



AKIŞ KONTROL ÇUBUĞU İLE KARE KESİTLİ BİR KÜT CİSİM ETRAFINDAKİ AKIŞ KONTROLÜNDE HÜCUM AÇISININ GİRDAP KOPMA OLAYINA ETKİSİ

Yahya Erkan AKANSU*, Mehmet ÖZMERT** ve Erhan FIRAT***

*Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 51200, Niğde, akansu@nigde.edu.tr,

**Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 51200, Niğde, mehmetozmert@nigde.edu.tr

***Tunceli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 62000, Tunceli, efirat@tunceli.edu.tr

(Geliş Tarihi: 01. 12. 2009, Kabul Tarihi: 17. 06. 2010)

Özet: Bu çalışmada, pasif akış kontrol elemanı olarak kullanılan dairesel kesitli bir çubuk ile kare kesitli bir kütle cisim etrafındaki akış durumunda hücum açısının girdap kopma olayına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Hücum açısının değeri 0° 'ye eşit iken öndeki kontrol çubuğu ile kare model serbest akışa göre ardışık olarak durmaktadır. Deneysel Reynolds sayısının 1.0×10^4 değerinde, $d/D=0.25$ çap oranında, hücum açısının $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ aralığında, iki cisim arasındaki boyutsuz mesafe olan L/D 'nin 1, 2, 3 ve 4 değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Hız ölçümleri sabit sıcaklık anemometresi (CTA) ile yapılmış olup, girdap kopma frekansları hız-zaman değişiminin spektral analizinden elde edilmiştir. Duman tel yöntemi ile akış görünür hale getirilerek akış ayrılması, yeniden tutunması ve girdap oluşum bölgesinin özellikleri ortaya konulmuştur. $L/D=2$ ve 3 konumlarındaki $\alpha=0^\circ$ hücum açısında, sürüklenme kuvvetinde dikkate değer azalmalara ve ısı transferinde önemli artışlara neden olan yüksek girdap kopma frekansına sahip akış yapısı elde edilmiştir. Bu akış yapısının $\alpha=10^\circ$ 'ye kadar artan hücum açısı ile azalarak devam ettiği görülmüştür. Hücum açısının daha da artırılması ile akış kontrol çubuğunun girdap oluşum yapısı üzerindeki etkisi tamamen ortadan kalkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Pasif akış kontrolü, Kontrol çubuğu, Kare prizma, Hücum açısı, Girdap kopması.

THE EFFECT OF ATTACK ANGLE TO VORTEX SHEDDING PHENOMENON OF FLOW AROUND A SQUARE PRISM WITH A FLOW CONTROL ROD

Abstract: In this study, the effect of attack angle on vortex shedding phenomena in the case of flow around the square prism as a bluff body and the circular rod which used as flow control component was experimentally investigated. While the value of attack angle equal to 0° , the upstream control rod and square prism are in tandem arrangement to free stream. Experiments were conducted at Reynolds number of 1.0×10^4 , for the diameter ratio of $d/D=0.25$, the attack angle between $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, and the value of normalized distance between two prism L/D is 1, 2, 3, and 4. The velocity measurements were conducted by means of constant temperature anemometer (CTA) as well as vortex shedding frequencies obtained by the spectral analysis of velocity-time history. Characteristics of the vortex formation region and location of flow attachments, reattachments, and separations were observed by means of the smoke-wire flow visualizations. At the angle of attack 0° of the location $L/D=2$ and 3, the flow structure that possess high vortex shedding frequency which causes remarkable reductions on the drag force and significant increase in the heat transfer was obtained. This flow structure continuous to decrease with increasing attack angle up to around 10° . By further increasing of attack angle, the effect of flow control rod on vortex shedding frequency disappears completely.

Key Words: Passive flow control, Control rod, Square prism, Attack angle, Vortex shedding.

SEMBOOLLER

AR	Açıklık (görünüş) oranı, W/D	H	Test bölgesi yüksekliği, [m]
BR	Blokaj oranı, D/H	L	İki kütle cismin merkezleri arasındaki uzunluk, [m]
d	Dairesel kesitli kontrol çubuğunun çapı [m]	Re	Reynolds sayısı, $(U D) / \nu$
D	Kare kesitli kütle cismin kenar uzunluğu [m]	St	Strouhal sayısı, $(f_s D) / U_o$
D'	Kare kesitli kütle cismin akışa göre izdüşüm yüksekliği [m]	St'	D'ye göre Strouhal sayısı, $(f_s D') / U_o$
f_s	Girdap kopma frekansı [Hz]	Tu	Türbülans şiddeti, $\%Tu = (u_{rms} / \bar{U}) * 100$

U_o	Serbest akış hızı [m/s]
U	Serbest akış yönündeki anlık hız [m/s], $U = \bar{U} + u$
\bar{U}	Serbest akış yönündeki ortalama hız [m/s]
u	Serbest akış yönündeki çalkantı hızı
u_{rms}	Çalkantı hızlarının karelerinin ortalamasının karekökü [m/s]
W	Kare model genişliği [m]
$x/D, y/D$	Kare model merkezine göre akış alanındaki prob konumunun boyutsuz koordinatları
α	Hücum açısı [$^\circ$]
ν	Kinematik viskozite [m^2/s]

GİRİŞ

Isı eşanjörlerinden reaksiyon kulelerine, hava ve kara taşıtlarından binalara kadar birçok mühendislik uygulamalarında cisimlerin bir akış ortamı içinde bulunması nedeniyle akış kaynaklı problemlerle sıkça karşılaşmakta, bu ise cisimler etrafındaki akışın kontrol edilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Bu problemlerin başında akış kaynaklı titreşimler ve cismin akış içerisinde ilerlemesine karşı gösterilen direnç, yani sürüklenme (drag) kuvveti yer almaktadır. Cisme etki eden çalkantı kuvvetleri ve sürüklenme kuvveti, akışın cismin arkasında oluşturduğu iz bölgesi yapısına ve buradaki girdap oluşumuna önemli ölçüde bağlıdır. Bunların yanı sıra zorlanmış taşınımın gerçekleşen ısı transferinde ısı transferinin iyileştirilmesi geometrik yapı ve akış şartları ile doğrudan alakalıdır. Çeşitli aktif ve pasif akış kontrol yöntemlerinin uygulanması ile akış kaynaklı problemlerin olumsuz etkilerinin azaltılmasının veya ortadan kaldırılmasının yanı sıra, birçok mühendislik uygulamasında kullanılmakta olan konvansiyonel sistemlerin verimliliğinin artırılması da mümkün olabilmektedir. Pasif yöntemlerde ilave bir güç kullanılmaksızın sisteme çeşitli düzeneklerin dahil edilmesi söz konusudur. Ayırıcı plaka (splitter plate), küçük bir kontrol çubuğu (control rod), yüzey pürüzlülüğünün değiştirilmesi ve yivli (veya çıkıntılı) yüzey gibi pasif akış kontrol yöntemleri sıkça kullanılmaktadır. Aktif yöntemlerde ise, harici olarak bir enerji girişi gerekli olup, akış içine yapılan üfleme ve emme, mikro-kabarcık yada parçacık gönderme, akustik uyarma, dönen veya salınım yapan cisim, hareketli duvar ve elektromanyetik kuvvetlerin oluşturulması örnek olarak verilebilmektedir.

Akış ortamında bulunan iki cismin birbirlerinden etkilenmesi, iki cismin birbirine yeterli miktarda yakın olmaları veya arkadaki cismin öndekinin iz bölgesinin içerisinde olması durumunda söz konusu olmaktadır. Zdravkovich (2003) aynı çaplı iki dairesel silindirin farklı konumlarında akış alanındaki etkileşimlerini dört ana grupta sınıflandırmıştır. Bunlardan “Yakınlık (Proximity) etkileşimi” akış yapısında, iki silindirde birbirlerinin iz bölgesinde kalmayacak şekilde konumlandırılmaktadır. Bu durum özellikle üst-üste (side by side) yerleştirilmelerde ve zikzaklığın az olduğu konumlarda gerçekleşmektedir. “İz (wake)

etkileşimi” akış yapısı, silindirlerden birinin kısmen veya tamamen diğerinin iz bölgesi içerisinde olması durumunda oluşmaktadır. Bu durum hem ardışık hem de zikzak düzenlemelerde iki cisim arası mesafenin $L/D > 4$ olduğu durumlarda görülmektedir. “İz ve yakınlık etkileşimli” akış yapısında, iki cisim arası mesafenin küçük olması durumundan dolayı, öndeki cismin arkasındaki iz bölgesi, arkadaki cisim tarafından rahatsız edilmektedir. Bu durum $L/D < 4$ olduğu hem ardışık hem de zikzak düzenlemelerde görülmektedir. “Etkileşimsiz” akış yapısında ise her iki cisimde bir diğerinin akış alanını etkileyemeyecek kadar birbirlerinden uzakta bulunmaktadır. İki cisim arası mesafeye, hücum açısına, cisim büyüklük ve geometrilerine bağlı olarak bu etkileşimlerdeki akış yapılarının sınırları değişebilmektedir.

