



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

YÜKSEK BLOKAJLI KANAL İÇİNDE LAMİNER SÜREKLİ AKIŞ İÇİN ARD ARDA İKİ SİLİNDİR ETRAFINDA AKIŞ VE ISI KARAKTERİSTİKLERİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

**NESLİHAN GÜNEŞ
A. ALPER ÖZALP
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ**

YÜKSEK BLOKAJLI KANAL İÇİNDE LAMİNER SÜREKLİ AKIŞ İÇİN ARD ARDA İKİ SİLİNDİR ETRAFINDA AKIŞ VE ISI KARAKTERİSTİKLERİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Neslihan GÜNEŞ
A. Alper ÖZALP

ÖZET

Bu çalışmada ard arda silindirler etrafında yüksek blokaj etkisinde laminer akış için ısı ve akış karakteristikleri nümerik olarak incelenmiştir. Ard arda dizili silindirler etrafından akışın incelenmesi konusu; uçaklar, arabalar, yüksek katlı binalar, gemiler, denizaltılar, türbinler, köprü ayakları, ısı değiştiriciler ve fabrika bacaları gibi uygulama alanlarından dolayı kayda değer bir öneme sahiptir. İki boyutlu Navier-Stokes ve Enerji Denklemleri ANSYS-CFX v.13.0 kullanılarak sıkıştırılmaz akış için çözümlenmiştir. Blokaj oranı ($\beta=B/H$) 0.6 ve Reynolds sayısı 40 olarak belirlenmiştir. Silindirler arası mesafe sabit silindir çapı ile orantılı olarak 0.2-0.7-1.0-1.5-3.0-4.0 D olarak seçilmiştir. Ön ve arka silindirler için tüm silindirler arası mesafe oranlarında statik basınç, kayma gerilmesi ve ısı transfer katsayıları değerleri hesaplanıp tartışılmıştır. Silindirler arası mesafenin hidrodinamik ve termal parametrelere etkileri incelenmiştir. Ayrıca çift silindir için elde edilen sonuçlar; aynı senaryolar tek silindir için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Hesaplama sonuçlarına göre akım çizgileri ve vorteksler direk olarak hidrodinamik ve termal parametreleri etkilediği anlaşılmıştır. Belirli bir silindirler arası mesafeden $g=3.0-4.0$ D sonra öndeki silindir arkadaki silindiri etkilememiş ve her bir silindir tek silindir gibi davranmıştır.

Anahtar Kelimeler: Blokaj oranı, silindirler arası mesafe, kayma gerilmesi, ayrılma noktası, ard arda silindirler.

ABSTRACT

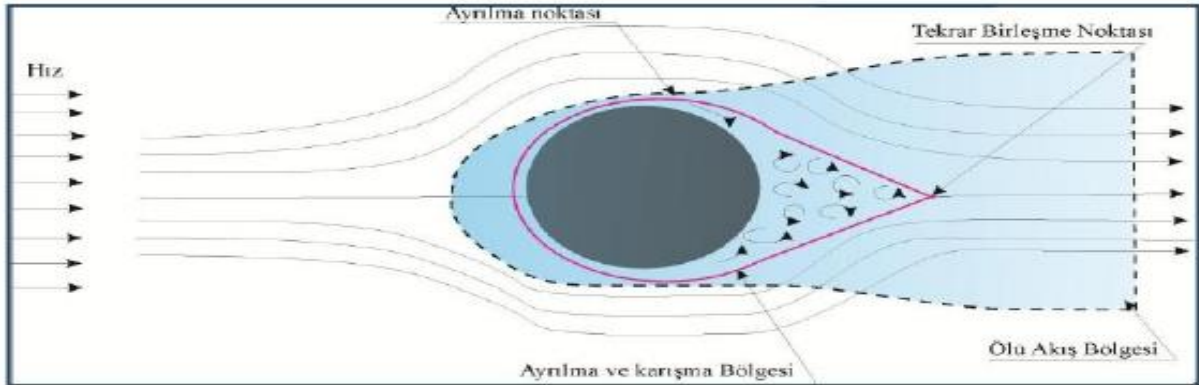
In this study, heat and flow characteristics of laminar steady flow across two tandem circular cylinders (CC) were numerically investigated. This subject of flow across two tandem cylinders is significant interest in many application fields such as planes, cars, high-rise buildings, ships, submarines, turbines, piers of bridge, heat exchangers, factory chimneys. Two dimensional Navier Stokes and energy equations were solved with ANSYS-CFX v13.0 for incompressible flow under steady state conditions. The blockage ratio ($\beta=B/H$) were held 0.6 and the Reynolds number (Re) was 40. The distance between circular cylinders were chosen 0.2-0.7-1.0-1.5-3.0-4.0 D and static pressure, shear stress and heat transfer coefficients on the upstream (front) and downstream (back) cylinders were calculated and discussed. Effects of gap ratios on hydrodynamic and thermal parameters are investigated. Otherwise the results that were obtained for two tandem cylinders were compared with the results that were obtained for single cylinder for the same scenarios. According to the calculations it is understood that wakes and vortices between cylinders directly affect hydrodynamic and thermal parameters. After a certain gap ratio $g=3.0-4.0$ D upstream cylinder was not effect downstream cylinder and each of two cylinders acted as a single cylinder.

Key Words: Blockage ratio, gap ratio, wall shear, separation point, tandem cylinders.

1. GİRİŞ

Kanal içi akışta blokaj etkisinde dairesel cisimler üzerindeki akışlar ve bu alanda yapılan sayısal çalışmalar son yıllarda önemli bir araştırma konusu olmuştur. Silindirik elemanlar etrafındaki akışın yapısı; akışın hızına, derinliğine, akışkanın viskozitesine, silindirik yapının şekil ve boyutlarına, silindirin akış içerisindeki konumuna ve silindirin katı sınırına olan uzaklığına bağlı olarak değişmektedir.

Akışın laminar veya türbülanslı bir yapıya sahip olması, dairesel yapılarda etkin bir rol oynamaktadır. Bir dairesel yapı üzerinde oluşan akış yapısının bilinmesi, dairesel yapı üzerindeki enerji değişimlerinin anlaşılmasında etkin rol oynamaktadır. Bir akışkan yüksek bir hızla eğrisel bir yüzey üzerine akarsa; katı ile akışkanın birleşme noktalarında akışkan kendini yüzeye sarmaya başlar. Silindir üst yüzeyinde oluşan düşük basınç ile akış içe doğru ters şekilde dönmeye başlar. Silindir üst yüzeyinde oluşan düşük basınç ile akış içe doğru ters şekilde dönmeye başlar. Silindirden akışın koptuğu noktaya ayrılma noktası denilmektedir. Ayrılma bölgesi ne kadar büyük olursa basınç kaybı o kadar artar. Akışın ayrılma bölgesinden sonra akışına düzensiz devam etmesi ve silindir geometrisine bağlı olarak hızını kaybetmesi ölü akış bölgesini oluşturmaktadır. Ayrılma bölgesi akışın iki koldan birbiri ile yeniden birleşmesiyle; tekrar birleşme noktasında biter fakat ölü akış bölgesi; akış hızını tekrar kazanana kadar gelişerek devam eder (Şekil 1) [1].



Şekil 1. Silindir etrafında akışta oluşan ayrılma, tekrar birleşme noktaları; ayrılma ve karışma bölgesinin şematik gösterimi [1].

Akış olayları genellikle katı yüzeyler ile sınırlandırılır ve bu nedenle katı yüzeyin akışı nasıl etkileyeceğini kavramak önemlidir. Visköz etkilerinin dolayısı ile hız profilinin önemli olduğu yüzeye yakın akış bölgelerine sınır tabaka adı verilir. Sınır tabaka üzerinde oluşan akış yapısı düzlem plaka ve dairesel yapılarda bazı fiziksel özelliklerinden dolayı farklılık göstermektedir. Akış yapısında önemli değişkenlerden biri akışın laminar veya türbülanslı oluşudur. Laminar akıştan türbülanslı akışa geçişte; yüzey geometrisi, yüzey pürüzlülüğü, akıntıya karşı olan hız, yüzey sıcaklığı, akışkan tipi ve bunlarla beraber en çok Reynolds sayısının karakteristiği önemli rol oynamaktadır [1].

Birçok önemli mühendislik uygulamasında karşımıza çıkan ard arda dizili çift silindir etrafındaki akışın karmaşık fiziksel yapısını incelemek ve silindirler etrafındaki akış fenomenlerini anlayabilmek için günümüze kadar pek çok deneysel ve nümerik çalışma yapılmıştır.

Genellikle deneysel olarak yürütülmüş olan bu çalışmalar da; nümerik olarak analiz programı kullanarak ard arda iki silindir etrafında akışın dinamik olarak yapısının incelenmesi daha nadirdir.

