

171131



T.C

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖNEN DAİRESEL DİSK AKIŞI

Alaattin Metin KAYA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ
ANABİLİM DALI

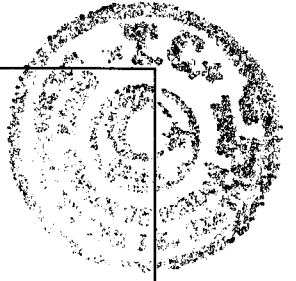
TEZ DANIŞMANI
Yrd.Doç.Dr. İlyas KANDEMİR

GEBZE
2005



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU



Alaattin Metin KAYA' nın tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 25.07.2005 Tarih ve 2005/26 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Enerji Sistemleri Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yard. Doç. Dr. İlyas Kandemir

ÜYE

: : Doç. Dr. Mahmut F. Akşit

ÜYE

: Yard. Doç. Dr. Erdoğan Sevilgen

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
08.09.2005 Tarih ve 2005/37 sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada, sıcaklık ve hız faktörlerinin, deneysel, teorik ve sayısal olarak, dönen dairesel disk akışına etkileri incelenmiştir. Dönen disk akışı ile ilgili olarak yapılmış olan çoğu çalışmada düzlemsel disk kullanılmıştır. Birkaç çalışma da gözenekli disk üzerine yapılmıştır. Bu çalışmada ise ilk defa konik geometriye sahip bir disk kullanılmıştır.

Yüksek devirlere çıkabilecek bir sistem tasarlanmakta olduğundan, dönen milin eksensel simetrisi oldukça önem arz etmektedir. Yatak sürtünmesini en aza indirmek, yüksek daimi hızlara ulaşabilmek ve ısı izolasyona katkı sağlayabilmek için dönen mil, havalı iki radyal yatak ve alttan bir havalı eksensel yatak ile desteklenmiştir. Düzenek, kararlılığını sağlamak için alttan zemine, yandan duvara çelik dübellerle sabitlenmiştir. Merkezkaç gerilmeler yapılan sonlu elemanlar analizi ile belirlenmiştir.

Yüksek hızlara ulaşabilmek için sürtünme katsayısı en düşük olan yatak (havalı yatak) kullanılmıştır. Diskin 3000 d/d'ye çıkabilmesi ve bu değer civarlarındaki hızlarda kendi haline bırakıldığında 30 dakikanın üzerinde bir zaman zarfında durgun hale gelmesi, havalı yatak kullanımının ne denli önemli olduğunun göstergesidir.

Hazırlanan deney düzeneğinde diskin tahrik edilmesi dremel, ısıtılması oksijen kaynağı ile yapılmıştır. Bu tip yüksek devirli ve sıcak koşullara maruz sistemlerde, hava yastıklı yatak kullanımının uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca, dönen parçanın mümkünse bir defada aynı tezgâhtan eksensel simetrik olarak üretilmesinin balans açısından önemli olduğu gözlemlenmiştir.

Teorik ve bu çalışmada yapılan sayısal hesaplarda ortaya çıkan, disk ucundan dışarıya doğru akışkan üfleme etkisi olarak gözlemlenen pompalama etkisi, deneylerde, bu bölgedeki sıcaklığın, dönen sıcak diskin açısal hızıyla artan bir davranış arz etmesine yol açmıştır. Üst ve alt yüzeyler arasındaki sıcaklık farkının akış alanına etkilerini gözlemlemek ise, disk içindeki hızlı ısı transferi nedeniyle sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilememiştir.

SUMMARY

Rotating disc flow and heat transfer problem is a classical fluid mechanics problem of theoretical and practical importance. Heat transfer from a rotating part is important in various rotating machinery. Disk drives in computers and gas turbine rotors may be shown as examples.

In this study, effects of temperature and velocity on the rotating disc flow were experimentally, theoretically, and numerically investigated. Most of the studies on rotating disc focus on planar geometry. Some studies involving porous disk exist, as well. This study, on the other hand, uses a disc with conical shape as a first.

Axial symmetry of the rotating disc is crucial, simply because it is intended to design a high rpm system. In order to minimize the bearing frictions, to achieve high steady speeds, and to contribute on the thermal insulation, the rotating shaft was supported by two radial and one axial air-bearings. The whole assembly was fixed to the ground and side wall using steel pegs, to get a stiff structure. Centrifugal stresses were estimated using a finite element analysis.

In order to achieve high speeds, bearing with least friction (air-bearing) was chosen. When left free at 3000 rpm, continuation of the rotation for more than 30 minutes proves how important the use of air-bearings was.

In the experimental setup, dremel and oxygen-acetylene welding were used to rotate and heat the disk, respectively. It has been concluded that, use of air cushioned bearing in this kind of high rpm and hot surface systems was suitable. Added to this, if it is possible, for the sake of axial symmetry, manufacturing of the rotating part cut from a whole at once should be achieved for balance.

The pumping effect that was observed as outward blowing of the fluid at the tip of the disk in theoretical and numerical calculations done in this study caused a temperature increase at that region as the angular velocity increases. Because of the fast heat conduction through the disk material, it was not possible to conduct a sound investigation on how the temperature difference between the upper and lower surfaces of the disk affects the flow field.

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanmasında bana her türlü konuda destek olan, anlayış ve yol gösteren ve yüksek lisans eğitimim boyunca üzerimde büyük emeği olan Sayın hocam Yrd. Doç. Dr. İlyas KANDEMİR'e ve değerli yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve birikimlerini aktaran Sayın hocam Doç. Dr. Mahmut F. AKŞİT'e, ve Sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Erdoğan SEVİLGİN'e, Tasarım ve İmalat Mühendisliği Bölümü'ne, Enerji Sistemleri Bölüm Başkanı Doç. Dr. AlpEr KONUKMAN'a, Sayın Araştırma Görevlileri İsmail BİCAN ve Ufuk YAVUZ'a, teknisyen arkadaşım Sayın Selahattin UYSAL'a ve beni büyüten, yetiştiren, her zaman yanımda ve destek olan sevgili aileme katkılarından dolayı teşekkürlerimi bildiririm.

Alaattin Metin KAYA

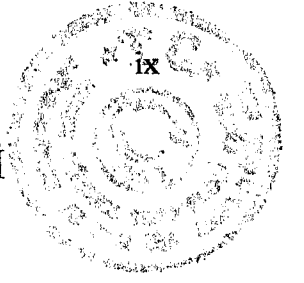
İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ	1
2.DÖNEN DAİRESEL DİSK AKIŞI	3
2.1.Dönen Disk Akışının Tarihsel Gelişimi	3
2.2.Tek Bir Disk Üzerinde Laminer Akış	5
2.3.Serbest Disk Üzerinde Laminer Akış	6
2.3.1.Teorik Çalışmalar	6
2.3.2.Deneysel Çalışmalar	14
2.4.Laminer Akış Denklemlerinin Genelleştirilmesi	16
2.4.1.Dönen Bir Akışkandaki Dönen Disk	17
2.4.2.Dönen Bir Akışkandaki Sabit Disk	18
2.4.3.Dönen Bir Diske Akış Etkisi	21
3.DENEY DÜZENEĞİ VE TASARIMI	23
3.1.Disk	23
3.1.1.Konilerin Tasarımı	23
3.1.2.Şaft Tasarımı	24
3.1.2.1. Şaft Çapının Belirlenmesi	24
3.1.2.2. Şaft Boyunun Belirlenmesi	24
3.1.3.Disk Malzemesi	24
3.1.4.Disk'in Hazırlanışı	24
3.2.Alt Tabla	26
3.3.Kollar	26
3.4.Destek Elemanı	28
3.5.Yataklar	28

3.5.1.Rulmanlı Yataklar	29
3.5.1.1. Bilyeli Rulmanlar	29
3.5.1.2. Makaralı Rulmanlar	30
3.5.1.3. İnce Kesitli Rulmanlı Yataklar	31
3.5.2.Düzlem Yataklar	32
3.5.3.Hidrostatik Yataklar	32
3.5.4.Manyetik Yataklar	32
3.5.5.Havalı Yataklar	32
3.5.6.Yatak Seçimi	33
3.5.7.Deneyde Kullanılan Yatakların Teknik Özellikleri	34
3.6.Taşıyıcı Eleman	35
3.7.Diğer Ekipmanlar	35
3.8.Deney Öncesi Düzenegün Hazırlanışı	36
4.DENEYİN YAPILIŞI	38
4.1.Yapısal Analizler	38
4.1.1.Analiz Koşulları	38
4.1.2.Analiz Sonuçları	39
4.2.Akış Analizi	40
4.3.Deney Aşamaları	42
4.3.1.Diskin Tahrik Edilmesi	42
4.3.2.Diskin Isıtılması	42
4.4.Deney	43
4.5.Akış Analizleri	44
5.SONUÇLAR	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEMİŞ	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ



Sabitler

a	: Diskin İç Çapı
b	: Diskin Dış Çapı
c_p	: Sabit Basıncıta Özgül Isı
k	: Isı İletim Katsayısı
μ	: Dinamik Viskozite
ν	: Kinematik Viskozite
ρ	: Yoğunluk
Ω	: Rotorun Açısal Hızı

Değişkenler

H	: Toplam Entalpi
M	: Rotorun Bir Tarafındaki Moment
$\dot{m}$	: Radyal Kütle Debisi
p	: Akışkandaki Statik Basıncı
q	: Isı Akısı
r	: Radyal Koordinat
T	: Sıcaklık
(u, v, w)	: Dönen Silindirik Koordinatlarda Hız Bileşenleri
(v_r, v_ϕ, v_z)	: Sabit Silindirik Koordinatlarda Hız Bileşenleri
α	: $-\tau_{r,0}/\tau_{\phi,0} = \lim_{z \rightarrow 0} [v_r(r, z)/v_\phi(r, z)]$
β	: ω/Ω ; Koni - Sirkülasyon Oranı
Γ	: $r v_\phi$; Sirkülasyon
δ, δ_T	: Hız Kalınlığı, Termal Sınır Tabaka
ε_m, σ	: Benzerlik Parametresi, $(\dot{m}/\mu r = \varepsilon_m (x^2 \text{Re}_\phi)^{\sigma})$
τ_0	: Yüzeyde Kayma Gerilmesi
τ_ϕ, τ_r	: Sınır Tabakada Kayma Gerilmesinin Radyal ve Teğetsel Bileşenleri



- ϕ : Teğetsel Koordinat
 Φ : Enerji Denkleminde Dissipation Terimi
 ω : Sınır Tabaka Dışındaki Akışkanın Açısal Hızı

Boyutsuz Sayılar

- C_M : Rotorun Bir Tarafındaki Moment Katsayısı
 C_w : $\dot{m}/\mu r$, Boyutsuz Akış Oranı
 K_H : Entalpi Şekil Faktörü
 K_T : Entalpi Sıcaklık Faktörü
 K_V : Entalpi Hız Faktörü
 K_w : Gerilme Akış Oran Parametresi
 Nu : Lokal Nusselt Sayısı
 Pr : Prandtl Sayısı
 Re_ϕ : Dönel Reynolds Sayısı
 Re_ϕ^f : Modifiye Edilmiş Dönel Reynolds Sayısı
 x : r / b Boyutsuz Yarıçap
 ζ : Boyutsuz Eksenel Koordinat
 $x^2 Re_\phi$: Lokal Dönel Reynolds Sayısı

Alt İndisler

- r, ϕ, z : Radyal, Teğetsel, Eksenel Yönler
 w : Diskdeki Değer (K_w, C_w, Re_w Hariç)
 ∞ : Diskten Uzaktaki Değer

Üst İndisler

- $*$: β^* ; β 'nın süperpoze Olmayan Akıştaki Değeri

ŞEKİLLER DİZİNİ



Sekil

2.1 Döner bir disk için koordinat sistemi	5
2.2 Serbest disk için laminar hız profilleri	12
2.3 CM 'in Re ile değişimi	14
2.4 Serbest disk ζ ile değişimler	15
2.5 Döner bir akışkandaki sabit disk için hız profilleri	20
3.1 Nihai disk	26
3.2 Alt tabla	26
3.3. Deney Düzenek	28
3.4 .Destek Elemanı	28
3.5 Conrad tipi (solda), maksimum kapasite tipi (sağda) radyal rulmanlı yataklar	30
3.6 Küresel makaralı çift sıralı rulmanlı yatak	31
3.7 Manyetik yatak	32
3.8 Havalı Yatak ve Teknik Özellikleri	34
3.9 Deney tertibatı	36
4.1 Disk ve Yataklar	39
4.2 Analiz sonucu disk	39
4.3 Disk Üzerindeki Akış	40
4.4 Düzlemsel Disk Üzerinde Hız Vektörleri ve Sıcaklık Gradyanı	41
4.5 Sıcaklığın Akış Rejimine Etkisi: Türbülansa geçiş	41
4.6 Döner disk etrafındaki pompalama etkisi – Hız Grafiği	44
4.7 Diske üstten bakış, hız vektörleri	45
4.8 Disk etrafındaki basınç dağılımı	45

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Serbest disk için Von Karman'ın nümerik çözümleri	11
2.2 Dönen bir akışkandaki sabit disk için hız profilleri	19
2.3 Dönen bir diske akış etkisi için moment katsayısı değerleri	22
4.1 Disk ve yatakların analiz özellikleri	38
4.2 Analiz sonuçları	39



1 GİRİŞ

Bu çalışmada, sıcaklık ve hız faktörlerinin, deneysel ve teorik olarak akışa etkileri incelenmiş, bulunan sonuçlar nümerik yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır.

Dönen disk akışı ve ısı transferi problemi, teorik ve pratik öneme sahip, klasik akışkanlar mekaniği problemlerinden biridir. Dönen bir parçadan ısı transferi, çeşitli makinelerin dönen bileşenleri için önemlidir. Bilgisayarlardaki disk sürücüler ve gaz türbin rotorları bunlara örnek olarak gösterilebilir.

Navier-Stokes denklemleri, akışkanlar mekaniğinde en fazla başvurulacak denklemlerdir. Bu denklemler, korunum denklemlerinin yeniden ifadesi ile elde edilmiştir. Birçok akış probleminde analitik çözüm bir hayli zordur, ancak Navier-Stokes denklemlerinde yapılan birtakım kabuller neticesinde çözüme daha kolay ulaşılabilmektedir. Bu durum nümerik çözüm yöntemlerinde de aynen geçerlidir. Söz konusu kabuller, kimi zaman bazı kombine etkilerin yanlış tahliline neden olabilmektedir. Yüksek sıcaklık ve hız faktörleri de bunlardandır.

Dönen dairesel disk etrafındaki laminar akış problemi, az sayıda çözümü olan 3 boyutlu Navier-Stokes denklemlerinden, kesin çözümü olan bir problemdir. Bu tip akış ilk olarak yaklaşık bir metot ile von Karman tarafından incelendi [Karman, 1921]. Karman, sonsuz bir disk için viskoz, sıkıştırılamaz akışkan ve daimi akış şartlarındaki bir problem için Navier-Stokes denklemlerinin adi bir diferansiyel denklem setine indirgenebileceğini gösterdi ve yaklaşık bir integrasyon metodu kullanarak bu denklemleri çözdü. Sonsuz bir diskin dönmesiyle indüklenen viskoz akışkanın eksensel simetrik hareketini, benzerlik dönüşümü kullanarak inceledi; bir sınır tabaka yaklaşımı ile radyal mesafeden bağımsız olan akış sınır tabakası benzeşimini buldu.

Akışkanların hareketleri incelenirken kullanılan momentumun korunumu denklemleri, lineer olmayan kısmi türevli diferansiyel denklemler olduklarından çözümleri oldukça güçtür. Bu denklemleri çözmek için yaklaşık veya deneye dayalı ampirik metotlar kullanılabilmesine rağmen, özellikle kuramsal akışkanlar mekaniğinde tam çözüm bulmak asıl amaçtır. Ancak, problem karmaşık oldukça, tam çözüm bulmak da güçleşir. Bir sıkıştırılamaz akış hareketi için tam çözüm,

momentumun korunumu denklemi ve süreklilik denkleminin kullanılmasıyla, hız ve basınç alanlarının elde edilmesi olarak tanımlanabilir. Sıkıştırılabilir akışlar için ise sıcaklığın ve yoğunluğun değişimi de bulunması gereken büyüklüklerdir.

Bu çalışmada yapılan deney ile teorik olarak incelenmesi çok zor olan; sıkıştırılabilir, viskoz, daimi olmayan bir akış incelenmiştir. Bu amaçla iki adet havalı radyal ve bir adet havalı destek yatağı kullanılarak bir diskin yataklaması yapılmış ve diskin yüzeyi ısıtılarak disk çevirilmiştir. Burada deneyin gerçekleştirilmesindeki ana zorluklar olarak, öncelikle diskin tasarımı ve imalatı, yataklaması ve kuvvet, hız, sıcaklık gibi temel verilerin elde edilmesi gösterilebilir.

Çalışma 5 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde dönen disk akışı ile ilgili genel bilgi verilmiştir. İkinci bölümde ise kapsamlı bir literatür araştırması ile günümüze kadar benzer problemler üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde deney düzeneğinin hazırlanışı ve deneyde kullanılan teçhizat hakkında bilgi verilmiş olup, tasarım aşaması da anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise deneyin yapılmasından evvelki analizler, deneyin yapılışı, deney şartları ve sonuçlar yer almıştır. Beşinci bölümde sonuçlar ve yorumlar sunulmuştur.

2 DÖNEN DAİRESEL DİSK AKIŞI

2.1 Dönen Disk Akışının Tarihsel Gelişimi

Tarihsel gelişimin bir bütünlük içinde takdimi için maddeler halinde sunulması uygun görülmüştür. Buna göre;

- Von Karman, dönen disk problemini ilk defa formüle etti [Karman, 1921].
- Cochran, iki seriyi genişletip birbirine ekleyerek daha hassas sonuçlar elde etti [Cochran, 1934].
- Benton, Cochran'ın çözümünü sağladı ve hidrodinamik problemi, daimi olmayan durum için genişletti [Benton, 1966].
- Bödewadt, farklı olarak, durgun bir disk ve sonsuzda üniform açısız hızla dönen akışkan üzerinde çalıştı [Bödewadt, 1940].
- Roger ve Lance, etrafında akışkan olan ve akışkandan farklı açısız hızda dönen bir disk ile benzer bir problemde nümerik olarak çalıştılar [Rogers M.G., Lance G.N., 1960].
- Stuart, Batchelor [Batchelor, 1951] tarafından yapılan öneriyi izleyerek, dönen diskin yüzeyinden, akışkanın üniform emilmesinin etkisini inceledi [Stuart, 1954]. Emiş etkisi, sonsuzda diske doğru eksensel akışın artışının ve hızın radyal ve azimut bileşenlerinin azalmasının özüdür. Sonuç olarak sınır tabaka inceltili.
- Ockendon, dönen bir akışkanda dönen bir diskin neden olduğu emme parametrelerinin küçük değerlerdeki problemin çözümünü belirlemek için asimptotik açılım kullandı [Ockendon, 1972].
- Wagner [Wagner, 1948], Millsaps ve Pohlhausen [Millsaps K., Pohlhausen K., 1942], etraftaki sabit sıcaklıktan farklı üniform bir yüzey sıcaklığı ile diskten ısı transferini belirlediler.
- Sparrow ve Gregg [Sparrow E.M., Gregg J.L., 1959], keyfi Prandtl sayılı bir akışkana, dönen bir diskten ısı transferini elde ettiler.
- Ostrach ve Thornton, Sparrow ve Gregg'in sabit sıcaklıkta dönen diskini ele alarak, kendi incelemelerini $Pr=0.72$ olan ve değişik

fiziksel özellikteki akışkan için genişlettiler [Ostrach S., Thornton P.R., 1958].

- Hartnett, havada dönen bir diskten ısı transferinde, yüzey sıcaklığının değişiminin etkilerini gözden geçirdi. Bunu yaparken, disk yüzeyi ile akışkan arasındaki sıcaklık farkına izin verdi [Hartnett, 1959].
- Merkin, ısıtılmış yatay dönen disk üzerinde, dış kenardan diskin merkezine doğru serbest akışı inceledi [Merkin, 1983].
- Zakerullah ve Ackroyd, değişebilen özellikleri olan akışkan için Merkin'in yaptıklarını daha önceden çalışmışlardı. Daha sonraki çalışmalarında diskin çevresine yakın bölgede yoğunlaştılar [Zakerullah M., Ackroyd J.A.D., 1979].

Bütün bu çalışmalarda akışkanın viskozitesi sabit kabul edildi. Bununla beraber viskozite, sıcaklık ile birlikte önemli ölçüde değişebilir ve akış davranışlarını daha doğru tahmin etmek için, sıkıştırılmaz akışkanlarda viskozite değişimini hesaba katmak gerekebilir.

- Gary ve arkadaşları [Gary et al, 1982] ile Mehta ve Sood [Mehta K.N., Sood S., 1978], viskozite etkisi içerildiğinde, akış karakteristiklerinin sabit viskozite kabulüne göre önemli ölçüde değişebileceğini gösterdi.
- Kafoussias ve Williams [Kafoussias N.G., Williams E.W., 1995] ile Kafoussias ve Rees [Kafoussias N.G., Rees D.A.S., 1998], hücum kenarına yakın bölgede, dikey düzlemde karışık konveksiyon akışında, sıcaklığa bağımlı viskozite etkisini, bölgesel benzerlik metodu kullanarak inceledi.
- Hassain ve Munir, doğal konveksiyon ve zorlanmış konveksiyonun hâkim olduğu 2 uç akış bölgesinde, pertürbasyon tekniği kullanarak dikey düzlemde karışık konveksiyon problemini incelediler [Hossain M.A., Munir M.S., 2000]. Zorlanmış-serbest konveksiyon rejiminde, sonlu farklar metodu ile Keller box eliminasyon tekniği [Keller, 1978] ile çalışıldı. Sıcaklığın lineer fonksiyonu olarak değişen viskozite

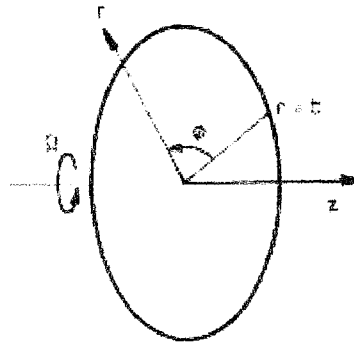
düşünülerek, viskozite değişiminin etkisini gösteren sonuçlar elde edildi.

2.2 Tek Bir Disk Üzerinde Laminer Akış

Rotor-stator sistemlerinde meydana gelen karmaşık akışı incelemekten önce, serbest uzayda dönen tek bir disk için akışı düşünmek daha uygundur. Serbest uzayda dönen tek bir disk akışı için şu 4 durum mevcuttur [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989] :

1. Diskten uzakta akış yoktur. Bu durum sık sık “serbest disk” olarak adlandırılır.
2. Diskten uzakta, diskin hızından daha düşük hızda dönen bir akışkan vardır.
3. Disk durgun, diskten uzakta akışkan dönmektedir.
4. Dönen diskin üzerine eksensel bir akış uygulanmıştır.

Çalışmanın şartlarına en uygun olan serbest disk, b yarıçapında, $z = 0$ düzleminde, z -ekseni etrafında Ω açısal hızı ile dönmekte olsun (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Dönen bir disk için koordinat sistemi [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989]

Sınır tabakası, diskin her tarafındaki hızın teğetsel bileşeni boyunca gelişir ve söz konusu hız Ωr 'dir. Bu değer, sınır tabakası dışındaki serbest akımda sıfır değerine kadar düşer. Birçok uygulamada, sadece diskin bir tarafındaki akış ($z > 0$) ve sadece $r \leq b$ olan bölge düşünülmektedir [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989].

Dönen disk tarafından oluşan merkezkaç kuvvetler, sınır tabakası ile birlikte akışkanın dışarı atılmasına neden olur. Hızın radyal bileşeni diskte ve uzaktaki serbest akımda sıfır olduğu için, dış akışkan eksensel olarak sınır tabakasının içerisine çekilir. Radyal dış akış sık sık serbest disk pompalama etkisi olarak anılır [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989].

Sınır tabakasının içerisindeki belirgin parametre, bölgesel dönel Reynolds sayısıdır: $x^2 Re_\phi = \Omega r^2 / \nu$ [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989]. Bu sınır tabakasındaki akışın rejimi laminar veya türbülanslı olabilir. Ω 'nın bütün değerleri için sınır tabaka içerisinde, dönme eksenine yakın yerdeki akış genellikle laminardır. Ω 'nın geniş değer aralığı için, r 'ye göre küçük değerler olsa bile, akış türbülanslı olabilir. İkinci durumda laminar ve türbülanslı akış arasında bir geçiş bölgesi olacaktır [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989].

2.3 Serbest Disk Üzerinde Laminer Akış

2.3.1 Teorik Çalışmalar

Şekil 2.1'de $z > 0$ ve $r \leq b$ bölgesinde hız bileşenleri için sınır şartları şöyledir :

$$z = 0 \text{ da ;}$$

(2.01)

$$v_r = 0 \quad , \quad v_\phi = \Omega r \quad , \quad v_z = 0$$

$$z \rightarrow \infty \text{ için}$$

$$v_r \rightarrow 0 \quad , \quad v_\phi \rightarrow 0$$

$z \rightarrow \infty$ durumundaki v_z değeri sınır şartı olarak belirtilmemiştir. Çünkü Bölüm 2.2'de belirtilen pompalama etkisi dolayısı ile, süreklilik denklemini sağlayacak negatif değeri alır.

Problemi ilk teorik olarak ele alan Karman, yeni bir boyutsuz değişken belirledi

$$\zeta = z \left(\frac{\Omega}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.02)$$

ve hız bileşenleri ile basıncı bu değişkene bağladı :

$$v_r = \Omega r F(\zeta), \quad v_\phi = \Omega r G(\zeta), \quad v_z = (\Omega \nu)^{\frac{1}{2}} H(\zeta), \quad p = -\rho \Omega \nu P(\zeta) \quad (2.03)$$

Bu ilişkiler aşağıda verilen, sıkıştırılamaz silindirik koordinatlardaki Navier-Stokes denklemlerine uygulanacaktır.

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.04)$$

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\phi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\nabla^2 v_r - \frac{v_r}{r^2} \right) \quad (2.05)$$

$$v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} + \frac{v_r v_z}{r} = \nu \left(\nabla^2 v_\phi - \frac{v_\phi}{r^2} \right) \quad (2.06)$$

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 v_z \quad (2.07)$$

Burada laplasyen operatörü

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.08)$$

olmaktadır.

Buradan hareketle, ζ 'ye göre kısmi türevleri içeren şu denklemler elde edilir :

$$H' = -2F, \quad (2.09)$$

$$F'' = F'^2 - G'^2 + F'H \quad (2.10)$$

$$G'' = 2FG + G'H \quad (2.11)$$

$$P' = HH' - H'' \quad (2.12)$$

Von Karman denklemleri olarak adlandırılan (2.09-2.11) denklemleri ile denklem (2.01)'deki sınır şartları kullanılarak

$$F(0) = 0 \quad G(0) = 1 \quad H(0) = 0 \quad (2.13)$$

$$\zeta \rightarrow \infty \quad F(\zeta) \rightarrow 0 \quad G(\zeta) \rightarrow 0 \quad (2.14)$$

elde edilir.

Denklem (2.12) sadece $P(\zeta)$ 'ye bağımlı olduğu için, yukarıdaki sınır şartları ve (2.09) denklemini kullanarak direkt integre edilir ve

$$P(\zeta) = P(0) + \frac{1}{2} H^2(\zeta) + 2F(\zeta) \quad (2.15)$$

Bulunur [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989].

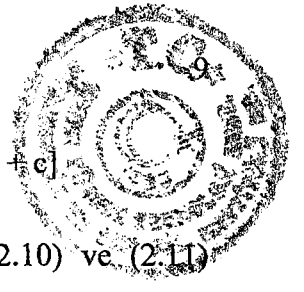
Denklem (2.13) ve (2.14)'deki sınır şartları yardımı ile denklem (2.09-2.11)'in çözülmesi sonucu problem basite indirgenir.

Denklemi çözmek için hangi tekniğin kullanılacağına karar vermeden önce sistemin $\zeta \rightarrow \infty$ durumunda nasıl davranacağı incelenmelidir.

$\zeta \rightarrow \infty$ İken $F(\zeta) \rightarrow 0$ olduğu için denklem (2.09) şu duruma gelir :

$$H \rightarrow H_\infty = -c \quad (2.16)$$

Burada c bir sabittir ve değeri sadece ζ 'nin geniş bir aralığında denklemin çözümüyle belirlenebilir. c'nin pozitif olması için sağ tarafa eksi işareti konur.



$$F^2(\zeta), G^2(\zeta), F(\zeta)G(\zeta), F'(\zeta)[H(\zeta)+c] \text{ ve } G'(\zeta)[H(\zeta)+c]$$

$\zeta \rightarrow \infty$ durumunda 2.dereceden küçük değerler oldukları için (2.10) ve (2.11) denklemleri;

$$F'' + cF' \approx 0, \quad G'' + cG' \approx 0 \text{ haline gelir. Buradan, } \zeta > \zeta_0 \gg 0 \text{ için}$$

$$F(\zeta) \approx F(\zeta_0)e^{-c(\zeta-\zeta_0)}, \quad G(\zeta) \approx G(\zeta_0)e^{-c(\zeta-\zeta_0)}, \quad H \approx -c \quad (2.17)$$

elde edilir.

Tam denklemler ilk Cochran tarafından çözüldü [Cochran, 1934]. Cochran, $\zeta = 0$ civarında, denklem (2.17)'den yola çıkarak, ζ 'nin geniş değerleri için, asimptotik bir açılım ile seri çözüm elde etti. Alternatif bir metot, benzer bir şekilde Roger ve Lance tarafından kullanıldı [Rogers M.G., Lance G.N., 1960].

ζ 'nin sonsuz değerlerinde çalıştıkları için denklemlerin integrasyonunda zorluklar ortaya çıktı. $F'(0)$ ve $G'(0)$ 'ı tam belirleyebilmek için dönüşüm kullanılması denklemi iyileştirmektedir [Benton, 1966]. Yeni bağımsız değişken ξ ,

$$\xi = e^{-c\zeta} \quad (2.18)$$

olarak belirlendi ve yeni bağımlı değişkenler $f(\xi)$, $g(\xi)$ ve $h(\xi)$ oldu.

$$F(\zeta) = c^2 f(\xi), \quad G(\zeta) = c^2 g(\xi) \quad H(\zeta) = -c[1 - h(\xi)] \quad (2.19)$$

$\zeta=0$ olduğunda $\xi=1$ ve $\zeta \rightarrow \infty$ ise $\xi=0$ olduğu için $0 \leq \xi \leq 1$ dir. Bu durumda denklem (2.09), (2.10) ve (2.11) şu hale gelir :

$$\xi^2 \ddot{f} = f^2 - g^2 - \xi \dot{f} \dot{h} \quad (2.20)$$

$$\xi^2 \ddot{g} = 2fg - \xi \dot{g} \dot{h} \quad (2.21)$$

$$\xi \dot{h} = 2f \quad (2.22)$$

Noktalı ifadeler yegâne bağımsız değişken olan ξ 'ye göre türevleri belirtir. Sınır şartları denklem (2.13), (2.14) ve ekstra şart olan $h(0) = 0$ ile şu hale gelir ;

$$f(0) = g(0) = h(0) = 0 \quad (2.23)$$

$$f(1) = 0, \quad g(1) = \frac{1}{c^2}, \quad h(1) = 1 \quad (2.24)$$

Bu sınır şartları ve denklem (2.20–2.22) c sabitini içermez. Sistem bu yüzden tek çözümlü olabilir. c sabiti (2.24) ifadesinde 6. sınır şartı olarak verilir. Benton, $\xi=0$ ve $\xi=1$ civarlarında, yani aralığın ortasında, eşleştirme yaparak güç serileri çözümünü kullandı. Fakat bu yaklaşım, problemi $\dot{f}(0)$ ve $\dot{g}(0)$ 'ın tahmini değerleri ile başlangıç değer problemi olarak ele almaktadır. Düzeltilmiş değerler, gerekli hassasiyeti sağlayan (2.24) ifadesinde f (1) ve g (1)'de verilen sınır şartları yardımıyla deneme yanılma yöntemi kullanılarak belirlenir.

$\xi = 0$ olduğu durumda $\ddot{f}(\xi)$, $\ddot{g}(\xi)$ ve $\dot{h}(\xi)$ için genel açıklamaların hepsi belirsiz olur. Bu durumda, $\ddot{f}(0)$, $\ddot{g}(0)$, ve $\dot{h}(0)$ 'ı belirleyebilmek için ξ üzerinde bir kuvvet serisi kullanmak gereklidir.

$$\ddot{f}(0) = -[\dot{f}^2(0) + \dot{g}^2(0)] \quad , \quad \ddot{g}(0) = 0 \quad \text{ve} \quad \dot{h}(0) = 2\dot{f}(0) \quad \text{olduğu gösterilebilir.}$$

(2.20), (2.21) ve (2.22) denklemleri 5 tane 1. mertebeden denklem olarak yeniden yazılabilir.

Bilgisayar yardımı ile şu değerler bulunur [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989] :

$$\dot{f}(0) = 1.182245 \quad \dot{g}(0) = 1.536777 \quad (2.25)$$

Denklemler bir kere çözdürülür; $H_\infty = -c$, $F'(0)$ ve $G'(0)$ değerleri, şu ilişkiler kullanılarak geliştirilir:

$$c = [1/g(1)]^{\frac{1}{2}}, \quad F'(0) = c^3 \dot{f}(1), \quad G'(0) = c^3 \dot{g}(1) \quad (2.26)$$

Oldukça büyük hassasiyet elde edilmesine rağmen, birçok amaç için şu değerleri almak tatmin edicidir [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989];

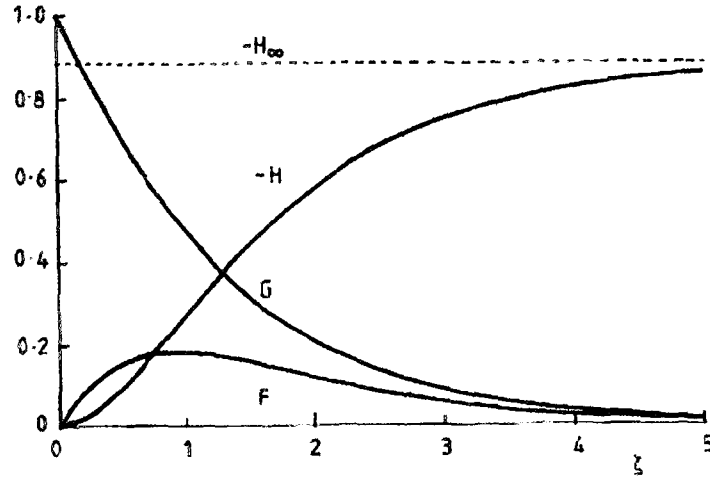
$$H_\infty = -0.884474, \quad F'(0) = 0.510233, \quad G'(0) = -0.615922 \quad (2.27)$$

ζ 'nin bir fonksiyonu olarak çözüm Tablo 2.1'de tablolaştırıldı ve Şekil 2.2'de de grafik olarak görülmektedir.

Tablo 2.1 Serbest disk için Von Karman'ın nümerik çözümleri [Karman, 1921]

ζ	F	G	H	P-P(0)	F'	G'
0.0	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.5102	-0.6159
0.1	0.0462	0.9386	-0.0048	0.0925	0.4163	-0.6112
0.2	0.0836	0.8780	-0.0179	0.1674	0.3338	-0.5987
0.3	0.1133	0.8190	-0.0377	0.2274	0.2620	-0.5803
0.4	0.1364	0.7621	-0.0628	0.2747	0.1999	-0.5577
0.5	0.1536	0.7076	-0.0919	0.3115	0.1467	-0.5321
0.6	0.1660	0.6557	-0.1239	0.3396	0.1015	-0.5047
0.7	0.1742	0.6067	-0.1580	0.3608	0.0635	-0.4764
0.8	0.1789	0.5605	-0.1934	0.3764	0.0317	-0.4476
0.9	0.1807	0.5171	-0.2294	0.3877	0.0056	-0.4191
1.0	0.1802	0.4766	-0.2655	0.3955	-0.0167	-0.3911
1.1	0.1777	0.4389	-0.3013	0.4008	-0.0327	-0.3641
1.2	0.1737	0.4038	-0.3365	0.4041	-0.0461	-0.3381
1.3	0.1686	0.3712	-0.3707	0.4059	-0.0564	-0.3133
1.4	0.1625	0.3411	-0.4038	0.4066	-0.0640	-0.2898
1.5	0.1559	0.3132	-0.4357	0.4066	-0.0693	-0.2677
1.6	0.1487	0.2875	-0.4661	0.4061	-0.0728	-0.2470
1.7	0.1414	0.2638	-0.4952	0.4053	-0.0747	-0.2276
1.8	0.1338	0.2419	-0.5227	0.4043	-0.0754	-0.2095
1.9	0.1263	0.2218	-0.5487	0.4031	-0.0751	-0.1927
2.0	0.1189	0.2033	-0.5732	0.4020	-0.0739	-0.1771
2.1	0.1115	0.1864	-0.5962	0.4008	-0.0721	-0.1627
2.2	0.1045	0.1708	-0.6178	0.3998	-0.0698	-0.1494
2.3	0.0976	0.1565	-0.6380	0.3987	-0.0671	-0.1371
2.4	0.0910	0.1433	-0.6569	0.3978	-0.0643	-0.1258
2.5	0.0848	0.1313	-0.6745	0.3970	-0.0612	-0.1153
2.6	0.0788	0.1202	-0.6908	0.3962	-0.0580	-0.1057
2.7	0.0732	0.1101	-0.7060	0.3955	-0.0548	-0.0969
2.8	0.0678	0.1008	-0.7201	0.3949	-0.0517	-0.0888
2.9	0.0628	0.0923	-0.7332	0.3944	-0.0485	-0.0814
3.0	0.0581	0.0845	-0.7452	0.3939	-0.0455	-0.0745
3.2	0.0496	0.0708	-0.7668	0.3932	-0.0397	-0.0625
3.4	0.0422	0.0594	-0.7851	0.3926	-0.0343	-0.0524
3.6	0.0358	0.0498	-0.8007	0.3922	-0.0296	-0.0440
3.8	0.0304	0.0417	-0.8139	0.3919	-0.0253	-0.0369
4.0	0.0257	0.0349	-0.8251	0.3917	-0.0216	-0.0309
4.5	0.0168	0.0225	-0.8460	0.3914	-0.0144	-0.0199
5.0	0.0109	0.0144	-0.8596	0.3912	-0.0094	-0.0128
5.5	0.0070	0.0093	-0.8684	0.3912	-0.0062	-0.0082
6.0	0.0045	0.0060	-0.8741	0.3912	-0.0040	-0.0053
7.0	0.0019	0.0025	-0.8802	0.3912	-0.0017	-0.0022
8.0	0.0008	0.0010	-0.8827	0.3911	-0.0007	-0.0009
9.0	0.0003	0.0004	-0.8837	0.3911	-0.0003	-0.0004
10.0	0.0001	0.0002	-0.8842	0.3911	-0.0001	-0.0002
...	0.0000	0.0000	-0.8845	0.3911	0.0000	0.0000

Burada verilen çözüm, $\zeta \leq 4.4$ değeri için, virgülden sonra 4 basamak Benton'un ki ile ($\zeta \rightarrow \infty$ için $F'(0.2)$ değeri hariç) uymaktadır [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989].



Şekil 2.2 Serbest disk için laminar hız profilleri [Karman, 1921]

Cochran'ın değerleri virgülden sonra 3 basamak olarak incelendiğinde son hesaplamalar ile mükemmel uymaktadır (H_∞ hariç). H_∞ değeri Cochran tarafından 0.886 olarak elde edildi bu da % 0.2'den daha az bir hatadır [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989].

Şayet sınır tabaka kalınlığı δ , $v_\phi = 0.01\Omega r$ 'ye karşılık gelen z değeri olarak belirlenir ise, Tablo2.1'den açıkça görülebilir ki

$$\delta \cong 5.5 \left(\frac{\nu}{\Omega} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.28)$$

olmaktadır.

Görüldüğü gibi δ , r 'den bağımsızdır. Bu durum, kayma gerilmesinin (τ_r ve τ_ϕ) bileşenlerinin mertbe analizi ile doğrulanabilir. Sınır tabaka içerisinde, gerilmenin radyal bileşeni, birim alana gelen santrifüj kuvvet ile dengelenir. İki bileşenin oranı

$$\frac{\tau_r}{\tau_\phi} \propto \frac{\Omega \delta^2}{\nu} \quad (2.29)$$

olur [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989].

Bu oranın r 'den bağımsız olduğu kabul edilirse $\delta = K \left(\frac{\nu}{\Omega} \right)^{\frac{1}{2}}$ olur. K 'nın kesin değeri elbette δ 'nın belirli olmasına bağlıdır. Bununla birlikte $K \cong 5.5$ olarak verilmektedir.

Targ tarafından verilen yaklaşık bir çözümde ($\nu_{\phi} \cong 0.05\Omega r$ 'ye uyan) momentum – integral teknikleri kullanılarak, $K = 3.50$ verilmektedir [Targ, 1951].

Kütle debisi ;

$$\dot{m}_0 = -2\pi\rho \int_0^r [v_z]_{z \rightarrow \infty} dr = -\pi\rho r^2 (\Omega\nu)^{\frac{1}{2}} H_{\infty} \quad (2.30)$$

dir.

Disk in b yarıçapı tarafındaki sürtünme momenti

$$M = - \int_0^b 2\pi r^2 \mu \left[\frac{\partial v_{\phi}}{\partial z} \right]_{z=0} dr = -\frac{1}{2} \pi \rho \Omega^{\frac{3}{2}} \nu^{\frac{1}{2}} b^4 G'(0) \quad (2.31)$$

boyutsuz bölgesel kütle debisi, diskteki sonradan gelen akış için

$$\frac{\dot{m}_0}{\mu r} = -\pi H_{\infty} (x^2 \text{Re}_{\phi})^{\frac{1}{2}} = 2.779 (x^2 \text{Re}_{\phi})^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

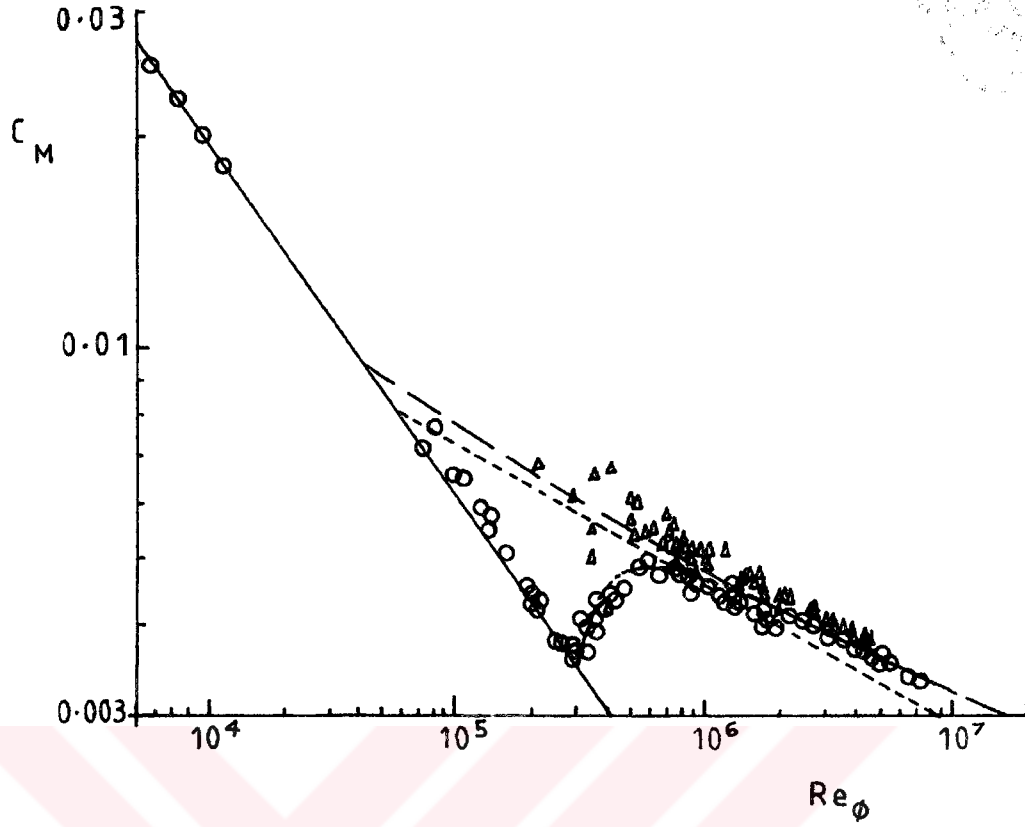
ve diskteki kayma gerilmesi

$$\frac{\tau_{\phi,0}}{\rho\Omega^2 b^2} = G'(0) \text{Re}_{\phi}^{-\frac{1}{2}} = -0.6159 \text{Re}_{\phi}^{-\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bu kayma gerilmesinin de gerilme debi parametresi K_w 'yi etkilediği (2.34) denkleminde görülmektedir:

$$\frac{\tau_{\phi,0}}{\rho\Omega^2 b^2} = -\frac{1}{\pi} K_w \text{Re}_{\phi}^{-1} \frac{\dot{m}_0}{\mu r} \quad (2.34)$$

C_M grafiği, Re 'nin bir fonksiyonu olarak Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 C_M 'in Re ile değişimi [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989]

Teorik:

- _____ Laminer akış
- 1 / 7'nci kuvvet profili
- _____ Türbülanslı akış asimptotik logaritmik profil
- Türbülanslı akış geçiş logaritmik profil

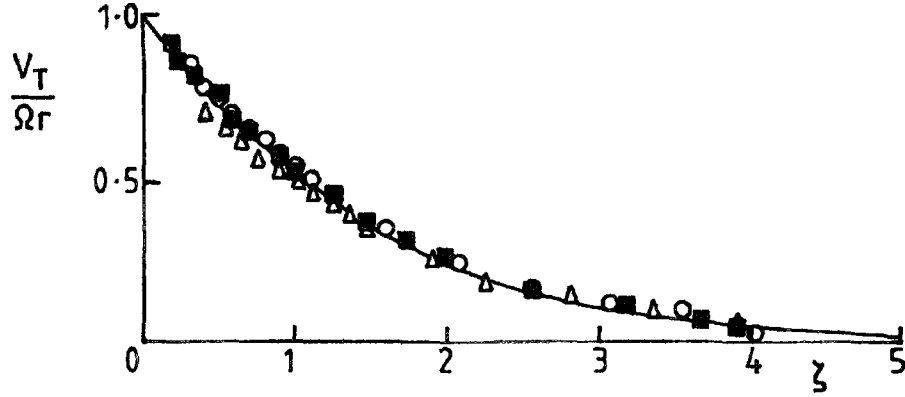
Deneysel :

- O Theodorsen ve Regier [23] (1944)
- Δ Owen (1969)

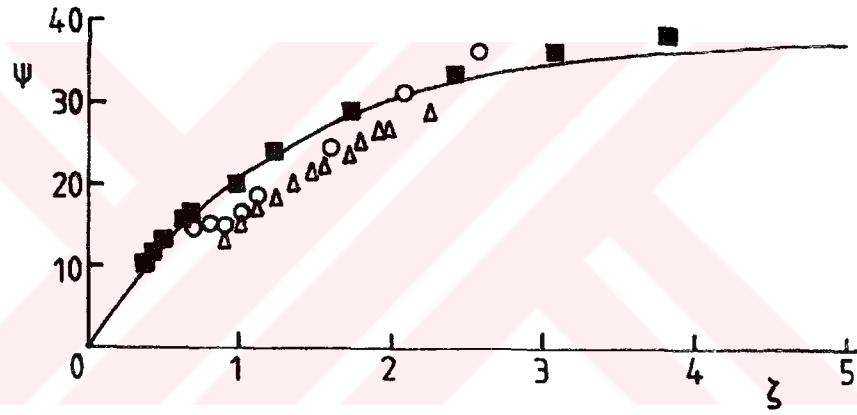
2.3.2 Deneysel Çalışmalar

Gregory, Stuart ve Walker, havada dönen 305 mm çapındaki bir diskte, sınır tabakasındaki hız profillerini ölçtüler [Gregory et al, 1955]. Sapma açısını ölçmek

için 2 tıp “conrad probe” ve meydana gelen toplam basıncı ölçmek için bir pitot tıpu kullandılar. Şekil 2.4’te sonuçların $x^2 Re_\phi = 1.13 \times 10^5$ ve 1.37×10^5 değerleri için yukarıda tanımlanan teori ile mukayesesi gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.4 Serbest disk ζ ile değişimler [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989]

- ζ ile Boyutsuz toplam hızın, $\left(\frac{v_T}{\Omega r}\right)$ değişimi.
- ζ ile ψ , akış yönü ile radyus vektörü arasındaki açının değişimi.

Teori :

Deneysel :

- $\triangle$ $Re_\phi = 1.13 \times 10^5$ [Gregory et al, 1955]
- $\circ$ $Re_\phi = 1.37 \times 10^5$ [Gregory et al, 1955]
- $\blacksquare$ $Re_\phi = 1.29 \times 10^5$ [Cham and Head, 1969]

Meydana gelen boyutsuz hızın,

$$\frac{v_T}{\Omega r} = \frac{(v_r^2 + v_\phi^2)^{\frac{1}{2}}}{\Omega r} \quad (2.35)$$

ζ ile değişimi Şekil 2.4a'da, teori ile deney sonuçlarının uyumu oldukça iyi olduğu gösterilmektedir. Uyum, akış yönü ile yarıçap vektörü arasındaki açı, $\psi = \tan^{-1} \left(\frac{v_r}{v_\phi} \right)$ için yeterince tatmin edici değildir (Şekil 2.4b).

Cham ve Head tarafından $Re_\phi = 1.29 \times 10^5$ ile yapılan benzer deney sonuçları Şekil 2.4'te görülmektedir [Cham and Head, 1969]. Cham ve Head, 914 mm çapında, havada dönen bir disk kullandılar. ψ açısı bir sıcak tel anemometresi kullanılarak ölçüldü ve v_r 'yi belirlemek için bir total-head prob kullandılar.

$\zeta < 2$ için sonuçları, Bölüm 2.3.1 ile mükemmel uymaktadır. ζ 'nin daha büyük değerleri için, hızın küçük değerler alması ölçümleri olumsuz etkiledi.

C_M 'in ilk ölçümleri Kempf tarafından tamamlandı [Kempf, 1924]. Onun değerleri teorik eğriden çok yüksekti. Birçok yazar onun sonuçlarının hassas olmadığını düşünüyor. C_M 'in Re_ϕ ile değişimini veren denklem (2.24), Şekil 2.4'te Theodorsen ve Regier'in deney sonuçları ile mukayese edildi. Theodorsen ve Regier, Reynolds sayısının 7×10^6 'ya kadar olan değerine ulaşmak için diski hem havada hem de Freon 12'de kullandılar [Theodorsen and Regier, 1944]. Momentlerin nasıl ölçüldüğü hakkında detay verilmemesine rağmen, verileri $5 \times 10^4 < Re < 3 \times 10^5$ denklem (2.24) ile mükemmel uymaktadır. Freon 12 kullanılmasıyla 2 Mach'a ulaşılar fakat ölçülebilir bir Mach sayısı etkisi yoktu.

2.4 Laminer Akış Denklemlerinin Genelleştirilmesi

$$v_r = r A F(\zeta), \quad v_\phi = r A G(\zeta), \quad v_z = (\nu A)^{\frac{1}{2}} H(\zeta) \quad (2.36)$$

yazılabildiği durumda ve denklem (2.12)

$$p = -\rho \nu A P(\zeta) + \frac{1}{2} \rho B r^2 \quad (2.37)$$

şeklinde yazılabildiği durumda von Karman denklemleri (2.09–2.11) genelleştirilebilir. Burada ;

$$\zeta = (A/\nu)^{\frac{1}{2}} z \quad (2.38)$$

olup A ve B sabittir. Bu denklemlerin, denklem (2.04–2.07)'ye uygulanması ile şu denklemler elde edilir [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989]:

$$H' = -2F, \quad (2.39)$$

$$F'' = F^2 - G^2 + F'H + B/A^2 \quad (2.40)$$

$$G'' = 2FG + G'H \quad (2.41)$$

$$P' = HH' - H'' \quad (2.42)$$

Burada şu konuya dikkat edilebilir. Eğer $A = \Omega$ ise $B = 0$ 'dır. Bu durumda bu denklemler, serbest disk için (2.09–2.12) denklemlerine dönüşür. Bununla birlikte A ve B değerleri denklem (2.39–2.41)'in sınır şartı için, üzerinde çalışılan probleme bağlıdır. Çözüm sadece önemsiz değişikliklerle (Bölüm 2.3'te tanımlanan metot ile) elde edilebilir [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989].

2.4.1 Dönen Bir Akışkandaki Dönen Disk

Disk ω ile dönen bir akışkan ile aynı dönme ekseninde, açısal bir Ω hızı ile döndüğünde, (2.44) ve (2.45) ifadelerindeki sınır şartları ile birlikte

$$A = \Omega, \quad B = \omega^2 = \beta^2 \Omega^2 \quad (2.43)$$

almak uygundur [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989].

$$F(0) = 0 \quad G(0) = 1 \quad H(0) = 0 \quad (2.44)$$

$$\zeta \rightarrow \infty \text{ durumunda} \quad F(\zeta) \rightarrow 0 \quad G(\zeta) \rightarrow 0 \quad (2.45)$$

$\omega = 0$ durumunda sistem von Karman'ın serbest disk problemine indirgenir. $\omega = \Omega$ olduğu durumda tek cisim gibi hareket vardır ve $\Omega = 0$ olduğu durumda yani $\zeta \rightarrow \infty$ durumunda problem, Bölüm 2.4.2'de anlatılan, dönen bir akışkandaki sabit disk problemi (Bödewadt Problemi) halini alır.

Bu denklem sisteminin çözümü $-0.2 < \zeta < \infty$ için Roger ve Lance tarafından yapıldı [Rogers M.G., Lance G.N., 1960]. Onlar $\zeta < -0.2$ için çözüm bulamadılar.

$$\frac{\dot{m}_0}{\mu r} = -\pi H_\infty (x^2 \text{Re}_\phi)^{\frac{1}{2}}, \quad K_w = \frac{G'(0)}{H_\infty}, \quad C_M = -\pi G'(0) \text{Re}_\phi^{-\frac{1}{2}} \quad (2.46)$$

2.4.2 Dönen Bir Akışkandaki Sabit Disk

ω açısal hızı ile dönen bir akışkandaki sabit disk için, $B/A^2 = 1$ alındığı durumda, önceki kısımdaki denklem (2.39), (2.40) ve (2.41) ile aynı olur. Bunun için $A = \omega$ ise $B = \omega^2$ dir.

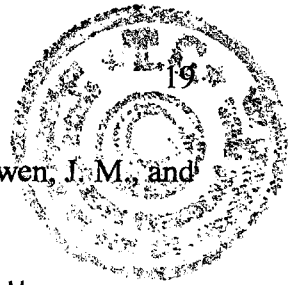
Bu durumda sınır şartları şöyledir :

$$F(0) = 0 \quad G(0) = 1 \quad H(0) = 0 \quad (2.47)$$

$$\zeta \rightarrow \infty \quad F(\zeta) \rightarrow 0 \quad G(\zeta) \rightarrow 0 \quad (2.48)$$

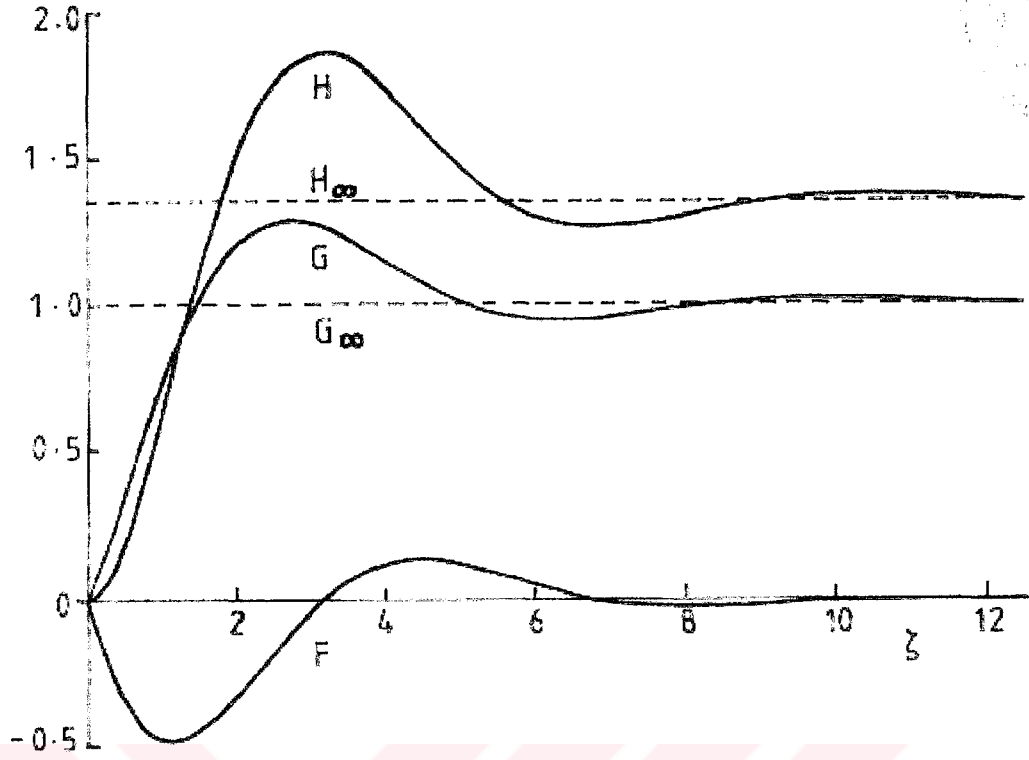
İlk olarak Bödewadt bu durumun farkına vardı [Bödewadt, 1940]. Bödewadt, Cochran'ın Karman denklemlerini çözmek için kullandığı metoda benzer bir metod ile denklemleri çözdü. Sonuçlar Roger ve Lance tarafından da hesaplandı [Rogers M.G., Lance G.N., 1960]. Son zamanlarda Nydahl tarafından da hesaplandı. Nydahl'ın metodu özelleştirilmedi fakat onun sonuçları Bödewadt'ın sonuçlarını ve Roger ile Lance'nin verdiklerini, H_∞ 'un bölüm 2.4.1'de verildiği gibi, yeterince geniş değerleri için etkili bir şekilde teyit etti [Schlichting, 1979].

Hesaplamalar son zamanlarda, Roger ve Lance'nin metodu ve Shampine ve Gordon [Shampine, L. F. and Gordon, M. K., 1975] tarafından verilen rutin integrasyon kullanılarak tamamlandı. Roger ve Lance tarafından hassas sonuçlar elde edildiği sanılan bu denklemler hassas H_∞ değeri vermek için yeterince hassas değildir. Hesaplamalar Tablo 2.2'de görülmektedir.



Tablo 2.2 Dönen bir akışkandaki sabit disk için hız profilleri [Owen, J. M. and Rogers, R. H., 1989]

ξ	F	G	H
0.0	0.0000	0.0000	0.0000
0.5	-0.3487	0.3834	0.1944
1.0	-0.4788	0.7354	0.6241
1.5	-0.4496	1.0134	1.0987
2.0	-0.3287	1.1924	1.4929
2.5	-0.1762	1.2721	1.7459
3.0	0.0361	1.2714	1.8496
3.5	0.0663	1.2182	1.8308
4.0	0.1227	1.1413	1.7325
4.5	0.1371	1.0640	1.5995
5.0	0.1210	1.0016	1.4685
5.5	0.0878	0.9611	1.3632
6.0	0.0499	0.9427	1.2944
6.5	0.0162	0.9421	1.2620
7.0	-0.0084	0.9530	1.2589
7.5	-0.0223	0.9693	1.2751
8.0	-0.0268	0.9857	1.3004
8.5	-0.0243	0.9990	1.3264
9.0	-0.0179	1.0078	1.3476
9.5	-0.0102	1.0118	1.3617
10.0	-0.0033	1.0121	1.3683
10.5	0.0018	1.0099	1.3689
11.0	0.0047	1.0065	1.3654
11.5	0.0057	1.0031	1.3601
12.0	0.0052	1.0003	1.3545
12.5	0.0038	0.9984	1.3500
∞	0.0000	1.0000	1.3494



Şekil 2.5 Dönen bir akışkandaki sabit disk için hız profilleri [Bödewadt, 1940]

Nümerik çözümler şu sonuçları verir:

$$H_{\infty} = 1.3494, \quad F'(0) = -0.94197, \quad G'(0) = 0.77289 \quad (2.49)$$

Bu denklemler, denklem 2.46 açılımı ile birlikte şu denklemi verir:

$$\frac{\dot{m}_0}{\mu r} = -4.239 \left(x^2 \text{Re}_{\phi}^f \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.50)$$

Burada

$$\text{Re}_{\phi}^f = \frac{\rho \omega b^2}{\mu} \quad (2.51)$$

akışkanın açısal hızı ile ilişkili bir geliştirilmiş rotasyonel Reynolds sayısıdır. Kayma gerilmesinin, bölgesel kütle debisi ve rotasyonel Reynolds sayısı ile ilişkisi şu şekildedir:

$$\frac{\tau_{\phi,0}}{\rho \omega^2 b^2} = -\frac{1}{\pi} K_{\omega}^f \operatorname{Re}_{\phi}^{f-1} \frac{\dot{m}_0}{\mu r} \quad (2.52)$$

Burada $K_{\omega}^f = 0.6167$ 'dir ve denklem (2.56)'dan elde edilen gerilme-kütle-akış parametresi K_{ω} ile aynı işi görür.

2.4.3 Dönen Bir Diske Akış Etkisi

Milne-Thomson, b yarıçaplı düz bir diskin yüzeyine dik akışın U hızı ile hareket ettiği durumdaki irrotasyonel akış üzerine çalıştı [Milne-Thomson, L. M., 1960]. Onların çözümleri göstermektedir ki diskteki hızın radyal bileşeni

$$v_{r,\infty} = \frac{2U}{\pi} \frac{r}{(b^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.53)$$

olmaktadır. Bu değer, ne akıştaki üniform akımın süperpozisyonuyla (burada sabit bir yüzeye akışın etkisi vardır), ne de akışa paralel bir eksen etrafında Ω açısal hızı ile dönen bir diskin dönüşü ile değişir; bundan dolayı birçok akıştaki diskte sınır tabakası için bir çıkış sınır şartı olarak kullanılıyor olabilir. Eğer U ve b biliniyorsa

$$\sigma = \frac{2}{\pi} \frac{U}{\Omega b} \quad (2.54)$$

yazılabilir. $r \ll b$ olduğunda denklem (2.53) iyi bir yaklaşımla şu hale gelir:

$$v_{r,\infty} = \sigma \omega r$$

Tifford ve Chu denklem (2.39- 2.41)'in $A = A = (\sigma + 1)\Omega$ ve $B = -\sigma^2 \Omega^2$ ile geçerli olduğunu gösterdiler ve bundan dolayı aşağıdaki gibi yazılabilir [Tifford, A. N. and Chu, S. T., 1954] :

$$H' = -2F, \quad (2.55)$$

$$F'' = F^2 - G^2 + F'H - \frac{\sigma^2}{(\sigma + 1)^2} \quad (2.56)$$

$$G'' = 2FG + G'H \quad (2.57)$$

Sınır şartları :

$$F(0) = 0 \quad G(0) = \frac{1}{\sigma + 1} \quad H(0) = 0 \quad (2.58)$$

$$\zeta \rightarrow \infty \quad F(\zeta) \rightarrow \frac{1}{\sigma + 1} \quad G(\zeta) \rightarrow 0 \quad (2.59)$$

Denklemler, Cochran'ın σ 'nın değişik değerleri için denklem (2.03), denklem (2.09–2.12)'yi çözerken kullandığı metoda benzer bir metot kullanılarak çözüldü. σ 'nın bir fonksiyonu olarak bölgesel moment katsayısını hesapladılar. Çözümleri ve sonuçları Tablo 2.3'te sunulmaktadır. C_M 'i belirlemek için integrasyon $r = 0$ dan b 'ye kadar tamamlanır ve çözüm büyük diskler için sağlanmaz bu nedenle sonuçlar dikkatle ele alınmalıdır.

Tablo 2.3 Dönen bir diske akış etkisi için moment katsayısı değerleri [Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989]

σ	0	0.1	0.25	0.5	1	1.5	2	4	6
$C_M R$	1.94	2.03	2.24	2.65	3.21	4.20	4.82	6.67	8.32

3 DENEY DÜZENEĞİ VE TASARIMI

Bu bölümde deneyde kullanılan ölçme aletlerinin tanıtımının yanı sıra bütün parçaların tasarım ve imalat aşamaları anlatılmaktadır.

3.1 Disk

Günümüze kadar dönen disk akışı ile ilgili yapılan çalışmalarda büyük çoğunlukla düzlemsel bir disk kullanılmış ve bu disk üzerindeki akış incelenmiştir. Bununla birlikte 3 boyutlu dönen diskin uçuşu üzerine çalışmalar da yapılmıştır [Rohde, 2000]. Bu çalışmada ise daha değişik bir geometriye sahip bir diskin akışa etkisi incelenmektedir. Bu çalışmada disk, iki koninin birleşimi şeklinde alınmıştır. Böylece imalatın daha kolay yapılması ve deney sonuçlarının irdelenmesinin mümkün olabileceği düşünülmüştür. Hatta akış etkisinin daha iyi görülebilmesi amacı ile farklı geometrilere (açılara) sahip koniler kullanılmıştır. Koniler ve shaftın birleşimi diski oluşturmaktadır (Şekil 3.1).

Deneyde kullanılacak havalı yataklara bağlı olarak diskin geometrisi değişiklik arz etmektedir. Bu nedenle araştırma yapılarak 25 mm. iç çapındaki havalı yatakların kullanılmasına karar verildi.

Disk yere dik bir eksen etrafında dönmek üzere tasarlanmıştır. Buna göre, oluşabilecek daimi veya geçiş etkili dikey kuvvetlerin gözlemlenebilmesi için disk ve bütünleşik mil, bir kuvvet ölçüm cihazının taşıdığı bir havalı destek yatağı ile taşınmaktadır. Radyal yatakların da havalı olması ile eksenel kuvvet ölçümüne olabilecek olumsuz etkileri azaltılmıştır.

3.1.1 Konilerin Tasarımı

Disk geometrisinin akışa olan etkisini daha iyi görebilmek için yapılacak olan konilerin açıları arasında 15^0 'lik farkın yeterli olacağı düşünüldü. Büyük açıların kullanılması yüksek kütle veya düşük yüzey alanı gibi sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Yüzey alanı ile kütle değişiminin mukayesesi sonucu 10^0 ve 25^0 'lik açılara sahip, 165 mm. çapında konilerin kullanılmasına karar verildi.

3.1.2 Şaft Tasarımı

3.1.2.1 Şaft Çapının Belirlenmesi

Kullanılacak olan havalı yatakların çapının 25 mm. olması ve bu yatakların şaft ile aynı çapta olması gerektiğinden şaft çapı 25 mm. olarak belirlenmiştir.

3.1.2.2 Şaft Boyunun Belirlenmesi

Şaftın uzun oluşu yüksek titreşimlere yol açmakta, kısa oluşu ise hava akımına engel teşkil etmektedir. Bu nedenle hava akımına engel teşkil etmeyecek şekilde, şu hususlar da göz önünde bulundurularak, şaft yarı boyunun 150 mm. olmasına karar verilmiştir ;

- Yatak boyu, 58 mm.
- Koni yüksekliği, 36 mm.
- Koni ile yatak arasındaki boşluk, ≈ 35 mm. Bu boşluk hava akışının engellenmemesi için bırakıldı.
- Yatağın bitiminden itibaren ≈ 20 mm boşluk. Yatağın şafttan çıkmadan hareketine müsaade eder.

3.1.3 Disk Malzemesi

Disk malzemesinden beklenen özellikler:

- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık
- Uygun maliyet ve bulunabilirlik
- Yüksek özgül ısı
- İşlenebilirlik

Bu özellikler göz önüne alındığında en uygun malzeme olarak “Ç 4140 Islah Çeliği” seçildi.

3.1.4 Diskin Hazırlanışı

Deneyin yüksek hızlarda yapılabilecek olması disk için bir takım sınırlandırmaları beraberinde getirmiştir:

Yaklaşık 2.5 kg ağırlığındaki üst koninin veya alt koninin deney esnasında (yüksek hızlarda) kopması durumunda sahip oldukları çok yüksek atalet kuvvetleri

ile çok büyük hasarlara yol açabileceği aşikârdır. Bu riski önemli ölçüde azaltmak amacıyla diskin tek parçadan imal edilmesine karar verilmiştir.

Disk in tek parçadan imal edilmesi de birtakım zorlukları beraberinde getirmiştir:

Disk in en büyük çapı 165 mm olduğu için en az 165 mm çapında ve uzunluğu en az 300 mm uzunluğunda dolu bir malzemenin tornada boşaltılması gerekmektedir. Bu nedenle piyasada standart olarak bulunan 170 mm çapındaki malzemeden 305 mm uzunluğunda alındı. Bu parçanın da yüksek kütlesi (≈ 52 kg) ve büyük çapı nedeniyle torna tezgâhına bağlanması ve tezgâhta işlenmesi, punto deliğinin de belirli olmayışıyla birlikte, bir hayli zor oldu.

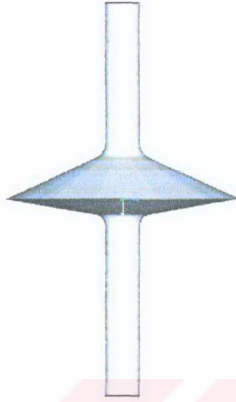
Disk in torna tezgâhında bir defada işlenmesi eksensel kaçıklığı önleyecek olması nedeniyle tercih edildi. Aksi takdirde oluşacak çok küçük bir eksensel kaçıklık, yüksek hızlarda büyük dengesizliğe, sonucunda da yatak sarmasına neden olabilmektedir.

Kullanılacak havalı yatakların çok hassas yüzey gerektirdiği için shaft yüzeyi ve alt kısmı, tornada dönmekte iken, değişik hassasiyetlerdeki zımparalar ile zımparalandı. Yüzey pürüzlülüğü ölçüldüğünde, yüzeyin gereken hassasiyet sınırları dâhilinde olduğu görüldü. Deneye geçilmeden önce shaft çapı değişik yerlerinden CMM makinesi ile ölçüldü ve şu sonuçlar elde edildi :

En büyük çap : 25, 009 mm

En küçük çap : 24, 992 mm.

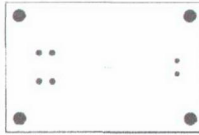
Söz konusu yüzey pürüzlülüğü ve CMM ölçümlerinin yapılmasında kullanılan donanımın teknik özellikleri Ek-2’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Nihai disk

3.2 Alt Tabla

Alt tabla, deneyin düz bir zeminde yapılmasını sağlar ve bütün düzeneği taşır. Tablanın 4 köşesinden çelik dübeller ile yere monte edilmesi sağlanmıştır. Tablanın bağlantılarının sıkı olması ve ağır olması ile dönmeden kaynaklanacak titreşimlerin azaltılması sağlanmıştır.



Şekil 3.2 Alt tabla

3.3 Kollar

Havalı yatakları taşır.



70 x 70 dolu malzeme kullanıldı (imalat çeliği).

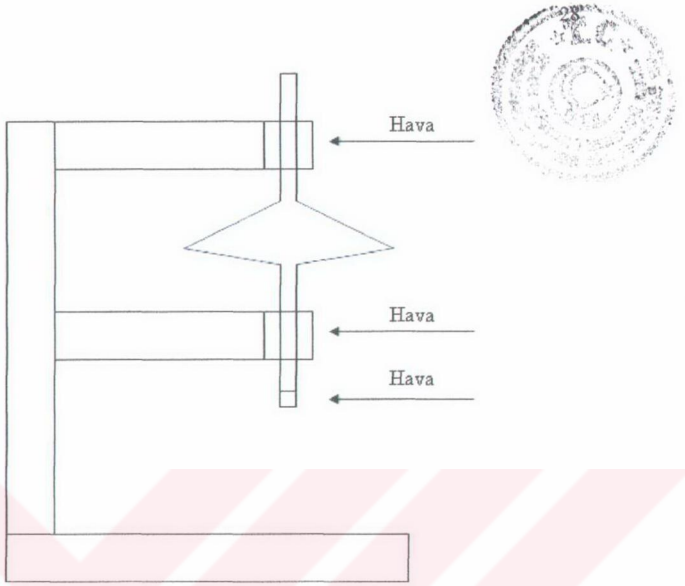
Nedenleri :

- Havalı yatağın monte edilebilmesi için 62 mm genişlik ve 44 mm yüksekliğe gerek duyulur. Bu ölçülere sahip en uygun şekildir.
- Maliyeti çok düşüktür,
- Kolaylıkla üretilebilir.

Düzenekte 3 adet kol mevcuttur :

1. Üst destek kolu: Görevi üstteki yatağı tutmaktır.
2. Alt destek kolu: Görevi alttaki yatağı tutmaktır
3. Ana kol: Görevi üst destek kolunu ve alt destek kolu tutmaktır. Ana kol alttan tablaya bağlanmıştır.

Üç kol birbirine “F” şeklinde monte edilir, daha sonra CNC tezgâhında aynı anda üst ve alt destek kolları işlenir. Böylece oluşması olası bir düzlemler arası mesafe farkı ortadan kaldırılmış oldu. Fakat yine de tezgâhın hassasiyet yetersizliğinden dolayı 0,047 derecelik bir açı oluşmuştur. Söz konusu açının yüksek değerlerinde ve yüksek hızlarda, çok büyük balans sorunları ortaya çıkacağı aşikârdır (Şekil 3.4).



Şekil 3.3. Deney Düzenegi

3.4 Destek Elemanı

Görevi; meydana gelebilecek yüksek titreşimlerde ana kola destek olmaktır. Bu amaçla bir taraftan duvara 2 adet çelik dübel ile diğer taraftan da ana kola monte edilmiştir.



Şekil 3.4 . Destek Elemanı

3.5 Yataklar

Yatakların seçimi ve sisteme entegrasyonu, tasarım, imalat ve montaj sürecinin en önemli aşamalarından birini teşkil etmiştir. Seçimin gerekçelerini

vurgulamak amacı ile, bu bölümde en çok kullanılan yatak çeşitlerinden ve deneyde kullanılan yataklardan bahsedilmektedir.

3.5.1 Rulmanlı Yataklar

Rulmanlı yataklar, yükleri desteklemek için rulmanlara veya makaraya dayanır. Yuvarlanma hareketi, düzlemsel hareketten daha az sürtünme kuvveti oluşturur. Bu nedenle rulmanlı yataklardan sık sık anti-sürtünme yataklar diye söz edilir. Rulmanlı yatakların, radyal yükleri, açısız yükleri ve bunların kombinasyonu şeklindeki yükleri karşılayacak şekilde tipleri mevcuttur [MachineDesign].

Bilyeli rulmanlı ve makaralı rulmanlı olmak üzere ikiye ayrılır. Bilyeli rulmanlı yataklar tipik olarak, makaralı rulmanlı yataklardan daha yüksek hız ve daha düşük yük kapasitelerine sahiptir. Her iki tipin de önceden monte edilen ve monte edilmemiş tipleri vardır.

3.5.1.1 Bilyeli Rulmanlar

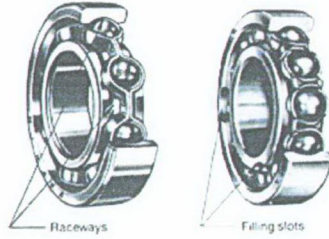
Radyal, açısız temas ve eksensel bilyeli olmak üzere 3 tip bilyeli rulmanlı yatak mevcuttur.

3.5.1.1.1 Radyal Bilyeli Rulmanlar

Radyal yüklerde kullanılır ve 2 temel tipi mevcuttur [MachineDesign].

- Conrad tipi (yankların doldurulmadığı tip) rulmanlar: giriş ve çıkış halkalarında kesintisiz oluk olan bir derinliğe sahiptir. Bu tasarım ağır radyal yükleri ve makul eksensel yükleri taşır.
- Maksimum kapasite rulmanları (yarıkların doldurulduğu tip): Conrad tipinden daha fazla bilye içerir ve bu nedenle eşit ölçüdeki Conrad tipi bir rulmandan daha yüksek radyal yük kapasitesine sahiptir.

Bilyeli rulmanların bir özelliği de maksimum tip yerine, iki sıra bilye kullanılarak yük kapasitelerinin artırılmasıdır.



Şekil 3.5 Conrad tipi (solda), maksimum kapasite tipi (sağda) radyal rulmanlı yataklar [MachineDesign].

3.5.1.1.2 Açısal Temas Bilyeli Rulmanlar

Tek yönde büyük eksensel yükleri ve orta büyüklükteki radyal yükleri destekleyebilir. 15 ~ 40 derece arasında temas açısı olan tipleri mevcuttur fakat 30 derecenin üzerindeki temas açısı olan tipleri, yüksek hız uygulamaları için tavsiye edilmemektedir [MachineDesign].

3.5.1.1.3 Eksensel Rulmanlar

Eksensel yüklerde kullanılır. Bir bakıma 90 derecelik açısal temas rulmanlarıdır. Radyal yük kapasiteleri sıfırdır. Orta hızlarda eksensel yükleri taşır [MachineDesign].

3.5.1.2 Makaralı Rulmanlar

Genellikle aynı ölçülere sahip bilyeli yataklardan daha yüksek yük kapasitelerine sahiptirler ve ağır görev orta hız uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar. Bununla beraber, silindirik makaralı rulmanlı hariç, düşük hız kapasitelerine sahiptirler.

Esas olarak silindirik makaralı, küresel makaralı, konik makaralı ve iğne makaralı olmak üzere 4 çeşittir

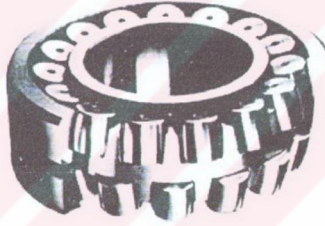
3.5.1.2.1 Silindirik Makaralı Rulmanlar

Yüksek radyal kapasiteye sahiptir. Bu yatağın özelliği düşük sürtünmedir. Bu sayede yüksek hızda operasyona müsaade eder. Silindirik adlandırılmasına rağmen

yuvarlanma elemanı gerçekte silindirik değildir. Gerçek silindirler, yuvarlanma tipi temas sonralarında gerilme yoğunlaşmasına sebep olacağından, yüksek aşınma ve yüksek eksensel kaçıklığa yol açabilmektedir. Bilyeli yataklardakinin aksine silindirik makaralı yataklar genellikle yağ ile yağlanır ve yağın çoğunluğu soğutmaya hizmet etmektedir [MachineDesign].

3.5.1.2.2 Küresel Makaralı Rulmanlar

Yüksek yük kapasitesi, ani yüklerdeki yüksek toleransı, farklı kombinasyonları ve kendini merkezleyebilme avantajlarıdır. Bunun yanında sınırlı hızlarda çalışırlar. Bu nedenlerden dolayı ; titreşimlerde, sarsıntılarda, konveyörlerde, hız düşürücülerde, geçişlerde ve diğer ağır sanayide kullanılır. Temelde RBEC-1 toleranslarında yapılmalarına rağmen, yüksek doğruluk sınıfları da mevcuttur [MachineDesign].



Şekil 3.6 Küresel makaralı çift sıralı rulmanlı yatak [MachineDesign].

3.5.1.3 İnce Kesitli Rulmanlı Yataklar

Yarıkların doldurulmadığı, 4 noktadan temaslı ve açılmalı temaslı yataklar olmak üzere üç tipte ince kesitli yatak mevcuttur. Standart kesitli rulmanlı yataklar ile kıyaslandığında bu 3 yatak tipi de gereken boşluğun azaltılmış oluşu ile düşük maliyet avantajları sağlar. En çok şaft yerinin temel esas olduğu durumlarda kullanılır. Yapısal bileşen olarak, standart kesitli yataklardan daha farklı davranırlar çünkü yatak halkaları oldukça esnekler. 4 noktadan temaslı yataklar eksensel yükleri iki yönde de destekler ve yarıkların doldurulmadığı tasarımdan daha fazla moment direncine sahiptir [MachineDesign].

3.5.2 Düzlem Yataklar

Bir düzlemsel yatakta, yatak ve şaft yağ katmanı birbirinden tamamen ayrılmıştır. Metal-metal etkileşimi olmadığı için dayanıklılık gerektiren herhangi bir yatak malzemesi kullanılabilir. Bununla beraber çoğu uygulamalar, en azından genelden daha az yağlama tabakası sunduğundan, işlemi yerine getirebilecek şekilde uygun malzeme yatağı ve tasarımı seçilmelidir.

3.5.3 Hidrostatik Yataklar

Diğer bütün yataklara göre en önemli özelliği, iş parçası ile yüzeyin bütün hızlarda ve bütün yüklerde bir akışkan tabaka ile ayrılmış olmasıdır. Sonuç olarak düşük hızlarda aşınma yoktur ve sürtünme ile ilgili azalma düşüktür. Diğer bir önemli avantajı ise radyal yüklere dayanıklılığı iyidir. Hidrodinamik yatakların aksine, sıfırdan çalışma yüküne kadar bütün yüklerde ve sıfır dâhil bütün hızlarda, yük altında dayanıklılığın devam etmesidir. Radyal değişimlere yüksek dayanıklılığı bu yatakları, hassas makinelere uygun yapmıştır.

3.5.4 Manyetik Yataklar

Yatak yükünü karşılamak için manyetik alan uygulanır.



Şekil 3.7 Manyetik yatak [MachineDesign].

3.5.5 Havalı Yataklar

Temas halinde olan yataklardan farklı olarak, yaklaşık sıfır sürtünmeyi sağlamak amacıyla basınçlı hava ile ince bir film oluşturulmuştur. Bu film sayesinde

temas ortadan kaldırılmış, dolayısıyla genellikle karşılaşılan yatakla ilgili yağlama, aşınma ve sürtünme problemlerinde belirgin avantajları vardır.

Havalı yatakların da düz, radyal gibi tipleri mevcuttur.

3.5.6 Yatak Seçimi

Bu çalışmanın en önemli özelliğinin ağır bir cismin muhtemel yüksek hızlarda hareketi oluşu ve havalı yatakların yaklaşık sıfır sürtünme ile yüksek hızlara uygun olması, deneyde kullanmak üzere havalı yatakların tercih edilmesini sağlamıştır. Bir diğer önemli etken de, yüksek ivmelenmelerde kayacak bilyelerinin olmayışıdır. Ayrıca üflediği basınçlı hava sayesinde tozlu ortamda kendi kendini temizleyebilmesi önemli avantajdır. Bunlara ilaveten, ısınmaları azaltıcı yöndeki olumlu etkisi de göz önünde bulundurulmuştur.

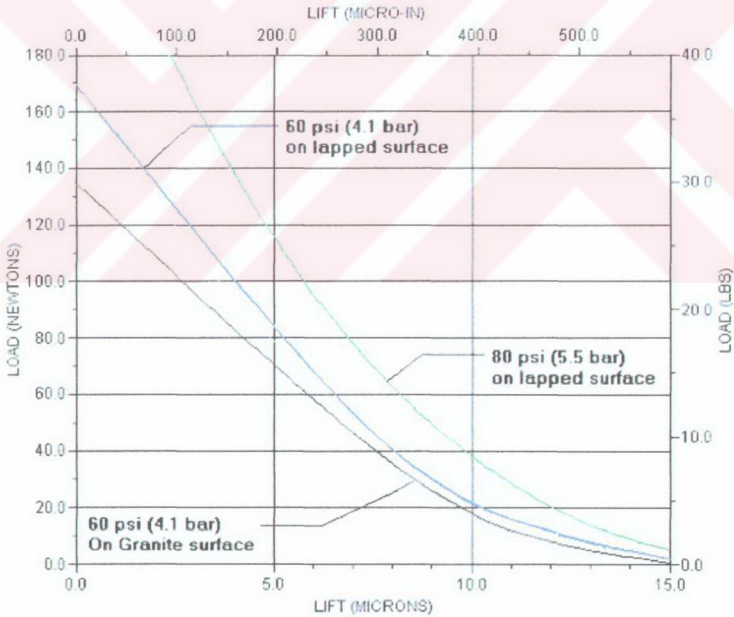
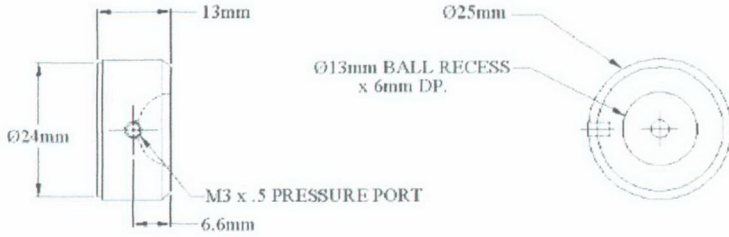
Havalı yatakların ayrıca şu üstünlükleri de vardır.

- Sıfır aşınma: Temas olmadığı için, parça kaybı da olmamaktadır.
- Sessiz ve pürüzsüz operasyon
- Yağsız çalışması ve yağlama sorununun olmaması

Havalı yatakların başlıca dezavantajları :

- Yüksek maliyeti,
- Yurtiçinde bulunmayışı
- Kullanılması gereken havanın bir takım temizlik özelliklerini sağlaması [NewWay, 2003]
- Pürüzsüz şaft yüzeyi gerektirmesi
- Çok hassas imalat

3.5.7 Deneyde Kullanılan Yatakların Teknik Özellikleri



Şekil 3.8 Havalı Yatak ve Teknik Özellikleri [NewWayAir]

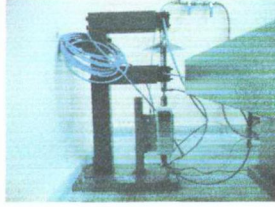
3.6 Taşıyıcı Eleman

Havalı yatak ve disk, kuvvetölçer tarafından taşınmaktadır. Taşıyıcı elemanın görevi ise kuvvetölçeri taşımaktır. Gözenekli olan havalı yatağın görevini yerine getirebilmesi için disk alt yüzeyi ile tamamen aynı koordinatlarda olmalıdır. Bu bağlamda taşıyıcı eleman, havalı yatağın pozisyonunda yapılacak küçük değişikliklere müsaade edecek şekilde tasarlanmıştır.

3.7 Diğer Ekipmanlar

- Termokupl : Diskin hemen üzerindeki hava sıcaklığını ölçmektedir. K-tipi termokupl kullanılmıştır.
- Kuvvet Ölçer : Havalı yatağa gelen kuvveti ölçer. 5 kg. kapasiteye sahiptir. Teknik özellikleri Ek-3'te verilmiştir. Verilerin bilgisayara aktarılması için bir iletişim kablosu ve Visual Basic Programı yapılmıştır.
- Dremel : Diski tahrik etmede kullanılır. 5000 ~ 33000 devir arasında çalışmaktadır.
- Pürmüz : Disk yüzeyini ısıtmakta kullanılmaktadır. 550 gr'lık kartuşa sahiptir.
- Oksi-asetilen kaynağı: Diskin şok ısıtılmasında kullanılmıştır.
- Optik takometre: Milin dönüş hızını ölçmek için kullanıldı.
- Dizüstü bilgisayar: Sıcaklık, hız, kuvvet gibi değerlerin gerçek zamanlı olarak bilgisayara aktarılması için kullanıldı.
- Multimetre: Sıcaklık ve frekans değerlerinin ölçümünde ve bilgisayara gönderilmesinde kullanıldı.
- Pico 8'li termokupl veri toplayıcısı: Sıcaklık verilerinin toplanmasında kullanıldı. Teknik özellikleri Ek-4'te verilmiştir.

3.8 Deney Öncesi Düzeneğin Hazırlanışı



Şekil 3.9 Deney tertibatı

- Alt tabla, kollar, destek elemanı ve taşıyıcı eleman montaj halinde deney ortamında kurulmuştur.
- Kuvvetölçer, taşıyıcı elemana monte edilir.
- Havalı yatak, kuvvetölçerin üzerine konur.
- Yataklar alkolle temizlenir ve hava bağlantıları yapılır.
- Sisteme 5-6 bar basınçlı kuru hava verilir.
- Radyal hava yastıklarına diske sıkı geçme ile geçirilir.

Burada montaj yapılırken yastıklar ve disk alkolle temizlendikten hemen sonra montaj işlemi yapılmalıdır. Alkolün uçması durumunda montaj yapılamamaktadır.

- Disk ve yastıklar, kollara monte edilir.

Bu esnada, gerek hava hortumlarının varlığı, gerek hava yastıklarının düşey doğrultuda hareket etmesi montaj işlemi esnasında en az iki kişinin hazır bulunmasını gerektirmektedir.

- Diğer ekipmanlar yerleştirilir. Kuvvetölçerin, bilgisayar ile bağlantısı yapılır. Encoderin probu üst destek kolunun üzerine yerleştirilir, multimetreye ve multimetrenin de bilgisayara bağlantısı yapılır. Termokuplların takılı olduğu veri toplayıcı ile bilgisayarın bağlantısı yapılır.

Görüldüğü üzere bilgisayara birçok ölçme aleti bağlanmaktadır. Bu aletlerin hepsinin bağlantısının com portundan yapılması dolayısıyla bilgisayarın portları yetersiz kalmıştır. Bu ihtiyacı gidermek için iki adet USB-RS232 çevirici kullanılmıştır.

- Dremel, fişinin prize takılması ile hazırlanır.

Dremelin ucuna takılan plastik parça, direkt olarak diskin hızını etkilediğinden ve disk yüzeyine temas ettiğinden seçimi hususuna dikkat edilmiştir.

- Oksijen kaynağı hazır halde bekletildi.

Bu işlemlerden sonra deneye geçilmiştir.



4 DENEYİN YAPILIŞI

Bu bölümde deneyi başlanmadan önce, deney şartlarının analizle tahmini ve deneyin gerçekleştirme süreci konu edilmektedir.

4.1 Yapısal Analizler

Deneyin yapılmasına başlanmadan önce uygulanabilecek hız ve sıcaklık aralıklarının belirlenmesi için bir önçalışma yapmak gerekmektedir. Bu maksatla merkezkaç kuvvetlerin ve ısıl gerilmelerin risk oluşturmaya başlayacağı kritik çalışma koşulları bilgisayarda Ansys Workbench yazılımı kullanılarak belirlendi.

4.1.1 Analiz Koşulları

Disk ve yatakların analiz koşulları

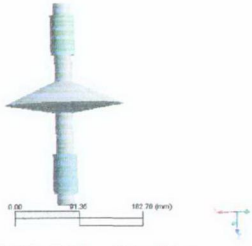
- Toplam kütle : 4,62 kg
- Açısal hız: 3000 rd/s
- Toplam hacim: 588.120,05 mm³

Mesh (ağ) Özellikler :

- Element boyu : 5 mm
- 14877 düğüm ve 2824 eleman kullanılmıştır.

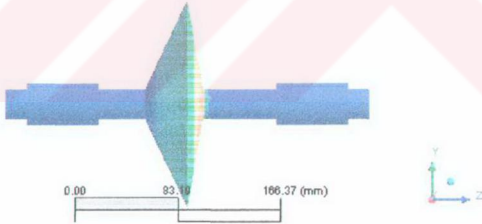
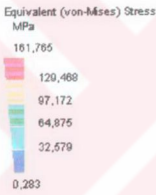
Tablo 4.1 Disk ve yatakların analiz özellikleri

İsim	Malzeme	Ölçüler (mm)	Kütle (kg)	Hacim (mm ³)	Düğüm	Eleman
"DUZ[1]"	"Yapısal Çelik"	170.01, 170.01, 294.0	4.19	533,501.9	11417	2296
"YATAK[2]"	"Yapısal Çelik"	35.0, 35.0, 58.0	0.21	27,309.07	1730	264
"YATAK[3]"	"Yapısal Çelik"	35.0, 35.0, 58.0	0.21	27,309.07	1730	264



Şekil 4.1 Disk ve Yataklar

4.1.2 Analiz Sonuçları



Şekil 4.2 Analiz sonucu disk

Tablo 4.2 Analiz sonuçları

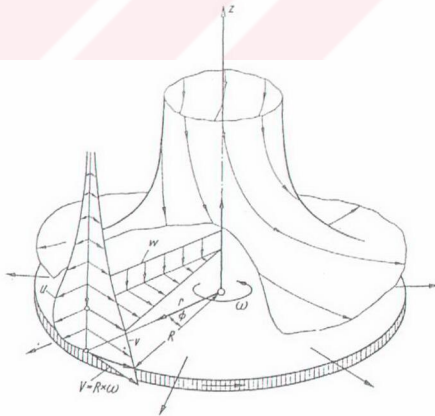
İsim	Kapsam	Minimum	Maksimum	Minimum Oluşan Yer	Maksimum Oluşan Yer	Tehlikeli Bölge
"Eşdeğer gerilim"	Modeldeki Bütün hacim	0.28 MPa	161.76 MPa	DUZ[1]	DUZ[1]	Yok

Benzer bir analizde bu sefer sisteme disk yüzeyinden uygulanan sıcaklığın etkisi de incelenmiştir. Bunun da 300°C için önemli bir tehlikeli bölge oluşturmadığı görülmüştür.

Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta, ısı ve merkezkaç genleşmelerinin mil çapını artırıcı etkisidir. Bu da yatak boşluklarının tehlikeli olabilecek boyutlarda azalmasına neden olabilir. Yapılan bir diğer Ansys Workbench analizi ile bu da incelenmiş ve dönme etkisinin termal etkiye nazaran ihmal edilebilecek kadar az olduğu görülmüştür. Bu da milin yarıçapının az olmasından kaynaklanmaktadır. Buna göre milin yatak bölgesinde 70°C sıcaklığı altında kalması durumunda bir tehlike yaratmayacağı öngörülmüştür. Bu analizlerde disk etrafındaki akış tamamı ile ihmal edilmiştir.

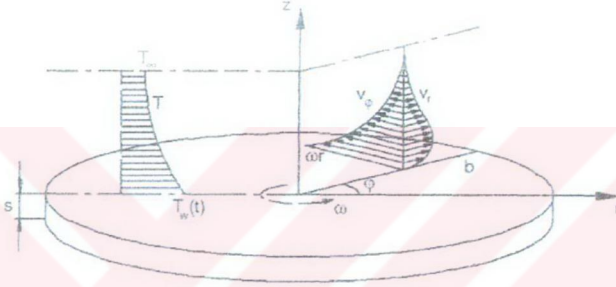
4.2 Akış Analizi

Dönen dairesel simetrik disk üzerindeki akış şartlarının belirlenmesi amacı ile birtakım hesaplamalar yapıp, akışın hangi durumlarda laminlerden çıktığı incelenmiştir.

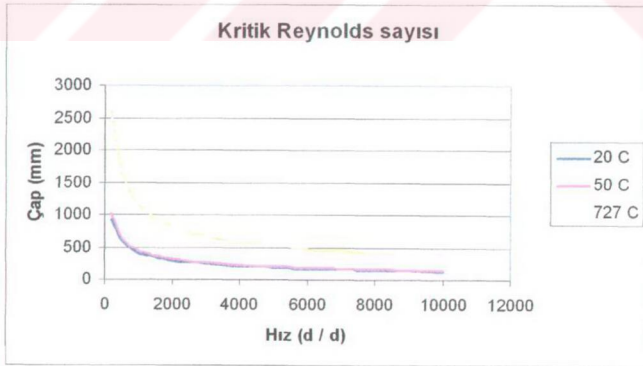


Şekil 4.3 Disk Üzerindeki Akış [Schlichting, 1979]

Deneyde kullanılan disk çapına yakın bölgedeki, diskin hızına göre hangi çapta türbülanslı akışa geçildiği Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Burada kritik Reynolds sayısı olarak 3×10^5 alınmıştır [Schlichting, 1979]. Burada, düşük sıcaklıklarda, disk hızı $7500 \, d/d'$ 'yi geçtiği andan itibaren, 165 mm çaplı diskimiz için laminar akışın bittiği görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ise türbülans, bizim çalışma aralığımızdaki açısal hızlar için çok uzaktır.



Şekil 4.4 Düzlemsel Disk Üzerinde Hız Vektörleri ve Sıcaklık Gradyanı



Şekil 4.5 Sıcaklığın Akış Rejimine Etkisi: Türbülansa geçiş

Şekil 4.5'teki grafiğin çiziminde $Re = \frac{r^2 \omega}{\nu}$ formülünden faydalanılmıştır.

Laminer rejimden çıkışa referans olarak kritik reynolds Sayısı 3×10^5 alınmıştır [Schlichting, 1979].

Daha açık yazmak gerekirse, Şekil 4.5'te hangi sıcaklıkta, hangi devir sayısında, hangi mesafede akışın laminer bölgeden çıktığı görülmektedir. Şekilden kolayca anlaşılabileceği üzere sıcaklık arttıkça türbülanslı akışa geçiş gecikmektedir. Deney esnasında 20 °C'de 6500 d/d hızdan itibaren, 50 °C'de 7500 d/d hızdan itibaren, 727 °C'de ise çok daha büyük hızlarda (deney esnasında ulaşamadığımız hızlarda) laminer bölge bitmektedir.

Yani deneyimiz tamamen laminer bölgede yapılmıştır.

Hesaplamalar yapılırken kullanılan, değişik sıcaklıklardaki havanın özellikleri Ek 1'de sunulmuştur.

4.3 Deney Aşamaları

Bu alt başlıkta deneyin yapılışından önce kullanılan ısıtma ve tahrik yöntemi ve bu yöntemlerin kullanılış nedenleri hakkında bilgi vermek amaçlanmıştır.

4.3.1 Diskin Tahrik Edilmesi

Disk en üst tarafına, dremelin ucunun uyacağı şekilde delik açıldı. Tahrik işleminin buradan direkt temas ile yapılacağı düşünüldü. Dremelin devrinin 5000 rpm'den başlaması ve disk kütlesinin 4 kg civarında oluşu, dremel motorunun zorlanmasına, aynı zamanda darbeli çalışmaya yol açmıştır. Bunun yerine dremelin ucuna takılan dairesel plastik bir başlığın disk yüzeyine değdirilmesi ile tahrik işleminin yapılmasına karar verilmiştir. Böylece dremelin çekilmesi de çok kolay bir hale gelmektedir. Bütün akış ölçümleri, tahrik bittikten sonra başlatılmıştır.

4.3.2 Diskin Isıtılması

Disk yüzeyinin ısıtılmasının ilk olarak ısıtım yolu ile yapılması düşünüldü. Böylece alev teması olmayacak ve disk yüzeyine olası bir ilave kuvvet gelmesi engellenecekti. Elektrikli ısıtıcı alınarak disk yüzeyine milimetre mertebesinde yakın

mesafeden disk yüzeyi ısıtıldı. Fakat yüksek hızlara çıkıldığında bu yöntemle yeterli sıcaklık farkına ulaşılamayacağı görüldü. Daha kısa sürede daha fazla ısının verilmesi amacıyla direkt alev teması gerektiği göz önüne alınarak pürmüz ile ısıtmaya geçildi. Fakat yüksek hızlara çıkıldığında, kaybolan ısının yüksekliğinden dolayı istenilen yüzey sıcaklığına ulaşılamaması nedeni ile ısıtma işleminin oksijen kaynağı ile yapılmasına karar verildi.

Oksijen kaynağı ile ısıtmaya geçmeden önce, deney esnasında, alevden dolayı oluşabilecek kuvvet etkisini ölçmek gerekmektedir. Bu amaçla durağan disk yüzeyine alev uygulanır ve bu sürede kuvvet değişimine bakıldı. Bu durum alevin değişik açılardaki uygulanışı ile tekrarlandı ve hiçbir durumda alevden dolayı ilave bir kuvvet (gr mertebesinde) görülemedi. Aynı durum deneye geçilmeden, disk yüksek hızlarda döndürülürken de denendi ve sonucun değişmediği görüldü.

Yukarıdaki durumlar göz önüne alınarak disk yüzeyine oksijen kaynağı ile ısı verilmesi uygun görüldü.

4.4 Deney

- Yataklara hava verilir.
- Optik takometre açılır ve diskin hızı okunmaya başlanır.

Deney tamamlanana kadar optik takometre açıktır ve diskin hızını okumaktadır.

- Dremelin 5000 d/d'da (en düşük devrinde) çalıştırılıp, disk yüzeyine temas ettirilmesi ile disk harekete geçirilir.
- Dremelin hızı (diskin hızı) yavaş yavaş artırılır

Diskin dremel hızına ulaşabilmesi için her geçiş zamanında kısa süre beklenir.

- Yeterli hıza ulaşıldığında dremel çekilir ve sistemden uzaklaştırılır.
- Kuvvetölçer çalıştırılır ve referans olması açısından gösterdiği değer sıfırlanır.
- Oksijen kaynağı ile disk yüzeyi ısıtılır,
- Birkaç saniye ısı uygulandıktan sonra kaynak sistemden uzaklaştırılır.
- Sıcak yüzeye sahip disk, hava yastıkları üzerinde dönmektedir. Diskin birkaç saniye dönmesi ve gerekli ölçümlerin yapılması ile deney tamamlanır.

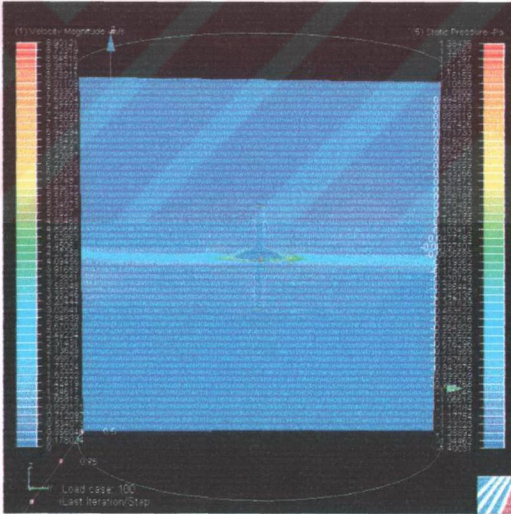
Oksijen kaynağı ile ısı verilmeye başlandığından itibaren toplanmaya başlanan veriler, deney için en önemli verilerdir. Bu andan itibaren farklı sıcaklıktaki iki yüzey, yüksek hızda havada dönmektedir. Çok kısa bir zaman zarfında yüzeyler arası sıcaklık farkının kaybolacağı göz önünde tutulmuştur.

Buradan toplanan veriler ve karşılaştırmalar Beşinci Bölüm’de anlatılmaktadır.

4.5 Akış Analizleri

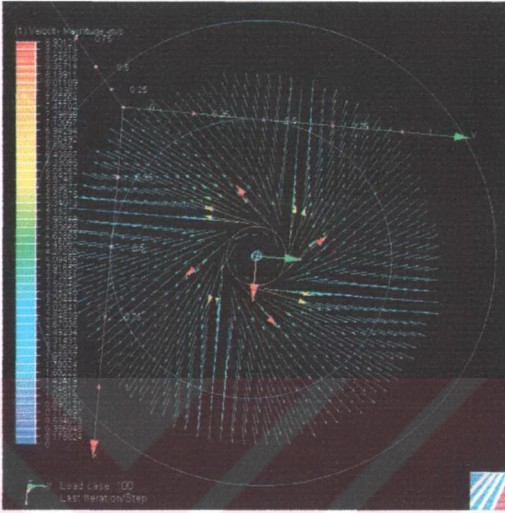
Dönen disk etrafında oluşması muhtemel akışın tahmin edilmesi için CFXDesign yazılımı kullanılarak basınç ve hız alanları görselleştirildi. Burada elbette ki türbülans, termal etkiler gibi akışı karmaşıklaştırıcı realiteler, hesaplama yeteneklerinin sınırlılığından ötürü, göz önüne alınamamıştır.

Yukarıda anılan kabuller doğrultusunda yapılan örnek akış analizinde, Bölüm 2.2’de bahsedilen pompalama etkisi açıkça gözlemlenmektedir (Şekil 4.6).

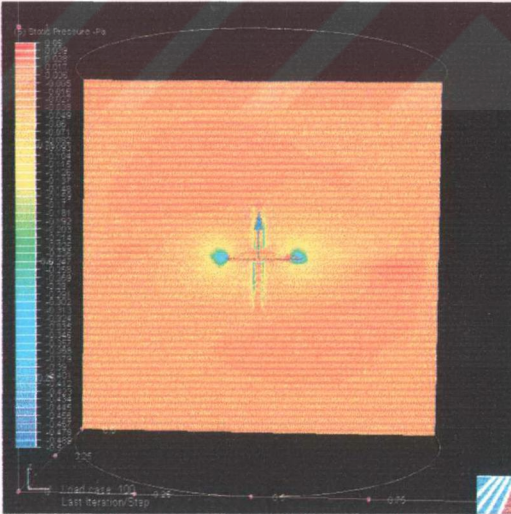


Şekil 4.6 Dönen disk etrafındaki pompalama etkisi – Hız Grafiği

Şekil 4.7’de, diskin iki konisinin birleştiği en büyük yarıçaplı yatay kesitten geçirilen bir düzlem üzerindeki hız vektörleri gösterilmiştir. Bu dağılım önceki teorik çalışmaların öngördüğü hız dağılımı ile uyumlu bulunmuştur.



Şekil 4.7 Diske üstten bakış, hız vektörleri



Şekil 4.8 Disk etrafındaki basınç dağılımı

Şekil 4.8'de ise diskin etrafındaki basınç dağılımı verilmiştir. Birbirine çok yakın, paralel iki vorteks halkası izlenimindeki bu basınç dağılımı, muhtemelen yüzeylerin açılarının farklı olmasından dolayı asimetrik bir yapı arz etmektedir. Bu nümerik çalışma ile tabiidir ki yüzey sıcaklığının bu basınç ve hız dağılımlarına etkisi incelenememektedir.

5 SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında hız ve sıcaklık faktörlerinin, dış hava akış karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Bu incelemenin iyi bir şekilde yapılabilmesi amacıyla gerekli bir deney düzeneği itina ile hazırlanmıştır. Hazırlanan düzenekte şimdiye kadar literatürde bulunan disklerden daha değişik geometriye sahip bir disk üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu çalışmadan disk geometrisinin akış üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Ayrıca bu geometrinin çok yüksek sıcaklık ve hızlarda akışa yaptığı etki daha farklı olmaktadır. Yani yüksek sıcaklık ve hız faktörlerinin akış üzerinde önemli etkisi vardır. Sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemleri kullanılırken yapılmakta olan kabuller bu etkileri azımsamaktadır.

Bu çalışmanın belki de en büyük başarısı olarak yaklaşık 4 kg ağırlığındaki bir disk ve mil grubu, havalı yataklar üzerinde, yüksek hızlarda dönebilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bunun yanı sıra sürtünmenin çok az olduğu havalı yataklar dolayısı ile, yaklaşık 3000 d/d'ya kadar hızlandırılan diskin yaklaşık 30 dk'da durduğu gözlemlenerek sistemin hassas bir şekilde çalıştığı doğrulanmıştır.

Bu çalışmada, teorik olarak ortaya koyulmuş bulunan pompalama etkisi sayısal yöntemlerle de doğrulanmıştır. Bu pompalama etkisinin bir neticesi olarak, ısıtılmış yüzeyden radyal olarak uzaklaşan akışkanın yüzeyden transfer ettiği ısının bir ölçütü olarak, diskin hemen kenarından termokupl ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Buna göre, oksijen kaynağı ile 40 sn kadar üst yüzeyden ısıtılmamış diskten pompalanan havanın sıcaklığı, ortam sıcaklığına (27°C) yakın iken, ortalama 1500 d/d'da bu değer 41°C ve yine ortalama 750 d/d'da da 35°C olarak ölçülmüştür. Disk durduktan sonra aynı yerde ölçülen sıcaklık tekrar ortam sıcaklığına düşmektedir. Buna göre, dönen sıcak diskin üflediği akışkanın sıcaklığı, pompalama etkisinin bir göstergesi olarak, açısal hızla artmaktadır.

Deney sırasında, üst yüzeye sıcaklık uygulandığı sırada, 1-2 gramlık bir negatif kuvvet farkı gözlemlenmişse de bunun kullanılan ölçüm aletinin ve deney teçhizatının hassasiyeti ve deney koşulları göz önünde tutululursa, güvenilir bir gözlem olduğu düşünülmemektedir. Ayrıca bu reaksiyon birkaç saniye içinde yok olmaktadır. Ayrıca, üst yüzey ısının çelik malzeme içinden alta çok hızlı sirayet etmesi ile üst ve alt yüzeyler arasında sıcaklık farkı oluşturulamamıştır. Bunun başka bir tasarımıyla gerçekleştirilmesi sonraki bir çalışmaya bırakılmıştır.

KAYNAKLAR

[Karman, 1921], Von Kármán T., Über Laminare Und Turbulente Reibung, Z. Angew. Math. Mech., 1 (1921) 233–255.

[Cochran, 1934], Cochran W.G., The Flow Due To A Rotating Disc, Proc. Cambridge Phil. Soc., 30 (1934) 365–375.

[Benton, 1966], Benton E.R., On The Flow Due To A Rotating Disc, J. Fluid Mech., 24 (1966) 781–800.

[Bödewadt, 1940], Bödewadt U.T., Die Drehströmung Über Festem Grunde, Z. Angew. Math. Mech., 20 (1940) 241–253.

[Rogers M.G., Lance G.N., 1960], Rogers M.G., Lance G.N., The rotationally Symmetric Flow Of A Viscous Fluid In Presence Of Infinite Rotating Disc, J. Fluid Mech., 7 (1960) 617–631.

[Stuart, 1954], Stuart J.T., On the Effect of Uniform Suction on The Steady Flow Due to a Rotating Disc, Quart. J. Mech. Appl. Math., 7 (1954) 446–457.

[Batchelor, 1951], Batchelor G.K., Note on a Class of Solutions of the Navier–Stokes Equations Representing Steady Nonrotationally Symmetric Flow, Quart. J. Mech. Appl. Math., 4 (1951) 29–41.

[Ockendon, 1972], Ockendon H., An Asymptotic Solution For Steady Flow Above An Infinite Rotating Disc With Suction, Quart. J., Mech. Appl. Math., 25 (1972) 291–301.

[Wagner, 1948], Wagner C., Heat Transfer From A Heated Disc To Ambient Air, J. Appl. Phys., 19 (1948) 837–841.

[Millsaps K., Pohlhausen K., 1942], Millsaps K., Pohlhausen K., Heat Transfer By A Laminar Flow From A Rotating Plate, J. Aero. Sci., 19 (1952) 120-126.

[Sparrow E.M., Gregg J.L., 1959], Sparrow E.M., Gregg J.L., Heat Transfers From A Rotating Disc To A Fluid Any Prandtl Number, ASME J. Heat Tran., C 81 (1959) 249-251.

[Ostrach S., Thornton P.R., 1958], Ostrach S., Thornton P.R., Compressible Laminar Flow and Heat Transfer About a Rotating Isothermal Disc, NACA Technical Note, 4320, 1958.

[Hartnett, 1959], Hartnett J.P., Heat Transfer From A Non-Isothermal Rotating Disc In Still Air, ASME J. Appl. Mech., 4 (1959) 672-673.

[Merkin, 1983], Merkin J.H., Free Convection Above A Horizontal Circular Disc, J. Appl. Math. Phys., 34 (1983) 597-608.

[Zakerullah M., Ackroyd J.A.D., 1979], Zakerullah M., Ackroyd J.A.D., Free Convection Above a Horizontal Circular Disc for Variable Fluid Properties, Z. Angew. Math. Phys., 30 (1979) 427-438.

[Kafoussias N.G., Williams E.W., 1995], Kafoussias N.G., Williams E.W., The Effect Of Temperature Dependent Viscosity On The Free Convective Laminar Boundary Layer Flow Past A Vertical Isothermal Flat Plate, Acta Mechanica, 110 (1995) 123-137.

[Kafoussias N.G., Rees D.A.S., 1998], Kafoussias N.G., Rees D.A.S., Numerical Studies Of The Combined Free And Forced Convective Laminar Boundary Layer Flow Past A Vertical Isothermal Flat Plate With Temperature Dependent Viscosity, Acta Mechanica, 127 (1998) 39-50.

[Gary et al, 1982], Gary J., Kassory D.R., Tadjeran H., Zebib A., The effect of Significant Viscosity Variation On Convective Heat Transport In Water-Saturated Porous media, J. Fluid Mech. 117 (1982) 233–249.

[Mehta K.N., Sood S., 1978], Mehta K.N., Sood S., Transient Free Convection Flow With Temperature Dependent Viscosity In Fluid Saturated Porous Medium, Int. J. Eng. Sci. 30 (1992) 1083–1087. Mechanics, 10 (1978) 417–433.

[Targ, 1951]Targ, G. M., Basic Problem in the Theory of Laminar Flow. Moscow: Gostekhizdat 1951

[NewWay, 2003] Air Bearing Application and Design Guide, Rev. D, New Way Precision, 2003

[NewWayAir], <http://www.newwayairbearings.com/>

[MachineDesign], <http://www.bearings.machinedesign.com/>

[Owen, J. M., and Rogers, R. H., 1989], Owen, J. M., and Rogers, R. H., Flow and Heat Transfer in Rotating Disc Systems, Acta Mechanica 127 (1998) 39–50

[Gregory et al, 1955], Gregory, N., Stuart, J. T., and Walker, W. S., On the Stability of Three-Dimensional Boundary Layers With Application to the Flow Due to a Rotating Disk, Phil. Trans. Roy. Soc. A, 248, (1955) 155–199.

[Cham and Head, 1969], Cham, T.S., and Head, M. R., Turbulent Boundary-Layer Flow on a Rotating Disk. J. Fluid Mech., 37, (1969) 129–147.

[Theodorsen and Regier, 1944], Theodorsen, T., and Regier, A., 1944, Experiments on drag of Revolving Disks, Cylinders, and Streamline Rods at High Speeds. Naca Report, No. 793.

[Shampine, L. F. and Gordon, M. K., 1975], Shampine, L. F. and Gordon, M. K., Computer Solution of Ordinary Differential Equations: the Initial Value Problem, [Freeman, W. H., San Francisco]

[Milne-Thomson, L. M., 1960], Milne-Thomson, L. M., Theoretical Hydrodynamics [Macmillan, London].

[Schlichting, 1960], Schlichting, H., Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, (1960), 83-95

[Rohde, 2000], Rohde, A., A Computational Study of Flow Around a Rotating Disc in Flight, (2000)

ÖZGEÇMİŞ



Doğum Tarihi : 02.01.1978
Doğum Yeri : Göle/ARDAHAN
Lise : Gebze Sarkuysan Lisesi, 1995
Lisans : Selçuk Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü, 2001
Yüksek Lisans : Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Anabilim Dalı