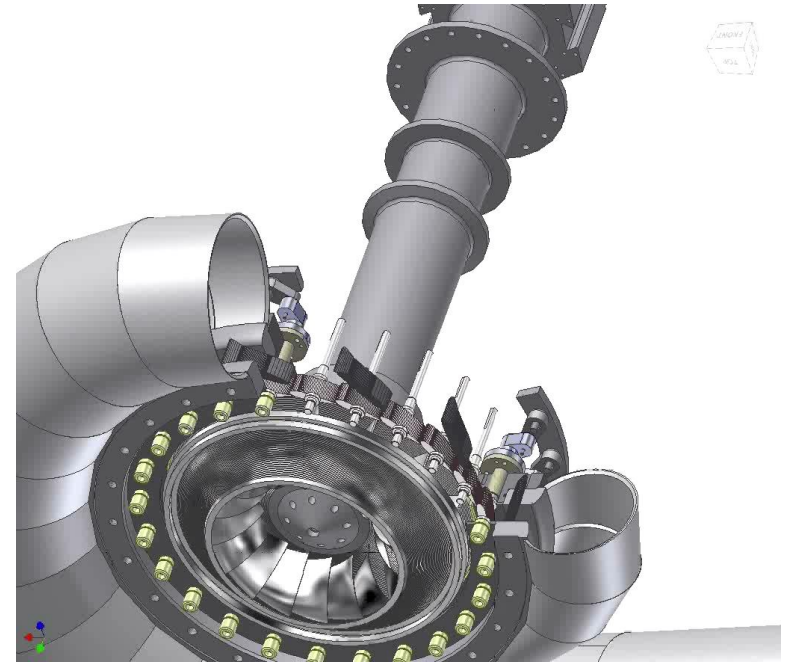
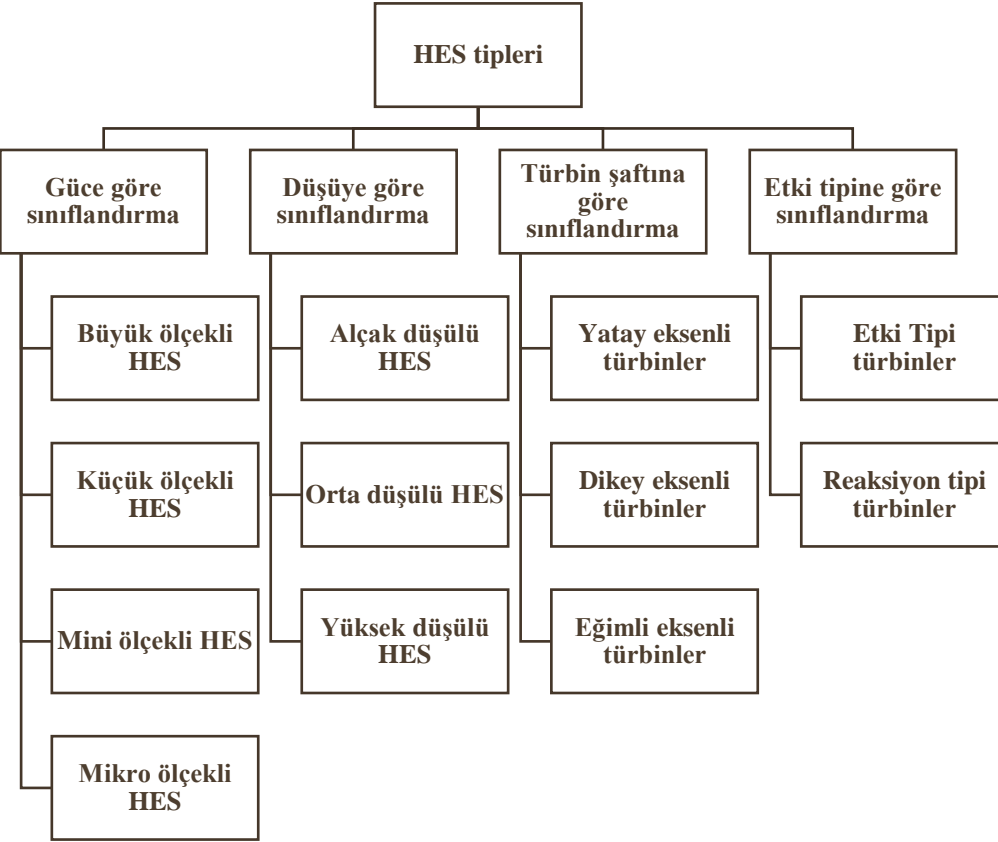
**KURULU GÜÇ (2015): 71.858,5 MW**

# HİDROLİK ENERJİ NEDİR?



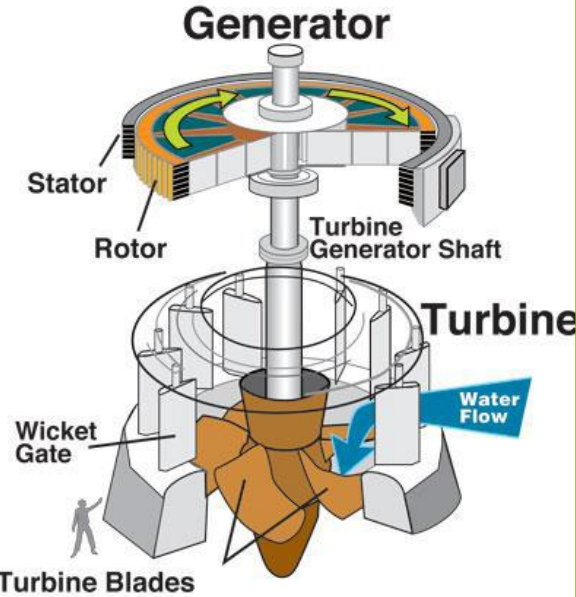
Deniz, göl veya nehirlerdeki sular güneş enerjisi ile buharlaşmakta, oluşan su buharı rüzgârın etkisiyle de sürüklenerek dağların yamaçlarında yağmur veya kar halinde yeryüzüne ulaşmakta ve nehirleri beslemektedir. Böylelikle hidrolik enerji kendini sürekli yenileyen bir enerji kaynağı olmaktadır. Enerji üretimi ise suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi ile sağlanmaktadır.

# TEMEL TÜRÜN TİPLERİ



# TEMEL TÜRBİN TİPLERİ- RXN TİPİ TÜRBİNLER

- Net düşü ve özgül hız bakımından oldukça geniş kullanım alanı olan reaksiyon tipi su türbinleri suyun hem kinetik hem de potansiyel enerjisinden yararlanırlar. Bu nedenle, çarka girişteki basınç çıkıştaki basınçtan çok daha büyük olur. Bu yüzden, suyun kapalı kanallar içinden akma zorunluluğu vardır (Kaplan, Francis, Uskur).



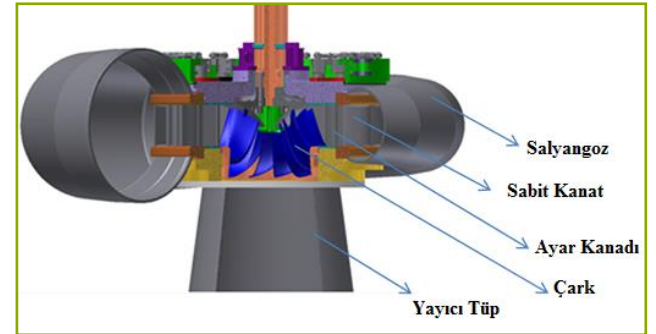
- ✓ 1913&Prof. Victor Kaplan
- ✓ Yüksek debiler ve düşük düşüler(3- 70 m arası).
- ✓ Avantajları:
  - ✓ Francis tipi türbinlerin kullanılmadığı düşü aralıklarında kullanılabilirlikleri
  - ✓ Oynayabilir çark kanatları
  - ✓ Debiye bağlı maksimum verim adına çark kanatları açısı ayarlanabilmekte
- ✓ Dört ile sekiz arasında çark kanat sayıları
- ✓ Düşü arttıkça daha fazla kanat ihtiyacı doğmaktadır. Su çarka iletilirken salyangoz, sabit kanat ve ayar kanatlarını geçmektedir. Salyangoz çoğu zaman trapezoid şekilli olarak tercih edilmektedir.
- ✓ Ayar kanatları sayısı yirmi ile otuz iki kanat arası
- ✓ Ayar kanatları türbin gücünü regüle etmekte
- ✓ Yayıcı tüp suyun çarktan tahliye edilmesini sağlamaktadır ve çoğu zaman betondan yapılmaktadır



# TEMEL TÜRÜN TİPLERİ- RXN TİPİ TÜRÜNLER

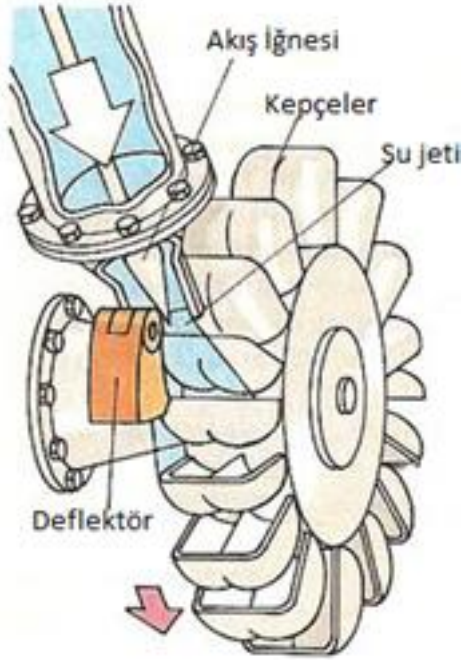


- 19. yy & Howd ve Francis
- Eksenel Giriş & Eksenel Çıkış
- Francis tipi türbinler reaksiyon tipi türbinlerin en çok tercih edilen tipi
- 40-700 m düşü aralığında & 500 MW güç
- Yüksek verim değerlerinde
- Kolay tasarlanabilme
- Francis tipi türbinlerde 20-24 arası ayar kanadı
- Ayar kanadından akış, çark kanatlarına çarparak itki yaratmakta ve türbin jeneratör şaftını döndürerek elektrik üretimini gerçekleştirmekte
- Avantajı: daha küçük boyutlarda imal edilerek, daha yüksek dönme sayıları



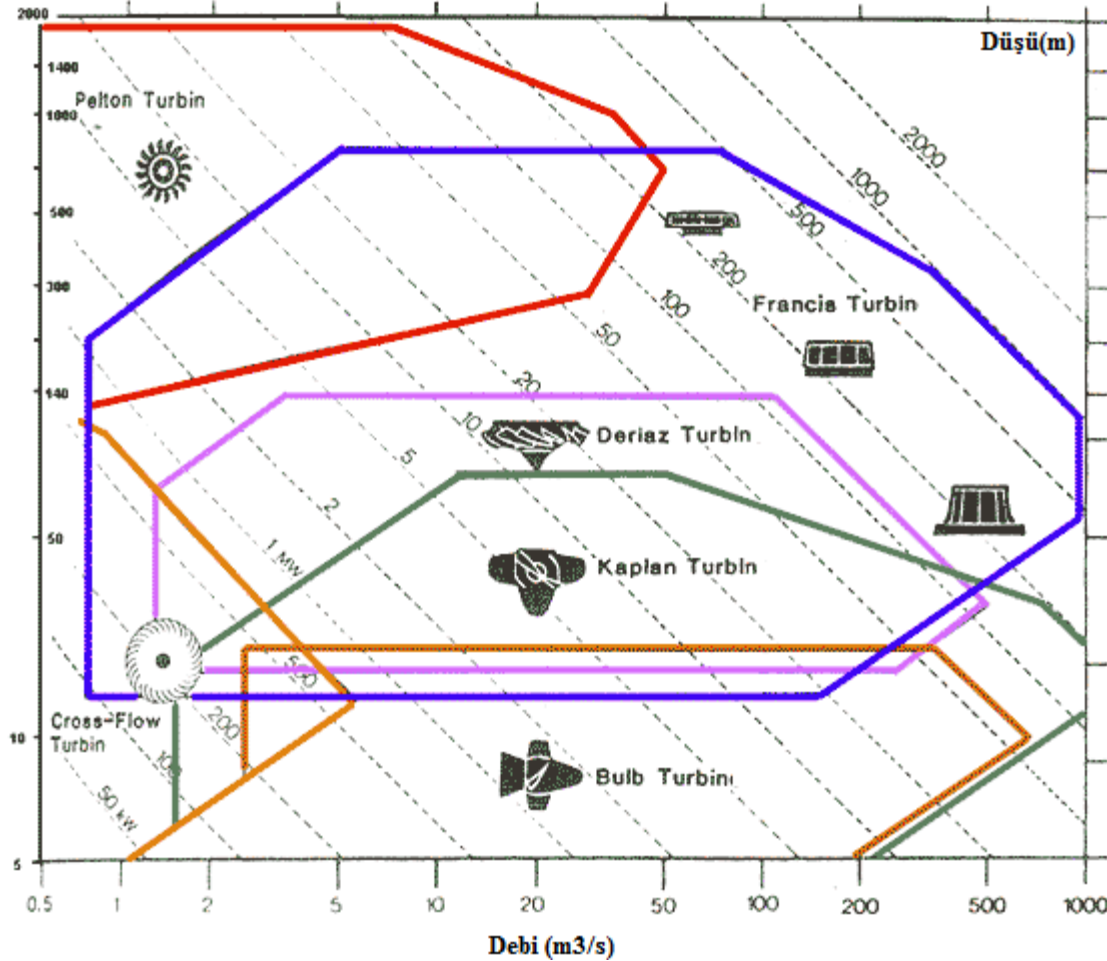
# TEMEL TÜRÜN TİPLERİ- ETKİ TİPİ TÜRÜNLER

- Bu türbinlerde akışkan kepçelere veya çarka atmosfer basıncında girip yine atmosfer basıncında çıkar. Bu yüzden bu tip türbinlere eş basınçlı türbinler adı verilmiştir (Pelton, Turgo, Banki).



- ✓ Yüksek düşülü hidroelektrik sistemlerde (400-600 m)
- ✓ Pelton tipi türbinin kanatları hava ile temas halindedir ve tek bir zaman anında belli başlı kanatlar su ile temas halindedir.
- ✓ Bu tip türbinlerde suyun enerjisi önce, uygun şekle sahip bir borudan geçirilip, çıkış ağzında su jeti haline getirilerek, kinetik enerjiye dönüştürülür.
- ✓ Su, çarkın kap şeklindeki rotor kanatlarına teğetsel olarak çarpmaktadır. Bu çarpma ile suyun kinetik enerjisi mekanik enerjiye dönüşerek türbin çarkını döndürmektedir.
- ✓ Pelton tipi türbinlerde en yüksek verim noktası çark dönüş hızının su jetinin hızının yaklaşık olarak %50'si civarında elde edilmektedir
- ✓ Düşey veya yatay olarak konumlanma
- ✓ Kapların geometrileri ve su jetlerinin sayıları Pelton tipi türbinlerin en önemli parametreleri

# TÜRBİN SEÇİM KRİTERLERİ



- ✓ Eksenel türbinler 70m'ye kadar olan düşük düşülü
- ✓ Francis tipi türbinler 40-700 m arasında
- ✓ Pelton tipi türbinler ise 400 m düşü üzerinde kullanılmaktadır.

reaksiyon tipi türbinler geniş bir düş aralığında kullanım alanına sahipken aksiyon tipi türbinler sadece yüksek düşülerde kullanılabilir.

# TÜRBİN SEÇİM KRİTERLERİ

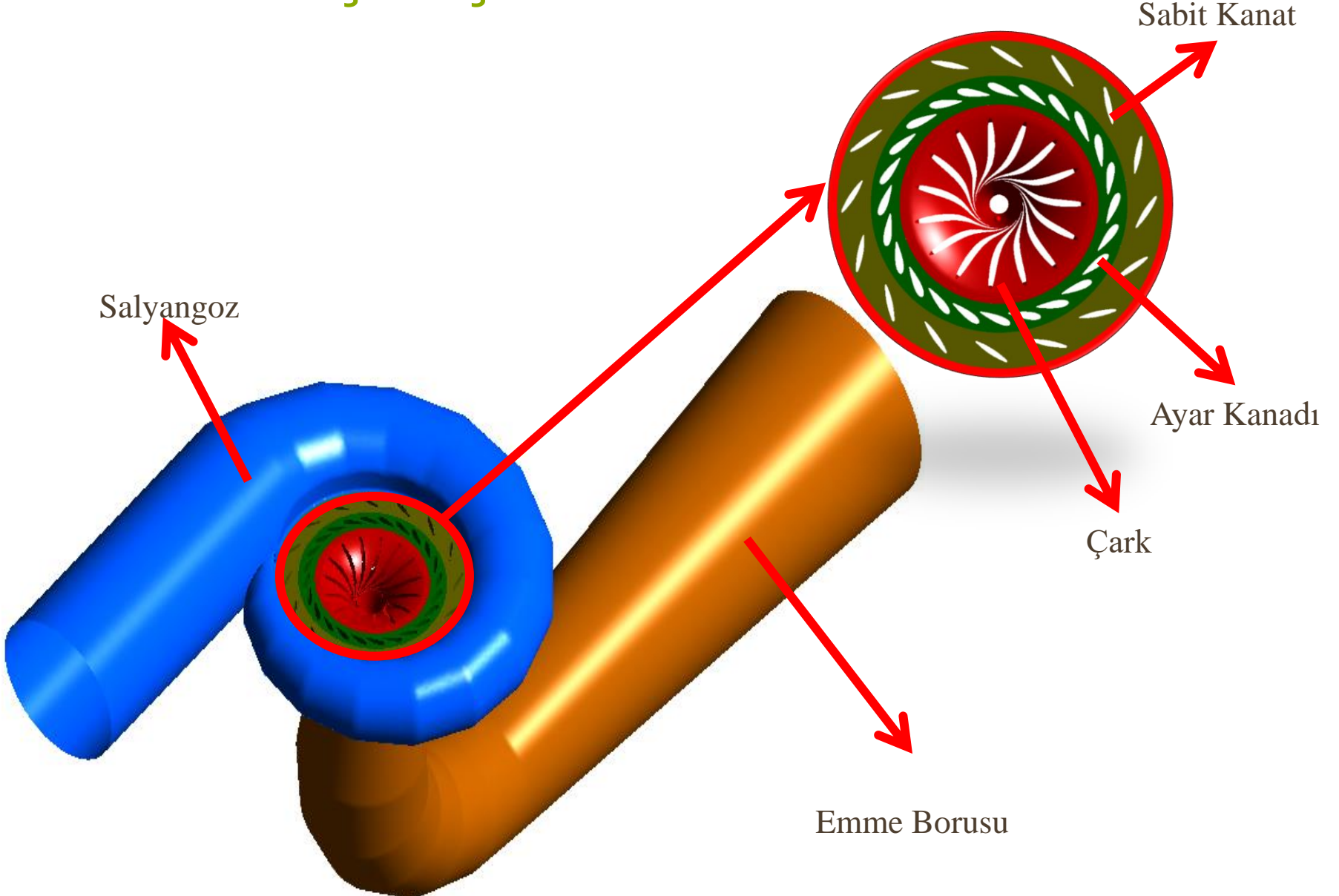
türbin tipinin  
belirlenmesinde özgül  
hızlar birinci parametredir

Türbin Tipi			Özgül Hız (devir/dakika)	Maksimum Düşü (m)
Aksiyon	Pelton		7 – 26	1800 – 350
Reaksiyon	Francis	Yavaş	51 – 107	700 – 410
		Orta	107 – 190	410 – 150
		Hızlı	190 – 250	150 – 64
	Kaplan		250 – 300	50 – 6

