

## Küçük İHA'lar İçin 3D Baskılı Şekil Değiştirebilir Kanat Tasarımı ve Testleri

Fatma İlayda AYTAÇ<sup>1</sup>, Ümit ÇELİK<sup>2\*</sup>, Muhsin Tunay GENÇOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Uçak Bakım Onarım Böl., Sivil Havacılık Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Elektrik-Elektronik Müh. Böl., Müh. Fak., Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>1</sup> fatma.ilayda00@gmail.com, <sup>2</sup> u.celik@firat.edu.tr, <sup>3</sup> mtgencoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 02/12/2022;

Kabul/Accepted: 24/08/2023)

**Öz:** Kuşlar; tırmanış, düz uçuş, alçalma vb. değişik uçuş fazlarını, şekillendirilebilir kanatları sayesinde verimli bir şekilde gerçekleştirebilmektedirler. Geleneksel hava araçlarında ise değişik uçuş fazları için yardımcı kontrol yüzeyleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada şekil değiştirebilir esnek kanat yaklaşımı ile mini sınıf insansız hava araçlarının uçuş verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Esnek kanat 3 boyutlu yazıcı ile üretilebilir şekilde tasarlanmıştır. Kanat profilleri simetrik, yarı simetrik ve bombeli (kambur) olarak sınıflandırılabilir. Simetrik kanatlar daha yüksek hızlara ulaşılabilmesine olanak sağlarken bombeli kanat profilleri daha fazla kaldırma kuvveti üretilmesini sağlar. Hava aracı kanadının belirtilen kanat profillerine dönüştürülebilmesi amaçlanmıştır. Kanat, uyumlu hücum kenarı ve firar kenarına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede uçuş sırasında kanadın değişken kamburlu olabilmesi hedeflenmiştir. Kanadın şekillenebilmesi için kanadın üst yüzeyinde elastik deforme edilebilir esnek 3D baskılı yapılar, alt yüzeyinde ise yuva-yol ilişkisine sahip bir yapı tasarlanmıştır. Tasarlanan kanadın statik ve aerodinamik analizleri simülasyon araçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmalarından sonra 3 boyutlu (3B) yazıcı kullanılarak prototip kanat üretimi ve daha sonra rüzgâr tüneline şekil değiştirebilir kanadın testleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan şekil değiştirebilir kanadın değişik durumlardaki aerodinamik davranışı XFRL5 yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Aerodinamik analizler sonucunda kambur kanadın en yüksek kaldırma katsayısına (CL) sahip olduğu görülmüştür. Simetrik kanadın daha düşük sürüklenme katsayısına (CD) sahip olduğu ve sonuç olarak aerodinamik verimliliğinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Rüzgâr tüneli testlerinde farklı rüzgâr hızları ve hücum açıları için kanat kaldırma kuvveti ölçümleri yapılmıştır. Geliştirilen uyumlu kanat ile çok geniş yelpazede farklı kanat davranışlarının elde edilebildiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Şekil değiştirebilir kanat, uyumlu kanat, İHA

### Design and Tests of a 3D-printed Morphing Wing for Small UAVs

**Abstract:** Birds can perform different flight phases such as climb, cruise and descent efficiently thanks to their adaptive wings. In conventional aircrafts, auxiliary control surfaces are used for different flight phases. In this study, it is aimed to increase the flight efficiency of small unmanned aerial vehicles with the morphing wing approach. The flexible wing is designed to be produced using a 3D printer. Airfoils can be classified as symmetrical, semi-symmetrical and cambered. Symmetrical wings allow higher speeds to be achieved, while cambered wing profiles provide more lift. It is intended that the aircraft wing can be transformed to specified airfoils. The wing is designed to have a morphing leading and trailing edge. In this way, it is aimed that the wing can have variable camber during flight. In order to shape the wing during flight, deformable flexible 3D printed structures were designed on the upper surface of the wing, and a structure with a slotted guide on the lower surface. Static and aerodynamic analyzes of the designed wing were carried out using simulation tools. After the optimization studies, prototype wing was manufactured using a FDM 3D printer, and then the morphing wing was tested in the wind tunnel. The aerodynamic behavior of the designed deformable wing in different conditions was analyzed using XFRL5 software. As a result of the aerodynamic analysis, it was seen that the camber wing had the highest lift coefficient (C<sub>L</sub>). It has been observed that the symmetrical wing has a lower drag coefficient (C<sub>D</sub>), resulting in higher aerodynamic efficiency. In wind tunnel tests, wing lift measurements were made for different wind speeds and angles of attacks. It has been observed that a wide range of different wing behaviors can be obtained with the developed morphing wing.

