

ORTA SÜPÜRME AÇILI DELTA KANAT ETRAFINDAKİ AKIŞIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

İlhan ÖZTÜRK¹, Mohammadreza ZHARFA², Berksu ERKAL³ ve Mehmet Metin Yavuz⁴

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

45 derecelik orta süpürme açılı bir delta kanadın etrafında oluşan akış, lazer aydınlatmalı akış görüntüleme, yüzey basınç ölçümleri ve Lazer Doppler Anemometre (LDA) yöntemi kullanılarak düşük hız rüzgâr tüneline deneysel olarak incelenmiştir. Kanat ucu girdabının oluşum ve kırınımı ve kanat yüzeyinden üç boyutlu akış ayrılması geniş bir hücum açısı ve Reynolds sayısı aralığında çalışılmıştır. Akış görüntüleme deneyleri akışa dik üç farklı düzlemde ve kanat ucu girdabının merkezinden geçen yatay düzlemde gerçekleştirilmiştir. Yüzey basınç ölçümleri, kanat yüzeyinde bir uçtan diğer uca gidecek şekilde kanat veteri boyunca üç farklı istasyonda sıralanmış olan basınç ölçüm deliklerinden gerçekleştirilmiştir. Hız ölçümlerinde ise girdap merkezi ve planform yüzeyine yakın belirgin noktalar kullanılmıştır. İstatistiksel yöntemler ve spektral analizler kullanılarak akışın düzensizliği detaylı olarak araştırılmış ve farklı noktalardaki basınç ve hız çalkantılarının büyüklükleri ve yapısı karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar, girdap merkezlerinin konumlarının kanat yüzeyindeki en yüksek emme basınçlarının görüldüğü yerler ile örtüşmesi neticesinde, yüzey basınç ölçüm sonuçları ile akış görüntüleme sonuçlarının birbiriyle oldukça uyumlu olduğunu ortaya çıkarmıştır. Girdap kırınımı ve kanat yüzeyinden üç boyutlu akış ayrılmasının, kanat yüzeyi üzerinde girdap merkezinin emme basıncı ve akışın yeniden yüzeye bağlanma basıncında önemli kayıplara neden olduğu görülmüştür. Hız ve basınçtaki çalkantılar incelendiğinde; $\alpha = 4^\circ$ ve 7° hücum açılarında en yüksek çalkantı değerlerinin girdap eksenini civarında ölçüldüğü, yüzeyden üç boyutlu akış ayrılmasının yaşandığı $\alpha = 13^\circ$ hücum açısı ve düşük Reynolds sayıları durumlarında ise en yüksek çalkantı değerlerinin akışın yüzeye yeniden bağlandığı bölge civarında elde edildiği görülmüştür.

GİRİŞ

Delta kanatlar gerek sabit uçuşta gerekse de manevra halindeyken karmaşık akış yapıları üretmekte olup bu yapılar genellikle kanat ucu girdabı ve bunun kırınımı ile yüzeysel akış ayrılmaları ve kanat yüzeyinden üç boyutlu akış ayrılmalarından (stall) kaynaklanmaktadır. Hem sivil hem de askeri amaçlarla kullanılabilmeleri nedeniyle İnsansız Savaş Uçaklarına olan ilginin

¹ Araştırma görevlisi, Makina Müh. Böl., E-posta: oilhan@metu.edu.tr

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Makina Müh. Böl., E-posta: zharfa.mohammadreza@metu.edu.tr

³ Lisans Öğrencisi, Makina Müh. Böl., E-posta: e174368@metu.edu.tr

⁴ Doç. Dr., Makina Müh. Böl., E-posta: ymetin@metu.edu.tr

son zamanlarda artması, bu araçlarda sıklıkla tercih edilen delta kanatlar üzerindeki karmaşık akış yapısının anlaşılmasına duyulan ihtiyacı da artırmaktadır.

Orta ve düşük süpürme açılı ($\leq 55^\circ$) delta kanatlar üzerinde oluşan akış yapıları, yüksek süpürme açılı ($> 55^\circ$) kanatlar üzerinde oluşan akış yapılarından önemli farklılıklar göstermektedir. Her iki kanat türünde de hücum kenarlarından ayrılan kayma tabakalarının oluşturduğu kanat ucu girdap çifti, akıştaki dengenin sağlanması ve kanat üzerinde ilave kaldırma üretilmesinde önemli rol oynamaktayken [Yavuz, 2006], yüksek süpürme açılı kanatlarda bu girdaplar yüksek hücum açılarında bile akışta baskın bir etki gösterebilmektedir [Taylor ve Gursul, 2004]. Delta kanatlar yeterince yüksek hücum açılarında çıktıklarında kanat ucu girdaplarının merkezleri doğrultusundaki akışta durmalar oluşmakta ve bu da girdaplarda ani genişlemelere neden olarak girdap kırımını olarak adlandırılan durumu ortaya çıkarmakta [Werle, 1954], bu da kanattaki kaldırma ve momentlerde azalma yaratmaktadır. Yüksek süpürme açılı kanatların aksine düşük ve orta süpürme açılı kanatlarda kanat ucu girdabı kırımını kaldırma kuvveti üretilebilmesi için sınırlayıcı bir etken olmaktan çıkmaktadır [Williams, 2009]. Girdap kırımının olumsuz sonuçlarına diğer bir örnek de kanat yüzeyinde geniş genlikli düzensiz yüklere (buffeting) neden olarak kanatta yapısal hasar ve buna ek olarak kontrol ve denge kaybına neden olabilmesidir [Yavuz, 2006].

Düşük ve orta süpürme açılı kanatlardaki kanat ucu girdaplarının kırımını, yüksek süpürme açılı kanatlarda oluşan kanat ucu girdaplarının kırımını gibi ani olmadığı için bu kanatlarda girdap kırım noktasının konumunu tespit oldukça zordur [Gursul, Gordnier ve Visbal, 2005]. Ol ve Gharib orta ve yüksek süpürme açılı delta kanatlar üzerinde boya görüntüleme ve stereo parçacık görüntülemeli hız ölçme tekniğini kullanılarak yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda girdap kırım başlangıcını belirlemişler [Ol ve Gharib, 2001; Ol ve Gharib, 2003], Gordnier ve Visbal ise anlık ve ortalama akış yapısının detaylı karakteristikleri ve yüzey akış topolojisi nümerik olarak hesaplamışlardır [Gordnier ve Visbal, 2005]. 50° süpürme açılı delta kanatlar üzerinde yürütülen deneysel ve nümerik çalışmalar düşük hücum açıları ve görece düşük Reynolds sayılarında birincil kanat ucu girdabının ikincil kanat ucu girdabı tarafından iki farklı kanat ucu girdabına bölünmesi sayesinde sarmal girdap çifti yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir [Taylor Schnorbus ve Gursul, 2003; Taylor ve Gursul, 2004; Yaniktepe ve Rockwell, 2004; Öztürk, Çelik, Tunç ve Yavuz, 2012]. Kanat kalkış manevrası yaparken de oluşan bu sarmal girdap çiftinden kanat simetri eksenine yakın olanı daha geniş bir alanı kaplamakta ve her zaman daha geç kırımına uğramaktadır [Öztürk, Çelik, Tunç ve Yavuz, 2012]. Süpürme açısı 45° ile 65° arasında değişen delta kanatlarda boya enjeksiyonu ve hidrojen kabarcığı ile görüntüleme teknikleri kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda sarmal girdap çifti yapısının sadece düşük ve orta süpürme açılı delta kanatlara özgü bir yapı olmadığı, belirli şartlar altında yüksek süpürme açısına sahip delta kanatlarda da ortaya çıkabildiği ve Reynolds sayısının bu yapının ortaya çıkmasında önemli bir etken olduğu görülmüştür [Wang ve Zhang, 2008]. 50° süpürme açılı delta kanat üzerinde yürütülen çalışmalar Reynolds sayısındaki azalmanın girdap merkezini kanadın simetri eksenine yönünde hareket ettirdiği ve girdap kırımını önemli derecede geciktirdiğini göstermiştir [Taylor Schnorbus ve Gursul, 2003; Taylor ve Gursul, 2004]. Bu sonuçlara ek olarak aynı kanatta Reynolds sayısı 3×10^4 mertebesine ulaştığında akışın asimptotik bir yapıya ulaştığı ve Reynolds sayısının daha da artırılmasının sadece girdap çekirdeği ve girdap kırımını konumlarında ufak değişikliklere neden olduğu bildirilmiştir [Taylor ve Gursul, 2004]. Basit delta kanat planformlarına ek olarak daha karmaşık yapılar olan ve geometrilerinde düşük veya orta süpürme açılı delta kanatlar bulduran elmas ve lambda tipi planformlar da insansız hava araçlarında sıklıkla tercih edilebilmektedir. Yayla bu tip kanatlar üzerindeki akış yapısını boya görüntüleme ve kanat yüzeyine paralel yakın bir düzlemde ve akışa dik farklı düzlemlere PIV ölçümleri yaparak incelemiştir [Yayla, Canpolat, Sahin, Akilli, 2010, 2013; Sahin, Yayla, Canpolat, Akilli, 2012].

Honkan ve Adreopoulos 45° süpürme açılı bir delta kanatta üç yönlü dik açılı sıcak tel probu kullanarak kanat üzerindeki anlık girdap yapılarını belirlemişler ve besleyen kayma tabakasında birincil kanat ucu girdabına ek olarak ayrık sabit girdaplar da bulunduğunu tespit etmişlerdir [Honkan ve Adreopoulos, 1997]. Mevcut çalışmada 45° derecelik orta süpürme açılı bir delta kanadın etrafında oluşan akış, lazer aydınlatmalı akış görüntüleme, yüzey basınç ölçümleri ve Lazer Doppler Anemometre (LDA) yöntemi kullanılarak düşük hızlı bir rüzgâr tüneline deneysel olarak incelenmiştir.

YÖNTEM

Deneyler Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında bulunan düşük hız rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tüneline test bölgesinin ölçüleri 750 mm X 510 mm X 2000 mm olup burada ölçülen en yüksek çalkantı yoğunluğu %1'in altındadır. Deneyler $4^\circ - 13^\circ$ hücum açısı ve $Re = 8.000 - 150.000$ aralığında, 15 mm kalınlık, 150 mm veter ve 300 mm kanat açıklığına sahip, hücum kenarları 45° açı ile pahlanmış 45° süpürme açılı bir delta kanat kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Görsel analizler lazer aydınlatmalı akış görüntüleme tekniği kullanılarak "x" kanat ucundan uzaklık ve "C" kanat veteri olmak üzere $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 konumlarında akışa dik üç farklı düzlem üzerinde ve kanat altında girdap merkezinden geçen yatay düzlemde gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de akış görüntüleme deney düzeneğinin temsili şeması gösterilmiştir.