Jeneratör Hızı

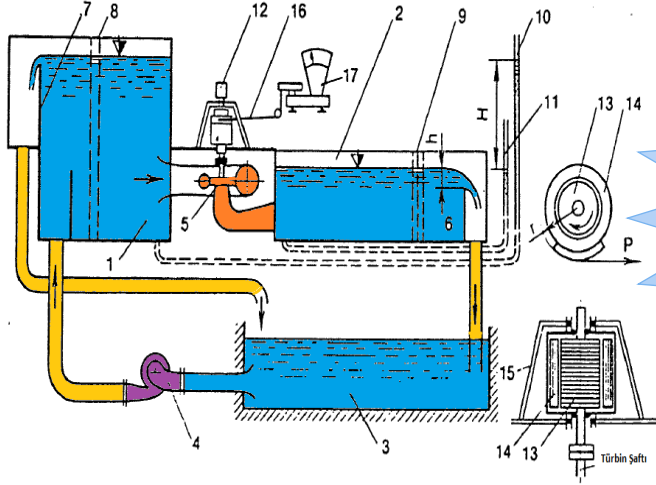
Türbin tarafından döndürülen jeneratörler, tipik bir türbinin optimum hızından daha yüksek bir devirde dönerler. Jeneratör ve türbin arası bağlantı bir dişli mekanizması veya bir kavrama yardımı ile sağlanır. Çark dönme hızı ile jeneratör dönme hızı aynı olduğu durumlarda türbin çarkı direk olarak jeneratöre aynı şaft ile bağlanabilmektedir; ancak jeneratör ve çark dönme hızları birbirinden farklı olduğunda, türbin şaftı, jeneratör şaftına transmisyon ile bağlanır ve jeneratör kutup sayısına göre senkron bir hız yakalar. Kutup sayısı kısıtından ötürü çarkın belirli dönme hızlarında çalışması gerekir

# TÜRBİN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEMELLERİ



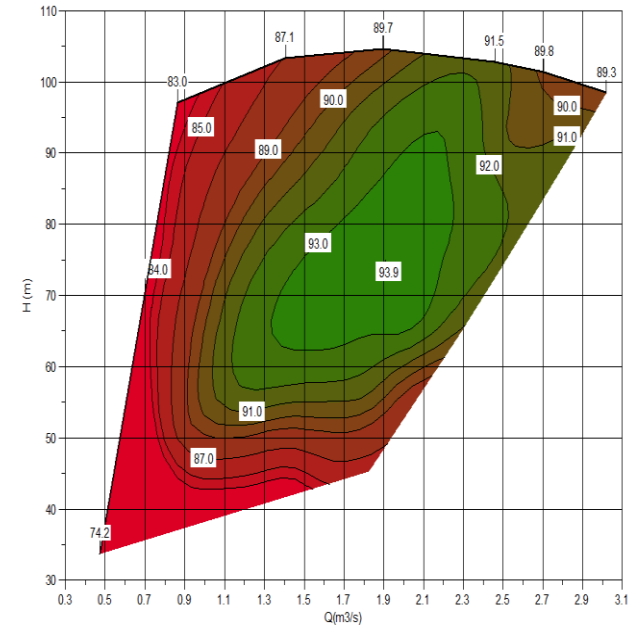
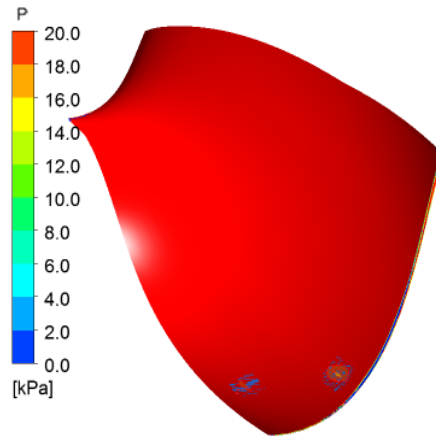
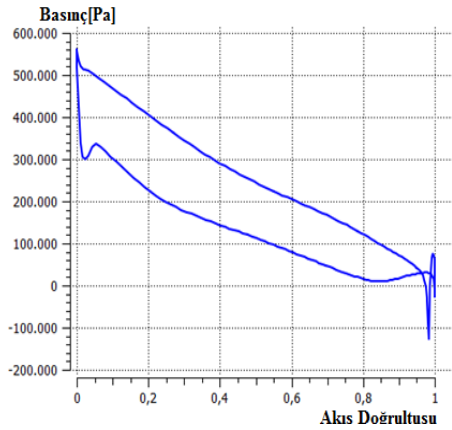


# HAD YÖNTEMLERİ İLE TÜRBİN TASARIMLARI



- ✓ Türbin imalatı
- ✓ Zaman gereksinimi
- ✓ Performansa etki eden kritik oluşumlar?

HAD  
YÖNTEMLERİ



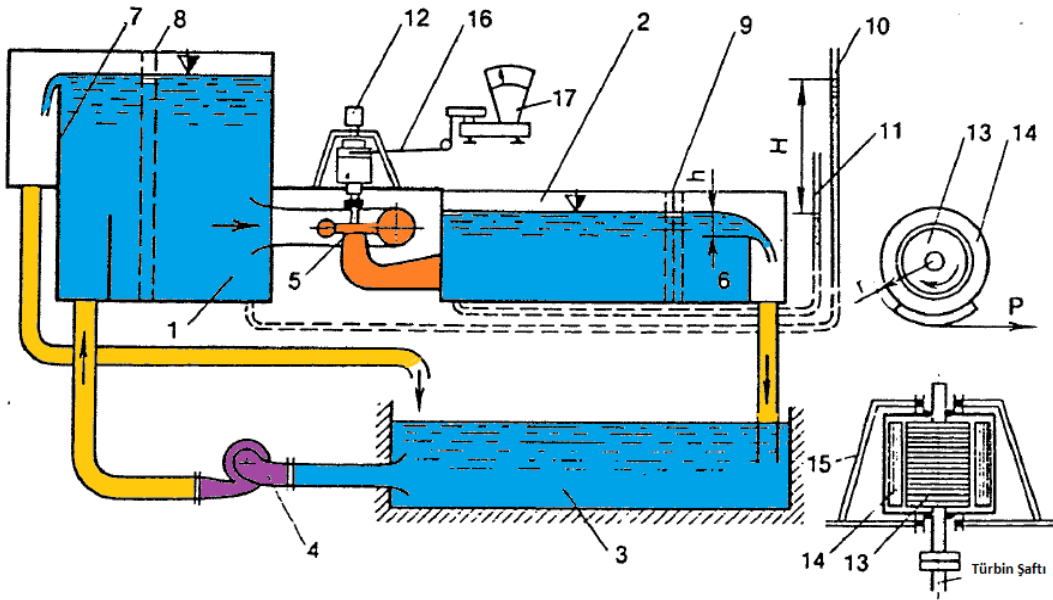
# HAD YÖNTEMLERİ İLE TÜRBİN TASARIMLARI



Araştırmacılar / Yayın Başlığı	
Hu, Ying, et al.	<i>Numerical simulation of unsteady turbulent flow through a Francis turbine</i>
Patel, K., Desai, J., Chauhan, V., & Charnia	<i>Development of Francis Turbine using Computational Fluid Dynamics</i>
Gohil, Pankaj P., and R. P. Saini	CFD: Numerical analysis and performance prediction in Francis turbine
Ruprecht A, Heitele M, Helmrich T	Numerical simulation of a complete Francis turbine including unsteady rotor/stator interactions
Li, J., J. Yu, and Y. Wu	3D unsteady turbulent simulations of transients of the Francis turbine
Lipej, A., Jost, D., Meznar, P	Numerical prediction of non-cavitating and cavitating vortex rope in a Francis turbine draft tube.
Anup, K. C., Bhola Thapa, and Young-Ho Lee	Transient numerical analysis of rotor–stator interaction in a Francis turbine

# DENEYSEL HIDROLİK TÜRİN ÇALIŞMALARI

✓ Teknolojinin gelişmesi ile beraber HAD yöntemleri ile hidrotürbin tasarımı her ne kadar maliyeti düşük, hızlı ve büyük oranda güvenilir sonuçlar veren bir araç haline gelmiş olsa da tam olarak güvenilir, gerçek ve geniş bir çalışma aralığında sonuçlar elde etmenin tek yolu deneysel çalışmalardır

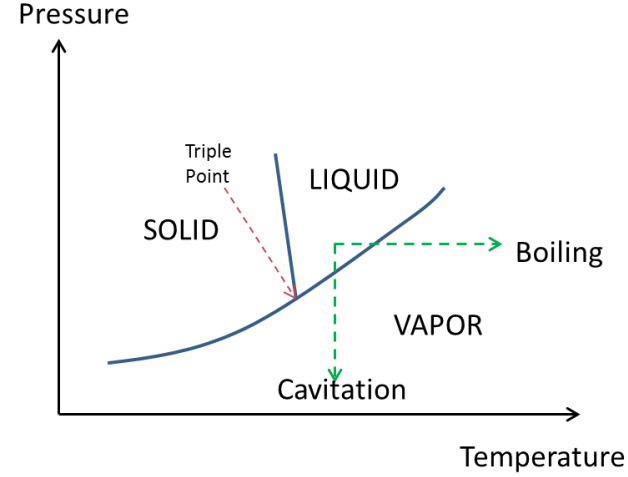


Deney sırasında ölçümlenen parametreler:

- ✓ Debi ( $Q$ ),
- ✓ Düşü ( $H$ )
- ✓ Hız ( $n$ )
- ✓ Türbin tarafından elde edilen güç ( $P$ ) değerleridir.
- ✓ Farklı Ayar kanadı açıklıkları için testler tekrarlanarak karakteristik eğriler elde edilir.

# HATIRLATMA:KAVITASYON NEDİR?

- Fiziksel bir olgu olan kavitasyon akış alanında oluşan baloncuklara verilen isimdir. Bernoulli prensibine göre, akışın hızı artınca, basınç değerleri düşmektedir. Basınç değerlerinin düşüşü ise daha düşük kaynama noktası anlamına gelmektedir.
- Diğer bir deyişle, basınçtaki düşüş, akışkanın kaynama noktasını ortam sıcaklığına kadar düşürmektedir. Bu durumda soğuk kaynama gerçekleşmekte ve buhar ve gaz dolu baloncuklar oluşmaktadır. Bu durum kavitasyon olarak adlandırılmaktadır.

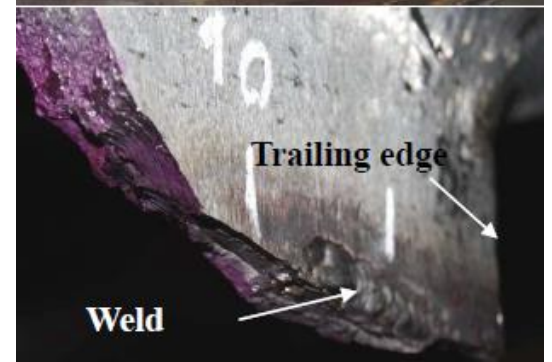


Üçlü Faz Diyagramı

- Knapp vd.'ne göre bir kütle sabit basınç altında ısıtıldığında kaynama, sabit sıcaklık altında basıncı düşürüldüğünde ise kavitasyon olarak adlandırılır. Kavitasyon olgusu mühendisliğin birçok dalında karşılaşılan bir problemdir. Ani basınç ve hız değişimi içeren tüm sistemlerde karşı karşıya kalınan bu olgu pompalarda, türbinlerde, pervanelerde hatta insan vücudunda bile meydana gelebilmektedir.

# HATIRLATMA: KAVITASYON NEDİR?

- Hidrolik Makinelerde Kaviteasyon
- Düşük basınç bölgesinin ayar kanadı ve çark arasında meydana gelmesi durumunda hızlar bu bölgede yükselir ve akış alanı daralır. Bu durum ise güç ve debi de düşümlere yol açar.
- Kaviteelerin çökmesine bağlı olarak türbin verimi %10-20 arasında düşümlere uğrayabilir.
- Kaviteasyona bağlı olarak malzeme yüzeyleri aşınmaya başlar. Bu aşınan yüzeyler ise kaviteasyona bağlı olarak daha a büyürler ve malzemenin yüzeyden kopması ile sonuçlanırlar.
- Kaviteasyonun sonucu olan düzensiz radyal kuvvetler, türbinde vibrasyona ve osilasyona neden olurlar.
- Kısmi yükleme durumlarında yayıcı tüpte büyük bir girdap yapısı oluşur ve bu yapı yayıcı tüp verimini ciddi oranda düşürür

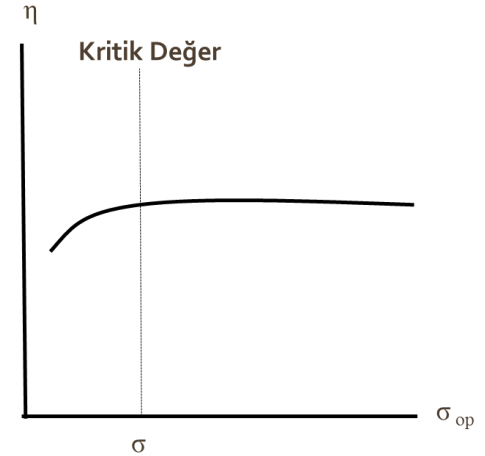
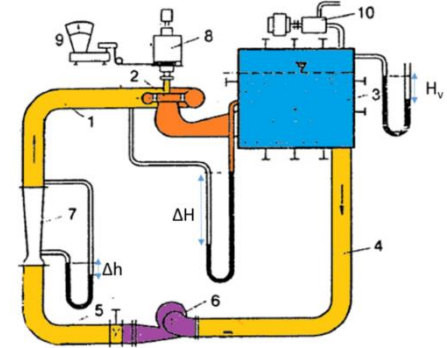




# DENEYSEL HIDROLİK TÜRBİN ÇALIŞMALARI

- Kavitasyon test düzeneği, boru hattı (1), model türbin (2), düşük düşü tankı (3), sirkülasyon boru hattı (4,5) ve pompa (6) sisteminden oluşur.
- Deney düzeneği kapalı bir sistemdir ve sabit su hacminde gerçekleşmektedir.
- Test sırasında ventürimetre ile debi (Q), düşü, fren sistemi yardımı ile de güç (P) ölçülmektedir. Sistemde düşük düşü tankının üzerine monte edilmiş olan vakum pompası (10) ile vakum sağlanmaktadır.
- Kavitasyon kat sayısı ölçümünde aşağıda verilen formülasyondan yararlanılmaktadır.

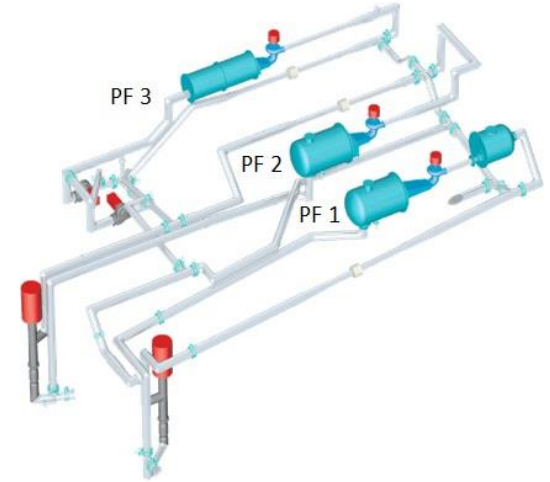
$$\sigma_{op} = \frac{\frac{P_{tw}}{\rho g} - H_s - \frac{P_{wv}}{\rho g}}{H}$$



# TEST MERKEZLERI- EPFL

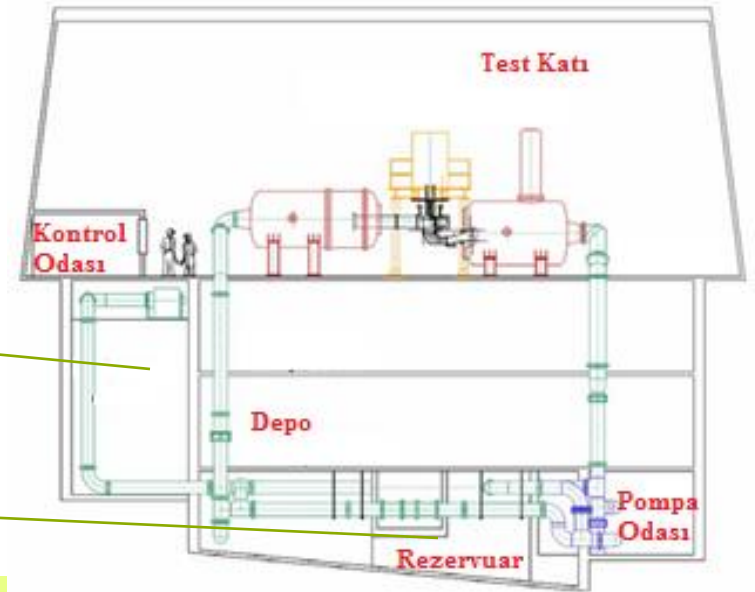
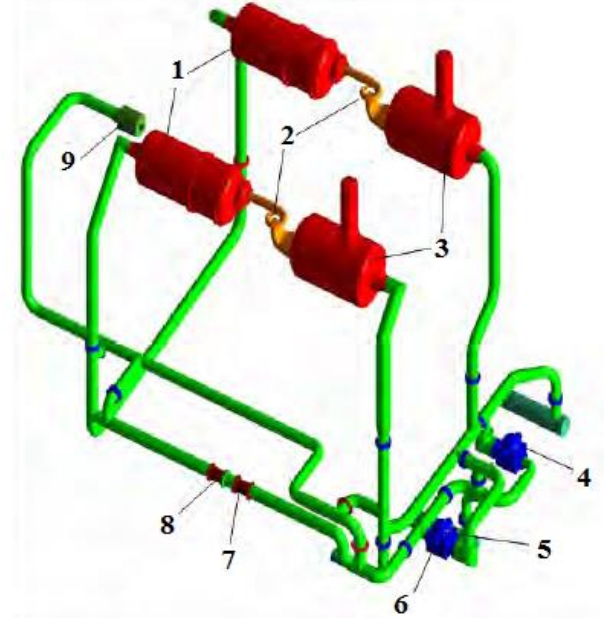
- İsviçre'nin Lozan şehrinde bulunan EPFL bünyesinde faaliyet göstermektedir.
- Laboratuvarında IEC 60193 standardına uygun olarak işleyen 3 adet test düzeneği (açık, kapalı, kalibrasyon) bulunmaktadır
- Düzenekler birbirinden bağımsız bir şekilde aynı anda çalışabilmekte ve test yapabilmektedir.