Önceki pek çok çalışma araştırıldığında kısıtlı olarak bir ya da iki tane silindirler arasındaki mesafe değiştirilerek incelenmiş aynı şekilde Reynolds sayıları bir iki defa değiştirilerek sabit blokaj oranında araştırmalar yapılmıştır. Sabit silindirler arası mesafede blokaj oranı değiştirilerek silindirler arası akışın etkisi incelenmiştir. Yapılan pek çok çalışma incelendiğinde; Zdravkovich [2], silindirlerin değişik konumlandırılmaları için iki silindir etrafındaki akış etkileşimini ayrıntılı ve geniş kapsamda incelemiştir. Buna mütakiben Zdravkovich, silindirler merkezlerinden arası mesafe (L) ve eş çaplı silindirlerin silindir çapı (D) bu ikisinin oranına göre L/D akışı sınıflandırmıştır. Zdravkovich' in yaptığı bu çalışmaya göre eğer bu oran silindirler arası mesafe oranı $1 < L/D < 1.3-1.8$ olduğunda silindirler tek küt bir cisim gibi davranıyor ve yalnızca öndeki silindirde akım çizgileri silindiri sıyrıp geçiyor ve akış boyunca arkadaki silindire tekrar bağlanmadan akım çizgileri tek silindir varmış gibi yoluna devam ediyor. Silindirler arası mesafe artmaya başladığında ise $1.2-1.8 < L/D < 3.4-3.8$ akım çizgileri öndeki silindir etrafından sıyrıp geçerek arkadaki silindirde akım çizgileri bağlanıyor ve akımın sadece arkadaki silindiri etkilediğini saptamıştır. L/D oranı daha da arttırdığında ise akımın silindirler arası mesafede vorteks oluşturmaya başladığı ve bu oluşan vorteksin arkadaki silindirin arkasında oluştuğunu gözlemlemiştir. Chen ve ark. [3], Reynolds sayısı $Re=100$ için silindir etrafında sonlu eleman ve sonlu fark metodu ile simetrik ve asimetric oluşan akım çizgilerini gözlemlemişlerdir. Slauouti ve ark. [4], iki boyutlu laminar akış için Reynolds sayısı $Re=200$ değerinde silindirlerin konumlarını yan yana ve üst üste değiştirerek akış karakteristiklerini vorteks metodu ile hesaplamışlardır. Yaptıkları bu çalışma ileride daha yüksek Reynolds sayılarının akış yapılarının belirlenmesinde yol gösterici sonuçlar sağlamada yardımcı olmuştur. Li ve ark. [5], Reynolds sayısı 100 için ard arda silindir etrafındaki akışı Galerkin Hız-Basınç Sonlu Eleman yöntemiyle kaba mesh için çalışmıştır. Dört farklı silindirler arasındaki mesafe için akış simule edilip deneysel çalışmalarla kıyaslanmıştır. Deneysel çalışmalar ile nümerik çalışmaların uyumluluğu fark edilip ayrıca akışın türbülans ve üç boyutluluğunun akışın silindirler arasındaki mesafeye etki ettiğini gözlemlemişlerdir. Mittal ve ark. [6], bir çift silindir değişik Reynolds sayılarında ($Re=100$ ve $Re=1000$) akış dinamiğini hem sıralı ard arda akış dizilimi hem de silindirlerin çapraz dizilimi için akış fenomenlerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiştir. Ard arda akış için silindirler arası mesafe L/D sırasıyla 2.5 ve 5.5 seçilerek akış karakteristikleri irdelenmiştir. Meneghini ve ark. [7], Reynolds sayısı 100 ve 200 için iki silindiri farklı konumlarda ard arda ve üst üste gibi farklı konumlarda yerleştirerek silindirlerin etrafındaki akışı ve bu akımın oluşturduğu vortekslerin değişimini nümerik olarak detaylıca çalışmışlardır. Ard arda silindirler için sürüklenme katsayıları ve kaldırma katsayılarını hesaplamışlardır. Vorteks kontürlerini ard arda silindirlerin Reynolds değerleri için göstermişlerdir. Ayrıca iki silindir arasındaki mesafe silindirlerin çapından üç kat büyük olduğunda ortalama sürüklenme katsayısının negatiften pozitifte geçtiğini gözlemlemişlerdir. Chakraborty [8], kanal içi blokaj oranı $\beta=0.05-0.65$ arasında değişen değerler için dairesel silindir etrafındaki sürtünme ve toplam sürüklenme katsayılarını hesaplamıştır. Sharman ve ark. [9], Reynolds sayısı 100 için tek silindiri uygun meshi bulup doğrulamak için çalışmış ve ard arda iki silindir etrafındaki akış karakteristiklerini de kaldırma ve sürüklenme katsayılarını iki silindir arasındaki mesafeyi çok farklı aralıklarda değiştirerek metod olarak da hesaplamalı akışkanlar mekaniği metodunu kullanarak incelemişlerdir. Griffith ve ark. [10], kanal içinde blokaj oranı $\beta=0.05-0.9$ arasında değişen değerler için silindir etrafındaki akım davranışlarını vorteks oluşumlarını, resirkülasyon ve ayrılma uzunluklarını irdelenmiştir. Zhou ve ark. [11], ard arda silindirler etrafından akış orta büyüklükte Reynolds değerleri için nümerik olarak çözümlenmiştir. Silindirler arasındaki mesafe küçük tutulduğunda her iki silindir etrafında durgun akış oluşmaktadır. Ayrıca ikinci silindirde periyodik vorteks oluşumları gözlenmiştir. İkincil olarak az bir miktar silindirler arası mesafe arttırıldığında bütün akış rejimi her iki silindir etrafından akışta durgun olmayan akış oluşmaya başlamış ve vorteks kopmaları meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada Reynolds değerleri $Re=80-320$ ve silindirler arası mesafe silindir çapı ile orantılı olarak $g=2.0-8.0$ D arasında değiştirilerek nümerik sonuçlara ulaşılmıştır. Patil ve ark. [12], ard arda dizili bir çift silindir etrafındaki akışı sonlu hacim metodu kullanılarak durgun akış yapısı incelenmiştir. Silindirler arası mesafe $g=2-10$ D ve Reynolds sayısı $Re=1-40$ arasında değiştirilerek akım hız profilleri, silindir yüzeyindeki basınç katsayıları, toplam sürüklenme katsayıları gibi lokal ve global akış karakteristikleri hesaplanmıştır. Singha ve ark. [13], Reynolds sayısının $Re=40-150$ arasında değişen değerleri ve silindirler arası mesafe $g=0.2-4.0$ D arasında değişecek şekilde tasarlanarak silindirler etrafından akış nümerik olarak incelenmiştir. Akışın silindir etrafından ayrılma noktasına blokaj oranının önemli ölçüde etkilediği saptanmıştır. Kanal yüksekliğinin azalması ile birlikte ayrılma noktasının da geriye doğru gittiği bulunmuştur. Ayrıca kanal açıklığının değişmesinin resirkülasyon bölgesinin uzunluğunu da önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Harichandan ve ark. [14], teorik olarak hesaplama alanı içerisinde düz bir duvar üzerindeki tek ve ard arda yerleştirilmiş

silindirler üzerindeki akışı incelemişlerdir. Hesaplamalarını iki boyutlu daimi olmayan akışı sonlu hacimler metodu ile Re sayısı 100 ve 200 için yapmışlardır. Akış karakteristiği Re sayısının yanı sıra silindirlerin duvara olan uzaklığı ve iki silindir arasındaki uzaklığa bağlı olduğu görülmüştür. Çalışmaların üç boyutlu analiz için faydalı noktalar içerdiğini ileri sürmüşlerdir. Ayrıca bu çalışmanın ileriki zamanlarda daha ayrıntılı üç boyutlu bir çalışma ile karşılaştırmalar için faydalı olacağı düşünülmüştür. Gao [15], PIV (Partikül Hız Görüntüleme) yöntemiyle de farklı çaplardaki bir çift silindir etrafındaki akış yapısını incelemiştir. Bu çalışmada Reynold sayısının değeri $Re=1200$ ve silindirler arası mesafe $L/D=1.2$ ve çap oranı $d/D=2/3$ seçilmiştir. Bu değerler altında akış rejimi ve vorteks oluşumları gözlemlenmiştir. Jiang ve ark. [16], paralel iki duvar arasında farklı oranlardaki çaplarda (D/d , D =Büyük silindir çapı, d =Küçük silindir çapı) ard arda konumlandırılmış BSA (Big-Small arrangement) silindirler etrafından akışı Lattice-Boltzman metodunu kullanarak nümerik olarak incelemişlerdir. Silindir çapları arasındaki oran sırasıyla 0.5-0.625-0.75 ve 0.875 seçilmiştir. Reynolds sayısının etkisi, çap oranı, silindirler arası mesafe, alan sınırlarının blokaj oranının akış üzerine etkisi detaylıca incelenmiştir. Ayrıca nümerik sonuçlar SBA (Small-Big Arrangement) şeklinde silindir çap oranları sırası değiştirilerek büyük küçük çaplarda denenmiştir. Bu model için de sürüklenme katsayısı ve kaldırma katsayısı değerleri hesaplanmıştır.

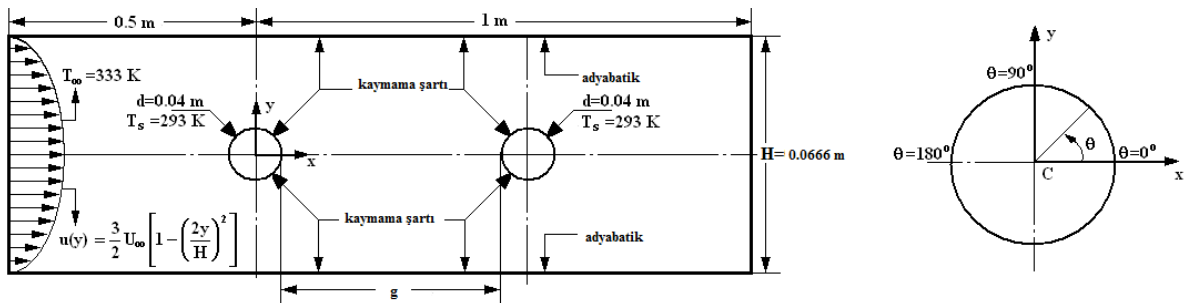
Bu çalışmada ise iki boyutlu sürekli sıkıştırılmaz akış $\beta=0.6$ ve $Re=40$ sabit değeri için farklı silindirler arası mesafelerde $g=0.2-0.7-1.0-1.5-3.0-4.0 D$ akış ve ısı karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Çıkan sonuçlar ayrıca tek silindir $\beta=0.6$ sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. SAYISAL METOD

Şekil 2.1 'de bu çalışmada incelenen akışın geometrisi ve ölçümleri detaylı bir şekilde verilmiştir. Şekil 2.1 'de, dairesel silindir adyabatik duvarlar arasında konumlandırılmış ve ortadaki dairesel silindir alt ve üst adyabatik kanal duvarlarına eşit uzaklıkta ($H/2$) mesafesindedir. Adyabatik kanal duvarlarına ve dairesel silindirlerin duvarlarına kaymama sınır şartı ($u=v=0$) uygulanmıştır. Dairesel silindirlerin yüzeyleri sabit sıcaklıkta kabul edilmiş (T_s) ve havanın kanala giriş sıcaklığı (T_∞) olarak verilmiştir. Hava kanala tam gelişmiş laminar akış hızı profilinde;

$$u(y) = \frac{3}{2} U_c \left[1 - \left(\frac{2y}{H} \right)^2 \right] \quad (1)$$

şeklinde sağlanmıştır. Burada U_c kanal girişindeki havanın aksenal hızıdır.



