



AÇIK BİR KAVİTE İÇİNDE DÖNEN SİLİNDİRLE AKTİF AKIŞ KONTROLÜ: ISI TRANSFERİ VE AKIŞ ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

İrem DALGIÇ, Nehir TOKGOZ*, Coşkun ÖZALP

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Açık Kavite Akışı, Dönen Silindir, Isı Transferi, HAD.</i>	Kavite akışı içerisinde dönen adyabatik bir silindir varlığının akış yapısı ve ısı transfer üzerindeki etkisinin incelendiği sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada uzunluk ve derinlik oranı (D/L) 2 olan açık bir kavite içerisine 0.025m çapa sahip adyabatik bir silindir yerleştirilmiştir. Silindir kavite içerisinde 11 farklı konuma yerleştirilmiş ve bu konumlarda 6 farklı dönme hızı tanımlanmıştır. Silindir çapı ile tanımlanan Reynolds sayısı 10000 olarak belirlenmiştir. Isı transfer analizi için kavite duvarlarına 10000 W/m ² değerinde sabit ısı akışı uygulanmış, sonlu hacimler yöntemi kullanılarak çözümlenmeler yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları kavite içerisinde silindirin kullanılmadığı boş kavite akışı olarak ifade edilmiş olan durum dikkate alınarak incelenmiştir. Boş kavite akışına nispeten silindire farklı konumlarda tanımlanan dönme hızları akış yapısını ve ısı transferini iyileştirici yönde etki sağladığı gözlemlenmiştir.

ACTIVE FLOW CONTROL INSIDE AN OPEN CAVITY WITH ROTATING CYLINDER: NUMERICAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER AND FLOW CHARACTERISTICS

Keywords	Abstract
<i>Open Cavity Flow, Rotating Cylinder, Heat Transfer, CFD.</i>	A numerical study is carried out to examine the effect of the presence of an adiabatic cylinder rotating in the cavity flow on the flow structure and heat transfer. In the study, an adiabatic cylinder with a diameter of 0.025 m is placed in an open cavity with a length to depth ratio (D/L) of 2. The cylinder is placed in 11 different positions in the cavity and 6 different rotational speeds are defined in these positions. The Reynolds number defined by the cylinder diameter is determined as 10000. For heat transfer analysis, a constant heat flux of 10000 W/m ² is applied to the cavity walls and analyzes are made using the finite volume method. The results of the study are examined by considering the situation expressed as empty cavity flow where the cylinder is not used in the cavity. It has been observed that the rotational speeds defined in different positions to the cylinder relative to the empty cavity flow provide an improvement in the flow structure and heat transfer.

Alıntı / Cite

Dalgıç, İ., Tokgoz, N., Ozalp, C., (2021). Açık Bir Kavite İçinde Dönen Silindire Aktif Akış Kontrolü: Isı Transferi ve Akış Özelliklerinin Sayısal İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(4), 1348-1371.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

İ. Dalgıç, 0000-0002-3340-5915
N. Tokgoz, 0000-0001-9264-9971
C. Ozalp, 0000-0003-2249-7268

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	09.06.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	12.09.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	15.09.2021
Yayın Tarihi / Published Date	20.12.2021

1. Giriş (Introduction)

Kaviteler basit bir geometriye sahip olmalarına rağmen içerisindeki akışın kararsız yapısı, kayma tabakası dengesizlikleri, basınç dalgalanmaları, güçlü akustik dalgaların ve resirkülasyon bölgelerinin oluşması açısından 1950'li yıllardan beri ilgi ile incelenen mühendislik problemlerinden biri olmuştur. Uzun yıllar boyunca yürütülen birçok deneysel, teorik ve sayısal çalışmada kavite akışının serbest akış hızı, akışın sınır tabaka özellikleri ve kavite geometrisindeki karakteristik boyutların oranları (L/D ve L/W) gibi çeşitli parametrelere çok güçlü bir şekilde bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak kaviteler uzunluk ve derinlik oranlarına göre (L/D) "Açık" ve "Kapalı" kaviteler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Kayma tabakasının yukarı akış köşesinden ayrılıp aşağı akış

* İlgili yazar / Corresponding author: nehirtokgoz@osmaniye.edu.tr, +90-328-827-10-00

köşesinin hemen önünde yeniden bağlanması ile oluşan akışın meydana getirdiği kavite sınıflandırılması açık kavite olarak tanımlanmaktadır Charwat vd. (1961). Açık kavitelerde oluşan yoğun periyodik salınımlar ve kayma tabakası kararsızlıkları, akışın aerodinamik yapısında şiddetli dalgalanmalara ve ses üretimine sebep olmaktadır. Bahsedilen bu salınımların azalmasında kavitenin uzunluk ve derinlik oranının (L/D) etkili olduğu belirlenmiştir. Açık kavitelerde $L/D < 1$ olduğunda kavite içerisinde oluşan salınımlar sönümlenmekte ve rezonans salınımları kavite için doğal frekanslarına karşılık gelen belirli akış koşulları altında oluşmaktadır. $L/D > 1$ olduğunda ise derinliğin azalmasından dolayı kayma tabakası salınımları daha yüksek karışık akustik dalgalar haline gelmektedir. Bu yüzden L/D oranları 1'den küçük olan açık kavitelere " derin kavite ", L/D oranları 1'den büyük olan açık kavite ise " sığ kavite " olarak sınıflandırılmıştır Sarohia (1977). Kavite geometrisinde uzunluk ve genişlik oranına (L/W) bağlı olarak oluşan bir diğer parametre iki boyutlu ve üç boyutlu kavite akışlarıdır. İki boyutlu kavite akışında, akış üniform ve tüm kavite genişliği boyunca tutarlı bir kayma tabakası oluşturmaktadır. Ancak üç boyutlu kavite akışlarında kavite genişliği azaldıkça kavite duvarlarının ve köşelerinin giderek baskın hale gelmesi sonucunda kayma tabakası tutarlılığını koruyamamaktadır. Bu yüzden $L/W < 1$ olduğunda akışın kavite genişliğinin büyük bir kısmında iki boyutlu görüldüğü, $L/W > 1$ olduğunda ise, akışın gittikçe daha fazla üç boyutlu hale geldiği belirlenmiştir Ahuja ve Mendoza (1995). Kavite üzerindeki akış ilgi çekicidir, çünkü kavite varlığı sürtünmeyi ve ısı transferini değiştirir ve yoğun periyodik salınımlara neden olabilir, bu da aerodinamik yapının şiddetli dalgalanmasına ve ses üretimine yol açabilmektedir. Geçtiğimiz yıllarda pek çok araştırmacı bu periyodik salınımların azaltılmasında ve ses üretimi üzerindeki etkiler hakkında deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Kavite üzerinde türbülanslı akış esnasında meydana gelen akış tonları ve salınımlara yol açan şartlar üzerinde durulmuş ve kavite geometrisinin ortalama akış alanı ve salınım üzerindeki etkisini anlamak için birçok sayısal çalışma yapılmıştır Rockwell ve Naudascher (1978). Franke ve Carr (1975) açık, sığ ve dikdörtgen kesitli bir kavite üzerindeki basınç salınımlarını kavite geometrisini değiştirerek azaltılması yönünde çalışmışlar ve farklı kavite konfigürasyonları kullanarak çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Kayma tabakası dikdörtgen kavitede ön kenara yakın daha ince ve dalgalı iken, çift eğik düzlemlili kavite konfigürasyonunda tam tersi olarak gözlemlenmişlerdir. Eğik düzlem kavite konfigürasyonunda akış ayrılması giriş eğik düzlemine yakın olarak gerçekleştirildiğinde basınç salınımlarının azaltılmasında etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Öte yandan yukarıda bahsedilen durumların tersine kavite akışlarındaki kayma tabakası kararsızlıklarının ısı transfer hızı için faydalı sonuçlar ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir. Özellikle açık kavitelerdeki ısı transfer uygulamaları birçok mühendislik uygulamasında büyük ilgi görmüştür. Elektronik aksamaların soğutulmasında, kanatlı ısı eşanjörlerinde, güneş termal alıcı sistemlerde ve yanma odalarına kadar birçok endüstriyel sektördeki uygulama alanlarında karşımıza çıkmaktadır. Kavite akışlarında, akış ayrılması, girdap oluşumu, kavitenin uzunluk ve derinlik oranı ve akışın sınır tabaka özellikleri ısı transfer mekanizması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Birçok çalışma için elde edilen ortak sonuç kavite için ısı transfer performanslarının, kavitenin uzunluk ve derinlik oranlarındaki değişiminden güçlü bir şekilde etkilendiği yönünde olmuştur Aung ve Bhatti (1984). Ses altı rüzgâr tüneli test düzeneğinin tabanına yerleştirmiş oldukları kavitedeki zorlanmış taşınımına bağlı ısı transferini Richards vd. (1987) deneysel olarak incelemişlerdir. Kavite genişliğine göre ortalama Nusselt sayısının ve Reynolds sayısının uzunluk ve derinlik oranının artmasıyla azaldığını, kavite yüksekliğine göre ise; ortalama Nusselt sayısının ve Reynolds sayısının bir eğri üzerinde sabit kaldığını belirlemişlerdir. Suponitsky vd. (2005) çalışmalarını kavite ön ve arka duvarlarından uygulanan sabit enjeksiyon ve emme ile salınımların azaltılması olasılığını test etmişlerdir. Kavitenin ön ve arka duvarlarındaki enjeksiyon ve emme ile salınımlarının azaltılmasının kütle akış hızı parametresinin $B_c = \%0,375$ ' ten yüksek olduğunda elde edilebilir olduğunu ve kütle akış hızı parametresinin bu değerin altında olduğunda, salınımlar bu kontrolden neredeyse hiç etkilenmediği sonucuna varmışlardır. Uzunluk ve derinlik oranı 5.16 ve 1.49 olan açık bir kavite üzerindeki Mach sayısı 0,2'lik ses altı akışının analizi için Ukeily ve Murray (2005) girdap ve hız alanlarının belirlenmesinde Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm tekniğini kullanmış ve hız-basınç dağılımları arasındaki korelasyonları detaylandırmak için ise sıcak tel anemometresi verilerini yüzey basıncı ölçümleriyle birleştirmişlerdir. Hız alanının incelenmesiyle, kayma tabakasının iki kavitenin uzunluk ve derinlik oranları ile nasıl etkileşime girdiğine dair birçok benzer ve farklı sonuçlara ulaşılmıştır. Zdanski vd. (2006) kavite içerisindeki ısı transferinin, girdapların yer değiştirmesinin ve girdap kapsülleme olgusu olarak adlandırdıkları ikinci kabarcık oluşumunun değişen uzunluk ve derinlik oranı arasındaki ilişkilerini laminar ve türbülanslı rejimler için sayısal olarak ele almışlardır. Girdapların yer değiştirmesine kavite tabanındaki basınç gradyanı ve Reynolds Sayısının etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Manovski vd. (2007) çalışmalarında, su tüneli içerisine yerleştirilmiş uzunluk ve derinlik oranı 5 olan bir kavitenin derinliğine bağlı olarak farklı Reynolds sayılarında akışı karakterize etmişlerdir. Reynolds sayısı arttıkça kavitenin çoğunda saat yönünde büyük bir devridaim yapısının hâkim olduğunu ve yukarı akış saat yönünün tersine köşe girdabının da genişlemiş olduğu sonucuna varmışlardır. Sabit uzunlukta ve farklı yükseklikteki alt duvarları sabit ısı akısına sahip sığ kavite için akış alanı ve ısı transferlerinin parametrik bir çalışmasını Mesalhy vd. (2008) deneysel ve sayısal olarak sunmuşlardır. Isı transferinin düşük uzunluk ve derinlik oranlarında kavite içerisindeki girdaplardan, yüksek uzunluk ve derinlik oranlarında ise kavite tabanına çarpan akıştan etkilendiğini göstermişlerdir. Değişen oranlarının basınç katsayısı ile arasındaki ilişkiyi incelediklerinde uzunluk ve derinlik oranı arttıkça basınç katsayısının negatif hale geldiğini ve basınç bölgesinin sola doğru yer değiştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Yukarı akış özelliklerindeki değişimin, akış yapısı ve yeniden bağlanma

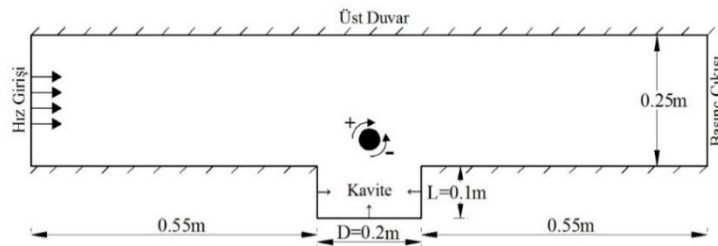
üzerindeki etkisini belirlemek için Madi vd. (2011) üç farklı uzunluk ve derinlik oranına sahip sıg kavitenin akış yapısını duvar jet akışı ve sınır tabaka akışı olarak iki ayrı durum şeklinde karşılaştırarak incelemişlerdir. Çalışmanın sayısal sonuçlarında, akış yapısının yukarı akış özelliklerine çok duyarlı olduğunu ve aynı Reynolds sayısı için, bir duvar jet akışı ile bir sınır tabaka akışının birbirinden önemli ölçüde farklı olduğunu belirlemişlerdir. Sınır tabaka akışında oluşan yeniden bağlanma uzunluğunun, duvar jet akışına göre oldukça daha geniş bir yapıda meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Billah vd. (2011) kare kavite içerisine yerleştirilen ısıtılmış içi boş dairesel silindirin etkisiyle meydana gelen birleşik ısı transferine silindir çapının, Richardson sayısının ve ısı iletkenlik oranının etkilerine bakmışlardır. Üst duvarı sabit hızla hareket eden kare kavitede silindir çapının artmasının sabit Richardson sayısı için ısı transferini artırdığını ve silindir çapının yüksek değerleri için daha yüksek ortalama Nusselt sayısı ve termal iletkenlik oranı elde edildiğini belirlemişlerdir. Dhiman ve Kumar (2011) geriye dönük adım akışına sahip bir kanal içerisine yerleştirdikleri adyabatik bir silindirin laminar zorlanmış ısı transferi ve akış üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Silindirsiz durum ile karşılaştırdıklarında Reynolds sayısının artmasıyla beraber akışın silindirin arkasından ayrılmaya başladığını ve yeniden bağlanma noktalarının arttığını gözlemlemişlerdir. Selimefendigil ve Öztöp (2014) kavite içerisine yerleştirilen, manyetik dipol etkisi altında dönen silindirin ısı transferi üzerindeki etkisini ve akışkan özelliklerinin sayısal analizini yapmışlardır. Reynolds sayısının ve manyetik gücün doğrusal olarak artmasının ısı transferini iyileştirici yönde etki sağladığını belirlemişlerdir. Uygun silindir dönüşü seçimi ile ısıtılmış blokların farklı yüzeyleri için ısı transferini arttırmanın elde edilebileceğini göstermişlerdir. Laouira vd. (2020) kapalı bir kanal içerisine yerleştirdikleri açık trapez şeklindeki kavitenin alt duvarında bulunan sabit sıcaklıkta ve farklı uzunluklardaki boyutsuz ısı kaynağının kavitenin ısı transferi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda ortalama Nusselt sayısının en yüksek değerini, maksimum uzunluktaki ısı kaynağı için elde etmişlerdir. Maksimum ve minimum hız değerlerinin girdap yapılarının merkezlerinde oluştuğunu ve ısı kaynağının uzunluktaki artışın hız dağılımlarında sıcaklık dağılımları kadar etki meydana getirmediklerini belirlemişlerdir.

Yukarıdaki literatür araştırması, iki boyutlu, açık bir kavite içerisine adyabatik bir silindir yerleştirilmesinin akış yapısı ve ısı transfer üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmanın şimdiye kadar gerçekleştirilmediğini, ancak kanal ve geriye dönük adım akışlarında bu uygulamaya benzer çalışmaların yapıldığını göstermektedir. Bu çalışmanın temel amacı açık kavite içerisinde 11 farklı konuma yerleştirilen bir silindire farklı dönme hızı büyüklükleri tanımlayarak yoğun ve periyodik salınımların oluşumu ile ısı transferinde verimli sonuçlar elde etmeyi amaçlamaktadır. Sayısal modelleme mühendislik uygulamalarının birçoğunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Deney düzeneklerinin kurulum maliyetlerinin yüksek olması ve deneylerin yapılmasının çok fazla zaman alması mühendisleri hemen hemen her alanda modelleme çalışmalarına yönlendirmiştir (Şimşek,2020), (Şimşek vd. ,2021).