Pasif akış kontrol yöntemlerinden biri olan kontrol çubuğu ile akış kontrol yönteminde cisimlerin akış karakteristiklerinde %70'lere varan iyileşmeler görülebilmektedir (Igarashi, 1997). Bu yöntemde, bir kontrol çubuğu akışa göre cismin önüne belirli bir mesafeye yerleştirilmektedir. Burada, iki cisim arasındaki boyutsuz mesafeye (L/D) bağlı olarak iki temel akış yapısı ortaya çıkmaktadır. Bu iki akış yapısı belli bir kritik L/D mesafesi ile birbirinden ayrılmaktadır. L/D 'nin kritik mesafeden küçük olması durumunda, kontrol çubuğu üzerindeki kayma tabakaları çubuğun üst ve alt tarafında yüzeyden ayrılarak arkadaki küt cismin ön yüzeyinde köşelere yakın bölgelerde (kare kesitli küt cisimlerde) yeniden tutunmaktadır. Bu sayede iki cisim arası bölgede düşük basınç oluşmakta ve arkadaki cismin sürüklenme kuvvetinin önemli bir kısmına neden olan ön yüzeydeki yüksek basınçın değeri sıfır basınç değerine kadar düşmektedir. Ayrıca çubuktan kopan kayma tabakalarının kare modelin ön yüzeyinin alt ve üst köşelerine yakın bölgelerde tutunması kare modelden kopan akışın daha dar bir iz bölgesi oluşturmasına ve girdap oluşum bölgesinin cismin daha da arka tarafına kaymasına neden olmaktadır. Böylelikle cismin arka kısmındaki negatif basınç bölgesindeki basınçta da yükselme sağlanmaktadır. Cismin ön ve arka yüzeyindeki bu iki basınç seviyesinin değişimi ise sürüklenme kuvvetinin önemli ölçüde düşmesine neden olmaktadır. İki cisim arası mesafenin kritik değerden büyük olması durumunda akış yapısı değişerek çubuktan ayrılan kayma tabakaları iki cisim arasında girdap caddesini oluşturmaktadır. Bu durumda küt cisim, öndeki çubuğun oluşturduğu ve onun iz bölgesi içerisinde yer alan girdaplı akışa maruz kalarak, yüksek türbülanslı serbest akıştakine benzer bir şekilde akış yapısı değişmektedir (Igarashi, 1997; Sarioğlu *vd.*, 2005).

Bu yöntemde, akış kontrol elemanı olarak dairesel bir çubuk kullanarak öncülük eden bir çalışma, Lesage ve Gartshore (1987) tarafından yapılmıştır. Çeşitli küt cisim geometrilerini kullandıkları çalışmada akış yapısında ani bir değişim meydana getiren kritik bir

mesafenin var olduğunu ve dairesel silindir uygulamasında sürüklenme kuvvetinde dikkate değer bir azalmanın olduğunu ifade etmişlerdir.

Igarashi ve arkadaşları dairesel kesitli küçük bir akış kontrol çubuğunun kullanıldığı, bir seri çalışmalarda bulunmuşlardır. Bu çalışmalarda, küt cisim geometrisi olarak kare prizma (Igarashi, 1997), dairesel silindir (Tsutsui ve Igarashi, 2002) ve akışa dik yerleştirilmiş dikdörtgen prizma (Igarashi ve Nabuaki, 2002) kullanılmıştır. Bu çalışmalarda, Reynolds sayısına ve iki cisim arası mesafeye bağlı olarak sürüklenme kuvvet katsayısı (C_D), Strouhal sayısı (St), model elemanlar yüzey basınç dağılımları (C_p) ve akış görüntülemeleri elde edilmiştir. Bunların sonucunda, iki cisim arası mesafeye bağlı olarak çubuk elemandan girdap kopmasının olduğu ve olmadığı iki akış yapısına ait akış karakteristiklerini ortaya koymuşlardır. Kare modelin ele alındığı çalışmada, kare model ve çubuğa ait sürüklenme kuvvetlerinin toplamının, kare modelin akış ortamında tek olarak bulunduğu durumdaki değerine kıyaslandığında, sürüklenme kuvvetindeki azalma miktarının %70 olduğu ifade edilmiştir (Igarashi, 1997). Bu oran dairesel silindir durumunda %63 olurken (Tsutsui ve Igarashi, 2002), akışa dik yerleştirilen dikdörtgen durumunda ise %20-30 civarında gerçekleşmiştir (Igarashi ve Nabuaki, 2002).

Tsutsui *vd.* (2001) dairesel kesitli kontrol çubuğu ile akış kontrolünü bir kare prizma etrafındaki ısı transferini arttırmak için uygulamışlardır. d/D 'nin 0.1'den 0.5'e kadar 5 farklı değerinde yaptıkları çalışmalarında, toplam ısı transferinde en fazla artışın görüldüğü optimum şartların $d/D=0.3$ değerinde ve kritik L/D mesafesinde oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bu akış şartında, tek kare prizmaya kıyasla ortalama ısı transferinin %35 arttığı ve her iki cisme etki eden toplam sürüklenme kuvvetinin %70 azaldığı görülmüştür. Tsutsui ve Igarashi (2006) bu akış kontrol yöntemini kullanarak bir dairesel silindir etrafındaki akışta yerel ve ortalama ısı transferini incelemişlerdir. Optimum düzenlemede silindirin ön yüzeyindeki ısı transferinin tek dairesel silindire göre dikkate değer ölçüde arttığını ve bunun toplam ısı transferinde %40'luk bir artışa neden olduğunu ortaya koymuşlardır.

Prasad ve Williamson (1997) tarafından yapılan çalışmada, kontrol elemanı olarak dairesel çubuk yerine küçük bir dik plaka kullanılmıştır. Sürüklenme kuvvetinde en fazla azalmanın olduğu en uygun konfigürasyonun, kontrol plakasının 1/3 silindir yüksekliğinde ve silindirin 1.5 D önüne yerleştirildiği durumda gerçekleştiğini ifade etmişlerdir.

Sarıoğlu *vd.* (2005) tarafından yapılan bir çalışmada, kare bir prizma önüne bir akış kontrol çubuğu yerleştirilmiş ve kare prizmanın hücum açısı çubuktan bağımsız olarak değiştirilmiştir. Kontrol çubuğu etkisiyle sürüklenme kuvvetindeki en fazla azalmanın, iki cisim arasındaki boyutsuz mesafe olan $L/D=2$

konumunda ve hücum açısının 0° değerinde gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Bu konumdaki kare model ve çubuğa ait toplam sürüklenme katsayısının tek kare modelden elde edilen değerlerin %30'u kadar (%70 azalma) olduğu belirtilmiştir.

Dairesel bir silindirin önüne yerleştirilen bir çubuk ile akış kontrolünün yapıldığı sayısal bir çalışma Zhang *vd.* (2006) tarafından gerçekleştirilmiştir. Reynolds sayısının 200 değerinde, 80000 hücreli yapılandırılmış ağ kullanarak yaptıkları modellemeyi ticari bir CFD paket programı kullanarak çözmüşlerdir. Farklı çap oranlarını kullanarak, sürüklenme katsayısının minimuma düştüğü iki cisim arası mesafenin optimum değerlerini elde etmişlerdir. Sisteme ait sürüklenme kuvvetindeki maksimum azalma $d/D=0.3$ ve 0.5 çap oranları için %28 ve %35 olarak gerçekleşirken, dairesel silindirin çalkantı kaldırma kuvvetindeki azalma sırasıyla %50 ve %73 olarak gerçekleşmiştir.

Dairesel bir kontrol çubuğunun, kare veya dairesel kesitli bir küt cismin akışa göre üst veya arka bölgedeki bir konuma yerleştirilmesiyle, özellikle küt cisimden ayrılan kayma tabakaları baskı altına alınmaktadır. Zhang *vd.* (2005), sabit duran bir kare model önüne $L/D=1.5-4.7$ arasındaki çeşitli mesafelerde yerleştirdikleri kontrol çubuğunun ardışık düzenlemesine ilave olarak düşey konumlarını da değiştirerek farklı zikzak (staggered) düzenlemeler için de test etmişlerdir. Çubuk ile kare model ardışık düzenlemede iken sürüklenme kuvvetindeki düşüşe esas olarak arka emme basıncındaki artışın sebep olduğunu, zikzak düzenleme durumunda ise çubuğun kare model üzerindeki etkisinin azalarak modelin sürüklenme kuvvetinde artışa neden olduğunu ifade etmişlerdir. Zikzak düzenleme nedeniyle oluşan en büyük yan kuvvetin değeri tek dairesel silindire ait sürüklenme kuvvetinin yaklaşık %20'sine karşılık gelmekte olduğunu ve farklı zikzak düzenleme konumlarında altı farklı akış yapısının oluştuğunu göstermişlerdir.

Sakamoto *vd.* (1991) kare kesitli bir küt cismin üst kısmına yerleştirdikleri kontrol çubuğu ile cisimden ayrılan kayma tabakalarının kontrolünü gerçekleştirerek, çubuk konumuna göre üç farklı akış yapısı olduğunu göstermişlerdir. Buna göre, birinci tip akış yapısında, çubuk kayma tabakasının alt kısmındaki iz bölgesi içerisine konumlandırılmakta ve akış yapısı tek kare durumundaki ile aynı kalmaktadır. İkinci tip akış yapısında, kontrol çubuğunun kayma tabakasının dış sınırı boyunca konumlandırılmasına bağlı olarak kayma tabakasının yuvarlanma bölgesi cismin daha uzağında gerçekleşmekte ve daha dar bir iz bölgesi oluşmaktadır. Üçüncü tip akış yapısında ise, kontrol çubuğu kayma tabakasının bükülmeye zorlayarak daha yoğunlaştırılmış bir yuvarlanma sağlamaktadır. Sakamoto *vd.* (1991) farklı çubuk çapları ve çubuk konumlarında yaptıkları bu çalışma sonucunda, zaman ortalamalı sürüklenme ve çalkantılı kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerindeki maksimum azalmanın,

çubuğun normal durumdaki (çubuksuz durumdaki) kayma tabakasının dış sınırının yakınında konuşlandırılması durumunda elde edildiğini ifade etmişlerdir. Çubuğun cismin üst tarafına konulması, cisme etki eden zaman ortalamalı sürüklenme kuvvetinden ziyade çalkantı kuvvetlerini baskılamakta olup, $d/D=0.14$ değerinde zaman ortalamalı sürüklenme kuvveti %30 düşerken, çalkantı kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerindeki düşüş sırasıyla %95 ve %75 olarak gerçekleşmiştir.