Şekil 2. Dairesel silindirler etrafındaki akış alanı ve koordinat sistemi

Ayrıca Şekil 2.'de silindirin arkası ve önündeki kesitler tanımlanmıştır. Kanal içi akışta silindir çapları sabit $D=0.04$ m ve blokaj oranı $\beta=D/H=0.6$ ve silindirler arası mesafe silindir çapları ile orantılı olarak 0.2-0.7-1.0-1.5-3.0-4.0 D arasında değiştirilerek nümerik hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 2.'de iki boyutlu dairesel silindir etrafındaki açıl koordinat sistemi sırasıyla $\theta=0^\circ-90^\circ-180^\circ$ olarak tanımlanmıştır.

Dairesel silindirler etrafından akış için temel akışkanlar mekaniği teorisine bakıldığında, kritik Reynolds sayısının değerini $Re_d \leq 2 \times 10^5$ den küçük olduğu durumda akış laminardır [17]. Şahin ve ark.[18], akış rejimini Reynolds sayısının değeri $Re=100$ için, blokaj oranlarını $\beta=0.33-0.800$ arasındaki oranlarda değiştirerek akışkan karakteristiklerini incelemişlerdir.

Reynolds sayısı $Re=40$ blokaj oranları $\beta=0.6$ ($\beta=D/H$) (D =Dairesel silindir çapı, H =Kanal yüksekliği) için silindir çapı sabit ve $D=40$ mm olacak şekilde girişteki hava hızı $U_\infty=15.68 \times 10^{-3}$ m/s, girişteki havanın sıcaklığı $T_\infty=333$ K ve silindirin yüzeyindeki sıcaklık $T_s=293$ K de sabit tutulmuştur. Burada, silindirler arası mesafenin akış yapısına etkisi ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

Kanal yüksekliği blokaj oranı $\beta=0.6$ için $H=66.6$ mm alınarak ve silindirler arası mesafe silindir üzerine akışın etkisi incelenmiştir. Silindir konum olarak kanalın girişinden 0.5 m, çıkışından ise 1 m uzaklığa konulmuş ve kanal yüksekliğinin ise tam ortasında ($H/2$) mesafede konumlandırılmıştır. Kartezyen koordinatlardaki xy eksen takımı ise silindirin merkezi olarak belirlenmiştir. Koordinatlar belirlenirken amaç akışın neredeki yapısı incelenecekse oraya yakın bir yer seçmektir. Bu çalışmada silindir etrafındaki akış yapısı inceleneceği için silindir merkezi koordinat eksenini olarak tanımlanmıştır.

Sayısal hesaplamalarda akışkan durgun ve sıkıştırılmaz iki boyutlu akış alanı olarak kabul edilmiştir. Ayrıca termal akış özellikleri içinde akış zamanla değişmeyen durgun akış ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) olarak tanımlanmıştır. Bu kabuller altında Navier-Stokes (Korunum Denklemleri) çözümlenmiştir. Korunum denklemleri iki boyutlu sürekli laminar akış için Kartezyen koordinatlarda şu şekilde yazılabilir:

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

Momentum denklemi

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Enerji denklemi

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

Akış ve ısı transfer simülasyonları ANSYS-CFX v13.0 programı kullanılarak çözümlendirilmiştir. Ayrıca yukarıdaki korunum denklemleri çözümlendirilerek istenilen basınç, kayma gerilmesi ve ısı transferi katsayı değerleri programdan alınmıştır. Temel olarak incelenen akış ve ısı transferi parametreleri ise sırasıyla ;

$$Re = \frac{\rho U_\infty d}{\mu} \quad (6) \quad \tau = \frac{C_f}{2\rho U_\infty^2} \quad (7) \quad Nu_\theta = \frac{h_\theta d}{k} \quad (8)$$

Burada; Re Reynolds sayısını, τ kayma gerilmesini, Nu_θ lokal Nusselt sayısını, h_θ ısı transfer katsayısını ifade eder.

3. HESAPLAMALI ANALİZ SONUÇLARI

Bu çalışmayı oluşturabilmek için bazı fiziksel, hidrodinamik ve termal veriler önceki çalışmalardan araştırılıp faydalanılmıştır. Bu çalışmanın sınır şartları ve koşulları bu şekilde belirlenmiştir. Özellikle silindir çapı silindirler arası mesafe ve blokaj oranını belirlerken önceki literatür çalışmaları temel alınmıştır.

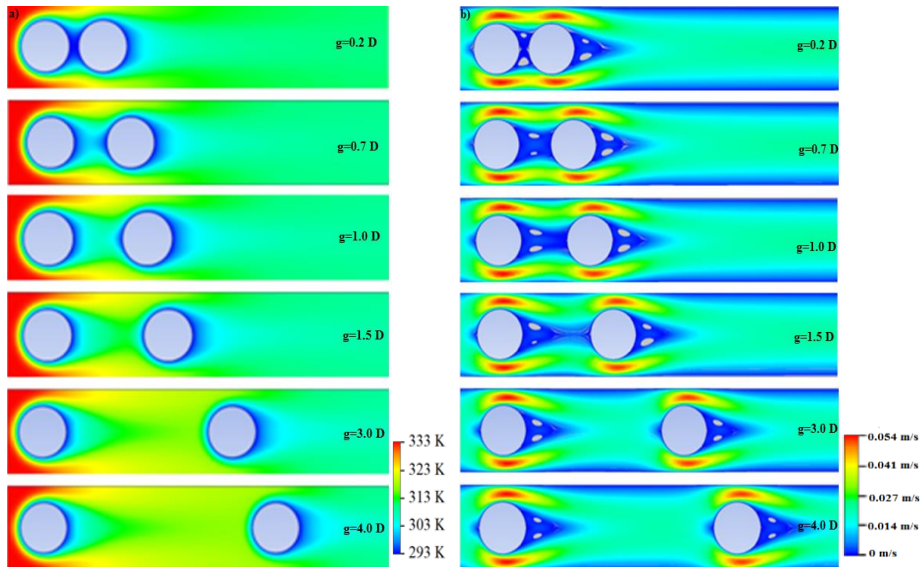
Çalışmayı ısı ve akış karakteristikleri bakımından dört ana başlıkta inceleyebiliriz: Ön ve arka silindirlerdeki, statik basınç dağılımları, kayma gerilmesi dağılımları, ısı transfer katsayıları dağılımları ve sürüklenme katsayıları dağılımları.

Ayrıca ANSYS-CFX programından tüm silindirler arası mesafe değişiminde $g=0.2-4.0 D$ için sıcaklık ve hız dağılımları alınmıştır.

3.1. $\beta=0.6$ Sıcaklık ve Hız Dağılımları

Sıcaklık kontürleri ve hız vektörleri incelenecek olursa; mavi renkler en düşük sıcaklık ve hız değerlerini, sarı ve yeşil renk ile gösterilenler orta, kırmızı renk ile gösterilen değerler ise en yüksek sıcaklık ve hız değerlerini göstermektedir.

Şekil 3.a ve Şekil 3.b birlikte incelendiğinde; ön ve arka silindir arkalarında minimum sıcaklık ve hız değerleri olduğu gözlemlenebilir. Silindirler arası mesafe arttıkça öndeki silindirde oluşan hız ve sıcaklık düşümlerinin arkadaki silindire çarpmadığı ve her bir silindirin tek bir silindirmiş gibi davrandığı anlaşılmıştır. Hız dağılımlarının direk sıcaklık dağılımlarını etkilediği sonucuna varılabilir yani sıcaklık dağılımındaki benzer sonuçlar hız dağılımında da açıkça görülebilir. Silindirler arası mesafe düştükçe ise ön silindirin arkasında oluşan sıcaklık düşümlerinin arkadaki silindire çarptığı ve arka silindirin sıcaklık dağılımını etkilediği gözlemlenebilir. Aynı şekilde hız dağılımlarına bakıldığında düşük silindirler arası mesafede $g=0.2-1.5 D$ aralığında öndeki silindirin arkasında oluşan vortekslerin arka silindirin ön yüzüne çarptığı ve buradaki hız dağılımlarını etkilediği gözlemlenmektedir. Bu değerlerden sonra ise $g=3.0 D$ ve $4.0 D$ değerinde öndeki silindirden kaynaklı sıcaklık ve hız dağılımının arkadaki silindire etki etmediği anlaşılmıştır. Ayrıca hız dağılımları incelendiğinde ön ve arka silindirde oluşan vorteks uzunluklarının ön silindir için birbirine eşit ve simetrik arka silindir içinde vorteks büyüklüğü ve uzunluğunun eşit ve simetrik olduğu görülmektedir. Akış tam silindirlere temas ettiği noktada hız sıfır ön ve arka silindir için gözlemlenebilir. Aynı şekilde duvarlarda kaymama şartı verildiğinden dolayı hız sıfır ya da minimum değerlerde olduğu anlaşılmaktadır.