	PF 1	PF 2	PF 3
Debi (m <sup>3</sup> /s)	1,4	1,4	1,4
Düşü (m)	100	120	100
Türbin Gücü (kW)	300	300	300
Pompa Gücü (kW)	900	1000	2 x 400
Dönüş Hız (rpm)	1500	2500	2500



# TEST MERKEZLERI-Voith S.Morqan Smith

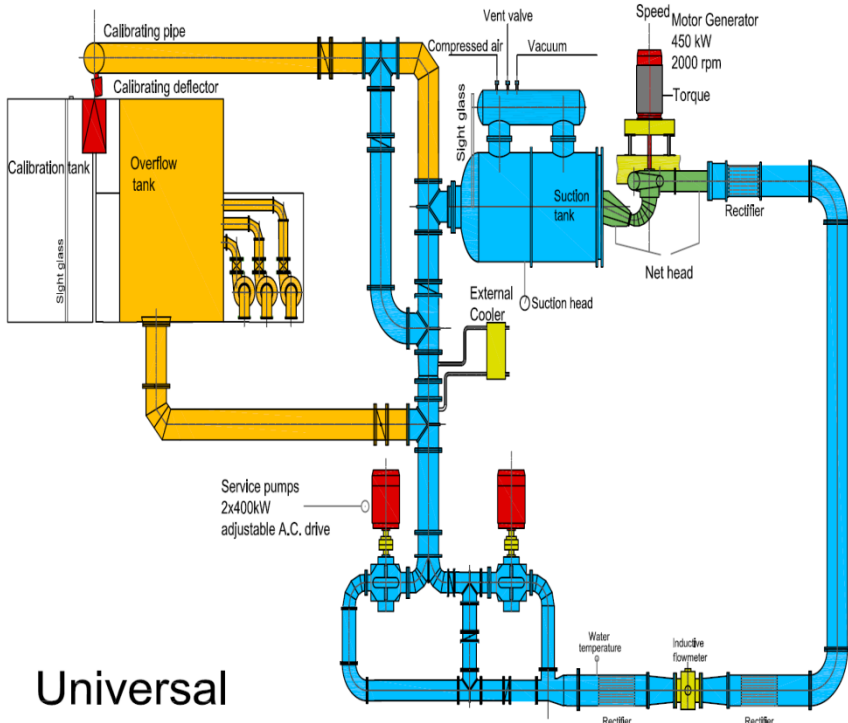
- ✓ 1973 yılında, ABD'nin York şehrinde, VOITH firması tarafından kurulmuştur.
- ✓ Yapılacak model testinin gerektirdiği debi ve düşü değerlerine göre, pompalar, paralel veya seri bağlanabilmektedir.
  - 131 m düşü (0,28 m<sup>3</sup>/s debi geçebilir)
  - 1,6 m<sup>3</sup>/s debi (49 m düşü elde edilebilir)
  - 450 kW güç
  - 2000 rpm devir
- ✓ Açık&Kapalı Çevrim



Hacimsel Depo: Debimetre kalibrasyonu

570 m<sup>3</sup> kapasiteli bir rezervuar ve servis pompaları

# TEST MERKEZLERI



Universal  
Teststand III



DÜNYADA'KI BAZI TEST DÜZENEKLERİNDEN RESİMLER



# TOBB ETÜ SU TÜRBİNİ TASARIM & TEST MERKEZİ (ETÜ HİDRO)

- Hidro Türkiye'nin en zengin yenilenebilir enerji kaynağıdır. 2001'den beri yeni bir yasa ile özel sektör hidroelektrik santraller kurabilmektedir. Türkiye'deki özellikle su türbini tasarımı konusundaki bil-yap yetersizdir. Dolayısıyla, TOBB Üniversitesi'nin de misyonu olan üniversite-sanayi işbirliği çerçevesinde türbinlerin tasarımı, üretimi ve testleri üzerine bil-yap'ın oluşturulması gerekmektedir.
- TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Kalkınma Bakanlığı'ndan, **Prof. Dr. Selin Aradağ** yönetiminde ve **Dr. Kutay Çelebioğlu'nun** koordinatörlüğünde gerçekleşen, 10 milyon TL'si bakanlık tarafından desteklenen, insan kaynağı ve binası da TOBB tarafından sağlanan bir proje almıştır. Projenin amacı, su türbinlerinin tasarımı, model üretimi ve testlerinin tek yerden yapılabileceği bir araştırma merkezi kurmaktır.



# ETÜ HİDRO

Merkez üç ana laboratuvardan oluşmaktadır:

Bilgisayar destekli tasarım laboratuvarı:

- CFD destekli türbin tasarımı
- Tasarımların yapısal analizleri
- Son tasarımlar için parametrik çalışmalar

Türbin Üretim Laboratuvarı:

- Model türbinlerin 5 eksenli CNC işleme makineleri ile üretimi
- Metroloji ve kalite kontrol

Su Türbinleri Test Laboratuvarı:

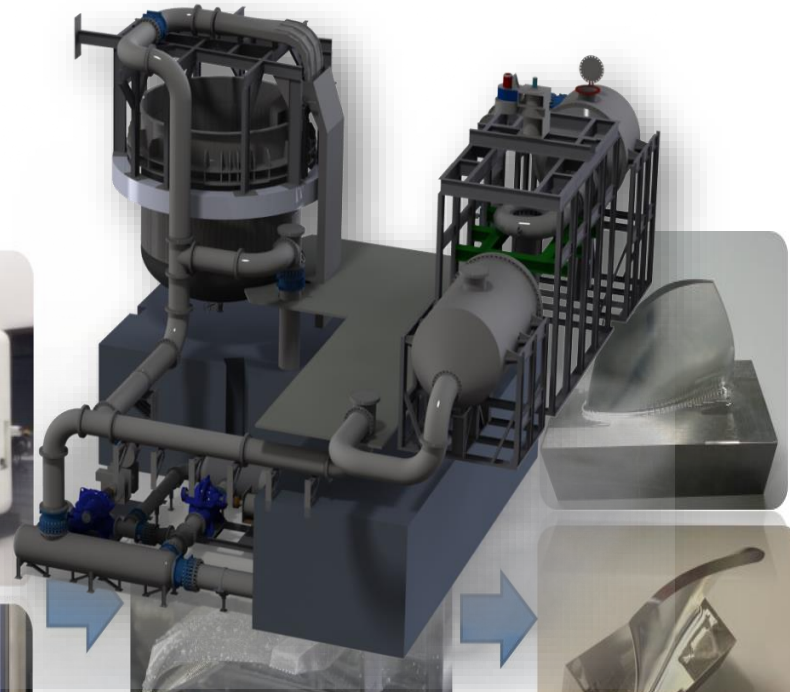
- IEC 60193 standartlarına göre
- Model hidrolik türbin deneyleri
- Debi, basınç, düşü ölçümleri
- Performans testleri
- Kavitasyon testleri

# ETÜ HİDRO

## Design, Construction & Test of Hydraulic Turbines

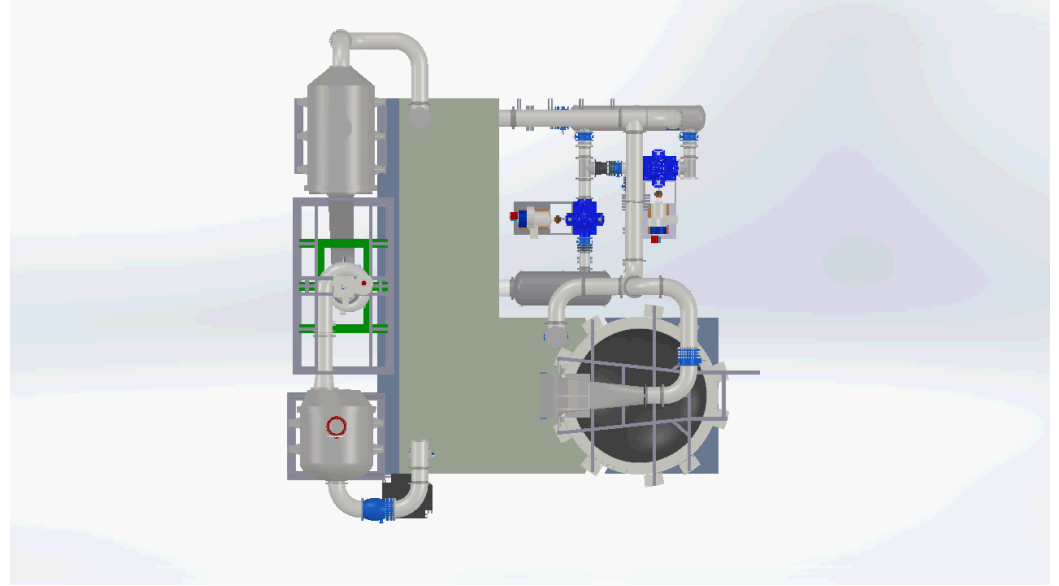
### TOBB ETU HYDRO ENERGY RESEARCH CENTER

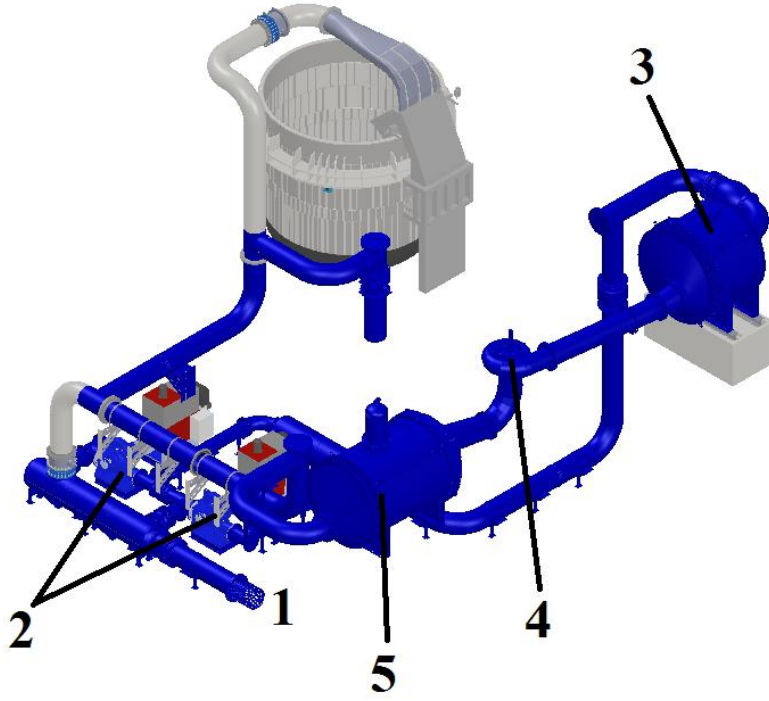
- Computational Design Laboratory
- Turbine Manufacturing Laboratory
- Hydroturbine Test Laboratory



# ETÜ HİDRO

- Test düzeneğinin özellikleri:
  - İki katlı lab
  - 24m x 24m taban alanı
  - 19 metre yükseklik
  - 650 metreküplük havuz
  - 2 MW kurulu güç
  - 1600 rpm max dönüş hızı
  - Herbiri 1 MW'lık 2 pompa,
  - 160 m düşü ve 2 m<sup>3</sup>/s debi
  - Seri ve paralel Pompalar
  - Francis tipi türbin testleri
  - Kavitasyon görüntüleme
  - 2 MW güç kapasitesi



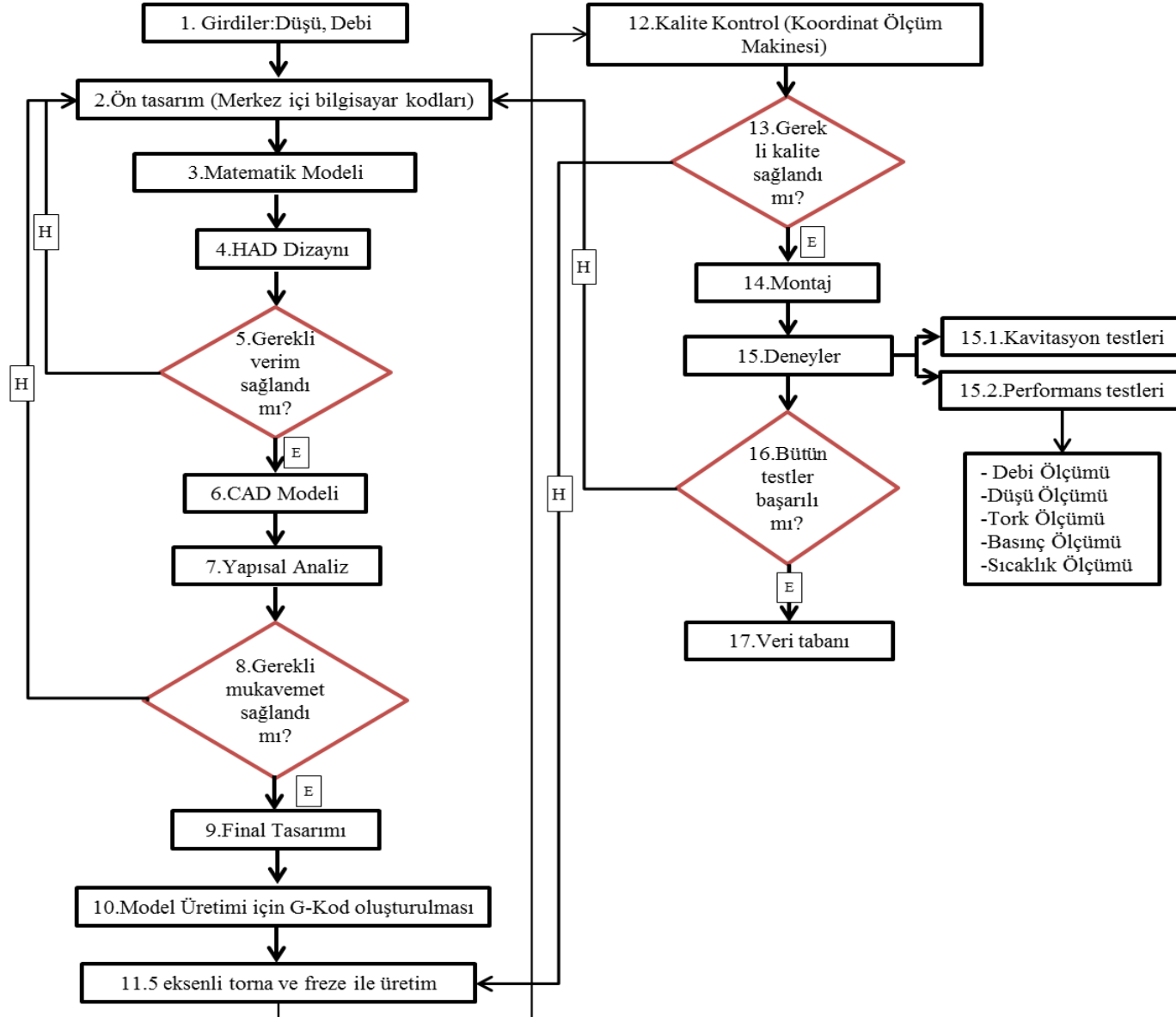


# ETÜ HİDRO

## • Açık çevrim ve Performans Testi

- Performans testleri için, düzenek, açık çevrim konfigürasyonunda çalıştırılacaktır.
- Çevrimin, açık çevrim olarak isimlendirilmesinin sebebi, düzenekten geçen suyun, rezervuardan alınıp rezervuara dönmesidir.
- Performans testlerinin, dönüş hızı parametresi sabit tutularak yapılması önerilir. Bu şekilde, yapılan ölçümlerin tümünde, modelin Reynolds sayısı sabit kalacaktır.
- Test esnasında; rezervuardan (1) temin edilen su, pompalar(2) vasıtasıyla yüksek düşü tankına iletilir. Yüksek düşü tankından(3) model türbine(4) gelen su, enerjisini bırakarak model türbini terk eder. Su, model türbinden sonra düşük düşü tankına(5) gider. Düşük düşü tankından ise tekrar rezervuara boşaltılır.

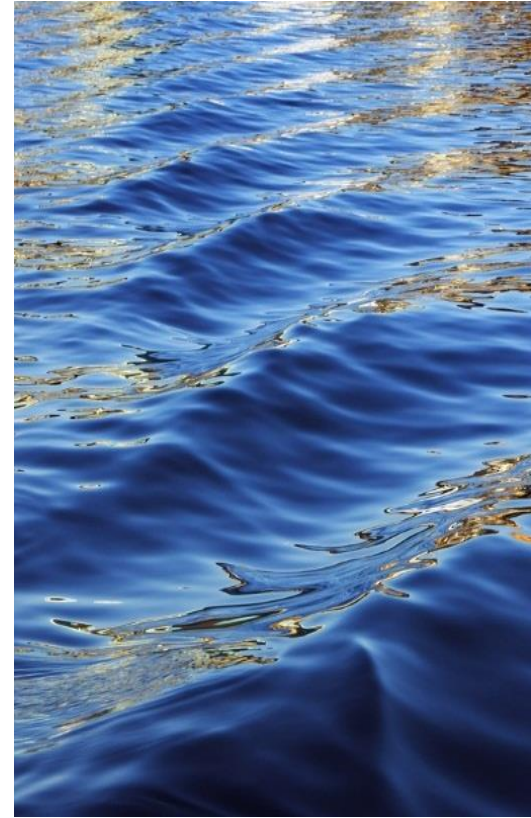
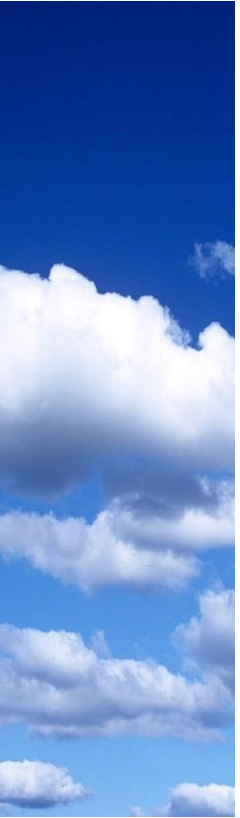
# SAYISAL YÖNTEMLER İLE TASARIM METODOLOJİSİ





# GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

DR. ECE AYLI





# PARTNERLER



- TUBITAK (110M539), "Hidroelektrik Santral Bileşenlerinin Yerli Olarak Tasarımı ve Üretimi (MILHES) ", Bütçe: 20 Milyon TL, 2021.
- MILHES, Yerli Hidroelektrik Santral Projesi", Tübitak Kamag destekli (113G109), bütçe: 23 milyon TL (4 milyon TL'si TOBB ETÜ'nün payı olmak üzere), Şubat 2015-Şubat 2021.
- Enerji Üretiminde Verimlilik, IPA 2013 CSo1c, Avrupa Birliği Projesi, 2019-2020

