

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÖNEN BİR DİSK YÜZEYİNE ÇARPAN JET AKIMININ
SAYISAL İNCELENMESİ**

Makina Müh. Emre TÜRKER

**FBE Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Oktay ÖZCAN

İSTANBUL,2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT.....	xi
1 GİRİŞ	1
1.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Nedir.....	2
1.2 HAD Analizlerinin Planlanması ve Çözüm Adımları.....	4
1.2.1 HAD Analizlerinin Planlanması	4
1.2.2 Problem Çözme Adımları	4
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
3 SAYISAL ÇÖZÜMLEME YÖNTEMLERİ	13
3.1 Yöneten Denklemler	13
3.2 Ayrıklaştırma ve Yakınsama.....	15
3.3 Tek Hassaslıklı ve Çift Hassaslıklı Çözücüler.....	17
3.4 Ayrık Çözüm ve Birleştirilmiş Çözüm Yöntemleri	17
3.5 Türbülans Modeli Seçimi.....	20
3.5.1 Standart k- ϵ Modeli.....	20
3.5.2 RNG k- ϵ Modeli.....	21
3.5.3 SST k- ω Modeli	22
3.5.4 Reynolds Stress Modeli(RSM)	22
3.6 Ağ Dizaynı	22
3.7 Yakın Duvar Çözüm Modelleri.....	24
4 SAYISAL ÇALIŞMALAR.....	26
4.1 Dönen Disk Yüzeyine Yakın Laminar Akım (Problem 1)	26
4.1.1 Sayısal Çözüm Alanının Tanımlanması.....	26
4.1.2 Çözüm Algoritması	28
4.1.3 Çözüm Sonuçları.....	28
4.2 Hareketsiz Disk Yüzeyine Çarpan Jet Akımı (Problem 2)	30
4.2.1 Sayısal Çözüm Alanının Tanımlanması.....	30
4.2.2 Çözüm Algoritması	32
4.2.2.1 Boru İçerisindeki Akım.....	32
4.2.2.2 Hareketsiz Disk Yüzeyine Çarpan Jet Akımı	33

4.2.3	Çözüm Sonuçları.....	34
4.3	Dönen Disk Yüzeyine Çarpan Jet Akımı (Problem 3).....	44
4.3.1	Sayısal Çözüm Alanının Tanımlanması.....	44
4.3.2	Çözüm Algoritması.....	45
4.3.2.1	Boru İçerisindeki Akım.....	45
4.3.2.2	Dönen Disk Yüzeyine Çarpan Jet Akımı.....	46
4.3.3	Çözüm Sonuçları.....	47
5	SONUÇLAR.....	53
KAYNAKLAR.....		56
ÖZGEÇMİŞ.....		59

SİMGE LİSTESİ

\vec{A}	Yüzey alan vektörü
a_p	Merkezdeki hücreye ait katsayı
a_{nb}	Komşu hücreye ait katsayı
b	Üretimin ve sınır şartlarının sabit değeri
c_p	Özgül ısı
D	Çap
\vec{e}_r	Radyal yönde birim vektör
\vec{e}_θ	Teğetsel yönde birim vektör
\vec{e}_z	Eksenel yönde birim vektör
F	Radyal hız fonksiyonu
G	Teğetsel hız fonksiyonu
H	Jet çıkış ağzının disk yüzeyine dik uzaklığı
I	Türbülans şiddeti
J	Eksenel hız fonksiyonu
k	Türbülans kinetik enerjisi
k_f	Akışkanın ısı iletim katsayısı
L	Uzunluk
p	Basınç
P	Basınç fonksiyonu
r	Radyal koordinat
R	Yarıçap
R^ϕ	ϕ için artık değer
Re	Reynolds sayısı
Re_j	Jet için eksenel yönde Reynolds sayısı
S_ϕ	ϕ için kaynak terimi
U	Bileşke hız
U_b	Jet için boru çıkışındaki ortalama akış hızı
\vec{V}	Hız vektörü
u_τ	Sürtünme hızı
V	Kontrol hacmi

V_r	Radyal yöndeki hız bileşeni
V_θ	Teğetsel yöndeki hız bileşeni
V_z	Eksenel yöndeki hız bileşeni
v_r	Radyal hız çalkantıları
v_θ	Teğetsel hız çalkantıları
v_z	Eksenel hız çalkantıları
y_k	İlk kontrol hacminin duvardan uzaklığı
y_k^+	Duvarın boyutsuz uzaklık
z	Eksenel koordinat
x_f	FLUENT'te x koordinatı
y_f	FLUENT'te y koordinatı
∇	Gradyan
ρ	Yoğunluk
θ	Teğetsel koordinat
ε	Türbülans sönümlenme hızı
ω	Spesifik sönümlenme hızı
τ_w	Duvardaki kayma gerilimi
ν	Kinematik viskozite
μ	Mutlak viskozite
Ω	Dönme Hızı
δ	Tabaka kalınlığı
ξ	Diskten boyutsuz uzaklık
ϕ	Genel parametre
Γ_ϕ	ϕ için difüzyon katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

CFD	Computational Fluid Dynamics
HAD	Hesaplamaalı Akışkanlar Dinamiği
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RNG	Renormalization Group Theory
RSM	Reynolds Stres Model
PRESTO	Pressure Steggered Option
SST	Shear-Stress Transport
URF	Under Relaxation Factors

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	FLUENT programında izlenecek çözüm adımları için genel bir şema	5
Şekil 2.1	Dönen disk yüzeyine yakın akımın 3 boyutlu şematik gösterimi	6
Şekil 2.2	Schlichting(1968)'in nümerik çalışmasına göre dönen bir disk üzerindeki akım için diskten boyutsuz ξ uzaklığına göre F-radyal, G-teğetsel, J-eksenel hız fonksiyonlarının değişim grafiği	9
Şekil 2.3	Hareketsiz disk yüzeyine çarpan jet akımı deneyinin şematik gösterimi	10
Şekil 2.4	Dönen disk yüzeyine çarpan jet akımı deneyinin şematik gösterimi	11
Şekil 3.1	Ayrık çözüm tekniği iterasyon adımları	17
Şekil 3.2	Birleştirilmiş çözüm tekniği iterasyon adımları	18
Şekil 3.3	Hücre modelleri	22
Şekil 3.4	Yakın duvar çözüm modelleri	23
Şekil 4.1	Problem 1 için tasarlanan çözüm ağında kullanılan sınır şartları ve koordinatlar	26
Şekil 4.2	Problem 1'e ait duvar yaklaşım modelli çözüm ağı	26
Şekil 4.3	Problem 1 için yakınsama eğrileri	28
Şekil 4.4	Problem 1'deki $F(\xi)$, $G(\xi)$, $J(\xi)$ fonksiyonları için çözüm sonuçlarının Schlichting(1968)'in çözümleri ile karşılaştırılması	29
Şekil 4.5	Boru içerisindeki akımın çözümlenmesi için tasarlanan çözüm ağında kullanılan sınır şartları ve koordinatlar	30
Şekil 4.6	Problem 2 için tasarlanan çözüm ağında kullanılan sınır şartları ve koordinatlar	31
Şekil 4.7	Problem 2'de $H/D=2$ için çözüm ağı	31
Şekil 4.8	Problem 2'de $H/D=6$ için çözüm ağı	31
Şekil 4.9	Problem 2'de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=0$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi	34
Şekil 4.10	Problem 2'de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=0.5$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi	34
Şekil 4.11	Problem 2'de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=1$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi	35
Şekil 4.12	Problem 2'de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=1.5$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi	35
Şekil 4.13	Problem 2'de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=2$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi	36
Şekil 4.14	Problem 2'de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=2.5$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi	36
Şekil 4.15	Problem 2'de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=3$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi	37
Şekil 4.16	Problem 2'de SST $K-\omega$ türbülans modeline göre $H/D=2$, $Re=23000$ için farklı sabit yarıçap doğrularında boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişim grafiği	37
Şekil 4.17	Problem 2'de SST $K-\omega$ türbülans modeline göre $H/D=6$, $Re=23000$ için farklı sabit yarıçap doğrularında boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişim grafiği	38
Şekil 4.18	Problem 2'de SST $k-\omega$ türbülans modeline göre $H/D=2$, $Re=23000$ için hız konturları	39

Şekil 4.19	Problem 2’de SST k- ω türbülans modeline göre H/D=6, Re=23000 için hız konturları	39
Şekil 4.20	Problem 2’de SST K- ω türbülans modeline göre H/D=2, Re=70000 için farklı sabit yarıçap doğrularında boyutsuz bileşke hızın(U/U_b) aksenal yönde değişim grafiği	40
Şekil 4.21	Problem 2’de SST K- ω türbülans modeline göre H/D=6, Re=70000 için farklı sabit yarıçap doğrularında boyutsuz bileşke hızın(U/U_b) aksenal yönde değişim grafiği	40
Şekil 4.22	Problem 2’de SST k- ω türbülans modeline göre H/D=2, Re=70000 için r/D=0, r/D=0.5, r/D=1, r/D=1.5, r/D=2, r/D=2.5, r/D=3 sabit yarıçap doğrularında hız vektörleri	41
Şekil 4.23	Problem 2’de H/D=2, Re=23000 için SST k- ω modeline göre disk üzerinde radyal doğrultuda Nusselt sayısı değişim grafiğinin Cooper(1992) deneyi ile karşılaştırılması	42
Şekil 4.24	Problem 2’de H/D=6, Re=23000 için SST k- ω ve RNG k- ϵ türbülans modellerine göre bulunan radyal doğrultuda disk yüzeyindeki Nusselt sayısı değerlerinin daha önce yapılmış deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.25	Problem 3 için oluşturulmuş çözüm ağı.....	44
Şekil 4.26	Problem 3 için birinci aşamada boru probleminin çözülmesi ile elde edilmiş tam gelişmiş akım profili	46
Şekil 4.27	Problem 3’te $\Omega=167.6$ rad/s ve r/D=5.8 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen çözüm sonuçlarının Minagawa-Obi (2003) deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması	47
Şekil 4.28	Problem 3’te farklı dönme hızları için z/D=0.032’deki boyutsuz radyal hızların(V_r/U_b) radyal yönde değişim grafiği	48
Şekil 4.29	Problem 3’te H/D=5, Re=14000 ve $\Omega=0$ rad/s için radyal hız (V_r) konturları.....	49
Şekil 4.30	Problem 3’te H/D=5, Re=14000 ve $\Omega=167.6$ rad/s için radyal hız (V_r) konturları.....	49
Şekil 4.31	Problem 3’te boyutsuz radyal hızların (V_r/U_b) farklı dönme hızları için r/D=5.8 sabit yarıçap doğrusu boyunca aksenal yönde değişim grafiği	50
Şekil 4.32	Problem 3’te H/D=5, r/D=5.8, $\Omega =167.6$ rad/s için Reynolds gerilimlerinin aksenal yönde değişim grafiği.....	51
Şekil 5.1	Çarpan jet akımı bölgeleri.....	53

ÖNSÖZ

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak, akışkanlar dinamiği problemlerinin sayısal olarak çözümlenmesi konusu da gelişmiş ve yaygınlaşmıştır. Sayısal yöntemlerin kullanılması ile akışkanlar dinamiği denklemleri, bilgisayar aracılığı ile hızlı bir şekilde sayısal olarak çözülmekte ve çeşitli durumlar için detaylı incelemeler yapılabilmektedir. Teknoloji üretiminde rekabetin, tamamen hızlı bilgi üretmeye dayalı olduğu günümüzde, endüstriyel kuruluşlar bünyelerinde, gelişmiş bilgisayar sistemleri oluşturmakta ve çeşitli firmalar tarafından geliştirilmiş olan FLUENT ve benzeri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programlarını kullanarak teknoloji üretimindeki hızlı rekabet ortamına ayak uydurmaktadırlar.

Bu tez çalışmasında da mühendislikte geniş bir uygulama alanına sahip akışkanlar dinamiğinin en önemli konularından dönen disk yüzeyine çarpan jet akımı, dönen disk yüzeyine yakın laminar akım ve hareketsiz disk yüzeyine çarpan jet akımı problemleri FLUENT programı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir.

Tez çalışmasını yöneten, tüm tecrübesi ve deneyimlerini paylaşan, olumlu eleştirileri ve önerileri ile çalışmalarına büyük katkısı bulunan ve bana güncel bir çalışma alanında tez çalışması yapma imkanı sağlayan değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Oktay ÖZCAN'a gösterdikleri destekten ve anlayıştan ötürü ailem, çalışma arkadaşlarım ve dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Bu tez çalışmasında dönen disk yüzeyine çarpan jet akımı ile bu akımın daha kolay anlaşılması için jet olmayan durumda dönen disk yüzeyine yakın laminar akım ve hareketsiz disk yüzeyine çarpan jet akımı problemleri sayısal olarak incelenmiştir.

Sayısal çalışmalar kısmında üç ayrı problem, çözüm ağı GAMBİT 2.2.30 programında tasarlandıktan sonra sonlu hacimler metodunu kullanan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programlarından FLUENT 6.2.16 kullanılarak çözülmüştür. HAD analizlerinin temelleri üstünde durulmuş ve kullanılan sayısal çözüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlara göre hız ve ısı transferi incelemeleri yapılmıştır. Değişik sınır şartlarında hız büyüklüklerinin, Reynolds gerilimlerinin ve Nusselt sayısının boyutsuz parametreler ile değişimleri incelenmiştir.

Farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar Matlab programına aktararak, literatürde benzer konularda daha önce yapılmış sayısal ve deneysel çalışmalarla, grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Grafikler üzerinden yapılan karşılaştırmalarda sonuçların birbirine yakın oluşu HAD hesaplamalarında kullanılan model, metod, ve algoritma seçimlerinin uygun olduklarını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Çarpan jet, Dönen disk, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği(HAD)

ABSTRACT

In this thesis impinging jet flow onto a rotating disc problem and to understand this flow easier laminar flow near a rotating disc without jet and impinging jet flow onto a stationary disc problems were examined numerically.

Three different problems were solved by using Computational Fluid Dynamics (CFD) packet program FLUENT 6.2.16 which is using finite volume method, after their solution areas and meshes designed in GAMBIT 2.2.30 program. Basics of CFD analysis were emphasized and numerical solution methods used by software were explained. Heat transfer and flow field results are discussed in terms of the velocity magnitude, Reynolds stresses and Nusselt number.

Finally numerical results obtained by different turbulent models were processed by MATLAB and compared by graphics with previous studies and experimental datas in literature. According to the comparison with graphics very close results showed that the choice of the models, methods and algorithms which were used in CFD computations were appropriate.

Keywords: Impinging jets, Rotating disc, Computational fluid dynamics (CFD)

1.GİRİŞ

Jet akışı aerodinamiğin en temel ve en önemli konularından biridir ve mühendislikte geniş bir uygulama alanına sahiptir. Jetler ısı ve kütle transferini arttırmak için bir çok endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Hava jetleri yüksek sıcaklıkta çalışan gaz türbinleri, kağıt, tekstil ve cam sanayinde, metal ısı işlemlerinde, elektriksel ve elektronik devrelerde sıkça kullanılmaktadır.

Türbülanslı jetler birçok nümerik ve deneysel çalışmanın konusu olmuştur. Türbülanslı akışkan hareketinde, akışı oluşturan büyüklüklerin zaman ve konuma göre düzensiz değişimler göstermesi nedeniyle teorik analizleri oldukça zordur. Olayların fiziksel olarak açıklanması genellikle deneysel çalışmalar yardımı ile yapılmaktadır. Ayrıca hesaplama metodlarının ve teorisinin geliştirilmesi ve desteklenmesi açısından da deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır. İlk deneysel çalışmalarda ortalama basınç ve hızlar araştırılmıştır. Daha sonraları sıcak tel anomometresi kullanılarak zamana bağımlı ölçümler de yapılmaya başlanmıştır. Son zamanlarda ise lazer tekniği kullanılarak daha detaylı deneyler yapılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında üç ayrı problem incelenmiştir.“Dönen Disk Yüzeyine Çarpan Jet Akımı” probleminin daha iyi incelenebilmesi ve akım karakteristiklerinin anlaşılabilmesi için öncelikle “Jet Olmayan Durumda Dönen Disk Yüzeyine Yakın Laminer Akım” ve “Hareketsiz Disk Yüzeyine Çarpan Jet Akımı” üzerinde çalışmalar yapılmıştır. 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 6.2.16 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 (pre-processor) 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 kullanılarak sayısal analiz

gerçekleştirilmiştir. Üç ayrı problem için yapılan sayısal çalışmalar ve çözüm algoritmaları ayrı ayrı bölümler halinde sunulmuştur.

Buradan elde edilen sayısal sonuçlar MATLAB 7.0 programı yardımıyla grafiklere dönüştürülerek literatürde daha önce yapılmış deneysel veya nümerik çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre değişik koşullar için radyal hız, aksenal hız, bileşke hız değişimi, Reynolds gerilmeleri ve Nusselt sayısı incelemeleri yapılmış problem çözümünde kullanılan farklı türbülans modelleri karşılaştırılmıştır.

1.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Nedir?

Akışkanlar dinamiği bilimi, sıvılar için hidrodinamik, gazlar için aerodinamik adlarını alır. Teorik, deneysel ve sayısal çalışmalar ile hareket halinde bulunan akışkanın davranışını, çevresi ile olan etkileşimini inceler. Teorik çalışmalar çok kısıtlı durumlar için yapılabildiğinden günümüzde büyük ölçüde terkedilmiş ve sayısal çalışmalara ağırlık verilmiştir. Deneysel çalışmalar ise hesap sonuçlarının test edilmesinde çok önemli rol oynamaktadır.

1950’li yıllardan beri büyük bir hızla gelişen bilgisayarların hız ve bellek kapasitelerindeki artışa bağlı olarak akışkanlar dinamiği problemlerinin sayısal olarak çözümlenmesi konusu da gelişmiş ve yaygınlaşmıştır. Sayısal yöntemlerin kullanılması ile analitik olarak çözülemeyen akışkanlar dinamiği denklemleri, sayısal çözüm teknikleri kullanılarak çözülmekte ve çeşitli durumlar için detaylı incelemeler yapılmaktadır. Akışkanlar dinamiği problemlerinin bilgisayar yardımıyla sayısal yöntemlerle çözülmesi konusu ‘Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)’ adıyla yeni bir çalışma alanı doğmasına neden olmuştur. Literatürde İngilizce anlamının baş harfleri kullanılarak CFD (Computational Fluid Dynamics) olarak da karşımıza çıkan hesaplamalı akış dinamiği, başka bir deyişle akışkan bir nesnenin dinamiği üstüne çalışmamıza olanak sağlayan hesaplama teknolojisidir.

Tasarım ve geliştirme zamanının kısalması; deneysel model testlerinde oluşturulamayan akış koşullarının benzeşiminin kolayca yapılabilmesi; daha detaylı ve anlaşılır bilgi vermesi; daha az enerji tüketiminin ortaya çıkması günümüzde akışkanlar dinamiği çalışmalarında HAD kullanımını oldukça yaygınlaştırmış deneysel ve teorik çalışmaların önüne geçirmiştir.

Akışkan ile etkileşim halinde olan her mühendislik problemi büyük ölçüde HAD kapsamına girmektedir. HAD çalışmalarında, bilgisayar yardımıyla akış simülasyonu yapılacak olan alan ve bu alanda meydana gelen etkileşimler detaylı olarak görülebilmektedir. HAD kullanarak

sadece akışkanın davranışı üstüne öngörülerin yanında ısı transferi, kütle transferi, faz değişimi (donma, buharlaşma), kimyasal reaksiyonlar (yanma), mekanik hareketler (zorlanmış dönmeler), katı yapılarıyla ilgili deformasyon (rüzgarda bayrak ve direğin davranışları) incelenebilir.

Herhangi bir HAD analizi genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar işlem sırasına göre aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Katı model ve sayısal ağ tabakasının oluşturulması
- Sınır şartlarının ve çözüm ayarlarının tanımlanması
- Sonuçların yorumlanması

Sisteme dışarıdan dahil edilen bir CAD paketinde bulunan veya yeni tasarlanan bir geometri programı HAD prosesinin başlangıcıdır. Bir HAD analizinin yapılabilmesi için akış hacminin sonlu sayıda ufak parçalara (hücrelere) bölünmesi gerekmektedir. İki boyutlu sayısal çözüm alanında bu hücreler, alan; üç boyutlu çözüm alanında ise hacim olmaktadır. 2 veya 3 boyutlu CAD çalışılacak çerçeveyi oluşturur ve bu çerçeve içine bir ağ tasarlanır. Bu ağ veya ızgara, küçük parçacıklardan meydana gelen bir yapıdır ve bu yapı akışkanın içinden geçeceği boşluğu doldurur. Bu işleme sayısal ağ oluşturma işlemi, sonucunda oluşan modele de çözüm ağı veya sayısal model denir. Bu parçaların (elemanlar) sayısı ne kadar büyük ise sonuçlar o kadar hassas olur. Ancak bu parçaların sayısı analiz süresine de doğrudan etki eder. Bu nedenle yüksek gradyanların olduğu bölgelerde yoğun diğer bölgelere daha seyrek elemanlar kullanılarak optimum bir sayı bulunmak zorundadır. Sayısal ağ tabakası oluşturulduktan sonra sıra sınır şartlarının tanımlanmasına ve çözüm ayarlarının yapılmasına gelir. Burada dikkat edilmesi gereken birçok husus vardır. Bunlardan başlıcaları sayısal model sınırlarında kullanılacak sınır şartları ve arka planda yapılacak hesaplamalar için kullanılacak sayısal yöntemlerdir. Daha sonra bir HAD kodu akışkanın belirleyici Navier-Stokes denklemlerini (Navier-Stokes Denklemleri, akışkanların tanımını yapan temel denklemlerdir) ağın içindeki tüm hücrelere uyarlar.

Bilgisayar prosesi tüm hücreler arasında çaprazlama haberleşip bilgi iletir ve problemi çözene değin bunu tekrarlayıcı olarak yapar.

Bu işlemlerden sonra tüm akışkan etki alanının ve her bir hücre yapısının içinde korunum denklemleri dengelenir. Hesaplama tamamlandığında, HAD çözümü, incelenen parçanın yüzeyinde ve yüzeye yakın alanlarda oluşan tüm basınçları ve hızları içerir ve bu genelde milyonlarca sayıdan oluşur. Bu problemlerin çözümünde kullanılan nümerik metodlarla elde edilen çözümler, bize çalışma yapılan konuda iyi bir fikir verebilmektedir.

1.2 HAD Analizlerinin Planlanması ve Çözüm Adımları

1.2.1 HAD Analizlerinin Planlanması

Bu tez çalışmasında hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümlenmesinde çözücü program olarak FLUENT kullanılmıştır. Bir problemi FLUENT'te çözmeye başlamadan önce aşağıdaki adımlarla kararlar alınmalıdır.

- 1) **Modelleme Hedeflerinin Açıklanması** : HAD modelinden ne tip çözümler istenmekte ve bu çözümler nasıl kullanılacak? Modelden ne kadar doğruluk derecesi bekleniyor?
- 2) **Çözüm Modelinin 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 bu 3 boyutlu bir model mi? Ne tür bir ağ yapısı bu problem için en idealdir?
- 3) **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?
- 4) **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 yolla oluşturulacak modelin başarısı artacaktır.