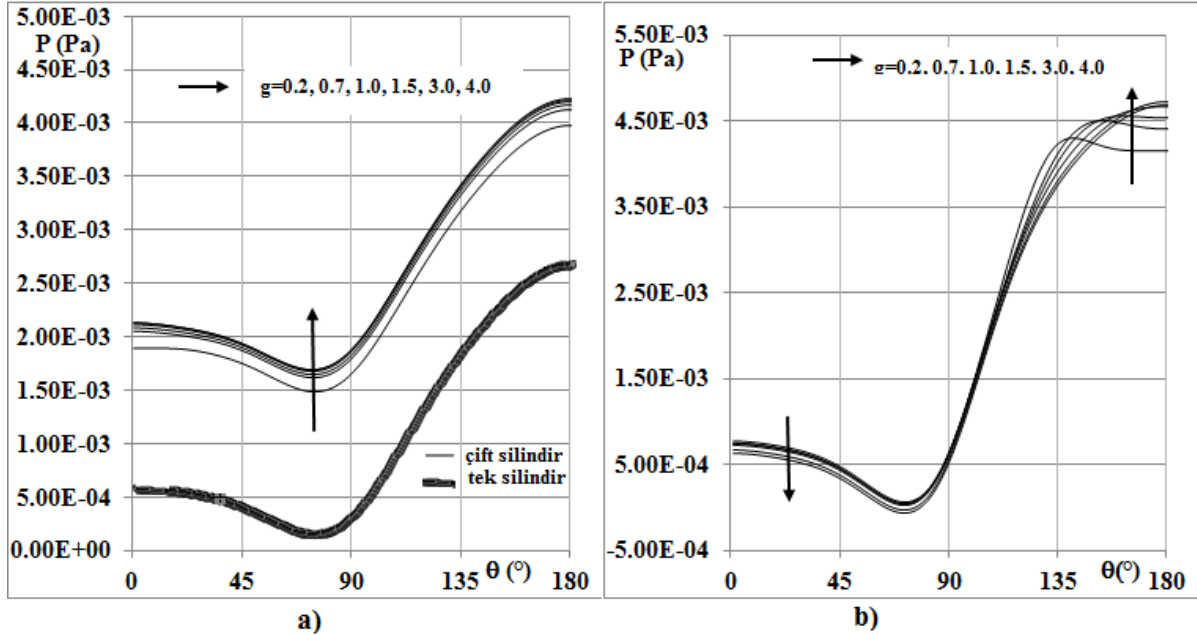


Şekil 3. a) $\beta=0.6$ Sıcaklık Dağılımları b) $\beta=0.6$ Hız Dağılımları

3.2 Statik Basınç Dağılımları

Şekil 4.a ön silindir yüzeyindeki statik basınç dağılımlarını silindirler arası mesafenin değişmesi ile birlikte dağılımını göstermektedir. Şekil 4.a 'dan görüldüğü üzere silindirler arası mesafe arttıkça statik basınç dağılımları da artmıştır. Bu artış tüm silindirler arası mesafe görülebilir. Ayrıca bu grafikten silindirin $\theta=45^\circ-90^\circ$ arasında açılal konumunda minimum değerlere ulaştığı 90° itibaren tekrar arttığı gözlemlenebilir. Ön silindirde $0-4.25 \times 10^{-3}$ Pa değişen değerlerdedir. $\theta=0^\circ-45^\circ$ arasında ön silindir basınç değişimi $1.8 \times 10^{-3}-2.2 \times 10^{-3}$ Pa arasında silindirler arası mesafe ile artmış, açı arttıkça azalmıştır; $\theta=45^\circ-135^\circ$ arasında önce azalan daha sonra ise artan bir basınç dağılım grafiği göstermiştir. Minimum 1.5×10^{-3} Pa değerine kadar düşmüş bu değerden sonra açılal konum arttıkça basınç değerleri de 4.25×10^{-3} Pa maksimum değerine kadar çıkmıştır. Akışın silindirden ayrıldığı yerden itibaren statik basınç değerleri de tekrardan pozitif değerlere yükselmiştir. Bernoulli ve süreklilik denklemleri çözümlendirildiğinde hız değerleri süreklilikten yükseldikçe statik basınç değerleri de git gide azalacaktır. Ayrıca tek silindir sonuçları ile karşılaştırıldığında aynı trend de bir dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Nümerik olarak bakıldığında tek silindir sonuçlarında değer olarak $0-2.52 \times 10^{-3}$ Pa arasında aynı şekilde başlangıçta 5×10^{-4} Pa değerinden başlayarak azalan $\theta=45^\circ-90^\circ$ arasında minimum seviyelere düşen ve bu değerden sonra aynı çift silindirde olduğu gibi artan doğrultuda dağılım gösteren bir grafik elde edilmiştir. Maksimum $\theta=135^\circ-180^\circ$ arasında 2.52×10^{-3} Pa değerine kadar çıkmıştır.

Şekil 4.b ' de ise başlangıçta statik basınç değerleri silindirler arası mesafe arttıkça azalmış daha sonra belli bir açılal konumundan sonra ise ($\theta=135^\circ-145^\circ$ arasında) silindirler arası mesafe arttıkça artmıştır. Aynı şekilde öndeki silindirde olduğu gibi ($\theta=45^\circ-90^\circ$ arasında) minimum seviye düşmüş bu açılal konumdan sonra yaklaşık $\theta=75^\circ-80^\circ$ den sonra tekrardan statik basınç değerleri artmıştır. Burada önemli olan diğer bir nokta özellikle arka silindirde hissedilen $g=3.0-4.0$ D değerlerinde statik basınç dağılımı öndeki silindirden etkilenmemiş ve tek silindir gibi davranmıştır. Bu önemli sonucu Bernoulli ile bağdaştırarak diğer analiz sonuçları ile karşılaştırdığımızda şu şekilde söyleyebiliriz; hız değerleri arttıkça statik basınç değerleri düşmüş, statik basınç değerleri arttıkça ise hız değerleri minimuma yaklaşmıştır.

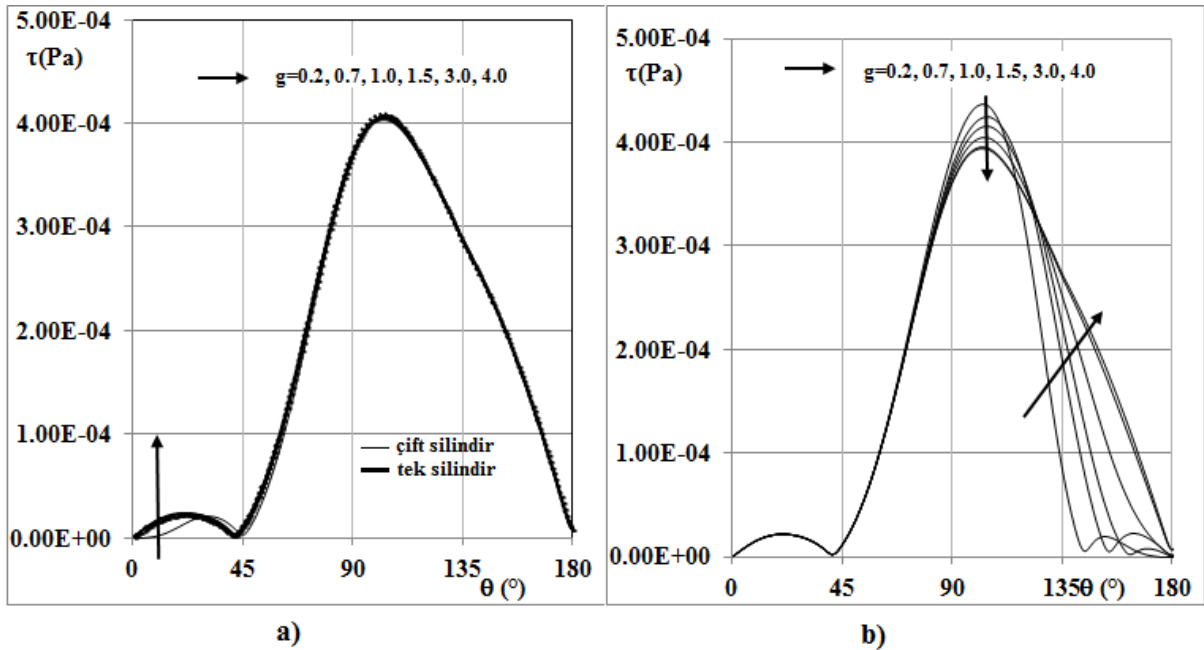


Şekil 4. a) Öndeki silindir statik basınç dağılımları b) Arkadaki silindir statik basınç dağılımları