# Yapılan Çalışmalar

- Dizayn
- Rehabilitasyon
- Mevcut Durum Analizi

• Buski  
HES

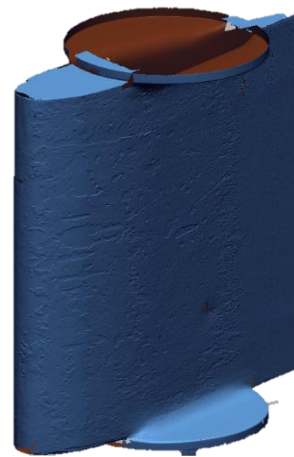
• Kepez HES

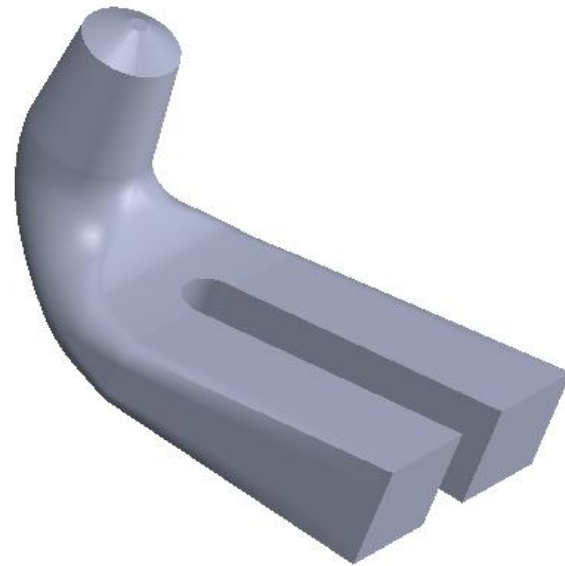
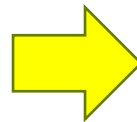
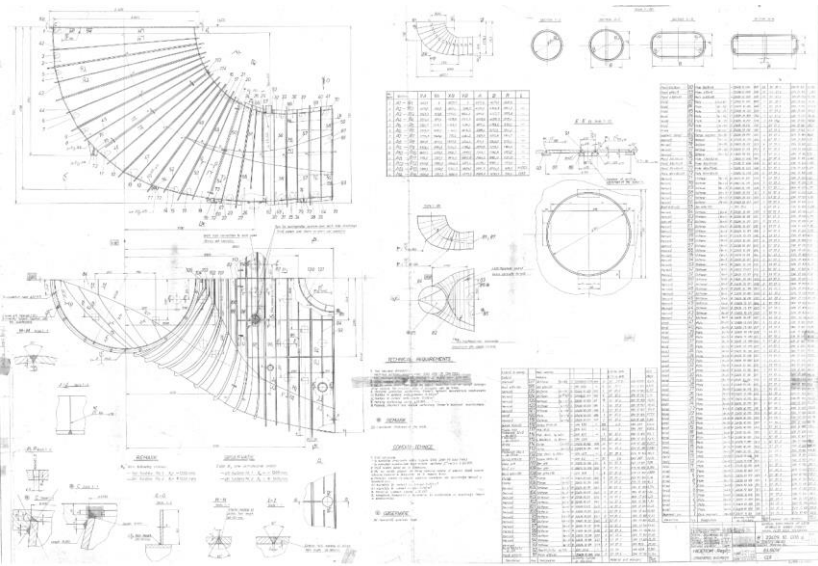
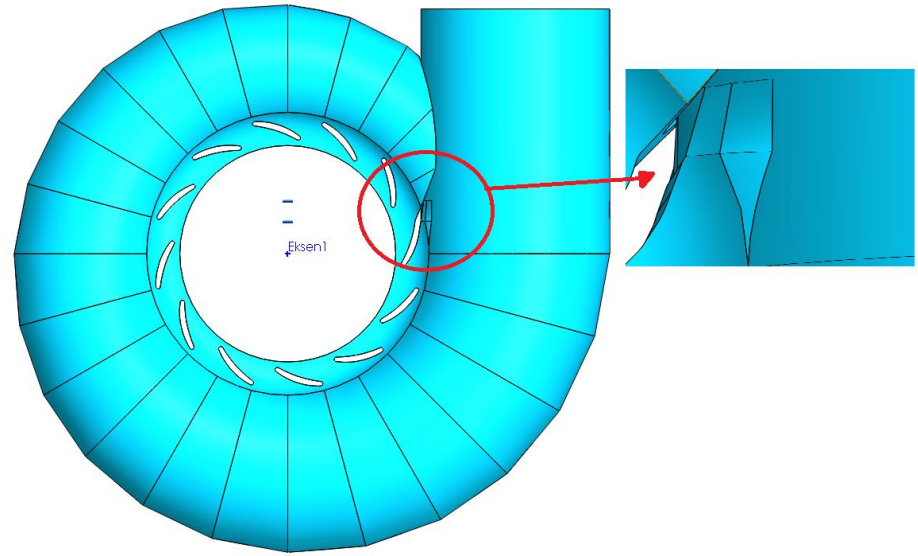
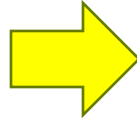
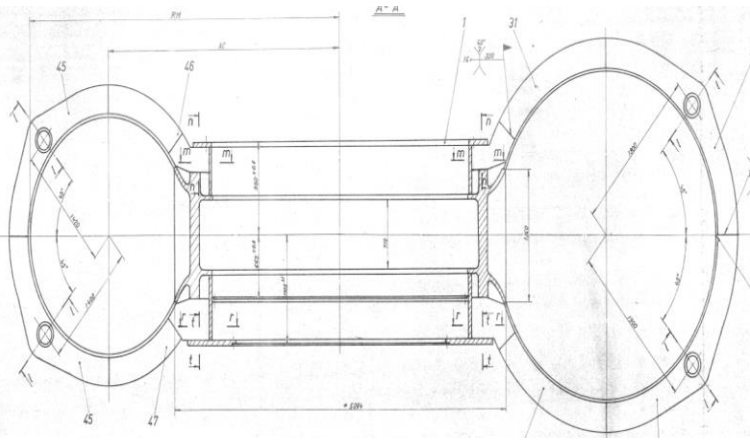
• Altinkaya  
Hes  
• Gezende  
HES  
• Kılıçkaya  
HES

# Scanning of the Runner

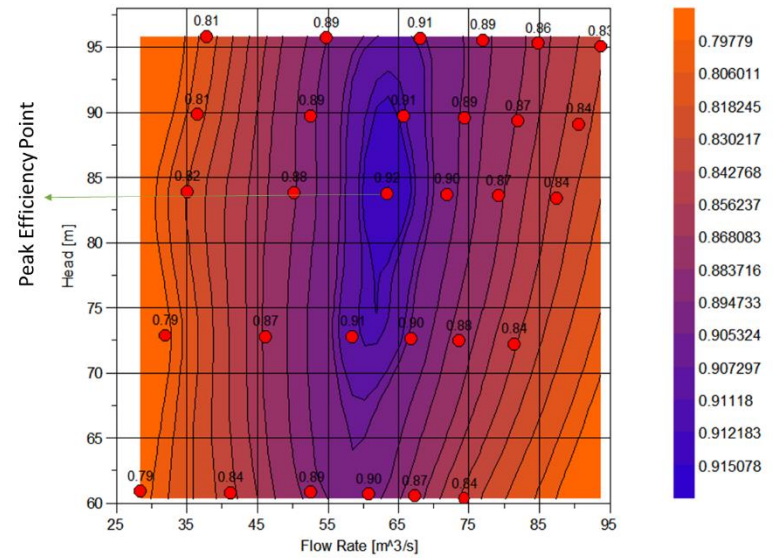
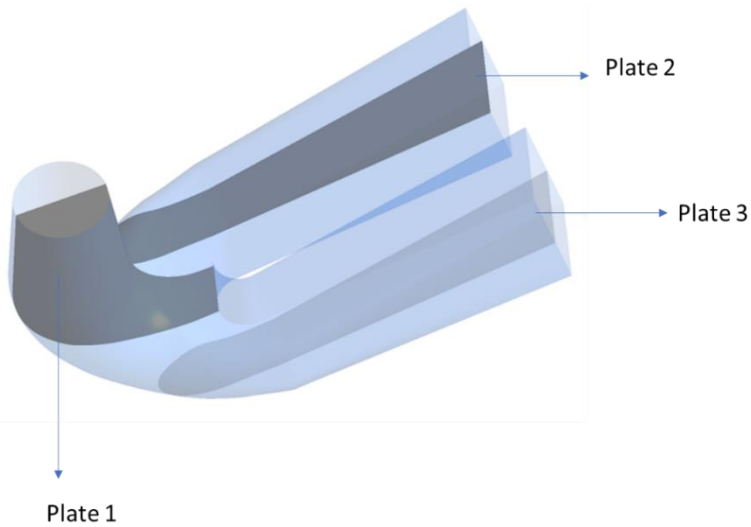
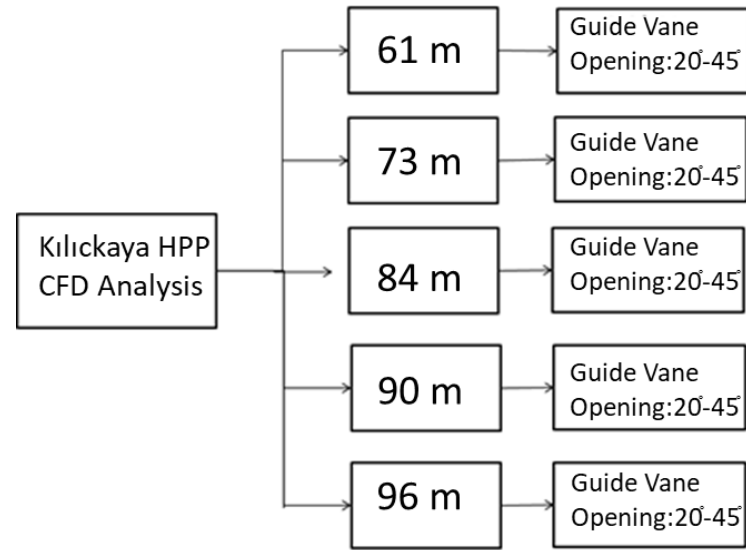
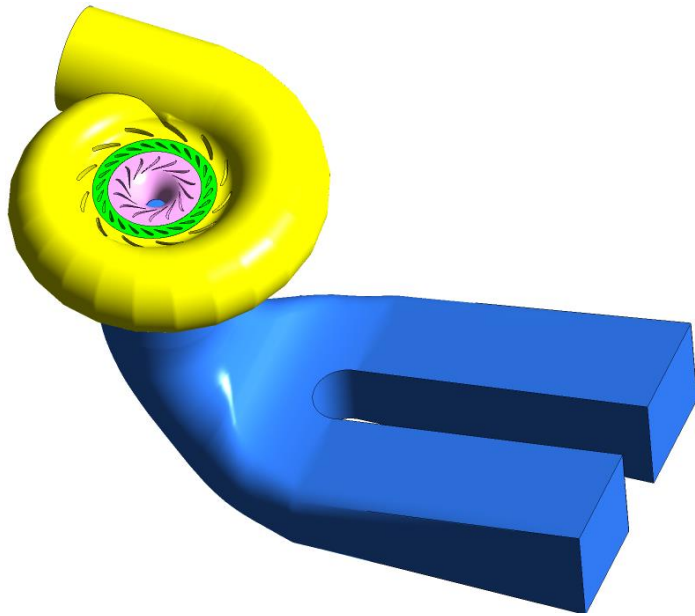


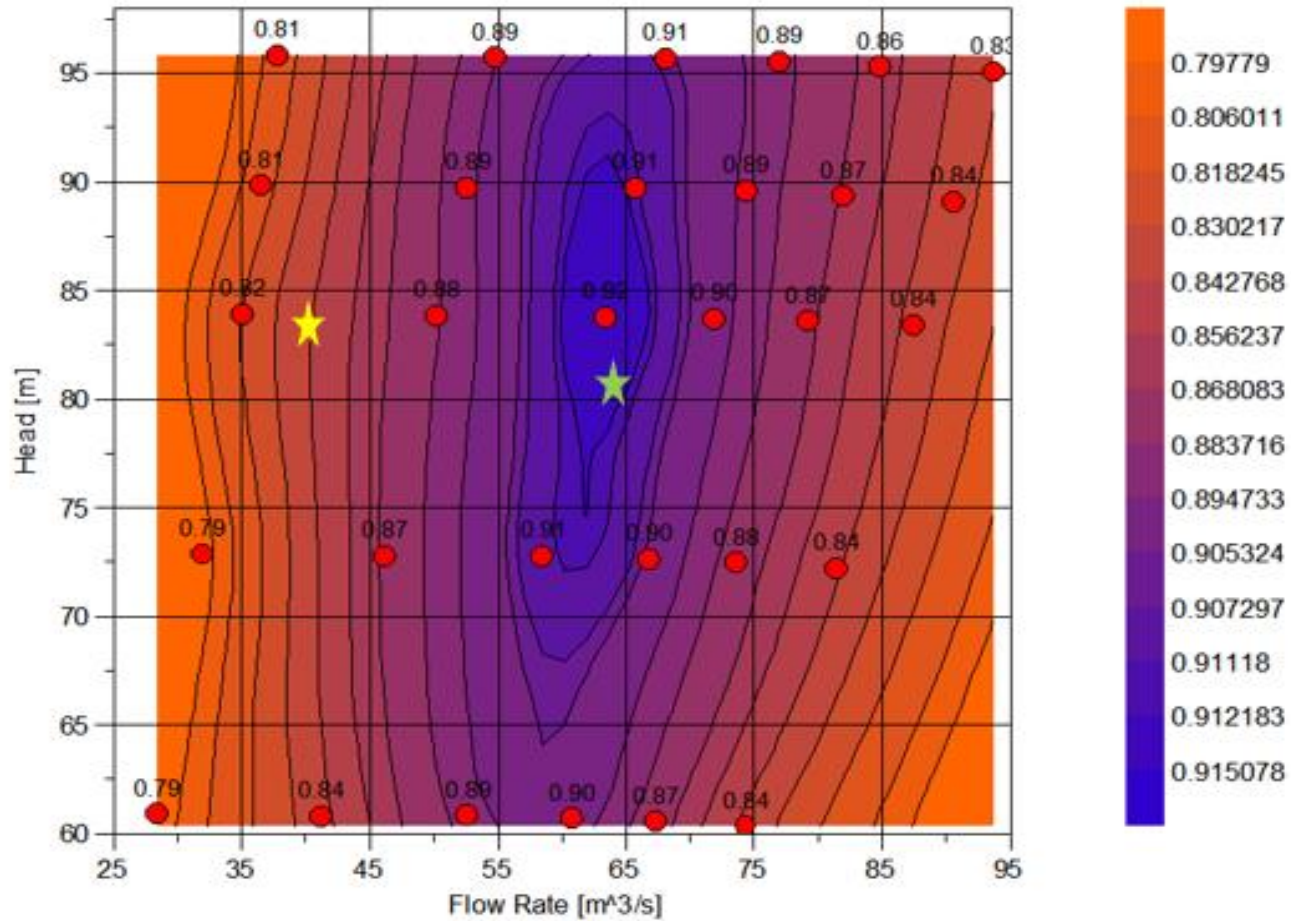
# Scanning of the Guide Vane











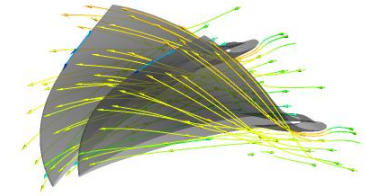
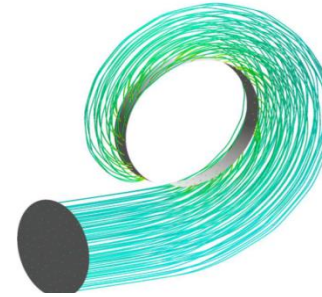
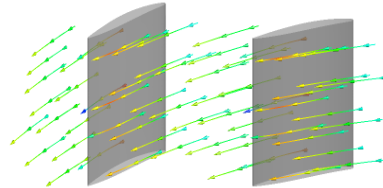
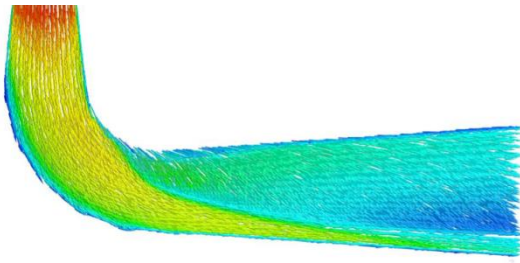


Symbol	Guaranteed Efficiency Value	CFD Efficiency Value
	82.6	81.8
	90.3	91.5



# Dizayn Çalışmaları

Parametreler	Ataköy HES	Köprübaşı HES	Yuvacık HES	Buski HES	Birim
$\omega$ (Açısal Dönme Hızı)	78,54	104,72	104,72	104,72	[rad/s]
Q (Debi)	4,25	3,75	2,50	2	[m <sup>3</sup> /s]
H[in-out] (Düşü)	66	126	45	78	[m]
$\eta$ (Verim @ BEP)	91.4	92.0	92.0	94	[%]



# SAYISAL YÖNTEMLER İLE TASARIM METODOLOJİSİ

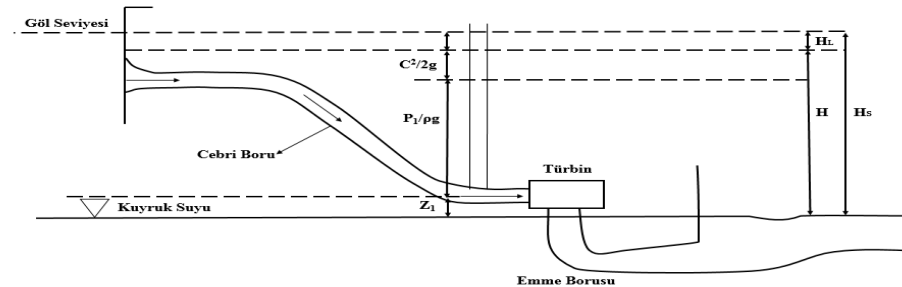
## Tasarım Parametrel eri: Debi ve düşü

Debi:

- ✓ her bir türbin tasarımına göre değişiklik gösterir
- ✓ Optimum noktayı bulabilmek açısından, bir türbin tasarımı aşamasında birden fazla değer denenebilmektedir (güç etkisi)
- ✓ Her kanada eşit debi varsayımı

Düşü:

- ✓ sistemde var olan hidrolik kayıplar tarafından belirlenir.
- ✓  $H = H_s - h_L = \text{brüt statik düşü} - \text{hidrolik kayıplar}$



- ✓ Düşü artarsa, toplam basınç artacak ve dolayısıyla üretilen güç artar.
- ✓ verimlilik, güç, dönme hızı, özgül hız ve kanat açıları bu iki parametre kullanılarak hesaplanır.

**Güç**

$$P_i = \rho g Q H$$

**Verimlilik**

$$\eta = \frac{P}{P_i} \Rightarrow P = \rho g Q H \eta$$

**Senkron Hız**

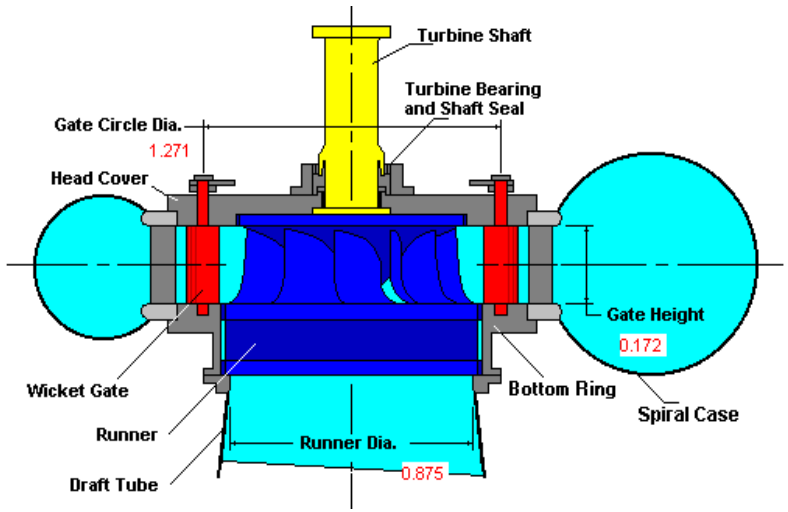
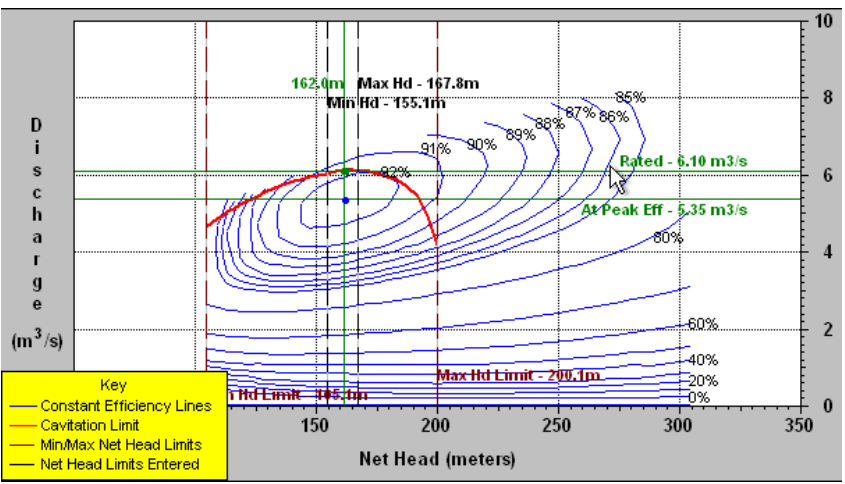
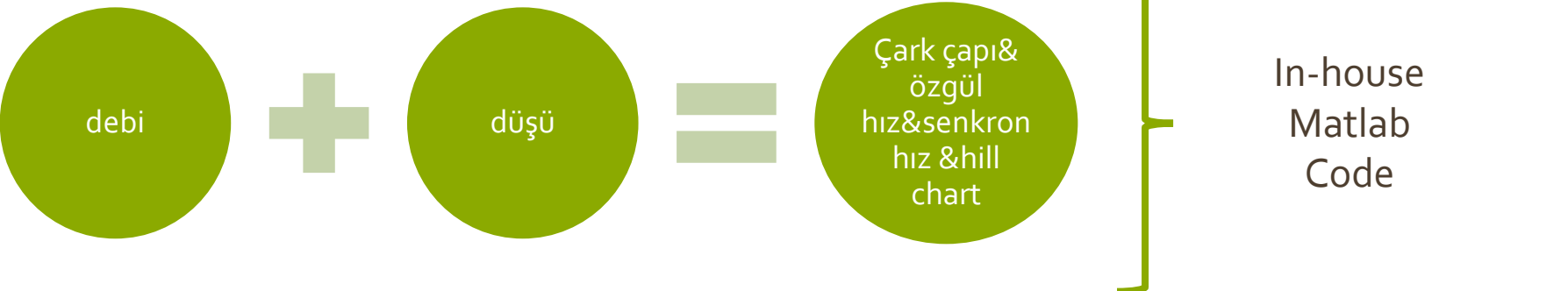
$$n_{senk} = \frac{120 * f}{\text{kutup sayısı}}$$

