

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜRBİNMETRE AKIŞ HACMİNİN 3 BOYUTLU
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ KODLARI
İLE SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Makine Mühendisi Mehmet Serkan YILDIRIM

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet KOYUN

İSTANBUL,2008

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tez Kapsamı	1
2. TÜRBİNMETRE ÜZERİNDE TEMEL KAVRAMLAR VE TÜRBİNMETRE ÇEŞİTLERİ	2
2.1 Türbinmetrelerin Genel Yapısı ve Çalışma Prensibi	2
2.1.1 Türbinmetrelerin Çalışma Prensibi	2
2.1.2 Türbinmetre Yapısı	3
2.2 Türbinmetre Tipleri	6
3. TÜRBİNMETRE ÜZERİNDE AKIŞ VE TEORİK İNCELEME	10
3.1 Türbinmetre Temel Teorisi	10
3.2 Daimi Akışta Türbinmetre	14
3.3 Türbinmetre Teorik Modeli	15
3.3.1 Momentum Yöntemi	15
3.3.2 Air Foil Yöntemi	18
3.4 Hareket denklemi	20
3.5 Düzensiz Akışkan Hız Profiline Türbinmetre Üzerindeki Etkisi	22
3.5.1 Türbinmetre Montaj Kriterleri	22
3.5.2 Akış Doğrultucuların Etkisi	24
3.6 Viskozenin Türbinmetre Üzerindeki Etkisi	26
3.6.1 Sınır Tabaka Akımının Etkisi	30
3.6.2 Sınır Tabaka Teorisi	32
3.6.3 Düz Levha Üzerinde Blasius gerçek Çözüm Yöntemi	34
3.6.4 Von Karman Momentum İntegral Denklemlerinin Yaklaşık Çözümü	40
3.6.5 Laminer Sınır Tabaka İçin Yaklaşık Çözüm	41
3.6.6 Türbilanslı Sınır Tabaka İçin Yaklaşık Çözüm	42
3.6.7 Rotor Kanatları Üzerinde Oluşan Sınır Tabaka	44

3.7	Rotor Kanat Arkasındaki İz Bölgesi.....	45
3.7.1	Kanat Arkasında Oluşan İzin Dönem Hızına Etkisi.....	48
3.8	Giriş Hız Profili Dağılımının Rotor Dönüş Hızına Etkisi	49
3.9	Sürtünme Kuvvetleri.....	50
3.9.1	Rotor Kanat Tabanında Sürüklenme	50
3.10	Kanat Ucu Açıklığı	52
3.11	Mekanik Sürtünem Kuvvetleri	53
4.	SAYISAL ÇÖZÜM HESAPLAMA YÖNTEMLERİ	54
4.1	Giriş	54
4.2	Sayısal Çözümde Kullanılacak Hesaplama Yöntemleri.....	54
4.2.1	Sayısal Çözüm Yöntemleri.....	56
4.2.2	Lineerleştirme Yöntemleri.....	57
4.2.3	İkinci Dereceden Enterpolasyon Yöntemi.....	58
4.2.4	Basınç- Hız Çifti İçin Simple Metodu.....	58
4.2.5	Artık Değer (Residual)	59
4.3	Türbülans Modeli Seçimi	60
4.3.1	Standart k- ϵ Modeli	61
4.3.2	RNG k- ϵ Modeli	61
4.3.3	SST k- ω Modeli.....	62
4.3.4	Reynolds Stres Modeli.....	62
4.4	Yakınsama ve Kararlılık	63
4.5	Problemin Çözümü İçin Oluşturulan Algoritma.....	63
4.6	Modelin Çizimi.....	64
4.7	Çözüm Ağının Oluşturulması.....	67
4.8	HAD Analizlerinin Planlanması ve Çözüm Adımları	69
4.8.1	HAD Analizlerinin Planlanması.....	69
5.	TESTLERDE KULLANILACAK TÜRBİNMETRENİN İMALATI.....	71
5.1	GÖVDE İMALATI	71
5.2	ROTORUN İMALATI.....	72
5.3	ALGILAYICI VE VERİ TRANSFERİ.....	73
6.	LABORATUAR DENEYLERİ.....	74
6.1	BOPP & REUTHER REFERANS TÜRBİNMETRE TESTLERİ	76
6.2	İMAL EDİLEN TÜRBİNMETREYE AİT TESTLER	80
7.	BOPP & REUTHER REFERANS TÜRBİNMETRE HAD ANALİZ SONUÇLARI	89
8.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	98
	KAYNAKLAR.....	99
	İNTERNET KAYNAKALARI.....	101
	EKLER	102
EK – I	Newton Rahpson Denklem Çözümleri.....	103

EK – II	150,284 m ³ /h Debi değeri İçin FLUENT Czc Ayarları zet Dosyası	104
ÖZGEÇMİŞ	105

SİMGE LİSTESİ

c_0	Ses Hız.....	s^{-1}
f	Frekans.....	Hz
h_{kanat}	Kanat Yüksekliği	m
n	normal birim vektörü	
n	Kanat Sayısı	Adet
P	Basınç	Pa
ΔP	Basınç Fark	Pa
P'	Basınç Dalgalanması	Pa
r	Yarıçap.....	m
r_{taban}	Taban Yarıçapı.....	m
$r_{dış}$	Dışı Duvar yarıçapı.....	m
$r_{uç}$	Kanat Ucu Yarıçapı	m
s	İki Kanat arası mesafe	m
t	Zaman	s
t_{kanat}	Kanat Kalınlığı.....	m
x	X eksenine'	Hızdaki Dalgalanma
$u_{giriş}$	Giriş Hızı	ms^{-1}
u_{max}	Maksimum Hız	ms^{-1}
$u_{çıkış}$	Çıkış Hızı	ms^{-1}
v	Hız Vektörü	ms^{-1}
w	Genişlik.....	m

A	Kesit Alanı	m^2
D	Boru Çapı.....	m
E	İdeal Dönül Hızından Sapma.....	
F_{bf}	Rotorun akışkana Uyguladığı Kuvvet	N
F_D	Sürükleme Kuvveti	N
F_L	Kaldırma Kuvveti	N
I_{rotor}	Rotor Atalet momenti	$kg\ m^2$
K	Sayaç Akış katsayısı	Pls/l
L_{kanat}	Kanat Kiriş Uzunluğu	m
L_{taban}	Taban Uzunluğu.....	m
Q	Hacimsel Debi	$m^3\ s^{-1}$
R	Ortalama Rotor Yarçapı.....	m
T_{mek}	Mekanik Sürtünme Momenti.....	$kgm^2\ s^{-2}$
T_{bf}	Akışkanın Rotora Uygulığı Döndürme Momenti.....	$kgm^2\ s^{-2}$
T_d	Döndürme Momenti.....	$kgm^2\ s^{-2}$
T_f	Toplam Sürtünme Momenti.....	$gm^2\ s^{-2}$
U	Ortalama Akışkan Hızı	$m\ s^{-1}$
V	Hacim.....	m^3
W	Rotor Genişliği.....	m
x_f	FLUENT'te x koordinatı	
y_f	FLUENT'te y koordinatı	

Yunan Harfleri

α	Hücum Açısı	$^{\circ}$
β	Rotor Kanadının Rotor Eksenine İle Yaptığı Açısı.....	$^{\circ}$
δ_1	Sınır tabaka Kalınlığı	m
δ_2	Momentum Kalınlığı	m
μ	Dinamik Viskozite	$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$
ν	Kinematik Viskozite	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ω	Donme Hızı	rad s^{-1}
ω_{id}	İdeal Dönme Hızı.....	rad s^{-1}
ρ	Yoğunluk	kg m^{-3}
ρ'	Yoğunlukdaki Dalgalanma	kg m^{-3}
τ	Kayma Gerilmesi	$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$
τ_D	Duvardaki Kayma Gerilmesi	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$

Boyutsuz Sayılar

C_D	Sürükleme Katsayısı	$FD/(1/2\rho u^2A)$
C_L	Kaldırma Katsayısı	$FL/(1/2\rho u^2A)$
M	Mach Sayısı	u
Pr	Prandtl number, ν/a with a the thermal diffusivity	
Re	Reynolds number	uL/ν
Sr	Strouhal number.....	fL

KISALTMA LİSTESİ

CFD	Computational Fluid Dynamics
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operators
PRESTO	Pressure Staggered Option
QUICK	Quadratic Upwind Interpolation
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RNG	Renormalization Group Theory
RSM	Reynolds Stres Model
SIMPLE	Semi-Implicit Methods for Pressure Linked Equations
SIMPLEC	Semi-Implicit Methods for Pressure Linked Equations Consistent
URF	Under Relaxation Factor
CMM	Coordinat Measurement Machine

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Türbinmetre Yapısı	2
Şekil 2.2 Düz Türbinmetre Kanadı (50°)	4
Şekil 2.3 Düz Türbinmetre Kanadı (35°-85°)	4
Şekil 2.4 Türbinmetre Kanadı Kuyruk Yapısının Kalibrasyon Eğrisi Üzerine Etkisi	4
Şekil 2.5 Aksiyal Türbinmetre Yapısı	6
Şekil 2.6 Pervaneli Türbinmetre	7
Şekil 2.7 Daldırma Tip Tanjantsiyal Türbinmetre	8
Şekil 2.8 Daldırma Tip Çift Rotorlu Aksiyal Türbinmetre	8
Şekil 2.9 Çift Rotorlu Aksiyal Türbinmetre	9
Şekil 3.1 İdeal Akışta Hız ve Açılı ilişkisi	10
Şekil 3.2 Türbinmetre Girişinde ve Rotorunda Akışkan Hız Profili	11
Şekil 3.3 Türbinmetre Rotoruna Etkiyen Tork (Döndürme Momenti) Kuvvetleri	13
Şekil 3.4 Türbinmetre Rotoru	16
Şekil 3.5 2 Boyutlu Türbinmetre Rotor Kanat Yapısı Üzerinde Giren & Çıkan Akışkan Hızları	17
Şekil 3.6 2 Boyutlu Türbinmetre Rotor Kanat Yapısı Üzerinde Kaldırma ve Sürüklenme Kuvvetleri	20
Şekil 3.7 AGA ve ISO Standartlarına Uygun Türbinmetre ve Akış Doğrultucu Montaj Mesafeleri	23
Şekil 3.8 Boru Demeti Tip Akış Doğrultucu	25
Şekil 3.9 Perfore Delikli Tip Akış Doğrultucu	25
Şekil 3.10 Birbirine Dik İki Düzlem Üzerine Peşpeşe Yerleştirilmiş 2 Dirsekten 10D Uzaklıkta Eksenel ve Radyal Hız Profili (Hava Debisi 1750 m ³ /h)	26
Şekil 3.11 Birbirine Dik İki Düzlem Üzerine Peşpeşe Yerleştirilmiş 2 Dirsekten 10D Uzaklıkta Yerleştirilmiş Boru Demeti Tip Akış Doğrultucu Çıkışında Eksenel ve Radyal Hız Profili (Hava Debisi 1750 m ³ /h)	26
Şekil 3.12 Küçük Ebatlı Su Türbünü	26
Şekil 3.13 30	
Şekil 3.14 Türbinmetrede Oluşan Sınır Tabaka Kalınlıkları	31
Şekil 3.15 Düz Levha Üzerinde Sınır Tabaka Oluşumu	33
Şekil 3.16 J. Nikuradse Deneysel Çalışma Sonuçları	42
Şekil 3.17 n Değerine Karşılık u / U Değeri	43
Şekil 3.18 Türbinmetre Rotor Kanadı Arkasında Oluşan İz	45
Şekil 3.19 Hoerner – 1965’ tarafından Kullanılan Geometri	47
Şekil 3.20 Açık ve Kapalı Türbinmetre Rotor Ucu Açıklığı	52
Şekil 4.1 HAD Sayısal Çözüm Algoritması	55
Şekil 4.2 Rotor ve Statora Ait 3 Boyutlu Boyutsal Ölçümler (CMM)	65
Şekil 4.3 3 Boyutlu Türbinmetre CAD Modeli	66
Şekil 4.4 3 Boyutlu 120° Türbinmetre ve 90° Akış Doğrultucu Akış Hacmi	67
Şekil 4.5 ..3 Boyutlu Prizmatik 5 Kenarlı ve Dörtgen 6 Kenarlı Eleman Yapıları	68
Şekil 4.6 Türbinmetre ve Akış Doğrultucu İçin Oluşturulan 3 Boyutlu Sayısal Ağ	68
Şekil 5.1 Türbinmetre ve CAD Modeli	71
Şekil 5.2 PleksiGlass Türbinmetre Gövdesi İmalatı	72
Şekil 5.3 Türbinmetre Rotorlarının İmalatı	72
Şekil 5.4 Türbinmetre Algılayıcı ve Darbe & Zaman Sayıcıları Akış Diagramı	73
Şekil 6.1 TÜBİTAK – UME Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı Test Sistemi Şeması	75
Şekil 6.2 TÜBİTAK – UME Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı Testlerden Görüntüler	76
Şekil 6.3 Türbinmetre Testi Debi & Hata Eğrisi	77
Şekil 6.4 Türbinmetre Testi Debi & Basınç Farkı Eğrisi	77
Şekil 6.5 Türbinmetre Testi Debi & Basınç Farkı Eğrisi	78

Şekil 6.6	Türbinmetre Testi Debi & Basınç Farkı Eğrisi	78
Şekil 6.7	İmal Edilen Türbinmetre Laboratuvar Testleri	80
Şekil 6.8	İmal Edilen Türbinmetre Debi & Rotor Dönüş Hızı Hatası Eğrileri	87
Şekil 6.9	İmal Edilen Türbinmetre Debi & Basınç Düşümü Eğrileri	87
Şekil 6.10	İmal Edilen Türbinmetre Debi & K Akış Katsayısı Eğrileri.....	88
Şekil 7.1	Çeşitli Kesitlerde Akış Doğrultucu Hız Profili	90
Şekil 7.2	Akış Doğrultucu Orta Ekseninde ve Çıkışında (Türbinmetre Girişinde) Hız Profili	90
Şekil 7.3	Akış Doğrultucu Çıkışında X Eksenine Yönündeki (Akışa Dik Yön) Hız Vektörleri	91
Şekil 7.4	Akış Doğrultucu Çıkışında Y Eksenine Yönündeki (Akışa Dik Yön) Hız Vektörleri	91
Şekil 7.5	Akış Doğrultucu Çıkışında X Eksenine Yönündeki (Akış Yönü) Hız Vektörleri.....	92
Şekil 7.6	Türbinmetre Debi & Rotor Dönüş Hızı Bağlı Hatası Eğrileri	93
Şekil 7.7	Türbinmetre Debi & Rotor Dönüş Hızı Eğrileri	93
Şekil 7.8	Türbinmetre İçinde 92.457 m ³ /h Debi Değeri için Eş Hız Konturları	94
Şekil 7.9	Türbinmetre Rotorunda 92.457 m ³ /h Debi Değeri İçin Eş Hız Konturları.....	95
Şekil 7.10	Türbinmetre Rotoru Üzerinde (r = 30 Radyal Eksende) Eş Hız Konturları	95
Şekil 7.11	Türbinmetre Rotoru Üzerinde Akım İplikcikleri (Hız Konturları).....	96
Şekil 7.12	Türbinmetre Rotoru Üzerinde Akım İplikcikleri (Statik Basınç)	96
Şekil 7.13	Türbinmetre Rotoru Üzerinde Akım İplikcikleri (Re Sayısı)	97

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Türbinmetre Boyutsal Özellikleri	21
Çizelge 3.2 Mattingly & Yeh – 1991 Test Sonuçları	24
Çizelge 3.3 Blasius Denklemleri Çözüm Tablosu(Schlichting- 1979)	38
Çizelge 6.1 Türbinmetre Test Dataları	79
Çizelge 6.2 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (12_60).....	81
Çizelge 6.3 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (12_55).....	82
Çizelge 6.4 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (12_50).....	83
Çizelge 6.5 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (9_60).....	84
Çizelge 6.6 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (9_55).....	85
Çizelge 6.7 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (9_50).....	86

ÖNSÖZ

Tez konusunu belirlerken özellikle metroloji biliminin sorunlarından birinin çözümü üzerinde durulmuş ve sonuçta ‘TÜRBİNMETRE AKIŞ HACMİNİN 3 BOYUTLU HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ KODLARI İLE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ’ konusu benimsenmiştir. Burada asıl amaç türbinmetreleri sayısal olarak ifade edebilmek ve bu sayede metrolojik anlamdam daha kararlı, daha hassas ölçüm cihazlarının geliştirilmesine yardımcı olarak, dolaylı olarak ülkemiz sanayiinin rakabet gücünün arttırılmasına katkıda bulunmaktır.

Nümerik çözümler için FLUENT programından, Sayısal CAD modelinin oluturulması için ProENGINEER WildFire 2.0 programlarından faydalanılmıştır.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde büyük payı olan başta tez danışmanım değerli hocam Sayın Doc. Dr. Ahmet KOYUN‘ a teşekkürlerimi sunarım.

Bütün bu teşekkürlerin ötesinde; beni yetiştiren, her türlü konuda destekleyen aileme ve tezim bounca yardımlarını esirgemeyen eşime şükranlarımı sunarım.

Mehmet Serkan YILDIRIM

OZET

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Türbinmetrede sıvı akışkan debi ölçümü ve türbinmetre içindeki akışın modellenmesi ve deneysel çalışmaların yapılması konusu incelenmiş ve Fluent programında sayısal olarak çözümlenmeler yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Tez çalışması sekiz ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmaya başlama nedenleri, ulaşılmak istenen sonuçlar ve de tez kapsamı genel olarak açıklanarak konuya giriş yapılmıştır. İkinci bölümde tez konusu kapsamında konu ile ilgili önceki araştırmacıların çalışmaları ışığında temel kavramlara değinilmiştir. Üçüncü bölümde kullanılan hesap yöntemi açıklanmış elde edilmek istenen sayısal değerlerin hesaplanabilmesi için bir denklem takımı geliştirilmeye çalışılmıştır. Elde edilen denklemler Wolfram Research MATEMATICA 6.0 yardımı ile çözümlenerek Dördüncü bölümde HAD analizlerinin temelleri üstünde durulmuş ve kullanılan sayısal çözüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde 3 farklı tip rotor ve kanatçığa sahip bir türbinmetre imalatı açıklanmış, Altıncı bölümde Laboratuvar test yöntemi, test düzeneği, test verileri üzerinde durulmuş, Yedinci bölümde HAD analiz sonuçlarına yer verilmiştir. HAD analizlerinden önce ise ProEngineer WildFire 2 programı vasıtasıyla Bopp & Reuther yapımı türbin tip debimetre sayısal olarak 3D olarak modellenmiştir. Elde edilen modelden çözüm ağları oluşturmak amacıyla GAMBİT 2.2.30 programında tasarlanmış ve yedinci bölümde oluşturulan sayısal ağ ile sonlu hacimler metodunu kullanan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programlarından FLUENT 6.3.16 programı kullanılarak sayısal çözümler elde edilmiştir. Daha sonra sayısal çözüm yardımı ile hesaplanan türbinmetre giriş çıkış statik basınç kaybı ve K türbinmetre akış katsayısı deneylerden elde edilen sonuçlar ve ikinci bölümde elde ettiğimiz ampirik formüllerle hesaplanan değerlerle birlikte üçlü bir karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlara göre türbinmetre üzerinde akışkan akış hızı ve basınç dağılımları incelenmiştir. Sonuçların kabul edilebilir oranlarda deneylerle uyumlu olduğu görülmüştür. Değişik sınır şartlarında hız büyüklüklerinin, K akış katsayısı ve statik basınç düşüşü ile değişimleri incelenmiştir.

Son olarak sekizinci bölümde yapılan çalışmayla ilgili sonuçlar belirlenmiş ve öneriler sunulmuştur. Elde edilen sayısal çalışma sonuçlarına göre elde edilen bilgiler verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Türbinmetre, Kalibrasyon, Debi Ölçüm, Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği, HAD

ABSTRACT

In this master thesis, Flowrate measurement on turbine flowmeter has been investigated and modelled numerically by the means of commercial CFD code FLUENT.

Thesis consists of eight chapters. In the first chapter, the aim of the study and the results to be reached have been explained generally. In the second chapter, fundamental concepts which are in scope of this thesis and the calculation method have been explained. Also studies that are related to our subject in the literature have been reviewed. In third chapter series of equations tried to be developed to obtain desired flowmeter variables such as turn speed. In the fourth chapter, information about the methods of calculation in numerical solution were given. Basics of CFD analysis were emphasized and numerical solution methods used by software were explained.

In Fifth Chapter Manufacturing processes of a new design turbine flowmeter which has 6 different rotors tried to be explained. In the sixth chapter laboratory test method, test set-up and laboratory test results has been explained in details. Then before numerical solutions ProENGINEER WildFire 2 was used for detailed CAD geometry of Bopp & Reuther turbine type flowmeter and finite number of mesh adapted on the CAD model by the means of GAMBIT 2.2.30. In the seventh chapter problems were solved by using Computational Fluid Dynamics (CFD) packet program FLUENT 6.3.26 which is using finite volume method. Calculated rotor speed, static pressure drop and turbine meter K factor has been compared both test results and results that we had obtained from equations solved in chapter two. In different boundary conditions, changes of velocity magnitudes, Reynolds numbers, rotor speed and static pressure drop were investigated.

In the eighth chapter conclusions and advices has been presented and according to the obtained results.

Key words: Turbinometer, Calibration, Flowrate Measurement, Computational Fluid Mechanics, CFD

1. GİRİŞ

Günümüz sanayisinde aksiyel türbin tip debi ölçüm cihazları gaz ve sıvı akışkanların hacimsel debilerinin ölçülmesinde kullanılırlar. Türbin metreler ile yapılan hacimsel debi ölçümlerinde sıvılar için 0.1%, gazlar için ise 0,25% ' lik bir doğrulukla hacimsel debi ölçümleri gerçekleştirilebilmekle birlikte bazı hassas türbin metrelerde uygun akış koşulları altında 0,02%' lik doğrulukla ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Halen birçok farklı dizayna sahip türbin metre çeşitleri petrokimya, temiz su, gıda ve havacılık endüstrisinde uygulama alanları bulmaktadır. Bu bahsi geçen türbin metrelerin iç çapları en küçüğü 6mm iç çap en büyüğü de 800mm 'lik iç çapa sahip olabilmektedirler.

Türkiye'de aksiyel türbin tip debi ölçüm cihazları genellikle doğal gaz hatlarında kullanılmakla birlikte temiz içme suyu su hatlarında da sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle Ülkemizde ve dünyada son zamanlarda etkisini her geçen gün arttıran küresel ısınma ve bir sonucu olarak karşımıza çıkan yağışların azalmasına paralel olarak var olan doğal içme suyu kaynaklarını debilerinin azalması mevcut kaynakların değerini her geçen gün artırmakla birlikte mümkün olduğunca iyi şekilde yönetilmesi ve korunmasını gerektirmektedir. Özellikle petrokimya sanayinde kullanılacak türbin metrelerde meydana gelecek küçük sistematik ölçüm hataları, zaman içerisinde çok büyük hacimsel debi kayıplarına sebebiyet verebilmektedir. Bütün bu sebepler, her koşulda yapılacak debi ölçümünün yüksek doğrulukta gerçekleştirilmesinin gerekliliğini ve önemini arttırmaktadır.

1.1 Tez Kapsamı

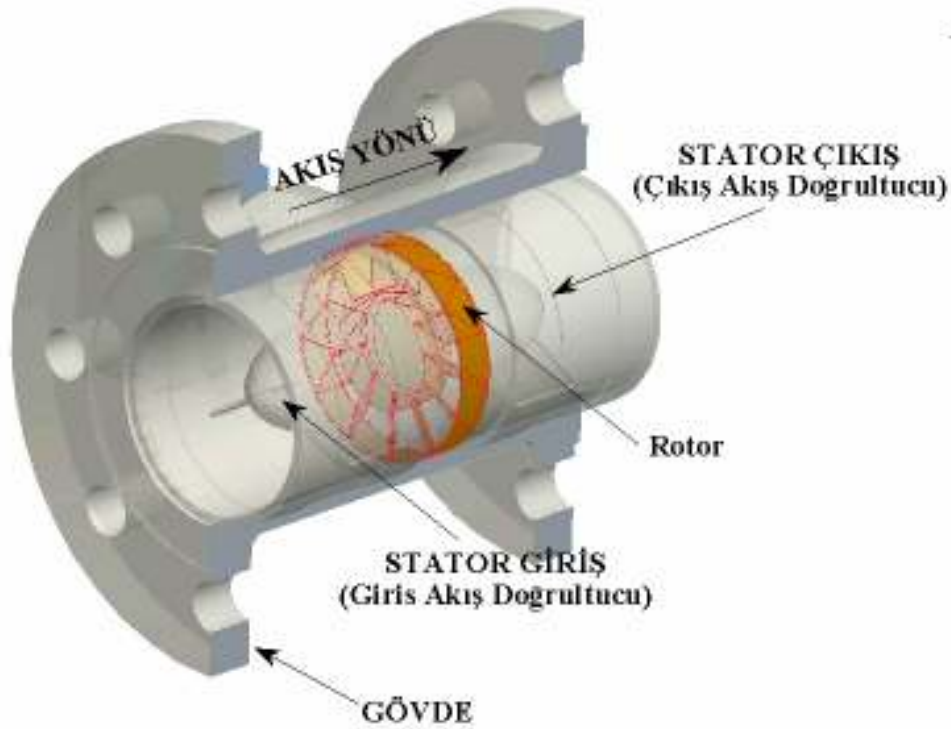
Bu tez konusu kapsamında daimi akış şartları altında çalışan türbin metrenin davranışları deneysel ve de hazırlanacak sayısal modeller ile nümerik olarak incelenerek, türbinmetre rotor dönüş hızı w , akış katsayısı K ve giriş çıkış basınç farkı ΔP hesaplanmaya çalışılacaktır. Çeşitli basit yaklaşımlarla hazırlanacak olan denklemler Newton&Raphson metodu ile çözülecek, HAD analizleri sonucu teorik ve deneysel olarak elde edilen verilerle karşılaştırılarak türbinmetre yi temsil eden sayısal bir model oluşturulmaya çalışılacaktır.

2. TÜRBİNMETRE ÜZERİNDE TEMEL KAVRAMLAR VE TÜRBİNMETRE ÇEŞİTLERİ

2.1 Türbinmetrelerin Genel Yapısı ve Çalışma Prensibi

2.1.1 Türbinmetrelerin Çalışma Prensibi

En genel hali ile tipik bir aksiyal türbinmetrenin şematik çizimi Şekil 2.1’ de verilmiştir. Şekilde verilen çizimde türbinmetrenin en genel elemanları gösterilmeye çalışılmıştır. Şekil 2.1’ deki türbinmetrede dairesel kesitli, akışa dik olarak yerleştirilmiş tek bir sensor, aksiyel olarak yataklanmış türbin kanatçıklarının üstüne yerleştirilmiştir. Türbin shaft milini, giriş ve çıkışta akış doğrultucusu vazifesi gören ve stator olarak da adlandırılan aerodinamik yapıları ile yataklanmıştır. Bu şekilde bir yerleşimde türbinmetre içerisinde akışkan türbin kanatçıklarına çarparak ilerler. Türbin kanatları genellikle sabit bir açıda olmakla birlikte bazı türbinmetre tiplerinde türbin kanat uçları belli bir oranda kıvrık olabilmektedir. Böyle bir yapıya çarpan akışkan türbin rotorunda belli bir tork oluşturarak türbin kanatlarının yataklama eksenini etrafında dönmesini sağlar. Dönüş hızı, belli bir zaman diliminde her bir türbin kanatının gövdede bulunan sensor hizasından geçişiyle elde edilen darbelerin bir sayıcı tarafından sayılması ile hesaplanır.



Şekil 2.1 Türbinmetre Yapısı

Akışkanın uyguladığı hidrolik kuvvet ile bir eksen etrafında dönen rotor kanatları, akışkan akışını bozmayacak şekilde dizayn edilirler. İdeal durumda rotor kanatları akışkanı helisel olarak keserken, helisin bir turu bir vida adımına eşdeğer hacimdeki yer değiştirmeyi ifade eder. Pratikte ise sürüklenme kuvvetleri rotorun dönüşünü durdurma yönünde etki eder. Bu sürüklenme kuvvetleri rotor kanatlarına etki eden sürüklenme kuvveti, rotor yüzeyine ve tabanına etki eden sürüklenme kuvveti ve yataklamadan kaynaklanan sürüklenme kuvvetleridir ve bu ters yönlü kuvvetler rotorun bir dönüşünde elde etmesi gereken sabit hacmi etkileyerek düşük akışkan debilerinde yani küçük döndürme momenti altında ön plana çıkararak nonlinear bir davranışa sebep verirler. Bu sebeple lineer akışkan akış bölgesinde rotor devir sayısı direkt olarak akışkan hacimsel debisi ile orantılı kabul edilir. Rotor dönüş hızı türbinmetre gövdesine yerleştirilen elektromanyetik bir algılayıcı ile alınarak cihaz göstergesinde işlenmek üzere kullanılır.

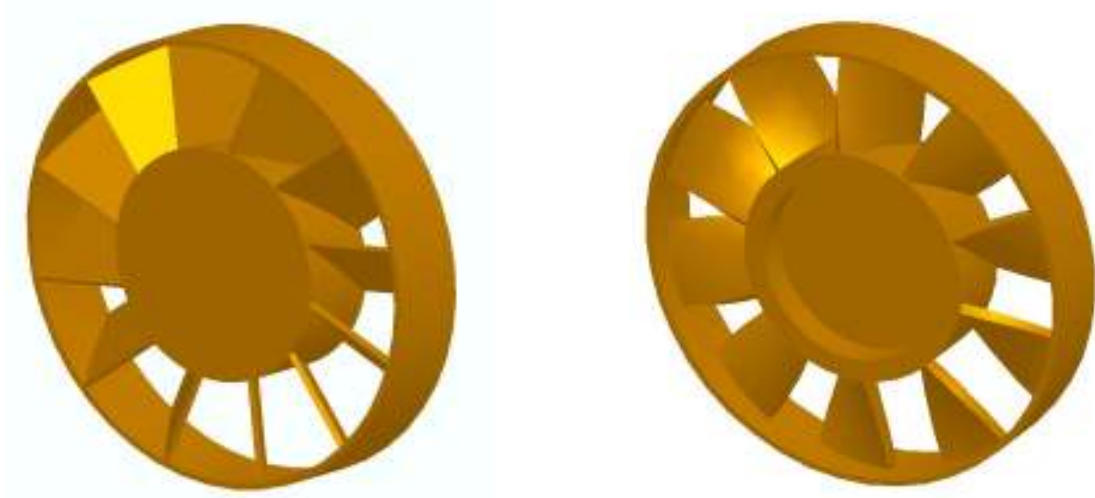
2.1.2 Türbinmetre Yapısı

Şekil 2.1. Genel türbinmetre yapısı hakkında genel bir görüntü içermektedir. Şekilde görülen türbinmetre parçaları arasında mutlak olarak en önemlisi türbinmetre rotorudur. Türbinmetre rotoru güç türbinlerinin tersine ölçüm sırasında akışı, akışkan hareketini bozmadan düzgün bir biçimde kesmektir. Teorik olarak bu mümkün olmamakla birlikte akışkandan türbinmetre ye iletilen güç çok çok küçüktür. Bir diğer önemli eleman olarak türbinmetre gövdesi türbin kanatçıklarının (Rotor), giriş&çıkış akış doğrultucularına ve de rotor dönüş hızı algılayıcısına yataklık eder

2.1.2.1 Rotor

Rotor türbinmetre içinde akışkan hızıyla orantılı olarak dönen üzerinde belirli açılarda yerleştirilmiş kanatları bulunan elemandır. Rotor dizaynları üreticiye bağlı olarak farklılık göstermekle birlikte kullanılan malzeme, türbinmetrenin dizayn edildiği akışkan , çalışma koşulları ve yataklama elemanlarında rotor dizaynında belirleyici rol oynarlar. Türbinmetre rotor kanatları düz yada burgulu olarak imal edilebilir. İyi bir türbinmetre dizaynı için türbin rotorunun taban çapı türbinmetre çapının yaklaşık olarak yarısı olarak alınabilir. Daha önce belirtildiği gibi türbinmetreler ile güç türbinleri arasındaki en büyük fark akışkana karşı olan davranış biçimleridir. Türbinmetrelerde asıl amaç akışkan hareketine mümkün olan en az müdahale ile rotor kanatlarının akışkanı kesmesini sağlamaktır. Burgulu kanatlı türbin rotorlarının kullanılmasının en önemli sebebi akışkan hız profiline ve de rotor kanat yarı

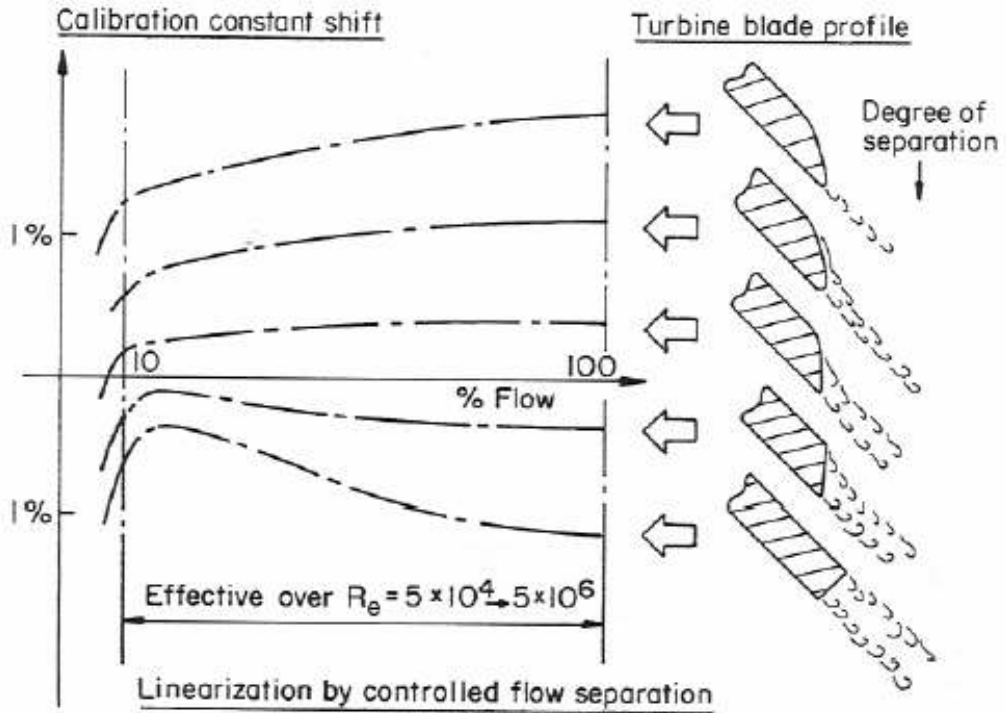
çapına bağlı olarak akışkanın rotor kanadına olan rölatif yaklaşım açısı değişmektedir.



Şekil 2.2 Düz Türbinmetre Kanadı (50°)

Şekil 2.3 Düz Türbinmetre Kanadı (35°-85°)

Bu nedenle düz rotor kanatları sabit bir akışkan yaklaşım açısı oluşmasına engel olurlar. Ayrıca aynı sebepten dolayı düz rotor kanatları özellikle rotor tabanına yakın bölümlerde akışkanın gereksiz olarak büyük rölatif yaklaşım açısı ile rotor kanatlarına çarpmasıyla birlikte akışkan hareketinde bozulmalara ve sürüklenme kuvvetlerinin etkisinin ön plana çıkmasına sebep olmaktadır.



Şekil 2.4 Türbinmetre Kanadı Kuyruk Yapısının Kalibrasyon Eğrisi Üzerine Etkisi

Türbinmetre rotor kanatlarının tasarımı sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biride rotor kanat kesitleridir. Köşeli rotor kanatları arkasında oluşacak olan iz bölgeleri sebebi ile ciddi bir aerodinamik sürükleme kuvveti etkisinde kalarak türbinmetre kalibrasyon faktörünün değişmesine sebep olacaktır. Şekil.2.4' de Griffiths ve Silverwood (1986) 'nın yaptıkları çalışma sonucunda kanat kesiti farklılıklarına bağlı elde ettikleri sonuçlar görülmektedir.

Bunların yanında rotorlar en genel şekilde akışkanın taşıdığı enerjinin rotor üzerinde atalet kuvvetlerini yenerek kayda değer bir moment oluşturmaya izin vermek amacı ile mümkün olduğunca hafif malzemelerden imal edilirler. Bu şekilde düşük rotor kütlelerine sahip türbinmetreler de çok daha hassas ve düşük hacimsel debili akışkan debi ölçümleri gerçekleştirilebilir, akışkanın hızındaki olası anlık değişiklikler çok daha hızlı bir şekilde rotora iletilebilir.

2.1.2.2 Rotor Yataklama Elemanları

Rotor yataklama elemanları rotorun gövde içerisinde üzerinde hareket ettiği elemanlardır ve yine üreticiden üreticiye farklılık gösterebilir. Hatalı tasarımlarda sıklıkla rotorun dönüş hareketi sebebi ile yataklarda aşınmalara sebep olur. Türbinmetre rotor yataklarında genellikle korozyona dayanıklı kendinden yağlamalı paslanmaz çelik yada seramik rulmanlar kullanılmaktadır. Rulman seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta tasarlanan türbin dönüş hızı ile rulman çalışma devrilerinin örtüşmesidir. Aksi durumlarda rulmanların çalışma devirlerinin üzerine çıkıldığında oluşabilecek aşırı ısınmalar türbinmetre rotor kanatlarında genleşmelere sebep olabileceği gibi direkt olarak servis dışı kalarak türbinmetrenin kendisine de zararlı olabilir.

2.1.2.3 Rotor Dönüş Hızı Algılayıcısı

Türbinmetre Rotor dönüş hızı mekanik yada RF (manyetik) olmak üzere iki yolla ölçülerek izlenebilmektedir.

Mekanik sistemlerde rotor direkt olarak bir dişli mekanizması ile mekanik sayıcıyı bağlanarak dönüş hareketi mekanik olarak iletir.

Manyetik sistemde ise türbinmetre gövdesi üzerine yerleştirilmiş olan bir mıknatıs sayesinde rotorun herbir iletken kanadının mıknatıs önünden geçmesi ile meydana gelen voltaj değişimlerinin bir yükseltici devre ile darbe (pulse)lere çevrilmesi prensibi ile çalışır.

Bu tezde yer alan çalışmada Bopp&Reuther marka sıvı akışkan türbinmetresi

kullanılmıştır. Tezin bir parçası olarak yapılan doğrulama ölçümleri TÜBİTAK – UME akışkanlar mekaniği laboratuvarı bünyesinde ulusal sıvı akışkan referans ölçüm standardı olan 1 Ton' luk kütleli ölçüm sistemi kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan türbinmetre 18 – 180 m³/h debi aralığında 0,5% doğrulukla ölçüm yapabilen 80 mm iç çapa sahip bir referans ölçüm cihazıdır. Türbinmetre rotor ve statoru paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir.

2.1.2.4 Diğer Mekanik Dizayn Kriterleri

Türbinmetre iç aksamı genellikle paslanmaz çelik malzemeden yapılmakla beraber teflon yada polyetilen türevli malzemelerde kullanılabilir.

Türbinmetrelerde pulse sayısını arttırmak için genellikle minimum 3-6 kanat kanat uçlarında üstünde birçok delik bulunan bir metal ringle birlikte kullanılırlar. Metal ringde bulunan delikler Bu delikler hareket sırasında manyetik algıyı arttırmırlar. Ayrıca yapı itibarı ile viskoz tabakada yer bulan bu metal ring sayesinde türbinmetrenin viskoziteye olan duyarlılığı azalırken, kanat ucundaki bu metal ring sayesinde rotor kanatlarının rijitliği artar vede yüksek rotor dönüş hızlarında kanat vibrasyonu ciddi oranda azalır.

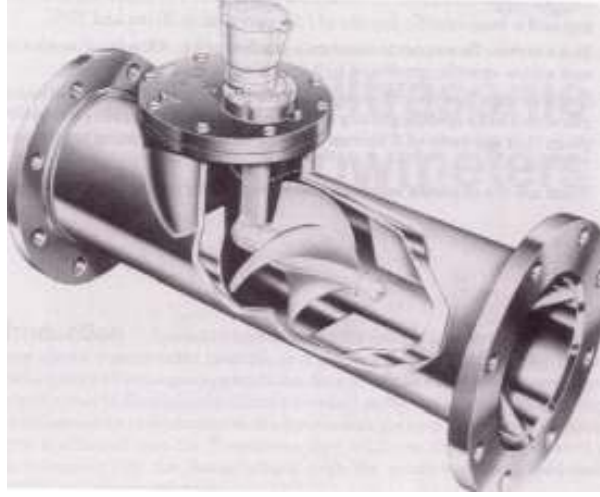
2.2 Türbinmetre Tipleri

Endüstride sıklıkla görülebilen türbin tip debi ölçüm cihazlarından örnekler aşağıda verilmiştir. Şekil 2.5' de gösterilen aksiyal türbinmetre gaz debisi ölçmek için kullanılır.



Şekil 2.5 Aksiyal Türbinmetre Yapısı

Şekil 2.6' da gösterilen pervaneli türbinmetreler genellikle viskoz ve de kompozisyon olarak kirli akışkanlar ile birlikte kullanılırlar. Pervaneli türbinmetrelerden beklenebilecek maksimum en iyi doğruluk değeri %2 mertebelerindedir.



Şekil 2.6 Pervaneli Türbinmetre

Şekil 2.7 ve Şekil 2.8' de daldırma tip türbinmetreler gösterilmiştir. Tüm diğer türbinmetre tipleri yaklaşık olarak da olsa montajı yapılacak boru hatları çapında olduğundan imalat maliyetleride daldırma tip türbinmetrelere göre daha fazladır. Çalışma prensibi olarak diğer türbinmetre çeşitlerinden hiçbir farklı bulunmayan bu tip ölçüm cihazları, klasik inline türbinmetrelerden farklı olarak akışkan hacimsel debisi yerine boru/kanal içinde daldırıldıkları noktadaki akışkan hızını ölçerler. Boru / kanaldaki akışkan debisi akışkanın aktığı kesitten yola çıkılarak yaklaşık olarak hesaplanır. Temelde noktasal hız ölçen bu cihazların boru / kanal hatlarında montajlarının yapıldığı yer çok önemlidir. Boru / kanal içindeki akışkan hız profilinin düzensiz olduğu durumlarda yapılan ölçümler sonucu hesaplanan yaklaşık hacimsel debilerin tutarlılığı ciddi bir soru işareti olarak karşımıza çıkabilecektir. Tüm bu sebeplerden dolayı bu tip debi ölçüm cihazlarından beklenen doğruluk yüksek olmayacaktır.

Şekil 2.9'da gösterilen çift rotorlu türbinmetre tipleri adlarından da anlaşılacağı ve görüleceği üzere 2 adet rotora sahip olarak üretilirler. Çalışma prensiplerini incelediğimizde rotor yönleri birbirleri ile zıt yada aynı olabilmektedirler. Giriş tarafında bulunan rotor primer rotor elamanı olarak adlandırılırken çıkış tarafındaki sensör roturu olarak adlandırılır ve de primer rotora göre daha dar kanat açısına sahiptir. Girişte meydana gelebilecek girdaplar ve de

yataklama srtnmelerindeki olası değişiklikler primer rotorun hızının değişmesine sebep olacaklardır. Primer rotor dönüş hızı değişikliğine bağlı olarak çıkan akışkanın hücum açısı değişecek, dolayısı ile sensör rotoru hızı değişiklik gösterecektir. Rotor hızlarında meydana gelen değişikliklerin farkı akışkan hacimsel debi hesaplarında düzelme katsayısının hesaplanmasında kullanılacaktır.



Şekil 2.7 Daldırma Tip Tanjantsiyal
Türbinmetre



Şekil 2.8 Daldırma Tip ift Rotorlu Aksiyal
Türbinmetre

Çift rotorlu türbinmetrelerin bir diğer çeşidinde ise rotor dönüş yönleri birbirlerine terstir. Giriş rotorundan çıkan akışkanın çıkış açısı çıkış tarafında bulunan rotorun giriş açısını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple birlikte çalışan her iki rotor hidrolik olarak da bir çift birliktelik oluştururlar. Rotor dn yönleri ters olduğu için giriş rotorunu etkileyen herhangi bir durum çıkış rotoru üzerinde aynı Őiddette fakat ters yönlü bir etki yaratacaktır. Oluşabilecek girdaplar yada yataklama sürüklemeleri nedeniyle giriş rotorunda meydana gelecek yavaşlama neticesinde çıkış rotorunun hızı artmış olacaktır. Bu iki rotor hidrolik olarak bir birliktelik gösterdiklerinden bu ilişkiyi ters yönlü kurmakta mümkün olacaktır. Tüm bunların sonucu olarak giriş & çıkış rotor hızlarının toplamı yada averajı belirlenen belli bir debi değeri için sistemde oluşabilecek girdaplardan yada tork değişikliklerinden bağımsız olarak sabit kalacaktır. Bunun sonucu olarak giriş tarafında oluşabilecek ve de trbinmetreleri en çok etkileyen akışkan akış düzensizliği olan girdapların etkisi ortadan kaldırılmış olacaktır.

Bunların yanında çift rotora sahip türbinmetrelerin bir diğer avantajı ise rotor dönüş hızlarının toplamının belli bir debi değerinde sabit olmasına karşın, giriş çıkış rotor dönüş hızlarının oranı sabit değildir. Akışkan ortamda meydana gelebilecek girdap yada sürüklenme kuvvetleri bu aynı debi değerinde farklı giriş & çıkış rotor dönüş oranlarının oluşmasına sebep olacaktır. Bu oran sistemde gözlenerek bakım periyotlarının oluşturulmasında kullanılabilir. Tüm bu sıralanan özellikler sebebi ile bu tip türbinmetreler klasiklerinin aksine 1:500 hatta 1:1000 turndown oranlarına sahip olabilirler ve de bu özellikleri sayesinde sıklıkla doğalgaz debi ölçüm sistemlerinde kullanılırlar.