1.2.2 Problem Çözme Adımları

Çözülecek problemin önemli özellikleri belirlenip analizi yapıldıktan sonra aşağıdaki temel prosedürü izleyerek çözümü yapabilirsiniz :

- Model geometrisi ve ağ yapısını oluşturun.
- Çözücüyü (FLUENT programı) 2B(İki boyutlu) veya 3B(3 Boyutlu) akıma göre başlatın.
- Ağ yapısını çözücüye girin.
- Ağ yapısını kontrol edin
- Çözücü formülasyonunu seçin.
- Çözülecek basit eşitlikleri seçin : Laminer ya da türbülanslı, kimyasal reaksiyonlar , ısı transferi modelleri vb. ek modellerinde belirtilmesi gereklidir.
- Materyal özelliklerini belirtin.
- Sınır şartlarını belirtin.
- Çözüm kontrol parametrelerini ayarlayın.
- Akış alanını ayarlayın ve çözücüyü başlatın.
- Çözümü hesaplatın
- Sonuçları gözden geçirin.
- Sonuçları kaydedin.
- Eğer gerekirse, ağ yapısını iyileştirmeye çalışın ya da nümerik veya fiziksel model

üzerinde revizyonlar yapın.

Birinci adım için FLUENT programının dışında bir geometri modelleyicisi ve ağ oluşturucusu gerekmektedir. GAMBIT bunun için uygun bir programdır. Ayrıca TGrid ile yüzey ağ yapılarından hacimsel ağ yapısı oluşturabilirsiniz. İkinci adım için oluşturulan çözüm ağına göre başlangıç kısmında FLUENT'te 2B ya da 3B olarak oturum açılır.

İzlenecek çözüm adımları için Şekil 1.1 deki gibi genel bir şema oluşturulabilir.

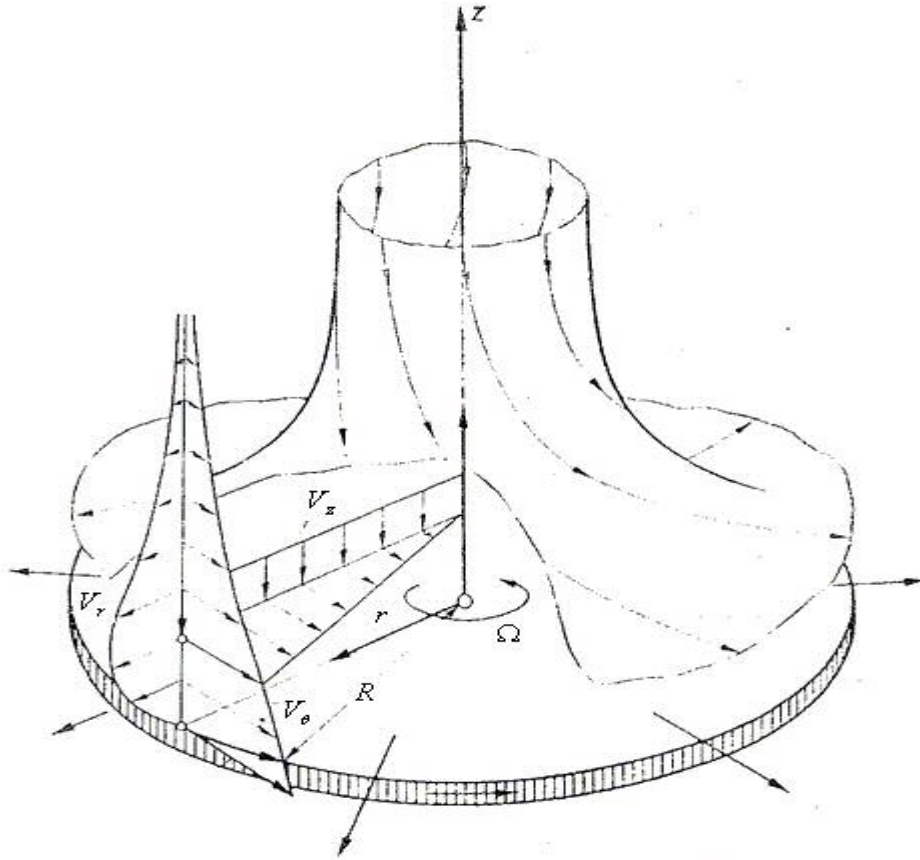
Ağ yapısını girin	File menüsü
Ağ yapısını kontrol edin	Grid menüsü
Çözücü formülasyonunu seçin	Define menüsü
Basit eşitlikleri seçin	Define menüsü
Materyal özelliklerini seçin	Define menüsü
Sınır şartlarını belirleyin	Define menüsü
Çözüm kontrol parametreleri	Solve menüsü
Çözüm başlangıcı ve yakınsama ayarları	Solve menüsü
Çözümü hesaplatın	Solve menüsü
Sonucu gözden geçirin	Display/Plot/Report menüleri
Sonuçları save'leyin	File menüsü
Ağ yapısı revizyonları	Adapt menüsü

Şekil 1.1 FLUENT programında izlenecek çözüm adımları için genel bir şema

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Dönen disk yüzeyine çarpan jet akımının daha iyi incelenebilmesi ve akım karakteristiklerinin anlaşılabilmesi için öncelikle jetsiz dönen disk yüzeyine yakın laminar akım ve hareketsiz diske çarpan jet akımı üzerinde çalışmalar yapılmış, literatürde ilgili konularda daha önce yapılmış deneysel ve nümerik çalışmalar araştırılmıştır.

Schlichting(1968), Navier-Stokes denklemlerini kullanarak dönen disk yüzeyine yakın laminar akımı incelemiştir. Navier-Stokes denklemleri kullanılarak elde edilen tam çözümlerden biri de, kendisine dik bir eksen etrafında uniform bir açısal hızla normalde durgun bir ortam içerisinde dönen disk yüzeyine yakın laminar akımdır. Diske yakın tabaka sürtünmenin etkisi ile disk tarafından taşınır ve merkezci kuvvetlerin etkisi ile dışa doğru atılır. Bunun sonucu olarak bu oluşumu dengeleyen yukarıdan aşağı doğru eksenel yönde dengeleyici bir akım oluşur. Şekil 2.1 de diskin z eksenini etrafında dönmesiyle oluşan bu hareketlenmenin 3 boyutlu görünümü verilmektedir.



Şekil 2.1 Dönen disk yüzeyine yakın akımın 3 boyutlu şematik gösterimi.

Şekilde radyal yön(r), teğetsel yön (θ) ve eksenel yön (z) ile sırasıyla bunlara bağlı hız bileşenleri V_r, V_θ, V_z gösterilmiştir.

Schlichting (1968), hesaplamalarını sonsuz uzunlukta yarıçapa sahip dönen bir disk için yapmıştır. Kenar etkilerinin ihmal edilmesi halinde bu sonuçları belli çaplı ($D=2r$) disk için genişletmek daha kolay olacaktır.

Problem dönme eksenine göre simetri olması nedeniyle Navier-Stokes denklemlerinin silindirik koordinatlarda düzenlenmiş hallerini kullanmıştır.(Sıkışmaz, daimi akım) Momentum denklemlerinin r, θ , z yönlerindeki bileşenleri ve süreklilik denklemi laminar akımda aşağıdaki denklemlerle verilir.

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V_r}{r} \right) + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right\}, \quad (2.1)$$

$$V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} = \nu \left\{ \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V_\theta}{r} \right) + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right\}, \quad (2.2)$$

$$V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right\}, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

Duvarda kayma koşulunun olmadığı kabulü (2.5) ve (2.6) daki sınır şartlarını verir.

$$z = 0: \quad V_r = 0 \quad V_\theta = r\Omega \quad V_z = 0 \quad (2.5)$$

$$z = \infty: \quad V_r = 0 \quad V_\theta = 0 \quad (2.6)$$

Burada Ω sabit olan disk açısal hızını belirtir. Schlichting (1968) çalışmasına disk tarafından taşınan akışkan tabakanın kalınlığının (δ) hesaplamasıyla başlamıştır. Sürtünmenin etkisiyle disk ile birlikte dönen akışkan tabakanın kalınlığının viskozite ile orantılı olarak artacağı açıktır ve bu daha önce bu konuda yapılmış çalışmalarla doğrulanmıştır. Dönen tabakada eksenden r kadar uzakta bulunan akışkan parçacığına birim hacimde etki eden merkezcil kuvvet $\rho r \Omega^2$ 'ye eşittir. Eğer hacim için yüzey alanını $dr.ds$, yüksekliği de δ ile ifade edersek merkezcil kuvvet $\rho r \Omega^2 \delta dr ds$ halini alır. Aynı akışkan parçacığına akışkanın kaydığı yönde teğetsel hız ile θ açısı yapan τ_w kayma gerilmeleri de etki eder. Kayma gerilmelerinin radyal

bileşeni merkezci kuvvetlere eşit olmak zorundadır. Buradan (2.7) eşitliği yazılabilir.

$$\tau_w \sin \theta dr ds = \rho r \Omega^2 \delta dr ds \quad (2.7)$$

$$\tau_w \sin \theta = \rho r \omega^2 \delta \quad (2.8)$$

Öteki taraftan disk üzerinde kayma gerilmelerinin teğetsel bileşeni, teğetsel hızların hız gradyanları ile orantılı olmak zorundadır.

$$\tau_w \cos \theta \approx \mu r \Omega / \delta \quad (2.9)$$

İki orantıdan τ_w ler sadeleştirilirse (2.10) daki orantı elde edilmiş olur.

$$\delta^2 \approx \frac{\nu}{\Omega} \tan \theta \quad (2.10)$$

Disk üzerindeki akımın kayma yönünün yarıçaptan bağımsız olduğu düşünülürse disk tarafından taşınan tabaka kalınlığı (δ) için (2.11) deki orantı yazılabilir.

$$\delta \approx \sqrt{\frac{\nu}{\Omega}} \quad (2.11)$$

(2.1), (2.2), (2.3), (2.4) denklem sisteminin daha kolay integralini alabilmek için diskten uzaklığı ifade eden boyutsuz bir ifade kullanılmıştır.

$$\xi = z / \delta \quad (2.12)$$

Akışkan tabaka kalınlığı (δ), (2.11) yardımıyla ifade edilirse (2.13) eşitliği elde edilmiş olur.

$$\xi = z \sqrt{\frac{\Omega}{\nu}} \quad (2.13)$$

Hız bileşenleri ve basınç için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

$$V_r = r \Omega F(\xi) \quad (2.14)$$

$$V_\theta = r \Omega G(\xi) \quad (2.15)$$

$$V_z = \sqrt{\nu \Omega} J(\xi) \quad (2.16)$$

$$p = p(z) = \rho \nu \Omega P(\xi) \quad (2.17)$$

Bu denklükleri (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) denklem sisteminde yerine koyulduğunda F-radyal,

G-teğetsel, J-eksenel ve P-basınç fonksiyonları için dört diferansiyel denklem elde edilmiş olur.

$$2F + J' = 0 \quad (2.18)$$

$$F^2 + F'J - G^2 - F'' = 0 \quad (2.19)$$

$$2FG + JG' - G'' = 0 \quad (2.20)$$

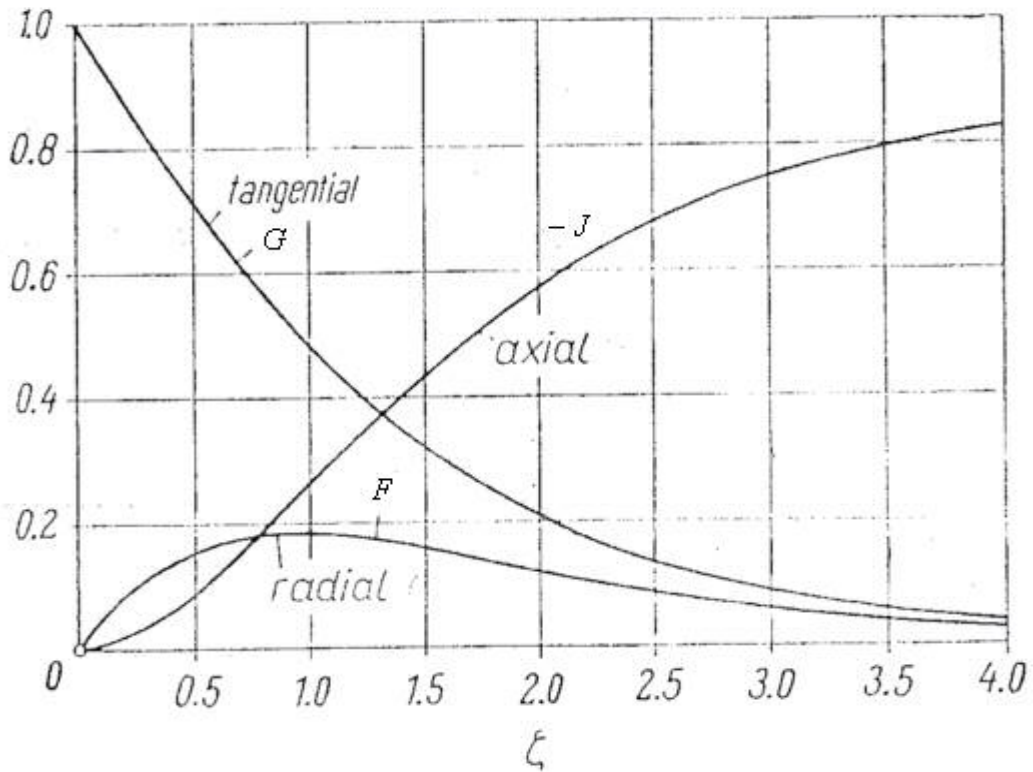
$$P' + JJ' - J'' = 0 \quad (2.21)$$

Sınır koşulları için (2.5) ve (2.6) daki eşitlikler kullanılarak hesaplamalar yapıldığında F, G, J, P fonksiyonları için (2.22) ve (2.23) deki sonuçlar bulunur.

$$\xi = 0 : F = 0 \quad G = 1 \quad J = 0 \quad P = 0 \quad (2.22)$$

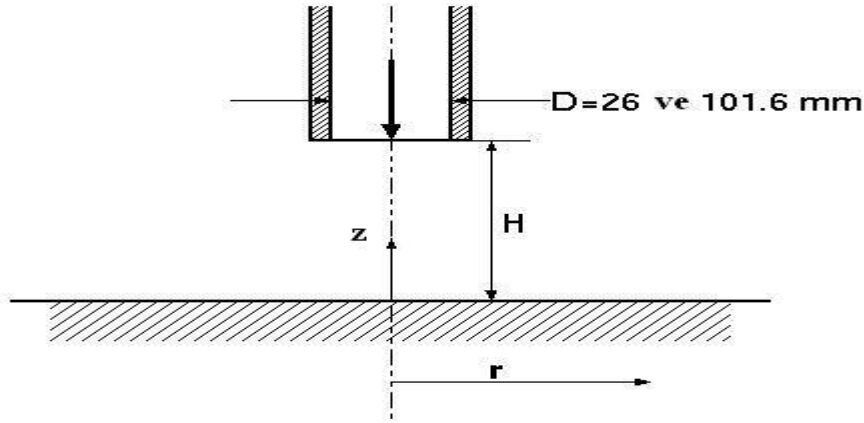
$$\xi = \infty : F = 0 \quad G = 0 \quad (2.23)$$

Denklem sistemleri çözülmüş ve elde edilen sonuçlar grafik haline dönüştürmüştür.



Şekil 2.2 Schlichting(1968)'ın çalışmasına göre dönen bir disk üzerindeki akım için diskten boyutsuz ξ uzaklığına göre F-radyal, G-teğetsel, J-eksenel hız fonksiyonlarının değişim grafiği.

Literatür araştırması yapıldığında hareketsiz bir disk yüzeyine dik olarak çarpan jet akımlarıyla ilgili birçok araştırma yapıldığı ortaya çıkmıştır. Bunlardan biri de Cooper(1992)'ın yaptığı deneysel çalışmadır. Deneyin yapılmasındaki amaç tam gelişmiş akım profilinin sağlanabilmesi için yeterince uzun seçilmiş bir borunun çıkış ağzından, boru iç çapının 2 ile 10 katı arası uzaklıkta bulunan disk yüzeyine çarpan hava jeti akımlarının değişik Reynolds sayıları kullanarak incelenmesidir. Boru iç çapı için biri 26mm (1.025 inch) ve diğeri 101.6 mm (4 inch) olmak üzere iki farklı çap, Reynolds sayısı içinde 2.3×10^4 ve 7×10^4 olmak üzere iki farklı değer kullanılmıştır (Cooper vd., 1993; Craft vd., 1993).



Şekil 2.3 Hareketsiz disk yüzeyine çarpan jet akımı deneyinin şematik gösterimi (Cooper,1992)

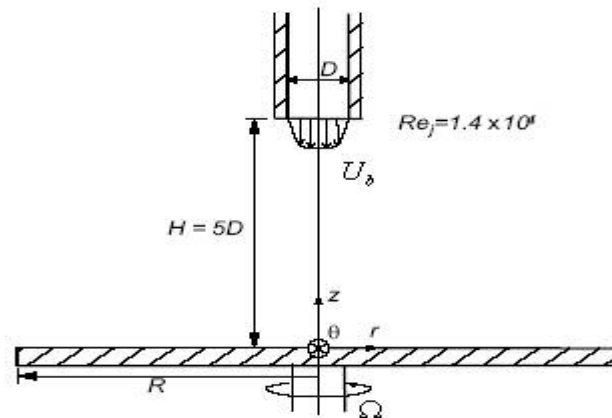
Sıfır gradyan ve benzeri koşullar nedeniyle incelenen alanda hata oluşumunu engellemek için disk yarıçapı yeterince büyük seçilmiştir ($r/D=8$ veya daha büyük). Yapılan ölçümler sonucunda hız büyüklüklerinin radyal ve aksenal doğrultuda değişimlerini, ısı transferinde boyutsuz Nusselt sayısının disk yüzeyinde radyal(r) doğrultuda değişimini gösteren grafikler elde edilmiştir (www.ercofac.com).

Mühendislikte yüksek sıcaklıklara ulaşan sistemlerin soğutulması probleminin verimli ve amaca uygun şekilde çözülebilmesi için sistemin yapısına uygun olan çok çeşitli soğutma yöntemleri mevcuttur. Bu çözümlerden biri de jet yardımıyla soğutma işlemidir. Bu yöntemin temeli bir veya daha fazla sayıdaki borudan çıkan jet akımlarının soğutulması istenen yüzeye çarptırılarak sıcaklığın düşmesi temeline dayanmaktadır. Birçok mühendislik alanında uygulanan bu yöntem ve verimliliğine etki eden parametrelerde araştırmacıların devamlı merak konusu olmuştur. Konu ile ilgili ilk deneysel çalışmalar 1960'lerde başlamıştır. Gelişen optik teknik ve ölçüm aletleri ile beraber yapılan daha detaylı çalışmalarla konu hala güncelliğini korumaktadır. Değişik araştırmacılar tarafından duyarlı deneyler yapılmasına

rağmen çıkış ağzı geometrisi, çarpılan düzlem yüzeyi özellikleri, termal sınır koşulları, deney tekniği gibi nedenlerle ısı transferinde deneyler arası sonuçlar önemli farklılıklar göstermektedir. Baughn ve Shimizu(1989) $Re=23000$ ve $H/D=6$ koşulunda disk yüzeyinde nusselt sayısının değişimini incelemek için bir deney yapmışlardır. Sıvı kristalleri ile uniform bir şekilde ısıtılan düzgün sıcaklık dağılımına sahip bir plaka kullanılmıştır. Plakaya çarparak soğutan akım tam gelişmiş akım profilinin elde edilebilmesi için çapının 72 katı uzunluğunda boru içerisinden geçirilmiştir. Baughn (1991) aynı deney koşulları ve aparatlarla çevre koşullarının etkisi üzerinde çalışmak için deneyi tekrarlamış ve sonuçların farklı olduğunu gözlemlemiştir. Yan (1993) daha gelişmiş bir teknikle ölçümler yapmıştır. Lytle ve Webb (1994) kızılötesi tekniğini kullanarak deney üstünde çalışmışlardır. Benzer bir çalışmayı da Colucci ve Viskanta (1996) yapmışlardır.(Behnia vd,1999)

Jet akımları ile ilgili yapılan literatür araştırması bize dönen disk yüzeyine çarpan jet akımıyla ilgili çalışmaların hareketsiz diske oranla çok daha az olduğunu göstermiştir. Fakat hareketsiz disk üzerine çarpan jet akımının karakteristik özelliklerinin yapılan nümerik ve deneysel çalışmalar ile birlikte hemen hemen anlaşılabilir hale gelmesi son zamanlarda dönme hareketi ile birlikte daha merak uyandırıcı hale gelen bu konuyu güncel kılmıştır.

Dönme hareketinin çarpan jet akımına etkilerini incelemek için Minagawa ve Obi (2003) deneysel bir çalışma yapmışlardır. Tam gelişmiş akım profili, 25 mm çaplı ve uzunluğu çapının 50 katından fazla bir boru kullanılarak sağlanmıştır. Disk yarıçapı 150 mm (6D), boru çıkışındaki ortalama hız $U_b=8,7$ m/s ($Re_j=1.45 \times 10^4$) ve boru çıkış ağzının diskten yüksekliği 125 mm (5D) dir.



Şekil 2.4 Dönen disk yüzeyine çarpan jet akımı deneyinin şematik gösterimi (Minagawa ve Obi ,2003)

Deney $0 \leq \Omega \leq 167.6$ rad/s aralığındaki farklı dönme hızları için yapılmıştır. Radyal hız büyüklüklerinin bu dönme hızları ile aksenal ve radyal doğrultuda değişimleri ve Reynolds gerilmeleri incelenmiştir.

3. SAYISAL ÇÖZÜMLEME YÖNTEMLERİ

3.1 Yöneten Denklemler

Bu çalışmada sayısal çözümleme 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 kullanır.

FLUENT sıkıştırılmaz (düşük sesaltı), orta sıkıştırılabilir (transonik) ve yüksek sıkıştırılabilir (sesüstü 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'deki fiziksel modellerin zenginliği, laminer, geçiş ve türbülanslı akışların, ısı transferinin, kimyasal tepkimelerin, çokfazlı akışların ve diğer olguların sayısal ağ esnekliği ve çözüm tabanlı ağ uyarlaması ile hassas çözülmesine olanak sağlar.

Duvar yakını akışları 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 ya da sıkıştırılabilirliği içeren akışlar için ayrıca enerji denklemi çözülmektedir. İncelenen üç problemde aksenal yönden simetriye sahip olduğundan modelleme incelenmek istenen alanın yarısı için yapılmış ve silindirik koordinatlar kullanılmıştır. Silindirik koordinatlar için zaman ortalaması alınmış Navier-Stokes denklemleri (3.1) ile (3.5) arasındaki eşitliklerle gösterilmiştir. Momentum denklemlerinde ağırlık kuvveti ihmal edilmektedir.

