

## ÇIRPAN KANATLI MİKRO HAVA ARAÇLARININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİNE YÖNELİK KONTROLLÜ SAĞANAK OLUŞTURULMASI

Hülya BİLER\*, Berk ZALOĞLU† ve Okşan ÇETİNER‡  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

### ÖZET

*Bu çalışmada Mikro Hava Araçlarının maruz kalacağı sağanakları simüle etmek için su kanalı içerisinde düz bir levhaya yunuslama ve akışa dik yönde ötelenme hareketi verilmiştir. Farklı frekans ve hareket fonksiyonları için toplam 10 durum incelenmiştir. Particle Image Velocimetry (DPIV, Parçacık Görüntüleyerek Hız Belirleme) sistemiyle hız alanları ölçülmüştür. Hız alanları kullanılarak akış bölgesindeki baskın frekanslar için yatay ve dikey hız bileşenlerinin oto-spektral yoğunluk ve çapraz-spektra alanları hesaplanmıştır.*

### GİRİŞ

Düşük Reynolds sayısında uçan Mikro Hava Araçları (MHA) ile ilgili yapılan çalışmalar günümüzde gittikçe artan ilgi uyandıran bir araştırma konusudur. Kuşlar, böcekler gibi uçabilen canlılar hareketlerini sürdürebilmek için itki kuvvetini kanat çırpma hareketi ile oluşturmaktadır. Bu hareket mekanizması havacılıkta uygulanabilecek tahrik sistemleri açısından ilgi çekmektedir. Benzer şekilde, bu konudaki çalışmalar, çırpan kanat sistemlerinden yararlanan mühendislik uygulamalarının tasarımını ve geliştirilmesini sağlayacaktır.

Birçok güncel projede, hava ve su aracı tasarımları için çırpan kanat sistemleri kullanılmaktadır (Delfly-Delft Üniversitesi/Hollanda, Nano Hummingbird – AeroVironment/A.B.D, SmartBird-Festo/Almanya, vb.). Ayrıca güç üretimine yönelik uygulamalar için de araştırmalar yapılmaktadır. (bioSTREAM-Bio Power Systems Ltd./Avustralya, HFG3-ANIPROP GbR/Almanya, Stingray-Engineering Business Ltd./İskoçya, vb.). Özellikle havacılıkta geliştirilmekte olan çırpan kanat tasarımlarında güncel en büyük problem uçan aracın düzgün hava akımına maruz olmadığı zaman stabilite ve kontrolünün sağlanabilmesidir. Geliştirilmiş araçların deneme uçuşları sürekli iç hacimlerde gerçekleştirilmektedir. Çırpan kanatlı bu araçlar, gereksinimler açısından da gittikçe küçülerek, böcek boyutlarında üretilmeye çalışılmaktadır (DelFlyNaNo). Bu durum çalkantılı, rüzgârlı hava şartlarında uçuşlarını güçleştirmektedir.

Sağanak etkisi çoğunlukla yüksek Reynolds sayısında uçan insanlı hava araçları için incelenmiştir [Lian ve Shyy, 2007 A]. Zaide ve Raveh, gerçekleştirdikleri sayısal çalışma ile bir kanadın, Mach sayısı 0.11 ila 0.7 aralığında rastgele seçilmiş şekle sahip bir sağanak akışındaki cevabını incelemişlerdir [Zaide ve Raveh, 2006]. Patil ve Taylor ise yine sayısal olarak yüksek esnekliğe sahip bir uçağın sağanak cevabını çalışmışlardır [Patil ve Taylor, 2006]. Golubev ve diğerleri, ses altı akışlarda, değişik frekans ve genliğe sahip sağanaklar için nonlineer kanat-sağanak etkileşimini

\* Lisans öğrencisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: hulyabiler@gmail.com

† Doktora öğrencisi, FBE Disiplinlerarası Uçak ve Uzay Müh., E-posta: berk\_zaloglu@yahoo.com

‡ Prof. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: cetiner@itu.edu.tr

incelemişlerdir [Golubev ve diğerleri, 2006]. Yang ve Obayashi ise ses üstü bir uçak için, yapısal deformasyonu göz önüne alarak ve almayarak sağanak etkisini sayısal olarak çalışmışlardır [Yang ve Obayashi, 2004].

MHA odaklı çalışmalarda da sağanak etkisi daha çok sabit kanat için ve sayısal olarak incelenmiştir. Shyy ve diğerleri esnek olmayan ve olan kanatlar için sağanak etkisini deneysel ve hesaplamalı olarak incelemişler ve taşıma-sürüklenme oranını koruma açısından esnek bir kanadın rijit olana göre sağanak etkisini daha iyi tolere ettiği sonucuna ulaşmışlardır [Shyy W. ve diğerleri, 1997]. Lian ve Shyy ise MHA'ların operasyon sınırlarında, Reynolds sayısı  $10^4$ - $10^5$  değerlerinde, sabit ve esnek bir kanadı laminer-türbülanslı akış geçiş bölgesinde incelemiş, sağanak etkisi ile laminer ayrılma habbeciğinin oluştuğunu ve bozuntuya uğradığını, dolayısı ile taşıma ve sürüklenmede sağanak etkisi altında önemli farklılıklar oluştuğunu göstermişlerdir [Lian ve Shyy , 2007 B].

Görüldüğü üzere, çırpan kanat uygulamalarına yönelik deneysel olarak yapılmış sağanak etkisi çalışmalarına literatürde pek rastlanmamaktadır. Buna ek olarak aslında deneysel olarak kontrollü sağanak yaratılması güç olduğundan, sağanak etkisinin incelendiği çalışmalar genellikle hesaplamalı olmaktadır. Bu çalışmada bir çırpan kanada gelecek ve sağanak içeren kontrollü akışın oluşturulması amaçlanmaktadır. Serbest akım içerisinde değişik frekanslarda yunuslama ve akışa dik ötelenme yapan ince bir levha yardımı ile sağanak oluşturulmakta ve iz bölgesindeki akımın karakterizasyonu yapılmaktadır. İncelemeler bir su kanalında niceliksel akım görüntüleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## DENEYSEL YÖNTEM

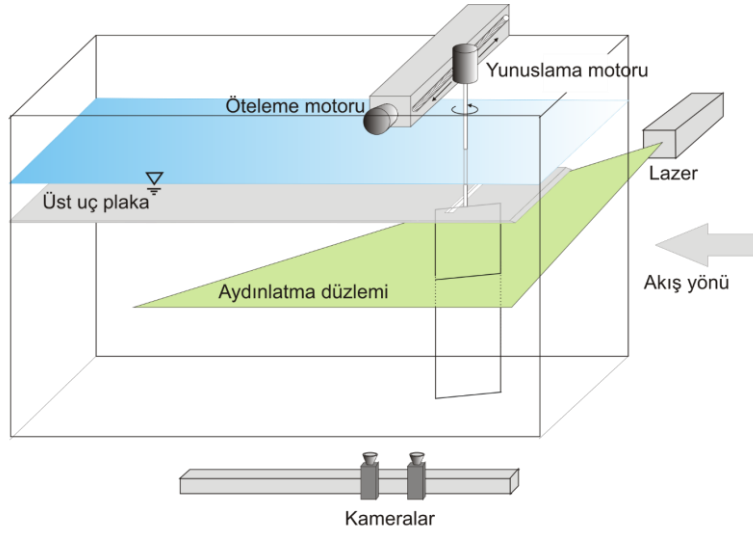
Bu deneysel çalışma, İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Trisonik Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan büyük ölçekli, serbest yüzeye sahip su kanalında gerçekleştirilmiştir. Kanalın deney bölümü genişliği 1010mm, yüksekliği 790mm'dir. Serbest akım hızı, Re sayısının 200-13700 aralığı için 6.7mm/sn - 100mm/sn aralığında değişim göstermektedir.

Model olarak ucu  $30^\circ$  açı ile çift yönlü sivriltilmiş, 100mm uzunluğa ve 5mm kalınlığında pleksiglas düz levha kullanılmıştır. Model yarı veterinden dikey olarak dönme hareketini veren servo motora bağlıdır. Dönme hareketini veren servo motor ise diğer bir servo motorun hareket ettirdiği bir lineer hareket sistemi üzerinde ötelenmektedir. Kanat modelinin yunuslama hareketi Kollmorgen AKM33E servo motor ve Danaher Motion S300 servo sürücü ile sağlanırken akıma dik ötelenme hareketi AKM54K servo motor ve Danaher Motion S700 servo sürücü ile sağlanmıştır.