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Modelin Tanımlanması (Definition of the Model)

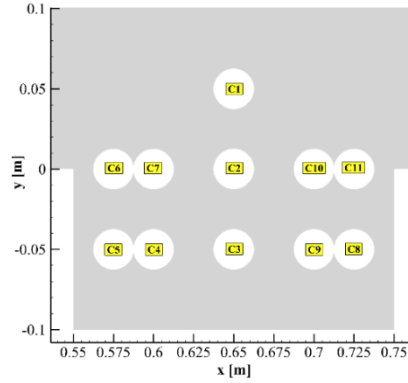
Sayısal çözüm için oluşturulan hesaplama alanı Şekil 1' de gösterilmiştir. Koordinat sistemini kanal girişine konumlanmış ve kavite geometrisi $(x(m), y(m))=(0.55m, -0.1m)$ konumuna yerleştirilmiştir. İki boyutlu yatay kanalda bulunan açık kavitenin uzunluğu (D) 0.2m ve derinliği (L) 0.1m'dir. Kanal girişi ve kanal çıkışının kavite duvarlarına olan mesafeleri eşit (0.55m) ve kanal yüksekliği 0.25m olarak belirlenmiştir. Kavite duvarlarına sabit ısı akışı ($q=10000 W/m^2$) uygulanmış ve geometrinin geri kalan kısımları iyi yalıtılmıştır. Hidrodinamik ve termal karakteristikleri değiştirmek için adyabatik bir silindir (çap, $d=0.025m$) kavite geometrisi içerisinde 11 farklı konuma (C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10 ve C11 silindir konumları) yerleştirilmiştir. Her bir konumda silindire 6 farklı dönme hızı ($\mp 60 rpm$, $\mp 120 rpm$ and $\mp 240 rpm$) tanımlanarak akış yapısı ve ısı transferi üzerinde silindirin etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Dönme hızlarının pozitif (+) gösterimi silindirin saat yönünde, negatif (-) gösterimi ise silindirin saat yönünün tersi yönünde döndüğünü belirtmektedir.



Şekil 1. Kavitenin geometrisi ve sınır şartları (Geometry of the cavity and boundary conditions)

Dönen adyabatik silindir Şekil 2' de görüldüğü gibi kavite içerisine merkezi olarak yerleştirilmiş ve konumlar silindirin kavite duvarlarına olan mesafelerine göre adlandırılmıştır. C1, C2 ve C3 konumları kavite orta

düzleminde bulunan yatay doğrultuda $x(m) = 0.65m'$ de sabit tutularak düşey doğrultuda $y(m) = 0.05m$ aralıklarla kavite tabanına doğru yerleştirilmiştir. Akış yönünde $x(m)=0.025m$ aralıklarla C4, C5, C6 ve C7 konumları kavite ön duvarına, C8, C9, C10 ve C11 konumları da kavite arka duvarına yakın olarak konumlandırılmıştır.



Şekil 2. Silindirin bulunduğu konumlar (Locations of the cylinder)

2.2. Sayısal Metot ve Matematiksel Model (Numerical Method and Mathematical Model)

İki boyutlu, sıkıştırılamaz ve zamana bağlı türbülanslı akış ve sıcaklık alanlarına ait denklemlerin çözülmesi, sonlu hacimler yöntemini kullanan ANSYS Fluent programı ile yapılmıştır. Navier Stokes Denklemleri, belirtilen özelliklerdeki bir akış için sayısal olarak çözümlenmiştir. Momentum ve enerji denklemlerini ayrıştırmada ikinci mertebeden ileri gidişli şema (second order upwind scheme), basınç-hız bağıntısı için SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Sayısal çözümün yakınsaması, enerji için 10^{-8} ve diğer tüm bağımlı değişkenler için ise 10^{-6} olarak kararlaştırılmıştır. Courant sayısı (CFL) belirlenen zaman adımı boyunca akışkanın kat ettiği hücre miktarını ve çözümün doğruluğunu gösteren boyutsuz bir sayıdır. Bu çalışmada akış içerisindeki değişimlerin gözlemlenmesi için Courant sayısı 5' e bağlı olarak hesaplanan uygun zaman adımı 0.06 sn olarak belirlenmiştir. Akış ve sıcaklık alanları için yönetici denklemler, süreklilik, momentum ve enerji denklemleridir. Çalışmada akış hareketinin analiz edilebilmesi için kullanılan bu denklemlerin diferansiyel formları Eşitlik (1), Eşitlik (2) ve Eşitlik (3)' de sunulmuştur.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] \quad (2)$$

Sırasıyla ρ akışkanın yoğunluğunu, u_i , x_i yönündeki ortalama hız bileşenini, p basıncı, μ dinamik viskoziteyi ve u' hızın çalkantı bileşenini göstermektedir. i ve j indisleri de her bir boyutu ($i=x, y, z$ ve $j=x, y, z$) temsil etmektedir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

Akış analizlerinde yaygın olarak kullanılan Reynolds-ortalama yaklaşım modelindeki (RANS) türbülans stresi $-\rho \overline{u_i u_j}$ Boussinesq hipotezi ile Eşitlik (4)' deki gibi modellenmektedir. Burada μ_t türbülans viskozitesi, k türbülans kinetik enerjisidir ve $k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$ olarak tanımlanır.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (4)$$

Çalışmada türbülanslı akış analizinin modellenmesi için daha az hesaplama kaynağı gerektiren Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemi ve standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Reynold Ortalamalı Navier Stokes Denkleminin kartezyen tensör formu Eşitlik (5)' te verilmiştir. $(-\rho \overline{u_i u_j})$ ifadesi modellenecek olan Reynolds gerilim tensörü olarak adlandırılmaktadır ve eşitlikteki " δ_{ij} " ifadesi Kronecker deltasıdır Doğan (2014).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \bar{\rho} \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

Eşitlik (6) ve Eşitlik (7)' de verilen " σ_k " türbülans Prandtl sayısı ve " σ_ε " model sabitidir. Eşitlik (8), Eşitlik (9) ve Eşitlik (10)' da standart $k - \varepsilon$ modelindeki, türbülans Eddy viskozitesi, C_μ , $C_{\varepsilon 1}$ ve $C_{\varepsilon 2}$ model katsayıları ve Tablo 2' de standart $k - \varepsilon$ modeline ait sabitler verilmiştir Doğan (2014).

$$\mu_k = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

$$C_\mu = \left(\frac{u_x^2}{k} \right)^2 \quad (9)$$

$$C_{\varepsilon 1} = C_{\varepsilon 2} - \frac{k}{\sqrt{C_\mu} \sigma_\varepsilon} \quad (10)$$

Tablo 2. Standart $k - \varepsilon$ modelinin sabitleri (The constants of standard $k - \varepsilon$ model)

Parametreler	σ_k	σ_ε	C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
Değer	1	1.3	0.09	1.44	1.92

Çalışmada boş kavite akışı için kavite derinliği ($D_h = L$) ile silindir konumları için ise silindir çapına ($D_h = d$) göre tanımlanan Reynolds sayısını veren bağıntı Eşitlik (11)' de gösterilmiştir Çengel vd. (2008).

$$Re = \frac{\rho \times V \times D_h}{\mu} \quad (11)$$

Eşitlik (12)' de Yerel Nu sayısını veren bağıntı gösterilmiştir. Burada " h_x ", yerel ısı transfer katsayısı, " k " ısı iletkenlik katsayısı ve " S " karakteristik uzunluktur. Çalışmada Nu sayısı " Nu " hidrolik çapa ($D_h = S$) göre hesaplanmıştır Çengel vd. (2008)

$$Nu_x = \frac{h_x S}{k} \quad (12)$$

2.3. Modelin Sınır Şartları (Boundary Conditions of The Model)

Şekil 1'deki hesaplama alanına uygulanan sınır şartları Şekil 1'de verilmiştir. Silindirin açık bir kanal içerisine yerleştirilerek incelendiğini göstermek amacıyla kanalın üst duvarı, akış doğrultuda ve akış ile aynı hız büyüklüğünde olacak şekilde "hız girişi" sınır şartı olarak tanımlanmıştır. $U=V=0$, $\dot{q}=10000$ (W/m²) Silindir yüzeyine hiçbir termal sınır şartı tanımlanmamıştır fakat kavite içerisinde dönmesi istendiğinden dolayı bir duvar yüzeyinin bir eksen etrafındaki dönüşünü belirtmek için kullanılan "hareketli duvar sınır şartı" olarak belirlenmiştir. Silindirin dönme ekseninin orijini, silindir merkezinin x ve y koordinatlarıdır ve kavite içerisindeki konumuna göre x ve y koordinatları değişmektedir.

3. Sayısal Sonuçlar (Numerical Results)

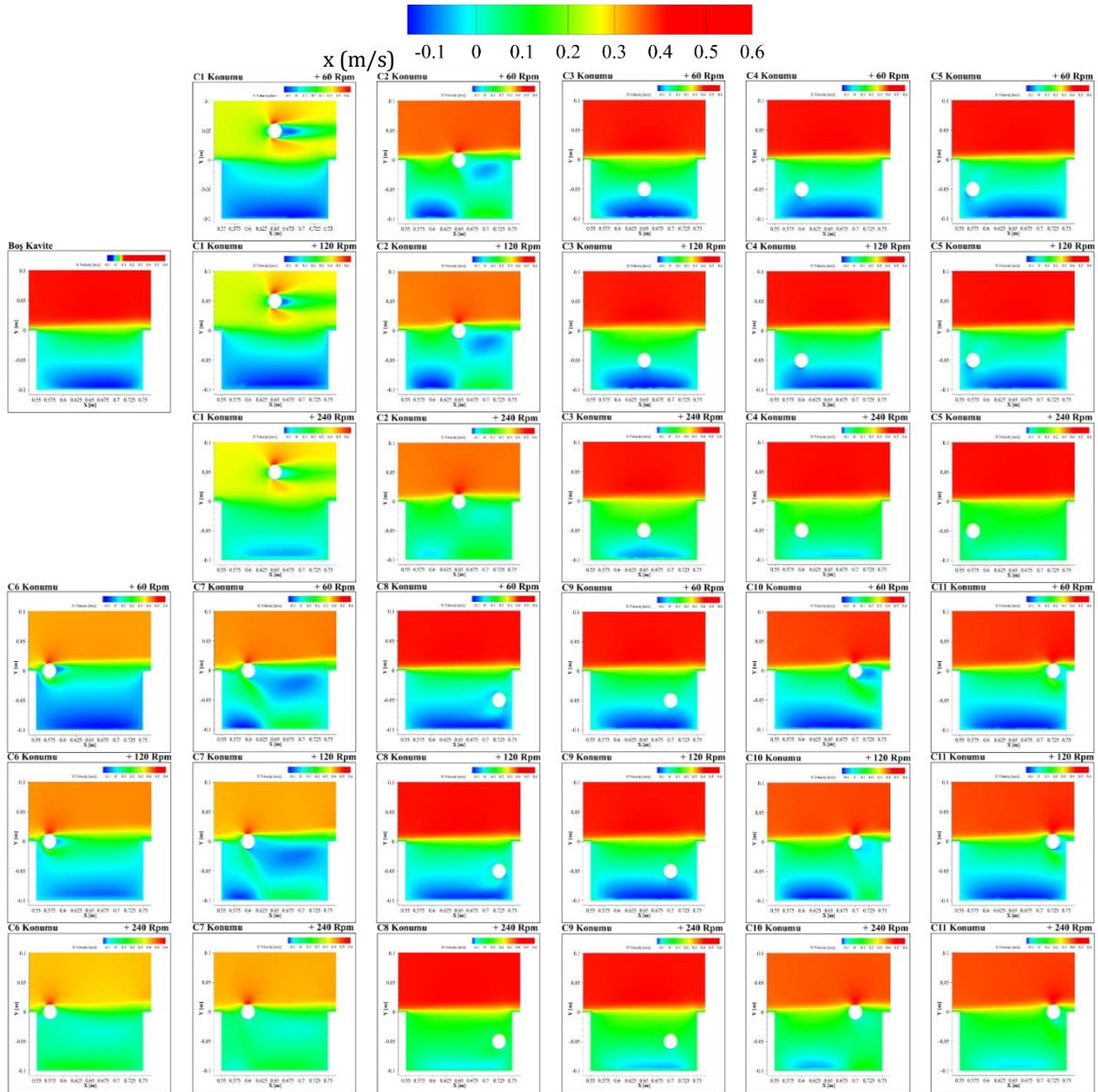
Çalışmada, silindirin konumundaki değişimin ve bu konumlardaki farklı dönme hızlarının akış yapısı ve ısı transfer üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Silindir çapı ile tanımlanan Reynolds sayısı 10000 olarak belirlenmiş ve kavite duvarlarına sabit ısı akısı ($\dot{q}=10000$ W/m²) tanımlanarak ısı transfer analizi sağlanmıştır. Akış yapısı ve

ısı transferini karakterize etmek için sonuçlar saat yönünde ve saat yönünün tersi yönünde dönme hızları olarak iki ayrı başlık şeklinde sunulmuş ve aynı Reynolds sayı değeri için kavitede silindirin olmadığı boş kavite akışı adı verilen durum sonucuyla karşılaştırılarak ele alınmıştır.

3.1. Saat Yönünde Dönme Hızlarının Akış Yapısı ve Isı Transferi Üzerinde Etkisi (The Effect Of Clockwise Rotational Speeds On Flow Structure And Heat Transfer)

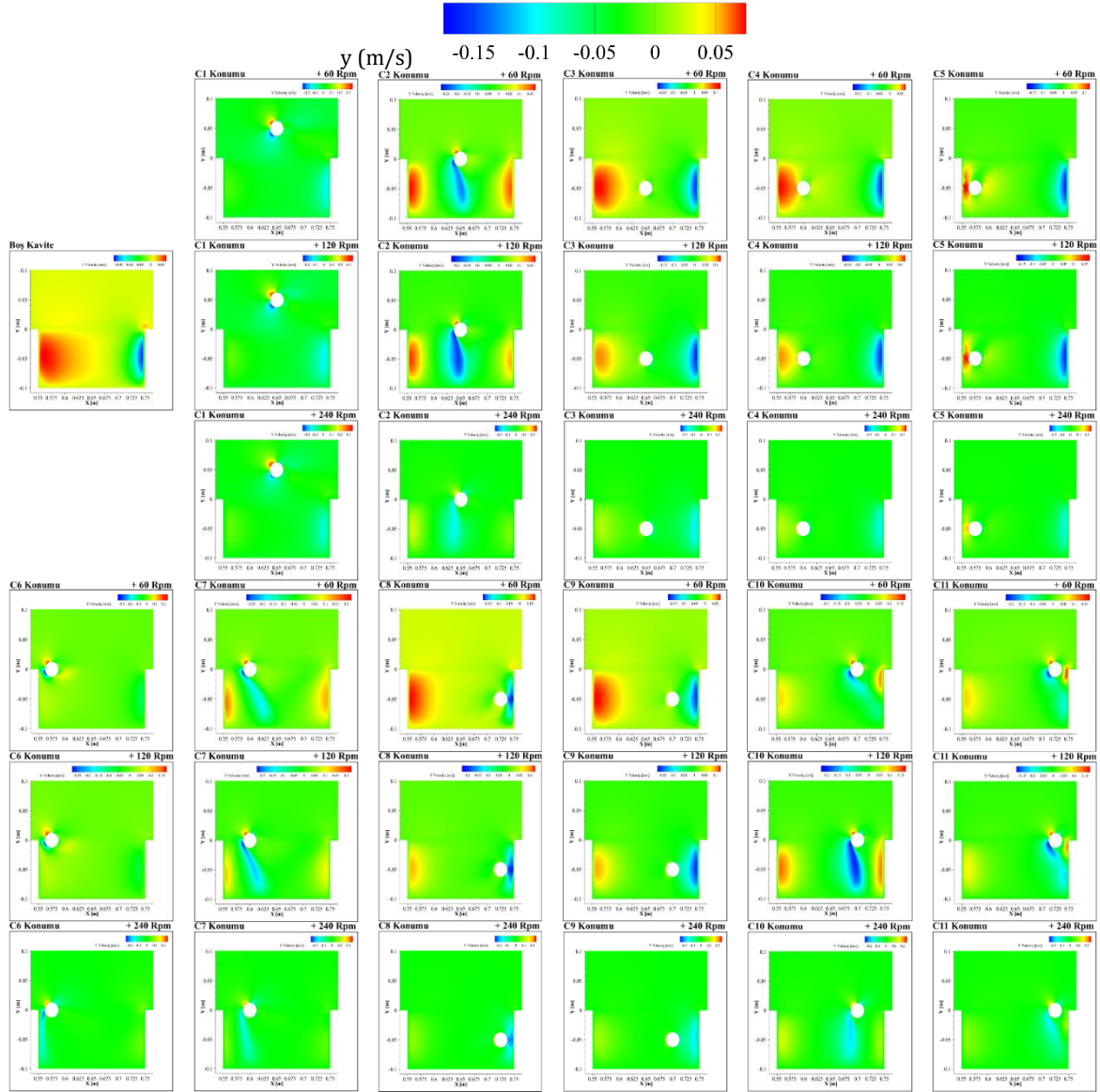
3.1.1. Akış Yapısı Üzerinde Etkisi (The Effect on Flow Structure)

Şekil 3 ve 4, boş kavite ve farklı konumlarda değişen dönme hızlarının ortalama hız alanlarına ait x ve y hızı dağılımlarını göstermektedir. C1 konumunda dönme hızının artması, boş kavite akışına göre kavite tabanına doğru yüksek hızlarda ters akış oluşmasını sağlamış ve silindirin üst yüzeyinden geçen akışın hızını artırmıştır. Dönme hızı + 240 rpm olduğunda + 60 ve + 120 rpm dönme hızlarına göre kavite tabanına yakın oluşan ters akışın hızı azaltmıştır. Bu durum, saat yönünde dönme etkisine bağlı olarak silindirin alt yüzeyinden geçen kayma kaymasının hızındaki azalmadan kaynaklanmıştır. + 60 rpm dönme hızında silindirin ön yüzeyinden kavite tabanına doğru boyutunu artıran kayma tabakası, C2 konumunda kavite ön ve arka duvarına yakın iki farklı ters akış oluşturmuştur. Dönme hızının artması, kayma tabakasının kavite tabanına doğru hız alanının azalarak kavite içerisinde düşük hızlarda ters akış yapıları oluşmasına sebep olmuştur. + 60 rpm dönme hızına kıyasla + 120 ve + 240 rpm dönme hızlarında, kavite ön duvarına yakın oluşan ters akışın akış alanı azalırken, kavite arka duvarına yakın oluşan ters akışın akış alanı artmıştır. C3 konumunda silindir ile kavitenin ön ve arka duvarları arasında oluşan y hızı dağılımları iki ayrı ters akışın varlığını göstermektedir. Dönme hızının artması oluşan ters akışların şiddetini azaltmış fakat boş kavite durumuna göre yine de kavite içerisindeki hızın artmasını sağlamıştır. C4 ve C5 konumlarında dönme hızının artması, boş kavite akışına nispeten kavite içerisindeki hız alanının artmasında etkili olmuştur. C5 konumunda silindir ile kavite ön duvarı arasındaki bölgeden geçen akışın hızı C4 konumuna göre oldukça fazladır. Ancak kavite tabanına yakın oluşan ters akış hızındaki artışın en fazla C4 konumunda olduğu gözlemlenmiştir. + 60 ve + 120 rpm dönme hızlarında C6 konumu, silindir etrafında akış oluşturarak boş kavite durumuna benzer ters akış meydana getirmiştir. Dönme hızının + 240 rpm' e artması kayma tabakasındaki kararsızlıkları artırmış ve mevcut akış yapısını değiştirerek saat yönünün tersi doğrultusunda ters akış oluşturmuştur. C2 konumuna benzer akış oluşturan C7 konumunda kayma tabakası kavite ön ve arka duvarlarında iki farklı ters akışı meydana getirmiştir. Kavite ön duvarında oluşan ters akışın akış alanı artan dönme hızı ile azalırken, kavite tabanına yakın silindirin alt yüzeyinde oluşan ters akışın akış alanı kavite arka duvarına kadar artmıştır. C2 konumda olduğu gibi C7 konumunda da ters akışın hız büyüklükleri artan silindirin dönüş hızı ile azalmıştır. C8 ve C9 konumları aynı akış doğrultusunda silindir konumları olmalarına rağmen kavite arka duvarına olan mesafeleri silindirin arka yüzeyinden geçen akış hızını etkilemektedir.