**Özgül Hız**

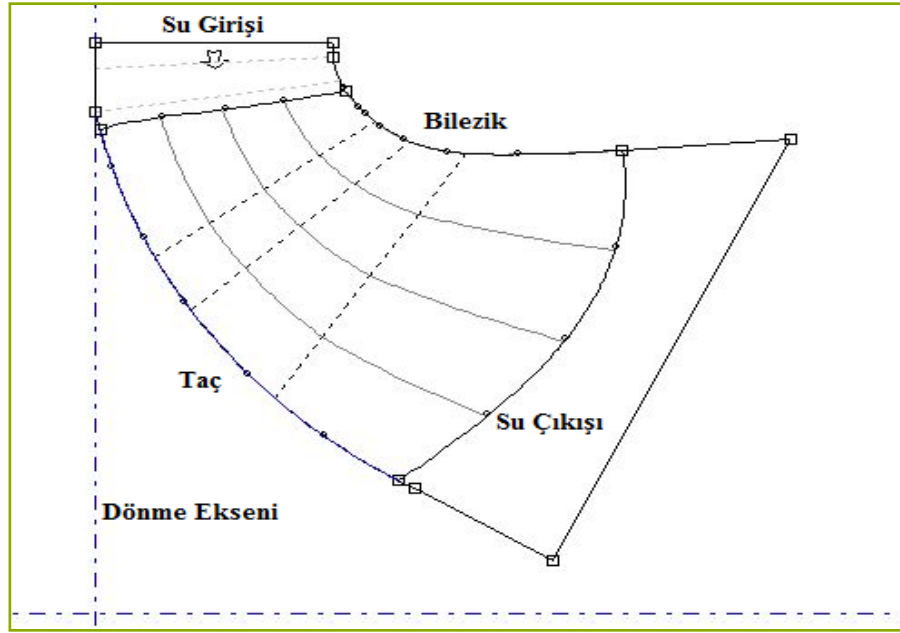
$$n_s = n_{sync} \frac{P^{0.5}}{H^{1.25}}$$

# SAYISAL YÖNTEMLER İLE TASARIM METODOLOJİSİ

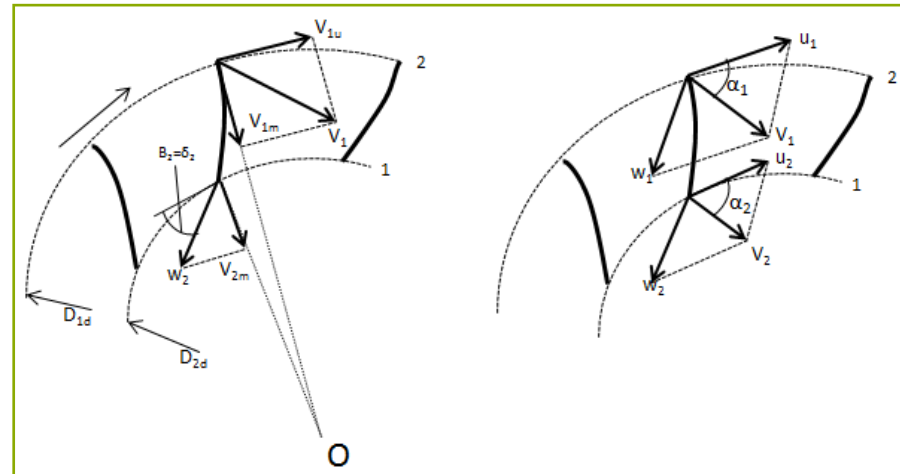
- ✓ Türbin çarkının başlangıç geometrisi türbinin senkronize dönüş hızı, tasarım düşüsü ve tasarım debisi parametreleri ile belirlenir.
- ✓ Ön Tasarım: Çark giriş çapı, ayar kanadı yüksekliği, çark çıkış çapı, shaft çapı → çark ana ölçüleri
- ✓ Çizelgeler&Programlar& Literatürler



# SAYISAL YÖNTEMLER İLE TASARIM METODOLOJİSİ

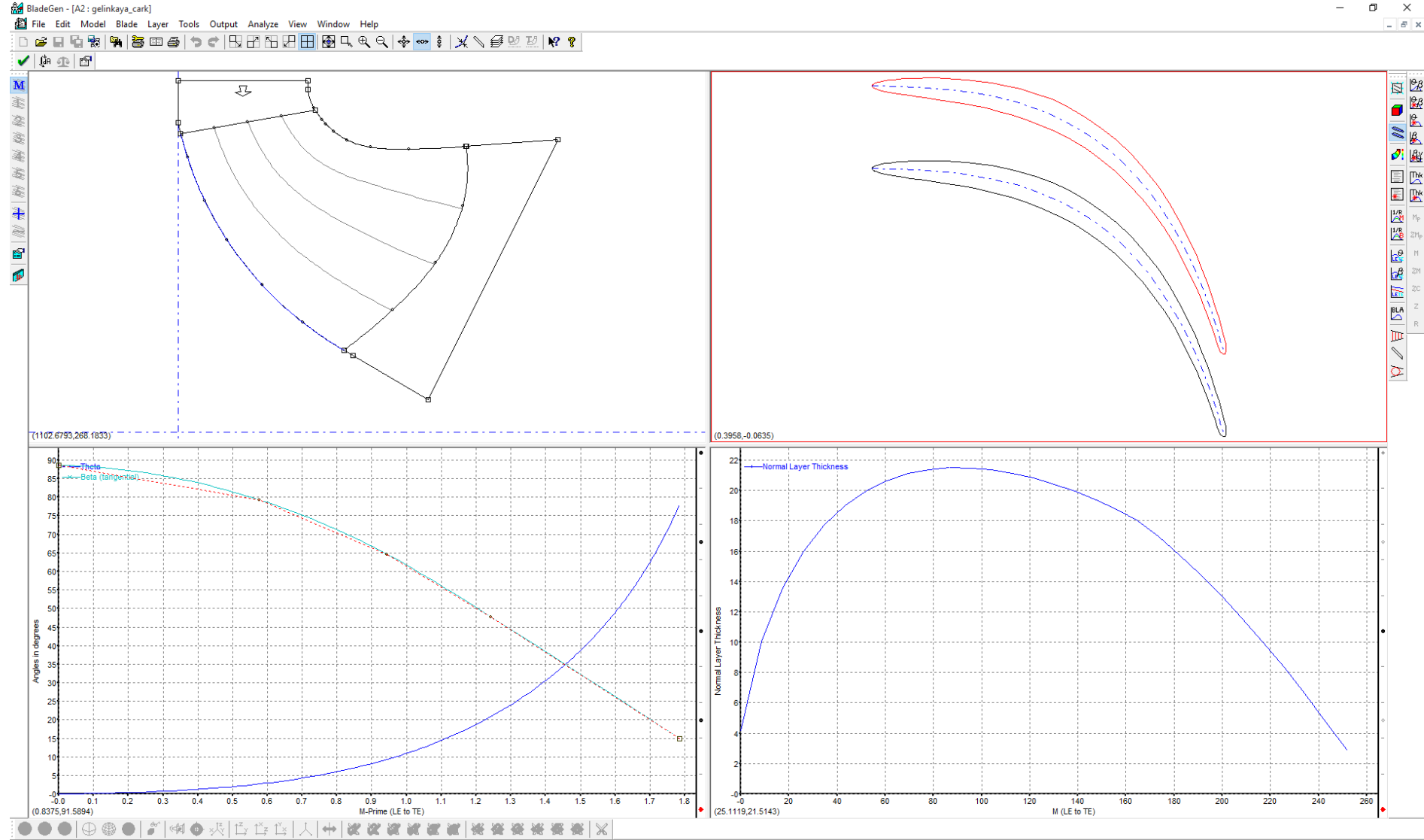


- ✓ Türbin çarkının ön tasarımı çapsal boyutların hesaplanmasından sonra çarkın **meridyonel profilinin** belirlenmesi ile devam eder!
- ✓ Geometri üzerindeki akış çizgilerini kolay tanımlamak için kanadın dönme yüzeyi kesitsel olarak tanımlanır.
- ✓ Bu iki boyutlu tanımlamaya meridyonel profil adı verilir.
- ✓ Bu profil, giriş ve çıkış tanımlamaları, taç ve bilezik profilinin belirlenmesi ve kanat açılarının tanımlanmasında kolaylık sağlamaktadır.
- ✓ Belirlenen parametreler ve oluşturulan meridyonel profil sonrasında kanat şeklinin verilebilmesi ve doğru bir akış alanı oluşturulabilmesi için **BladeGen** programı kullanılır.



Beta ve teta açıları!

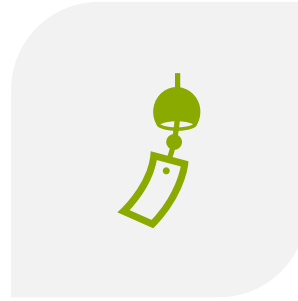
# SAYISAL YÖNTEMLER İLE TASARIM METODOLOJİSİ



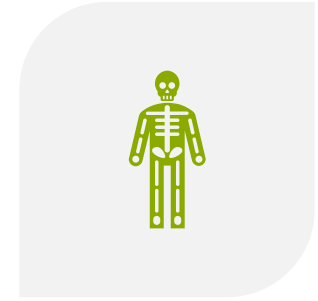
# SAYISAL YÖNTEMLER İLE TASARIM METODOLOJİSİ



KANAT BASINÇ  
YÜKLEMELERİ  
KONTROLLERİ



CM, CU KONTROLLERİ VE  
OPTİMİZASYONU

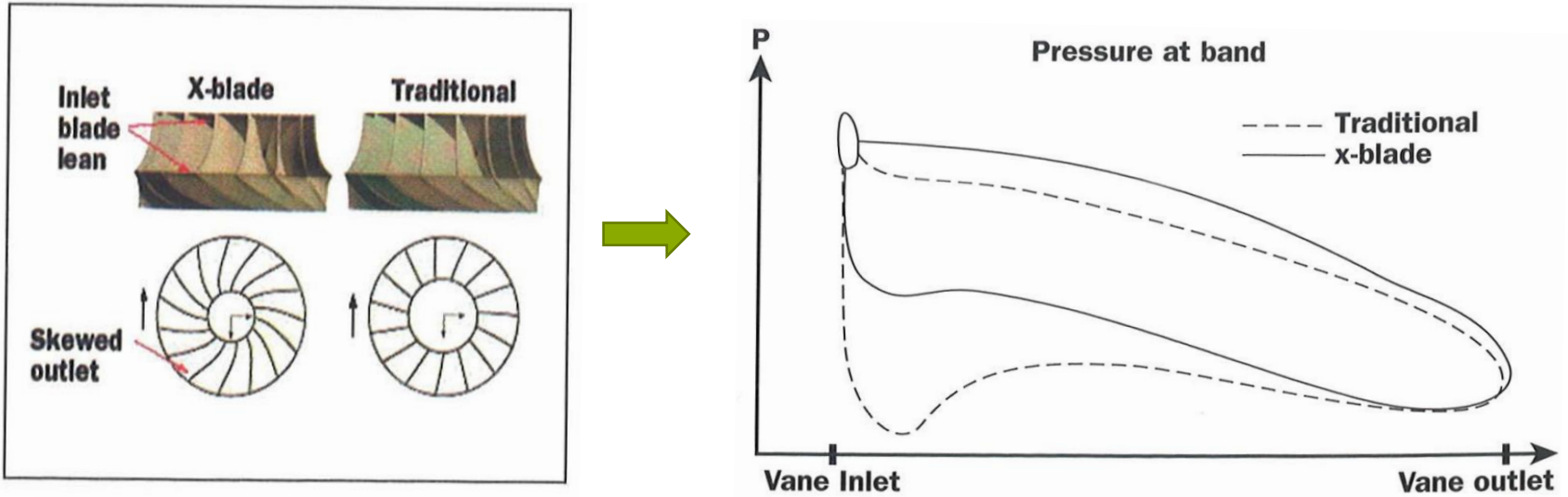


VERİM VE KAVİTASYON  
OPTİMİZASYONU (İSTENEN  
DEBİ KONTROLÜ İLE)



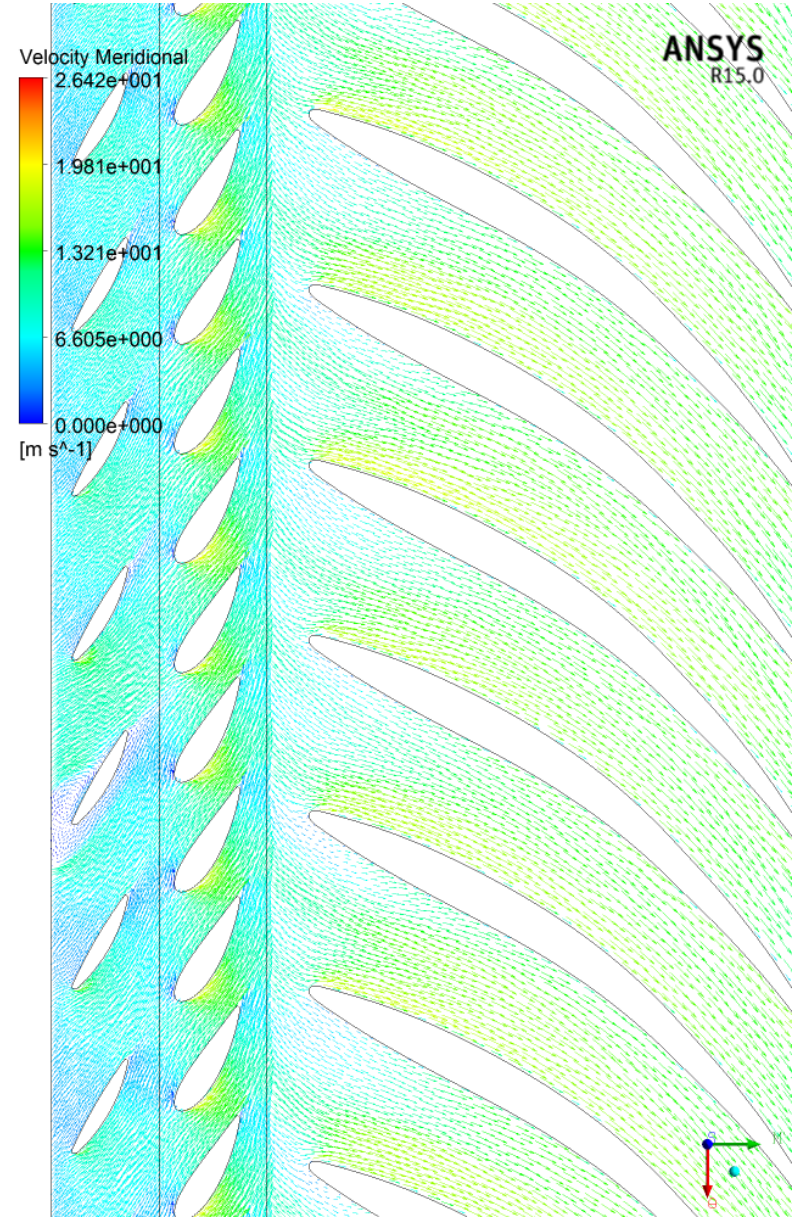
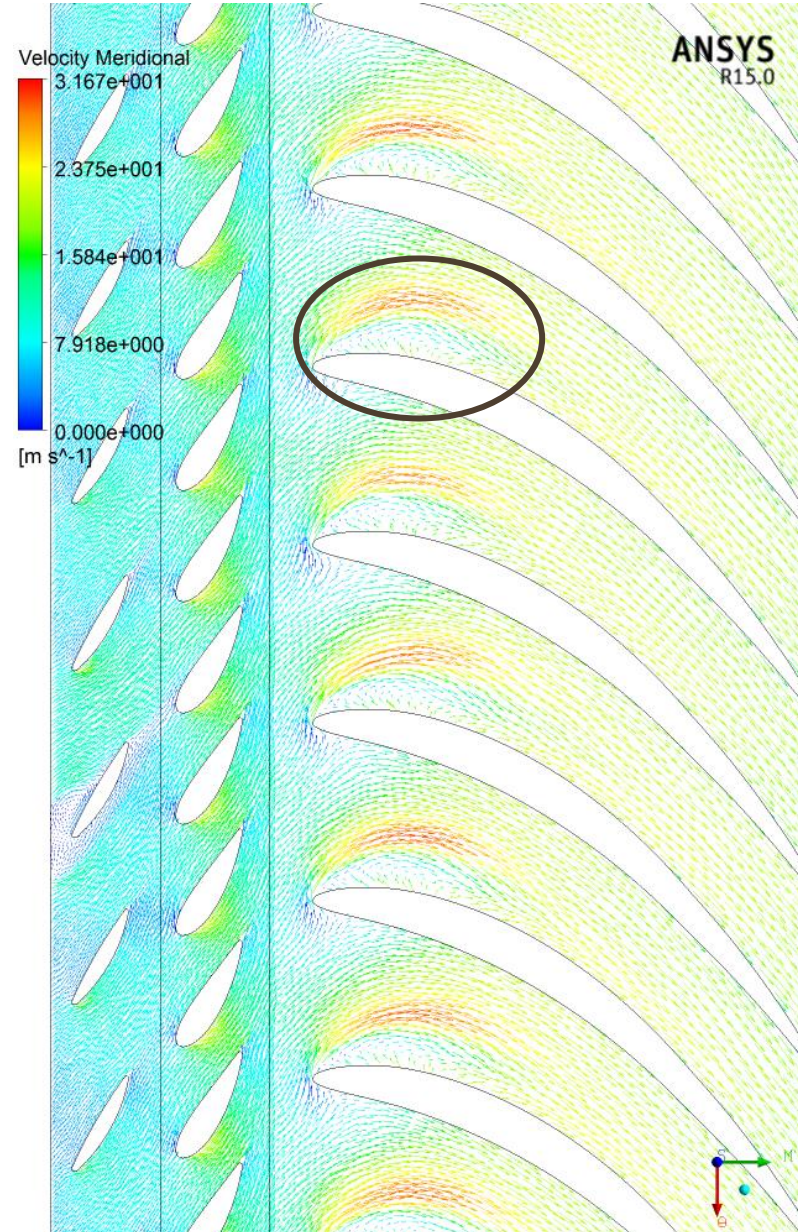
# SAYISAL YÖNTEMLER İLE TASARIM METODOLOJİSİ

- Geleneksel Francis türbin çarkı tasarımlarında, çark kanadının emme tarafında özellikle giriş kenarında kavitasyon hasarı oluşmaktadır. Bu tür bir kavitasyon kanada önemli derecede hasar vermekte, kaynakla tamir edilmesi hatta bazı durumlarda daha zor ve maliyetli tamirlere ihtiyaç duymaktadır



Geleneksel çarklarla karşılaştırıldığında X-blade tasarıma sahip kanatlar giriş ve çıkış kenarlarının bükülmüş bir geometriye sahiptir.