3.3 Kayma Gerilmesi Dağılımları

Şekil 5.a ön silindir için silindirler arası mesafe değişimi ile kayma gerilmesinin değişimini göstermektedir. Görüldüğü gibi ön silindir için silindirler arası mesafe arttıkça artmış ancak özellikle açılma konum $\theta=45^\circ$ den itibaren silindirler arası mesafe ile bir değişim görülmemiştir. Sadece küçük silindirler arası mesafede $g=0.2$ D için ayrılma açısına kadar çok ufak bir değişim söz konusudur. Ayrıca ön silindirde yaklaşık $\theta=95^\circ-105^\circ$ açılma konumunda silindir yüzeyinde en yüksek $\tau=4 \times 10^{-4}$ Pa kayma gerilmesi değerlerine ulaşmış, bu konumdan sonra git gide azalarak sıfır değerine ulaşmıştır. Kayma gerilmesinin minimum olduğu yer ayrılma açısının olduğu yer olarak düşünülebilir, bu durumda bu blokaj oranı $\beta=0.6$ için ön silindirde tüm silindirler arası mesafede $\theta_s = 41.37^\circ$ olarak bulunmuştur. Bu ayrılma açısı değerinden sonra kayma gerilmesi değerleri de artarak devam etmiştir. Ayrıca Şekil 5.a dan da görüldüğü gibi ön silindir üzerindeki kayma gerilmelerinde tek silindir sonuçlarına çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 5.b' de ise arka silindir için silindirler arası mesafenin değişimi ile kayma gerilmesinin dağılımı gösterilmektedir. Arka silindir için kayma gerilmeleri dağılımları incelendiğinde başlangıçta aynı ön silindirde olduğu gibi silindirler arası mesafe ile herhangi bir değişim olmamış ancak yaklaşık $\theta=90^\circ$ değerinden itibaren silindirler arası mesafe ile önce azalan daha sonra ise yaklaşık $\theta=120^\circ-125^\circ$ den itibaren artan bir eğilim göstermiştir. Bunun sebebi hız dağılımı grafiğinden de görebileceğimiz üzere silindir arkasında oluşan vortekslerdir. Özellikle küçük silindirler arası mesafede $g=0.2-0.7$ D gibi oluşan vorteksler arkadaki silindire çarpmakta ve arka silindirde daha düşük hızların oluşmasına neden olmaktadır. Büyük silindirler arası mesafede ise $g=3.0-4.0$ D ise ön silindir arkasında oluşan vorteksler kendi içinde son bulup arka silindire temas etmeyip etkilemeden; arka silindirde daha yüksek hızların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Kayma gerilmesi değerleri de bu ayrılma noktasında $\theta_s=41.37^\circ$ değerinde minimum yani yaklaşık sıfır değerine ulaşmaktadır ve bu değerden sonra tekrardan yükselmeye başlamıştır. Ayrıca öndeki silindirde oluşan vortekslerin arkadaki silindire çarpmasından dolayı arkadaki silindirde çıkan kayma gerilmesi değerleri, önde çıkan kayma gerilmesi değerlerinden bir miktar daha fazladır. Nümerik olarak inceleyecek olursak arka silindir de ön silindir de bulunan kayma değerleri gibi yaklaşık olarak $\theta=120^\circ-125^\circ$ de ön silindirde bir miktar daha yüksek ve silindirler arası mesafe ile azalacak doğrultuda değişmiş, $\tau=4.25 \times 10^{-4}$ Pa maksimum değerine ulaşmıştır. Arka silindirde açılma konum $\theta=135^\circ-140^\circ$ arasında bir düşüş olmuş ve bu değerden sonra bir dalgalanma olmuştur.

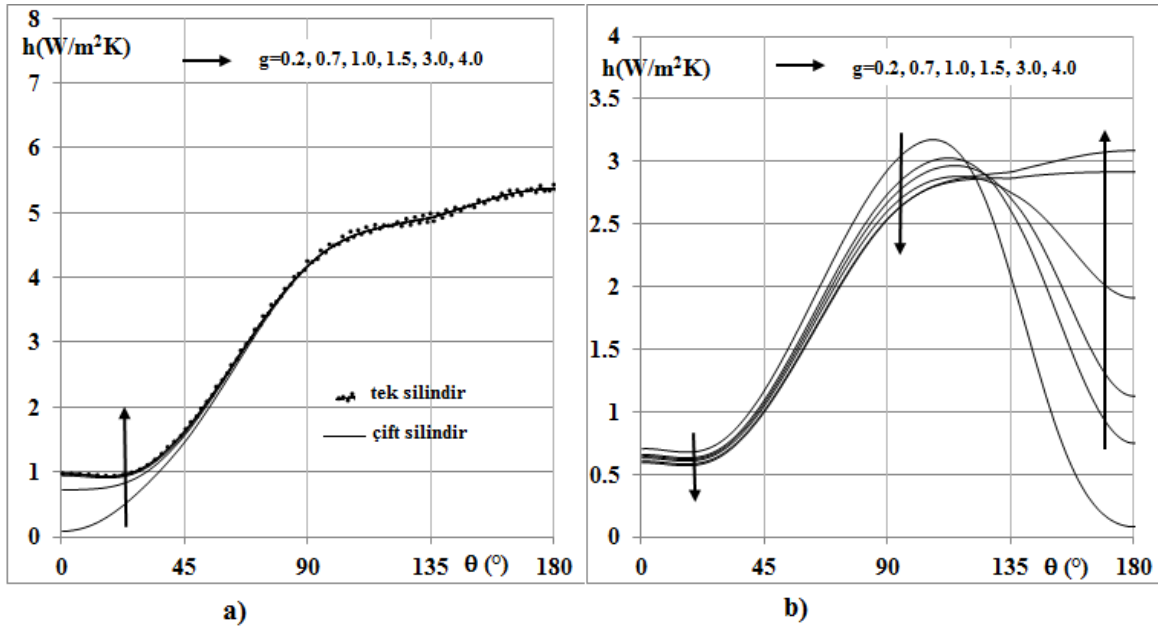


Şekil 5. a) Öndeki silindir kayma gerilmesi dağılımları b) Arkadaki silindir kayma gerilmesi dağılımları

3.4 Isı Transfer Katsayıları Dağılımları

Şekil 6.a ön silindir yüzeyindeki ısı transfer katsayılarının dağılımını göstermektedir. Kayma gerilmesi değerlerinde olduğu gibi ön silindir yüzeyinde küçük silindirler arası mesafede $g=0.2-0.7 D$ değerlerinde farklı diğer daha büyük silindirler arası mesafelerde $g=1.0-4.0 D$ arasında silindirler arası mesafe ile pek bir değişim olmamıştır. Ayrıca kayma gerilmesi dağılımlarında olduğu gibi ısı transfer katsayılarının dağılımlarına bakıldığında tek silindir için çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ön silindir de yaklaşık $\theta=45^\circ$ açısal konumuna kadar silindirler arası mesafe ile artmış bu açısal konumdan sonra artmaya devam etmiş fakat silindirler arası mesafe ile değişmemiştir. Ön silindir için maksimum ısı transfer katsayısı $h=5.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ olarak bulunmuştur. Ön silindir yüzeyinde $\theta=0^\circ-45^\circ$ açısal pozisyonunda $h=0-1.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ arasında silindirler arası mesafe ile artmıştır. $\theta=45^\circ$ açısal değerinden itibaren ise öndeki silindirde $h=1.5-5.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ arasında artarak devam etmiştir. Buradan sıcaklık dağılımının direk olarak hız dağılımından etkilendiği söylenebilir. Düşük silindirler arası mesafede $g=0.2-0.7 D$ gibi silindirler arasında oluşan vorteksler gelişmemiş bunun sonucunda daha düşük hız değerleri arka silindirde oluşmuş öndeki silindirde oluşan hız değerleri arka silindiri etkilemiş ve arka silindirde daha düşük sıcaklık ve dolayısıyla daha düşük ısı transfer katsayıları değerleri oluşmuştur.

Şekil 6.b arka silindir için silindirler arası mesafenin değişimi ile ısı transfer katsayılarının dağılımını göstermektedir. Başlangıçta silindirler arası mesafe arttıkça azalan öndeki silindire göre daha yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmiştir. Yaklaşık olarak $\theta=120^\circ-125^\circ$ aynı kayma gerilmesi sonuçlarında olduğu gibi silindirler arası mesafe ile azalan bir eğilim göstermiştir. Her bir silindir arası mesafe incelendiğinde açısal konumla birlikte artan bir dağılım oluşmuştur. Arka silindir için ısı transfer katsayıları $h=0.5-3.2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ değerine kadar çıkmıştır. Ancak $\theta=120^\circ-125^\circ$ değerinden sonra özellikle düşük silindirler arası mesafede açısal konum artmaya devam ederken ısı transfer katsayıları azalmış, yüksek silindirler arası mesafe değerlerinde ise $g=3.0-4.0 D$ ısı transfer katsayıları artmaya devam etmiştir. Buradan arkadaki silindir $g=3.0-4.0 D$ değerlerinde öndeki silindirden etkilenmediği sonucu da görülebilir. Arka silindir de ısı transfer katsayısı maksimum $g=4.0 D$ değerinde açısal konum $\theta=135^\circ-180^\circ$ arasında $h=3.2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ değerine kadar yükselmiştir. Ayrıca sıcaklık dağılımı grafikleri incelenecek olursa arka silindirde ön silindirden kaynaklanan sıcaklık düşüşünün ısı transfer katsayılarının dağılım grafiklerinde olduğu gibi oradan da bu değişim görülebilir.



Şekil 6. a) Öndeki silindir ısı transfer katsayıları dağılımları b) Arkadaki silindir ısı transfer katsayıları dağılımları

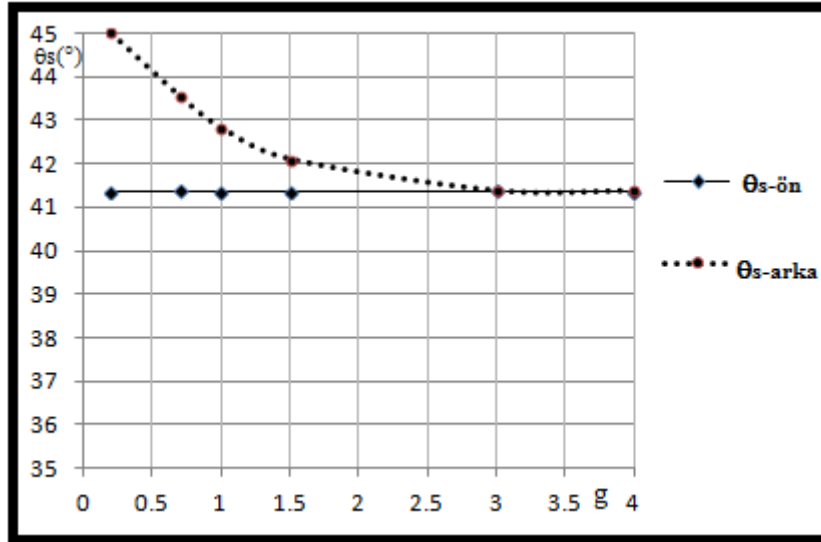
3.5 Ayrılma Açılarının Değişimi

Ayrılma açılarının değişimi ön ve arka silindir için ayrı ayrı incelendiğinde; baştan beri bahsedilen bazı sevindirici sonuçları görmek mümkündür. Tablo 1 incelendiğinde; ayrılma açıları öndeki silindir için; silindirler arası mesafe ile değişmemiş ve tek silindir için bulunan değerle aynı çıkmıştır ($\theta_{s-ön}=41.37^\circ$). Tek silindir için bu değer $\theta_s=41.34^\circ$ tabloda verilmiştir.. Ayrıca arka silindir için bakıldığında ön silindirden silindirler arası mesafe dolayısıyla etkilendiğinden başlangıçta bir miktar ön silindir ayrılma açısı değerinden yüksek çıkmış fakat silindirler arası mesafe arttıkça ayrılma açısı değerleri de küçülerek özellikle baştan sözünü ettiğimiz $g=3.0-4.0$ D değerlerinde $\theta_{s-ön}=\theta_{s-arka}=41.37^\circ$ bulunmuştur (Şekil 7). Buradan da silindirler arası mesafe arttıkça öndeki silindir arkadaki silindiri etkilememeye başlamıştır diye söylenebilir.