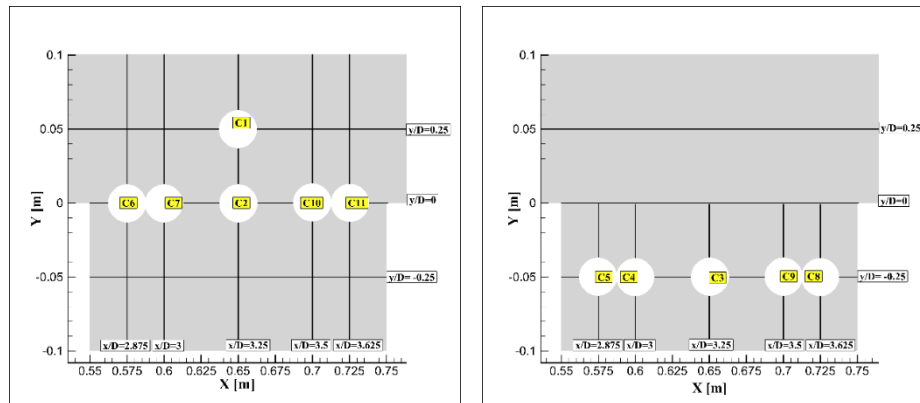
Şekil 3. Değişen silindir konumları ve saat yönünde dönme hızlarına göre kavite içindeki x- hızı dağılımları (x-velocity distributions in the cavity according to varying cylinder positions and clockwise rotational speeds)

C8 konumunda silindirin arka yüzeyinden geçen akışın hızı daha fazla iken kavite tabanına yakın yüksek hızlarda ters akışın C9 konumunda olduğu belirlenmiştir. C10 konumunun + 60 rpm dönme hızında, silindirin ön yüzeyinden ayrılan kayma tabakası kavite içerisinde farklı iki ters akış meydana getirmiştir. Silindirin artan dönme hızı kavite arka duvarına yakın olan ters akışın akış alanını artırırken, kavite ön duvarına yakın ters akışın akış alanını azaltmıştır. Silindirin alt yüzeyinden geçen kayma tabakası C11 konumunda, silindirin arka yüzeyinde ve tüm kavite uzunluğu boyunca kavite içerisinde iki ayrı ters akış oluşturmuştur. Dönme hızının artmasıyla birinci ters akışın akış alanı sabit kalmış, silindirin arka yüzeyine yakın konumda bulunan ikinci ters akışın akış alanı artmıştır.



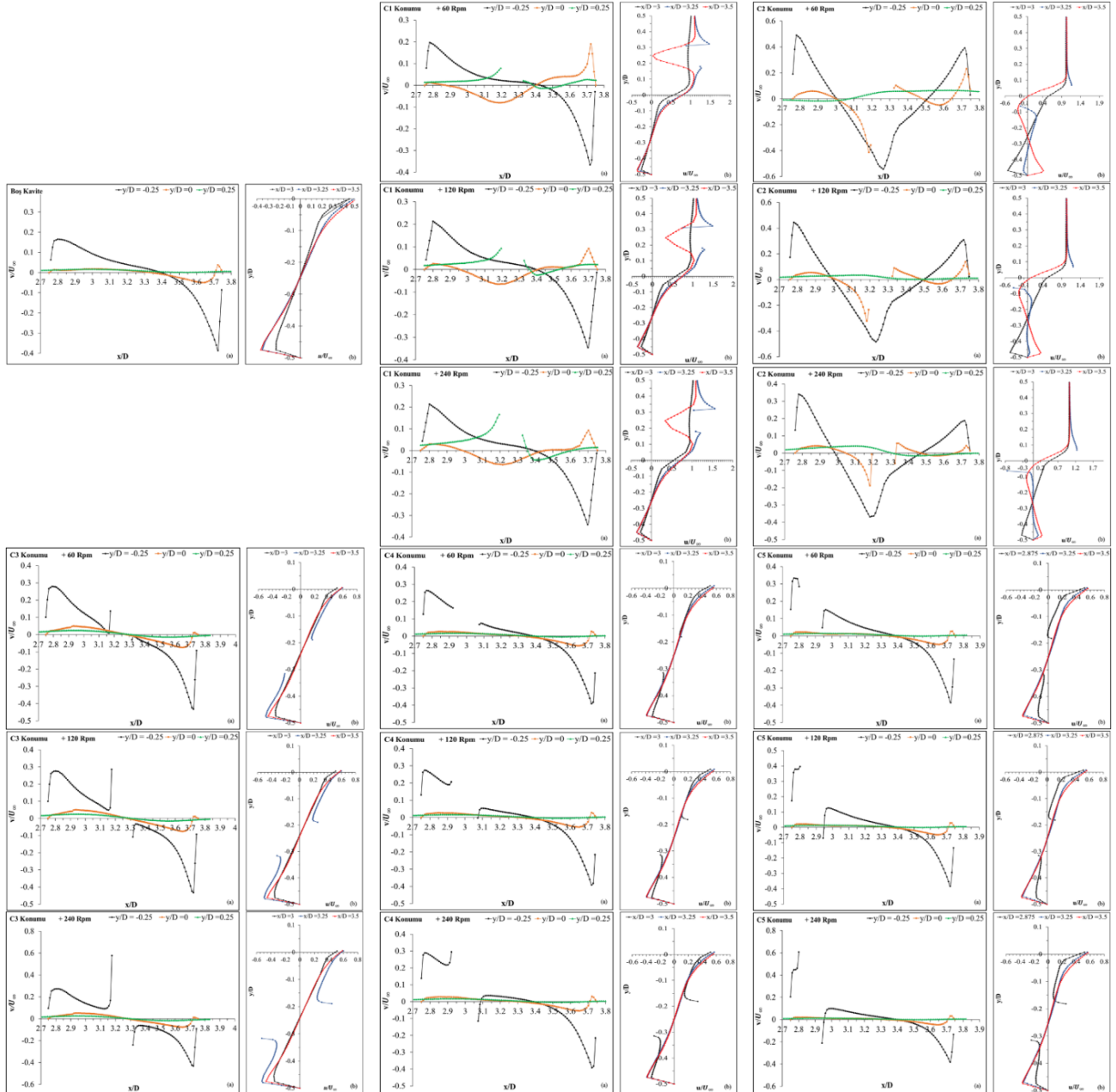
Şekil 4. Değişen silindir konumları ve saat yönünde dönme hızlarına göre kavite içindeki y-hızı dağılımları (y-velocity distributions in the cavity according to varying cylinder positions and clockwise rotational speeds)

Boyutsuzlaştırılmış ortalama hız profillerinin ($u/U_\infty, v/U_\infty$) incelenmesi için belirlenen dikey ($x/D= 2.875, x/D=3, x/D=3.25, x/D=3.5$ ve $x/D=3.625$) ve yatay ($y/D= -0.25, y/D=0$ ve $y/D=0.25$) eksenler üzerindeki konumlar Şekil 5' te gösterilmiştir.



Şekil 5. hız profilleri ($u/U_\infty, v/U_\infty$) için x/D ve y/D konumları (x/D and y/D positions for velocity profiles)

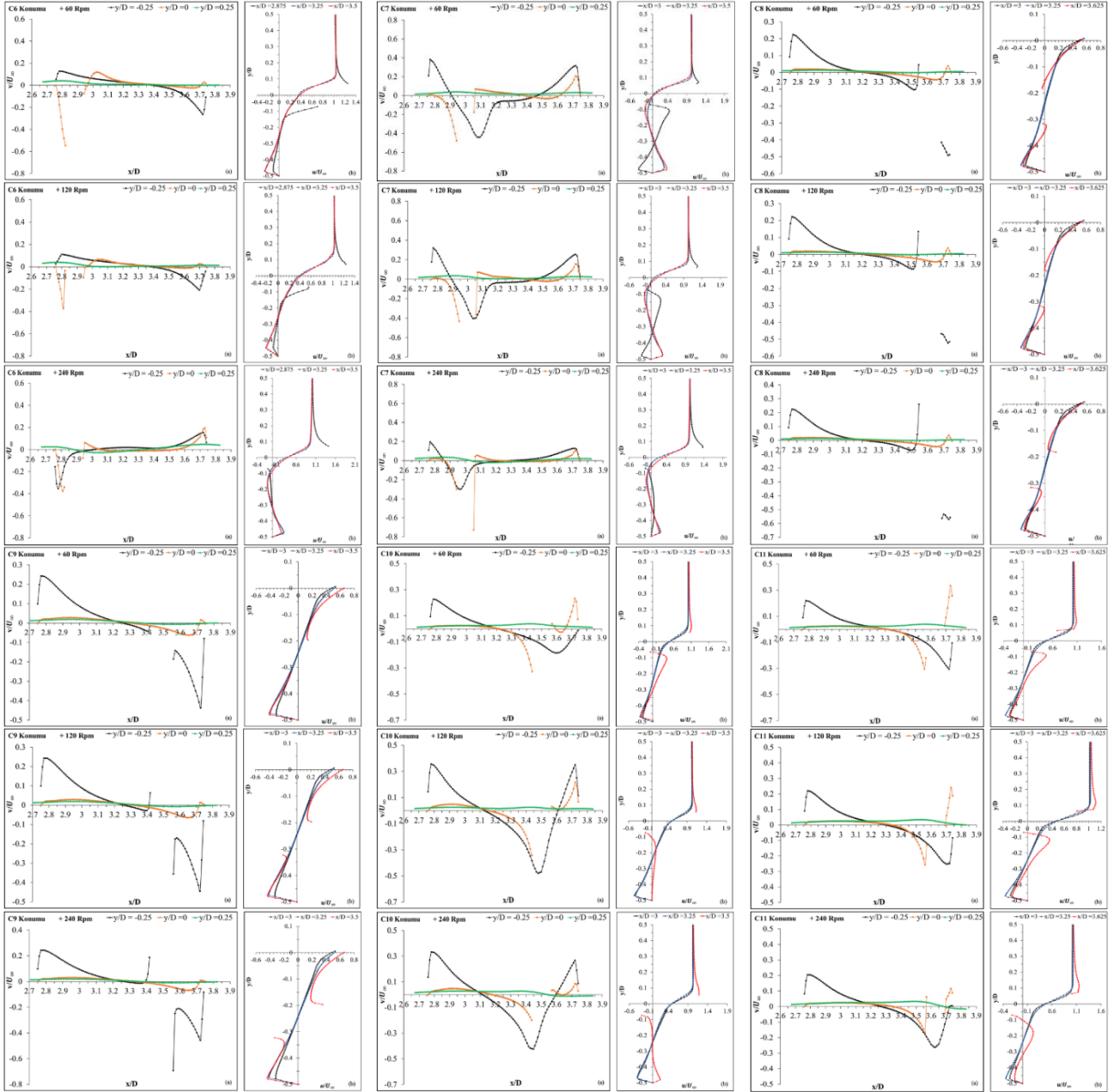
Boş kavite ve silindri durumlarda için yatay ve dikey eksenle tanımlanan bu konumlar kavite uzunluğu (D) ile eksenler üzerindeki hız büyüklükleri ortalama akış hızı (U_∞) ile boyutlandırılmamış olarak sunulmuştur. Kayma tabakası üzerinde ve kayma tabakasından uzak konumlara yerleştirilen silindirin (C1, C2, C6, C7, C10 ve C11) kavite haricinde akışta meydana getirdiği hız değişimlerini incelemek için dikey eksen üzerindeki hız profilleri kavite derinliğinden daha fazla mesafe dikkate alınarak incelenmiştir. Kavite tabanına yakın (C3, C4, C5, C6, C8 ve C9) silindir konumlarında ise sadece kavitedeki akışta meydana gelen hız değişimlerinin gözlemlenebilmesi için dikey eksen üzerindeki hız profilleri kavite derinliğindeki mesafeye göre incelenmiştir.



Şekil 6. C1, C2, C3, C4 ve C5 konumlarının boyutsuz hız profilleri, a) Yatay eksen üzerindeki boyutsuz hız profili, b) Dikey eksen üzerindeki boyutsuz hız profili (The non-dimensional velocity profiles of C1, C2, C3, C4 and C5 positions, a) The non-dimensional velocity profiles on horizontal axis, b) The non-dimensional velocity profiles on vertical axis)

Silindir konumlarının farklı dönme hızlarına ait boyutsuz ortalama hız bileşenlerindeki değişimleri gösteren grafikler Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir. Bu grafik eğrilerindeki kopmalar, Şekil 5’te de gösterildiği gibi yatay ve dikey eksenler üzerinde tanımlanan konumların silindirin sınır şartlarına denk gelmesinden kaynaklanmaktadır. $y/D = -0,25$ ’teki hız profillerinde negatif yönde oluşan tepe noktası boş kavite ve C1 konumunda kavite arka duvarı ile etkileşen kayma tabakasının oluşturduğu ana girdap yapısını göstermektedir. C1 konumunda dönme hızı arttıkça ana girdap yapısının boyutu azalmış ve yüksek hızda girdap oluşumu + 120 rpm dönme hızında elde edilmiştir. C2 konumunda $x/D = 3$ ve $3,5$ ’deki hız profillerinin negatif ve pozitif yöndeki hız değişimleri kavite içerisindeki ters akışları göstermektedir. Akışa dik doğrultudaki hız profiline ($y/D = -0,25$) negatif ve pozitif tepe noktaları kavite içerisindeki kayma tabakasına ait birbiri tersine dönen iki girdap akışının varlığını ispatlar