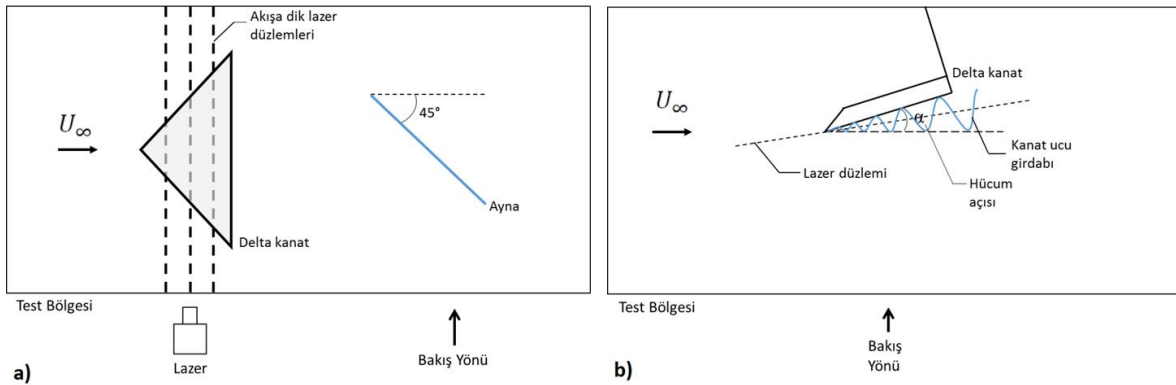
Nicel analizler yüzey basınç ölçümü ve LDA ile hız ölçümleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Basınç ölçümleri kanat yüzeyi üzerinde $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 konumlarında bulunan 3 farklı kesitte enine bir şekilde sıralanmış basınç ölçüm deliklerinden saniyede 500 ölçüm alınarak ve toplamda 10 saniye ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir. Kanatta gerçekleştirilen ön basınç ölçümleri ve akış görüntüleme deneylerinde kanat üzerinde simetrik bir akış yapısı elde edildiği görülmüş ve basınç ölçüm deneylerindeki ölçüm tekrarını önlemek için yüzey basınç ölçümleri kanadın sadece sol yarısında alınmıştır. Şekil 2'nin "a" kısmında kullanılan delta kanat ve üzerindeki basınç ölçüm delikleri ile bu deliklerden hangilerinden basınç ölçümü alındığı detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Basınç ölçüm sonuçları aşağıdaki formül kullanılarak boyutsuz C_p (basınç katsayısı) değerlerine dönüştürülmüş ve basınç dağılımı olarak bu C_p değerleri ($-C_p$ olarak) kullanılmıştır.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2} = \frac{p - p_\infty}{p_{din.}}$$

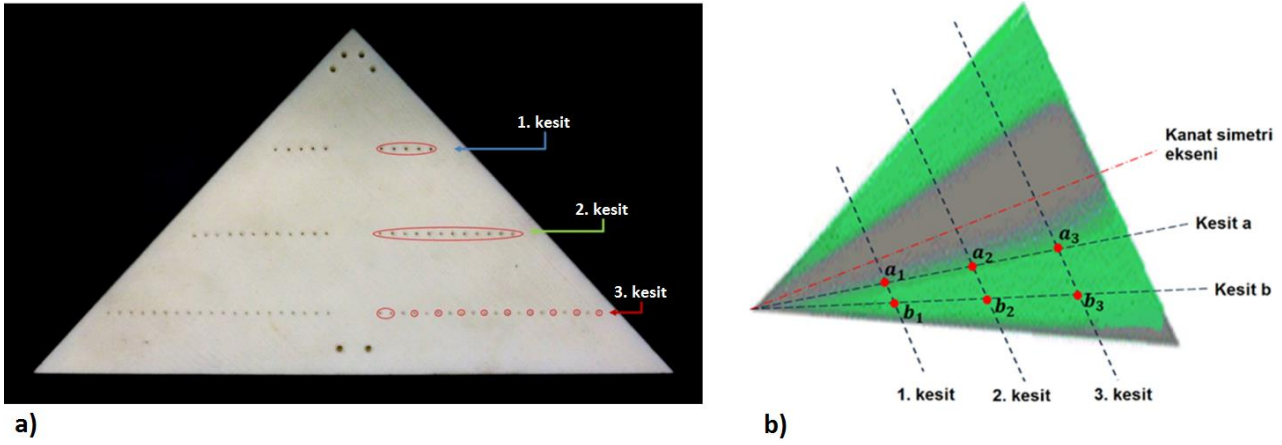
Alınan basınç verilerinin ortalaması ve RMS (root mean square) değerleri hesaplanarak akışın sabit ve değişken basınç yapısı incelenmiştir. Bildiride sunulan basınç ölçümü RMS sonuçlarının hesabı aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$C_{p,RMS} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(p_i - \bar{p})^2]}{N}}}{p_{din.}}$$

Yukarıdaki formüllerde N toplanan veri sayısını, p basınç değerini, \bar{p} ölçülen basınç değerlerinin ortalamasını, p_∞ test bölgesinde akışın statik basıncını ve $p_{din.}$ 'de test bölgesindeki akışın dinamik basınç değerini göstermektedir.



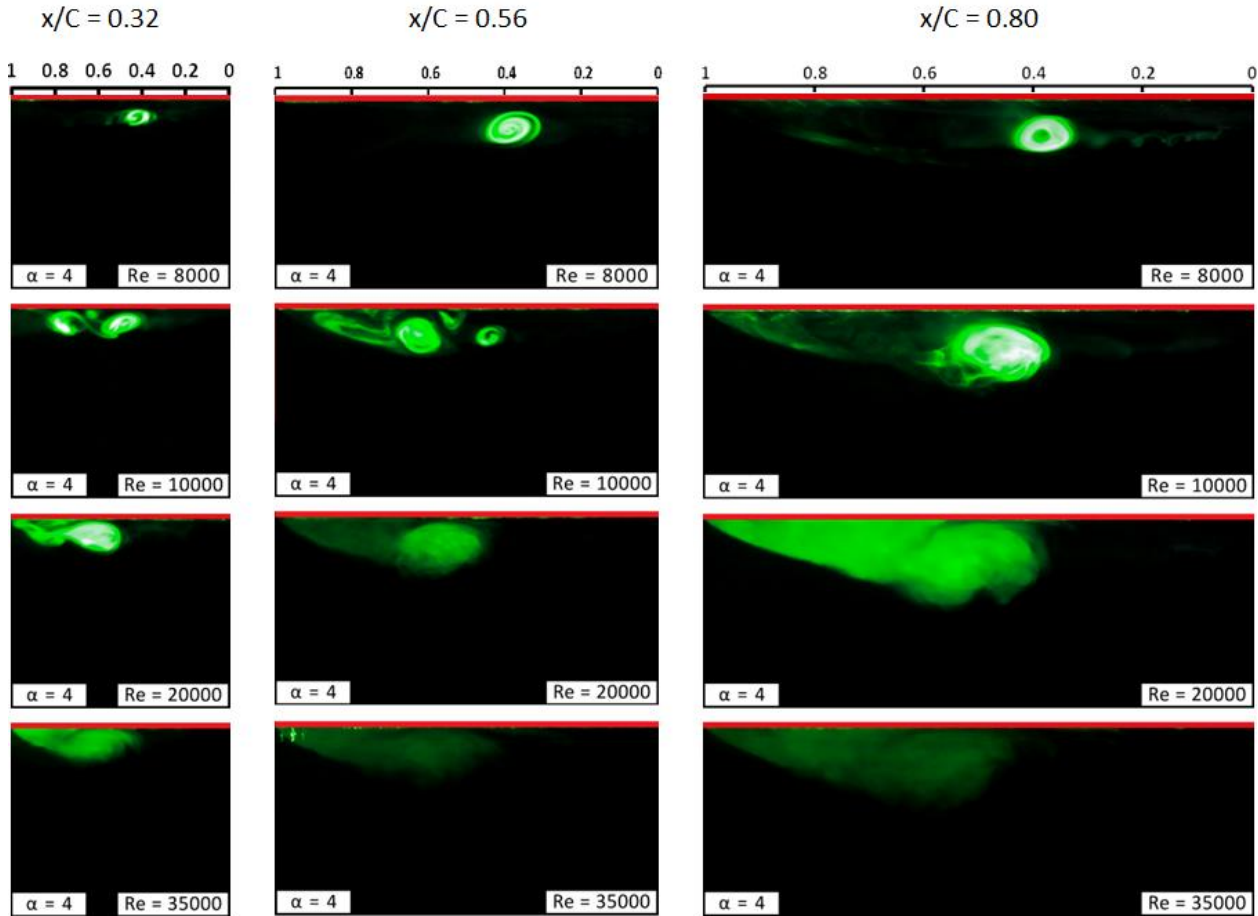
Şekil 1: Lazer aydınlatmalı akış görüntüleme deney düzeneği şemaları; a) akışa dik lazer düzlemleri $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 deney düzeneği b) kanat ucu girdabı merkezinden geçen yatay lazer düzlemi deney düzeneği



Şekil 2: a) Kanat yüzeyi basınç ölçüm delikleri b) LDA hız ölçümü noktaları.

UYGULAMALAR

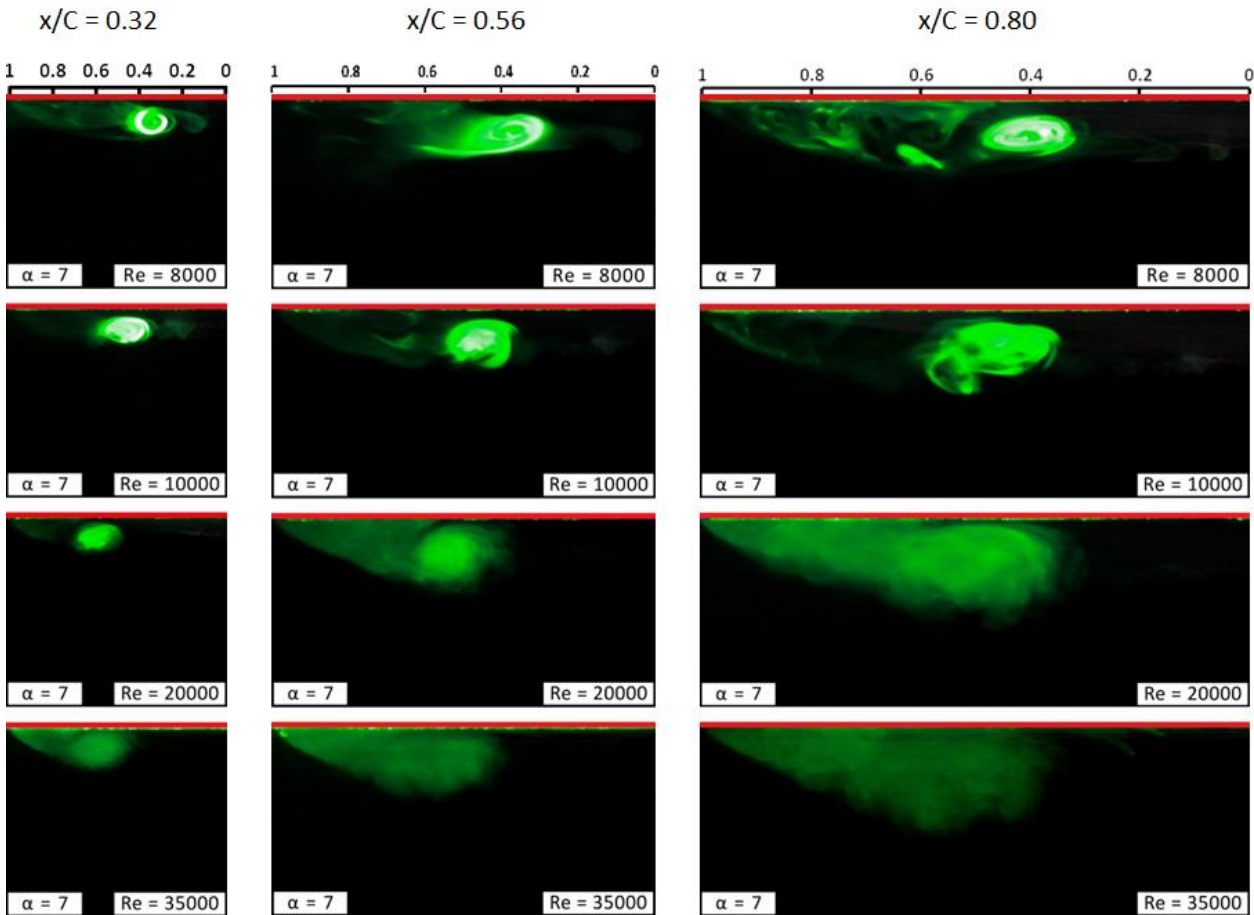
Şekil 3, 4 ve 5 sırasıyla hücum açıları 4, 7 ve 13 dereceler için akışa dik düzlemde lazer aydınlatmalı akış görüntüleme sonuçlarını Reynolds sayıları 8000, 10000, 20000 ve 35000, $x/C = 0.32$, 0.56 ve 0.80 konumlarında göstermektedir. Şekillerde sütunlar farklı x/C değerlerini gösterirken sıralar ise farklı Reynolds sayılarını belirtmektedir. Kanat altında elde edilen simetrik akış yapısından faydalanılarak her kesitte sadece kanadın yarısı altındaki akış görüntüsü kullanılmış ve böylece 3 farklı kesitteki akış yapısının aynı şekilde gösterilebilmesi sağlanmış ve akış yapısının konumunun belirlenebilmesine yardımcı olması amacıyla her kesite bölgesel kanat genişliğini gösteren boyutsuz y/\tilde{s} skalası ($y/\tilde{s} = 0$ kanat merkezini göstermektedir) eklenmiştir.



