

FARKLI YÖNLERDE EĞİLME SERTLİĞİNE SAHİP ESNEK KANATLARIN DOĞRUSAL HAREKET BOYUNCA AKIŞ KARAKTERİSTİĞİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Hasan Halil Karakaş¹
ODTÜ/Havacılık ve Uzay Mühendisliği,
Ankara

Dr. Mustafa Perçin²
ODTÜ/Havacılık ve Uzay Mühendisliği,
Ankara

ÖZET

Bu çalışma, önce durağan durumdan sabit ivme ile hızlanan, daha sonra sabit hızla doğrusal bir hareket gerçekleştiren kanatlar etrafındaki akış alanını deneysel olarak incelemektedir. Farklı yönlerde eğilme sertliğine sahip kanatlar incelenecektir. Bu sertlik, kanat üst yüzeyine hücum kenarı ile farklı açılara sahip sertliği artırıcı çubuklar (ing., stiffener) yerleştirilerek sağlanmıştır. Hareket sırasında kanadın ulaştığı limit hız 0.08 m/s ve kanat veter uzunluğu 92 mm'dir. Reynolds sayısı 7360 olarak hesaplanmıştır. Hareket başında hücum açısı sabit ve 45 derecedir. İki boyutlu iki bileşenli parçacık görüntülemeli hız ölçme tekniği (2D2C PIV) kullanılarak, kanat açıklığının %75'indeki konumda düzlemsel akış alanları elde edilmiştir. Deneyler, destek çubuğu varlığının kanadın eğilme sertliğini arttırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, destek çubuğu açısının artması, kanadın veter yönünde daha az esneyerek daha yüksek geometrik hücum açısı ile hareket etmesine sebep olmuştur. Bu nedenle, kanatlar hareket boyunca farklı geometrik hücum açılarında hareket etmiştir ve bunun sonucunda kanatların etrafındaki akışın karakteristiği birbirlerinden farklılaşmıştır. En yüksek geometrik hücum açısı, beklenildiği gibi 90 derece destek çubuklu kanat tarafından elde edilirken, destek çubuksuz kanat, akış yönünde kolaylıkla yeniden hizalanarak en düşük değere sahip olmuştur. PIV ölçümleri, hareketin ilk anlarında tüm kanatlar için kararlı hücum kenarı girdabı oluştuğunu ve kararlılığını uzun bir hareket süresi boyunca koruduğunu göstermektedir. Fakat, yaklaşık 2.4 veter boyu hareketten sonra, hücum kenarı girdabı yapıları, farklı geometrik hücum açıları oluşumu sebebiyle farklılık göstermektedir. Kanat yüzeyine en yakın hücum kenarı girdabı, veter yönünde esnekliği en yüksek olan destek çubuksuz kanat tarafından elde edilirken, 90 derece destek çubuklu kanat ise en yüksek hücum kenarı girdabı sirkülasyonunu üretmiştir.

GİRİŞ

Düşük hızlı ve insansız uçuş kabiliyetleri, mikro hava araçlarını gözetleme, keşif ve destek gibi birçok askeri ve ticari görevlerde kullanıma uygun hale getirmektedir. Mikro insansız hava araçları sabit kanatlı, döner kanatlı ve çırpan kanatlı olacak şekilde üç ana tasarım kategorisinde incelenebilir. Son zamanlarda mikro insansız hava araçlarına artan ilgi artmıştır. Bu ilgi artışıyla beraber, çırpan kanat aerodinamiği, döner ve sabit kanatlı rakiplerine göre düşük Reynolds sayılarında manevra kabiliyeti ve uçuş verimliliği açısından oldukça avantajlı olması sebebiyle dikkatleri üzerine çekmektedir [Percin, 2015]. Diğer iki kategorinin uçuş mekanizmalarından farklı olarak, çırpan kanatlı hava araçlarında kuvvet sürüklenme kuvveti, kanat yüzeyinde hücum kenarı girdabı mevcutken maksimum değerlerine sahip olmasıdır. Fakat, hücum kenarı girdabı koştığında kanat taşıma kaybına uğramaktadır [Sane, 2003].

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: hasan.karakas@metu.edu.tr

² Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: mpercin@ae.metu.edu.tr

Doğada gözlemlenen çırpan kanat aerodinamiğini karmaşıklaştıran bir başka mekanizma ise kanat esnekliğidir [Combes ve Daniel, 2002]. Bu sebeple, kanat esnekliğinin kuvvet üretimi üzerindeki etkisinin incelenmesi adına literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, kanat açıklığı yönünde ve veter yönünde esneklik olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilmektedir. Kanat açıklığı yönündeki esneklik, kanadın kökünden ucuna doğru çırpma hızını değiştirdiğinden ötürü net akış üretimi geleneksel olmayan ve oldukça karmaşık zamana bağlı değişen uçuş mekanizmaları ile elde edilmektedir. Bu mekanizmalardan en bilineni hücum kenarı girdabı oluşumudur. Hücum kenarı girdabı oluşumu, çırpan kanat aerodinamiğindeki birincil kuvvet üretim yöntemidir [Sane, 2003]. Birdenbire taşıma kaybı açısından daha yüksek bir hücum açısı ile devinime başlayan bir kanadın hücum kenarında geçici süreli bir girdap oluşur. Bu girdap, kanat yüzeyinde bir emme bölgesi yaratarak taşıma kuvvetinin önemli ölçüde artmasını sağlamaktadır. Yüksek hücum açısı ile öteleme hareketini sürdüren bir kanatta, hücum kenarı girdabı akışın yüzeye tekrar bağlanmasına mümkün olmadığı ana kadar büyümeye devam etmektedir. Bu noktada, ulaşabileceği maksimum boyut ile kanattan koparak taşıma kuvvetinde ani düşüşe sebep olmaktadır. Bu durum, geciktirilmiş taşıma kaybı olarak adlandırılmaktadır. Bu durumun bu şekilde adlandırılmasının sebebi, taşıma ve yönünü değiştirmektedir [Yang vd., 2012]. Bu durum efektif hücum açısının kanat açıklığı yönünde değişmesine sebep olmaktadır. Uygun aralıktaki kanat açıklığı yönündeki esneklik, ortalama ve anlık itki kuvvetini arttırabilmektedir. Fakat, aşırı düzeyde kanat açıklığı yönünde esneklik, kanadın kökü ve ucu arasında faz farkı oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum, zayıf girdap oluşumuna sebebiyet vermektedir ve kuvvet üretimini ciddi bir şekilde düşürmektedir [Aona vd., 2009]. Literatürde yer alan çalışmalarda kullanılan veter yönünde esnek kanatlar, genellikle kanat açıklığı yönünde eğilme sertliğine sahiptir ve veter yönünde bükülebilmektedir. Bu kanatlar, kanat açıklığı yönünde bükülmeyi önleyecek sertlikte bir hücum kenarı ve veter yönünde esnemeyi sağlayacak bir kanat yüzeyi ile elde edilebilmektedir. Veter yönünde esnek kanatlar, esnek olmayan kanatlara göre daha az taşıma ve sürüklenme kuvveti üretmektedir [Zhao vd., 2011]. Akışa uyum sağlayan firar kenarı yapısı, kanadın akış yönünde yeniden hizalanmasını sağlamaktadır. Bu durumda daha küçük firar kenarı girdabı oluştuğu, hücum kenarı girdabı sürekli büyümesi ve parçalamasının da önüne geçildiği gözlemlenmektedir [Yazdanpanah, 2019]. Ek olarak, kararlı haldeki hücum kenarı girdabı sayesinde, akış kanat yüzeyine yeniden bağlanarak daha az kaotik iz bölgesi oluşumunu sağlamaktadır. Burulma ekseninin arkasından uygulanmış bir aerodinamik kuvvet, kanadın hücum kenarının belirli bükülme açısı ile bükülmesine sebep olmaktadır [Ennos, 1988]. Bu bükülme, hücum kenarına direkt olarak bağlanmış bir destek çubuğuna (ing. stiffener), aynı büyüklükte ve zıt yönlü olarak iletilmektedir. Çubukta meydana gelen bükülme, veter yönünde kanat eğiminin değişmesine sebep olmaktadır. Eğer çubuk firar kenarına kadar ulaşıyorsa, kanat eğimi simetrik ve maksimum eğim veterin ortasında olacak şekilde gerçekleşmektedir. Kanat eğimi oluşumu, hücum kenarının burulma açısı, kanat veter uzunluğu ile doğru, hücum kenarı ile çubuk arasındaki açı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Örneğin, hücum kenarı ile çubuk arasındaki açı 0 derece (paralel) ise, maksimum kanat eğimi oluşumu görülecekken, açı 90 derece (dik) ise, minimum kanat eğimi oluşumu görülecektir. Kanat eğiminin pozitif yönde artması durumunda, firar kenarı etrafındaki sirkülasyon artmaktadır [Zhao vd., 2011]. Bu durumda daha büyük ve kuvvetli hücum kenarı girdabı oluşmaktadır. Bu sayede üretilen taşıma kuvveti miktarı artmaktadır. Destek çubuğu yönünün, kanat etrafındaki akışa olan etkisinin doğru bir şekilde incelenebilmesi için, kanat ile bütünleşmiş çok sayıda destek çubuğunun kanat yüzeyine yerleştirilmesi gerekmektedir. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi, çok sayıda destek çubuğuna sahip karmaşık bir kanat yapısının düşük üretim toleransı ile üretilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada amaç, farklı yönlerdeki eğilme sertliğinin, zamana bağlı değişen hareket gerçekleştiren yüksek hücum açılı esnek kanatlar etrafındaki akışa olan etkisinin incelenmesidir. Farklı açılarda yerleştirilmiş, çok sayıda destek çubuğuna sahip üç adet kanat modeli, üç boyutlu yazıcı yardımıyla PLA filamentli kullanılarak üretilmiştir. Farklı yönlerde eğilme sertliğine sahip kanatların etrafındaki akış alanı, iki boyutlu ve iki bileşenli parçacık görüntülemeli hız ölçme tekniği (2D2C PIV) kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, aynı yöntem ile üretilen destek çubuksuz kanat modeli etrafındaki akış alanı ile karşılaştırılmıştır.