Şekil 2.9 Çift Rotorlu Aksiyal Türbinmetre

3. TÜRBİNMETRE ÜZERİNDE AKIŞ VE TEORİK İNCELEME

3.1 Türbinmetre Temel Teorisi

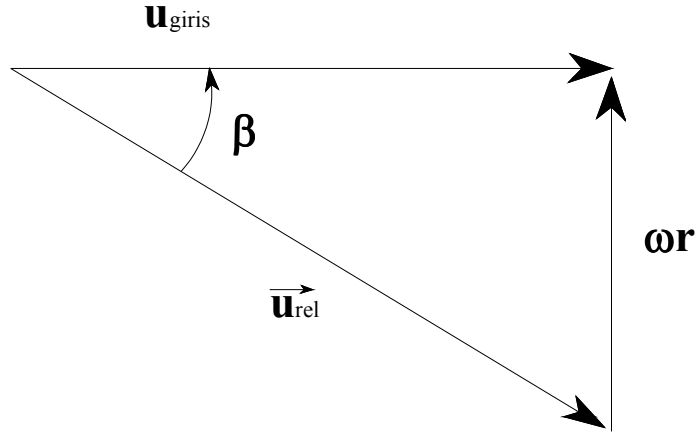
Birçok türbinmetrede düz kesitli kanatlar kullanılır. İdeal durumda bu kanatlar dönüş sırasında akışı mükemmel bir helis açısıyla keserler. Bu basit yaklaşımla U_{giris} rotor akış eksenine paralel akışkan hızının değeri f dönen rotorun kanatlarının algılayıcıdan geçiş frekansı cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$U_{Giris} = U_{rel} / \tan \beta \quad 3.1$$

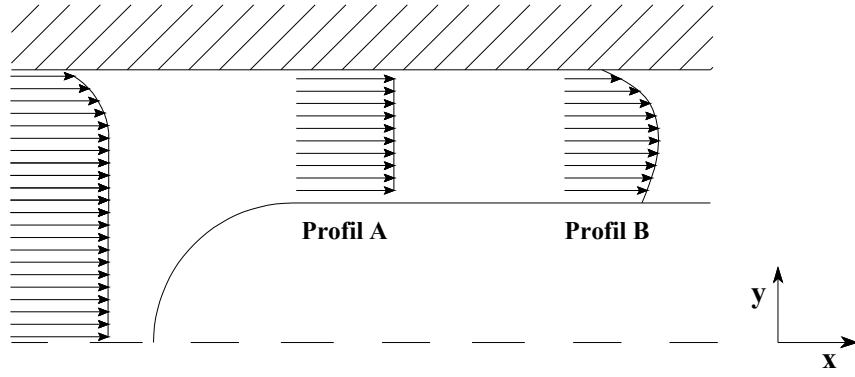
ve

$$f = N \tan \beta U_{Giris} / 2 \pi r \quad 3.2$$

Yukardaki denklemden W rotor dönüş hızı, N rotor kanat sayısı ve r ölçüm alınan noktadaki rotor kanat yarıçapını ifade eder.



Şekil 3.1 İdeal Akışta Hız ve Açılı ilişkisi



Şekil 3.2 Türbinmetre Girişinde ve Rotorda Akışkan Hız Profili

Denklem 3.2 den yararlanarak akış katsayısı, türbinmetre sabiti yada Kalibrasyon sabiti olarak adlandırılan ve pulse başına türbinmetreden geçen hacimsel debiyi ifade eden K katsayısını içeren aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$f = q_V K_F \quad 3.3$$

Fakouhi (1977) denklem 3.3 ' ün aşağıdaki şekilde yazılabileceğini ortaya koymuşlardır.

$$\frac{f}{q_V} = a_0 + \frac{a_1}{q_V} + \frac{a_2}{q_V^2} \quad 3.4$$

Denklem 3.4 de eşitliğin sağındaki ikinci terim viskozite tarafından, sağdan üçüncü terim ise mekanik ve de aerodinamik sürükleme kuvvetlerinin etkisini ifade eder. Bu iki terimin etkisiyle bilinen türbinmetre eğrisi oluşmaktadır.

Bütün bunlarla birlikte türbinmetre içinde her noktada farklılık gösterebilen β akışkan hız profili sebebi ile ve de değişken r kanat çapı, rotor kanatlarının akışı mükemmel bir helis açısı ile kesememesine sebep olarak durumun bu kadar basit açıklanamayacağını ortaya koyar.

Şekil 3.2' de görüleceği üzere sabit hız dağılımına sahip A akışkan hız profili altında rotor çapına bağlı olarak

$$\tan \beta / r = \text{Sabit} \quad 3.5$$

Sabit kalacağı görülür.

Benzer şekilde pratikte sıkça karşılaşılabileceğimiz B akışkan hız profili altında akışkan radyel

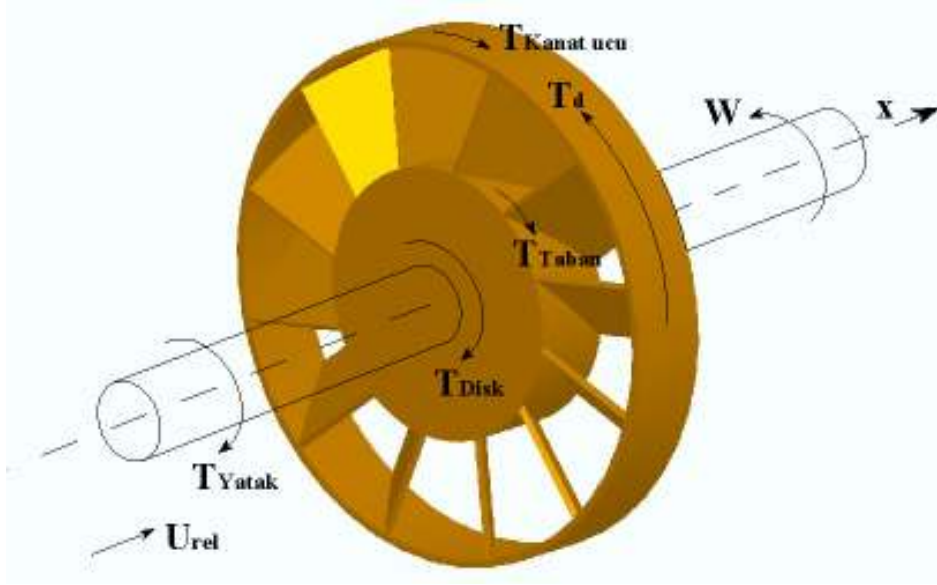
yönde kanadın her noktasında farklı açılarda çarparak denklem 3.5 de belirtilen eşitliğin bozulmasına sebep olacaktır. Bu sebeple türbinmetre tasarımlarında sıklıkla karşılaşılabileceğimiz burgulu kanat profilleri kullanılarak kanat yüzeyinde radyel yönde her noktaya uygulanan hidrolik kuvvetin sabit kalması sağlanır.

Bu açıklamalar altında türbinmetreler için tavsiye edilen montaj kurallarına uygun olmayan durumlarda beklenmedik sonuçların görülebileceği göz ardı edilmemelidir. Çünkü montajı yanlış yapılmış yada dışarıdan bir etki ile giriş akışkan hız profili etkilenmiş Türbinmetrelerde akışkanın rotor kanatlarına olan hücum açısı her noktada farklılık gösterir.

Türbinmetre üzerinde akışı incelerken türbin rotoru dönüş hızını etkileyebilecek tüm parametreler göz önüne alınmalıdır. Gerçekçi ve doğru bir hesap için bu parametreler denklem 3.4 viskozite ve aerodinamik kuvvetler başlıkları ile belirtilmek istenen akışkan viskozitesi, akışkan giriş hızı profili, türbinmetre geometrisi, rotor yatağı ve kanat ucu açıklığı etkisi şeklinde sıralanır.

Türbinmetre üzerinde akan akışkan uyguladığı moment etkisinde dönen türbin rotorunu üzerine yukarıda saydığımız parametreler vasıtası ile birçok ters yönlü kuvvet etki ederek rotorun ideal dönüş hızından sapmasına sebep olur. Şekil 3.3'de Tsukomoto ve Hutton (1985)' un yaptığı çalışmalarda ortaya koyduğu 4 farklı yavaşlatıcı momenti gösterilmiştir.

T_{YATAK}	Yataklama Direnci
T_{DISK}	Taban Diski Sürüklenme Direnci
$T_{KANAT\ UCU}$	Kanat Ucu Açıklığı Direnci
T_{TABAN}	Tabanda Akışkan Sürüklenme Direnci



Şekil 3.3 Türbinmetre Rotoruna Etkiyen Tork (Döndürme Momenti) Kuvvetleri

Bunlara ilave olarak yalnızca küçük ebatlı Türbinmetrelerde etkisi ön plana çıkan ve de hesaplaması kolay olmayan manyetik algılayıcı direnci eklenebilir.

İdeal durumu ele aldığımızda sonsuz ince kalınlıklı kanatlara sahip bir türbinmetreden geçen akışkanın uniform, sıkışamaz ve de akışın zamanla değişmedi bir durumda rotorun herhangi bir sürtünme kuvveti etkisinde kalmadan döndüğü durum ele alınmaktadır. Böyle bir durumda rotorun dönme hızı, S rotor kanatçıkları arası mesafe ile ifade edilebilmekle birlikte şu şekilde tanımlanır;

$$S = \frac{2\pi r}{\tan \beta} \quad 3.6$$

Bu eşitlikte rotor çapı r ve rotor kanatlarının rotor dönüş eksenine ile yaptığı açı β olarak tanımlanmaktadır. (Şekil 3.4). İdeal durumda S rotorun bir turunda akışkanın aksel yer değiştirmesi olarak tanımlanabilir ve farklı rotor yarı çapı değerleri için S sabit kalır. Sürtünmenin ihmal edildiği durumda rotor boyunca giren ve çıkan akışkan kanatçıklara paralel bir yol izler. Bu durumda rotor dönüş hızının akışkan giriş hızına oranı rotor β kanat açısı olmak üzere aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\frac{w_{id} r}{u_{giriş}} = \tan \beta \quad 3.7$$

w_{id} ideal durumda rotor açısal hızı ve u_{id} akışkanın rotora giriş hızını ifade eder. Bu durumda açısal hız w_{id} ;

$$w_{id} = \frac{u_{giriş} \tan \beta}{r} = \frac{2 \pi u_{giriş}}{S} \quad 3.8$$

şeklinde de ifade edilebilir.

Hacimsel debi akışkanın rotora giriş hızı ile rotor yüzey kesit alanının çarpımı şeklinde ifade edilirse, hacimsel debi ile rotor dönüş hızı arasındaki aşağıdaki eşitlik yazılabilir ;

$$Q = \frac{AS}{2\pi} w_{id} \quad 3.9$$

Bu eşitlikte sabitler bir tarafta toplanır ve bir K katsayısı ile ifade edilirse

$$Q = K w_{id} \quad 3.10$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte yer alan sabit K katsayısı, türbinmetre akış katsayısı olarak adlandırılır.

3.2 Daimi Akışta Türbinmetre

Türbinmetre akış karakteristiği üzerine analitik ve de deneysel bir çok çalışma yapılmış yapılmıştır. Bu çalışmalar içinde son dönemlerde yapılan güncel çalışmalarla (Thompson ve Grey (1970), Tsukomoto ve Hutton (1985), Y. Zu (1992), Von Lavante (2003), Merzkirch (2005), L.Sun Z.Zhou (2006)) türbinmetre içindeki akışı nümerik olarak modelleyerek incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen teorik modeller ile türbinmetre geometri üzerinde performansı arttırıcı çalışmaların yapılmasını sağlamış, farklı akışkan ortamlarda nasıl bir performans beklenebileceği konusunda bir fikir ortaya koymuşlardır. Gerçek akışkan akışı şartlarında türbinmetrenin reynolds sayısına bağlılığı 0,2% iken, bu tez konusu altında yapılan çalışmada beklenebilecek en iyi hata değeri de belirtilmektedir.

Türbinmetre rotoru hakaret denklemleri ile çözülmeye çalışılacaktır. Akışkan akışı sırasında rotorun üzerinden geçen akışkan, rotor üzerinde T_d döndürme momentini oluşturur. İlk olarak

bu döndürme momentini hesaplamak için iki yöntem üzerinde durulacak daha sonrada akışkanın rotora giriş hızı u_{giris} 'nin etkisi sınır tabaka yaklaşımı ile ele alınacaktır. Diğer sürtünme kuvvetlerinin rotor dönme hızı üzerindeki etkisi açıklanacaktır. Son bölümde ise ampirik formüller ile elde ettiğimiz rotor dönüş hızı, hazırlanacak olan sayısal HAD modelinden elde edilecek sayısal çözümler TÜBİTAK – UME akışkanlar mekaniği laboratuvarında yapılmış olan test dataları ile karşılaştırılacaktır.

3.3 Türbinmetre Teorik Modeli

Literatüre bakıldığında türbin rotoru üzerine etki eden döndürme momentini momentum yöntemi C.Baker (1993), airfoil yöntemi ise Rubin (1965) tarafından üzerinde çalışmalar yapılmış yöntemlerdir.

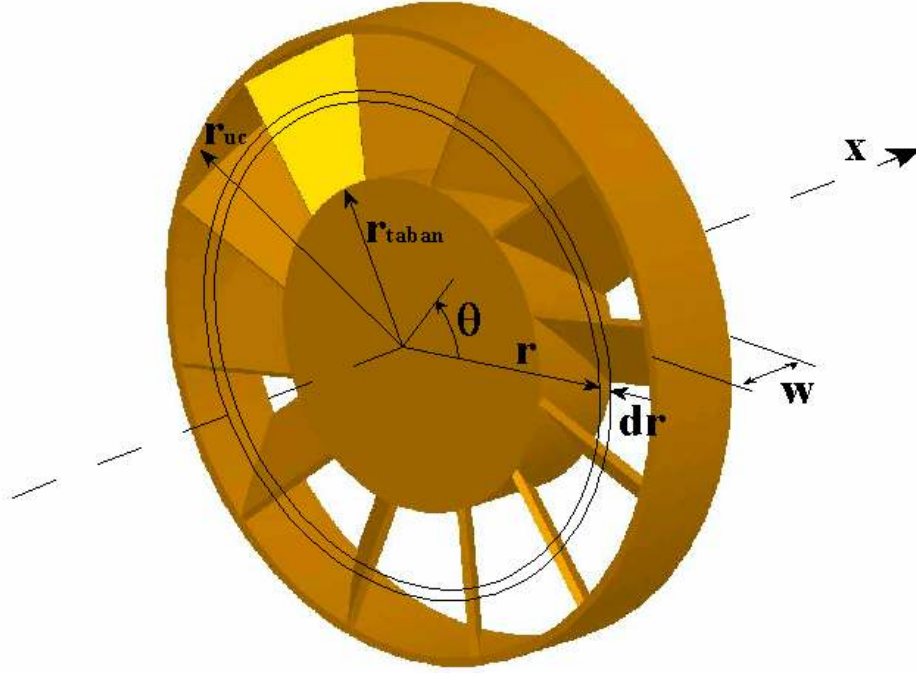
Momentum yaklaşımında momentum integrali rotor kanatçıkları üzerinde çözümlenerek rotor üzerindeki döndürme momenti hesaplanır. Bu yöntemin en önemli kabulü akışkan iplikçiklerinin birbirlerini takip ettiği varsayımdır. Bu varsayımda akışın düzgün ve rotor çıkışında kanatlardan teğetsel olarak çıktığı kabul edilir. Bu kabuller iki kanat arası mesafenin kanat genişliğine oranının küçük olmasını gerektirir. Weing (1964), 2 boyutlu bir model üzerinde yaptığı çalışmalarda iki kanat arası mesafe S nin kanat genişliğine L_{kanat} oranının $S/L_{kanat} \leq 0.7$ olması gerektiğini ortaya koymuştur.

Rotor üzerine etkileyen döndürme momentini hesaplamak için kullanılan bir başka yöntem ise airfoil yöntemidir. Bu yöntemde kanat üzerinde kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini hesaplayarak bir kanada etkileyen toplam net kuvvetler hesaplanır ve kanat sayısı ile çarpılır. Bu yöntemde akışkanın yüzeyi takip ettiği kabulü yapılmaz ancak kanatların birbirlerine olan etkileri ihmal edilir. Bunun anlamı kanat sayısındaki artış döndürme momentini aynı şekilde arttırır. Thompson ve Grey (1970) yaptıkları çalışmalarda Weing (1964)' ün yaptığı çalışmaları geliştirip bağımsız kanatların birbirlerine olan etkilerini de dikkate alan bir yöntem geliştirmişlerdir.

3.3.1 Momentum Yöntemi

Türbinmetreler 3 boyutlu karmaşık bir yapıya sahip ölçüm cihazlarıdır. (Şekil 3.5) Bazı kabuller altında bu 3 boyutlu yapıya sahip problemi 2 boyutlu bir düzlemde ele alarak düzgün aksenal u_{in} giriş hızında r yarı çapında dr kalınlığında bir hacimden akan akışkanın rotor kanatlarına etkisini inceleyeceğiz. X yönü aksenal yönü, y yönü ise akışa dik kanat aksenini

göstermektedir. Akış hacmi boyunca radyel hızlar ihmal edilmiş ve rotorun sabit bir w hızı ile döndüğü kabulü yapılmıştır. Rotora etki eden döndürme momentini hesaplamak için rotor kanatlarına etki eden kuvvetleri rotor yarı çapında integre edilmesi gerekir. Rotoru da içine alan kontrol hacmi Şekil 3.5' de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Türbinmetre Rotoru

Rotor üzerine etki eden döndürme momentini hesaplamak için kütle korunumu ve momentumun korunumu denklemlerini 2 boyutlu rotor kanat yapısı üzerinde aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho dV + \iint_{CS} \rho \underline{v} \cdot \underline{n} dA = 0 \quad 3.11$$

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho \underline{v} dV + \iint_{CS} \rho \underline{v} (\underline{v} \cdot \underline{n}) dA = - \iint_{CS} p \underline{n} dA + \iint_{CS} \underline{\tau} \underline{n} dA + \underline{F}_{bf} \quad 3.12$$

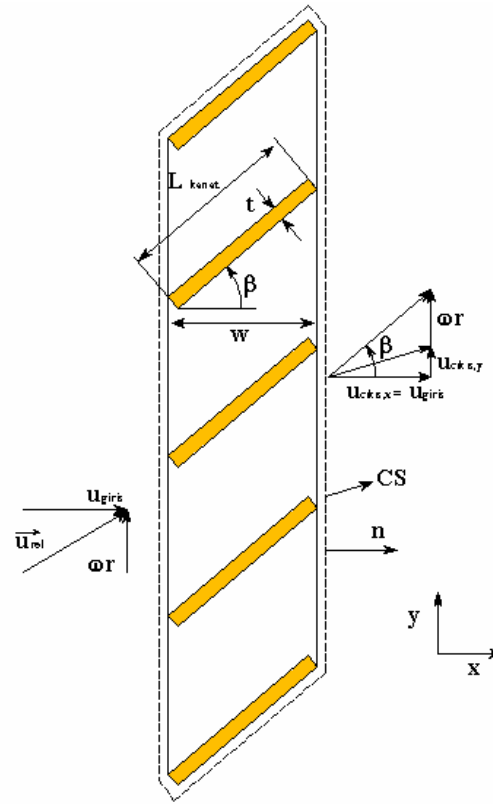
Bu denklemleri CS kontrol yüzeyleri içinde kalan rotor kanat yapısı için çözümler yapılır. Bu denklemlerde CV kontrol yüzeyleri arasında kalan hacim, \underline{n} kontrol yüzeyinden çıkan normal vektörü, ρ akışkan yoğunluğu, \underline{v} akışkan hız vektörü, p akışkan basıncı, $\underline{\tau}$ viskoz stres tansörünü ve \underline{F}_{bf} rotor kanatlarının akışkana uyguladığı kuvvetleri göstermektedir.

Radyel hızları ve Coriolis kuvvetlerini ihmal edersek akışkanın ele alınan kontrol hacmi

içerisinde rotor çevresi boyunca her yerde kanatlara paralel olarak rotordan çıktığı kabulünü yapabiliriz. Benzer şekilde akışkanın kontrol hacmine yani rotora control yüzeyi normali doğrultusunda $u_y = 0$, girdiğini ve akışkanı daimi ve sıkışamaz kabul ederek 2.6' deki kütle korunumu denklemini dr hacimsel elaman için yeniden yazarsak,

$$u_{giriş,x} dA_{giriş} = u_{cikis,x} dA_{cikis} \quad 3.13$$

denklemini elde ederiz.



Şekil 3.5 2 Boyutlu Türbinmetre Rotor Kanat Yapısı Üzerinde Giren&Çıkan Akışkan hızları

Burada $u_{giriş,x}$, giren ve $u_{çıkış,x}$ çıkan akışkanın x yönündeki bileşenlerini, $dA_{giriş}$ ve $dA_{çıkış}$ giriş çıkış yüzey alanlarını ifade eder. Giriş & çıkış alanlarını eşit ve akışkanı da sıkışamaz kabul edersek

$$dA_{giriş} = dA_{çıkış} = 2\pi r dr \quad 3.14$$

Eşitliğini yazabiliriz. Bu durumda giren ve çıkan akışkanın x yönündeki hızları eşit olur.

$$u_{giriş,x} = u_{cikis,x} \quad 3.15$$

Benzer yaklaşımla viskoz kuvvetleri ihmal ederek y yönündeki momentumun korunumu denklemini daimi akış için dr kalınlıklı bir hacim elemanı için yazarsak

$$\rho((u_{cikis,y} + wr)u_{cikis,x} dA_{cikis} - u_{giriş,x} wrdA_{giriş}) = dF_{bf,y} \quad 3.16$$

Şekil 3.5 deki hız vektörleri gösteriminden

$$u_{cikis,y} = u_{cikis,x} \tan \beta - wr \quad 3.17$$

Olduğu görülür.

Bu noktaya gelindiğinde 3.16 ve 3.17 denklemlerini 3.18' de yerine koyarsak rotor kanatlarının akışkan üzerine uyguladığı kuvvetin y bileşeni olan $dF_{bf,y}$ şu şekilde yazabiliriz.

$$dF_{bf,y} = \rho u_{cikis,x}^2 \tan \beta dA_{cikis} - u_{giris,x} \omega r dA_{giris} \quad 3.18$$

Rotorun akışkana uyguladığı kuvvet, akışkanın rotora uyguladığı kuvvete eşit ve de ters yönde olduğundan aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$dF_{bf,y} = - dF_{fb,y} \quad 3.19$$

Bu durumda akışkanın rotor eksenini üzerinde rotor kanatlarına uyguladığı döndürme momenti dT_d aşağıdaki şekli alır.

$$dT_d = r dF_{fb,y} \quad 3.20$$

3.18 denklemini 3.19 de yerine yazıp rotor kanat dibi ile kanat ucu arasında integre edersek akışkanın rotor kanatlarına uyguladığı döndürme momentini veren ifadeyi aşağıdaki şekilde elde ederiz.

$$T_d = - \int_{r_{taban}}^{r_{uc}} \rho u_{cikis,x}^2 (\tan \beta) r dA_{cikis} + \int_{r_{taban}}^{r_{uc}} \rho u_{giris,x}^2 \omega r^2 dA_{giris} \quad 3.21$$

3.3.2 Air Foil Yöntemi

Rotor kanatlarına hareket eksenini üzerinde etki eden döndürme momentini hesaplamak

için kullanılan bir diğer yöntem ise airfoil yöntemidir. Momentum yönteminde yaptığımız kabullere benzer şekilde yarıçapı r ve dr kalınlıklı sonsuz 2 boyutlu bir modeli ele alırsak (Şekil 3.6) rotora etki eden döndürme momenti, rotor kanatlarına etki eden kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin hesaplanması ile bulunur. Kanada etki eden kaldırma kuvveti F_L relativ rotor giriş hızı yönünde dik bir doğrultuda etki ederken,

$$\underline{u}_{giris,rel} = (u_{giris,x}, \omega r) \quad 3.22$$

F_D giriş hız vektörüne paralel yönde bir kuvvet ile etki eder. Bu yöntem ile rotor kanatlarına etki eden kuvvetlerin rotor yataklama eksenini olan x yönü yok sayılıp y yönünde etki eden bileşkesi F_L ve F_D cinsinden ifade edilir.

$$F_y = n(-F_L \cos \phi + F_D \sin \phi) \quad 3.23$$

Burada $\phi = \beta - \alpha = \arctan\left(\frac{\omega r}{u_{giris,x}}\right)$ ve β rotor kanatlarının rotor eksenini ile yaptığı açığı, n

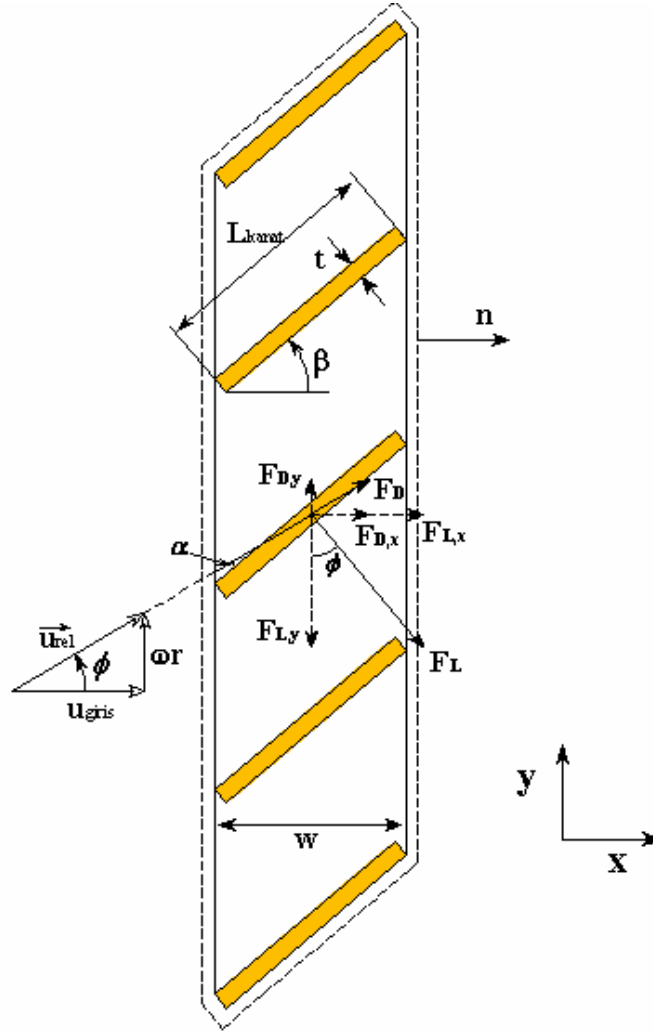
rotor kanat sayısını ve α ise akışkanın rotora giriş açısı (hücum açısı) olmak üzere, kaldırma ve sürüklenme katsayıları şu şekilde ifade edilir.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho u_{giris,rel}^2 L_{kanat}} \quad 3.24$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho u_{giris,rel}^2 L_{kanat}} \quad 3.25$$

Bu denklemlerde L_{kanat} kanat boyunu ifade eder. Bununla birlikte kaldırma ve sürüklenme katsayıları α hücum açısı, Re Reynolds sayısı ve mach sayısı ile değişiklik gösterir. Bulduğumuz bu katsayılarla beraber rotor kanatlarına etkileyen döndürme momentini şu şekilde yazabiliriz.

$$T_d = \int_{r_{taban}}^{r_{uc}} \frac{1}{2} n \rho u_{giris,rel}^2 L_{kanat} (-C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) r dr \quad 3.26$$



Şekil 3.6 2 Boyutlu Türbinmetre Rotor Kanat Yapısı Üzerinde Kaldırma ve Sürüklenme Kuvvetleri

3.4 Hareket denklemi

3.21 ve 3.26 denklemleri ile elde ettiğimiz döndürme momenti ve rotor üzerinde yazacağımız hareket denklemleri ile rotorun hızını hesaplayabiliriz.

$$I_{rotor} \frac{d\omega}{dt} = T_d - T_f \quad 3.27$$

burada I rotorun atalet momenti, T_F rotora etki eden sürtünme kuvvetlerinin rotorun dönüş yönüne ters yönde etki ettirdiği durdurma - yavaşlatma momentini ifade etmektedir. Tezin konusu olan bu çalışmada daimi bir akışın incelenecek olması sebebiyle 3.27 denklemi aşağıdaki eşitliğe dönüşür.

3.5 Düzensiz Akışkan Hız Profiline Türbinmetre Üzerindeki Etkisi

Denklem 3.21' de de görüleceği üzere rotor kanatlarına etki eden döndürme momenti türbinmetre girişindeki akışkan hızının büyüklüğüne ve yönüne bağlıdır. Bununla birlikte türbinmetre girişinde akışkan genellikle düzensiz (non-uniform) bir davranış gösterir. Cidarlarda oluşabilecek sınır tabakalarla beraber giriş tarafındaki düzensizliklerden kaynaklı girdaplarda meydana gelebilir. Türbinmetrelerin sistemde montajlarının yapıldığı yerlere bağlı bazı etkilerde söz konusu olabilir. (dirsek, vana v.b.). Özellikle dirseklere yakın bölgelerde oluşan girdapların türbinmetre üzerinde büyük etkileri vardır. Bu etkileri minimuma indirmek için türbinmetre girişlerine akış doğrultucular ya da girdap eliminatörleri yerleştirilir. Türbinmetrelerin montaj yerlerine bağlı oluşan akış düzensizlerinin türbin tip ya da farklı tiplerde akışkan debi ölçüm cihazları üzerine etkisini inceleyen literatürde birçok çalışma mevcuttur. P.Jepson & P.G Bean (1969), Thompson & Grey (1970), J.T. Park (1995) ve B.Michan, G.Wendt, R.Kramer, D.Dopheide (1997) yaptıkları çalışmalarda çeşitli boru dizilimlerinin akışkan hız profiline etkilerini ve de oluşan bu hız profillerinin uniform hale getirmek için kullanılan farklı geometrilere sahip akış doğrultucularının etkilerini incelemişler, bunların debi ölçüm cihazları üzerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır.

P.Jepson & P.G Bean (1969) tarafından yapılan çalışmada Weinig (1964), 'ün 2 boyutlu bir model üzerinde yaptığı çalışmaya paralel şekilde iki kanat arası mesafe S nin kanat genişliğine L_{kanat} oranının (S/ L_{kanat}) büyüdükçe, düzensiz akışkan hız profillerine olan duyarlılığının azaldığını ortaya koymuşlardır .

Bu tez çalışması sırasında hazırlayacağımız modelde girdaplı akışın kompleks yapısını ihmal ederek akışın yalnızca aksenal olduğu kabulünü yapacağız. Bu sebeple yapılan bu çalışmada non-uniform (düzensiz) akış terimi yalnızca akışın x eksenini yönündeki düzensizliğinin kast edildiği unutulmamalıdır.

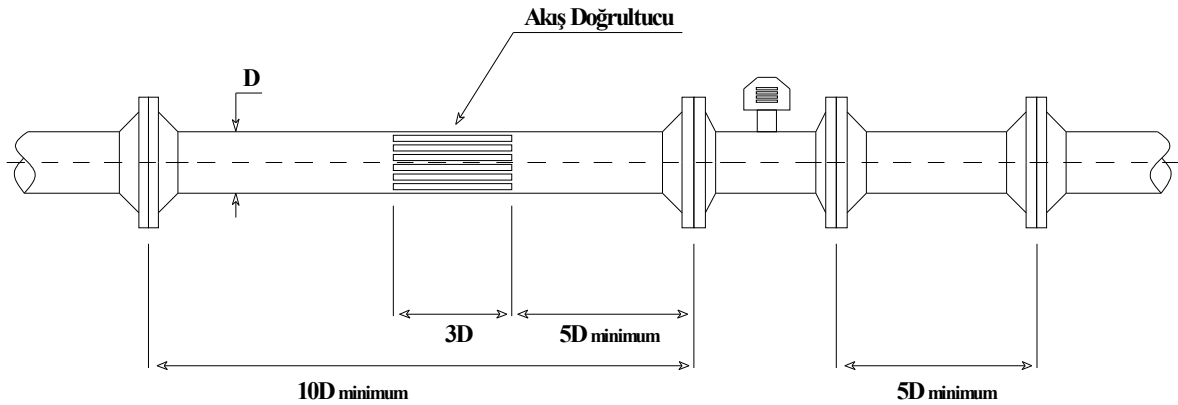
İleriki bölümlerde türbinmetre giriş hız profiline türbinmetre rotorunun dönüş hızı üzerindeki etkilerini sınır tabaka yaklaşımı ile elde edilen denklemler ile hız profiline bağlı rotor dönüş hızını hesaplamaya çalışacağız.

3.5.1 Türbinmetre Montaj Kriterleri

Tüm akışkan debi ölçüm cihazlarında olduğu gibi türbinmetreler de de görülen ölçüm hatalarının en büyük sebebi montaj hatalarıdır. Ölçüm sırasında akışkan gelişmiş hız profiline elde edilmesi için gerekli minimum giriş tarafı düz boru mesafesinin sağlanması bu

noktada çok önemlidir. Türbinmetrelerin çalıştıkları hatlar üzerindeki düzensiz akış koşulları, akışı bozabilecek vanalar, dirsek ve diğer bağlantı parçaları akışın simetrisinin bozulmasına yada girdap oluşumuna sebep olabilirler. Bu sebeple türbinmetre kalibrasyonları sırasında yada türbinmetre ile yapılan ölçümlerde sıklıkla akış doğrultucu adını verdiğimiz basit konstrüksiyonlu cihazla kullanılır. Bu cihazlar birçok durumda bahsettiğimiz bu kaynakların yol açtığı ölçüm hatalarının önleminde kayda değer bir etki gösterirler.

Türbinmetrelerin kalibrasyonu yada türbinmetreler ile yapılan ölçümlerde dikkat edilmesi gereken vade akış doğrultucusun kullanımı yada kullanılmaması durumunda minimum giriş çıkış düz boru uzunluklarını tanımlayan dokümanlar ANSI, API ve ISO gibi standartlarda açıkça belirtilmiştir. Şekil 3.7 'de görüleceği gibi 10D boyunda bir giriş tarafı düz boru mesafesi yada 5D mesafede 3D boyunda bir akış doğrultucunun türbinmetrenin girişinde temin edilmesi standartlarda belirtilmiştir. Çıkış tarafında istenen minimum düz boru mesafesi ise her iki durumda 5D boyundadır.



Şekil 3.7 AGA ve ISO Standartlarına Uygun Türbinmetre ve Akış Doğrultucu Montaj Mesafeleri

Mattingly & Yeh (1991) 'in montaj şekillerinin türbinmetreler üzerinde etkisini inceledikleri çalışmalarında, 1×10^4 ve 1×10^5 Reynolds sayıları arasında 50mm çapındaki boru hattında birbirine dik iki yüzey üzerinde bulunan iki dirseğin sebep olduğu girdabın kaynakdan 40D uzaklıkta 18° den 6° ye daha sonra 80D uzaklıktada 3° ' ye düştüğünü testlerle ortaya koymuşlardır.

Aşağıda Mattingly & Yeh (1991)' nin yaptığı çalışmalar sonucu elde ettiği bazı sonuçlar Çizelge 3.2' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Mattingly & Yeh – 1991 Test Sonuçları

<u>Parça</u>	<u>Giriş Mesafesi (D)</u>	<u>Türbinmetre K Faktöründe Fark (%)</u>
Akış Doğrultucusuz Durum		
Tek 90° Dirsek	30	> 0.1
İki 90° Dirsek	25	+1
Akış Doğrultuculu Durum		
Tek 90° Dirsek	15	- 0.1
İki 90° Dirsek	10	+0.2

3.5.2 Akış Doğrultucuların Etkisi

Çalışma şartlarında tüm debi ölçüm cihazları ölçüm sırasında girdap, türbülans ve akışkanın hız profiline duyarlılık gösterirler. Metrolojik Kalibrasyon sonucu elde edilen debimetrelerin kalibrasyon katsayıları yalnızca kalibrasyon düzeneği ile çalışma şartları arasında geometrik ve de dinamik benzerlik bulunması durumunda geçerlidir. Bunu akışkanlar mekaniğindeki benzeşim kanunu ile açıklayabiliriz.

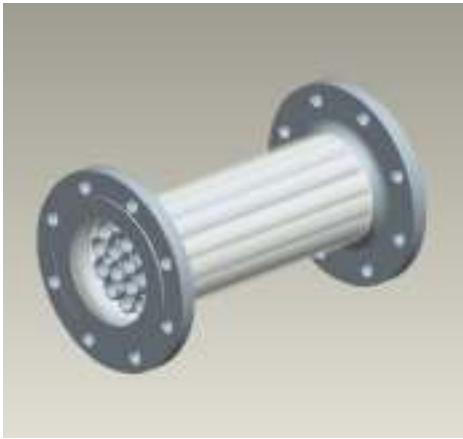
Gerçek çalışma şartları altında ölçüm cihazları diğer birçok cihaz, ekipman ve aksesuarlarla ile birlikte daha büyük bir sistemin parçaları olarak bir arada çalışırlar. Bir arada çalışan bu cihazların kimi zaman mecburiyetten kimi zaman ise bilgi eksikliği kaynaklı, birbirlerine olan etkileri dikkate alınmaz. Dikkate alınmayan bu etkiler sıklıkla ölçüm cihazları üzerinde hatalı değerlerin okunmasına sebep olmaktadır. Örnek olarak hemen bir dirsekten sonra yerleştirilen türbinmetre, dirseğin sebep olduğu akışkan hız profili değişimleri ve girdaplardan etkilenecek hatılı ölçümler yaparlar. Tüm bu olumsuzluklar ilgili konularda standartlar yazan kuruluşlar ve ölçüm cihazı üreticilerini karmaşık problemlerle karşı karşıya getirir. Gerçekten üzerinde durulması gereken konu gerçek çalışma şartları ile kalibrasyon şartları arasındaki farkları minimuma indirerek, sistemde tam gelişmiş akış profilini sağlamaktır.

Kalibrasyonu yapılan herhangi bir ölçüm cihazı için yapılan kalibrasyonun kullanılabilir bir anlam ifade etmesi için çalışma şartları ile kalibrasyon şartlarının benzeşim göstermesi gerekmektedir. Buna karşı üreticiler ölçüm cihazının performansını en üst seviyede tutmak için bazı özel durumlar için geçerli çeşitli korelasyon metotları önerebilmektedirler.

Eğer sistemde olumsuz etkilerin kendi kendine yok olması için standartlarda tanımlı gerekli düz boru mesafeleri yoksa kullanılacak en basit metot sisteme ölçüm cihazından önce bahsedilen diğer cihazların olumsuz etkilerini bertaraf edebilecek akış doğrultucularını

yerleştirmektir. Akış doğrultucuları standartlarda ve üretici kataloglarında tanımlı gerekli boş düz boru mesafelerine uygun olarak yerleştirildiklerinde akış profilini bozabilecek birçok etkinin önüne geçebilmektedirler. Pratikte bu olumsuz etkileri % 100 olarak önleyemese de akış doğrultuculardan beklenen asıl hedef düzgün gelişmiş akış profilini temin etmeleridir.

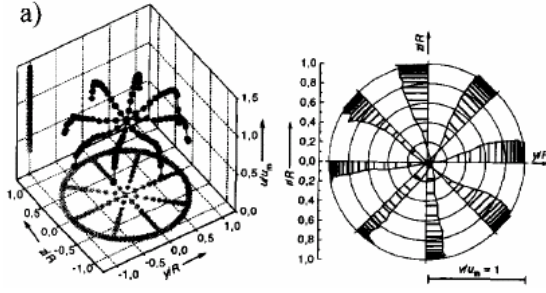
Teorik olarak düzgün gelişmiş akım profili dendiğinde girdapsız, aksi simetrik ve zamana bağlı hız profilinin ortalama hızın birden çok küçük üstel bir kuvvet ile ifade edilebilen (Schlichting (1979), 1/7th Power Law) akış ile ifade edilir. Akış doğrultucularının 3 çeşidi mevcuttur. Bunlardan ilki akışı belli bir mesafe boyunca çok sayıda paralel parçalara ayırarak sistemde bulunan girdap açılarını %2 den daha düşük değerlere getirebilen boru demetleridir. Bir diğer çeşit akış doğrultucuları ise, tek yada seri halde çok sayıda perfore delikli yapıların blokaj etkilerini kullanarak akışını aksi simetrik bir forma sokan sistemlerdir. Son olarak ise akışkan hız profili değişik çaplı gözenekli ortamdan geçirerek türbülans yapılarının bu çaplara bağlı olarak yeniden oluşturulması prensibi ile çalışan akış doğrultucu sistemlerdir.



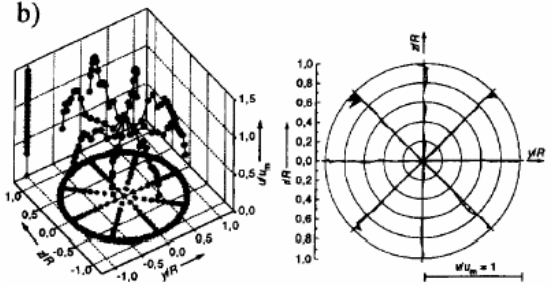
Şekil 3.8 Boru Demeti Tip Akış Doğrultucu **Şekil 3.9** Perfore Delikli Tip Akış Doğrultucu

G.Wendt – 1996 4 kişilik bir ekiple yaptığı çalışmalarında dirsek ve kısmi açık vanaların akışkan hız profili üzerine olumsuz etkilerini, bu olumsuz etkilerin bertaraf edilmesi için kullanılan akış doğrultucuları performanslarını incelemiş ve sonuçları aşağıdaki şekilde yayınlamışlardır. Yapılan çalışmanın en önemli çıktılarından biri olarak boru demeti yapılı (Tube-Bundle) akış doğrultucuların hız profilinin düzeltilmesi yönünde hiçbir olumlu etkisi bulunmadığını ancak akışın yapısında bulunan girdapların yok edilmesinde ise çok iyi sonuçlar verdiğini ortaya konmuş olmasındır. Yine benze şekilde A.K. Ouazzane, R. Benhadj (2002) yaptıkları çalışmada boru demeti tip akış doğrultucularının ultrasonik debimetrelerde kullanımının kesinlikle uygun olmadığını buna karşın türbinmetreler de ise çok iyi sonuçlar

verdiğini yaptıkları testlerle doğrulamışlardır.



Şekil 3.10 Birbirine Dik İki Düzlem Üzerine Peşpeşe Yerleştirilmiş 2 Dirsekten 10D Uzaklıkta Aksenel ve Radyal Hız Profili (Hava Debisi 1750 m³/h)



Şekil 3.11 Birbirine Dik İki Düzlem Üzerine Peşpeşe Yerleştirilmiş 2 Dirsekten 10D Uzaklıkta Yerleştirilmiş Boru Demeti Tip Akış Doğrultucu Çıkışında Aksenel ve Radyal Hız Profili (Hava Debisi 1750 m³/h)

3.6 Viskozitenin Türbinmetre Üzerindeki Etkisi

Türbinmetreler benzer prensiple çalışan güç türbinleri yada aksiyel pompalardan farklı olarak güç üretmeyen bir güç türbini olarak tanımlanabilirler. Her ne kadar çalışma prensipleri benzese de güç türbinleri ile türbinmetrelerden beklenen özellikler tamamen farklıdır. Güç türbinleri minimum türbin hacminde maksimum akışkan deplasmanını sağlayacak şekilde tasarlanırken, türbinmetrelerden çalışma aralığı içinde viskoziteden bağımsız olarak akışkan hacimsel debisi ile türbin dönüş hızı arasında lineer bir ilişki beklenmektedir.



Şekil 3.12 Küçük Ebatlı Su Türbünü

Viskozitenin türbinmetre üzerinde iki temel etkisinden bahsedilebilir. Bunlardan ilki viskoziteye bağlı akışkan hız profilinin sonucu olan sınır tabaka kalınlığıdır. Viskozitenin

artmasına bağı olarak sınır tabaka kalınlığı azalır ve radyel yönde akışkan hacmi, çapın karesi ile doğru orantılı olarak artar. Bunun anlamı şu şekilde özetlenebilir. Kanat ucu bölgesinde değişiklik gösteren akışkan hız profili (sınır tabaka kalınlığı) sebebi ile türbinmetre rotor kanat uzunluğu ve de şekli K akış katsayısının hesaplanmasında önemli rol oynar. Oluşan bu sınır tabaka kalınlığı türbinmetrenin çalışma aralığında non-linear bir davranış göstermesine sebep olur.

Akışkan viskozitesine bağı bir diğer etki ise kesme kuvvetlerinin rotor ve yataklama elemanı olarak kullanılan rulmanlar üzerindeki etkisidir.