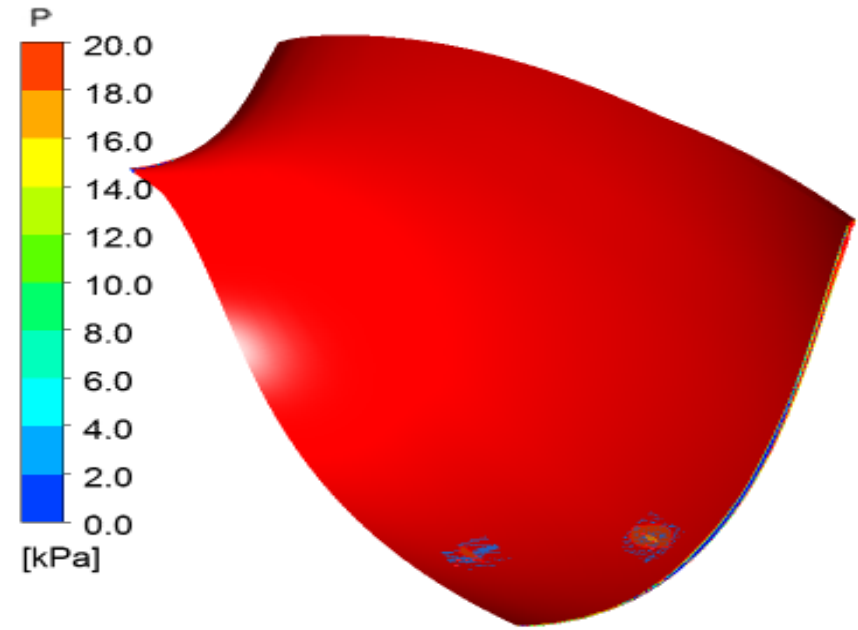
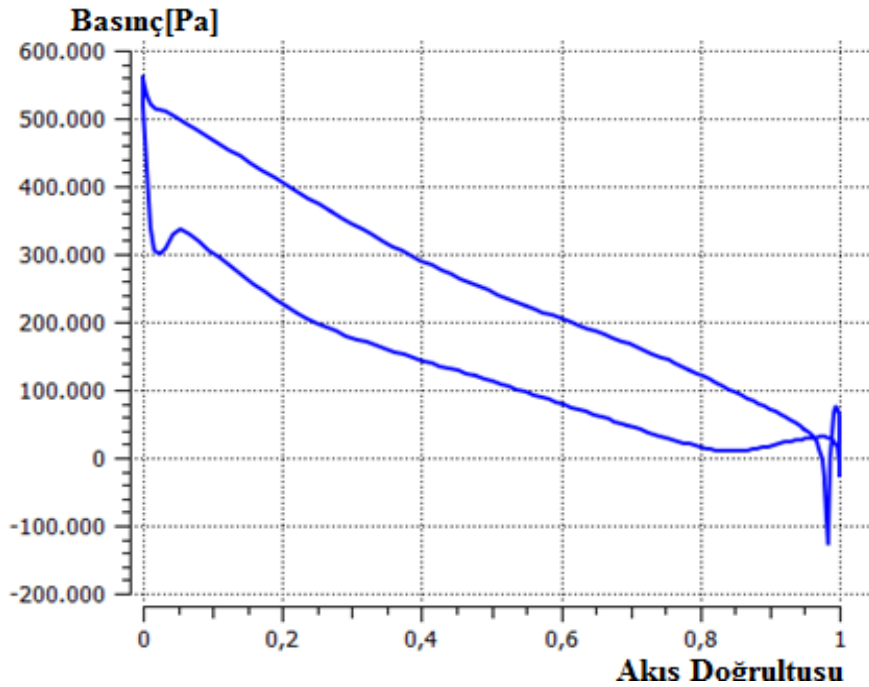
# SAYISAL YÖNTEMLER İLE TASARIM METODOLOJİSİ





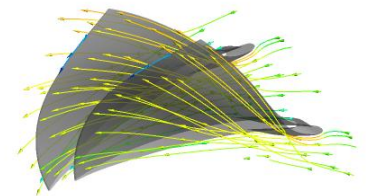
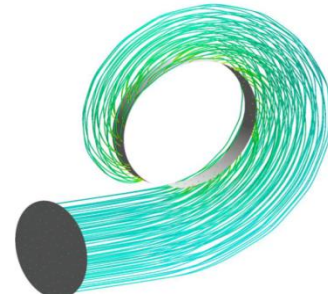
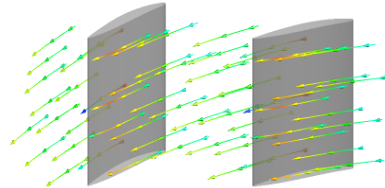
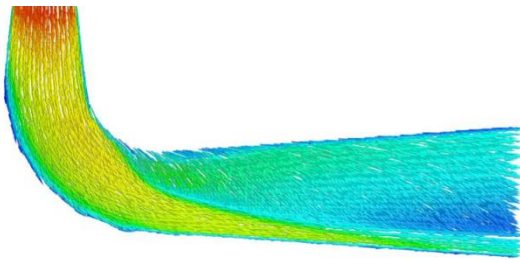
# SAYISAL YÖNTEMLER İLE TASARIM METODOLOJİSİ

yüksek akış hızına sahip bölgelerde suyun buhar basıncının altına düşmesiyle oluşur . Kaviteasyon, verimliliği düşüren nedenlerden bir tanesidir ve yok edilmesi için kanat üzerindeki basınç değerinin, suyun buhar basıncı değerinin altına düşmesi önlenmelidir.



# GERÇEKLEŞTİRİLEN TASARIMLAR

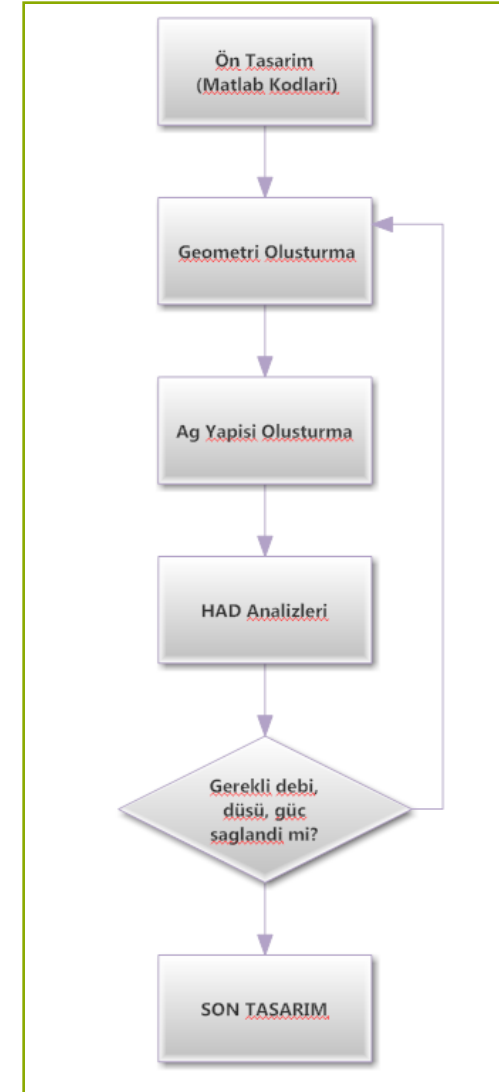
Parametreler	Ataköy HES	Köprübaşı HES	Yuvacık HES	Buski HES	Birim
$\omega$ (Açısal Dönme Hızı)	78,54	104,72	104,72	104,72	[rad/s]
Q (Debi)	4,25	3,75	2,50	2	[m <sup>3</sup> /s]
H[in-out] (Düşü)	66	126	45	78	[m]
$\eta$ (Verim @ BEP)	91.4	92.0	92.0	94	[%]



# GERÇEKLEŞTİRİLEN TASARIMLAR

- Yapılan alıŐmalar Türkiye'de kurulacak bir santral için gerçekleŐtirilmiŐtir. BUSKİ HES kapsamında yatay eksenli Francis tipi su türbini tasarımı yapılmıŐtır. Santralin kurulu gücü 1.4 MW olacaktır. HES toplamda 2 m<sup>3</sup>/s debiye ve 78 m net dŐye sahiptir. Debi ve düşü belli olan bu türbini tasarımı geliŐtirilmiŐ olan tasarım metodolojisi kullanılarak gerçekleŐtirilmiŐtir.

Debi	2m <sup>3</sup> /s
DÜŞÜ	78 m
Devir	1000 rpm
G	1.4 MW

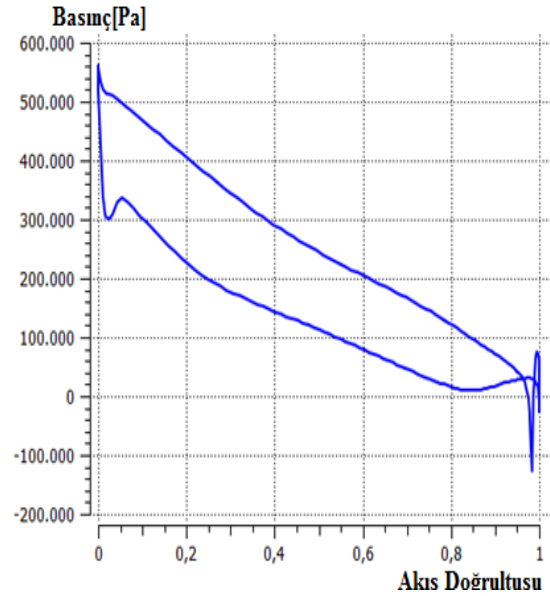


# GERÇEKLEŞTİRİLEN TASARIMLAR

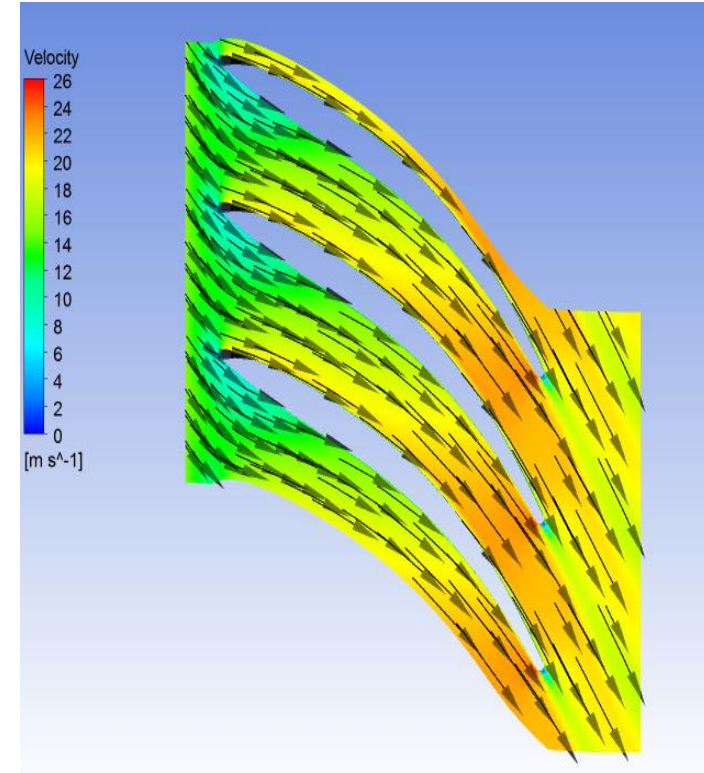
- Benzerlik eşitlikleri sonucunda çark giriş çapı 581 mm olacak şekilde ve kanat yüksekliği 100 mm olacak şekilde boyutsal olarak Gelinkaya çarkı küçültülerek çark geometrisi oluşturulmuştur.

Çark için performans sonuçları

Dönüş Hızı, $n$ (rad/s)	104.72
Referans Çap, $D$ (m)	0.35
Debi ( $m^3/s$ )	2.01
Düşü, $H$ (LE-TE) (m)	72.95
Düşü, $H$ (IN-OUT) (m)	73.86
Mil Gücü (MW)	1.41
Toplam Verimlilik %	96.69

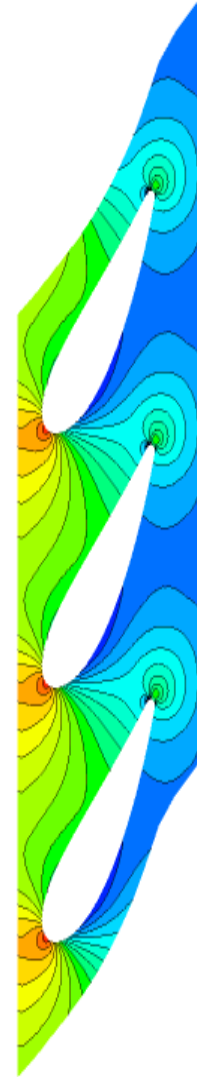
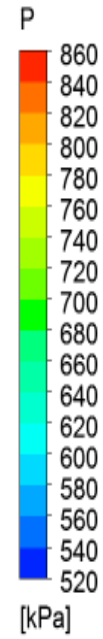
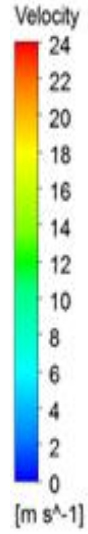
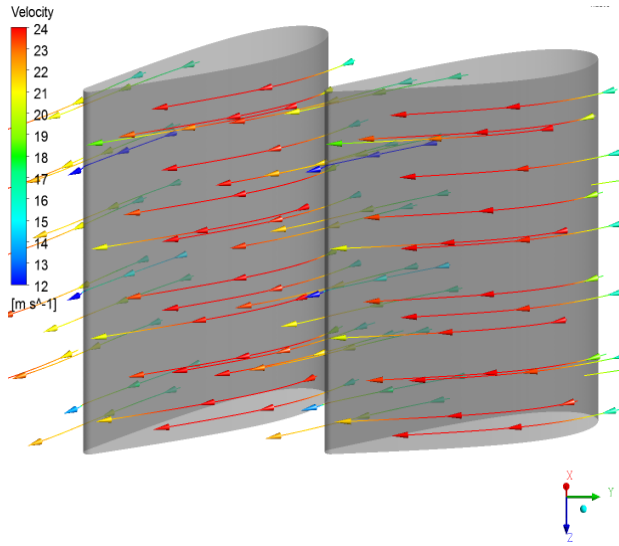


Çark kanadı üzerindeki ortalama yük dağılımı

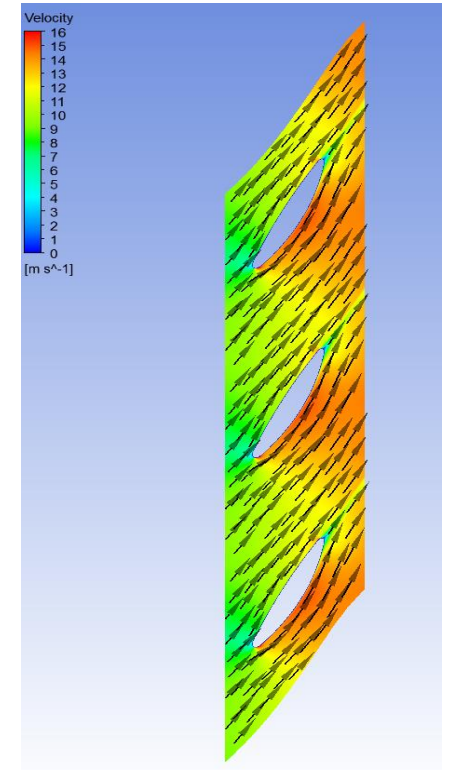
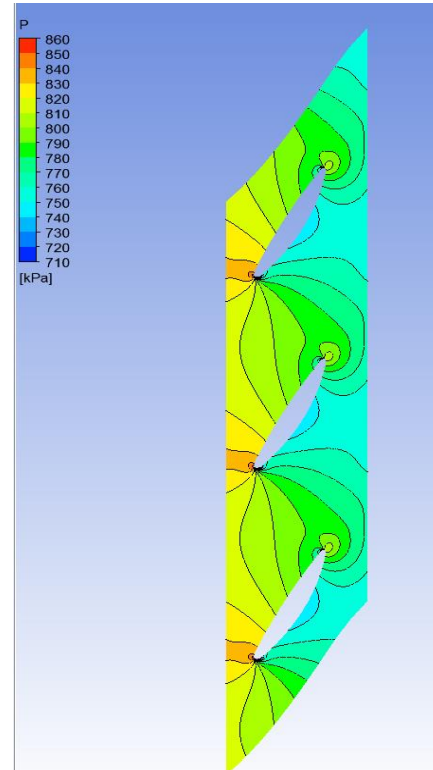
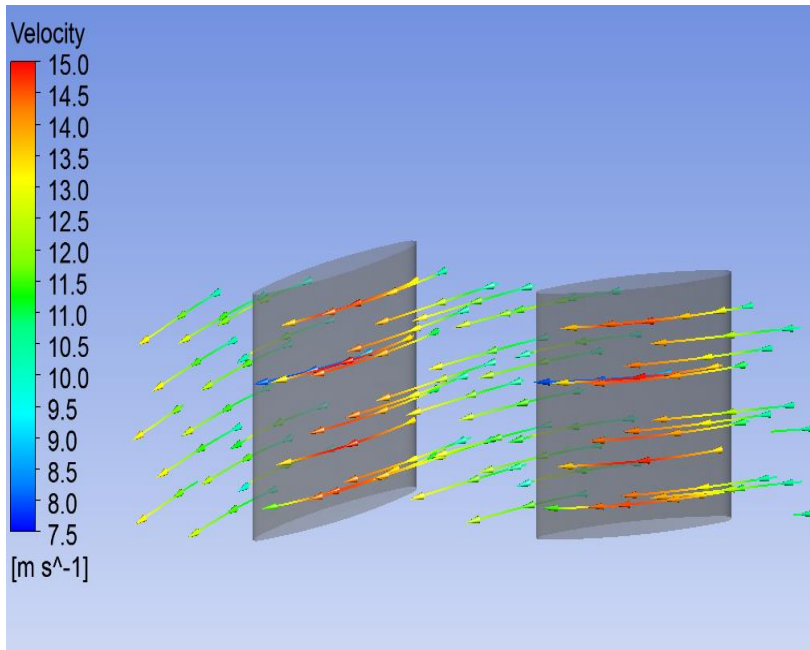




# GERÇEKLEŞTİRİLEN TASARIMLAR

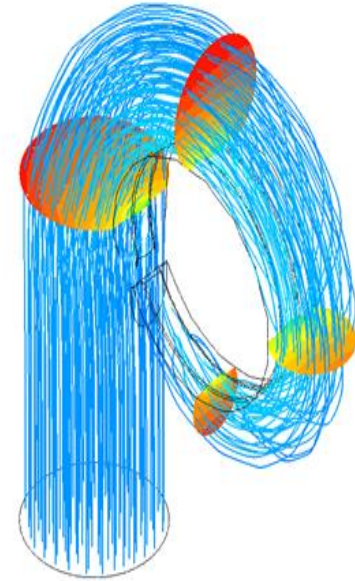
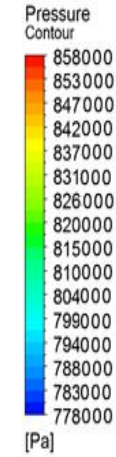
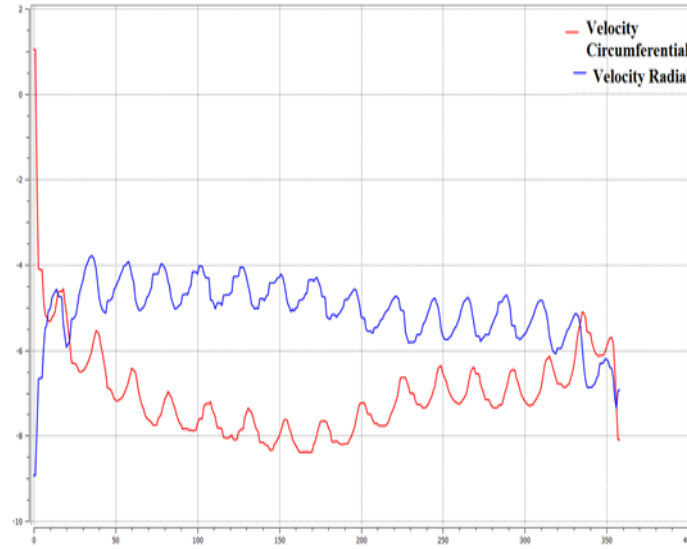


# GERÇEKLEŞTİRİLEN TASARIMLAR



# GERÇEKLEŞTİRİLEN TASARIMLAR

	Giriş	Çıkış
Toplam Basınç, Pt [Pa]	866505	860330
Basınç, P [Pa]	856210	821450
Hız, C [m/s]	4.53	5.40
Alan, A [m <sup>2</sup> ]	0.441458	0.370173
Toplam Düşü [m]	78.00	77.37
H giriş- H çıkış [m]	0.63	

