

## RÜZGÂR TÜNELİ SAĞANAK AKIŞ ÜRETECİ TASARIMI, DENEYSEL VE HESAPLAMALI İNCELEMESİ

İ. Yığılı<sup>1</sup> ve M.A. Andırın<sup>2</sup>  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Ö. Başkan<sup>3</sup> ve M. Perçin<sup>4,5</sup>  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara  
Rüzgâr Enerjisi ve Teknolojileri Araştırma ve  
Uygulama Merkezi, Ankara

### ÖZET

*Bu çalışma, rüzgâr tüneli için bir sağanak akış üreticinin tasarımı, deneysel ve hesaplamalı incelemesini konu edinmiştir. Sinüzoidal yunuslama hareketi yapan iki kanatçıga sahip bir sağanak üretici imal edilmiş ve RÜZGEM Deneysel Aerodinamik Laboratuvarı'nda bulunan C1 rüzgâr tüneline entegre edilmiştir. Yunuslama frekansı, serbest akış hızı, maksimum hücum açısı ve kanatlar arası mesafe değiştirilmiş ve faz-kilitli iki bileşenli iki boyutlu parçacık görüntülemeli hız ölçme tekniğiyle ölçümler ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 0.26 değerine sahip bir indirgenmiş frekans için akış yönünde 0.02, akışa dik yönde ise 0.09 sağanak oranına sahip bir sağanak akış elde edilmiştir. Buna ek olarak, artan indirgenmiş frekans ile sağanak oranında bir artış ve kanatların iz bölgesinde daha büyük bir sapma açısı gözlenmiştir. Kanatlar arası mesafenin artmasıysa sağanak şiddetinde bir düşüşe sebep olmuştur. Öte yandan, hareket genliğinin artması daha büyük bir sağanak oranıyla beraber sağanak akışın simetrisi ve homojenliğinde bir bozulma meydana getirmiştir. Nümerik simülasyonlar ile deney sonuçları birbirini doğrulamakta, akış alanı yüksek güvenilirlikle yakalanabilmektedir. Bu çalışmanın sonuçları RÜZGEM Büyük Rüzgâr Tüneli için bir sağanak akış üretici üretimi için bir başlangıç noktası olarak kullanılacaktır.*

### GİRİŞ

Sağanak akış üreticileri, taşıma kuvveti üreten yüzeylerin zamana bağlı davranışlarının incelenmesinde kritik bir öneme sahiptir. Birçok çeşitte rüzgâr tüneline kullanıma elverişli olmaları, helikopter, mikro insansız hava aracı ve sabit kanatlı hava araçlarının [Wei, 2019] sağanak akış yanıtlarını inceleyen araştırmacılar için sağanak akış üreticilerini vazgeçilmez hale getirmiştir. Bu durum birçok enstitünün kendi sağanak akış üreticini tasarlayıp imal etmesi ve rüzgâr tünellerine entegre etmesine sebep olmuştur. Sağanak akış üreticileri, rüzgâr tüneli test kesitlerinin girişine konumlandırılan, istenilen büyüklük ve profilde sağanak akış üretmeye yarayan gereçlerdir. Sayısı rüzgâr tüneli kesit alanına bağlı olarak değişen ve salınma hareketi yapan kanatlardan oluşmaktadırlar. Kanatların salınma hareketi sonucunda, test kesiti içindeki akış yönü değişir. Kesit içerisindeki ana akış ve salınım hareketi sonucu oluşan akışın sentezi bu değişime sebep

<sup>1</sup> Araştırma görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: [imge@metu.edu.tr](mailto:imge@metu.edu.tr)

<sup>2</sup> Araştırma görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: [andirin@metu.edu.tr](mailto:andirin@metu.edu.tr)

<sup>3</sup> Dr. Öğretim Üyesi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: [obaskan@metu.edu.tr](mailto:obaskan@metu.edu.tr)

<sup>4</sup> Dr. Öğretim Üyesi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: [mpercin@metu.edu.tr](mailto:mpercin@metu.edu.tr)

<sup>5</sup> RÜZGEM Deneysel Aerodinamik Laboratuvarı Koordinatörü., E-posta: [mpercin@metu.edu.tr](mailto:mpercin@metu.edu.tr)

olmaktadır. Kanatların hücum açısı ve yunuslama hareketi frekansını değiştirerek birçok farklı sağanak akış profili elde etmek mümkündür [Buell, 1969].

Literatürde sağanak akış üreteçlerinin tasarım ve geliştirilmesiyle alakalı birçok çalışma vardır. Wood et al. (2017), deneysel ve nümerik çalışmaları birleştirerek sağanak akış üreteci performansını etkileyen parametreleri çalışmış, bunun sonunda Bristol Üniversitesi'ndeki büyük rüzgâr tüneli için bir sağanak akış üreteci tasarlamıştır. Bu çalışmada kanatların veter uzunluğu ve kanatlar arasındaki mesafe olmak üzere iki tasarım parametresinin önemi üzerinde durulmuştur. Veter uzunluğunun artırılması ve kanatlar arasındaki mesafenin azaltılması sağanak büyüklüğünün artışına yol açmıştır. Ancak, kanatlar arası mesafenin azaltılması sağanak akış altında kalan alanın azalmasına yol açmıştır. Bu çalışmanın ortaya koyduğu bir başka nokta ise, 8 Hz ve üzerindeki yunuslama hareketi frekansları için sağanak profilinin sinüzoidalden ziyade karesel olduğudur [Wood, 2017].

Delft Teknoloji Üniversitesi'ndeki 2.85 m × 2.85 m test kesite sahip açık jet tüneli için bir sağanak akış üreteci tasarlanmıştır [Lancelot, 2015]. Tünelin ulaşabildiği maksimum hız 35 m/s'dir. Bu tasarım için yapılan ön çalışma, indirgenmiş frekans ve kanatların maksimum hücum açısının da önemli tasarım parametreleri olduğunu göstermiştir. DLR'da yer alan transonik rüzgâr tüneline ise NACA0010 profilli tek kanatçığa sahip bir sağanak akış üreteci kullanılarak bir esnek kanat modelinin sağanak akış yanıtı incelenmiştir [Neumann, 2013]. Elde edilen deney sonuçları sonrasında nümerik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, sağanak akış üretecinin iz bölgesindeki aerodinamik ağ hücrelerinin kalitesinin Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü sonuçlarına yaklaşma açısından önemli olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, deneylerin tekrarlanabilirliği göz önünde bulundurulduğunda sağanak akışın istikrarı önem kazanmaktadır. Ancak, tek bir kanat kullanılması iz bölgesinde kesme akımı bölgesinin oluşmasına sebep olmuş ve kanat profili sınır tabakasından dolayı oluşan bu bölge, üretilen sağanak akışın istikrarını bozmuştur. Dolayısıyla, istikrarlı ve tekdüze bir sağanak akış elde edebilmek için ikinci bir kanatçığın eklenmesi gerekliliği ortaya konmuştur [Lancelot, 2015].

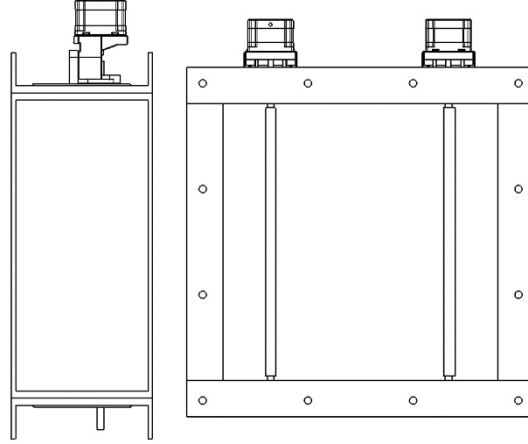
Bilgisayar donanımlı bir başka sağanak akış üreteci, Virginia Tech Durağanlık Rüzgâr Tüneli için geliştirilmiş ve test edilmiştir [Grissom, 2004]. Sistem, rüzgâr tünelinin daralma alanına yukarıdan aşağıya doğru yerleştirilmiş 10 kanattan oluşmaktadır. Her bir kanatçığın bir step motor tarafından kontrol edildiği bu sistemde, sürekli ve ani bozunumlar elde etmek mümkündür. Hareket genliği artırıldıkça sağanak güç kaybı hızlanmış ve bozunumun şekli daha olgun hale gelmiştir. Bunun sebebi, en yüksek genliklerde artan duvar sönümlenmesi etkisidir. Açık jet bir rüzgâr tüneli için tasarlanan bir başka sağanak akış üreteci ise mekanik olarak bağlanmış altı kanattan oluşmaktadır [Saddington, 2014]. Salınan kanatlar bir çerçeveye yerleştirilmiş ve bu çerçeve rüzgâr tüneline monte edilmiştir. Kanat profili NACA0015'tir ve yunuslama açısı, taşıma kaybı durumunu engellemek için 12° ile sınırlandırılmıştır. Kanatların salınım frekansı ise 0.5 Hz ve 2 Hz arasında değişmektedir. Deneysel sonuçlar, kanatların hemen arkasında iyi bir sinüzoid göstermektedir. Kanatlardan uzaklaştıkça ise, kanat iz bölgesi dolayısıyla, enine hız bileşenindeki iniş çıkışların düzleştiği gözlenmektedir. Colorado Boulder Üniversitesi'ndeki Deneysel Aerodinamik Laboratuvarı'nda ise 10 tane NACA0015 profilli kanat, sürekli sinüzoidal salınımlar ve ayrık ani hareketler oluşturmak amacıyla rüzgâr tüneli girişine yerleştirilmiştir [Batemend, 2017]. Periyodik sağanak profilleri, sağanak akış üretecinin zamana bağlı değişen ve değişmeyen davranışlarının incelenmesi sonunda elde edilmiştir. Motor boyutlandırması için ise en ekstrem durumda ortaya çıkan maksimum atalet torqu baz alınmıştır.