W.F.Z. Lee & H. Karlby (1960) yaptıkları çalışmalarda viskozitenin türbinmetre üzerindeki etkilerini incelemişler ve de farklı viskozitelerdeki akışkanlarla çalışabilecek bir türbinmetre üzerinde çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada bizimde elde ettiğimiz denklem 3.21 ' yi farklı bir formda ele alarak incelemişlerdir.

$$\bar{r} = \left(\frac{r^r + r_{Uc}^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 3.40$$

$$T_d = \left[\frac{\tan \beta}{r A_{cikis}} - \frac{w}{Q} \right]^{-2} r^2 \rho Q^2 \quad 3.41$$

Yine benzer bir yaklaşımla

$$T_d = T_r \quad 3.42$$

$$T_r = T_m + T_f \quad 3.43$$

T_m , Rulman, yataklama elemanları ve de mekanik sayıcıdan kaynaklanan toplam yavaşlatma momenti

T_f , Akışkan aerodinamik sürüklemesinin sebep olduğu toplam yavaşlatma momenti

Kabulü yapılarak yavaşlatıcı etki gösteren döndürme momentlerini aşağıdaki şekilde ikiye ayırmışlardır. Denklem 3.41 – 3.42 ve 2.43 bir arada yazar ve $\frac{w}{Q}$ ya eşitlersek.

$$\frac{w}{Q} = \left(\frac{\tan \beta}{r A_{Cikis}} \right) - \left(\frac{T_m}{r^2 \rho Q^2} \right) - \left(\frac{T_f}{r^2 \rho Q^2} \right) \quad 3.44$$

Denklem 2.29' da

$$\frac{w}{Q} = \frac{w(\text{Zaman } t)}{Q(\text{Zaman } t)} = \frac{t \text{ zaman zarfında rotorun acisal yer deg istirmesi}}{t \text{ zaman zarfında gecen toplan hacimsel debi}} \quad \text{ifade}$$

eder. w/Q türbinmetreler için direkt bir ölçüm parametresidir. Yüksek tekrarlanabilirlikli türbinmetrelere bu değer çalışma aralığında farklı debi değerlerinde ve farklı akışkan viskozitelerinde sabit kalır yada çok küçük bir aralıkta değişim gösterir. W.F.Z. Lee & H. Karlby (1960) çalışmalarında T_m , Rulman, yataklama elemanları ve de mekanik sayıcıdan kaynaklanan toplam mekanik yavaşlatma momentinin çok çok küçük olduğunu kabul ederek ihmal etmişlerdir. Bu kabulde denklem 3.44 aşağıdaki şekli almıştır.

$$\frac{w}{Q} = \left(\frac{\tan \beta}{r A_{Cikis}} \right) - \left(\frac{T_f}{r^2 \rho Q^2} \right) \quad 3.45$$

Daha sonra T_f , Akışkan aerodinamik sürüklemesinin sebep olduğu toplam yavaşlatma momentini de

$$T_f = T_{ff} + T_{fs} \quad 3.46$$

T_{ff} , Akışkan aerodinamik sürüklemesinin etkisinde toplam yüzey sürtünme kuvvetlerinin sebep olduğu yavaşlatma momenti, D_f

T_{fs} , Akışkan aerodinamik sürüklemesinin etkisinde tüm toplam ikincil sürüklenme kuvvetlerinin sebep olduğu yavaşlatma momenti, D_s

şeklinde ikiye ayırmışlardır. Bu noktada denklem 3.44 aşağıdaki forma gelmiştir.

$$\frac{w}{Q} = \left(\frac{\tan \beta}{r A_{Cikis}} \right) - \left(\frac{T_{ff}}{r^2 \rho Q^2} \right) - \left(\frac{T_{fs}}{r^2 \rho Q^2} \right) \quad 3.47$$

W.F.Z. Lee & H. Karlby (1960) yaptıkları çalışmada T_{ff} 'yi şekil 3.6' ya dayanarak aşağıdaki şekilde yazmışlardır.

$$T_{ff} = n \bar{r} D_f \sin \beta \quad 3.48$$

Yüzey sürtünmesi sürüklenme katsayısı olarak adlandırılan C_f aşağıdaki şekilde tanımlanır

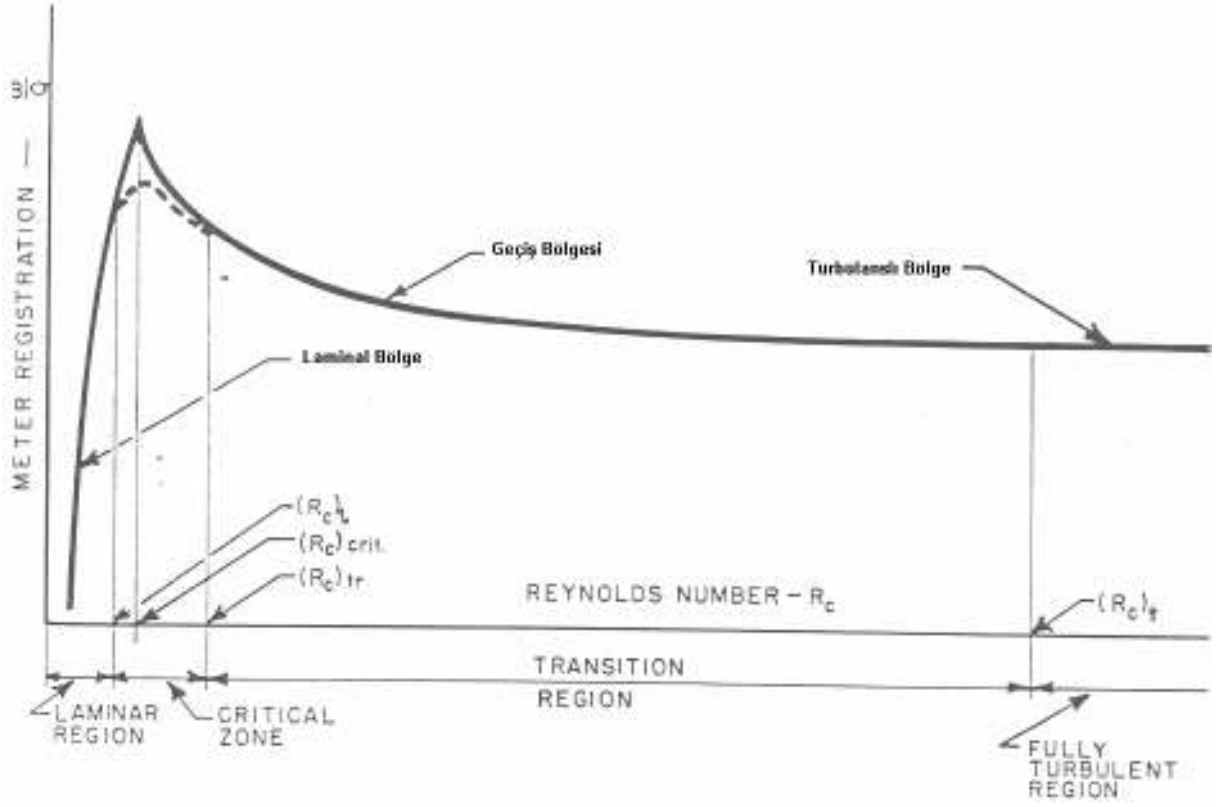
$$C_f = \frac{D_f}{\frac{1}{2} \rho U^2 [2l_{Kanat} (r_{Kanat\ Ucu} - r_{Kanat\ Taban})]} \quad 3.49$$

W.F.Z. Lee & H. Karlby (1960)' ın tanımladıkları bir diğer katsayı ise tüm ikincil sürtünme katsayısı olarak adlandırılan C_s katsayısıdır ve de aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$T_{fs} = \bar{r} D_s \quad 3.50$$

$$C_f = \frac{D_s}{\frac{1}{2} \rho U^2 [2l_{Kanat} (r_{Kanat\ Ucu} - r_{Kanat\ Taban})]} \quad 3.51$$

Tüm bu katsayılar denklem 3.47 de yerine yazılır ve de sabitler bir K katsayısı altında toplanırsa denklem 3.47 aşağıdaki son şeklini alır.



Şekil 3.13 W.F.Z. Lee & H. Karlby (1960) tarafından yapılan nümerik çalışma sonucu oluşturulan türbinmetre eğrisi

3.6.1 Sınır Tabaka Akımının Etkisi

Hareket halinde boru eksenini boyunca ilerleyen akışkan akış doğrultucusundan geçerek türbinmetre statorunda ilerleyerek rotora ulaşır. Statora giren akışkan meydana gelen daralma sonucu hızlanır ve bu hız artışı sebebiyle sınır tabaka kalınlıkları azalır. Statora ulaşan akışkan stator tabanı ve dış çeperler olmak üzere iki yüzeyde sınır tabaka oluşturur. Oluşan bu yeni aksi simetrik hız dağılımı 3 bölgeden oluşur. İlk bölge stator tabanında oluşan sınır tabaka, 2. bölge hızın uniform kabul edilebileceği 2 sınır tabaka arasında kalan bölge, 3. bölge ise dış duvarda oluşan sınır tabaka bölgesidir. Bu tez çalışmasında hesaplamalar laminar ve türbülanslı olmak üzere iki farklı akış durumu için yapılacaktır. Laminardan türbülanslı akışa geçiş optimal şartlarda ve $Re \geq 3 \times 10^5$ (Schlichting (1979)) değerlerinde gerçekleşmekle beraber bu değer üstünde geçiş bölgesi akımını ihmal ederek akımı türbülanslı olarak kabul edeceğiz.

Hesaplamalarda kullanılacak sınır tabaka kalınlıkları Von Karman integral yöntemi ile

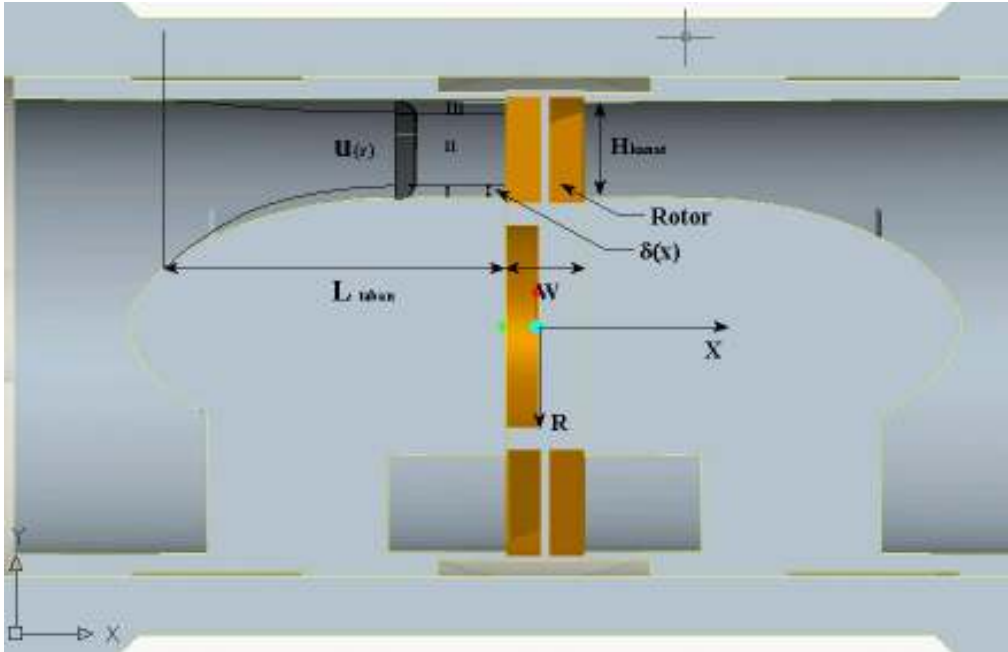
aşağıdaki kütle ve momentum korunumu denklemlerinin sınır tabaka üzerinde çözülmesi ile elde edilecektir..

$$\frac{w}{Q} = \left[\left(\frac{\tan \beta}{r A_{Cikis}} \right) - \left(\frac{K}{n \sin \beta} \right) C_s \right] - KC_f \quad 3.52$$

$$K = \frac{n l_{Kanat} (r_{Kanat\ Ucu} - r_{Kanat\ Taban})}{r A_{Cikis}^2} \left(\frac{\sin \beta}{\cos^2 \beta} \right) \quad 3.53$$

W.F.Z. Lee & H. Karlby (1960) çalışmalarında C_s ' in sabit, C_f ' nin ise reynolds sayısı ile değiştiğini öngörerek laminar, türbülanslı, geçiş bölgesi ve kritik bölge olmak üzere dört farklı durum için C_f katsayısının değerini yaptıkları karşılaştırma testleri yardımı ile hesaplayarak belirlemişlerdir. Bu çalışma sonucu ortaya çıkan dört farklı durum için elde edilen dört farklı denklemden elde edilen eğri Şekil.3.13'de gösterilmiştir.

$$\frac{d}{dx} (U^2 \delta_2) + \delta_1 U \frac{dU}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho} \quad 3.54$$



Şekil 3.14 Türbinmetrede Oluşan Sınır Tabaka Kalınlıkları

Burada U sınır tabaka dışındaki akışkan hızı, δ_I yer değiştirme (Öteleme) kalınlığı, δ_{II} momentum kalınlığı ve τ_{DUVAR} duvardaki kayma gerilemesini ifade etmektedir. Laminar akımda oluşan yer değiştirme (öteleme) kalınlığını hesaplamak için newton' un τ_{DUVAR} için

çözümünü içeren 3. dereceden bir denklem kullanılmıştır. Bu 3. dereceden denklem laminar akış durumu için Pelarson (1994) ve Hofmans (1998) tarafından kabul görmüştür. Türbülanslı akış şartlarındaki sınır tabaka kalınlığı için Blasius' un duvar kayma gerilmelerini ifade eden denklemlerini içeren hız profilinin 1/7. dereceden kuvvetine bağlı bir formül kullanılmıştır. Tüm bu modeller kullanılarak öteleme kalınlığı, δ_I , momentum kalınlığı, δ_{II} ve kayma gerilmesi τ_{DUVAR} rotor girişinde hesaplanarak serbest akım hızı U tekrar hesaplanacaktır. U serbest akım hızını sınır tabaka kalınlıkları dikkate alınarak aşağıdaki şekilde hesapla bilir,

$$U(x; Q; \delta(x)) = \frac{Q}{\pi((r_{cikis} - \delta_1)^2 - (r_{taban} - \delta_1)^2)} \quad 3.55$$

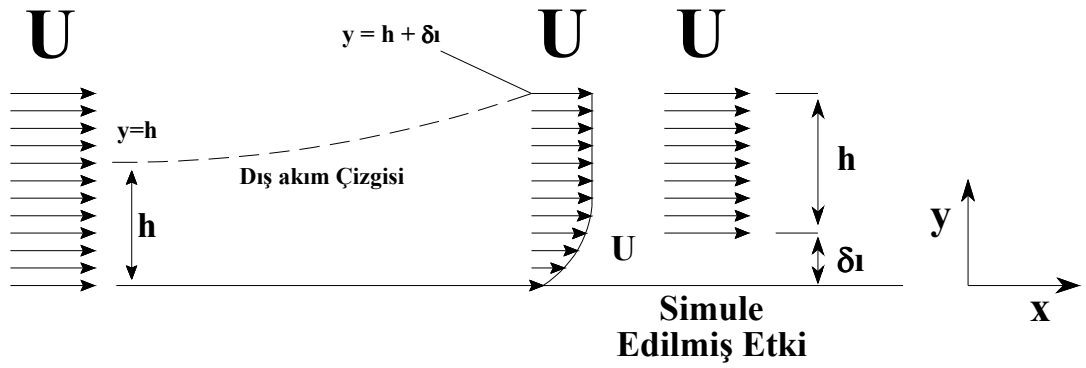
Bu denklemde Q hacimsel debi, $r_{dış}$ rotor dış yarı çapı, r_{taban} rotor taban yarı çapı olmak üzere, tabanda ve tavanda eşit büyüklüklerde sınır tabakalar oluştuğu kabulü yapılmıştır.

3.6.2 Sınır Tabaka Teorisi

Tezin konusu olan çalışmada türbinmetre yüksek Re sayılarında test edilmiştir ve Re sayısı aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad 3.56$$

Burada U serbest akım hızı, L karakteristik uzunluk ve ν kinematik viskoziteyi ifade eder. Bu yüksek Re sayılarında ($Re \gg 1$) sınır tabaka dışında viskoz kuvvetler ihmal edilebilirken duvara yakın bölgelerde sınır tabaka içerisinde viskoz kuvvetler daha baskındır ve bu bölgedeki akış sınır tabakası teorisi ifade edilebilir. Akışın diğer kısımları daimi sıkışamaz ağdasız akış olarak yorumlanıp Euler denklemleri ile ifade edilebilir. Tipik bir sınır tabaka oluşumu Şekil 3.15' de gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Düz Levha Üzerinde Sınır Tabaka Oluşumu

Sınır tabakanın içerisinde kütle korunumu ve Navier-Stokes denklemleri 2.6 ve 2.7 aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad 3.57$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad 3.58$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad 3.59$$

Burada x eksenini rotasyon eksenini, y eksenini ise rotasyon kanatlarına paralel cidarlara dik yönü, u x yönündeki hızı, v y yönündeki hızı belirtmektedir. Akış yönündeki sınır tabaka dışındaki akışkanın basıncı sınır tabakasında bir etkiye sebep olmaktadır ve bu etki Euler denklemlerinin çözülmesi ile hesaplanabilir. düz levha üzerinde daimi akışta bu etki;

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho U(x) \frac{\partial U(x)}{\partial x} \quad 3.60$$

şeklinde ifade edilebilir.

Sınır tabaka kalınlığı δ ' yı hesaplamak çok kolay değildir. akışkan hızı duvarda sıfır iken viskoz kuvvetlerin etkisinde yavaşça artarak asimtotik olarak U serbest akım hızına ulaşır. Sınır tabaka kalınlığı δ_i ,

$$\delta_1(x) = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad 3.61$$

$y \geq \delta u=U$ ve integralin içi sıfır olduğundan integralin üst limiti sonsuza gider.

Bir diğer kalınlık değeride δ_{II} momentum kalınlığıdır. Momentum kalınlığı değeri sınır tabakası dışında akışın momentumundaki değişimi ifade etmek için kullanılır ve δ_1 sınır tabakasına ve debiye bağlı olarak tekrar ifade edilir.

$$\delta_2(x) = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad 3.62$$

H yükseklikli, içerisinde uniform bir akış bulunan kanalda akan akışkanın toplam momentumu,

$$\rho U^2 (H - 2(\delta_1 + \delta_2)) \quad 3.63$$

şeklinde ifade edilir.

Bazı basit durumlar için sınır tabakası denklemlerinin gerçek çözümleri mevcuttur. Blasius' un düz levha üzerindeki akış için geliştirdiği çözüm bir örnek olabilir. Bununla beraber birçok durum için gerçek çözüm olmamakla birlikte, yaklaşık çözüm metodları ya da nümerik yöntemler kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak Von Karman momentum integrali örnek olarak verilebilir.

3.6.3 Düz Levha Üzerinde Blasius gerçek Çözüm Yöntemi

Blasius bu çözüm için yarı sonlu düz bir levha üzerinde sınır tabaka akışını göz önüne almış bununla beraber akışkan akışın daimi, sabit debili akışkan hızı U, x eksenine paralel ve akış doğrultusunda herhangi bir basınç dağılımının olmadığı kabullerini yapmıştır. Bu kabuller altında sınır tabakası denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad 3.64$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad 3.65$$

Duvarda akışkanın hızını sıfır iken duvardan uzaklaştıkça akışkan hızı maksimum hızı olan U

serbest akım hızına ulaşır. Bu sınır şartlarını aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$y=0 \quad ; \quad u = v = 0 \quad ; \quad y = \infty \quad ; \quad u = U_{\infty}$$

Blasius yaptığı bu çözümünde u/U_{∞} boyutsuz hızının tıpkı boyutsuz δ/y gibi x yönünde arttığını ve de bu benzerliğin bütün x değerleri için aynı olan bir $u/U_{\infty} = \phi(y/\delta)$ fonksiyonu ile ifade edilebileceğini ortaya koymuştur.

Bu durumda sınır tabaka kalınlığını Navier Stokes denklemlerinin gerçek çözüm yöntemi ile bulabiliriz.

Sıkışamaz akışkan için Navier Stokes denklemlerini aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad 3.66$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad 3.67$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad 3.68$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad 3.69$$

Hareketin y ve z yönündeki bileşenleri ihmal edip basınç dağılımının yalnızca x ekseninde değiştiği kabulü ile yukarıdaki denklem aşağıdaki şekli alır.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{dp}{dz} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad 3.70$$

X ekseninde yatırılmış aniden hareket ettirilen düz levha üzerindeki hareketi incelerken yukarıdaki denklem (3.70) aşağıdaki en basit şeklini alır.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad 3.71$$

Akışkan hacmi içinde basıncı sabit kabul ederek sınır şartlarını aşağıdaki şekilde tanımlayabiliriz.

$$t \leq 0 ; \quad u = 0 \quad \text{tüm } y\text{'ler için};$$

$$t > 0 ; \quad y = 0 \quad \text{için } u = U_0 \quad ; \quad y = \infty \quad \text{için } u = 0$$

Bu sınır şartları altında 3.70 kısmi diferansiyel denkleminde $\eta = \frac{y}{2\sqrt{\nu t}}$ eşitliğini yerine koyar ve $u = U_0 f(\eta)$ kabulünü yaparak, bu denklem aşağıdaki şekilde adi bir diferansiyel denkleme indirgenebilir.

$$f'' + 2\eta f' = 0 \tag{3.72}$$

Bu adi diferansiyel denklem için sınır şartlarını yazarsak.

$$\eta = 0 \quad \text{için } f = 1 \quad \text{ve } \eta = \infty \quad \text{için } f = 0 \tag{3.73}$$

Diferansiyel denklemin çözümünü aşağıdaki şekli alır.

$$u = U_0 \operatorname{erfc} \eta \tag{3.74}$$

Yukarıdaki erfc tamamlayıcı hata fonksiyonunu adını alır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\operatorname{erfc} \eta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\eta}^{\infty} \exp(-\eta^2) d\eta = 1 - \operatorname{erf} \eta = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} \exp(-\eta^2) d\eta \tag{3.75}$$

Yukarıda tanımı yapılan tamamlayıcı hata fonksiyonu $\eta=2.0$ için 0.01 değerini alır.

Bu durumda sınır tabakası kalınlığı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\delta = 2 \eta_{\delta} \sqrt{\nu t} \approx 4 \sqrt{\nu t} \tag{3.76}$$

Bu denklemde t hareketin başladığı andan itibaren geçen zamanı ifade eder. Bu denklemde t' yi akışkan parçacığının belli bir zamanda kat ettiği yol olarak ifade edersek.

$$t = x/U_{\infty} \tag{3.77}$$

3.76. eşitliği aşağıdaki şekli alır.

$$\delta \approx \sqrt{\nu x / U_{\infty}} \quad 3.78$$

Bu noktada yeni bir boyutsuz koordinat olan $\eta = y / \delta'$ yi tanımlarsak 3.78 denklemini aşağıdaki şekli alır.

$$\eta = y \sqrt{\frac{U_{\infty}}{\nu x}} \quad 3.79$$

Süreklilik denklemini ifade etmek için $\psi(x,y)$ akım fonksiyonunu aşağıdaki şekilde seçebiliriz.

$$\psi = \sqrt{\nu x / U_{\infty}} f(\eta) \quad 3.80$$

Bu denklemde $f(\eta)$ boyutsuz akım fonksiyonunu ve $f'(\eta)$, η üzerinde bir integrali ifade ederken hızın bileşenleri aşağıdaki şekli alır.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} = U_{\infty} f'(\eta) \quad 3.81$$

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu U_{\infty}}{x}} (\eta f' - f) \quad 3.82$$

3.65 denkleminin diğer terimlerini de akım fonksiyonunu yerine koyarak yazarsak, 3.65 denklemini aşağıdaki şekli alır.

$$-\frac{U_{\infty}^2}{2x} \eta f' f'' + \frac{U_{\infty}^2}{2x} (\eta f' - f) f'' = \nu \frac{U_{\infty}^2}{x \nu} f''' \quad 3.83$$

Gerekli sadeleştirmeleri yaparak Blasius denklemini olarak da bilinen aşağıdaki son denklemini elde ederiz.

$$f f'' + 2 f''' = 0 \quad 3.84$$

Howarth (1938) bu denklemini nümerik olarak çözmüş ve sonuçları bir tabloda sunmuştur. (Çizelge 3.3)

Çizelge 3.3 Blasius Denklemleri Çözüm Tablosu(Schlichting (1979))

$\eta = y \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu x}}$	f	$f' = \frac{u}{U_\infty}$	f''
0	0	0	0.33206
0.2	0.00664	0.06641	0.33199
0.4	0.02656	0.13277	0.33147
0.6	0.05974	0.19894	0.33008
0.8	0.10611	0.26471	0.32739
1.0	0.16557	0.32979	0.32301
1.2	0.23795	0.39378	0.31659
1.4	0.32298	0.45627	0.30787
1.6	0.42032	0.51676	0.29667
1.8	0.52952	0.57477	0.28293
2.0	0.65003	0.62977	0.26675
2.2	0.78120	0.68132	0.24835
2.4	0.92230	0.72899	0.22809
2.6	1.07252	0.77246	0.20646
2.8	1.23099	0.81152	0.18401
3.0	1.39682	0.84605	0.16136
3.2	1.56911	0.87609	0.13913
3.4	1.74696	0.90177	0.11788
3.6	1.92954	0.92333	0.09809
3.8	2.11605	0.94112	0.08013
4.0	2.30576	0.95552	0.06424
4.2	2.49806	0.96696	0.05052
4.4	2.69238	0.97587	0.03897
4.6	2.88826	0.98269	0.02948
4.8	3.08534	0.98779	0.02187
5.0	3.28329	0.99155	0.01591
5.2	3.48189	0.99425	0.01134
5.4	3.68094	0.99616	0.00793
5.6	3.88031	0.99748	0.00543
5.8	4.07990	0.99838	0.00365
6.0	4.27964	0.99898	0.00240
6.2	4.47948	0.99937	0.00155
6.4	4.67938	0.99961	0.00098
6.6	4.87931	0.99977	0.00061
6.8	5.07928	0.99987	0.00037
7.0	5.27926	0.99992	0.00022
7.2	5.47925	0.99996	0.00013
7.4	5.67924	0.99998	0.00007
7.6	5.87924	0.99999	0.00004
7.8	6.07923	1.00000	0.00002
8.0	6.27923	1.00000	0.00001
8.2	6.47923	1.00000	0.00001
8.4	6.67923	1.00000	0.00000
8.6	6.87923	1.00000	0.00000
8.8	7.07923	1.00000	0.00000

Howarth - 1938 ' in yardımıyla sınır tabaka kalınlıkları ve kayma gerilmelerini bulmak bundan sonra zor olmayacaktır.

Viskoz akışkanın duvarda sebep olduğu yerel kayma gerilmesi şu şekilde ifade edilir.

$$\tau_0(x) = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} = \mu U_\infty \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu x}} f''(0) = \alpha \mu U_\infty \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu x}} \quad 3.85$$

$f''(0) = \alpha = 0,332$ olduğu Çizelge 2.2 'den kolayca görülebilir. Bu durumda 3.85 denklemini

aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\tau_{du\text{var}}(x) = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} = \rho U \sqrt{\frac{U\nu}{x}} f''(0) \approx 0.332 \rho U \sqrt{\frac{\nu U}{x}} \quad 3.86$$

Aynı şekilde δ_1 sınır tabaka kalınlığı ifade eden denklemi bulmak zor olmayacaktır. Sınır tabakası içinde viskoz kuvvetlerin etkisi akışkanı çevreleyen sınırlardan uzaklaştıkça asimptotik olarak azalır. Buna paralel olarak sınırdaki akışkan hızı u , sınırdan uzaklaştıkça asimptotik olarak artarak U_∞ serbest akım hızı değerini alır. ($f'(\eta)$, 0.0 değerinden başlayarak asimptotik olarak artarak 1.0 değerini alır.). Eğer sınır tabaka hızını $u = 0.99 U_\infty$ olarak kabul etmek istersek, Çizelge 3.3' den $\eta \cong 5$ değerini olarak buluruz. Bu durumda 3.79 denklemi yeniden aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$\delta \approx 5.0 \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}} \quad 3.87$$

Öteleme kalınlığı ifadesinin tanımından yararlanarak aşağıdaki denklemleri yazabiliriz.

$$U_\infty \delta_1 = \int_{y=0}^{\infty} (U_\infty - u) dy \quad 3.88$$

$$\delta_1 = \int_{y=0}^{\infty} \left(-\frac{u}{U_\infty} \right) dy \quad 3.89$$

Denklem 2.60' de u/U_∞ ' in yerine yazarsak, sınır tabaka kalınlığını veren denklem aşağıdaki şekli alır.

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}} \int_{\eta=0}^{\infty} [1 - f'(\eta)] d\eta = \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}} [1 - f(\eta_1)] \quad 3.90$$

Bu denklemde η_1 sınır tabaka dışında bir noktayı göstermek üzere, $f(\eta)$ ifadesinin değerini Çizelge 3.3 ' de $\eta_1 - f(\eta_1) = 1,7208$ olarak elde ederiz.

Bu durumda öteleme kalınlığı δ_1 ' i veren ifade aşağıdaki son şeklini alır.

$$\delta_1 = 1.7208 \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}} \quad 3.91$$

3.6.4 Von Karman Momentum İntegral Denklemlerinin Yaklaşık Çözümü

Daha öncede bahsedildiği gibi bir çok problemin gerçek sonuçlarını elde etmek çok zor hatta imkansızdır. Bu tür problemlerin çözümünde yaklaşık çözüm yöntemleri kullanılır. Daimi, 2 boyutlu ve sıkışamaz akışkan için hareket denklemini $y = 0$ ' dan $y = h$ ' a integre edersek ($y = h$ her zaman sınır tabaka dışında bir noktayı ifade etmektedir) aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$\int_{y=0}^h \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - U \frac{dU}{dx} \right) dy = \int_{y=0}^h v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} dy \quad 3.92$$

bu denklemde duvardaki kayma gerilmesini veren aşağıdaki ifade yerine konursa,

$$\tau_{du \text{ var}} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad 2.93$$

ve süreklilik denkleminde elde edilen hızın normalini veren aşağıdaki ifadeyi yazarsak

$$v = - \int_0^y \frac{\partial u}{\partial x} dy \quad 3.94$$

Denklem 3.92 aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\int_{y=0}^h \left(u \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \int_0^y \frac{\partial u}{\partial x} dy - U \frac{\partial U}{\partial x} \right) dy = - \frac{\tau_{du \text{ var}}}{\rho} \quad 3.95$$

yukarıdaki denklemi parçalara ayırırsak aynı denklemi aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$\int_{y=0}^h \frac{\partial}{\partial x} (u (U - u)) dy + \frac{dU}{dx} \int_{y=0}^h (U - u) dy = \frac{\tau_{du \text{ var}}}{\rho} \quad 3.96$$

Bu noktada daha önce tanımladığımız sınır tabaka kalınlığı ve momentum kalınlığı ifadelerini yerine yazarsak Von Karman Denklemleri adıyla da anılan aşağıdaki momentum integral denklemini elde ederiz.

$$\frac{d}{dx} (U^2 \delta_2) + \delta_1 U \frac{dU}{dx} = \frac{\tau_{du \text{ var}}}{\rho} \quad 3.97$$

Bu denklemi çözmek için hız profilinin u/U şeklinde olduğu kabulünü yapacağız.

3.6.5 Laminer Sınır Tabaka İçin Yaklaşık Çözüm

Pohlhausen (1921) ' de yayınladığı çalışmasında sınır tabakası içinde akışkanın hızını ifade etmek için 4. dereceden bir polinom kullanmıştır.

$$\frac{u}{u_e} = a + b\left(\frac{y}{\delta}\right) + c\left(\frac{y}{\delta}\right)^2 + d\left(\frac{y}{\delta}\right)^3 + e\left(\frac{y}{\delta}\right)^4 \quad \text{yada} \quad \frac{u}{U} = \sum_{i=0}^3 a_i \left(\frac{y}{\delta}\right)^i \quad 3.98$$

Yukardaki 3 bilinmeyenli denklemin katsayılarını bulmak için aşağıdaki sınır şartlarına ihtiyaç duyarız. Kaymama sınır şartına göre duvarda akışkan hızı sıfır olacak ve duvardan uzaklaştıkça düzgün bir şekilde serbet akım hızına ulaşacaktır.

$$\begin{aligned} y = 0 \quad \text{için} \quad u = 0 \quad v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -U \frac{dU}{dx} \\ y = \delta \quad \text{için} \quad u = U \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad 3.99$$

Bu durumda Pohlhausen (1921) yaptığı kabulde aşağıdaki boyutsuz parametreyi parametreyi kullanmıştır.

$$\Lambda = \frac{\delta^2}{\nu} \frac{dU}{dx} = - \frac{dp}{dx} \frac{\delta}{(\mu U / \delta)} \quad 3.100$$

Yukardaki sınır şartlarının yardımı ile 3. dereceden polinomunkatsayıları aşağıdaki şekilde ortaya çıkar.

$$a_0 = 0, \quad a_2 = -\frac{\lambda}{2}, \quad a_1 = \frac{3}{2} + \frac{\lambda}{4}, \quad a_3 = -\frac{1}{2} + \frac{\lambda}{4} \quad 3.101$$

Bu noktada denklem 2.32' deki δ_I sınır tabaka kalınlığı ifadesini ve 2.33' deki δ_{II} momentum kalınlığı ifadesini kullanarak aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\delta_1 = \left(\frac{3}{8} - \frac{1}{48} \lambda \right) \delta \quad 3.102$$

$$\delta_2 = \left(\frac{39}{280} - \frac{1}{560} \lambda - \frac{1}{1680} \lambda^3 \right) \delta \quad 3.103$$

Eğer akış yönü boyunca basınç dağılımını ihmal edersek ($\lambda = 0$), Blasius gerçek çözümünü elde ederiz.

3.6.6 Türbülanslı Sınır Tabaka İçin Yaklaşık Çözüm

Akışın tamamen türbülanslı olduğu durumlarda akışkan hızı ve basıncı ortalama büyüklük ve salınım olmak üzere iki parçaya ayrılabilir.

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad p = \bar{p} + p' \quad 3.104$$

Türbülanslı akışın yaklaşık çözümünde yalnızca hızın ortalama büyüklüğü dikkate alınır ve unutulmamalıdır ki türbülanslı akış için herhangi bir gerçek çözüm yöntemi yoktur. Prandtl 'ın mixing length teorisinde (Schlichting (1979)) yaklaşık çözüm için bir yöntem ortaya konmuş ancak çok karmaşık olan bu yöntemin kullanılması başlı başına bir çalışma konusu olabilmektedir. Ancak türbülanslı akışın yaklaşık çözümü için bazı pratik yöntemler mevcuttur. Bunlardan en önemlisi 1/7. mertebeden katı yöntemidir.

J. Nikuradse pürüzsüz borularda sürtünme ve hız profili dağılımı üzerine yaptığı deneysel çalışmalarda, Hız profili dağılımını birçok Re sayısı için grafik haline getirmiş (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17) ve aşağıdaki denklemi ortaya koymuştur.

$$\frac{u}{U} = \left(\frac{y}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad 3.105$$

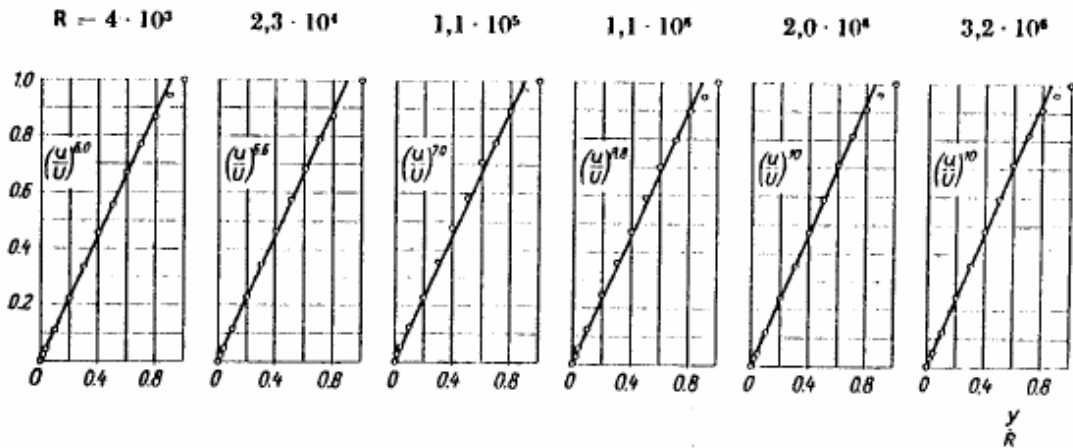


Fig. 20.3. Velocity distribution in smooth pipes. Verification of the assumption in eqn. (20.6)

Şekil 3.16 J.Nikuradse Deneysel Çalışma Sonuçları

Table 20.1. Ratio of mean to maximum velocity in pipe flow in terms of the exponent n of the velocity distribution, according to eqn. (20.6)

n	6	7	8	9	10
\bar{u}/U	0.791	0.817	0.837	0.852	0.865

Şekil 3.17 n Değerine Karşılık u / U Değeri

Bu çalışmaların ışığında $u/U \cong 0.8$ kabul edersek $n = 7$ değerini alacağı Şekil 3.17'de görülmektedir. Bu durumda denklem 2.75 denklemini aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$\frac{u}{U_{\infty}} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{7}} \quad 3.106$$

Bu denklemde $\delta = \delta(x)$, x mesafesine bağlı öteleme kalınlığını ifade eder. Kayma gerilmesini veren denklemi elde etmek çok kompleks bir çalışma gerektirdiğinden bu tez çalışmasında pürüzsüz borudaki kayma gerilmesi değerini kullanarak çok büyük bir hataya sebebiyet vermeyiz.

$$\frac{\tau_0}{\rho U_{\infty}^2} = 0.0225 \left(\frac{v}{U_{\infty} \delta} \right)^{\frac{1}{4}} \quad 3.107$$

Sınır tabaka kalınlıklarının tanımından (3.61 ve 3.62) ve denklem 3.107'yi kullanarak δ_I öteleme kalınlığı ifadesini ve δ_{II} momentum kalınlığı veren aşağıdaki denklemleri elde ederiz.

$$\delta_1 = \frac{\delta}{8}; \quad \delta_2 = \frac{7}{72} \delta \quad 3.108$$

3.6.7 Rotor Kanatları Üzerinde Oluşan Sınır Tabaka

Rotor kanatları üzerinde oluşan sınır tabaka sürtünmeye sebep olur. Sınır tabaka yaklaşımı ile bu sınır tabaka kalınlıklarını hesaplayabilir ve momentumun korunumu denklemi 3.11' de yerine yazabiliriz. Bunun için tekrar bazı kabuller yapılması gerekmektedir. Rotor kanatlarını taban ve tavanında sınır tabaka oluşan sıralı dikdörtgen kanallar dizisi olarak ele alınır. Santrifüj ve radyel kuvvetleri ihmal ederek n kanat yani dikdörtgen kanal sayılı, L_{kanat} uzunluklu, h_{kanat} kanat yüksekliğine sahip, yapının iki kanat arası mesafesi şu şekilde yazılabilir.

$$2\pi r - \frac{n t}{\cos \beta} \quad 3.109$$

Burada sınır tabaka yaklaşımında laminar ve de türbülanslı olmak üzere iki farklı durumu incelemek gerekir. Her iki durum için öteleme kalınlığı $\delta_{I,Kanat}$ ve momentum kalınlığı $\delta_{II,Kanat}$ 'yı hesaplamak için Von Karman denklemlerini kullanacağız. Laminar durum için 3. dereceden bir denklem ile hız profilini hesaplarken, türbülanslı durum için hızın 1/7. kuvvetini içeren bir denklem ile sınır tabaka kalınlıklarına bağlı hız profilini hesaplayacağız.

Sıkışamaz akışkan için kütle korunumu kanununu kullanarak akışkanın rotordan çıkış hızının x yönündeki bileşeni $u_{çıkış, x}$ aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$u_{çıkış, x} = \frac{2\pi r}{2\pi r - \frac{n(2\delta_{1,kanat} + \delta_{1,iz})}{\cos \beta}} u_{giris} \quad 3.110$$

Öteleme kalınlığı $\delta_{I,kanat}$ 'ın ve momentum kalınlığı $\delta_{II,kanat}$ 'ın tanımlarını kullanarak rotora etki eden döndürme momenti T_d aşağıdaki şekilde yazılır.

$$T_d = - \int_{r_{taban}}^{r_{uc}} \rho \frac{u_{giris, x}^2 (\tan \beta) r}{\left(1 - \frac{n(\delta_{1,iz} + 2\delta_{1,kanat})}{2\pi r \cos \beta}\right)^2} \times \left(2\pi r - \frac{n(\delta_{1,iz} + \delta_{2,iz} + 2(\delta_{1,kanat} + \delta_{2,kanat}))}{\cos \beta}\right) dr \quad 3.111$$

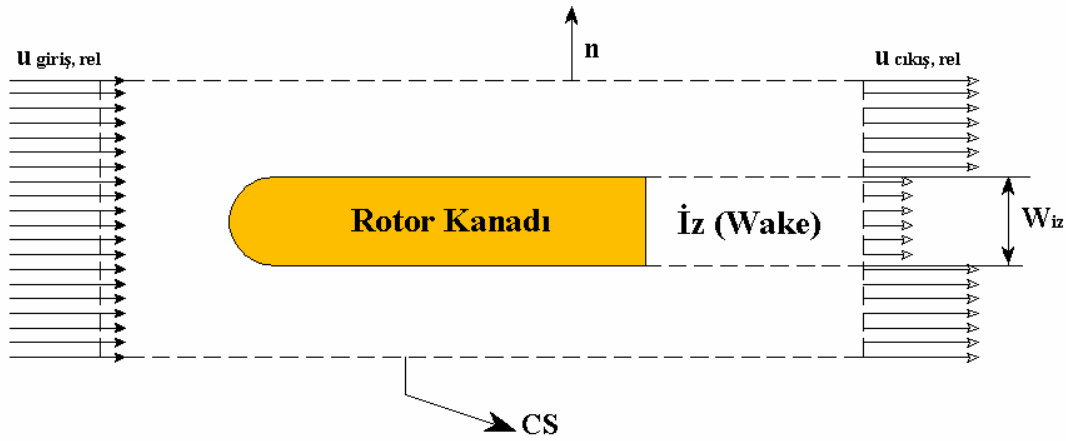
$$+ 2\pi \int_{r_{taban}}^{r_{uc}} \rho u_{giris, x} \omega r^3 dr ,$$

Burada $\delta_{I,iz}$ ve $\delta_{II,iz}$ kanat arkasındaki iz sebebi ile oluşan kalınlıklar olmak üzere, rotorun dönüş hızı toplam tork değerini sıfır yapan değer olarak iteratif olarak hesaplanır.

Laminar sınır tabaka sınır tabaka kalınlığının daha büyük olması sebebi ile rotorun daha hızlı dönmesini sağlar. Çalışmanın yapıldığı Re sayılarında türbülanslı sınır tabaka kalınlıklarının oluşmasını sağlar ve türbülanslı şartlarda rotor dönme hızlarında büyük farklar oluşmaz.

3.7 Rotor Kanat Arkasındaki İz Bölgesi

Rotor kanatları üzerinde akan akışkan rotor üzerinde bir döndürme momenti oluştururken ayrıca rotor kanatları üzerinde bir sürüklenme kuvveti de oluşturur. Rotor giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkı ve akışkanın viskoz etkilerinin rotor kanatları üzerindeki etkisi ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır. Rotor kanatları üzerinde akan akışkanın kanat arkasında oluşturduğu iz bölgesi (wake) etkisinin hesaplanması için bir model oluşturmaya çalışılacaktır. Gerçek şartlarda çok karmaşık bir yapı sergileyen bu iz bölgesinin incelenmesi için bazı kabullerle bir takım kolaylaştırmalar yapılacaktır. Bu modelde rotor kanatlarından akan akışkanın kanat arkasında oluşturduğu izin Şekil 3.18 'deki daimi akış altında bulunan izole edilmiş rotor kanat modeli ile aynı yapıda olduğu kabulü yapılmıştır.



Şekil 3.18 Türbinmetre Rotor Kanadı Arkasında Oluşan İz

Betz, Prandtl ve tietjens (1934) belli bir geometri üzerinde daimi, düzenli bir akışın oluşturduğu sürüklenme kuvvetini geometriyi çevreleyen bir kontrol yüzeyi üzerinde giriş çıkış

momentum dengesini formülize ederek hesaplamışlardır. Rotor kanadını içine alan CS kontrol yüzeyleri ile çevrili n vektörüne sahip bir kontrol hacmi seçilmiştir (Şekil 3.18). Seçilen bu kontrol hacminin rotor kanat yüzeylerinden yeterince uzak olması gerekmektedir. Daha önceki varsayımlarımızda da olduğu gibi akımın yine rotor kanatları üzerinde ve kanatlarına paralel olarak ilerlediğini kabul edip, iz bölgesindeki basınç dağılımını düzgün ve aynı bölgedeki basıncın serbest akımın basınç dağılımına eşit kabul edersek, kanatların üzerinden ilerleyen akışkan kenarlara doğru deplase olacaktır. momentumun korunumu denklemini bu kontrol hacmi için yazar ve iz bölgesi dışında kalan akışın serbest akış hızında olduğu kabulünü yaparsak,

$$u_{\infty} = u_{giris} \quad 3.112$$

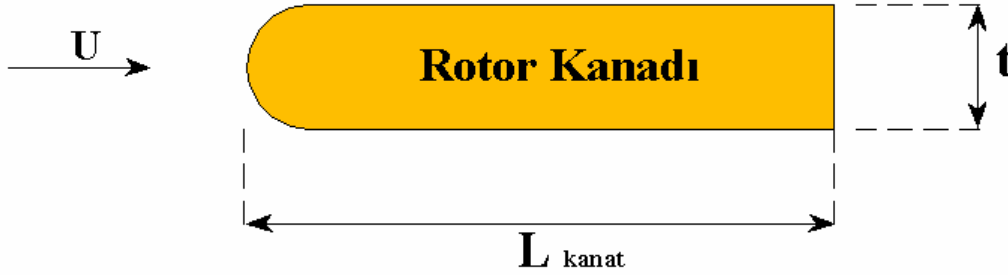
bu durumda kanadın arkasında oluşan iz sebebi ile kanada etki eden sürüklenme kuvveti şu şekilde ifade edilebilir.

$$F_D = \rho \int_{iz} u_{cikis} (u_{\infty} - u_{cikis}) dy = \rho u_{\infty}^2 \delta_{2,iz} \quad 3.113$$

Bu eşitlikte iz bölgesi dışında kalan akışkanın hızı $U_{çıkış} = U_{\infty}$ olduğu için integrali yalnızca iz bölgesi ile sınırlandırmakla bir yanlışlık yapmayız. Bu durumda L_{kanat} genişliğinde ve t kalınlığında bir rotor kanadı için sürüklenme katsayısını şu şekilde yazabiliriz.

$$C'_D = C_D \frac{L_{kanat}}{t} = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho u_{girisrel}^2 t} \quad 3.114$$

Bu yaklaşımda rotor kanadının hemen arkasında hızın sıfır, iz bölgesindeki basınç dağılımının düzgün ve serbest akımın basınç dağılımına eşit olduğu kabulü önemlidir. Ayrıca gerçek akışta iz bölgesindeki akışın modellenmesi oldukça karmaşık olması sebebiyle bu tez konusu kapsamında belirtilen kabullerin yapıldığı unutulmamalıdır.



Şekil 3.19 Hoerner – 1965’ tarafından Kullanılan Geometri

Hoerner (1965) deneysel olarak yuvarlatılmış bir burnu olan ve küt kesilmiş bir kuyruğa sahip $L_{kanat}/t = 6$ olan bir rotor kanadı için sürüklenme direnci katsayısını $C_D^I = 0.64$ olarak hesaplamışlardır. Bu geometri bizim kanatlarımızla burun bölgesi dışında bazı ufak farklılıklar gösterse de birbirleri ile kıyaslanabilir. Tezin konusu olan çalışmada kullanılan bopp&reuther yapımı türbinmetrenin $L_{kanat} / t = 17,6$ oranındadır. Bununla beraber rotor kanadının burun kısmı dik kesitli olduğu için test edilen türbinmetre ye ait rotor kanatçığına etki eden sürüklenme kuvveti artacaktır.

Bu kısımda hesaplamaya çalıştığımız sürüklenme basınç dağılımına bağlı sürüklenme ve viskoz sürtünmelere bağlı sürüklenme kuvvetlerini içerir. Viskoz sürtünmeler ilerleyen bölümlerde de ele alınacaktır. Viskoz sürtünmelerin etkisini hesaplayabilmek için basınç dağılımına bağlı sürüklemenin etkisini incelememiz gerekir. Bunun için rotor kanatlarını düz bir levha olarak kabul ederek duvardaki kayma gerilmesini Blasius' un nümerik çözümleri ile (Schlichting (1979)) düz levha kabulü yapılarak çözmeye çalışacağız.

Kanadın her iki tarafında yüzey sürtünmeleri etkisiyle oluşan sürüklenme kuvvet katsayısı

$$C'_{D,surtunme} = \frac{2 \int_{x=0}^{L_{kanat}} \tau_{du\ var} dx}{\frac{1}{2} \rho U^2 t} = \frac{1.328}{\sqrt{Re_{L_{kanat}}}} \frac{L_{kanat}}{t} \quad 3.115$$

olarak ifade edilir.