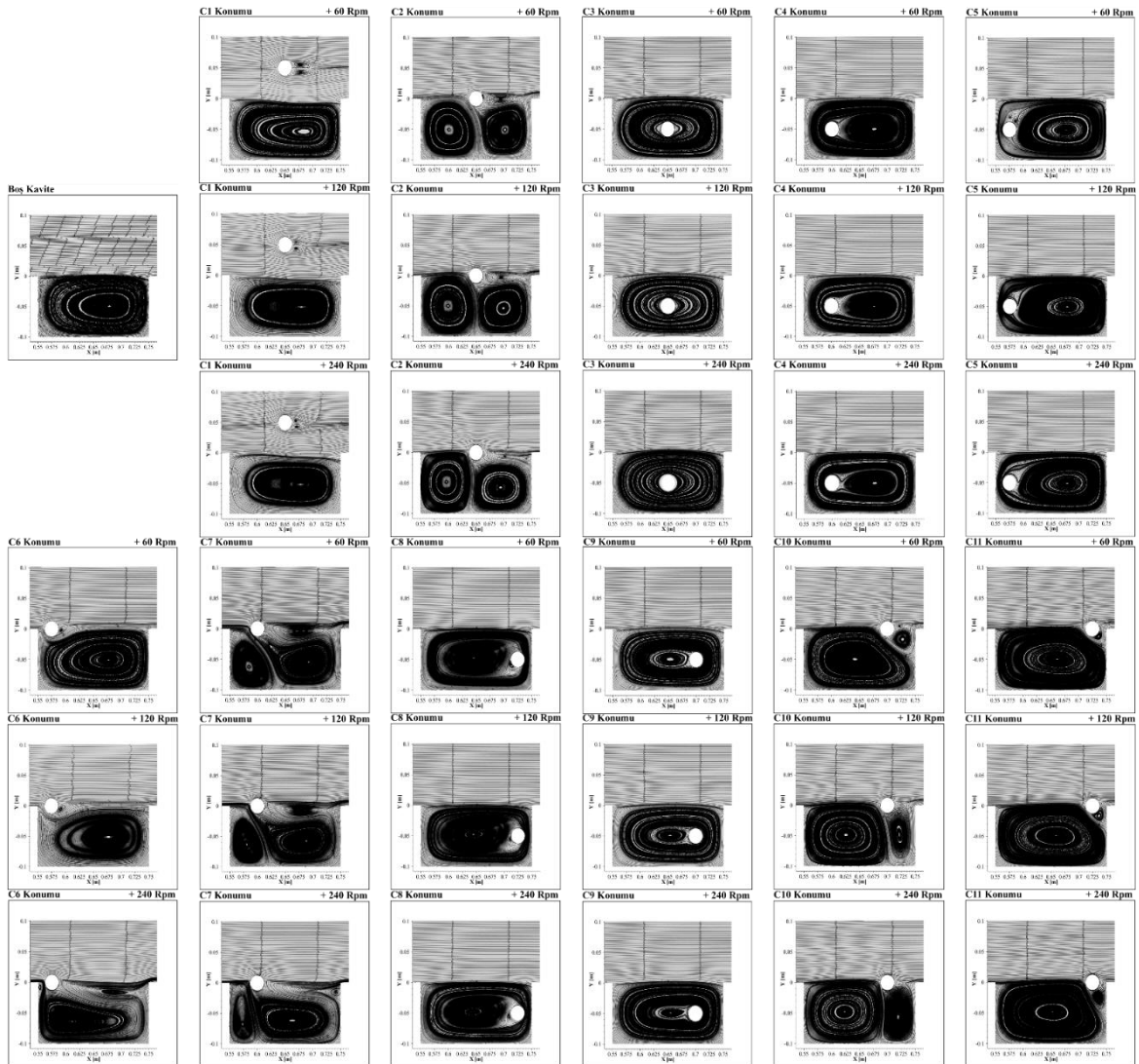
niteliktedir (Şekil 8). Bu hız profilinin negatif tepe noktasının x/D konumu üzerindeki değişimi birinci girdabın boyutundaki azalmadan kaynaklanmaktadır. Kayma tabakası doğrultusundaki hız bileşenin ($y/D = 0$) negatif tepe noktası silindirin arka yüzeyinde oluşan saat yönündeki üçüncü girdap akışını göstermektedir. + 240 rpm dönme hızında üçüncü girdap yapısının $x/D = -0.1$ konumuna doğru boyutunu artırması ikinci girdap yapısını sıkıştırarak kavite arka duvarının üst köşesinde dördüncü girdabın oluşmasını sağlamıştır. Boş kavite durumuna benzer şekilde C3 konumunda da ana girdabı gösteren akışa dik doğrultusunda negatif tepe noktası gözlemlenmiştir. Dönme hızının artması kavite tabanına yakın ters akışı artırırken, girdabın boyutunda önemli bir etki sağlamamıştır.



Şekil 7. C6, C7, C8, C9, C10 ve C11 konularının boyutsuz hız profilleri, a) Yatay eksen üzerindeki boyutsuz hız profili b) Dikey eksen üzerindeki boyutsuz hız profili. (The non-dimensional velocity profiles of C6, C7, C8, C9, C10 and C11 positions, a) The non-dimensional velocity profiles on horizontal axis b) The non-dimensional velocity profiles on vertical axis)

C4 ve C5 konuları kavite uzunluğu boyunca silindiri de içerisine alan ana girdap yapısı meydana getirmişlerdir. C4 konumunda dönme hızındaki artış, kavite tabanına yakın konumdaki ters akışın hız büyüklüğü artırmış ve silindirin arka yüzeyinde girdap çekirdeğini oluşturan akış yapısının boyutunu azaltmıştır. C5 konumunda ise dönme hızının artması C4 konumda olduğu kadar yüksek hızlarda ters akış oluşturmamıştır. C6 konumunun + 60 ve +120 rpm 'de oluşturduğu hız profilleri hemen hemen aynıdır, ancak + 120 rpm dönme hızında kavite içerisindeki hız profili diğer dönme hızlarına göre farklılık gösterir. Bu durum kayma tabakasının kavite içerisinde oluşturduğu saat yönünün tersine dönen girdap akışından kaynaklanmaktadır. C7 konumunun $y/D = -0.25$ ' teki hız profilinde, negatif ve pozitif yönde oluşturduğu tepe noktaları kavite içerisinde birbirinin tersi yönde dönen iki

girdap yapısının olduğunu göstermiştir. Silindirin dönme hızı arttıkça birbiri tersine dönen bu iki dönel yapının arasında indüklenmiş bir akış oluşmuştur. $y/D = 0$ 'daki hız profilinde kayma tabakası doğrultusunda kavite arka duvarına yakın konumda oluşan tepe değeri üçüncü girdap yapısını göstermektedir. Dönme hızının artmasına bağlı olarak ikincil girdap yapısının boyutunun artması üçüncül girdap yapısının kavite arka duvarının üst köşesinde dördüncü girdabı oluşturmasında etkili olmuştur. Şekil 7' de C6, C7, C8, C9, C10 ve C11 konumlarının boyutsuz ortalama hız profillerini gösteren grafikler sunulmuştur. C8 ve C9 konumlarında benzer akış yapıları oluşmuştur. Her iki konumun $y/D = -0.25$ 'deki hız profillerinin $x/D = 3.5$ konumlarında tanımlanan negatif tepe noktaları silindirin ön yüzeyinde oluşturdukları ters akışları göstermektedir. Aynı hız profiline ait grafik eğrisinin kavite arka duvarına konumlarındaki ($x/D = 3.7$ ve 3.8) negatif tepe değerleri silindirin arka yüzeyinden geçen akışın hız büyüklüğüdür ve C8 konumunun kavite arka duvarına olan yakınlığına bağlı olarak C9 konumuna göre oldukça yüksek hız değerlerine ulaşmıştır. C10 konumunun $+60$ rpm dönme hızından sonra grafik eğrilerinin negatif yönden pozitif yöne doğru değişiminin kavite içerisindeki iki ters akıştan kaynaklandığı bilinmektedir. $y/D = -0.25$ 'deki negatif tepe noktası birinci girdabı, $y/D = 0$ 'daki hız profilinde kavite arka duvarına yakın konumda oluşan eğrinin pozitif yönde oluşturduğu tepe noktası ikinci girdap yapısını, aynı eğri üzerinde negatif yöndeki tepe noktası ise üçüncü girdap yapısını göstermektedir. Dönme hızı arttıkça bu girdap akışlarının boyutlarını artırdığı ancak hızlarında azalmalar olduğu belirlenmiştir. C11 konumunun, $y/D = -0.25$ ve $x/D = 3.625$ 'deki hız profillerinden elde edilen tepe değerleri kavite içerisinde farklı yönlerde dönen iki girdap akışı olduğunu göstermektedir. Bu grafik eğrilerinin artan dönme hızıyla tepe noktalarındaki azalmalar girdap akışlarının hız değerlerindeki azalmadan kaynaklanmaktadır.



Şekil 8. Silindir konumlarının saat yönünde dönme hızlarındaki zaman ortalamalı akım çizgileri
(Time-averaged streamlines at clockwise rotational speeds of cylinder positions)

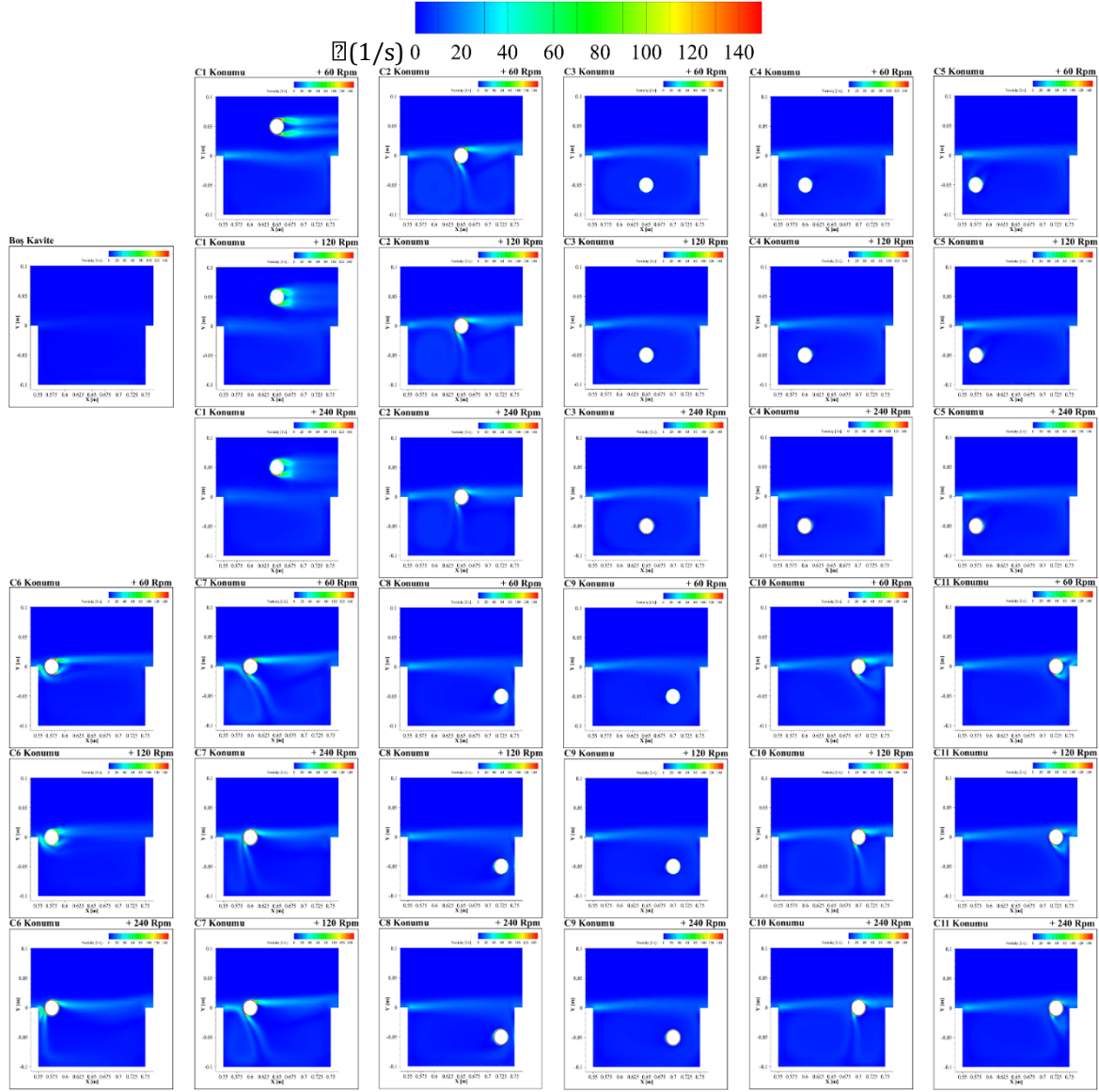
Değişen konumlarda dönme hızlarının zaman ortalamalı akım çizgileri Şekil 8' de verilmiştir. C1 konumu boş kavite durumuna benzer akış yapısını tüm dönme hızları için korumuştur. $+60$ rpm' de kayma tabakasının kavite arka duvarı ile etkileşimi sonucunda saat yönünde dönen ana girdap yapısı oluşmuştur. Kavite dışında silindirin

arka yüzeyinde birbiri tersine dönen iki girdap akışı daha gözlemlenmiştir. Silindirin dönme yönüne ve dönme hızının artmasına bağlı olarak bu girdap yapılarının boyutları azaltmıştır. C2 konumunun + 60 rpm dönme hızında kayma tabakası silindirin ön yüzeyinden ayrılarak kavite tabanına yakın iki girdap akışı meydana getirmiştir. Birinci girdap yapısı kavite ön duvarına yakın saat yönünde, ikincil girdap yapısı ise kavite arka duvarına yakın saat yönünün tersi yönünde dönmektedir. İkinci girdap silindirin arka yüzeyinde ve birinci girdap ile aynı yönde dönen üçüncü bir küçük girdap üretmiştir. Dönme hızının artması, kayma tabakasında daha fazla salınım oluşturmuş ve ikinci girdabın boyutunu arttırmıştır. Dönme hızı + 240 rpm olduğunda ikinci girdaptaki boyut artışı üçüncü girdap ile aralarında indüklenmiş bir akış oluşmasını sağlayarak kavite arka duvarının köşesinde dördüncü bir girdap yapısını oluşturmuştur. Kavite orta düzleminde bulunan C3 konumu boş kavite akışına benzer fakat girdap çekirdeği üzerinde silindirin bulunduğu saat yönünde dönen bir resirkülasyon bölgesi üretmiştir. Silindiri de içerisine alarak oluşan bu girdap yapısının boyutu ve hız alanı dönme hızının artmasıyla doğrusal olarak artmıştır. C4 ve C5 konumlarında, tüm kavite yüzeylerine temas eden ve saat yönünde dönen ana girdap akışının olduğu gözlemlenmiştir. Bu konumların birbirinden farkı, C5 konumunun silindir yüzeyinde oluşturduğu girdap akışları ve silindirin arka yüzeyindeki girdap çekirdekleridir. Dönme hızındaki artış girdap çekirdeklerinin boyutunu azalmış ve C5 konumunda oluşan diğer küçük girdap yapılarının kaybolmasını sağlamıştır. + 60 ve + 120 rpm dönme hızlarında aynı akış yapısını oluşturan C6 konumu, kavite içerisinde saat yönünde birinci girdap ve silindirin arka yüzeyinde saat yönünün tersi yönde dönen ikinci girdap akışını oluşturmuştur. +120 rpm' de dönme hızındaki artışa bağlı olarak birinci girdabın boyutunun azaldığı, ikinci girdabın boyutunun arttığı belirlenmiştir. + 240 rpm dönme hızında mevcut akışın tamamen değiştiği ve kavite içerisinde üç farklı girdap akışının olduğu gözlemlenmiştir. Bu girdaplarından biri kavite tabanına yakın saat yönünün tersi yönde dönen birinci girdap akışı diğeri kavite arka duvarı ile silindirin arka yüzeyi arasında sınırlandırılan ters yönde dönen ikinci girdap akışıdır. İkinci girdabın gelişmesi, birinci girdap yapısının kavite arka duvarına yakınlaşarak kayma tabakasının sıkıştırılmasına sebep olmuş ve bu durum kavite ön duvarının üst köşesinde saat yönünde dönen üçüncü girdabın oluşmasını sağlamıştır. C2 konumunda olduğu gibi C7 konumunda da kayma tabakasına ait iki ayrı girdap ve silindirin arka yüzeyinde üçüncü bir girdabın varlığı tanımlanmıştır. Birinci ve üçüncü girdap akışları saat yönünde, ikinci girdap akışı ise saat yönünün tersi yönde dönmektedir. Silindirin dönme hızındaki artış birinci girdap yapısının boyutunu azaltırken, ikinci girdap yapısının boyutunu artırmıştır. Kavite arka duvarına yakın konumlanan ikinci girdabın gelişimi beraberinde silindirin arka yüzeyinde lokalize bulunan üçüncü girdabı indüklemiş ve kavite arka duvarının üst köşesinde dördüncü bir küçük girdap yapısı oluşmasını sağlamıştır. C8 ve C9 konumları C4 ve C5 konumlarına oldukça benzer akış yapıları oluşturmuşlardır. Artan dönme hızıyla silindirin arka yüzeyindeki girdap çekirdeklerinin boyutları azalmış ve C8 konumunda silindirin alt yüzeyinde oluşan ikinci girdap akışının konumu değişmemiştir. C10 konumu artan dönme hızıyla kayma tabakasına ait ve silindirin arka yüzeyinde bulunan ikinci girdap akışının boyutunu arttırmıştır. Birinci girdap akışı kavite ön duvarına doğru boyutunu azalmış ve silindirin ön yüzeyi ile sınırlandırılan bir akış alanı oluşturmuştur. + 60 rpm' de bulunan üçüncü girdabın, + 120 ve + 240 rpm dönme hızlarında oluşmamıştır. C10 konumunun + 60 rpm dönme hızına benzer akış meydana getiren C11 konumunda dönme hızının artması, ikinci girdabın boyutunu arttırmıştır.