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Radyal Momentum Denklemi:

$$\rho \left(V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) = \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) \right) + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right] - \frac{V_r}{r^2} - \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(-\overline{\rho v_r^2} \right) - \frac{\left(-\overline{\rho v_\theta^2} \right)}{r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\overline{\rho v_r v_z} \right) \quad (3.2)$$

Teğetsel Momentum Denklemi:

$$\rho \left(V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) = \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_\theta) \right) + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right] - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(-\overline{\rho v_r v_\theta} \right) + \frac{\left(-\overline{\rho v_r v_\theta} \right)}{r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\overline{\rho v_\theta v_z} \right) \quad (3.3)$$

Eksenel Momentum Denklemi:

$$\rho \left(V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left(-\overline{\rho v_r v_z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\overline{\rho v_z^2} \right) \quad (3.4)$$

Enerji Denklemi:

$$\rho c_p \left(V_r \frac{\partial T}{\partial r} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \rho c_p \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(-\overline{v_r T'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\overline{v_z T'} \right) \right] \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemlerde Reynolds gerilmeleri sıfır olduğunda laminar akım için geçerli (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) denklemleri elde edilir. Silindirik koordinatlarda Reynolds gerilme bileşenlerine ait eşitliklerde (3.6) ile (3.10) arasında gösterilmiştir.

$$-\overline{\rho v_r^2} = 2\mu_t \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{3} \rho k \quad (3.6)$$

$$-\overline{\rho v_\theta^2} = \mu_t \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{3} \rho k \quad (3.7)$$

$$-\overline{\rho v_r v_\theta} = \mu_t r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V_\theta}{r} \right) \quad (3.8)$$

$$-\overline{\rho v_r v_z} = \mu_t \left(\frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \quad (3.9)$$

$$-\overline{\rho v_\theta v_z} = \mu_t \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \quad (3.10)$$

3.2 Ayırıklaştırma ve Yakınsama

Sonlu hacimler yöntemi, çözülecek geometriyi parçalara bölerek bu parçaların her biri için çözüm yapma ve daha sonra bu çözümleri birleştirerek problemin genel çözümünü bulma ilkesine dayanır. Bölge ayırıklaştırması ile sürekli bir ortam, sonlu sayıda düğüm noktalarından oluşmuş bir ağ şeklinde düşünülür. Akış denklemlerinin integrasyonu her kontrol hacminde yapılır ve bu integrasyon her bir kontrol hacmini karakterize eden denklemlerin ortaya çıkmasını sağlar. Her bir kontrol hacmini karakterize eden bu denklemleri daha iyi incelemek için ϕ gibi bir parametre tanımlanırsa, kararlı bir rejimde V gibi herhangi bir kontrol hacmi için akış denklemi (3.12) eşitliğindeki gibi olur. Bu denklem akışkanlar mekaniğinde genel formda süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini karakterize eder.

$$\vec{V} = V_r \vec{e}_r + V_\theta \vec{e}_\theta + V_z \vec{e}_z \quad (3.11)$$

$$\oint \rho \phi \vec{V} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (3.12)$$

Bu denklem hesaplama alanındaki her bir kontrol hacmine veya hücreye uygulanır. Γ_ϕ , ϕ değişkenleri için difüzyon katsayılarını ve S_ϕ ise her bir hacim elemanın kaynak terimini göstermektedir. Genel değişken ϕ ' nin alacağı anlama göre değerler alırlar.

Kontrol hacmi temeli üzerinde her büyüklüğün korunumunu içeren ayırık denklemler elde edilir. FLUENT, birinci mertebe (First Order Upwind), ikinci mertebe (Second Order Upwind), hızlı (QUICK) ve üssel (Power-Law) ayırıklaştırma yöntemlerinin kullanılmasına olanak tanır. Denklem ayırıklaştırılmasında diferansiyel veya integral yapıda olan denklemler düğüm noktalarındaki bilinmeyenleri içeren basit lineer denklemlere dönüştürülür. Akım alanının çözümü için, oluşturulan bu lineer denklem sistemi çözülür. Bütün sayısal yöntemlerin temelinde akış denklemlerinin sayısal olarak çözümünü sağlayacak, diferansiyel denklemlerin lineer denklemlere olan bu dönüşümü yatmaktadır.

Sonlu küçük hacimlere bölünen akış bölgesinde her bir sonlu hacimde her bir değişkene ait lineer formdaki korunum denklemleri (3.13) gibi yazılır;

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.13)$$

Burada a_p merkezdeki hücreye ait katsayısı, a_{nb} komşu hücreye ait katsayısı, b ise üretimin ve sınır şartlarının sabit değerini ifade etmektedir. Lineer denklemlerin tümü iterasyon metodu ile çözülür, her iterasyon sonucunda ϕ değişkeninin değişimi URF (Under Relaxation Factor) düzeltme katsayısı ile kontrol edilir. URF düzeltme katsayısı, denklemlerin lineer olmamasından dolayı ortaya çıkabilecek muhtemel hatalı çözümleri önlemek için ϕ değişkeninin değişimini kontrol eden bir katsayıdır (Kaya, 2004). İterasyon sırasında ϕ değişkeni için Denklem (3.13) deki eşitliğin iki tarafı arasındaki farkların tüm P hücreleri boyunca toplam değeri R^ϕ ile gösterilir.

$$R^\phi = \sum_{\text{Hücreleri}} |\sum a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b - a_p \phi_p| \quad (3.14)$$

Denklem (3.14) ile elde edilen artık değer çoğu zaman herhangi bir karşılaştırma ve oransallaştırma yapılmadığı için yakınsama değerlendirmesi yapmak için yeterli değildir. FLUENT bu artık değeri yakınsama kontrolü için (3.15) eşitliği yardımıyla oransallaştırır.

$$R^\phi = \frac{\sum_{\text{Hücreleri}} |\sum a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b - a_p \phi_p|}{\sum_{\text{Hücreleri}} |a_p \cdot \phi_p|} \quad (3.15)$$

Momentum denklemlerinde paydadaki $a_p \cdot \phi_p$ yerine $a_p \cdot U_p$ gelir. Nümerik çözümün yakınsayıp yakınsamadığı anlamak için kritik değer karşılaştırması yapılır.

$$\frac{R^\phi N_{iterasyon}}{R^\phi M_{iterasyon}} \leq 10^{-3} \quad (3.16)$$

(3.16)'daki R_N^ϕ değeri ϕ değişkeninin N iterasyon sonundaki artık değeridir, paydadaki M değeri ise programda 5 değerine ayarlıdır ve R_5^ϕ ilk beş iterasyondaki ϕ değişkenine ait maksimum artık değerdir. Paydadaki M değeri Solve-Monitors-Residuals komutları ile çıkan arayüzde 'normalize' kutusu aktifleştirilerek değiştirilebilir. Eğer denklem (3.16)'daki boyutsuz artık değerler oranı kritik değerden daha küçük ise yakınsama vardır ve iterasyon durdurulur. Çözümün doğruluğu ve kararlılığı açısından artık değerler oranı en önemli göstergedir. Fluent yakınsama kriterleri enerjinin korunumu denklemi için 10^{-6} değerleri için

10^{-3} tür. Yakınsama kriterleri kullanıcı tarafından değiştirilebilir.

3.3 Tek Hassaslıklı ve Çift Hassaslıklı Çözümler (Single-Precision and Double-Precision Solvers)

Fluent'in bütün bilgisayar platformlarındaki versiyonlarında tek hassasiyetli ya da çift hassasiyetli seçenekleri mevcuttur. Bazı problemlerde tek hassasiyetle yola çıkarak sonuçlar elde edilebilirken bazılarında tek hassasiyet probleme yetmez ve çift hassasiyet gerekir .

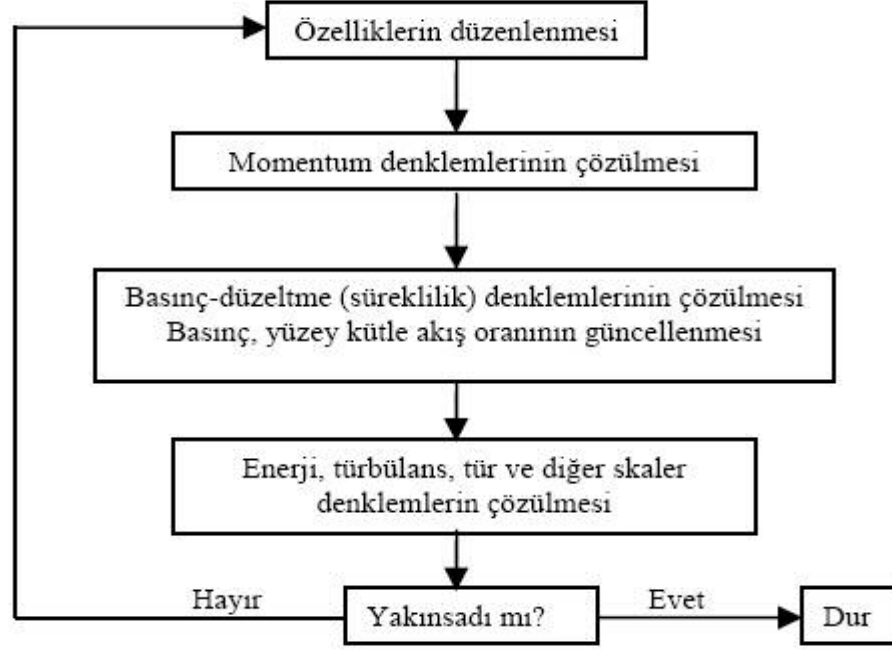
Eğer problem geometrisi kıyaslanamayacak uzunluklar içeriyorsa (ör:çok uzun, çok ince boru), tek kesinlikli hesaplamalar yeterli olamayabilir.

Eğer problem geometrisi otomobil manifoldlarındaki gibi büyük kapalı alanların küçük çapta borularla bağlantısını içeriyorsa, yani iç basınç bazı noktalarda daha büyük olabilecekse, çift kesinlikli çözümler akıştaki basınç farklarını ölçmede tek kesinlikliye göre daha iyi sonuç verecektir.

3.4 Ayrık Çözüm ve Birleştirilmiş Çözüm Yöntemleri

FLUENT, 3 değişik formülasyon çeşidinin kullanılmasına olanak sağlar :

- Ayrık Örtülü Yöntem (Segregated Implicit)
- Birleştirilmiş Örtülü Yöntem (Coupled Implicit)
- Birleştirilmiş Açık Yöntem (Coupled Explicit)



Şekil 3.1 Ayırık çözüm tekniği iterasyon adımları

Bu 3 formülasyon çeşidi, genelde bütün problemlerde kullanılabilirken, bazı özel hallerde aralarından bir tanesi daha iyi sonuç verebilir(daha çabuk). Ayırık ve birleştirilmiş yaklaşımlar süreklilikte, momentumda, enerjide ve bazı kütle geçişi problemlerinde farklılıklar gösterebilirler. Ayırık çözüm yöntemi, süreklilik, enerji ve momentum denklemlerini yakınsama gerçekleştiği zamana kadar ayrı olarak çözer. Birleştirilmiş çözüm yöntemi ise bu denklemlerin eş zamanlı çözülmesi yöntemidir. Açık ve örtülü yöntemler lineerleştirme yöntemleridir. Ayırık ve birleştirilmiş çözüm yöntemlerinde farklı, lineer olmayan denklemler lineerleştirilir. Her hücre için bağımlı değişkene ait denklem sistemi oluşturmak için lineerleştirme gereklidir. Bulunan lineer denklemler güncellenmiş akış alanları elde etmek için çözümlenir. Ayırık çözüm yöntemi sadece örtülü yöntem ile lineerleştirmeye müsaade eder. Örtülü yöntem, her hücredeki bilinmeyen değerleri komşu hücrelerdeki bilinen ve bilinmeyen değerler yardımıyla hesap eder. Her bilinmeyen değere ait birden fazla denklem ortaya çıkar bu denklemler eş zamanlı olarak çözülür. Açık yöntem her hücredeki bilinmeyen değerlerin sadece bilinen değerler yardımıyla bulunmasıdır. Her bir bilinmeyen sadece bir denklemde yer alır ve her hücredeki bilinmeyenler bir an için çözülür.



Şekil 3.2: Birleştirilmiş çözüm tekniği iterasyon adımları

FLUENT açılışta ayrık metoduyla 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 yöntemde enerji ve akış denklemleri birleştirilmekte fakat bu çözücü daha az hafıza gerektirmekle beraber sonuçta daha uzun zamanda ulaşmaktadır.

Bazı fiziksel modeller sadece ayrık çözücülerde desteklenmektedir. Bunlar :

- Birçok fazdan oluşan modeller
- Karışım oranları / PDF yanma modelleri
- Önkarişimli 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 ya da kararlısız oluşuna göre, akışın boyutsal yapısına göre ekstra seçenekler bulunmaktadır.

3.5 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. Akışın karakteristiği, boyutsuz olan Reynolds sayısının değerine bağlıdır. Reynolds sayısının değeri ise akışkanın fiziksel özelliği olan viskozite, akış hızı ve akış ortamını karakterize eden karakteristik uzunluğunun fonksiyonudur. 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 ortalamalı 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 (Barlas ve Aldoğan, 1999). Bu işlem kendine özgü bazı varsayımlar ve yaklaşımlarla yapılır. Türbülans modellemede ek gerilme terimlerinin yeni bağıntılar ile tanımlanması sonucunda, türbülans kinetik enerjisi, bu enerjinin sönümlenme (yayıma) 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 $k - \epsilon$, RNG $k - \epsilon$, SST $k - \omega$ ve Reynolds Stress türbülans modelleri kullanılarak çözümler yapılmıştır.

3.5.1 Standart $k - \epsilon$ Modeli

Standart $k - \epsilon$ modeli; model taşınım denklemlerinin iki türbülans niceliği için (ki bu model için k : türbülansın kinetik enerjisi ve ϵ : türbülans sönümlenmesi olmaktadır) çözüldüğü iki denklemler sınıfına aittir. Model özellikle Reynolds kayma gerilmelerinin daha etkin olduğu sınırlanmış akışlar için iyi performans göstermektedir. Standart $k - \epsilon$ 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 denklemliler 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 popülaritesini açıklamaktadır. Yarı deneysel bir modeldir ve model denklemlerinin elde edilmesi fenomenolojik faktörlere bağlıdır. k-ε modeli sabitlerinin değerleri genel kabul görmüş değerler olup, herhangi özel bir akış için sabitlerin 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 değerlerinin probleme uygun olarak değiştirilmesi ile giderilebilir. Ancak bu tür akışa bağlı ayarlamalar da belirli bir sınıra kadardır.

3.5.2 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 (Arif, 1999).
- 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.

3.5.3 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.

3.5.4 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.

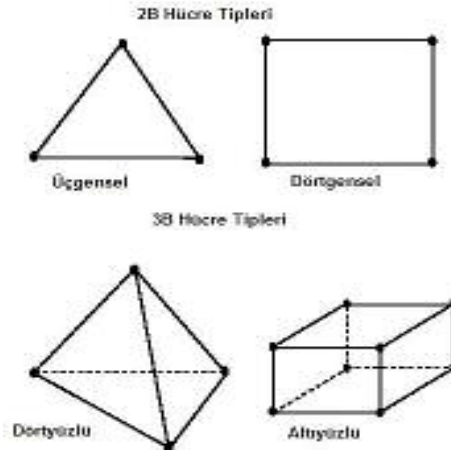
RSM akış çizgisindeki kıvrımları, değişimleri, dönmeleri, girdapları ve gerilme oranlarındaki hızlı değişimleri tek denklemler ve iki denklemler modellere göre daha ince ve ayrıntılı hesaplayarak kompleks akımlar için doğru tahminler verir.

Ek denklemlerin ve hesaplamaların olması RSM'nin her tür akımda daha basit modellerden daha iyi sonuç vereceğini garanti etmez. Fakat ilgilenilen akış özellikleri Reynolds-stresslerdeki anizotropinin bir sonucu ise RSM modelinin kullanılması Reynolds gerilmelerinin sayısal değerlerinin sadece bu modelde görülüyor olmasından dolayı şarttır.

3.6 Ağ Dizayını

Hesap alanı ve çözüm ağının oluşturulması aşamasında kullanılacak ağ yapısının dizaynı çözüm sonuçlarını doğrudan etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Quad/hex (dört kenarlı/altı yüzlü) ya da 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 kombinasyonundan oluşmuş hücreler, 3 boyutlu uygulamalarda dörtyüzlü, altıyüzlü, piramit şeklinde hücreler veya bunların kombinasyonlarından oluşan hücreler

kullanabilir. Bu çeşitler probleme en uygun olacak şekilde seçilmelidir.

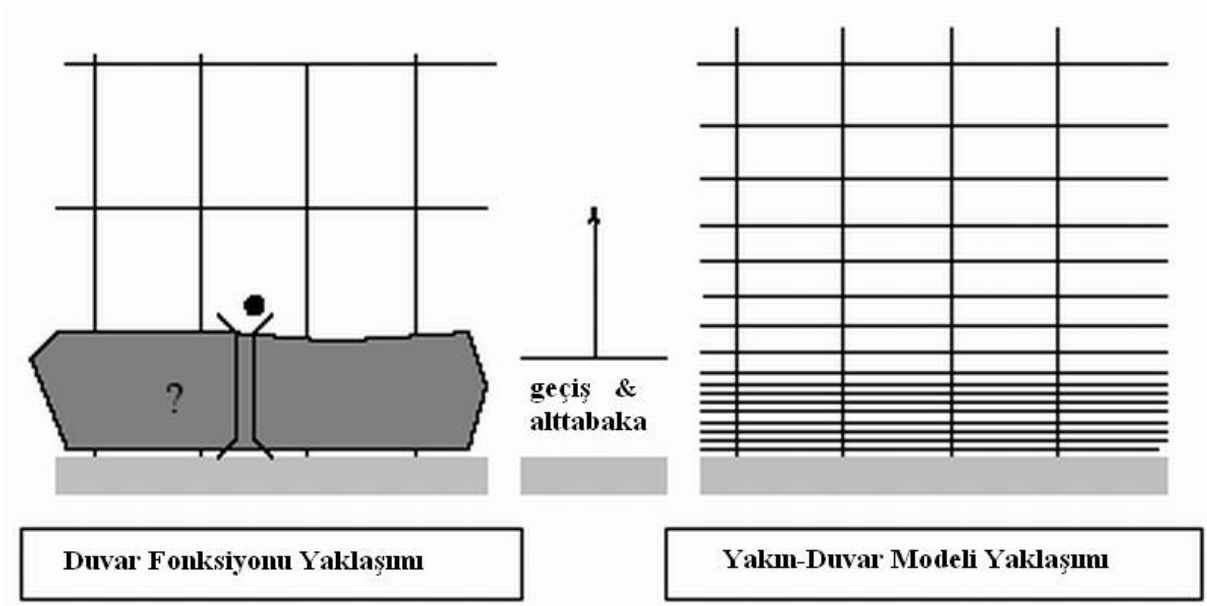


Şekil 3.3 Hücre modelleri

Geometrilere kompleks ise ya da akışlar uzun mesafelerdeyse, genellikle dörtgenel/altyüzlü hücre modellerinden daha az hücre gerektirecek olan üçgenel/dörtüzlü ağ yapısı tercih edilir. Bunun sebebi, üçgenel/dörtüzlü ağ yapısının, hücrelerin akış alanının istenilen bölgelerinde kümelenmesine izin vermesidir, dörtgenel/altyüzlü ağ yapısı hücrelerin gerekli olmadığı, hatta istenmediği bölgelere sarkmasına sebebiyet vermektedir. Dörtgenel/Altyüzlü ağ yapısının diğerlerine göre daha ekonomik olabileceği durumlar da olur. Bu gibi durumlarda bu modeller, üçgenel/dörtüzlü modellerden daha fazla yüzey oranı sağlayacaklardır. Üçgenel/Dörtüzlü modellerde yüzey oranı arttırmak ise yüzeyin eğriliğini değiştirecektir ki bu durum hassaslığa ve bir noktada kesişime engel olacağından istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, eğer geometriye uyan bir akışımız varsa ve geometrimiz nispeten basitse, yüksek yüzey oranına sahip dörtgenel/altyüzlü hücreleri kullanabiliriz. Bu sayede üçgenel/dörtüzlü modelden daha az hücreye sahip olacağımızdan hesap süresi de daha kısalmaktadır.

Her ne kadar küçük sonlu hacimlerin kullanılması daha hassas çözümün elde edilmesini sağlasa da, akış hacminin gereğinden fazla sayıda sonlu hacimlere bölünmesi bilgisayar kapasitesini zorlamakta ve analiz zamanını uzatmaktadır. Uygun bölme sayısının bulunması için tavsiye edilen yöntem, bölme işlemine öncelikle büyük sonlu hacimler ile başlamak ve analiz sürecinin belirli bir evresinde sonlu hacimlerin küçük olması gereken yerleri tespit edip, sadece o bölgelerdeki hacimleri daha küçük sonlu hacimlere bölmektir.

3.7 Yakın Duvar Çözüm Modelleri



Şekil 3.4 Yakın duvar çözüm modelleri

Yakın duvar bölgesinin daha doğru çözümlenebilmesi için duvar fonksiyonu yaklaşımı ve yakın-duvar modeli olmak üzere iki çözüm metodu mevcuttur. Duvar fonksiyonu yaklaşımı pratik bir yoldur ve viskoziteden etkilenen bölge tekrar çözülmez, bunun yerine duvar fonksiyonları tarafından köprü oluşturulur. Özellikle viskozite etkisi nedeniyle duvar yakını bölgesinde değişkenlerin çok hızlı biçimde değiştiği yüksek Reynolds sayılı akım çözümlerinde gerek zaman gerekse doğruluk olarak önemli derecede etkilidir. Duvar fonksiyonları ekonomik, güvenilir ve kabul edilebilir derecede hassastır. Bununla beraber küçük Reynolds sayılı akımlar gibi duvar fonksiyonlarının yetersiz kaldığı yakın duvar yaklaşımının kullanılması gereken durumlar vardır. Yakın duvar yaklaşımında duvara doğru yaklaştıkça çözüm ağı sıklaştırılır ve yakın duvar bölgesi duvara doğru her yerde yeniden çözülür. Türbülans modelleri duvar bölgesinde her yerde geçerlidir. FLUENT bize bu iki yaklaşımı aynı anda kullanma imkanı sağlar.

Türbülanslı akışlar, kontrol hacmindeki duvarların varlığından önemli ölçüde etkilenirler. Duvara çok yakın yerlerde viskoz sönümlenme türbülans dalgalanmalarını azaltır. Dışa doğru gidildikçe yüksek hız gradyanı nedeniyle türbülans kinetik enerjisi oluşumu hızla artış gösterir. Buna bağlı olarak duvara yakın bölgelerin sayısal olarak yeterli hassasiyette çözümlenmesi büyük önem taşımaktadır. Ağ örgüsü ile duvar arasındaki boyutsuz uzaklık (3.17) eşitliği ile verilebilir.

$$y_k^+ = \frac{\rho u_\tau y_k}{\mu} \quad (3.17)$$

$$u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (3.18)$$

Burada ρ , akışkanın yoğunluğunu, τ_w duvardaki kayma gerilmesi, u_τ sürtünme hızını, y_k ilk kontrol hacminin duvardan uzaklığını, μ mutlak viskoziteyi ve y_k^+ boyutsuz uzaklığı temsil etmektedir. Duvar fonksiyonu yaklaşımında, sınır koşulları tam duvar üzerinde değil, logaritmik duvar şartının geçerli olduğu viskoz alt tabakanın dışında belirlenmektedir. Akış alanında, duvardan sonraki ilk iki çözüm ağı noktası logaritmik duvar şartının geçerli olduğu bölgeye düşmelidir. Bu bölgede ana akış hızı, sürtünme hızı u_τ 'ya bağlıdır (Gant, 2002). Duvar yakını bölgesini duvar fonksiyonu kullanmadan hesaplara tam olarak dâhil edebilmek amacıyla ağ yapısının, duvar etrafında ortalama olarak $y_k^+ \approx 1$ olacak şekilde oluşturulması tavsiye edilmektedir. Bu değer duvar fonksiyonları için $30 < y_k^+ < 300$ arasındadır.