Bir küt cisim etrafındaki akışın kontrolünde bir kontrol çubuğunun kullanıldığı bu çalışmaların yanı sıra, literatürde ardışık fakat farklı çaplardaki iki küt cisimlerle ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların çoğunda iki cisim arasındaki etkileşim nedeniyle akış yapılarındaki değişimlerin yanı sıra ısı transferi karakteristikleri de incelenmiştir. Hiwada vd. (1979) ardışık iki dairesel silindiri kullandıkları çalışmada, öndeki küçük çaplı silindiri, arkadaki silindirin üzerindeki ısı transferini arttırmak için bir türbülans üreticisi gibi kullanmışlardır. Daloğlu ve Ünal (2000), başka bir cismin iz bölgesinde bulunan bir dairesel silindirdeki ortalama ısı transferini belirlemişlerdir. Öndeki cisim geometrisi olarak dairesel ve kare kesitli silindirlerin kullanıldığı çalışmada, öndeki cismin büyük olduğu farklı çap oranlarının ve iki cisim arasındaki boyutsuz mesafenin ortalama Nusselt sayısına etkisini hesaplamışlardır. Sonuçlardan, öndeki cisim şeklinin ve büyüklüğünün iz bölgesinde bulunan silindirdeki ısı transferine önemli derecede etki ettiğini ve düşük Re sayılarında cisimdeki ısı transferinin, tek başına olduğu durumdaki ısı transferine oldukça yakın olmasına karşın, yüksek Re sayılarında tek silindirdekenden önemli miktarda yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Yukarıda verilen literatür analizinde de görüldüğü üzere bir kontrol çubuğu ile yapılan akış kontrolü uygulamalarının çoğunda, kontrol çubuğu ile küt cisim akış doğrultusunda aynı eksen üzerindedir. Başka bir deyişle cisimler akışa paralel ve ardışık olarak yerleştirilmişlerdir. Cisimlerin bu şekilde konumlanması durumunda dikkate değer ölçüde akış kontrolü sağlanabilmektedir. Bununla birlikte, akışın cisimlere belirli bir hücum açısı ile gelmesi durumunda aerodinamik karakteristiklerdeki değişimler araştırılmamıştır. Halbuki, gerçek mühendislik uygulamalarında akış cisimlere sadece karşıdan değil farklı yönlerden de gelebilmektedir. Bu durumda, “kullanılan akış kontrol çubuğunun etkisi hangi hücum açılara, hangi iki cisim arası mesafelere kadar geçerlidir ve akış karakteristiklerine etkisi ne kadar olmaktadır?” soruları cevapsız kalmaktadır. Bu çalışmada, sürüklenme kuvvetinde %70 azalmaya ve ısı transferinde %40 civarında iyileşmeye neden olan akış kontrol çubuğu ile elde edilen akış yapısının hücum açısı ile değişimi ele alınmıştır. Bu amaçla, bir dairesel kontrol çubuğu ile kare prizma etrafındaki akış kontrolünde akışın sıfırdan farklı bir hücum açısı ile

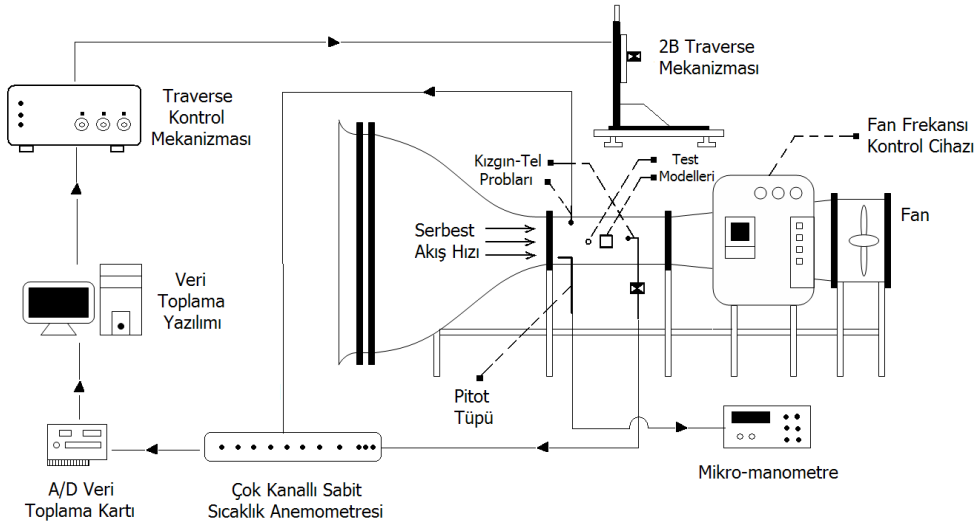
gelmesinin girdap kopması olayı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

DENEYSSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma, test bölgesi kesiti 400 mm x 400 mm olan açık çevrim, emmeli tip bir rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Tünel, 9:1 daralma oranına ve iki adet akış düzenleyici tel eleğe (screen) sahip olup test bölgesindeki türbülans şiddeti %1'in altında çıkmaktadır. Test bölgesindeki en yüksek serbest akış hızı 28 m/s olarak elde edilmiştir. Rüzgar tüneli hız ayarı, elektrik motorunun frekansını değiştirerek hassas bir şekilde yapılabilmektedir. Serbest akış hızı pitot tüpü ve daralma konisi referans basınç prizlerindeki basınç farkından ölçülmektedir. Şekil 1'de rüzgar tüneli ve ölçüm sisteminin kurulum şeması verilmiştir. Deneylede biri test modellerinin önünde sabit duran ve diğeri test modellerinin arkasında istenilen konuma hareket edebilen iki adet kızgın tel probu kullanılmış ve bunlarla eş zamanlı olarak ölçümler yapılmıştır. Test bölgesi serbest akış hızı ve kare model kenar uzunluğuna göre belirlenen Reynolds sayısı, hız ve spektrum ölçümleri için $Re=1.0 \times 10^4$ değerinde ve akış görüntüleme deneylerinde ise $Re=3.6 \times 10^3$ değerinde gerçekleştirilmiştir.

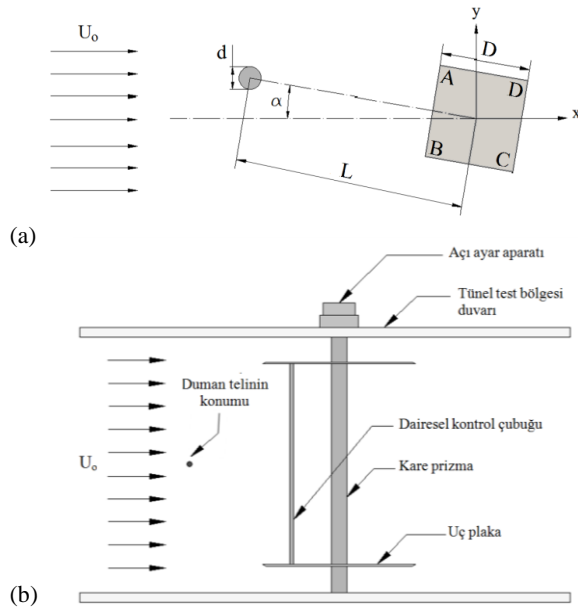
Şekil 2'de bu çalışmada kullanılan model geometrisi ve koordinat sistemi görülmektedir. Burada $D=24$ mm ve $d=6$ mm olmak üzere kullanılan test modeli ve kontrol elemanı için d/D oranı 0.25 olmaktadır. İki cisim merkezleri arasındaki mesafe L olmak üzere deneyler L/D 'nin 1, 2, 3 ve 4 değerlerinde gerçekleştirilmiştir. İki cismin akışa göre ardışık olarak durdukları $\alpha=0^\circ$ 'deki düzenlemeden başlanılmış ve Şekil 2'de görüldüğü gibi α hücum açısının istenilen değerlerine döndürülmüştür. Deneyler α açısının $0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 14^\circ, 16^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ ve 90° değerlerinde yapılmıştır. Girdap kopma frekansları cismin arkasındaki 4 farklı noktadan hız ölçümleri alınarak belirlenmiştir.

Deneylede kullanılan test modellerinden kare model kenar uzunluğu 24 mm ve genişliği tünel genişliği ile aynı olup 400 mm'dir. Bu durumda blokaj oranı %6 olmaktadır. Literatürde dairesel kesitli küt cisimler için blokaj oranının %6'yı geçmemesi istenmektedir (West ve Apeld, 1982). Bu oran kare kesitli modeller için de literatürde genel olarak aynı seviyede seçilmektedir. Bu nedenle test modelinin blokaj oranı, $BR = \% 6$ olacak şekilde kenar uzunluğu 24 mm seçilmiştir. Modelin görünüş oranı (aspect ratio) uç plakasız durumda $AR=16.7$ ve uç plakalı durumda ise $AR=13$ olmaktadır. Bu oranlarda modelin iki boyutlu kabul edilebilmesi için literatürde verilen alt sınırları fazlasıyla sağlamaktadır. Dairesel silindirler için yapılan çeşitli çalışmalarda bu oranın $AR>10$ olması durumunda akış şartlarını etkilemeyecek kadar yeterince büyük olduğundan bahsedilmektedir (West ve Apeld, 1982)



Şekil 1. Rüzgar tüneli ve ölçüm sisteminin kurulum şeması.