Türbülanslı durum için ampirik olarak hesaplanan sürüklenme katsayısı ise şu şekilde yazılabilir(Schlichting (1979)).

$$C'_{D,surtunme} = 0.148 \operatorname{Re}_{L_{kanat}}^{-\frac{1}{5}} \frac{L_{kanat}}{t} \quad 3.116$$

Rotor kanatlarına etki eden sürüklenme kuvvetlerine katkısı bulunan yüzey gerilmeleri Re sayısına ve akışın karakteristiğine bağlıdır. Bu çalışma sırasında yapılan ölçümlerde yüzey gerilmelerinin sürüklenme kuvvetlerine etkisi laminar durum için $C_D^I \approx 0.05$, türbülanslı durum için ise $C_D^I \approx 0.25$ olarak hesaplanmıştır. (Horner (1965)) yayınladığı çalışmasında kullandığı $C_D^I = 0.64$ olan rotor kanadı için basınç dağılımının toplam sürtünmeye etkisi yaklaşık olarak ~ 0.5 olarak kendi yaptığımız yaklaşımlar çerçevesinde hesaplayabiliriz. Bu yaklaşımda kullandığımız kanat iz kalınlığı t kanat kalınlığına ve de iz bölgesindeki hızın serbest akım hızının yarısına eşit olduğu kabulünü yapabiliriz. Bu kabullerle 2.83 denklemini kullanarak sürüklenme katsayısı $C_D^I \approx 0.5$ olarak hesaplanır.

3.7.1 Kanat Arkasında Oluşan İzin Dönem Hızına Etkisi

Yukarıda elde ettiğimiz denklemler momentumun korunumu denkleminde yerine koyulur. İz bölgesindeki hız düşümünü öteleme kalınlığı δ_I ve momentum kalınlığı δ_{II} ile açıklanabilir. Bu ifadeleri kullanarak kütle korunumu denklemini yazarsak aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$u_{cikis,x} = \frac{1}{1 - \frac{n\delta_{I,iz}}{2\pi r \cos \beta}} u_{giris,x} \quad 3.117$$

Bu denklemde n rotor kanat sayısını ifade eder. öteleme kalınlığı $\delta_{I,iz}$, momentum kalınlığı $\delta_{II,iz}$ ve 3.117 denklemini kullanarak rotora etki eden döndürme momenti değerini veren 3.21 denklemini aşağıdaki şekilde yeniden yazabiliriz.

$$T_d = - \int_{r_{taban}}^{r_{uc}} \rho \frac{u_{giris,x}^2 (\tan \beta) r}{\left(1 - \frac{n \delta_{1,iz}}{2\pi r \cos \beta}\right)^2} \left(2\pi r - \frac{n(\delta_{1,iz} + \delta_{2,iz})}{\cos \beta}\right) dr \quad 3.118$$

$$+ 2\pi \int_{r_{taban}}^{r_{uc}} \rho u_{giris,x} \omega r^3 dr$$

Bu denklemde iz bölgesindeki hız serbest akım hızının yarısı $u_{Iz} = \frac{1}{2} u_{Cikis}$, sınır tabaka kalınlığı $\delta_{I,iz} = 1/2t$ ve momentum kalınlığı $\delta_{II,iz} = 1/4t$ olarak kabul edilmiştir.

3.8 Giriş Hız Profili Dağılımının Rotor Dönüş Hızına Etkisi

Akışkanın rotora giriş hızının rotora etki eden döndürme momentine etkisini görmek için, sınır tabaka yaklaşımı ile hesaplanan hız profili kullanılarak rotora etki eden döndürme momentini hesaplamamız gerekir. Mekanik sürtünme, viskoz kuvvetler rotor kanat kalınlıkları ihmal edilirse, sıkışamaz akışkan için süreklilik denkleminde göre akışkan giriş hızı, çıkış hızının aksel bileşenine eşit olacaktır.

$$u_{giris} = u_{giris,x} = u_{cikis,x} \quad 3.119$$

Bu durumda döndürme momenti denklemi denklem 3.21 aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$T_d = - \int_{r_{taban}}^{r_{uc}} \rho u_{giris} (u_{giris} \tan \beta + \omega r) 2\pi r^2 dr \quad 3.120$$

sürtünme kuşetlerinin ihmal edildiği daimi akış şartlarında, rotor hareket denklemi denklem 3.28' ü aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$T_d = 0 \quad 3.121$$

Bu şekilde geometrisi bilinen yüzeyde giriş hız profili bilinen bir akışkanın rotora uyguladığı döndürme momenti hesaplanabilir. Giriş hız profili Re sayısına bağlı bir form oluşturacağından, rotor dönüş hızının gerçek dönüş hızına göre farkını ifade eden denklem (3.29) farklı Re sayıları için hesaplanarak gösterilmiştir. Rotor dönüş hızı, laminer ve türbülanslı olmak üzere farklı Re sayılarında hesaplanarak gösterilmiştir. Uniform bir akışla kıyasladığımızda hesapladığımız hız profili dağılımı ile bulduğunuz rotor dönüş hızı

arasındaki fark hesaplanacaktır. Görülmüştür ki hız profili dağılımı kullanılarak hesaplanan dönüş hızı daha yüksek çıkmaktadır. Bununla birlikte türbülanslı durumla laminar durumu karşılaştırdığımızda türbülanslı durumda rotor dönüş hızının yine daha yüksek bir değerde olduğu görülmüştür. Bütün bu yapılan hesaplarla rotor giriş hızı dağılımının rotor dönüş hızına etkisi açıkça ortaya konmuştur.

3.9 Sürtünme Kuvvetleri

Türbinmetreler her ne kadar minimum sürtünme ile çalışacak şekilde dizayn ve imal edilmiş olsalar da çalışmalarını sırasında türbinmetrelere etki eden bir çok sürtünme kuvveti vardır. Bu etki eden sürtünme kuvvetlerini ikiye ayırabiliriz. Bunlardan ilki yataklama ve mekanik sayma mekanizması kaynaklı mekanik sürtünme kuvvetleridir. Diğeri ise akışkanın rotor kanatlarından ve rotor kanat tabanından ilerlerken kayma gerilmelerine bağlı sürüklenme kuvvetlerinin sebep olduğu sürtünme kuvvetleri, rotor kanat ucu açıklığından kaynaklanan sürtünme kuvvetleri ve de iz bölgesinin sebep olduğu basınç dağılımına bağlı sürüklenme kuvvetlerine bağlı sürtünme kuvvetleridir.

Rotor kanatlarına ve rotor kanat tabanına etki eden sürtünme kuvvetlerini hesaplamak için radyel hızları ve santrifüj kuvvetleri ihmal ederek sınır tabaka yaklaşımı ile bazı yaklaşık hesaplamalar yaptık. Mutlaka unutulmamalıdır ki bu tez çalışması sırasında yapılan kabuller gerçek durumun basitleştirilmiş bir halidir.

Bir sonraki bölümde bahsi geçen kuvvetlerin rotorun ideal dönüş hızına olan etkisi hesaplanmaya çalışılacaktır.

3.9.1 Rotor Kanat Tabanında Sürüklenme

Akış halindeki akışkan rotor kanatlarında oluşturduğu sınır tabakanın yanında rotor tabanında da sınır tabaka oluşumuna sebep olur. Burada yüzey kompleks olduğundan bu bölgeyi tekrar düz levha olarak ele alacağız. Bu yüzeyin genişliğini

$$\omega = 2\pi r_{taban} \frac{n t}{\cos \beta} \quad 3.122$$

olarak yazabiliriz.

Burada r_{taban} rotor kanat tabanının yarıçapını, n rotor kanat sayısını, t ise kanat kalınlığını

ifade eder. problemi karmaşık olarak ele almak yerine sınır tabaka dışında akışkan hızının sabit ve relativ hıza eşit kabul edersek aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$u_{rel} = \sqrt{\left(\frac{U}{1 + \frac{nt}{2\pi \cos \beta_{taban}}} \right)^2 + (\omega r_{taban})^2} \quad 3.123$$

Bu denklemde U sınır tabaka kalınlıkları sebebi ile düzeltilmiş giriş hızı olmak üzere, radyal hızları ihmal edersek, sınır tabaka akımları sebebi ile oluşan τ_{duvar} kayma gerilmelerini tanımlamak için 2 sınır şartını dikkate almamız gerekir. Bunlardan ilki olan üst sınır şartında, sınır tabakanın rotor girişinde oluşmaya başladığı kabulü yapılır. W genişliğindeki, β_{taban} kanat açısına sahip rotor tabanının boyunu $w/\cos \beta_{taban}$ olarak kabul ederiz (Şekil 3.4 – Şekil 3.5). Alt limit olarak ise sınır tabakanın stator tabanının hemen başından başladığı ve rotora kadar devam ettiğini kabul ederiz. Bu durumda düz levha boyunu $L_{taban} + w/\cos \beta_{taban}$ olarak alırız.

Türbülanslı durumda boru içinde akan akışkana etki eden kayma gerilmesini ifade eden ampirik formül denklem 3.107' de verilmiştir (Schlichting (1979)). Bu denklemi ve türbülanslı durumda oluşan sınır tabaka kalınlıklarını ifade eden denklemleri kullanarak τ_{duvar} kayma gerilmesini ifade eden aşağıdaki denklemi bulabiliriz.

$$\tau_{duvar} = 0.0288 \rho u_{rel}^{\frac{9}{5}} \nu^{\frac{1}{5}} x^{-\frac{1}{5}} \quad 3.124$$

Üst limit olarak rotor tabanında oluşan sınır tabaka kalınlıkları sebebi ile rotora etki eden ters yöndeki döndürme momenti $T_{surt,taban} = F_{surt,taban} r_{taban} \sin \beta_{taban}$ olarak yazılabilir. Burada

$$T_{surt,taban} < \omega r_{taban} \sin \beta_{taban} \int_0^{\frac{W}{\cos \beta_{taban}}} \tau_{duvar} dx \quad 3.125$$

$$= 0.036 \rho \nu^{\frac{1}{5}} u_{rel}^{\frac{9}{5}} \omega r_{taban} \sin \beta_{taban} \left(\frac{W}{\cos \beta_{taban}} \right)^{\frac{4}{5}} \quad 3.126$$

alt limit ise;

$$T_{fr,taban} > \omega r_{taban} \sin \beta_{taban} \int_{L_{taban}}^{L_{taban} + \frac{W}{\cos \beta_{taban}}} \tau_{du} \varpi dx \quad 3.127$$

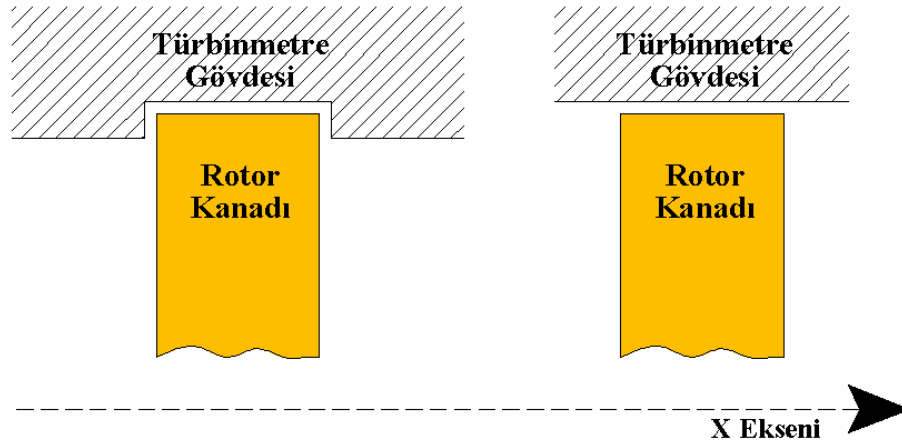
$$= 0.036 \rho v^{\frac{1}{5}} u_{rel}^{\frac{9}{5}} \omega r_{taban} \sin \beta_{taban} \left[\left(L_{taban} + \frac{W}{\cos \beta_{taban}} \right)^{\frac{4}{5}} - L_{taban}^{\frac{4}{5}} \right] \quad 3.128$$

Şeklinde ifade edilir.

Rotor hareket denklemi (3.28)' ini kullanarak daimi ve sıkışamaz akış şartlarında çok ince kalınlıklı rotor kanatlarına sahip bir rotorda oluşan sınır tabaka kalınlıklarına bağlı kuvvetler dışında oluşan diğer tüm negatif yönlü kuvvetleri ihmal edersek, ideal dönüş hızından sapmayı, farklı Re sayıları için hesaplayabiliriz.

3.10 Kanat Ucu Açıklığı

Türbinmetre çalışırken rotor kanat uçları türbinmetre gövdesine çok yakın bir konumda bulunurlar. Buda farklı bir ters yönlü bir kuvvetin oluşmasına dolayısı ile kayıplara sebep olur. Kanat ucu açıklığından kaynaklanan kayıpların ne mertebede olduğunu hesaplamak oldukça zor olmakla beraber kanat ucu açıklığının büyüklüğü ve Re sayısına direkt olarak bağlı olmakla beraber, kanat uçlarının türbinmetre gövdesindeki yerleşimine de bağlıdır. Bazı türbinmetre tiplerinde bu açıklık bir kanal içine gizlenmiş olabilir (Şekil 3.20)



Şekil 3.20 Açık ve Kapalı Türbinmetre Rotor Ucu Açıklığı

Thompson & Grey – 1970 yaptıkları çalışmalarda kanat ucu açıklığının sebep olduğu

sürtünme kayıplarını radyel akışkan yatak yataklardaki kayıplara benzer bir yaklaşımla aşağıdaki gibi formülize etmişlerdir. Bu yaklaşım altında kanat ucu açıklığının rotora uyguladığı ters yönlü döndürme momentini veren ifade aşağıda verilmiştir.

$$T_{kanat\ ucu} = \frac{0.078}{2 Re_{uc}^{0.43}} \rho u_{rel,r_{uc}}^2 r_{uc} L_{kanat} t n \quad 3.129$$

Bu denklemde Re sayısı $Re_{kanatucu} = u_{rel,r_{kanatucu}}(r_{dış} - r_{kanatucu})$ şeklinde ifade edilir.

Bu kabulle birlikte unutulmamalıdır ki, kanat ucunun akışın geldiği ön ucunda oluşabilecek girdaplar ve de kanat boyunun kanat ucu açıklığına oranı önemli derece etkiler. Bu sebepler kanat ucu açıklığı için geçerli genel bir çözümden bahsetmek doğru olmayacaktır. Bu tezin konusu olan çalışmada kanat ucu açıklığının etkisi bu sebeplerden dolayı dikkate alınmayacaktır.

3.11 Mekanik Sürtünem Kuvvetleri

Türbinmetreler her ne kadar minimum sürtünme kuvvetine maruz kalacak şekilde tasarlanmış olsalarda mekanik sürtünme kuvvetleri her zaman gözlemlenir. Bu mekanik sürtünme kuvvetlerinin ana kaynağı süpüresizki rotorun yatakladığı bölgeden kaynaklanmıştır. Bu bölgede oluşan sürtünme direkt olarak rotorun dönmesini engelleyecek şekilde ters yönde bir kuvvet oluşturarak etki ederler. Rotora etki eden bu sürtünme kuvvetlerini statik ve dinamik sürtünme kuvvetleri olarak ikiye ayırabiliriz. Ancak bu ters yönlü momenti ölçmek zor olacağından bu noktada üretici kataloğunda verilen bilgilerden faydalanmak daha yerinde bir yaklaşım olacaktır. Bopp & Reuter firmasının cihaz kataloğunda dinamik sürtünme değeri yaklaşık olarak 5.6×10^{-6} Nm mertebelerindedir.

4. SAYISAL ÇÖZÜM HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

4.1 Giriş

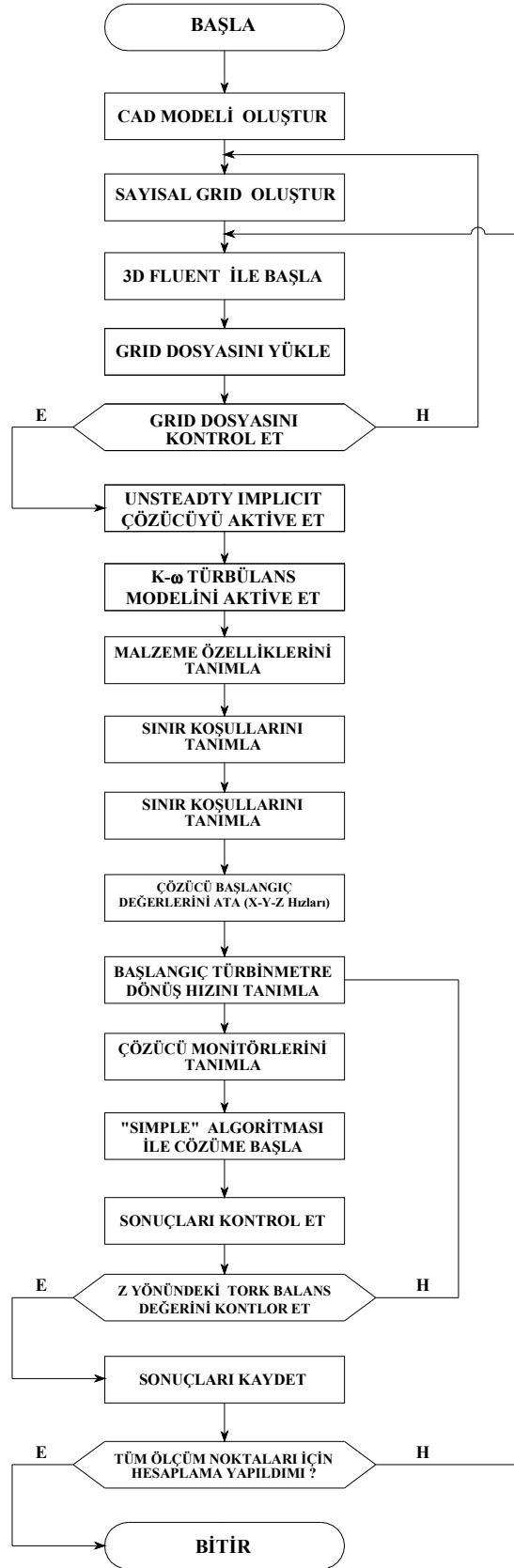
Bu bölümde öncelikle FLUENT CFD programında kullanılan hesaplama yöntemleri ve ele alınan problem için oluşturulan çözüm algoritması açıklanmıştır. Daha sonra, Gambit programında çizilen modeller ve elde edilen çözüm ağları, sayısal çözüm ile elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır. Farklı helis açıları ve uzunluklardaki türbülatorler için FLUENT programından elde edilen sonuçlara göre karşılaştırma yapılmıştır.

4.2 Sayısal Çözümde Kullanılacak Hesaplama Yöntemleri

Bu çalışmada sayısal çözümler için FLUENT paket programı kullanılmıştır. Program sonlu hacimler yöntemi ile çalışmaktadır. Paket programda, akış denklemlerini, sayısal olarak çözülebilecek lineer denklemlere dönüştürmek için kontrol hacmini esas alan bir teknik kullanılmaktadır. Bu teknik, akış denklemlerinin integrallerini her kontrol hacminde alma ilkesine dayanmaktadır. Bu denklemlerin integrali alınmış diferansiyel biçimi Navier-Stokes denklemleri olarak bilinir.

FLUENT sıkıştırılmaz (düşük ses altı), orta sıkıştırılabilir (transonik) ve yüksek sıkıştırılabilir (ses üstü ve hipersonik) akışlar için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözücüsüdür. Yakınsamayı hızlandıran çoklu ağ metoduyla beraber çoklu çözücü seçenekleri ile FLUENT geniş hız rejimleri aralıklarında optimum çözüm etkinliği ve hassasiyeti getirir. Zamandan bağımsız (daimi) veya bağımlı akımların analizleri yapılabilir. Sağlam ve gerçekçi türbülans modelleri FLUENT programının hayati öneme sahip modelleridir. FLUENT içinde bulunan fiziksel modellerin zenginliği, laminar, geçiş ve türbülanslı akışların, ısı transferinin, kimyasal tepkimelerin, çok fazlı akışların ve diğer olguların sayısal ağ esnekliği ve çözüm tabanlı ağ uyarlaması ile hassas çözülmesine olanak sağlar. Duvar yakınındaki akış için özel ve ileri duvar fonksiyonlarının kullanımı ile doğruluk derecesine gösterilen özen artırılmıştır.

Tüm akışlar için FLUENT programı kütle ve momentum korunum denklemlerini çözer. Isı transferi yada sıkıştırılabilirliği içeren akışlar için ayrıca enerji denklemi çözülebilmektedir.



Şekil 4.1 HAD Sayısal Çözüm Algoritması

4.2.1 Sayısal Çözüm Yöntemleri

4.2.1.1 Basınç Tabanlı Çözüm Yöntemi (Pressure Based Solver)

Bu yöntem, süreklilik, enerji ve momentum denklemlerini yakınsama gerçekleştiği zamana kadar ayrı olarak çözer. Daha çok sıkıştırılamaz akışkanların bulunduğu ortamlarda tercih edilir. Akışkan fiziksel özellikleri, bir önceki iterasyondan elde edilen sıcaklık dağılımları yardımıyla yeniden hesaplanarak belirlenir. Eğer hesaba yeni başlanıyor ise akışkanın giriş sıcaklığındaki fiziksel özellikleri hesaplanır. x, y, z yönlerindeki u, v, w hız değerlerine ait momentum denklemleri, o anki basınç ve yüzey akısı yardımıyla çözülür.

Hesaplamalarda bulunan hız değerleri, süreklilik denklemini sağlamıyorsa, süreklilik ve lineer edilmiş momentum denklemleri yardımıyla, basınç düzeltmesi denklemi türetilir. Bu denklem hız-basınç dağılımları için gerekli düzeltmeyi elde edebilmek ve kütleli debi, süreklilik denklemini sağlaması için çözülür.

4.2.1.2 Yoğunluk Tabanlı Çözüm Yöntemi (Density Based Solver)

Süreklilik, momentum, uygun olması durumunda enerji, kütle transferi denklemleri ile eş zamanlı çözülür. İterasyonlarda akışkan özellikleri bir önceki iterasyondan güncellenir. Başlangıçta ise giriş değerleri kullanılır. İterasyonlarda süreklilik, momentum, enerji ve kütle denklemleri eş zamanlı çözülür. Her iterasyon sonucu yakınsama kriterlerine göre yakınsama kontrol edilir. Yakınsama gerçekleşmez ise iterasyon devam ettirilir. Ayrı çözüm yönteminde, bir arada çözüm yöntemine göre daha kısa sürede çözüme ulaşılmaktadır.

FLUENT açılışta ayrık metotla başlar, fakat eğer yüksek hızlı sıkıştırılabilir akışkanlar ya da çok iyi yapılandırılmış ağ yapısına sahip akışkanlar inceleniyorsa birleştirilmiş örtülü yöntem seçilebilir. Bu çözücü metodu, akış ve enerji denklemlerini birleştirerek daha hızlı çözüme ulaşır. Fakat aynı zamanda ayrık metodu kullanan çözücünden 1,5 – 2 kat daha fazla hafıza kullanır. Düşük kapasiteli sisteme sahip kullanıcıların bu durumu göze almaları gerekir. Eğer hafıza durumu kritikse, ayrık yöntem kullanılmalı ya da birleştirilmiş açık yöntem kullanılmalıdır. Birleştirilmiş açık yöntem de enerji ve akış denklemleri birleştirilmekte fakat bu çözücü daha az hafıza gerektirmekle beraber sonuca daha uzun zamanda ulaşmaktadır.

Bazı fiziksel modeller sadece ayrık çözücülerde desteklenmektedir. Bunlar:

- Birçok fazdan oluşan modeller
- Karışım oranları / PDF yanma modelleri

- Ön karışımli yanma modelleri- Kirlenme kaynağı oluşum modelleri- Faz değişim modelleri
- Rosseland radyasyon modelleri
- Periyodik ısı transferi modelleri

Yukarıda bahsedilen 3 çözücü metodunu seçebilmek için Define → Models → Solver menüsünü açmak gerekir. Ayrıca burada akışın kararlı yada kararsız oluşuna göre, akışın boyutsal yapısına göre ekstra seçenekler bulunmaktadır.

4.2.2 Lineerleştirme Yöntemleri

Sayısal çözüm yöntemlerinden ayrı çözüm ve bir arada çözüm yöntemlerinde farklı lineer olmayan denklemleri her hücre için bağımlı değişkene ait denklemler sistemi oluşturmak üzere lineerleştirir. Bulunan lineer denklemler, güncellenmiş akış alanı elde etmek için çözümlenir. Bu lineerleştirme bağımlı değişkene göre örtülü veya açık olarak gerçekleştirilebilir.

4.2.2.1 Örtülü Yöntem (Implicit Formulation)

Her hücrede bilinmeyen değerler, komşu hücrelerdeki bilinen ve bilinmeyen değerler yardımıyla hesap edilir. Bununla birlikte her bir bilinmeyen değere ait, sistemde birden fazla denklem ortaya çıkar ve bu denklemler bilinmeyenleri tespit edebilmek için eş zamanlı olarak çözümlenir.

4.2.2.2 Açık Yöntem (Explicit Formulation)

Verilen bir değişkenin, hücredeki bilinmeyen değerinin sadece bilinen değerler yardımıyla bulunmasıdır. Her bir bilinmeyen sadece bir denklemde yer alır ve her hücredeki bilinmeyenler bir an için çözümlenir.

Ayrı çözüm yöntemi sadece örtülü yöntem ile lineerleştirmeye müsaade eder. Ama bir arada çözüm yönteminde örtülü veya açık yöntem kullanılabilir. Bir arada çözüm ve örtülü çözümde P,u,v,w ve T değerleri tüm hücrelerde aynı anda çözümlenir. Bir arada çözüm ve açık yöntemde P,u,v,w ve T değerleri bir hücrede aynı anda çözümlenir.

Bu çalışmada akışkan hızlarının çok düşük olması nedeniyle ayrı çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem seçildiğinde sadece örtülü yöntemle lineerleştirme gerçekleştirilebildiğinden, örtülü yöntem seçilmiştir.

Fluent'in çözüm yöntemleri içerisinde momentum ve enerji için değişik enterpolasyon teknikleri mevcuttur. Bunlar:

- First Order: Birinci dereceden,
- Second Order: İkinci dereceden,
- Power Law: Üssel,
- Quick: Hızlı enterpolasyon yöntemleridir.

Fluent bunları her bir hücre merkezi için farklı skaler ϕ değeri bulabilmek için kullanır.

$\phi_f \cdot a_p = \sum_{nb} a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b$ formülündeki ϕ_f 'yi merkez değerlerden enterpolasyon ile bulur.

Girdap akış için Fluent programında ikinci dereceden enterpolasyon yöntemi tavsiye edilmiştir.

4.2.3 İkinci Dereceden Enterpolasyon Yöntemi

Hücre yüzeyindeki değişkenler, lineer yeniden yapılandırma yaklaşımı yöntemi kullanılarak çözülür. Yüzey değerleri ϕ_f Taylor serisi yardımıyla;

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \Delta S \quad 4.1$$

$$\nabla \phi = \frac{1}{\nabla} \sum_f^{N_{faces}} \phi_f \cdot A \quad 4.2$$

İkincil enterpolasyon yöntemi yüksek derecede güvenilirlik sağlar. Burada ΔS bir önceki hücre merkezi ile bundan bir sonraki hücre yüzey merkezi arasındaki yer değişim vektörü, $\nabla \phi$ ise ikisi arasındaki ϕ 'nin değişim miktarıdır.

4.2.4 Basınç- Hız Çifti İçin Simple Metodu

Momentum, süreklilik ve diğer skalerlere ait denklemlerin çözüm algoritması aşağıdaki gibidir:

- Tahmini basınç değerleri P^* belirlenir.
- Tahmini basınçtan tahmini hız u^* , v^* , w^* değerleri bulunur.
- Bulunan bu hız denklemleri ile süreklilik denklemindeki basınç düzeltme değerleri hesaplanır.

- Düzeltme değerleri ile gerçek basınç hesaplanır.
- Gerçek u, v, w hız değerleri bulunur.
- Akışın türbülanslı olması durumunda u, v, w hız değerleri yardımıyla türbülans denklemleri çözülür.
- Sıcaklık değerleri de yukarıda anlatılan yöntemle sırayla bulunur.
- Akışkan özellikleri bulunan sıcaklık değeri ile düzeltilir.
- R artık değeri hesaplanır. Kullanıcının ayarlayabildiği R değerine göre karşılaştırma yapılır. Bulunan değer, ayarlanan değerden büyük ise iterasyon devam eder. Aksi halde iterasyon sonlandırılır. Bir sonraki iterasyon yapılırken en son bulunduğu basınç değeri, başlangıç basıncı olarak kabul edilir ve işlemler tekrarlanır.

4.2.5 Artık Değer (Residual)

P hücresi için ϕ değeri:

$$a_p \cdot \phi_p = \sum a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b \quad 4.3$$

$$S = S_c + S_p \cdot \phi \quad 4.4$$

$$a_p = \sum_{nb} a_{nb} + S_p \quad 4.5$$

İlk yazılan denklemde eşitliğin sağlanması gerekir ancak iterasyon sırasında eşitliğin sağ ve sol tarafı farklı olabilir. İki taraf arasındaki farkın tüm P hücreleri boyunca olan toplam değerine ϕ değişkeninin artık R^ϕ değeri adı verilir

$$R^\phi = \sum_{P_{\text{hücreleri}}} \left| \sum a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b - a_p \cdot \phi_p \right| \text{ 'dir.} \quad 4.6$$

Bu formül ile yakınsamanın olup olmadığını anlamak zordur. Bu nedenle boyutsuzlaştırma yapıp boyutsuz artık değeri "Residual" aşağıdaki şekilde bulunur:

$$R^\phi = \frac{\sum_{P_{\text{hücreleri}}} \left| \sum_{nb} a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b - a_p \cdot \phi_p \right|}{\sum_{P_{\text{hücreleri}}} |a_p \cdot \phi_p|} \quad 4.7$$

Momentum denklemlerinde paydadaki $a_p \cdot \phi_p$ yerine $a_p \cdot V_p$ gelir. Süreklilik denklemi için net kütle üretimi değeri:

$$R^c = \sum_{\text{Hücreleri}} |P \text{ Hücresindeki Kütle Üretimi}| \quad 4.8$$

Süreklilik denklemi için boyutsuz artık değeri :

$$\frac{R \text{ N Iterasyon}}{R \text{ M Iterasyon}} \leq 10^{-4} \quad 4.9$$

Paydadaki değer ilk beş iterasyondaki en büyük mutlak değer olarak artık R^ϕ 'dır.

4.3 Türbülans Modeli Seçimi

En genel anlamda akışkan hareketleri, Navier-Stokes denklemleri ile tanımlanabilir. Bununla beraber, bu denklemlerin, belli bir takım kabuller yapılmadan analitik veya nümerik olarak çözümü günümüzde çok zordur. Pratikte akışkan hareketi ile ilgili olarak karşılaşılan durum genellikle türbülanslıdır. Türbülanslı akışkan hareketinde, akışı oluşturan büyüklüklerin zaman ve konuma göre düzensiz değişimler göstermesi nedeniyle türbülanslı akışkanların çözümlenmesinde istatistiksel ortalama büyüklükler göz önünde bulundurulur. Navier-Stokes denklemlerini, zaman ortalaması alınmış Navier-Stokes denklemlerine dönüştürebiliriz. Bu denklemlere RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemleri denir. Hareket denklemlerinin zaman ortalamasının alınması karşımıza yeni bilinmeyenler çıkarmaktadır. Bu ek terimler türbülanslı harekete ait gerilmelerdir. Bu ek terimleri hız ve basınç gibi ortalama akış büyüklüklerine bağlı olarak tanımlama işlemi 'türbülans modelleme' olarak adlandırılmaktadır. Bu işlem; kendine özgü bazı varsayımlar ve yaklaşımlarla yapılır. Türbülans modellemede ek gerilme terimlerinin yeni bağıntılar ile tanımlanması sonucunda, türbülans kinetik enerjisi, bu enerjinin sönmelenme(yutulma) hızı gibi bazı yeni büyüklükler ortaya çıkar. Günümüzde bilinen bütün türbülans modellerinin geçerli olduğu akış koşulları ve türleri birbirinden farklıdır. Tek başına hiçbir türbülans modeli, bütün problemler için evrensel olarak üstün kabul edilmemiştir. Bir türbülans modelinin geçerliliği yapılan sayısal hesaplama sonuçları ile yapılan deneysel ölçümler karşılaştırılarak test edilir. Türbülans modeli seçimi, akışın kapsadığı fizik, belli bir sınıfa özgü kurulmuş uygulamalar, istenilen doğruluğun seviyesi, halihazırdaki hesaplama kaynakları ve simülasyon için eldeki zaman gibi birtakım faktörlere bağlıdır. Uygulama için en uygun model seçimi birtakım opsiyonların olanak ve kısıtlarının iyi anlaşılmasına bağlıdır. Bu tez çalışmasında ağırlıklı olarak standart

k - ϵ türbülans modelleri kullanılarak çözümler yapılmıştır.

4.3.1 Standart k- ϵ Modeli

Standart k- ϵ modeli; model taşınım denklemlerinin iki türbülans niceliği için (ki bu model için k:türbülansın kinetik enerjisi ve ϵ :türbülans sönümlemesi olmaktadır) çözüldüğü iki denklemlilikli modeller sınıfına aittir. Model özellikle Reynolds kayma gerilmelerinin daha etkin olduğu sınırlanmış akışlar için iyi performans göstermektedir. Standart k- ϵ modeli endüstrideki mühendislik uygulamaları için sıkça kullanılan oldukça popüler bir modeldir ve birçok ticari HAD kodunda mevcuttur. Tüm türbülans modellerinde olduğu gibi kavram ve ayrıntıları zamanla gelişim göstermiştir ve standart k- ϵ model temelli çözüm modelleri türetilmiştir.

Türbülanslı hız ve uzunluk ölçeklerinin bağımsız olarak belirlenebilmesine izin veren iki ayrı taşınım denkleminin çözüldüğü iki denklemlilikli modeller türbülansın en basit tam modelleridir. Launder ve Spalding (1972) tarafından ortaya konulduktan beri kullanışlı olarak mühendislik akış hesaplamalarında çokça yararlanılan bir türbülans modeli olmuştur. Türbülanslı akışların geniş bir kısmında sağlamlık, ekonomiklik ve makul bir doğruluk sunması endüstriyel akış ve ısı transferi simülasyonlarındaki popüleritesini açıklamaktadır. Yarı deneysel bir modeldir ve model denklemlerinin elde edilmesi fenomenolojik faktörlere bağılıdır. K- ϵ modeli sabitlerinin değeri genel kabul görmüş değeri olup, herhangi özel bir akış için sabitlerin değeri değiştirilmesi doğruluğu artırabilir. Büyük Reynolds sayılarında standart k- ϵ modelinde duvar boyunca model denklemlerinin integrallerinden kaçınılmıştır. Model bazı akım alanlarında daha zayıf bir yaklaşıma sahiptir. Bazı sınırlanmamış akımlar, girdap akımları gibi ilave zorlanmaların bulunduğu akımlar bunlara örnektir. Modelin bilinen bir eksikliği dairesel jet için yayılma oranını olduğundan fazla öngörmesidir. Bu problem daha önce yapılmış deneysel ve sayısal çalışmalar referans alınarak model için belirlenmiş sabit katsayı değeri probleme uygun olarak değeri değiştirilmesi ile giderilebilir. Ancak bu tür akışa bağılı ayarlamalar da belirli bir sınıra kadardır.

4.3.2 RNG k- ϵ Modeli

RNG (Renormalization Group Theory) k- ϵ modeli kullanılan istatistiksel tekniklerden üretilmiştir. Standart k- ϵ model ile benzerlik taşır. Fakat birkaç farklılık gösterir:

- RNG k- ϵ modelinde ϵ denklemine ek bir terim sağlar ki bu ek terim hızla zorlanmış akım çözümlerinin doğruluğunu önemli ölçüde etkiler,

- RNG modelinde, girdap veya dönme içeren akım çözümlerinin doğruluğunu arttırmak için, türbülans üzerine dönme etkilerini içeren iyileştirmeler mevcuttur.
- RNG teorisi bir analitik formül ile türbülans Prandtl sayısını tanımlar fakat standart k-ε modelinde sabit değerindedir,
- Standart k-ε modeli yüksek Reynolds sayısı modeli iken RNG k-ε modeli, düşük Reynolds sayısı etkilerini hesaplamak için kullanılan efektif viskozite için türetilmiş analitik differansiyel denklemler içerir. Bu özellik RNG k-ε modelini çok çeşitli akım çözümleri için standart k-ε modelinden daha güvenilir ve doğru yapar.

4.3.3 SST k-ω Modeli

Fluent'te kullanılan standart k- ω modeli Wilcox'un (1998) HAD için türbülans modelleri ile ilgili çalışmasındaki düşük reynolds sayısı etkileri, sıkıştırılabilirlik ve kayma akım iyileştirilmelerini içeren k- ω modelini temel almıştır. Bu yaklaşım karışım tabakası, kesikli akış, radyal jet ve duvar sınırlı akım problemlerinde ölçülmüş verilerle iyi uyum sağlayan ve bu problemler için tavsiye edilen çözüm modelidir.

SST k-ω modeli ise Menter (1994) tarafından k- ε modelinin k- ω formuna çevrilip bu iki çözüm modelinin harmanlanmasıyla elde edilmiştir. Cidar yakını bölgelerinde iyi sonuçlar veren, ters basınç gradyanlı akımlar, transonik şok dalgaları ve kanat akımı gibi çok çeşitli problem tipleri için daha hızlı ve daha doğru sonuç veren özelleştirilmiş bir çözüm modelidir.

4.3.4 Reynolds Stres Modeli

Reynolds Stres Modeli (RSM) Fluent'te kullanılan en ayrıntılı modeldir. RSM, RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) denklemlerini çözmek için sönmleme hızı (dissipation rate) denklemleri ile birlikte transport denklemlerini Reynolds stresleri için hesaplatır. Bu iki boyut için 5 ve üç boyut için 7 ek denklemin çözülmesi gerektiği anlamına gelir.

RSM akış çizgisindeki kıvrımları, değişimleri, dönmeleri, girdapları ve gerilme oranlarındaki hızlı değişimleri tek denklemler ve iki denklemler modelere göre daha ince ve ayrıntılı hesaplayarak karmaşık akımlar için doğru tahminler verir.

Ek denklemlerin ve hesaplamaların olması RSM' nin her tür akımda daha basit modellerden daha iyi sonuç vereceğini garanti etmez. Fakat ilgilenilen akış özellikleri Reynolds-streslerdeki anizotropinin bir sonucu ise RSM modelinin kullanılması Reynolds

gerilimlerinin sayısal değerlerinin sadece bu modelde görülüyor olmasından dolayı şarttır.

4.4 Yakınsama ve Kararlılık

FLUENT programında yakınsama kriterleri: süreklilik, x,y,z yönlerindeki hızlar için $R=10^{-4}$, enerji için $R=10^{-6}$ dır. Yakınsama kriterleri kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir.

Yapılan nümerik çalışmada Fluent ile hesaplamalar yapılırken Fluent ayar değerleri olan ve yukarıda belirtilen değerler yakınsama kriteri olarak alınmıştır.

Bu kriterlere göre İterasyon sayısı 1000–2000 aralığında değişmektedir, yani Fluent 1000–2000 iterasyonda sonuca gidebilmektedir. Yakınsama kriterlerinin sağlanmasından sonra, yakınsama eğrilerinin yataylaşması için iterasyon devam ettirilmiştir. Çözüm sonuçlarının daha doğru olması, sistemin kararlı hale gelebilmesi için yapılan bu işlem, eğrilerin yataylaşması durumunda sonlandırılmıştır.

4.5 Problemin Çözümü İçin Oluşturulan Algoritma

- Gambitte çizilen model FLUENT'e aktarılır ve program çalıştırılarak msh dosyaları okutulur.
- Çizilen modelin geometrik kontrolü yapılır.
- Gambit'te girilen ölçülerin birimi tanımlanır.
- Çözüm ağı gerçekleştirilirken yapılan küçük parçalara bölme işleminde gerekli modifikasyonlar gerçekleştirilir.
- Pressure Based unsteady 3D çözüm yöntemi seçilir.
- K- ε Türbülantlı akım modeli seçilir.
- Karışım seçilerek tanımlamalar yapılır.
- Yerçekimi terimi seçilmeden bırakılır.
- Sınır şartları girilir.
- URF (Under Relaxation Factors) değerleri ve parçalara ayırma yöntemleri girilir. URF değerleri: Pressure: 0,3, Density: 1, Body Forces: 1, Momentum: 0,5, Turbulance Kinetic Energy: 0,8, Turbulance Dissipation Rate: 0,8, Turbulance Viscosity: 1, Energy:1 olarak

girilmiştir. Parçalara ayırma yöntemlerinden, basınç-hız çifti: SIMPLE, basınç: PRESTO! Momentum: QUICK, Turbulance Kinetic Energy: QUICK, Turbulance Dissipation Rate: QUICK, Energy: Second Order Upwind seçilmiştir.

- Yazım-çizim ayarları yapılır.
- Yapılan bütün ayarlar ve girilen bütün değerler kaydedilir.
- Hesaplanmış değerler varsa sıfırlanır ve başlangıç ayar konumlarına getirilir.
- İterasyon sayısı girilerek iterasyon başlatılır.

Sayısal çözümlemede basınç-hız arasındaki bağıntıyı çözebilmek için SIMPLE (Semi-Implicit Methods for Pressure Linked Equations) methodu tercih edilmiştir. Bu metot kararlı akış için uygun bir yöntemdir. SIMPLEC (Semi-Implicit Methods for Pressure Linked Equations Consistent) methodu da kararlı akış çözümünde kullanılır. Ama URF (düzeltme katsayısı)'nın 1 alındığı problemlerde, çözümün yakınsamamasına neden olabilmektedir. PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) methodu kararsız akışlarda kullanılan bir çözüm yöntemi olup, tercih edilmemiştir.

Yakınsamanın gerçekleştiğini anlamak için Residual (artık) değerlerine bakılır. Her iterasyondan sonra kontrol gerçekleşir.

$$\frac{R_{\phi}^n}{R_{\phi}^5} \leq 10^{-4} \quad 4.10$$

N. iterasyondaki artık, ilk beş iterasyondaki maksimum artığa oranı 10^{-3} değerinden küçük olmalıdır. Süreklilik, x,y,z koordinatlarındaki u,v,w hızlarının artık oranları 10^{-3} 'den ve enerji denklemindeki artık oranı da 10^{-6} 'dan küçük olmalıdır. Bu değerler Fluent programı tarafından tavsiye edilen değerlerdir. Yapılan çözümlerde bu değerlerin de altına inilmiş ve yakınsama eğrilerinin yataylaşması beklenerek çözümler sonlandırılmıştır.

4.6 Modelin Çizimi

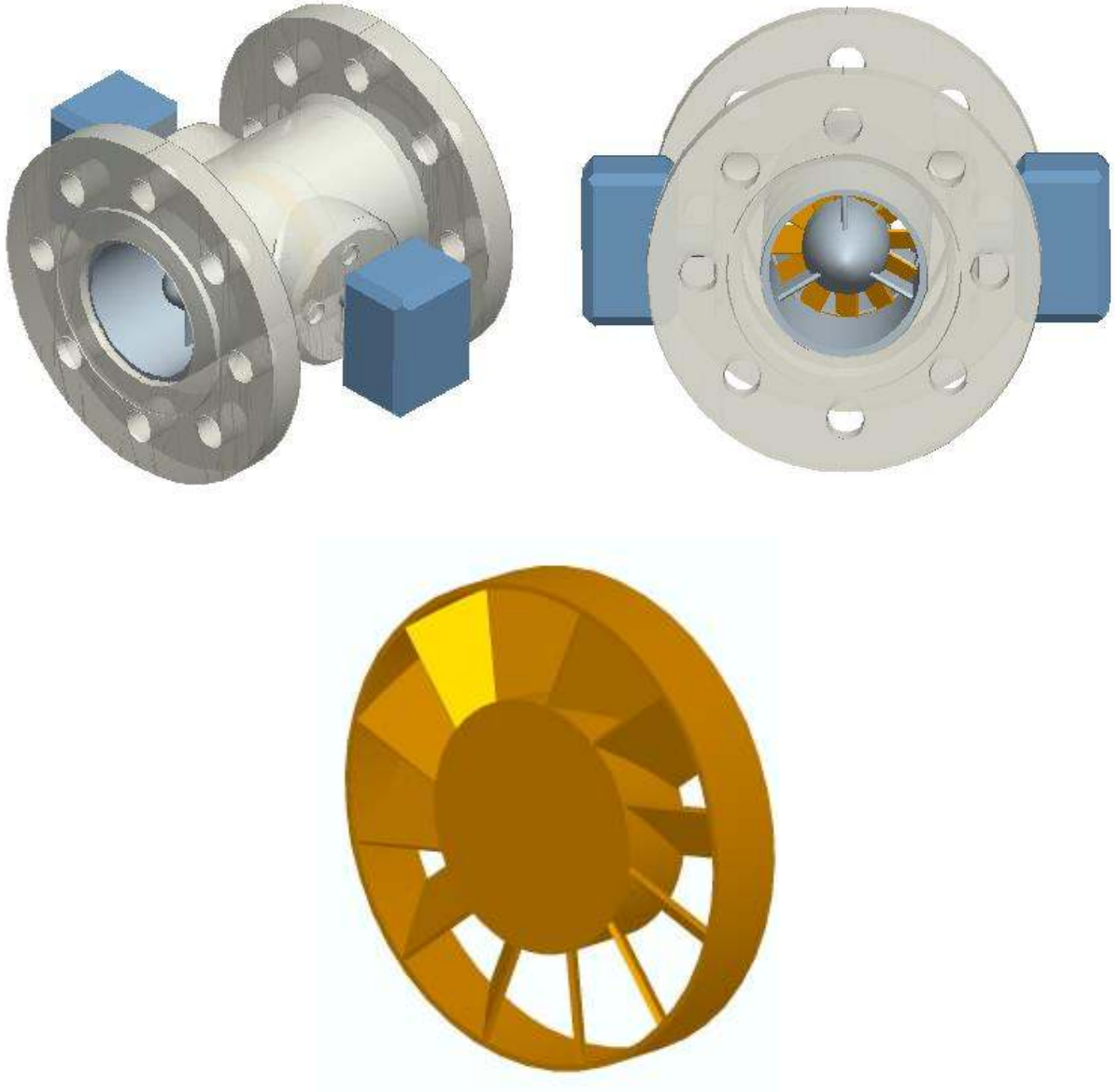
Türbinmetre sayısal CAD modelinin oluşturulabilmesi için türbinmetre ye ait boyutsal parametrelerin hassas olarak elde edilmesi hazırlanacak CAD modelin gerçek modelin sayısal bir temsili olması açısından çok önemlidir. Burada yapılacak hatalar sonraki bölümlerde ele alacağımız HAD analizlerinde hatalı sonuçlar elde etmemize sebep olacaktır.