4. SAYISAL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde jet olmayan durumda dönen disk yüzeyine yakın laminer akım (Problem 1), hareketsiz disk yüzeyine çarpan jet akımı (Problem 2) ve dönen disk yüzeyine çarpan jet akımı (Problem 3) olmak üzere üç ayrı problem FLUENT programı yardımıyla incelenmiştir. Kullanılan çözüm yöntemlerinden bahsedilmiş ve çözüm algoritmaları sunulmuştur. Çözümlerin daha önce yapılmış deneysel ve nümerik çalışmalarla karşılaştırılmalarının yapılabilmesi için ilgili veri dosyaları MATLAB programına aktarılmış ve çizdirilen grafikler üzerinden yorumlar yapılmıştır.

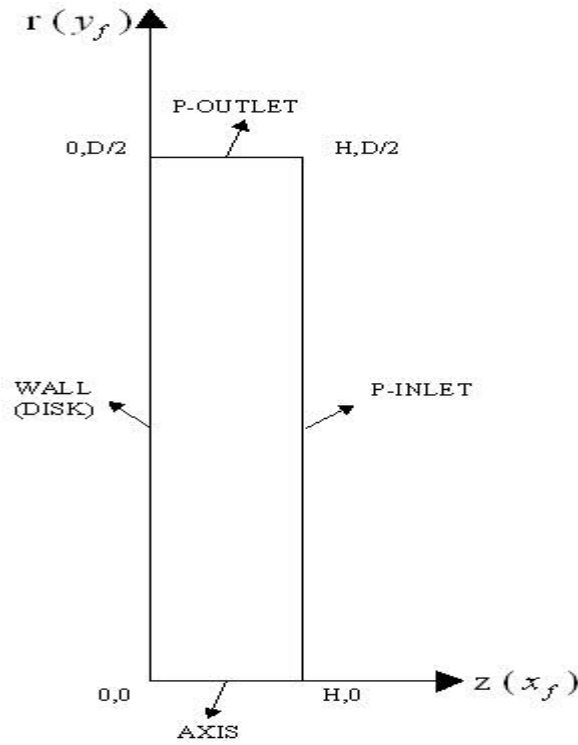
4.1 Dönen Disk Yüzeyine Yakın Laminer Akım (Problem 1)

4.1.1 Sayısal Çözüm Alanının Tanımlanması

Akımı düşük dönme hızlarında laminer olarak incelemek istediğimiz için dönme hızı $\Omega = 0.5 \text{ rad/s}$ olarak seçilmiştir. Schlichting(1968)'in çalışmasındaki hesaplamaların başlangıçta sonsuz uzunlukta disk yarıçapı kabulü yapılarak çözüldüğü düşünülerek disk yarıçapı, diskin dönme hareketinden etkilenen akışkan tabakanın kalınlığına oranla büyük olacak şekilde $R=1000\text{mm}$ olarak belirlenmiştir. Disk yüzeyine yakın alandaki oluşumlar incelenmek istendiğinden hesap alanı oluşturulmasında kullanılacak, z koordinatında disk yüzeyinden uzaklık 100mm olarak tercih edilmiştir.

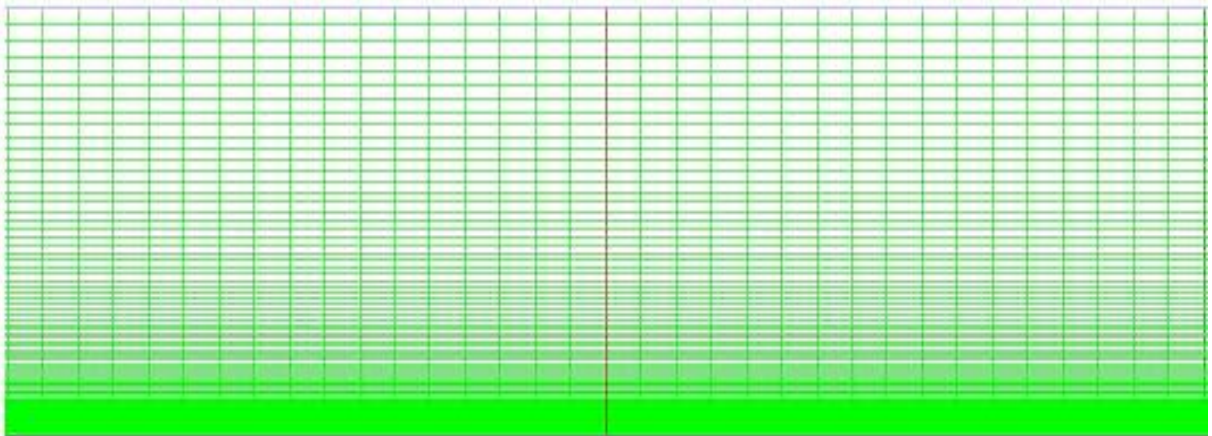
Problemin önemli özellikleri belirlendikten sonra sıra model geometrisinin ve ağ yapısının oluşturulmasına gelmiştir. GAMBİT bunun için uygun bir programdır. Dönen disk problemi eksenel yönden simetriye sahiptir ve çözümün daha doğru ve daha hızlı gerçekleştirilebilmesi için programın kullanıcı rehberindeki önerilerinden de yararlanarak problemin 2 boyutlu eksenel simetrik olarak modellenip çözülmesine karar verilmiştir. Böylelikle HAD çözümlerinde hesap alanının yeteri kadar geniş, hesap maliyetini(zaman) arttırmayacak kadar küçük olması şartı göz önünde bulundurulmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken konu 2 boyutlu eksenel simetrik problemlerin çözümünde programın daima x_f eksenini simetri eksenini kabul etmesidir aksi durumdaki modellemelerde program eksenel simetrik çözüme başlamamaktadır. Diğer önemli hususta diske yakın bölgedeki oluşumları incelemek istediğimiz için bu bölgelerdeki ağ yapımızı daha sık tasarlayarak yakın duvar modeli yaklaşımını kullanmak gerektiğidir. Bu düşüncedeki amaç böylelikle bu bölgede daha çok

değer hesaplatarak daha doğru sonuçlara ulaşabilmektir.



Şekil 4.1 Problem 1 için tasarlanan çözüm ağında kullanılan sınır şartları ve koordinatlar

Disk yarıçapı 1000 mm eksen uzunluğunda 100 mm olacak şekilde dikdörtgen bir yüz Gambit programında çizilmiştir. Hesap alanı simetrik olduğundan modelleme yarısı için yapılmıştır. Diske yakın nokta sayısının fazla olması için axis ve pressure outlet'i simgeleyen kenarlar wall(disk) kenarına doğru sıklaşan 1.04 oran ile 100 parçaya bölünmüştür, disk ve pinlet'i simgeleyen y_f doğrultusundaki kenarlarda 100 eşit parçaya bölünerek 100x100 bir çözüm ağı oluşturulmuştur.



Şekil 4.2 Problem 1'e ait duvar yaklaşım modelli çözüm ağı

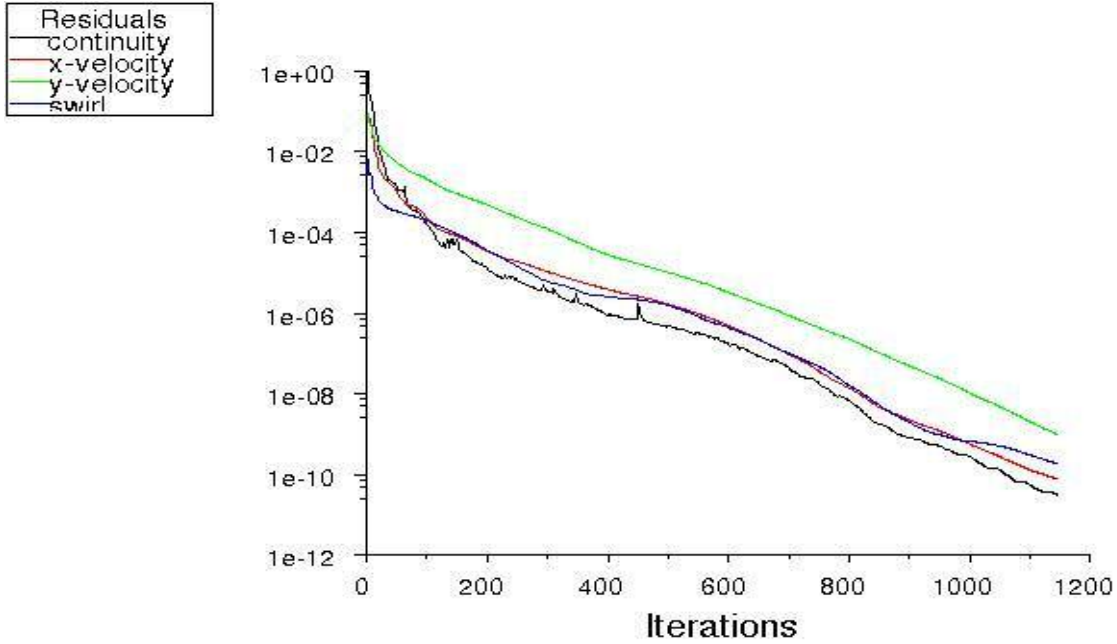
4.1.2 Çözüm Algoritması

- 1) Gambitte çizilen model export komutu ile Fluent'e aktarılır.
- 2) Fluent programı çalıştırılarak File-Read-Case komutu kullanılarak msh dosyası okutulur.
- 3) Grid-Check komutu ile çizilen modelin geometrik kontrolü yapılır.
- 4) Grid-Scale komutu ile Gambit'te girilen ölçülerin biriminin milimetre olduğu tanımlanır.
- 5) Define-Models-Solver ile Segregated-Implicit-Axisymmetric Swirl çözüm yöntemi seçilir.
- 6) Define-Models-Viscous-Laminar komutu ile laminar akım için çözüm modeli seçilir.
- 7) Define-Materials komutu yardımıyla havanın termo-fiziksel özellikleri girilir. Ayarlı değerler kabul edilmiştir.
- 8) Define-Operating Conditions komutu yardımıyla çevre şartları girilmiştir. Basınç 101325 pascal olarak kabul edilmiş, yerçekimi seçeneğinin yanındaki kutu işaretlenerek aktifleştirilmiş ve yerçekimi ivmesi için eksnel yönde (z) yani çözüm ağına göre x_f koordinatında $-9.81m/s^2$ değeri girilmiştir.
- 9) Define-Boundary Conditions komutu yardımıyla sınır şartları girilir. Diske dönme hareketi Fluid-Set-Motion-Moving Reference Frame komutu seçilip dönme hızının yanındaki boşluğa 0.5 rad/s değeri girilerek verilir.
- 10) Solve-Controls-Solution komutu yardımıyla URF(Under Relaxation Factors)değerleri ve ayrıklaştırma yöntemleri girilir. URF değerleri var olan şekilleri ile kabul edilmiştir. Ayrıklaştırma yöntemlerinden basınç:PRESTO, momentum ve dönme hızı:Second Order Upwind seçilmiştir. Nümerik çözümlemede basınç-hız arasındaki bağıntıyı çözebilmek için SIMPLE metodu tercih edilmiştir.
- 11) Solve-Monitors-Residuals komutu yardımı ile yakınsama ve yazım çizim ayarları yapılır. Yakınsama değeri her bir tercih için $1e-09$ seçilmiştir. Yakınsama kriterlerinin sağlanıp sağlanmadığını grafiksel olarak görmek için Plot opsiyonu aktif hale getirilmiştir.
- 12) Solve-Initialize-Initialize komutu yardımı ile hesaplama Compute From-Pressure Inlet seçilerek bu sınır şartından başlatılmış olur.
- 13) Solve-Iterate komutundan iterasyon sayısı girilerek iterasyon başlatılır.
- 14) Ayarlanan yakınsama değerlerine ulaşıldığında çözüm File-Write-Case and Data komutu yardımıyla kaydedilir.

4.1.3 Çözüm Sonuçları

Ayarlanan yakınsama değerlerine 1146 iterasyon sonucunda erişilmiştir. Yapılan değişik denemeler sonucunda çevre şartları ayarlarında yerçekimi ivmesinin aktif olup olmamasının sorunun çözümünü pek etkilemediği ve çözüme ulaşılan iterasyon sayısında ve sonuçlarda bir değişme olmadığı gözlemiştir. Programda komutlar yardımıyla diske dönme hareketi vermenin bir diğer yolu da sınır koşulu ayarlarında Wall(Disk)-Set-Momentum-Wall Motion-

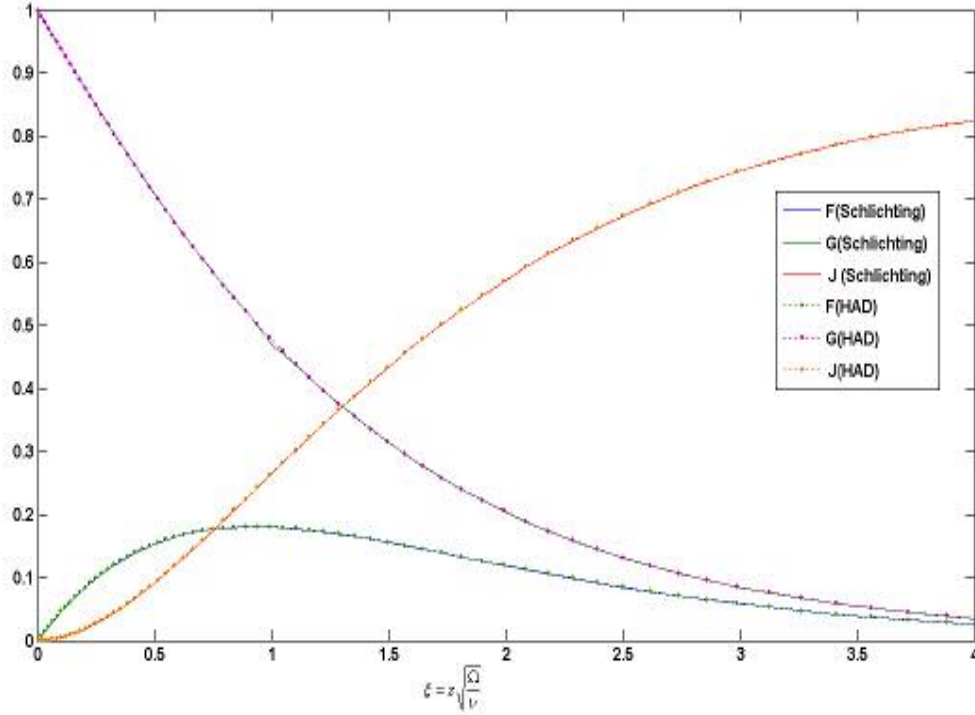
Moving Wall seçerek disk için dönme hızının girilmesidir. Bu şekilde de problem çözüldüğünde elde edilen sonuçların aynı olduğu görülmektedir. Fakat program çözüme 2551 yani daha fazla iterasyon sonucunda daha uzun sürede ulaşmaktadır.



Şekil 4.3 Problem 1 için yakınsama eğrileri

Schlichting(1968) yaptığı benzerlik çözümü ile hız bileşenleri için tanımlanmış $F(\xi)$, $G(\xi)$, $J(\xi)$ fonksiyonlarının, boyutsuz ξ değeri için değişim grafiklerini bularak genel bir çözüm elde etmiştir. Şekil 2.2 deki bu grafik kullanılarak değişik dönme hızı ve yarıçap değerleri için tekrar denklem çözümleri yapmaya gerek kalmadan, disk yüzeyine yakın, koordinatları bilinen herhangi bir noktada aksenal, radyal ve teğetsel hız bileşenleri için sayısal sonuçlar elde edilebilir.

FLUENT programı yardımıyla bulduğumuz laminer çözüm Schlichting(1968)'in verdiği çözümler ile karşılaştırılmıştır. Bunun için belirlenen dönme hızı ve sınır şartları için elde edilmiş HAD çözümündeki hız bileşenlerinin (V_r, V_θ, V_z) sayısal değerleri kullanılmıştır. ξ ve $F(\xi)$, $G(\xi)$, $J(\xi)$ fonksiyonları sırasıyla (2.13), (2.14), (2.15), (2.16) eşitliklerinden yararlanılarak hız bileşenleri cinsinden Define-Custom Field Function komutu yardımıyla programa tanıtılmıştır. Merkezden $r=500$ mm uzaklık için fonksiyonların değişim grafikleri Plot-XY plot komutu yardımıyla çizdirilmiştir.



Şekil 4.4: Problem 1'deki $F(\xi)$, $G(\xi)$, $J(\xi)$ fonksiyonları için çözüm sonuçlarının Schlichting(1968)'in çözümleri ile karşılaştırılması

FLUENT kodu kullanılarak HAD ile elde edilen sonuçların ve H.Schlichting'in elde ettiği sonuçların birbirine yakın olması nümerik çözümde kullanılan model, metod, algoritma ve enterpolasyon yöntemleri seçimlerinin uygun olduğunu göstermektedir.

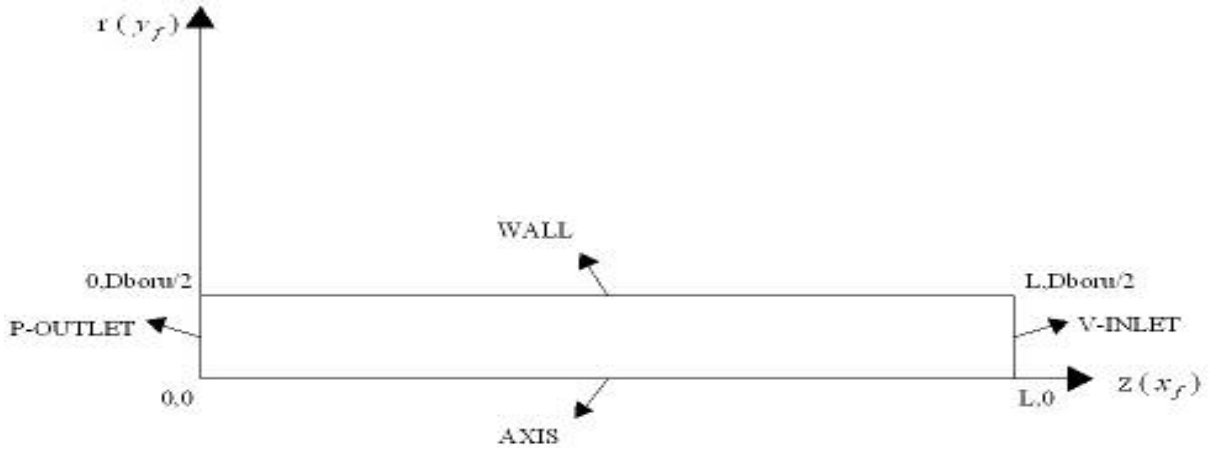
4.2 Hareketsiz Disk Yüzeyine Çarpan Jet Akımı (Problem 2)

4.2.1 Sayısal Çözüm Alanının Tanımlanması

Bu bölümde hareketsiz disk yüzeyine çarpan jet akımı FLUENT'te incelenmeye çalışılmıştır. Daha önce bu konuda yapılmış deneysel çalışmalar ışığında akım aynı deney şartları için programda modellenip çözülerek elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Disk yüzeyine çarpan jet akımı $Re=23000$ ve $Re=70000$ Reynolds sayıları kullanılarak $H/D=2$ ve $H/D=6$ şartları için çözülmüş hız değişimleri ve ısı transferi incelemeleri yapılmıştır.

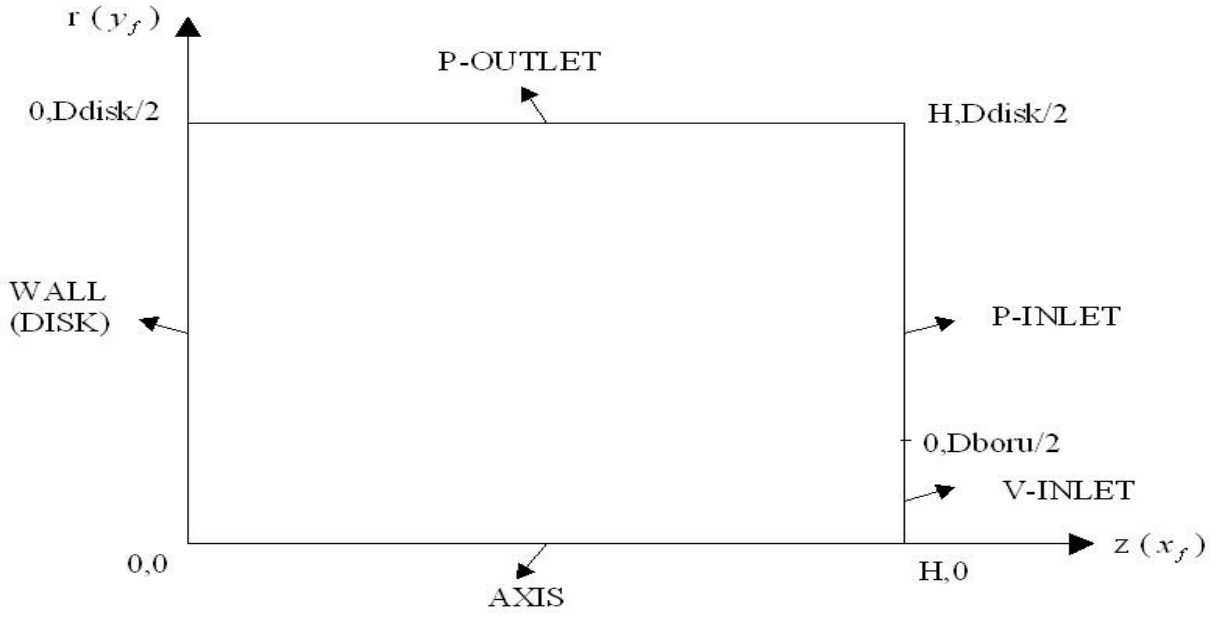
Deneyde tam gelişmiş akım profilinin sağlanabilmesi için kullanılan boru uzunluğunun ($L=80D=2100$ mm) bizim incelemek istediğimiz disk üzerindeki alana oranla çok büyük olması sebebiyle daha hızlı ve daha doğru bir çözüm elde etmek için problem iki aşamalı olarak düşünülmüştür. Öncelikle $L=2.1$ m ve $D=26$ mm boyutlarındaki boru içerisindeki akım

için ayrı bir çözüm ağı oluşturulup $Re=23000$ ve $Re=70000$ için boru içerisindeki akım çözülmüştür. Borunun çıkışı için 'profil' komutu yardımıyla bir profil yazdırılmış ve bu değerler sorunun ikinci kısmı için sınır şartı olarak kullanılmıştır. Boru içerisindeki akım problemi de hareketsiz disk üzerine çarpan jet akımı problemi gibi eksenel yönden simetrik olduğu için sadece simetri eksenine göre yarısı modellenmiştir. Gambitte x_f koordinatı simetri eksenini olacak şekilde 2100×13 mm boyutlarında 2 boyutlu dikdörtgenel yüz boru içerisindeki akım alanını temsilen çizilmiştir. Şekil 4.5 deki sınır şartları kullanılarak dikey doğrultuda 0.98 lik oranla 26 ,yatay doğrultuda eşit aralıklarla 210 nokta oluşturularak 26×210 luk boru iç yüzeyini temsil eden y_f doğrultusunda eksenden boru iç yüzeyini temsil eden kenara doğru sıklaşan bir ağ tanımlanmıştır.