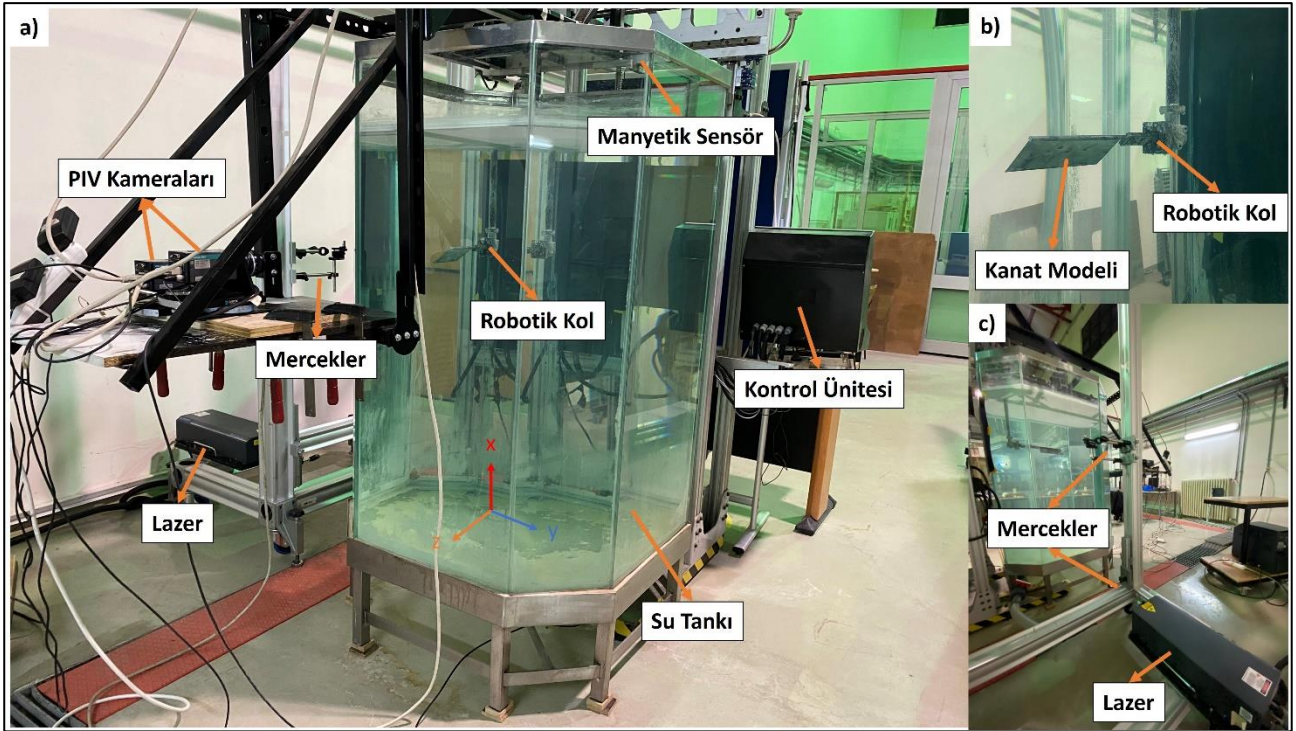
YÖNTEM

Bildirinin bu bölümü üç ana başlıktan oluşmaktadır. Birinci bölümde deney düzeneği, deneyde kullanılan yardımcı ekipmanlar ile tanıtılırken, ikinci bölümde kanat geometrisi ve kanat hareket

kinematiği hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Üçüncü bölümde ise üç boyutlu yazıcı yardımıyla kanat üretimi detaylı olarak açıklanmıştır.

Deney Düzeneği

Akış alanı testleri, sekizgen profile sahip bir su tankında gerçekleştirilmiştir. Su tankının paralel kenarları arasındaki uzaklık ile yüksekliği sırasıyla 1 ve 1.5 metredir. Su tankının yüzeyleri ışık geçirmesi amacıyla Pleksiglas malzemeden yapılmıştır. Kanat hareketleri, su tankının üzerine yerleştirilmiş bir adet robotik kol sistemi tarafından kontrol edilmiştir. Robotik kol sistemi; bir adet robotik kol, robotik kol ile hareket eden bir adet kamera masası ve bir adet kontrol ünitesi içermektedir. Kanatlar, robotik kola adaptör yardımı ile bağlanmıştır. Robotik kol, x ve y yönünde doğrusal, z yönünde ise açılabilir olmak üzere toplam üç serbestlik derecesine sahiptir. Robotik kolun hareketi, kontrol ünitesinde bulunan yazılım yardımıyla hareketin programlanması ile sağlanmaktadır. Su tankı ve robotik kol sistemi Şekil 1a ve 1b'de gösterilmiştir. Akış alanı görüntülenmesi, iki boyutlu ve iki bileşenli parçacık görüntüleme hız ölçme tekniği (2D2C PIV) ile yapılmıştır. Kanat açıklığının %75'indeki konum, çift darbeli, 532 nm dalga boyuna, 120 mJ/kavite enerjiye sahip ND: YAG Lazer ile uygun mercekler yardımı ile aydınlatılmıştır. Bu konumdaki görüntüler, yan yana konumlandırılmış iki adet HiSense MK II CCD model kamera ile kaydedilmiştir. Akış yönüne göre ikinci kamera ile, kanat iz bölgesinin ayrıntılı bir şekilde gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

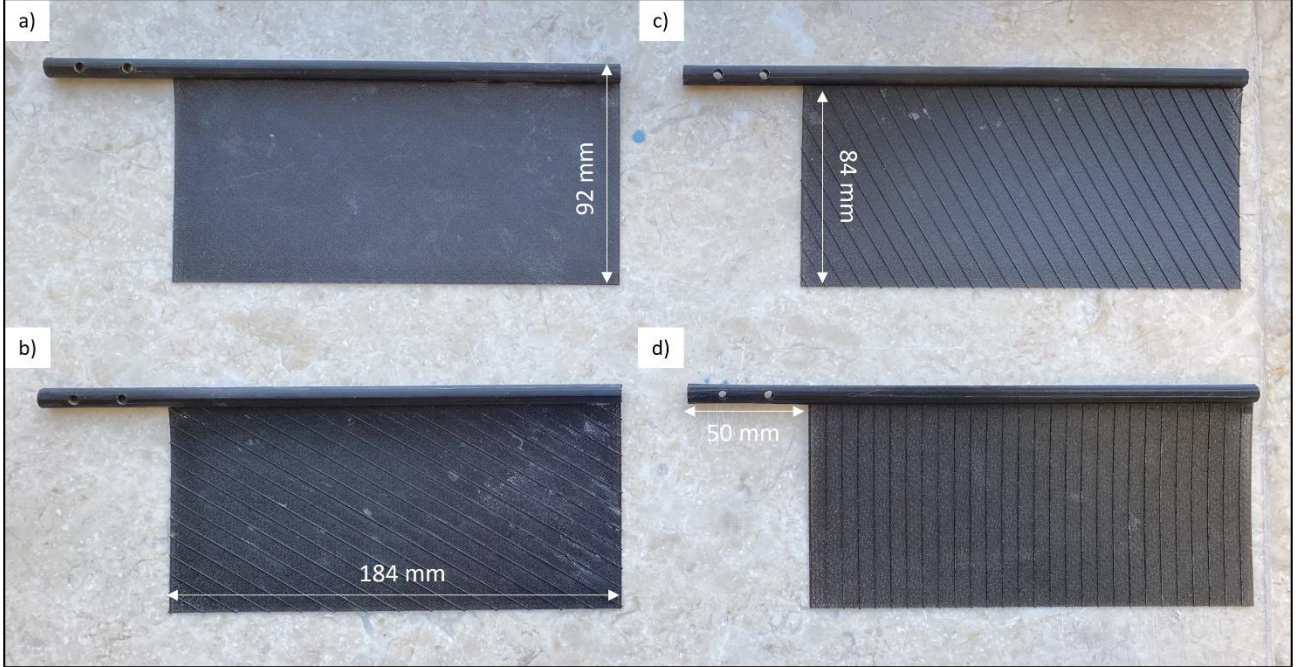


Şekil 1: Deney Düzeneği

Görüş alanının boyutunu arttırmak için kameralar yan yana konumlanmıştır. Hareket sırasında oluşan hücum ve firar kenarı girdaplarını daha iyi bir şekilde yakalamak amacı ile kamera yükseklikleri birbirinden farklıdır. Akış yönüne göre soldaki kamera daha alçak bir konumdayken, sağdaki kamera ise daha yüksek bir konuma yerleştirilmiştir. Bu sayede, $2562 \times 1354 \text{ pixel}^2$ boyutunda görüş alanı elde edilmiştir. Küçültme oranı her iki kamera için de eşit olup 16.85 olarak hesaplanmıştır. Her iki kamera da robotik kola bağlı kamera sehmasına yerleştirilip hareket ettiği için kanat modelleri ile aynı hareket kinematiğine sahiptir. Bu sayede görüş alanı kanata göre sabit bir boyuta sahiptir. Manyetik Hall sensörü, görüntü yakalamak için harici tetikleyici olarak kullanılmıştır. Aralarında 0.2 veter boyu uzaklık olacak şekilde konumlandırılan 20 adet mıknatıs yardımı ile hareketin istenilen anında görüntü kaydı alınmıştır. Kayıt işlemleri sırasında, Dantec FlowManager

v4.60 isimli yazılım kullanılmıştır ve kaydedilen görüntüler, DynamicStudio 2015a isimli yazılım kullanılarak işlenmiştir. Deney düzeneğine Şekil 1’de yer verilmiştir.