Bir küt cisim etrafındaki akışta, akış özelliklerini değiştiren bir diğer faktör de uç etkileridir. Uç etkileri özellikle akışın iki boyutluluğunu önemli derecede bozmakta ve cismin uç kısımlarındaki akış şartları istenmeyen ve gerçekte üç boyutlu olan etkilere sebep olabilmektedir. Fox ve West (1990) tarafından yapılan bir çalışmada, boyu $15D$ olan bir silindirde uç plaka kullanılmaması durumunda akışın test bölgesi duvar sınır tabakalarının etkisi altında olduğu, uç plaka kullanılması durumunda ise bu etkilenmenin $3.5D$ 'ye kadar düştüğü belirtilmektedir. Ayrıca alt kritik bölgede $AR > 20$ olduğu durumlarda, bu oranın uç plaka kullanmaya ihtiyaç duymayacak kadar büyük olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir (Fox ve West, 1990; Szepessy, 1993). Bu çalışmada, akışı 30° 'lik açı ile kesen, 3mm kalınlığa ve $10D$ çapa sahip dairesel uç plakaları kullanılmıştır.



Şekil 2. a) Test modellerinin ve koordinat sisteminin şematik görünümü; b) Modellerin test bölgesindeki yerleşimi.

Bu çalışmada hız ölçümleri, Dantec çok kanallı kızgın-tel (hot-wire) sabit sıcaklık anemometresi (CTA) kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerde örnekleme oranı 1000 Hz ve 2000 Hz olarak kullanılmış olup, veri sayısı her bir ölçüm için en az 8192 olarak alınmıştır. Low Pass filtre 1000 Hz olarak kullanılmıştır. Ölçümlerde Dantec 55P11 model genel maksat minyatür kızgın-tel problemleri, bilgisayar kontrollü 2-boyutlu traverse mekanizması ile akış ortamında istenilen konumlara hassas bir şekilde yerleştirilmiştir. Ölçüm verilerinin alınmasında ve bilgisayara aktarılmasında anemometreye ait bilgisayar yazılımı, NI PCI-6220 16bit 'lik A/D veri toplama kartı ile kullanılmıştır. Kartın çözünürlüğünün yüksek olması nedeniyle (önceki nesil 12 bit 'lik kartlara göre 2^4 kat daha fazla çözünürlük) anemometre ölçüm sinyaline offset ve gain işlemleri yapılmasına (sıcaklık düzeltmesi yapılabilmesi için) gerek duyulmamıştır. Ölçümlerde eş zamanlı olarak serbest akış sıcaklığı da anemometrenin sıcaklık probu ile ölçülerek hız ölçümlerinin sıcaklık düzeltmeleri gerçekleştirilmiştir.

Hız-zaman verilerinin spektral analizi yapılarak girdap kopma frekansları belirlenmiş ve girdap kopma frekansını boyutsuz olarak ifade eden Strouhal sayıları elde edilmiştir. Burada Strouhal sayısı;

$$St = \frac{f_s \cdot D}{U_0} \quad (1)$$

şeklinde girdap kopma frekansı f_s , kare model kenar uzunluğu D , ve serbest akış hızı U_0 cinsinden tanımlanmıştır. Akışın kare modele belirli bir hücum açısıyla gelmesi durumunda cismin akışa göre iz düşüm yüksekliğindeki (D') artışın girdap kopma frekansına etkisini ortaya koyan Strouhal sayısına (St') dairesel kontrol çubuğunun kullanıldığı çalışmalarda yer verilmemiştir.

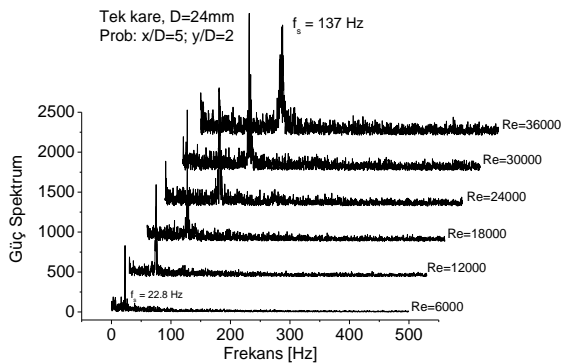
Duman-tel (smoke-wire) yöntemi ile elde edilen akış görüntülemelerinde uygun görüntü alınabilmesi için

çıkılabilecek serbest akış hızı değerinin sınırlı olması nedeniyle, bu çalışmadaki akış görüntülemeleri Reynolds sayısının, 3.6×10^3 değerinde gerçekleştirilmiştir. Akış görüntüleme deneyinin yapıldığı Re sayısı diğer hız ölçümlerinin yapıldığı Re sayısından daha küçük olmakla birlikte, her iki Reynolds sayısı değeri aralığındaki akış yapısının Re sayısı ile değişmemesi nedeniyle, yapılan akış görüntüleme deneyleri $Re=1.0 \times 10^4$ 'deki akış karakteristiklerini de ortaya koymaktadır (Sarioğlu *vd.*, 2005). Nitekim Alam *vd.* (2003), Reynolds sayısının 5.5×10^4 değerinde iki dairesel silindirin aerodinamik karakteristiğini inceledikleri çalışmada, akış gözlemini Reynolds sayısının 350 değerinde yaparak akış yapısının aynı olması (alt kritik bölgede) nedeniyle bunun yeterli olduğunu ifade etmişlerdir.

Kızgın-tel probleminin kalibrasyonu, rüzgar tüneline pitot tüpü ile elde edilen hız ölçüm değerleri kullanılarak yapılmıştır. Pitot tüpünden elde edilen serbest akış dinamik basıncı ManoAir500 model mikro-manometre ile ölçülmüştür. Bu çalışmada, Reynolds sayısı ve Strouhal sayısı için belirsizlik analizi Holman (1994) tarafından verilen bağıntılar kullanılarak yapılmış ve sırası ile $\pm \%3.2$ ve $\pm \%3.1$ olarak bulunmuştur.

BULGULAR VE İRDELEME

Burada ilk önce, yapılan çalışmanın literatür ile uyumluluğunun ve kontrol çubuğunun etkisinin ortaya konulması için literatürde iyi bir şekilde bilinen bir (tek) kare prizma etrafındaki akış karakteristiklerine yer verilmiştir. Kızgın tel probu ile $x/D=5$, $y/D=2$ konumunda elde edilen tek kare modelde ait Reynolds sayısı ile spektral yoğunluk şiddetinin değişimi Şekil 3'te görülmektedir.

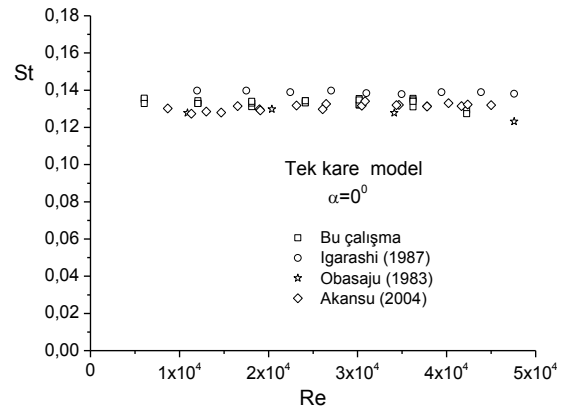


Şekil 3. Tek kare model arkasında artan Re sayısı ile güç spektrum şiddetinin ve girdap kopma frekansının değişimi.

Burada artan Reynolds sayısı ile orantılı olarak girdap kopma frekanslarını gösteren spektral piklerin frekansları da artmaktadır. Reynolds sayısının artması ile serbest akım hızı da artmakta ve iz bölgesinde daha büyük hız salınımları, güç spektrum şiddetlerinin daha büyük değerlere çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle artan Reynolds sayısı ile girdap kopma

frekanslarının yanı sıra güç spektrumlarının şiddetleri de artmaktadır.

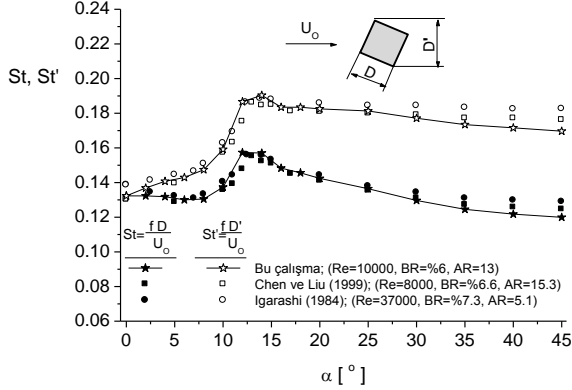
Spektral dağılım grafiklerinden tespit edilen girdap kopma frekansları (f_s) kullanılarak hesaplanan Strouhal sayılarının Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Burada görüldüğü üzere, tek kare modelin $\alpha=0^\circ$ için St sayısı 0.13 - 0.14 aralığında literatüre uygun bir değer olarak elde edilmiştir. Buradaki Re sayısı aralığı için Strouhal sayısı değişimi yaklaşık sabit olup Igarashi (1987) ve Obasaju (1983)'nin tek kare model için yapmış oldukları çalışmalardan elde ettikleri değerlerin arasında kalmaktadır.



Şekil 4. Tek kare model arkasında elde edilen Strouhal sayısının Re sayısı ile değişimi.