Şekil 4.2 Rotor ve Statora Ait 3 Boyutlu Boyutsal Ölçümler (CMM)

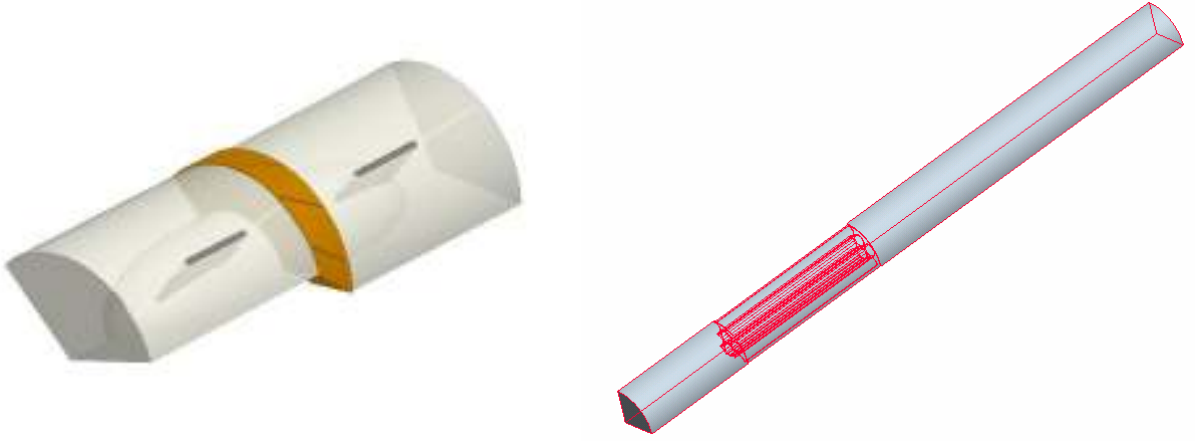
Bu sebepten türbinmetre üzerindeki ölçüler TÜBİTAK – UM E boyutsal ölçüm laboratuvarında referans standart olarak kullanılan CMM (Coordinat Measurement Machine) cihazı ile yüksek doğrulukla ve 0.02 mm hassasiyetle ölçülmüştür.

Ölçümler sonucu elde edilen boyutsal datalar dikkatli bir şekilde sayısal modelleme programı PROENGINEER WildFire 2.0 bilgisayar programı ile CAD datasına çevrilmiştir.



Şekil 4.3 3 Boyutlu Türbinmetre CAD Modeli

HAD analizleri için elde ettiğimiz bu 3 boyutlu CAD geometrisi bir şey ifade etmeyecektir. HAD analizlerinin mantığında yatan isminde anlaşılacağı gibi türbinmetre akış hanminin incelenmesidir. Bu doğrultuda bizim elde ettiğimiz CAD geometrisinin akış hacmini elde etmemiz gerekmektedir. Akış hacmini elde etmek için bir dizi işlem daha yapmak gerekmektedir. bu sayede analizlerimizde kullanacağımız aşağıdaki geometriyi ele etmiş olacağız.

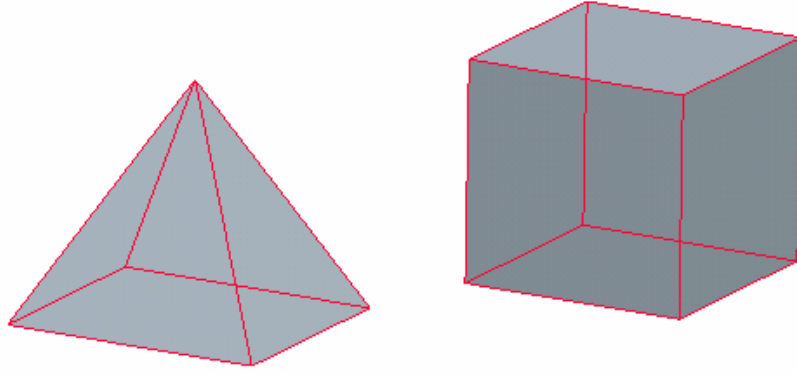


Şekil 4.4 3 Boyutlu 120° Türbinmetre ve 90° Akış Doğrultucu Akış Hacmi

Yukarda Şekil 4.4' de görüldüğü gibi akış hacminin yalnızca 1/3 ' lük bölümü uygun biçimde modellenmiştir. Bunun sebebi HAD analizleri sırasında kullanılan ticari kod FLUENT' in bu konuda izin verdiği simetrik çözüm yöntemidir. Türbinmetre akış hacminin 120° lik simetrik kısmı modellenmiştir. Dikkat edilirse görülecektir ki, 3 kanatlı stator kanatlı yapısının tek bir kanadı ve toplam 12 kanadı bulunan rotorun yalnızca 4 kanadı modellenmiştir. Bu çözümler sırasında bize büyük kolaylık sağlayacaktır. Bunlardan en önemlisi bilgisayar kapasitemize bağlı olarak tamamına oranla 3 kat fazla sayıda elemana bölünebilecek olmasıdır. Bu sayede analizlerden daha hassas çözümler beklenebilecektir.

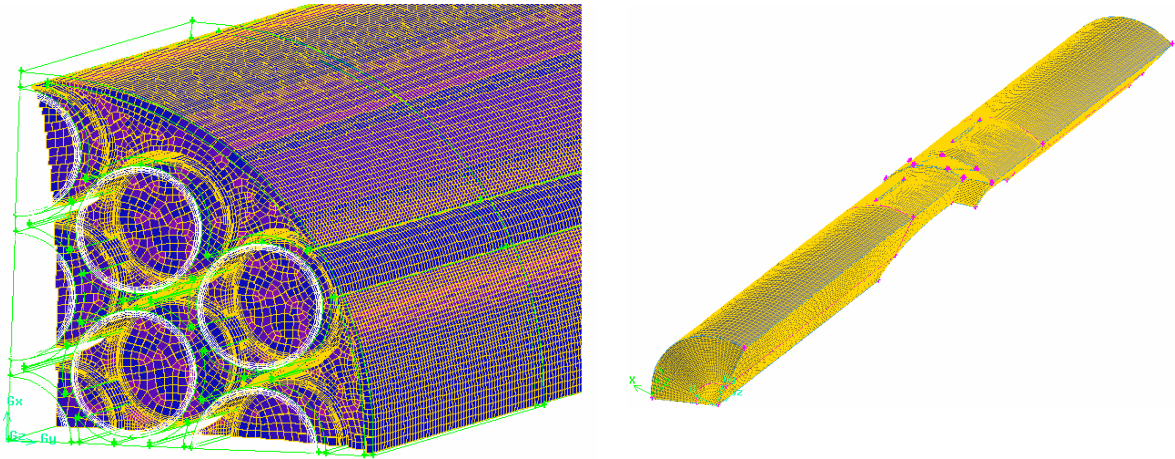
4.7 Çözüm Ağının Oluşturulması

Hesap alanı ve çözüm ağının oluşturulması aşamasında kullanılacak ağ yapısının tasarımı çözüm sonuçlarını doğrudan etkileyen en önemli unsurlardandır. Quad/hex (dörtkenarlı/altı yüzlü) yada Tri/Tet (üç kenarlı/dört yüzlü) ağdan hangisinin kullanıldığı bu yüzden çok önemlidir. FLUENT birçok değişik kaynaktan gelebilecek ağ bilgilerini kendi kullanım prosedürüne göre çevirebilmektedir. 2 boyutlu uygulamalarda üçgenler veya dörtgenlerden veya ikisinin birleşiminden oluşmuş hücreler, 3 boyutlu uygulamalarda altı yüzlü dörtgensel elemanlar, beş yüzlü piramit şeklinde elemanlar veya bunların birleşiminden oluşan elemanlar kullanılabilir. Bu çeşitler probleme en uygun olacak şekilde seçilmelidir.



Şekil 4.5 ..3 Boyutlu Prizmatik 5 Kenarlı ve Dörtgenel 6 Kenarlı Eleman Yapıları

Dörtgenel elemanlar HAD analizlerinde daima daha iyi sonuç verirler. Bunun sebeplerinden biri de aynı hacmin içimde tek bir dörtgenel elman yerine minimum beş adet prizmatik elemanlar kullanılabilir olmasıdır. Bu sayede dörtgenel eleman kullanarak gerekli hacim içinde daha fazla eleman bulundurabiliriz. İnceleyeceğimiz hacim içinde dörtgenel elemanlar bulundurmak her zaman mümkün değildir. Bunun için uygulanabilecek çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerin detaylarına burada girilmeyecektir ancak istenildiği takdirde GAMBİT 2.2.30 Documentaion Manual bu konuda iyi bir referans olarak takip edilebilir.



Şekil 4.6 Türbinmetre ve Akış Doğrultucu İçin Oluşturulan 3 Boyutlu Sayısal Ağ

Bizim problemimizde yukarıda bahsi geçen yöntemler kullanılarak GAMBİT 2.2.30 kullanılarak hacmin tamamı dörtgenel elemanlara ayrılabilmiştir. Kullanılan bu yöntemler sonucunda inceleyeceğimiz hacim bilgisayar kapasitenin izin verdiği en yüksek değer olan

yaklaşık olarak 1.000.000 sayıda elemana ayrılarak kapsamlı bir sayısal ağ oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal ağ yukarıda Şekil 4.6' da görülmektedir.

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak Akışkanlar Dinamiği problemlerinin sayısal olarak çözümlenmesi konusu da gelişmiş ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) olarak adlandırılmıştır. Bu tez çalışmasında, HAD paket programlarından FLUENT 6.3.26 kullanılarak problemler sayısal yöntemlerle çözülmüştür. HAD kavramı ve HAD analizlerinin planlanması çözüm adımları anlatılmıştır. İlgili konularda daha önce yapılmış deneysel ve nümerik çalışmalara literatür araştırması kısmında değinilmiştir. Üçüncü bölümde bu problemlerin HAD çözümlerinde kullanılan sayısal çözüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Öncelikle FLUENT'in sunduğu model ve ağ oluşturma programı olan GAMBIT 2.2.30'da problemler için çözüm ağları hassas sonuçlar elde edilmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmaya çalışılmıştır. Tasarlanan çözüm ağları FLUENT programına aktarılıp sınır koşulları verildikten sonra sonlu hacimler yöntemini kullanarak sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Farklı debilerdeki akış hızları için yapılan sayısal çalışmalar çözüm algoritmaları ayrı ayrı bölümler halinde sunulmuştur. Fluent programının yardımıyla elde edilen veriler hazırlanan test düzeneğinde yapılan çalışmalardan elde edilen rotor dönüş hızı, statik basınç düşümü verileri ile karşılaştırılmıştır.

4.8 HAD Analizlerinin Planlanması ve Çözüm Adımları

4.8.1 HAD Analizlerinin Planlanması

Bu tez çalışmasında hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümlenmesinde çözücü program olarak FLUENT programı kullanılmıştır. Bir problemi FLUENT'te çözmeye başlamadan önce aşağıdaki yollar takip edilmelidir.

- a) Türbinmetre 3D sayısal modelinin gerçeğine kıyasla minimum hata ile oluşturulması.
- b) Oluşturulan modelin sonlu sayıda elemanlara ayrılması.
- c) Modelleme Hedeflerinin Açıklanması: HAD modelinden ne tip çözümler istenmekte ve bu çözümler nasıl kullanılacak? Modelden ne kadar doğruluk derecesi bekleniyor?
- d) Çözüm Modellerinin Seçilmesi: Modellenecek olan sistemin bir parçasını nasıl ayırırsınız? Çözüm alanı nereden başlayıp nerede bitecek? Modelin sınırlarında ne gibi sınır şartları kullanılacak? Problem 2 boyutta çözülebilir mi, yoksa 3 boyutlu bir

model kullanmak zorunluluğu var mı? Ne tür bir ağ yapısı bu problem için en idealdir?

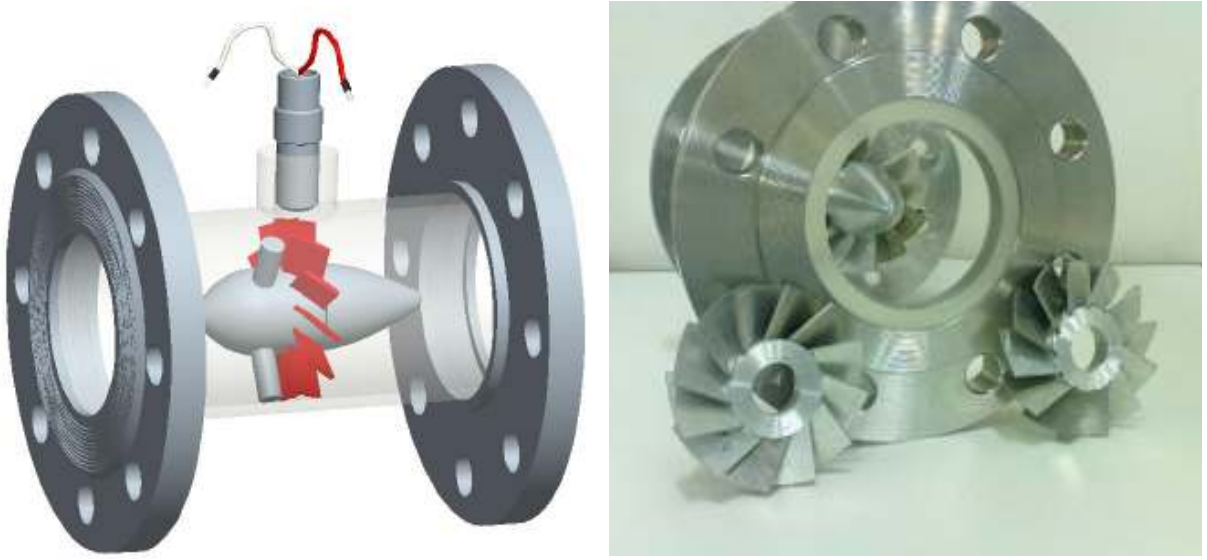
e) Fiziksel Modelin Seçilmesi: Akış viskoz mu, laminar mı, türbülanslı mı? Akış daimi mi, zamana bağlı mı? Isı transferi önemsenmeli mi? Akışkan sıkıştırılabilir mi, sıkıştırılmaz mı? Başka fiziksel modeller de kullanılabilir mi?

f) Çözüm Prosedürünün Kararlaştırılması: Problem sadece genel çözüm formülü ve çözüm parametreleri ile çözülebilir mi? Daha akılcı bir çözüm prosedürü ile daha yakınsak sonuçlar elde edilebilir mi? Bilgisayarınız bu yollarla ne kadar sürede bir yakınsamaya varabiliyor?

Bu konular üzerinde verilecek doğru cevaplar ve bunlar doğrultusunda izlenecek yollarla oluşturulacak modelin başarısı artacaktır.

5. TESTLERDE KULLANILACAK TÜRBİNMETRENİN İMALATI

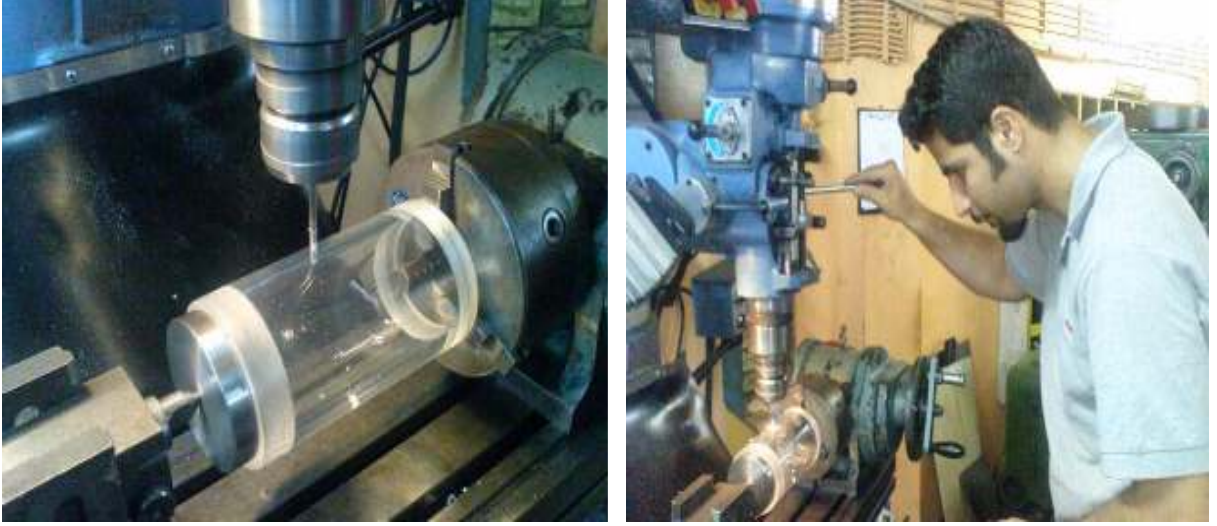
Bu bölümde testler sırasında kullanılacak, kanat sayıları 9 ve 12 olan, kanat düzlemleri akış eksenine ile 50° , 55° ve 60° açılar ile yerleştirilmiş toplam 6 adet düz kanatlı türbinmetre rotoru ve bir adet DN80 türbinmetre gövdesinin akış doğrultucuları ile birlikte imalatı anlatılacaktır. Tasarlanan türbinmetrede giriş bölümünde akış doğrultucu tasarlanmamış yalnızca rotorun yataklanması için çıkışta 120° açılı 3 kollu bir yapı oluşturularak aynı zamanda çıkış tarafı akış doğrultucusu olarak kullanılması ön görülmüştür. Bunlardan farklı olarak türbinmetre rotorunda yataklama elemanı olarak sıvı akışkan ile çalışılacağından ve de sürtünme momentinin düşüklüğünden faydalanılmak istenmesi sebebi ile $26 \times 10 \text{ mm}$ ölçülerinde ZrO₂ malzemedeki seramik rulman seçilmiştir.



Şekil 5.1 Türbinmetre ve CAD Modeli

5.1 GÖVDE İMALATI

İmalatı yapılacak türbinmetre gövde malzemesi için testler sırasında akışın gözlenebilmesi açısından avantajlı olabilecek 10mm et kalınlığına sahip şeffaf PleksiGlass malzeme kullanılmıştır. TUBITAK – UME akışkanlar mekaniği ölçüm hatlarına bağlantısının sağlanabilmesi amacıyla Pleksi Glass gövdeye 2 adet DN80 PN25 AISI 316L paslanmaz çelik flanş dişli bir bağlantı ile monte edilmiş, sızdırmazlık için sıvı conta kullanılmıştır.



Şekil 5.2 PleksiGlass Türbinmetre Gövdesi İmalatı

5.2 ROTORUN İMALATI

Testlerde kullanılacak 9 ve 12 kanatlı 6 adet düz kanatlı türbinmetre rotorunun imalatından bahsetmeden önce kullanılacak malzemeler ve sebepleri hakkında bazı bilgiler vermek uygun olacaktır. Testlerde türbin rotoru dönüş hızının tespit edilmesi için kullanılacak pick off algılayıcısının çalışabilmesi için türbinmetre rotor gövdesinin anti manyetik, rotor kanatlarının ise manyetik olması gereklidir. Bu sayede algılayıcı pick off' un önünden her bir kanat geçişinde mV lar mertebesinde bir akım oluşabilecektir. Bununla beraber tez kapsamında çalıştığımız akışkan su olduğu için bu malzemelerin paslanmaz olması da bir o kadar önemlidir.

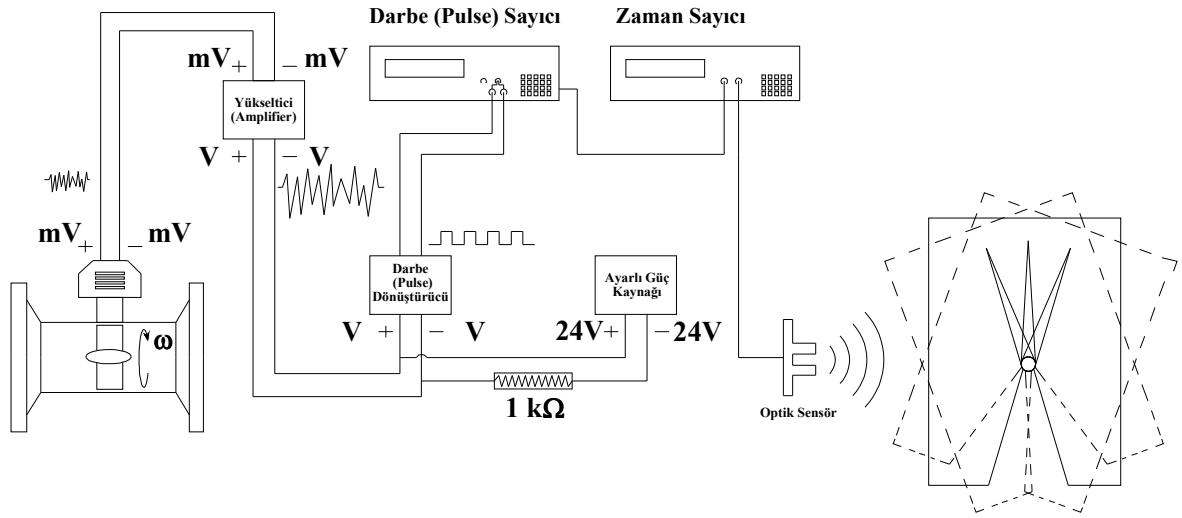


Şekil 5.3 Türbinmetre Rotorlarının İmalatı

Bu sebeple rotor gövdesi paslanmaz çelik AISI 304 anti manyetik, rotor kanatları ise 2mm kalınlığında AISI 430 manyetik paslanmaz çelik saç malzemeleri seçilmiştir. Rotor tabanı torna ve freze tezgahlarında üzerlerine 50°, 55° ve 60° açılarda ve 2mm genişliğinde kanallar açılarak imal edilmiş, kanatları ise CNC tel erozyon tezgahında hazırlanan CAD datasına uygun olarak kesilerek imal edilmiştir.

5.3 ALGILAYICI VE VERİ TRANSFERİ

Türbinmetre rotor dönüş hızının ölçülebilmesi için manyetik pick off adı verilen bir algılayıcı kullanılmıştır. Manyetik rotor kanatları bir eksen etrafında dönüşü sırasında bu algılayıcının önünden her bir kanat geçişinde mV mertebelerinde üretilen akım, bir yükseltici(Amplifier) vasıtası ile yükseltilerek darbe (Pulse) üreticisine gönderilir. Darbe üretici yada darbe çevirici, yükselticiden çıkan rotor hızına bağlı kesikli akımın işlenerek hızlı sayıcının sayabileceği düzenli darbelerle dönüştürülmesinde kullanılır.

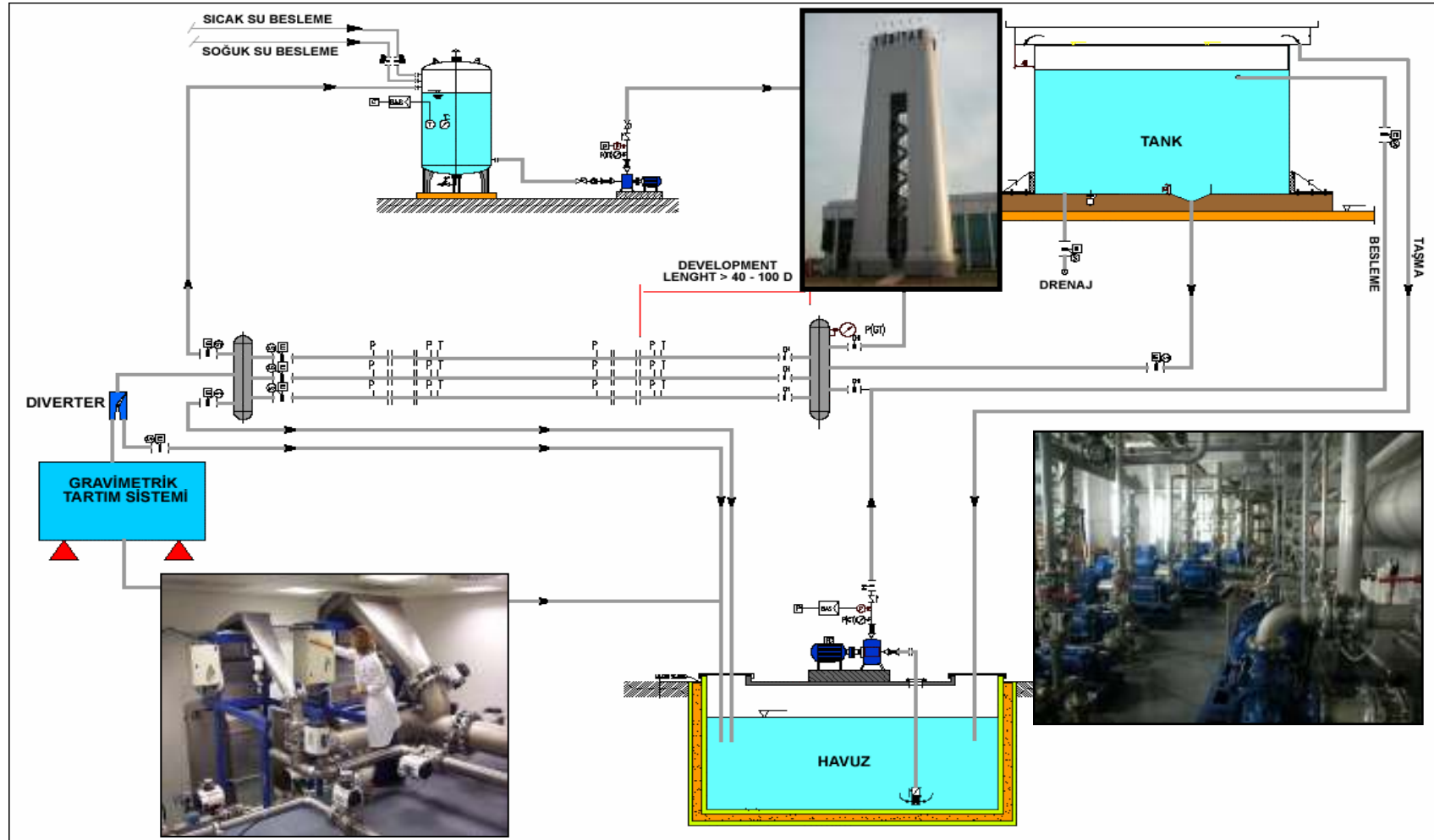


Şekil 5.4 Türbinmetre Algılayıcı ve Darbe & Zaman Sayıcıları Akış Diagramı

6. LABORATUAR DENEYLERİ

Laboratuar deneyleri TUBİTAK – UME akışkanlar mekaniği laboratuvarında 5 ton' luk ulusal kütleli debi ölçüm sistemi kullanılarak yapılmıştır. 0-3000 m³/h debi aralığındaki Su sayaçlarının ölçüm ve kalibrasyon hizmetlerini karşılamak için bu sistem kurulmuştur. Mevcut laboratuar içerisinde bulunan 5m x 20m x 3m boyutlarındaki havuzda bulunan yumuşak su, havuz üzerinde bulunan Muhtelif debi ve basınçtaki frekans kontrollü paslanmaz çelik pompa ve borularla, laboratuar ölçüm seviyesinden 35 m yükseklikte ki bir kulede bulunan ve iç içe paslanmaz çelikten oluşan her birinin hacmi 50, 15, ve 5 m³ olan sabit seviye tanklarına basılmakta ve bu sabit seviye tanklarından gelen su ile UME' ye ait referans sayaçlar, Uluslararası karşılaştırmalar için gelen transfer standartları veya akredite olmuş laboratuvarlara ait transfer standartları ile özel isteğe bağlı sayaçlar kalibre edilmektedir. Hata oranı büyük olan sayaçların beslenmesi ise sabit seviye tankından değil direkt olarak frekans kontrollü pompalardan sağlanmaktadır.

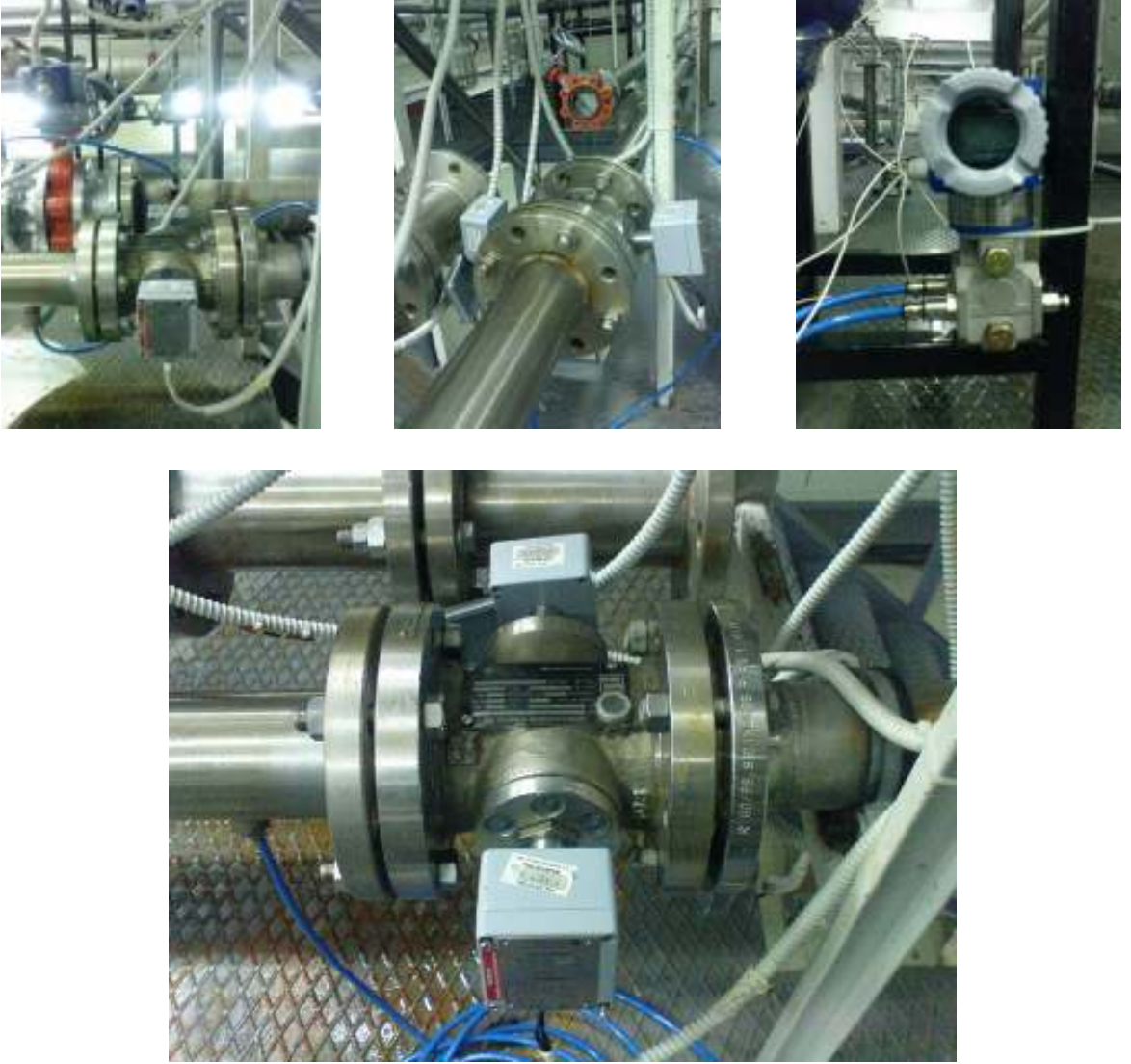
Bopp & Reuther marka referans türbinmetre cihazına ait laboratuar testleri TUBİTAK – UME akışkanlar mekaniği laboratuvarı sabit seviye tankları kullanılarak yapılmıştır. Bu tankların kullanılmasının asıl amacı teste tabi cihazın sürekli olarak 35 mt sabit su seviyesi statik basıncı altında tutarak pompalardaki frekans ve devir dalgalanmaları sonucu oluşan basınç dalgalanmalarının önüne geçmektir. Suyu sıkışamaz akışkan olarak kabul edersek Bernoilli denkleminden açıkça görülebileceği üzere bu basınç dalgalanmaları direkt olarak debiyi ve dolayısı ile direkt olarak akışkan akış hızını etkileyecektir. Burada yaptığımız çalışma sırasında kabul ettiğimiz daimi şartların yerine getirilmemesi anlamına gelebilmektedir. Test sistemi yukarıda Şekil 5.1 ' de gösterilmiştir



Şekil 6.1 TÜBİTAK – UME Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı Test Sistemi Şeması

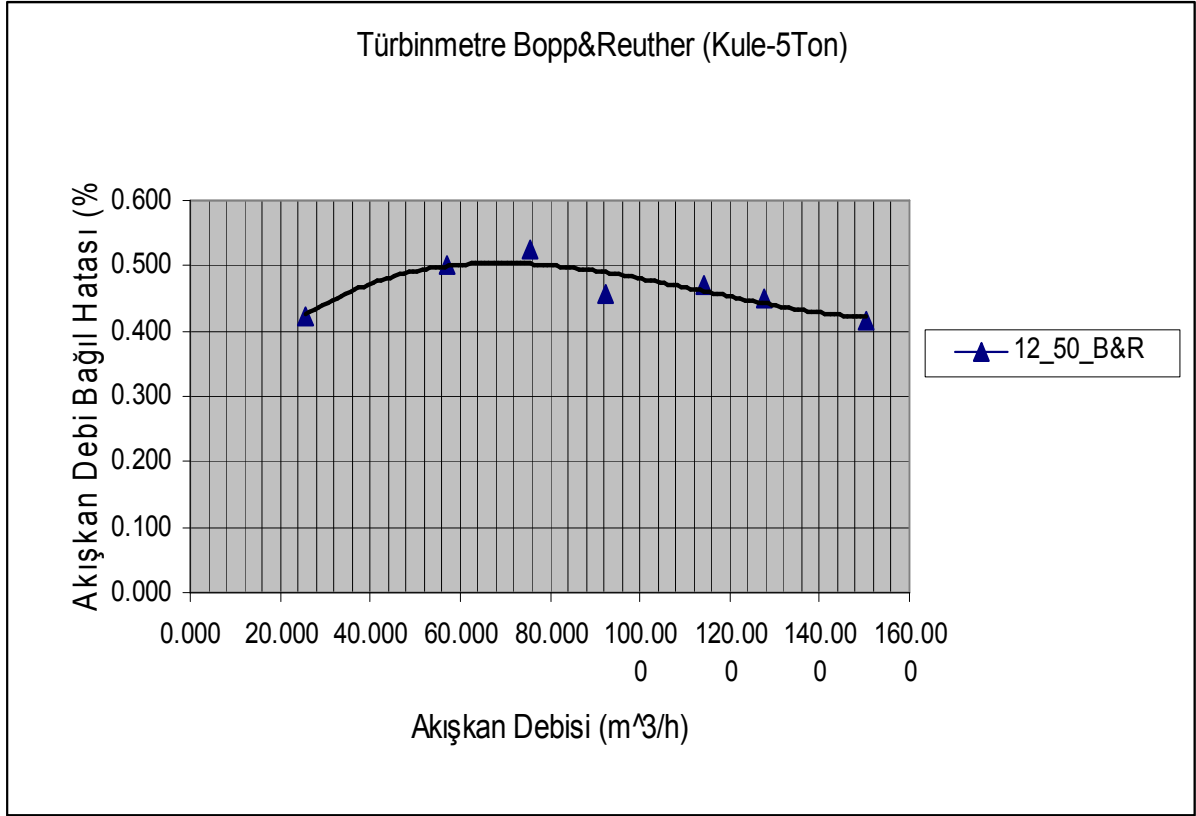
6.1 BOPP & REUTHER REFERANS TÜRBİNMETRE TESTLERİ

Testler sırasında belirli bir zamanda türbinmetreden geçen akışkan miktarı tartılmıştır. Testin başlama ve bitişi arasında geçen süre FLUKE marka UME zaman frekans laboratuvarına izlenebilir hızlı zaman sayıcılarla hassas olarak sayılmış, aynı sürede türbinmetreden geçen akışkan miktarı türbinmetre çıkışından alınan pulse'ların sayılması ile hesaplanmıştır.

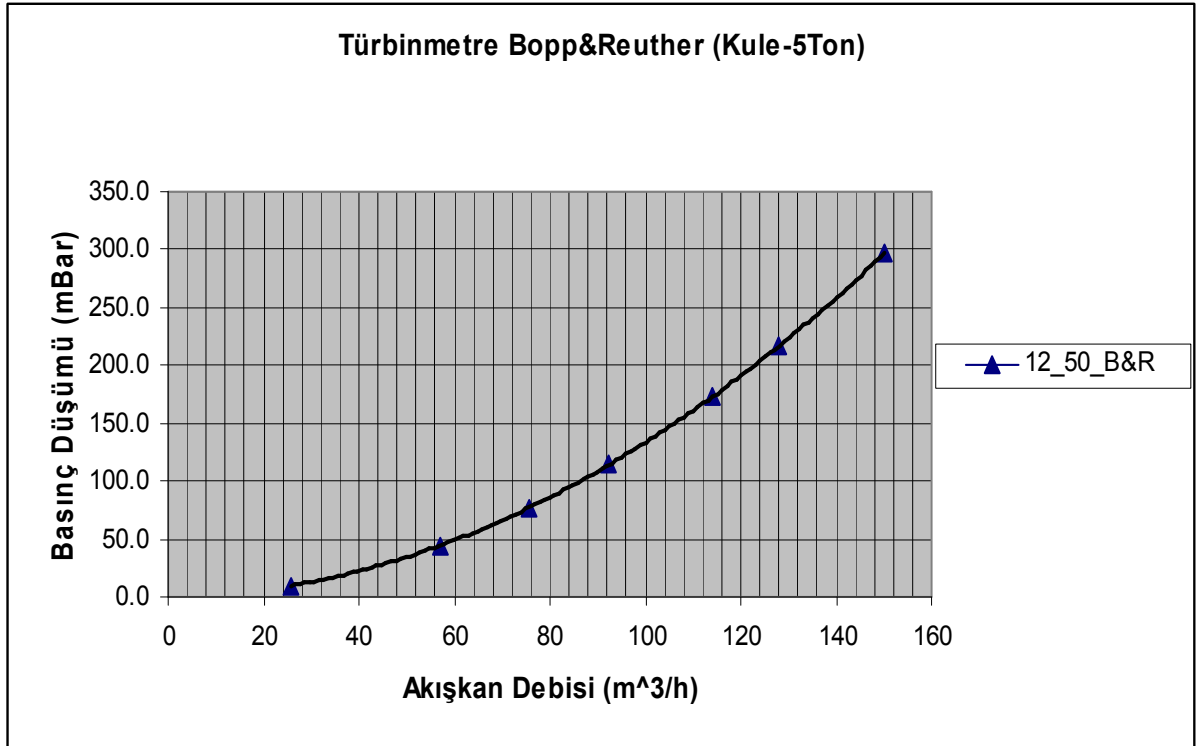


Şekil 6.2 TÜBİTAK – UME Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı Testlerden Görüntüler

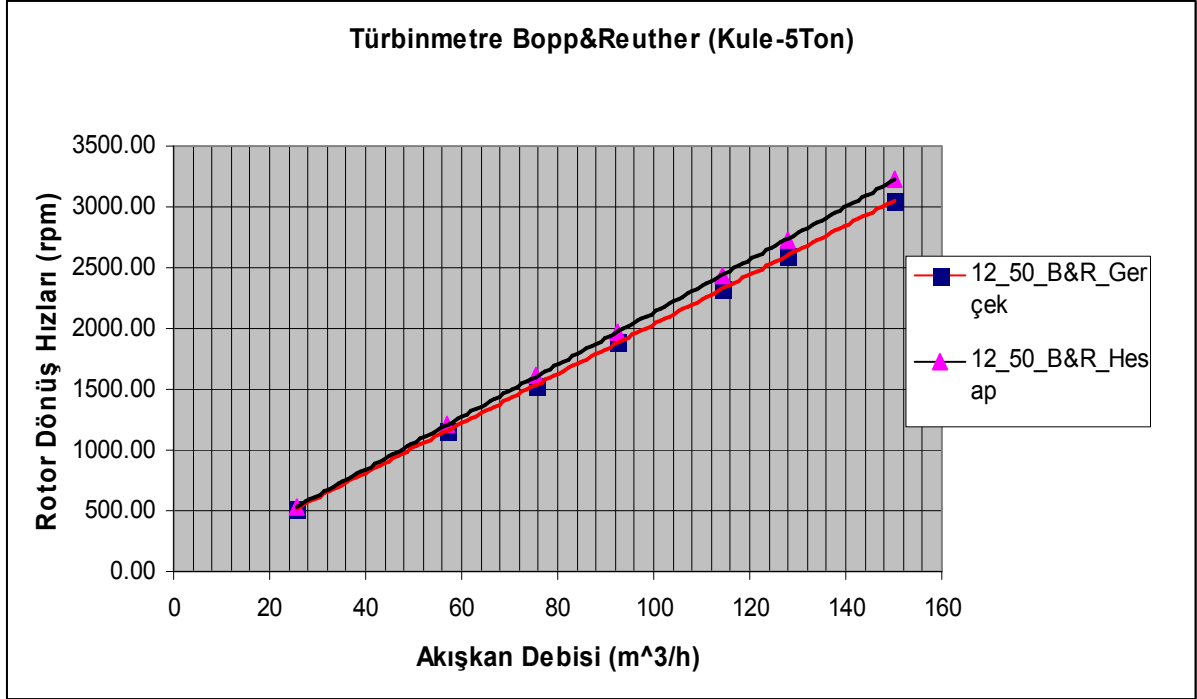
Testler sonucu rotor dönüş hızı bilinen zaman dilimi içinde toplanana pulse'lardan yola çıkılarak bir turda 12 pulse üreten rotorun dakikada ürettiği pulse miktarı hesaplanmış ve buradanda rotor dönüş hızı rpm olarak hesaplanmıştır. Yapılan testlere ait grafikler (Şekil 6.3 – Şekil 6.4-- Şekil 6.5 - Şekil 6.6) ve testlere ait datalar tablo halinde (Çizelge 6.1) aşağıda verilmiştir.



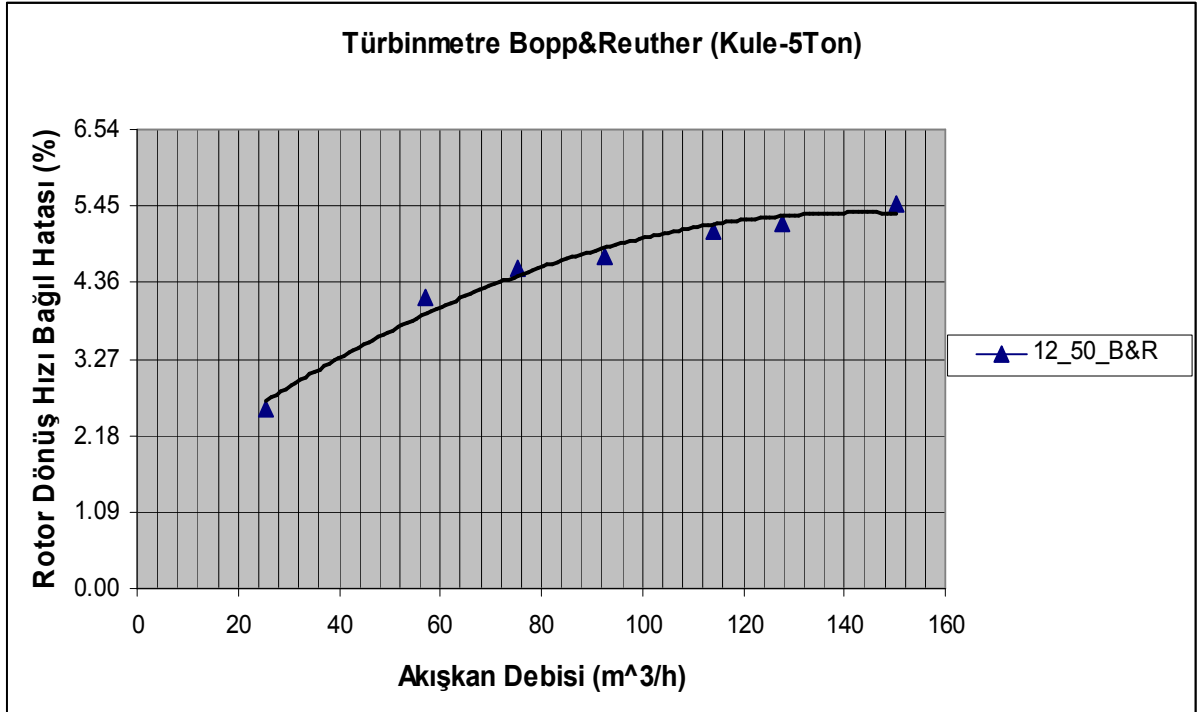
Şekil 6.3 Türbinmetre Testi Debi & Hata Eğrisi



Şekil 6.4 Türbinmetre Testi Debi & Basınç Farkı Eğrisi



Şekil 6.5 Türbinmetre Testi Debi & Basınç Farkı Eğrisi



Şekil 6.6 Türbinmetre Testi Debi & Basınç Farkı Eğrisi

Çizelge 6.1 Türbinmetre Test Dataları

Sl. No.	W ₁ kg	W ₂ kg	DW kg	Dp mBar	T sec	T deg C	ρ kg/m ³	Q _r m ³ /h	Pulse p/l	W _{cihaz} l	Q _c m ³ /h	%Dev. in Q _i
1	2,6	2471,6	2469,0	299,0	59,36249071	17,2	998,74	150,079	36427	2488,132	150,8912	0,541
2	2471,6	4924,0	2452,4	293,1	59,48458229	17,2	998,74	148,764	36154	2469,485	149,4529	0,463
3	3,2	2564,0	2560,8	298,9	61,54580280	17,2	998,74	150,137	37771	2579,933	150,9081	0,513
							Ortalama Q_r	149,660		Ortalama Q_c	150,417	0,506
4	2564,0	4977,4	2413,4	216,0	68,45318419	17,2	998,74	127,217	35566	2429,322	127,7597	0,426
5	2,0	2462,0	2460,0	216,1	69,82691803	17,0	998,77	127,118	36278	2477,955	127,7536	0,500
6	2462,0	4963,0	2501,0	216,1	70,95859617	17,0	998,77	127,176	36855	2517,366	127,7156	0,424
								127,171		Ortalama Q_c	127,743	0,450
7	2,0	2449,6	2447,6	173,8	77,72998956	17,0	998,77	113,618	36090	2465,113	114,1697	0,485
8	2449,6	4991,6	2542,0	173,0	80,72707665	17,0	998,77	113,619	37462	2558,827	114,1101	0,432
9	3,6	2478,0	2474,4	172,9	78,58168416	17,0	998,77	113,617	36489	2492,367	114,1808	0,496
							Ortalama Q_r	113,618		Ortalama Q_c	114,154	0,471
10	2478,0	4941,4	2463,4	113,8	96,38746474	17,0	998,77	92,217	36308	2480,004	92,6263	0,444
11	2,4	2440,4	2438,0	114,3	95,64372463	17,1	998,76	91,977	35948	2455,414	92,4210	0,482
12	2597,6	4949,4	2351,8	113,9	92,32499900	17,1	998,76	91,915	34664	2367,711	92,3234	0,445
							Ortalama Q_r	91,946		Ortalama Q_c	92,372	0,464
13	4,2	1620,5	1616,3	77,1	77,59623162	17,1	998,76	75,160	23854	1629,338	75,5915	0,575
14	1620,5	3335,4	1714,9	77,1	82,35250766	17,1	998,76	75,139	25284	1727,014	75,4956	0,475
15	3335,4	4963,2	1627,8	76,9	78,27390427	17,1	998,76	75,039	24011	1640,062	75,4303	0,521
							Ortalama Q_r	75,113		Ortalama Q_c	75,506	0,523
10	4,8	1639,2	1634,4	44,5	104,02501270	17,2	998,74	56,693	24117	1647,302	57,0083	0,556
11	1639,2	3321,2	1682,0	44,6	106,96986910	17,1	998,76	56,737	24791	1693,340	56,9882	0,442
12	3321,2	4962,2	1641,0	44,6	104,48282400	17,1	998,76	56,672	24201	1653,040	56,9562	0,502
							Ortalama Q_r	56,701		Ortalama Q_c	56,984	0,500
13	135,4	1634,6	1499,2	9,7	212,20667820	17,1	998,76	25,492	22104	1509,805	25,6132	0,476
14	1634,6	3374,4	1739,8	9,8	246,15063030	17,1	998,76	25,504	25631	1750,715	25,6045	0,396
15	3374,4	4991,2	1616,8	9,8	228,84875480	17,1	998,76	25,492	23820	1627,016	25,5944	0,400
							Ortalama Q_r	25,496		Ortalama Q_c	25,604	0,424
							Tekrarlanabilirlik(%) =			0,0206		

6.2 İMAL EDİLEN TÜRBİNMETREYE AİT TESTLER

Testler sırasında bir önceki testlerde olduğu gibi belirli bir zamanda türbinmetreden geçen akışkan miktarı tartılmıştır. Testin başlama ve bitişi arasında geçen süre FLUKE marka UME zaman frekans laboratuvarına izlenebilir hızlı zaman sayıcılarla hassas olarak sayılmış, aynı sürede türbinmetreden geçen akışkan miktarı türbinmetre çıkışından alınan pulse' ların sayılması ile hesaplanmıştır. Bu testler sırasında akışkan sisteme bir önceki testteki gibi kulede bulunan sabit seviye tankından değil, direk olarak santrijüf pompalarla beslenmiştir. Testler sırasında sistem çalışır halde bir müddet bırakılarak akışın sabit bir rejime ulaşması beklenmiştir.