**Key words:** Morphing wing, adaptive wing, UAV.

### 1. Giriş

İnsanlar her zaman gökyüzüne tutkuyla bakmıştır. Tarihte ilk motorlu uçak 1903 yılında Wright kardeşler tarafından uçuşurabilmiştir. Bu başarının arkasında süzülen kuşları taklit etme fikrinin olduğu bilinmektedir. Daha sonra havacılık endüstrisinde hızlı bir gelişim görülmüştür. Günümüzde biyomimetik yaklaşımla ürün geliştirme

\* Sorumlu yazar: [u.celik@firat.edu.tr](mailto:u.celik@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-5882-7321, <sup>2</sup> 0000-0002-7759-6821, <sup>3</sup> 0000-0002-1774-1986

yöntemi geçerliliğini sürdürmektedir. Bilindiği üzere sabit kanatlı hava araçlarında kaldırma kuvveti hava aracı kanatları tarafından üretilmektedir. Hava aracı kanatları, yüksek kaldırma / sürüklenme oranı hedeflenerek tasarlanmaktadır. Uçağın ileriye doğru hareket edebilmesi ve sürtünmenin üstesinden gelinebilmesi için de itki sistemleri geliştirilmiştir [1]. Uçak kanatları belirli uçuş görevlerini yerine getirecek şekilde tasarlanmıştır. Hava aracı uçuş süresince tırmanış, seyir uçuşu ve alçalma gibi farklı uçuş fazlarında bulunmaktadır. Geleneksel hava aracı kanatları farklı uçuş fazlarının gereksinimlerini karşılayabilecek uyarlanabilir kanat yapısına sahip değildir. Uçuşun bu evreleri kanatçıklar, flaplar, spoiler ve diğer kontrol yüzeyleri yardımıyla gerçekleştirilmektedir [2]. Tırmanış, seyir uçuşu ve alçalma gibi farklı uçuş fazları uçuş boyunca gerçekleştirilmektedir. Doğada kuşlar tarafından bu olayların zahmetsizce gerçekleştirildiği görülmektedir. Kuşlar şekil değiştirebilen kanatları sayesinde farklı uçuş fazlarına uygun kanat profilleri arasında geçiş yapabilirler. Bu sayede kuşlar tarafından uçuş sırasında enerji daha verimli olarak kullanılabilir. Geleneksel hava araçları şekil değiştirebilir kanatlara sahip olmadığından, hava araçlarının kuşları tam olarak taklit edemediği söylenemez. Şekil değiştirebilir kanat fikri enerjinin daha verimli kullanılabilmesi amacıyla ortaya çıkmıştır.