Şekil 3: Kanat altındaki akışın, akışa dik $x/C = 0.32$, 0.56 ve 0.80 konumlarında bulunan düzlemler üzerinde lazer aydınlatmalı duman görüntüleme yöntemi kullanılarak, $\alpha = 4^\circ$ hücum açısında ve farklı Re sayılarında yarım kanat genişliğinde görüntülenmesi.

Şekil 3'te $\alpha = 4^\circ$ hücum açısına ait akış yapıları görülmektedir. Reynolds sayısı $Re = 8.000$ mertebesinde iken birincil kanat ucu girdabı kanadın önünden arkasına doğru sıralanmış üç farklı konumda da belirgin bir şekilde görülmekte olduğundan mevcut koşullar altında bu girdabın $x/C = 0.80$ konumuna kadar kırımıma uğramadığı söylenilebilir. Reynolds sayısının $Re = 10.000$ mertebesine artırıldığında akıştaki ikincil girdaplar, birincil kanat ucu girdaplarını ikiye bölerek çift sarmal girdap olarak adlandırılan farklı yoğunluklarda birincil girdapları ortaya çıkarmaktadırlar. Kanadın önünden arkaya doğru ilerledikçe çift sarmal girdap yapısından kanadın hücum kenarına yakın olanının diğerinden daha önce kırımıma uğradığı, akış son kesite ulaştığında da akışta bu girdaba ait bir iz kalmadığı ve kanadın merkezine yakın konumdaki girdabın da kırımıma uğramaya başladığı görülmektedir. Şekil 3 incelendiğinde Reynolds sayısının daha da artması sonucunda tekrar birincil kanat ucu girdabı yapısına geri dönüş görülmekte ve girdap kırımım noktası kanat ucuna yaklaşmaktadır.

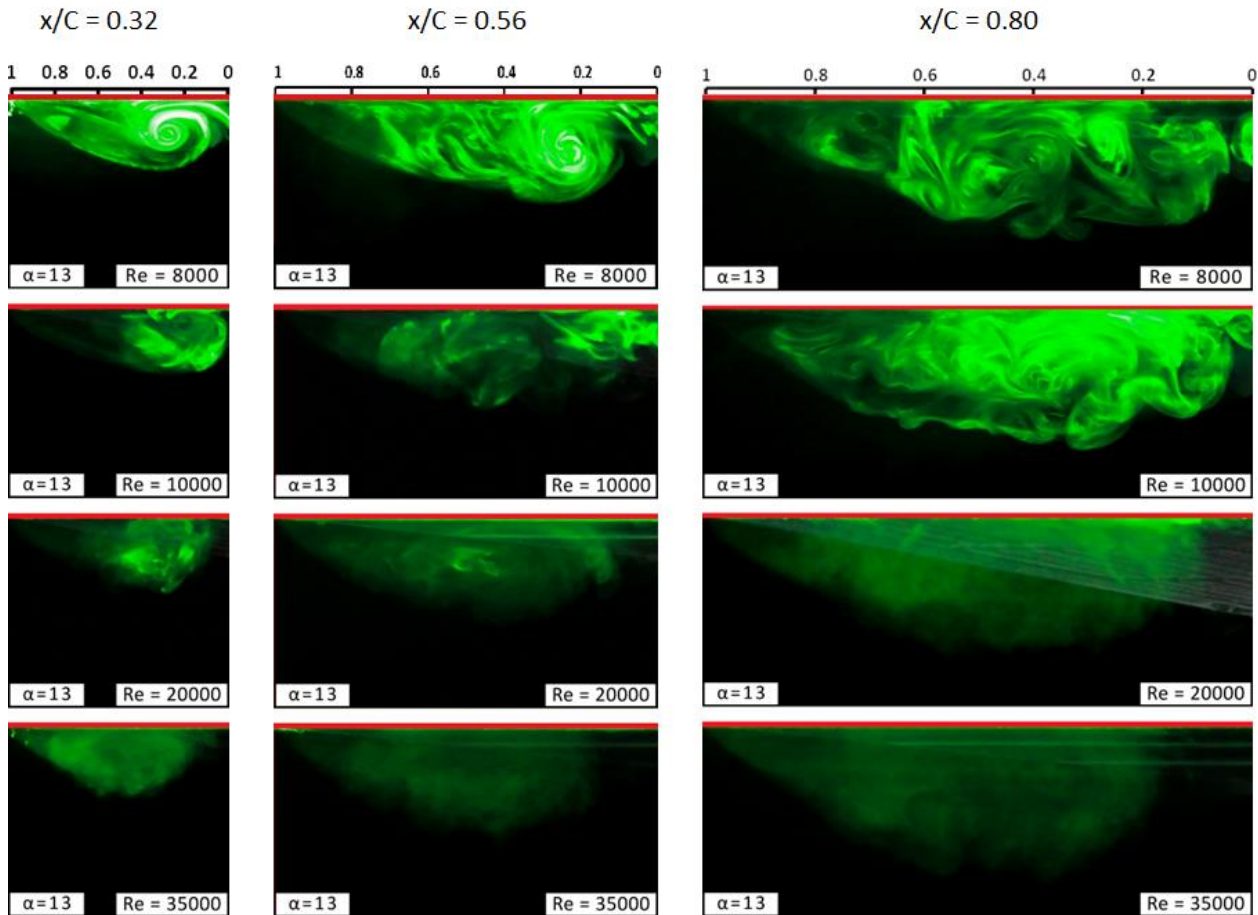
Hücum açısının $\alpha = 7^\circ$ 'ye artırılmasının akış yapısında meydana getirdiği değişiklikler Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilde $Re = 8.000$ durumu incelendiğinde tüm kesitlerde kanat ucu girdabı merkezinin göstergesi olan yoğun duman içeren bölgeler belirgin bir şekilde gözlenebilmektedir. $Re = 10.000$ için verilen akış görüntüleri ele alındığında ise birincil kanat ucu girdabı merkezi ilk iki kesitte belirgin bir şekilde yer alırken üçüncü kesitte girdabın genişlemeye başladığı fakat Şekilde daha yüksek Reynolds sayılarına ait durumlarda gözlemlendiği gibi tamamen akışın içerisinde dağılmadığı görülmektedir. Bu durum $x/C = 0.80$ konumuna ulaşmadan girdapta kırımımının başladığı şeklinde yorumlanabilir. $Re = 20.000$ ve $Re = 35.000$ 'e ait akış görüntüleri incelendiğinde ise hiçbir kesitte kanat ucu girdabı merkezini temsil eden yüksek duman yoğunluğu görülememekte, bunun yerine akış görüntülerinde girdap kırımımına işaret eden etrafa yayılmaya başlamış ya da tamamen akışa yayılmış düşük duman yoğunlukları görülmektedir. Bu sonuçlar kanat ucu girdabının kırımım noktasının $x/C = 0.32$ 'den daha önlere ilerlediğine işaret etmektedir.



Şekil 4: Kanat altındaki akışın, akışa dik $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 konumlarında bulunan düzlemler üzerinde lazer aydınlatmalı duman görüntüleme yöntemi kullanılarak, $\alpha = 7^\circ$ hücum açısında ve farklı Re sayılarında yarım kanat genişliğinde görüntülenmesi.

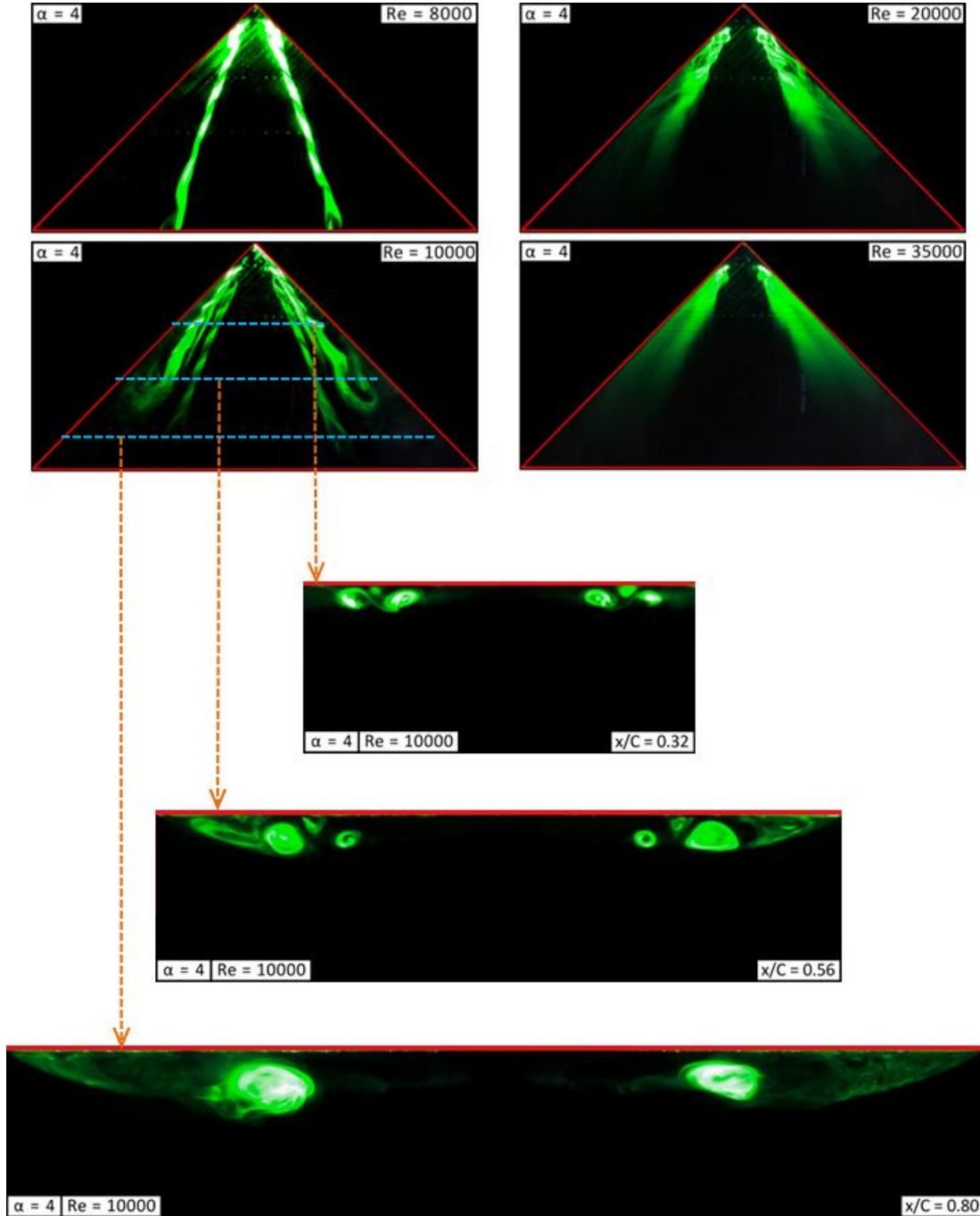
Şekil 3. ve 4. karşılaştırıldığında dikkat çeken önemli bir nokta da $\alpha = 4^\circ$ ve $Re = 10.000$ değerinde karşılaşılan çift sarmal girdap yapısının, mevcut hücum açısı durumunda gerek aynı gerekse de daha yüksek Reynolds sayılarında akışa dik kesitlerde gözlenmemesidir. Bu sonuç karşısında göreceli olarak düşük Reynolds sayılarında hücum açısının akış yapısında önemli değişiklikler ortaya çıkardığı söylenebilir. Buna ek olarak her iki şekildeki göreceli olarak yüksek Reynolds sayısı durumları incelendiğinde, Reynolds sayısındaki artışın girdapta kırınımaya yol açarak girdap kırınım noktasını kanadın ucuna doğru ilerlettiği ve kanat ucu girdaplarını kanadın hücum kenarına doğru kaydıracağı söylenebilir.

Şekil 5 incelendiğinde $\alpha = 13^\circ$ hücum açısında kanat altında oluşan akışın daha önceki hücum açılarında karşılaşılan akış yapılarından farklı olduğu görülebilmektedir. $Re = 8.000$ ve $Re = 10.000$ durumlarına bakıldığında akışta yüzeyden üç boyutlu ayrılmanın meydana geldiği ve yüzeyden ayrılan akışın kanat merkezi civarında tekrar yüzeye bağlandığı görülebilmektedir. Ayrıca bahsedilen Reynolds sayılarında, akışta yüksek duman yoğunluğuna sahip belirgin birincil girdaplar yerine kanat ucundan gelen akışın etkisiyle ortaya çıkmış ufak çaplı dönen yapılar, kanattan ayrılan akış nedeniyle tüm akış alanını kaplayan dumanın içerisine hapsolmüş bir şekilde görülmektedirler. Bu yapıların özellikle $Re = 8.000$ değerindeki ilk iki kesit alanına ait akış görüntülerinde daha belirgin bir şekilde gözüktüğü söylenebilir. $Re = 20.000$ ve $Re = 35.000$ değerlerine ait durumlar incelendiğinde Reynolds sayısı arttıkça artan hız, kanadın hücum kenarından ayrılan akışı güçlendirerek akışta, kanadın uç kısımlarında kırınımaya uğramış birincil girdap yapısına benzer fakat kanat merkezine oldukça yaklaşmış bir akış yapısına geçiş sağlamaktadır.



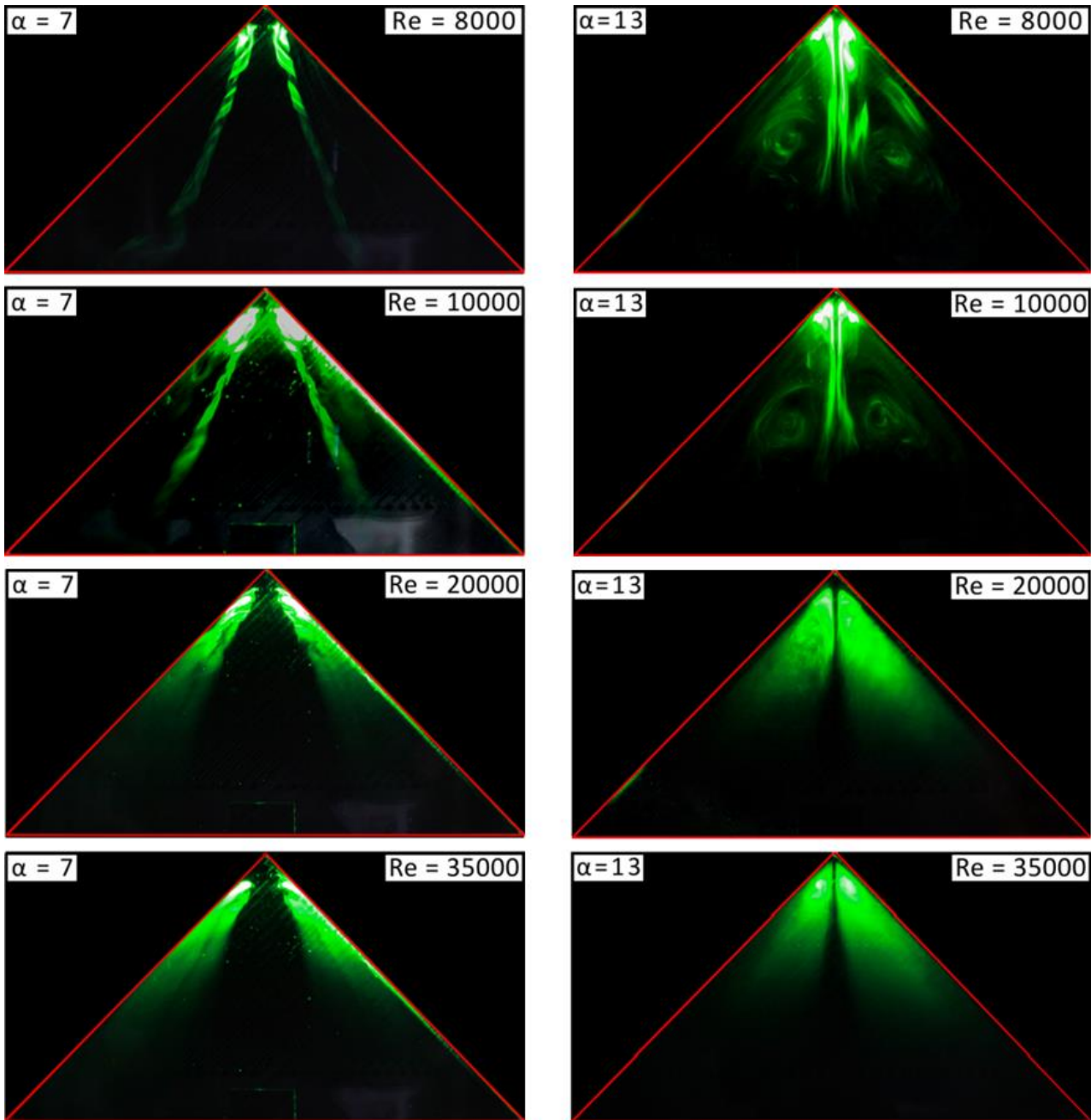
Şekil 5: Kanat altındaki akışın, akışa dik $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 konumlarında bulunan düzlemler üzerinde lazer aydınlatmalı duman görüntüleme yöntemi kullanılarak, $\alpha = 13^\circ$ hücum açısında ve farklı Re sayılarında yarım kanat genişliğinde görüntülenmesi.

$\alpha = 4^\circ, 7^\circ$ ve 10° 'ye ait akışa dik yöndeki görüntüleme sonuçları karşılaştırıldığında, hücum açısını artırmanın girdap yapısını kanadın merkezi yönünde ilerlettiği yönünde bir sonuca varılabilir. Yürütülen çalışma ilgili verilmesi önemli görülen bir bilgi de 3, 4 ve 5 numaralı şekillerde gösterilen durumlara ek olarak $Re = 50.000$ değerinde de akışa dik kesitte görüntüleme deneylerinin yapılmış olması, fakat elde edilen sonuçlar $Re = 35.000$ sonuçlarıyla oldukça benzer olduğundan bildiriye eklenmemesidir. Karşılaşılan bu durum Taylor ve Gursul'un 2004 yılına ait 50° süpürme açılı delta kanatta yaptıkları deneysel çalışmada elde ettikleri, $Re = 30.000$ değerinde kanattaki akışın asimptotik bir hale ulaştığı ve Reynolds sayısını daha çok artırmanın akış yapısında belirgin bir değişim yaratmadığı, sadece girdap merkezi konumunda ufak yer değiştirmeler yaratması sonucuyla oldukça uyumludur.



Şekil 6: Kanat altındaki akışın, $\alpha = 4^\circ$ hücum açısında farklı Re sayılarında girdap eksenine paralel düzlemde ve $Re = 10.000$ 'de $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 konumlarındaki akışa dik düzlemlerde, lazer aydınlatmalı duman görüntüleme yöntemi kullanılarak görüntülenmesi.

Şekil 6 ve 7’de sırasıyla $\alpha = 4^\circ$ ve $\alpha = 7^\circ - 13^\circ$ derece hücum açısındaki kanat altındaki akış yapısı, lazer aydınlatmalı duman görüntüleme yöntemi kullanılarak, girdap eksenine paralel düzlemde farklı Reynolds sayıları için görüntülenmiştir. Şekil 6’da ayrıca girdap eksenine paralel yönde görüntüleme sonuçları ile akışa dik yönde tam kanat görüntüleme sonuçları $Re = 10.000$ değeri için bir arada kullanılarak akış yapısı daha açık bir şekilde gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde akışın simetrik olduğu ve iki farklı eksendeki görüntüleme sonuçlarının birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülebilmektedir. Şekil 6 ele alındığında; aynı hücum açısı ve Reynolds sayısı için daha önceki görüntüleme sonuçlarında bahsedildiği gibi Reynolds sayısı arttıkça birincil kanat ucu girdabı yapısından çift sarmal girdap yapısına geçildiği bu girdaplardan hücum kenarına daha yakın olanın diğerinden daha önce kırınıma uğradığı, Reynolds sayısında devam eden artış sonucunda da tekrar birincil girdap yapısına dönüş ve girdap kırınım noktasının kanat ucuna doğru ilerlemesi görülmektedir.

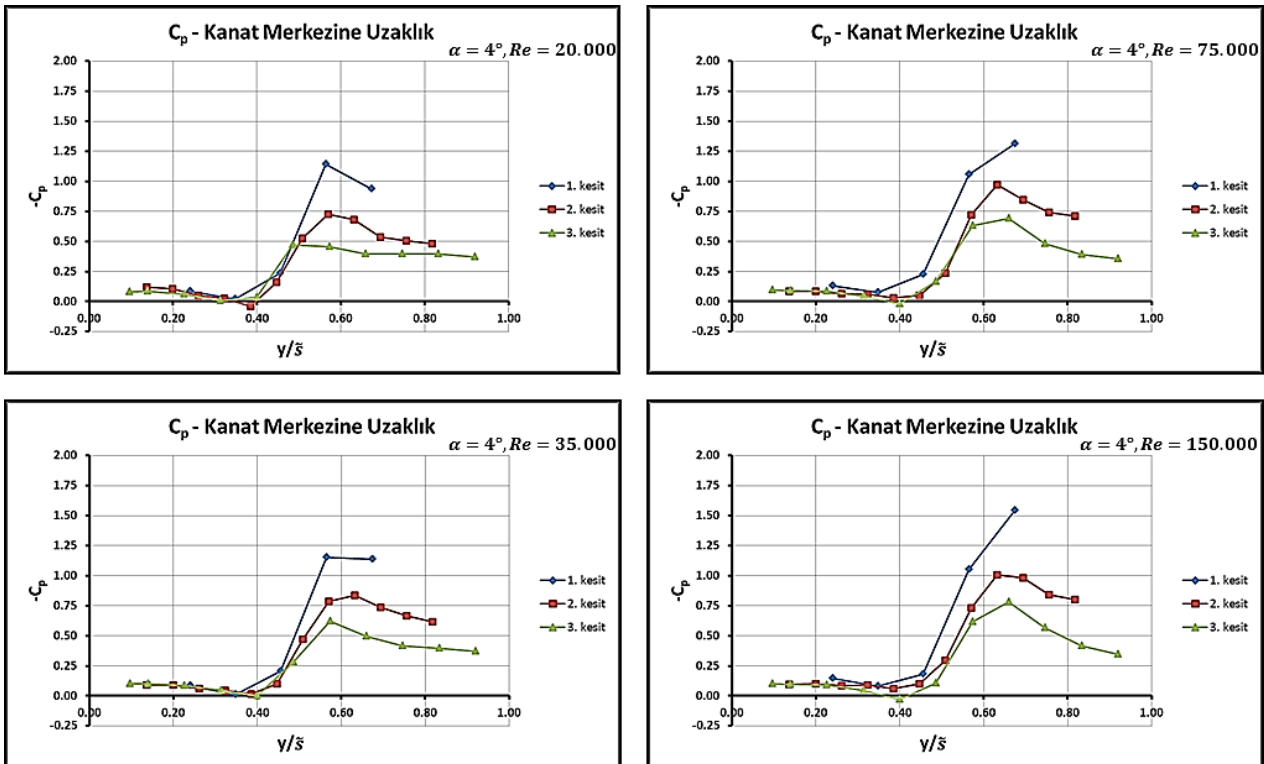


Şekil 7: Kanat altındaki akışın, $\alpha = 7^\circ$ ve $\alpha = 13^\circ$ hücum açıları ve farklı Re sayılarında girdap eksenine paralel düzlemde lazer aydınlatmalı duman görüntüleme yöntemi kullanılarak görüntülenmesi.

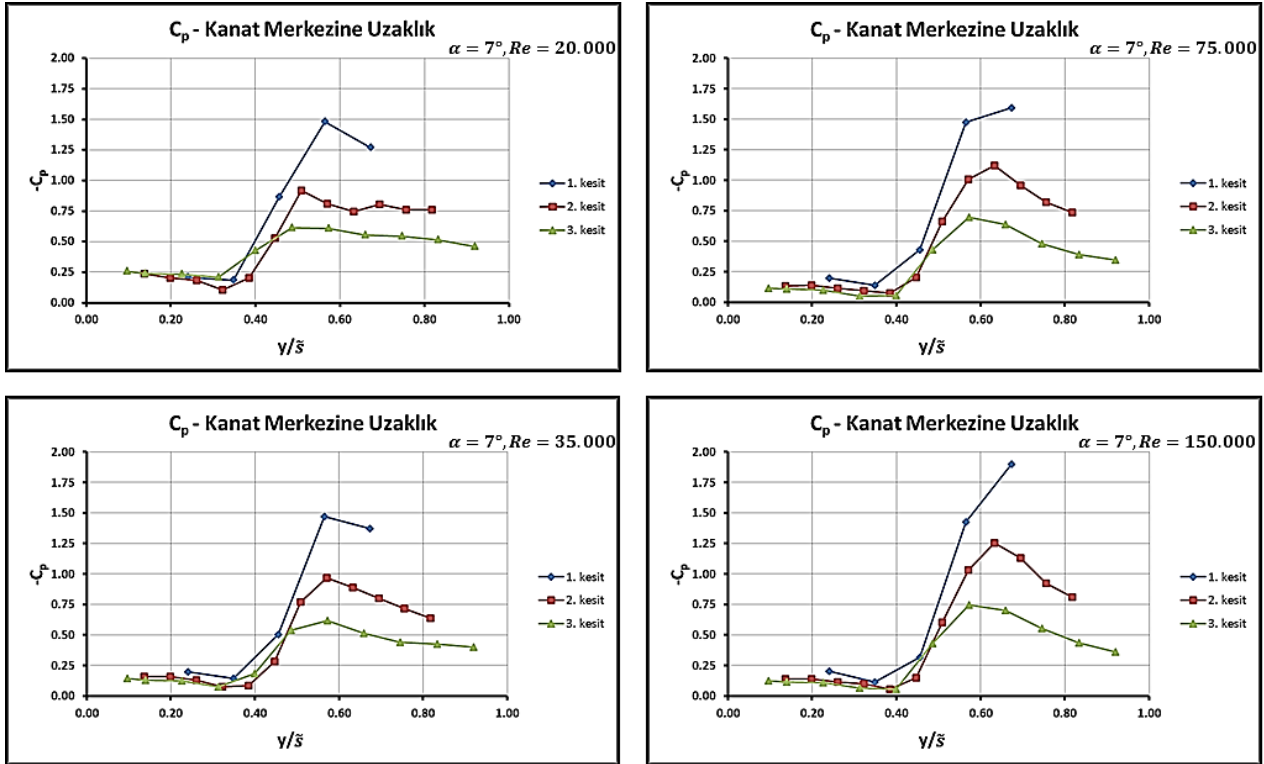
Şekil 7'de $\alpha = 7^\circ$ hücum açısındaki görüntüleme sonuçları incelendiğinde akış yapısının $\alpha = 4^\circ$ hücum açısındaki yapı ile benzerlik gösterip burada da $Re = 10.000$ mertebesinde çift sarmal girdap yapısının görülmekte olduğu fakat önceki durumla karşılaştırıldığında hücum kenarına yakın olan girdabın kapladığı alanın daha dar ve kırınım noktasının da çok daha yukarıda, kanadın ucuna yakın bir konumda olduğu görülmektedir. Akışa dik konumdaki düzlemlerde yapılan görüntüleme sonuçlarında çift sarmal girdap yapısına ait belirgin bir iz bulunmamasının nedeni olarak kırınım noktasının kanat ucuna yakınlığı ve ilk görüntüleme düzleminin ise $x/C = 0.32$ konumunda olması gösterilebilir. Yine hücum açısında da artan Reynolds sayısı çift sarmal girdap yapısından birincil kanat ucu girdabı yapısına geçişe neden olup girdap kırınım noktasını kanat ucuna doğru ilerletmektedir.

Şekil 7'de $\alpha = 13^\circ$ hücum açısına ait görüntüleme sonuçları ele alındığında akış yapısının düşük ve görece yüksek Reynolds sayılarında ne kadar farklı olduğu belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Düşük Reynolds sayılarında yüzeyden ayrılan akış kanadın altını kaplayarak kanadın her iki tarafında birbirine göre ters yönde dönen düzensiz yapılar oluşturmaktadır. Reynolds sayısı arttıkça bahsedilen yapının kanat altında kapladığı alan azalmakta ve kanat ucuna doğru hareket etmektedir. Reynolds sayısı daha da artarak $Re = 20.000$ veya daha yukarısına ulaştığında akıştaki hızlanma yüzeyden ayrılan kayma tabakasını güçlendirerek, girdap kırınım noktası kanat ucuna kadar ilerlemiş birincil kanat ucu girdabı yapısına benzeyen fakat akışta daha geniş bir alan kaplayan bir yapının ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

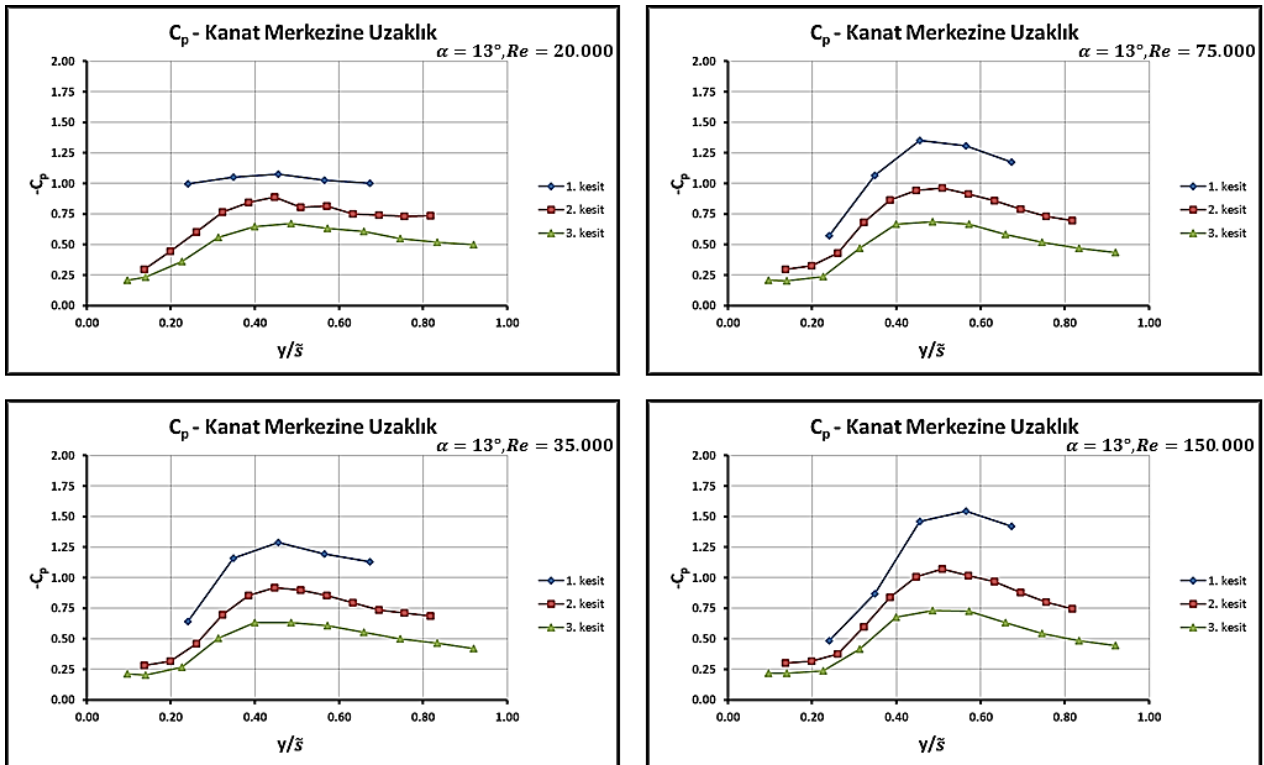
Kanat yüzeyinde $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 konumlarında bulunan üç farklı istasyonda kümelenmiş basınç ölçüm deliklerinden ölçülen basınç değerleri Şekil 8, 19 ve 10'da sırasıyla 4, 7 ve 13 derecelik hücum açıları için $-C_p$ dağılımı şeklinde kanat merkezine olan uzaklığa bağlı olarak farklı Reynolds sayılarında gösterilmiştir. Şekillerde akışın simetrik olmasından faydalanılarak yarım kanat sonuçları gösterilmektedir. Grafiklerdeki en yüksek $-C_p$ noktaları kanat yüzeyinde en yüksek emmenin gerçekleştiği yerleri göstermekte ve bu konumlar girdap merkezi ekseninin nereden geçtiği hakkında bilgi vermektedir. Benzer şekilde $-C_p$ değerlerinin 0 civarı değerler aldığı noktalarda akışın kuvvetli bir şekilde yeniden yüzeye bağlandığı kabul edilebilir.



Şekil 8: Kanat veteri boyunca $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 konumlarında sıralanmış üç farklı istasyondaki basınç ölçüm deliklerinden $\alpha = 4^\circ$ hücum açısında ve farklı Re sayılarında elde edilen kanat yüzeyi birimsiz basınç katsayısı dağılımı.

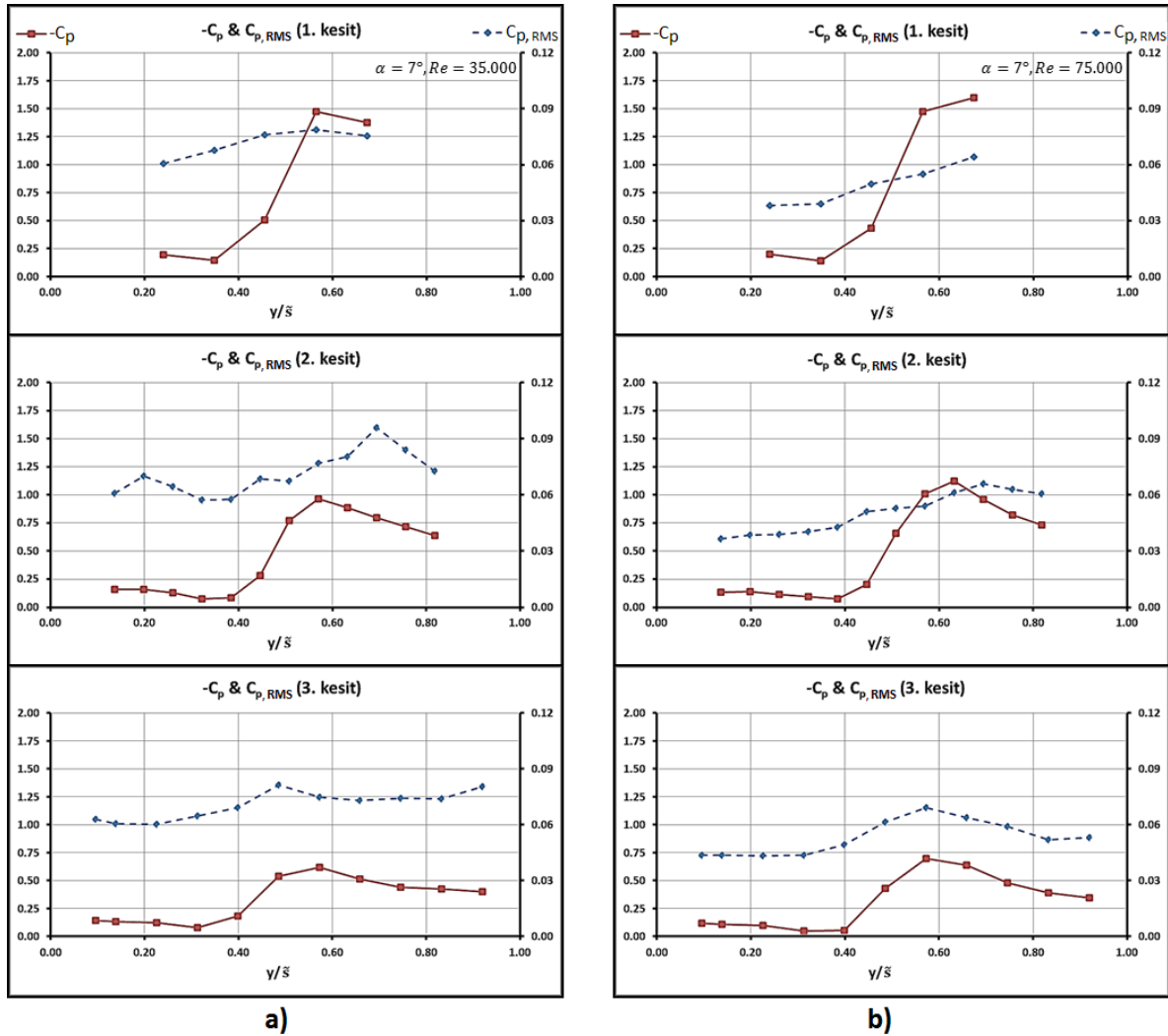


Şekil 9: Kanat veteri boyunca $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 konumlarında sıralanmış üç farklı istasyondaki basınç ölçüm deliklerinden $\alpha = 7^\circ$ hücum açısında ve farklı Re sayılarında elde edilen kanat yüzeyi birimsiz basınç katsayısı dağılımı.

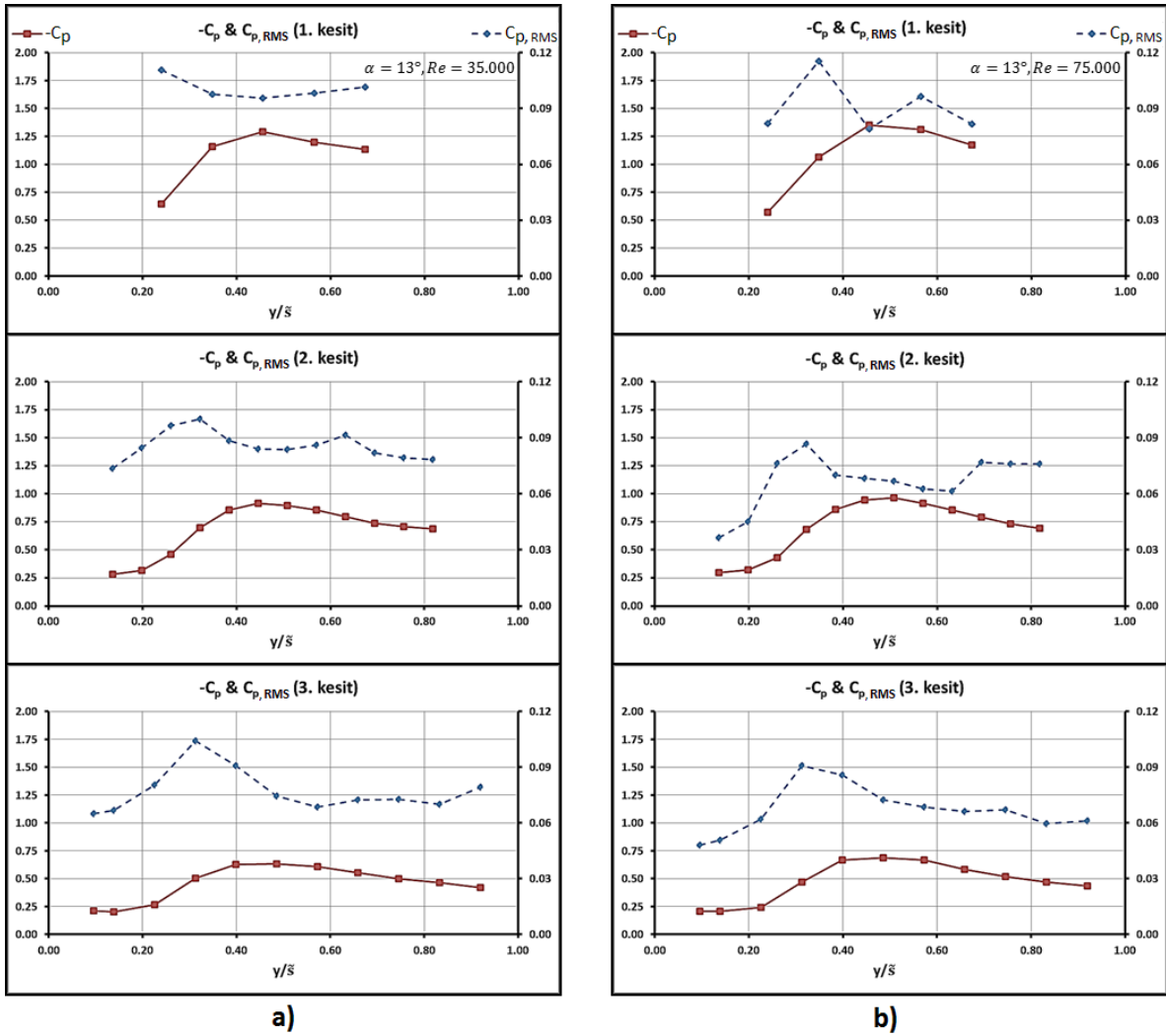


Şekil 10: Kanat veteri boyunca $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 konumlarında sıralanmış üç farklı istasyondaki basınç ölçüm deliklerinden $\alpha = 13^\circ$ hücum açısında ve farklı Re sayılarında elde edilen kanat yüzeyi birimsiz basınç katsayısı dağılımı.

Şekil 8, 9 ve 10'daki grafikler incelendiğinde en yüksek emmenin görüldüğü konumlar ile 3, 4 ve 5. şekillerde verilen akış görüntüleme sonuçlarında girdap ekseninin geçtiği konumların birbiriyle uyum içinde olduğu görülebilmektedir. Basınç dağılımı grafiklerinden çıkarılabilecek ortak sonuç, kanadın önünden arkasına doğru ilerledikçe girdabın gücündeki azalma ve kanadın arka kısımlarındaki olası girdap kırınımları nedeniyle emmede azalma oluşmasıdır. Bununla birlikte Reynolds sayısının artırılması, akışı hızlandırarak emmede artışa yol açmaktadır. $\alpha = 13^\circ$ 'lik hücum açısında ve $Re = 20.000$ mertebesinde görülen basınç dağılımı, daha düşük hücum açılarında karşılaşılan birincil girdap yapısına ait basınç dağılımından oldukça farklılık göstermektedir. Hem maksimum emme değerleri diğer durumlardan oldukça düşük kalarak girdap merkezinin göstergesi olan yüksek emme noktaları içermemekte, hem de özellikle 1. kesitte akışın yüzeye yeniden bağlanmasına ait bir işaret bulunmamaktadır. 13° hücum açısında daha önce akış görüntüleme kısmında da bahsedilen yüzeyden üç boyutlu akış ayrılmaları nedeniyle düşük Reynolds sayılarında kanat yüzeyinde geniş bir alana yayılmış bir basınç dağılımı ve özellikle uç kısımlardaki emmede önemli ölçüde azalma görülmekteyken, Reynolds sayısının artmasıyla kanatta emme miktarı artmakta ve elde edilen basınç dağılımı daha düşük hücum açılarında ait durumlarda görülen ve girdap merkezinin göstergesi olan yüksek emme noktalarını içeren daha genel bir basınç dağılımına dönüşmektedir. Basınç dağılımı grafiklerinden çıkarılabilecek önemli bir sonuç da incelenen tüm hücum açılarında göreceli olarak yüksek Reynolds sayılarına çıkıldığında kanat altındaki akış yapısında artık önemli bir değişimin gözlenmemesi, yani akışın asimptotik bir yapıya ulaşmasıdır. Böyle bir durumda Reynolds sayısını daha da artırmak sadece akış yapısını biraz daha güçlendirmekte, bu da emmede bir artışa neden olmaktadır.



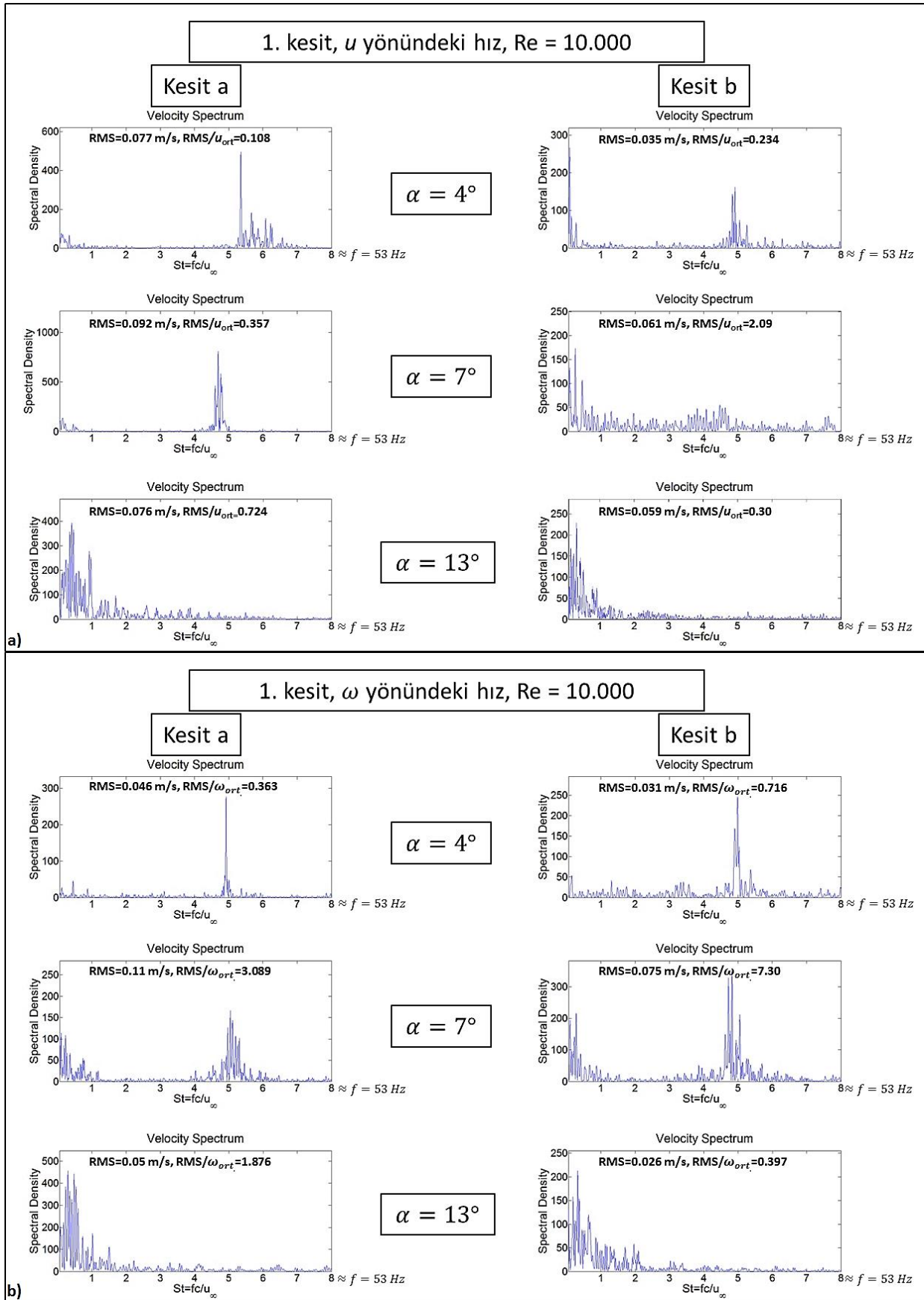
Şekil 11: Kanat veteri boyunca yüzeyde sırasıyla $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 konumlarında sıralanmış basınç ölçüm istasyonlarından $\alpha = 7^\circ$ hücum açısında elde edilen birimsiz basınç katsayısı değerleri ve bu değerlere ait birimsiz çalkantı miktarları. a) $Re = 35.000$, b) $Re = 75.000$ değerindeki ölçüm sonuçları.



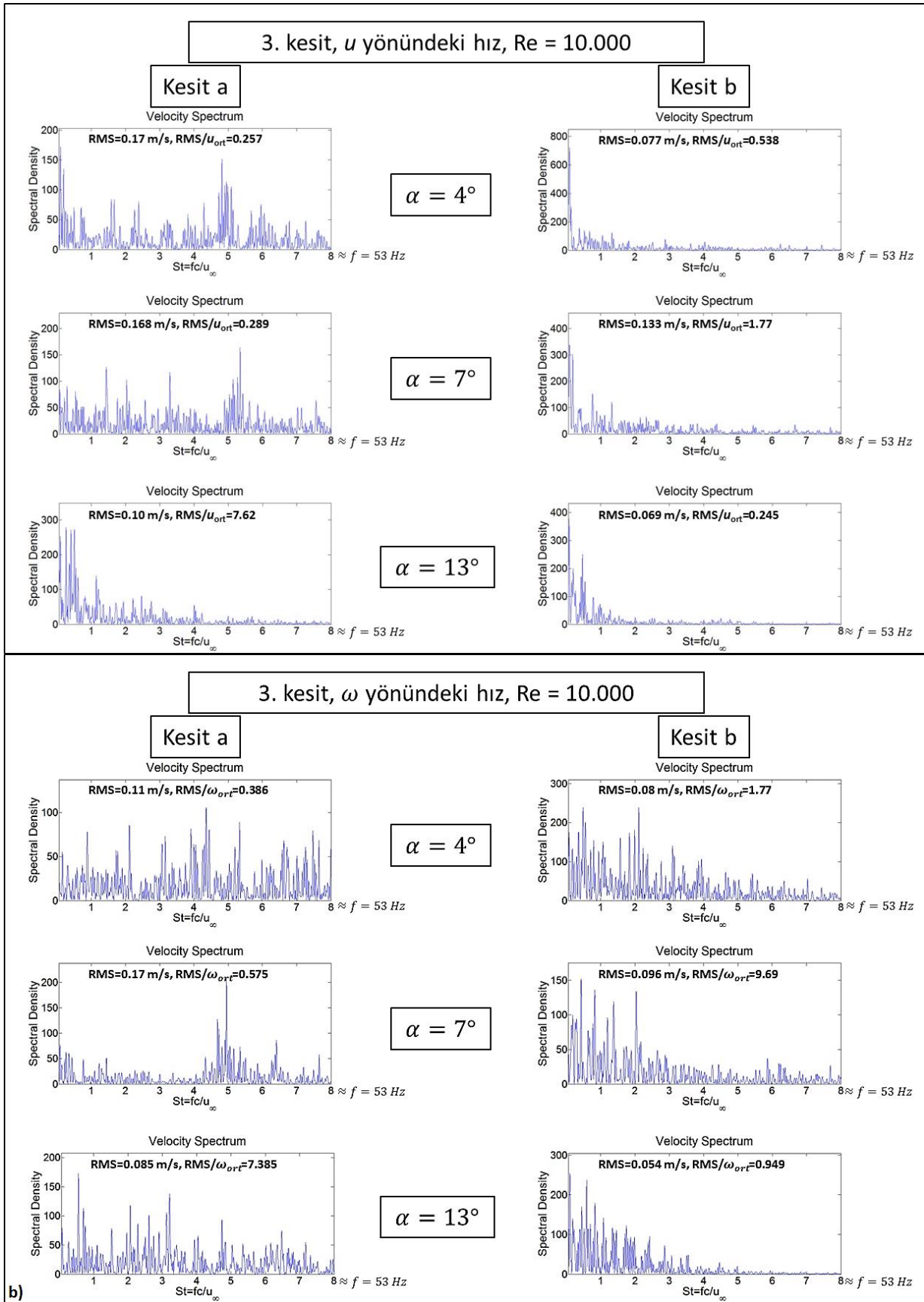
Şekil 12: Kanat veteri boyunca yüzeyde sırasıyla $x/C = 0.32, 0.56$ ve 0.80 konumlarında sıralanmış basınç ölçüm istasyonlarından $\alpha = 13^\circ$ hücum açısında elde edilen birimsiz basınç katsayısı değerleri ve bu değerlere ait birimsiz çalkantı miktarları. a) $Re = 35.000$, b) $Re = 75.000$ değerindeki ölçüm sonuçları.

11 ve 12 numaralı şekillerde, daha önceki şekillerde gösterilen $-C_p$ değerlerinden hesaplanan ve basınçtaki çalkantı miktarına ışık tutan $C_{p,RMS}$ değerleri sırasıyla $\alpha = 7^\circ$ ve $\alpha = 13^\circ$ hücum açıları için kanat üzerindeki her üç kesitte gösterilmiştir. Şekillerde yer alan grafiklerden sol sütunda sıralananlar $Re = 35.000$ değerindeki ölçüm sonuçlarını, sağ sütundakiler de $Re = 75.000$ değerindeki ölçüm sonuçlarını temsil etmektedir. Yapılan çalışmada $\alpha = 4^\circ$ ve $\alpha = 7^\circ$ hücum açılarına ait çalkantı yapılarının birbiriyle oldukça benzer olduğu görüldüğünden sadece $\alpha = 7^\circ$ 'ye ait sonuçlar bildiride verilmiştir. Şekil 12 incelendiğinde $\alpha = 7^\circ$ hücum açısında kanat yüzeyinde tüm kesitlerdeki birimsiz basınç katsayısı dağılımında en yüksek çalkantı miktarının, girdap merkezi ekseninin geçtiği bölgeyi temsil ettiği düşünülen en yüksek $-C_p$ değerinin ölçüldüğü konumlarda veya bu konumların çok yakınlarında olduğu görülebilir. Dolayısıyla $\alpha = 4^\circ$ ve $\alpha = 7^\circ$ gibi belirgin kanat ucu girdabının tespit edildiği durumlarda en yüksek $C_{p,RMS}$ değerlerinin girdap merkezinin geçtiği konumlar civarında ölçüldüğü söylenebilir.

Şekil 12 incelendiğinde, $\alpha = 13^\circ$ 'lik hücum açısına çıkıldığında kanat yüzeyindeki basınç dağılımına ait çalkantı miktarının daha düşük hücum açısındaki durumlara göre artış gösterdiği görülmektedir. Buna ek olarak en yüksek çalkantıyı gösteren nokta, her kesitte girdap çekirdeğinin eksenini veya yakınları yerine, girdap merkezi ve akışın yüzeye yeniden bağlandığı konum olarak düşünülen en düşük $-C_p$ değerine sahip konum arasında bir konumda yer almaktadır. Ayrıca tüm hücum açılarına ait durumlar incelendiğinde en düşük çalkantı değerlerinin genellikle kanat merkezi ile en düşük $-C_p$ değerlerinin ölçüldüğü konumlar arasında görüldüğü söylenebilir.



Şekil 13: LDA kullanılarak $Re = 10.000$ değerinde farklı hücum açılarında $x/C = 0.32$ 'de konumlu ölçüm noktalarından yapılan hız ve çalkantı yoğunluğu sonuçları ve ilgili hız ölçümlerinden hesaplanan spektral güç yoğunluğu analizlerinin boyutsuz Strouhal numarasının fonksiyonu olacak şekilde gösterimi. a) hızın u bileşenine ait sonuçlar, b) hızın ω bileşenine ait sonuçlar.



Şekil 14: LDA kullanılarak $Re = 10.000$ değerinde farklı hücum açılarındaki $x/C = 0.80$ 'de konumlu ölçüm noktalarından yapılan hız ve çalkantı yoğunluğu sonuçları ve ilgili hız ölçümlerinden hesaplanan spektral güç yoğunluğu analizlerinin boyutsuz Strouhal numarasının fonksiyonu olacak şekilde gösterimi. a) hızın u bileşenine ait sonuçlar, b) hızın ω bileşenine ait sonuçlar.

13 ve 14 numaralı şekillerde LDA kullanılarak $Re = 10.000$ değerinde kanat yüzeyine 5 mm yakınlıkta konumlandırılmış yüzeye paralel bir düzlem üzerindeki ölçüm noktalarından farklı hücum açılarında alınan hız, çalkantı (RMS), çalkantı yoğunluğu (RMS/ortalama hız) sonuçları ve ilgili hız ölçümlerinden hesaplanan spektral güç yoğunluğu analizlerinin boyutsuz frekans Strouhal sayısına göre değişimi gösterilmiştir. Ölçüm noktaları $x/C = 0.32$ ve 0.80 konumlarında yer alan 1 ve 3 numaralı kesitler üzerinde $y/\bar{s} = 0.33$ konumunda yer alan a_1 ve a_3 noktaları ve $y/\bar{s} = 0.66$ konumunda yer alan b_1 ve b_3 noktalarıdır. Şekillerin üst kısmında u yönündeki hız bileşenine ait sonuçlar verilirken alt kısımda da ω yönündeki hız bileşenine ait sonuçlar verilmiştir.