Silindir konumları için dönme hızlarının girdap dağılımları Şekil 9' da gösterilmiştir. Boş kavitede, kavite içerisindeki durgun akışta yeteri kadar hareketliliğin sağlanamamasından dolayı akıştaki girdap dağılımlarının belirginleşecek seviyede türbülanslı olmadığı belirlenmiştir. C1 konumunun + 60 rpm dönme hızında silindirin alt yüzeyinden geçen akışın kayma tabakasında yarattığı kararsızlık girdap dağılımda da görülmüştür. Dönme hızının artmasıyla silindirin üst yüzeyinden geçen akışın kayma tabakasına etki sağlamadığı da gözlemlenmiştir. Boş kavitedeki durgun akış hali C1 konumunda belirli seviyeye kadar türbülanslı olacak şekilde sağlanmıştır. C2 konumunun bütün dönme hızlarında kayma tabakasında oluşan salınımlar aynı girdap seviyesinde oluşurken, silindirin arkasında oluşan girdap seviyesi giderek azalmıştır. Kavite içerisinde en belirgin girdap oluşumu silindirin etrafında meydana gelmiştir. Kayma tabakasının oluşturduğu girdap yapılarının varlığı özellikle + 60 ve + 120 rpm dönme hızlarında gözlemlenmiştir. C3 konumunda kavite ön duvarından ayrılan kayma tabakası ve silindir etrafında oluşan akışın girdap yoğunluğu kavite de belirgin girdap dağılımı sağlamıştır. C4 ve C5 konumunda kavite ön duvarından ayrılan kayma tabakası salınımları ile silindirin etrafında oluşan akış belirgin girdap dağılımları üretmiştir. Özellikle C5 konumunun + 60 rpm dönme hızında silindirin alt yüzeyine temas eden ters akışın silindirin ön ve arka yüzeylerinde hız artışı yapmış olması kavite kayma tabakasına doğru daha belirgin girdap alanları oluşturmuştur. C6 konumunda dönme hızının artması kavite ön yüzeyinden ayrılan kayma tabakası ile silindirin üst yüzeyinden geçen akışta yüksek seviyelerde girdap üretmiştir. + 240 rpm' de birinci girdap yapısını oluşturan kayma tabakasının kavite ön duvarında oluşturduğu girdap yoğunluğu da gözlemlenmiştir. C7 konumunda artan dönme hızlarında ikincil girdap yapısının kavite içerisindeki hareketinin kayma tabakasında oluşturduğu etkiler belirgin girdap yoğunlukları oluşturmuştur. Özellikle +240 rpm dönme hızında kayma tabakasına ait girdap dağılımları kavite arka duvarına doğru yaklaşmıştır.

C8 ve C9 konumlarında en az girdap üretimi kayma tabakasında en fazla girdap üretiminin ise silindirin etrafındaki akışta oluşturmuştur. C10 konumunda kayma tabakasındaki girdap yoğunluğu silindirin varlığından dolayı kavite

arka duvarına doğru artmıştır. Silindirin alt yüzeyinden kavite tabanına ayrılan kayma tabakasının ise kavitede oluşturduğu girdap yapılarının varlığı görülebilmektedir. C11 konumunun + 60 ve + 120 rpm dönme hızlarında silindirin etrafında oluşan akışa kavite arka duvarının etkisi silindirin alt yüzeyinden geçen akış alanının girdap dağılımlarından da belirlenebilmektedir. Artan dönme hızı ile kavite içerisine genişleyen girdap bölgesinin yoğunluğu silindirin alt yüzeyinde oluşan ikinci girdabın boyutunu arttırdığını göstermektedir.

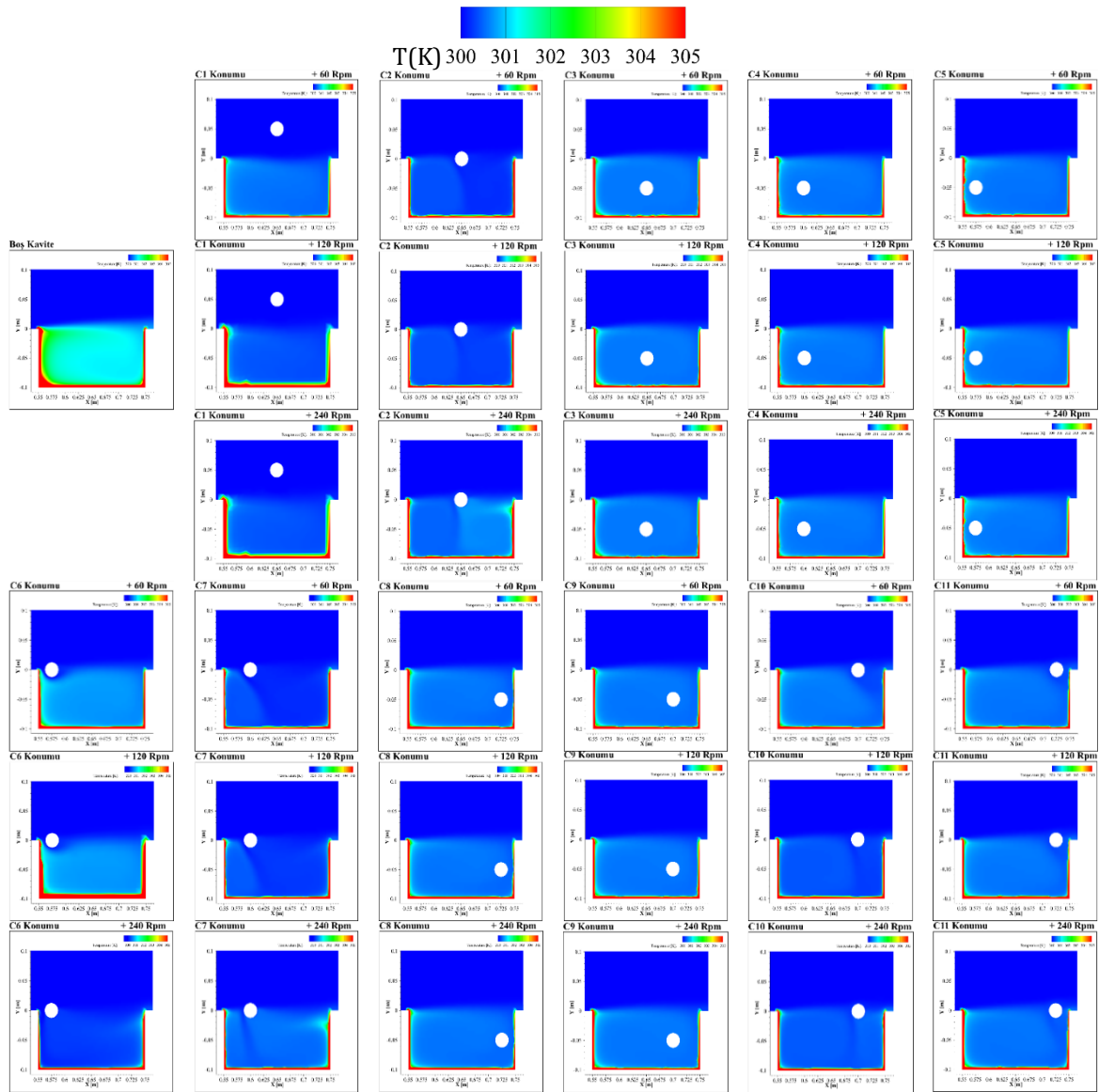


Şekil 9. Farklı silindir konumları ve saat yönünde dönme hızlarındaki girdap dağılımları (Vorticity distributions at different cylinder positions and clockwise rotation speeds)

3.1.2. Isı Transferi Üzerinde Etkisi (The Effect On Heat Transfer)

Silindir konumlarının, dönme hızlarına ait akış alanı içerisindeki sıcaklık dağılımları ve Nusselt sayısındaki değişimleri Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir. C1 konumunun + 120 ve + 240 rpm dönme hızlarında, + 60 rpm dönme hızına nispeten daha yüksek hızlarda girdap yapısının oluşması kavite içerisindeki yüzey sıcaklığının azalmasını sağlamıştır. Boş kavite akışında olduğu gibi tüm kavite uzunluğu boyunca zayıf girdap akışı yerine yüksek hıza sahip girdap akışının oluşması ısı transferini iyileştirmiştir. Özellikle en fazla yüzey sıcaklığında azalmanın + 120 rpm dönme hızında olduğu belirlenmiştir. C2 konumunda dönme hızı arttıkça kavite içerisindeki girdapların hız değerlerinde azalmalar gözlemlenmiş (Şekil 6) ve bu yüzden kavite ön ve arka duvarlarında oluşan girdap yapılarının hızlarındaki azalmalar ısınmış olan akışkanın kavite içerisinde dolaşmasına sebep olmuştur. Kavite arka duvarının üst köşesinde oluşan dördüncü girdap yapısı da kavitedeki yüzey sıcaklığının artmasını büyük ölçüde etkilemiştir. Şekil 10'da görüldüğü üzere C2 konumu için en iyi ısı transfer sonucu + 60 rpm dönme hızında elde edilmiştir. C3 konumunda silindirin dönme hızının artması kaviteye giren akışın azalmasına ve ısınan akışın kavitede dolaşmasına sebep olmuş ve bu durum ısı transferini olumsuz etkilemiştir. C4 ve C5 konumlarında artan dönme hızı ile silindirin arka yüzeyindeki girdap çekirdeğinin boyutunun azalması, kavite içerisindeki yüzey

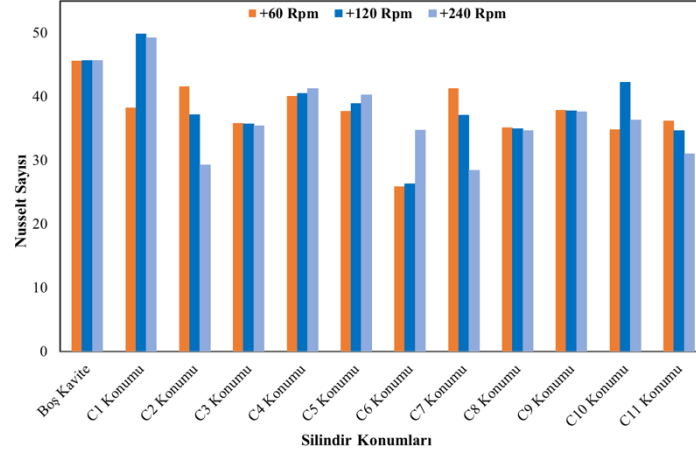
sıcaklığını azaltmış fakat boş kavite durumuna göre ısı transferinde iyileştirme sağlanamamıştır. C6 konumunda dönme hızının artması kavitedeki girdapların hız değerlerini arttırmış ve + 240 rpm’ de değişen akış yapısı ısı transferi için olumlu sonuç oluşturmuştur. C2 konumunda olduğu gibi C7 konumunda da kavitede zayıf girdaplar arasındaki indüklenmiş akış dönme hızının artmasıyla ısı transferi için olumsuz etki oluşturmuştur. Kavite arka duvarının üst köşesindeki dördüncü girdap yapısı da kavitedeki ısı geçişini azaltan diğer bir nedendir. C8 konumunda silindirin arka yüzeyinde oluşan ikinci girdabın boyutunun ve hızının artması kavite içerisindeki yüzey sıcaklığını artırarak ısı geçişini azaltmıştır. C9 konumu, C8 konumu ile kıyaslandığında girdap çekirdeğindeki azalma ve ikinci girdabın oluşmaması ısı transferinde daha iyi sonuç sağlamıştır. Ancak her iki konumda da dönme hızının artması silindir etrafındaki ısınan akış miktarını arttırdığından ısı transferinde istenilen sonuç elde edilememiştir. C10 konumunda dönme hızlarının artması kavite içerisindeki sıcaklık dağılımlarında farklı sonuçlar ortaya koymuştur. Bu durum girdap boyutları ve kavitedeki hız dağılımından kaynaklanmaktadır. + 60 ve + 240 rpm dönme hızlarında kaviteden uzaklaşmak isteyen akışın ikinci girdap ile tekrar kavite içerisine alınması ve zayıf girdap akışları ısı geçişini azaltmıştır. Şekil 11’ e incelendiğinde C10 konumunda en iyi ısı transferinin + 120 rpm’ de olduğu belirlenmiştir. C11 konumunun ısı transferinde iyileştirmenin sağlandığı dönme hızı + 60 rpm’ dir. Bu dönme hızında, kavite tabanına yakın oluşan birinci girdabın güçlü ters akış oluşturması ve silindirin alt yüzeyinde bulunan ikinci girdap yapısının boyutunun az olması akışın kavite arka duvarından daha hızlı uzaklaşmasını sağlamıştır.



Şekil 10. Farklı silindir konumları ve saat yönünde dönme hızlarındaki sıcaklık dağılımları (Temperature distributions at different cylinder positions and clockwise rotation speeds)

Şekil 11’de verilmiş olan silindir konumlarının dönme hızlarına ait Nusselt sayı değişimleri incelendiğinde, C2, C7 ve C11 silindir konumlarında dönme hızının artması ısı transferini iyileştirmemiştir. Kayma tabakası doğrultusunda bulunan bu silindir konumlarında dönme hızı arttıkça kavite içerisindeki girdap yapıları artmış

fakat ikinci girdap yapılarının boyutlarındaki artış ve kavite arka duvarında oluşan köşe girdapları ısı transferini olumsuz etkilemiştir. Silindirin dönme hızının artması kavite ön duvarına yakın noktalara yerleştirilmiş olan C4, C5 ve C6 silindir konumlarında olduğu gibi ısı transfer kalitesini artırmıştır. C4 ve C5 konumlarında dönme hızı arttıkça ısıtılmış kavite duvarlarındaki ısı transfer özellikleri ayrılmış akışın yeniden bağlanması ve yüksek hızlardaki girdap akışından büyük ölçüde etkilenmiştir. C6 konumunda dönme hızı arttıkça kavite ön duvarının üst köşesinde oluşan köşe girdabı ve kavite tabanı boyunca gelişen girdap yapısı ısı transferinin artmasında önemli etkiler sağlamıştır. Silindir konumlarının dönme hızları için elde edilen ısı transfer sonuçları boş kavite ile karşılaştırıldığında, C1 konumunun + 120 rpm ile + 240 rpm dönme hızlarında kavite içerisinde tek bir girdap yapısının oluşması ve dönme hızı arttıkça girdap boyutunun azalması ısı geçişinde % 8.49 kadar bir artış oluşturmuştur.



Şekil 11. Boş kavite ve silindir konumlarının saat yönünde dönme hızlarına göre Nusselt sayısının değişimleri (Variations of Nusselt number according to clockwise rotational speed of empty cavity and cylinder positions)

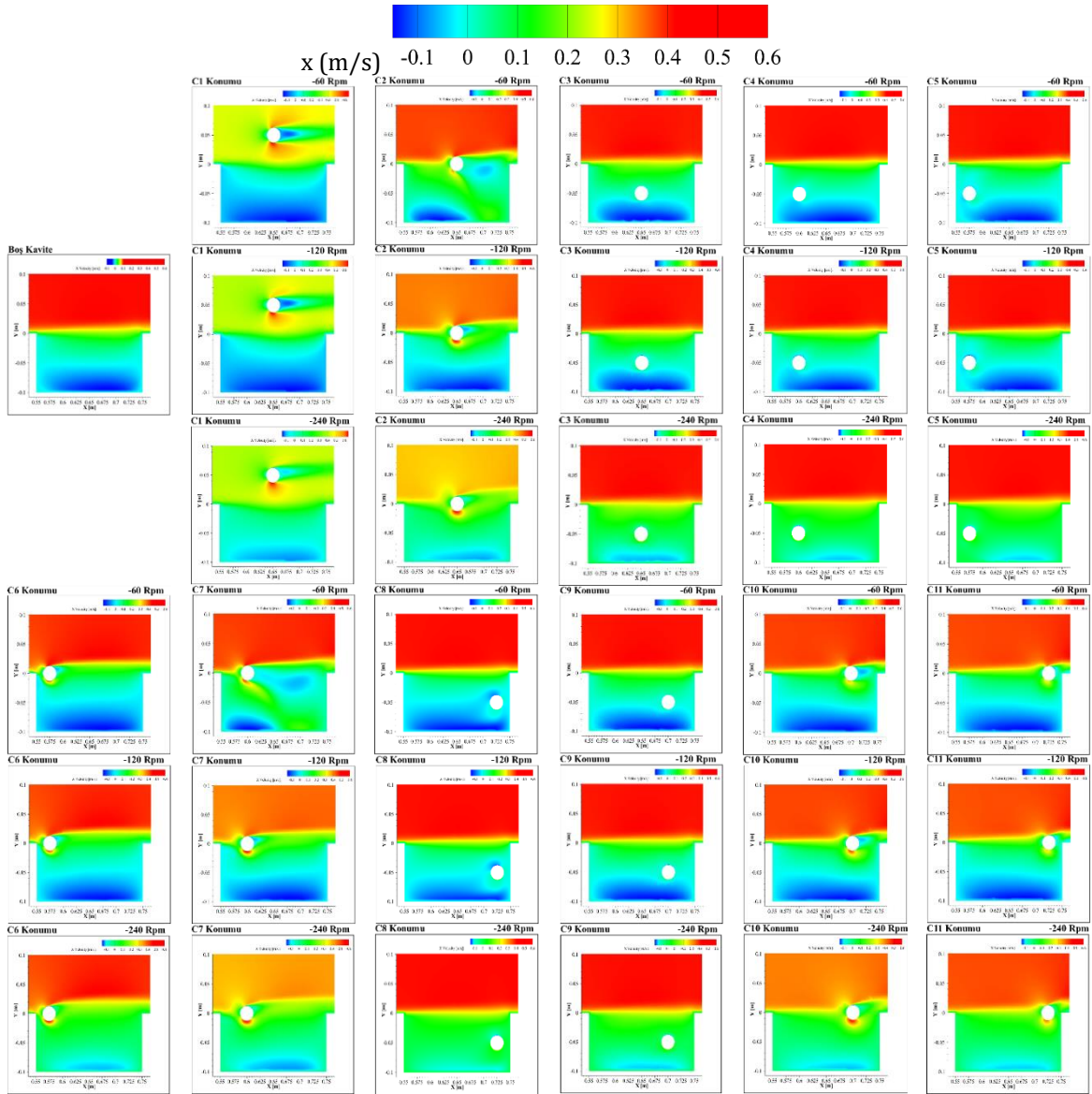
3.2. Saat Yönünün Tersine Dönme Hızlarının Akış Yapısı ve Isı Transfer Üzerindeki Etkisi (The Effect Of Counter Clockwise Rotational Speeds On Flow Structure And Heat Transfer)