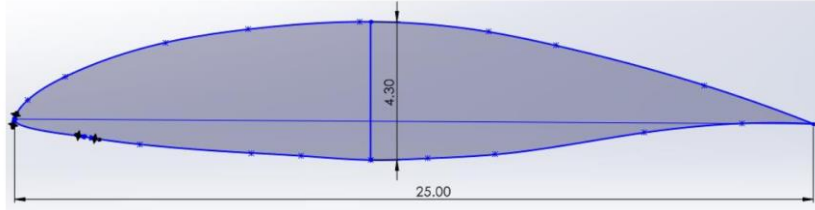
Dönüştürülebilir kanat yaklaşımı ilk olarak 1890'da bir Fransız mucit ve mühendis Clement Ader tarafından gösterilmiştir [3]. Ader'in "Eole" adlı uçan makinesi uçuş sırasında kanat şeklini değiştirebilmiştir. 1899'da Wright kardeşler uçağın kontrolünü geliştirmek için kontrol kabloları ile hareket ettirebilir mekanizmalar geliştirmiştir [4]. 1937'de Baksaev tarafından kayan kanat folyosu mekanizması ile kanat alanının kontrol edilebilir bir şekilde artırılması sağlanmıştır [3]. Son yıllarda, değiştirilebilir kanat yaklaşımı ile ilgili akademik araştırmalar uçuş verimliliğine olabilecek potansiyel katkısından dolayı önemli ölçüde artmıştır. Vasista vd. şekil değiştirilebilir kanat ucu mekanizması tasarlamış ve üretmiştir [5]. Bu çalışmada esnek bir kaplama ve monolitik bir iç yapıya sahip bir tasarım sunulmuştur. Model üretilerek konseptin işlevselliği ve uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Anmin vd. insansız hava araçlarında kullanılması amaçlanan uyarlanabilir eğimli kanat tasarımı geliştirmiştir ve değişken eğimli kanadın aerodinamik performansı büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir [6]. Simülasyon sonuçlarına göre uyarlanabilir eğimli kanadın kaldırma katsayısını aynı hücum açısına karşı kademeli olarak artırdığı görülmüştür.

Rafic vd. tarafından simetrik ve asimetrik kanat açıklığı geçişine olanak sağlayan çok görevli bir İHA geliştirilmiştir [7]. Bu çalışmada kanat geçiş mekanizmasında kremayer ve pinyon mekanizması kullanılmıştır. Kaldırma katsayısının açıklık uzantısı ile doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Açıklık boyunca uniform olmayan hava profili şekli bu çalışmanın bir dezavantajı olarak sıralanabilir. Fasel vd. tarafından kompozit eklemeli imalatın dönülebilen havacılık yapılarına uygulanabilirliği gösterilmiştir [8]. Bu çalışmada dönülebilen kanada sahip küçük ölçekli bir sabit kanat İHA, eklemeli üretim tekniği ile üretilmiştir. Hugo ve ark. kanat ucunun dönmesine olanak sağlayan biçim değiştiren kanat tasarımı geliştirmiştir [9]. Başka bir çalışmada, kiriş ve kamber geçişi yapabilen uyumlu, çok biçimli bir kanat geliştirilmiştir [10]. Aerodinamik analizin sonuçları, kiriş geçişinin daha düşük saldırı açılarında aerodinamik etkinliği iyileştirdiğini, kamber geçişinin ise daha yüksek saldırı açılarında etkinliği geliştirdiğini göstermiştir. Amoozgar vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada polimorfik kanat tasarımının aerodinamik performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda ve sayısal analizler, polimorfik kanatların genişlik uzatma ve değişken açıklık özelliklerinin, uçak performansını önemli ölçüde artırabileceği gösterilmiştir [11]. Diğer bir çalışmada, örgü şekillendirme kanadının tasarımı, analizi ve performans değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur [12]. Yapılan sayısal analizler ve deneysel çalışmalarda, örgü şekillendirme kanadının aerodinamik performansını artırabileceğini ve uçakların daha iyi manevra kabiliyeti sağlayabileceği gösterilmiştir. Sepulveda vd. tarafından yeni bir genişlik şekillendirme kanat çekirdek tasarımının geliştirilmesi ele alınmıştır [13]. Yapılan deneysel çalışmalarda, yeni çekirdek tasarımının genişlik şekillendirme kanadının performansını artırabileceği ve uçakların daha iyi manevra kabiliyeti sağlayabileceği gösterilmiştir.

