



ELMAS KANAT MODELİNDE OLUŞAN GİRDAP ÇÖKMESİNE SAPMA AÇISININ ETKİSİ

Sedat YAYLA, Çetin CANPOLAT, Beşir ŞAHİN, Hüseyin AKILLI
Çukurova Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Telefon: (322) 338 6084/2722, Fax: (322) 338 61 26 e-mail: sedatyayla@cu.edu.tr

(Geliş Tarihi: 27. 04. 2009, Kabul Tarihi: 04. 09. 2009)

Özet: Bu çalışmada, düşük süpürme açısına sahip elmas kanadın yüzeyine yakın bölgede akış yapısına etki eden parametreler boya görüntüleme ve 3-Boyutlu Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) yöntemleriyle detaylı olarak incelenmiştir. Akış yapısı ve girdap çökmesi oluşumu, sapma açısı $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ aralığında değiştirilerek hücum açısının $\alpha=7^\circ$ ve Reynolds sayısının 10 000 değeri için incelenmiştir. Elmas kanada $\alpha=7^\circ$ hücum açısı verildiğinde; kanadın ucundan itibaren oluşan sarmal girdap çiftinin merkezi eksenlerinde belirli bir mesafeden sonra durma noktası oluşmakta ve girdap çökmeleri meydana gelmektedir. Sapma açısı arttıkça sarmal girdaplardan birinin çökme noktası ön uca doğru yaklaşırken diğeri kanadın arka kısmına doğru gerilemektedir.
Anahtar Kelimeler: Elmas Kanat, PIV, Reynolds Gerilmeleri, Türbülans İstatistikleri.

EFFECT OF YAW ANGLE ON THE FORMATION OF VORTEX BREAKDOWN OVER THE DIAMOND WING

Abstract: In this study, the flow structure close to the surface of the non slender diamond wing was investigated both qualitatively and quantitatively using dye visualization and the 3-D Particle Image Velocimetry (PIV) technique. The flow structure and formation of the vortex breakdown were studied by varying the yaw angle of the wing within the range of $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ for the angle of attack of $\alpha=7^\circ$ and Reynolds number of 10 000. After a certain distance from the wing apex, a stagnation points and onset of vortex breakdowns took places on the central axes of spiral vortices that occurred over the wing surface for the angle of attack of $\alpha=7^\circ$. When the yaw angle was increased the locations of vortex breakdowns approached to the wing apex, but, the other one moves towards the trailing edge.

Keywords: Diamond Wing, PIV, Reynolds Stress, Turbulent Statistics.

SEMBOLLER

Re	Reynolds sayısı [$=V\rho D/\mu$]
α	hücum açısı [derece, °]
θ	sapma açısı [derece, °]
Λ	süpürme açısı [derece, °]
U	serbest akış hızı [mm/s]
$L_{\text{ç}}$	girdap çökme noktasının kanat ucuna olan mesafesi [mm]
$\langle V \rangle$	zaman ortalama hız vektörü [mm/s]
$\langle \Psi \rangle$	zaman ortalama akım çizgisi [mm ²]
C	veter uzunluğu [mm]
$\langle \omega \rangle$	Zaman ortalama girdap eşdeğer eğrileri [s ⁻¹]
x/C	Boyutsuz veter uzunluğu
$\langle u_{\text{rms}} \rangle$	serbest akış yönündeki hız bileşeninin karesinin karekök ortalaması [mm/s]
$\langle v_{\text{rms}} \rangle$	aynı düzlem içerisinde serbest akışa dik yöndeki hız bileşeninin karesinin karekök ortalaması [mm/s]
$\langle u'v' \rangle$	Reynolds gerilmeleri eşdeğer eğrileri [mm ² /s ²]

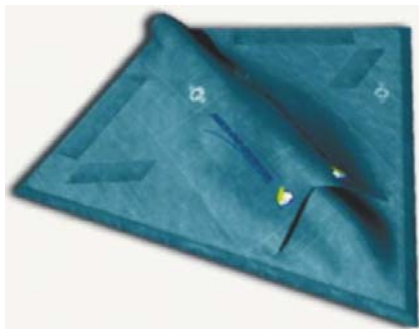
GİRİŞ

Yüksek performansından ve girdabın ekstra kaldırma kuvveti uygulamasından dolayı delta kanat konfigürasyonları yüksek uçuş hızına sahip savaş uçaklarında kullanılmaktadır. Kanat yüzeyine yakın bölgede girdap çökmesinin oluşmasıyla kanat aerodinamiği etkilenmekte, kaldırma kuvveti azalmakta ve sürüklenme kuvveti artmaktadır (Cui ve ark., 2007). Girdaplı akış yapısını kontrol edebilmek için girdaplı akış fiziğini nicel olarak parçacık görüntülemeli hız ölçme veya benzer yöntemlerle araştırılması gerekmektedir. Geçmiş yıllarda delta kanat yüzeyinde yakın bölgede oluşan girdaplı ve kararsız akış yapısı, yüzeydeki akış ayrılması, girdap çökmesi boya deneyleri ile aktif ve pasif kontrol yöntemleri geliştirilmeye çalışılmıştır (Rockwell, 2000). Canpolat ve ark. (2009) süpürme açısı $\Lambda=40^\circ$ olan delta kanat üzerinde oluşan akış yapısının sapma açısına (θ) ve hücum açısına (α) bağlı olarak değişimini boya deneyi ile görsel olarak incelemiştir. Akışkanlar mekaniğinde son zamanlarda kullanılmaya başlanan PIV ölçme tekniği bilgisayar ve elektronik teknolojisinin gelişmesiyle birlikte kararlı olmayan akışın yapısı hakkında çok detaylı bilgiler vermeye başlamıştır. Karmaşık geometriye sahip akışlar için aynı anda bir düzlemsel bölgede anlık hızları ölçen Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüme Yöntemi (PIV) kullanarak akış karakteristikleri belirlenebilmektedir. Bu yöntemin işleyişi ve kullanılabilirliği hakkında geniş bilgi Rockwell (2000) ve Nakano ve ark. (2007) tarafından kapsamlı olarak verilmiştir.

Şahin ve ark. (2001) hücum açısı 22° olan bir delta kanatta oluşan girdap çökmesinin kanat ardında olan yapıları etkisini incelemiştir. Bu amaçla delta kanat arkasına düz bir levha yerleştirilmiş ve girdap çökmesi ile birlikte oluşan daimi olmayan girdapların levha ile etkileşimi PIV yöntemiyle belirlenmiştir. Girdap çökme noktasını kontrol altında tutmak amacıyla, Akıllı ve ark. (2001) çok ince bir çapa sahip teli sarmal girdap eksenine dik olarak yerleştirmişlerdir. Ayrıca,