Tablo 1. Silindirler arası mesafe ile ayrılma açılarının değişimi (ξ = Tek silindir)

g	0.2 D	0.7 D	1.0 D	1.5 D	3.0 D	4.0 D
$\theta_{s-ön}$	41.37°	41.37°	41.37°	41.37°	41.37°	41.37°
θ_{s-arka}	45°	43.54°	42.82°	42.09°	41.37°	41.37°

ξ	
θ_s	41.34°



Şekil 7. Silindirler arası mesafe ile ayrılma açılarının değişimi

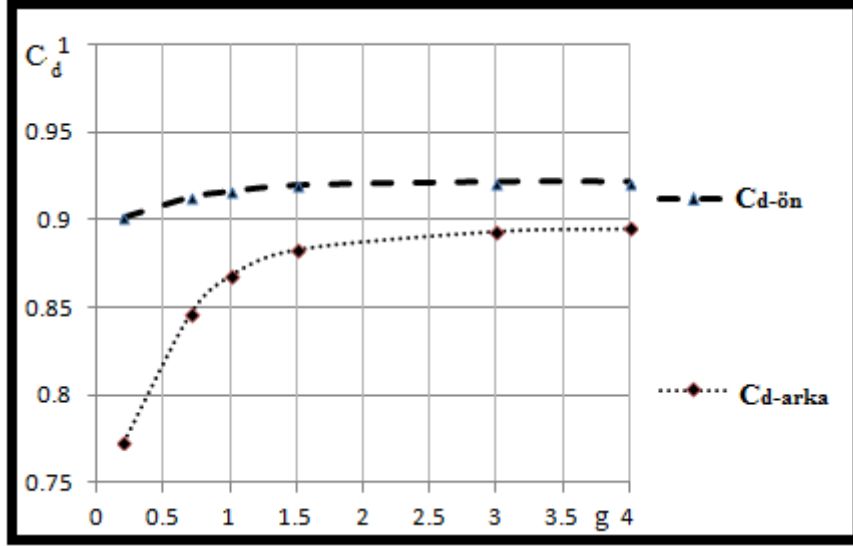
3.6 Sürüklenme Katsayılarının Değişimi

Tablo 2' de silindirler arası mesafe ile sürüklenme katsayılarının değişimi sayısal değerleri verilmiş ayrıca Şekil 8' de sürüklenme katsayılarının eğilimi ön ve arka silindir için gösterilmiştir. Tablo 2 ve Şekil 8 ortak incelendiğinde ön silindirde arka silindire göre bir miktar daha yüksek sürüklenme katsayıları bulunmuştur ($C_{d-ön}=0.90-0.92$). Silindirler arası mesafe arttıkça sürüklenme katsayıları değerleri de artmış ve $g=3.0-4.0$ D için tek silindir sonucuyla eşit $C_d=0.92$ değeri hesaplanmıştır. Buradan da görüldüğü gibi artık bu değerler de $g=3.0-4.0$ D için öndeki silindirden kaynaklı basınç, sıcaklık değişimleri ve oluşan vorteksler arkadaki silindiri etkilemeyecektir. Arka silindir sürüklenme katsayıları incelendiğinde ise ön silindire göre bir miktar daha düşük fakat yine de silindirler arası mesafe ile artan değerler elde edilmiştir ($C_{d-arka}=0.77-0.89$). Aynı şekilde arka silindir için de $g=3.0-4.0$ D değerlerinde ön silindir sürüklenme katsayılarına yaklaşmış ve bu iki silindirler arası mesafe de eşit çıkmıştır ($C_{d-arka}=0.89$).

Tablo 2. Silindirler arası mesafe ile sürüklenme katsayılarının değişimi (ξ = Tek silindir)

g	0.2 D	0.7 D	1.0 D	1.5 D	3.0 D	4.0 D
Cd-ön	0.90	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92
Cd-arka	0.77	0.84	0.86	0.88	0.89	0.89

ξ	
Cd	0.92

**Şekil 8.** Silindirler arası mesafe ile sürüklenme katsayılarının değişimi

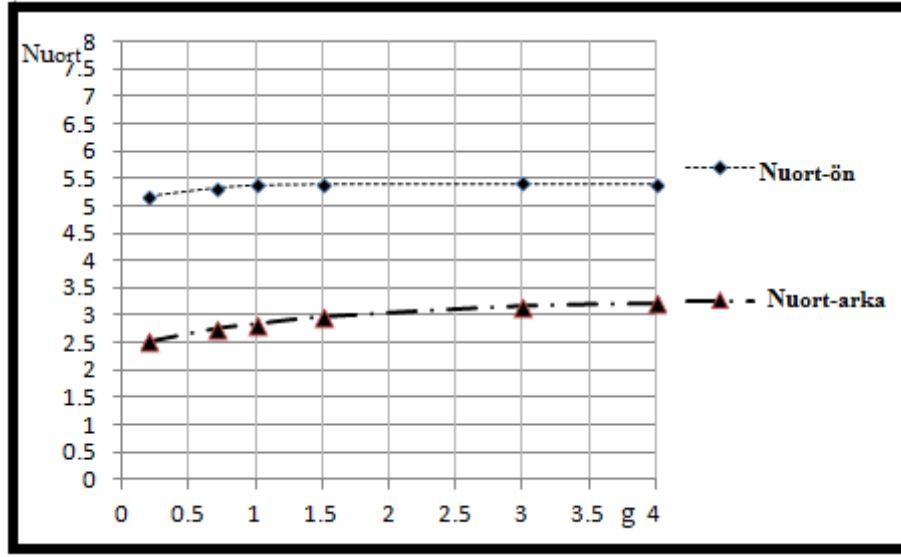
3.7 Ortalama Nusselt Sayılarının Değişimi

Tablo 3 ortalama Nusselt sayılarının değişimi silindirler arası mesafenin değişimi ile verilmiştir. Sürüklenme katsayılarında çıkan sonuçlara benzer bir eğilim burada da mevcuttur. Silindirler arası mesafe arttıkça ön ve arka silindirde ortalama ısı transferi dolayısıyla ortalama Nusselt sayıları da artmıştır ($Nu_{ort-ön}=5.16-5.41$, $Nu_{ort-arka}=2.53-3.21$). Sürüklenme katsayılarında olduğu gibi burada da ön silindir silindirler arası mesafe $g=3.0-4.0 D$ için eşit ve tek silindir için bulunan değere çok yakın bir sonuç bulunmuştur ($Nu_{ort-ön}=5.41$). Arka silindir için ortalama Nusselt sayılarının değişimi incelendiğinde ise aynı sürüklenme katsayılarındaki değişim gibi azalan bir eğilim göstermiştir. Fakat yine de silindirler arası mesafe arttıkça ısı transfer katsayıları artmış dolayısıyla ortalama Nusselt değerleri de artmıştır ($Nu_{ort-arka}=2.53-3.22$). Ayrıca Şekil 9’ da ortalama Nusselt sayılarının dağılımı gösterilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde ön silindirde arka silindire göre daha büyük ortalama Nusselt sayıları elde edilmiştir. Bu değişimi sıcaklık dağılımı grafiğinden de görmek mümkündür. Arkadaki silindir öndeki silindirin arkasında oluşan sıcaklık değişiminden etkilenmiş ve bundan dolayı arkadaki silindirin ön yüzeyinde daha düşük sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Bunun sonucunda da arka silindir de oluşan ortalama Nusselt sayıları, öndeki silindirde oluşan ortalama Nusselt sayılarından neredeyse yarıya düşmüştür. Yine de özellikle $g=3.0-4.0 D$ silindirler arası mesafede artmış ama öndeki silindir ortalama Nusselt sayıları değerlerine ulaşamamıştır ($Nu_{ort-arka}=3.17-3.22$).

Tablo 3. Silindirler arası mesafe ile ortalama Nusselt sayılarının değişimi (ξ = Tek silindir)

g	0.2 D	0.7 D	1.0 D	1.5 D	3.0 D	4.0 D
$Nu_{ort-ön}$	5.16	5.33	5.38	5.40	5.41	5.41
$Nu_{ort-arka}$	2.53	2.76	2.85	2.98	3.17	3.22

ξ	
Nu_{ort}	5.408



Şekil 9. Silindirler arası mesafe ile ortalama Nusselt sayılarının değişimi

4. HESAPLANAN SONUÇLARIN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR İLE KIYASLANMASI

Daha önceden yapılan çalışmalar incelendiğinde kıyaslamaların genellikle bir ya da iki değişken üzerinden olduğu görülmektedir. Başta da bahsedildiği gibi ya Reynolds sayısı değişimi C_d sürüklenme katsayısı üzerinde değişimi incelenmiş ya Reynolds sayısı çok büyük ve sabit tutularak zamana göre değişim yani C_L kaldırma katsayısının değişimi ve buna bağlı olarak Strouhal sayısının değişimi verilmiştir. Ancak biz burada kaldırma katsayılarının ya da Strouhal sayısının değişimine girmeyeceğiz çünkü steady state dediğimiz daimi akış zamandan bağımsız akış söz konusu ve bizim burada amacımız sabit Reynolds sayısının ve blokaj oranının silindirler arası mesafe değişimi ile birlikte etkisini incelemektir. Bunun için uygun olan makaleler daha önceden denenmiş makalede verilen sınır şartları, başlangıç koşulları verilmiş ve çok yakın sonuçlar elde edilip bu çalışmaya geçilmiştir. Burada başlıca incelenen konular olan ayrılma açılarının, sürüklenme katsayılarının ve statik basınç dağılımlarının diğer araştırmacılar tarafından elde edilen veriler ile karşılaştırılması sunulacak ayrıca diğer çalışmalara benzer ve farklı yönleri de tartışılacaktır.