Deneyde test edilen kanat modelleri Şekil 2’de gösterilmiştir. Kanatlar, 92 mm veter uzunluğuna, 184 mm kanat açıklığına ve 0.15 mm yüzey kalınlığına sahiptir. Hücum kenarı, 4 mm yarı çapa sahip dairesel bir profilden oluşmaktadır. Kanat boyut parametreleri detaylı olarak Tablo 1’de verilmiştir. Kanatlar, veter yönünde farklı derecelerde esnektir ve kanat açıklığı boyunca eşit bükülme sertliğine sahiptir.



Şekil 2: Kanat Modelleri a) Destek Çubuksuz Kanat, b) 30° Destek Çubuklu Kanat, c) 60° Destek Çubuklu Kanat d) 90° Destek Çubuklu Kanat

Kanatların belirli bir yönde ekstra eğilme sertliğine sahip olması birbirlerine paralel ve aralarında 6 mm uzaklık bulunan çubuklar ile sağlanmıştır. Bu çubuklar, 0.15 mm yarı çapında yarı dairesel bir profile sahiptir ve kanat yüzeyi boyunca konumlandırılmıştır. Deneyler sırasında, 3 farklı destek çubuğu yönüne sahip kanat modeli test edilmiştir. Destek çubuğu yönleri sırasıyla 30, 60 ve 90 derecedir. Bu çubukların hücum kenarı ile yaptığı açı değiştirilerek, farklı yönlerde eğilim sertliği elde edilmesi sağlanmıştır.

Tablo 1: Kanat Boyut Parametreleri

Kanat Boyut Parametreleri	
Veter Uzunluğu	92 mm
Kanat Açıklığı	184 mm
Hücum Kenarı Yarıçapı	4 mm
Yüzey Kalınlığı	0.15 mm
Kanat Açıklık Oranı	2
Destek Çubuğu Parametreleri	
Destek Çubuğu Yarıçapı	0.3 mm
Destek Çubuğu Uzaklığı	6 mm
Destek Çubuğu Açısı	30°, 60°, 90°

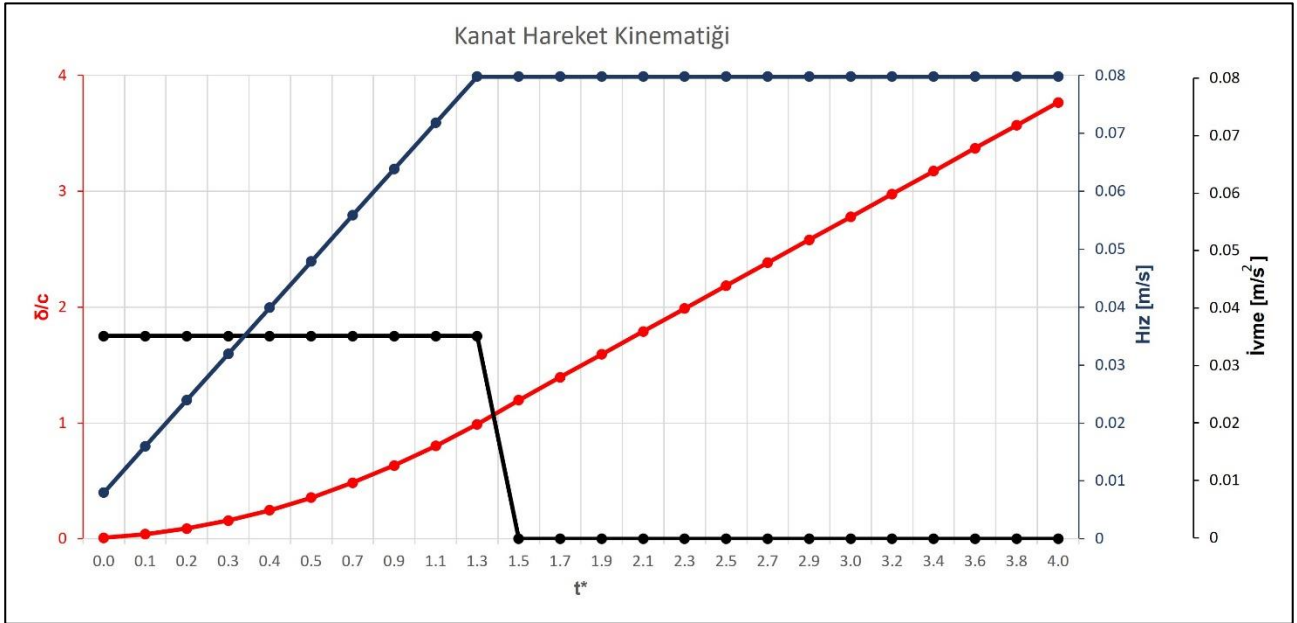
Kanatların belirli bir yönde ekstra eğilme sertliğine sahip olması birbirlerine paralel ve aralarında 6 mm uzaklık bulunan çubuklar ile sağlanmıştır. Bu çubuklar, 0.15 mm yarı çapında yarı dairesel bir profile sahiptir ve kanat yüzeyi boyunca konumlandırılmıştır. Deneyler sırasında, 4 farklı destek çubuğu yönüne sahip kanat modeli test edilmiştir. Destek çubuğu yönleri sırasıyla 30, 60 ve 90 derecedir. Bu çubukların hücum kenarı ile yaptığı açı değiştirilerek, farklı yönlerde eğilme sertliği elde edilmesi sağlanmıştır. Destek çubuksuz kanadın yapısal özelliklerine Tablo 2’ de yer verilmiştir.

Tablo 2: Destek Çubuksuz Kanadın Yapısal Özellikleri

Destek Çubuksuz Kanadın Yapısal Özellikleri	
Eğilme Sertliği	$1.24 \times 10^{-4} \text{ Nm}^2$
Bükülme Parametresi	0.16
Elastisite Modülüsü	2850 MPa

Hareket Kinematığı

Kanat hareketi iki aşamadan oluşmaktadır. Hareketin ilk aşamasında ($0 \leq \delta^* < 1.0$), bir veter uzunluğu yol boyunca, kanatlar önceden 0.08 m/s olarak tanımlanan terminal hız elde edilene kadar 0.035 mm/sn^2 sabit bir ivme ile hızlanmaktadır. İkinci aşamada ise ($1.0 < \delta^* \leq 3.8$), üç veter boyu mesafe boyunca kanatlar sabit terminal hızıyla ötelemeye devam etmektedir. Hareket kinematığı Şekil 3’te gösterilmiştir. δ^* , kanadın yol aldığı boyutsuz mesafedir ve $\delta^* = \delta/c$ olarak ifade edilmektedir. Ayrıca t^* konvektif zamandır ve $t^* = t \cdot V_t/c$ olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3: Kanat Hareket Kinematığı Grafiği

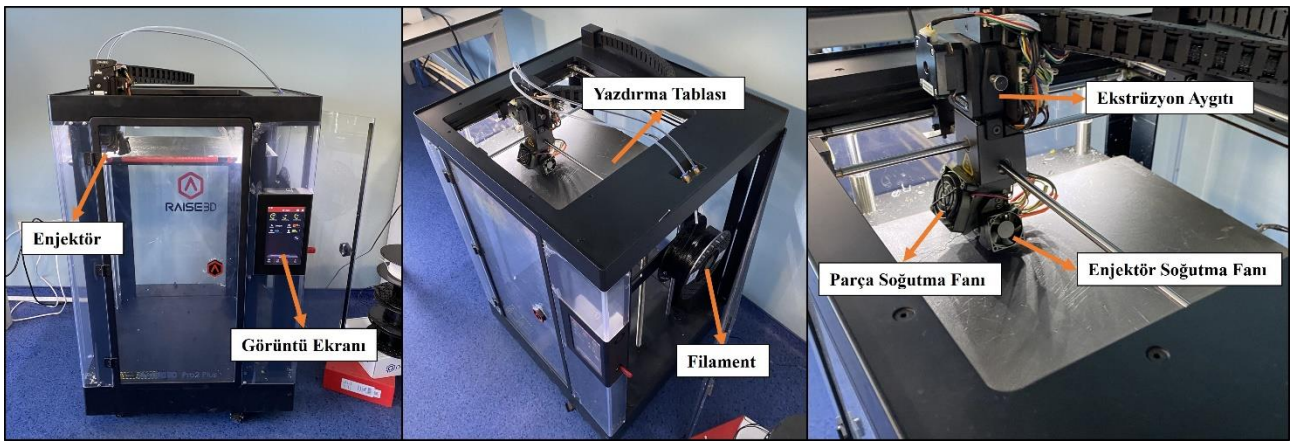
Reynolds sayısı hareket esnasında 7360'tır. Bu hesaplamada veter uzunluğu 92 mm ve terminal hızı 0,08 m/s olarak alınmıştır. Hücum açısı hareketin başlangıcında sabit ve 45° 'dir. Bununla birlikte, veter yönündeki esneklik nedeniyle hareket boyunca kanatların sahip olduğu geometrik hücum açısı değişmektedir. Kanat hareket kinematığı parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Kanat Hareket Kinematığı