Kuşlarla yaklaşık olarak benzer boyutlara sahip olan mikro ve mini sınıf insansız hava araçlarının kanat yüzey alanlarının küçük olmasından dolayı verim anlamında dezavantajlı bir durumda oldukları söylenebilir. Bu çalışmada biyomimetik yaklaşımdan yola çıkılarak, mikro ve mini sınıf insansız hava araçları için kolay üretilebilir, şekil değiştirebilen kanat yapısının tasarlanması ve prototip üretim yapılmıştır. Sonrasında şekil değiştirebilir kanadın rüzgar tüneli testleri gerçekleştirilmiştir. Değiştirilebilir kanat yaklaşımı maksimum hız, manevra kabiliyeti, taşıma kapasitesi, menzil, dayanıklılık, stabilite vb. parametrelerin kontrol edilebilmesine olanak sağlar. Bu parametrelerin iyileştirilmesi uçuş verimliliğini ve uçağın gerçekleştirilebileceği görevleri arttırabilir. Tüm bunların yanı sıra şekil değiştirebilir kanat tasarımı yakıt tasarrufu, düşük karbon salınımı ve azaltılmış gürültü dâhil olmak üzere uçuş performansında önemli avantajlar sağlamaktadır.

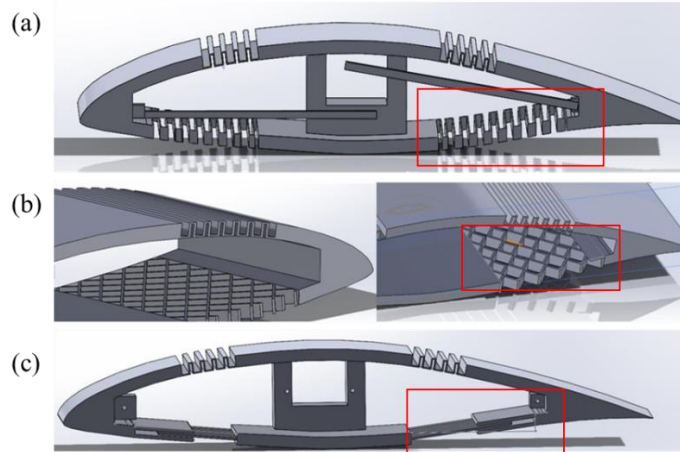
## 2. Şekil Değiştirebilen Kanat Tasarımı

Bu çalışmada AH 82-150A kanat profili kullanılmıştır [14]. Althaus AH 82-150 A kanat profili maksimum kalınlık %15, %40,2 kırışte ve %43,5 kırışte maksimum bombe %3,3 olarak verilmiştir. Çalışmada önerilen yaklaşım tüm kanat profillerine uygulanabilir ancak bu çalışmada gerekli hareket mekanizmalarını kanat içyapısına yerleştirebilmek için yüksek kamburluk oranına sahip olan kanat profillerinden biri seçilmiştir. Kanat profilinin şekil değiştirebilen kanat özelliğine kavuşması hedeflenmiştir. Değişken kamburluk geçişini elde edebilmek için servo motor tabanlı bir uyarıcı mekanizması kullanılmıştır. Bilindiği üzere uçaklarda bulunan slatlar, sabit kanatlı bir uçağın kanadının ön kenarında yer alan ve kanadın daha yüksek bir hücum açısında çalışmasına izin veren aerodinamik yüzeylerdir. Tasarımda, kanadın servo motor kontrollü uyumlu hücum kenarı ve firar kenarına sahip olması sağlanmıştır. Şekil 1’de şekil değişim öncesi AH 82-150A kanat profili verilmiştir. Servo motor ve destek kırışleri kanat geometrisinin içerisine yerleştirilmiştir. Tasarlanan prototip kanat profilinin boyu 25 cm ve kalınlığı 4.3 cm’dir.