Testlerde 80 mm çapa sahip bir adet türbinmetre 6 farklı rotor tipi ile birlikte ayrı ayrı olarak test edilmiş ve rotor dönüş sayıları ile birlikte K akış katsayıları belirlenmiştir. . Yapılan testlere ait test sonuçları ve grafikler aşağıda Şekil. 6.7 ve Çizelge 6.2 – 6.6 ' da verilmiştir.



Şekil 6.7 imal Edilen Türbinmetre Laboratuvar Testleri

Çizelge 6.2 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (12_60)

TÜRBİNMETRE Kanat Sayısı :12 _Kanat Açısı: 60															
Sl. No.	W ₁ kg	W ₂ kg	DW kg	Dp mBar	T sec	T deg C	ρ kg/m ³	Q _r m ³ /h	Pulse p	W _{cihaz} rpm	K p/l				
1	326.60	456.93	130.33	97	19.1367	17.5	998.68	24.57602589	2734	714.334	20.94992				
2	468.40	599.11	130.71		19.2047	17.5	998.68	24.56040577	2744	714.408	20.96542				
							Ortalama Q_r	24.56821583	Ortalama K		20.95767				
4	226.98	318.40	91.42	124	8.225536	17.5	998.68	40.10618296	1918	1165.881	20.95249				
5	318.40	508.21	189.81		17.06045	17.5	998.68	40.14790174	3977	1165.561	20.92497				
							Ortalama Q_r	40.12704235	Ortalama K		20.93873				
7	723.60	835.54	111.94	187	7.647705	17.5	998.68	52.81879608	2340	1529.871	20.87656				
8	835.54	960.92	125.38		8.567414	17.5	998.68	52.80959215	2621	1529.633	20.87695				
			118.66								Ortalama Q_r	52.81419411	Ortalama K		20.87675
10	103.25	274.20	170.95	260	10.21908	17.5	998.68	60.3659013	3566	1744.776	20.83246				
11	274.20	504.09	229.89		13.72785	17.5	998.68	60.42988924	4791	1744.993	20.81299				
			200.42								Ortalama Q_r	60.39789527	Ortalama K		20.82272
13	504.09	745.37	241.28	333	12.96613	17.5	998.68	67.14988424	5007	1930.800	20.72452				
14	745.37	973.33	227.96		12.26439	17.5	998.68	67.07286268	4723	1925.492	20.69129				
			234.62								Ortalama Q_r	67.11137346	Ortalama K		20.70791
10	4.26	344.38	340.12	371	16.00311	17.5	998.68	76.69414299	7023	2194.261	20.62143				
11	344.38	614.40	270.02		12.69027	17.5	998.68	76.7820022	5574	2196.171	20.61576				
			305.07								Ortalama Q_r	76.7380726	Ortalama K		20.61859

Çizelge 6.3 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (12_55)

TÜRBİNMETRE Kanat Sayısı :12_Kanat Açısı: 55											
Sl. No.	W₁ kg	W₂ kg	DW kg	Dp mBar	T sec	T deg C	ρ kg/m³	Q_r m³/h	Pulse p	W_{cihaz} rpm	K p/l
1	63.70	236.92	173.22	93	24.92686	17.5	998.68	25.07637753	3227	647.294	18.60498
2	236.92	466.75	229.83		33.09005	17.5	998.68	25.06361251	4282	647.022	18.60665
							Ortalama Q_r	25.06999502		Ortalama K	18.60582
4	559.60	757.85	198.25	130	18.55116	17.5	998.68	38.56349279	3666	988.078	18.46748
5	757.85	976.71	218.86		20.46851	17.5	998.68	38.58465165	4050	989.325	18.48064
							Ortalama Q_r	38.57407222		Ortalama K	18.47406
7	105.83	328.45	222.62	172	15.85211	17.5	998.68	50.67705521	4114	1297.619	18.45561
8	328.45	528.15	199.70		14.20468	17.5	998.68	50.73188351	3687	1297.812	18.43841
			211.16				Ortalama Q_r	50.70446936		Ortalama K	18.44701
10	568.02	975.55	407.53	225	24.11926	17.5	998.68	60.97193901	7509	1556.640	18.40140
11	5.17	348.40	343.23		20.32056	17.5	998.68	60.95142147	6321	1555.321	18.39199
			375.38				Ortalama Q_r	60.96168024		Ortalama K	18.39670
13	348.40	697.97	349.57	274	17.83546	17.6	998.67	70.7281073	6428	1802.028	18.36378
14	697.97	991.67	293.70		14.98445	17.6	998.67	70.73025464	5400	1801.868	18.36159
			321.64				Ortalama Q_r	70.72918097		Ortalama K	18.36269
10	14.55	501.55	487.00	335	21.94206	17.6	998.67	80.09284709	8944	2038.095	18.34101
11	501.55	963.52	461.97		20.79448	17.6	998.67	80.16925139	8477	2038.281	18.32521
			474.49				Ortalama Q_r	80.13104924		Ortalama K	18.33311

Çizelge 6.4 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (12_50)

TÜRBİNMETRE Kanat Sayısı :12 _Kanat Açısı: 50															
Sl. No.	W ₁ kg	W ₂ kg	DW kg	Dp mBar	T sec	T deg C	ρ kg/m ³	Q _r m ³ /h	Pulse p	W _{cihaz} rpm	K p/l				
1	28.99	233.00	204.01	88	29.26948	17.5	998.68	25.15189655	3167	541.007	15.50333				
2	233.00	482.80	249.80		35.87722	17.5	998.68	25.12511138	3879	540.594	15.50799				
								Ortalama Q_r		25.13850397	Ortalama K	15.50566			
4	541.13	734.22	193.09	117	17.58959	17.5	998.68	39.61307049	2978	846.524	15.40257				
5	734.22	973.05	238.83		21.72818	17.5	998.68	39.66430479	3682	847.287	15.39654				
								Ortalama Q_r		39.63868764	Ortalama K	15.39956			
7	55.56	327.10	271.54	152	19.18306	17.5	998.68	51.07992093	4177	1088.721	15.36240				
8	327.10	553.45	226.35		15.98816	17.5	998.68	51.08769865	3482	1088.931	15.36302				
			248.95									Ortalama Q_r	51.08380979	Ortalama K	15.36271
10	590.20	963.30	373.10	187	22.25803	17.5	998.68	60.48850432	5731	1287.401	15.34029				
11	4.39	378.55	374.16		22.32604	17.5	998.68	60.47556589	5740	1285.494	15.32085				
			373.63									Ortalama Q_r	60.4820351	Ortalama K	15.33057
13	425.30	748.85	323.55	227	16.46402	17.6	998.67	70.91654031	4949	1502.974	15.27554				
14	748.85	990.54	241.69		12.30548	17.6	998.67	70.87647552	3698	1502.582	15.28019				
			282.62									Ortalama Q_r	70.89650791	Ortalama K	15.27786
10	75.47	504.65	429.18	274	19.09515	17.6	998.67	81.10704796	6559	1717.452	15.26225				
11	504.65	939.61	434.96		19.33915	17.6	998.67	81.16223185	6642	1717.242	15.25001				
			432.07									Ortalama Q_r	81.13463991	Ortalama K	15.25613

Çizelge 6.5 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (9_60)

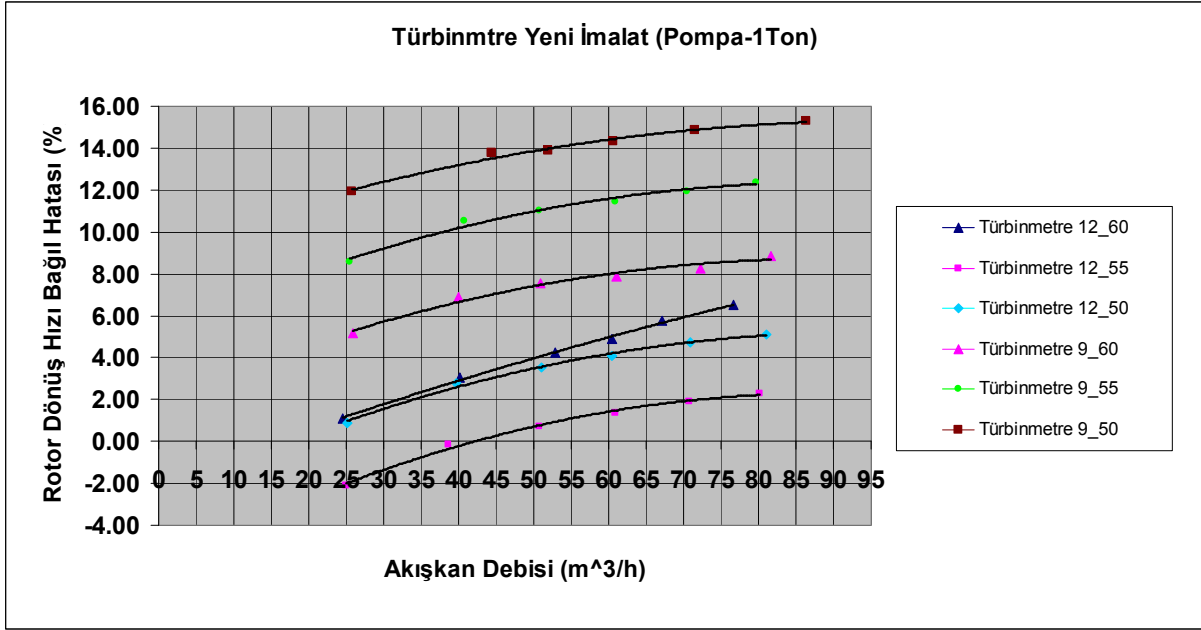
TÜRBİNMETRE Kanat Sayısı :9_Kanat Açısı: 60											
Sl. No.	W₁ kg	W₂ kg	DW kg	Dp mBar	T sec	T deg C	ρ kg/m³	Q_r m³/h	Pulse p	W_{cihaz} rpm	K p/l
1	568.74	763.10	194.36	95	27.06385	17.5	998.68	25.91502481	3183	784.072	16.35528
2	763.10	990.97	227.87		31.76623	17.5	998.68	25.88545674	3734	783.641	16.36498
							Ortalama Q_r	25.90024078		Ortalama K	16.36013
4	46.46	262.40	215.94	136	19.50649	17.5	998.68	39.9473813	3523	1204.044	16.29325
5	262.40	477.00	214.60		19.38859	17.5	998.68	39.94090181	3501	1203.801	16.29261
							Ortalama Q_r	39.94414155		Ortalama K	16.29293
7	569.25	812.50	243.25	183	17.24535	17.5	998.68	50.89970397	3955	1528.915	16.23760
8	812.50	1001.21	188.71		13.38871	17.5	998.68	50.86164081	3070	1528.651	16.24695
			215.98				Ortalama Q_r	50.88067239		Ortalama K	16.24227
10	63.23	341.69	278.46	236	16.48166	17.5	998.68	60.96719031	4531	1832.744	16.25023
11	341.69	656.40	314.71		18.60094	17.5	998.68	61.05342691	5113	1832.524	16.22533
			296.59				Ortalama Q_r	61.01030861		Ortalama K	16.23778
13	731.65	989.06	257.41	296	12.84296	17.6	998.67	72.32733207	4182	2170.839	16.22479
14	4.08	385.08	381.00		19.03078	17.6	998.67	72.24546603	6193	2169.468	16.23292
			319.21				Ortalama Q_r	72.28639905		Ortalama K	16.22885
10	385.08	709.11	324.03	365	14.32439	17.6	998.67	81.63026821	5250	2443.385	16.18060
11	709.11	981.82	272.71		12.06126	17.6	998.67	81.59252157	4418	2441.977	16.17876
			298.37				Ortalama Q_r	81.61139489		Ortalama K	16.17968

Çizelge 6.6 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (9_55)

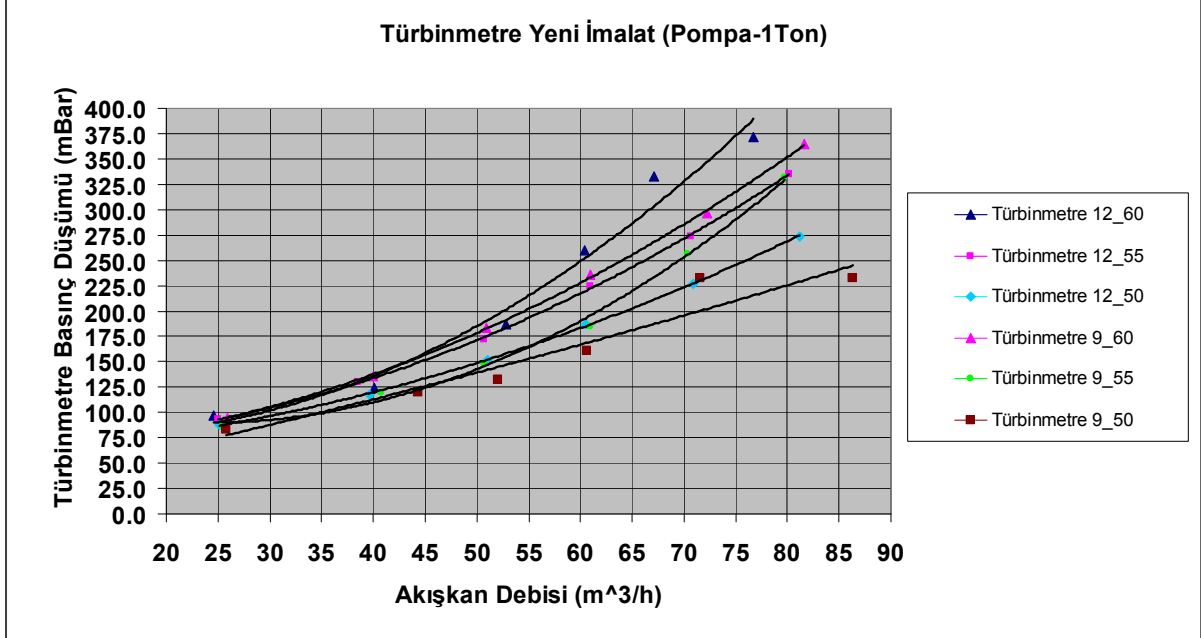
TÜRBİNMETRE Kanat Sayısı :9_Kanat Açısı: 55											
Sl. No.	W₁ kg	W₂ kg	DW kg	Dp mBar	T sec	T deg C	ρ kg/m³	Q_r m³/h	Pulse p	W_{cihaz} rpm	K p/l
1	44.07	257.01	212.94	86	30.20287	17.5	998.68	25.44153699	2856	630.404	13.39458
2	257.01	464.45	207.44		29.43914	17.5	998.68	25.42738519	2784	630.453	13.40309
							Ortalama Q_r	25.43446109		Ortalama K	13.39884
4	584.23	786.29	202.06	120	17.87327	17.5	998.68	40.79535371	2692	1004.107	13.30525
5	786.29	992.25	205.96		18.23317	17.5	998.68	40.76196757	2746	1004.031	13.31515
							Ortalama Q_r	40.77866064		Ortalama Q_c	13.31020
7	47.53	346.40	298.87	148	21.27211	17.5	998.68	50.69977823	3976	1246.076	13.28594
8	346.40	549.61	203.21		14.45846	17.5	998.68	50.71745076	2702	1245.868	13.27910
			251.04				Ortalama Q_r	50.70861449		Ortalama Q_c	13.28252
10	593.95	817.21	223.26	185	13.21688	17.5	998.68	60.95597275	2965	1495.562	13.26301
11	817.21	1001.62	184.41		10.92573	17.5	998.68	60.90718264	2449	1494.333	13.26272
			203.84				Ortalama Q_r	60.9315777		Ortalama Q_c	13.26286
13	166.99	405.90	238.91	256	12.25532	17.6	998.67	70.34803886	3169	1723.878	13.24672
14	405.90	932.32	526.42		26.97618	17.6	998.67	70.41967382	6972	1723.001	13.22652
			382.67				Ortalama Q_r	70.38385634		Ortalama Q_c	13.23662
10	51.72	455.30	403.58	332	18.26522	17.6	998.67	79.73461636	5343	1950.155	13.22136
11	455.30	943.45	488.15		22.08598	17.6	998.67	79.75884304	6457	1949.050	13.20985
			445.87				Ortalama Q_r	79.7467297		Ortalama Q_c	13.21560

Çizelge 6.7 İmal Edilen Türbinmetre Test Dataları (9_50)

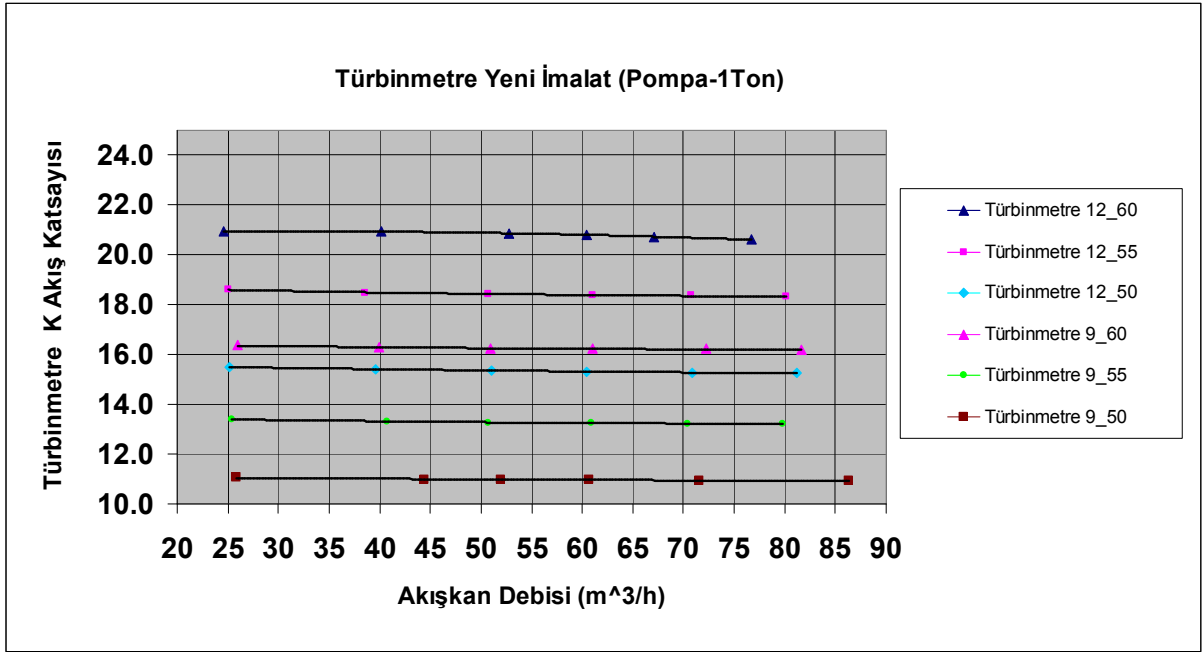
TÜRBİNMETRE Kanat Sayısı :9_Kanat Açısı: 50															
Sl. No.	W₁ kg	W₂ kg	DW kg	Dp mBar	T sec	T deg C	ρ kg/m³	Q_r m³/h	Pulse p	W_{cihaz} rpm	K p/l				
1	52.68	256.40	203.72	83	28.49189	17.5	998.68	25.80160136	2254	527.401	11.04965				
2	256.40	492.80	236.40		33.09229	17.5	998.68	25.7783379	2616	527.011	11.05143				
								Ortalama Q_r	25.78996963	Ortalama K		11.05054			
4	575.90	772.72	196.82	120	16.07232	17.5	998.68	44.19009861	2163	897.195	10.97528				
5	772.72	982.70	209.98		16.99192	17.5	998.68	44.59331298	2309	905.921	10.98182				
								Ortalama Q_r	44.3917058	Ortalama Q_c		10.97855			
7	48.76	312.25	263.49	132	18.06354	17.5	998.68	52.63753696	2902	1071.034	10.99921				
8	312.25	680.58	368.33		25.89086	17.5	998.68	51.33634135	4053	1043.611	10.98924				
			315.91									Ortalama Q_r	51.98693916	Ortalama Q_c	10.99423
10	723.10	995.61	272.51	161	16.21022	17.5	998.68	60.66357286	2994	1231.322	10.97230				
11	7.61	399.12	391.51		23.2878	17.5	998.68	60.6664662	4301	1231.260	10.97122				
			332.01									Ortalama Q_r	60.66501953	Ortalama Q_c	10.97176
13	399.12	691.20	292.08	232	14.69678	17.6	998.67	71.7169567	3202	1452.473	10.94813				
14	691.20	996.43	305.23		15.42655	17.6	998.67	71.40037691	3345	1445.560	10.94433				
			298.66									Ortalama Q_r	71.5586668	Ortalama Q_c	10.94623
10	7.47	494.75	487.28	232	19.35325	17.6	998.67	90.85874383	5333	1837.073	10.92983				
11	494.75	967.60	472.85		20.84869	17.6	998.67	81.84398595	5174	1654.460	10.92757				
			480.07									Ortalama Q_r	86.35136489	Ortalama Q_c	10.92870



Şekil 6.8 İmal Edilen Türbinmetre Debi & Rotor Dönüş Hızlı Hatası Eğrileri



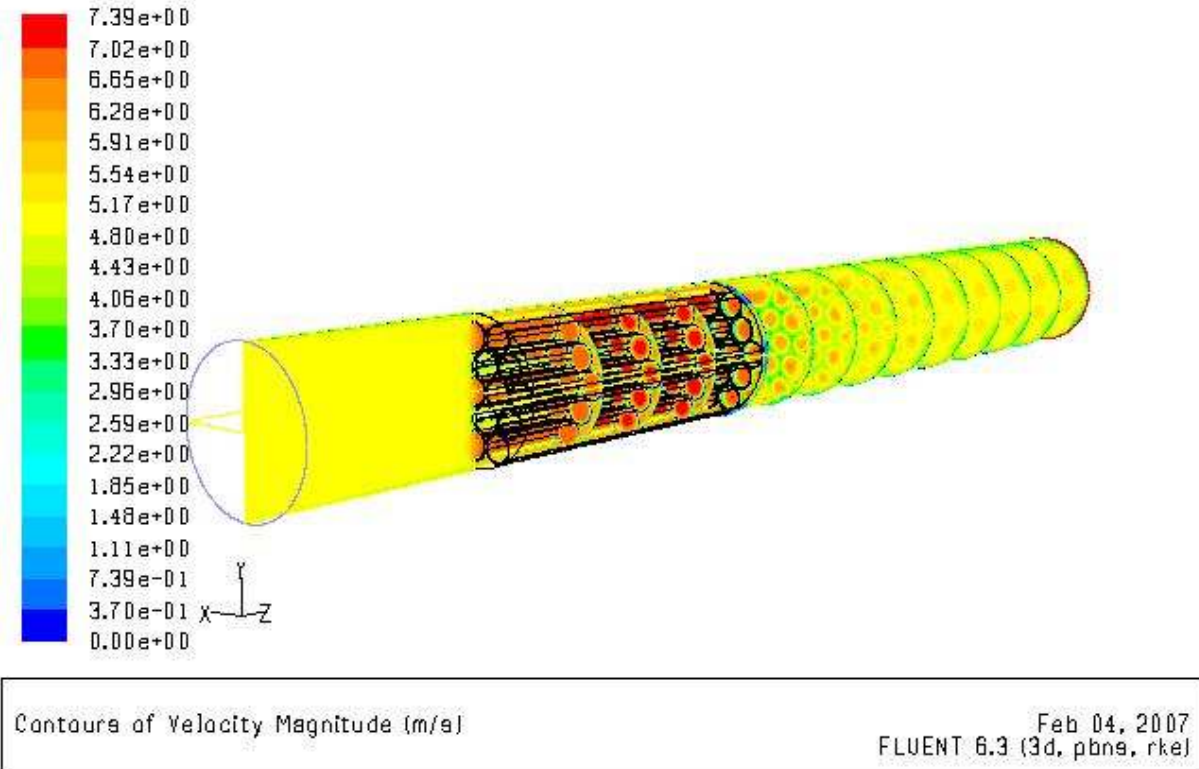
Şekil 6.9 İmal Edilen Türbinmetre Debi & Basınç Düşümü Eğrileri



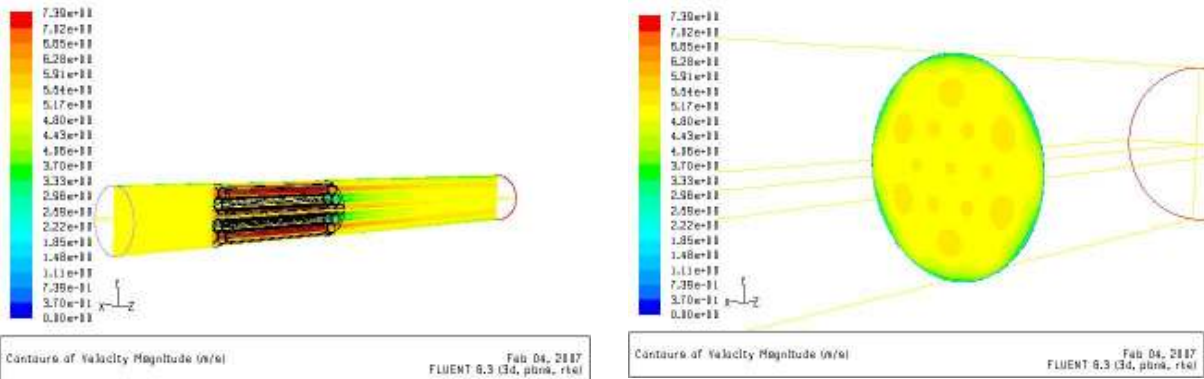
Şekil 6.10 İmal Edilen Türbinmetre Debi & K Akış Katsayısı Eğrileri

7. BOPP & REUTHER REFERANS TÜRBİNMETRE HAD ANALİZ SONUÇLARI

Yapılan laboratuvar testleri sonucu elde edilen sonuçları, test sırasında elde ettiğimiz dataları yapacağımız HAD sayısal analizlerinde kullanarak testler ile analizler ile doğrulamaya çalışacaktır. Yapılan HAD analizlerinin test sonuçlarını birebir yansıtabilmesi için testlerdeki akış şartlarını analizdede birebir simüle etmek gerekir. Bu noktada en çok dikkat edilmesi gereken nokta önceki bölümlerde elde ettiğimiz denklemlerde (2.16) rotorun üzerinde etki eden döndürme momentini hesaplarken karşımıza çıkan en önemli parametrelerden biri olan rotor giriş hız profilidir. Giriş hız profili etkisini yapacağımız HAD analizlerinde doğru olarak simule etmek için bu profilin LDA yada PIV gibi yüksek teknoloji ürünü lazer ölçüm sistemleri ile taranarak elde edilmesi yada ön bir HAD analizi yapılarak bu profilin elde edilmesi gerekir. 2. bölümde yaptığımız serbest akım hızının 1/7. derecen kuvveti yaklaşımı (Schlichting (1979)) normal şartlar altında, kullandığımız HAD ticari kodu FLUENT' in bize sunduğu UDF (User Defined Functions) yöntemi ile aynen HAD analizlerine uygulanabilir. Ancak yaptığımız testlerde türbinmetre girişinde oluşabilecek girdapların etkisini minimuma indirmek için kullandığımız akış doğrultucu girdapları elimine ederken hız profilini de değiştirmektedir. Bu durumda serbest akım hızının 1/7. derecen kuvveti yaklaşımının uygulanabilirliği geçerliliğini yitirmektedir. Bu noktada yapılması gereken çalışma yukarıda belirtilen lazer ölçüm yöntemlerinden birini kullanarak yada türbinmetre girişinde bulunan akış doğrultucunun türbinmetre ye benzer şekilde modellenerek hız profilinin elde edilmesidir. Bu işleminde en az türbinmetrenin modellenmesi kadar zor ve zaman alıcı bir işlem olmasının sebebi özellikle ilgilendiğimiz çıkış hız profilinin doğru olarak modellenebilmesi için hazırlayacağımız sayısal ağda sınır tabaka bölgesinde mümkün olduğunca fazla hacim elemanın bulunma zorunluluğu ve kullanılan türbülans modelinin ve duvar fonksiyonlarının bize ilave hesaplama yükleri getirmesidir. Tez çalışması sırasında akış doğrultucu için hazırlanan sayısal ağda 1 milyondan fazla dörtgensel hacim elemanı kullanılmış ve istenilen çözüm alınması için yaklaşık 1.400 iterasyon ve 768 mb RAM' a sahip Celeron işlemcili bir bilgisayarla yaklaşık $4^{1/2}$ günlük bir vakit almaktadır. Yapılan bu ön HAD analizi için testlerden elde ettiğimiz verileri kullanmamız yeterli olacaktır. Bahsettiğimiz zorluklar ve zaman alıcı hesaplama süreçleri sebebi ile testlerdekinin aksine yalnızca bir tek debi noktası için sayısal analiz yapılmış ve elde edilen hız profili türbinmetre giriş hız profili olarak FLUENT programına tanıtılarak aynı debi noktası için rotor dönüş hızı sayısal olarak hesaplanmıştır. Aşağıda akış doğrultucu için yapılan analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 7.1 Çeşitli Kesitlerde Akış Doğrultucu Hız Profili

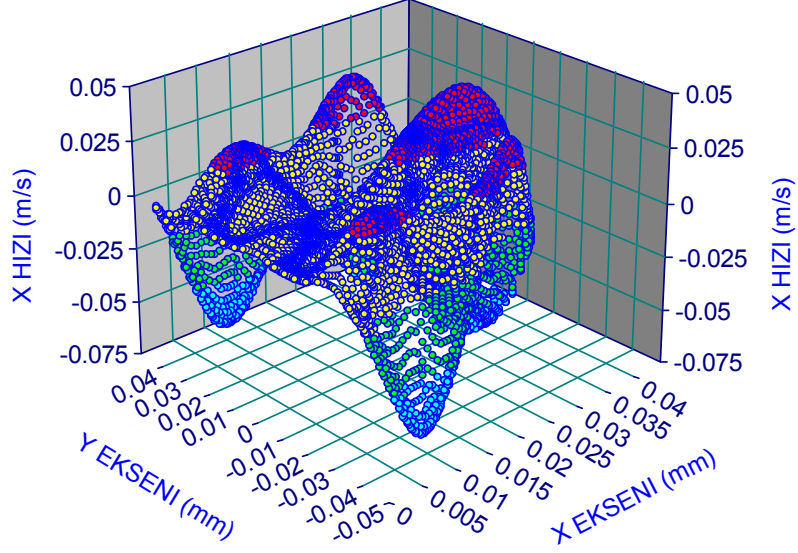


Şekil 7.2 Akış Doğrultucu Orta Ekseninde ve Çıkışında (Türbinmetre Girişinde) Hız Profili

HAD analizi ile hesaplanan akış doğrultucu çıkış hız profilinde görülmüştür ki, hızlar akış doğrultucu boru demetinin şeklini almaktadır. Buda UDF ile tanımlanması imkansız bir profil olacağından FLUENT ticari HAD kodunun sunduğu imkanlardan biri olan yüzey profili tanımlama kabiliyeti kullanılacaktır. Yukarda Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de gösterilen hız profilinin daha net anlaşılabilmesi için aşağıda 3 boyutlu olarak her bir eksene ait hız

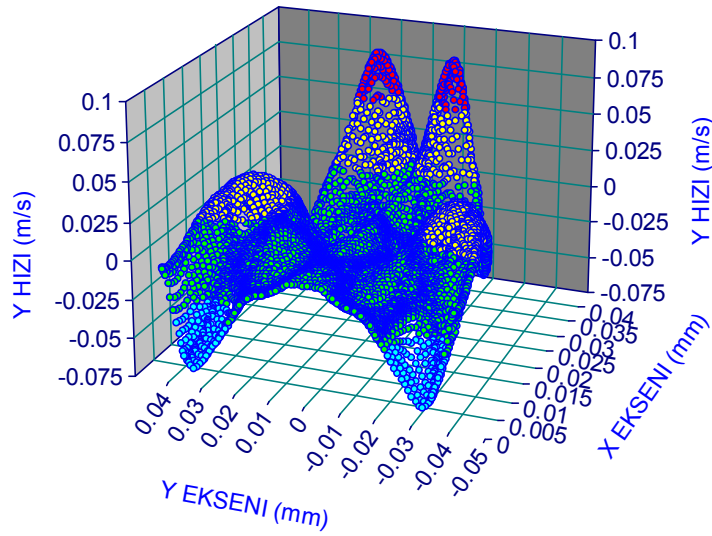
değerleri plot edilmiştir. Şekil 7.3, Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’ de görüleceği üzere akış yönü pozitif z eksenidir. X ve y eksenleri, z eksenine dik olan eksenlerdir.

AKIS DOGRULTUCU (X EKSENİNDE HIZ)



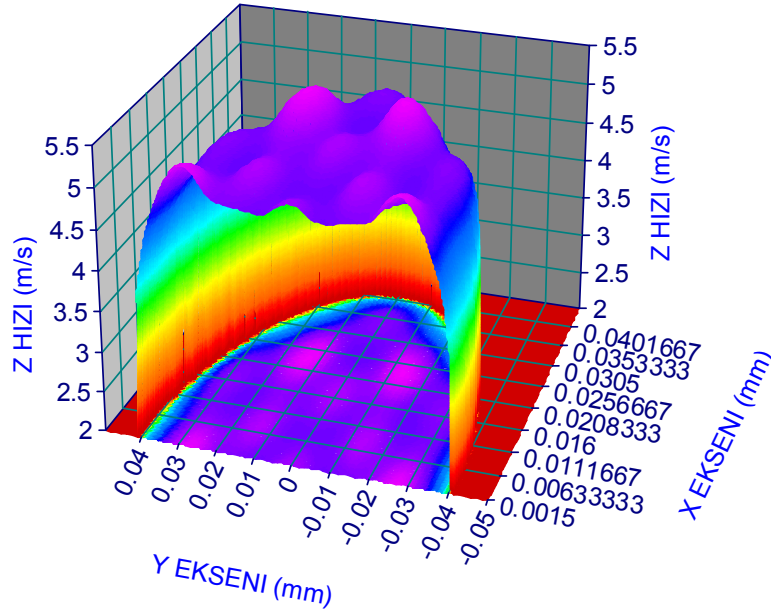
Şekil 7.3 Akış Doğrultucu Çıkışında X Eksenine Yönelikteki (Akışa Dik Yön) Hız Vektörleri

AKIS DOGRULTUCU (Y EKSENİNDE HIZ)



Şekil 7.4 Akış Doğrultucu Çıkışında Y Eksenine Yönelikteki (Akışa Dik Yön) Hız Vektörleri

AKIS DOGRULTUCU (Z EKSENİNDE HIZ)



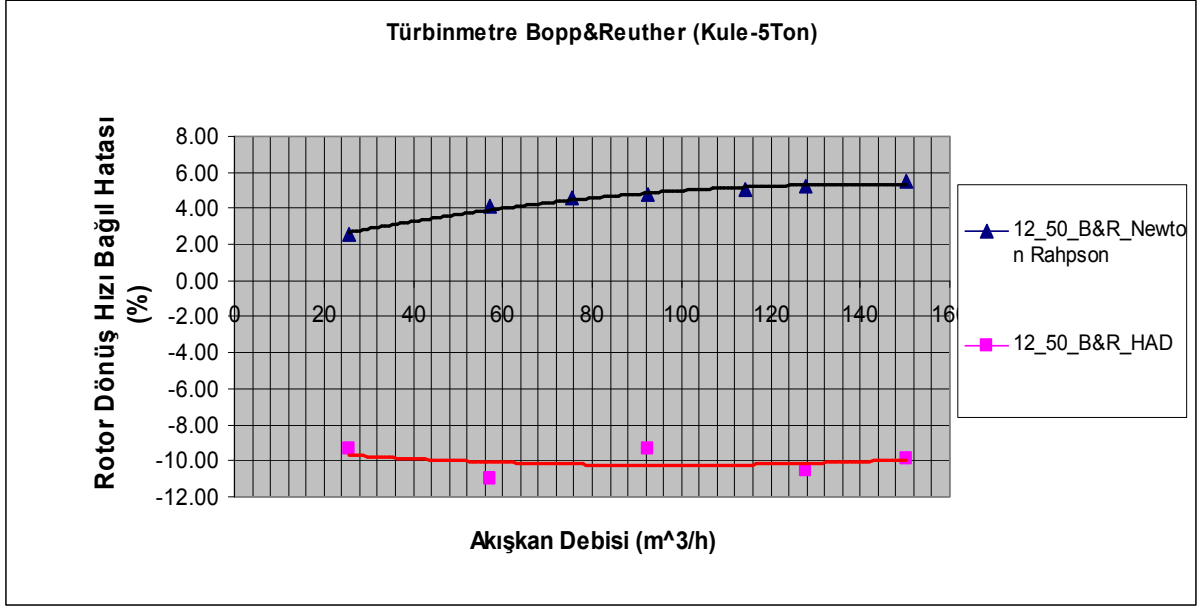
Şekil 7.5 Akış Doğrultucu Çıkışında X Ekseni Yönündeki (Akış Yönü) Hız Vektörleri

Analiz sonuçların dikkat çeken önemli noktalar sırasıyla sınır tabaka kalınlıklarının akış doğrultucu çıkış ağzı çevresi boyunca düzensiz bir yapı sergilemesi ve de akış yönünde dik yönler olan x ve y yönlerinde hız vektörlerinin kimi yerlerde negatif değer almasıdır.

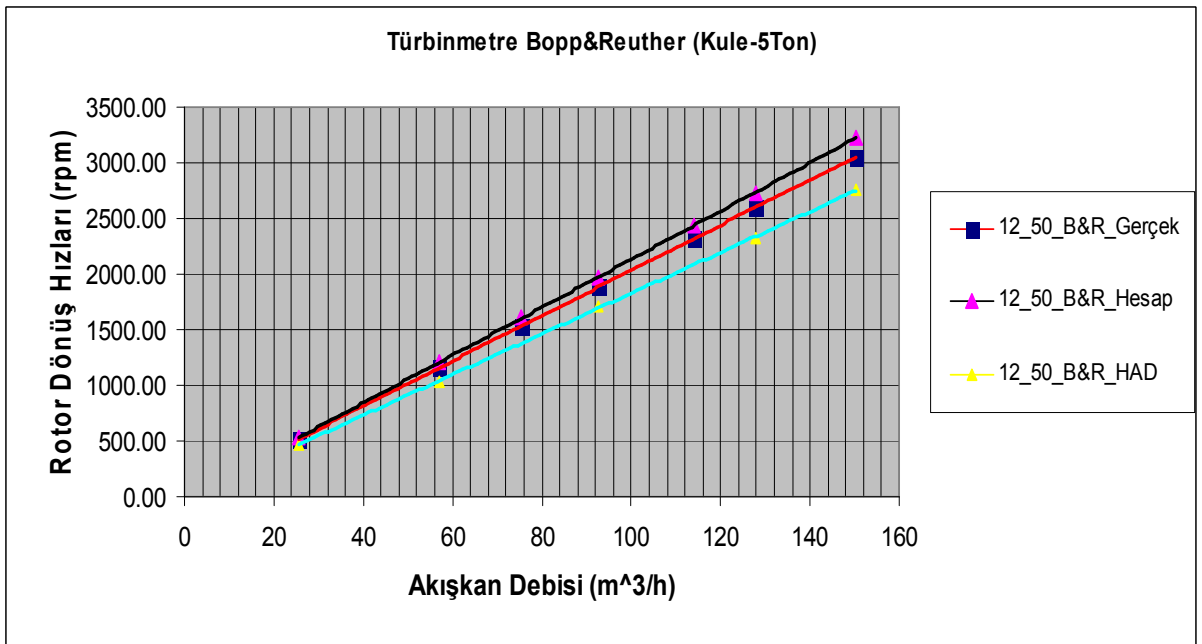
Yapılan çalışma, G.Wendt (1996) 'nın çalışmasında deklere ettiği ve Şekil. 3.10 – Şekil 3.11' da verilen grafiğe benzer bir hız profili elde edilmiştir. Türbinmetre için yapılacak HAD analizinde 3 farklı eksende bulduğumuz hız değerleri kullanılacak ve sonuçlar irdelenecektir.

Türbinmetre için yapılacak çalışmada rotor dönüş hızını analizlerinde kullanacağımız ticari HAD kodu FLUENT bize direkt olarak vermez. Bu noktada şöyle bir yol izlemek rotor dönüş hızının tayininde bize yardımcı olacaktır. Daimi akışta ve tanımladığımız hız profili altında çalışan bir türbinmetre rotoruna etki eden kuvvet dengelerini incelediğimizde, denge durumunda rotora etki eden döndürme momenti değerinin sıfır olması gerekir. (3.28). Bu durumda tanımlanan hız profili altında ve aynı hız profili için tanımlanan devir sayısında dönen türbinmetre rotoruna etki eden net kuvvetleri bulmamız gerekir. Ticari HAD kodu FLUENT' in Turbo Topology özelliği sayesinde tanımlı belli bir eksen etrafında dönen kapalı bir yüzey etkileyen kuvvetleri hesaplamak mümkündür. Bunun yapılması gereken şey akış

doğrultucu çıkışında elde ettiğimiz hız profilini türbinmetre girişinde tanımlamak, akışkan özellikleri ve ortam şartlarını da tanımladıktan sonra rotora belli bir dönüş hızı vererek turbo topology özelliği sayesinde rotora etkiyen döndürme momentini hesaplatıp sıfıra yakınsamasını beklemektir.

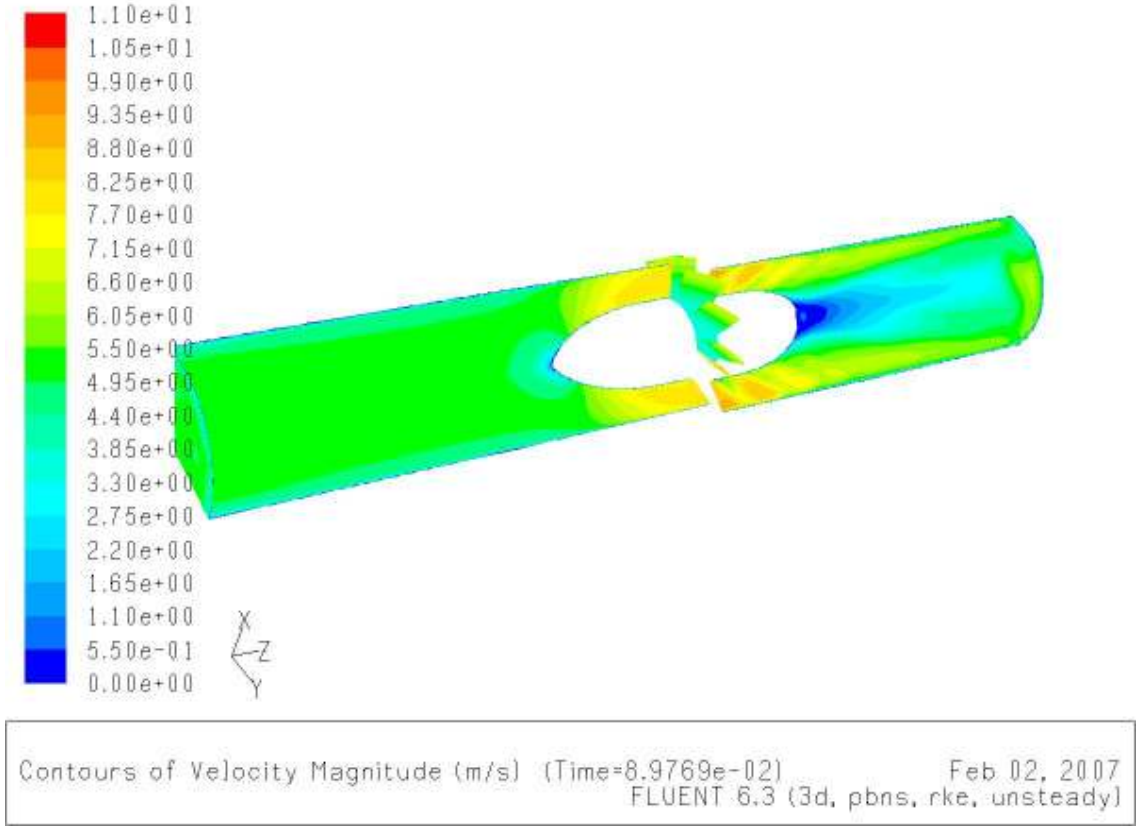


Şekil 7.6 Türbinmetre Debi & Rotor Dönüş Hızı Bağlı Hatası Eğrileri

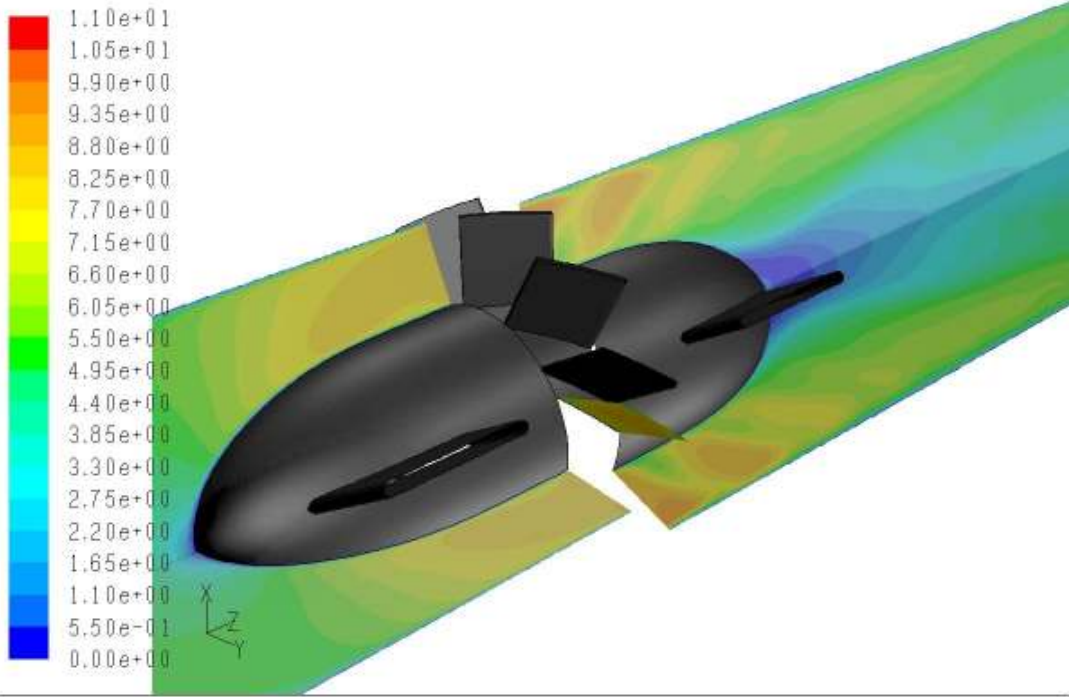


Şekil 7.7 Türbinmetre Debi & Rotor Dönüş Hızı Eğrileri

Net döndürme momenti sıfıra yakınsayana kadar rotor dönüş hızı değiştirilir ve net döndürme momenti yaklaşık olarak $2e-5$ Nm mertebelerine düştüğü andaki rotor dönüş hızı, hesaplama çalışığımız rotor dönüş hızı olarak kabul edilir. Yapılan analizler sonucu elde edilen rotor dönüş hızı değerleri, Türbinmetre içindeki akışkan hareketini ifade eden hız, basınç, türbülans garfikleri verilmiştir.