Deney bölgesini, su kanalının üst yüzeyinde oluşan serbest yüzey etkilerinden arındırmak için sonlandırma plakası kullanılmıştır. Plaka  $150 \times 100$ cm ölçülerinde ve 1cm kalınlığında pleksiglasdan üretilmiştir ve hücum kenarının üst yüzeyi  $30^\circ$  açı ile keskinleştirilmiştir. Plaka DPIV (Digital Particle Image Velocimetry – Parçacık Görüntüleyerek Hız Belirleme) görüntüleri alırken lazerin parlama yapmasını engellemek amaçlı olarak mat siyaha boyanmıştır. Plakanın kendi ağırlığı ve akışın etkisiyle deforme olmaması için üst tarafı alüminyum profiller ile desteklenmiştir. Hareket çubuğunun geçmesi için plaka üzerine serbest akışa dik yönde 2cm genişliğinde bir yarık açılmıştır. Sonlandırma plakasının alt yüzeyi ile modelin ucu arasında minimum mesafe bırakılmıştır.

Model arkası akış DPIV Sistemi kullanılarak incelenmiştir. Akış çift kavite Nd-Yag lazer (max. 120 mJ/vuruş) kullanılarak aydınlatılmış; tohumlama için ortalama çapları  $10\mu\text{m}$  olan gümüş kaplı içi boş cam kürecikler kullanılmıştır. Geniş bir görüntüleme alanı oluşturmak için iki adet 10-bit ve  $1600 \times 1200$  piksel çözünürlüğe sahip CCD kamera kanalın altına yan yana yerleştirilmiştir. Kameraların görüntü alanları deneylere başlamadan önce bir kalibrasyon levhası yardımı ile ortak iki noktaya sahip ve bir düzlemde üst üste gelecek şekilde konumlandırılmış ve iki kameradan alınan görüntü çiftleri sorgulama öncesinde laboratuvar yazılımı kullanılarak birleştirilmiştir. Sayısal görüntüler  $\Delta t = 2,000 \mu\text{s}$  zaman aralığı ile alınmış; elde edilen çift görüntülerden çapraz korelasyon kullanılarak hız alanları elde edilmiştir. Çapraz korelasyonda sorgulama pencereleri  $64 \times 64$  alınmış ve %50 üst üste bindirme kullanılmıştır. Sonuçta akış düzleminde vektör çözünürlüğü yaklaşık  $3.4 \text{ mm} \times 3.4 \text{ mm}$ 'dir ve akış alanı toplamda 3255 vektör ile gösterilmektedir. Veri alma

hızı her bir periyotta 8 akış alanı ile temsil edilecek şekilde ayarlanmış ve 25 periyot süresince veri alınmıştır. Sistem hareket başladıktan sonra 3. periyottan itibaren veri alacak şekilde tetiklenmektedir. Deney düzeneği Şekil 1’de görülmektedir.

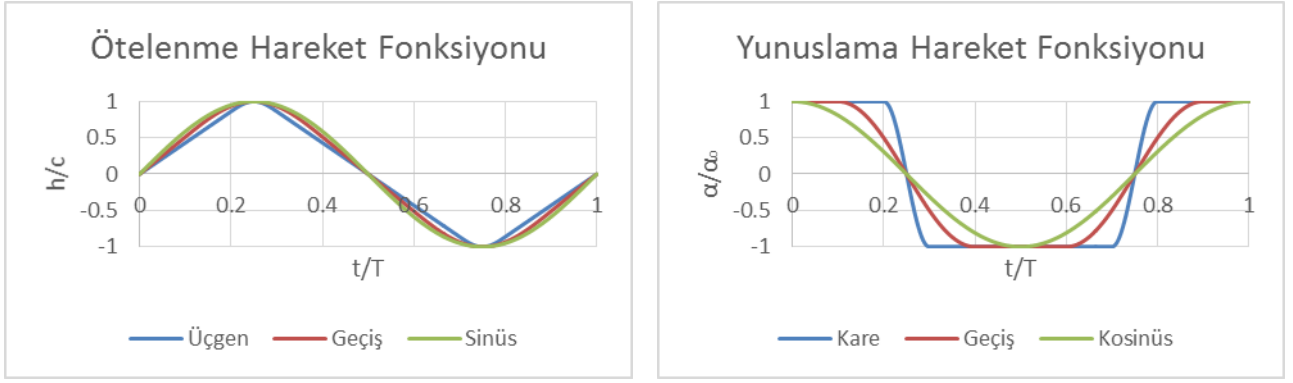


Şekil 1: Deney düzeneği

Levhanın hareketi için farklı fonksiyonlar kullanılarak oluşturulan pozisyon sinyali servo sürücülere yollanmıştır. Bu hareketlerin bazıları sadece yunuslama içerirken diğerleri hem yunuslama hem de akışa dik yönde ötelenme içermektedir. Tablo 1’de incelenen hareketler detaylı şekilde verilmiştir. Kare fonksiyonun köşeleri servo-motor hareket sisteminin ivme sınırları dahilinde keskin tutulmuştur. Ancak 0.5Hz’deki kare yunuslama hareketi (4. ve 8. durum) servo-motor sisteminin yeterlilik sınırları dışında kaldığından gerçekleştirilememiştir. Tablo 1’de kırmızıyla işaretlenmiş bu durumlar hariç toplam 10 adet durum incelenmiştir. Geçiş hareketi olarak tanımlanan durumda yunuslama hareketi kare ile kosinüs fonksiyonu, ötelenme hareketi ise üçgen ile sinüs fonksiyonu arasındaki geçiş fonksiyonudur (Bkz. Şekil 2). Tüm hareketler 45 derece yunuslama genliği ile iki farklı (0.25Hz ve 0.5Hz) frekansta ve Reynolds sayısı 10 000’de gerçekleştirilmiştir. Ötelenme genliği kanadın üçgen fonksiyonla ötelenme yaptığı durumdaki efektif hücum açısının sıfıra denk geleceği şekilde seçilmiştir. Yani kanat, 45 derece sabit geometrik hücum açısıyla ötelenme boyunca “feathering” yapmakta daha sonra ani şekilde -45 dereceye gelip diğer yönde hareketine devam etmektedir. Diğer ötelenme durumları (geçiş ve sinüs) için de aynı ötelenme genlikleri kullanılmıştır.

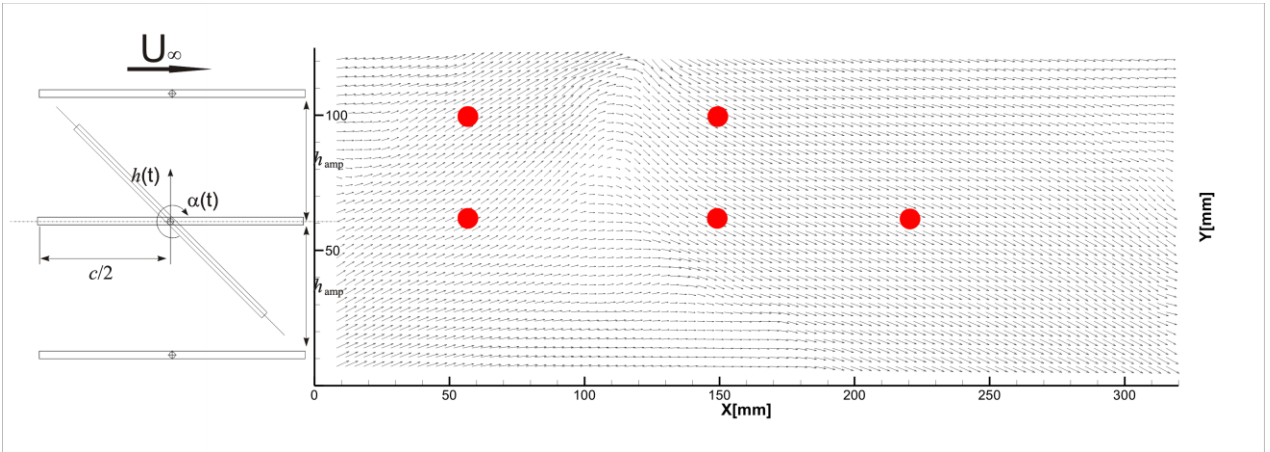
Tablo 1: Levhanın hareket parametreleri

Durum	Hız [m/s]	Frekans [Hz]	$\alpha$ maks [derece]	h max (mm)	Yunuslama	Ötelenme
1	0.1004	0.25	45	0	Üçgen	X
2	0.1004	0.5	45	0	Üçgen	X
3	0.1004	0.25	45	0	Kare	X
4	0.1004	0.5	45	0	Kare	X
5	0.1004	0.25	45	0	Kosinüs	X
6	0.1004	0.5	45	0	Kosinüs	X
7	0.1004	0.25	45	100.4	Kare	Üçgen
8	0.1004	0.5	45	50.2	Kare	Üçgen
9	0.1004	0.25	45	100.4	Geçiş	Geçiş
10	0.1004	0.5	45	50.2	Geçiş	Geçiş
11	0.1004	0.25	45	100.4	Kosinüs	Sinüs
12	0.1004	0.5	45	50.2	Kosinüs	Sinüs