Tek kare model etrafındaki akışta, hücum açısı'nın değişmesi durumunda St sayılarının dağılımları Şekil 5'te verilmiştir. Strouhal sayısının hücum açısı ile değişiminin elde edildiği ölçümler her hücum açısında üç defa tekrarlanmış olup, bunların ortalaması grafikte sürekli çizgili yıldız sembolü ile gösterilmiştir. Şekil 5'de Strouhal sayısı, hem kare model kenar uzunluğuna ve hemde kare modelin serbest akışa göre izdüşüm yüksekliğine göre hesaplanarak St ve St' notasyonlarıyla birarada sunulmuştur. St dağılımı hücum açısına bağlı olarak hem akış yapısındaki değişimin ve hemde cismin izdüşüm yüksekliğindeki değişimin girdap kopma frekansı üzerine olan etkisini içermektedir. St' değerinin hesaplanmasında cismin izdüşüm yüksekliği kullanıldığı için hücum açısına bağlı olarak akış yapısındaki değişimin girdap kopma frekansı üzerindeki etkisini net olarak ortaya koymaktadır. Şekilde görüldüğü üzere artan hücum açısı ile birlikte St sayısı artmakta ve $\alpha=12^\circ$ civarında bir sıçrama meydana gelmektedir. Bu açıda kare modelin ön alt köşesinden kopan kayma tabakası kare modelin alt yüzeyinde yeniden tutunmakta ve daha sonra kare modelin alt arka köşesinden ayrılarak daha dar bir iz bölgesi oluşturmaktadır. Aynı serbest akış hızında iz bölgesinin daralması girdap oluşum bölgesinin kare modelin daha arkasına kaymasına neden olmaktadır. Böylece daha küçük ama daha yüksek frekanslı girdap kopmaları meydana gelmektedir. Hücum açısının daha da artmasıyla akış yapısı değişmemekle birlikte, $\alpha=45^\circ$ 'ye kadar St' sayısı bir miktar azalmaktadır. Bu durum, hücum açısına bağlı

olarak kare modelin ön üst ve alt arka köşesinden ayrılan kayma tabakasının yüzeyden ayrılma (sapma) açısının iz bölgesi genişliği ve girdap oluşum uzunluğunu değiştirmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu hücum açısı aralığında, St sayısı St'ne göre daha fazla azalmaktadır. Bu durum cismin iz düşüm yüksekliğinin (D') artması nedeniyle girdap kopma frekansındaki azalmanın bir sonucudur.



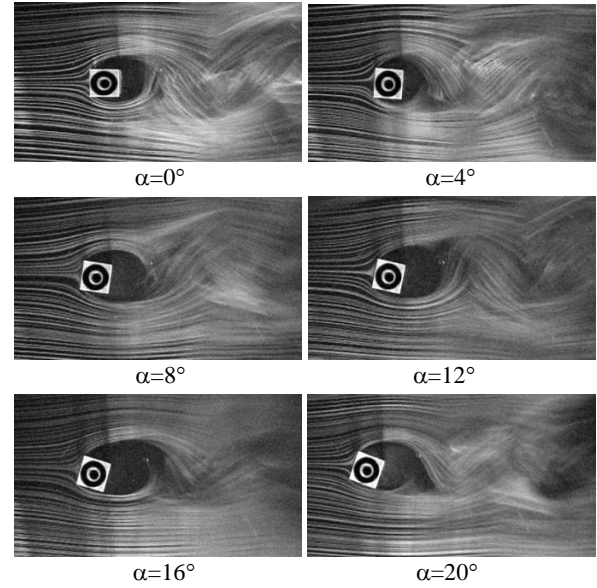
Şekil 5. Tek kare modelde Strouhal sayısının hücum açısı ile değişimi.

Strouhal sayısının α ile değişimi literatür ile büyük bir uyum içerisindedir (Igarashi, 1984; Chen ve Liu, 1999). Ancak, bu çalışmada yüksek hücum açılarında elde edilen değerlerin literatürdeki değerlerden bir miktar daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, Reynolds sayısındaki farklılıklardan ziyade, literatürdeki her iki çalışmaya ait blokaj ve görünüş oranlarının sunulan çalışmadan olan farklılığının bir sonucu olarak özellikle yüksek hücum açılarında ortaya çıkmaktadır. Blokaj oranının daha yüksek olduğu veya görünüş oranının daha düşük olduğu durumlarda test bölgesi içerisinde cisimlerin etrafından geçen akışkanın hızının daha da artmış olması girdap kopma frekansının da daha yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca serbest akışa ait türbülans şiddetlerindeki farklılıklarda bu değişimde etkili olabilmektedir.

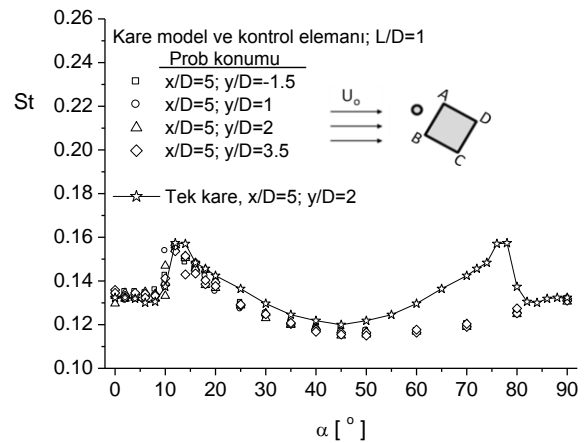
Duman-tel yöntemi ile elde edilen tek kare model etrafındaki akış görüntüleme fotoğrafları Şekil 6'da sunulmuştur. Burada, $\alpha=0^\circ$ hücum açısında kare modelin ön kenarının alt ve üst köşelerinden ayrılan akışın kare modelin arkasında iz bölgesi içerisine doğru yuvarlandıkları belirgin bir şekilde görülmektedir. Hücum açısının $\alpha=12^\circ$ 'ye yükseltilmesi ile birlikte kare modelin ön alt köşesinden ayrılan kayma tabakası kare modelin alt yüzeyinde yeniden tutunmakta ve akış ayrılması kare modelin alt arka köşesinden gerçekleşmektedir. Bu ise girdap oluşumunun kare modelin daha arkasına kaymasına neden olmakta ve girdap kopma frekansında ani bir artışın olduğu, akış yapısında önemli bir değişime karşılık gelmektedir.

Akış kontrol elemanının $L/D=1$ konumunda olduğu durumda Strouhal sayısının hücum açısı ile değişimi Şekil 7'de görülmektedir. Burada, akış alanındaki dört

farklı prob konumundan elde edilen Strouhal sayıları tek kare modele ait değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu L/D mesafesinde, kontrol elemanın kare modelin önünde olduğu $\alpha=0^\circ$ hücum açısındaki St sayısı tek kare ile aynı seviyede oluşmaktadır. Bu durumda dairesel elemandan ayrılan kayma tabakaları kare modelin ön yüzeyi üzerinde yeniden tutunmakta ve bu yüzeyin üst ve alt (A ve B) köşelerinden tek karedekine benzer bir şekilde ayrılmaktadırlar. Özellikle $\alpha=20^\circ$ 'lik hücum açısına kadar kontrol elemanın kare model etrafındaki akış yapısını değiştirmedikleri anlaşılmaktadır. Bu açıdan sonra kontrol elemanının iki cisim arasından geçen ve kare modelin A köşesinden ayrılan kayma tabakasını baskı altına almasının bir sonucu olarak bu köşeden ayrılan kayma tabakası, tek karedekine göre cisim arkasında daha kısa mesafede yuvarlanmaya başlamaktadır. Bu ise girdap kopma frekansına az da olsa bir düşüş olarak yansımaktadır. Özellikle, $\alpha=50^\circ$ 'den sonraki hücum açılarında kare modelin AB kenarı akışa göre yukarı doğru kaymaktadır.

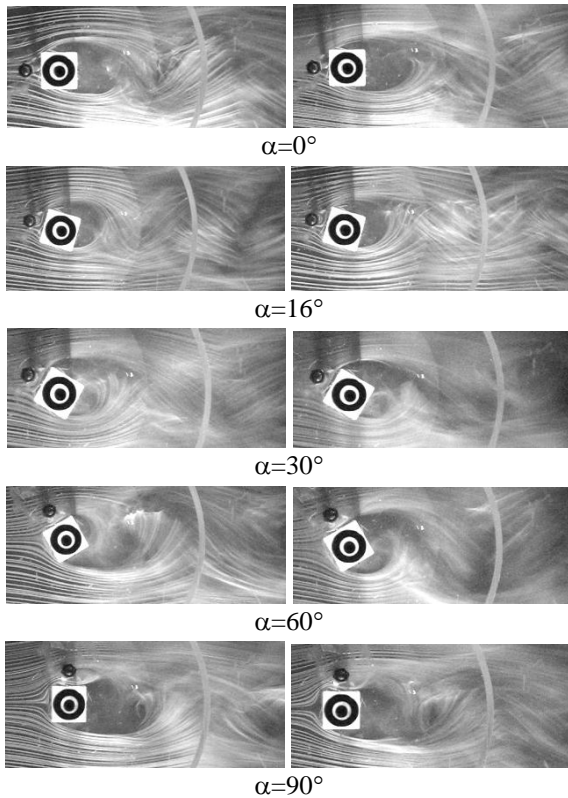


Şekil 6. Farklı hücum açılarındaki tek kare model etrafındaki akış görüntüleme fotoğrafları.



Şekil 7. $L/D=1$ konumunda dört farklı ölçüm noktasından elde edilen St sayısının hücum açısı ile değişimi.