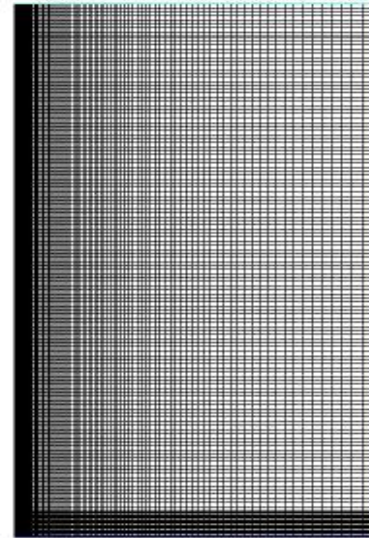
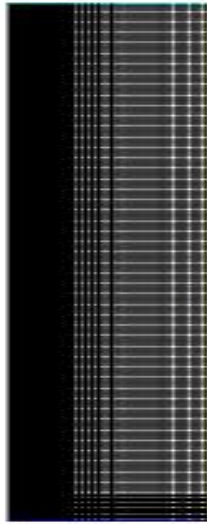


Şekil 4.5 Boru içerisindeki akımın çözümlenmesi için tasarlanan çözüm ağındaki kullanılan sınır şartları ve koordinatlar

İkinci bölüm için yine eksenel simetri düşünülerek Şekil 4.6 daki sınır şartları ve koordinatlar kullanılarak dikey kenarı 52 mm yatay kenarı 260 mm olan dikdörtgenel bir yüz meydana getirilmiştir. Jetin çıkış ağzı ve diske yakın bölgelerde yakın duvar yaklaşımı modeli kullanılarak daha fazla hesap noktası olacak şekilde 100×273 lük bir çözüm ağı tasarlandı.



Şekil 4.6 Problem 2 için tasarlanan çözüm ağında kullanılan sınır şartları ve koordinatlar



Şekil 4.7 Problem 2’de $H/D=2$ için çözüm ağı Şekil 4.8 Problem 2’de $H/D=6$ için çözüm ağı

4.2.2 Çözüm Algoritması

4.2.2.1 Boru İçerisindeki Akım

- 1) Gambit’te çizilen model export komutu ile Fluent’e aktarılır.
- 2) Fluent programı 2ddp de çalıştırılarak msh dosyası okutulur.
- 3) Grid-Check komutu ile çizilen modelin geometrik kontrolü yapılır.
- 4) Grid-Scale komutu ile Gambit’te girilen ölçülerin biriminin milimetre olduğu tanımlanır.
- 5) Define-Models-Solver ile Segregated-Implicit-Steady-Axisymmetric çözüm seçilir.

- 6) Define-Models-Viscous-Standart k-ε model komutu ile türbülanslı akım için çözüm modeli seçilir. Gelişmiş duvar fonksiyonları için 'Enhanced Wall Treatment' aktifleştirilir.
- 7) Define-Materials komutu yardımıyla havanın termo-fiziksel özellikleri girilir.
- 8) Define-Operating Conditions komutu yardımıyla çevre şartları girilir.
- 9) Define-Boundary Conditions yardımıyla sınır şartları girilir. Vinlet-Set komutu ile $Re=23000$ için giriş hızı 12.92 m/s ve $Re=70000$ için giriş hızı 39.33 m/s hidrolik çap 0.026 mm ve $I=4.5\%$ olarak girilir.
- 10) Solve-Controls-Solution komutu yardımıyla URF değerleri ve ayrıklaştırma yöntemleri seçilir. URF değerleri var olan şekilleri ile kabul edilmiştir. Ayrıklaştırma yöntemlerinden basınç PRESTO, diğerleri Second Order Upwind seçilmiştir. Nümerik çözümlemede basınç-hız arasındaki bağıntıyı çözebilmek için SIMPLE metodu tercih edilmiştir.
- 11) Solve-Monitors-Residuals komutu yardımı ile yakınsama değeri her bir tercih için $1e-09$ olarak ayarlanır .
- 12) Solve-Initialize-Initialize komutu yardımı ile hesaplama Compute From-Velocity-Inlet seçilerek bu sınır şartından başlatılmış olur.
- 13) Solve-Iterate komutundan iterasyon sayısı girilerek iterasyon başlatılır.
- 14) İstenen yakınsama değerleri için çözüm sağlandıktan sonra File-Write-Profile komutu yardımı ile diğer aşamada sınır şartı olarak kullanılmak üzere boru çıkışındaki çözüm için profil yazdırılır.

4.2.2.2 Hareketsiz Disk Yüzeyine Çarpan Jet Akımı

- 1) Gambitte çizilen model export komutu ile Fluent'e aktarılır.
- 2) Fluent programı 2ddp de çalıştırılarak msh dosyası okutulur.
- 3) File-Read-Profile komutu ile kaydettiğimiz boru çözüm profili okutulur.
- 4) Grid-Check komutu ile çizilen modelin geometrik kontrolü yapılır.
- 5) Grid-Scale komutu ile Gambit'te girilen ölçülerin biriminin milimetre olduğu tanımlanır.
- 6) Define-Models-Solver ile Segregated-Implicit-Steady-Axisymmetric çözüm seçilir.
- 7) Define-Models-Energy komutu aktif hale getirilerek enerji korunum denklemlerinin nümerik çözümlenmesi sağlanır.
- 8) Define-Models-Viscous komutu ile çözüm yapılacak model seçilir.(RNG k- ε, SST k-ω, RSM).Yakın duvar fonksiyonları için non-equilibrium aktifleştirilir.
- 9) Define-Materials komutu yardımıyla havanın termo-fiziksel özellikleri girilir.
- 10) Define-Operating Conditions komutu yardımıyla çevre şartları girilir.
- 11) Define-Boundary Conditions yardımıyla sınır şartları girilir. Vinlet-Set komutu kullanılarak giriş şartlarında ayar edilecek bütün değerler karşısındaki profil değerleri seçilerek o sınır şartlarına ayar edilir. Böylelikle iki çözüm birbirine bağlanmış olur. Enerji çözümleri için sıcaklık değerleri girilir.

- 12) Solve-Controls-Solution komutu yardımıyla URF değerleri ve ayrıklaştırma yöntemleri seçilir. URF değerleri var olan şekilleri ile kabul edilmiştir. Ayrıklaştırma yöntemlerinden basınç PRESTO, diğerleri Second Order Upwind seçilmiştir. Nümerik çözümlemede basınç-hız arasındaki bağıntıyı çözebilmek için SIMPLE methodu tercih edilmiştir.
- 13) Solve-Monitors-Residuals komutu yardımı ile yakınsama değeri enerji için 1e-09 diğer seçenekler için 1e-06 olarak ayarlanır .
- 14) Solve-Initialize-Initialize komutu yardımı ile hesaplama Compute From-Velocity-Inlet seçilerek bu sınır şartından başlatılmış olur.
- 15) Solve-Iterate komutundan iterasyon sayısı girilerek iterasyon başlatılır.
- 16) İstenen yakınsama değerleri için çözüm sağlandıktan sonra File-Write-Case and Data komutu yardımı ile çözüm kaydedilir.

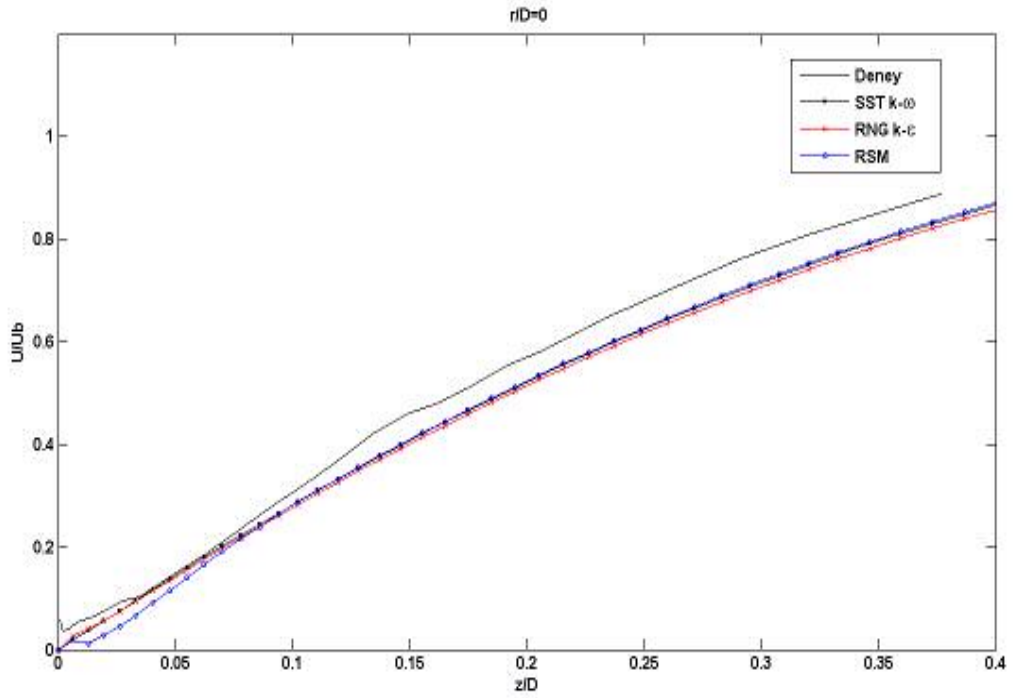
Yeterli yakınsama değerine ulaşmış çözümlerde istenen fonksiyonlara ve değişkenlere göre grafikleri çizdirebilmek için yardımcı komutlar kullanılmıştır. Define-Custom Field Functions komutu yardımıyla grafiksel olarak değişimini görmek istediğimiz fonksiyonlar tek tek arayüze formüsel olarak girilip, isimleri yazılarak kaydedilir. Sınır şartları dışında çözüm alanı içerisinde belli koordinatlarda veya sabit doğrularda görmek istediğimiz sonuçlar için Surface-Line/Rake komutu kullanılmıştır. Komut kullanıldığında çıkan arayüze tanımlamak istediğimiz doğrunun başlangıç ve bitiş noktaları ile ismi girilerek kaydedilir. Grafikler Plot-XY plot komutu ile çizilecek grafik için daha önce yazılmış fonksiyonlar ve doğrularda dahil olmak üzere istenen değişkenler seçilerek çizdirilir.

4.2.3 Çözüm Sonuçları

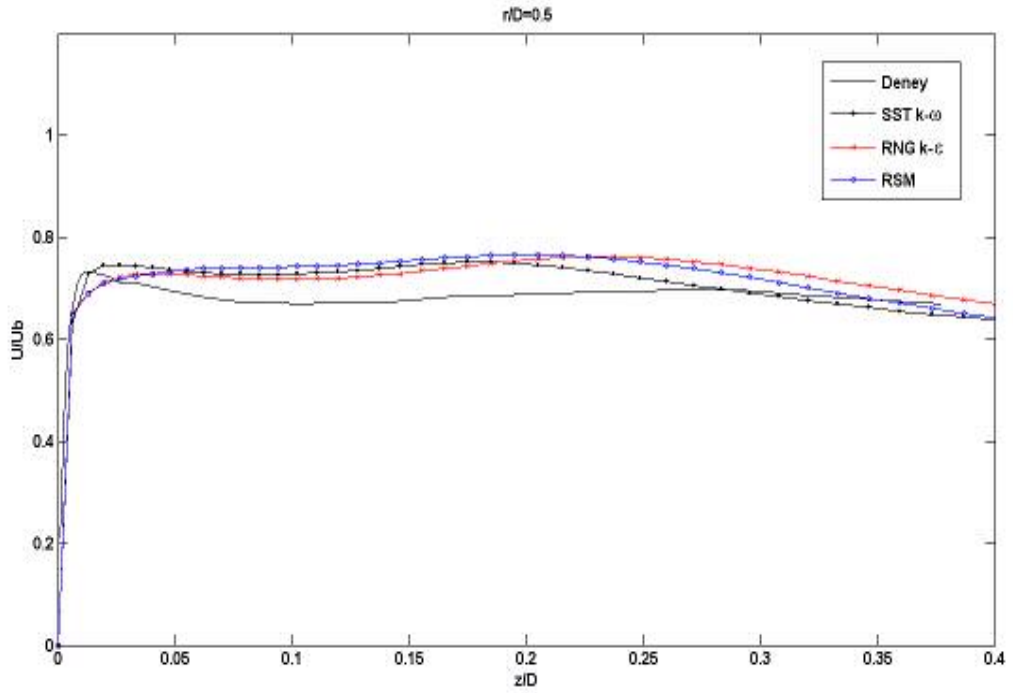
Çözümün ilk kısmını oluşturan boru içerisindeki akım 503 iterasyon ve kısa bir sürede Standart $k-\epsilon$ türbülans modelinde sonuca ulaşmış ve boru profilinin çıkışında istenen tam gelişmiş akım profili elde edilmiştir. Problemin ikinci kısmı ise daha çok hesap noktasına sahip olması ve diske yakın alanda çözüm ağının sık olması sebebiyle daha uzun sürede çözüme ulaşmıştır. Hareketsiz disk üzerine çarpan jet akımı kullanıcı rehberinden ve kaynak dökümanlardan elde edilen bilgiler ışığında çözüm için tavsiye edilen RNG $k-\epsilon$, SST $k-\omega$ ve RSM türbülans modelleri kullanılarak çözdürülmüştür. İstenen yakınsama değerlerine en çabuk SST $k-\omega$ (1960 iterasyon) modeli ile ulaşılmıştır. Yapılan araştırmalar ve denemeler sonucunda yakın duvar fonksiyonları içinde non-equilibrium fonksiyonların diğerlerine oranla deney sonuçlarına daha yakın ve daha hızlı çözüm verdikleri görülmüştür.

Çözümler üzerinde incelemelere çarpan jet akımı hız büyüklüklerinin ortalama boru giriş hızına oranlarının (U/U_b), boyutsuz z/D koordinatına göre değişim grafikleri çizdirilerek başlanmıştır. Tüm kullanılan türbülans çözüm modelleri ve Cooper(1992)'nin deney

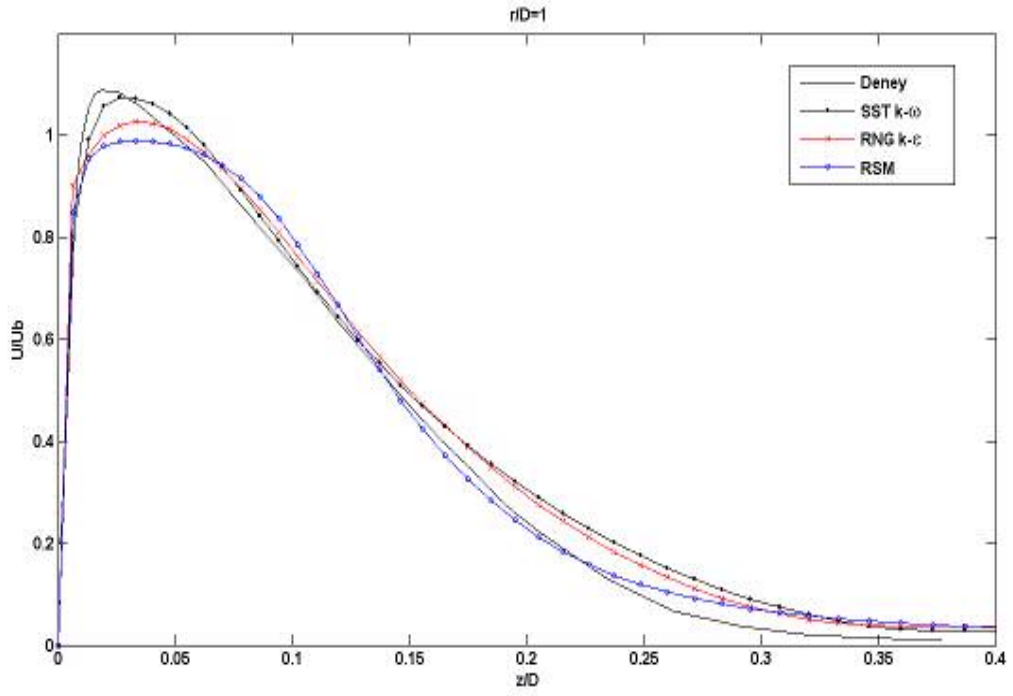
sonuçları için grafikler çizdirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.



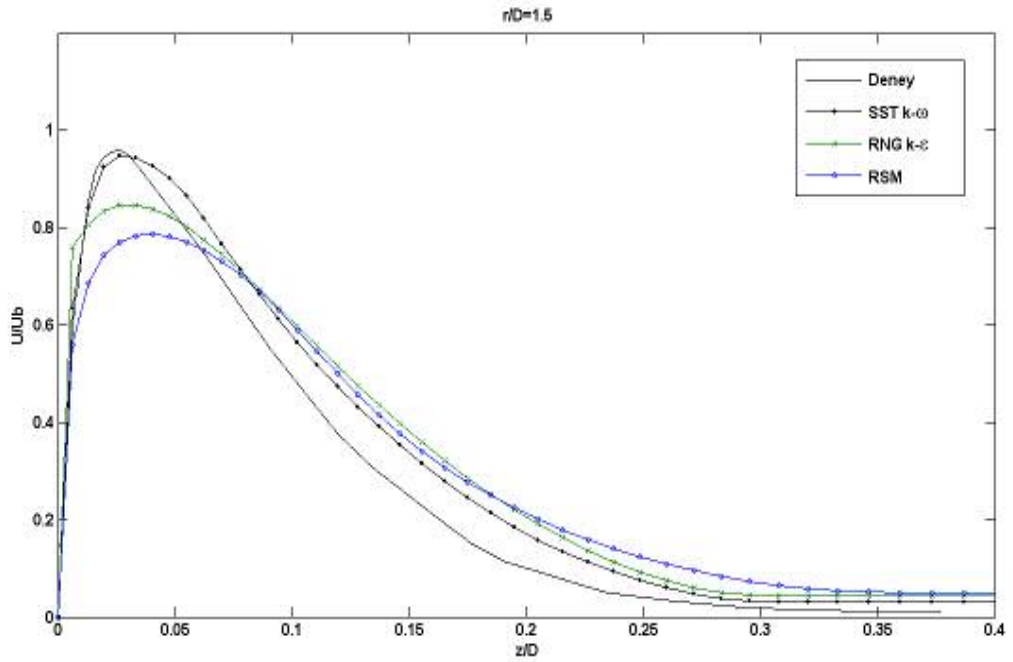
Şekil 4.9 Problem 2’de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=0$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi



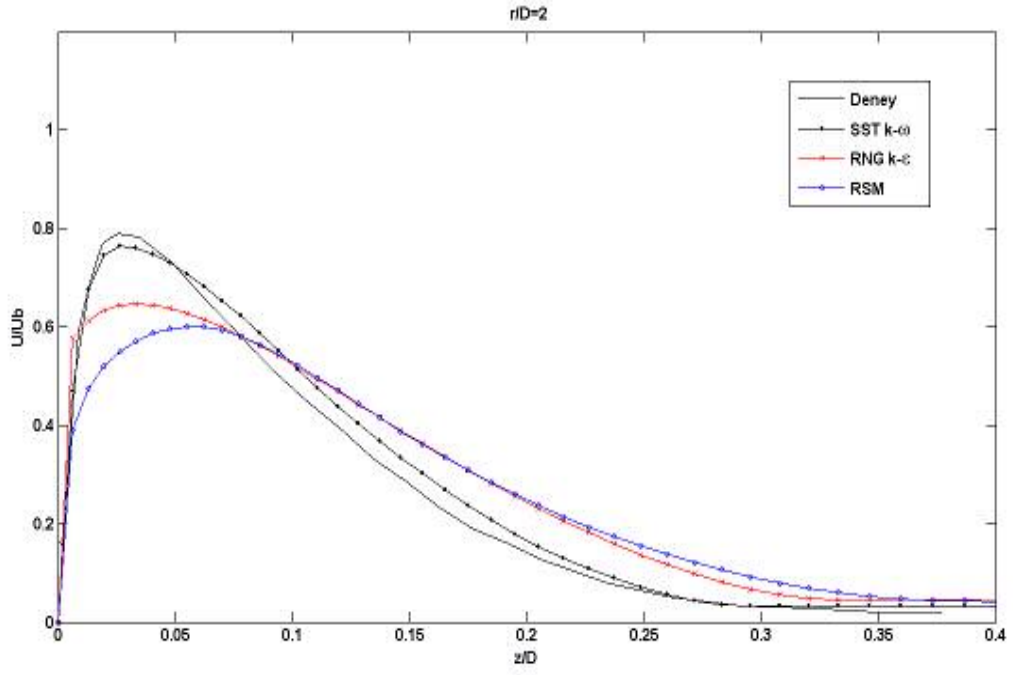
Şekil 4.10 Problem 2’de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=0.5$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi



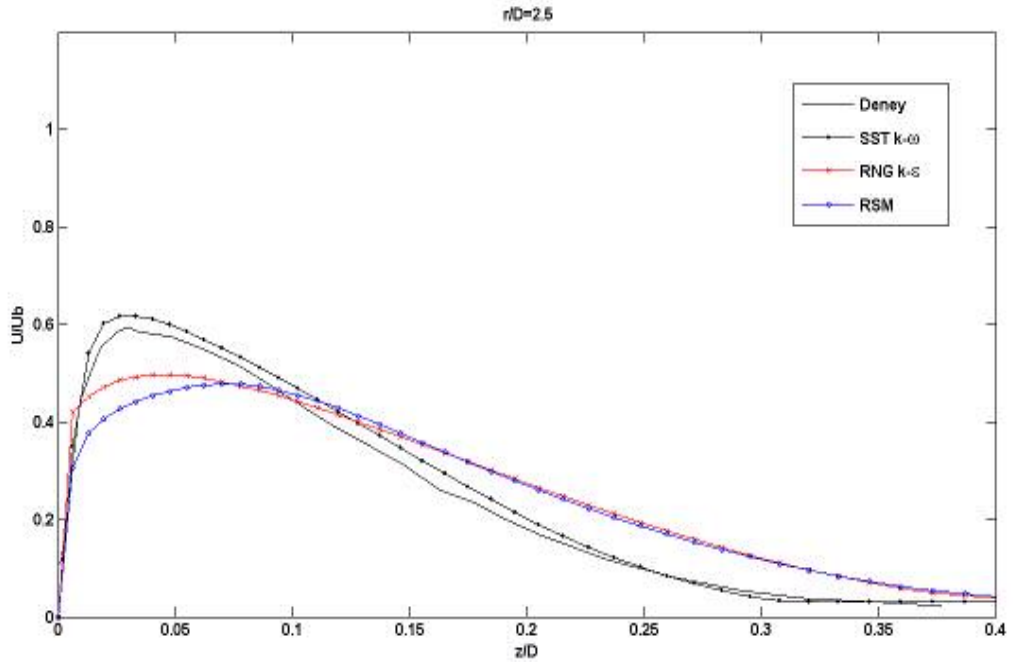
Şekil 4.11 Problem 2’de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=1$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi



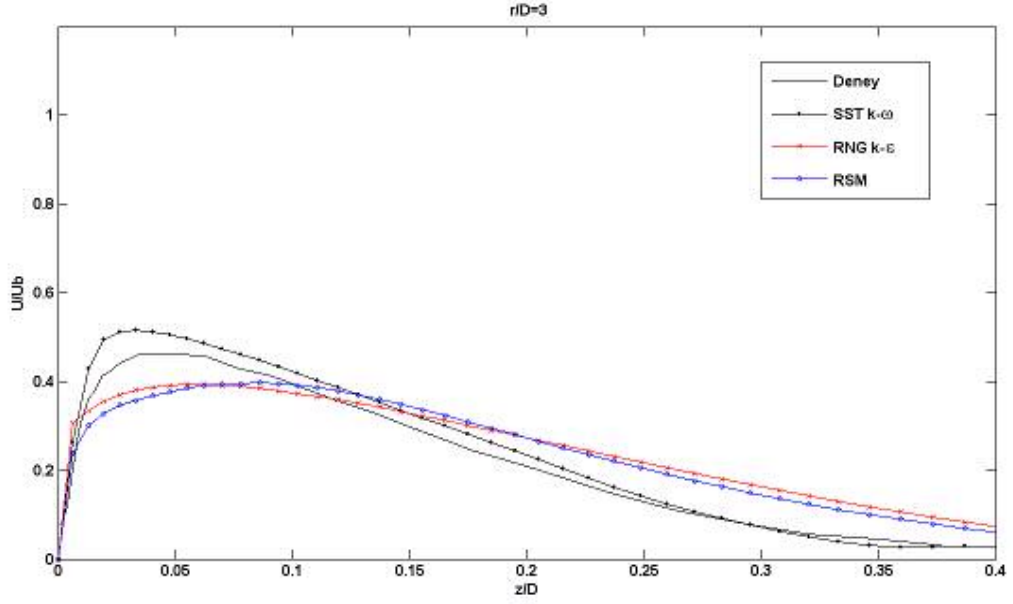
Şekil 4.12 Problem 2’de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=1.5$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi



Şekil 4.13 Problem 2’de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=2$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi

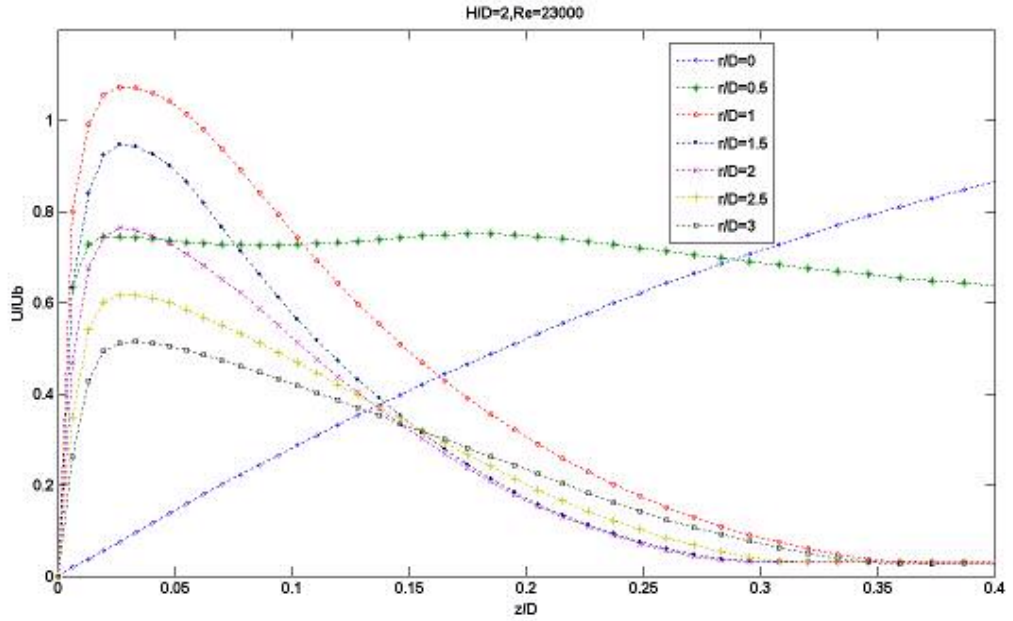


Şekil 4.14 Problem 2’de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=2.5$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksenal yönde değişimi



Şekil 4.15 Problem 2’de $Re=23000$, $H/D=2$ ve $r/D=3$ için sabit yarıçap doğrusu boyunca boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksel yönde değişimi

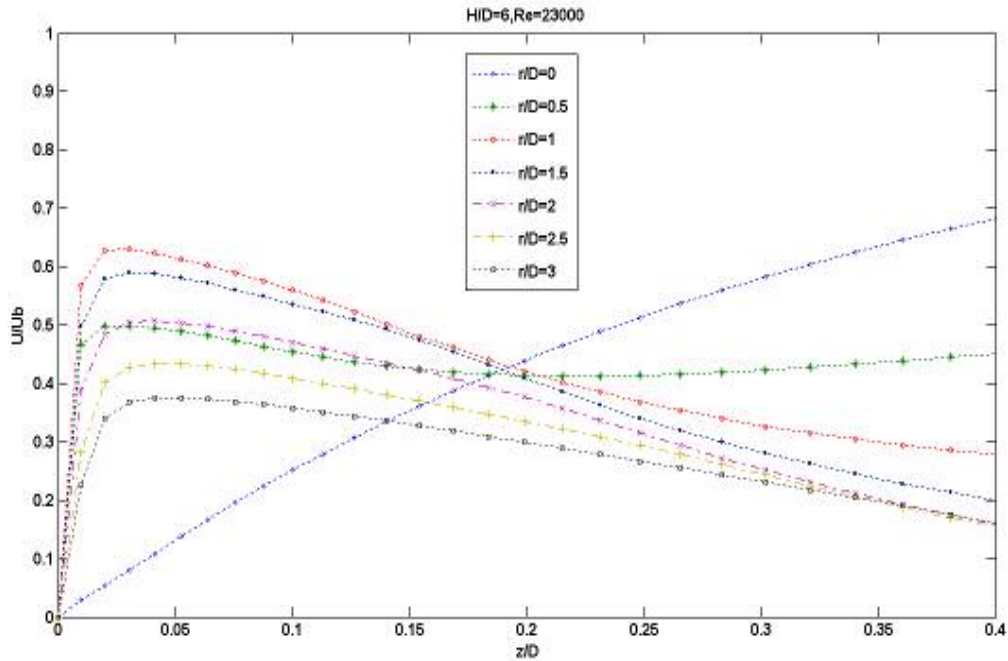
Elde edilen grafiklerden de anlaşılacağı gibi çözümler ve deney sonuçları arasında çok büyük farkların olmamasına rağmen deneye en yakın ve en hızlı sonuçların SST $k-\omega$ türbülans modeli ile sağlandığı görülmüştür.



Şekil 4.16 Problem 2’de SST $K-\omega$ türbülans modeline göre $H/D=2$, $Re=23000$ için farklı sabit yarıçap doğrularında boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksel yönde değişim grafiği

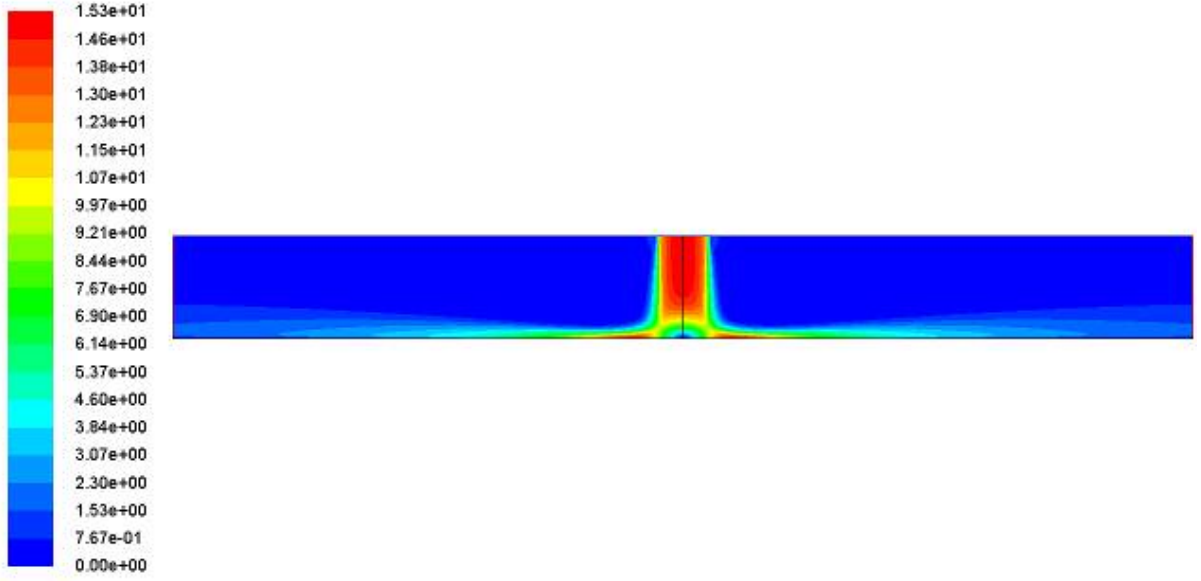
Grafiklerden radyal doğrultuda disk merkezinden uzaklaştıkça, aksel yönde hız büyüklüklerinin benzer değişimler gösterdiğini görmekteyiz. Çarpma noktasına ve merkeze yakın $r/D=0$ ve $r/D=0.5$ dışındaki bölgelerin benzer değişim profilleri gösterdiğini, bileşke hız büyüklüklerinin disk yüzeyine çok yakın bir tabakada çarpmanın etkisiyle hızlı bir yükselme gösterdiğini $z/D=0.05$ civarında maksimum değerlerine ulaştıklarını peşinden de z doğrultusunda disk yüzeyinden uzaklaştıkça sıfıra yaklaştıklarını görmekteyiz. Aynı şekilde radyal doğrultuda disk kenarına yaklaştıkça bileşke hız büyüklüklerinin giderek küçüldüğü de grafiklerden görülmektedir.

Benzer bir çözüm disk ile boru çıkış ağzı arasındaki mesafenin bileşke hız büyüklükleri üzerindeki etkisini görmek için $H/D=6$ için yapılmıştır.

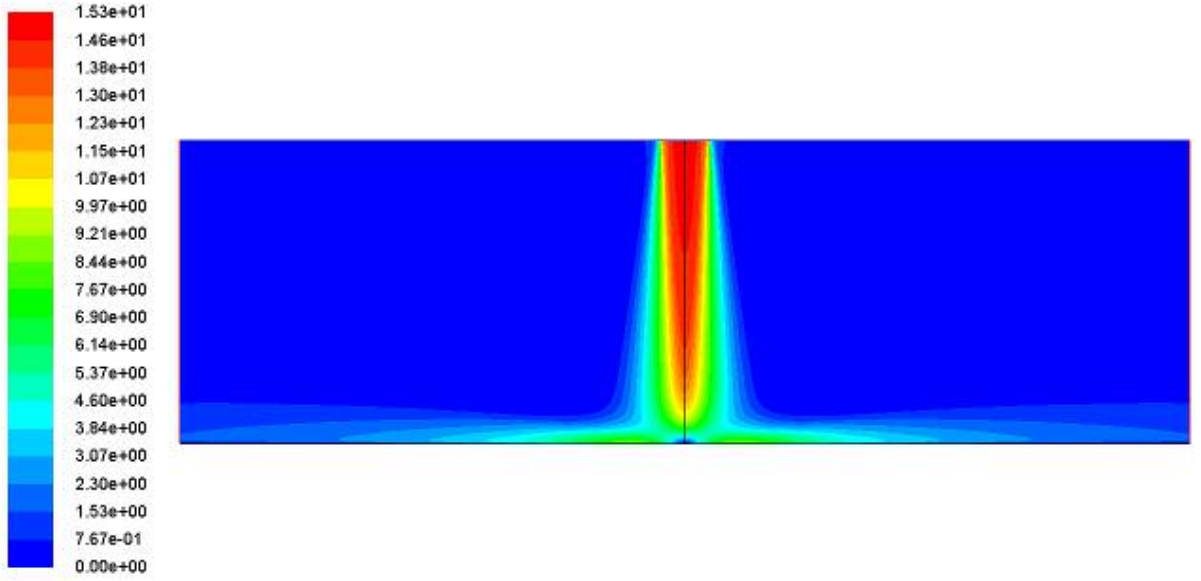


Şekil 4.17 Problem 2’de SST K- ω türbülans modeline göre $H/D=6$, $Re=23000$ için farklı sabit yarıçap doğrularında boyutsuz bileşke hızın (U/U_b) aksel yönde değişim grafiği

Elde edilen çözüm grafiği bize hız değişim profillerinin hemen hemen aynı olduğunu fakat hız büyüklüklerinin yükseklikten ötürü bir kayba uğradığını ve disk yüzeyine yakın bölgedeki bileşke hız büyüklüklerinin maksimum değerlerine ulaştığı $z/D=0.05$ civarlarında, $H/D=2$ çözümüne oranla daha küçük değerlerde olduğunu göstermektedir. Bu grafikte de z doğrultusunda maksimum değerlerine ulaşan hızlar daha sonra disk yüzeyinden uzaklaştıkça azalmaktadır. Fakat bu azalmalar aksel doğrultuda Şekil 4.16 daki grafiğe göre daha yumuşak olmaktadır.

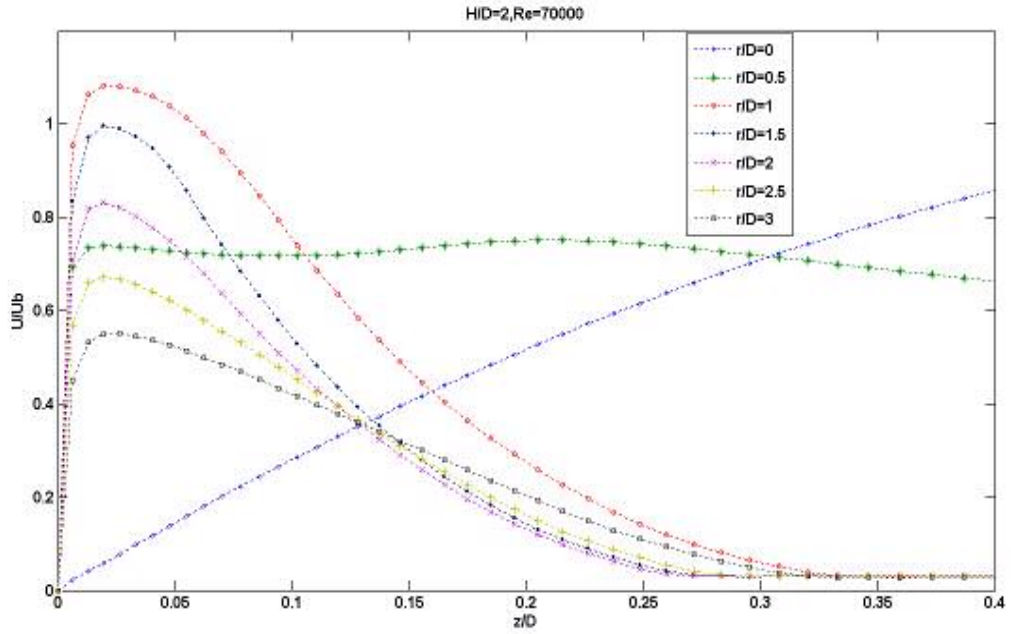


Şekil 4.18 Problem 2’de SST k- ω türbülans modeline göre $H/D=2$, $Re=23000$ için hız konturları

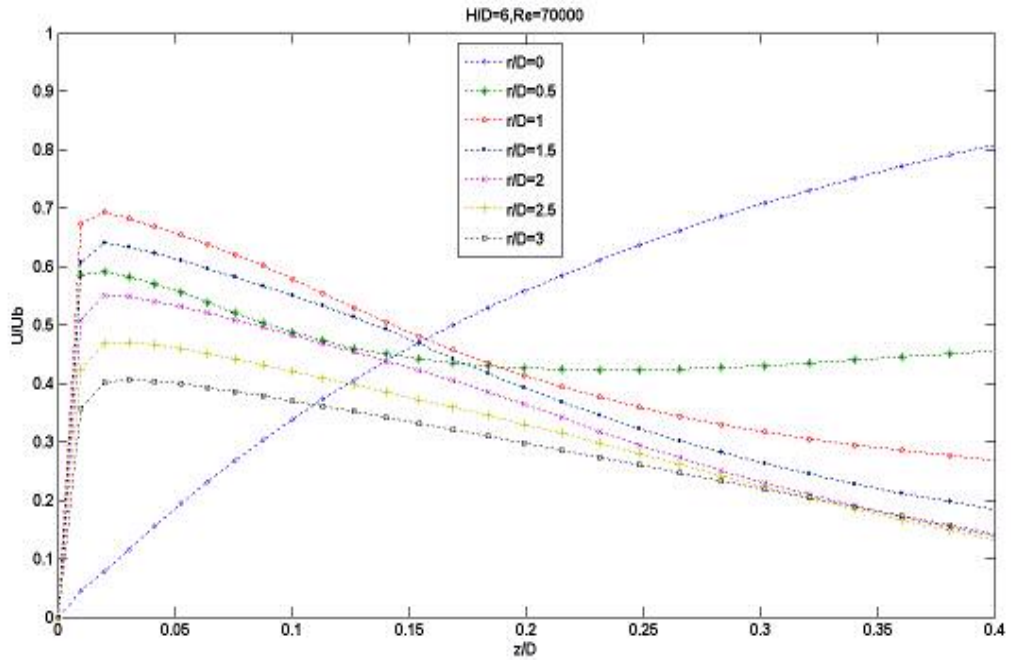


Şekil 4.19 Problem 2’de SST k- ω türbülans modeline göre $H/D=6$, $Re=23000$ için hız konturları

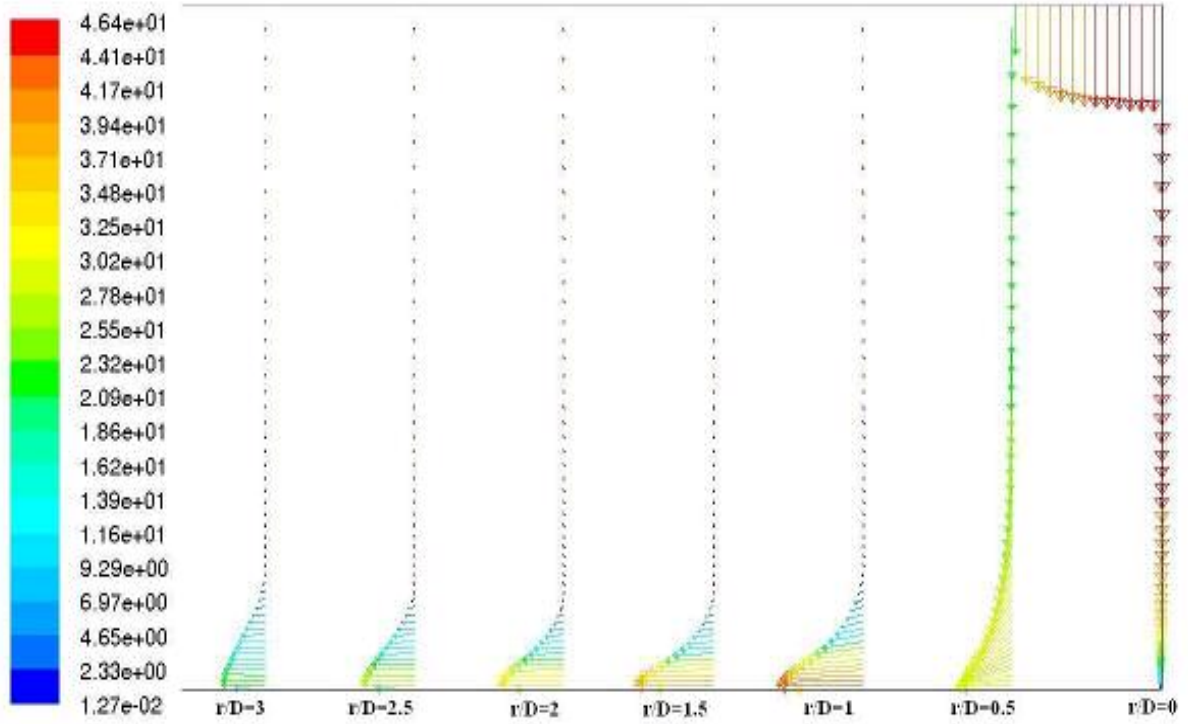
Benzer çalışmalar $Re=70000$ için yapılmış ve grafikler çizdirilmiştir.



Şekil 4.20 Problem 2’de SST K- ω türbülans modeline göre $H/D=2$, $Re=70000$ için farklı sabit yarıçap doğrularında boyutsuz bileşke hızın(U/U_b) aksel yönde değişim grafiği

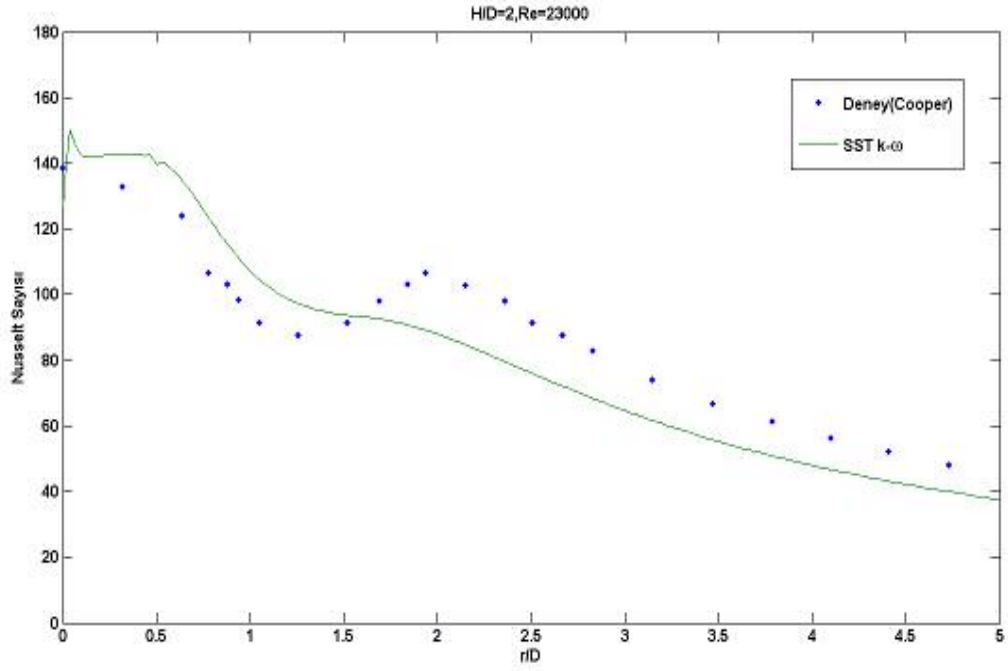


Şekil 4.21 Problem 2’de SST K- ω türbülans modeline göre $H/D=6$, $Re=70000$ için farklı sabit yarıçap doğrularında boyutsuz bileşke hızın(U/U_b) aksel yönde değişim grafiği