3.2.1. Akış Yapısı Üzerinde Etkisi (The Effect On Flow Structure)

Silindir konumlarının dönme hızlarına ait x ve y hızı dağılımları Şekil 12 ve Şekil 13' te gösterilmiştir. C1 konumunda, kavite ön duvarından ayrılan kayma tabakasının kavite arka duvarı ile etkileşimi ters akışı meydana getirmiştir. Dönme hızı arttıkça, kavite tabanına yakın konumlarda ve silindirin alt yüzeyinde hız artışı olmuştur. C2 konumu, - 60 rpm dönme hızında kavite içerisinde iki farklı ters akış oluşturmuştur. Oluşan akış her ne kadar + 60 rpm dönme hızına benzer (Şekil 3 ve Şekil 4) olsa da - 60 rpm' de bu ters akışlar daha yüksek hızlardadır. Dönme hızı arttıkça, kavite içerisindeki iki farklı ters akışın yerine tek bir ters akış oluştuğu gözlemlenmiştir. C3 konumunda silindiri de içerisine alan tek bir ters akış olduğu görülse de, y hızının kavite arka duvarında yapmış olduğu negatif yöndeki hız artışı, silindirin ön ve arka yüzeylerinde iki ters akış olduğunu göstermiştir. C4 ve C5 konumları saat yönündeki dönme hızlarından farklı akış oluşturmamışlardır. x hızının kavite tabanına yakın doğrultuda yön değişimi kavite içerisinde ters akışın oluştuğunu göstermiştir. Kavite arka duvarındaki negatif y hızının silindirin ön yüzeyinde pozitif yöndeki hız değişimi ise, ters akışa ait girdap çekirdeğinin akış alanıdır. C6 konumunda silindir etrafında akış oluşmuş ve silindirin alt yüzeyinden geçen kayma tabakasının kavite arka duvarına yakın hız değişimi kavite içerisindeki birinci ters akışı göstermiştir. Silindirin üst ve alt yüzeylerindeki pozitif y hızı ile kayma tabakası doğrultusundaki negatif x hızı, ikinci ters akıştan dolayı oluşmuştur. Dönme hızı arttıkça birinci ters akış kavite arka duvarında daha keskin dönüşler yapmış ve ikinci ters akışa ait hız büyüklüklerinde azalmalar olduğu gözlemlenmiştir. C7 konumunun - 60 rpm dönme hızında kavite de bulunan iki farklı ters akış yapısının yerini - 120 ve - 240 rpm dönme hızlarında tek bir ters akış yapısı almıştır. - 120 rpm dönme hızında silindirin üst yüzeyindeki negatif x hızları kavite de oluşan ikinci ters akışı göstermektedir ve dönme hızı arttıkça bu ters akış yapısı kaybolmuştur. C8 ve C9 konumları, kavite arka duvarının önünde keskin bir dönüş yaparak kavite ön duvarına doğru ters akış oluşturmuşlardır. Dönme hızının artması C8 konumuna göre C9 konumunda kavite tabanına yakın daha yüksek hızlara sahip ters akış meydana getirmiştir.

C10 konumunda maksimum pozitif x hızı silindirin alt yüzeyinde, maksimum negatif y hızı ise silindirin ön yüzeyine yakın konumda gözlemlenmiştir. Kayma tabakası kavite arka duvarının alt köşesine doğru ilerleyerek, kavite tabanına yakın ve kavite ön duvarına kadar uzanan ters akışı meydana getirmiştir. Silindirin arka yüzeyinde oluşan negatif x hızı kavite arka duvarının üst köşesine yakın konumdaki ters akış yapılarını göstermiş ve dönme hızı arttıkça oluşan ters akış yapıları kaybolmuştur. C10 konumda kayma tabakasının kavite içerisinde oluşturduğu ters akış C11 konumuna göre daha yüksek hızlardadır. C11 konumunda maksimum pozitif x hızı silindirin alt

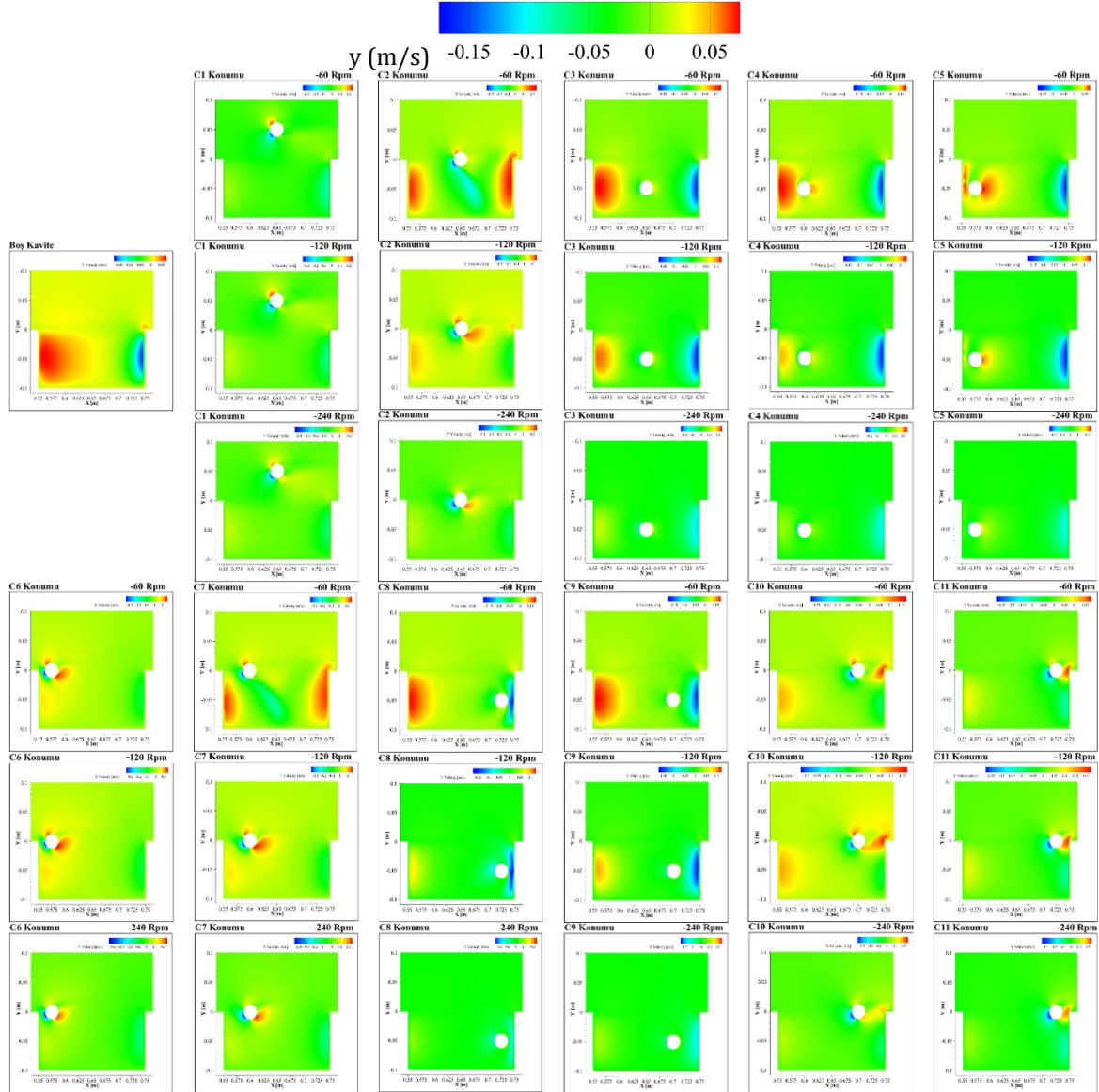
yüzeyinde, maksimum pozitif y hızı ise kavite arka duvarının üst köşesinde gözlemlenmiş ve dönme hızındaki artış bu hız büyüklüklerini artmıştır.



Şekil 12. Değişen silindir konumları ve saat yönünün tersi yöndeki dönme hızlarına göre kavite içindeki x -hızı dağılımları (x -velocity distributions in the cavity according to varying cylinder positions and counter clockwise rotational speeds)

Kavitedeki ortalama boyutsuz hız profillerinin incelenmesi için belirlenen dikey ve yatay eksenler üzerindeki konumlar Şekil 5' te gösterilmiştir. Silindir konumlarının akış yönü doğrultusunda (u/U_∞) ve akışa dik doğrultudaki (v/U_∞) ortalama boyutsuz hız bileşenlerinin gösterildiği grafikler Şekil 14 ve Şekil 15' te verilmiştir. C1 konumu her iki yöndeki dönme hızları için boş kaviteye benzer akış yapısını değiştirmemiştir fakat saat yönünün tersi yöndeki dönme hızlarında kavite içerisinde oluşan girdabın hızı ve boyutu daha fazladır. Bu durum dönme yönünün etkisine bağlı olarak silindirin alt yüzeyinden geçen akışın hızındaki artıştan kaynaklanmaktadır. C2 konumunun - 60 rpm dönme hızında $y/D = -0.25$ ve $y/D = 0'$ daki hız profillerine ait grafik eğrilerinin negatif ve pozitif yöndeki tepe noktaları kavite içerisinde oluşan girdap yapılarını göstermektedir. - 120 ve - 240 rpm dönme hızlarındaki grafik eğrilerinde hızın kavite içerisinde negatif yönde tek bir tepe noktası oluşturduğu gözlemlenmiştir. Her iki dönme hızında da kayma tabakası boyunca akış yönünde hız değişimi olduğunu ve kavite tabanına yakın konumda yüksek hızlarda bir ters akışın olduğu görülmüştür. - 60 rpm dönme hızında oluşan girdap akışlarının hız büyüklükleri - 120 ve -240 rpm dönme hızlarına göre oldukça fazladır. C3 konumunda dönme hızının artması kavite tabanına yakın daha zayıf girdap akışı oluşturmuştur. Ana girdap yapısına ait silindirin ön ve arka yüzeylerinde oluşan girdap merkezlerinin konumları ve boyutları dönme hızı arttıkça farklılık göstermiştir. Kavite girişine yakın konumda, $y/D = -0.25'$ deki hız profilinin grafik eğrisinde oluşan düşey hız bileşenin tepe değeri, kavite içerisine kayma tabakası ile eklenen akışkan miktarını göstermiştir ve dönme hızı arttıkça kaviteye eklenen akış miktarı artmıştır. C4 ve C5 konumlarında $y/D = -0.25'$ deki hız profilinde dönme hızı arttıkça yatay hız bileşeninin negatif yöndeki tepe değeri artmıştır ve bu durum silindiri de içerisine alan ana

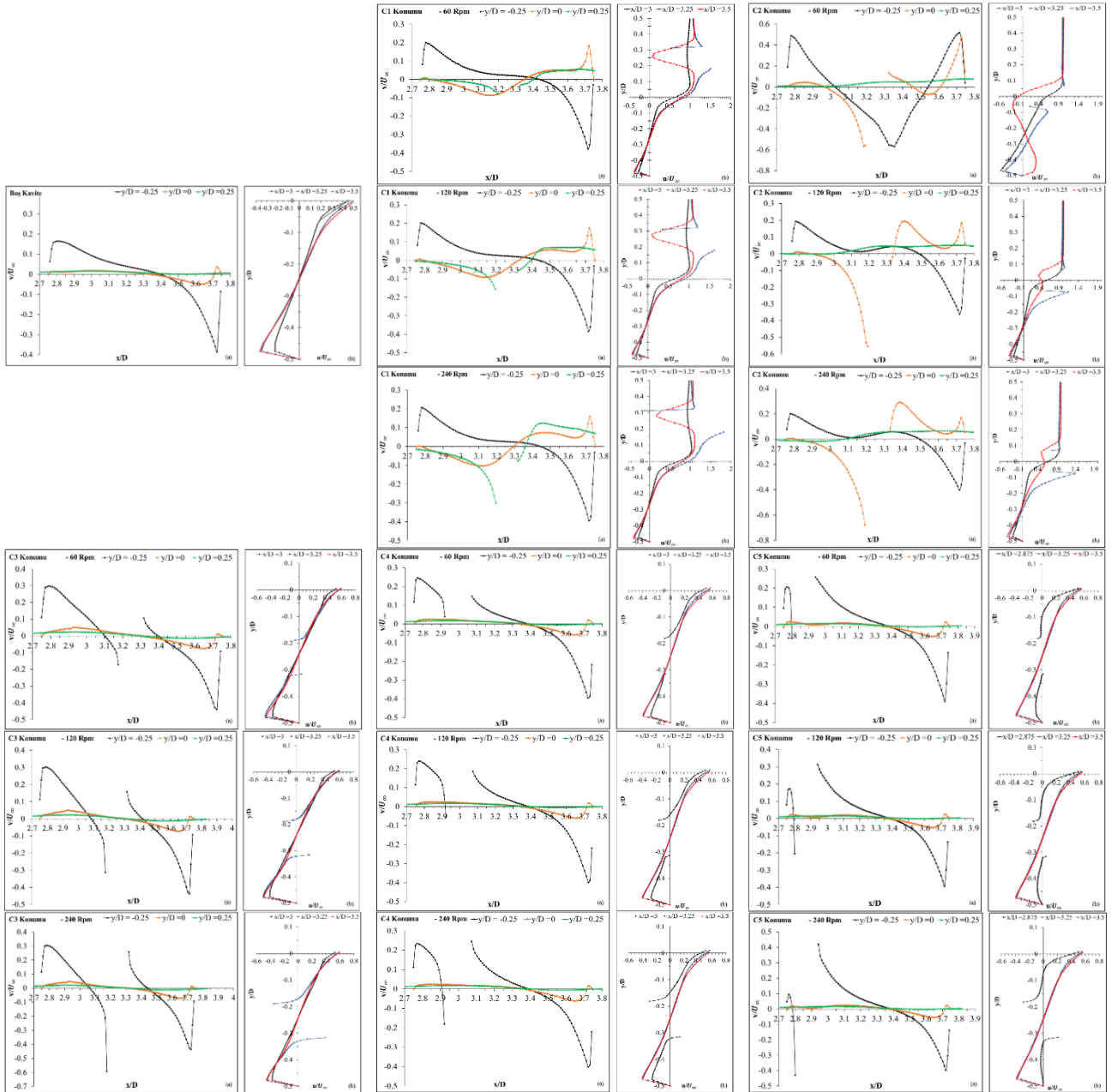
girdabın gücünün arttığını göstermiştir. Kavite ön duvarına yakın konum olan $x/D= 2.875$ ' deki yatay hız bileşenlerinin kavite tabanında oluşturduğu ters akış silindirin dönme yönüne ve hızına bağlı olarak sürüklediği akış etkisinden dolayı azalmıştır.