aynı kalınlıktaki teli Akıllı ve ark. (2003) diğer bir çalışmada ise sarmal girdabın eksenini boyunca yerleştirerek tel boyunun girdap çökmesine olan etkilerini incelemiştir. Bilindiği gibi, yüksek hücum açılarında akışın kaldırma kuvvetinin düşmesi nedeniyle uçağın havada irtifa kaybı söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle, büyük hücum açıları yüksek performanslı uçaklarda kullanılmamaktadır. Delta kanadın, kararlı olmayan akış ortamında aerodinamik özelliklerinin bilinmesinin uygulamada büyük önemi vardır. Delta kanada yüksek düzeyde hücum açısı vererek girdap çökmesinin yapısı ve ayrılmış akış bölgesinin kanat yüzeyine olan etkisi Özgören ve ark. (2002) tarafından araştırılmıştır. Gad-el-Hak ve Ho (1985), delta kanadın arka uç köşesinden başlamak üzere üç boyutlu ayrılmanın olduğunu ve bu ayrılmanın akış yönünün tersi istikamette ilerlediğini belirlemiştir. Mochizuki ve ark. (2006), hücum açısına verilen düşük frekanslı salınımın, girdap şiddetini, yarıçapını ve girdap çökme noktasının pozisyonunu periyodik olarak değiştirdiğini belirlemiştir. Genel olarak, kanat üzerindeki daimi olmayan akış yapısı girdap merkezinin ve girdap çökme noktasının gelişigüzel salınım halinde olmasına sebep olmaktadır (Gürsul ve Yang, 1995). Delta kanatları kısmi olarak esnek imal ederek ön uçta oluşan sarmal girdabın değişik hücum açılarında sürüklenme ve kaldırma kuvvetini nasıl etkilediği Kawazoe ve Kato (2006) tarafından incelenmiştir. Kanat merkezi ekseninin her iki yanında oluşan girdap çökmelerinin simetrik olmayan veya aynı anda farklı akış davranışları sergilemeleri durumunda kanat yüzeyine etkileyen yük, yan kuvvetler ve uyguladıkları momentler farklı olabilmektedir (Lin, 1998).

İnsansız hava savaş araçlarının (Unmanned Combat Air Vehicles-UCAVs) manevra kabiliyetlerinin yüksek olması bu araçların en önemli taktik avantajlarından biridir. Gelecekteki insansız hava araçlarının geometrileri Şekil 1’ de gösterilmektedir (Gürsul ve ark., 2005). Süpürme açısı küçük olan bu tür delta kanatların yüzeyinde oluşan kararlı olmayan akışın yapısı ile ilgili henüz yeterli düzeyde detaylı çalışmalar yapılmamıştır (Yanıktepe, 2006).



(a)



(b)

Şekil 1. a) Elmas tipi insansız hava savaş aracı b) Lambda tipi İnsansız hava savaş aracı (Gürsul ve ark., 2005).

Ver Haagen ve Naording (1989), yaptıkları deneysel çalışmada, sapma açısının, θ helisel girdap yapısını, girdap çökmesini ve sonrasında oluşan kararsız akış durumunu çok büyük oranda etkilediğini ve kanat yüzeyinde oluşan akış yapısının zaman ortalama akış karakteristiklerinin simetrikliğinin bozulduğunu gözlemlenmiştir. Sohn ve ark. (2004), süpürme açısı $\Lambda=65^\circ$ ve $C=530$ mm veter uzunluğuna sahip olan bir delta kanada sapma açısı vererek kanadın akışa maruz kalan kısmında girdap çökmesinin kanat ucuna yakın bir bölgede oluştuğunu diğer kenarda oluşan girdap çökmesinin ise kuyruk kısmına doğru ilerlediğini belirlemiştir.

Reynolds sayısının 10 000 ve daha üst değerlerinde elmas kanat üzerinde oluşan akış yapısının değişmediği ayrıca hücum açısının $\alpha=7^\circ$ olması durumunda kanat üzerinde oluşan girdap çökmesinin kanat sapma açısına (θ) çok duyarlı olduğu belirlenmiştir.

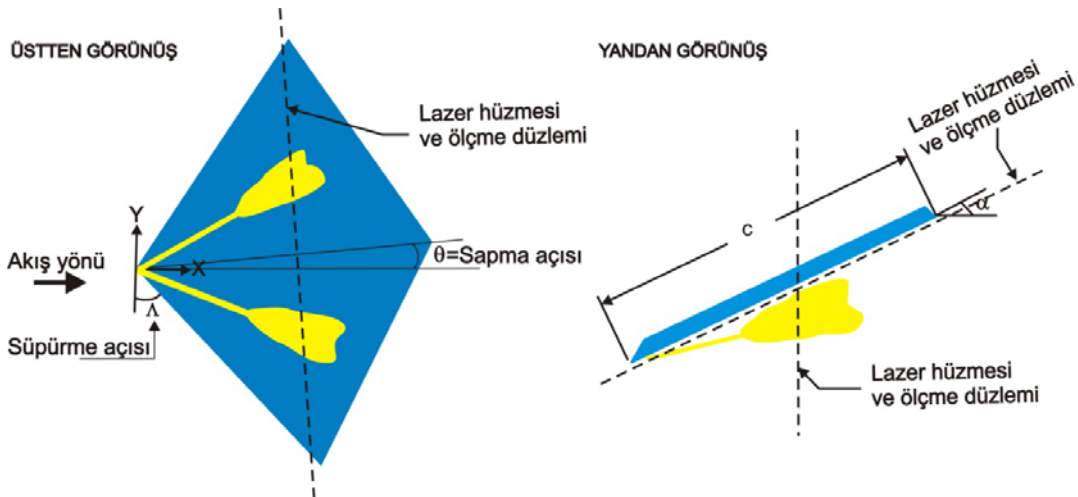
Delta kanatlar (delta, elmas, lambda kanatlar v.b.) geçmişten günümüze kadarki yıllarca yapılan araştırmalar sonucunda gelişerek birçok savaş uçaklarında birincil elaman olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu uçakların manevra kabiliyetlerinin artırılabilmesi için girdap dinamiğinin, girdap kanat etkileşiminin, kararsız akış yapısının ve fiziğinin anlaşılması oldukça önemlidir. Pilotsuz uçak kullanımının söz konusu olduğu günümüzde, bu tür uçakların manevra kabiliyetini arttırabilmek için uçak gövdesinin oluşturduğu sarmal girdap ve girdap çökmesinin oluşumu, çökme sonrası oluşan girdaplı akışın kanat yüzeyi ile etkileşiminin ve kontrolü gerekmektedir. Bu çalışmada, süpürme açısı $\Lambda=40^\circ$ olan elmas kanat üzerinde oluşan girdapların oluşum mekanizması, girdap cisim yüzeyi etkileşimi, akış ayrılması, sarmal girdapların oluşması ve çökmesi hem boya deneyi ile nitel hem de Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) yöntemiyle nicel olarak incelenmiştir.

Elmas kanadın akış yönüne göre sapma açıları $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ aralığında değiştirilerek akış yapısındaki değişim gözlenmiştir. Ölçülen anlık hız vektörlerinden, zaman ortalamalı eşdeğer girdap eğrileri, $\langle \omega \rangle$ akım çizgileri, $\langle \Psi \rangle$ ve hız vektörleri, $\langle V \rangle$ akış yönünde ve akışa dik yöndeki hız çalkantıları $\langle u_{rms}/U \rangle$ ve $\langle v_{rms}/U \rangle$ ve Reynolds gerilmeleri, $\langle u'v'/U^2 \rangle$ hücum açısının $\alpha=7^\circ$ değeri ve değişik sapma açıları için hem arkadan görünüş düzleminde hem de üstten görünüş düzleminde belirlenmiştir.