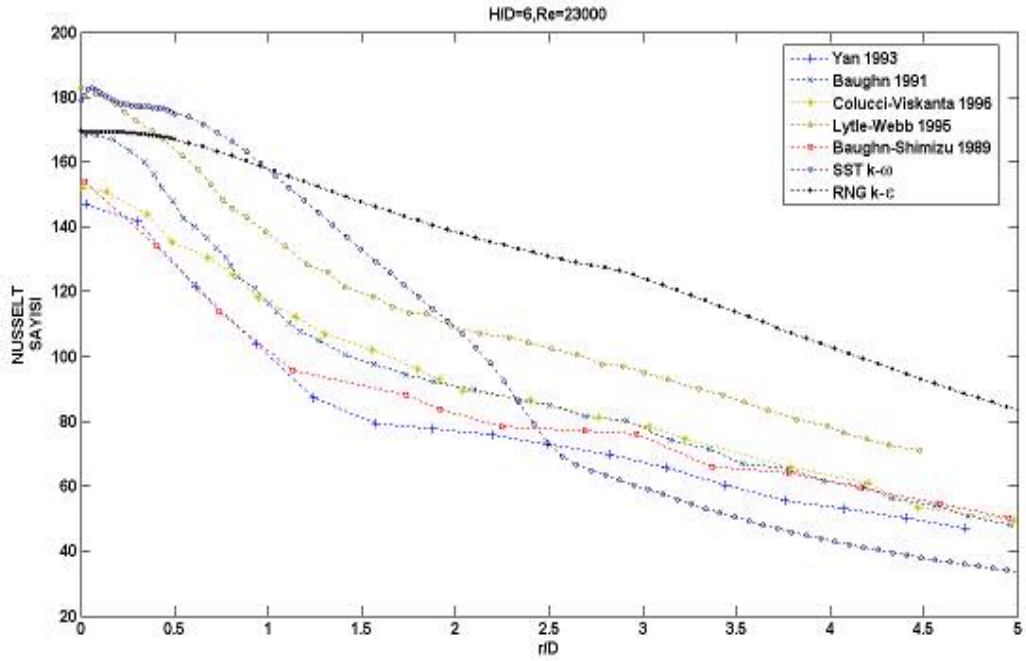


Şekil 4.22 Problem 2’de SST $k-\omega$ türbülans modeline göre $H/D=2$, $Re=70000$ için $r/D=0$, $r/D=0.5$, $r/D=1$, $r/D=1.5$, $r/D=2$, $r/D=2.5$, $r/D=3$ sabit yarıçap doğrularında hız vektörleri

Yüksek hızlı hava jetleri çarpma bölgesinde oluşturdukları yüksek transfer katsayıları nedeniyle endüstride ısıtma, soğutma ve kurutma işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Çarpan jet yardımıyla ısıtılmış bir yüzeyin soğutulması probleminin incelenmesi, için sayısal çözüm aşamasında programda enerji denklemleri aktifleştirilerek çözüme dahil edilmiştir. Problem soğutma amaçlı olduğundan sınır şartları için disk sıcaklığı $T_{disk}=330$ K, jet akımı da $T_{jet}=300$ K seçilmiştir. Enerji çözümlerinde bir diğer önemli husus akışkan özelliklerinin ve referans değerlerinin uygun seçilmesidir. Bu amaçla tablolar yardımıyla hava için $\rho=1.1614 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.8455e-05 \text{ kg/m.s}$, $c_p=1007 \text{ j/kg.K}$, $k_f=0.0263 \text{ W/mK}$ değerleri girilmiştir. Çözümler daha önce yapılmış deney şartları ile benzer sınır şartları kullanılarak yapılmıştır ($H/D=2$, $H/D=6$, $Re=23000$). Sonuçlar boyutsuz Nusselt sayısının disk yüzeyinde radyal doğrultuda değişim grafikleri çizdirilerek deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.23 Problem 2’de $H/D=2$, $Re=23000$ için SST $k-\omega$ modeline göre disk üzerinde radyal doğrultuda Nusselt sayısı değişim grafiğinin Cooper(1992) deneyi ile karşılaştırılması



Şekil 4.24 Problem 2’de $H/D=6$, $Re=23000$ için SST $k-\omega$ ve RNG $k-\epsilon$ türbülans modellerine göre bulunan radyal doğrultuda disk yüzeyindeki Nusselt sayısı değerlerinin daha önce yapılmış deney sonuçları ile karşılaştırılması

Grafikler incelendiğinde HAD hesaplamalarının ve deneysel sonuçların birbirine yakın olduğu ve maksimum Nusselt sayısının durma noktası civarında meydana geldiği görülmektedir. Fakat yüzey üzerinde bu bölgeden itibaren radyal doğrultuda küçülen yönde bir değişim göstermektedir. Çarpma bölgesinde sınır tabaka kalınlığı azalmakta ve buna bağlı olarak yerel ısı taşınım katsayısı artmaktadır. Çarpan jet yardımıyla soğutma araştırmalarında Nusselt sayısı genelde Reynolds sayısına, boru ile yüzey arasındaki mesafeye, boru ile disk arasındaki açığa, disk yüzeyinin pürüzlülüğüne bağlı olmaktadır.

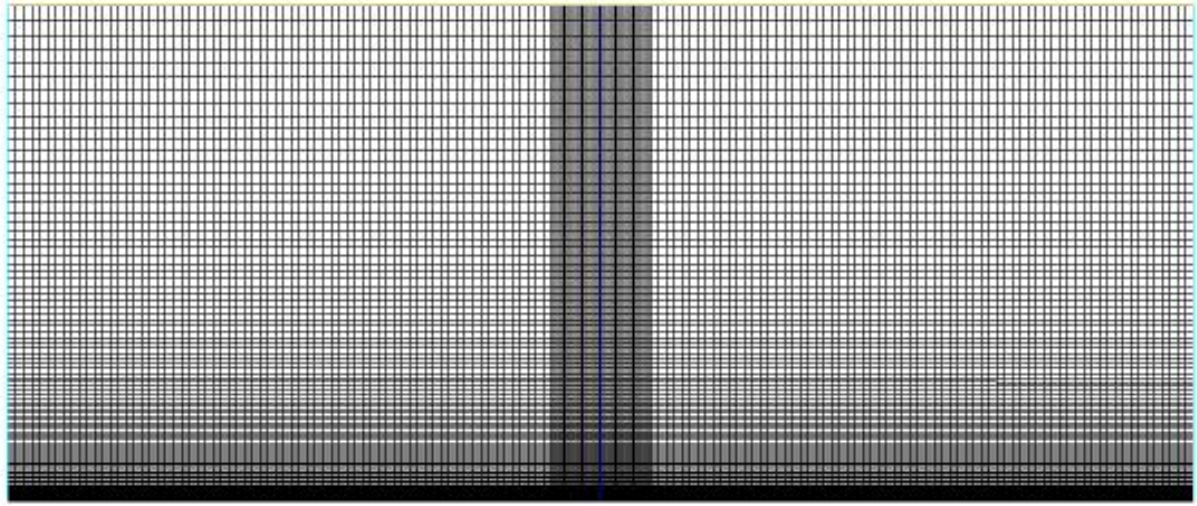
4.3 Dönen Disk Yüzeyine Çarpan Jet Akımı (Problem 3)

4.3.1 Sayısal Çözüm Alanının Tanımlanması

Daha hızlı ve daha doğru sonuçlar elde edebilmek için problem iki aşamalı olarak çözdürülmüştür. Probleme aksenal simetrisinin varlığı düşünülerek simetriye sahip bölgelerden biri modellenmiştir. Dönme hareketi içeren 2 boyutlu problemlerde dönme eksenini daima x_f eksenini kabul edilir. Minagawa ve Obi (2003)'nin deneylerinde kullandıkları tam gelişmiş akım profilini elde etmek için boru içerisindeki akım çözümlemesinde deney şartları ile aynı boru boyutları kullanılmış ve Şekil 4.5 deki sınır şartları ve koordinatlar ile 2 boyutlu dikdörtgensel bir çözüm yüzeyi oluşturulmuştur. (D=25 mm, L=80D=2000mm)

Dikey kenarlar boru iç yüzeyi yakınındaki hesaplamaların daha doğru yapılabilmesi için simetri ekseninden uzaklaştıkça sıklaşan bir oranla (0.98), 25 parçaya, yatay kenarlar 20 mm eş aralıkla 100 parçaya bölünerek 25x100 lük bir çözüm ağı oluşturulmuştur.

İkinci aşama için boru çıkışına uzaklığı H=125 mm olan 150mm yarıçaplı disk için Şekil 4.6 daki sınır şartları ve koordinatlar kullanılarak 2 boyutlu hesap alanı oluşturulmuştur. Yatay kenarlar x_f doğrultusunda iki boyutta diski simgeleyen kenara yaklaştıkça sıklaşan bir oranla 100 parçaya, düşey kenarlarda boru çıkış ağız (Vinlet) 0.5 mm, diğer kısımlar 2mm lik eşit aralıklarla toplamda 94 parçaya bölünerek 94x100 lük çözüm ağı oluşturulmuştur.



Şekil 4.25 Problem 3 için oluşturulmuş çözüm ağı

4.3.2 Çözüm Algoritması

4.3.2.1 Boru İçerisindeki Akım

- 1) Gambit'te çizilen model export komutu ile Fluent'e aktarılır.
- 2) Fluent programı 2ddp de çalıştırılarak msh dosyası okutulur.
- 3) Grid-Check komutu ile çizilen modelin geometrik kontrolü yapılır.
- 4) Grid-Scale komutu ile Gambit'te girilen ölçülerin biriminin milimetre olduğu tanımlanır.
- 5) Define-Models-Solver ile Segregated-Implicit-Steady-Axisymmetric çözüm seçilir.
- 6) Define-Models-Viscous-Standard k- ϵ model komutu ile türbülanslı akım için çözüm modeli seçilir. Gelişmiş duvar fonksiyonları için 'Non-Equilibrium' aktifleştirilir.
- 7) Define-Materials komutu yardımıyla havanın termo-fiziksel özellikleri girilir.
- 8) Define-Operating Conditions komutu yardımıyla çevre şartları girilir.
- 9) Define-Boundary Conditions yardımıyla sınır şartları girilir. Velocity-Inlet komutu ile giriş hızı için aksiyel yönde -8.7m/s, hidrolik çap 0.025 mm ve I=4.8 olarak girilir. Hızdaki eksiğin sebebi x_f koordinatına göre boru çıkışındaki hız vektörlerinin yönünün negatif yönde olmasıdır.
- 10) Solve-Controls-Solution komutu yardımıyla URF değerleri ve ayrıklaştırma yöntemleri seçilir. URF değerleri var olan şekilleri ile kabul edilmiştir. Ayrıklaştırma yöntemlerinden basınç PRESTO, diğerleri Second Order Upwind seçilmiştir. Nümerik çözümlemelerde basınç-hız arasındaki bağıntıyı çözebilmek için SIMPLE metodu tercih edilmiştir.
- 11) Solve-Monitors-Residuals komutu yardımı ile yakınsama değeri her bir tercih için 1e-09 olarak ayarlanır .
- 12) Solve-Initialize-Initialize komutu yardımı ile hesaplama Compute From-Velocity-Inlet

seçilerek bu sınır şartından başlatılmış olur.

- 13) Solve-Iterate komutundan iterasyon sayısı girilerek iterasyon başlatılır.
- 14) İstenen yakınsama değerleri için çözüm sağlandıktan sonra File-Write-Profile komutu yardımı ile diğer aşamada sınır şartı olarak kullanılmak üzere boru çıkışındaki çözüm için profil yazdırılır.

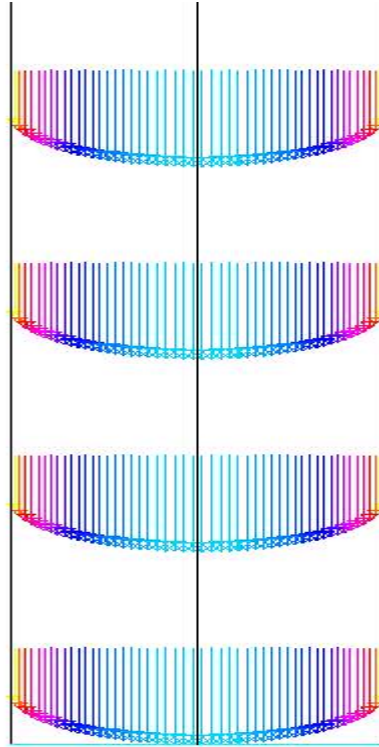
4.3.2.2 Dönen Disk Yüzeyine Çarpan Jet Akımı

- 1) Gambit'te çizilen model export komutu ile Fluent'e aktarılır.
- 2) Fluent programı 2ddp de çalıştırılarak msh dosyası okutulur.
- 3) File-Read-Profile komutu ile kaydettiğimiz boru çözüm profili okutulur.
- 4) Grid-Check komutu ile çizilen modelin geometrik kontrolü yapılır.
- 5) Grid-Scale komutu ile Gambit'te girilen ölçülerin biriminin milimetre olduğu tanımlanır.
- 6) Define-Models-Solver ile Segregated-Implicit-Steady-Axisymmetric Swirl çözüm seçilir. Burada diğerlerinden farklı olarak 'swirl' seçilmesinin sebebi dönme hareketi içeren problemler için özelleştirilmiş olmasıdır.
- 7) Define-Models-Viscous komutu ile çözüm yapılacak model seçilir. (RNG k- ϵ , SST k- ω , RSM). Yakın duvar fonksiyonları için non-equilibrium aktifleştirilir.
- 8) Define-Meterails komutu yardımıyla havanın termo-fiziksel özellikleri girilir.
- 9) Define-Operating Conditions komutu yardımıyla çevre şartları girilir.
- 10) Define-Boundary Conditions yardımıyla sınır şartları girilir. Vinlet-Set komutu kullanılarak giriş şartlarında ayar edilecek bütün değerler karşısındaki profil değerleri seçilerek o sınır şartlarına ayar edilir. Böylelikle iki çözüm birbirine bağlanmış olur. Wall(Disk)-Set-Momentum komutu kullanılarak duvar için sınır koşulları girilir. Burada çıkan arayüzde 'moving wall' tercihi aktifleştirilerek pencerenin genişlediği görülür. Genişleyen pencerede 'Rotational' tercihi seçilerek hareketin dönme hareketi olduğu belirtilir ve dönme hızı mutlak değer olarak girilir.
- 11) Solve-Controls-Solution komutu yardımıyla URF değerleri ve ayrıklaştırma yöntemleri seçilir. URF değerleri var olan şekilleri ile kabul edilmiştir. Ayrıklaştırma yöntemlerinden basınç PRESTO, diğerleri Second Order Upwind seçilmiştir. Nümerik çözümlemelerde basınç-hız arasındaki bağıntıyı çözebilmek için SIMPLE metodu tercih edilmiştir.
- 12) Solve-Monitors-Residuals komutu yardımı ile yakınsama değeri tüm seçenekler için 1e-06 olarak ayarlanır .
- 13) Solve-Initialize-Initialize komutu yardımı ile hesaplama Compute From-Velocity-Inlet seçilerek bu sınır şartından başlatılmış olur.
- 14) Solve-Iterate komutundan iterasyon sayısı girilerek iterasyon başlatılır.
- 15) İstenen yakınsama değerleri için çözüm sağlandıktan sonra File-Write-Case and Data komutu yardımı ile çözüm kaydedilir.

Report-Fluxes-Mass Flow Rate komutu ile giriş çıkış sınır şartlarındaki giren çıkan debi arasındaki fark hesaplatılarak çözümün doğruluğu kontrol edilebilir. Define-Custom Field Functions komutu yardımıyla tanımlanmış fonksiyonlar ve Surface-Line/Rake komutu ile oluşturulmuş sabit yüzey doğruları problemin daha detaylı incelenmesine yardımcı olmuş, daha önce yapılmış deneysel çalışmalar ile karşılaştırma yapmak için ilgili grafikler çizdirilmiştir. HAD hesaplamalarıyla elde edilen veriler MATLAB programına ‘export’ komutu ile aktarılmıştır.

4.3.3 Çözüm Sonuçları

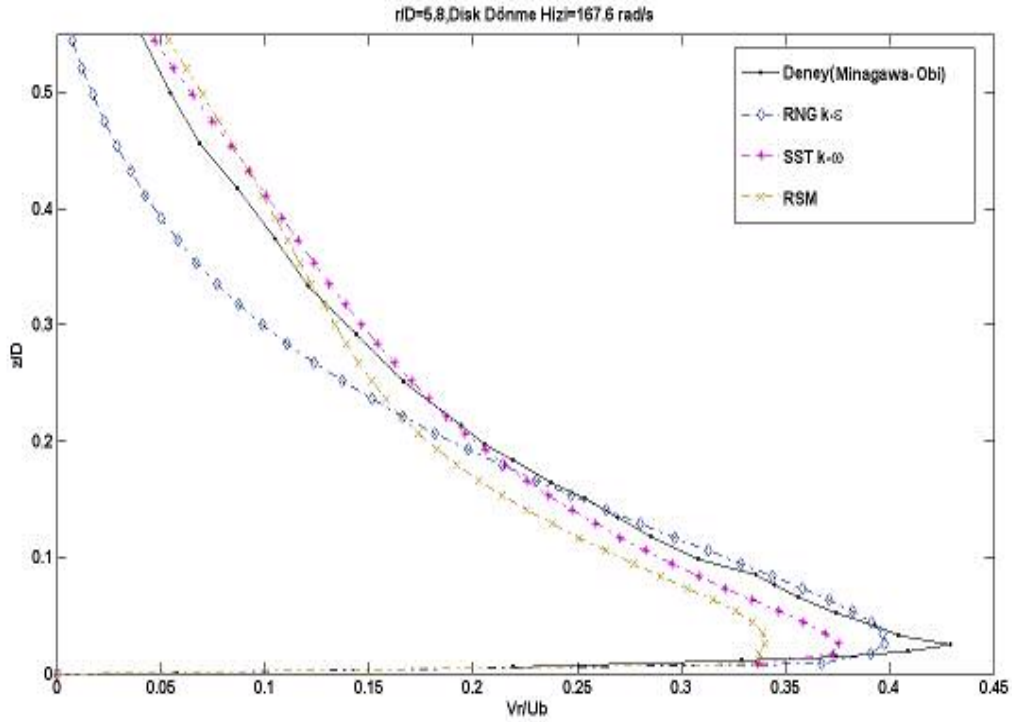
Öncelikle problemin ilk kısmını oluşturan uzun boru içerisindeki akım çözülerek Şekil 4.26’daki tam gelişmiş akım profili Standart k-e çözüm modelinde 609 iterasyon sonucu kısa bir sürede elde edilmiştir. Bu boru çıkışındaki profil, ikinci aşamada (Vinlet) sınır şartı olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.26 Problem 3 için birinci aşamada boru probleminin çözülmesi ile elde edilmiş tam gelişmiş akım profili

Diskün dönme hareketinin en önemli etkileri merkezci kuvvetlerde ve sınır tabakada görülmektedir. Bu amaçla bu büyüklükleri etkileyen radyal hız bileşenlerinin farklı dönme hızları için değişimleri incelenmiştir. Dönen disk üzerine çarpan jet akımı değişik çözüm

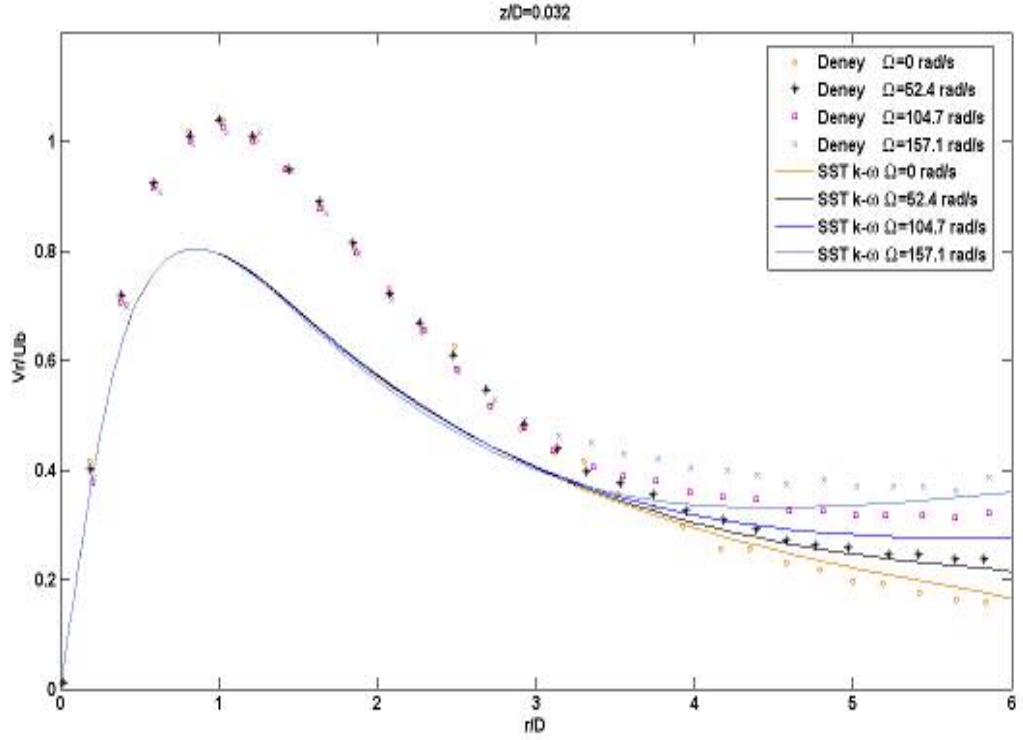
modelleri kullanılarak çözdürülmüştür. Disk üzerindeki hesap alanının doğru bir biçimde çözümlenebilmesi için duvar fonksiyonları ve yakın duvar modeli yaklaşımı kullanılmıştır. Çözümler diske yakın alanda hesap noktası artırıldıkça daha uzun sürede istenilen yakınsama değerlerine ulaşmıştır. Şekil 4.27 de disk dönme hızı $\Omega = 167.6$ rad/s için farklı türbülans çözüm modelleri kullanılarak elde edilen radyal hız değişim grafiklerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 4.27 Problem 3'te $\Omega=167.6$ rad/s ve $r/D=5.8$ için farklı türbülans modelleri ile elde edilen çözüm sonuçlarının Minagawa-Obi (2003) deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

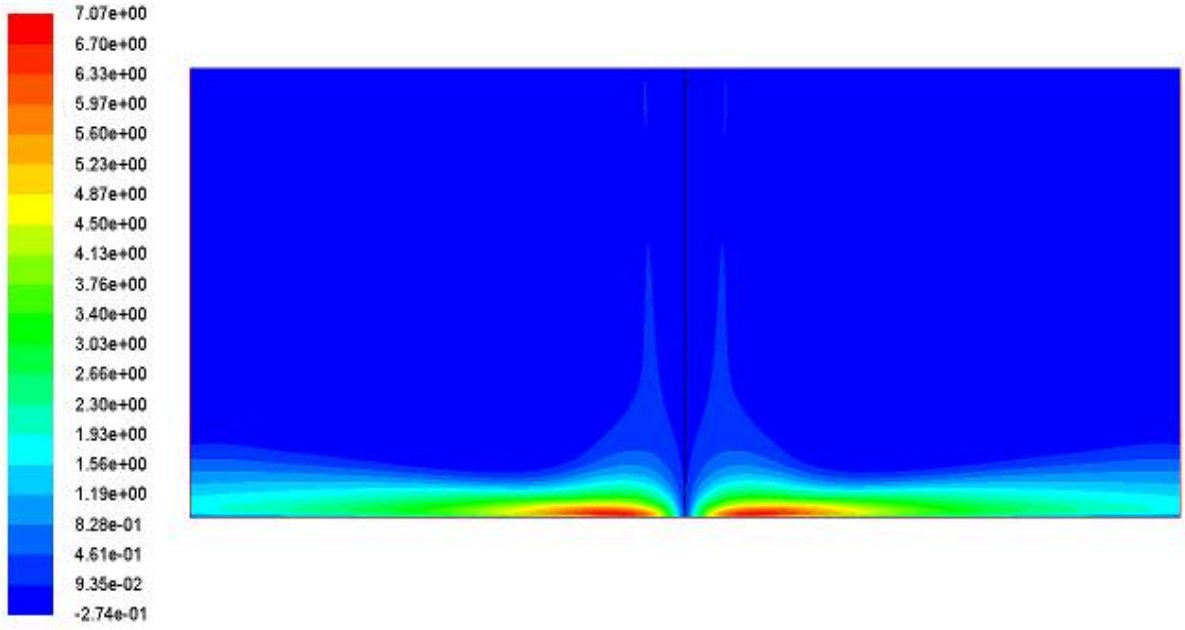
Grafiğe bakıldığında birbirine benzer sonuçların bulunduğunu fakat bazı bölgelerde ufak çözüm farklılıklarının meydana geldiği görülmüştür. Çözüm modelleri arasında en uzun yakınsama süresi diğerlerine oranla daha fazla denklem çözümü içerdiği için RSM çözüm modelinde olmuştur. Sadece yakın duvar yaklaşım modeli ile çözüm yapabilen SST k- ω çözüm modeli ise en hızlı yakınsama değerlerine ulaşan ve deney sonuçları ile en benzer sonuçları veren çözüm modeli olmuştur.