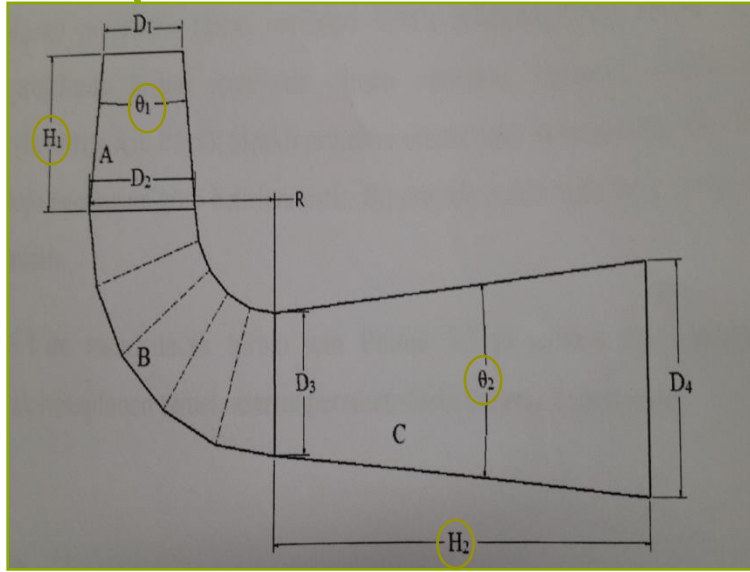


# GERÇEKLEŞTİRİLEN TASARIMLAR

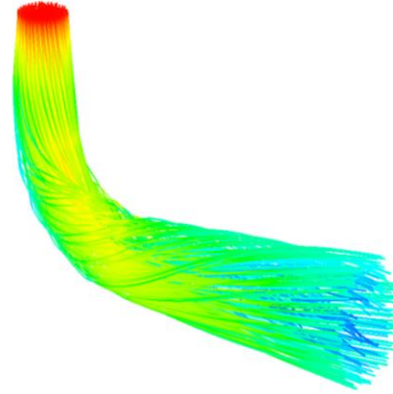
- Yayıcı tüp tasarımında en önemli parametre geri kazanım oranıdır. Geri kazanım oranının matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir. Bu oran fiziksel olarak ise çark çıkışındaki kinetik enerjinin yayıcı tüpte ne kadarının geri kazanılabildiğinin göstergesidir.

$$C_p = \frac{P_{out} - P_{in}}{\frac{\rho v^2}{2}}$$

Çark Çıkış Çapı

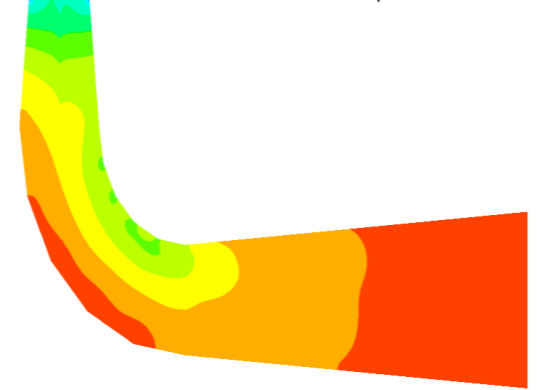


velocity  
9  
7  
5  
2  
0  
[m s<sup>-1</sup>]



0 1.000 2.000 (m)  
0.500 1.500

Pressure [Pa]  
50200  
55512  
60824  
66136  
71448  
76760  
82072  
87384  
92696  
98008  
103320



0 0.500 1.000 (m)  
0.250 0.750

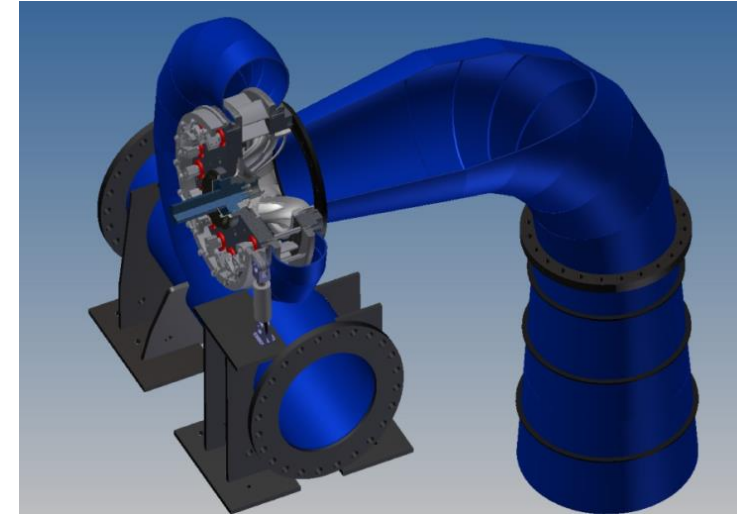


# GERÇEKLEŞTİRİLEN TASARIMLAR

- Tüm parçalar tek tek tasarlandıktan sonra tam türbin analizi yapmak gerekmektedir çünkü türbin komponentlerinin akış yapıları birbirleri ile yakından ilişkilidir. Dinamik kuvvetlere bağı olarak özellikle ayar kanatları, emme borusu ve çark birbirlerinden etkilenmektedir.

## Genel Performans Değerleri

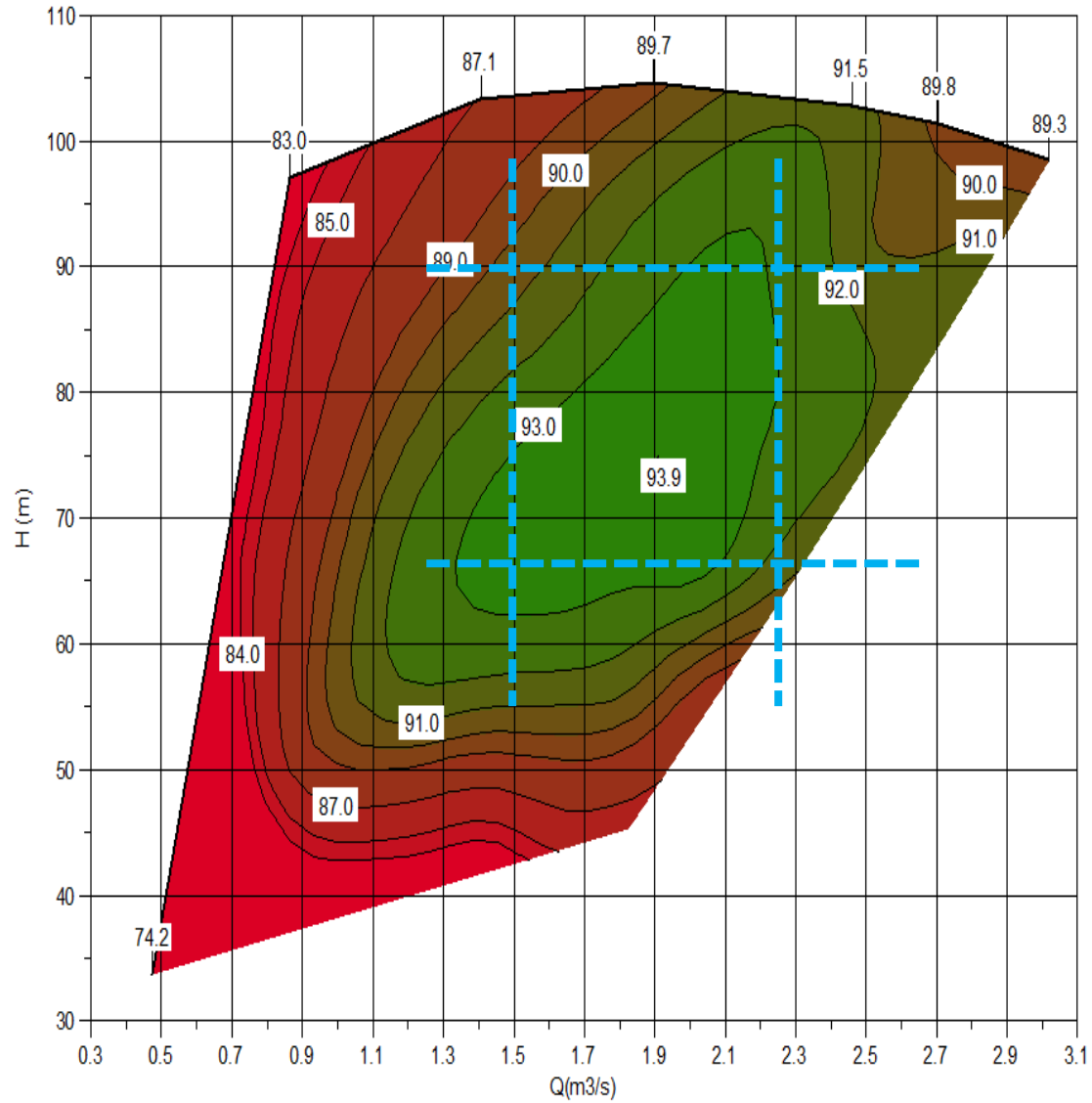
	Salyangoz	Sabit Kanat	Ayar Kanadı	Çark	Emme Borusu
Performans (Efficiency)	0.993	0.998	0.986	0.967	0.957
$\Delta H$ (m)	0.63	0.2	1.77	73.87	0.47
Kayıplar	1.5%				
Toplam Verim	93.9 %				
Düşü	78 m				
Debi	2.0 m <sup>3</sup> /s				
Güç	1400 kW				



Tasarlanan Francis Türbini



# GERÇEKLEŞTİRİLEN TASARIMLAR





## Yerli Kaynaklar ile Rehabilitasyon

- Antalya'daki Kepez-1 Hes'in eskiyen türbini söküldü ve yerine tamamı Türkiye'de son teknoloji ile tasarlanan, test edilen ve üretilen yenisi takıldı!
- Milhes kapsamında; türbinlerin üretiminde en kritik aşama olan 'model türbin'in tasarımı ve test edilmesi de, Türkiye'de ilk kez TOBB ETÜ'de gerçekleştirildi. TOBB ETÜ'de gerçekleştirilen Kepez-1'in model türbin testi ekonomiye 400 bin euroluk döviz tasarrufu sağladı.
- Testin ardından; imalata hazır tüm teknik resim ve türbine ait katı modeller türbin üreticisine verildi.

## Yerli ve milli HES türbini üretiliyor



Hidroelektrik santralleri türbini, yerli ve milli olarak geliştirildi. Geliştirilen ve testi yapılan türbinin üretimi de başladı. Böylece sıkıhka gündeme getirilen tasarım-Ar-Ge'nin ticari ürüne dönüşmesi bağlamında bir proje ticari somut çıktı sağlamış oldu. Türbinin, Ekim 2018 itibarıyla elektrik üretmeye başlaması hedefleniyor.

MEHMET KAYA/ANKARA

Türkiye'de ilk kez hidroelektrik santrallerinde elektrik üreten esas türbin olan yerli ve milli olarak geliştirildi. Üretilen türbinin ve testi yapılan türbinin üretimi de başladı. Üretimizin kamu eylemi kapsamında hazırlanan türbin, Antalya'daki Kepez-1 hidroelektrik santraline (HES) takılacak. Ekim 2018 itibarıyla yerli ve milli türbinin elektrik üretmeye başlaması hedefleniyor.

TÜBİTAK destekli MILHES projesi kapsamında geliştirilen ve üretilen türbinin model türbin tasarımı ve testi TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesinde (TOBB-ETÜ) yapıldı. Özyüklenmiş çivili dişliçlerle birleştirilen türbinin yurt dışından test ettiril-

### MILHES PROJESİ HAKKINDA

- Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu, 2013 yılında MILHES Projesinin başlatılmasını kararlaştırdı.
- TOBB-ETÜ Su Türbin Tasarımı ve Test Merkezi'nin kurulumuna başlandı.
- Aynı yıl TÜBİTAK, MILHES projesiyle ilgili bir proje çağrısına çıktı.
- 5 Ocak 2015'te TOBB-ETÜ ve diğer ortaklar Kepez-1'de MILHES Projesi'nin inşaatına başladı.
- Ekim 2018'de TOBB-ETÜ Su Türbin Tasarımı ve Test Merkezi kurulmuş oldu. MILHES'in yüzde 100 Türkiye'de gerçekleştirilmesi mümkün oluyordu. Merkez, 2017 yılında türbin testi yapabilecek hale geldi.
- 2018 Nisan ayında model türbinin tasarımı ve testleri bitirilip belgelendirildi, esas türbinin inşaatına başlandı ve teslim edildi.
- 2018 Mayıs ayında KEPEZ-1'de elektrik üretimi durdurulup eski ekipmanın sökümü ve yeni ekipmanın takılması çalışmaları başladı.
- Kepez-1'in Ekim 2018 itibarıyla tamamı yerli, yeni hidrolik ekipmanla tekrar elektrik üretmeye başlaması planlanıyor.

## Yerli HES Türbini Üretildi!

Hidroelektrik Santral Bileşenlerinin Yerli Olarak Tasarımı ve Üretimi (MILHES) adlı Proje kapsamında, 2015 yılından bu yana üzerinde çalışılan ilk yerli türbinimiz üretildi. Test edilen türbinler, önümüzdeki günlerde Antalya'nın Düder Çayı üzerine kurulu Kepez-1 hidroelektrik santraline takılacak. Ayrıntılar haberimizde.

# TASARIM VE TESTLERİ TOBB ETÜ'DE YAPILDI

# İlk yerli hidroelektrik türbini Kepez-1'e



Türkiye'de ilk kez hidroelektrik santrallerde kullanılmak üzere yüzde yüz yerli ve milli türbin üretildi. MILHES projesiyle tasarlanan ve test edilen ilk türbinler Antalya'daki Kepez-1 hidroelektrik santraline takılacak

2015 yılında başlatılan "Hidroelektrik Santral Bileşenlerinin Yerli Olarak Tasarımı ve Üretimi (MILHES) Projesi" ilk meyvesini verdi. Türkiye'de tasarlanan, test edilen ve üretilen türbinler, Antalya'nın



## Yerli türbin üretildi



Neşe KARANFİL/ANKARA

TÜRKİYE'DE tasarım ve testleri TOBB ETÜ'de yapılan yüzde 100 yerli ve milli türbin üretildi. Daha önce sadece yurt dışından getirilerek hidroelektrik santrallerine takılabilen türbinler TÜBİTAK destekli MILHES projesiyle üretildi. Antalya'daki KEPEZ-1 HES'in eskiyen türbinini sökülü ve yerine Türkiye'de üretilen yenisi takılmaya başlandı. Türkiye'de şimdiye kadar inşa edilen HES'lere elektrik üretmek için takılan türbinler, yurt dışından alınıyordu. 2015 yılında başlatılan "Hidro Elektrik Santral Bileşenlerinin Yerli Olarak Tasarımı ve

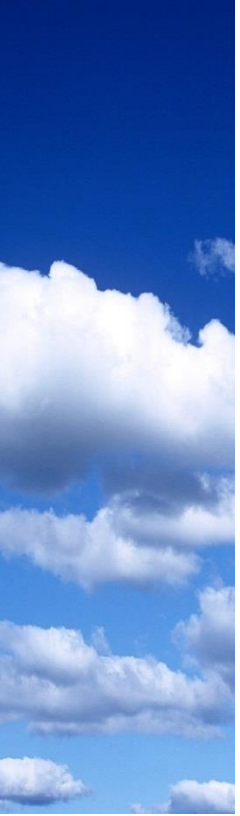
Üretimi (MILHES) Projesi" ile Antalya-Düder Çayı üzerinde kurulu Kepez-1 HES'in türbinini, tamamen Türkiye'de üretilerek barajdaki yerine takılma aşamasına geldi. 36 bini aşkın konuta elektrik sağlayan ve değiştirilmesi gereken Kepez-1 HES'in türbininin yenilenmesinde en kritik aşama ise "model türbin" in üretimi ve test edilmesiydi. TOBB ETÜ Su Türbin Tasarımı ve Test Merkezinde (ETÜ Hidro) Kepez-1'e takılacak türbinin modeli üretilerek, esas türbinin imalatına geçilebilmesi için gerekli test yapıldı. Testin ardından; imalata hazır tüm teknik resim ve türbine ait katı modeller üretici firmaya verildi. Yeni türbinin üretiminin Türkiye'de gerçekleşmesi üzerine Mayıs 2018 itibarıyla Kepez-1, enerji üretimini durdurdu ve eski ekipman sökümüne başlandı. Yeni ekipman, önümüzdeki aylarda santrale kurulacak. Kepez-1'in Ekim 2018 itibarıyla tamamı yerli, yeni hidrolik ekipmanla tekrar elektrik üretmeye başlaması planlanıyor.





**Teşekkürler!**

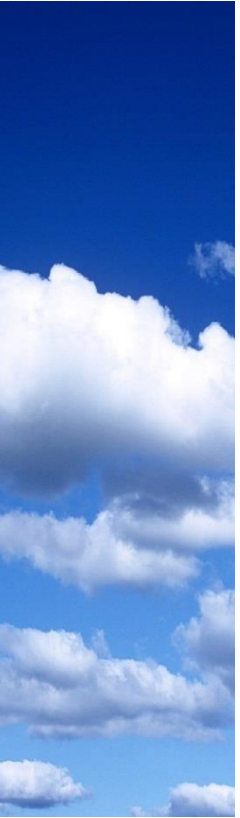
DR. ECE AYLI





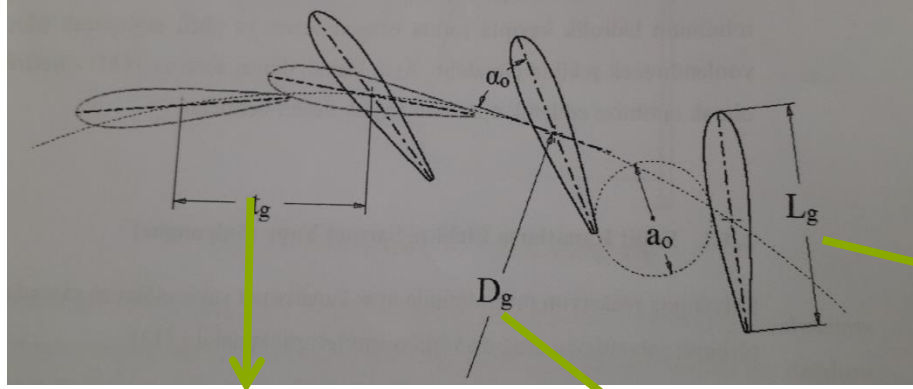
# TÜRBİN ÇALIŞMA PRENSİBLERİ

DR. ECE AYLI





# TÜRBİN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEMELLERİ



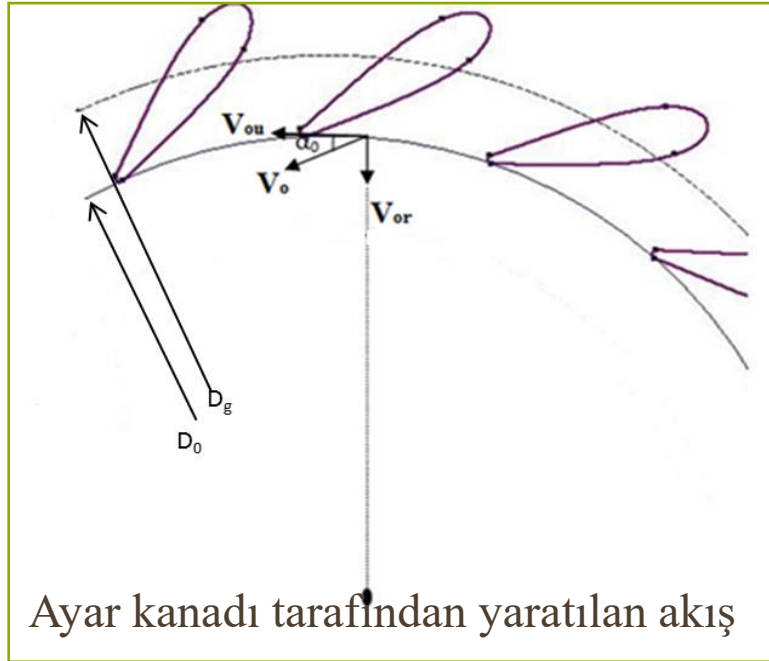
$$L_g = \frac{\pi D_g}{\text{ayar kanadı sayısı} \times 0.9}$$

$$\frac{L_g}{t_g} = 1.1 \text{ (tam kapanabilme)}$$

Ayar kanatlarının dönme merkezlerinin bulunduğu çemberin çapı çark giriş çapının 1.16 katı olarak belirlenir.