Bu bağlamda, bu çalışmanın amacı iki kanatlı bir sağanak akış üretecinin tasarım ve karakterizasyonunu yapmak ve kapalı test kesitinde istenen sağanak akış profillerini üretmektir. Üretilen sağanak akış profilleri üzerinde serbest akış hızı, yunuslama frekansı, hareket genliği ve kanatlar arası mesafenin etkisi Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) teknikleriyle incelenmiştir. Bu çalışma, RÜZGEM Büyük Rüzgâr Tüneli için inşa edilecek bir sağanak akış üretecinin ön çalışması olarak kullanılacaktır. Ayrıca, Yiğili vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın devamı niteliğindeki bu çalışmanın kapsamı parçacık görüntülemeli hız ölçüm sonuçları eklenerek genişletilmiştir.

## YÖNTEM

### Sağanak Akış Üretici Tasarımı

Salınım hareketi yapan iki kanatçığa sahip bir sağanak akış üretici tasarlanmış ve RÜZGEM'deki C1 rüzgâr tünelinin test kesiti girişine entegre edilmiştir. Kanatlar 80 mm veter uzunluğuna ve NACA0015 profiline sahiptir ve iki servo motor ve sürücüleri ile kontrol edilmektedirler. Motorlar kanatlara ¼ veter pozisyonundan geçen bir şaft ile bağlıdır. Bu bağlantı iki adet kamalı kaplin kullanımıyla sağlanmıştır. Böylelikle motorlar ve kanatlar arasında herhangi bir kayma olması engellenmiştir.



Şekil 1: Sağanak akış üretici yapısal tasarımı

Kanat sayısı ve veter uzunluğu test kesiti boyutuna göre seçilmiştir. Kanatlar, akış yönünde 15 cm uzunluğunda bir metal çerçeveye yerleştirilmiştir. Bu çerçeve ise RÜZGEM Deneysel Aerodinamik Laboratuvarı'nda bulunan C1 rüzgâr tünelinin test kesidi girişine entegre edilmiştir. Servo motorlar bu çerçevenin üzerindeki flanşlara monte edilmiştir.

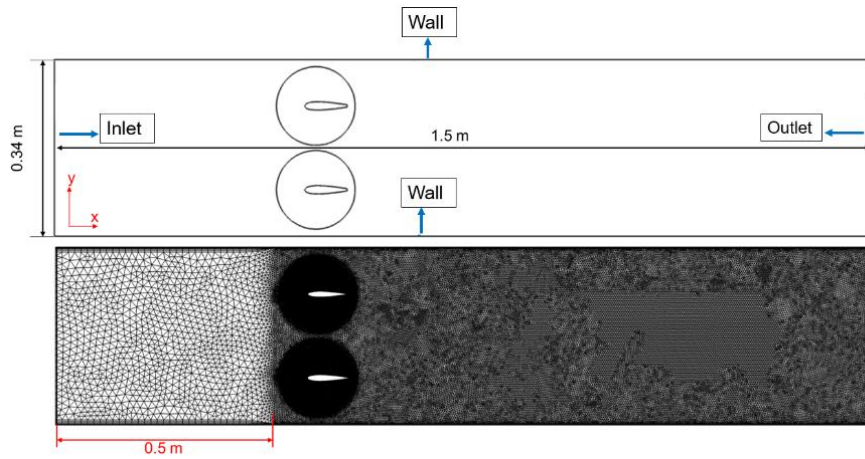
Kanatlar, 1.27 Nm nominal tork üretme kapasiteli motorlar tarafından senkronize şekilde sinüzoidal hareket yaptırılarak kontrol edilmektedir. Hareket kinematığını oluşturmak için bir LabVIEW kontrol algoritması geliştirilmiştir. Motorların güvenli operasyon aralığında kalan maksimum yunuslama frekansı 15 Hz'dir. Rüzgâr tünelinin ulaşabildiği maksimum hız ise 25 m/s'dir. Dolayısıyla, 0.06 ile 0.55 aralığında değişen bir indirgenmiş frekans ( $k$ ) aralığında çalışmak mümkündür.

$$k = \frac{\omega b}{U_{\infty}} \quad (1)$$

İndirgenmiş frekans denklemindeki  $\omega$  dairesel yunuslama frekansını,  $b$  yarı veter uzunluğunu ve  $U_{\infty}$  rüzgâr hızını ifade etmektedir.

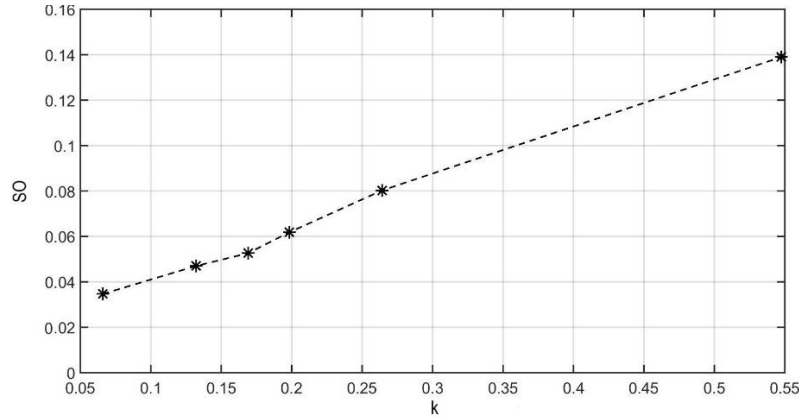
### Nümerik Analizler

Sağanak akış üreticinin tasarım ve karakterizasyon çalışmasında, ticari HAD çözücü Ansys Fluent kullanılarak iki boyutlu HAD analizleri yapılmıştır. Nümerik alan, veter uzunluğu 80 mm olan iki tane NACA0015 profilinin yerleştirildiği iki tane dairesel bölgeden oluşmaktadır. Bu dairelerin çapı 150 mm'dir. Bu dairesel alanların merkezleri, kanat profillerinin ¼ veter lokasyonu ile çakışmakta ve sinüzoidal hareket sadece bu dairesel alanlara uygulanmaktadır. Nümerik alanın kalanı sabittir. Girişte bir hız girişi sınır koşulu uygulanırken nümerik alanın üst ve alt kenarları duvar olarak tanımlanmaktadır. Basınç çıkış sınır koşulu nümerik alanın çıkışına uygulanmakta, türbülans yoğunluğu %0.5 olarak girilmektedir. Çözüm ağı büyüklüğü ve zaman adımı bağımsızlık çalışmaları yapılmış ve simülasyonlar 110000 elemanlı bir çözüm ağı ile CFL sayısı 1'e eşitlenerek gerçekleştirilmiştir. Üç farklı türbülans modeli denenmiştir:  $k - \omega$  SST, gelişmiş duvar muamelesi ile realizable  $k - \epsilon$  ve Reynolds stress modeli (RSM). RSM diğer simülasyonlarda kullanılmak üzere seçilmiştir. HAD çalışmaları farklı indirgenmiş frekans değerlerinde yapılmış ve her bir durum için maksimum sağanak oranı ( $SO = v/U_{\infty}$ ) hesaplanmıştır. Farklı indirgenmiş frekans değerleri serbest akış hızını ve yunuslama hareketi frekanslarını değiştirerek elde edilmiştir. Bu değerler rüzgâr tüneli ve motor kapasiteleri ile sınırlanmaktadır.



Şekil 2: Nümerik hesaplama alan ve sınır koşulları

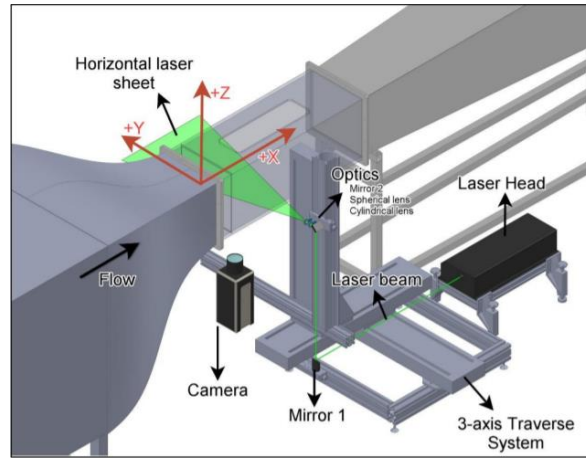
İndirgenmiş frekansın 0.05 ile 0.55 arasında değiştiği nümerik analizler sonucu iki boyutlu iki bileşenli Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm tekniği ile ölçülmeye elverişli, motorlar ve rüzgâr tünelinin güvenli operasyon zarfı içinde kalan bir durum referans durum olarak seçilmiştir. Bu durum, hızın 10 m/s, yunuslama hareketi frekansının 10 Hz olduğu, 0.25 indirgenmiş frekansa karşılık gelen durumdur.



Şekil 3: Sağanak akış üretici karakterizasyonu için farklı indirgenmiş frekanslarda yapılan nümerik analizler sonucu elde edilen maksimum sağanak oranları. Sağanak oranları kanatların hücum kenarının 3 veter uzunluğu arkasında hesaplanmıştır.