4.1 Ayrılma Açılarının Kıyaslanması

Ayrılma açıları incelendiğinde tek silindir için $\theta_s=41.34^\circ$, çift silindir için ise ön silindirde $\theta_{s-ön}=41.37^\circ$, arka silindir de ise $\theta_{s-arka}=45^\circ-41.37^\circ$ şeklinde silindirler arası mesafe arttıkça öndeki silindirden etkilenmediğini kanıtlayacak şekilde arka silindir ile ön silindiri birbirine eşit bulmuştuk. Benzer şekilde incelendiğinde Chakraborty ve ark.[8], Mittal ve ark.[6], Singha ve ark.[13], yaptıkları çalışmalara yakın sonuçlar elde edilmiştir. Birçok deneysel ve nümerik çalışmada ise blokaj etkisi olmadan silindirler arası mesafe incelenmiştir. $Re=40$ için ise blokaj oranı gözetmeden yapılan çalışmalarda ve belirli bir blokaj oranında yapılan çalışmalarda ayrılma açıları bizim yaptığımız sonuca yakın $\theta_s=51^\circ-37^\circ$ arasında bulunmuştur [3,4,5,6,8,13]. Chakraborty ve ark.[8], Mittal ve ark.[6], Singha ve ark.[13], özellikle blokaj oranının etkisini incelemişlerdir. Blokaj oranı $\beta=0.5-0.8$ bizim blokaj oranı değerimize yakın değerlerde ayrılma açılarını $\theta_s=46^\circ-37.5^\circ$ bulmuşlardır [6,8]. Singha ve ark.[13], ise blokaj oranı $\beta=1/24$ de çalışmış ve bu değerlerde $g=0.2-4.0 D$ arasında değiştirerek ön ve arka silindir ayrılma açılarının değişimini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada sırasıyla $g=0.2-4.0 D$ arasında ön silindir için $\theta_{s-ön}=51.5^\circ-53.5^\circ$ ve arka silindir için ise $\theta_{s-arka}=42^\circ-37^\circ$ bulmuşlardır. Burada görüldüğü üzere özellikle

öndeki silindir ayrılma açısı değerleri bizim yaptığımız sonuca göre bir miktar daha yüksek çıkmıştır, bunun nedenine bakılacak olursa doğal olarak blokaj oranlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

4.2 Sürüklenme Katsayılarının Kıyaslanması

Sürüklenme katsayılarının değişimi pek çok makale de incelenmiş ancak yine blokaj oranı ya da silindirler arası mesafe çoğu makalede göz ardı edilmiştir. Gao ve ark.[15], Meneghini ve ark.[7]; yaptıkları çalışmalarda $Re=200$ değeri için ortalama C_d katsayılarının değişimini incelemişlerdir. Blokaj oranı dikkate alınmamıştır ancak incelenecek olursa $\beta=1/30$ olarak seçildiği görülebilir. Bu koşullarda buldukları ortalama drag(sürüklenme) katsayıları sırasıyla $C_d=1.345-1.25$ değerlerindedir. Ayrıca Patil ve ark.[12] $Re=100$ için yaptıkları çalışmada yaklaşık olarak sürüklenme katsayısını $C_d=1.31$ olarak bulmuşlardır. Singha ve ark.[13] ise yaptıkları çalışmalarda çift silindir için blokaj oranı $\beta=1/24$ değeri için ön ve arka silindir sürüklenme katsayıları değerlerini hesaplamışlar ve yaklaşık olarak C_d -ön=1.55-1.45 arasında bulmuşlardır. Bu değer arka silindir için ise C_d -arka=0.1-0.4 silindirler arası mesafe arttıkça artan bir şekilde değişmiştir. Yaptığımız çalışma incelenecek olursa tek silindir için biz blokaj oranı $\beta=0.6$ değerinde sürüklenme katsayısını $C_d=0.92$ hesapladık. Çift silindir için ise ön silindirde tek silindire benzer olarak yaklaşık değerler arka silindir de ise bir miktar daha düşük fakat silindirler arası mesafe ile artan değerler elde edilmiştir. Buradan da silindirler arası mesafe arttıkça arkadaki silindirin öndeki silindirden etkilenmediği ve tek silindir gibi davrandığı yorumunu yapabilir ayrıca diğer makalelerle karşılaştırdığımızda blokaj oranı arttıkça sürüklenme katsayılarının da düştüğü gözlemlenmiştir.

4.3 Statik Basınç-Sıcaklık ve Hız Dağılımlarının Kıyaslanması

Statik basınç dağılımları ve buna bağlı olarak hız ve sıcaklık dağılım grafikleri ANSYS-CFX programından elde edilmiştir. Önceki yapılan çalışmalar incelenecek olursa statik basınç dağılımları, ısı transfer katsayıları ya da kayma gerilmeleri yerine bunların birer ölçüğü olan basınç katsayıları sürtünme katsayıları ve ortalama Nusselt sayıları kullanılarak akışın durumu belirlenmiştir. Özellikle C_p basınç katsayılarının değişimleri pek çok makalenin ana konusu olarak incelenmiştir. Ancak yine diğer akış karakteristiklerinde olduğu gibi kanalın boyutları yani blokaj oranı ya da silindirler arası mesafe yerine değiştirilen kriter; genelde Reynolds sayısı olmuştur. Mittal ve ark.[6], tek silindir için sabit blokaj oranında $\beta=0.015$ için C_p katsayısının değişimini incelemişlerdir. Burada $Re=30$ değerinde sabit tutulmuş ve önceden yapılan bir çalışma ile karşılaştırılarak sonuçlar yorumlanmaya çalışılmıştır. Bizim yaptığımız çalışmaya göre daha düşük Reynolds sayısı seçmeleri ve blokaj oranında oldukça düşük olmasından dolayı basınç katsayı değerleri de oldukça düşük çıkmıştır ($C_p=-1.5-1$). Sharman ve ark.[9] ise Reynolds sayısını $Re=100$ değeri ve daha yüksek değerlerinde hem tek silindir hem de çift silindir sonuçlarını elde etmişlerdir. Tek silindir için basınç katsayıları değerleri $C_p=-1.5-1$ arasında açışal konuma bağlı olarak aynı şekilde çift silindir içinse silindirler arası mesafe oranı $g=2-3.5-4-6-8-10$ olacak şekilde değiştirilerek basınç katsayıları değerlerini hesaplamışlardır ve tek silindire göre silindir yüzeyindeki ortalama basınç katsayıları oldukça düşük çıkmıştır ($C_p=0-0.15$). Eğer bu sonuçlar bizim elde ettiğimiz veriler ile kıyaslanacak olursa genel olarak sayısal veriler benzer olmakla beraber açışal konumun değişimi ile birlikte basınç katsayılarının değişim trendi de aynı yöndedir [6,9].

Singha ve ark.[13] değişik Reynolds sayıları için ($Re=40-70-120-150$ değerlerinde) farklı silindirler arası mesafelerde ($g=0.2-0.7-1.0-1.5-3.0-4.0$ D değerlerinde) akım çizgilerini elde etmiştir. Reynolds değeri $Re=40$ için özellikle akım ve vorteks yapıları detaylıca incelendiğinde bizim elde ettiğimiz hız ve sıcaklık dağılımları ile oldukça uyumlu yapılar söz konusudur. Silindirler arası mesafe $g=3.0-4.0$ D değerlerinde ön silindirden oluşan vorteksler kendi içinde son bulmakta ve arkadaki silindiri etkilememektedir. Bu değer $g=0.2-0.7-1.0-1.5$ D değerlerinde ise silindirler arası mesafe çok az olduğundan önde oluşan vorteksler arkadaki silindire çarpılmaktadır. Ancak burada blokaj oranı $b=1/24$ alındığı göz önünde bulundurulmalıdır. Yine de aynı durum blokaj oranı $\beta=0.6$ farklı olsa da hız ve sıcaklık grafiklerinde bu çalışmada da gözlenmektedir. Yani Singha ve ark.[13] yaptıkları çalışmaya benzer şekilde özellikle silindirler arası mesafe $g=3.0$ D ve $g=4.0$ D durumlarında her bir silindir tek silindir gibi davranmışlardır.