Şekil 1. AH 82-150A kanat profili

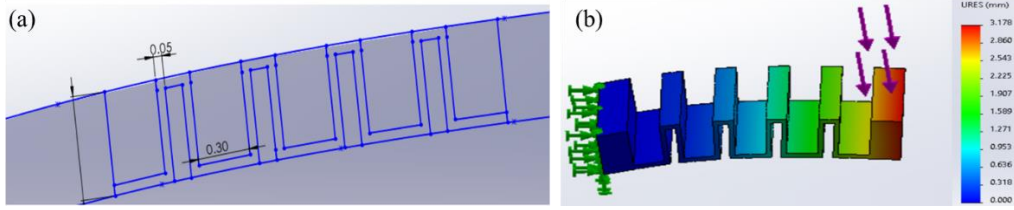
Şekil değiştirebilen kanat geometrisi tasarımında kanadın alt ve üst yüzeylerinin esnek, hareket edebilir bir mekanizmaya sahip olması beklenmektedir. Bu çalışmada, üç farklı esnek kol mimarisi tasarlanmış olup deformasyon ömrü en iyi sonucu veren kanat geometrisinin prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan farklı esnek kol mimarileri Şekil 2’de verilmiştir. Kanat üst kabuğu için kare dalga formunda bir esnek yüzey mimarisi tercih edilmiştir. Şekil 2(a)’da geliştirilen kanat alt yüzeyinde yer alan esnek kol yapısının üretim sonrasında yaklaşık olarak 60 çevrim sonrasında kırıldığı görülmüştür. Şekil 2(b)’de tasarlanan mimari statik analizler neticesinde yapının hedeflenen hareket aralığında plastik deformasyona uğradığı görüldüğü için bu tasarım üretilmemiştir. Şekil 2(c)’de kanadın alt yüzeyine yuva-yol ilişkili bir hareket mekanizması geliştirilmiştir. Bu sayede geniş bir aralıkta kanat alt yüzeyinde esneklik ve kayma sağlanmıştır. Tasarımda alt kanat yüzeyinde hücum ve firar kenar bölgelerine yakın olmak üzere 2 adet yuva-yol mekanizması bulunmaktadır. Bu sayede kanadın hem hücum hem de firar kenarının kamburluk oranlarının ayarlanabilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen esnek mekanizmalarla kanat profilinin simetrik, yarı simetrik ve değişken kambur oranlı kanat profiline dönüştürülebilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 2. Şekil değiştirebilen kanat esnek kol yapıları (a) kare dalga formunda esnek kol, (b) baklava dilimi tipi esnek kol, (c) yuva-yol ilişkili esnek mekanizma

## 2.1. Statik analizler

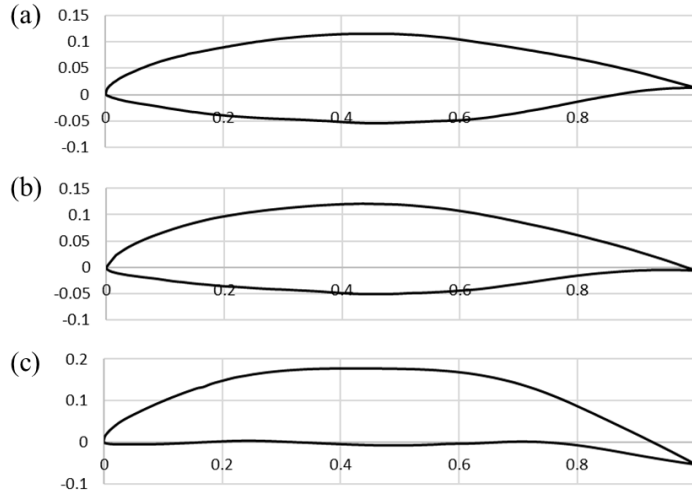
Konsept tasarım aşamasından sonra kanat yüzeyleri için tasarlanan esnek kol yapısının statik simülasyonları ANSYS sonlu elemanlar analizi (FEA) paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil değiştirebilen kanat yapısının hem üst hem de alt yüzeylerinin esneyebilmesi gerekmektedir. Kanat alt yüzeyinde bulunan yuva yol ilişkisi kayar mimariye sahip olduğu için esnemesi için sürtünme hariç ekstra kuvvet gerekmemektedir. Kanat üst yüzeyine yerleştirilen esnek kol yapısı ve statik simülasyonu Şekil 3'te verilmiştir. Kullanılan servo motorlu mekanizmanın 300gr (2.94N) kaldırdığı görülmüştür. Esnek kol yapısının bir ucu sabit uç olarak alınmış ve diğer uca 0.5 N kuvvet uygulanmıştır. Bu durumda esnek kol yapısının 3.178 mm hareket edebildiği yer değiştirme analizinde görülmüştür. Analizler neticesinde servo motorlu hareket mekanizmasının istenen oranda esnek kanat mekanizmasını hareket ettirebileceği görülmüştür.