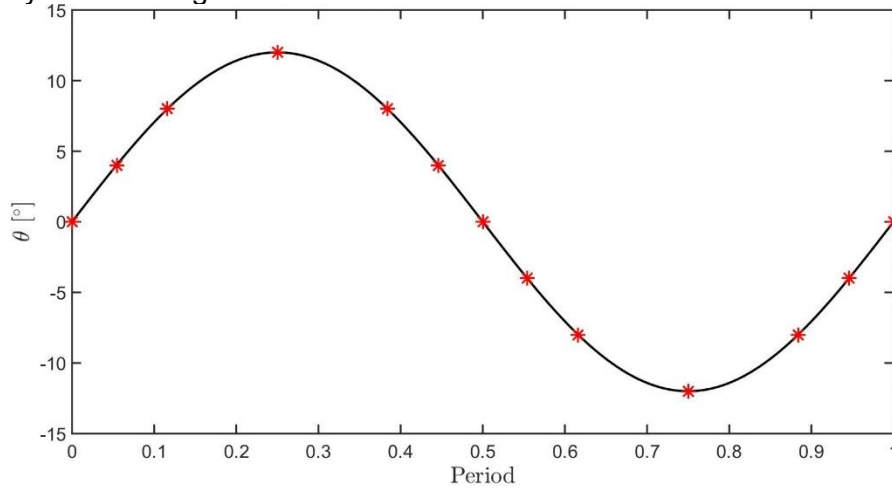
### Deneysel Analizler

Ölçümler, RÜZGEM'de bulunan C1 rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Açık devre emici tip rüzgâr tüneline ulaştığı maksimum serbest akış hızı 25 m/s iken test kesiti boyutu  $34 \times 34 \times 100 \text{ cm}^3$ 'tür. Motorun sürücü frekansının manuel olarak değiştirilmesi ile test kesiti içindeki hız ayarlaması yapılmaktadır. Test kesitinin girişine yerleştirilen Pitot-statik tüp ile hız kontrol edilmektedir. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm sistemi Phantom v641 yüksek hızlı kamera ve 60 mm NikonNikkor lens, New Wave Solo POV Nd:YAG lazer, Dantec Dynamics zamanlama kutusu ve Dynamic Studio veri toplama ve analiz sisteminden oluşmaktadır. Lazer ışını, ayna yardımıyla test kesitine doğru yansıtılmakta, bir küresel ve silindirik mercekten geçerek 2 mm kalınlığında bir lazer düzlemine dönüştürülmektedir. Aydınlanan düzlem test kesitinin ortasında ve serbest akış hızına paraleldir. Görüntülenen alan 166 mm  $\times$  256 mm büyüklüğündedir. İkili görüntülü parçacık imajları, imaj minimumun çıkarılmasıyla önden işlenmekte, böylelikle imaj kalitesi artırılmakta ve arka plandaki gürültüler elimine edilmektedir. Sonrasında iki adımlı uyarlanırlı korelasyon analizi yapılmakta ve %50 örtüşme ile 32 px  $\times$  32 px boyutunda bir sorgu alanı ve 1.62 mm vektör aralığı elde edilmektedir. Faz kilitli ölçümlerin yapılabilmesi için lazer, istenen faz açılarında motorlar tarafından üretilen bir Transistor-Transistor-Logic (TTL) sinyali ile harekete geçirilmektedir. Her faz için 100 vektör alanı elde edilmiş ve bunların ortalaması alınmıştır. Karakterizasyon ölçümleri için %10 örtüşme ile 2 ölçüm penceresi kullanılmıştır. İlk ölçüm penceresi kanatların firar kenarının yarım veter uzunluğu arkasından başlamaktadır.



Şekil 4: Deney sistemi

Faz-kilitli ölçümler, bir periyot içinde her 4 derecede bir lazer ve kameranın tetiklenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Yunuslama hareketi büyüklüğünün  $12^\circ$  olduğu bir durum için veri alınan noktalar bir periyot üzerinde gösterilebilir:



Şekil 5: Kamera ve lazerin aynı anda tetiklendiği ölçüm noktalarının bir periyot üzerindeki dağılımı. Dolayısıyla, her bir periyot 13 faza bölünmüş durumdadır. Kanatların hareket kinematikleri,

$$\theta = \bar{\theta} \sin \omega t \quad (2)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Burada  $\theta$  anlık hücum açısını,  $\omega$  dairesel frekansı ( $\omega = 2\pi f$ ),  $t$  ise zamanı temsil etmektedir. Sağanak akış üretici karakterizasyonu için hareket parametreleri ve kanatlar arası mesafe değiştirilmiştir. Bu parametreler rüzgâr hızı, yunuslama hareketi frekansı ve hareketin genliğidir.

Tablo 1'deki mesafe parametresi veter uzunluğu ( $c$ ) cinsinden kanatlar arası mesafedir.

Tablo 1: Deney matrisi

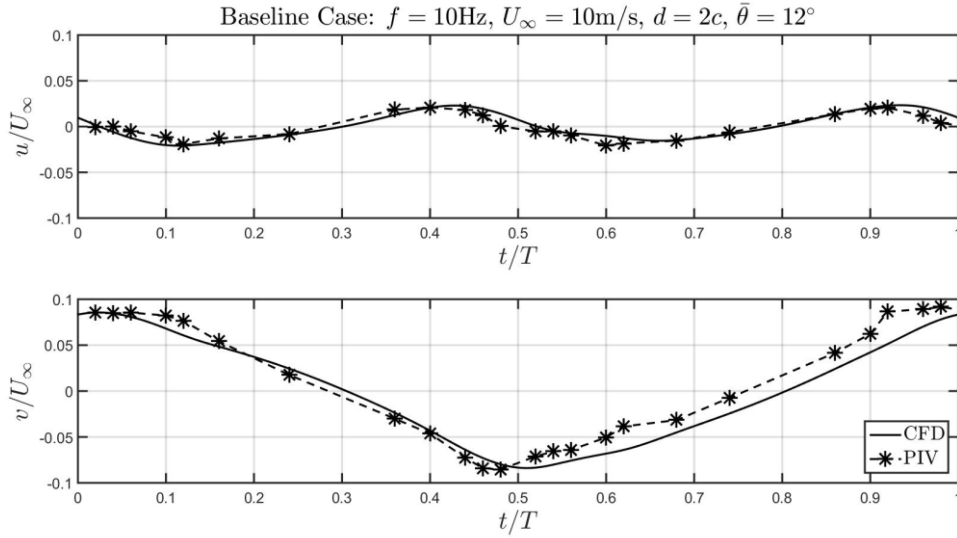
Durum	$f$ [Hz]	$U_\infty$ [m/s]	$k$	$\bar{\theta}$ [°]	Mesafe
1	2.5	10	0.0628	12	$2c$
2	5	5	0.2513	12	$2c$
3	5	10	0.1257	12	$2c$
4	7.5	10	0.1885	12	$2c$
5	10	5	0.5027	12	$2c$
6	10	10	0.2513	12	$2c$
7	10	15	0.1676	12	$2c$
8	10	10	0.2513	8	$2c$
9	10	10	0.2513	16	$2c$
10	10	10	0.2513	12	$1c$
11	10	10	0.2513	12	$2.5c$

Şekil 4'te görüldüğü üzere  $x$  serbest akış yönünü,  $y$  ise akışa dik yönü göstermektedir.

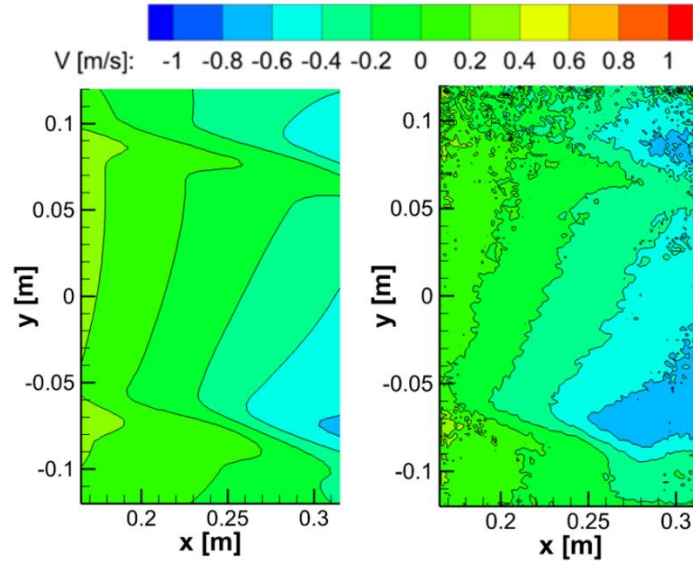
### UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Faz-kilitli ölçümler, yunuslama frekansının 10 Hz ve serbest akış hızının 10 m/s olduğu referans durumu için bir fazı 25 ayrı noktaya bölerek yapılmış ve kanatların firar kenarının üç veter uzunluğu arkasında HAD sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Referans duruma özgü olarak kamera ve lazerin tetiklenme işlemi 2 derecede bir yapılmıştır. Diğer durumlarda ise her bir periyot 13 faza bölünmüş, tetiklenme işlemi er 4 derecede bir yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, 0.26 değerinde bir indirgenmiş frekans için akış yönünde 0.02, akış eni yönünde ise 0.09 sağanak oranına sahip bir sağanak akışı üretilmiştir. HAD ve deney sonuçları oldukça uyumlu çıkmıştır. (Şekil 6) İstenildiği gibi sinüzoidal profile sahip bir sağanak akış hem akış hem de akışın eni yönünde üretilmiştir.