MATERYAL VE METOD

Bu çalışma, kapalı devre açık su kanalında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan su kanalı iki adet su deposu ile bu iki depo arasında bulunan ve ebatları 750mm x 1000mm x 8000mm (yükseklik x en x boy) olan akrilik kısımdan oluşmaktadır.

Şekil 2'de görülen elmas kanat modelinin veter uzunluğu 168 mm'dir. Elmas kanada sabit hücum açısında ve bulunduğu düzlem içerisinde akış yönü referans alınarak kanadın merkezi eksenine göre değişik sapma açıları verilmiştir. Diğer bir deyişle deneyler, elmas kanat üzerinde oluşan akış yapısında gözle görülür değişikliklerin meydana geldiği $\theta = 0^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ ve 15° sapma açıları gerçekleştirilmiştir. Elmas kanadın deney alanında sabit durması ve hücum ve sapma açılarının verilebilmesi için özel bir düzenek hazırlanmıştır. Bu düzende hücum açısı bir servo motor tarafından ve sapma açısı (θ) da bir açı düzeneği tarafından verilebilmektedir. Oluşturulan bu düzenek sayesinde elmas kanada hücum ve sapma açıları ayrı ayrı veya ikisi birlikte verilebilmektedir. Böylelikle, hücum ve sapma açılarının akış yapısına etkileri deneysel olarak gözlenmiştir. Deneyler boyunca su seviyesi 53 cm yüksekliğinde tutulmuştur. Kanat su seviyesinin ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Lazer hüzmesi ise kanat yüzeyine 1.25mm olan mesafede geçirilmiştir.



Şekil 2. Elmas kanat modeli ve ölçüm yapılan kesitin şematik görünüşü.

Boya deneylerinde, 532nm dalga boyundaki lazer ışığı altında parlayan florasan boya kullanılmıştır. Bu boya lazer karşısında parlamakta ve akış yapısını akışta renk ayrımı oluşturarak ortaya koymaktadır. Elmas kanat içinde açılan bir kanal yardımıyla boya, ön uçta belirli bir mesafede kanat dışına iletilmektedir. Boya çıkışının elmas kanadın ucuna yakın olmasına özen gösterilmiştir. Bunun amacı, elmas kanat üzerinde oluşan sarmal girdabın oluşumunun iyi bir şekilde görüntülenebilmesidir. Akışın doğru bir şekilde görüntülenebilmesi için lazer, sarmal girdabın merkezi ekseninden geçirilmiştir.

Parçacık Görüntülemeli hız Ölçme Tekniği (PIV) ile ölçme yapabilmek için suyun içerisine ortalama 12 mikrometre çapa sahip gümüş kaplı plastik parçacıklar serpiştirilmektedir. Bu katı parçacıklar gümüş kaplı olmalarından dolayı üzerlerine gelen darbeli lazer ışığı altında parlamaktadırlar. Bu parçacıkların yoğunlukları suyun yoğunluğuna çok yakın olduğundan, içinde buldukları su ile aynı hızda hareket etmekte.

Mevcut lazer ışık kaynağı ile saniyede en çok 15 hız ölçümü alınabilmektedir. Darbeli lazerin ilk aydınlatması sırasında, lazer ile senkronize çalışan yüksek çözünürlüğe sahip kamera ile resim alınmakta ve bilgisayara aktarılmaktadır. Kısa bir süre içinde ölçüm alanı ikinci kez lazer tarafından aydınlatılmakta ve aynı işlemler tekrarlanmaktadır. Çekim yapan kameranın çözünürlüğü yüksek olup, 1186x1600 piksel boyutundadır.

Deneyler sırasında 3 boyutlu ölçüm yapabilen stereo-PIV kullanılmıştır. Bu sisteminde aynı noktaya aynı açı ile bakan iki kamera bulunmaktadır. Bu kameralar insan gözü gibi düşünülmekte ve aynı düzleme odaklanabilmeleri için kameralar kalibre edilmektedir. Kalibrasyon tahtası 200mmx200mm boyutlarında olup, delikli bir yapıya sahiptir.

Kalibrasyondan elde edilen resim ve kameralar tarafından çekilen resimler adaptif korelasyon yöntemi ile elde edilen sonuçlar sistemin yazılımı tarafından üst üste çakıştırılarak üçüncü boyuta geçilmektedir. Bir başka deyişle, üçüncü eksenindeki hız bileşeni hesaplanmaktadır.

Nyquist kriterini sağlamak için ağ yapısı %50 olarak üst üste çakıştırılarak hız vektörleri hesaplanmıştır. Bilgisayara aktarılan bu resimlerin proses işlemi neticesinde anlık hız vektörleri hesaplanmaktadır. Hız vektörlerini kullanarak girdap eşdeğer eğrileri ve akım çizgilerinin hesaplanması da mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada, her bir deney seti için 900 adet anlık hız alanı ölçülmüş ve bu anlık hız alanlarından her bir deney seti için ortalama hız, girdap, akım çizgileri ve türbülans istatistikleri hesaplanmıştır.

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

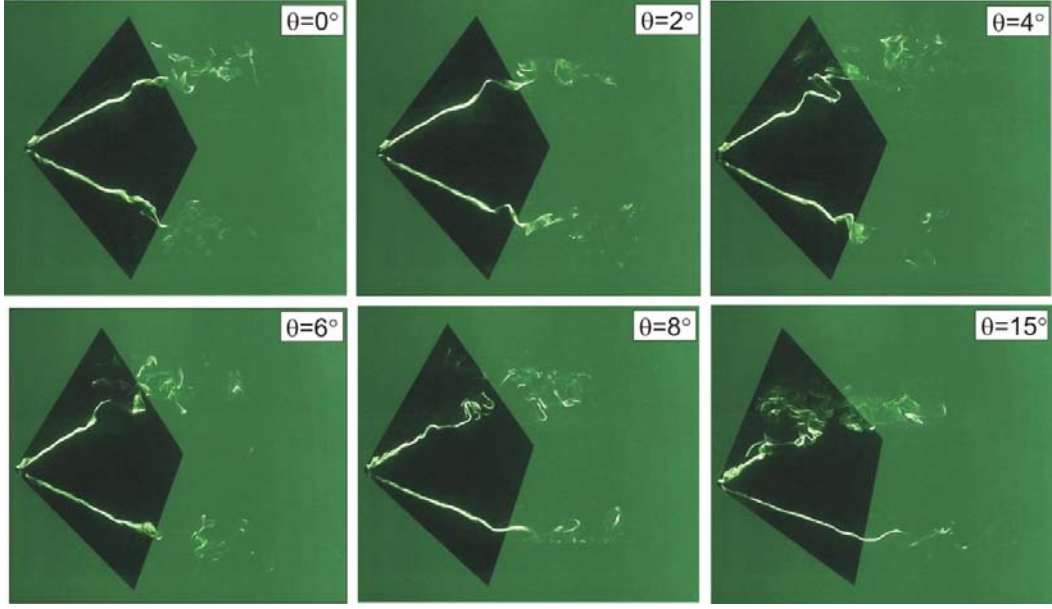
Elmas kanada $0^{\circ} \leq \theta \leq 15^{\circ}$ sapma açısı vererek kanat üzerinde oluşan akış yapısının sapma açısı ile değişimini gösteren boya deneyleri sonuçları Reynolds sayısının $Re = 10\ 000$ ve hücum açısının $\alpha = 7^{\circ}$ değerleri için şekil 3'de verilmiştir. Sapma olmadığı ($\theta = 0^{\circ}$) durumda kanat merkezi ekseninin her iki tarafında oluşan girdaplı akış bölgesinin simetrik bir yapıya sahip olduğu ve aynı zamanda kanadın her iki yanında oluşan girdap çökme noktasının kanat ucuna olan mesafesinin zaman ortalama değeri benzerdir.