Şekil 3. Esnek kol statik analizi

## 2.2. Aerodinamik analizler

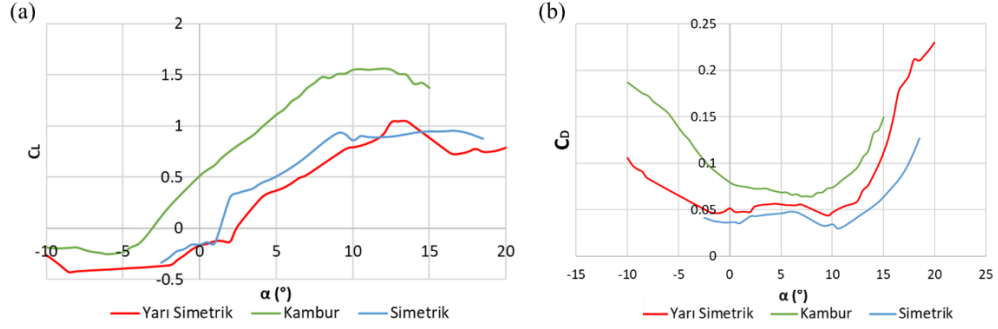
Bir uçağın verimliliği ve performansı çoğunlukla kanatların kaldırma, sürüklenme, kaldırma/sürüklenme oranı vb. aerodinamik özelliklerine bağlıdır. Şekil değiştirebilen kanat tasarımının 3 farklı durumu için (simetrik, yarı simetrik ve kambur) farklı hücum açılarında  $C_L/\alpha$  ve  $C_D/\alpha$  verileri analiz edilmiştir. Şekil 4(a)'da simetrik kanat profili, Şekil 4(b)'de yarı simetrik ve Şekil 4(c)'de kambur kanat profilleri verilmiştir. Şekil değiştirebilir kanat tüm ara kanat profillerine dönüşebilmekle birlikte kanadın ulaşabileceği uç profiller analizlerde kullanılmıştır. Geliştirilen şekil değiştirilebilen kanadın mini-sınıf İHA'larda kullanımı hedeflendiğinden dolayı aerodinamik analizler düşük Reynolds sayısında ( $Re=100000$ ) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Kanat profilleri. (a) Simetrik kanat profili (b) Yarı simetrik kanat profili, (c) Kambur kanat profili

Dönüşebilir kanat aerodinamik analizleri XFLR5 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [15]. İlk olarak belirtilen kanat profilleri için  $C_L$  (kaldırma katsayısı) -  $\alpha$  (hücum açısı) analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5(a)'da  $C_L$ -  $\alpha$  grafiği verilmiştir. Orijinal AH 82-150A kanat profili analizi incelendiğinde maksimum kaldırma katsayısının  $C_L = 1.2$  ve hücum açısının  $12^\circ$  olduğu görülmektedir. Kambur kanat için yaklaşık olarak  $12^\circ$  hücum