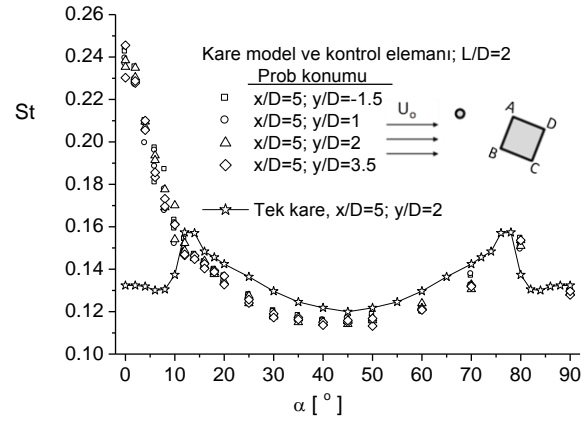
Şekil 8’de $\alpha=60^\circ$ ’deki fotoğrafta görüldüğü üzere kare model üzerindeki durma noktası BC kenarı üzerinde gerçekleşmektedir. Tek kare durumunda A köşesinden ayrılan kayma tabakası iz bölgesi genişliğini oluştururken, bu hücum açısından sonra kontrol elemanından ayrılan kayma tabakası iz bölgesinin üst sınırını oluşturmaktadır. Bu nedenle, tek kare durumunda $\alpha=12^\circ$ ’nin simetrisi olan ve $\alpha=78^\circ$ ’de görülen sıçrama, kontrol elemanının $L/D=1$ durumunda görülmemektedir. Hücum açısının 90° olması durumunda, AB kenarı akışa göre tamamen kare modelin üst kısmına gelmektedir. Şekil 8’de görüldüğü üzere B köşesinden ayrılan kayma tabakası kare modelin AB kenarı üzerinde yeniden tutunmaktadır. İz bölgesinin üst tarafındaki akış tabakası, iki cisim arasındaki akış ile kontrol elemanından ayrılan kararsız yapıdaki akışın birleşmesi neticesinde oluşmaktadır.



Şekil 8. $L/D=1$ mesafesinde farklı hücum açılarındaki akış görüntüleme fotoğrafları.

Şekil 9’da akış kontrol elemanının $L/D=2$ konumunda olduğu durumdaki Strouhal sayısının hücum açısı ile değişimi verilmiştir. Bu konumda düşük hücum açılarında elde edilen akış görüntüleme fotoğrafları da Şekil 10’da görülmektedir. Hücum açısının $\alpha=0^\circ$ olması durumunda, kontrol elemanı kare model etrafındaki akış yapısında önemli bir değişime neden olmaktadır. Literatürde, sürüklenme kuvvetinde %70’e varan azalmaların görüldüğü bu akış yapısında, dairesel kontrol elemanı üzerinden ayrılan kayma tabakaları kare modelin ön yüzeyi üzerinde köşelere yakın konumlarda yeniden tutunmakta ve iki cisim arasında düşük basınçlı bir boşluk oluşmaktadır. Ayrıca, kontrol elemanının

yönlendirmiş olduğu akış tabakaları kare modelin üst ve alt kenarlarının tek kare durmundakine göre oldukça yakından geçerek dar bir iz bölgesi oluşturmaktadır. Bu dar iz bölgesi cisim arkasındaki basıncın tek kare durmundakine göre artmasına ve daha yüksek frekanslı girdap kopmalarının gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu hücum açısında St sayısı 0.24 civarında gerçekleşmekte olup neredeyse tek kare durumundaki değerin iki katında oluşmaktadır. Sürüklenme kuvvetinde önemli düşüşlerin elde edildiği bu akış yapısı $\alpha=12^\circ$ ’ye kadar tamamen bozulmaktadır.

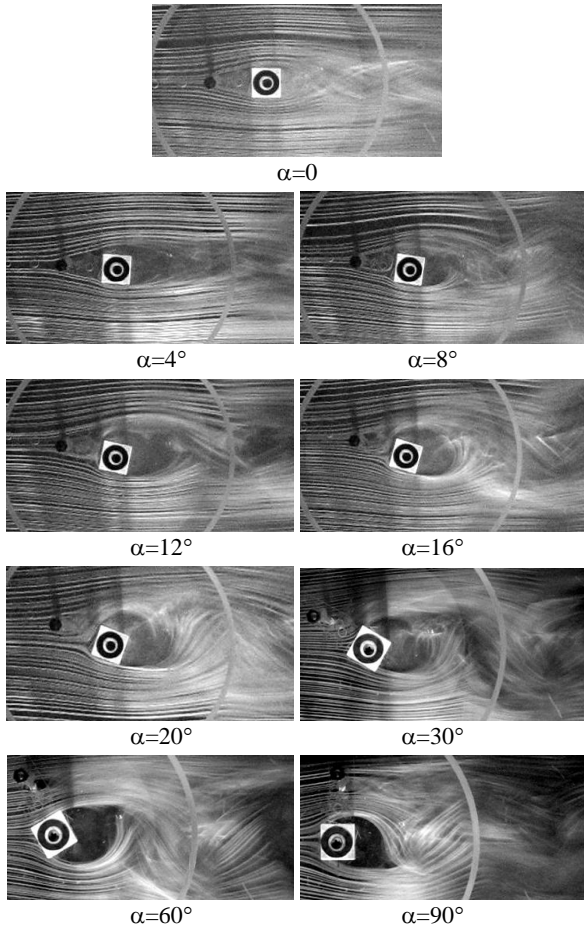


Şekil 9. $L/D=2$ ’de St sayısının hücum açısı ile değişimi.

Şekil 10’da $\alpha=4^\circ$ durumundaki akış görüntüsüne bakıldığında kontrol elemanının üst kenarından ayrılan kayma tabakasının kare modelin üst köşesinden tutunmadığı ve iz bölgesinin genişlediği görülmektedir. Burada iki cisim arasında hala bir boşluk oluşmakla birlikte, iz bölgesinin genişlemesi St sayısının düşmesine neden olmaktadır. Hücum açısının $\alpha=8^\circ$ olduğu durumdaki akış görüntüsüne bakıldığında kontrol elemanının alt kenarından ayrılan kayma tabakası kare modelin AB kenarı üzerinde yeniden tutunmaktadır. Bu tutunan akışın kare modelin üst köşesine doğru olması nedeniyle iki cisim arasındaki boşluk bölgesi giderek küçülmektedir. Bu açıda kontrol elemanın serbest akışa ait kayma tabakalarını hala yönlendiriyor olması nedeniyle kare modelin alt yüzeyinden geçen kayma tabakaları bu kenara çok yakın olarak geçmekte ve tek kare modelde $\alpha=12^\circ$ ’de görülen akış yapısında olduğu gibi bir etki oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu hücum açısındaki St sayısı 0.17 civarında elde edilmekte ve tek kareye ait değerin üzerinde çıkmaktadır. Hücum açısının $\alpha=12^\circ$ durumundaki akış görüntüsüne bakıldığında, tek kare durumunda olduğu gibi serbest akışa ait kayma tabakalarının kare modelin ön kenarı üzerinde tutunmaya başladıkları görülmektedir. Bu hücum açısında iki cisim arasındaki boşluklu akış yapısı tamamen ortadan kalkmaktadır.

Şekil 10’daki $\alpha=12^\circ$ ’den 20° ’ye kadar olan fotoğraflarda görüldüğü üzere kontrol elemanının kare model üzerindeki etkisi neredeyse tamamen ortadan kalkmış bulunmaktadır. Bu açılarda St sayısı tek kareye ait değerin biraz aşağısında elde edilmektedir. Burada,

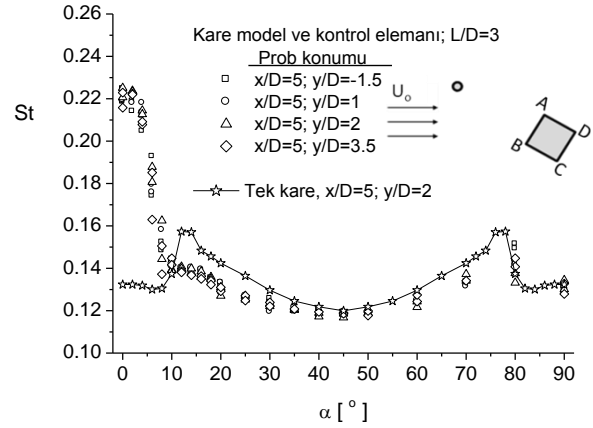
kontrol elemanından ayrılan kayma tabakalarının cisim arkasında oluşturduğu girdapların dar bir iz akışı olarak, kare modelin ön üst köşesinden ayrılan kayma tabakalarını etkilemesi söz konusudur. Hücum açısına bağlı olarak kontrol elemanının kare modelin iz bölgesinin büyümesine neden olması ve kare modelin yukarısında yüksek türbülanslı akış oluşturması nedeniyle girdap kopma frekansları bu hücum açılarında daha düşük çıkmaktadır. Şekil 10'da $\alpha=30^\circ$ 'deki kontrol elemanına ait iz akışı kare modelin üstünden ayrılan kayma tabakasıyla tamamen birleştiği görülmektedir. Hücum açısının artması ile kontrol elemanı ve dolayısıyla onun iz akışı kare modelden uzaklaşmaktadır. Kare model etrafında $\alpha=90^\circ$ 'deki akış yapısı, tek kareye ait 0° 'deki akış yapısıyla aynı özelliktedir ve bu açıdaki St sayısı tek kare modele ait değere çok yakın çıkmıştır.



Şekil 10. $L/D=2$ mesafesinde farklı hücum açılarındaki akış görüntüleme fotoğrafları.