Şekil 6: Referans durumu için deneysel sonuçlar ile HAD sonuçları karşılaştırması



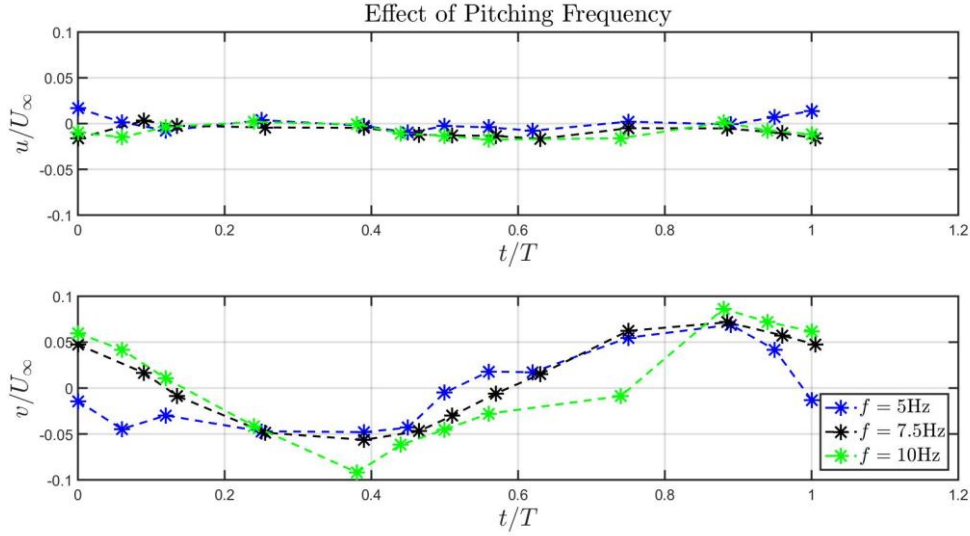
Şekil 7: Faz açısı  $-12^\circ$  iken enine hız bileşeni, HAD sonuçları (sol) ile deneysel sonuçlar (sağ) karşılaştırması

Sağanak akış üreticinin karakterizasyonu için hareket parametreleri ve kanatlar arası mesafe ayrı ayrı değiştirilmiş ve elde edilen sağanak akışının uzay ve zamandaki değişimi incelenmiştir.

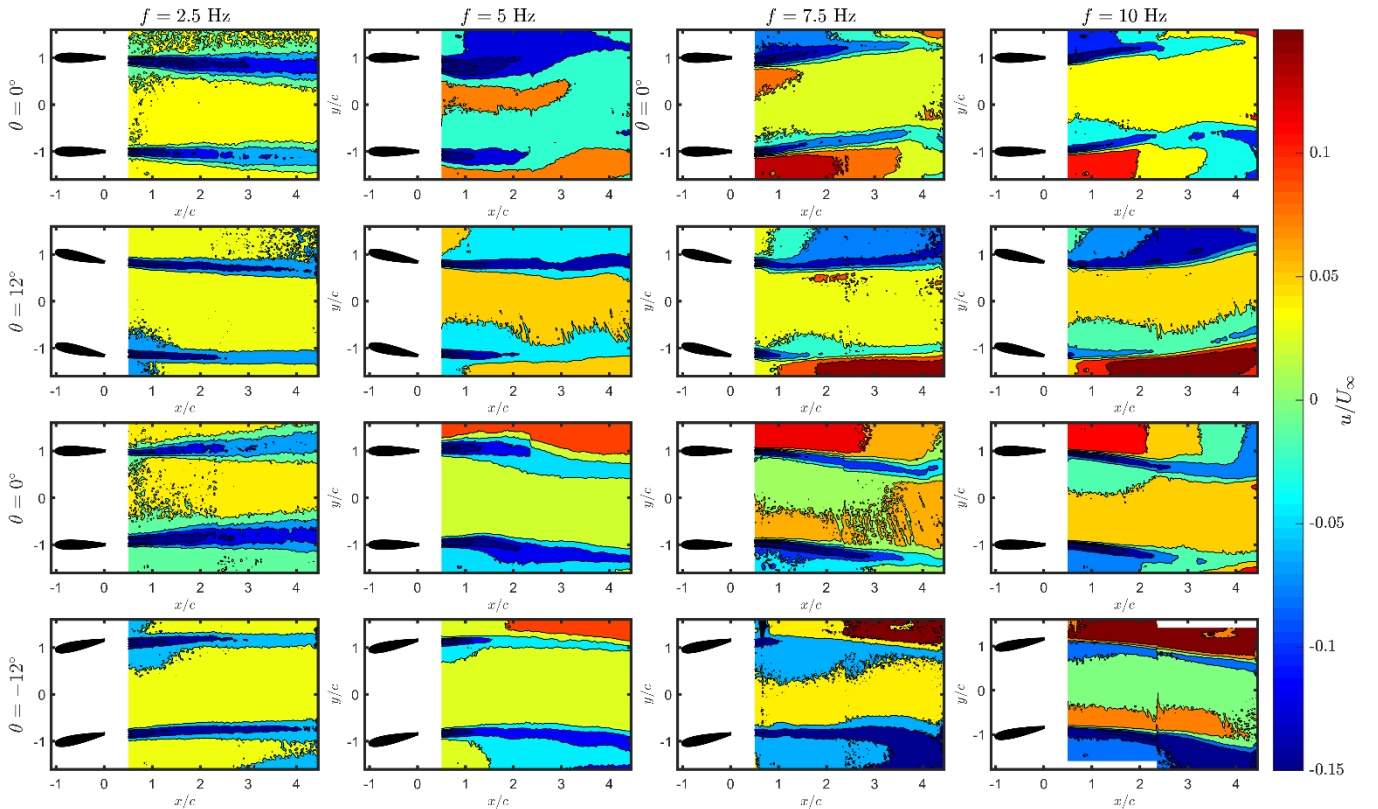
## İndirgenmiş Frekansın Sağanak Akış Üzerindeki Etkisi

İndirgenmiş frekans, yunuslama hareketi frekansı ve rüzgâr hızının değiştirilmesiyle iki ayrı şekilde değiştirilmiştir. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme tekniği ile yüksek doğrulukta ölçülebilir bir sağanak akış üretebilmek için minimum yunuslama frekansı 2.5 Hz olarak seçilmiştir. Motorların güvenli operasyon zarfında olmak için seçilen maksimum frekans ise 10 Hz'dir. Rüzgâr hızı ise 5-15 m/s arasında değiştirilmiştir.

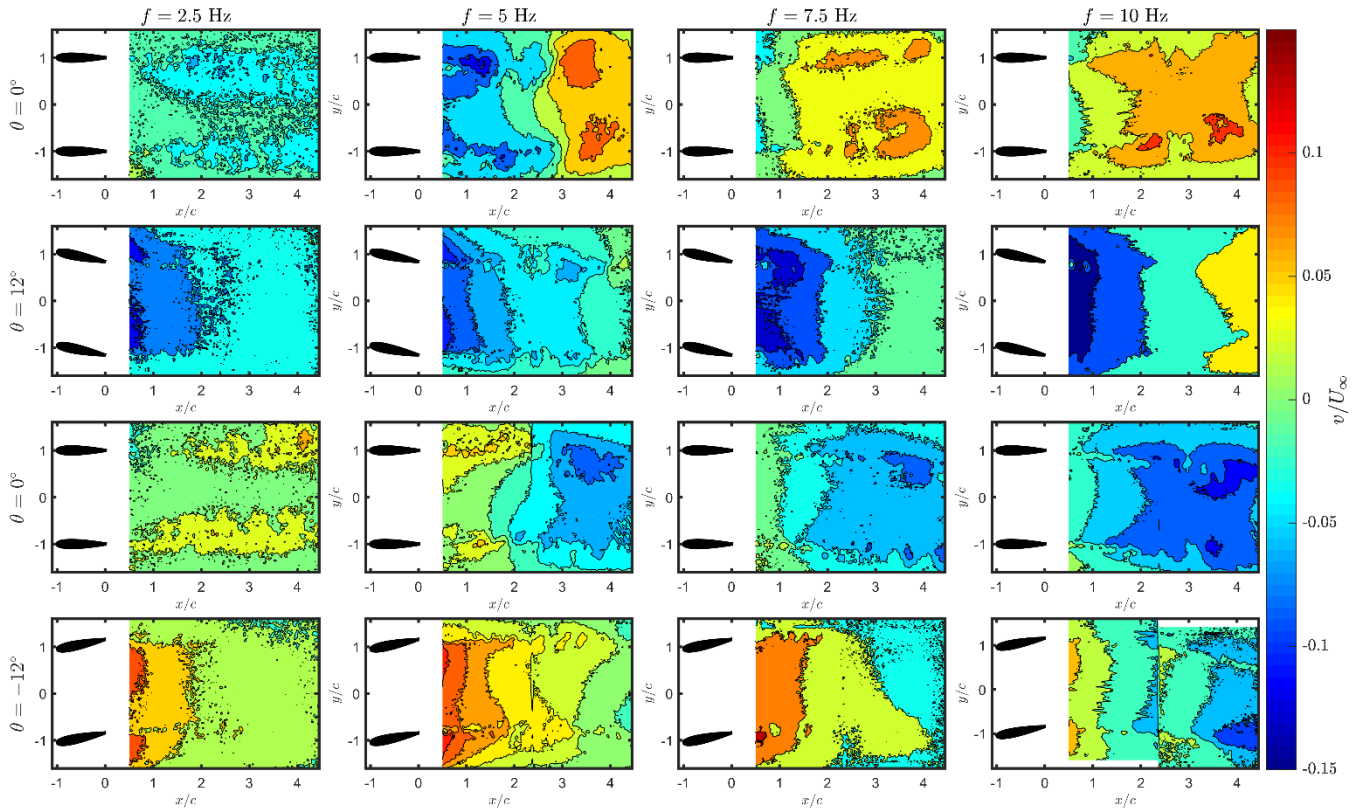
Tüm ölçümlerde kanatlar in-faz sinüzoidal çarpma hareketi yapmaktadırlar. Oluşan sağanak akışı hem zaman hem uzayda incelenmiştir. Zamansal inceleme kanatların hücum kenarının 3 veter arkasında bir noktada yapılmıştır (Şekil 8). Bunun sebebi, sağanak akışın yeterince olgunlaştığı bir noktada inceleme yapılmak istenmesidir.



Şekil 8: Yunuslama frekansının sağanak akışın zamansal davranışına etkisi



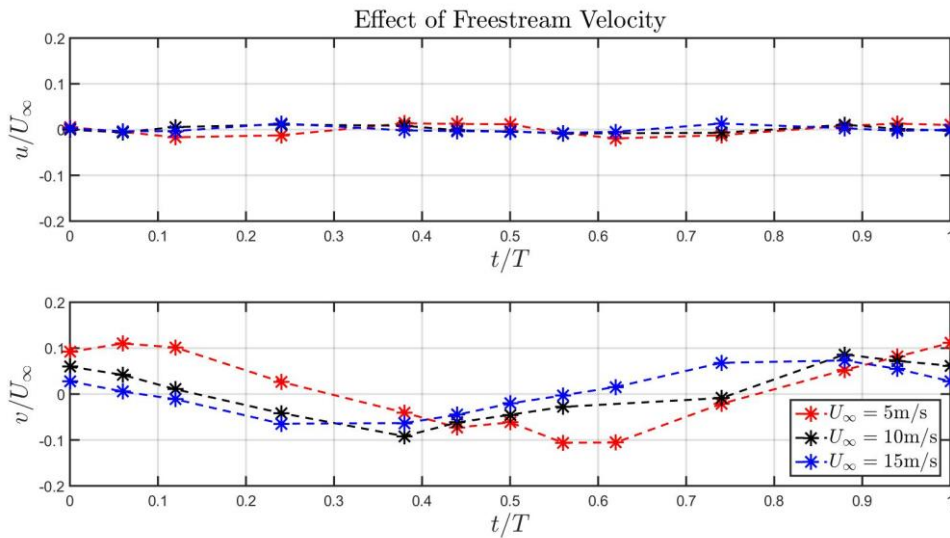
Şekil 9: Yunuslama frekansının serbest akış yönündeki hız bileşenine etkisi. Sütunlar frekansın farklı olduğu test durumlarını, satırlar ise faz açılarını göstermektedir.



Şekil 10: Yunuslama frekansının serbest akışa dik yöndeki hız bileşenine etkisi. Sütunlar frekansın farklı olduğu test durumlarını, satırlar ise faz açılarını göstermektedir.

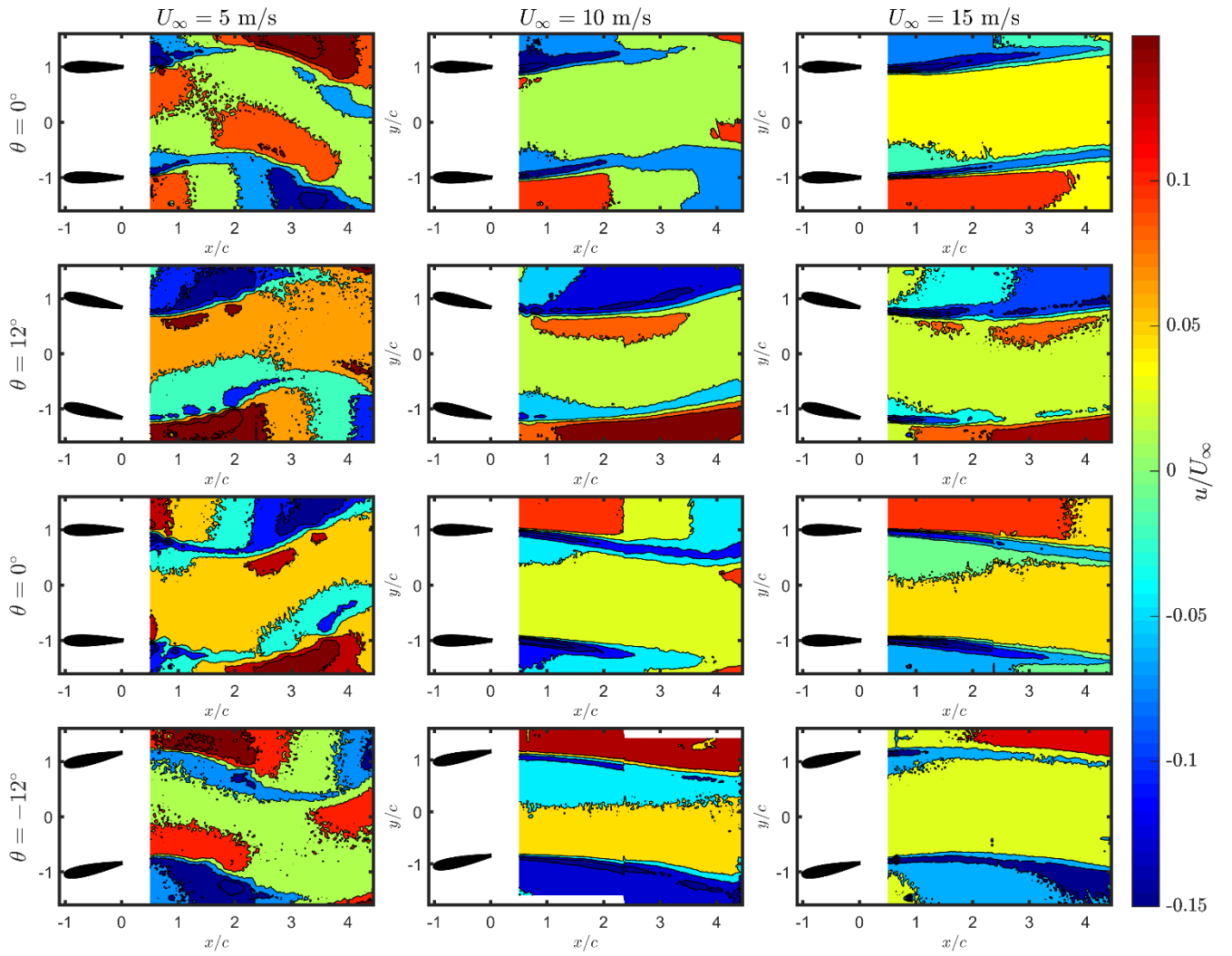
Oluşan sağanak akışın zamansal davranışı incelendiğinde, beklendiği gibi, artan yunuslama frekansı ile akışın enine yönde sağanak oranının arttığı gözlemlenmektedir. Öte yandan, akış yönünde sağanak oranının oldukça küçük ve sabit olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise kanatların yaptığı yunuslama hareketinin eş fazlı olmasıdır.

Akış yönündeki ( $x$  yönünde) hız değişimini gösteren konturlarda (Şekil 9) ise yunuslama frekansı arttıkça kanatların iz bölgelerinin her bir faz açısında belirgin şekilde yön değiştirdiği görülmektedir. Bu davranış, sağanak akışın gitgide baskın hale gelmesi ile açıklanabilir. Ek olarak, serbest akışa dik yöndeki hız konturlarında ise (Şekil 10) yunuslama frekansı arttıkça hızda belirgin bir artış göze çarpmaktadır. Aynı periyotun negatif işaretli faz açıları ( $12^\circ$  ve  $-12^\circ$ ) arasında oluşan hız farkı büyümektedir. Bu, daha şiddetli bir sağanak oluşturulduğunun kanıtıdır.



Şekil 11: Rüzgâr hızının sağanak akışın zamansal davranışına etkisi



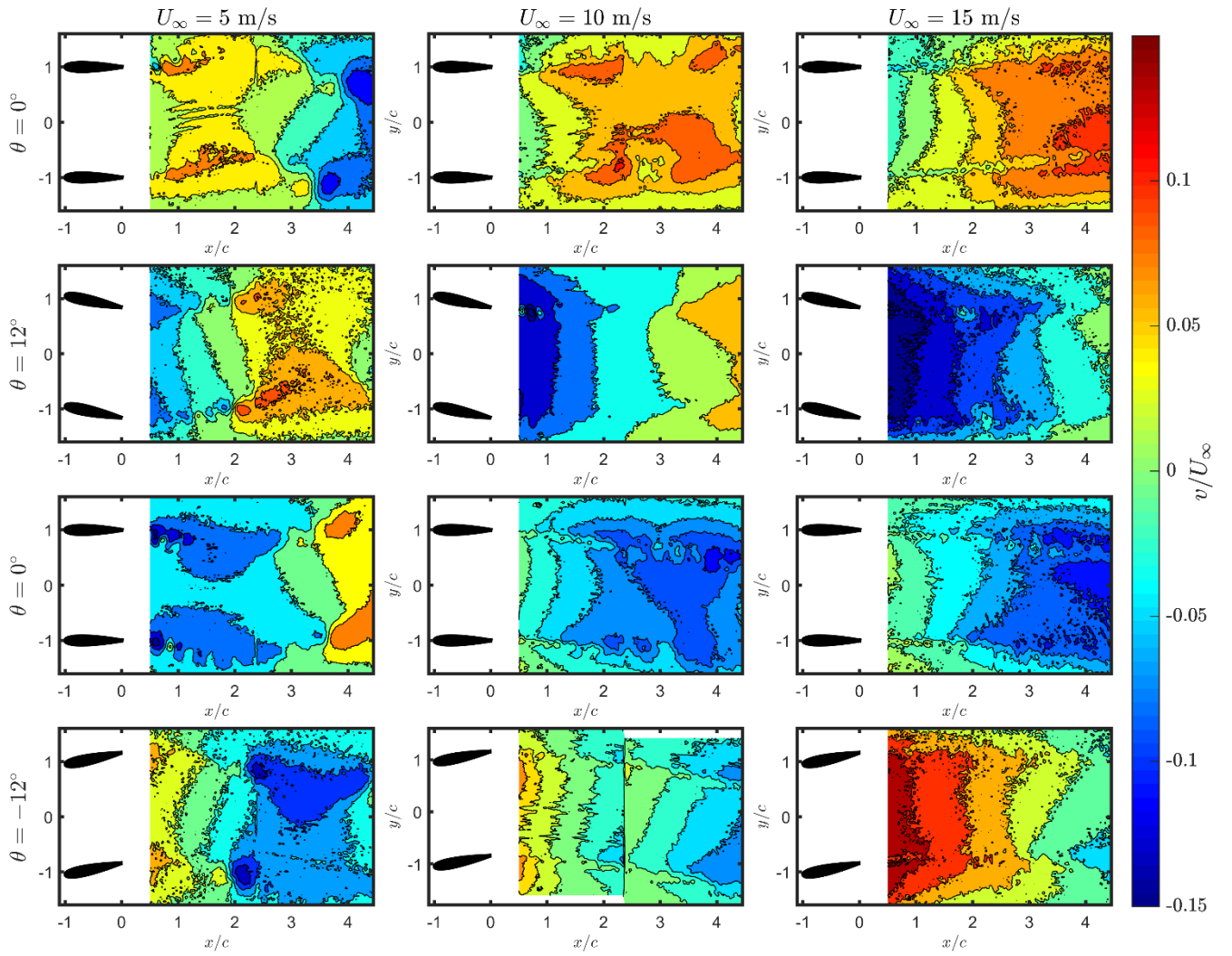


Şekil 12: Rüzgâr hızının serbest akış yönündeki hız bileşenine etkisi. Sütunlar rüzgâr hızının farklı olduğu test durumlarını, satırlar ise faz açılarını göstermektedir.

Beklendiği gibi, rüzgâr hızının düşmesiyle elde edilen sağanak oranı belirgin bir artış göstermiştir. Öte yandan, serbest akış yönündeki sağanak akış gene değişimden etkilenmemiştir. Bunun sebebi, sağanak akış üreticinin izlediği hareket protokolüdür. Bu çalışmada uygulanan protokolde, kanatların hareketleri arasında bir faz farkı bulunmadığı için, baskın sağanak serbest akışa dik yönde oluşturulmaktadır.

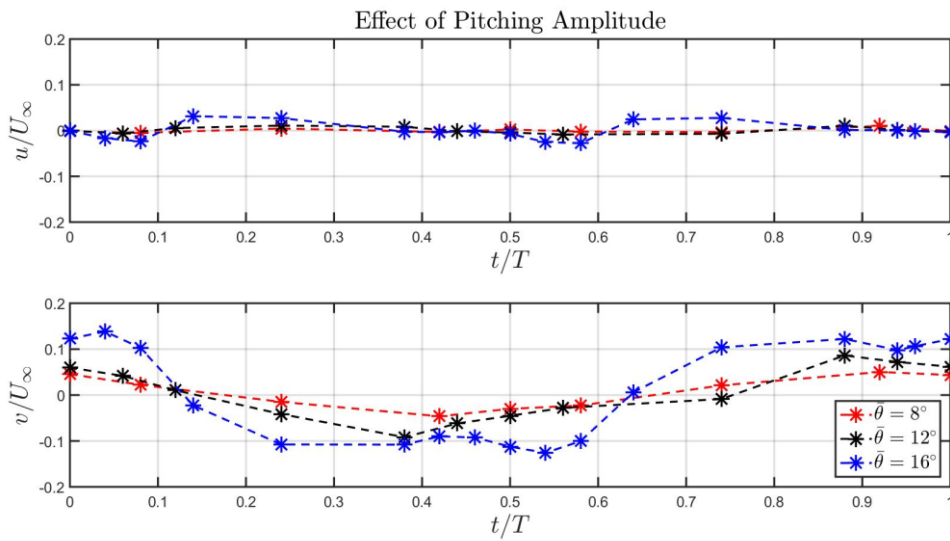
Serbest akış yönündeki hız kontürlerine bakıldığında, kanatların iz bölgesinin hızın en küçük olduğu durumda tam bir sinüs eğrisi oluşturduğu gözlemlenmektedir. Bu da artan indirgenmiş frekans ile hem büyüklük hem de uzayda davranış olarak daha güçlü bir sağanak üretildiğini göstermektedir.

Serbest akışa dik yöndeki hız kontürlerinde ise (Şekil 13), artan rüzgâr hızıyla daha tekdüze bir sağanak üretilebildiği görülmektedir. Düşen rüzgâr hızıyla indirgenmiş frekans artmakta, kanatların iz bölgesindeki sapmalar daha şiddetli olmaktadır. Oluşan bu şiddetli sağanak akışta hız değişimleri çok daha kısa mesafelerde meydana gelmektedir. Dolayısıyla, sağanak altında model testi için test edilen durumlardan en küçük rüzgâr hızına ve en büyük indirgenmiş frekansa sahip durum elverişli olmayabilir.



Şekil 13: Rüzgâr hızının serbest akışa dik yöndeki hız bileşenine etkisi. Sütunlar rüzgâr hızının farklı olduğu test durumlarını, satırlar ise faz açılarını göstermektedir.

### Hareket Genliğinin Sağanak Akış Üzerindeki Etkisi

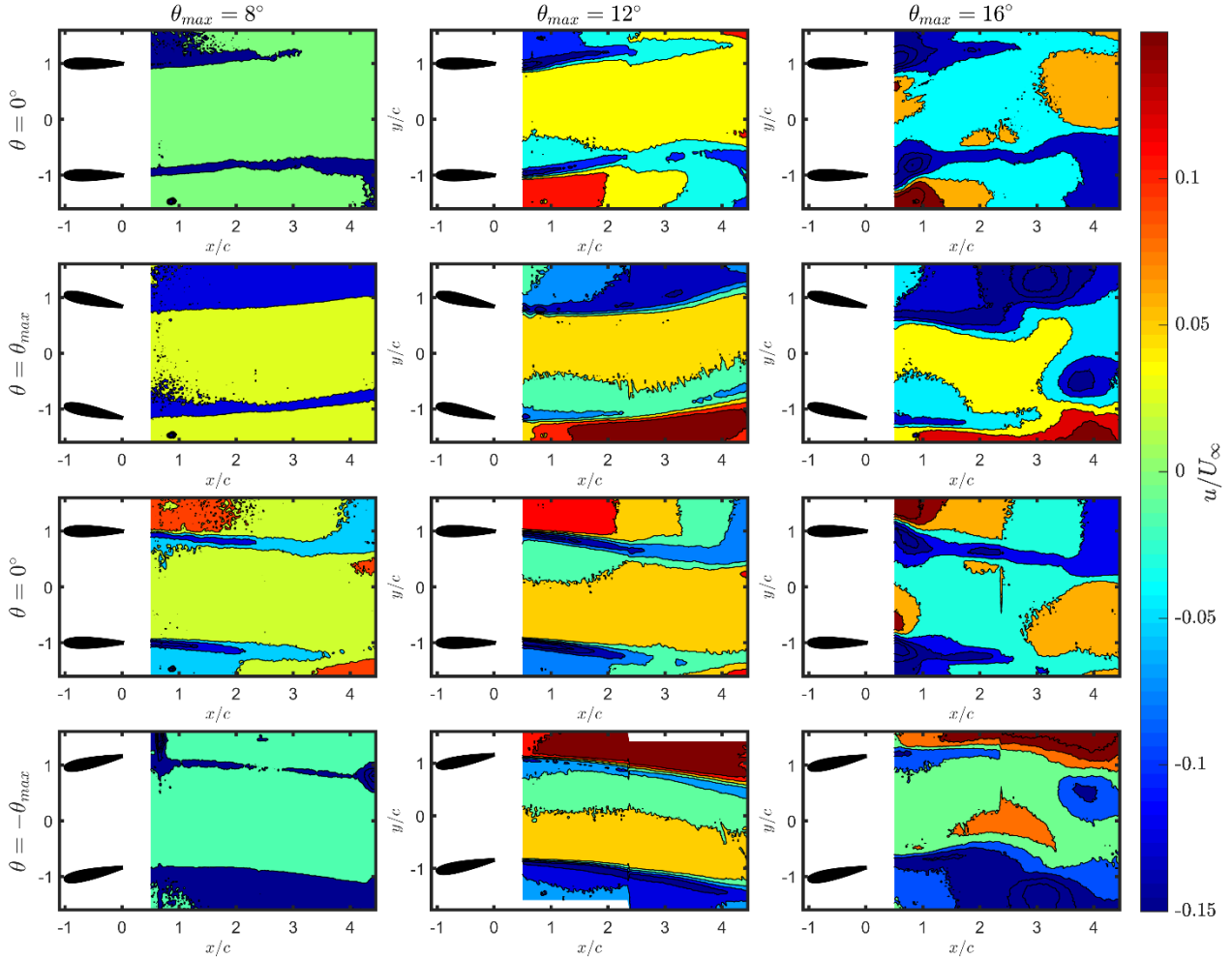


Şekil 14: Hareket genliğinin sağanak akışın zamansal davranışına etkisi

Değiştirilen hareket parametrelerinden bir diğeri ise hareket genliğidir. Seçilen hareket genlikleri  $8^\circ$ ,  $12^\circ$  ve  $16^\circ$ 'dir. Burada gözlenmek istenen, tek yönlü, düzenli bir akışa kanatların hareketleri dolayısıyla eklenen düzensizliğin büyüklüğünün oluşan sağanağın büyüklük ve uzayda davranışına etkisidir. Düzensizliğin matematiksel ifadesi:

$$\theta = \bar{\theta} \sin \omega t \quad (3)$$

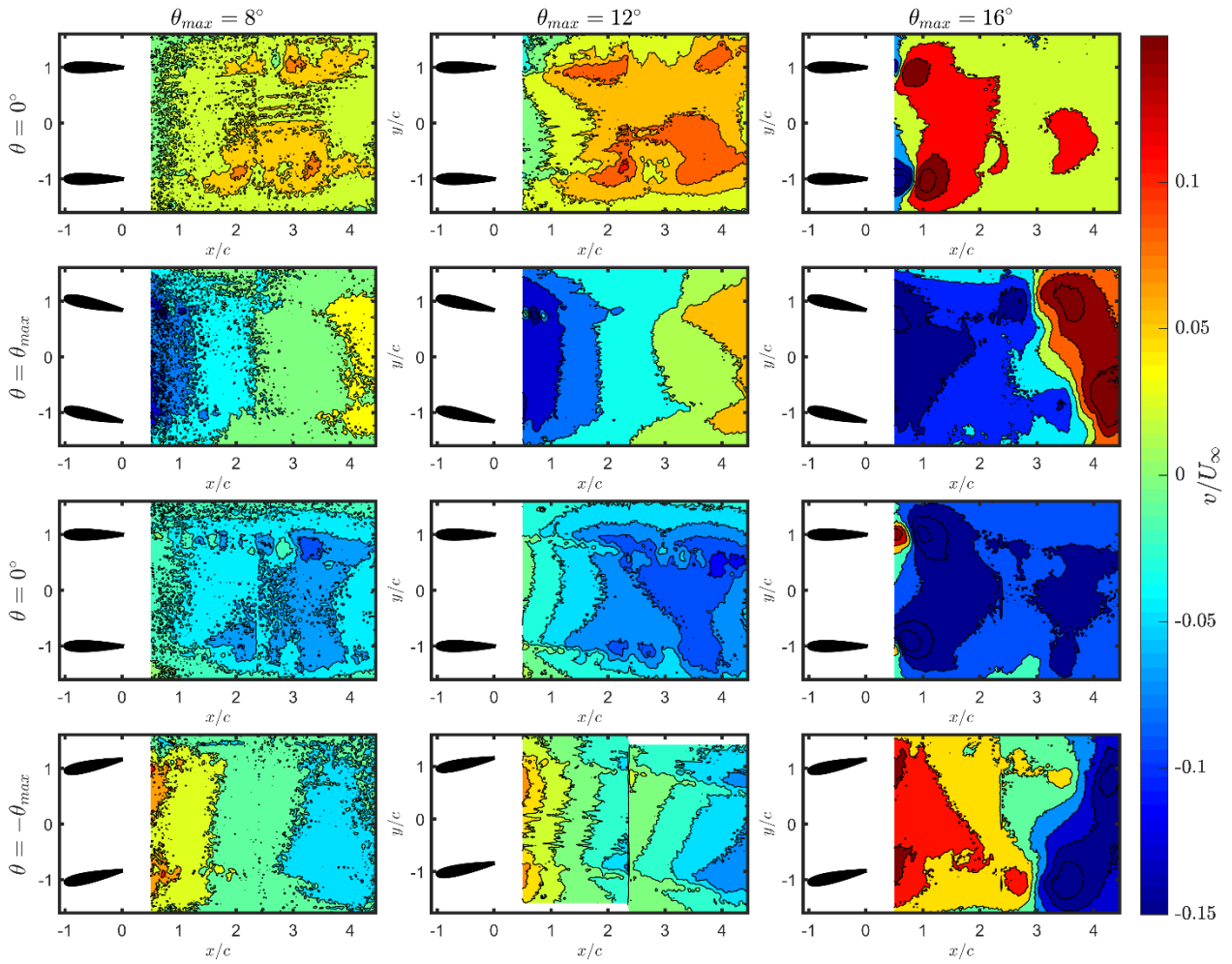
$\bar{\theta}$  parametresi  $8^\circ$ ,  $12^\circ$  ve  $16^\circ$  olacak şekilde değiştirilmiş ve ölçümler tekrarlanmıştır.



Şekil 15: Hareket genliğinin serbest akış yönündeki hız bileşenine etkisi. Sütunlar hareket genliğinin farklı olduğu test durumlarını, satırlar ise faz açılarını göstermektedir.

Hız konturlarında gösterildiği gibi, hareket genliğinin  $16^\circ$  olduğu durumda NACA0015 profiline sahip kanatlarda akış ayrılması olmaktadır. Bunun sonucunda, kanatların iz bölgelerinde oluşan uyumlu girdap yapıları gözlemlenmektedir. Öte yandan, hareket genliğinin maksimum olduğu durumda, oluşan sağanak akışın simetrik ve homojen yapısı bozulmuştur. Bu bozulma, akış ayrılması sonucu oluşan girdap salınımindan kaynaklanıyor olabilir.

Genlik arttıkça daha büyük bir sağanak oranına sahip bir sağanak akış üretilmiştir. Ancak bu akışın simetrik ve homojenlikten yoksun oluşu, sağanak altında bir model testi için bu durumu diğer durumlarla kıyaslandığında dezavantajlı bir hale getirmektedir.



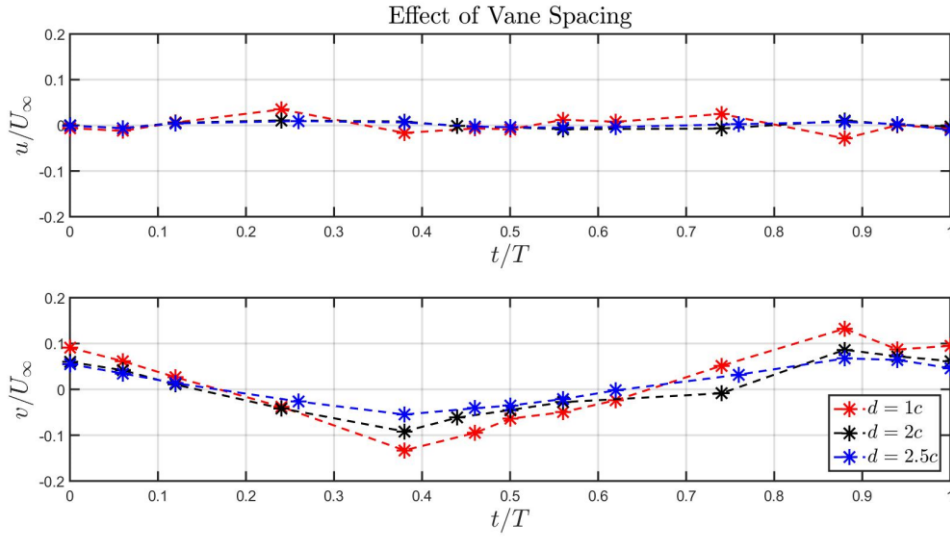
Şekil 16: Hareket genliğinin serbest akışa dik yöndeki hız bileşenine etkisi. Sütunlar hareket genliğinin farklı olduğu test durumlarını, satırlar ise faz açılarını göstermektedir.

### Kanatlar Arası Mesafenin Sağanak Akış Üzerindeki Etkisi

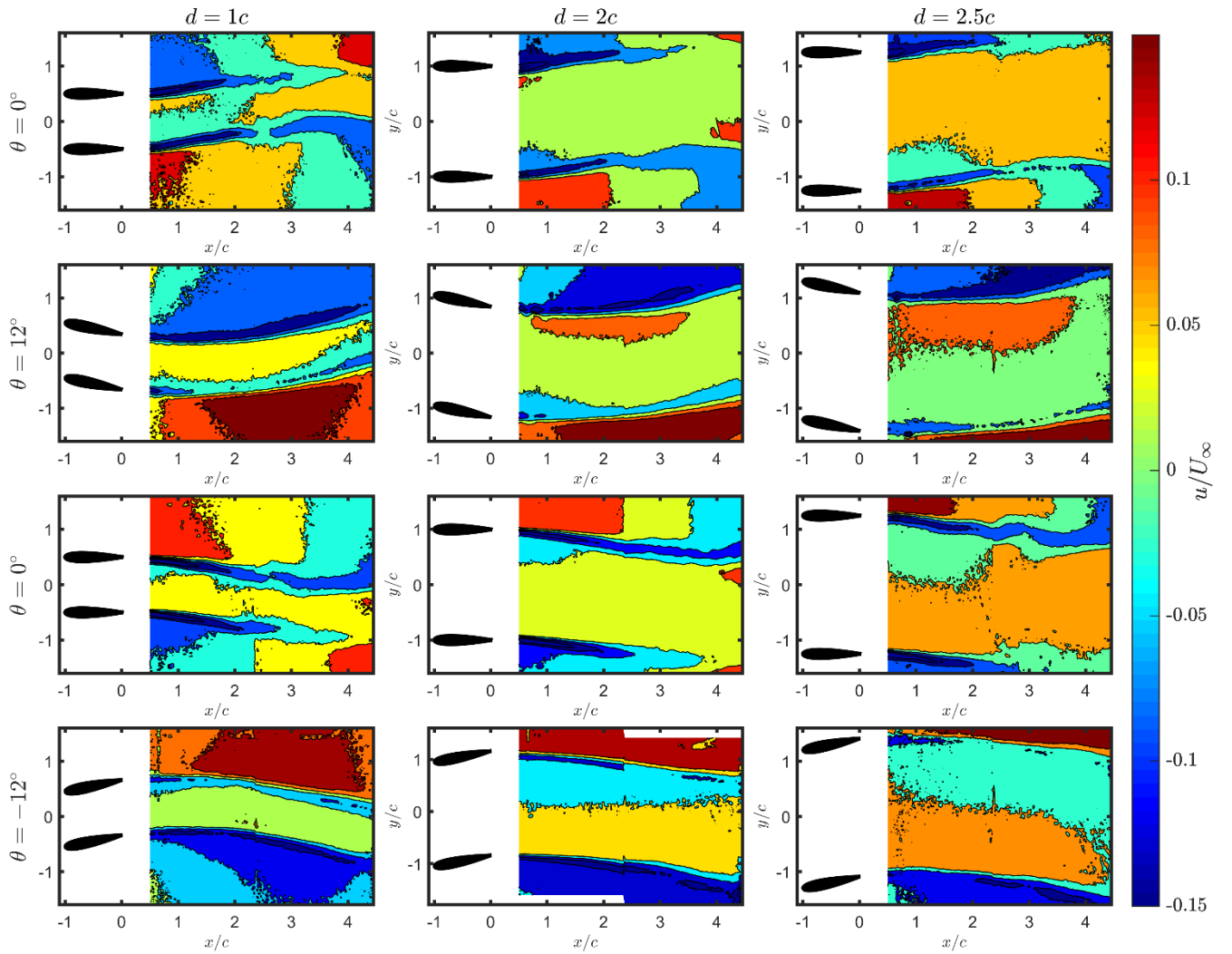
Değiştirilen bir diğer parametre ise kanatlar arası mesafedir. Bu mesafe, kanatların veter uzunluğu cinsinden 1, 2 ve  $2.5c$  olarak seçilmiştir. Oluşan sağanak akışın zamansal davranışı incelendiğinde, mesafe arttıkça elde edilen enine sağanak oranında bir azalma görülmektedir. Bunun sebebi, kanatlar birbirinden uzaklaştıkça, iz bölgeleri arasındaki etkileşimin azalması, dolayısıyla da akışa eklenen düzensizliğin karışma ile etkisinin sönümlenmesidir.