SONUÇ

Bu çalışmada blokaj oranı $\beta=0.6$ ve Reynolds sayısı $Re=40$ sabit değerlerinde silindirler arası mesafe silindir çapları ile orantılı olarak $g=0.2-4.0$ D aralığında seçilerek ard arda dizili kanal içerisindeki silindirler etrafındaki akış ve ısı karakteristikleri nümerik olarak çözdürülmüştür. Hesaplamalarda iki boyutlu sıkıştırılmaz laminer akış için Navier-Stokes ve enerjinin korunum denklemleri ANSYS-CFX v13.0 programı kullanılarak çözümlenmiştir. Silindirler arası mesafe değiştirilerek ön ve arka silindir yüzeyinde açılma konuma göre statik basınç dağılımları, kayma gerilmesi, ısı transfer katsayıları değerleri elde edilmiştir. Ayrıca ön ve arka silindir için silindirler arası mesafe değişimi ile ayrılma açıları, sürüklenme katsayıları değişimi ve Nu_{ort} sayılarının değişimleri irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlara genel olarak bakılacak olursa;

- Statik basınç dağılımları özellikle ön silindirde silindirler arası mesafe arttıkça artmıştır. Akışın silindirden ayrıldığı yerden itibaren statik basınç değerleri de tekrardan pozitif değerlere yükselmiştir. Bernoulli ve süreklilik denklemleri çözümlendirildiğinde hız değerleri süreklilikten yükseldikçe statik basınç değerleri de git gide azalacaktır. Ayrıca tek silindir sonuçları ile karşılaştırıldığında aynı trend de bir dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Arka silindir de başlangıçta azalan eğilimde fakat belli bir açılma konumundan sonra ($\theta=135^\circ-145^\circ$ arasında) silindirler arası mesafe arttıkça artmıştır.
- Kayma gerilmesi dağılımları incelendiğinde silindirler arası mesafeden bağımsız yalnızca küçük silindirler arası mesafede $g=0.2-0.7$ D de çok az bir sapma göstermiş onun haricinde tüm silindirler arası mesafelerde aynı dağılımı göstermiştir. Arka silindirdeki kayma gerilmesi dağılımı incelendiğinde başlangıçta silindirler arası mesafe ile azalan ancak açılma konuma göre artan bir eğilim göstermiştir fakat açılma konum $\theta=120^\circ-125^\circ$ de ön silindirden bir miktar daha yüksek ve silindirler arası mesafe ile azalacak doğrultuda değişen kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Bu değerden sonra artık kayma gerilmesi değerleri silindirler arası mesafe arttıkça artan şekilde değişmiştir. Buradan da silindirler arası mesafe arttıkça arka silindir öndeki silindirden etkilenmediği sonucuna varılabilir.
- Isı transfer katsayılarının dağılımları ön ve arka silindir için incelendiğinde özellikle ön silindir için neredeyse tüm silindirler arası mesafede ısı transfer katsayılarının dağılımı benzer çıkmıştır. Aynı kayma gerilmesi sonuçlarında olduğu gibi düşük silindirler arası mesafelerde çok az bir sapma olmuştur. Bunun nedeni de silindirler arasında oluşan düşük hızlı vortekslerin etkisidir. Arka silindir de ise başlangıçta silindirler arası mesafe arttıkça ısı transfer katsayıları azalarak fakat açılma konum arttıkça artmıştır daha sonra belli bir açılma konumunda ise kayma gerilmesi dağılımına benzer şekilde $\theta=120^\circ-125^\circ$ de ön silindirden bir miktar daha düşük ve silindirler arası mesafe ile azalmıştır. Ancak bu değerden sonra açılma konum arttıkça silindirler arası mesafe arttıkça ısı transfer katsayı değerleri de artmıştır.
- Ayrılma açıları değerleri hesaplandığında ön silindir için ayrılma açısı tek silindir ile aynı değer hesaplanmıştır ($\theta_{s-ön}=41.37^\circ$). Ayrıca arka silindir için ayrılma açıları incelendiğinde başlangıçta ön silindirden daha yüksek değerler elde edilmiştir ancak silindirler arası mesafe arttıkça azalan bir dağılım ve sonunda $g=3.0-4.0$ D değerinde ön silindirdeki değerle aynı sonuç elde edilmiştir ($\theta_{s-arka}=45^\circ-41.37^\circ$).
- Sürüklenme katsayıları değerlerine bakıldığında ön silindir için yine tek silindir sonucuna benzer sonuç elde edilmiş arka silindir de ise ön silindire göre daha düşük fakat silindirler arası mesafe arttıkça artan değerler elde edilmiştir ($C_{d-ön}=0.90-0.92$). Arka silindirde silindirler arası mesafe arttıkça $g=3.0-4.0$ D yine ön silindirdeki değere yaklaşmıştır ($C_{d-arka}=0.89$).
- Ortalama Nusselt sayıları ayrıca hesaplanmıştır ve sürüklenme katsayıları ve ayrılma açıları olduğu gibi ön silindir için tek silindir sonucuna çok yakın bir değer elde edilmiştir ($Nu_{ort-ön}=5.41$). Arka silindir de ise yine silindirler arası mesafe ile artan bir eğilimde fakat ön silindire göre daha düşük sonuçlar elde edilmiştir ($Nu_{ort-arka}=2.53-3.22$).



- Genel olarak bu blokaj oranının silindirler arası mesafeye etkisi incelenecek olursa; silindirler arası mesafe $g=3.0-4.0 D$ değerlerinde her bir silindir tek silindir gibi davranmaya başlamıştır. Yani öndeki silindirin arkasında oluşan vortekslerden arkadaki silindir etkilenmemiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Cengel, Y. A. 2003. Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd ed., McGraw-Hill, ISBN 0072458933
- [2] Zdravkovich, M. M., 1977. Review of Flow Interference Between Circular Cylinders in Cross Flow. ASME Journal of FLUIDS Engineering, 99, 618-633.
- [3] Chen, J. H., Pritchard, W. G., Tavener S. J. 1995. Bifurcation of Flow Past a Cylinder Between Paralel Planes, J. Fluid Mech., 284, 23-41.
- [4] Slaoutti, A., Stansby P. K. 1992. Flow Around Two Circular Cylinders by The Random-Vortex Method. Journal of Fluids and Structures, 6, 641-670.
- [5] Li, J., Chambarel, A., Donneaud, M., Martin, R., 1991. Numerical Study of Laminar Flow Past One and Two Cylinders," Comput. Fluids, 19, 155-170.
- [6] Mittal, S., Kumar, V., Raghuvashi A. 1997. Unsteady Incompressible Flows Past Periodic Arrays of Cylinders in Tandem and Staggered Arrangement. Comput. Mech., 25, 1315-1344.
- [7] Meneghini, J. R., Saltara, F., Siqueira, C. L. R., Ferrari, J. A., Jr. 2001. Numerical Simulation of Flow Interference Between Two Circular Cylinders in Tandem and Side-by-Side Arrangements, J. Fluids Struct., 15, 327-350.
- [8] Chakraborty, J., Verma, N. Chhabra, R.P. 2004. Wall Effects in Flow Past a Circular Cylinder in a Plane Channel: a Numerical Study. Chem. Eng. Process. 43, 1529-1537.
- [9] Sharman, B., Lien F. S., Davidson L., Norberg C. 2005. Numerical Predictions Of Low Reynolds Number Flows Over Two Tandem Circular Cylinders. Int. J. Numer. Methods Fluids, 47, 423-47.
- [10] Griffith, M. D., Thompson, M.C., Leweke, T., Hourigan, K., Anderson, W.P. 2007. Wake Behaviour And Instability Of Flow Through A Partially Blocked Channel. Journal Of Fluid Mechanics, 582, 319e340
- [11] Zhou, S., Zhou Z., Yan S., Yuan Y., Xi G. 2014. Numerical Study on Characteristics of Flow and Thermal Fields of Tandem Cylinders. Taylor and Francis, Heat Transfer Engineering, 35(11-12):1144-1151.
- [12] Patil, C. R., Bharti P. R., Chhabra R. P. 2008. Steady Flow of Power Law Fluids over a pair of Cylinders in Tandem Arrangement. Ind. Eng. Chem. Res., 47, 1660-1683
- [13] Singha, S., Sinhamahapatra, K. P. 2010. High Resolution Numerical Simulation of Low Reynolds Number Incompressible Flow About Two Cylinders in Tandem., Journal of Fluids Engineering, 132, 1-10.
- [14] Harichandan, A.B., Roy, A., 2010. Numerical Investigation Of Low Reynolds Number Flow Past Two And Three Circular Cylinders Using Unstructured Grid CFR Scheme. International Journal Of Heat And Fluid Flow, 31, 154-171.
- [15] Gao, Y., Wang, X., Tan, D. S., Keat, T. S. 2013. Particle Image Velocimetry Technique Measurements Of The Near Wake Behind A Cylinder-Pair Of Unequal Diameters. Fluid Dyn. Res., 45, 045504
- [16] Jiang, R., Lin J., Ku X. 2014. Numerical Prediction of Flows Past Two Tandem Cylinders of Different Diameters Under Unconfined and Confined Flows. The Japan Society of Fluid Mechanics, Fluid Dyn. Res., 46, 025506.
- [17] Incropera, F. P. and DeWitt, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, New York, 2001.
- [18] Sahin, M.; Owens, R.G. ; A numerical investigations of wall effects up to high blockage ratios on two-dimensional flow past a confined circular cylinder. Physics of Fluids, 2004, 16, 1305-1320.



ÖZGEÇMİŞ

Neslihan GÜNEŞ

21 Kasım 1990 Bursa doğumludur. 2012 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2015 Ocak ayında Makine Mühendisi yüksek lisans derecesini almıştır. Aynı üniversitede doktora eğitimine devam etmektedir.

A. Alper ÖZALP

26 Temmuz 1972 İstanbul doğumludur. Yardımcı Doçent, Doçent ve Profesör unvanlarını sırasıyla 2002, 2006 ve 2011 yıllarında alan yazar halen Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Profesör unvanı ile akademik hayatına devam etmektedir. Aynı zamanda Uludağ Üniversitesi Teknoparkı'nda faaliyet gösteren TEMAS AR-GE firmasının da kurucu ortağıdır. A. Alper ÖZALP akademik kulvarda akışkanlar mekaniği, ısı transferi, kurutma prosesleri, lüle ve mikro-kanal akışları, aero-endüstriyel gaz türbini uygulamaları ile hidrodinamik yağlama konularında araştırmalar yürütmekte ve pek çok SCI dergi makalesi ile ulusal ve uluslararası bildirisi bulunmaktadır.

A. Alper ÖZALP kurucusu olduğu TEMAS AR-GE bünyesinde, başta otomotiv, makine, tekstil, imalat ve yazılım olmak üzere endüstriye yönelik tasarım, proje hazırlama/yönetimi ve simülasyon programı geliştirme faaliyetlerini sürdürmektedir.