İki cisim arasındaki mesafenin $L/D=3$ değerindeki Strouhal sayılarının hücum açısı ile değişimi Şekil 11'de görülmektedir. Burada $\alpha=0^\circ$ 'deki Strouhal sayısı $L/D=2$ durumunda olduğu gibi tek kareye ait değerin oldukça üzerinde çıkmaktadır. Dolayısıyla bu iki cisim arasındaki mesafede de iki cisim arası boşluklu akış yapısı devam etmektedir. İki cisim arası mesafenin artmış olmasından dolayı, hücum açısının artmasıyla kontrol elemanı daha fazla açısal yer değiştirme

yapmaktadır. Bundan dolayı, $L/D=3$ konumunda kontrol elemanının girdap kopma frekansı üzerindeki etkisini yitirmesi, $L/D=2$ 'dekine nazaran daha düşük hücum açılarında olmaktadır. Hücum açısının $\alpha=10^\circ$ olduğu durumda Strouhal sayısı tek kare ile aynı seviyeye düşmektedir. Tek kare etrafındaki akışta $\alpha=12^\circ$ 'de görülen St sayısındaki sıçrama, kontrol elemanının oluşturduğu iz akışının kare modelin üst köşesinden (A köşesi) ayrılan akış tabakalarını kararsızlaştırması nedeniyle elde edilememektedir.

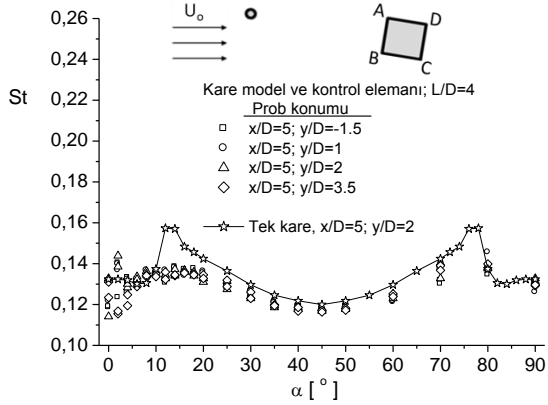


Şekil 11. $L/D=3$ 'te St sayısının hücum açısı ile değişimi

Hücum açısının daha da artmasıyla cismin iz düşüm yüksekliğinin artmasına bağlı olarak $\alpha=30^\circ$ 'de St sayısı yavaş bir şekilde azalmaya devam etmektedir. $\alpha=45^\circ$ durumunda kontrol elemanının A köşesinden ayrılan kayma tabakası üzerine etkisi nereseyse hiç kalmamakta ve St sayısı tek kareninki ile yaklaşık aynı çıkmaktadır. Hücum açısının $\alpha=60^\circ$ ve 70° değerlerinde, St sayısının tek kareye ait değerlerden yeniden sapmaya başlaması, bu açılarda kare model yüzeyinden gerçekleşen akış ayrılması B köşesine geçmesinden kaynaklanmaktadır. Bu açılarda akışın durma noktası BC kenarı üzerinde oluşmakta ve B köşesinden ayrılan akış AB kenarı üzerinde yeniden tutunmaktadır. $\alpha=80^\circ$ 'de St sayısındaki düzensizlik, bu açıda AB kenarı üzerinde akışın yeniden tutunması veya tutunmaması olaylarının kararsız bir şekilde gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Hücum açısının $\alpha=90^\circ$ olması durumunda B köşesinden ayrılan kayma tabakası AB yüzeyinde yeniden tutunma olmaksızın cisim arkasına yuvarlanmaktadır. Aradaki mesafenin kontrol elemanının oluşturduğu ize göre nispeten büyük olması nedeniyle, kare modelin tam üzerinde bulunan kontrol elemanın etkisi artık hissedilmemektedir.

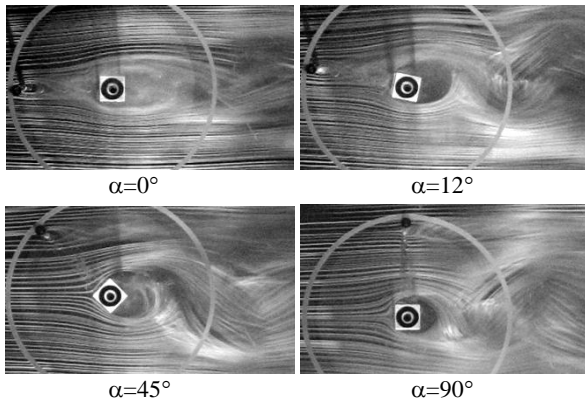
Şekil 12'de akış kontrol elemanının $L/D=4$ konumunda olduğu durumdaki Strouhal sayısının hücum açısı ile değişimi görülmektedir. Hücum açısının sıfır olduğu durumda St sayısı tek kareye ait değer altında kalmaktadır. Dolayısıyla bu L/D mesafesinde, iki cisim arasındaki boşluklu akış yapısından, kontrol elemanından girdap kopmalarının görüldüğü akış yapısına geçişin olduğu anlaşılmaktadır. Yani iki cisim arası mesafe, kritik L/D mesafesinden daha büyük

değerdedir. Bu akış yapısında kare model kontrol elemanının oluşturduğu yüksek türbülanslı bir akışa maruz kalmaktadır. Yüksek türbülanslı serbest akışa maruz kalan tek küt cisimlerde olduğu gibi cisim arka basıncı artmaktadır ve ayrılan kayma tabakalarının cisim yüzeyinde yeniden tutunması söz konusu olabilmektedir. Bu kritik üstü L/D mesafesinde, $\alpha=6^\circ$ 'ye kadar yüksek türbülanslı olarak kontrol elemanından kare modele gelen akış kare modelin hem üst hem de alt kenarından geçmekte ve St sayısı bu açılarda kararsız bir dağılım sergilemektedir.



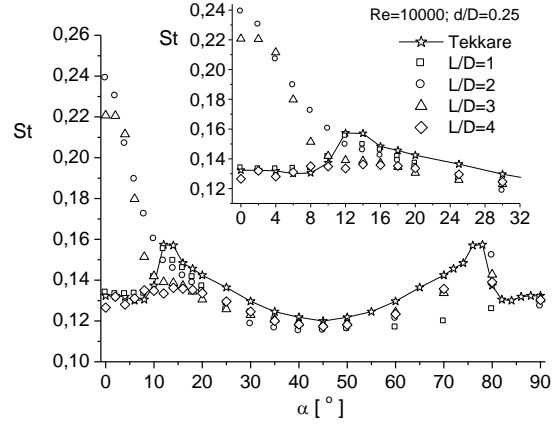
Şekil 12. $L/D=4$ konumunda dört farklı ölçüm noktasından elde edilen St sayısının hücum açısı ile değişimi

Hücum açısının daha da artması ile kontrol elemanının oluşturduğu iz akışı kare modelin sadece üst köşesinden geçen akışı etkilerken alt köşeden serbest akışa ait kayma tabakasının ayrılması söz konusu olmaktadır. Bu durum Şekil 13'teki $\alpha=12^\circ$ 'lik hücum açısına ait akış görüntüleme fotoğrafından da net olarak görülmektedir. Hücum açısının bu değerlerinde kontrol elemanın etkisi, $L/D=2$ ve 3 durumlarında olduğu gibi olmakta ve St sayısı tek kareye ait değerlerin altında kalmaktadır.



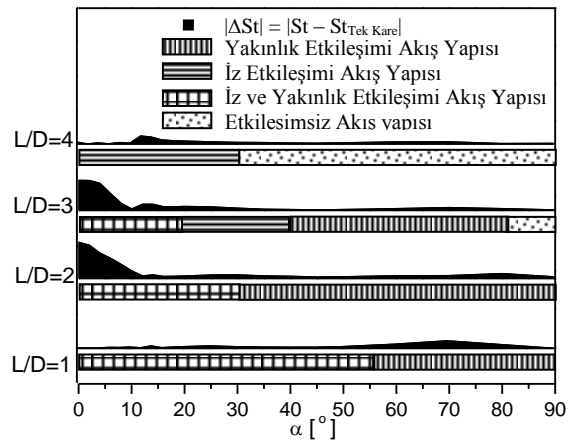
Şekil 13. $L/D=4$ mesafesinde farklı hücum açılarındaki akış görüntüleme fotoğrafları

Şekil 14'te, yukarıda verilen Strouhal sayısı dağılımlarında görülen dört farklı konumdan elde edilen değerlerin ortalamaları tek kare modele ait St sayısı dağılımı ile birlikte verilmiştir. Burada iki cisim arası mesafeye bağlı olarak hücum açısının etkisi belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 14. $L/D=1, 2, 3$ ve 4 aralıklarında dört farklı noktadan elde edilen Strouhal sayılarının ortalama değerlerinin hücum açısı ile değişimi.

Kontrol elemanın kare model etrafındaki akışta girdap kopma yapısı üzerindeki etki düzeyini ortaya koyabilmek için her bir L/D düzenlemesindeki Strouhal sayılarının tek kare modele ait değerlerden olan farklarının hücum açısı ile değişimi Şekil 15'de verilmiştir. Burada ayrıca Zdravkovich (2003) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre hücum açısına bağlı olarak cisimlerdeki etkileşim türünün dağılımları da görülmektedir. Akış yapıları arasındaki geçişler her ne kadar kesin bir çizgiyle birbirinden ayrılmasa da, burada yaklaşık değerler olarak sınıflandırma yapılmıştır. Kontrol elemanı, $L/D=2$ ve 3 değerlerinde $\alpha=10^\circ$ civarına kadar Strouhal sayısını önemli oranda değiştirmektedir. Yani bu değerlerde, $d/D=0.25$ çap oranındaki dairesel silindir bir pasif akış kontrol aygıtı olarak işlev görebilmektedir ancak akışın daha büyük bir hücum açısı ile gelmesi durumunda girdap kopma frekansı üzerine etkisi neredeyse hiç olmamakta ya da çok daha az seviyede kalmaktadır. İki cisim arası mesafenin en küçük değeri olan $L/D=1$ aralığında $\alpha=50^\circ$ 'ye kadar, akış yapısı iz ve yakınlık etkileşimi şeklinde olmasına rağmen Strouhal sayısında önemli bir değişim ortaya çıkmamıştır.