- ✓ Ayar kanatları dönme eksenleri etrafında dönerek türbinde debiyi kontrol edebilen tek mekanizmadır.
  - ✓ Salyangoz ve sabit kanatlardan gelen akışı çarka optimum açı ile eşit dağıtılmakla görevlidir.
- Ön tasarımda belirlenmesi gereken parametreler:
- $D_g$  = dönme merkezlerinin bulunduğu çember çapı
  - $L_g$  = Kanat uzunluğu
  - $t_g$  = iki kanat arasındaki mesafe
  - $a_0$  ve  $\alpha_0$ , tasarım parametreleri
- ✓ Ayar kanadı sayısı: 12,16,24 (çark büyüklüğüne göre)
  - ✓ Çapsal boyut hesaplanmasının ardından kalınlık dağılımı: NACA profilleri
  - ✓  $a_0$ : sabit kanattan gelen akışı minimum hidrolik kayıp ile & çarkta istenen güç/verim sağlayan giriş açısına uygun olmalıdır.--- iteratif belirlenir---

# TÜRBİN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEMELLERİ



$$v_0 = v_{or} + v_{ou}$$

Radyal akışlı bir ayar kanadı için  $v_0$  vektörü

$$v_{or} = \frac{Q}{\pi D_{02} b_0} \quad v_0 = \frac{v_{or}}{\sin \alpha_0} \quad v_{ou} = v_0 \cos \alpha_0$$

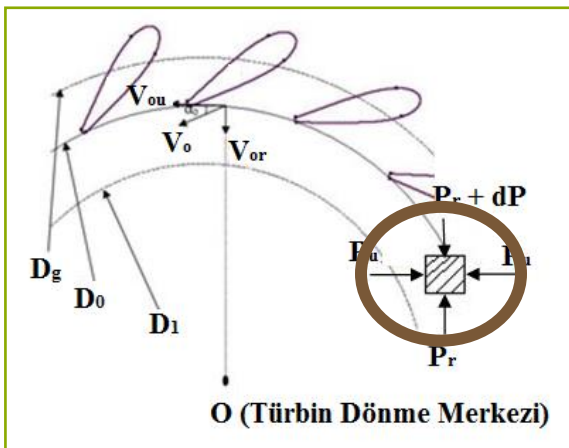
Çevresel hız komponenti akışın 0 noktası etrafında döngüsel bir hareket yarattığının kanıtıdır. Bu döngüsel akış sirkülasyon ( $\Gamma$ ) olarak tanımlanır:  $\Gamma = \int v_0 \cos(\alpha) ds$  (S, kapalı eğri)

$$\Gamma_0 = (\pi D_0) V_0 \cos(\alpha_0)$$

$$\sum M_0 = \frac{d(mv_u r)}{dt} \quad \frac{d(mV_u r)_0}{dt} = 0 \quad V_u r = \text{sabit}$$

$$R_0 V_{ou} = R_1 V_{1u}$$

$$\Gamma_0 = \Gamma_1 = \text{sabit}$$



# TÜRBİN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEMELLERİ

- TÜRBİN ÇARKI TARAFINDA YARATILAN AKIŞ ALANI



Tüm Francis tipi türbinler için geçerli olacak geometrik karakteristikler belirlemek dizayn sürecini kolaylaştırmakta  $\rightarrow$  Hız Üçgenleri!



Hız üçgenlerinin elde edilmesinde akışın dönmez ve viskoz olmayan olduğu ve çarkın sınırsız sayıda kanattan oluştuğu varsayımları yapılmaktadır.

$$\Gamma_0 = (\pi D_0) V_0 \cos(\alpha_0)$$

$$\Gamma_0 = \Gamma_1 = \text{sabit}$$

$$v_{1u} = v_{0u} \frac{D_{02}}{D_{1d}}$$

$$v_{2m} = \frac{Q}{\pi D_2 b_0}$$

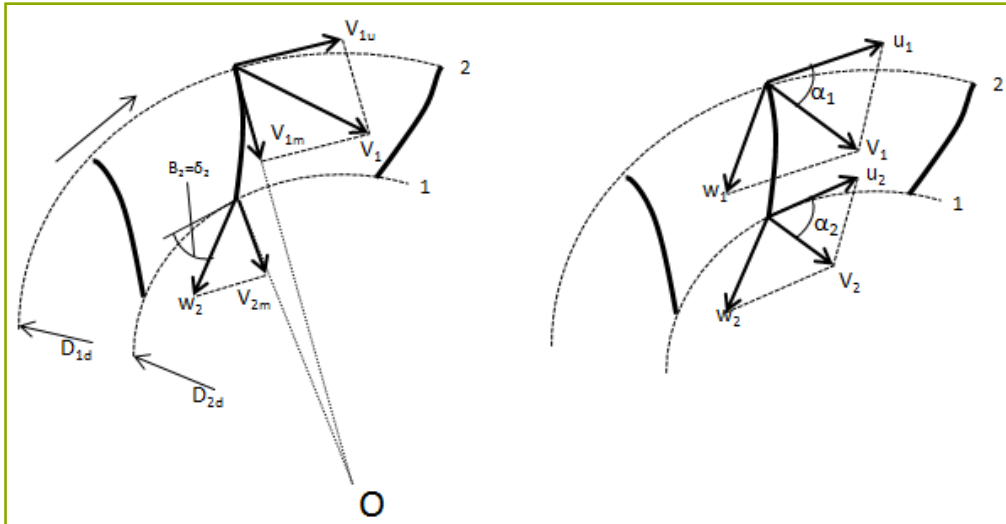
$$v_{1m} = \frac{Q}{\pi D_2 b_0}$$

$$u = \frac{\pi D n}{60}$$

$$v_i = \sqrt{v_{im}^2 + v_{iu}^2}$$

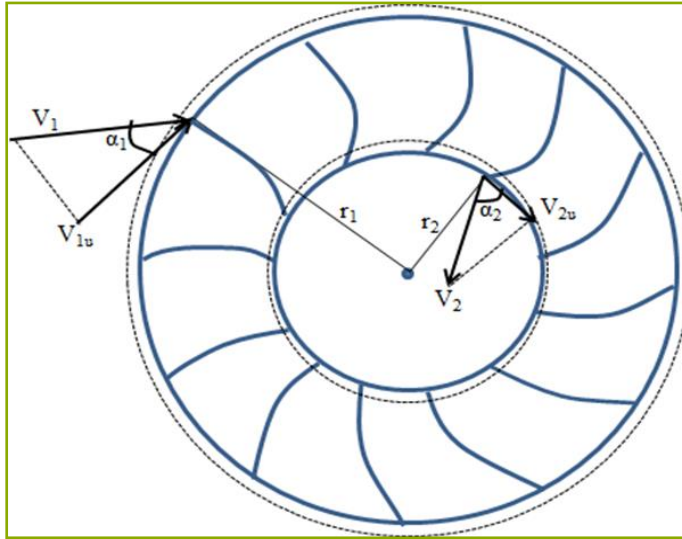
$$w_2 = v_{2m} / \sin \delta_2$$

$$u = \frac{\pi D n}{60}$$



# TÜRBİN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEMELLERİ

- TÜRBİN ENERJİ DENKLEMİ



Q=debi

P= akışkan yoğunluğu

$V_u$ = radyal hız bileşeni

R=türbin yarıçapı

U=taşınım hız komponenti

W=bağlı hız komponenti

T=tork

P=üretilen güç

- ✓ Açısal momentum denklemi yazılarak çarkın güç üretme karakteristiği belirlenebilir
- ✓ dt kadar zamanda çarktan akan akışkan kütlesi  $m = \rho Q dt$

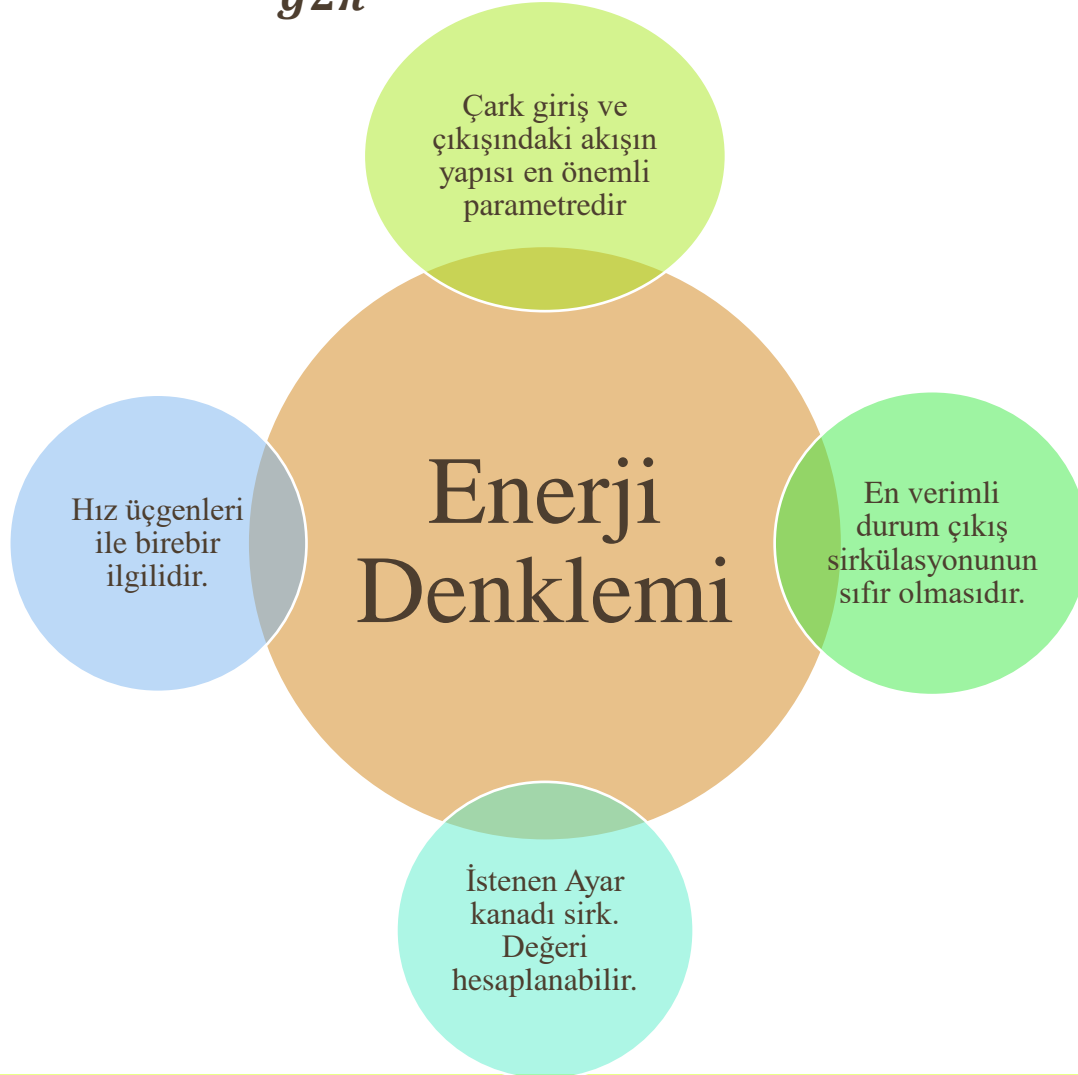
$$\rho Q (v_2 \cos \alpha_2 r_2 - v_1 \cos \alpha_1 r_1) = \sum M_0$$

$$P = M\omega = \rho g Q H \eta$$

$$H \eta = \frac{\omega}{g 2\pi} (\Gamma_1 - \Gamma_2) \text{ "Euler Equation"}$$

# TÜRBİN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEMELLERİ

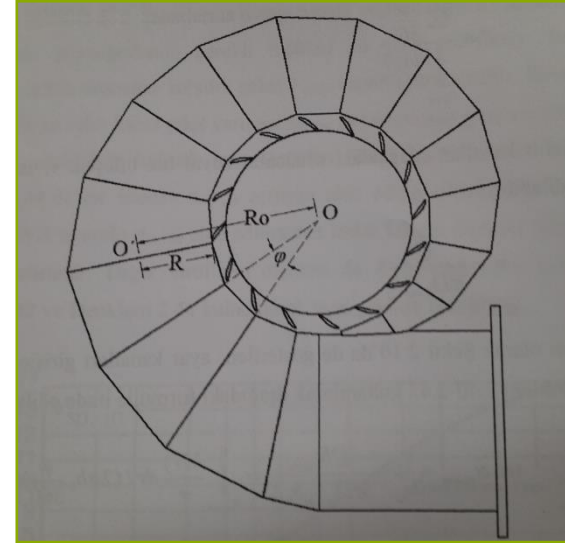
$$H\eta = \frac{\omega}{g2\pi} (\Gamma_1 - \Gamma_2) \text{ "Euler Equation"}$$





# TÜRBİN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEMELLERİ

- Ayar kanatlarına tüm çevresinde düzgün ve aynı olacak şekilde akış sağlamalıdır.
- Salyangoz içerisinde minimum kayıp meydana gelmelidir.
- Salyangozun şekli ve büyüklüğü santralin yerleşim planına uygun olmalıdır.



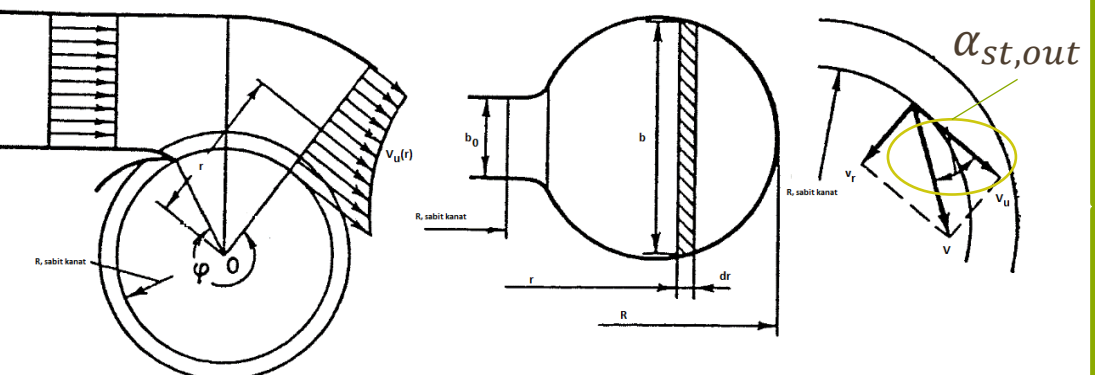
$$Q_{virol} = Q_d \frac{\varphi}{360} \text{ (her bir virole giren debi hesabı)}$$

$$v_u = \frac{K}{r} \text{ (hız momentinin korunumu yasası)}$$

$$K = \frac{Q_d \frac{\varphi}{360}}{\int_{R,out}^R \frac{b(r)}{r}}$$

# TÜRBİN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEMELLERİ

- Sabit kanat çıkışındaki ortalama radyal hız bileşeni:


$$v_r = \frac{Q}{\pi D_{st,out} b_0}$$
$$v_u = \frac{K}{r} \quad K = \frac{Q_d \frac{\varphi}{360}}{\int_{R,out}^R \frac{b(r)}{r}}$$
$$\tan \alpha_{st,out} = \frac{v_r}{v_u} = \frac{Q R_{st,out}}{\pi D_{st,out} b_0 K}$$

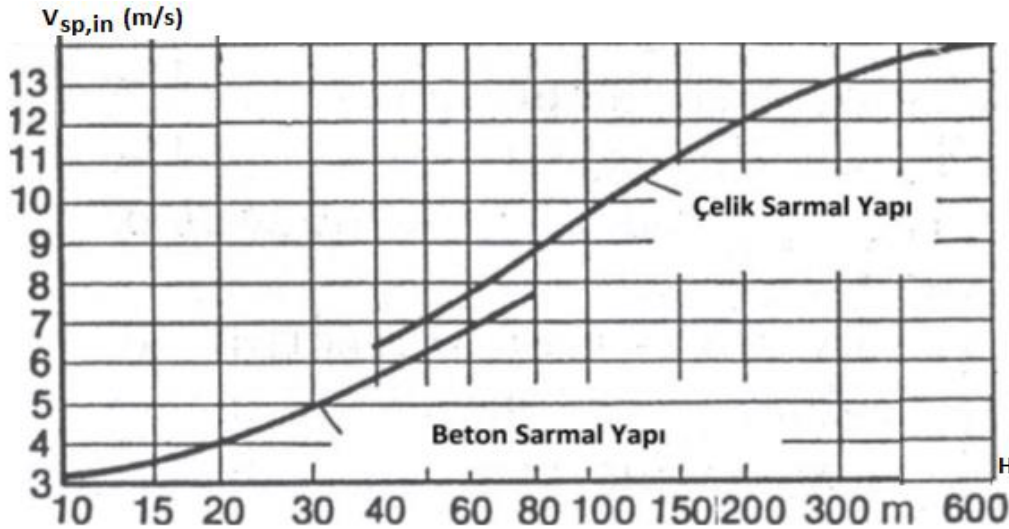
Bu denkleme göre;

- ✓ Ayar kanadı giriş açısı  $\alpha_{st,out}$ , debiden bağımsızdır.
- ✓ Tüm ayar kanatları çevresinde sabit K faktörü ile  $\alpha_{st,out}$  sabit bir değerde tutulabilir.
- ✓  $\alpha_{st,out}$  açısı salyangozun şekline ve büyüklüğüne bağlı bir parametredir.

# TÜRBİN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEMELLERİ

Salyangoz tasarımının ayar kanatlarına uygun sabit  $\alpha_{st,out}$  açısını sağlayacak şekilde yapılması gerekmektedir. Salyangoz ölçülerinin belirlenme basamakları aşağıda sıralanmıştır. İlk olarak türbin düşüsüne karşılık gelen  $v_{sp,in}$  hızı hesaplanır. Bu hesaplama

1. Şekil’de verilen grafik üzerinden hesaplanır.
2. Tahmini olarak belirlenen  $b_0$  ve sabit kanat çıkış yarıçapı  $R$  için, denklem K faktörü hesaplanır.
3. Elde edilen K faktörü yerine yazılarak  $\alpha_{st,out}$  açısını sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir.
4. Basamak 2 ve 3 uygun  $\alpha_{st,out}$  açısı elde edilene kadar kesit ölçüleri yenilenerek tekrar edilir ve uygun K kat sayısı bulunur.
5. Tüm virol çapları basamak 2-4 tercih edilerek aynı şekilde hesaplanır.



$$v_u = \frac{K}{r} \quad K = \frac{Q_d \frac{\varphi}{360}}{\int_{R,out}^R \frac{b(r)}{r}}$$

$$\tan \alpha_{st,out} = \frac{v_r}{v_u} = \frac{QR_{st,out}}{\pi D_{st,out} b_0 K}$$

# TÜRBİN ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEMELLERİ

- Yayıcı tüp tasarımında en önemli parametre geri kazanım oranıdır. Geri kazanım oranının matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir. Bu oran fiziksel olarak ise çark çıkışındaki kinetik enerjinin yayıcı tüpte ne kadarının geri kazanılabildiğinin göstergesidir.

$$C_p = \frac{P_{out} - P_{in}}{\frac{\rho v^2}{2}}$$

Çark Çıkış Çapı