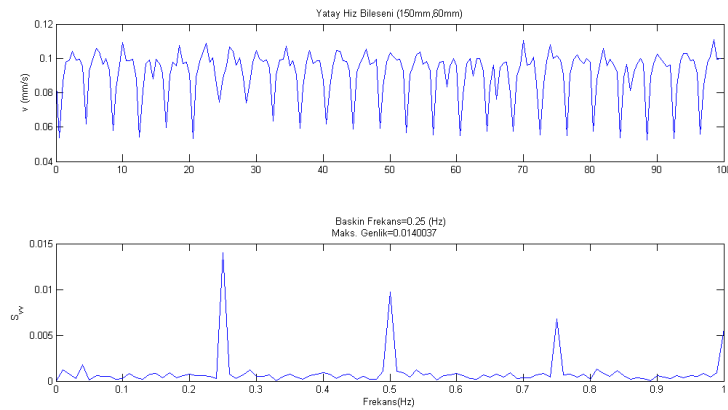


Şekil 2: Yunuslama ve öteleme hareketleri için boyutsuz hareket fonksiyonları

Ölçülen hız vektör alanları üzerinde Şekil 3'de görülen ve kırmızı ile işaretlenmiş beş nokta seçilerek bu noktalarda 25 periyot için hızın yatay ve dikey bileşenlerinin frekans spektrarı elde edilmiştir. Bu noktaların dikey eksenindeki koordinatları, plakanın ötelenme hareketinin simetri eksenini ve üst uç noktası olarak seçilmiştir. Yatay koordinatlar ise plakanın arkasında sağanağa maruz kalacak çırpan kanadın olası pozisyonuna göre belirlenmiştir. Bu beş noktadan elde edilen spektralara göre akış alanındaki baskın çalkantı hız frekansları elde edilmiştir (Bkz. Şekil 4).



Şekil 3: Düz plakanın hareket bölgesi ve arkasındaki hız vektör alanı



Şekil4: 1. Durum için (x=150mm, y=60mm)'deki yatay hız bileşeninin değişimi ve frekans spektrarı

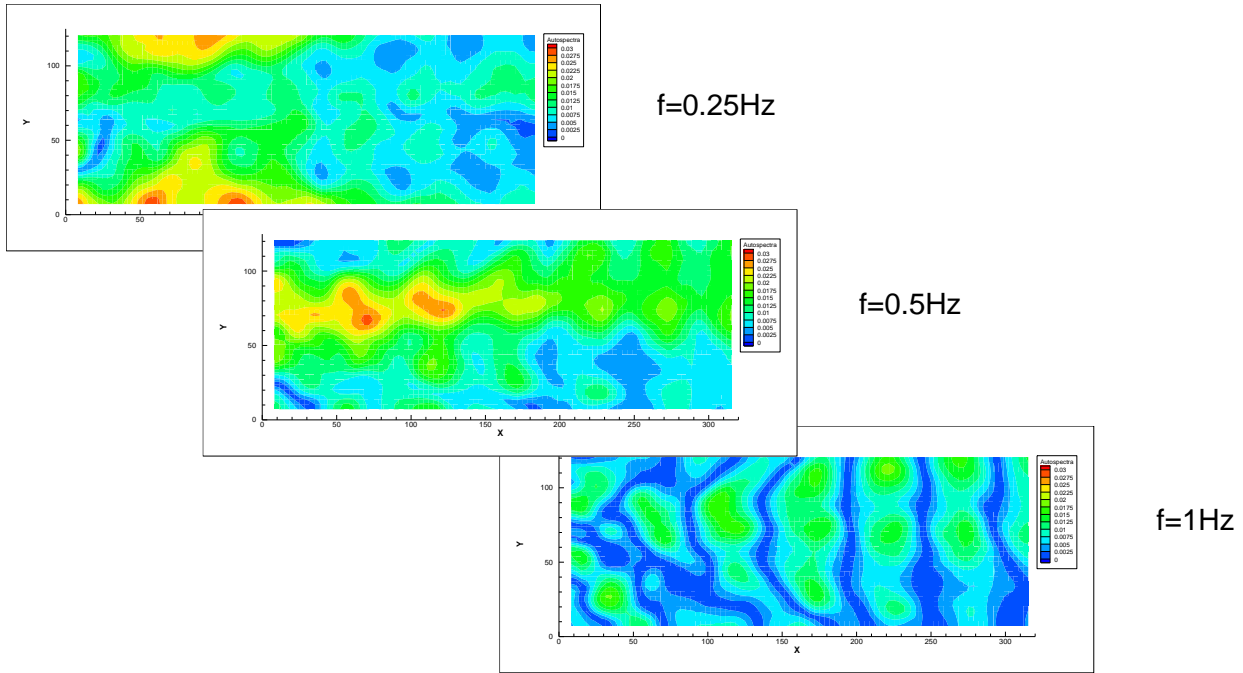
Daha sonra hız alanının yatay ve dikey bileşenleri için bu baskın frekanslardaki oto-spektral yoğunluk alanları çizilmiştir. Bu grafikler seçilen çalkantı frekansının hız bölgesindeki genliğinin dağılımını göstermektedir. Böylece çalkantı frekansının akış alanının neresinde etkin olduğu görülebilmektedir. Ayrıca hız alanının yatay ve dikey bileşenleri için baskın frekansların çapraz-spektra alanları hesaplanmıştır. Burada ise baskın frekansın faz açısı değişimi hız alanı boyunca izlenebilmektedir.

## UYGULAMALAR

Çırpan kanatlı MHA'ların maruz kalacağı sağanakları modelleyebilecek durumların belirlenmesi için akış alanı boyunca veya belli bir bölgesinde karakterize edilebilecek yatay ve dikey hız çalkantı frekansları aranmıştır. Daha sonra bu çalkantı frekanslarının akış boyunca faz açısı değişimlerinin çırpan kanatla yapılacak deneylere izin verecek şekilde olması göz önüne alınmıştır.

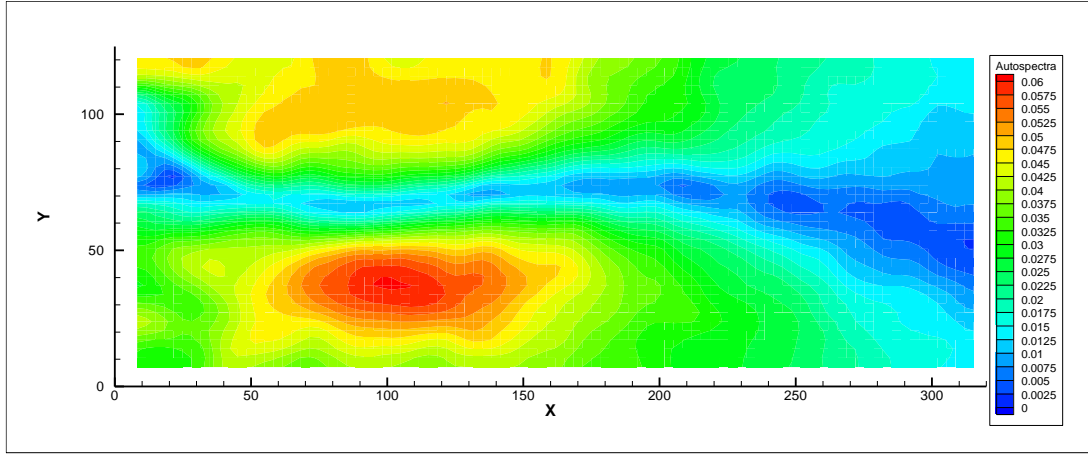
Elde edilen oto-spektral yoğunluk alanları incelendiğinde genellikle yatay bileşende, hareket frekansı ve katları olmak üzere birden çok baskın frekans görülmektedir. Dikey bileşende ise çoğunlukla hareket ile aynı frekansta baskın frekanslar gözlemlenmiştir.

Şekil 5'de örneklendiği gibi, 1. ve 2. durumlarda yatay hız bileşeni için birden çok baskın frekansın akış bölgesi boyunca uniform olmayan girişimi gözlenmektedir. 6. ve 9. durumlarda yatay hız bileşeni için asimetrik baskın frekans dağılımı görülmüştür.

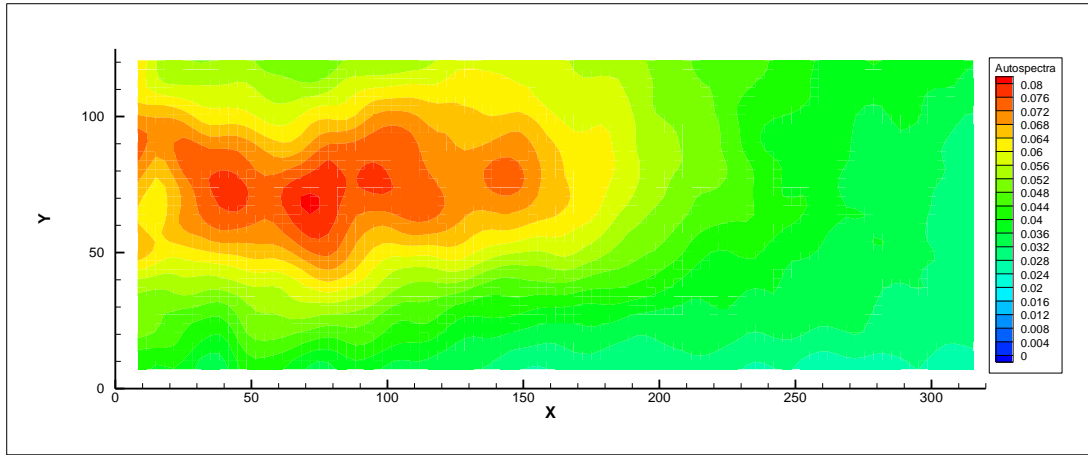


Şekil 5: Durum 1 için yatay bileşendeki baskın çalkantı frekanslarının oto-spektral yoğunluk alanları

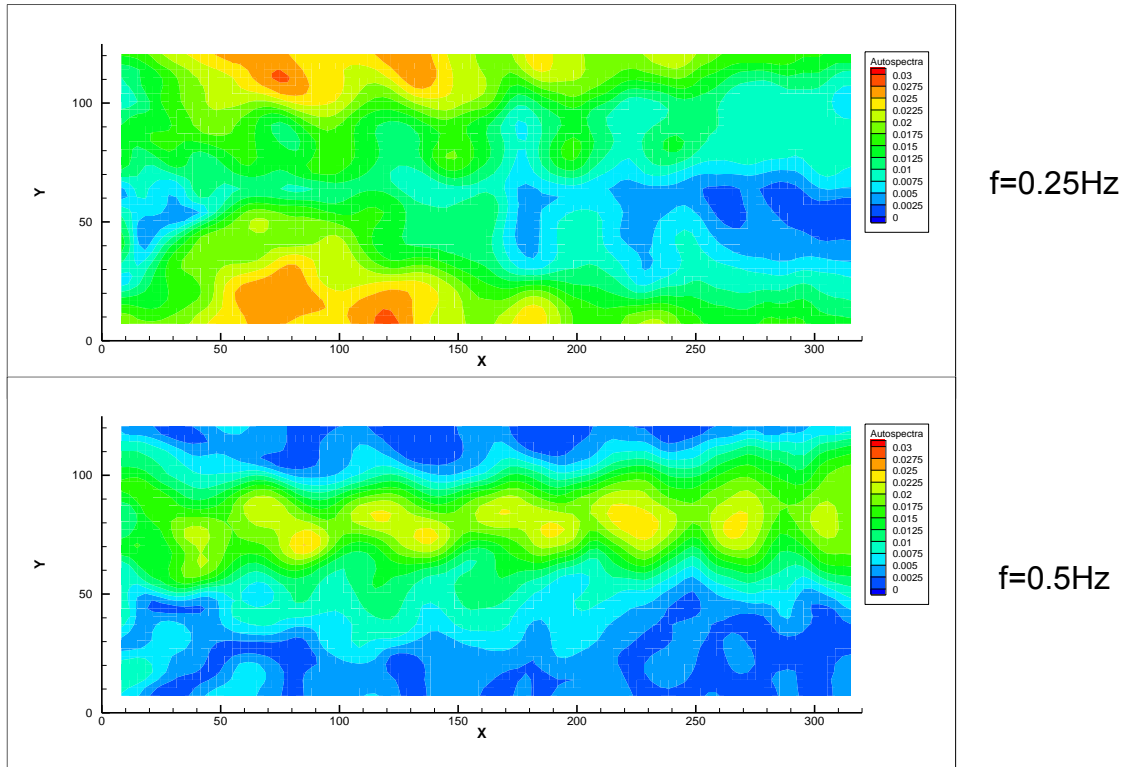
0.25Hz'de kare hareket fonksiyonunun uygulandığı 3. durumda hem yatay (Bkz. Şekil 6) hem de dikey (Bkz. Şekil 7) bileşen için hareket frekansı ile aynı baskın tek bir frekans belirlenmiştir. Yatay bileşende akışın üst ve alt yarısında iki baskın odak bölgesi görülürken, dikey bileşende simetri eksenini boyunca tek bir odak bölgesi bulunmaktadır. Şekil 8'de görüldüğü üzere, 0.25Hz'de kosinüs hareketi kullanılan 5. durumda, farklı olarak yatay bileşende iki baskın frekans oluşmaktadır. 3. durumda görülen iki odak 0.25Hz frekansı için yine görülürken aralarındaki yatay mesafe artmıştır. Bunun yanı sıra simetri ekseninde 0.5Hz frekansında baskın bir odak ortaya çıkmıştır. Dikey bileşendeki odak noktası ise akış arkasına yayılarak daha homojen bir dağılım sergilemektedir (Bkz.Şekil 9).



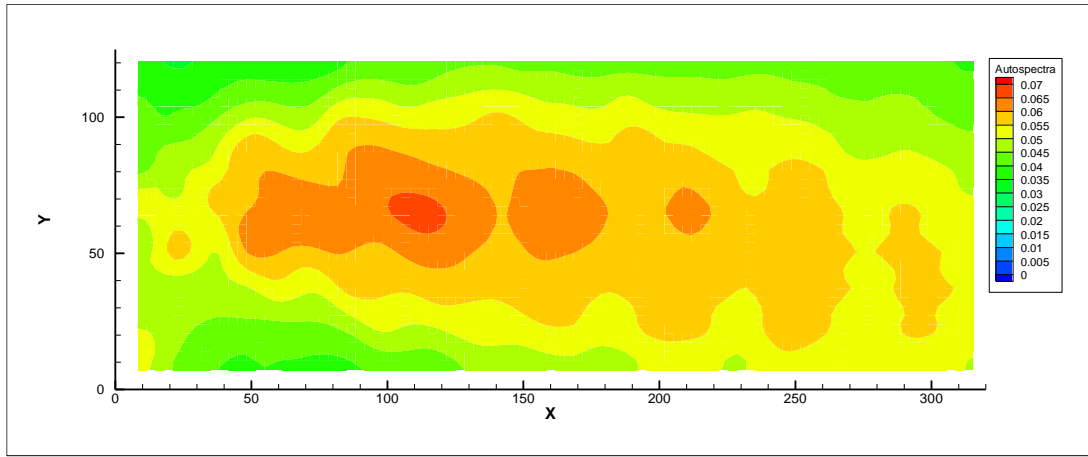
Şekil 6: Durum 3 için yatay bileşende 0.25Hz çalkantı frekansının oto-spektral yoğunluk alanı



Şekil 7: Durum 3 için dikey bileşende 0.25Hz çalkantı frekansının oto-spektral yoğunluk alanı

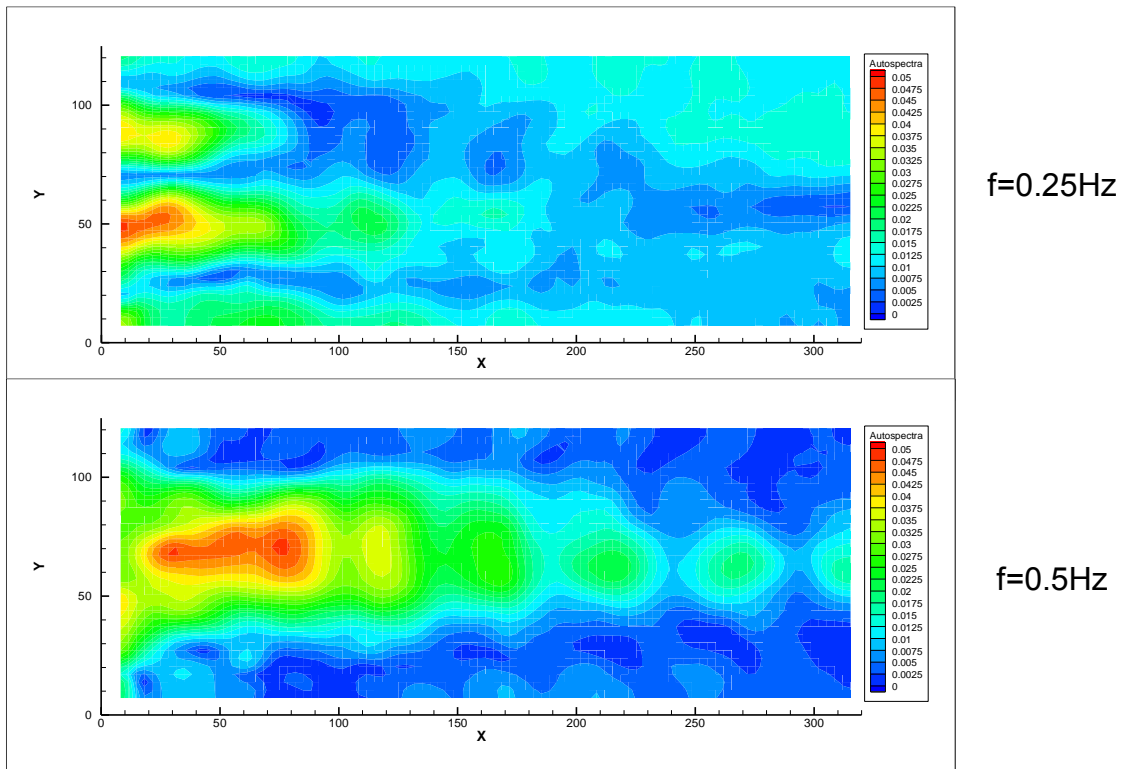


Şekil 8: Durum 5 için yatay bileşende baskın çalkantı frekanslarının oto-spektral yoğunluk alanları



Şekil 9: Durum 5 için dikey bileşende 0.25Hz çalkantı frekansının oto-spektral yoğunluk alanı

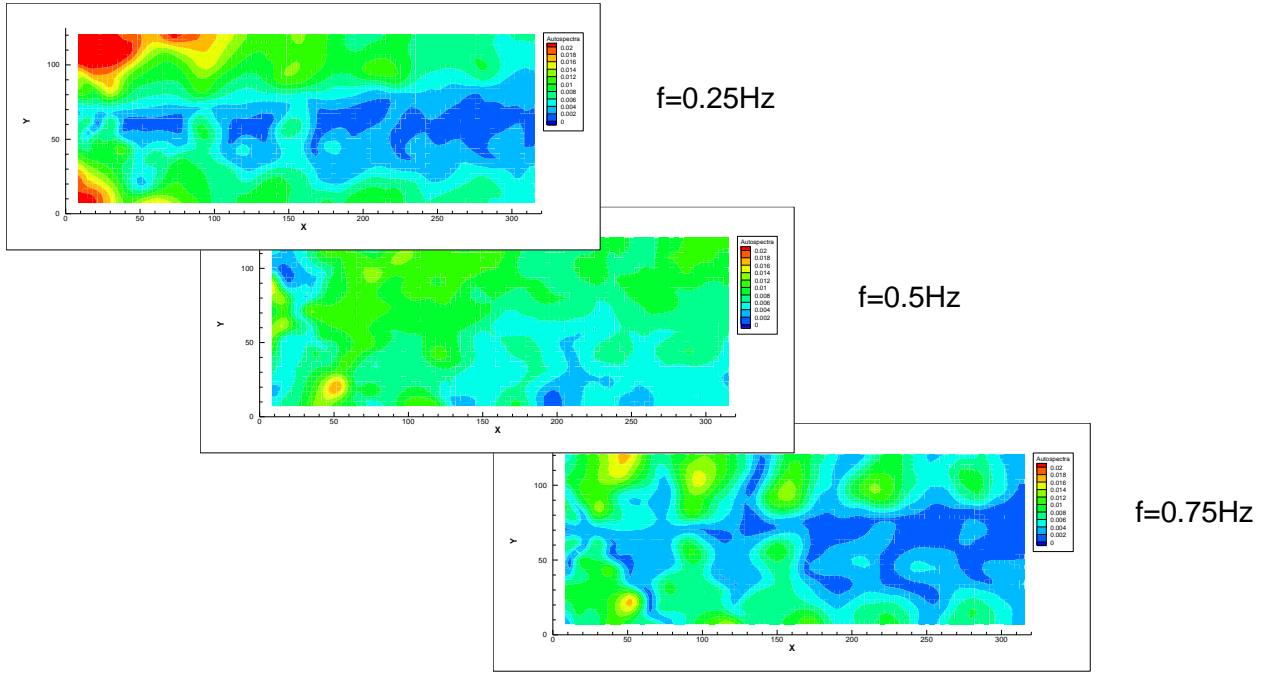
7. durumda 0.25Hz'in baskın olduğu iki odak noktasının yatay olarak birbirine yaklaştığı ancak etkinliklerini akış bölgesinin ortasına gelemeden yitirdikleri görülürken hemen arkalarında simetri eksenini boyunca 0.5Hz'in baskın olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 10). Yatay ekseninde ise 0.25Hz, 0.5Hz ve 0.75Hz frekanslarının çırpan kanadın olası konumu olana akış bölgesinin orta kısmında görece homojen dağılım sergilediği görülmektedir.



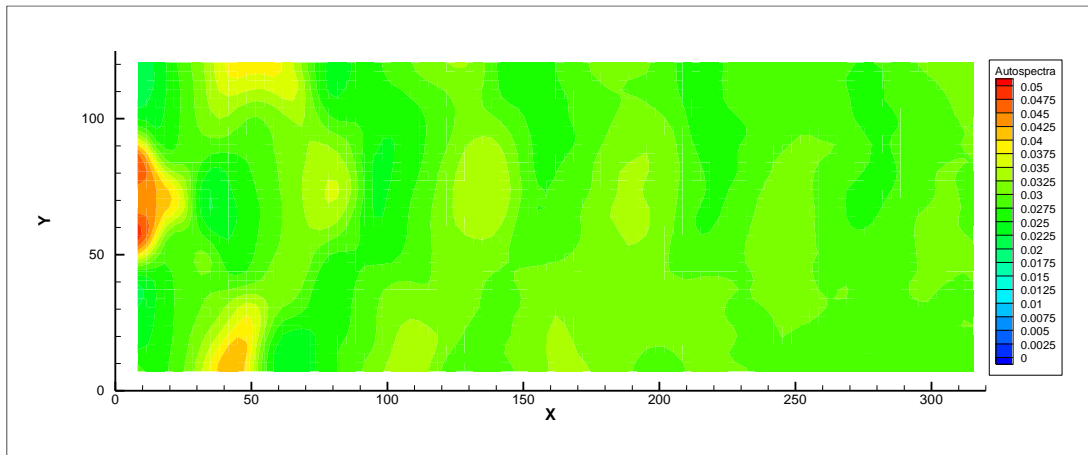
Şekil 10: Durum 7 için yatay bileşende baskın çalkantı frekanslarının oto-spektral yoğunluk alanları

10. durumda yatay bileşende baskın olan iki frekans da çok hızlı şekilde akım alanındaki etkinlikleri yitirmektedir. Dikey bileşenin de akış bölgesinin orta bölgesinde etkinliğini yitirdiği gözlemlenmektedir.

11. durumda yatay bileşende baskın olan 3 frekanstan 0.25Hz ve 0.75Hz akış bölgesinin ikinci yarısından sonra orta bölgede etkinliğini yitirirken 0.5Hz'in akış bölgesi boyunca homojen bir dağılım göstermektedir (Bkz. Şekil 11). Dikey bileşende ise tüm akış bölgesinde 0.25Hz baskındır (Bkz. Şekil 12).



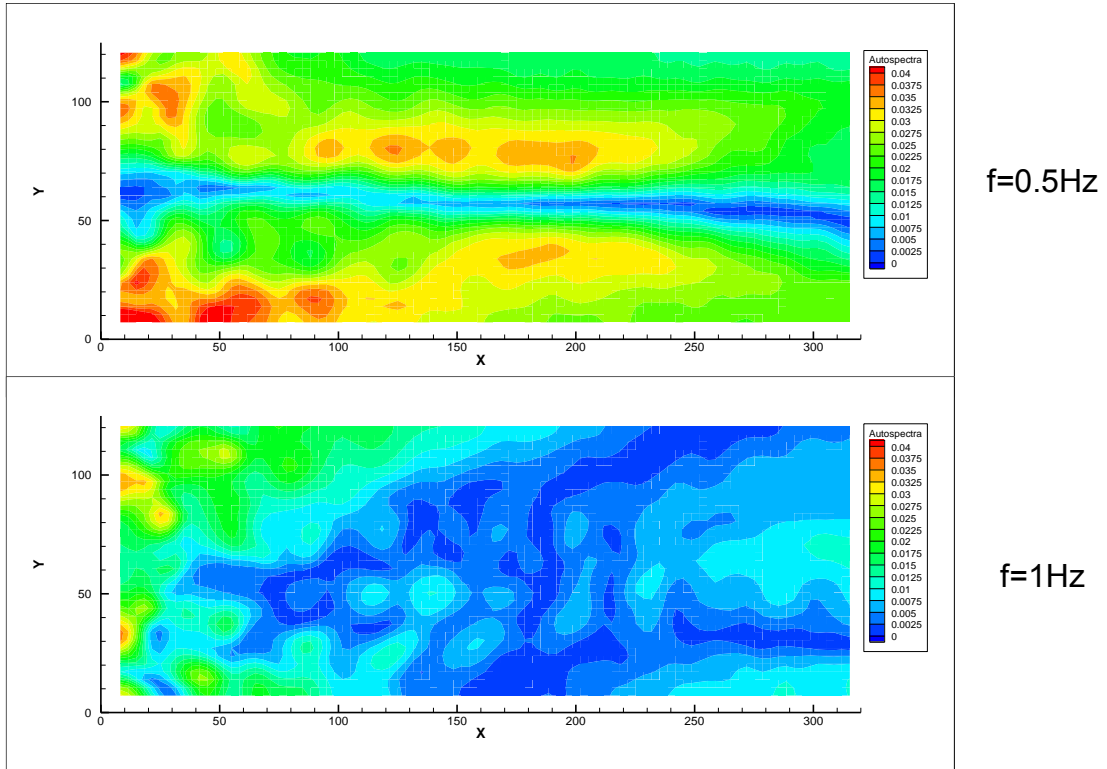
Şekil 11: Durum 11 için yatay bileşende baskın çalkantı frekanslarının oto-spektral yoğunluk alanları



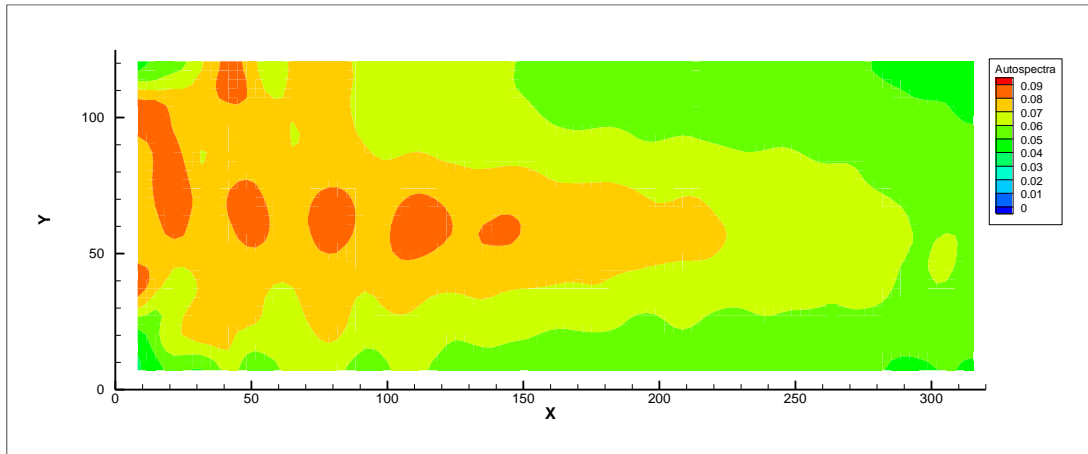
Şekil 12: Durum 11 için dikey bileşende 0.25Hz çalkantı frekansının oto-spektral yoğunluk alanı

12. durumda yatay bileşende 0.5Hz orta simetri eksenindeki ince bir hat dışında tüm akış alanında baskınlığını korumaktadır. 1Hz ise akışın orta bölgesinde itibaren etkinliğini yitirmektedir (Bkz. Şekil 13). Dikey bileşende 0.5Hz frekansı akış bölgesinin her yerinde etkinliğini korumaktadır (Bkz. Şekil 14).





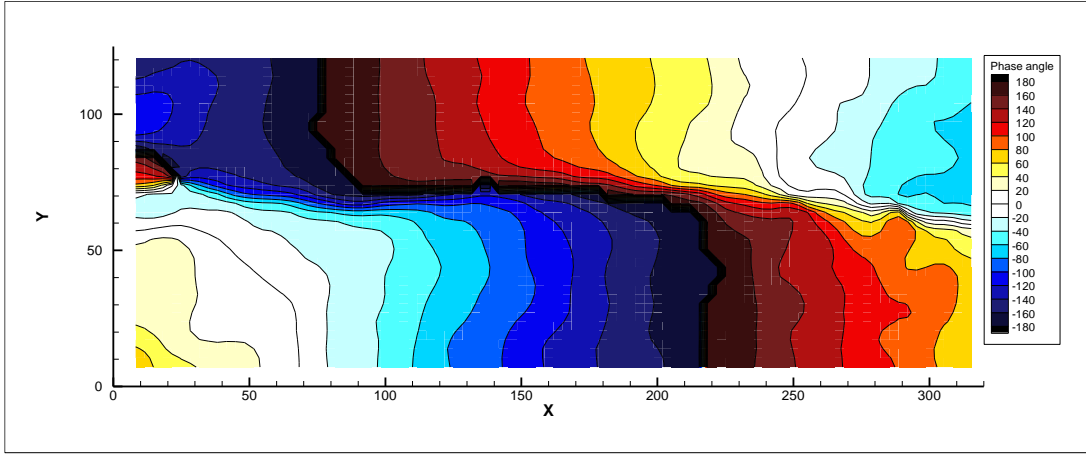
Şekil 13: Durum 12 için yatay bileşende baskın çalkantı frekanslarının oto-spektral yoğunluk alanları



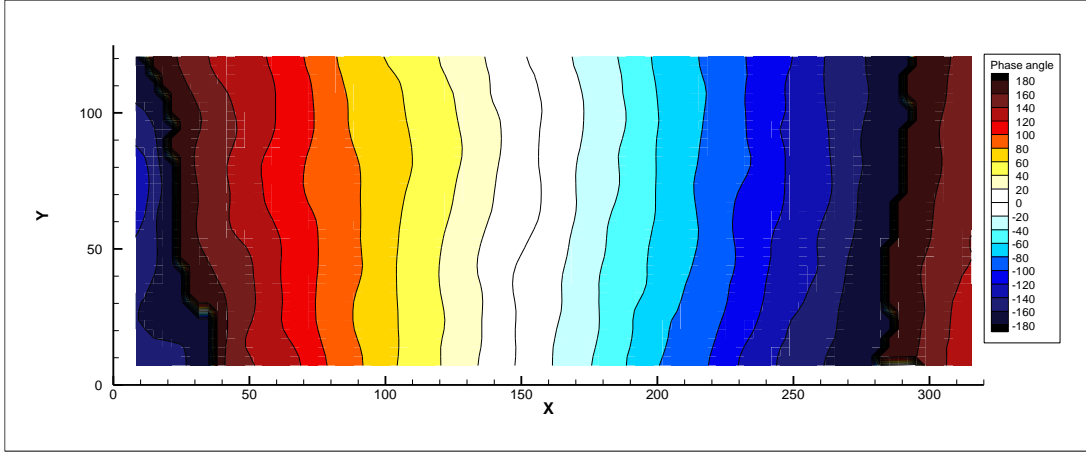
Şekil 14: Durum 12 için dikey bileşende 0.5Hz çalkantı frekansının oto-spektral yoğunluk alanı

Çapraz-spektra alanlarına bakıldığında 3. durumda yatay bileşen için akış bölgesinin üst ve alt yarısı arasında 180 derece faz farkı olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 15). Dikey bileşen ise akış boyunca dikey paralel hatlarla düzgün bir şekilde değişmektedir (Bkz. Şekil 16).

5. durumda yatay bileşendeki iki baskın frekanstan 0.5Hz'in değişimi akışın orta bölgesinde görece düzgün olsa da 0.25 Hz'in dağılımı asimetrik bir yapıdadır.

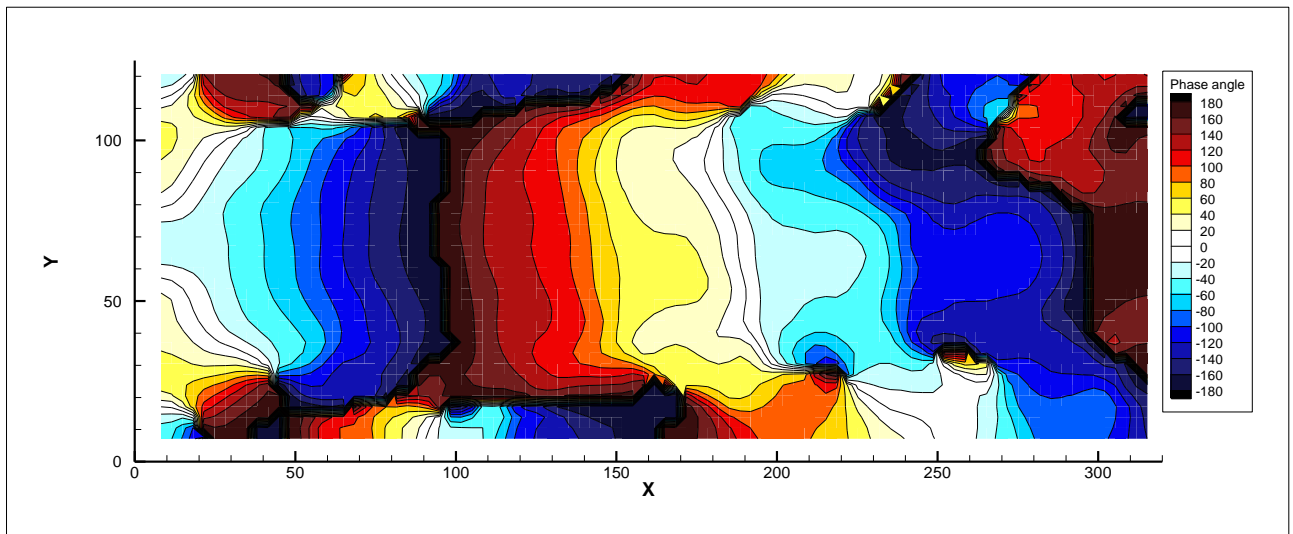


Şekil 15: Durum 3 için yatay bileşende 0.25Hz çalkantı frekansının çapraz-spektra alanı

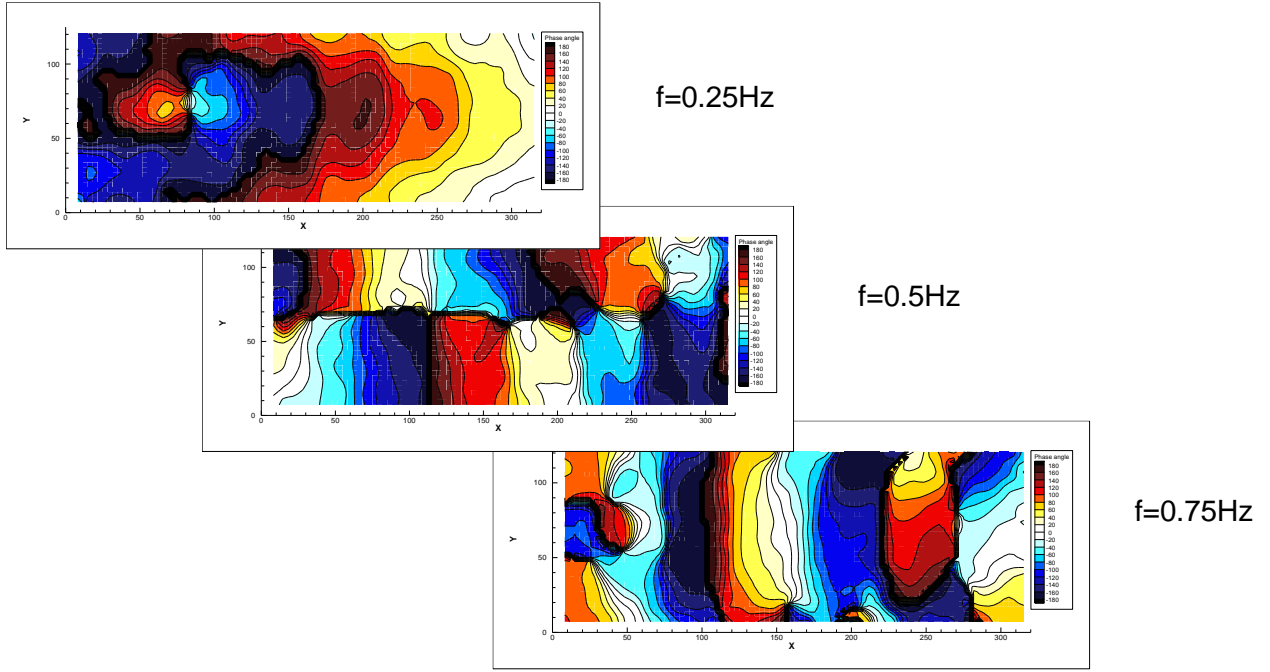


Şekil 16: Durum 3 için dikey bileşende 0.25Hz çalkantı frekansının çapraz-spektra alanı

7. durumda 0.25Hz frekansının faz açısı değişimi her ne kadar düzgün bir yapı sergilemese de bu frekans akış bölgesinin ortasına gelmeden etkinliğini yitirmektedir. Özellikle çırpan kanadın olası pozisyonunda 0.5Hz frekansı homojen bir faz açısı dağılımı göstermektedir (Bkz. Şekil 17). Dikey bileşende baskın olan üç frekansın faz açısı değişimleri kendi içlerinde düzgün yapılar sergiliyorsa da birbirlerinden farklı karakteristik yapılarıdır (Bkz. Şekil 18).



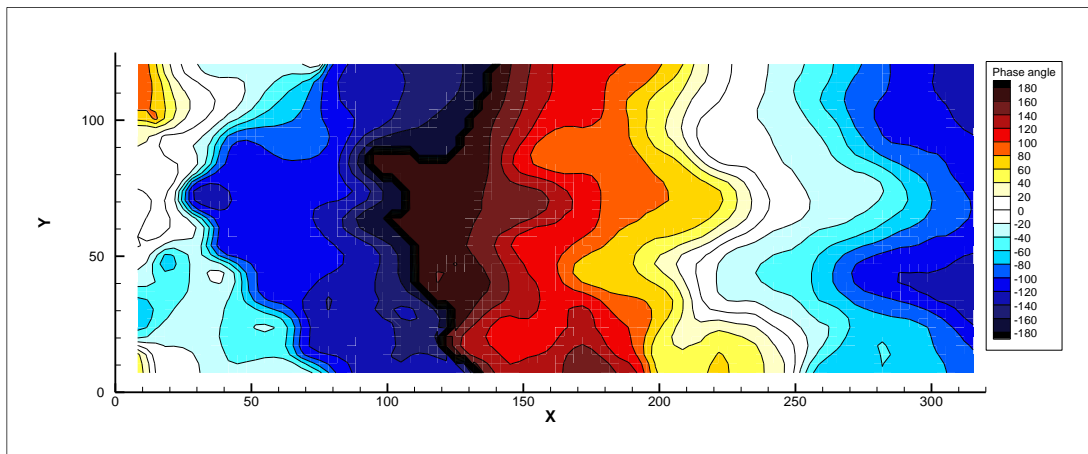
Şekil 17: Durum 7 için yatay bileşende 0.5Hz çalkantı frekansının çapraz-spektra alanı



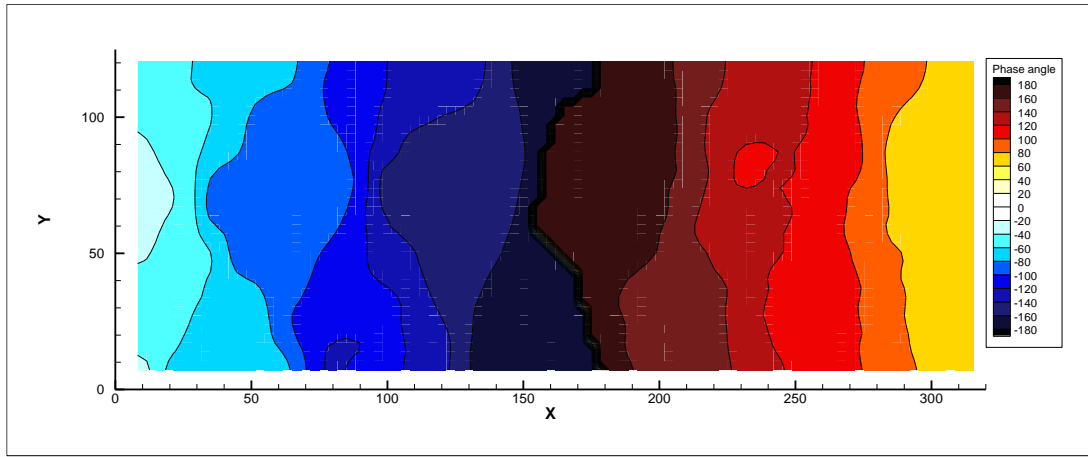
Şekil 18: Durum 7 için dikey bileşende baskın çalkantı frekanslarının çapraz-spektra alanları

10. durumda yatay bileşendeki frekansların faz değişimi düzgün yapılar göstermez iken dikey bileşendeki frekans paralel hatlarla akış boyunca değişmektedir.