3 farklı açısal dönme hızı ile yapılan çözümler sonucunda diske çok yakın sabit bir yüzeyde ($z/D=0.032$) radyal hızların r doğrultusunda değişimlerini gösteren Şekil 4.28 deki grafik elde edilmiştir.

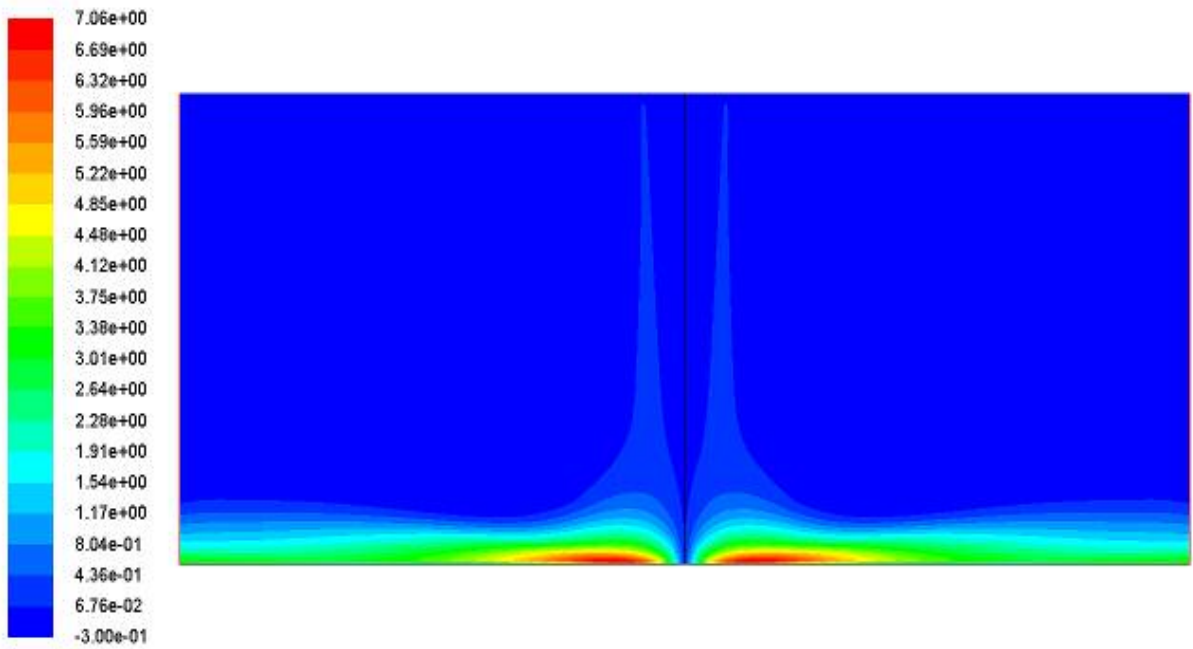


Şekil 4.28 Problem 3'te farklı dönme hızları için $z/D=0.032$ 'deki boyutsuz radyal hızların (V_r/U_b) radyal yönde değişim grafiği

Grafikler ve konturlar incelendiğinde radyal hız büyüklüklerinin çarpmanın meydana geldiği merkeze çok yakın alanda yok denecek kadar küçük olduklarını ve burada durma noktasını meydana getirdiklerini görüyoruz. Daha sonra çok hızlı bir şekilde arttıkları $r/D \sim 1$ civarlarında da maksimum değere ulaştıkları gözlemleniyor. Sonuçlar karşılaştırıldığında merkeze çok yakın bölgede radyal hız büyüklükleri birbirlerinden çok farklı değildir. Dönme hızı etkilerinin merkezden uzak bir bölge diyebileceğimiz $r/D \sim 3$ 'ten sonra radyal hızların azalma eğilimlerine etki ederken meydana çıktıklarını ve dönme hızı arttıkça disk kenarına doğru radyal hız büyüklüklerinin de arttığını görüyoruz. Dönme hızı arttıkça sınır tabaka kalınlığı azalır. Açısal hız veya disk yarıçap büyüklüğünün artması ile teğetsel hız bileşeni ve merkezci kuvvetler artar.

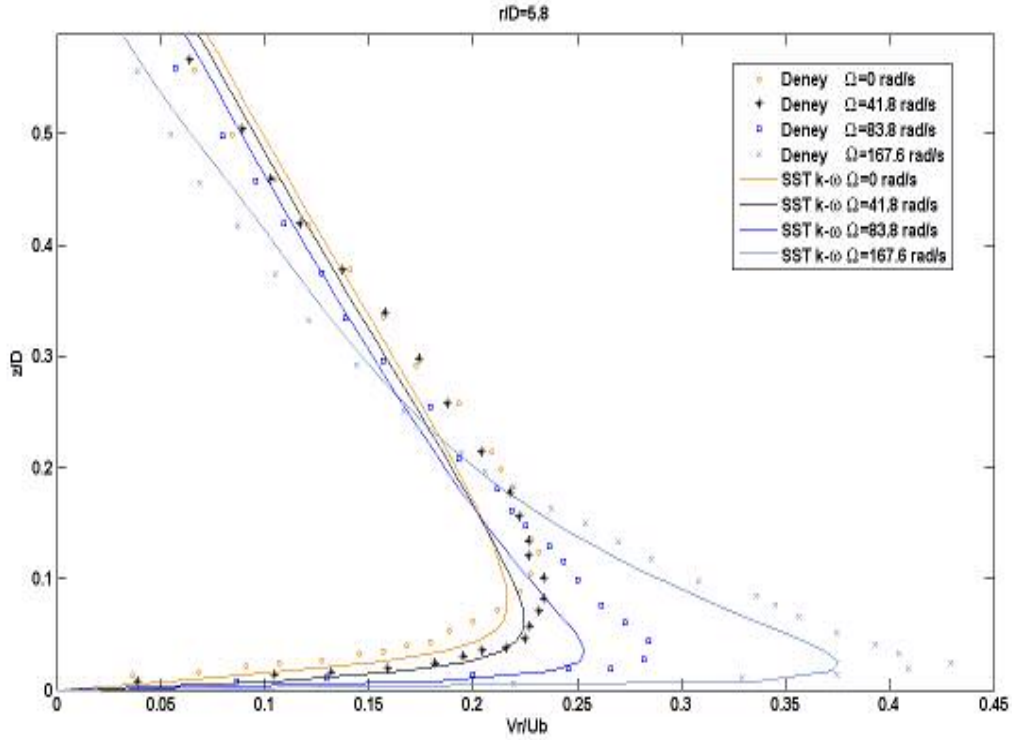


Şekil 4.29 Problem 3'te $H/D=5$, $Re=14000$ ve $\Omega=0$ rad/s için radyal hız (V_r) konturları



Şekil 4.30 Problem 3'te $H/D=5$, $Re=14000$ ve $\Omega=167.6$ rad/s için radyal hız (V_r) konturları

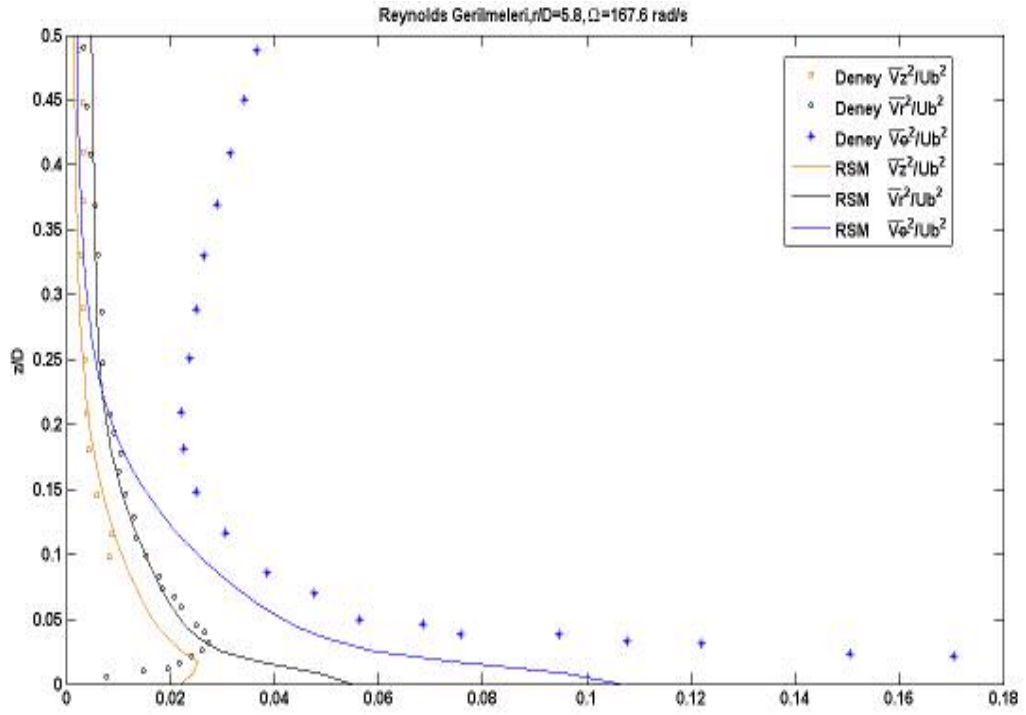
Disk yüzeyine çok yakın bölgedeki radyal hızların aksenal koordinatlarda, boyutsuz uzaklık z/D ye göre değişimleri benzer biçimde 3 farklı açısal dönme hızı için incelenmiş ve Şekil 4.31 deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.31 Problem 3'te boyutsuz radyal hızların (V_r/U_b) farklı dönme hızları için $r/D=5.8$ sabit yarıçap doğrusu boyunca aksenal yönde değişim grafiği

Bu grafikte de radyal doğrultudaki değişime benzer şekilde radyal hızların aksenal (z) doğrultuda önce hızlı bir artış gösterip maximum değerlerine ulaştıkları ve peşine de hızlı bir alçalma gösterdikleri görülmektedir. Dönme hızlarının disk yüzeyine yakın tabakada radyal hız büyüklüklerini arttıran yönde etkiledikleri ve z doğrultusunda disk yüzeyinden uzaklaştıkça radyal hızların birbirlerine yakın değerler aldıkları görülüyor.

RSM modeli ile çözüm zaman olarak ve performans olarak diğer çözüm modellerinden iyi olmasa da Reynolds gerilmelerini hesaplayan ve bu konuda bize fikir veren tek çözüm modelidir. Şekil 4.32 de 167.6 rad/s hızla dönen diske çarpan jet akımındaki teğetsel, aksenal ve radyal yöndeki Reynolds gerilmelerinin değişimleri görülmektedir.

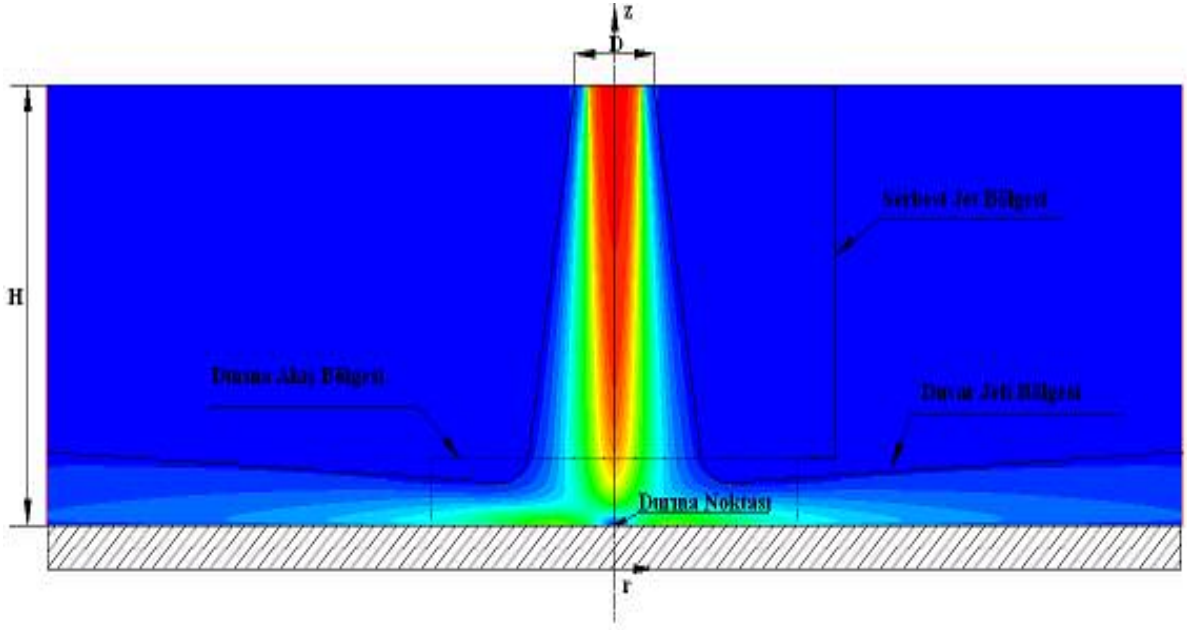


Şekil 4.32 Problem 3'te $H/D=5$, $r/D=5.8$, $\Omega = 167.6$ rad/s için Reynolds gerilmelerinin aksenal yönde değişim grafiği

5. SONUÇLAR

Eksenel simetriye sahip dönen cisimlerin aerodinamik incelenmesi teknik uygulamalardaki önemi nedeniyle araştırmacıların dikkatlerini sürekli olarak üzerine çekmiştir. Akış hareketleri incelenirken kullanılan korunum denklemleri lineer olmadıklarından çözümleri oldukça güçtür. Bir akışkan hareketi ile tam çözüm momentum korunum denklemleri ve süreklilik denklemlerinin kullanılmasıyla hız ve basınç alanı için kesin çözümlerin elde edilmesi olarak tanımlanabilir. Schlichting(1968)'in Navier-Stokes denklemlerinin tam çözümünü veren dönen disk yüzeyine yakın laminer akım çalışması ile FLUENT programı kullanılarak elde edilen HAD sonuçları karşılaştırıldığında akım alanının $F(\xi), G(\xi), J(\xi)$ benzeşim fonksiyonları ile tanımlanabildiği görülmüştür.

Çarpma jet akımıyla ilgili yaptığımız çalışmalar bize akım yapısının serbest jet, durma veya çarpma noktası ve duvar jeti bölgeleri olmak üzere üç ana kısımdan oluştuğunu göstermiştir. Bunlardan serbest jet halinde oluşan akımın yapısı da 3 ayrı bölgeden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla potansiyel çekirdek bölgesi, geçiş bölgesi ve tam gelişmiş bölgedir. Potansiyel çekirdek bölgesinde akım hızı jet çıkış hızına eşittir. Potansiyel çekirdekten sonra türbülans şiddeti artarken hız düşmeye başlar ve tam gelişmiş bölgedeki hız profilleri benzer yapıya sahiptir. Jet akımını etkileyen en önemli unsurlar jet çıkış kesitindeki hız profili, jet çıkış geometrisi, Reynolds sayısı ve çıkış ortamının koşullarıdır. Jetin bir yüzeye çarpması halinde ise oluşacak akımın yapısı, yüzeyin yerleştirildiği yerin jet çıkış kesitine olan uzaklığına bağlıdır. Çıkış noktasından itibaren uzaklık arttıkça, jet ile çevre arasındaki momentum aktarımı, jetin serbest sınırının genişlemesine ve sabit hız çekirdeğinin daralmasına yol açar. Hız profili tüm jet kesiti boyunca sabit değildir, hız, boru çıkışından itibaren uzaklık arttıkça, azalır. İkinci kısım olan çarpma noktası civarında akım alanı çarpmadan etkilenir, normal doğrultuda merkez noktasına yaklaştıkça yavaşlar, yatay doğrultuda (r veya x_f) yönde ise hızlanır ve "duvar jeti" olarak tanımlanan bölge oluşur (Knowles, 1996; Moran, 2004).



Şekil 5.1 Çarpan jet akımı bölgeleri

Son kısım olan duvar jeti bölgesinde yatay ivmelenme sürekli olamaz ve durma bölgesinde ivmelenen akış yavaşlayan duvar jetine dönüşür. Böylece jetin yüzeye çarptığı noktadan itibaren mesafenin artması ile yüzeye paralel hız bileşeni bir maksimuma ulaştıktan sonra tekrar azalır.

Dönen disk yüzeyine çarpan jet akımı ile ilgili yapılan çalışmalarda radyal doğrultuda (r) dönme hızı etkisinin çarpma bölgesinde pek görülmediği daha çok disk kenarına yaklaştıkça radyal hız büyüklüklerini arttıran yönde ortaya çıktıkları görülmektedir. Benzer şekilde dönme hızı etkileri aksenal doğrultuda (z) disk yüzeyine çok yakın bir bölgede belli bir sınıra kadar ($z/D=1$) etki ettiği ve radyal hız büyüklüklerini büyülterek değiştirdiği görülmektedir.

Yüzeye çarpan jetlerin diğer taşınım tiplerinden farkı, akışkanın dairesel veya dikdörtgen kesitli bir çıkış ağzından yüzeye dik veya belirli bir açıyla üflenmesidir. Akışkanın yüzeye dik olarak üflenmesi ve çarpmanın oluşumu yüzeye paralel akışa göre sınır tabaka kalınlığını oldukça inceltir. Termal direnci arttıran sınır tabakanın incilmesiyle ısı transferinde bir artış meydana gelir (İşman vd., 2005). Çarpan jet akımlarında sabit yüzey sıcaklığındaki diskin çarpan hava jeti ile soğutulması sırasında radyal doğrultuda Nusselt sayısı değişimleri gözlenmiştir. En büyük Nusselt sayılarının çarpma bölgesinde meydana geldiği ve r/D değeri arttıkça ısı transferinin azaldığı görülmüştür.

Daha önce değişik araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen deneysel veya sayısal çalışmalardan elde edilmiş olan sonuçlarla, benzer şartlar altında çalıştırılan modelden elde

edilen sonuçların birbirine yakınlık derecesi nümerik çözümde kullanılan model, metod, algoritma ve enterpolasyon yöntemleri seçimlerinin uygunluğunu göstermektedir. Yapılan sayısal çalışmalarda çözüm uyumunu etkileyen en önemli faktörlerin duvar fonksiyonları ve çözümde kullanılan türbülans modellerinden kaynaklandığı görülmüştür. Yapılan karşılaştırmalarda yakın duvar modeli yaklaşımı kullanılarak SST k- ω türbülans modeli ile elde edilen sayısal HAD çözümlerinin literatürde daha önce benzer konularda yapılmış çalışmalara daha yakın sayısal sonuçlar verdiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

Arif, H., (1999), Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) to the Modeling of Flow in Horizontal Wells, Thesis for the Degree of Master of Science, The Department Of Petroleum Engineering of Stanford University, June 1999.

Barlas, B. ve Aldoğan, A.İ., (1999), “Gemi Arkasındaki Türbülanslı Akışın Nümerik Hesaplanması”, Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi Bildiri Kitabı, 84-97, İstanbul.

Baughn, J. ve Shimizu, S., (1989), “ Heat Transfer Measurements from a Surface with Uniform Heat Flux and an Impinging Jet”, ASME J.Heat Transfer , 111, 1096-1098.

Baughn ,J., Hechanova, A. ve Yan, X., (1991), “An Experimental Study of Entrainment Effects on the Heat Transfer From a Flat Surface to a Heated Circular Impinging Jet”, ASME J.Heat Transfer, 113, 1023-1025.

Behnia, M., Parneix, S., Shabany, Y. ve Durbin, P. A., (1999), “Numerical Study of Turbulent Heat Transfer in Confined and Unconfined Impinging Jets”, Int. J. Heat and Fluid Flow, 20, pp. 1-9.

Colucci, D., ve Viskanta, R., (1996), “Effect of Nozzle Geometry on Local Convective Heat Transfer to a Confined Impinging Air Jet”, Experimental Thermal and Fluid Science, 13, 71-80.

Cooper, D., Jackson, D. C., Launder, B. E. ve Liao, G. X., (1993), “Impinging Jet Studies for Turbulence Model Assessment – I. Flow-field experiments”, Int. J. Heat and Mass Transfer, 36: 2675-2684.

Craft, T. J., Graham, R. H. ve Launder, B. E.,(1993), “Impinging Jet Studies for Turbulence Model Assessment – II. An Examination of the Performance of Four Turbulence Models”, Int. J.Heat and Mass Transfer, 36, 2685-2697.

Fluent 6.2 Documentation, Commercial code package usersguide, Fluent Inc, Germany, 2005

Gant, S.E., (2002), Development and Application of a NewWall Function for Complex Turbulent Flows, Ph.D.Thesis, University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, UK.

İşman, M.K., Pulat,E. ve Etemođlu, A.B., (2005), “Çarpan Dikdörtgen Hava Jetlerinde Akış ve Isı Transferi Karakteristiklerinin Sayısal Analizi”, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi 25,1,17-24.

- Kaya, O.,(2004),“Plastik Boruların Dikdörtgen Kesitli Helisel Kanallarla Soğutulmasının Deneysel ve Nümerik Analizi”, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi , 24, 85-100.
- Knowles, K., (1996), “Computational Studies of Impinging Jets Using $k-\varepsilon$ Turbulence Models”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 22, 799-810.
- Launder, B.E. ve Spalding, D.B., (1972), Lectures in Mathematical Models of Turbulence, Academic Pres, London, England
- Lytle, D. ve Webb, B., (1994), “Ait Jet Impingement Heat Transfer at Low Nozzle-Plate Spacings”, Int.J.Heat Mass Transfer, 37, 1687-1697
- Menter, F.R.,(1994), “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications.”, AIAA Journal, 32(8):1598-1605.
- Minagawa, Y. ve Obi, S. (2003), “Turbulence Impinging Jet Onto a Co-axial Rotating Disk”, in:K. Hanjalic, Y. Nagano and M. J. Tummers(Eds.), Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, Begell House, New York, 755-763.
- Moran, A.G.B, (2004), Prediction of the Axisymmetric Impinging Jet with Different $k-\varepsilon$ Turbulence Models, Thesis for the Degree of Master of Science , Department of Thermo and Fluid Dynamics Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- Schlichting H. (1968), Boundary Layer Theory (6th Edition), McGraw-Hill Book Company , New-York.
- Wilcox, D.C., 1998, Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., La Canada, California.
- Yan, X., (1993), A Preheated-Wall Transient Method Using Liquid Crystals for the Measurements of Heat Transfer on External Surfaces and in Ducts, Ph.D.Thesis, University of California, Davis.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] www.cfd-online.com

[2] <http://cfd.me.umist.ac.uk/ercofold/database/test25/test25.html>

[3] www.ercofac.com

[4] www.sciencedirect.com

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 14.05.1981

Doğum yeri Samsun

Lise 1992-1999 Samsun Anadolu Lisesi

Lisans 2000-2004 Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2004- Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

Çalıştığı kurumlar

2006- Altunel Isı Ltd.Şti