Şekil 13. Değişen silindir konumları ve saat yönünün tersi yöndeki dönme hızlarına göre kavite içindeki y-hızı dağılımları (y-velocity distributions in the cavity according to varying cylinder positions and counter clockwise rotational speeds)

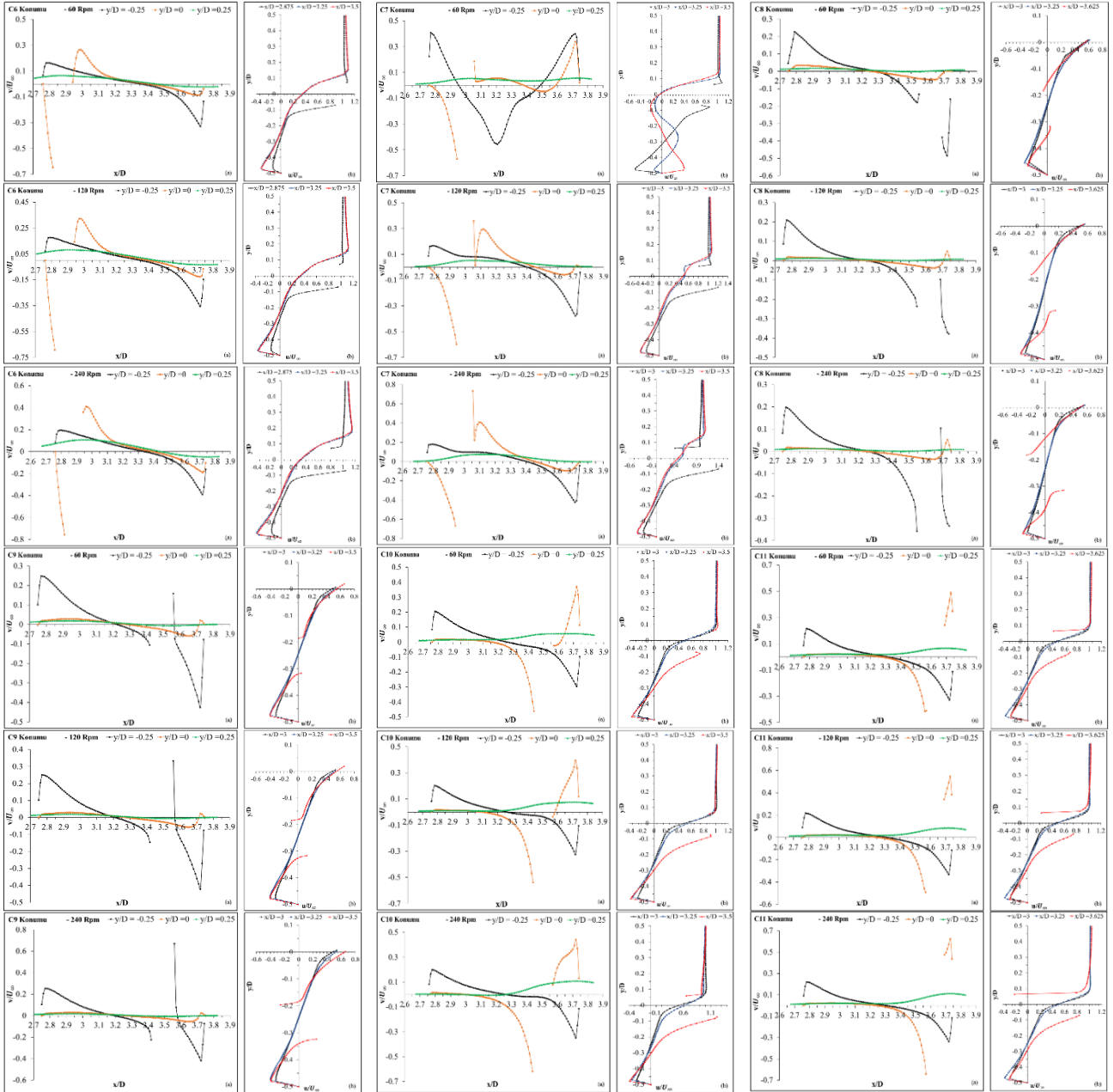
C6, C10 ve C11 konumlarında Kayma tabakası doğrultusundaki hız profiline ($y/D = 0$) negatif tepe değeri bu ters akışın oluşturduğu kavite içerisindeki ana girdabı göstermektedir (Şekil 4.15). Dönme hızı arttıkça $x/D = 3.25$ ve $x/D = 3.5$ ' teki hız profillerinde kavite tabanına yakın konumlarda belirlenen negatif hız bileşenlerinde artış olduğu gözlemlenmiş ve bu artış kavitedeki girdap oluşumunu olumlu etkilemiştir. C7 konumunda $x/D = 3$ ile $x/D = 3.5$ ' deki hız profillerinin kavite tabanına yakın oluşturduğu negatif ve pozitif hızlardaki tepe değerleri, kavitede içerisindeki iki farklı yönde dönen girdap akışlarıdır (Şekil 16). - 120 ve - 240 rpm dönme hızlarında yatay ve dikey doğrultuda kavite tabanına ve kavite arka duvarına yakın konumlarda artan negatif yöndeki hızlar kavite içerisindeki girdap akışının değiştiğini ve sadece tek bir girdap akışı oluştuğunu göstermiştir. Dönme hızlarındaki artış bu girdabın hız büyüklüğünün artmasında etkili olmuştur. C8 ve C9 konumlarının $y/D = - 0.25$ ' deki hız profillerinde kavite arka duvarına yakın negatif hızdaki tepe değeri kavite uzunluğu boyunca oluşan ana girdabın hızını göstermiştir. Dönme hızı arttıkça C9 konumunda girdabın hızı ve boyutu azalırken C8 konumunda sadece girdabın hızında azalma meydana gelmiştir. Silindir konumlarının dönme hızlarına ait zaman ortalamalı akış hızlarını gösteren akım çizgileri Şekil 14' de sunulmuştur. Görüldüğü gibi C1 konumu saat yönündeki dönme hızlarına (Şekil 8) ve boş kavite durumuna benzer akış yapısı oluşturmuş ve tüm kavite uzunluğu boyunca saat yönünde tek bir girdap akışı hakimdir. Dönme yönüne bağlı olarak silindirin alt yüzeyinden geçen akış ile kayma tabakası silindir varlığından belirgin şekilde etkilenmiş ve bu bölgedeki akış alanında hız artışı gözlemlenmiştir.

C2 konumunun - 60 rpm dönme hızında, akım çizgilerinin tüm kaviteyi dolduran ve birbiri tersi yönde dönen üç dönel yapıyı oluşturduğu görülmektedir.



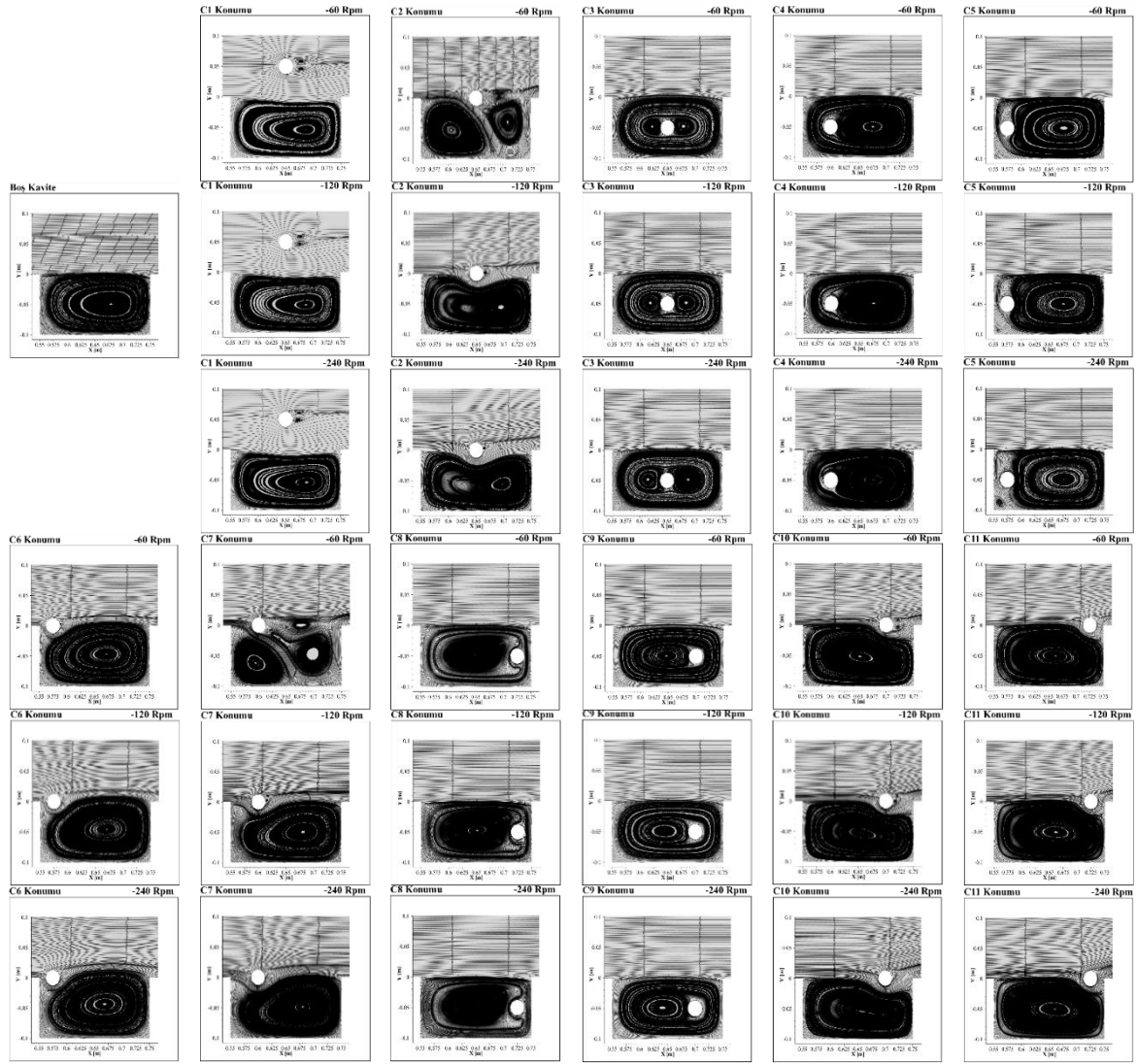
Şekil 14. C1, C2, C3, C4 ve C5 konumlarının boyutsuz hız profilleri, a) Yatay eksen üzerindeki boyutsuz hız profili, b) Dikey eksen üzerindeki boyutsuz hız profili (The non-dimensional velocity profiles of C1, C2, C3, C4 and C5 positions, a) The non-dimensional velocity profiles on horizontal axis b) The non-dimensional velocity profiles on vertical axis)

Birinci ve ikinci girdaplar kayma tabakasına ait girdap yapılarıdır ve birinci girdap saat yönünde, ikinci girdap ise saat yönünün tersi yönde dönmektedir. Silindirin arka yüzeyinde saat yönünde dönen üçüncü girdap yapısı ikinci girdap tarafından oluşturulmuştur. Dönme hızının artması kavitedeki akışı değiştirerek sadece ana girdap akışının oluşmasında etkili olmuştur. - 120 rpm dönme hızında silindirin alt yüzeyinden geçen akış alanının hızlanması, ana girdap yapısını kavite orta düzlemi doğrultusunda baskılamış ve dönme hızı - 240 rpm'e artırıldığında bu baskılama kavite içerisine doğru daha çok artmıştır. C3 konumunda - 60 rpm, - 120 rpm ve - 240 rpm dönme hızlarında, kavite arka duvarı ile etkileşen kayma tabakası, saat yönünde dönen ana girdap yapısını meydana getirmiştir. Ana girdap yapısının en önemli özelliği silindirin ön ve arka yüzeylerinde oluşturduğu girdap merkezleridir ve dönme hızı arttıkça bu girdap merkezlerinin boyutları artmaktadır. Artan dönme hızları C4 ve C5 konumlarında, silindirin arka yüzeyinde oluşan girdap çekirdeklerinin boyutlarını arttırmıştır.



Şekil 15. C6, C7, C8, C9, C10 ve C11 konumlarının boyutsuz hız profilleri, a) Yatay eksen üzerindeki boyutsuz hız profili, b) Dikey eksen üzerindeki boyutsuz hız profili (The non-dimensional velocity profiles of C6, C7, C8, C9, C10 and C11 positions, a) The non-dimensional velocity profiles on horizontal axis b) The non-dimensional velocity profiles on vertical axis)

C5 konumunun kavite ön duvarına C4 konumuna nispeten daha yakın olması silindirin ile duvar arasındaki alanı daralmış ve dönme hızının artmasıyla bu alandan silindirin arkasına sürüklenen akışın hızı artmıştır. Sürüklenen yüksek hızlı akış ile ana girdap yapısı arasındaki indüklenmiş akış alanı kavite ön duvarının alt köşesinde saat yönünün tersi yönde dönen köşe girdabını oluşturmuştur. Dönme hızındaki artış ile orantılı olarak bu köşe girdabı boyutunu arttırmaktadır. C6, C10 ve C11 konumları, tüm dönme hızlarında birbirlerine benzer şekilde akış oluşturmuşlardır. Bu konumlarda dönme hızı - 240 rpm'e yükseldikçe silindirin alt yüzeyinden geçen akışın hızı artmış ve saat yönünde dönen ana girdap yapısının üzerinde baskılanmış bir akış alanı oluşturmuştur. C6 ve C10 konumlarının silindirin arka yüzeyinde oluşturduğu küçük girdap akışlarına kayma tabakasındaki hız artışına bağlı olarak - 240 rpm dönme hızında rastlanmamıştır. C7 konumunda, - 60 rpm dönme hızı kavite içerisinde farklı olgunluğa sahip pek çok dönele yapı oluşturmuştur. Dönme hızının artması silindirin alt yüzeyinden geçen kayma tabakasının akış enerjisini artmıştır ve kavite arka duvarı ile etkileşimi sonucunda oluşan ters akış (Şekil 12 ve Şekil 13) tüm kaviteyi kaplayan sadece ana girdap yapısının oluşmasına olanak sağlamıştır. C8 ve C9 konumları, C4 ve C5 konumlarına benzer özelliklerde akış meydana getirmiş ve dönme hızının artması bu konumlarda da girdap çekirdeğinin boyutunun artmasında etkili olmuştur. C5 konumunda oluşan köşe girdabı, C8 konumunda silindirin arka yüzeyi ile kavite arka duvarı arasındaki bölgede saat yönünde dönen küçük girdap yapısı olarak oluşmuştur

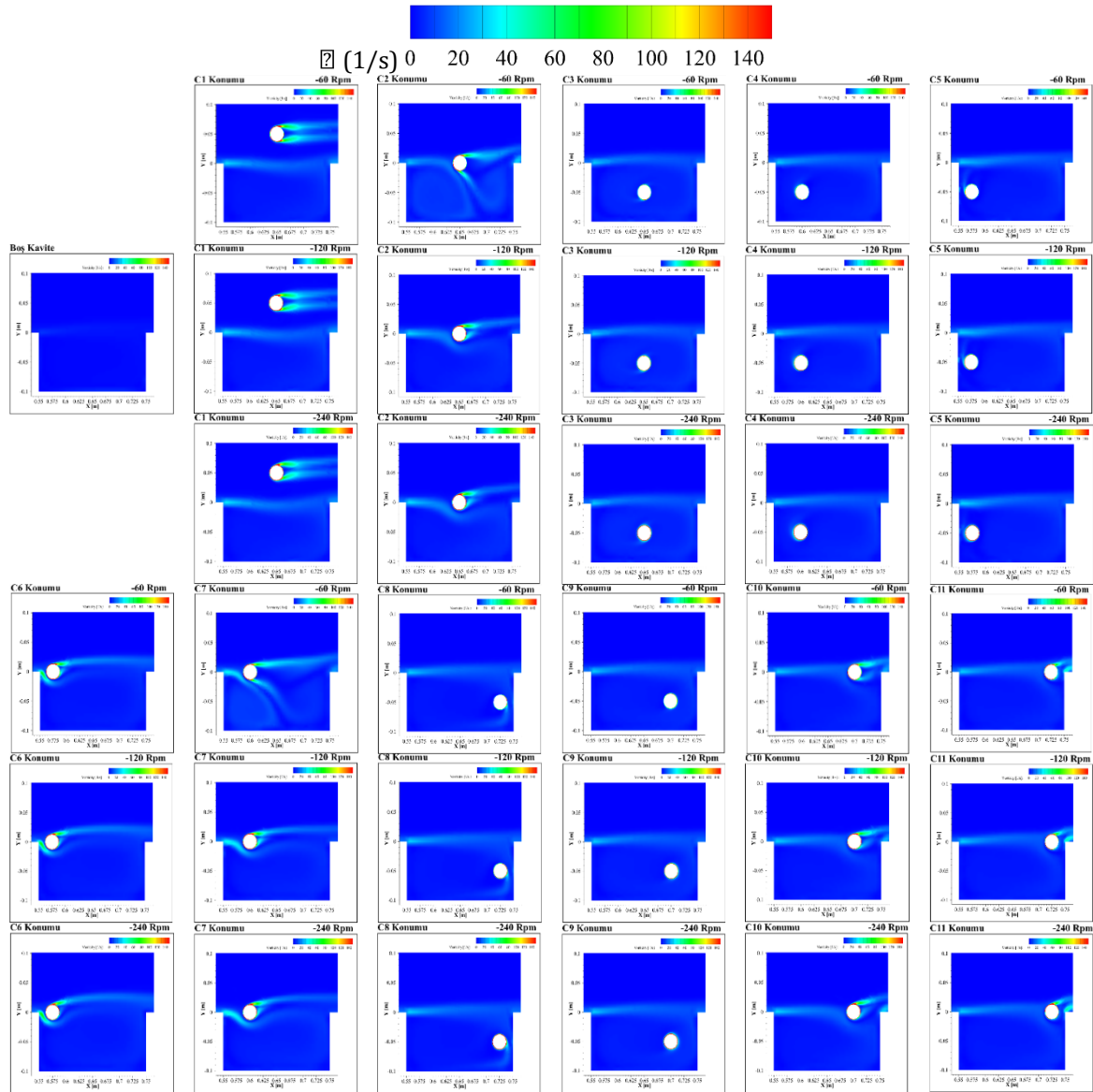


Şekil 16. Silindir konumlarının saat yönünün tersi yöndeki dönme hızlarındaki zaman ortalamalı akım çizgileri (Time-averaged streamlines at counter clockwise rotational speeds of cylinder positions)

Şekil 17, silindir konumlarının farklı dönme hızlarında kavite oluşturduğu girdap dağılımlarını göstermektedir. C1, C2 ve C3 konumlarının, yüksek düzeyde girdap oluşumlarının kavite ön duvarındaki akış ayrılmasında ve silindir etrafındaki akış alanında oluşturduğu belirlenmiştir. C1 konumunda dönme hızının artması kavite ön duvarından ayrılan akışın girdap seviyesini arttırmıştır. Silindirin etrafında oluşan akışın girdap seviyesi, kayma tabakasına nispeten daha fazladır. C2 konumunun - 60 rpm dönme hızında kavite arka duvarının ve silindirin varlığı kavite içerisinde yüksek seviyede girdap üretimi sağlamıştır. Kararsız kayma tabakası, silindirin alt yüzeyine temas ederek kavite tabanına doğru oluşturduğu güçlü dalgalanmalar kavite içerisindeki akışı oldukça türbülanslı hale getirmiştir. Kavite ön duvarı, silindirin arka yüzeyi ve kavite arka duvarının üst köşesinde girdap üretimi gözlemlenmiştir.