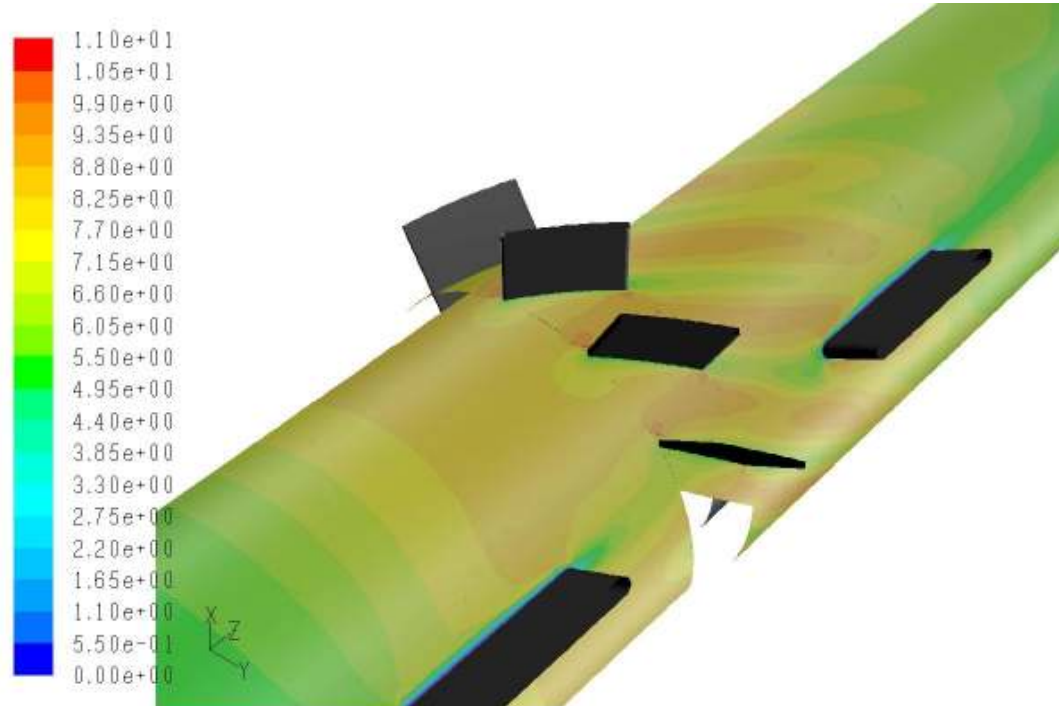


Şekil 7.8 Türbinmetre İçinde $92.457 \text{ m}^3/\text{h}$ Debi Değeri için Eş Hız Konturları



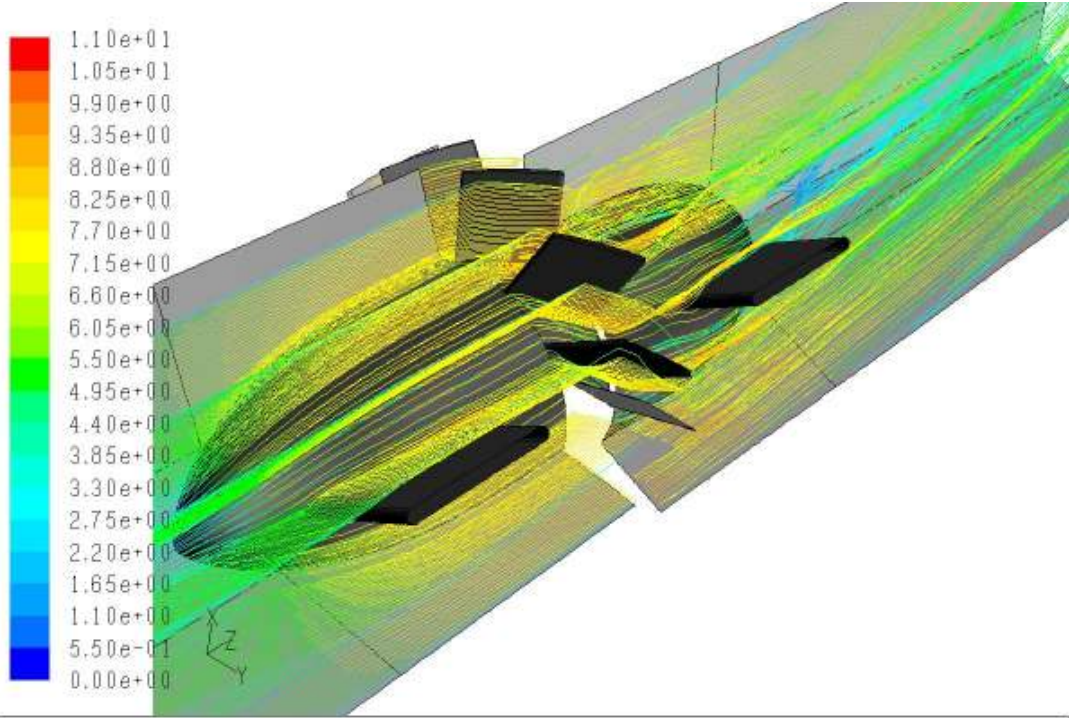
Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=8.9769e-02) Feb 02, 2007
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke, unsteady)

Şekil 7.9 Türbinmetre Rotorunda 92.457 m³/h Debi Değeri İçin Eş Hız Konturları



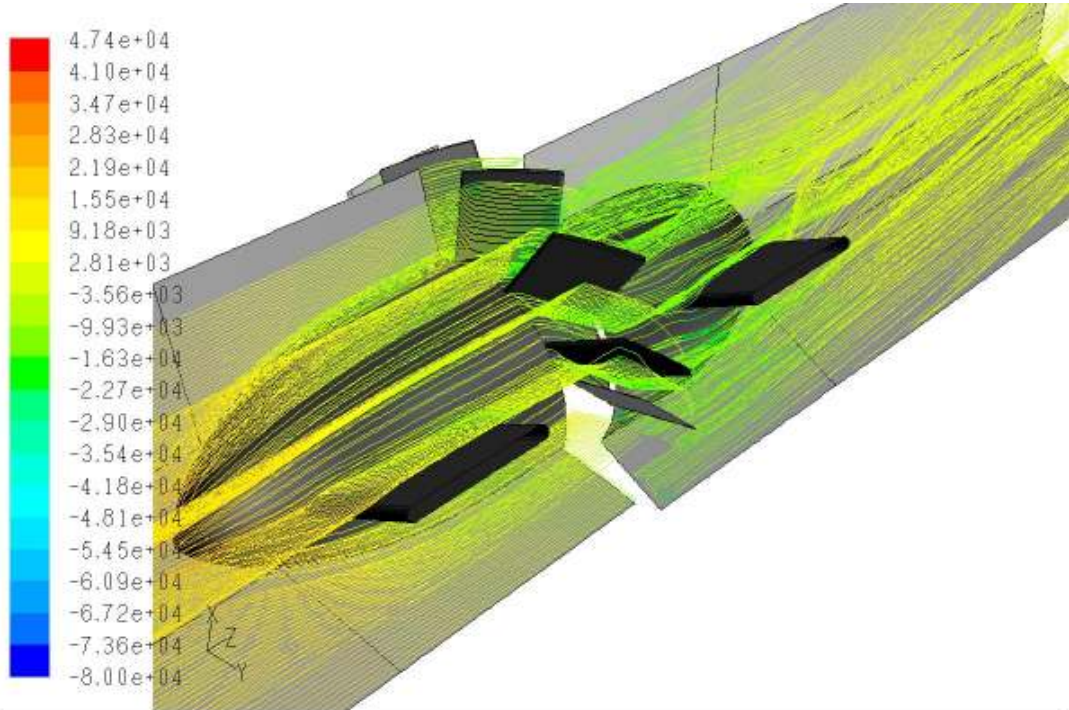
Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=8.9769e-02) Feb 02, 2007
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke, unsteady)

Şekil 7.10 Türbinmetre Rotoru Üzerinde (r = 30 Radyal Eksende) Eş Hız Konturları



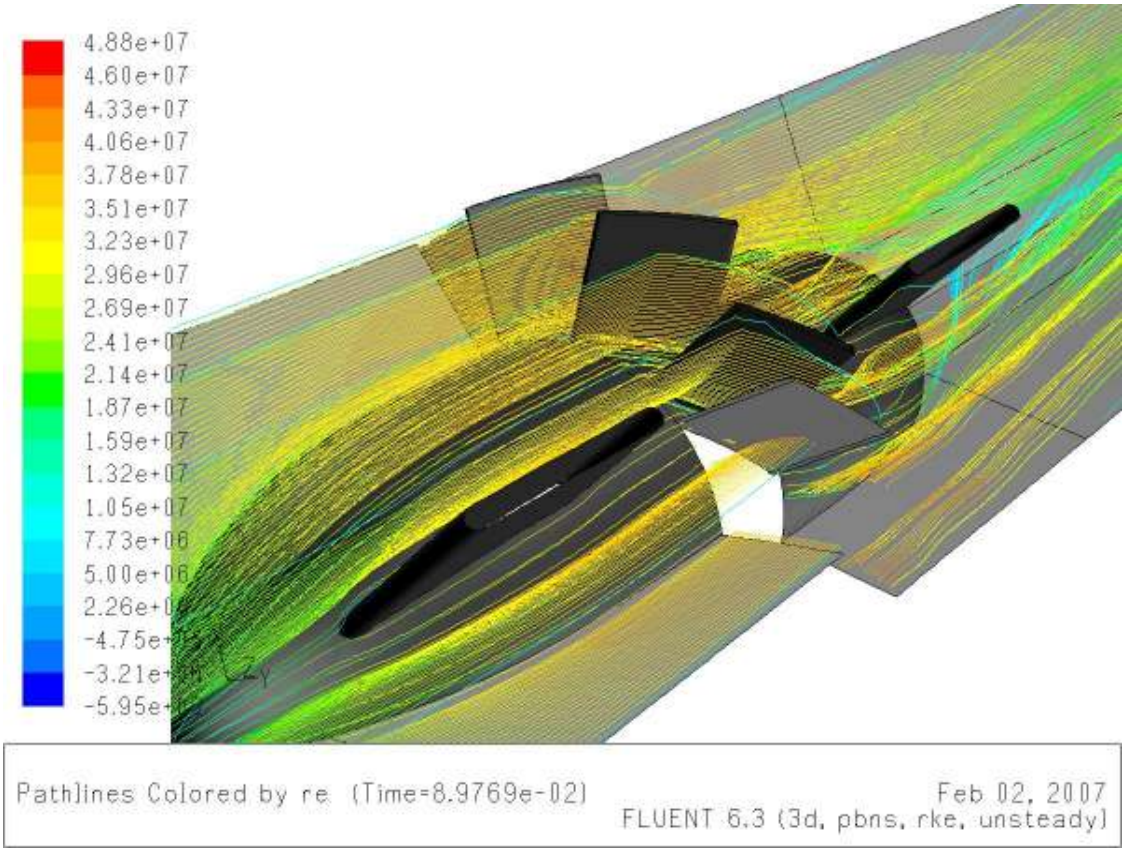
Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s) (Time=8.9769e-02) Feb 02, 2007
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke, unsteady)

Şekil 7.11 TürbinmetreRotoru Üzerinde Akım İplikcikleri (Hız Konturları)



Pathlines Colored by Static Pressure (pascal) (Time=8.9769e-02) Feb 02, 2007
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke, unsteady)

Şekil 7.12 TürbinmetreRotoru Üzerinde Akım İplikcikleri (Statik Basınç)



Şekil 7.13 TürbinmetreRotoru Üzerinde Akım İplikcikleri (Re Sayısı)

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler aşağıda verilmiştir. Çalışmalar göstermiştir ki türbinmetre girişinde hız profilini doğru tanımlamak gerçeği yansıtan sonuçlar elde etmek için üzerinde önemle durulması gereken noktaların başında gelmektedir. 2. Bölümde elde edilen denklemler Newton Rahpson metodu ile çözülerek sonuçlar test sonuçları ve HAD analizleri ile karşılaştırılması planlanmıştır. Bununla birlikte HAD çözümleri sınırlı bilgisayar kapasitesi nedeniyle ve çözüm sürelerinin uzun olması sebebi ile ortalama debinin 25,604 m³/h, 56,984 m³/h, 91,946 m³/h, 127,743 m³/h, 150,284 m³/h debilerinde yalnızca 5 farklı nokta için yapılan çözümlerde testler sırasında ölçülen rotor dönüş hızı ve de basınç kayıpları , FLUENT ile yapılan HAD analizleri sonucu elde edilen rotor dönüş hızları ve de basınç kayıpları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerin iyileştirilmesi için hazırlanmış olan sayısal ağ yoğunluğu arttırılabilir ancak yine limitli bilgisayar performansı önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Zhen Wang, Tao Zhang (2007) ‘ nin tanjansiyel tip bir su türbini ile yaptıkları benzer bir HAD analiz çalışmalarında %6.22 ila %7.51 arasında değişen oranlarda bir hata ile türbin dönüş hızını hesaplayabildikleri göz önüne alınırsa, tez kapsamında yaptığımız HAD analizlerinin sonuçları olarak karşımıza çıkan %11.02 ila % 9.31‘ lik hesap hataları makul sayılabilecek düzeyde oldukları görülür. Bunun yanında belli kabuller altında bölüm 3’de denklem 3.118 ile yapacağımız hesaplamalar bizleri sonuca belli limitler içinde daha hızlı ulaştırabileceğini söylemek yanlış olmayacaktır

KAYNAKLAR

Baker, R. (1993), Turbine Flowmeters : Theoretical And Experimental Published Information, Performance, And Applications, Cambridge University Press.

Blevins, R. (1992), Applied Fluid Dynamics Handbook., Krieger Publishing Company.

Cheesewright, R., Atkinson, K., Clark, C., ter Horst, G., Mottram, R., and Viljeer, J. (1996), Field Tests Of Correction Procedures For Turbine Flowmeters In Pulsatile flows, Flow Measurement and Instrumentation, 7:7–17.

Dijstelbergen, H. (1966), Dynamic response of turbine flowmeters. Instrument Review, 13:214–245.

Z.Wang, T.Zhang (2007), Research on Tangential Type Turbine Flowmeter Based on Simulation

Hoerner, S. (1965), Fluid-Dynamic Drag., Published By Author.

Lee, B., Cheesewright, R., and Clark, C. (2004), The Dynamic Response Of Turbine Flowmeters In Liquid Flows. Flow Measurement And Instrumentation, 15: 239– 248.

Lee, W. and Evans, H. (1965), Density Effect And Reynolds Number Effect On Gas Turbine Flowmeters. Journal Of Basic Engineering, 87:1043–1057.

Lee, W. And Karlby, H. (1960), A Study Of Viscosity Effect And Its Compensation On Turbine-Type Flowmeters. Journal Of Basic Engineering, 82:717–728.

Merzkirch, W., editor (2005), Fluid Mechanics of Flow Metering. Springer.

Rubin, M., Miller, R., And Fox, W. (1965), Driving Torques In A Theoretical Model Of A Turbine Meter. Journal Of Basic Engineering, Transactions Of The ASME, 87(2):413–420.

Schlichting, H. (1979), Boundary-Layer Theory, Mcgraw-Hill Inc, 7th Edition.

Thompson, R. And Grey, J. (1970), Turbine Flowmeter Performance Model. Journal Of Basic Engineering, Transactions Of The Asme, 92(4):712–723.

Von Lavante, E., Lazaroski, N., Maatje, U., Kettner, T., And L'Otz-Dauer, V. (2003), Numerical Simulation Of Unsteady Three-Dimensional Flow Fields In A Turbine Flow Meter. Proceedings Flomeko, Groningen.

Wadlow, D. (1998), Chapter 28.4 Turbine And Vane Flowmeters. In Webster, J., Editor, The

Measurement, Instrumentation And Sensors Handbook.

L.Sun, Z.Zhou (2006), Numerical Simulation of Turbine Flowmeter' s Flow Fields

Y.Xu (1992), Calculation of the Flow Around Turbine Flowmeter Blades, Flow Measurement Instrumentation, Vol 3 No 1

Y.Xu (1992), Model for the Prediction of Turbine Flowmeter Performance, Flow Measurement Instrumentation, Vol 3 No 1

G.Wendt, B.Michan, R. Kramner, D. Dopheide (1996), Systemetic Investigation of Pipe Flows and Installation Effects Using Laser Doppler Anemometry – Part I. Profile Measurements Downstream of Several Pipe Configurations and Flow Conditioners. Flow Measurement Instrumentation, Vol 7 No $\frac{3}{4}$

L.M. Lopez – Gonzalez, J.M. Sala, J.A. Gonzalez-Bustamante, J.L. Miguez (2006), Modelling and Simulation of the Dynamic Performance of a Natural-Gas Turbine Flowmeter, Applied Energy 83

INTERNET KAYNAKALARI

[1] www.cfd-online.com

[2] www.sciencedirect.com

[3] www.fluentusers.com

[4] www.ansys.com

EKLER

[1] Newton Rahnson Denklem özümleri

[2] 150,284 m³/h Debi değeri İçin FLUENT Cözücü Ayarları Özet Dosyası

EK - I

$u_{Girisx-1} = 1.383624977$
 $u_{Girisx-11} = 3.079381568$
 $u_{Girisx-111} = 4.080299465$
 $u_{Girisx-1v} = 4.991728103$
 $u_{Girisx-v} = 6.168814466$
 $u_{Girisx-v1} = 6.903155968$
 $u_{Girisx-v11} = 8.128445482$

$d_{ic} = 0.080$
 $r_{Uc} = 0.040599665$
 $r_{Taban} = 0.021814685$
 $\eta = 12$
 $t = 0.002$
 $h_{Kanat} = r_{Uc} - r_{Taban}$
 $L_{Taban} = 0.05$
 $L_{Kanat} = 0.0175863$
 $w_{Kanat} = 0.01396334$
 $\beta = 49.65$
 $\rho = 998.68$
 $\mu = 0.001002$
 $\nu = 0.000001004$
 $\delta_{IIz} = t / 2$
 $\delta_{IIIz} = t / 4$

$u_{Giris Kanat-1} = Q_1 / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-1} = \text{Sqrt} [((u_{Giris Kanat-1} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos} [\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_1 * r_{Taban})^2)]$
 $\delta_1 = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-1})^{(1/7)}), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-1}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((1/8) * \delta_1), ((3/8) * \delta_1)]$
 $\delta_{IIKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((7/72) * \delta_1), ((39/280) * \delta_1)]$
 $\text{Rey}_{Kanat-1} = u_{Giris Kanat-1} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-1} = u_{Girisx-1} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_1^2 * u_{Giris Kanat-1}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_1 = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-1}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_1)^{(1/7)}) * u_{Giris Kanat-1}$

$u_{Giris Kanat-11} = Q_{11} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-11} = \text{Sqrt} [((u_{Giris Kanat-11} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos} [\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{11} * r_{Taban})^2)]$
 $\delta_{11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-11})^{(1/7)}), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-11}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{11}), ((3/8) * \delta_{11})]$
 $\delta_{IIKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{11}), ((39/280) * \delta_{11})]$
 $\text{Rey}_{Kanat-11} = u_{Giris Kanat-11} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-11} = u_{Girisx-11} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_{11}^2 * u_{Giris Kanat-11}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_{11} = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-11}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_{11})^{(1/7)}) * u_{Giris Kanat-11}$

$$\begin{aligned}
u_{\text{Giris Kanat-111}} &= Q_{111} / ((\text{Pi} * (r_{\text{UC}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2)) \\
u_{\text{Rel-111}} &= \text{Sqrt} [((u_{\text{Giris Kanat-111}} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos} [\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{111} * r_{\text{Taban}})^2)] \\
\delta_{111} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} > 300\,000, \\
&\quad ((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / ((\text{Rey}_{\text{Kanat-111}})^{(1/7)})), ((5 * L_{\text{Kanat}} / (\text{Rey}_{\text{Kanat-111}}^{(1/2)})))] \\
\delta_{\text{IKanat-111}} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{111}), ((3/8) * \delta_{111})] \\
\delta_{\text{IIKanat-111}} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{111}), ((39/280) * \delta_{111})] \\
\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} &= u_{\text{Giris Kanat-111}} * L_{\text{Kanat}} / \nu \\
\text{Rey}_{\text{dic-111}} &= u_{\text{Girisx-111}} * d_{\text{ic}} / \nu \\
\lambda &= (\delta_{111}^2 * u_{\text{Giris Kanat-111}}) / (\nu * L_{\text{Kanat}}) \\
Q_{111} &= ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-111}} \\
u_{\text{Maks}} &= (((((r_{\text{UC}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{111})^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-111}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_{\text{Giris Kanat-1v}} &= Q_{1v} / ((\text{Pi} * (r_{\text{UC}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2)) \\
u_{\text{Rel-1v}} &= \text{Sqrt} [((u_{\text{Giris Kanat-1v}} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos} [\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{1v} * r_{\text{Taban}})^2)] \\
\delta_{1v} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300\,000, \\
&\quad ((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / ((\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}})^{(1/7)})), ((5 * L_{\text{Kanat}} / (\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}}^{(1/2)})))] \\
\delta_{\text{IKanat-1v}} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{1v}), ((3/8) * \delta_{1v})] \\
\delta_{\text{IIKanat-1v}} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{1v}), ((39/280) * \delta_{1v})] \\
\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} &= u_{\text{Giris Kanat-1v}} * L_{\text{Kanat}} / \nu \\
\text{Rey}_{\text{dic-1v}} &= u_{\text{Girisx-1v}} * d_{\text{ic}} / \nu \\
\lambda &= (\delta_{1v}^2 * u_{\text{Giris Kanat-1v}}) / (\nu * L_{\text{Kanat}}) \\
Q_{1v} &= ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-1v}} \\
u_{\text{Maks}} &= (((((r_{\text{UC}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{1v})^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-1v}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_{\text{Giris Kanat-v}} &= Q_v / ((\text{Pi} * (r_{\text{UC}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2)) \\
u_{\text{Rel-v}} &= \text{Sqrt} [((u_{\text{Giris Kanat-v}} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos} [\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_v * r_{\text{Taban}})^2)] \\
\delta_v &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300\,000, \\
&\quad ((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / ((\text{Rey}_{\text{Kanat-v}})^{(1/7)})), ((5 * L_{\text{Kanat}} / (\text{Rey}_{\text{Kanat-v}}^{(1/2)})))] \\
\delta_{\text{IKanat-v}} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300\,000, ((1/8) * \delta_v), ((3/8) * \delta_v)] \\
\delta_{\text{IIKanat-v}} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300\,000, ((7/72) * \delta_v), ((39/280) * \delta_v)] \\
\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} &= u_{\text{Giris Kanat-v}} * L_{\text{Kanat}} / \nu \\
\text{Rey}_{\text{dic-v}} &= u_{\text{Girisx-v}} * d_{\text{ic}} / \nu \\
\lambda &= (\delta_v^2 * u_{\text{Giris Kanat-v}}) / (\nu * L_{\text{Kanat}}) \\
Q_v &= ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-v}} \\
u_{\text{Maks}} &= (((((r_{\text{UC}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_v)^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-v}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_{\text{Giris Kanat-v1}} &= Q_{v1} / ((\text{Pi} * (r_{\text{UC}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2)) \\
u_{\text{Rel-v1}} &= \text{Sqrt} [((u_{\text{Giris Kanat-v1}} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos} [\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{v1} * r_{\text{Taban}})^2)] \\
\delta_{v1} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300\,000, \\
&\quad ((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / ((\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}})^{(1/7)})), ((5 * L_{\text{Kanat}} / (\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}}^{(1/2)})))] \\
\delta_{\text{IKanat-v1}} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{v1}), ((3/8) * \delta_{v1})] \\
\delta_{\text{IIKanat-v1}} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{v1}), ((39/280) * \delta_{v1})] \\
\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} &= u_{\text{Giris Kanat-v1}} * L_{\text{Kanat}} / \nu \\
\text{Rey}_{\text{dic-v1}} &= u_{\text{Girisx-v}} * d_{\text{ic}} / \nu \\
\lambda &= (\delta_{v1}^2 * u_{\text{Giris Kanat-v1}}) / (\nu * L_{\text{Kanat}}) \\
Q_{v1} &= ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-v1}} \\
u_{\text{Maks}} &= (((((r_{\text{UC}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{v1})^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-v1}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_{\text{Giris Kanat-v11}} &= Q_{v11} / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2)) \\
u_{\text{Rel-v11}} &= \text{Sqrt} [((u_{\text{Giris Kanat-v11}} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{v11} * r_{\text{Taban}})^2)] \\
\delta_{v11} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-v11}} > 300\,000, \\
&\quad ((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / ((\text{Rey}_{\text{Kanat-v11}})^{(1/7)})), ((5 * L_{\text{Kanat}} / (\text{Rey}_{\text{Kanat-v11}})^{(1/2)}))] \\
\delta_{\text{IKanat-v11}} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-v11}} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{v11}), ((3/8) * \delta_{v11})] \\
\delta_{\text{IIKanat-v11}} &= \text{If} [\text{Rey}_{\text{Kanat-v11}} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{v11}), ((39/280) * \delta_{v11})] \\
\text{Rey}_{\text{Kanat-v11}} &= u_{\text{Giris Kanat-v11}} * L_{\text{Kanat}} / \nu \\
\text{Rey}_{\text{dic-v11}} &= u_{\text{Girisx-v11}} * d_{\text{ic}} / \nu \\
\lambda &= (\delta_{v11}^2 * u_{\text{Giris Kanat-v11}}) / (\nu * L_{\text{Kanat}}) \\
Q_{v11} &= ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-v11}} \\
u_{\text{Maks}} &= (((((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{v11})^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-v11}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{FindRoot} [&\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \\
&\quad ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2)) * \\
&\quad ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1}} + \delta_{\text{IIKanat-1}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \text{ dr} + \\
&\quad \left. \left. 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1}} * \omega_1 * r^3 \text{ dr} \right) - (0.036 * \rho * \nu^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1}}^{(9/5)} * \right. \\
&\quad r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * \\
&\quad \left. \left. (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))) \right\}, \{\omega_1, 300\} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{FindRoot} [&\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-11}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \\
&\quad ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-11}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2)) * \\
&\quad ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-11}} + \delta_{\text{IIKanat-11}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \text{ dr} + \\
&\quad \left. \left. 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-11}} * \omega_{11} * r^3 \text{ dr} \right) - (0.036 * \rho * \nu^{(1/5)} * u_{\text{Rel-11}}^{(9/5)} * \right. \\
&\quad r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * \\
&\quad \left. \left. (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))) \right\}, \{\omega_{11}, 300\} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{FindRoot} [&\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-111}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \\
&\quad ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-111}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2)) * \\
&\quad ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-111}} + \delta_{\text{IIKanat-111}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \text{ dr} + \\
&\quad \left. \left. 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-111}} * \omega_{111} * r^3 \text{ dr} \right) - (0.036 * \rho * \nu^{(1/5)} * \right. \\
&\quad u_{\text{Rel-111}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * \\
&\quad \left. \left. (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))) \right\}, \{\omega_{111}, 300\} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{FindRoot} [&\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \\
&\quad ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2)) * \\
&\quad ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1v}} + \delta_{\text{IIKanat-1v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \text{ dr} + \\
&\quad \left. \left. 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}} * \omega_{1v} * r^3 \text{ dr} \right) - (0.036 * \rho * \nu^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1v}}^{(9/5)} * \right. \\
&\quad r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * \\
&\quad \left. \left. (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))) \right\}, \{\omega_{1v}, 300\} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{FindRoot} [&\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \\
&\quad ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2)) *
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{IIz} + \delta_{IIIz} + 2 * (\delta_{IKanat-v} + \delta_{IIKanat-v}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + \\ & 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v}} * \omega_v * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v}}^{(9/5)} * \\ & r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * \\ & (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)})))) \}, \{\omega_v, 300\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{FindRoot} & \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}})^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \\ & \left. \left. ((1 - ((\eta * (\delta_{IIz} + 2 * \delta_{IKanat-v1})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2)) * \right. \right. \\ & \left. \left. ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{IIz} + \delta_{IIIz} + 2 * (\delta_{IKanat-v1} + \delta_{IIKanat-v1}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + \right. \right. \\ & \left. \left. 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}} * \omega_{v1} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v1}}^{(9/5)} * \right. \right. \\ & \left. \left. r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * \right. \right. \\ & \left. \left. (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)})))) \right\}, \{\omega_{v1}, 300\} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{FindRoot} & \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v11}})^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \\ & \left. \left. ((1 - ((\eta * (\delta_{IIz} + 2 * \delta_{IKanat-v11})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2)) * \right. \right. \\ & \left. \left. ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{IIz} + \delta_{IIIz} + 2 * (\delta_{IKanat-v11} + \delta_{IIKanat-v11}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + \right. \right. \\ & \left. \left. 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v11}} * \omega_{v11} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * \right. \right. \\ & \left. \left. u_{\text{Rel-v11}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * \right. \right. \\ & \left. \left. (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)})))) \right\}, \{\omega_{v11}, 300\} \right] \end{aligned}$$

1.38362

3.07938

4.0803

4.99173

6.16881

6.90316

8.12845

0.08

0.0405997

0.0218147

12

0.002

0.018785

0.05

0.0175863

0.0139633

49.65

998.68

0.001002

1.004×10^{-6}

0.001

0.0005

1.88818

$\sqrt{3.52352 + 0.00047588 \omega_1^2}$

0.000483507

0.000181315

0.0000673456

33 073.8

110 249.

25.

0.00695486

2.88468

4.20231

$\sqrt{17.4529 + 0.00047588 \omega_{11}^2}$

0.000324101

0.000121538

0.0000451426

73 608.7

245 369.

25.

0.0154787

6.79767

5.56823

$\sqrt{30.6425 + 0.00047588 \omega_{111}^2}$

0.000281557

0.000105584

0.0000392168

97 534.4

325 123.

25.

0.0205098

9.19007

6.81202

$$\sqrt{45.8609 + 0.00047588 \omega_{1v}^2}$$

0.000254558

0.0000954591

0.0000354563

119 321.

397 747.

25.

0.0250912

11.406

8.41834

$$\sqrt{70.0396 + 0.00047588 \omega_v^2}$$

0.000228987

0.0000858701

0.0000318946

147 458.

491 539.

25.

0.0310078

14.3104

9.42047

$$\sqrt{87.7073 + 0.00047588 \omega_{v1}^2}$$

0.000216465

0.0000811744

0.0000301505

165 011.

491 539.

25.

0.034699

16.1431

11.0926

$$\sqrt{121.606 + 0.00047588 \omega_{v11}^2}$$

0.000199484

0.0000748065

0.0000277853

194 300.

647 685.

25.

0.040858

19.2315

$\{\omega_1 \rightarrow 55.9091 + 0. i\}$

$\{\omega_{11} \rightarrow 126.356 + 0. i\}$

$\{\omega_{111} \rightarrow 168.11 + 0. i\}$

$\{\omega_{1V} \rightarrow 206.192 + 0. i\}$

$\{\omega_V \rightarrow 255.436 + 0. i\}$

FindRoot::lstol :

The line search decreased the step size to within tolerance specified by AccuracyGoal and PrecisionGoal but was unable to find a sufficient decrease in the merit function. You may need more than MachinePrecision digits of working precision to meet these tolerances. >>

$\{\omega_{V1} \rightarrow 286.185 + 0. i\}$

$\{\omega_{V11} \rightarrow 337.526 + 0. i\}$

$u_{Girisx-1} = 1.42521$
 $u_{Girisx-11} = 2.45318$
 $u_{Girisx-111} = 2.87291$
 $u_{Girisx-1v} = 3.35248$
 $u_{Girisx-v} = 3.95448$
 $u_{Girisx-v1} = 4.77196$

$d_{ic} = 0.080$
 $r_{Uc} = 0.0395$
 $r_{Taban} = 0.019$
 $\eta = 9$
 $t = 0.002$
 $h_{Kanat} = r_{Uc} - r_{Taban}$
 $L_{Taban} = 0.0465$
 $L_{Kanat} = 0.0213$
 $w_{Kanat} = 0.015$
 $\beta = 50$
 $\rho = 998.68$
 $\mu = 0.001002$
 $\nu = 0.000001004$
 $\delta_{IIz} = t / 2$
 $\delta_{IIIz} = t / 4$

$u_{GirisKanat-1} = Q_1 / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-1} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-1} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_1 * r_{Taban})^2)]$
 $\delta_1 = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-1})^{(1/7)}), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-1}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((1/8) * \delta_1), ((3/8) * \delta_1)]$
 $\delta_{IIKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((7/72) * \delta_1), ((39/280) * \delta_1)]$
 $\text{Rey}_{Kanat-1} = u_{GirisKanat-1} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-1} = u_{Girisx-1} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_1^2 * u_{GirisKanat-1}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_1 = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-1}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_1)^{(1/7)}) * u_{GirisKanat-1}$

$u_{GirisKanat-11} = Q_{11} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-11} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-11} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{11} * r_{Taban})^2)]$
 $\delta_{11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-11})^{(1/7)}), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-11}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{11}), ((3/8) * \delta_{11})]$
 $\delta_{IIKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{11}), ((39/280) * \delta_{11})]$
 $\text{Rey}_{Kanat-11} = u_{GirisKanat-11} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-11} = u_{Girisx-11} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_{11}^2 * u_{GirisKanat-11}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_{11} = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-11}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_{11})^{(1/7)}) * u_{GirisKanat-11}$

$u_{GirisKanat-111} = Q_{111} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-111} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-111} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{111} * r_{Taban})^2)]$
 $\delta_{111} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-111} > 300\,000,$

$$\left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left((\text{Rey}_{\text{Kanat-111}})^{(1/7)} \right), \left((5 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-111}}^{(1/2)} \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-111}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{111} \right), \left((3/8) * \delta_{111} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-111}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{111} \right), \left((39/280) * \delta_{111} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} = u_{\text{Giris Kanat-111}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-111}} = u_{\text{Girisx-111}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{111}^2 * u_{\text{Giris Kanat-111}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{111} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-111}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{111}^{(1/7)} * u_{\text{Giris Kanat-111}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-1v}} = Q_{1v} / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-1v}} = \text{Sqrt} \left[\left((u_{\text{Giris Kanat-1v}} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \right)^2 + (\omega_{1v} * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_{1v} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left((\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}})^{(1/7)} \right), \left((5 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}}^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-1v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{1v} \right), \left((3/8) * \delta_{1v} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-1v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{1v} \right), \left((39/280) * \delta_{1v} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} = u_{\text{Giris Kanat-1v}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-1v}} = u_{\text{Girisx-1v}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{1v}^2 * u_{\text{Giris Kanat-1v}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{1v} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-1v}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{1v}^{(1/7)} * u_{\text{Giris Kanat-1v}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-v}} = Q_v / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-v}} = \text{Sqrt} \left[\left((u_{\text{Giris Kanat-v}} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \right)^2 + (\omega_v * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_v = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left((\text{Rey}_{\text{Kanat-v}})^{(1/7)} \right), \left((5 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v}}^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \left((1/8) * \delta_v \right), \left((3/8) * \delta_v \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \left((7/72) * \delta_v \right), \left((39/280) * \delta_v \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} = u_{\text{Giris Kanat-v}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-v}} = u_{\text{Girisx-v}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_v^2 * u_{\text{Giris Kanat-v}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_v = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-v}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_v^{(1/7)} * u_{\text{Giris Kanat-v}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-v1}} = Q_{v1} / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-v1}} = \text{Sqrt} \left[\left((u_{\text{Giris Kanat-v1}} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \right)^2 + (\omega_{v1} * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_{v1} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left((\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}})^{(1/7)} \right), \left((5 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}}^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-v1}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{v1} \right), \left((3/8) * \delta_{v1} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-v1}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{v1} \right), \left((39/280) * \delta_{v1} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} = u_{\text{Giris Kanat-v1}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-v1}} = u_{\text{Girisx-v1}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{v1}^2 * u_{\text{Giris Kanat-v1}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{v1} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-v1}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{v1}^{(1/7)} * u_{\text{Giris Kanat-v1}}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \left((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. \left((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2 \right) \right) * \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. \left((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1}} + \delta_{\text{IIKanat-1}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \right) \right) \right) \right] \text{dr} +$$

$$2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1}} * \omega_1 * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_1, 300\}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-11}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-11}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-11}} + \delta_{\text{IIKanat-11}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-11}} * \omega_{11} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-11}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{11}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-111}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-111}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-111}} + \delta_{\text{IIKanat-111}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-111}} * \omega_{111} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-111}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{111}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1v}} + \delta_{\text{IIKanat-1v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}} * \omega_{1v} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{1v}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v}} + \delta_{\text{IIKanat-v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v}} * \omega_v * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_v, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v1}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v1}} + \delta_{\text{IIKanat-v1}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}} * \omega_{v1} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{v1}, 300\} \right.$$

2.45318

2.87291

3.35248

3.95448

4.77196

0.08

0.0395

0.019

9

0.002

0.0205

0.0465

0.0213

0.015

50

998.68

0.001002

1.004×10^{-6}

0.001

0.0005

1.90147

$\sqrt{3.58357 + 0.000361 \omega_1^2}$

0.000530252

0.000198844

0.0000738565

40 339.9

113 563.

25.

0.00716389

2.90294

3.27295

$\sqrt{10.6174 + 0.000361 \omega_{11}^2}$

0.000404163

0.000151561

0.0000562942

69436.1

195473.

25.

0.012331

5.19439

3.83294

$\sqrt{14.5614 + 0.000361 \omega_{11}^2}$

0.000373474

0.000140053

0.0000520196

81316.4

228917.

25.

0.0144408

6.15215

4.47277

$\sqrt{19.8285 + 0.000361 \omega_{1v}^2}$

0.000345731

0.000129649

0.0000481554

94890.4

267130.

25.

0.0168514

7.25872

5.27594

$\sqrt{27.589 + 0.000361 \omega_v^2}$

0.000318329

0.000119374

0.0000443387

111930.

315098.

25.

0.0198774

8.66376

6.36659

$\sqrt{40.1746 + 0.000361 \omega_{V1}^2}$

0.000289783

0.000108669

0.0000403627

135 068 .

315 098 .

25 .

0.0239865

10.596

$\{\omega_1 \rightarrow 61.8035 + 0. i\}$

$\{\omega_{11} \rightarrow 107.404 + 0. i\}$

$\{\omega_{111} \rightarrow 126.073 + 0. i\}$

$\{\omega_{1V} \rightarrow 147.427 + 0. i\}$

$\{\omega_V \rightarrow 174.261 + 0. i\}$

$\{\omega_{V1} \rightarrow 210.738 + 0. i\}$

$u_{Girisx-1} = 1.40556$
 $u_{Girisx-11} = 2.25352$
 $u_{Girisx-111} = 2.80227$
 $u_{Girisx-1v} = 3.36721$
 $u_{Girisx-v} = 3.88956$
 $u_{Girisx-v1} = 4.40697$

$d_{ic} = 0.080$
 $r_{Uc} = 0.0395$
 $r_{Taban} = 0.019$
 $\eta = 9$
 $t = 0.002$
 $h_{Kanat} = r_{Uc} - r_{Taban}$
 $L_{Taban} = 0.0465$
 $L_{Kanat} = 0.0213$
 $w_{Kanat} = 0.015$
 $\beta = 55$
 $\rho = 998.68$
 $\mu = 0.001002$
 $\nu = 0.000001004$
 $\delta_{IIz} = t / 2$
 $\delta_{IIIz} = t / 4$

$u_{GirisKanat-1} = Q_1 / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-1} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-1} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_1 * r_{Taban})^2]$
 $\delta_1 = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-1})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-1}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((1/8) * \delta_1), ((3/8) * \delta_1)]$
 $\delta_{IIKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((7/72) * \delta_1), ((39/280) * \delta_1)]$
 $\text{Rey}_{Kanat-1} = u_{GirisKanat-1} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-1} = u_{Girisx-1} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_1^2 * u_{GirisKanat-1}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_1 = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-1}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_1)^{(1/7)}) * u_{GirisKanat-1}$

$u_{GirisKanat-11} = Q_{11} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-11} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-11} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{11} * r_{Taban})^2]$
 $\delta_{11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-11})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-11}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{11}), ((3/8) * \delta_{11})]$
 $\delta_{IIKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{11}), ((39/280) * \delta_{11})]$
 $\text{Rey}_{Kanat-11} = u_{GirisKanat-11} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-11} = u_{Girisx-11} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_{11}^2 * u_{GirisKanat-11}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_{11} = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-11}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_{11})^{(1/7)}) * u_{GirisKanat-11}$

$u_{GirisKanat-111} = Q_{111} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-111} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-111} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{111} * r_{Taban})^2]$
 $\delta_{111} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-111} > 300\,000,$

$$\left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\left(\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} \right)^{(1/7)} \right), \left(\left(5 * L_{\text{Kanat}} / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} \right)^{(1/2)} \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-111}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{111} \right), \left((3/8) * \delta_{111} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-111}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{111} \right), \left((39/280) * \delta_{111} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} = u_{\text{Giris Kanat-111}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-111}} = u_{\text{Girisx-111}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{111}^2 * u_{\text{Giris Kanat-111}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{111} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-111}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{111})^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-111}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-1v}} = Q_{1v} / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-1v}} = \text{Sqrt} \left[\left(\left(u_{\text{Giris Kanat-1v}} / \left(1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])) \right) \right) \right)^2 + (\omega_{1v} * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_{1v} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\left(\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} \right)^{(1/7)} \right), \left(\left(5 * L_{\text{Kanat}} / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} \right)^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-1v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{1v} \right), \left((3/8) * \delta_{1v} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-1v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{1v} \right), \left((39/280) * \delta_{1v} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} = u_{\text{Giris Kanat-1v}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-1v}} = u_{\text{Girisx-1v}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{1v}^2 * u_{\text{Giris Kanat-1v}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{1v} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-1v}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{1v})^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-1v}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-v}} = Q_v / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-v}} = \text{Sqrt} \left[\left(\left(u_{\text{Giris Kanat-v}} / \left(1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])) \right) \right) \right)^2 + (\omega_v * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_v = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} \right)^{(1/7)} \right), \left(\left(5 * L_{\text{Kanat}} / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} \right)^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \left((1/8) * \delta_v \right), \left((3/8) * \delta_v \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \left((7/72) * \delta_v \right), \left((39/280) * \delta_v \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} = u_{\text{Giris Kanat-v}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-v}} = u_{\text{Girisx-v}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_v^2 * u_{\text{Giris Kanat-v}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_v = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-v}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_v)^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-v}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-v1}} = Q_{v1} / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-v1}} = \text{Sqrt} \left[\left(\left(u_{\text{Giris Kanat-v1}} / \left(1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])) \right) \right) \right)^2 + (\omega_{v1} * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_{v1} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} \right)^{(1/7)} \right), \left(\left(5 * L_{\text{Kanat}} / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} \right)^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-v1}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{v1} \right), \left((3/8) * \delta_{v1} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-v1}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{v1} \right), \left((39/280) * \delta_{v1} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} = u_{\text{Giris Kanat-v1}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-v1}} = u_{\text{Girisx-v1}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{v1}^2 * u_{\text{Giris Kanat-v1}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{v1} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-v1}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{v1})^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-v1}}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \left((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. \left((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2 \right) \right) * \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. \left((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + \delta_{\text{IIZ}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1}} + \delta_{\text{IIKanat-1}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}])) \right) \right) \right) \right] \text{dr} +$$

$$2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1}} * \omega_1 * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * ((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)})))) \}, \{\omega_1, 300\}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-11}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-11}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-11}} + \delta_{\text{IIKanat-11}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-11}} * \omega_{11} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-11}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * ((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)})))) \}, \{\omega_{11}, 300\} \right]$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-111}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-111}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-111}} + \delta_{\text{IIKanat-111}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-111}} * \omega_{111} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-111}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * ((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)})))) \}, \{\omega_{111}, 300\} \right]$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1v}} + \delta_{\text{IIKanat-1v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}} * \omega_{1v} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * ((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)})))) \}, \{\omega_{1v}, 300\} \right]$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v}} + \delta_{\text{IIKanat-v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v}} * \omega_v * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * ((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)})))) \}, \{\omega_v, 300\} \right]$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v1}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v1}} + \delta_{\text{IIKanat-v1}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}} * \omega_{v1} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * ((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)})))) \}, \{\omega_{v1}, 300\} \right]$$

1.40556

2.25352

2.80227

3.36721

3.88956

4.40697

0.08

0.0395

0.019

9

0.002

0.0205

0.0465

0.0213

0.015

55

998.68

0.001002

1.004×10^{-6}

0.001

0.0005

1.87525

$\sqrt{3.4817 + 0.000361 \omega_1^2}$

0.000530252

0.000198844

0.0000738565

39783.7

111997.