Kanat Hareket Kinematığı	
Terminal Hız	0.08 m/s
İvme	0.035 m/s ²
Reynolds Sayısı	7360
Hücum Açısı	45°
İvmelenme Evresi	$0 \leq \delta^* \leq 1.0$
Sabit Hızlı Hareket Evresi	$1.0 < \delta^* \leq 3.8$

Kanat Üretimi

Kanat modellerini üretmek için FDM tabanlı 3D yazıcı olan Raise 3D Pro Plus tercih edilmiştir. Filament olarak yüksek baskı kalitesi nedeniyle Porima PLA Black olarak seçilmiştir. Ayrıca bu marka, filamentin mekanik özelliklerinin bulunabileceği bir veri sayfası sunmaktadır. Lazer ışığının kanat yüzeyinden yansımaları minimuma indirmek için siyah renk tercih edilmiştir. Kanat üretimi sırasında kullanılan yazıcı, Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4: Üç Boyutlu Yazıcı

Modeller 0,5 mm, 0,38 mm, 0,22 mm ve 0,22 mm katman yüksekliklerine ve 0°, 90°, 45° ve 45 çizgi yönlerine sahip dört katmandan oluşan platform yüzeyine basılmıştır. İlk iki katman için yazdırma hızı sırasıyla 8 mm/sn ve 30 mm/sn'dir. Bu iki yüzeyin kanat yüzey kalitesi üzerinde küçük bir etkisi olduğu için platform yüzeyinin yazdırma tablasına daha iyi yapışması ve daha kısa bir baskı süresi elde edilmesi amaçlanmıştır. Yüzey katmanları olarak adlandırılan son iki katmanda ise baskı hızı 20 mm/sn'ye düşürülerek kaliteli, pürüzsüz ve boşluksuz bir kanat yüzey elde edilmiştir. Ayrıca son iki katman, modelin ilk katmanıyla aynı yazdırma yönelimine sahip olup, iki katmanın temas yüzeyi en aza indirilerek birbirlerinden kolaylıkla ayrılabilirliği sağlanmıştır. Modeller platform yüzeyinden ince bir metal sac yardımı ile ayrılmıştır, bu nedenle ayırma işlemi sırasında herhangi bir kimyasal kullanılmamıştır.

Kanat modelleri 0,05 mm katman yüksekliğine sahip üç katmandan oluşmaktadır. Bu nedenle farklı kanat modellerinin destek çubuğu kalınlıkları hariç toplam kalınlıkları aynı ve 0,15 mm'dir. Bu değer, yukarıda bahsedilen 3D yazıcının düzgün bir yüzey için basabileceği minimum kalınlıktır. Yani, katman kalınlığı 0,05 mm'den daha ince olan bir model, üzerinde bazı boşluklar bulunan zayıf yüzey kalitesine sahip olmaktadır ve yüzey kalınlığı 0,15 mm'den az olan bir model, yapısal olarak çok fazla kırılabilir olduğu için kaba yüzeyden düzgün bir şekilde ayrılmamaktadır. Üç katmanın tümü için, yazdırma hızı 30 mm/sn olup baskı yönleri sırasıyla -45°, 90° ve 45°'dir. Bu sayede 90° yazdırma yönü ile sağlanan kanat açıklığı boyunca ekstra bükülme direnci elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Enjektörün baskı sıcaklığı 220 °C olup, yazıcı yazdırma tablası sıcaklığı ise 65 °C'dir. Baskı parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4: Kanat Yazdırma Parametreleri

Kanat Yazdırma Parametreleri	
Filament Tipi	PLA
Katman Yüksekliği	0.05 mm
Yazdırma Yönü	-45°, 90°, 45°
Yazdırma Hızı	30 mm/sn
Enjektör Sıcaklığı	220°C

Kanatların düzgün bir biçimde basıldığından emin olmak için, üç aşamalı üretim kontrolü yapılmıştır. İlk aşamada yazdırılan kanatlar gözle kontrol edilerek platform yüzeyinden kanat ayırma işlemi sırasında oluşabilecek çatlak veya plastik deformasyonlar tespit edilmeye çalışılmıştır. İkinci aşamada kanat uzunlukları cetvel yardımıyla ölçülerek kontrol edilmiştir. Bu nedenle tüm kanat modelleri önceden belirlenmiş ölçülere sahiptir. Son aşamada kanat kenarlarının fikstür ile örtüşüp örtüşmediğini kontrol etmek amacıyla kanatlar, aynı işlemle basılan bir fikstüre yerleştirilmiştir. Deneyde sadece üç kontrol aşamasından geçen kanatlar kullanılmıştır. Herhangi bir adımda başarısız olan bir kanat, hatalı üretim olarak tanımlanmıştır ve yeni kanat üretimine başlanmıştır. Dolayısıyla bu kontrol yöntemi ile kanat yüzeyindeki herhangi bir çatlak, boşluk veya plastik deformasyon ihtimali ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 5: Kanat Modeli ve Fikstür

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, çalışmadan elde edilen sonuçlar üç ana başlıkta toplanmıştır. Birinci bölümde, geometrik hücum açısının hareket boyunca değişimi anlatılırken, ikinci bölümde hücum kenarı girdabı sirkülasyon değerlerinin zamana bağlı değişimine yer verilmiştir. Son bölümde ise, farklı destek çubuğu etkisinin akış alanına etkisi gösterilmiştir.

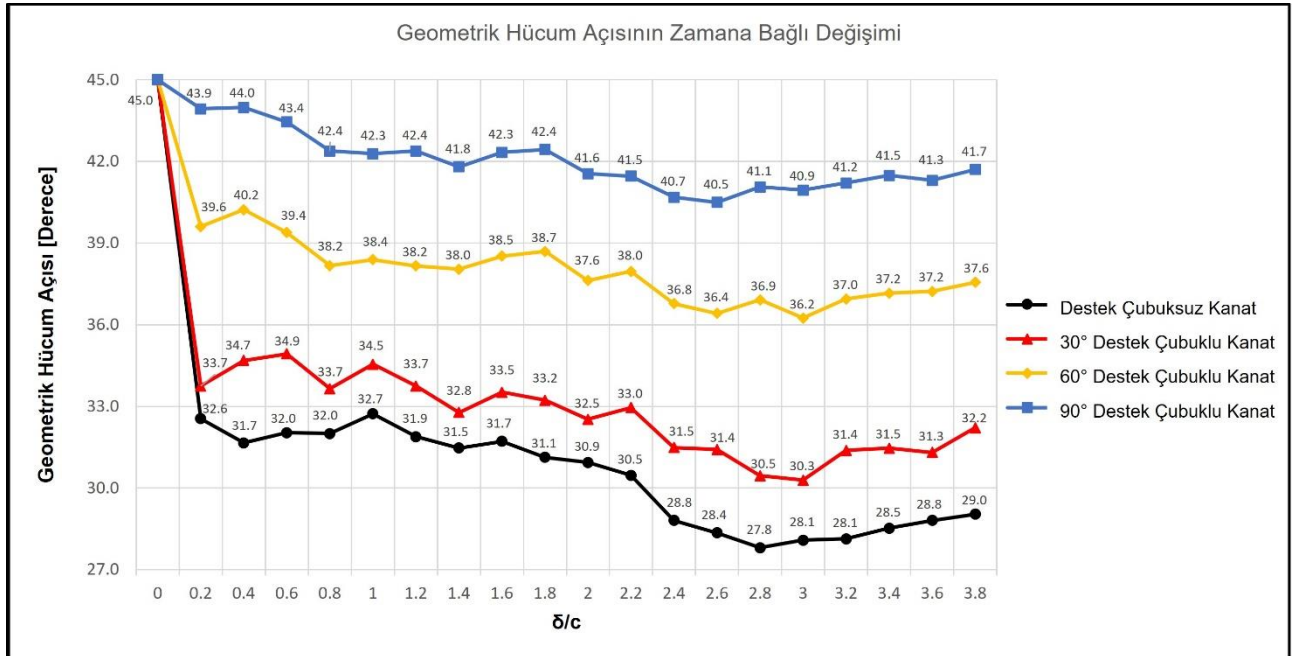
Geometrik Hücum Açısı Değişimi

Şekil 6'da destek çubuklu ve destek çubuksuz kanatların hareket boyunca geometrik hücum açılarının zamansal değişim grafiği verilmiştir. Geometrik hücum açısı değerlerini hesaplamak için, hücum ve firar kenarının PIV görüntülerinden elde edilen piksel değerleri kullanılmıştır. Denklem

1'de geometrik hücum açısının hesaplandığı formül verilmiştir. Denklem 1' de, Y_{HK} ve Y_{FK} kanadın hücum ve firar kenarının y eksenindeki pozisyonunu gösterirken X_{HK} ve X_{FK} kanadın hücum ve firar kenarının x eksenindeki pozisyonunu göstermektedir.