Şekil 13'deki spektral analiz sonuçlarından 4 ve 7 derece hücum açısına ait sonuçlara bakıldığında birinci kesit üzerinde bulunan a ve b noktasına ait ölçümlerin iki farklı hız bileşeninde de $St = 5$ civarındaki baskın frekanslar spektrumda belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Fakat kanadın b noktasında 7 derecelik hücum açısında ve u yönündeki hız bileşeninde elde edilen spektrumda $St = 5$ civarında ölçülen boyutsuz frekansız spektral yoğunluğunda önemli bir azalma gözlenmemektedir. Aynı şekilde 13 derecelik hücum açısına ait spektral analiz sonuçları incelendiğinde hem a hem de b noktasında alınan ölçümlerde elde edilen baskın frekansların $St = 0 - 1$ arasında kümelenmiş olduğu ve $St = 5$ civarında herhangi bir baskın frekans izine rastlanmadığı görülebilmektedir.

Şekil 14'de kanat üzerindeki 3. kesitte alınan spektral yoğunluk sonuçları gösterilmiştir. 4 ve 7 derecelik hücum açılarındaki sonuçlar incelendiğinde 1. kesitte karşılaşılan $St = 5$ civarındaki baskın frekans her iki hız bileşeninde de a noktasına ait ölçümlerde etkisini korumaya devam etmekte fakat b noktasına ait spektrumda herhangi bir izle sahip olmamaktadır. b noktasına ait spektrumlara bakıldığında 4, 7 ve 13 derece hücum açısındaki spektrumlardan u yönündeki hız bileşenine ait olanlar birbirine oldukça benzeyip $St = 0 - 1$ arasında kümelenmiş baskın frekanslara sahipken ω yönündeki hız bileşenine sahip olanlar da kendi arasında benzerlik göstermekte fakat $St = 0 - 2$ arasında kümelenmiş baskın frekanslar bulundurmaktadır. Benzer şekilde 13 derece hücum açısında a konumunda yapılan ölçümlerden u yönündeki hız bileşenine ait olanlarda baskın frekanslar $St = 0 - 1$ arasında kümelenmişken ω yönündeki hız bileşenine ait olanlarda da $St = 0 - 1$ arasında en yüksek yoğunluğa sahip baskın frekans görülmesine rağmen daha az yoğunluktaki baskın frekanslar spektrumun geneline yayılmış bir halde gözlenmektedir.

13 ve 14. şekillerdeki spektral analizler ile 3 ve 4. şekillerdeki akışa dik düzlemdeki akış görüntüleme sonuçları beraber incelendiğinde $\alpha = 4^\circ$ ve $\alpha = 7^\circ$ hücum açılarındaki $Re = 10.000$ değerinde karşılaşılan kuvvetli kanat ucu girdabının kanat altında geçtiği yerler ve hemen yakınındaki konumlarda $St = 5$ civarında bir baskın frekansın ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Aynı hücum açısı ve Reynolds sayısı durumunda kanattaki 3. kesitten alınan ölçümlerden b noktasına ait olanlarda bu baskın frekansın görülmemesinin nedeni olarak girdabın gücünde azalma olması ve ölçüm noktaları arasındaki mesafenin artması nedeniyle girdabın sadece kendisine en yakın ölçüm noktasındaki ölçümler üzerinde etkisini göstermesi olduğu söylenebilir. Daha yüksek hücum açılarındaki $St = 5$ civarında bir baskın frekansın görülmemesi de o koşullar altında kuvvetli kanat ucu girdabı yerine yüzeyden üç boyutlu akış ayrılımlarının görülmesi ve bu yapıların da daha düşük boyutsuz frekansta baskın frekanslar göstermesi şeklinde açıklanabilir.

Şekil 13 ve 14'deki hız ölçüm sonuçları incelendiğinde kanadın merkez eksenine yakın konumda alınan hız ölçümlerindeki çalkantı değerleri, tüm hücum açıları ve hızın her iki bileşeni göz önüne alındığında her seferinde diğer ölçüm noktasında ölçülen değerlerden daha yüksek çıkmaktadır. Bu sonuçlar ışığında $\alpha = 4^\circ$ ve 7° hücum açılarındaki en yüksek çalkantı değerlerinin girdap eksenine yakın olan konumda ölçüldüğü, yüzeyden üç boyutlu akış ayrılımlarının yaşandığı $\alpha = 13^\circ$ hücum açısı ve düşük Reynolds sayısı durumunda ise en yüksek çalkantı değerlerinin akışın yüzeye yeniden bağlandığı bölgeye yakın olan konumda ölçüldüğü söylenebilir. Bu sonuç da basınç ve hız çalkantısı sonuçlarının birbiriyle uyumlu sonuçlar vermesi şeklinde yorumlanabilir. Bu bağlamda hız ve basınçtaki çalkantıların daha nicel bir şekilde karşılaştırılabilmesi için hız ölçümü yapılan nokta sayısının da basınç ölçümü yapılan noktalarla eşit sayıya çıkarılması ve ölçüm konumlarının da aynı noktalara tekabül etmesi gerektiği vurgulanmalıdır.

Hız ölçümleri üzerine yapılan spektral analizler basınç ölçümleri için de yapılmış olup üzerinde çalışılmaya devam edilmektedir. Elde edilen ön sonuçlarda belli bir baskın bir frekansın varlığı

tespit edilememiş, bunun yerine geniş bir spektruma yayılmış bir frekans dağılımı ile karşılaşılmıştır.

Yürütülen çalışmada kanat yüzeyine yakın düzlemede yapılan hız ölçümlerinden farklı olarak kanat ucu girdabının akışta belirgin bir şekilde yer aldığı $\alpha = 4^\circ$ ve $\alpha = 7^\circ$ hücum açılarında ve $Re = 10.000$ Reynolds sayısında, girdabının merkezinde LDA ile hızın her iki yöndeki bileşeninde de hız ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde hücum açısı ya da konum ile değişen baskın bir yapı gözlenememiştir. Bu ölçümlerden elde edilen diğer bir sonuç da girdap merkezinde ölçülen en yüksek hızın $\alpha = 4^\circ$ hücum açısı durumunda, test bölgesindeki serbest akış hızının 1.77 katı büyüklüğünde bir eksenel hızda olması ve girdap gücünün diğer kesitlere göre daha fazla olduğu konum olan 1. kesitte ölçülmesidir.

SONUÇ

Yürütülen çalışma sonucunda hücum açısını artırmanın girdap yapısını kanadın simetri eksenine yaklaştırdığı fakat Reynolds sayısını artırmanın tam tersi bir etkiye neden olarak girdap yapısını kanadın merkezinden uzaklaştırdığı ve girdap kırınım noktasını kanat ucuna doğru ilerlettiği görülmüştür. Bunlara ek olarak, Reynolds sayısının akıştaki etkisi incelendiğinde düşük Reynolds sayılarının akış yapısını önemli derecede değiştirebildiği fakat yüksek Reynolds sayılarında akışa olan etkinin oldukça sınırlı olduğu ve akışın asimptotik bir hal aldığı tespit edilmiştir. Basınç ölçüm sonuçları ile akış görüntüleme sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların birbirleri ile oldukça iyi örtüştüğü ve en düşük basınç, dolayısıyla en yüksek emmenin girdap ekseninin geçtiği konumlarda ölçüldüğü görülmüştür. Basınçtaki en yüksek çalkantıların yüzeyden üç boyutlu akış kopmalarının yaşanmadığı durumlarda girdap eksenleri etrafında ölçüldüğü, diğer durumlarda da akışın yüzeye yeniden bağlandığı nokta ile girdap eksenleri arasındaki noktalarda ölçüldüğü tespit edilmiştir. Akıştaki belirli noktalarda yapılan hız ölçümleri sonucunda hızdaki çalkantıların da basınçtaki çalkantılar ile uyumlu bir yapıda olduğu görülmüştür. Hız ölçümlerine uygulanan spektral analiz yöntemleri kanat ucu girdabının etkisindeki bölgelerdeki akıştaki her iki hız bileşeninde de boyutsuz frekans $St = 5$ civarında baskın bir frekans ortaya çıkarmıştır.

KAYNAKLAR

- Honkan, A. ve Andreopoulos, J., 1997, "Instantaneous Three-Dimensional Vorticity Measurements in Vortical Flow over a Delta Wing," AIAA Journal, Vol. 35, No. 10, October, pp. 1612-1620.
- Gordnier, R. E. ve Visbal, M. R., 2005, "Compact Difference Scheme Applied to the Simulation of a Low Sweep Delta Wing Flow " AIAA Journal, Vol. 43, No. 8, pp. 1744-1752.
- Gursul, I., Gordnier, R. ve Visbal, M., 2005, "Unsteady Aerodynamics of Non slender Delta Wings", Progress in Aerospace Sciences 41, pp. 515-557.
- OI, M. V. ve Gharib, M., 2001, "The Passage Towards Stall of Non slender Delta Wings at Low Reynolds Number", AIAA Paper 2001-2843, June.
- OI, M. V. ve Gharib, M., 2003, "Leading-Edge Vortex Structure of Non slender Delta Wings at Low Reynolds Number", AIAA Journal, Vol. 41, No. 1, pp. 16-26.
- Öztürk, İ., Çelik, A., Tunç, H. C. ve Yavuz, M. M., 2012, "Orta Süpürme Açısına Sahip Delta Kanat Üzerindeki Akış Yapısının Kalkış Manevrası Sırasında Değişimi", UHUK-2012-109, 12 – 14 Eylül, Hava Harp Okulu, İstanbul.
- Sahin, B., Yayla, S., Canpolat, C., ve Akilli, H., 2012, "Flow Structure over the Yawed Non slender Diamond Wing", Aerospace Science and Technology, Vol. 23, No. 1, Pp. 108-119.
- Taylor, G. S., Schnorbus, T. Ve Gursul, I., 2003, "An Investigation of Vortex Flows over Low Sweep Delta Wings", AIAA-2003-4021, AIAA Fluid Dynamics Conference, 26-26 June, Orlando, FL.
- Taylor, G. S. ve Gursul, I., 2004, "Buffeting Flows over a Low-Sweep Delta Wing", AIAA Journal, Vol. 42, No. 9, pp. 1737-1745.

- Werle, H., “*Quelques résultats expérimentaux sur les ailes en flèches, aux faibles vitesses, obtenus en tunnel hydrodynamique*”, Rech. Aeronautique 41, 23 1954.
- Williams, N. M., 2009, “*Active Flow control on a Non slender Delta Wing*”, Doctor of Philosophy Thesis, Department of Mechanical Engineering University of Bath, UK, March.
- Wang, J. J., Zhang, W., 2008, “*Experimental Investigations on Leading-Edge Vortex Structures for Flow Over Non-Slender Delta Wings*”, Chin. Phys. Lett., Vol. 25, No:7.
- Yaniktepe, B., Rockwell, D., 2004, “*Flow structure on a delta wing of low sweep angle*”, AIAA J, 42(3):513–23.
- Yavuz, M. M., “*Origin and Control of the Flow Structure and Topology on Delta Wings*”, The Department of Mechanical Engineering and Mechanics, Lehigh University, U.S.A., January 2006.
- Yayla, S., Canpolat, C., Sahin, B., ve Akilli, H., 2010, “*Yaw Angle Effect on Flow Structure over the Non slender Diamond Wing*”, AIAA J, Vol. 48, No. 10, October 2010.
- Yayla, S., Canpolat, C., Sahin, B., ve Akilli, H., 2013, “*The Effect of Angle of Attack on the Flow Structure over the Non slender Lambda Wing*”, Aerospace Science and Technology, Vol. 28 No. 1, Pp. 417-430.