Kanada, akış yönüne göre bulunduğu düzlemde sapma açısı verilmesi halinde sarmal girdap yapısı ve diğer akış karakteristikleri bu değişimden hızla etkilenmektedir. Kanada, akış yönüne göre $\theta = 4^{\circ}$ lik sapma açısı verildiği durumda kanat merkezi ekseninin her iki yanında bulunan girdaplı akışın simetrik yapısının bozulmaya başladığı görülmektedir.

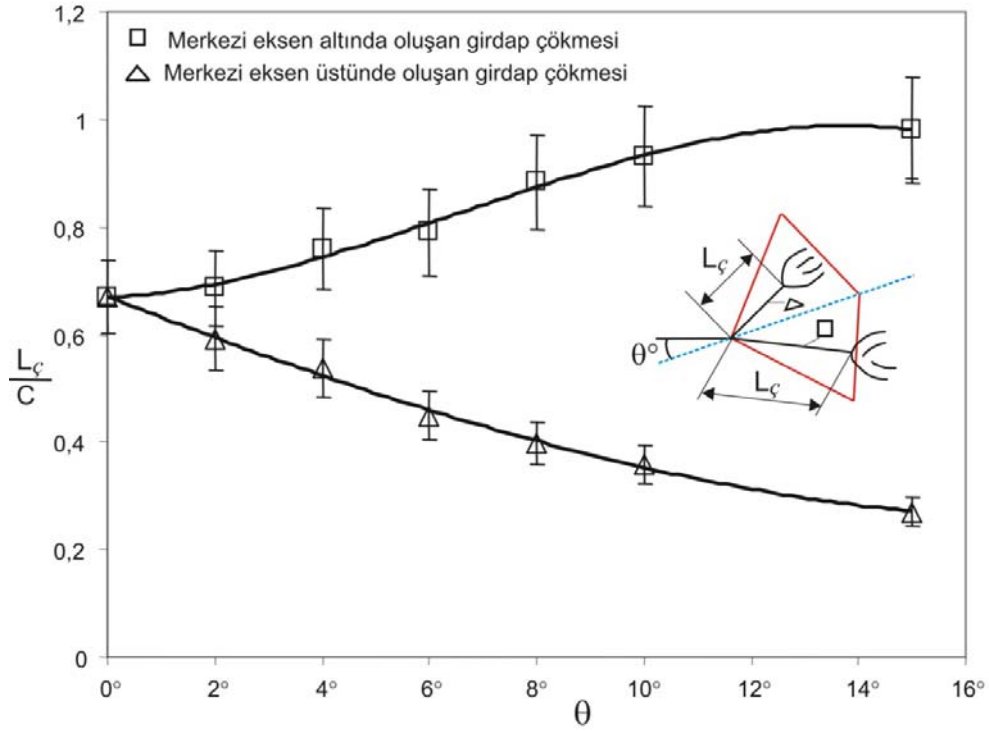
Sapma açısının $\theta = 15^{\circ}$ değerinde ise kanadın serbest akışa maruz kalan kenarının karşı istikametindeki kenarda bulunan sarmal girdabın çökme noktasının yeri kanat uç kısmından daha da uzaklaşmaktadır.

Hücum açısı $\alpha = 7^{\circ}$ ve $Re = 10\ 000$ için boyutsuz girdap çökme mesafesi, L_c/C ile farklı sapma açılarına göre değişimi şekil 4'de gösterilmiştir. Girdap çökme noktasının kanat ucuna olan mesafesi, L_c veter uzunluğuna, C bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. Kanada, akış yönüne göre bulunduğu düzlemde sapma açısı verilmesi halinde kanat yüzeyinde oluşan kayma tabakası, sınır tabaka ve basınç değişiminden dolayı kanat merkezi ekseninin her iki tarafında oluşan akış yapısı hızla etkilenmektedir. Sapma açısının $\theta = 15^{\circ}$ değerinde elmas kanadın merkezi ekseninin üstünde oluşan ana girdap çökmesi ortalama $L_c/C = 0.25$ mesafesinde, diğer bir deyişle kanat ucuna yakın bir yerde gerçekleşmekte ve aynı zamanda kanadın merkezi ekseninin altında oluşan ana girdabın çökme noktası ise kanadın arka ucuna doğru ilerlemektedir ($L_c/C = 0.9$).

Elmas kanada sapma açısı verildiği durumda girdap çökmesinin olduğu nokta yarı kararsız olarak akış istikametinde ileriye veya geriye doğru hareket etmekte ve bu hareket ortalama girdap çökme mesafesinin $\pm 9\%$ 'i mertebesinde olmaktadır.



Şekil 3. Sapma açısının girdap çökme noktasına etkileri, $Re=10\ 000$ ve $\alpha = 7^\circ$.



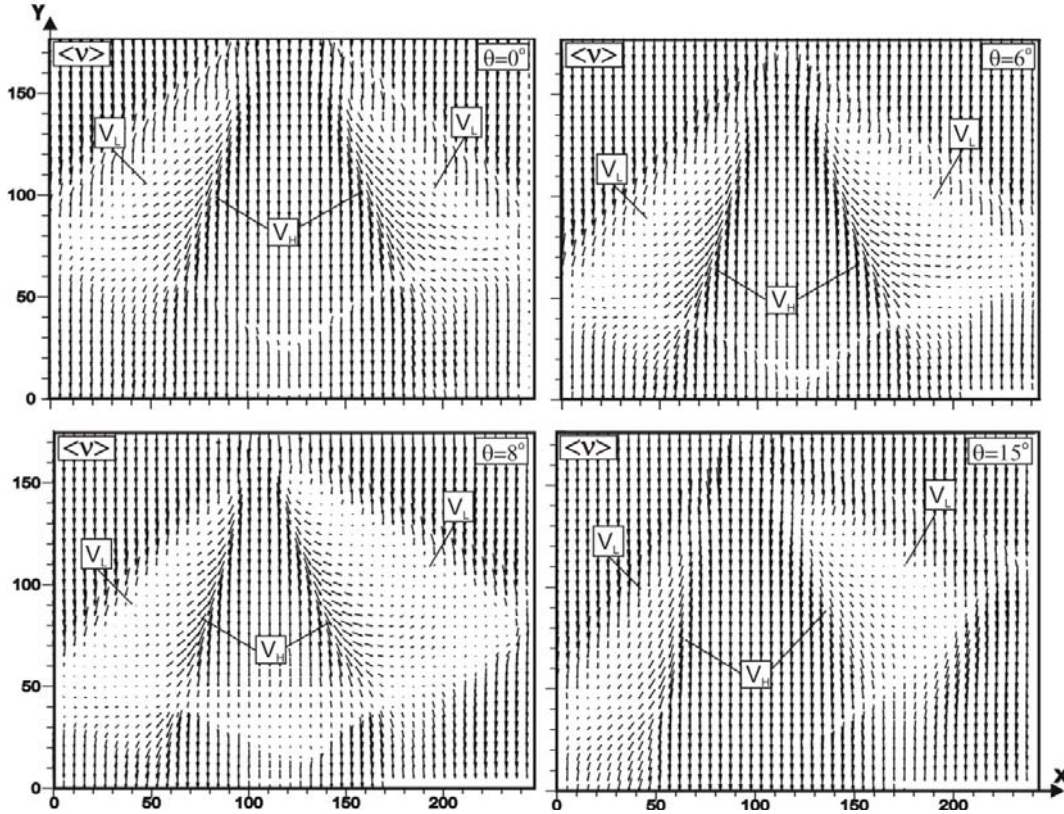
Şekil 4. Elmas kanat üzerinde sapma açısının girdap çökmesine etkisi.

Şekil 5'de görüldüğü gibi elmas kanadın $\alpha=7^\circ$ hücum açısında sabit konumunu $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ sapma açısı aralığında değiştirerek, kanat yüzeyine 1.25 mm mesafede akış yapısını incelemek için PIV ile deneyler yapılmıştır. Kanada sapma açısı verilmemiş durumda kanadın merkezi ekseninin iki yanında simetrik akış yapısının oluştuğu ortalama hız vektörlerinden ($\langle V \rangle$) anlaşılmaktadır. Zaman ortalama hız vektörleri

dağılımında kanadın merkezi ekseninin her iki yanında oluşan sarmal girdaplardan dolayı bu bölgede hız değerlerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir (V_D). Girdap etkileşim alanından hemen sonra basınçta ani bir düşüş olmakta ve buna bağlı olarak bu bölgede zaman ortalama hız vektörlerinin maksimum değer (V_V) aldığı görülmektedir. Sapma açısının artmasıyla birlikte,

örneğin $\theta=8^\circ$ değerinde yüksek hız değerlerinin kanadın akışa maruz kalan yan kenarın karşı tarafındaki kenara doğru kaydığı ve sapma açısı,

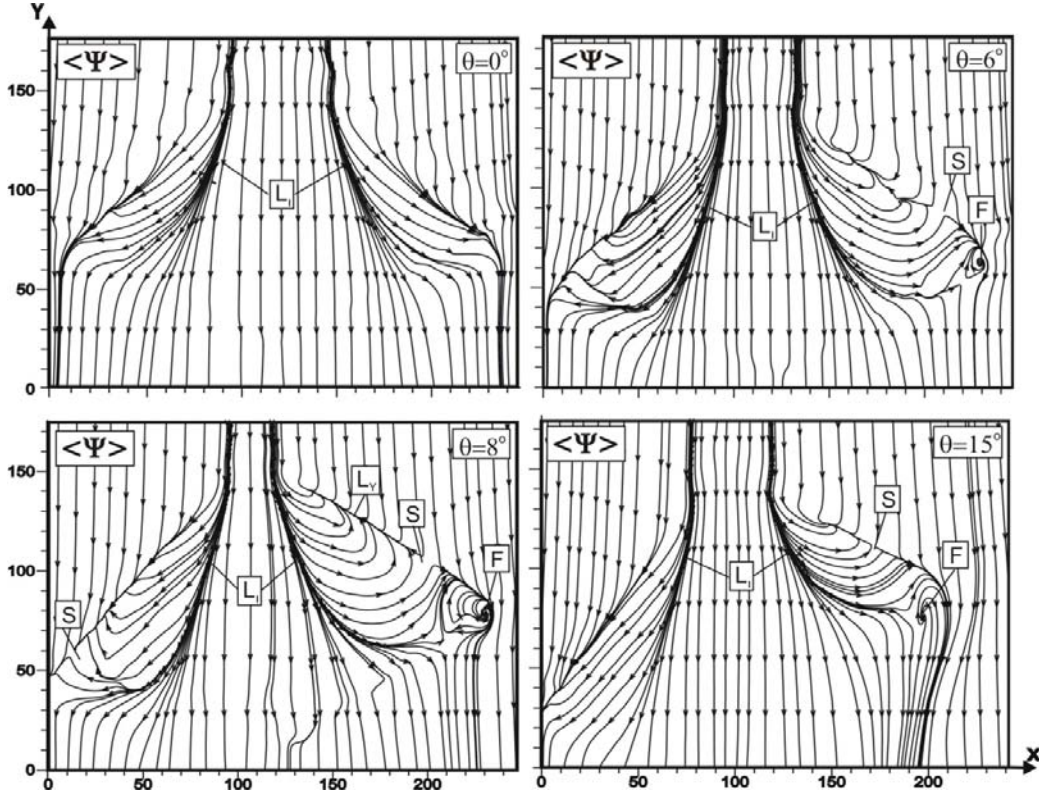
$\theta=15^\circ$ olduğunda sarmal girdap eksenleri ile kanat merkezi eksenini arasında çizgi halinde oluşan yüksek hız değerleri iyice azalmaktadır.



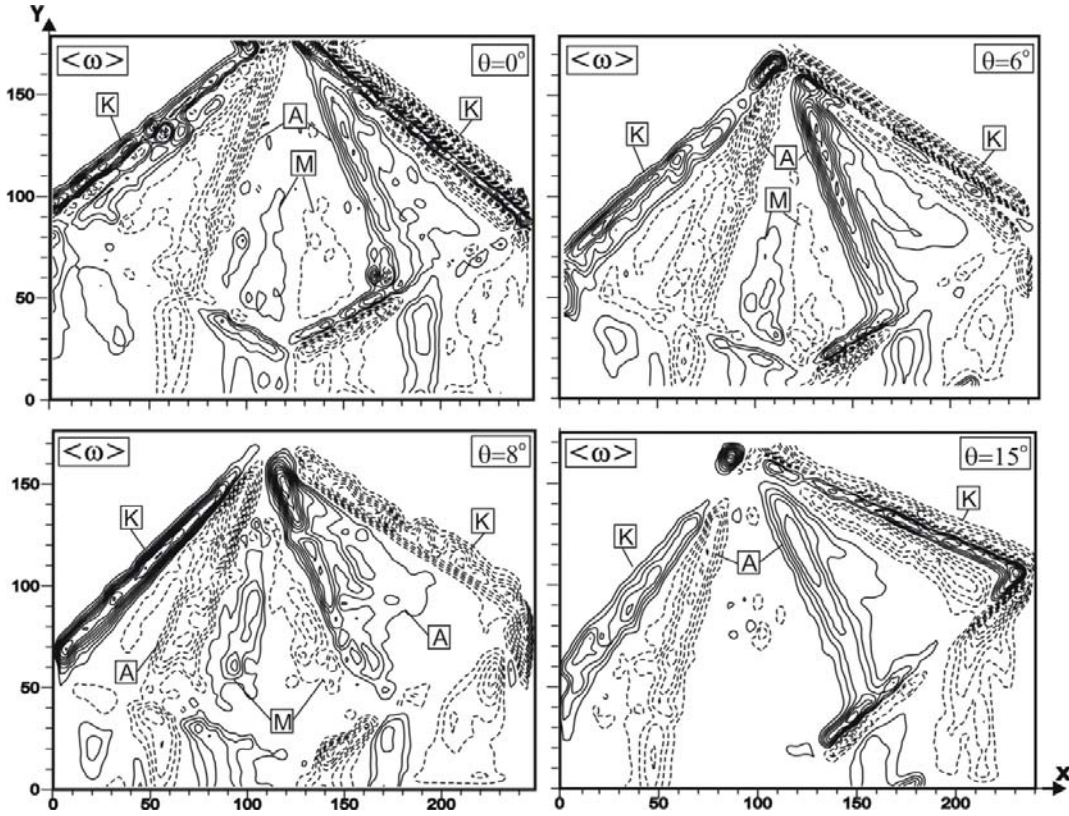
Şekil 5. Elmas kanadın yüzeyine 1.25 mm kadar yakın düzlemde akışı karakterize eden zaman ortalama hız vektörlerinin dağılımı, $\alpha=7^\circ$ ve $Re=10\ 000$.

Sapma açısının $\theta=0^\circ$ olması halinde şekil 6'da eşdeğer akım çizgileri $\langle \psi \rangle$ üzerinde kanat merkezi ekseninin her iki yanında iraksak akım çizgilerinin (L_1) oluştuğu görülmektedir. Sapma açısı verildiği zaman kanadın akışa ilk maruz kalan kenarında düğüm noktası, S veya durma noktası oluşmakta ve ayrıca kanadın bu kenarı üzerinde döngünün, F oluştuğu görülmektedir. Sapma açısının $\theta=8^\circ$ olması halinde kanadın akışa sonradan maruz kalan kenarda düğüm noktası (S) ve kanadın akışa önce maruz kalan kenarı üzerinde ise yakınsak akım çizgileri meydana gelmektedir. Sapma açısının $\theta=8^\circ$ ve 15° olması durumunda akış yönünde ve kanadın kuyruk kısmında söz konusu olan döngünün etki alanı büyümektedir. Akışa maruz kalan ilk kenarın düğüm (durma) noktası, S mevcudiyetini korurken oluşan yakınsak akım çizgisi (L_V) ve sapma açısının $\theta=8^\circ$ olduğu durumda karşı kanarda oluşan düğüm noktası, S ise yok olmaktadır. Sonuç olarak, akışın simetrikliği iyice bozulmaktadır. Şekil 7'de zaman

ortalama girdap eşdeğer eğrilerinin $\langle \omega \rangle$ dağılımına bakıldığında kanat yan kenarları boyunca uzun ve ince yapıda bir negatif ve bir de pozitif girdap yapısının oluştuğu görülmektedir. Burada kesik çizgiler, saat yönünde dönen negatif girdapları ifade etmekte iken düz çizgiler saatin tersi yönünde dönen pozitif girdapları göstermektedir. Kenar (K) girdapların arasında kalan bölgede ise bir çift pozitif ve negatif girdap oluşmaktadır. Bu yan alan girdapları (A) kanat yüzeyinin büyük bir bölümünü kaplamaktadır. Yan alan girdapları arasında ise kanat merkezi ekseninde oluşan bir adet pozitif ve negatif merkez girdapları (M) bulunmaktadır. Bu girdaplar sapma açısının $\theta=15^\circ$ değerinde ise şiddetini büyük oranda kaybetmektedir. Burada zaman ortalama girdap eşdeğer eğrilerinin minimum değeri $[\langle \omega \rangle]_{\min}=0.4$ ve bu eşdeğer eğrilerin artırım miktarı ise $\Delta[\langle \omega \rangle]=0.7$ olarak alınmıştır.



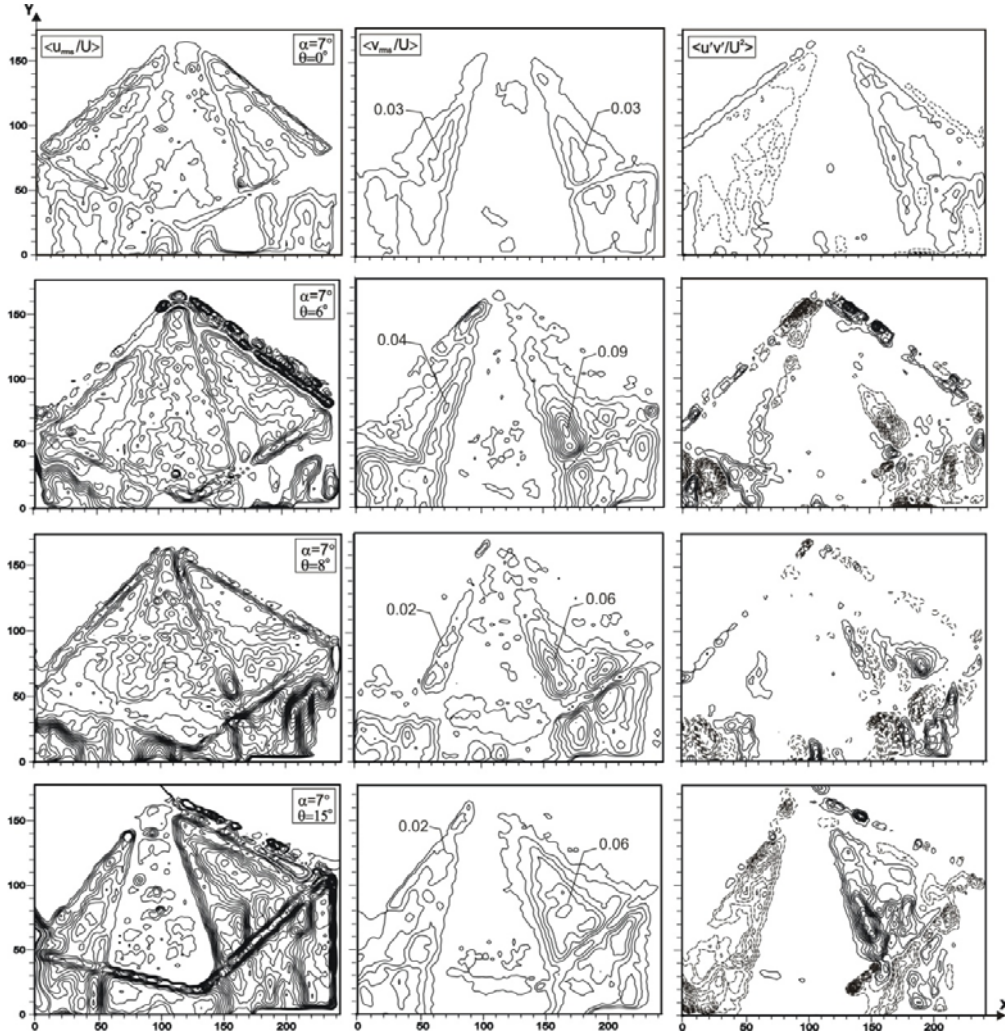
Şekil 6. Elmas kanadın yüzeyine 1.25 mm kadar yakın düzlemde akışı karakterize eden akım çizgilerinin dağılımı, $\alpha = 7^\circ$ ve $Re = 10\,000$.



Şekil 7. Elmas kanadın yüzeyine 1.25 mm kadar yakın düzlemde akışı karakterize eden zaman ortalama girdap eşdeğer eğrilerinin dağılımı, $\alpha = 7^\circ$ ve $Re = 10\,000$.

Şekil 8’de gösterilen sapma açısına bağlı olarak akış alanında elde edilen serbest akış yönündeki hız bileşeninin karesinin karekök ortalaması, $\langle u_{rms}/U \rangle$, serbest akışa dik yöndeki hız bileşeninin karesinin karekök ortalamalarının $\langle v_{rms}/U \rangle$ minimum boyutsuz çalkantı değerleri ve boyutsuz çalkantı değerlerinin artırım miktarları 0.01 olarak alınmıştır. Reynolds gerilmeleri eşdeğer eğrilerinin, $\langle u'v'/U^2 \rangle$ minimum değeri ve artırım miktarı ise 0.0005 olarak alınmıştır. Sapma açısı, $\theta = 6^\circ$ olarak verildiğinde kanat merkezi ekseninin bir tarafında $\langle u_{rms}/U \rangle$ ve $\langle v_{rms}/U \rangle$ eşdeğer eğrilerinin sayısal değerleri artarken eksenin diğer tarafında ise bu değerler azalmaktadır. Örneğin kanat üzerinde sapma açısı $\theta = 0^\circ$ olduğu durumda merkezi eksenin sağ tarafında $\langle v_{rms}/U \rangle$ maksimum boyutsuz çalkantı değeri yaklaşık olarak 0.03 iken sapma açısı, $\theta = 6^\circ$ için bu değer yaklaşık olarak

0.09 değerine çıkmaktadır. Elmas kanat üzerinde maksimum çalkantı, girdap çökmesinin olduğu yerde oluşmaktadır. Kanada sapma açısı, θ verildiğinde akışa maruz kalan bölgede oluşan girdap çökmesi kanada sapma açısı verilmemiş duruma göre kanadın uç kısmına doğru kaymaktadır. Buna bağlı olarak Reynolds gerilmeleri eşdeğer eğrileri de, $\langle u'v'/U^2 \rangle$ bu nokta etrafında yoğunlaşmaktadır. Sapma açısı, $\theta = 8^\circ$ ve $\theta = 15^\circ$ verildiği zaman kanat merkezi ekseninin sağ tarafında, yani akışa maruz kalan kısımda, girdap çökme noktası kanat ucuna doğru hareket etmesinden dolayı kanatın bu tarafında çökmeden sonra oluşan kararsız akış yapısı daha geniş bir alanı kaplamaktadır. Bundan dolayı Reynolds gerilmelerinin kanatın bu bölgesinde arttığı görülmektedir.

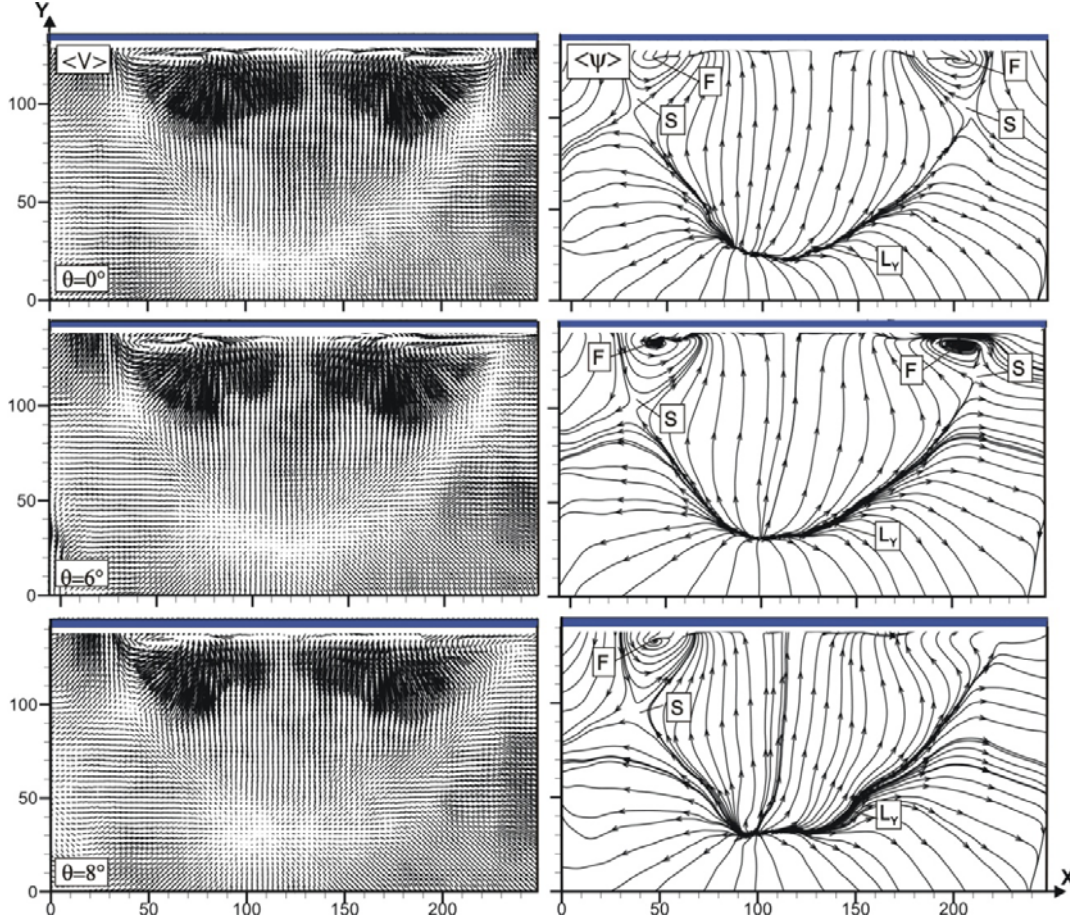


Şekil 8. Sapma açısı değişimi karşısında u ve v hız bileşenlerinin karelerinin karekök ortalamalarının ve türbülans gerilmelerinin değişimi, $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$, $\alpha = 7^\circ$ ve $Re = 10\,000$.

Akım çizgisi $\langle \Psi \rangle$, hız vektörleri $\langle V \rangle$ dağılımı ve sapma açısının $\theta=0^\circ$, 6° ve 8° değerleri için arkadan görünüş düzleminde yapılan deneylerin sonuçları şekil 9'da görülmektedir. Boya deneylerinin sonuçlarına bakılarak ölçme düzlemi, boyutsuz veter uzunluğunun $x/C=0.6$ değerinde alınmasına karar verilmiştir.

Akım çizgilerine bakıldığında sapma açısının $\theta=0^\circ$ olduğu durumda kanat merkezi ekseninin her iki yanında birbirinin tersi istikametinde dönen iki adet döngü (F) ve bu döngülerin alt kısmında durma noktaları (S) oluşmaktadır. Oluşan durma

noktalarından sonra yakınsak akım çizgileri (L_V) oluştuğu görülmektedir. Sapma açısının $\theta=6^\circ$ çıkarılmasıyla elmas kanadın akışa ilk maruz kalan kenarında oluşan döngünün çapı küçülmeğe ve diğer kenarı üzerinde ise döngünün çapı büyümektedir. Sapma açısı $\theta=8^\circ$ olduğunda ise kanadın akışa maruz kalan kenarı üzerinde oluşan girdap çökmesi kanat ucuna doğru kaymaktadır. Dolayısıyla ölçüm yapılan bölgede bu kenar üzerinde sarmal girdap olmadığı için akım çizgisi üzerinde döngü (F) belirgin olarak oluşmamaktadır.



Şekil 9. Değişik sapma açılarında, $x/C=0.6$ mesafesinde akışa dik arkadan görünüş düzleminde eşdeğer akım çizgileri, $\langle \Psi \rangle$ ve hız vektörleri, $\langle V \rangle$ dağılımı, $\alpha=7^\circ$ ve $Re=10\ 000$.

SONUÇ

Girdap çökme noktasının pozisyonu ve akış simetrisi sapma açısı karşısında hızla değişmektedir. Kanat üzerinde oluşan girdaplı akış yapısı kanat merkezi eksenine göre her iki yarı bölgedeki simetrikliği etkilenmektedir. Örneğin sapma açısının $\theta=4^\circ$ değerinde sarmal girdap yapılarının benzerliği bozulmaktadır. Serbest akışa maruz kalan ilk sarmal girdap daha erken çökmeye uğramaktadır. Diğer sarmal girdabın çökme noktası kanat uç noktasına göre çok daha uzak mesafelerde oluşmaktadır. Girdap çökmesinden sonra kanat yüzeyi daimi olmayan akış

yüklemelerine maruz kalmaktadır. Sapma açısının artmasıyla birlikte akışın çalkantı değerleri kanadın belirli bölgesinde artmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 105M225 nolu ve Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından MMF2007D13 nolu projeler kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Akıllı, H., Şahin, B., and Rockwell, D., "Control of vortex breakdown by a transversely oriented wire", *Physics of Fluids*, No.2, Vol.13, pp.452-463, 2001.

Akıllı, H., Şahin, B., and Rockwell, D., "Control of vortex breakdown by a coaxial wire", No. 1, Vol. 15, pp. 123-133, 2003.

Canpolat, C., Yayla, S., Sahin, B., and Akıllı, H., "Dye Visualization of the Flow Structure over a Yawed Nonslender Delta Wing", *Journal of Aircraft* (Yayına kabul edildi), 2009.

Cui, Y. D. , Lim T. T., Tsai H. M., "Control of Vortex Breakdown over a Delta Wing Using Forebody Slot Blowing", *AIAA Journal*, Vol. 45, No. 1, 2007.

Gad-el-Hak M. And Ho K., "The pitching delta wing," *J. AIAA* 23(11): pp. 1660-1665, 1985.

Gursul, I., and Yang, H., "Vortex breakdown over a pitching delta wing", *Journal of Fluid and Structures*. Vol. 9, pp. 571-583, 1995.

Kawazoe H., Kato S., "Effects of Leading Edge Separation Vortex of Flexible Structure Delta Wing on Its Aerodynamic Characteristics", *Jsm International Journal, Series B*, Vol.49, No.4, 2006.

Lin, H., "Vortex breakdown over delta wings in an unsteady free stream", Ph.D. thesis, University of Southern California, 1998.

Mochizuki, S., Yamada, S., and Osaka H., "Reynolds stress field in a turbulent wall jet induced by a

streamwise vortex with periodic perturbation", *Experiments in Fluids* Vol. 40, pp. 372–382, 20006.

Nakano, T. , Fujisava, N. , Oguma, Y. , Takagi, Y. , and Lee, S., "Experimental study and flow and noise characteristics of NACA 0018 airfoil" *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007.

Özgören, M., Şahin, B., and Rockwell, D., "Structure of leading-edge vortices on a delta wing at high angle-of-attack ", *AIAA Journal*, No. 2, Vol. 40, pp. 285-292, 2002.

Rockwell, D. "Imaging of unsteady separated flows: Global approaches to new insight" *Experiments in Fluids*, Vol. 29, No.7, pp. 255-273, 2000.

Sohn M. H., Yong L. Lee K. Y. and Chang J. W., "Vortex flow visualization of a yawed delta wing with leading-edge extension", *Journal of Aircraft*, V. 41, No.2, 2004.

Şahin, B., Akıllı, H., Lin, C.J. and Rockwell, D., "Vortex breakdown-edge intersection: consequence of edge oscillations", *AIAA Journal*, Vol.39, No:5, 2001.

Verhaagen, N. G., and Naarding, S. H. J., "Experimental and Numerical Investigation of Vortex Flow over a Sideslipping Delta Wing", *Journal of Aircraft*, Vol. 26, No. 11, 1989.

Yanıktepe, B., "Origin and control of vortex breakdown of unmanned combat air vehicles", Ph.D. thesis, University of Çukurova, 2006.



1977 yılında Van'da doğdu. 2000 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Müh.-Mim. Fakültesi Makine Müh. Bölümünden mezun oldu. 2002 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakültesi Makine Müh. Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır. Yüksek Lisans öğrenimini 2005 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalında tamamladı. Doktora öğrenimine halen Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalında devam etmektedir.



1984 yılında Hakkari ili'nin Yüksekova ilçesinde doğdu. 2006 yılında Çukurova Üniversitesi Müh.-Mim. Fakültesi Makine Müh. Bölümünden mezun oldu. Yüksek lisans öğrenimini 2008 yılında Çukurova Üniversitesinde tamamladı. Aynı yıl bu bölümde doktora öğrenimine başladı. 2008 yılında Çukurova Üniversitesi Müh.-Mim. Fakültesi Makine Müh. Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır. Halen aynı üniversitede görevini sürdürmektedir.



1954 yılında Hatay ili'nin Kırkhan ilçesinde doğdu. 1977 yılında Çukurova Üniversitesi Müh.-Mim. Fakültesi Makine Müh. Bölümünden mezun oldu. Doktora öğrenimini 1985 yılında Brunel Üniversitesi (İngiltere) tamamladı. 1988 yılında Çukurova Üniversitesi Müh.-Mim. Fakültesi Makine Müh. Bölümünde Yrd. Doç. olarak göreve başlamıştır. 1991 yılında aynı üniversitede Doçent ve 1997 yılında Profesör unvanı almıştır. Halen aynı üniversitede görevini sürdürmektedir.



1971 yılında Adana'da doğdu. İ.T.Ü., Uçak ve Uzay Bil.Fak., Uçak Müh. Bölümünden 1991 yılında mezun oldu. Ç.Ü. 1994 yılında Fen Bilimleri Enst., Makina Müh. Anabilim Dalı'nda Yüksek lisansını tamamladı. Doktora eğitimini 1999 yılında Ç.Ü. Fen Bilimleri Enst., Makina Müh. Anabilim Dalı'nda tamamladı. 2000 yılında Ç. Ü., Müh. Mim. Fak., Makine Müh. Bölümü, Enerji Anabilim Dalı'nda Yrd.Doç. olarak göreve başlamıştır. 2005 yılında aynı üniversitede Doçent unvanı almıştır ve halen aynı üniversitede görevini sürdürmektedir.