Öte yandan, kanatlar birbirine yaklaştıkça, iz bölgeleri de birbirlerine yaklaştığından, aralarındaki etkileşim artmaktadır. Bu durum, akışa eklenen düzensizliğin sönümlenmesini geciktirmektedir. Kanatlar arası mesafenin maksimum olduğu durumda ise, iz bölgeleri test kesiti duvarlarına çok yaklaşmış ve sönümlenmiştir. Bu durumda duvar etkisi de daha az şiddetli bir sağanak akışın ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

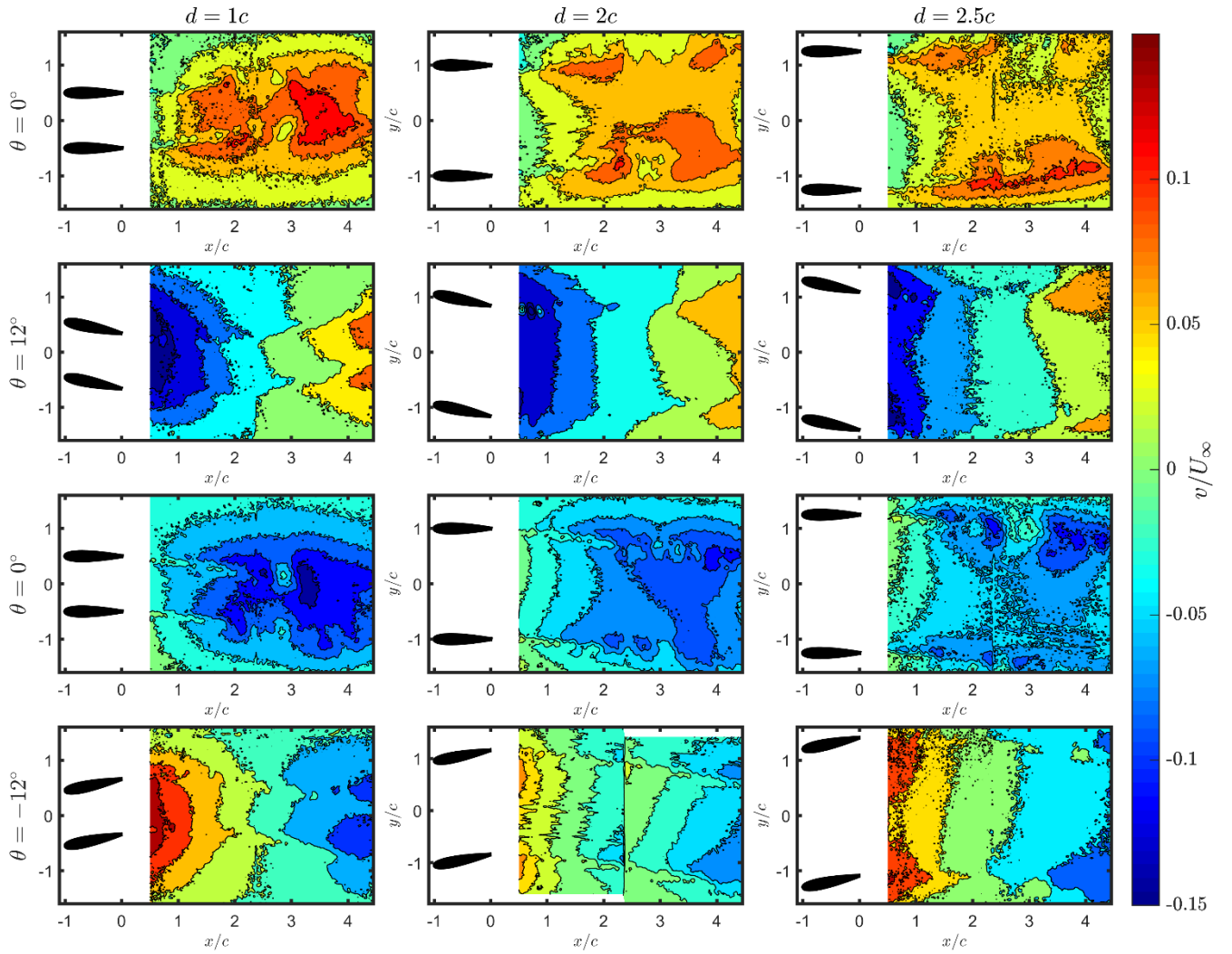
Son olarak, rüzgâr yönündeki sağanak, diğer durumlarda da olduğu gibi büyüklük olarak oldukça küçüktür. Parametrelerin değişiminden ise neredeyse etkilenmemektedir. Bunun sebebi, kanatların yaptığı yunuslama hareketinin aynı fazda oluşudur.



Şekil 17: Kanatlar arası mesafenin sağanak akışın zamansal davranışına etkisi



Şekil 18: Kanatlar arası mesafenin serbest akış yönündeki hız bileşenine etkisi. Sütunlar kanatlar arası mesafenin farklı olduğu test durumlarını, satırlar ise faz açılarını göstermektedir.



Şekil 19: Kanatlar arası mesafenin serbest akışa dik yöndeki hız bileşenine etkisi. Sütunlar kanatlar arası mesafenin farklı olduğu test durumlarını, satırlar ise faz açılarını göstermektedir.

## SONUÇ

Salınım hareketi yapan iki kanatlı bir sağanak akış üretici tasarlanmış, üretilmiş ve RÜZGEM'deki C1 rüzgâr tüneline entegre edilmiştir. Karakterizasyon için 0.05 ile 0.5 arasında değişen bir indirgenmiş frekans zarfında nümerik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel ve nümerik çalışmalar oldukça uyumlu sonuçlar vermiştir. Yapılan çalışmalar, indirgenmiş frekansın artması ile sağanak oranında bir artış meydana geldiğini ortaya koymuştur. İndirgenmiş frekans, yunuslama frekansı ve rüzgâr hızı parametrelerinin ayrı ayrı değiştirilmesiyle değiştirilmiştir. Bunun sonunda artan yunuslama frekansının artırılması, sağanak oranında belirgin bir artışa sebep olmuş ve kanat iz bölgelerinde de gözle görülür bir sinüzoidal hareket meydana gelmiştir. Öte yandan, artan rüzgâr hızı sağanak oranında bir düşüşe ve kanat iz bölgelerinde daha küçük bir sapmaya sebep olmuştur. İncelenen diğer bir parametre olan hareket genliği ise arttıkça kanatlarda akış ayrılması oluşmasına sebep olmuştur. Bu durum, oluşan sağanak akışın düzenli ve simetrik yapısını bozmuş, sağanak altında model testleri için uygun olmayan bir sonuç meydana getirmiştir. Son olarak, kanatlar arası mesafe değiştirilmiş ve oluşan sağanak akış incelenmiştir. Mesafe arttıkça iz bölgeleri test kesiti duvarları tarafından sönmülmüş ve birbirleriyle etkileşimleri azalmıştır. Bu, sağanak oranında bir düşüşe sebep olmuştur. Bu karakterizasyon çalışması sonucunda hangi hareket koşulu ve kanat yerleşiminin nasıl bir sağanak akış yaratacağı incelenmiş, tamamen kontrollü bir biçimde istenilen enine sağanak üretilmiştir.

**Kaynaklar**

- Batemend, D., 2017. *Design and Qualification of an Upstream Gust Generator in a Low-Speed Wind Tunnel*, M.S. Thesis, University of Colorado.
- Buell, D.A., 1969. *An experimental investigation of the velocity fluctuations behind oscillating vanes*, Technical Note D-5543, NASA, Ames Research Center, Moffett Field, CA.
- Grisson, D.L., Devenport W.J., 2004. *Development and testing of a deterministic disturbance generator*, AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference.
- Lancelot, P.M.G.J., Sodja, J., Richardson, Werter, N.P.M., and De Breuker, R., 2015. *Design and testing of a low subsonic wind tunnel gust generator*, Proceedings of IFASD 2015, International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, June 28-July 2.
- Saddington A.J., Finnis, M.V. and Knowles K., 2014. *The characterisation of a gust generator for aerodynamic testing*, Proc IMechE Part G: J Aerospace Engineering, Vol 229(7), p: 1214-1225.
- Wei, N.J., Kissing, J., Wester, T.T.B., Wegt, S., Schiffmann, K., Jakirlic, S., H"olling, M., Peinke, J. and Tropea, C., 2019. *Insights into the periodic gust response of airfoils*, J Fluid Mech, Vol 876, p: 237-263.
- Wood, K.T., Cheung, R.C, Richardson, T.S., Cooper, J.E., Darbyshire, O. and Warsop C., 2017 *A New Gust Generator for a Low Speed Wind Tunnel: Design and Commissioning*, Proc IMechE Part G: J Aerospace Engineering, Vol 229(7), p: 1214-1225.
- Yıgılı İ., Andırın M.A., Kurban E., Başkan Ö., Perçin M. *Design and experimental investigation of a wind tunnel gust generator*. Ankara International Aerospace Conference, 2021.