$$\alpha_{geo} = \arctan\left(\frac{Y_{HK} - Y_{FK}}{X_{HK} - X_{FK}}\right) \quad (1)$$

Test edilen her kanadın hareketin başlangıcındaki hücum açısı, kontrol ünitesinde planlandığı gibi 45°'dir. Beklendiği gibi kanatlar, kanatların üst yüzeyine entegre edilen destek çubuklarının sağladığı farklı veter yönünde esnekliğine bağlı olacak şekilde hareket sırasında farklı şekilde deformasyona uğramışlardır. Hareketin başlangıcında ($0 \leq \delta^* \leq 0.2$), destek çubuksuz kanatta ve 30° ve 60° destek çubuklu kanatlarda, kanadın aniden harekete geçiyor olması sebebiyle geometrik hücum açısında ani bir düşüş görülmüştür. Yani destek çubuksuz kanat için yaklaşık 12.4°'lik bir düşüş elde edilirken, bu düşüş 30° ve 60° destek çubuklu kanatlar için sırasıyla 11.3° ve 5.4° olmaktadır. 90° destek çubuklu kanat ise geometrik hücum açısında en az düşüş görülen kanat olmuştur. İvmelenme hareketinin devamında, geometrik hücum açısı 60° ve 90° destek çubuklu kanatlar için azalmaya devam ederken, 30° destek çubuklu ve destek çubuksuz kanatlar için neredeyse sabit kalmıştır. Sabit hızla hareket evresinde ise ($1.0 < \delta^* \leq 3.8$), tüm kanatlar için geometrik hücum açısında azalma görülmüştür. Bu aşamanın ilk bölümünde ($1.0 < \delta^* \leq 2.0$), destek çubuksuz kanat ve 30° destek çubuklu kanat için geometrik hücum açısı monoton olarak azaltılırken, 60° ve 90° destek çubuklu kanatlar için yaklaşık olarak sabittir. Bu aşamanın orta kısmında ($2.0 < \delta^* \leq 3.0$), tüm kanatlar için geometrik hücum açısı azalmıştır ve bu bölümün sonunda her kanat için minimum geometrik hücum açısı değerlerine ulaşılmıştır ($2.6 \leq \delta^* \leq 3.0$). Destek çubuksuz kanat için en düşük geometrik hücum açısı değeri 27.8° iken, 90° destek çubuklu kanat için ise en yüksek geometrik hücum açısı değeri 40.5°'dir. 30° ve 60° destek çubuğuna sahip kanatlar ise sırasıyla ikinci en düşük 30.3° ve üçüncü en düşük 36.3° geometrik hücum açısına ulaşmıştır. Bu aşamanın son bölümünde ($3.0 < \delta^* \leq 3.8$), tüm kanatlar için geometrik hücum açısı değeri biraz artmıştır.



Şekil 6: Geometrik Hücum Açısının Zamana Bağlı Değişimi

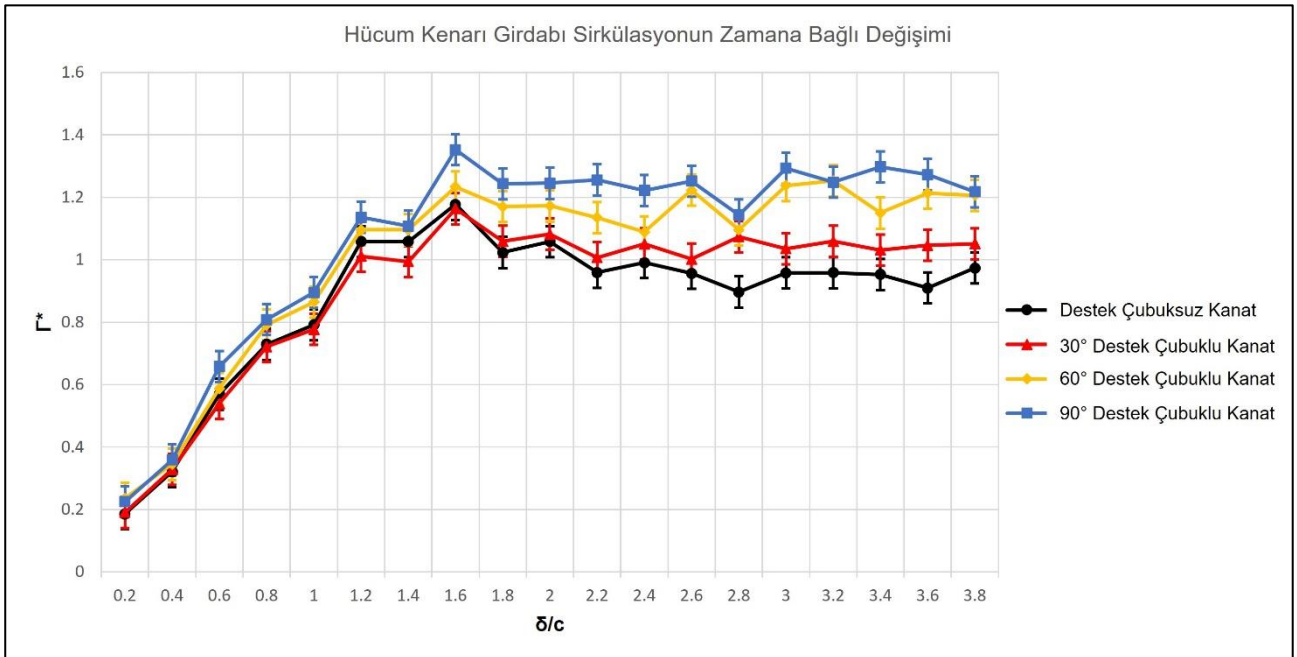
Şekil 6'ya göre, destek çubuğunun varlığının, kanadın veter yönünde eğilme sertliğini arttırarak kanadın veter yönündeki esnekliğini değiştirdiği ifade edilebilir. Bu nedenle, destek çubuksuz kanat, en yüksek veter yönünde esnekliğe sahip olduğu için hareket sırasında en düşük geometrik hücum açısına ulaşmıştır. Ayrıca, destek çubuğu yönü kanadın veter yönündeki esnekliğini doğrudan

etkilemektedir. Destek çubuğu ile hücum kenarı arasındaki açı arttığında, kanadın bükülme direnci de artmaktadır. Bu nedenle kanat, Veter yönündeki bir deformasyona karşı daha fazla dirence sahip olur. Sonuç olarak, destek çubuklu kanatlar arasında, 90° destek çubuklu kanat, veter yönünde en yüksek eğilme sertliğine sahip olması sebebiyle hareket sırasında en yüksek geometrik hücum açısını elde ederken, 30° destek çubuklu kanat ise en düşük geometrik hücum açısına ulaşmıştır.

Hareket sırasında destek çubuksuz kanadın ortalama geometrik hücum açısı 31.1° iken, 30°, 60° ve 90° destek çubuklu kanatlar için ortalama geometrik hücum açısı ise sırasıyla 33.3°, 38.3° ve 42.1°'dir. Destek çubuksuz kanat ile karşılaştırıldığında, ortalama geometrik hücum açısı 90°, 60° ve 30° destek çubuklu kanatlar için sırasıyla yaklaşık 26.35%, 21.27% ve %8.60% artmıştır.

Hücum Kenarı Girdabı Sirkülasyonu

Hareket sırasında hücum kenarı girdabı sirkülasyonu değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Hareketin ivmelenme aşamasında ($0 \leq \delta^* \leq 1.0$), hücum kenarı girdabı sirkülasyonu yaklaşık olarak sabit bir eğime sahiptir ve tüm kanatlar için monoton olarak artmıştır. Beklenildiği gibi, 90° destek çubuklu kanat en yüksek hücum kenarı girdabı sirkülasyonu değerini üretmiştir. Bu kanadı 60° destek çubuklu kanat takip etmiştir ve ikinci en yüksek değere sahip hücum kenarı girdabı sirkülasyonunu üretmiştir. Destek çubuksuz kanat ise tüm kanatlar içerisinde en düşük hücum kenarı girdabı sirkülasyonu değerini üreten kanat olmuştur. Bu durum, destek çubuğunun varlığının kanat tarafından üretilen hücum kenarı girdabı sirkülasyonu değerini arttırdığını göstermiştir. İvmelenme aşamasında, test edilen tüm kanatlar için üretilen hücum kenarı girdabı sirkülasyonu değeri hızla yükselmiştir. Hareketin sabit hız ile hareket evresinin başlangıcında ($1.0 < \delta^* \leq 1.4$), hücum kenarı girdabı sirkülasyonu tüm kanatlar için artmaya devam etmiştir. Kanadın 1.4 veter boyu ilerlemesinden sonra ($1.4 < \delta^*$), tüm kanatlar, hareketin devamı boyunca yaklaşık olarak sabit kalacak şekilde hücum kenarı girdabı sirkülasyonu açısından benzer bir eğilim ortaya koymuştur. Bununla birlikte, hücum kenarı girdabı sirkülasyonunun büyüklüğü, hücum kenarı girdabının varlığına ve veter yönünde farklı derecede esneklik sağlayan destek çubuğu açısına göre değişiklik göstermiştir.



Şekil 7: Hücum Kenarı Girdabı Sirkülasyonunun Zamansal Değişimi

Destek çubuklu kanatlar arasında, veter yönünde en yüksek eğilme sertliğine sahip olan 90° destek çubuklu kanat en yüksek hücum kenarı girdabı sirkülasyonunu üretirken, onu yine ikinci en büyük eğilme sertliğine sahip 60° destek çubuklu kanat takip etmektedir. En az eğilme sertliğine sahip 30° destek çubuklu kanat ise en düşük hücum kenarı girdabı sirkülasyonu değerini üretmiştir. Dolayısıyla destek çubuğu yönünün hücum kenarı girdabı sirkülasyonu açısından kanat etrafındaki akış alanını etkilediği açıkça gözlemlenmiştir. Destek çubuğu ve hücum kenarı arasındaki açı değiştirilerek

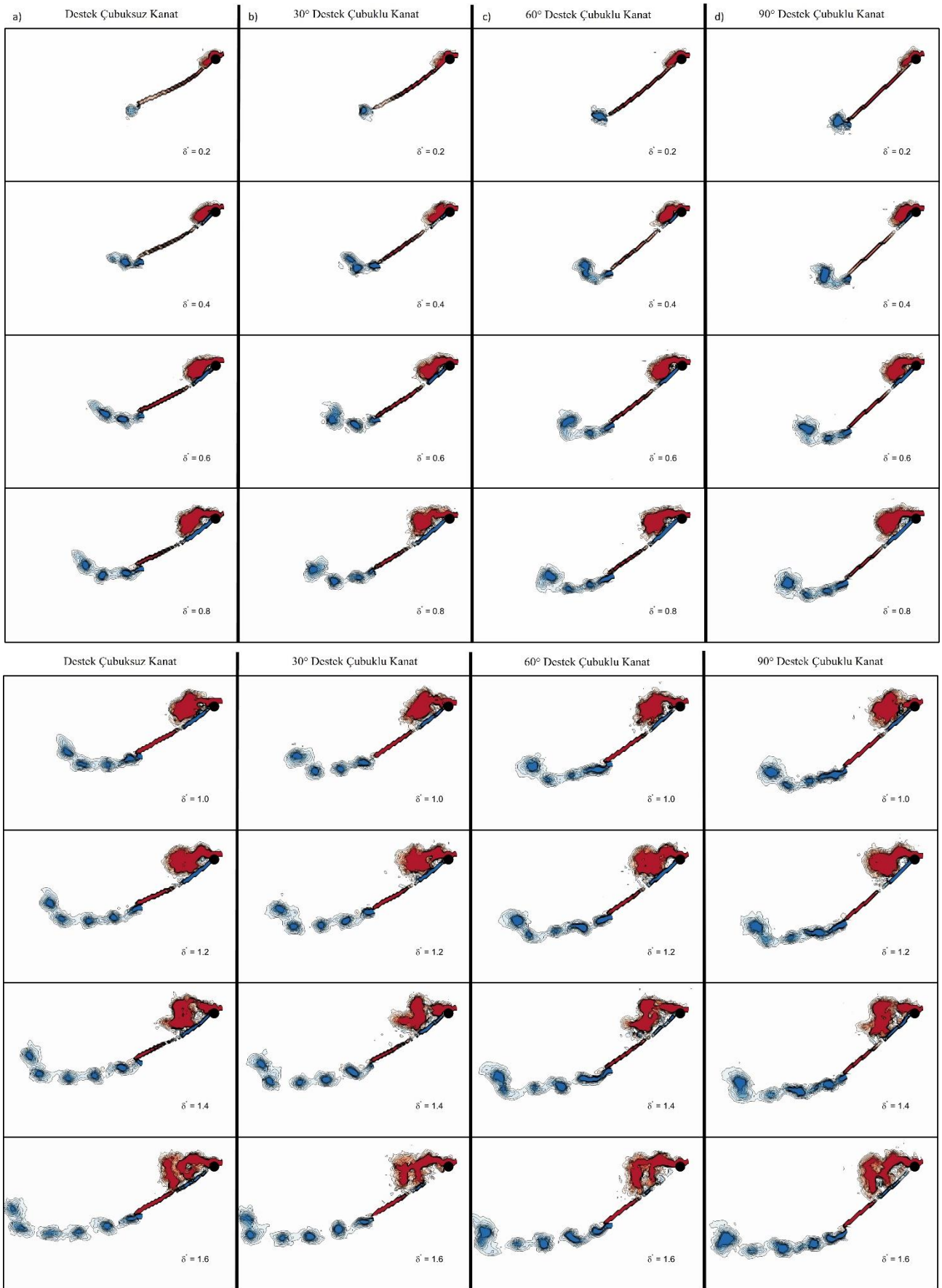
hücum kenarı girdabı sirkülasyonu değerinde farklılık elde edilebilir. Destek çubuğu ve hücum kenarı arasındaki açı arttığında, veter yönünde kanadın eğilme sertliğini artmaktadır. Bu durum, hareket sırasında kanadın daha yüksek bir geometrik hücum açısına sahip olmasına neden olur ve bu da daha büyük hücum kenarı girdabı sirkülasyonu üretimi ile sonuçlanır. Hareket boyunca,

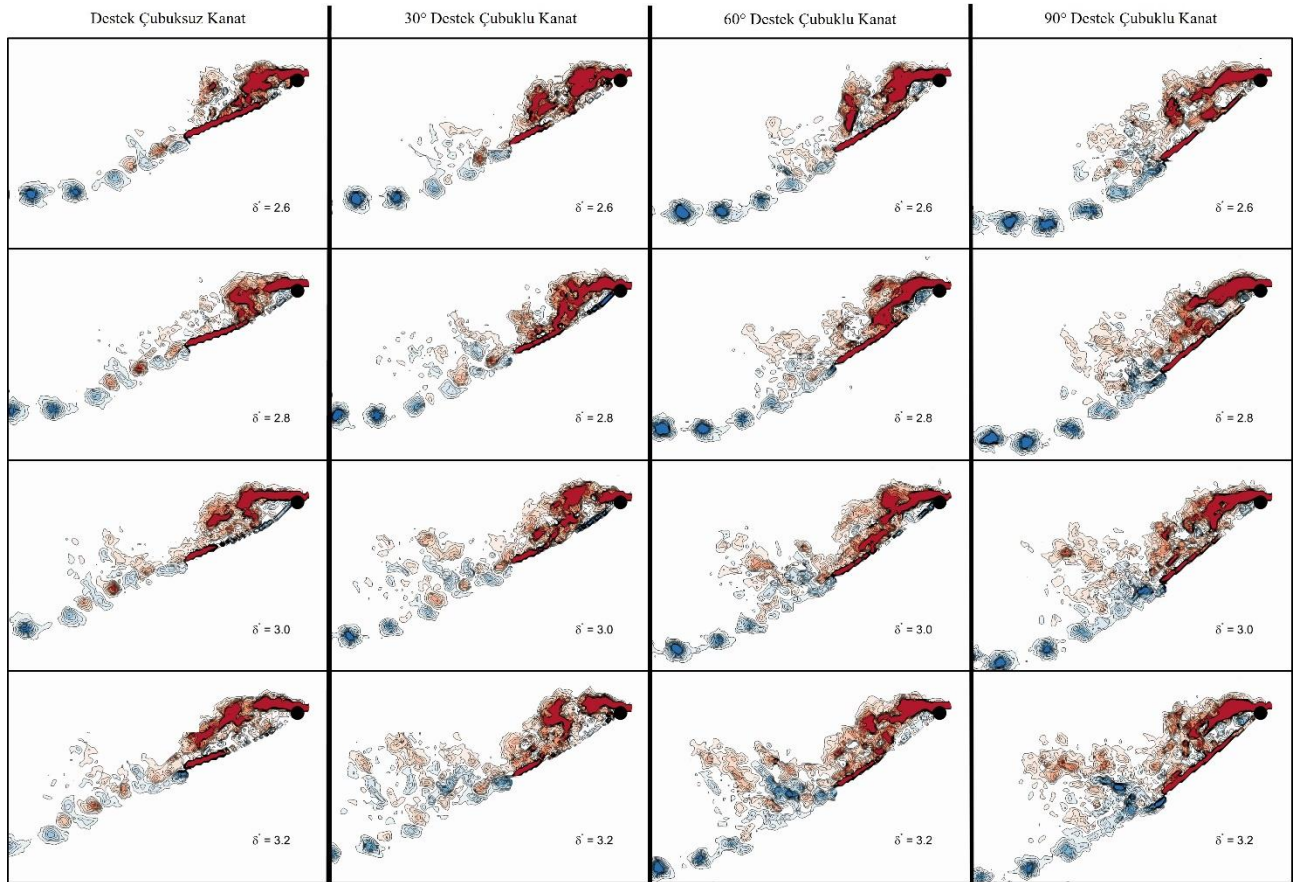
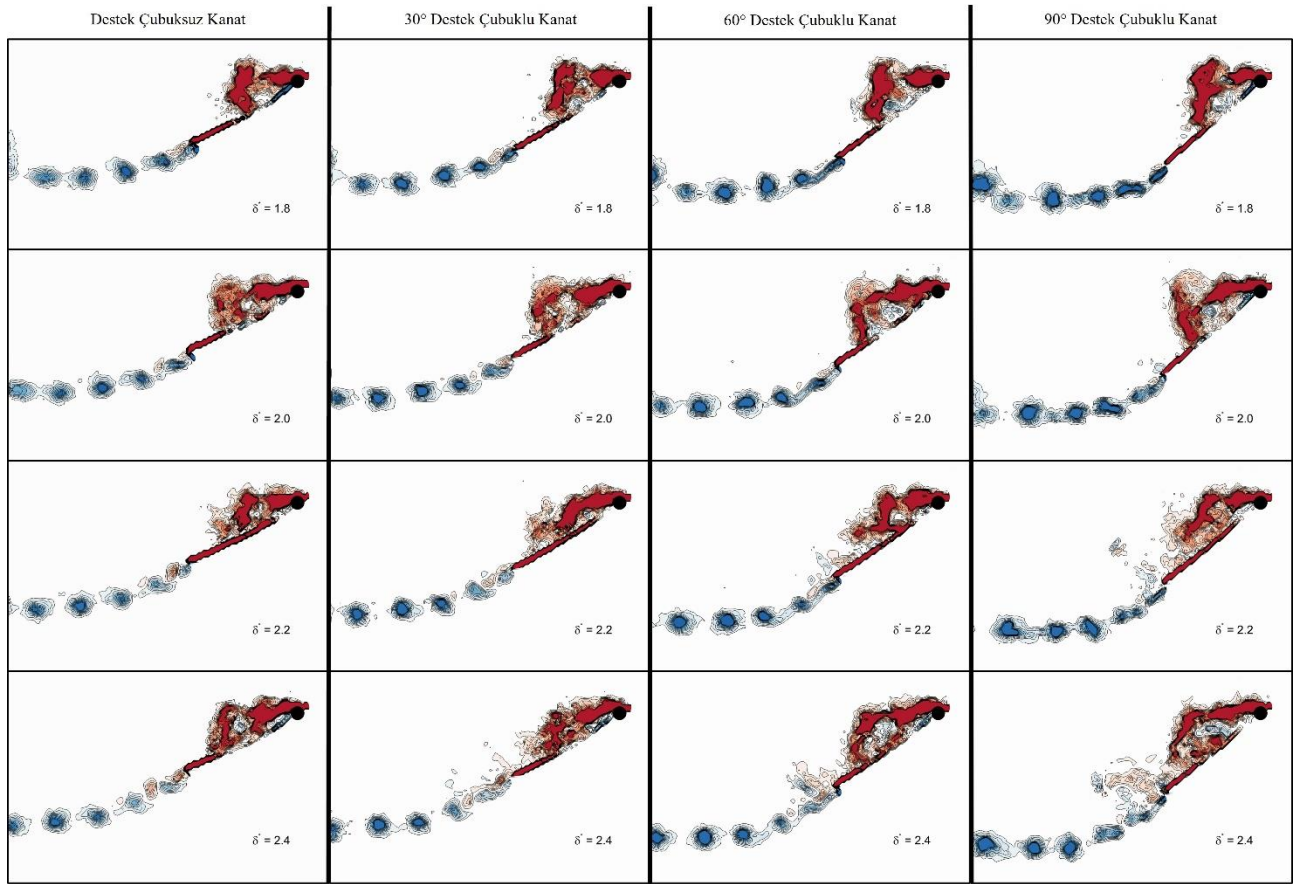
Ayrıca, destek çubuksuz kanadın ürettiği ortalama boyutsuz hücum kenarı girdabı sirkülasyonu değeri 0.87 iken, 90°, 60° ve 30° destek çubuklu kanatlar için sırasıyla 1.07, 1.01 ve 0.91 olmuştur. Dolayısıyla, bu değerler destek çubuksuz kanatın değerleri ile karşılaştırıldığında ortalama olarak, destek çubukları sayesinde hücum kenarı girdabı sirkülasyonu değerlerinde yaklaşık 17.97%, 13.14% ve 4.03% artışlar elde edilmiştir.

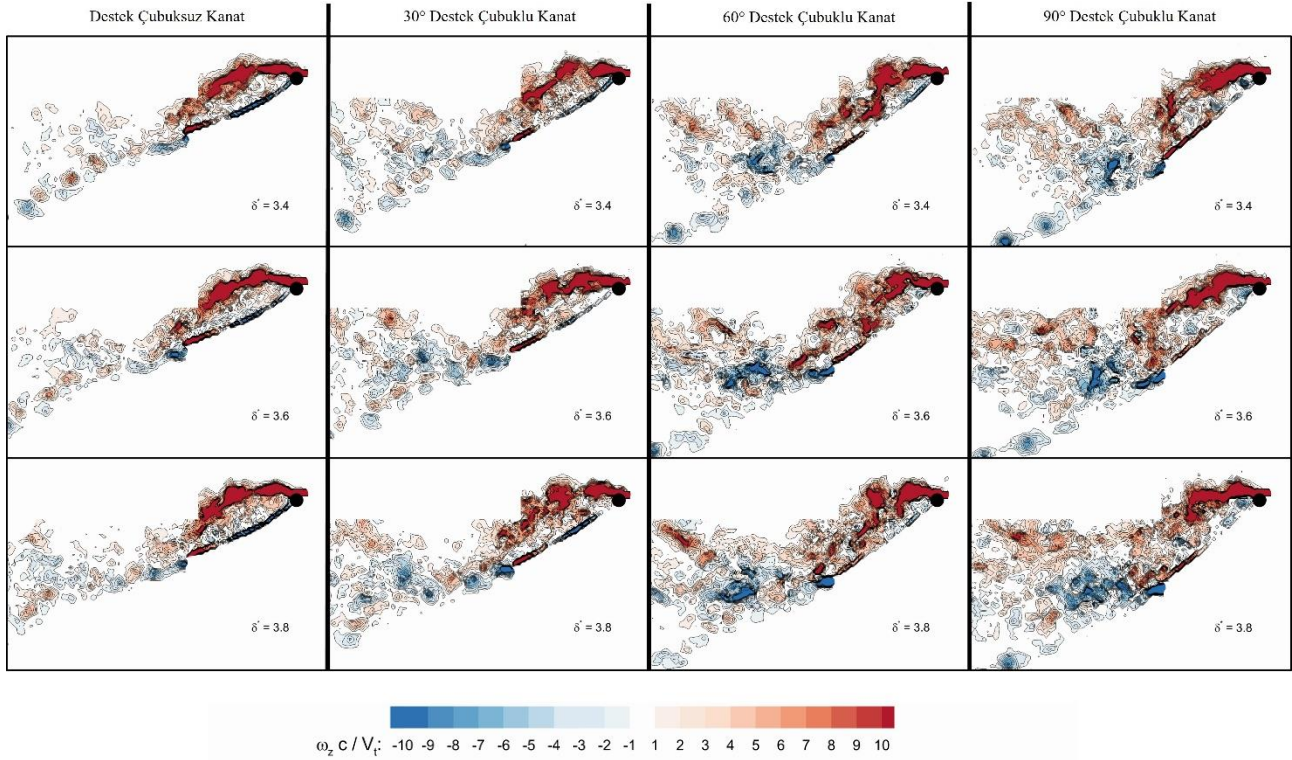
Akış Karakteristiği

Test edilen tüm kanatlar için, %75 kanat açıklığı konumlarında düzlem dışı girdap hesaplanmıştır ve düzlem dışı girdap konturları Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'e göre, deneyde test edilen tüm kanatlar için, hareketin ilk aşamalarında kararlı bir hücum kenarı girdabı oluştuğu ve bu girdabın uzun bir hareket süresi boyunca tutarlılığını koruduğu gözlemlenmiştir. Yaklaşık 2.4 veter boyu ilerleme boyunca ($0 \leq \delta^* \leq 2.4$), hücum kenarı girdabı yapısı ve hareketi tüm kanatlar için benzer özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, 2.4 veter uzunluğu hareketten sonra ($2.4 < \delta^* \leq 3.8$), kanatların veter esnekliğine bağlı olarak farklı geometrik hücum açısı ve kanat yeniden hizalanması nedeniyle hücum kenarı girdabı yapıları birbirinden ayırt edilmeye başlamıştır. Örneğin $\delta^* = 2.4$ 'te, 60° ve 90° destek çubuğuna sahip kanatlar için, hücum ve firar kenarından ayrılan kayma tabakaları birbirleriyle etkileşmeye başlamıştı. Bu durum, kanat izi bölgesinde küçük ölçekli girdap yapılarının oluşmasına neden olmuştur. Bu etkileşim, 30° destek çubuklu kanat ve destek çubuksuz kanat için sırasıyla 2.6 ve 3.0 veter uzunluğu hareketten sonra gözlemlenmiştir. Kayma katmanlarının bu etkileşimleri, hareketin sonuna kadar devam etmiştir ve bu da zaman boyunca kanat izinde daha kaotik bir akışa oluşmasına sebep olmuştur. Üç veter uzunluğu hareketten sonra ($3.0 < \delta^* \leq 3.8$), 60° ve 90° destek çubuklu kanatlar için kanat izinde tamamen kaotik akış gözlemlenmiştir. Test edilen tüm kanatlar arasında, destek çubuksuz kanat, daha küçük bir geometrik hücum açısı ile hareket etmesi sonucu kanat izinde daha az kaotik bir akış görülmüştür. Ayrıca kanat akış yönünde kolaylıkla yeniden hizalandığından ötürü, yüzeye en yakın hücum kenarı girdabı hareketi destek çubuksuz kanat çevresinde görülmüştür. Bu kanadı sırasıyla 30° ve 60° destek çubuklu kanatlar takip etmiştir. Beklendiği gibi, hücum kenarı girdabı, 90° destek çubuklu kanatta, kanat yüzeyine yakın bir konumda hareket edememiştir.