24.6553

0.00706512

2.86292

3.00657

$\sqrt{8.94985 + 0.000361 \omega_{11}^2}$

0.000404163

0.000151561

0.0000562942

63 784.9

179 563.

22.9653

0.0113274

4.77163

3.7387

$\sqrt{13.8393 + 0.000361 \omega_{111}^2}$

0.000373474

0.000140053

0.0000520196

79 317.

223 288.

24.3853

0.0140857

6.00088

4.49242

$\sqrt{19.9817 + 0.000361 \omega_{1v}^2}$

0.000345731

0.000129649

0.0000481554

95 307.3

268 304.

25.1098

0.0169254

7.29061

5.18932

$\sqrt{26.6621 + 0.000361 \omega_v^2}$

0.000318329

0.000119374

0.0000443387

110 092.

309 925.

24.5896

0.0195511

8.52153

5.87963

$$\sqrt{34.2273 + 0.000361 \omega_{V1}^2}$$

0.000289783

0.000108669

0.0000403627

124737.

309925.

23.0878

0.0221518

9.78557

$$\{\omega_1 \rightarrow 71.6965 + 0. \text{i}\}$$

$$\{\omega_{11} \rightarrow 116.2 + 0. \text{i}\}$$

$$\{\omega_{111} \rightarrow 144.873 + 0. \text{i}\}$$

$$\{\omega_{1V} \rightarrow 174.49 + 0. \text{i}\}$$

$$\{\omega_V \rightarrow 202.03 + 0. \text{i}\}$$

$$\{\omega_{V1} \rightarrow 229.464 + 0. \text{i}\}$$

$u_{Girisx-1} = 1.43130$
 $u_{Girisx-11} = 2.20740$
 $u_{Girisx-111} = 2.81177$
 $u_{Girisx-1v} = 3.37156$
 $u_{Girisx-v} = 3.99470$
 $u_{Girisx-v1} = 4.51002$

$d_{ic} = 0.080$
 $r_{Uc} = 0.0395$
 $r_{Taban} = 0.019$
 $\eta = 9$
 $t = 0.002$
 $h_{Kanat} = r_{Uc} - r_{Taban}$
 $L_{Taban} = 0.0465$
 $L_{Kanat} = 0.0213$
 $w_{Kanat} = 0.015$
 $\beta = 60$
 $\rho = 998.68$
 $\mu = 0.001002$
 $\nu = 0.000001004$
 $\delta_{IIz} = t / 2$
 $\delta_{IIIz} = t / 4$

$u_{GirisKanat-1} = Q_1 / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-1} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-1} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_1 * r_{Taban})^2]$
 $\delta_1 = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-1})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-1}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((1/8) * \delta_1), ((3/8) * \delta_1)]$
 $\delta_{IIKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((7/72) * \delta_1), ((39/280) * \delta_1)]$
 $\text{Rey}_{Kanat-1} = u_{GirisKanat-1} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-1} = u_{Girisx-1} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_1^2 * u_{GirisKanat-1}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_1 = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-1}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_1)^{(1/7)}) * u_{GirisKanat-1}$

$u_{GirisKanat-11} = Q_{11} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-11} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-11} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{11} * r_{Taban})^2]$
 $\delta_{11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-11})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-11}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{11}), ((3/8) * \delta_{11})]$
 $\delta_{IIKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{11}), ((39/280) * \delta_{11})]$
 $\text{Rey}_{Kanat-11} = u_{GirisKanat-11} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-11} = u_{Girisx-11} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_{11}^2 * u_{GirisKanat-11}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_{11} = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-11}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_{11})^{(1/7)}) * u_{GirisKanat-11}$

$u_{GirisKanat-111} = Q_{111} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-111} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-111} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{111} * r_{Taban})^2]$
 $\delta_{111} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-111} > 300\,000,$

$$\left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\left(\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} \right)^{(1/7)} \right), \left(\left(5 * L_{\text{Kanat}} / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} \right)^{(1/2)} \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-111}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{111} \right), \left((3/8) * \delta_{111} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-111}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{111} \right), \left((39/280) * \delta_{111} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} = u_{\text{Giris Kanat-111}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-111}} = u_{\text{Girisx-111}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{111}^2 * u_{\text{Giris Kanat-111}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{111} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-111}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{111})^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-111}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-1v}} = Q_{1v} / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-1v}} = \text{Sqrt} \left[\left(\left(u_{\text{Giris Kanat-1v}} / \left(1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])) \right) \right) \right)^2 + (\omega_{1v} * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_{1v} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\left(\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} \right)^{(1/7)} \right), \left(\left(5 * L_{\text{Kanat}} / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} \right)^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-1v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{1v} \right), \left((3/8) * \delta_{1v} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-1v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{1v} \right), \left((39/280) * \delta_{1v} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} = u_{\text{Giris Kanat-1v}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-1v}} = u_{\text{Girisx-1v}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{1v}^2 * u_{\text{Giris Kanat-1v}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{1v} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-1v}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{1v})^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-1v}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-v}} = Q_v / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-v}} = \text{Sqrt} \left[\left(\left(u_{\text{Giris Kanat-v}} / \left(1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])) \right) \right) \right)^2 + (\omega_v * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_v = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} \right)^{(1/7)} \right), \left(\left(5 * L_{\text{Kanat}} / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} \right)^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \left((1/8) * \delta_v \right), \left((3/8) * \delta_v \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \left((7/72) * \delta_v \right), \left((39/280) * \delta_v \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} = u_{\text{Giris Kanat-v}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-v}} = u_{\text{Girisx-v}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_v^2 * u_{\text{Giris Kanat-v}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_v = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-v}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_v)^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-v}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-v1}} = Q_{v1} / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-v1}} = \text{Sqrt} \left[\left(\left(u_{\text{Giris Kanat-v1}} / \left(1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])) \right) \right) \right)^2 + (\omega_{v1} * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_{v1} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} \right)^{(1/7)} \right), \left(\left(5 * L_{\text{Kanat}} / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} \right)^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-v1}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{v1} \right), \left((3/8) * \delta_{v1} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-v1}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{v1} \right), \left((39/280) * \delta_{v1} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} = u_{\text{Giris Kanat-v1}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-v1}} = u_{\text{Girisx-v1}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{v1}^2 * u_{\text{Giris Kanat-v1}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{v1} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-v1}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{v1})^{(1/7)}) * u_{\text{Giris Kanat-v1}}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \left((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2 \right) \right) * \right.$$

$$\left. \left. \left((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + \delta_{\text{IIZ}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1}} + \delta_{\text{IIKanat-1}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}] \right) \right) \right) \right] \text{dr} +$$

$$2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1}} * \omega_1 * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_1, 300\}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-11}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-11}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-11}} + \delta_{\text{IIKanat-11}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-11}} * \omega_{11} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-11}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{11}, 300\} \right\}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-111}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-111}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-111}} + \delta_{\text{IIKanat-111}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-111}} * \omega_{111} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-111}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{111}, 300\} \right\}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1v}} + \delta_{\text{IIKanat-1v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}} * \omega_{1v} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{1v}, 300\} \right\}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v}} + \delta_{\text{IIKanat-v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v}} * \omega_v * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_v, 300\} \right\}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v1}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v1}} + \delta_{\text{IIKanat-v1}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}} * \omega_{v1} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{v1}, 300\} \right\}$$

1.4313

2.2074

2.81177

3.37156

3.9947

4.51002

0.08

0.0395

0.019

9

0.002

0.0205

0.0465

0.0213

0.015

60

998.68

0.001002

1.004×10^{-6}

0.001

0.0005

1.90959

$\sqrt{3.60512 + 0.000361 \omega_1^2}$

0.000530252

0.000198844

0.0000738565

40 512.3

114 048.

25.1068

0.0071945

2.91534

2.94504

$\sqrt{8.57472 + 0.000361 \omega_{11}^2}$

0.000404163

0.000151561

0.0000562942

62 479.4

175 888.

22.4953

0.0110956

4.67398

3.75137

$\sqrt{13.9129 + 0.000361 \omega_{111}^2}$

0.000373474

0.000140053

0.0000520196

79 585.9

224 045.

24.468

0.0141335

6.02122

4.49822

$\sqrt{20.0041 + 0.000361 \omega_{1v}^2}$

0.000345731

0.000129649

0.0000481554

95 430.5

268 650.

25.1423

0.0169473

7.30003

5.3296

$\sqrt{28.0819 + 0.000361 \omega_v^2}$

0.000318329

0.000119374

0.0000443387

113 068.

318 303.

25.2543

0.0200796

8.75188

6.01712

$$\sqrt{35.7944 + 0.000361 \omega_{v1}^2}$$

0.000289783

0.000108669

0.0000403627

127 654 .

318 303 .

23.6277

0.0226698

10.0144

$\{\omega_1 \rightarrow 86.3024 + 0. i\}$

$\{\omega_{11} \rightarrow 134.779 + 0. i\}$

$\{\omega_{111} \rightarrow 172.198 + 0. i\}$

$\{\omega_{1v} \rightarrow 207.046 + 0. i\}$

$\{\omega_v \rightarrow 245.975 + 0. i\}$

$\{\omega_{v1} \rightarrow 278.491 + 0. i\}$

$u_{Girisx-1} = 1.38921$
 $u_{Girisx-11} = 2.19052$
 $u_{Girisx-111} = 2.82300$
 $u_{Girisx-1v} = 3.34237$
 $u_{Girisx-v} = 3.91789$
 $u_{Girisx-v1} = 4.48367$

$d_{ic} = 0.080$
 $r_{Uc} = 0.0395$
 $r_{Taban} = 0.019$
 $\eta = 12$
 $t = 0.002$
 $h_{Kanat} = r_{Uc} - r_{Taban}$
 $L_{Taban} = 0.0465$
 $L_{Kanat} = 0.0213$
 $w_{Kanat} = 0.015$
 $\beta = 50$
 $\rho = 998.68$
 $\mu = 0.001002$
 $\nu = 0.000001004$
 $\delta_{IIz} = t / 2$
 $\delta_{IIIz} = t / 4$

$u_{Giris Kanat-1} = Q_1 / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-1} = \text{Sqrt} [((u_{Giris Kanat-1} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_1 * r_{Taban})^2]$
 $\delta_1 = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-1})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-1}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((1/8) * \delta_1), ((3/8) * \delta_1)]$
 $\delta_{IIKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((7/72) * \delta_1), ((39/280) * \delta_1)]$
 $\text{Rey}_{Kanat-1} = u_{Giris Kanat-1} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-1} = u_{Girisx-1} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_1^2 * u_{Giris Kanat-1}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_1 = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-1}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_1)^{(1/7)}) * u_{Giris Kanat-1}$

$u_{Giris Kanat-11} = Q_{11} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-11} = \text{Sqrt} [((u_{Giris Kanat-11} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{11} * r_{Taban})^2]$
 $\delta_{11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-11})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-11}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{11}), ((3/8) * \delta_{11})]$
 $\delta_{IIKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{11}), ((39/280) * \delta_{11})]$
 $\text{Rey}_{Kanat-11} = u_{Giris Kanat-11} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-11} = u_{Girisx-11} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_{11}^2 * u_{Giris Kanat-11}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_{11} = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-11}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_{11})^{(1/7)}) * u_{Giris Kanat-11}$

$u_{Giris Kanat-111} = Q_{111} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-111} = \text{Sqrt} [((u_{Giris Kanat-111} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{111} * r_{Taban})^2]$
 $\delta_{111} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-111} > 300\,000,$

$$\left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left((\text{Rey}_{\text{Kanat-111}})^{(1/7)} \right), \left((5 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-111}}^{(1/2)} \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-111}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{111} \right), \left((3/8) * \delta_{111} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-111}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{111} \right), \left((39/280) * \delta_{111} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-111}} = u_{\text{Giris Kanat-111}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-111}} = u_{\text{Girisx-111}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{111}^2 * u_{\text{Giris Kanat-111}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{111} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-111}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{111}^{(1/7)} * u_{\text{Giris Kanat-111}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-1v}} = Q_{1v} / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-1v}} = \text{Sqrt} \left[\left((u_{\text{Giris Kanat-1v}} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \right)^2 + (\omega_{1v} * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_{1v} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left((\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}})^{(1/7)} \right), \left((5 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}}^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-1v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{1v} \right), \left((3/8) * \delta_{1v} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-1v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{1v} \right), \left((39/280) * \delta_{1v} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-1v}} = u_{\text{Giris Kanat-1v}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-1v}} = u_{\text{Girisx-1v}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{1v}^2 * u_{\text{Giris Kanat-1v}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{1v} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-1v}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{1v}^{(1/7)} * u_{\text{Giris Kanat-1v}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-v}} = Q_v / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-v}} = \text{Sqrt} \left[\left((u_{\text{Giris Kanat-v}} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \right)^2 + (\omega_v * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_v = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left((\text{Rey}_{\text{Kanat-v}})^{(1/7)} \right), \left((5 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v}}^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \left((1/8) * \delta_v \right), \left((3/8) * \delta_v \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-v}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} > 300000, \left((7/72) * \delta_v \right), \left((39/280) * \delta_v \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-v}} = u_{\text{Giris Kanat-v}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-v}} = u_{\text{Girisx-v}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_v^2 * u_{\text{Giris Kanat-v}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_v = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-v}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_v^{(1/7)} * u_{\text{Giris Kanat-v}}$$

$$u_{\text{Giris Kanat-v1}} = Q_{v1} / ((\text{Pi} * (r_{\text{Uc}})^2) - (\text{Pi} * (r_{\text{Taban}})^2))$$

$$u_{\text{Rel-v1}} = \text{Sqrt} \left[\left((u_{\text{Giris Kanat-v1}} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \right)^2 + (\omega_{v1} * r_{\text{Taban}})^2 \right]$$

$$\delta_{v1} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \right.$$

$$\left. \left((0.16 * L_{\text{Kanat}}) / \left((\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}})^{(1/7)} \right), \left((5 * L_{\text{Kanat}}) / \left(\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}}^{(1/2)} \right) \right) \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IKanat-v1}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \left((1/8) * \delta_{v1} \right), \left((3/8) * \delta_{v1} \right) \right]$$

$$\delta_{\text{IIKanat-v1}} = \text{If} \left[\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} > 300000, \left((7/72) * \delta_{v1} \right), \left((39/280) * \delta_{v1} \right) \right]$$

$$\text{Rey}_{\text{Kanat-v1}} = u_{\text{Giris Kanat-v1}} * L_{\text{Kanat}} / v$$

$$\text{Rey}_{\text{dic-v}} = u_{\text{Girisx-v}} * d_{\text{ic}} / v$$

$$\lambda = (\delta_{v1}^2 * u_{\text{Giris Kanat-v1}}) / (v * L_{\text{Kanat}})$$

$$Q_{v1} = ((\text{Pi} * d_{\text{ic}}^2) / 4) * u_{\text{Girisx-v1}}$$

$$u_{\text{Maks}} = (((r_{\text{Uc}} - r_{\text{Taban}}) / 2)) / \delta_{v1}^{(1/7)} * u_{\text{Giris Kanat-v1}}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \left((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2 \right) \right) * \right.$$

$$\left. \left. \left((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIZ}} + \delta_{\text{IIZ}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1}} + \delta_{\text{IIKanat-1}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \right) \right) \right] \text{dr} +$$

$$2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1}} * \omega_1 * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_1, 300\}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-11}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-11}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-11}} + \delta_{\text{IIKanat-11}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-11}} * \omega_{11} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-11}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{11}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-111}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-111}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-111}} + \delta_{\text{IIKanat-111}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-111}} * \omega_{111} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-111}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{111}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1v}} + \delta_{\text{IIKanat-1v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}} * \omega_{1v} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{1v}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v}} + \delta_{\text{IIKanat-v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v}} * \omega_v * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_v, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v1}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v1}} + \delta_{\text{IIKanat-v1}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}} * \omega_{v1} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{v1}, 300\} \right.$$

1.38921

2.19052

2.823

3.34237

3.91789

4.48367

0.08

0.0395

0.019

12

0.002

0.0205

0.0465

0.0213

0.015

50

998.68

0.001002

1.004×10^{-6}

0.001

0.0005

1.85344

$\sqrt{3.39477 + 0.000361 \omega_1^2}$

0.000537078

0.000201404

0.0000748073

39321.

110694.

25.

0.00698293

2.82445

2.92252

$\sqrt{8.44051 + 0.000361 \omega_{11}^2}$

0.000427709

0.000160391

0.0000595737

62 001.7

174 543.

25.

0.0110108

4.60087

3.76635

$\sqrt{14.0183 + 0.000361 \omega_{111}^2}$

0.000376761

0.000141285

0.0000524774

79 903.7

224 940.

25.

0.0141899

6.03771

4.45928

$\sqrt{19.6509 + 0.000361 \omega_{1V}^2}$

0.000346254

0.000129845

0.0000482282

94 604.3

266 324.

25.

0.0168006

7.23527

5.22712

$\sqrt{27.0009 + 0.000361 \omega_V^2}$

0.000319812

0.00011993

0.0000445453

110 894.

312 182.

25.

0.0196935

8.5779

5.98197

$$\sqrt{35.3624 + 0.000361 \omega_{v1}^2}$$

0.000298954

0.000112108

0.0000416401

126908.

312182.

25.

0.0225374

9.91167

$$\{\omega_1 \rightarrow 57.142 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{11} \rightarrow 91.1296 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{111} \rightarrow 118.061 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{1v} \rightarrow 140.222 + 0. i\}$$

$$\{\omega_v \rightarrow 164.815 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{v1} \rightarrow 189.02 + 0. i\}$$

$u_{Girisx-1} = 1.38542$
 $u_{Girisx-11} = 2.13169$
 $u_{Girisx-111} = 2.80204$
 $u_{Girisx-1v} = 3.36887$
 $u_{Girisx-v} = 3.90865$
 $u_{Girisx-v1} = 4.42821$

$d_{ic} = 0.080$
 $r_{Uc} = 0.0395$
 $r_{Taban} = 0.019$
 $\eta = 12$
 $t = 0.002$
 $h_{Kanat} = r_{Uc} - r_{Taban}$
 $L_{Taban} = 0.0465$
 $L_{Kanat} = 0.0235$
 $w_{Kanat} = 0.015$
 $\beta = 55$
 $\rho = 998.68$
 $\mu = 0.001002$
 $\nu = 0.000001004$
 $\delta_{IIz} = t / 2$
 $\delta_{IIIz} = t / 4$

$u_{GirisKanat-1} = Q_1 / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-1} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-1} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_1 * r_{Taban})^2]$
 $\delta_1 = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-1})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-1}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((1/8) * \delta_1), ((3/8) * \delta_1)]$
 $\delta_{IIKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((7/72) * \delta_1), ((39/280) * \delta_1)]$
 $\text{Rey}_{Kanat-1} = u_{GirisKanat-1} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-1} = u_{Girisx-1} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_1^2 * u_{GirisKanat-1}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_1 = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-1}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_1)^{(1/7)}) * u_{GirisKanat-1}$

$u_{GirisKanat-11} = Q_{11} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-11} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-11} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{11} * r_{Taban})^2]$
 $\delta_{11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-11})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-11}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{11}), ((3/8) * \delta_{11})]$
 $\delta_{IIKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{11}), ((39/280) * \delta_{11})]$
 $\text{Rey}_{Kanat-11} = u_{GirisKanat-11} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-11} = u_{Girisx-11} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_{11}^2 * u_{GirisKanat-11}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_{11} = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-11}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_{11})^{(1/7)}) * u_{GirisKanat-11}$

$u_{GirisKanat-111} = Q_{111} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-111} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-111} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{111} * r_{Taban})^2]$
 $\delta_{111} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-111} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-111})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-111}^{(1/2)})))]$

$$\begin{aligned} \delta_{IKanat-111} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-111} > 300000, ((1/8) * \delta_{111}), ((3/8) * \delta_{111})] \\ \delta_{IIKanat-111} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-111} > 300000, ((7/72) * \delta_{111}), ((39/280) * \delta_{111})] \\ \text{Rey}_{Kanat-111} &= u_{GirisKanat-111} * L_{Kanat} / \nu \\ \text{Rey}_{dic-111} &= u_{Girisx-111} * d_{ic} / \nu \\ \lambda &= (\delta_{111}^2 * u_{GirisKanat-111}) / (\nu * L_{Kanat}) \\ Q_{111} &= ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-111} \\ u_{Maks} &= (((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2) / \delta_{111})^{(1/7)} * u_{GirisKanat-111} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{GirisKanat-1v} &= Q_{1v} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2)) \\ u_{Rel-1v} &= \text{Sqrt}[(u_{GirisKanat-1v} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^2 + (\omega_{1v} * r_{Taban})^2)] \\ \delta_{1v} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-1v} > 300000, \\ &\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-1v})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat}) / (\text{Rey}_{Kanat-1v}^{(1/2)}))] \\ \delta_{IKanat-1v} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-1v} > 300000, ((1/8) * \delta_{1v}), ((3/8) * \delta_{1v})] \\ \delta_{IIKanat-1v} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-1v} > 300000, ((7/72) * \delta_{1v}), ((39/280) * \delta_{1v})] \\ \text{Rey}_{Kanat-1v} &= u_{GirisKanat-1v} * L_{Kanat} / \nu \\ \text{Rey}_{dic-1v} &= u_{Girisx-1v} * d_{ic} / \nu \\ \lambda &= (\delta_{1v}^2 * u_{GirisKanat-1v}) / (\nu * L_{Kanat}) \\ Q_{1v} &= ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-1v} \\ u_{Maks} &= (((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2) / \delta_{1v})^{(1/7)} * u_{GirisKanat-1v} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{GirisKanat-v} &= Q_v / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2)) \\ u_{Rel-v} &= \text{Sqrt}[(u_{GirisKanat-v} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^2 + (\omega_v * r_{Taban})^2)] \\ \delta_v &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v} > 300000, \\ &\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-v})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat}) / (\text{Rey}_{Kanat-v}^{(1/2)}))] \\ \delta_{IKanat-v} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v} > 300000, ((1/8) * \delta_v), ((3/8) * \delta_v)] \\ \delta_{IIKanat-v} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v} > 300000, ((7/72) * \delta_v), ((39/280) * \delta_v)] \\ \text{Rey}_{Kanat-v} &= u_{GirisKanat-v} * L_{Kanat} / \nu \\ \text{Rey}_{dic-v} &= u_{Girisx-v} * d_{ic} / \nu \\ \lambda &= (\delta_v^2 * u_{GirisKanat-v}) / (\nu * L_{Kanat}) \\ Q_v &= ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-v} \\ u_{Maks} &= (((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2) / \delta_v)^{(1/7)} * u_{GirisKanat-v} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{GirisKanat-v1} &= Q_{v1} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2)) \\ u_{Rel-v1} &= \text{Sqrt}[(u_{GirisKanat-v1} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^2 + (\omega_{v1} * r_{Taban})^2)] \\ \delta_{v1} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v1} > 300000, \\ &\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-v1})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat}) / (\text{Rey}_{Kanat-v1}^{(1/2)}))] \\ \delta_{IKanat-v1} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v1} > 300000, ((1/8) * \delta_{v1}), ((3/8) * \delta_{v1})] \\ \delta_{IIKanat-v1} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v1} > 300000, ((7/72) * \delta_{v1}), ((39/280) * \delta_{v1})] \\ \text{Rey}_{Kanat-v1} &= u_{GirisKanat-v1} * L_{Kanat} / \nu \\ \text{Rey}_{dic-v} &= u_{Girisx-v} * d_{ic} / \nu \\ \lambda &= (\delta_{v1}^2 * u_{GirisKanat-v1}) / (\nu * L_{Kanat}) \\ Q_{v1} &= ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-v1} \\ u_{Maks} &= (((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2) / \delta_{v1})^{(1/7)} * u_{GirisKanat-v1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{FindRoot} &\left[\left\{ \left(- \int_{r_{Taban}}^{r_{Uc}} ((\rho * u_{GirisKanat-1}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left((1 - ((\eta * (\delta_{IIz} + 2 * \delta_{IKanat-1})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2 \right) * \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{IIz} + \delta_{IIIz} + 2 * (\delta_{IKanat-1} + \delta_{IIKanat-1}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \right) \right) \right] dr + \end{aligned}$$

$$2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1}} * \omega_1 * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_1, 300\}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-11}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-11}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-11}} + \delta_{\text{IIKanat-11}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-11}} * \omega_{11} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-11}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{11}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-111}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-111}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-111}} + \delta_{\text{IIKanat-111}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-111}} * \omega_{111} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-111}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{111}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1v}} + \delta_{\text{IIKanat-1v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}} * \omega_{1v} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{1v}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v}} + \delta_{\text{IIKanat-v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v}} * \omega_v * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_v, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v1}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v1}} + \delta_{\text{IIKanat-v1}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}} * \omega_{v1} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{v1}, 300\} \right.$$

1.38542

2.13169

2.80204

3.36887

3.90865

4.42821

0.08

0.0395

0.019

12

0.002

0.0205

0.0465

0.0235

0.015

55

998.68

0.001002

1.004×10^{-6}

0.001

0.0005

1.84838

$\sqrt{3.37146 + 0.000361 \omega_1^2}$

0.000564904

0.000211839

0.0000786831

43263.9

110392.

25.

0.00696388

2.79649

2.84403

$\sqrt{7.98185 + 0.000361 \omega_{11}^2}$

0.000455411

0.000170779

0.0000634323

66 568.5

169 856.

25.

0.010715

4.43734

3.73839

$\sqrt{13.7913 + 0.000361 \omega_{111}^2}$

0.000397218

0.000148957

0.0000553267

87 502.2

223 270.

25.

0.0140846

5.94779

4.49464

$\sqrt{19.9353 + 0.000361 \omega_{1V}^2}$

0.000362263

0.000135848

0.000050458

105 203.

268 436.

25.

0.0169338

7.2457

5.21479

$\sqrt{26.8355 + 0.000361 \omega_V^2}$

0.00033632

0.00012612

0.0000468445

122 059.

311 446.

25.

0.019647

8.49636

5.90797

$$\sqrt{34.4439 + 0.000361 \omega_{V1}^2}$$

0.000315974

0.00011849

0.0000440107

138284.

311446.

25.

0.0222586

9.71194

$$\{\omega_1 \rightarrow 66.3418 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{11} \rightarrow 103.404 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{111} \rightarrow 136.852 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{1V} \rightarrow 165.21 + 0. i\}$$

$$\{\omega_V \rightarrow 192.262 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{V1} \rightarrow 218.335 + 0. i\}$$

$u_{Girisx-1} = 1.35769$
 $u_{Girisx-11} = 2.21751$
 $u_{Girisx-111} = 2.91863$
 $u_{Girisx-1v} = 3.33772$
 $u_{Girisx-v} = 3.70872$
 $u_{Girisx-v1} = 4.24071$

$d_{ic} = 0.080$
 $r_{Uc} = 0.0395$
 $r_{Taban} = 0.019$
 $\eta = 12$
 $t = 0.002$
 $h_{Kanat} = r_{Uc} - r_{Taban}$
 $L_{Taban} = 0.0465$
 $L_{Kanat} = 0.0263$
 $w_{Kanat} = 0.015$
 $\beta = 60$
 $\rho = 999.86$
 $\mu = 0.001002$
 $\nu = 0.000001004$
 $\delta_{IIz} = t / 2$
 $\delta_{IIIz} = t / 4$

$u_{GirisKanat-1} = Q_1 / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-1} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-1} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_1 * r_{Taban})^2]$
 $\delta_1 = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-1})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-1}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((1/8) * \delta_1), ((3/8) * \delta_1)]$
 $\delta_{IIKanat-1} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-1} > 300\,000, ((7/72) * \delta_1), ((39/280) * \delta_1)]$
 $\text{Rey}_{Kanat-1} = u_{GirisKanat-1} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-1} = u_{Girisx-1} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_1^2 * u_{GirisKanat-1}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_1 = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-1}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_1)^{(1/7)}) * u_{GirisKanat-1}$

$u_{GirisKanat-11} = Q_{11} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-11} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-11} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{11} * r_{Taban})^2]$
 $\delta_{11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-11})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-11}^{(1/2)})))]$
 $\delta_{IKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{11}), ((3/8) * \delta_{11})]$
 $\delta_{IIKanat-11} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-11} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{11}), ((39/280) * \delta_{11})]$
 $\text{Rey}_{Kanat-11} = u_{GirisKanat-11} * L_{Kanat} / \nu$
 $\text{Rey}_{dic-11} = u_{Girisx-11} * d_{ic} / \nu$
 $\lambda = (\delta_{11}^2 * u_{GirisKanat-11}) / (\nu * L_{Kanat})$
 $Q_{11} = ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-11}$
 $u_{Maks} = (((((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_{11})^{(1/7)}) * u_{GirisKanat-11}$

$u_{GirisKanat-111} = Q_{111} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2))$
 $u_{Rel-111} = \text{Sqrt} [((u_{GirisKanat-111} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))))^2 + (\omega_{111} * r_{Taban})^2]$
 $\delta_{111} = \text{If} [\text{Rey}_{Kanat-111} > 300\,000,$
 $\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-111})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-111}^{(1/2)})))]$

$$\begin{aligned} \delta_{IKanat-111} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-111} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{111}), ((3/8) * \delta_{111})] \\ \delta_{IIKanat-111} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-111} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{111}), ((39/280) * \delta_{111})] \\ \text{Rey}_{Kanat-111} &= u_{Giris\ Kanat-111} * L_{Kanat} / \nu \\ \text{Rey}_{dic-111} &= u_{Girisx-111} * d_{ic} / \nu \\ \lambda &= (\delta_{111}^2 * u_{Giris\ Kanat-111}) / (\nu * L_{Kanat}) \\ Q_{111} &= ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-111} \\ u_{Maks} &= (((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_{111}^{(1/7)} * u_{Giris\ Kanat-111} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{Giris\ Kanat-1v} &= Q_{1v} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2)) \\ u_{Rel-1v} &= \text{Sqrt}[(u_{Giris\ Kanat-1v} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^2 + (\omega_{1v} * r_{Taban})^2)] \\ \delta_{1v} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-1v} > 300\,000, \\ &\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-1v})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-1v}^{(1/2)})))] \\ \delta_{IKanat-1v} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-1v} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{1v}), ((3/8) * \delta_{1v})] \\ \delta_{IIKanat-1v} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-1v} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{1v}), ((39/280) * \delta_{1v})] \\ \text{Rey}_{Kanat-1v} &= u_{Giris\ Kanat-1v} * L_{Kanat} / \nu \\ \text{Rey}_{dic-1v} &= u_{Girisx-1v} * d_{ic} / \nu \\ \lambda &= (\delta_{1v}^2 * u_{Giris\ Kanat-1v}) / (\nu * L_{Kanat}) \\ Q_{1v} &= ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-1v} \\ u_{Maks} &= (((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_{1v}^{(1/7)} * u_{Giris\ Kanat-1v} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{Giris\ Kanat-v} &= Q_v / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2)) \\ u_{Rel-v} &= \text{Sqrt}[(u_{Giris\ Kanat-v} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^2 + (\omega_v * r_{Taban})^2)] \\ \delta_v &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v} > 300\,000, \\ &\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-v})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-v}^{(1/2)})))] \\ \delta_{IKanat-v} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v} > 300\,000, ((1/8) * \delta_v), ((3/8) * \delta_v)] \\ \delta_{IIKanat-v} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v} > 300\,000, ((7/72) * \delta_v), ((39/280) * \delta_v)] \\ \text{Rey}_{Kanat-v} &= u_{Giris\ Kanat-v} * L_{Kanat} / \nu \\ \text{Rey}_{dic-v} &= u_{Girisx-v} * d_{ic} / \nu \\ \lambda &= (\delta_v^2 * u_{Giris\ Kanat-v}) / (\nu * L_{Kanat}) \\ Q_v &= ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-v} \\ u_{Maks} &= (((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_v^{(1/7)} * u_{Giris\ Kanat-v} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{Giris\ Kanat-v1} &= Q_{v1} / ((\text{Pi} * (r_{Uc})^2) - (\text{Pi} * (r_{Taban})^2)) \\ u_{Rel-v1} &= \text{Sqrt}[(u_{Giris\ Kanat-v1} / (1 + ((\eta * t) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^2 + (\omega_{v1} * r_{Taban})^2)] \\ \delta_{v1} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v1} > 300\,000, \\ &\quad ((0.16 * L_{Kanat}) / ((\text{Rey}_{Kanat-v1})^{(1/7)})), ((5 * L_{Kanat} / (\text{Rey}_{Kanat-v1}^{(1/2)})))] \\ \delta_{IKanat-v1} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v1} > 300\,000, ((1/8) * \delta_{v1}), ((3/8) * \delta_{v1})] \\ \delta_{IIKanat-v1} &= \text{If}[\text{Rey}_{Kanat-v1} > 300\,000, ((7/72) * \delta_{v1}), ((39/280) * \delta_{v1})] \\ \text{Rey}_{Kanat-v1} &= u_{Giris\ Kanat-v1} * L_{Kanat} / \nu \\ \text{Rey}_{dic-v} &= u_{Girisx-v} * d_{ic} / \nu \\ \lambda &= (\delta_{v1}^2 * u_{Giris\ Kanat-v1}) / (\nu * L_{Kanat}) \\ Q_{v1} &= ((\text{Pi} * d_{ic}^2) / 4) * u_{Girisx-v1} \\ u_{Maks} &= (((r_{Uc} - r_{Taban}) / 2)) / \delta_{v1}^{(1/7)} * u_{Giris\ Kanat-v1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{FindRoot} &\left[\left\{ \left(- \int_{r_{Taban}}^{r_{Uc}} ((\rho * u_{Giris\ Kanat-1}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left((1 - ((\eta * (\delta_{IIz} + 2 * \delta_{IKanat-1})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2 \right) * \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{IIz} + \delta_{IIIz} + 2 * (\delta_{IKanat-1} + \delta_{IIKanat-1}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \right) \right) \right] dr + \end{aligned}$$

$$2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1}} * \omega_1 * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_1, 300\}$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-11}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-11}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-11}} + \delta_{\text{IIKanat-11}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-11}} * \omega_{11} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-11}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{11}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-111}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-111}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-111}} + \delta_{\text{IIKanat-111}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-111}} * \omega_{111} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-111}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{111}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-1v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-1v}} + \delta_{\text{IIKanat-1v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-1v}} * \omega_{1v} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-1v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{1v}, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v}} + \delta_{\text{IIKanat-v}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v}} * \omega_v * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_v, 300\} \right.$$

$$\text{FindRoot} \left[\left\{ \left(- \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} ((\rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}}^2 * \text{Tan}[\beta \text{ Degree}] * r) / ((1 - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + 2 * \delta_{\text{IKanat-v1}})) / (2 * \text{Pi} * \text{Cos}[\beta \text{ Degree}] * r))^2))) * ((2 * \text{Pi} * r) - ((\eta * (\delta_{\text{IIz}} + \delta_{\text{IIIz}} + 2 * (\delta_{\text{IKanat-v1}} + \delta_{\text{IIKanat-v1}}))) / (\text{Cos}[\beta \text{ Degree}]))) \, dr + 2 * \text{Pi} * \int_{r_{\text{Taban}}}^{r_{\text{Uc}}} \rho * u_{\text{Giris Kanat-v1}} * \omega_{v1} * r^3 \, dr - (0.036 * \rho * v^{(1/5)} * u_{\text{Rel-v1}}^{(9/5)} * r_{\text{Taban}} * ((2 * \text{Pi} * r_{\text{Taban}}) - (\eta * t)) * \text{Sin}[\beta \text{ Degree}] * (((L_{\text{Taban}} + (w_{\text{Kanat}} / \text{Cos}[\beta \text{ Degree}])))^{(4/5)} - (L_{\text{Taban}}^{(4/5)}))))), \{\omega_{v1}, 300\} \right.$$

1.35769

2.21751

2.91863

3.33772

3.70872

4.24071

0.08

0.0395

0.019

12

0.002

0.0205

0.0465

0.0263

0.015

60

999.86

0.001002

1.004×10^{-6}

0.001

0.0005

1.81139

$\sqrt{3.23155 + 0.000361 \omega_1^2}$

0.000603683

0.000226381

0.0000840845

47 449.6

108 182.

25.

0.00682449

2.71464

2.95853

$\sqrt{8.62068 + 0.000361 \omega_{11}^2}$

0.000472364

0.000177137

0.0000657936

77 499.3

176 694.

25.

0.0111464

4.59195

3.89394

$\sqrt{14.9337 + 0.000361 \omega_{111}^2}$

0.000411737

0.000154401

0.0000573491

102 003.

232 560.

25.

0.0146706

6.16358

4.45308

$\sqrt{19.5303 + 0.000361 \omega_{1V}^2}$

0.000385021

0.000144383

0.000053628

116 649.

265 954.

25.

0.0167772

7.11649

4.94805

$\sqrt{24.1134 + 0.000361 \omega_V^2}$

0.000365256

0.000136971

0.000050875

129 615.

295 516.

25.

0.0186421

7.96727

5.65782

$$\sqrt{31.5273 + 0.000361 \omega_{v1}^2}$$

0.000341578

0.000128092

0.000047577

148208.

295516.

25.

0.0213161

9.19776

$$\{\omega_1 \rightarrow 75.6298 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{11} \rightarrow 125.794 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{111} \rightarrow 166.951 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{1v} \rightarrow 191.623 + 0. i\}$$

$$\{\omega_v \rightarrow 213.498 + 0. i\}$$

$$\{\omega_{v1} \rightarrow 244.912 + 0. i\}$$

EK - II

FLUENT

Version: 3d, pbns, ske, unsteady (3d, pressure-based, standard k-epsilon, unsteady)

Release: 6.3.26

Title:

Models

Model	Settings
Space	3D
Time	Unsteady, 2nd-Order Implicit
Viscous	Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

Zones

name	id	type
rotor	2	fluid
stator_giris	3	fluid
stator_cikis	4	fluid
periodic-140	140	periodic
periodic-136	136	periodic
giris	28	velocity-inlet
rotor_per_i_ii	24	periodic
stator_giris_per_i_ii	17	periodic
stator_giris_per_ii_ii	15	periodic
stator_giris_per_iii_ii	13	periodic
stator_cikis_per_i_ii	11	periodic
stator_cikis_per_ii_ii	9	periodic
stator_cikis_per_iii_ii	7	periodic
rotor_kanat_cikis	5	wall
rotor_kanat_giris	6	wall
stator_cikis_shroud	18	wall
stator_giris_shroud	19	wall
rotor_shroud	20	wall
rotor_hub	21	wall
stator_cikis_hub	22	wall
stator_giris_hub	23	wall
cikis	27	pressure-outlet
stator_cikis_kanat	29	wall
stator_giris_kanat	30	wall
rotor_cikis_int	31	interface
rotor_giris_int	32	interface
stator_giris_int	33	interface
stator_cikis_int	34	interface
default-interior	36	interior
default-interior:001	1	interior

Boundary Conditions

rotor

Condition	Value
Material Name	water-
liquid	
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass)
(x-momentum) (y-momentum) (z-momentum) (k) (epsilon))	
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	((x-
velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile)))	
Motion Type	2
X-Velocity Of Zone (m/s)	0
Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
Z-Velocity Of Zone (m/s)	0
Rotation speed (rpm)	-288.2936
X-Origin of Rotation-Axis (mm)	0
Y-Origin of Rotation-Axis (mm)	0
Z-Origin of Rotation-Axis (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Deactivated Thread	no
Laminar zone?	no
Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?	yes
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Z-Component of Direction-1 Vector	0
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Component of Cone Axis Vector	1
Y-Component of Cone Axis Vector	0
Z-Component of Cone Axis Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis (mm)	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis (mm)	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis (mm)	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis (deg)	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m2)	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m2)	0
Direction-3 Viscous Resistance (1/m2)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0

Direction-3 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

stator_giris

Condition	Value
-----	-----
-----	-----
-----	-----
Material Name	water-
liquid	
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass)
(x-momentum) (y-momentum) (z-momentum) (k) (epsilon))	
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	((x-
velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (y-velocity (inactive .	
#f) (constant . 0) (profile)) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0)	
(profile)) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (epsilon	
(inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone (m/s)	0
Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
Z-Velocity Of Zone (m/s)	0
Rotation speed (rpm)	0
X-Origin of Rotation-Axis (mm)	0
Y-Origin of Rotation-Axis (mm)	0
Z-Origin of Rotation-Axis (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Deactivated Thread	no
Laminar zone?	no
Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?	yes
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Z-Component of Direction-1 Vector	0
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Component of Cone Axis Vector	1
Y-Component of Cone Axis Vector	0
Z-Component of Cone Axis Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis (mm)	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis (mm)	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis (mm)	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis (deg)	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m2)	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m2)	0
Direction-3 Viscous Resistance (1/m2)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0

Direction-3 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

stator_cikis

Condition	Value
-----	-----
-----	-----
-----	-----
Material Name	water-
liquid	
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass)
(x-momentum) (y-momentum) (z-momentum) (k) (epsilon))	
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	((x-
velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (y-velocity (inactive .	
#f) (constant . 0) (profile)) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0)	
(profile)) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile)) (epsilon	
(inactive . #f) (constant . 0) (profile))	
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone (m/s)	0
Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
Z-Velocity Of Zone (m/s)	0
Rotation speed (rpm)	0
X-Origin of Rotation-Axis (mm)	0
Y-Origin of Rotation-Axis (mm)	0
Z-Origin of Rotation-Axis (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Deactivated Thread	no
Laminar zone?	no
Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?	yes
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Z-Component of Direction-1 Vector	0
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Component of Cone Axis Vector	1
Y-Component of Cone Axis Vector	0
Z-Component of Cone Axis Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis (mm)	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis (mm)	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis (mm)	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis (deg)	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m2)	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m2)	0
Direction-3 Viscous Resistance (1/m2)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0

Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-3 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

periodic-140

Condition	Value
Rotationally Periodic?	no

periodic-136

Condition	Value
Rotationally Periodic?	no

giris

Condition	Value
Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0
Velocity Magnitude (m/s)	8.1284504
Coordinate System	0
X-Velocity (m/s)	0
Y-Velocity (m/s)	0
Z-Velocity (m/s)	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin (mm)	0
Y-Coordinate of Axis Origin (mm)	0
Z-Coordinate of Axis Origin (mm)	0
Angular velocity (rpm)	0
Turbulent Specification Method	3
Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)	1
Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)	1
Turbulent Intensity (%)	0.099999994
Turbulent Length Scale (mm)	1
Hydraulic Diameter (mm)	0.080900006
Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no

rotor_per_i_ii

Condition	Value
Rotationally Periodic?	yes

stator_giris_per_i_ii

Condition	Value
Rotationally Periodic?	yes

stator_giris_per_ii_ii

Condition	Value
Rotationally Periodic?	yes

stator_giris_per_iii_ii

Condition	Value
Rotationally Periodic?	yes

stator_cikis_per_i_ii

Condition	Value
Rotationally Periodic?	yes

stator_cikis_per_ii_ii

Condition	Value
Rotationally Periodic?	yes

stator_cikis_per_iii_ii

Condition	Value
Rotationally Periodic?	yes

rotor_kanat_cikis

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	1
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	no
Apply a rotational velocity to this wall?	yes
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Z-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (mm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rpm)	-288.2936
X-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Z-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

rotor_kanat_giris

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	1
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	no
Apply a rotational velocity to this wall?	yes
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Z-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (mm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rpm)	-288.2936
X-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Z-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

stator_cikis_shroud

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Z-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (mm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rpm)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Z-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

stator_giris_shroud

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Z-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (mm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rpm)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Z-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

rotor_shroud

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	1
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	no
Apply a rotational velocity to this wall?	yes
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Z-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (mm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rpm)	-288.2936
X-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Z-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

rotor_hub

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	1
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	no
Apply a rotational velocity to this wall?	yes
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Z-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (mm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rpm)	-288.2936
X-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Z-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

stator_cikis_hub

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Z-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (mm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rpm)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Z-component of shear stress (pascal)	0

Specularity Coefficient 0

stator_giris_hub

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Z-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (mm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rpm)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Z-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

cikis

Condition	Value
Gauge Pressure (pascal)	0
Backflow Direction Specification Method	1
Coordinate System	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin (mm)	0
Y-Coordinate of Axis Origin (mm)	0
Z-Coordinate of Axis Origin (mm)	0
Turbulent Specification Method	3
Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)	1
Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)	1
Backflow Turbulent Intensity (%)	0.099999994
Backflow Turbulent Length Scale (mm)	1
Backflow Hydraulic Diameter (mm)	0.080900006
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no
Radial Equilibrium Pressure Distribution	yes
Specify targeted mass flow rate	no
Targeted mass flow (kg/s)	1

stator_cikis_kanat

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Z-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (mm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rpm)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Z-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

stator_giris_kanat

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
Z-Component of Wall Translation (m/s)	0
Wall Roughness Height (mm)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rpm)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin (mm)	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Z-component of shear stress (pascal)	0
Specularity Coefficient	0

```

rotor_cikis_int
  Condition  Value
  -----
rotor_giris_int
  Condition  Value
  -----
stator_giris_int
  Condition  Value
  -----
stator_cikis_int
  Condition  Value
  -----
default-interior
  Condition  Value
  -----
default-interior:001
  Condition  Value
  -----
default-interior:035
  Condition  Value
  -----

```

Solver Controls

Equations

```

Equation      Solved
-----
Flow          yes
Turbulence    yes

```

Numerics

```

Numeric                               Enabled
-----
Absolute Velocity Formulation         yes

```

Unsteady Calculation Parameters

```

-----
Time Step (s)                          8.9285997e-05
Max. Iterations Per Time Step           20

```

Relaxation

Variable	Relaxation Factor
Pressure	0.30000001
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.69999999
Turbulent Kinetic Energy	0.80000001
Turbulent Dissipation Rate	0.80000001
Turbulent Viscosity	1

Linear Solver

Reduction	Solver	Termination	Residual
Variable	Type	Criterion	Tolerance
Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Z-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulent Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Turbulent Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7

Pressure-Velocity Coupling

Parameter	Value
Type	SIMPLE

Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	Standard
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind

Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

Material Properties

Material: water-liquid (fluid)

Property	Units	Method	Value (s)
Density	kg/m3	constant	998.20001
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	4182
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.6

Viscosity	kg/m-s	constant	0.001003
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.0152
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	0
L-J Energy Parameter	k	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value (s)
Density	kg/m3	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value (s)
Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	01.11.1979	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1994–1997	Beşiktaş Lisesi
Lisans	1997–2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2005–2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

Çalıştığı Kurumlar ve Alanlar

2002–2004	ENKA İnşaat A.Ş. (Saha Mühendisi)
2004–2005	CIAT Klima Havalandırma Türkiye Ofisi
2005–	TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı)