



**KOMPLEKS GEOMETRİLER İÇİN DÜŞÜK REYNOLDS
SAYISINDA 2-BOYUTLU AKIŞ İNCELENMESİ**

**(2-DIMENSIONAL FLOW INVESTIGATION FOR COMPLEX GEOMETRIES
AT LOW REYNOLDS NUMBER)**

Adnan ÖZTÜRK,* Ali PINARBAŞI*

ÖZET / ABSRACT

Bu çalışmada, Sonlu farklar tekniği kullanılarak, sıkıştırılamaz viskoz bir akışkan için tek tüp, tüp demeti, tek aerofoil kanat ve bir aksenel türbinin kaskat kanadı üzerinde akış incelenmesi yapılmıştır. Kullanılan yöntem, akışkanın Kararlı, Sıkıştırılamaz ve Laminer sabit viskoziteli akımda subsonic hız kabulü ile Süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerinin Akım Fonksiyonu-Vorticity metoduyla çözümünden ibarettir. Çalışılan farklı geometrik yapılar Reynolds sayısının 1000 değerinde nümerik olarak çalışılmış olup elde edilen sonuçlar grafik ortama aktarılarak daha önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Tek tüp ve tüp demeti üzerine yapılan incelemede, akış yoğunluğuna etki eden viskoz tabaka etkileşimi gözlemlenmiştir. Kaskat kanatlar üzerinde yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar ise, rotor ve stator kanatları arasında oluşan bölgesel ve kanat izi vortekslerinin akış kararlılığına olan etkisi net olarak gözlemlenmektedir.

In this study, the flow around the single circular cylinder, tube banks, aerofoil blade and a axial turbine blades have been investigated using finite difference computational technique for steady incompressible viscid flow approach. The Computational Technique used is a stream function-vorticity formulation of the Laminar flow, steady state incompressible, continuity. Loss generation and 2-D flow behaviour at the stator-rotor stage were computed at steady flow and Reynolds number of 1000 by solving Navier stokes equations. In the flow investigation of the single circular cylinder and the tube banks, the fluid density has been intreacted by viscous sublayer. The result of cascade blades shown that there was expansion between the stator and the rotor blades which is resulted from vortex motion.

ANAHTAR KELİMELER / KEY WORDS

Tek tüp, tek aerofoil kanat, Kaskat kanat, Nümerik metot, 2-Boyutlu akış

Circular cylinder, Aerofoil blade, Cascade blades, Numerical method, 2-D Fluid flow

1. GİRİŞ

Günümüzdeki teknolojik gelişmeler her ne kadar bilimsel araştırmalar üzerinde olumlu etkiler bıraksalar da, bazı bilim dallarında mevcut problemlerin çözümünde birtakım güçlükler halen varlığını sürdürmektedir. Buna örnek olarak, yapılan bazı deneysel çalışmaların analitik bazda çözümsüzlükleri gösterilebilir. Bu nedenle bu tür denklemlerin çözümü için nümerik çözüm teknikleri geliştirilmiştir. Bu problemlerin çözümünde kullanılan nümerik metotlarla elde edilen çözümler, bize çalışma yapılan konuda yaklaşık olarak bir fikir verebilmektedir.

Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler ve ilerlemeler, Akışkanlar Mekaniğinde CFD (Computational Fluid Dynamics) adıyla yeni bir çalışma alanı doğmasına neden olmuştur. CFD çalışmalarında, bilgisayar yardımıyla akış simülasyonu yapılacak olan alan ve bu alanda meydana gelen etkileşimler detaylı olarak görülebilmektedir.

CFD çalışmalarından elde edilen en önemli sonuçlardan birisi, bir dizayn yapılmadan önce bilgisayar simülasyonu aracılığıyla elde edilen veriler yardımıyla verim artırma yöntemleri ve dizayna yönelik bir takım problemlerin deney aşamasına gelmeden önce rahatlıkla çözülebilmesidir. Deney aşamasında, rüzgar tüneli testlerinde gerek ölçekli modellerin yapımı gerekse ölçekli rüzgar tünelinin pahalı bir yatırım olması nedeniyle, deney aşamasına gelmeden önce yapılan CFD çalışmaları bu çalışmalara göre daha az maliyetli ve daha farklı düşünceler geliştirebilme yönünde büyük katkılar sağladığı için tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalar esnasında ayrıntılı ve bileşik geometri içerisindeki değişiklikler daha kolay ve daha hızlı şekilde yapılabilmektedir. Bu amaçla CFD çalışmaları daha çok dizaynın başlangıç aşamasında yapılmaktadır. Son dizaynlar, rüzgar tüneline yapılan deneysel çalışmalara bağlı olarak modeller üzerindeki değişikliklerle düzenlenmektedir.

Son yıllarda nümerik akışkanlar mekaniği üzerine pek çok araştırmacı inceleme yapmış olup bunların bir kısmını şu şekilde özetleyebiliriz. Kararsız, sıkıştırılamaz bir akış ortamında bir vorteks üreticinin iki boyutlu incelenmesi, Sonlu Farklar metodu kullanılarak, Johnson (1990) tarafından yapılmıştır. Bu metotta Akım Fonksiyonu-Vorticity yaklaşımıyla her bir zaman dilimi için sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zamanda silindirik tüp etrafındaki kararsız akış değişik Reynolds sayılarında nümerik olarak çalışılmış ve sonuçlar deneysel gözlemlerle karşılaştırılarak bu çalışmada sunulmuştur. Kullanılan metot açısından, deneysel ve nümerik sonuçların uyumu bu çalışmada kanıtlanmıştır. Vorteks üretici için ölü bölgenin aşağı akıntı bölgesinde akışkana etki eden esas faktörler çıkartılmıştır.

Benzeri bir çalışma El Vahed (1993) tarafından tekrarlanmış olup iki boyutlu geometriler üzerine, kullanılan geometriye uygun türbülans modellemesi çıkarılarak sonuçlar Vorteks üreticinin, silindir, dikdörtgen, trapez ve üçgen geometrileri için iki boyutlu kararsız ortamda tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlardan Baldwin Lomax türbülans modellemesinin bu geometriler için uygun bir yaklaşım gösterdiğini ortaya koymuştur. Yapılan nümerik çalışmanın laminer ve türbülanslı ortamda tekrarlanmasıyla elde edilen sonuçlarla çalışma desteklenmiştir. Ayrıca Vorteks üreticiden beklenen vorteks alanlarının türbülans bölümünün ilerlemesiyle netleştiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada iki boyutlu Sonlu Farklar metodu yaklaşımıyla türbülans modellemesinin yapılabileceği belirtilmiş olmaktadır.

Bir silindir etrafındaki Sınır Tabakadaki dağılımı inceleyen diğer bir nümerik çalışma Jordan ve Ragap tarafından (1994) kararsız rejimde yüksek Reynolds sayılarında $Re > 5000$ için iki boyutlu bazda incelenmiştir. Çalışma özellikle bir silindirin ölü bölgesi etrafında oluşan büyük Eddy simülasyonunun yorumunu içermektedir. Bu da doğal olarak silindirin etrafında oluşan karmaşık ölü bölge ile bağlantılar gerektirmektedir. Kullanılan türbülans modellemesi için küçük ölçekli türbülans modellemesi geliştirilmiş, elde edilen sonuçlara göre rms (root mean square) dağılımları ne kadar yüksek görünse de çalışmanın deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

Mook ve Dong (1994) ise yapmış oldukları nümerik çalışmada aerofoil kanat üzerinde oluşan ölü bölge ve kanat vorteks hareketlerini perspektif olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada aerofoil kanat üzerinde sıkıştırılmaz akışın simülasyonu ve bunun doğurduğu ölü bölge ve kanat vorteksinin incelenmesini Sınır Tabaka etkileşimi esasına dayandırmaktadırlar. Çalışmada aerofoil kanat profili üzerindeki ölü bölge oluşumları sonucunda hız vektörlerinin büyüklüklerinin arttığı ve hızlı bir şekilde dağılım gösterdiği belirtilmektedir. Ayrıca bunun sebebi olarak ta viskoz alt tabaka üzerindeki etkileşimler gösterilmektedir.

Öztürk (1998) tarafından yapılan çalışmada Kararlı, Sıkıştırılmaz, Laminer ve sabit viskoziteli akış kabulü ile, tek tüp, tüp demeti, tek aerofoil kanat ve kaskat kanat durumları için farklı Reynolds sayılarında Akım Fonksiyonu ve 2-Boyutlu hız grafikleri elde edilmiş olup, değişen Reynolds sayılarında bu grafikler üzerindeki değişimler incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlarda, karmaşık geometrilerde elde edilen çözünürlük hassasiyetinin basit geometrilere göre daha yüksek olduğu, Laminer sabit viskoziteli akış kabulüne rağmen ayrılma noktalarının oluşumunda viskoz alt tabakadaki gelişimin etken olabileceği ve kaskat kanat durumu için yapılan incelemede, bu geometrinin akış hareketlerine etkisi incelenmiştir.

Çalışmamızdaki geometrilerde esas teşkil eden diğer deneysel çalışma ise 2-boyutlu türbin statoru ve rotoru üzerine Yamamoto (1995) tarafından yapılmıştır. Burada aerofoil kanatlar üzerindeki akış düzenleri incelenerek kaskat kanatlar üzerindeki toplam basınç kayıplarının etkileri ve kanat ucu etkileşimleri çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kaskat kanatların etkisi yukarı akıntı bölgesindeki düşük enerjili akışın, aşağı akıntı kaskatında aşırı derecede etkili olduğu ve kanat ucundaki hareketlerin bunun nedeni olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçta türbülans etkileşiminin sebepleri üzerine akış karışımlarının ne kadar etkili olduğunu gösteren bir uygulamadır.

Yukarıda incelendiği üzere kompleks geometrilerde oluşan akım hatlarının incelenmesi ve bunların uygun türbülans modelleri ile birleştirilmesi birçok araştırmacının ilgi odağını oluşturmaktadır. Bu sebeple yaygın kullanım alanı olan rotodinamik sistemler üzerinde yapılabilecek nümerik bir çalışma, bu konuda eksik kalan bilgilerin ışığa çıkmasında yarar sağlayabileceği gibi, yeni yapılmakta olan dizaynlarda dikkat edilmesi gerekli fiziksel özelliklerin bilinmesinde de avantaj sağlayacaktır.

Akışkanlar Mekaniğinde, karmaşık olarak kabul edilen dönel sistemler üzerindeki akış hareketlerinin incelenmesi, önemli ve ilgi çekici bir problem alanını oluşturmaktadır. Bu çalışmada ise tek tüp, tüp demeti, tek aerofoil kanat ve dönel ve karmaşık bir sistem olan türbinlerdeki rotor-stator kanatları üzerindeki akış hareketlerinin incelenmesi göz önüne alınacaktır.

2. NÜMERİK METOT

Bu çalışmada 2-boyutlu bazda düşünülen silindirik tüpler ve rotor-stator kanatları üzerinde, Sonlu Farklar yaklaşımı ile hız, akım fonksiyonu ilişkileri incelenmiştir. Bu incelemede temel parametre olarak Re (Reynolds sayısı) göz önüne alınmıştır. Re sayısının 1000 değerinde, tek tüp, tüp demeti, tek aerofoil kanat ve kaskat kanat durumları için nümerik çalışma tekrarlanmış olup, bu geometriler üzerinde oluşan akım fonksiyonu ve 2-boyutlu hız değişimleri üzerinde durulmuştur. Çalışmada kullanılan tek aerofoil kanat profili ve kaskat kanat dizaynı için Yamamoto (1995)'nin yaptığı deneysel çalışmadan faydalanılmıştır. Sonuç olarak elde edilen grafiklerin yorumlanması suretiyle düzgün geometriye sahip olarak kabul edilen silindirik tüp ile, karmaşık geometriye sahip rotor-stator kanatçıkları arasında değişen Reynolds sayılarında akış şeklinin karşılaştırılması yoluna gidilmiştir.

2.1 Potansiyel Akış Teorisi

Akışkanın 2-boyutlu hareketi düşünüldüğünde,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

yazılabilir. Burada u ve v sırasıyla x , y doğrultularındaki hız vektörlerini göstermektedir. Akım fonksiyonu $\psi(x,y)$ ise,

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada akım çizgileri, kütle korunumu prensibinin yorumu olarak görülebilir.

İkinci olarak yazılabilecek denklem ise Euler denklemidir. Akışkanın yoğunluğu sabit olmak üzere, sürtünmesiz, mükemmel bir akışkan için sürekli akışta, yüzey kuvvetlerini ihmal etmek koşuluyla, x ve y doğrultularındaki eksen takımları için Euler denklemi yazılacak olursa,

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (4)$$

denklemleri elde edilir. Burada $p(x,y)$ basınç, ρ yoğunluk, u ve v ise sırasıyla x ve y doğrultularındaki hız vektörleridir.

Süreklilik denklemi (1) ve iki adet Euler denklemi (3 ve 4) birleştirildiği takdirde u , v , p gibi üç tane bilinmeyen karşımıza çıkmaktadır. Böyle bir denklem takımı için sınır şartı, yüzeyin normali doğrultusunda herhangi bir hız vektörünün olmamasıdır. İki boyutlu hız alanı boyunca oluşabilecek vorteks için genel ifade olarak,

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir.

Hız potansiyeli olarak, $\phi(x,y)$ skaler potansiyeli göstermek üzere,

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (6)$$

denklemleri elde edilebilir. Bu şartlar altında akış, irrotasyonel potansiyel akış olarak bilinir. (6) denklemini (1) denkleminde yerine yazdığımızda, genel formda,

$$\Delta^2 \phi = 0 \quad (7)$$

denklemini elde edilir. (2) akım fonksiyonu denklemini (5) denklemiyle birleştirecek olursak,

$$\Delta^2 \psi = 0 \quad (8)$$

(8) denklemi genel formda elde edilebilir.

Burada ϕ ve ψ , potansiyel akıştaki akım çizgilerinin, ortogonal görüntünün bir formu olarak toplam akışı ifade etmektedir.

Ayrıca Sirkülasyon ve Vorticity ifadelerinin elde edilebilmesi için z-yönündeki akışın ihmal edildiği varsayımıyla Sirkülasyon ;

$$\Gamma = \frac{\partial v}{\partial x} \delta x \delta y - \frac{\partial u}{\partial y} \delta y \delta x \quad (9)$$

denklemini,
Vorticity için ise ;

$$\Omega = \frac{\text{Sirkülasyon}}{\text{Alan}} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (10)$$

$$= \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \Delta^2 \psi = \Omega \quad (11)$$

ifadeleri yazılabilir.

2.2. Akım Fonksiyonu - Vorticity Metodu :

Bu metot, sıkıştırılamaz akış kabulüyle, süreklilik denkleminin ve momentum denkleminin x ve y doğrultularında çözümünü içermektedir. Süreklilik denklemi (1) de verilen şekli ile aynı kalmak üzere, momentum denklemini viskoz etkilerin ilave edilmesi suretiyle düzenlenirse,

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (13)$$

denklemleri elde edilir.

Vorticity ise,

$$\frac{P_x}{\rho} + \psi_y \psi_{xy} - \psi_x \psi_{yy} = \nu \Omega_y \quad (14)$$

$$\frac{P_y}{\rho} - \psi_y \psi_{xx} + \psi_x \psi_{xy} = -\nu \Omega_x \quad (15)$$

şeklinde yazılabilir. Burada x ve y indisleri diferansiyel gösterimi ifade etmektedir.

Benzer şekilde (14) ve (15) denklemlerini x ve y doğrultularında diferansiyel formda yazarak birleştirecek olursak, basınç terimlerini ihmal etmek suretiyle;

$$\psi_x \Omega_y - \psi_y \Omega_x + \nu \Delta^2 \Omega = 0 \quad (16)$$

$$\psi_y \Omega_x - \psi_x \Omega_y = \nu \Delta^2 \Omega$$

denklemini elde edilir. Veya bu ifadenin sadece akım fonksiyonuna bağlı olarak yazılmasıyla,

$$\psi_y (\Delta^2 \psi)_x - \psi_x (\Delta^2 \psi)_y = \nu \Delta^4 \psi \quad (17)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik dördüncü dereceden Biharmonik bir denklemdir.

$Re_{\Delta x}$ ve $Re_{\Delta y}$ Grid hücre Reynolds sayılarını göstermek üzere, Sonlu Farklar metodu uygulanmak suretiyle,

$$Re_{\Delta y} = \frac{(\psi_k - \psi_g) \Delta x}{\Delta y} = \frac{u \Delta x}{\nu} \quad (18)$$

$$Re_{\Delta x} = \frac{(\psi_b - \psi_d) \Delta y}{\Delta x} = \frac{v \Delta y}{\nu} \quad (19)$$

şeklinde yazılabilir. Vorticity ise,

$$\Omega = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \Delta^2 \psi \quad (20)$$

olarak yazılabilir. (2) denkleminin kullanımıyla u ve v değişkenlerini momentum denkleminde yer değiştirirsek,

$$\frac{P_x}{\rho} - \psi_y \psi_{yy} - \psi_x \psi_{yy} = \nu(\psi_{xxy} + \psi_{yyy}) \quad (21)$$

$$\frac{P_y}{\rho} - \psi_y \psi_{xx} + \psi_x \psi_{xy} = \nu(\psi_{xxx} + \psi_{xyy}) \quad (22)$$

ifadeleri elde edilir.

İkinci dereceden sonlu farklar tekniği uygulanarak sırası ile ψ ve Ω , aşağıdaki formlara getirilip, çözüme gidilebilir. (8) ve (16) denklemleri Sonlu Farklar metoduyla yazılacak olursa

$$\Omega_o = \frac{\psi_b + \psi_d - 2\psi_o}{(\Delta x)^2} + \frac{\psi_k + \psi_g - 2\psi_o}{(\Delta y)^2} \quad (23)$$

$$\psi_o = \frac{\frac{\psi_b + \psi_d}{(\Delta x)^2} + \frac{\psi_k + \psi_g}{(\Delta y)^2} - \Omega_o}{\frac{2}{(\Delta x)^2} + \frac{2}{(\Delta y)^2}} \quad (24)$$

denklemleri elde edilir. Kullanılacak olan Akım fonksiyonu ψ ve Vorticity Ω için sınır şartları yazılacak olursa ikinci derece Taylor açılımları ,

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \left(x - \frac{\Delta x}{2}, 0 \right) = \frac{\psi(x,0) - \psi(x - \Delta x, 0)}{\Delta x} \quad (25)$$

veya

$$\psi(x,0) = \psi(x - \Delta x, 0) - \Delta x \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(x - \frac{\Delta x}{2}, 0 \right) \quad (26)$$

elde edilir. Vorticity için sınır şartı (17) denklemini aracılığıyla Akım fonksiyonu değerlerinden elde edilir. Yani;

$$\Omega(x,0) = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}(x,0) - \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}(x,0) \quad (27)$$

İkinci derece için bu ifade;

$$\Omega(x,0) = \frac{2\psi(x,0) - \psi(x + \Delta x,0) - \psi(x - \Delta x,0)}{\Delta x^2} + \frac{2\psi(x, \Delta y) - \psi(x,0) - \psi(x,2\Delta y)}{\Delta y^2} \quad (28)$$

şeklini alır. Bu formül Bryan (1963) , Greenspan (1969) gibi bir çok araştırmacı tarafından başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

2.3. Grid Üretimi ve Hesaplama Tekniği :

Bir akış hesabında, grid noktalarının yoğunluğu ve dağılımı sonraki sınır hesaplamalarının hassasiyetle çözünürlüğünü belirler. Ele alınabilen grid noktalarının sayısı kullanılacak bilgisayarın özelliğine, kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için kullanılan algoritmanın etkinliğine bağlıdır. Grid üretimi için basit bir metot olan ve Amsden ve Hirt (1973) tarafından tanımlanan grid üretim tekniği kullanılmıştır. Bu metot da Δx ve Δy hücre büyüklüğünün düzenli dikdörtgen, bir karesi gerekli olan geometriye göre sürekli olarak gevşetilir. Her bir iterasyon için sınır noktaları, başlangıç ve son lokasyona düzgün bir bağlantı şeklinde kısa aralıklarla hareket ettirilir. Koordinatlar her bir sınır nokta lokasyonu uygun hale getirildikten sonra en yakın sekiz sınır noktasının ortalama koordinatlarıyla belirlenir.

Bu koordinatlar;

$$x_{i,j} = \frac{1}{8}(x_{i+1,j} + x_{i-1,j} + x_{i,j+1} + x_{i,j-1} + x_{i+1,j+1} + x_{i-1,j+1} + x_{i+1,j-1} + x_{i-1,j-1}) \quad (29)$$

denklemleriyle belirlenir.

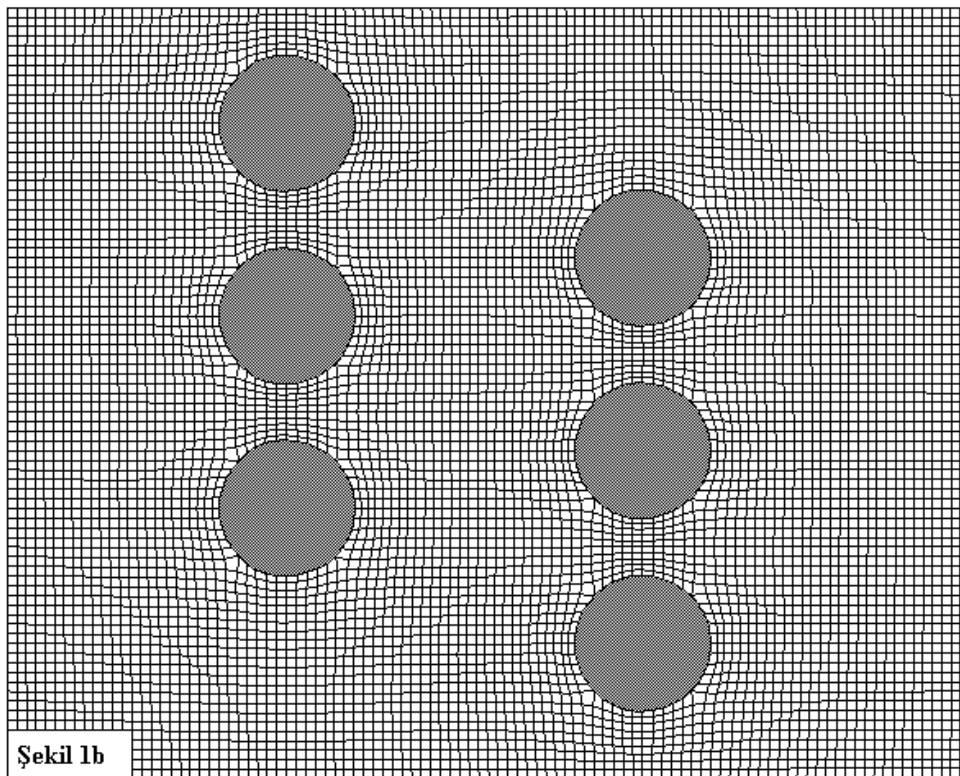
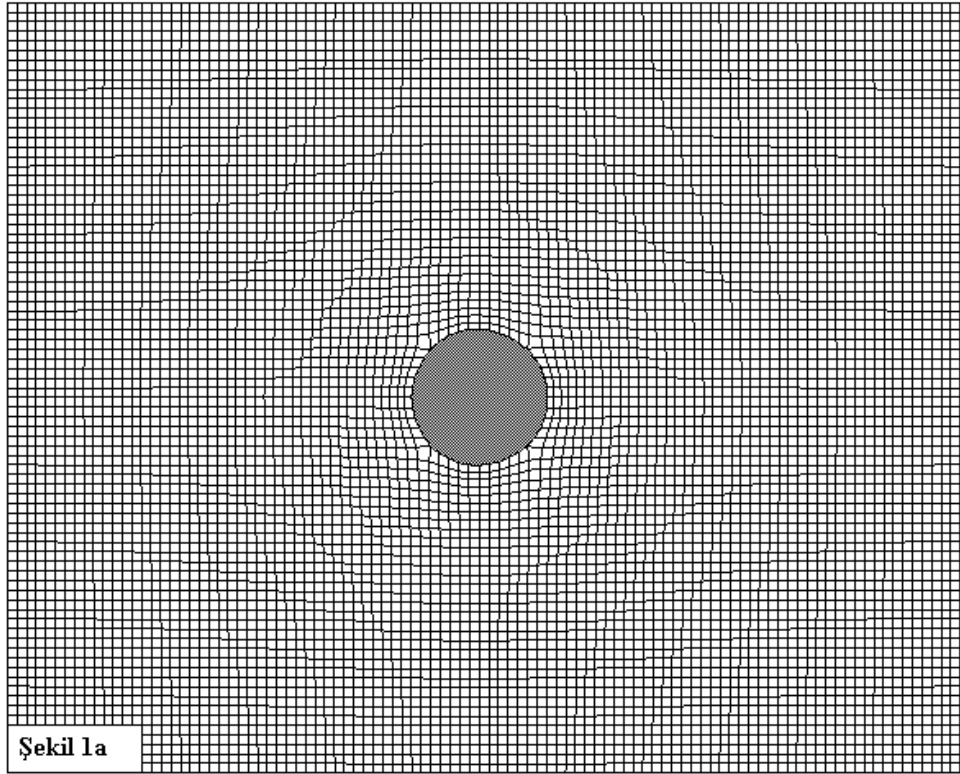
Grid oluşumuna yaygın örnekler silindirik ve küresel koordinat düzenindedir. Ancak çoğu aerodinamik cisimler karmaşık bir şekildedir. Bu tür cisimler için grid üretiminde uygun bir koordinat sisteminin elde edilmesi gerekir. Burada kabul edilen grid üretim şekli Thompson ve arkadaşlarının (1974) kullandığı yöntemine dayanır. Yöntem iki Laplace denklemi olan (30) ve (31) denklemlerinin çözülmesi esasına dayanır.

$$\frac{\partial^2 x}{\partial S_1^2} + \frac{\partial^2 x}{\partial S_2^2} = 0 \quad (30)$$

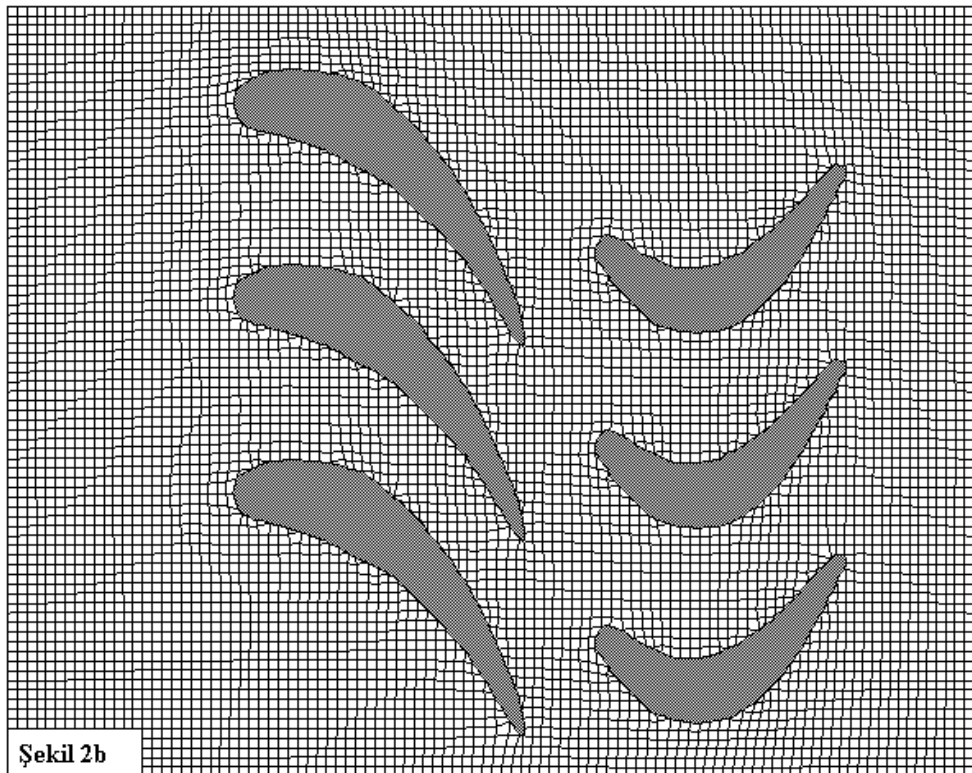
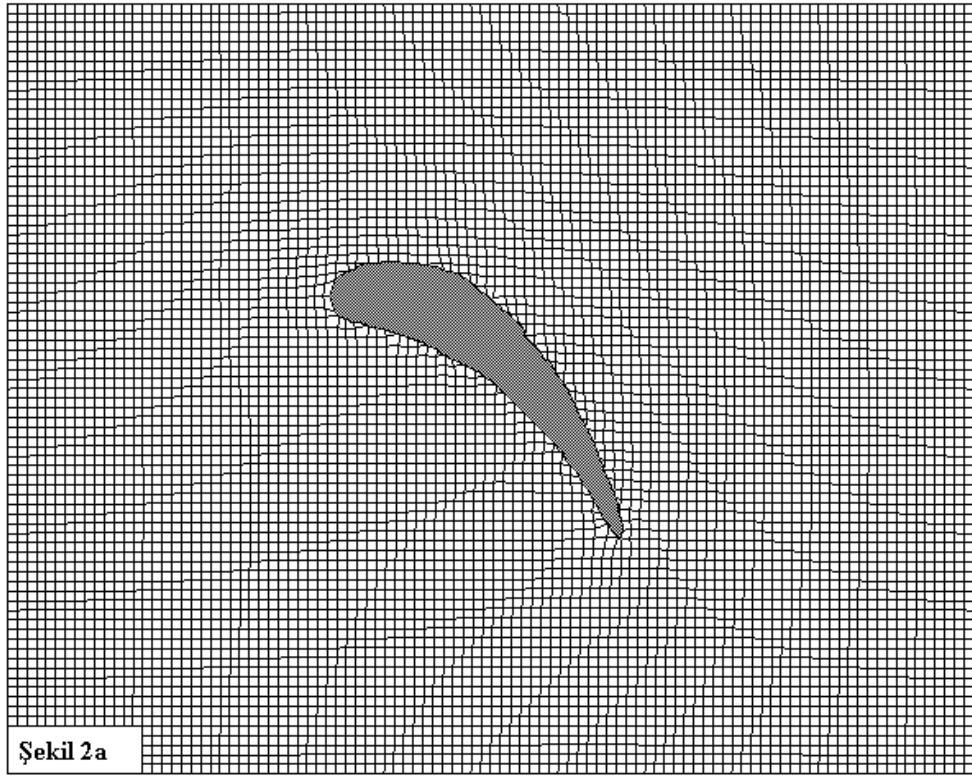
$$\frac{\partial^2 y}{\partial S_1^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial S_2^2} = 0 \quad (31)$$

İki Sonlu Fark operatörü bulunan (29) denkleminin çözümü bu denklemlerin çözümü ile aynı esasa dayanmaktadır. Denklemlerin çözülmesiyle kompleks geometriler için ortogonal eğrisel gridler üretilir.

Yapılan çalışmada kullanılan 2-boyutlu geometriler yukarıda belirtilen metot yardımıyla 100x80 boyutlarında grid üretimleri yapılarak ayrı bir dosya olarak elde edilmiştir. Şekil 1a'da tek tüp, Şekil 1b'de tüp demeti, Şekil 2a'da tek aerofoil kanat, Şekil 2b'de ise kaskat kanat durumları için elde edilen gridler görülmektedir.



Şekil 1. (a) Tek tüp için üretilen grid (b) Tüp demeti için üretilen grid



Şekil 2. (a) Tek aerofoil kanat için üretilen grid (b) Kaskat kanat için üretilen grid

3. NÜMERİK SONUÇLARIN YORUMLANMASI

3.1. Tek tüp :

Akış fiziğini incelemek için yapılan bu çalışmada, başlangıçta basit bir geometri olması nedeniyle tek silindirik tüp ile başlanmıştır. Tek tüp için 100x80 boyutunda oluşturulan grid formu Şekil 1a'da verilmiştir. $Re=1000$, değeri için çalıştırılması sonucu elde edilen akım fonksiyonu grafiği Şekil 3a'da, 2-boyutlu hız grafiği ise Şekil 3b'de verilmiştir. Akım fonksiyonu grafiğinden görülebileceği gibi silindirin arka tarafında akışın tam olarak ulaşmadığı bir ölü bölge ve silindir merkezinden geçen akım fonksiyonu değerinde bir durgunluk noktası olduğu gözlemlenmiştir. Akım çizgilerinden ayrılma noktası yaklaşık olarak merkezinden geçen eksene göre (saat yönünün aynı pozitif olmak üzere) 100° olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 3a). Yapılan bu nümerik çalışmada potansiyel akış kabulüne karşın, ayrılma noktalarının nedeni olarak viskoz alt tabakaların gelişimi gösterilebilir. Ayrıca aşağı ve yukarı akıntı bölgelerinde vortekslerin oluşmaya başladığı görülmektedir. Oluşan bu değişimler Şekil 3b' deki 2-boyutlu hız vektörlerinden de tespit edilebilmektedir. Burada 2-boyutlu hız vektörlerinin şeklin simetrik olan her iki yarısında 100° 'den sonra yön değiştirdikleri görülebilir. Bu hız vektörlerinin bu alanda vorteks oluşumuna neden oldukları söylenebilir.

$Re=1000$ değeri için elde edilen grafiklerde bu etkileşim sonucu ayrılma noktasının altında kalan alanda ters akış oranının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmektedir (Şekil 3b). Bu bölgede vorteksin arttığı, 2-boyutlu hız vektörlerinin bu bölge içerisinde gelişigüzel yön değiştirdikleri ve karmaşık bölge olarak adlandırılabilir bu bölgede akım hareketlerinde de akış doğrultusu yönünde azalma olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 3b).

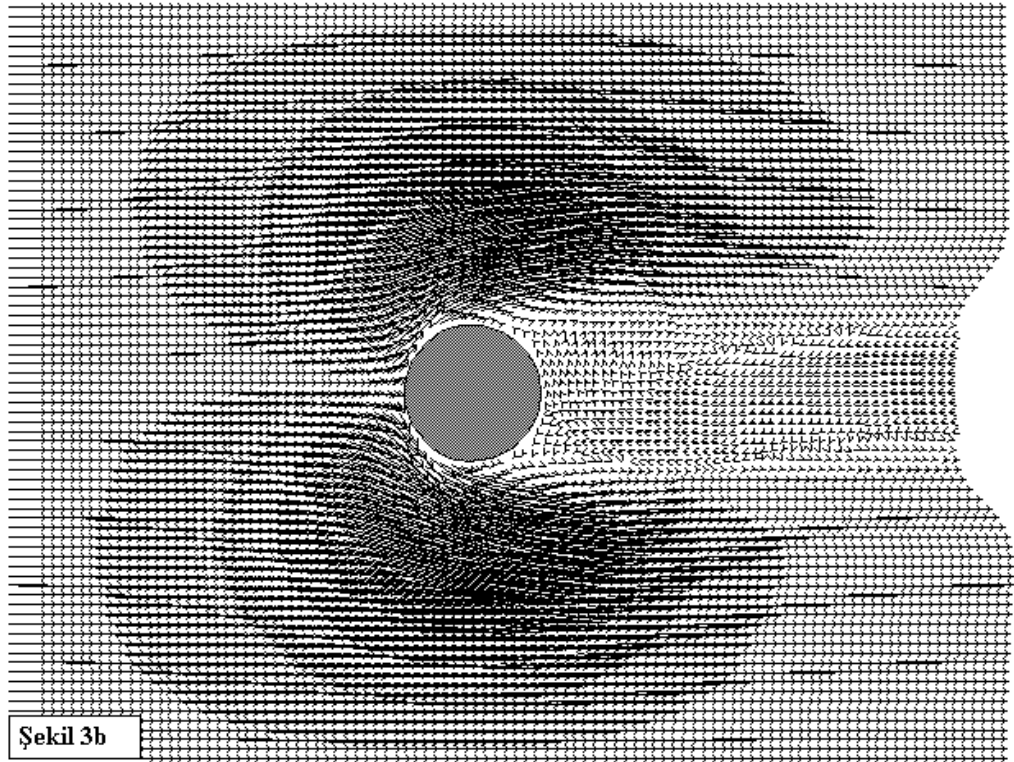
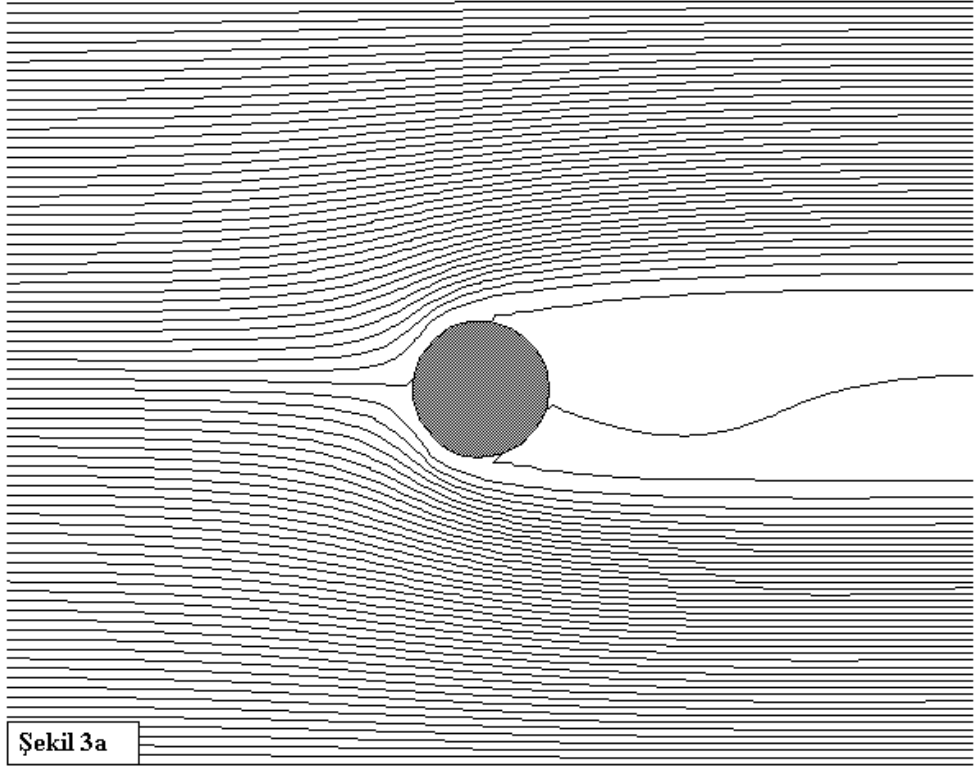
3.2. Tüp demeti :

Şekil 1b'de grid yapısı verilen tüp demeti için Reynolds sayısının 1000 değerinde program çalıştırılarak, belirtilen şartlarda akım fiziğindeki değişimler incelenmiştir. Bu dağılım her ne kadar eşanjör tüplerini temsil ediyor gibi görünse de, daha sonraki kısımda incelenecek olan kaskat kanat durumlarındaki dizilişine temel teşkil etmektedir.

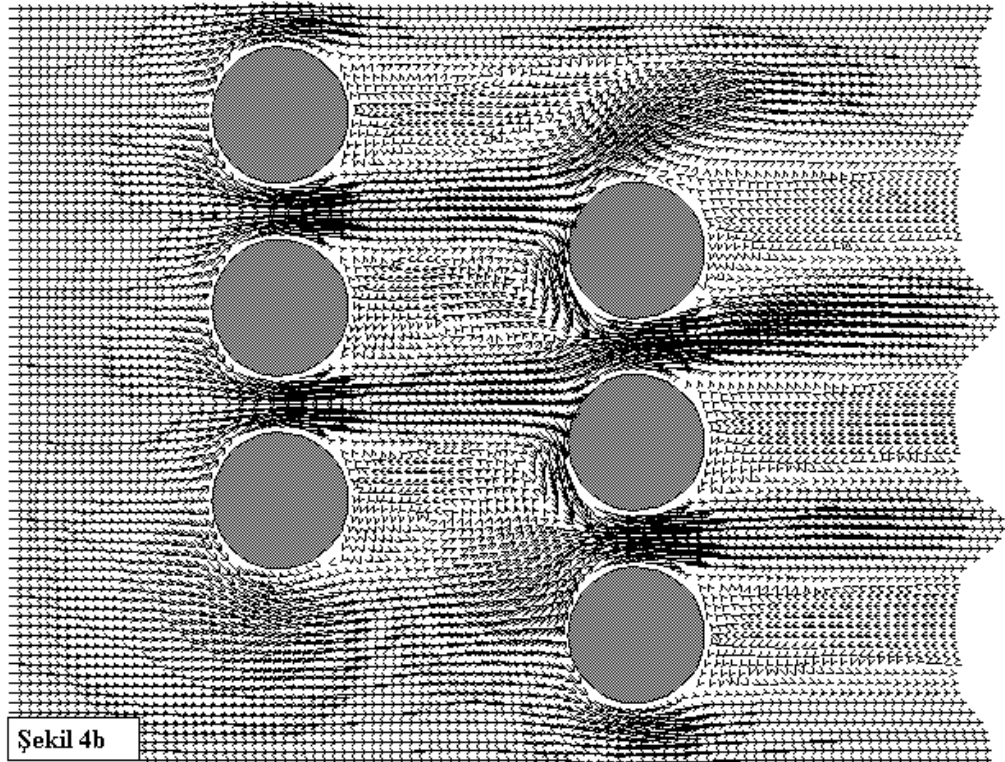
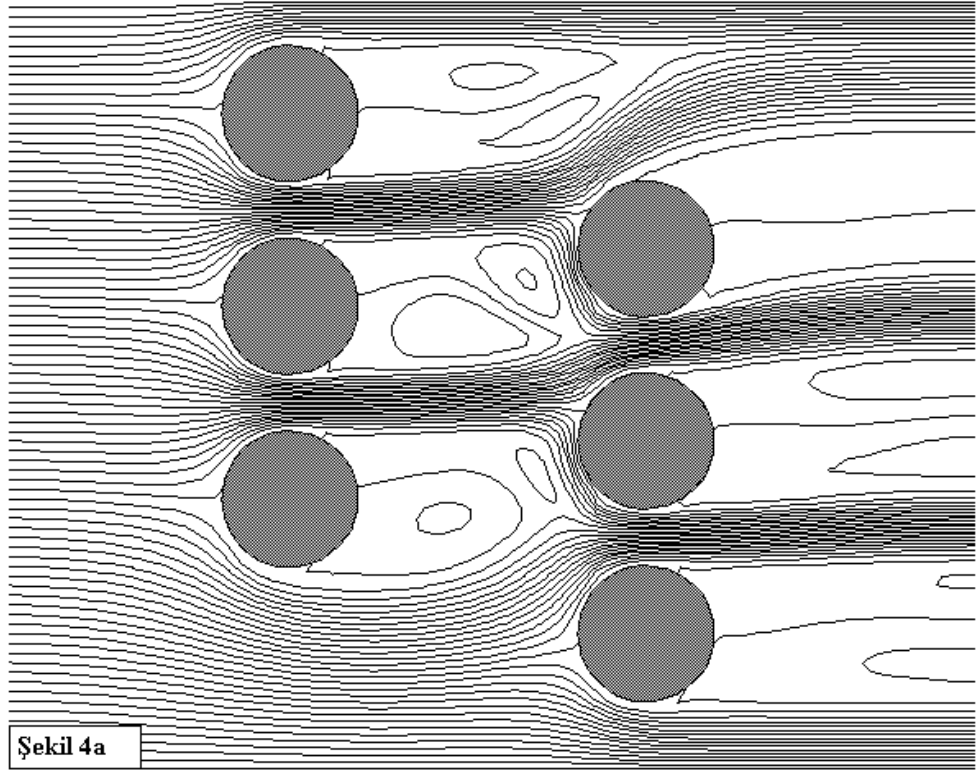
Oluşan akım çizgilerinin iki tüp arasındaki bölgelerde kesit daralmasından dolayı sıklaştığı görülmüştür (Şekil 4a). Giriş tarafındaki tüplerde ayrılma noktasının yaklaşık olarak 130° olduğu görülmüştür. Tüplerin arkasında kalan ölü bölgelerin oluşumu ve bu bölgelerde vortekslerin meydana geldiği görülebilir. Şekil 4b'de verilen 2-boyutlu hız vektörleri incelendiği zaman, tüplerin arkasındaki bölgenin akış yoğunluğunun düşük olması sebebiyle hız vektörlerinde yön değişimleri gözlenmiştir. Bu değişimlerin vortekse neden oldukları söylenebilir.

Akım çizgilerinin tüp üzerindeki ayrılma bölgelerinin altında kalan alanlar üzerinde yapılan inceleme sonucu iki bölgeli vorteks hareketinin görüldüğü, bunların düşük enerji yoğunluklu bölgede oluşan ikincil akım alanı olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Belirtilen bölgelerde, 2-boyutlu hız vektörleri üzerinde yapılacak incelemelerin tezimizi desteklediği sonucu çıkarılabilir.

İlk dizinde oluşan akımın ayrılma noktası ile ikinci dizinde oluşan akımın ayrılma noktasının yerleri karşılaştırıldığında, ikinci tüp dizinindeki akışkanın ayrılma noktasının ilk dizine göre daha düşük değerde başladığı Şekil 4a'dan görülebilir



Şekil 3. Tek tüp etrafında (a) Akım fonksiyonu (b) 2-boyutlu hız dağılımı ($Re=1000$)



Şekil 4. Tüp demeti etrafında (a) Akım fonksiyonu (b) 2-boyutlu hız dağılımı (Re=1000)

3.3. Tek Aerofoil Kanat :

$Re=1000$ değerinde tek aerofoil kanat durumuna ilişkin Akım Fonksiyonu ve 2- boyutlu hız grafiği Şekil 5'de görülmektedir. Şekil 5b'de kanat profilinin arka kısmında akışın tam olarak ulaşmadığı bir iz bölgesi ve kesit alanının daralmasından dolayı kanat profilinin alt kısmında hız vektörlerinin daha yoğun olduğu gözlemlenmektedir. Kanat çıkışı uç kısmında kanat izinin bir etkisi olarak 2-boyutlu hız vektörlerinde bir yön değişimi dolayısıyla bir vorteks hareketi görülmektedir.

Katı bir yüzey üzerinde akan akışkanın bu yüzey üzerinde kaymadan hareket ettiği, deneylerle kesin olarak saptanmıştır. Yüzey ile temasta olan akışkan yüzeyle birlikte hareket eder ve izafi hız yüzey üzerinde sıfırdır. Akışkanın yüzeyden itibaren Sınır Tabaka adı verilen bir tabaka içerisinden geçerek serbest akım hızına erişinceye kadar arttığı deneylerle tespit edilmiştir. Beklenen bir sonuç olarak Sınır Tabaka'ya yakın bölgede hızın vektörel büyüklüğünde gözle fark edilecek derecede bir azalma olduğu gözlemlenebilir. Bunun nedeni olarak oluşan yoğunluğun düşük olması gösterilebilir.

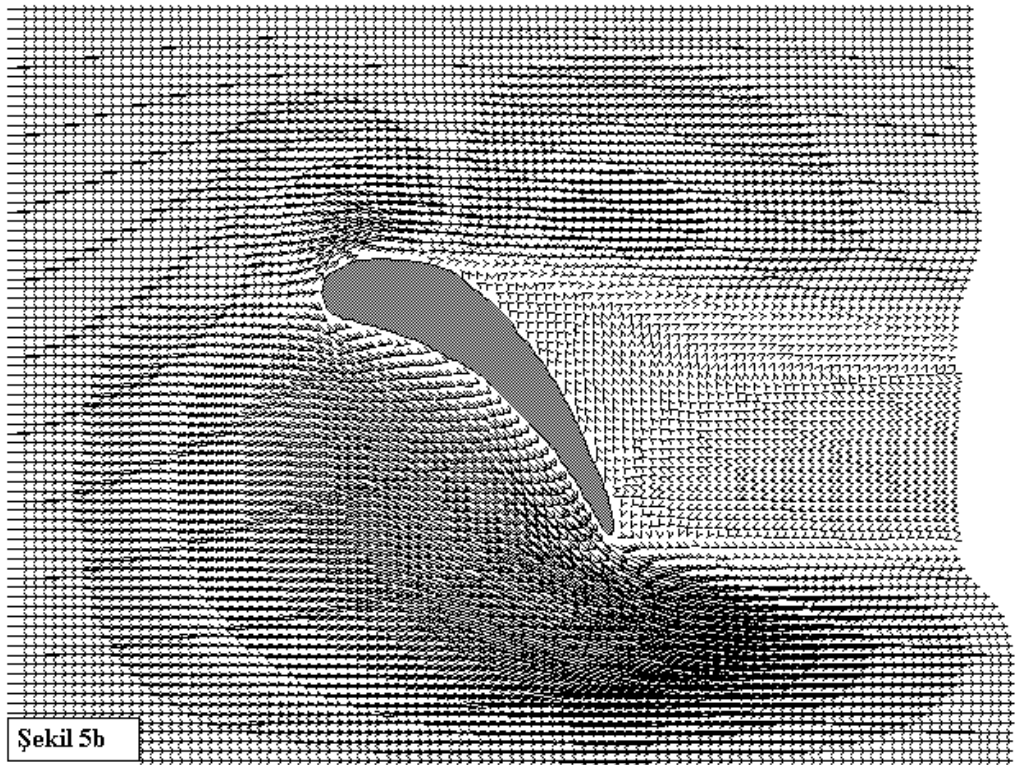
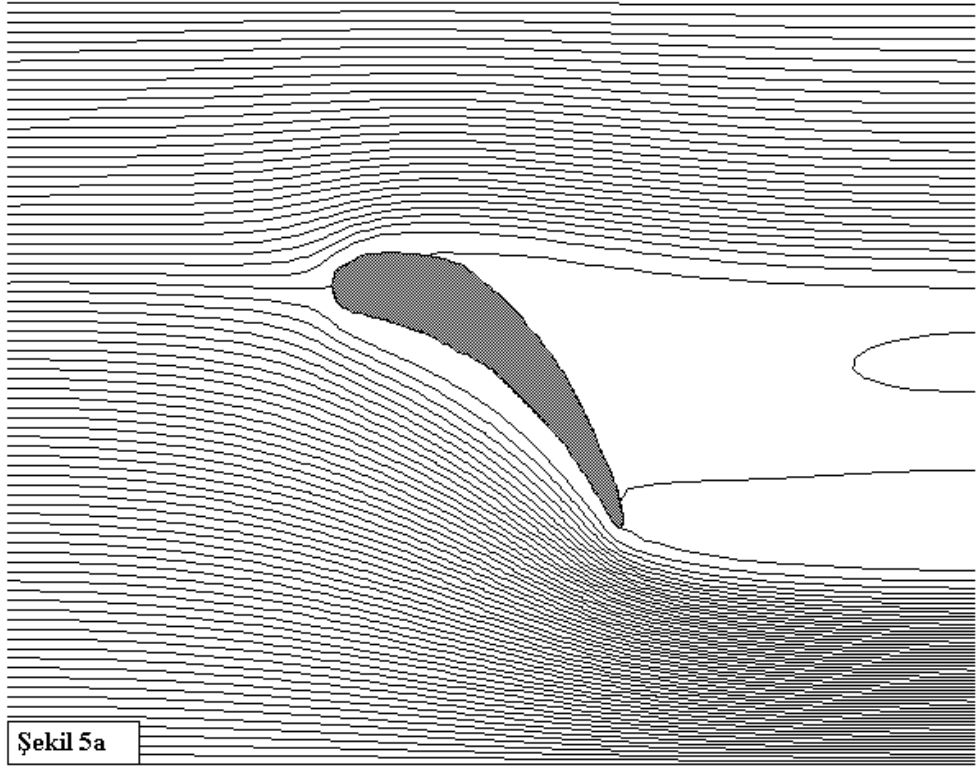
Beklendiği gibi akışkanın temas noktasının altında kalan alanda sınır tabaka etkileri nedeniyle vorteks hareketleri gözlenmektedir. Bu olayın diğer bir nedeni olarak, düşük enerji yoğunluğuna sahip olan bölgede akış hareketlerinde oluşan düzensizlik ve bu düzensizliğin sonucu olarak oluşan basınç gradyentindeki değişimler gösterilebilir.

3.4. Kaskat kanat :

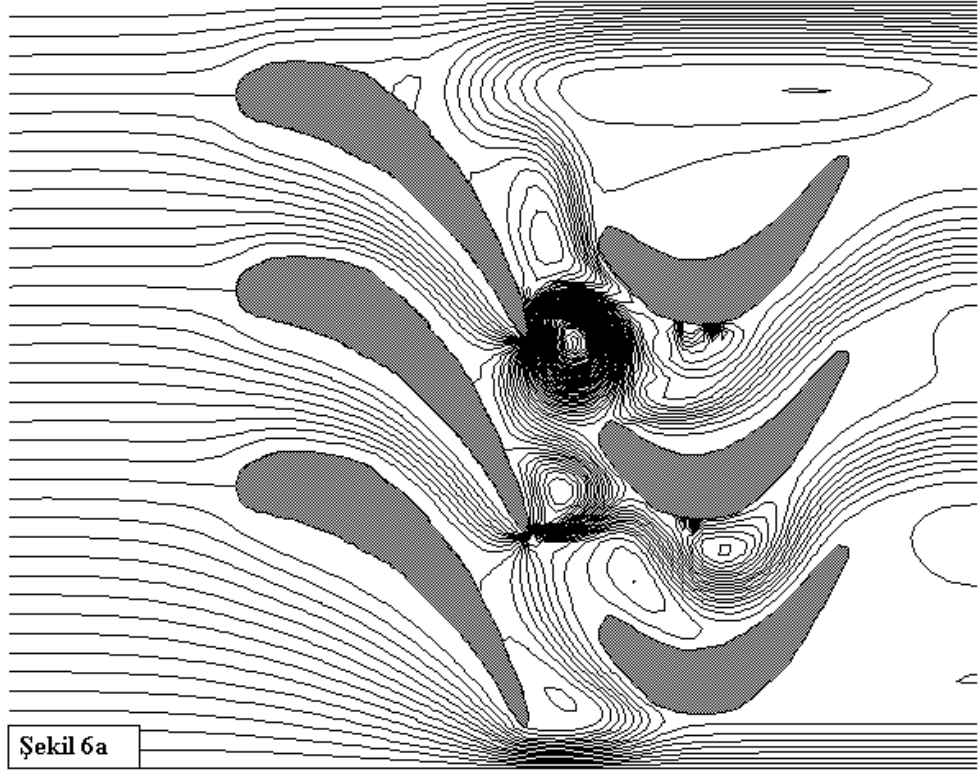
Kaskat kanat durumuna ilişkin oluşturulan kanat profilleri ve kanat yerleşimlerine ilişkin kaskat dizayn geometrileri, elde edilen sonuçları karşılaştırmak üzere Yamamoto'nun (1995) deneysel olarak yaptığı çalışmadan alınmıştır. Kaskat kanat durumuna ilişkin oluşturulan grid Şekil 2b'de görülmektedir.

Yukarıdaki geometrilere benzer şekilde kaskat kanat üzerinde akış dağılımını incelemek üzere Reynolds sayısının 1000 değeri için kanat giriş, çıkış ve ara bölgelerde gözlemlenen akım fonksiyonunun dağılımı ve 2-boyutlu hız vektörlerinin gelişimi sırasıyla Şekil 6a ve Şekil 6b'de çıkarılmıştır. Reynolds sayısının düşük seçilmesinin nedeni (Laminer bölge olarak kabul edilebilir) olarak rotor için oluşabilecek dönel hareket etkisinin minimize edilmesi gösterilebilir. Rotor-statorun ara yüzey bölgelerinde bölgesel vortekslerinin olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 6a) 2-boyutlu hız vektörlerini gösteren Şekil 6b incelendiğinde rotorun üst ve orta kanat uçlarında kanat izlerinin etkileşimi görülebilir. Bu bölgede hız vektörlerinde görülen yönsel farklılıkların vorteks oluşumuna neden oldukları söylenebilir. Ayrıca türbin rotorunun basınç bölgesinde oluşan ölü bölge nedeniyle ortaya çıkan kütleli debi dengesizliği akışın düzensiz bir hal almasına yol açmaktadır.

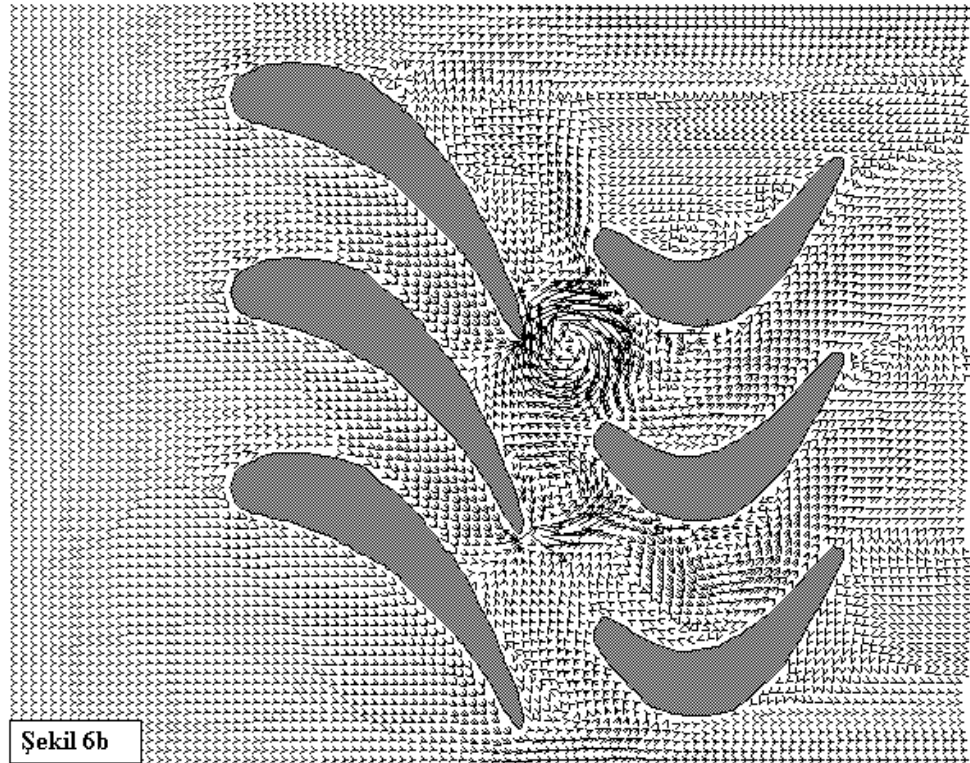
Yamamoto (1995)'nin türbin statoru ve rotoru üzerinde yaptığı deneysel çalışmada aerofoil kanatlar üzerindeki akış düzenleri incelenerek kaskat kanatlar üzerindeki toplam basınç kayıplarının etkileri ve kanat ucu etkileşimleri incelenmiştir. Elde ettiği sonuçlara göre, kaskat kanatların etkisi olarak yukarı akıntı bölgesindeki düşük enerjili akışın, aşağı akıntı kaskatında aşırı derecede etkili olduğu ve kanat ucundaki hareketlerin bunun nedeni olduğu sonucuna varmıştır. Bu çalışma ile karşılaştırdığımızda ise elde edilen sonuçların büyük bir uyum gösterdiği görülebilir.



Şekil 5. Tek aerofoil kanat etrafında (a) Akım fonksiyonu (b) 2-boyutlu hız dağılımı (Re=1000)



Şekil 6a



Şekil 6b

Şekil 6. Kaskat kanat durumunda (a) Akım fonksiyonu (b) 2-boyutlu hız dağılımı (Re=1000)

4. SONUÇ ve TARTIŞMA

-İncelenen geometriler üzerindeki vorteks hareketlerinin ve ölü bölgelerin oluşum esasları Akım Fonksiyonu ve 2-boyutlu hız grafikleri üzerinde sergilenmiştir.

-Laminer ve sabit viskoziteli akış kabulüne rağmen uygulanan nümerik metotta geometriler üzerindeki ayrılma noktalarının oluşumuna neden olarak viskoz alt tabakadaki gelişim gösterilebilir.

-Yamamoto (1995)'nin yaptığı deneysel çalışmadaki geometrik boyutlar esas alınarak yapılan bu nümerik çalışmadan elde edilen sonuçlar göz önüne alınırsa kaskat kanat için elde edilen Akım Fonksiyonu ve 2-boyutlu hız grafiklerinin eldesini içeren nümerik çalışma büyük benzerlik göstermektedir.

- Yapılan çalışmada, kaskat kanatla üzerinde oluşan üniform olmayan akış etkilerinin nedeni olarak, rotor-stator kanatları arasında oluşan sıkışma etkisinin olduğu söylenebilir.

- Akış kararlılığına etki eden faktör olarak ise kanatlar arası gözlemlenen bölgesel iz ve kanat izi vortekslerinin etkin olduğu tahmin edilmektedir.

-CFD tekniğinde, Navier-Stokes denklemlerini çözmek için uygulanan mevcut modellere ilave olarak, kaskat kanatlar için elde edilen sonuçların bu tür denklemlerin çözümünde faydalı olacağı düşünülmektedir. Elde edilen akım fonksiyonu 2-boyutlu hız vektörlerinin incelenmesi sonucu yeni modellerin geliştirilebileceği açıktır.

5. KAYNAKLAR

- AMSDEN, A.A., AND HİRT, C.V. (1973) : " A Simple Scheme for Generating General Curvilinear Grids ", Journal Comp. Phys., Vol. 11, p 348
- BRYAN, K. (1963) : Journal Atoms Sciences, Vol.20, pp 594-606
- EL WAHED, A.K. (1993) : Johnson, M.W., Sproston, J.L., "Numerical Study of Vortex-shedding from Different Shaped Bluff Bodies " , Flow Meas. Intrum., Vol. 4, pp 233-240
- GREENSPAN, D. (1969) : " Numerical Study of Prototype Cavity Flow Problems ", Comput. Journal, Vol.12, pp 89-96
- JOHNSON, M.W. (1990) : " Computation of Flow in a Vortex-shedding Flowmeter " , Flow Meas. Intrum., Vol. 1, pp 201-208
- JORDAN, S.A., RAGAB, S.A. (1994) : " A Large-Eddy Simulation of the Near Wake of a Circular Cylinder " , Turbulence in Complex Flows, FED Vol. 203, pp 1-9
- MOOK, T., DONG, B. (1994) : " Perspektive : Numerical Simulations of Wakes and Blade - Vortex Interaction " ASME Journal of Fluid Eng, Vol. 116, pp 5-21
- ÖZTÜRK, A. (1998) : " Aerofoil Kanatlarda 2-Boyutlu Viskoz Akış İncelenmesi " , Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- THOMPSON et al. (1974) : " Automatic Numerical Generation of Body Fitted Curvilinear Coordinate System for Field, Containing Any Number of Arbitrary 2-D Bodies " Journal of Comp. Phys., Vol.15
- YAMAMOTO, A., MURAO, R., SUZUKİ, Y., AOİ, Y. (1995) : " A Quasi-Unsteady Study on Wake Interaction of Turbine Stator and Rotor Cascades " ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 117, pp 553-561