Bu sonuçlar, destek çubuğu varlığının, veter yönünde ekstra bir eğilme direnci sağlayarak kanadın hareket boyunca daha yüksek bir hücum açısına sahip olmasını sağlamıştır. Bu durum, kanat etrafındaki akış alanını doğrudan etkilemiştir. Ek olarak, destek çubuğu yönü değiştirilerek, kanat etrafında farklı özelliklere sahip akış elde edilebilmesi mümkündür.







Şekil 8: Düzlem Dışı Girdaplılık Konturu a) Destek Çubuksuz Kanat, b) 30° Destek Çubuklu Kanat, c) 60° Destek Çubuklu Kanat, d) 90° Destek Çubuklu Kanat

SONUÇ

Bu çalışmada, doğrusal öteleme hareketi yapan esnek kanatlar için hücum kenarı ile destek çubuğu arasındaki açının akış karakteristiği üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Kanat yüzeyine ardışık olarak entegre edilen destek çubuklarının oryantasyonları değiştirilerek farklı yönlerde bükülme sertliğine sahip kanatlar elde edilmiştir. Kanat yüzeyindeki destek çubuklarının hücum kenarı ile yaptığı açı artırılarak, bu durumda destek çubuğu veter yönüne doğru daha fazla yönelmektedir ve kanadın veter yönünde esnekliği azalmaktadır. Bu nedenle, kanat üzerine hücum kenarına 90° açı yapan destek çubukları entegre edilerek veter yönünde eğilme sertliği en yüksek kanat elde edilmiştir. Benzer şekilde hücum kenarı arasında 60° ve 30° açı yapan destek çubuklu kanatlar, veter yönünde eğilme sertliği açısından sırasıyla ikinci ve üçüncü kanat olarak sıralanmıştır. Destek çubuksuz kanat ise kanat yüzeyine entegre edilmiş bir destek çubuğuna sahip olmadığı için en yüksek veter yönünde esnekliğe sahip olmuştur. Kanat hareketi, sabit ivmelenme evresi ve sabit hızla hareket evresi olmak üzere iki aşamadan oluşmuştur. Hareketin ilk aşamasında, kanat bir veter uzunluğu boyunca ($0 \leq \delta^* \leq 1.0$) sabit bir ivme ile hareketsiz konumdan hızlanmaya başlamıştır. Birinci aşamanın sonunda kanat, önceden belirlenmiş olan terminal hıza ulaşmaktadır. Hareketin ikinci aşamasında ise kanat, ivmelenme aşamasının sonunda elde edilen sabit terminal hız ile uç veter uzunluğu boyunca ($1.0 < \delta^* \leq 3.8$) öteleme hareketi yapmıştır. Hücum açısı, hareket başında bütün kanatlar için aynı ve 45°'dir. Farklı destek çubuğu yönleri tarafından sağlanan farklı veter yönünde esnekliğe sahip kanatların etrafındaki akış alanı, iki boyutlu iki bileşenli parçacık görüntü hızı (2D2C PIV) ile deneysel olarak incelenmiştir. Hareket sırasındaki geometrik hücum açısının zamansal değişimi, destek çubuğunun varlığının kanatların bükülme sertliğini giriş yönünde artırdığını göstermiştir. Yani, destek çubuksuz bir kanat, destek çubuklu kanatlara kıyasla daha düşük geometrik hücum açısını elde etmektedir. Çünkü, bu kanat veter yönünde daha fazla deformasyon kabiliyetine sahip olmanın bir sonucu olarak akış yönünde kolaylıkla hizalanabilmektedir. Bununla birlikte, hücum kenarı ile destek çubuğu arasındaki açı, veter yönündeki kanat esnekliğini değiştirmektedir. Örneğin 90° destek çubuklu kanat, hareketin her aşamasında destek çubuğu açısı daha düşük olan diğer kanatlara kıyasla en yüksek geometrik hücum açısına ulaşmıştır. Beklendiği gibi, 60° ve 30° destek çubuğuna sahip kanatlar, sırasıyla ikinci ve üçüncü en yüksek geometrik hücum açısına sahip olmuştur. Hareket boyunca, destek çubuksuz kanadın ortalama hücum açısı

31.1° iken, 30°, 60° ve 90° destek çubuklu kanatların ortalama hücum açıları ise sırasıyla 33.3°, 38.3° ve 42.1°'dir.

PIV ölçümleri, hareketin ilk başında, deneyde test edilen tüm kanatlar için kararlı bir hücum kenarı girdabının oluştuğunu ve bu girdabın uzun bir hareket süresi boyunca kararlılığını koruduğunu göstermiştir. Yaklaşık 2.4 veter uzunluğu boyunca ($0 \leq \delta^* \leq 2.4$), kanatlar etrafında oluşan girdap yapıları benzer özelliklere sahiptir. Ancak 2.4 veter boyu hareketten sonra ($2.4 < \delta^* \leq 3.8$), girdap yapılarının, kanatların veter yönündeki esnekliklerine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Üç veter uzunluğu hareketten sonra ise $3.0 < \delta^* \leq 3.8$, 60° ve 90° destek çubuğu açısına sahip kanatlar için izde tamamen kaotik akış gözlenmiştir. Test edilen kanatlar içerisinde, destek çubuksuz kanat hareket boyunca en düşük geometrik hücum açısına ulaşmıştır ve bu durum kanat izinde daha az kaotik akış görülmesine sebep olmuştur. Ayrıca hareket boyunca akış yüzeye bağlı kalmıştır.

Hücum kenarı girdabı sirkülasyonu ise, hareketin ivmelenme evresinde ($0 \leq \delta^* \leq 1.0$), test edilen tüm kanatlar için monoton olarak yaklaşık olarak sabit bir eğim ile artmıştır. Öte yandan sabit hızla hareket evresinde ($1.0 < \delta^* \leq 3.8$), tüm kanatlar için hücum kenarı girdabı sirkülasyonu hareketin devamındaki 0.6 veter uzunluğu boyunca ($1.0 < \delta^* \leq 1.6$) artmaya devam etmiştir. Bu noktadan sonra biraz azalma eğilimi göstermiştir ($1.6 < \delta^* \leq 2.8$). Devamında ise, hareketin sonuna kadar ($2.8 < \delta^* \leq 3.8$) tüm kanatlar için yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Hareket boyunca, destek çubuklu kanatlar, destek çubuksuz kanata kıyasla daha yüksek değere sahip hücum kenarı girdabı sirkülasyonu üretmiştir. Bu sonuç ile, destek çubuğu varlığının, geometrik hücum açısını artırarak hücum kenarı girdabı sirkülasyonunu arttırdığı sonucuna varılabilir. Destek çubuklu kanatlar arasında 90° destek çubuğu açısına sahip kanat en yüksek hücum kenarı girdabı sirkülasyonunu üretmiştir ve bu kanadı 60° destek çubuklu kanat takip etmiştir. Destek çubuğunun açısı arttıkça, destek çubuğu veter yönüne daha fazla yönelmektedir ve bu durum kanadın veter yönündeki eğilme sertliğini arttırmaktadır. Hareket boyunca destek çubuksuz kanadın ürettiği ortalama boyutsuz hücum kenarı girdabı sirkülasyonu değeri 0.87 iken, 90°, 60° ve 30° destek çubuklu kanatlar için sırasıyla 1.07, 1.01 ve 0.91 olmuştur.

Ayrıca bu çalışma, üç boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak, farklı amaçlar doğrultusunda, kanat açıklığı boyunca değişken yapısal özelliklere sahip karmaşık yapıdaki esnek kanatların düşük üretim toleransı ile oldukça kısa bir sürede üretilebileceğini göstermektedir. Destek çubuğu açısında yapılacak sistematik değişiklik, geometrik hücum açısı oluşumunu da sistematik olarak değiştirmektedir. Bu sayede, destek çubuğu yönü değiştirilerek, belirli bir hareket kinematğinde istenilen hücum açısında hareket edebilecek kanat üretimi mümkün hale gelmektedir. Bu yöntem, kuvvet üretimi ve enerji tüketimi açısından daha verimli mikro hava araçları tasarlamaya ve üretmeye olanak sağlamaktadır.

Kaynaklar

- Aono, H., Chimakurthi, S., Cesnik, C., Liu, H., & Shyy, W. (2009). Computational Modeling of Spanwise Flexibility Effects on Flapping Wing Aerodynamics. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition.
- Daniel TL, Combes, S.A. (2002). Flexible wings and fins: bending by inertial or fluid-dynamic forces? Integrative and Comparative Biology 42.
- Ennos, A.R. (1988). The importance of torsion in the design of insect wings. The Journal of Experimental Biology 140.
- Percin, M. (2015). Aerodynamic Mechanisms of Flapping Flight. Doctoral dissertation, Delft University of Technology.
- Sane, S.P. (2003). The aerodynamics of insect flight. Journal of Experimental Biology, 206.
- Yang, W.Q., Song, B.F., Song, W.P., & Wang, L.G. (2012). The effects of span-wise and chord-wise flexibility on the aerodynamic performance of micro flapping-wing. Chinese Science Bulletin.
- Yazdanpanah, M. (2019). Flow characteristics of translating flexible wings at low Reynolds numbers. Master's thesis, Middle East Technical University
- Zhao, L., Huang, Q., Deng, X., & Sane, S.P. (2009). Aerodynamic effects of flexibility in flapping wings. Journal of The Royal Society Interface.
- Zhao, L., Deng, X., & Sane, S.P. (2011). Modulation of leading edge vorticity and aerodynamic forces in flexible flapping wings. Bioinspiration & Biomimetics.