11. durumda yatay bileşende 0.5Hz frekansının tek başına baskın olduğu bölgede homojen faz açısı dağılımı (Bkz. Şekil 19) görülürken 0.25Hz ve 0.75Hz dağınık bir yayılım göstermektedir. Dikey bileşende ise dikey paralel hatlarla ilerleyen gayet homojen bir dağılım mevcuttur (Bkz. Şekil 20).

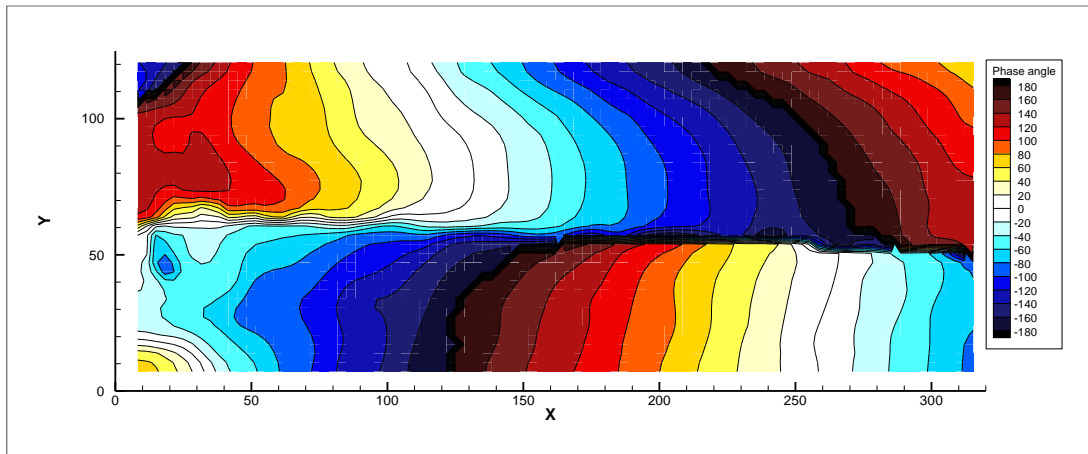


Şekil 19: Durum 11 için yatay bileşende 0.5Hz çalkantı frekansının çapraz-spektra alanı

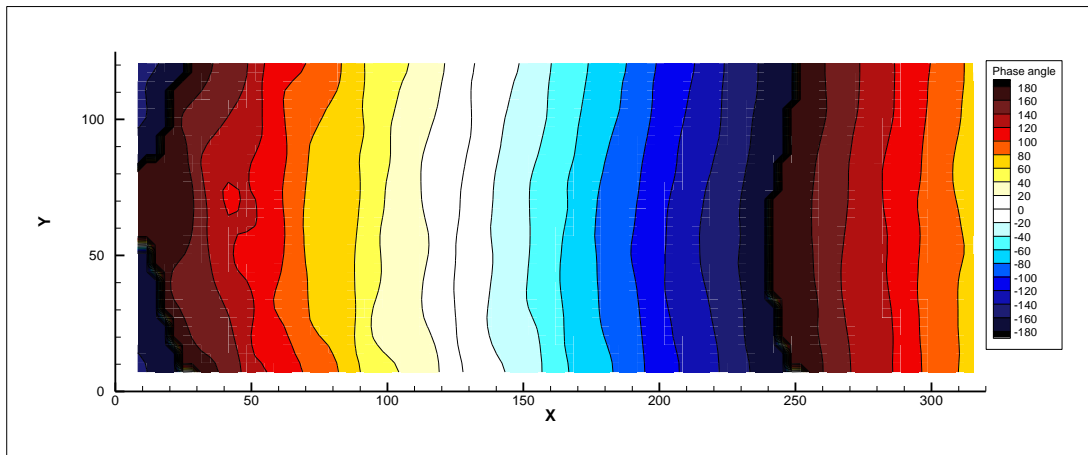


Şekil 20: Durum 11 için dikey bileşende 0.25Hz çalkantı frekansının çapraz-spektra alanı

12. durumda yatay bileşende akışın orta bölgesinden itibaren tek başına baskın olan 0.5Hz akışın üst ve alt bölgesinde 180 derece faz açısı farkıyla hareket eden düzgün bir dağılım sergilemektedir (Bkz. Şekil 21). Dikey bileşende ise paralel hatlarla ilerleyen düzgün bir değişim gözlenmektedir (Bkz. Şekil 22).



Şekil 21: Durum 12 için yatay bileşende 0.5Hz çalkantı frekansının çapraz-spektra alanı



Şekil 22: Durum 12 için dikey bileşende 0.5Hz çalkantı frekansının çapraz-spektra alanı

## SONUÇ

Mikro Hava Araçlarının maruz kalacağı sağanakların deneysel olarak oluşturulması amaçlanmaktadır. Buna yönelik olarak su kanalı içerisinde düz bir levhaya yunuslama ve akışa dik yönde ötelenme hareketi verilmiştir. Farklı frekans ve hareket fonksiyonları için toplam 10 durum incelenmiş ve Digital Particle Image Velocimetry (DPIV, Parçacık Görüntüleyerek Hız Belirleme) sistemiyle hız alanları ölçülmüştür. Hız alanları kullanılarak akış bölgesindeki baskın frekanslar için yatay ve dikey hız bileşenlerinin oto-spektral yoğunluk ve çapraz-spektra alanları hesaplanmıştır.

İncelenen tüm durumlar arasında özellikle 3., 11. ve 12. durumlar sağanak modellemesi için uygun görülmektedir. Durum 3'de iki hız bileşeni için de 0.25Hz'de çalkantı frekansı, durum 12'de 0.5Hz çalkantı frekansı modellenebilmektedir. Durum 11 ise yatayda 0.5Hz dikeyde 0.25Hz frekanslı çalkantıların modellenebilmesi için uygundur. 7. durum ise dikey çalkantı bileşeni için birden çok frekansın baskın olduğu bir model olarak kullanılabilir.

### Kaynaklar

- Golubev V. V., Mankbadi R. R., Visbal M. R., Scott J. R. ve Hixon R., 2006. *A Parametric Study of Nonlinear Gust-Airfoil Interaction*, 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference), Cambridge, Massachusetts, 8-10 Mayıs 2006-2426.
- Lian Y. ve Shyy W., 2007 A. *Aerodynamics of low Reynolds number plunging airfoil under gusty environment*, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 8-10 Ocak 2007-71.
- Lian Y. ve Shyy W., 2007 B. *Laminar-turbulent transition of a low Reynolds number rigid or flexible airfoil*, AIAA journal, 45(7), s. 1501-1513.
- Patil M. J. ve Taylor D. J., 2006. *Gust Response of Highly Flexible Aircraft*, AIAA Paper 2006-1638.
- Shyy W., Jenkins D. A. ve Smith R. W., 1997. *Study of Adaptive Shape Airfoils at Low Reynolds Number in Oscillatory Flow*, AIAA Journal, 35(9), s. 1545-1548.
- Yang G. ve Obayashi S., 2004. *Numerical Analyses of Discrete Gust Response for an Aircraft*. *Journal of Aircraft*, Vol. 41, No. 6, 2004, s. 1353-1359.
- Zaide A. ve Raveh D., 2006. *Numerical Simulation and Reduced-Order Modeling of Airfoil Gust Response*, AIAA Journal, Vol. 44, No. 8, 2006, s. 1826-1834.