Şekil 15. Kontrol elemanı ile Strouhal sayısında elde edilen değişim miktarının ve akış yapılarının hücum açısına göre dağılımları.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, kare kesitli bir küt cisim etrafındaki akışın bir dairesel çubuk ile kontrolünde, hücum açısının girdap kopma olayına etkisi, Reynolds sayısının 1.0×10^4 değerinde deneysel olarak incelenmiştir. Dairesel kontrol elemanının çapının kare model kenar uzunluğuna oranı $d/D = 0.25$ değerinde olup, deneyler iki cisim arasındaki boyutsuz mesafe olan L/D 'nin 1, 2, 3 ve 4 değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Akışın cisimlere $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ aralığındaki bir hücum açısı ile gelmesi durumunda, kontrol elemanının etkisini ortaya koyabilmek için sonuçlar tek kare modele ait değerlerle karşılaştırılmıştır.

Tek kare modele ait Strouhal sayılarında $\alpha=12^\circ$ civarında bir sıçrama oluşmaktadır. Bu durum literatürde kare modelin ön yüzeyinin alt köşesinden ayrılan akışın kare modelin alt yüzeyinde yeniden tutunması ve alt arka köşesinden yeniden ayrılması nedeniyle oluşan daha dar bir iz bölgesinin sonucu olarak açıklanmaktadır.

Hücum açısının sıfır olduğu durumda, $L/D=1$ durumunda akış kontrol elemanı girdap kopma yapısında önemli bir etki oluşturmazken, $L/D=2$ ve 3 konumlarında sürüklenme kuvvetinde önemli azalmalara neden olan kopma frekansının yüksek olduğu akış yapısı elde edilmiştir. Bu akış yapısında kontrol elemanından ayrılan akış tabakaları iki cisim arasında girdap caddesi oluşturmaksızın kare modelin alt ve üst kenarlarından geçerek kare modelin arkasında dar bir iz bölgesi oluşturmaktadır. $L/D=4$ konumunda kontrol elemanından ayrılan akış tabakalarının yuvarlanarak iki cisim arasında girdap caddesini oluşturduğu akış yapısı elde edilmiştir.

$L/D=1$ konumunda hücum açısının $\alpha=50^\circ$ 'ye kadar Strouhal sayısında tek kare modele göre önemli bir değişim olmamıştır. Bu durum iki cisim arasındaki mesafenin çok yakın olması nedeniyle kontrol elemanından ayrılan kayma tabakalarının kare modelin ön yüzeyinde yeniden tutunmasının ve akış ayrılmalarının tek kare model durumundakine benzer şekilde gerçekleşmesinin bir sonucudur. $\alpha=50^\circ - 80^\circ$ aralığında girdap kopma frekanslarının tek kare modele ait değerlerden daha düşük çıkması, serbest akışa göre kare modelin üst kısmına kayan kontrol elemanından ayrılan akış tabakaları kare modelin üst kısmından ayrılan akış tabakalarıyla birlikte iz bölgesini genişletmesinden kaynaklanmaktadır.

$L/D=2$ konumunda sıfır hücum açısında elde edilen akış kontrol mekanizmasının yaklaşık $\alpha=10^\circ$ civarına kadar artan hücum açısı ile azalarak devam ettiği görülmüştür. $L/D=3$ durumunda bu düşüş daha hızlı gerçekleşmekte ve kare model kontrollü akış yapısından daha çabuk çıkmakta ve hücum açısının daha da artırılması ile akış kontrol çubuğunun girdap oluşum yapısı üzerindeki etkisi tamamen ortadan kalkmaktadır.

Bu çalışma ile, literatürde pasif akış kontrol yöntemlerinden biri olarak kullanılan bir cismin önüne yerleştirilen bir kontrol elemanı ile akış kontrolünün sadece çok küçük hücum açılara kadar sağlanabildiği, daha büyük açılarda akış yapısındaki değişime bağlı olarak bu yöntemin etkisini kaybettiği ortaya konulmuştur. Akış görüntüleme fotoğraflarıyla beraber sunulan deneysel verilerin ışığında iki cisim arası mesafeye ve hücum açısına bağlı olarak ortaya çıkan girdap kopma karakteristiklerindeki değişimlerin sınıflandırılmasında bulunulmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya, 105M241 numaralı proje kapsamında verdikleri finansal destek dolayısıyla TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Akansu, Y. E., *Ardışık Olarak Yerleştirilen Farklı Geometrilere Sahip Küt Cisimlerin Aerodinamik Karakteristiklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004.

Alam, Md.M., Moriya, M. and Sakamoto, H., Aerodynamic Characteristics of Two Side-by-Side Circular Cylinders and Application of Wavelet Analysis on the Switching Phenomenon, *J. Fluid. Struct.*, 18, 325-346, 2003.

Chen, J. M. and Liu, C. H., Vortex Shedding and Surface Pressures on a Square Cylinder at Incidence to a Uniform Air Stream, *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 20-6, 592-597, 1999.

Daloglu, A. and Unal, A., Heat Transfer from a Cylinder in the Wake Flow, *Int. Commun. Heat and Mass Trans.*, 27, 569-580, 2000.

Fox, T.A. and West, G.S., On the Use of End Plates with Circular Cylinders, *Exp. Fluids*, 9, 237-239, 1990.

Hiwada, M., Taguchi, T., Mabuchi, I. and Kumada, M., Fluid Flow and Heat Transfer Around Two Circular Cylinders of Different Diameters in Cross Flow, *Bulletin of the JSME*, 22-167, 715-723, 1979.

Holman, J.P., *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill Book Company, NewYork, 1994.

Igarashi, T., Characteristics of the Flow around a Square Prism, *Bulletin of the JSME*, 27-231, 1858-1865, 1984.

Igarashi, T., Fluid Flow and Heat Transfer around Rectangular cylinders (The Case of a Width/Height Ratio of a Section of 0.33~1.5), *Int. J. Heat Mass Tran.*, 30, 893-901, 1987.

Igarashi, T., Drag Reduction of a Square Prism by Flow

Control Using a Small Rod, *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 69-71, 141-153, 1997.

Igarashi, T. and Nobuaki, T., Drag Reduction of Flat Plate Normal to Airstream by Flow Control Using a Rod, *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 90, 359-376, 2002.

Lesage, F. and Gartshore, I.S., A Method of Reducing Drag and Fluctuating Side Force on Bluff Bodies, *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 25, 229-245, 1987.

Obasaju, E. D., An Investigation of the Effects of Incidence on the Flow around a Square Section Cylinder, *Aeronautical Quarterly*, 34, 243-259, 1983.

Prasad, A. and Williamson, C. H. K., A Method for the Reduction of Bluff Body Drag, *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 69, 155-167, 1997.

Sakamoto, H., Tan, K. and Haniu, H., An Optimum Suppression of Fluid Forces by Controlling a Shear Layer Separated from a Square Prism, *J. Fluid. Eng.-T. ASME*, 113, 183-189, 1991.

Sarioglu, M., Akansu, Y. E. and Yavuz, T., Control of the Flow around a Square Cylinder at Incidence by Using a Rod, *AIAA J.*, 43-7, 1419-1426, 2005.

Szepessy, S., On the Control of Circular Cylinder Flow by End Plates. *Eur. J. Mech. B-Fluid.*, 12, 217-244, 1993.

Tsutsui, T., Igarashi, T. and Nakamura, H., Drag Reduction and Heat Transfer Enhancement of a Square Prism, *JSME Int. J., Ser. B*, 44-4, 575-583, 2001.

Tsutsui, T., Igarashi, T., Drag Reduction of a Circular Cylinder in an Air-Stream, *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 90, 527-541, 2002.

Tsutsui, T. and Igarashi, T., Heat Transfer Enhancement of a Circular Cylinder, *J. Heat Trans.-T. ASME*, 128, 226-233, 2006.

West, G. S. and Apeld, C. J., The Effects of Tunnel Blockage and Aspect Ratio on the Mean Flow Past a Circular Cylinder with Reynolds Numbers Between 10^4 - 10^5 , *J. Fluid Mech.*, 114, 361-377, 1982.

Zhang, P. F., Wang, J. J., Lu, S. F. and Mi, J., Aerodynamics Characteristics of a Square Cylinder with a Rod in a Staggered Arrangement, *Exp. Fluids*, 38, 494-502, 2005.

Zhang, P. F., Wang, J. J. and Huang, L. X., Numerical Simulation of Flow around Cylinder with an Upstream Rod in Tandem at Low Reynolds Numbers, *Appl. Ocean Res.*, 28, 183-192, 2006.

Zdravkovich, M. M., *Flow around Circular Cylinders Vol 2: Applications*, Oxford University Press, 2003.



Yahya Erkan AKANSU, 1972 yılında Kayseri’de doğdu. Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünden 1993 yılında mezun oldu. Aynı yıl Niğde Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünden, 1998 yılında Yüksek Lisans, 2004 yılında da Doktora derecesini aldı. 2005 yılında Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Enerji Anabilim Dalı’na Yrd. Doç. olarak atandı. Halen aynı üniversitede görevini sürdürmektedir.



Mehmet ÖZMERT, 1983 yılında Kayseri’de doğdu. 2007 yılında Niğde Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünü bitirdi. Aynı yıl Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans’a başladı. Halen Yüksek Lisans tez çalışmasına devam etmektedir.



Erhan FIRAT, 1985 yılında Adana’da doğdu. 2004 yılında Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. 2008 yılında buradan mezun olduktan hemen sonra aynı Üniversitede Yüksek Lisans’a başladı. 2010 yılında Tunceli Üniversitesinde Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak atanmış olup halen bu göreve ve Yüksek Lisans çalışmalarına devam etmektedir.