- 120 rpm ve - 240 rpm dönme hızlarında kayma tabakasındaki kararsızlıklar kavite arka duvarına doğru ilerlemiştir fakat - 60 rpm dönme hızında olduğu gibi kavite içerisinde yüksek türbülanslı akış oluşturmamıştır. C4 ve C5 konumlarında, dönme hızının artması kayma tabakası ve silindir ile kavite ön duvarı arasındaki bölgede girdap seviyesinin artışı sağlamıştır. C5 konumunun kavite ön duvarına yakın olması C4 konumuna göre bu bölgede daha fazla girdap yoğunluğu meydana getirmiştir. C6 ve C7 konumlarında, kayma tabakası ile silindir arasındaki etkileşim kavite ön duvarının üst köşesinde ve silindirin üst yüzeyinde girdap yoğunluğunu artmıştır. C7 konumunun - 60 rpm dönme hızında kayma tabakasının kavite tabanına doğru oluşturduğu güçlü salınımlar ve kavite içerisindeki türbülanslı akış yapısı C2 konumuna benzer girdap üretimi oluşturmuştur. C8 ve C9 konumlarında girdap üretimleri kayma tabakası ve silindir etrafında gözlemlenmiştir. C8 konumunun kavite arka duvarına yakın olması ve silindirin arkasına sürüklenen akıştaki hız artışı bu bölgedeki girdap yoğunluğu arttırmıştır. Fakat C9 konumunda aynı bölge için girdap üretimi gözlemlenmemiştir. C10 konumunun - 240 rpm dönme hızında diğer dönme hızlarından farklı olarak kayma tabakasındaki salınımlar kavite arka duvarının üst köşesine kadar ilerlemiş ve silindirin alt yüzeyinde girdap oluşumu devam etmiştir. C11 konumunda en belirgin

girdap dağılımı, silindirin alt yüzeyinden sürüklenen akışın kavite arka duvarına çarpmasına bağlı olarak kavite arka duvarının üst köşesinde görülmüştür. Çarpmanın etkisiyle bu bölgedeki türbülans seviyesi artırmış ve yoğunlaşmış girdap bölgesi oluşmuştur.

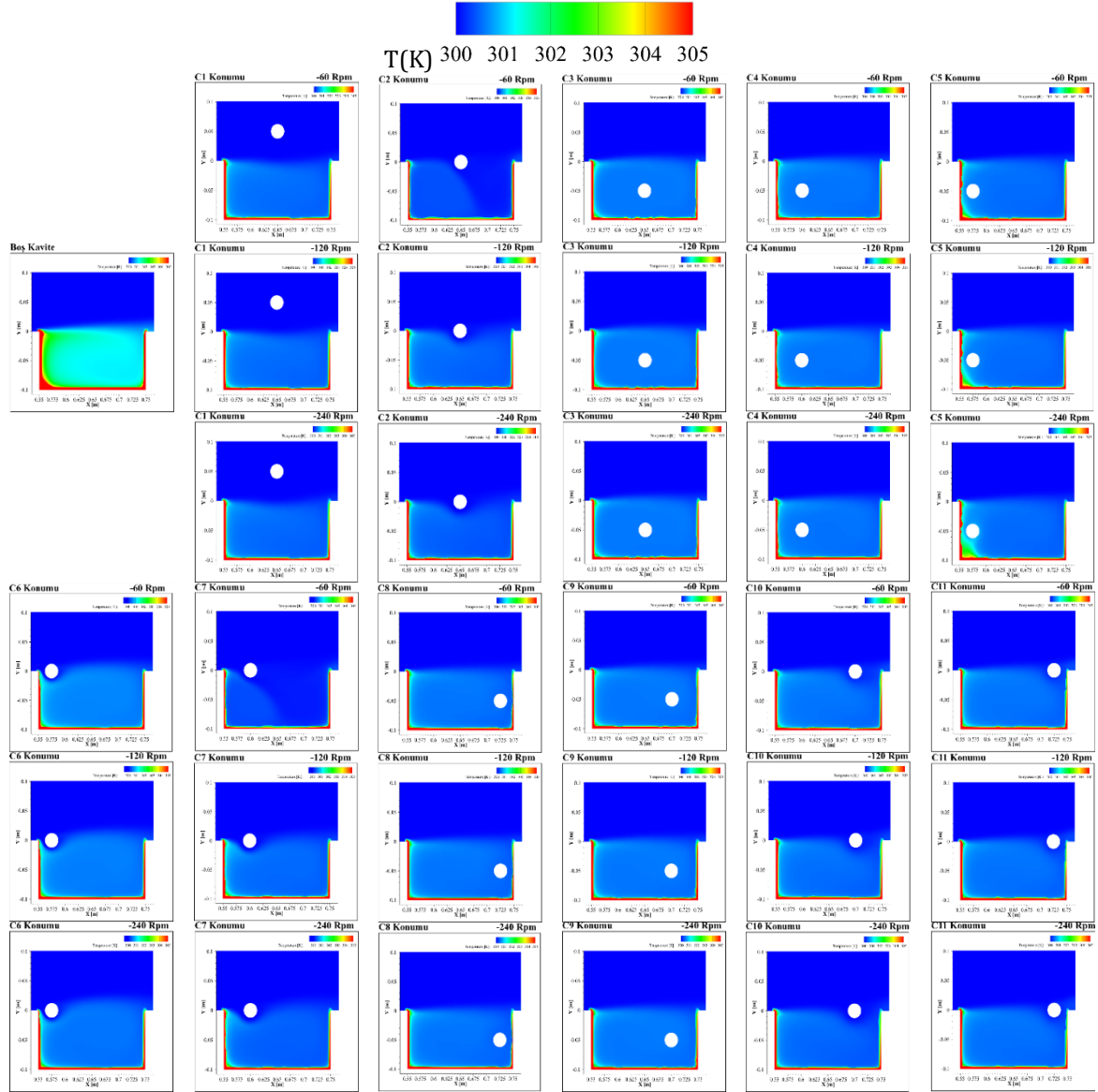


Şekil 17. Silindir konumlarının saat yönünün tersi yönde dönme hızlarındaki girdap dağılımları (Vorticity distributions at counter clockwise rotational speeds of cylinder positions)

3.2.2. Isı Transferi Üzerinde Etkisi (The Effect On Heat Transfer)

Silindir konumlarının farklı dönme hızlarında sabit ısı akısı uygulanmış olan kavite duvarlarındaki sıcaklık dağılımları ve ısı transfer üzerindeki etkilerini gösteren Nusselt sayı değişimleri Şekil 18 ve Şekil 19' da gösterilmiştir. C1 konumunda, dönme hızı artıkça silindirin alt yüzeyine daha fazla akışın yönlendirilmesi ve tüm kaviteyi kaplayan ana girdap yapısının hızının artması kavite içerisindeki yüzey sıcaklığını azaltarak ısı geçişini arttırmıştır. Saat yönünün tersi yöndeki dönme hızlarında oluşan ana girdap boyutunun, boş kavite ve saat yönündeki dönme hızlarında oluşan girdap boyutlarına göre daha fazla olması ısı transferinde olumsuz etki sağlamıştır (Şekil 11 ve Şekil 19). C2 ve C7 konumlarının - 60 rpm dönme hızlarında kavite arka duvarının önünde ve silindirin arka yüzeyinde oluşturdukları yüksek enerjili girdap yapıları, ısınan akışın kavite içerisinden uzaklaşmasında etkili olmuştur. Bu yüzden her iki konumun - 60 rpm dönme hızlarında - 120 ve - 240 rpm dönme hızlarına nispeten daha yüksek ısı transfer sonuçları elde edilmiştir (Şekil 19). C2 ve C7 konumlarının saat yönündeki dönme hızlarında - 60 rpm dönme hızında olduğu gibi ısı transferinde iyileştirme sağlanamamıştır (Şekil 11). Bu durum silindirin dönme yönüne ve kavitedeki girdap akışlarının sahip olduğu hız büyüklüklerinden kaynaklanmaktadır. C3 konumunda dönme hızı artıkça silindirin ön ve arka yüzeylerindeki girdap çekirdeklerinin boyutu ve kavite içerisine kayma tabakası ile eklenen akışın miktarı artmıştır. Ana girdap yapısının içerisinde aynı yönde dönen iki girdap çekirdeğinin bulunması kavitedeki yüzey sıcaklığını azaltarak, ısı geçişini arttırmıştır. C4

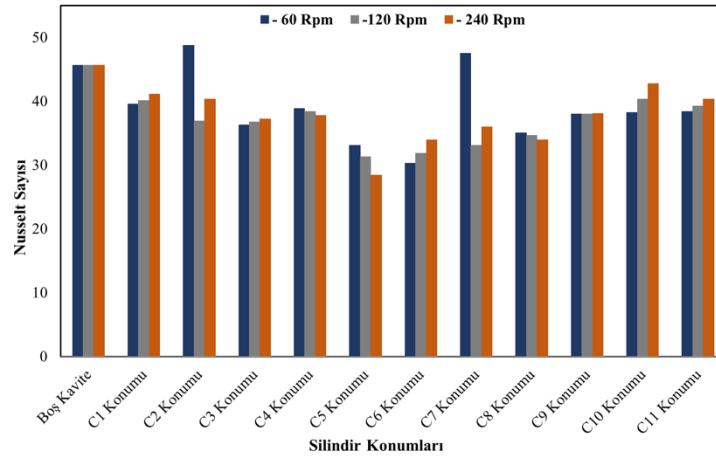
ve C5 konumlarında, kavite ön duvarı ile silindirin ön yüzü arasındaki ısınan akışın, dönme hızı arttıkça silindirin alt yüzüne doğru yönlendirilmesi kavite içerisindeki sıcaklık farkını artırarak, ısı transfer kalitesini azaltmıştır. Her iki konumda da yüksek hızlarda girdap akışları oluşmasına rağmen C5 konumunun kavite ön duvarına daha yakın olması ve kavite ön duvarının alt köşesinde oluşturduğu köşe girdabı bu konum için ısı geçişini daha fazla azaltmıştır.



Şekil 18. Silindir konumlarının saat yönünün tersi yöndeki dönme hızlarındaki sıcaklık dağılımları
(Temperature distributions at counter clockwise rotational speeds of cylinder positions)

C6, C10 ve C11 konumları benzer akış yapıları oluşturan konumlar olmasına rağmen C10 konumunda diğer konumlara nispeten daha iyi ısı geçişi elde edilmiştir. Bu durum C10 konumunun kavite arka duvarına yakın olmasından dolayı kavite dışına aktarılan sıcak akışkan kütlelerinin artmasından kaynaklanmıştır. C8 ve C9 konumlarında, tüm kaviteyi dolduran zayıf girdap akışı mevcuttur ve ısınan akışın silindirin etrafında oluşturduğu akış alanı kavite içerisindeki yüzey sıcaklığını arttırmıştır. C9 konumunda silindirin arka yüzü ile kavite arka duvarı arasındaki bölgede oluşan girdabın, girdap çekirdeği içerisindeki ısınan akışı tekrar kavite içerisine sürüklemesi C8 konumuna göre ısı transferini daha fazla azaltmıştır.

Nusselt sayı değişimlerinin gösterildiği Şekil 19' da boş kaviteye nispeten en yüksek ısı geçişi C2 ve C7 konumlarının - 60 rpm dönme hızlarında elde edilmiştir. Bu konumlar ısı transfer özelliklerinin ayrılmış akışın yeniden bağlanmasından ve girdap akışından büyük ölçüde etkilendiği göstermiştir.



Şekil 19. Boş kavite ve silindir konumlarının saat yönünün tersi yöndeki dönme hızlarına göre Nusselt sayısının değişimleri (Variations of Nusselt number according to counter clockwise rotational speed of empty cavity and cylinder positions)

4. Sonuç ve Tartışma (Results And Discussion)

Yüzeylerine sabit ısı akısı ($\dot{q}=10000 \text{ W/m}^2$) uygulanmış olan açık kavite içerisinde farklı konumlara yerleştirilen ve bu konumlarda dönme hızı tanımlanan adyabatik silindirin akış yapısı ve ısı transfer üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Açık kavitenin D/L oranı 2' dir ve silindir çapı ile tanımlanan Reynolds sayısı 10000 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları; ısıtılmış kavite yüzeylerine temas eden ve tüm kavite uzunluğu boyunca oluşan girdap yapılarının boyutları ve kavite içerisindeki resirkülasyon bölgelerinin doğru konumlanmasının ısı transferini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. C1 konumunda saat yönünde dönme hızı arttıkça, ana girdap yapısının boyutu azalmış ve silindirin alt yüzeyinden geçen akış miktarı artmıştır. Boş kavite ve saat yönünün tersi yöndeki dönme hızlarına nispeten girdap boyutundaki bu azalma en yüksek ısı transfer ile sonuçlanmıştır. C2 ve C7 konumlarında diğer dönme hızlarına ve boş kavite durumuna göre akış enerjisi yüksek girdap oluşumu – 60 rpm dönme hızında oluşmuştur. Bu dönme hızında yüksek enerjili girdap yapıları ve kavite arka duvarından kanala aktarılmak istenilen ısı akışı engellemeyecek boyutta girdap yapısının oluşması ısı transferini arttırmıştır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından OKÜBAP-2019-PT3-022 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ahuja K., Mendoza, J. 1995. Effects of cavity dimensions, boundary layer, and temperature on cavity noise with emphasis on benchmark data to validate computational aeroacoustic codes.
- Bhatti, A., Aung W., 1984. Finite Difference Analysis of Laminar Separated Forced Convection in Cavities, Journal of Heat Transfer, 106(1), 49-54.
- Billah, M.M., Rahman, M.M., Sharif, U.M., Rahim, N.A., Saidur, R., Hasanuzzaman, M., 2011. Numerical Analysis of Fluid Flow Due to Mixed Convection in a Lid-Driven Cavity Having a Heated Circular Hollow Cylinder, International Communications in Heat and Mass Transfer, 38(8), 1093-1103.
- Çengel Y., Cimbala J.M., 2008. Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, İzmir Güven Kitabevi, İzmir Rockwell, D., Naudascher, E., 1978. Review Self Sustaining Oscillations of Flow Past Cavities, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 100(2), 152-65.
- Doğan, F.B., 2014. Eş merkezli dönen iki silindir arasında oluşan Taylor ve Von Karman vortekslerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 110.
- Franke, M.E., Carr D.L., 1975. Effect of Geometry on Open Cavity Flow-Induced Pressure Oscillations, 2nd Aeroacoustics Conference, 492.
- Kumar, A., Dhiman, A.K., 2012. Effect of a Circular Cylinder on Separated Forced Convection at a Backward-Facing Step, International Journal of Thermal Sciences, 52(1),176-85.
- Laouira, H., Mebarek-Oudina, F., Hussein, A.K., Kolsi, L., Merah, A., Obai, Y., 2020. Heat Transfer inside a Horizontal Channel with an Open Trapezoidal Enclosure Subjected to a Heat Source of Different Lengths, Heat Transfer - Asian Research, 49(1), 406-23.

- Madi, A.F., Mataoui, A., Bouahmed, Z., 2011. Influence of Upstream Flow Characteristics on the Reattachment Phenomenon in Shallow Cavities, *Thermal Science*, 15(3) 721-34.
- Manovski, P., Giacobello, M., Soria, J., 2007. Particle Image Velocimetry Measurements over an Aerodynamically Open Two-Dimensional Cavity, in *Proceedings of the 16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 16AFMC, 677-83.
- Mesalhy, O.M., Abdel Aziz, S.S., El-Sayed, M.M., 2010. Flow and Heat Transfer over Shallow Cavities, *International Journal of Thermal Sciences*, 49(3), 514-21.
- Richards, R.F., Young, M.F., Haiad, J.C., 1987. Turbulent Forced Convection Heat Transfer from a Bottom Heated Open Surface Cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(11), 2281-87.
- Sarohia, V., Massier, P.F., 1977. Control of Cavity Noise, *Journal of Aircraft*, 14(9), 833-37.
- Selimefendigil, F., Öztop, H.F., 2014. Numerical Study and Identification of Cooling of Heated Blocks in Pulsating Channel Flow with a Rotating Cylinder, *International Journal of Thermal Sciences*, 79, 132-45.
- Suponitsky, V., Avital, E., Gaster, M., 2005. On Three-Dimensionality and Control of Incompressible Cavity Flow, *Physics of Fluids*, 17(10).
- Şimşek, O., (2020). Üstten Akışlı Kapak Akımının Sayısal Modellemesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 808-819.
- Şimşek, O., Gümüş, V., Özlük, A., (2021). Şaşırtmalı Mahmuzların Üç Boyutlu Sayısal Analizi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(1), 187-198
- Ukeiley, L., Murray, N., 2005. Velocity and Surface Pressure Measurements in an Open Cavity, *Experiments in Fluids*, 38(5), 656-71.
- Zdanski, P.S.B., Ortega, M.A., Nide, G.C.R., Fico, Jr., 2006. On the Flow over Cavities of Large Aspect Ratio: A Physical Analysis, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33(4), 458-66.