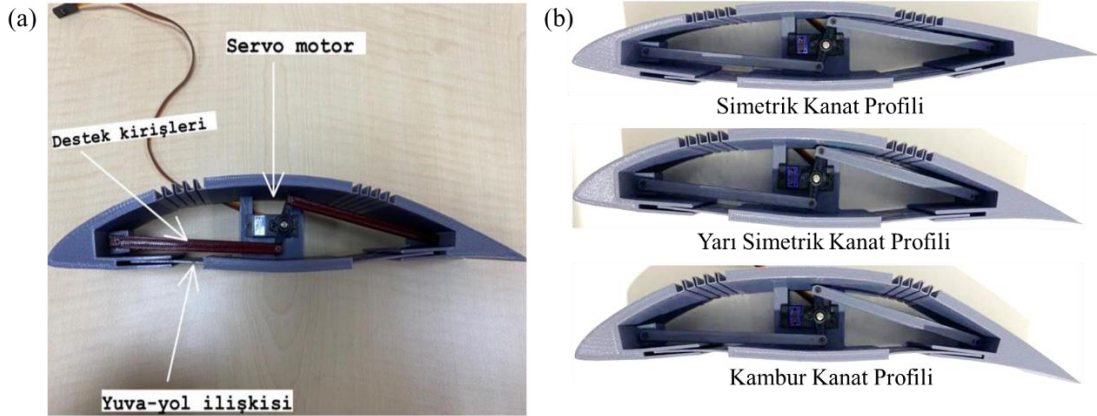
açısında maksimum kaldırma katsayısına ( $C_L=1.6$ ) ulaşıldığı görülmüştür. Kanat kamburluk oranının artması ile birlikte kaldırma katsayısı  $C_L=1.2$ 'den  $C_L=1.6$ 'ya ulaşmıştır. Simetrik kanat ile normal profil kaldırma katsayıları arasında belirgin bir fark görülememiştir. Çünkü, Şekil 4(a) ve (b) de görüldüğü gibi AH 82-150A kanat profili simetrik kanat profiline yakın bir geometriye sahiptir. Ayrıca Şekil 4(a), (b) ve (c)'de verilen 3 farklı durumdaki kanat yapıları için hücum açısına karşın sürükleme katsayısı ( $C_D$ -  $\alpha$ ) analizleri gerçekleştirilmiştir.  $C_D$ -  $\alpha$  grafiği Şekil 5(b)'de verilmiştir. Beklendiği gibi simetrik kanat yapısının en düşük sürükleme katsayısına, kambur kanat profilinin de en yüksek sürükleme katsayısına sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Dönüştürülebilir kanadın üç farklı durumu için  $C_L$ - $\alpha$  grafikleri

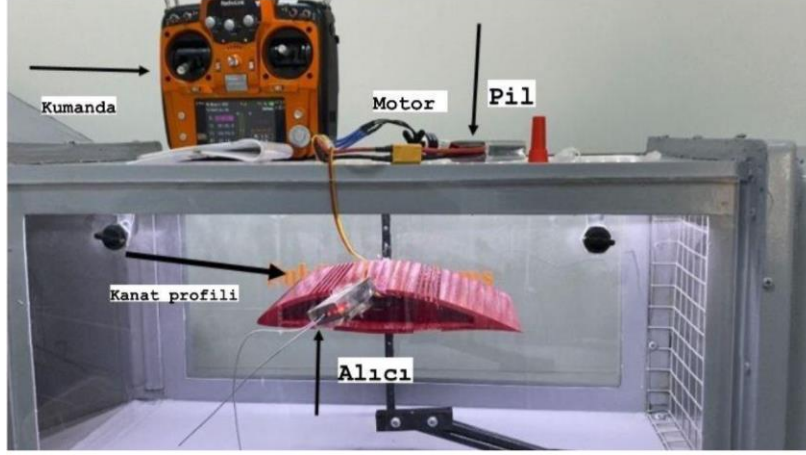
### 3. Üretim ve Testler

Prototip kanat üretimi filament tabanlı 3 boyutlu yazıcı (Raise 3D N2 Plus, Raise3D INC., Costa Mesa, USA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretimde düşük hız, yüksek kalite seçeneği kullanılmıştır. Şekil değıştürülebilir kanat üretimde PLA filament kullanılmıştır. Üretim sırasında 215°C nozle sıcaklığı ve 45°C tabla sıcaklığı kullanılmıştır. Üretilen kanat yapısı Şekil 6(a)'da verilmiştir. Servo motorun kontrolü ile birlikte elde edilebilen kanat profilleri Şekil 6(b)'de verilmiştir. Kontrol edilebilir hücum ve firar kenarı için tek metal dişli servo motor kullanılmıştır. Çift servo motor kullanılarak hücum ve firar kenarı ayrı ayrı kontrol edilebilir, ancak kullanım kolaylığı açısından bu çalışmada tek servo motorla hem hücum hem de firar kenarı burulma oranları kontrol edilmiştir.



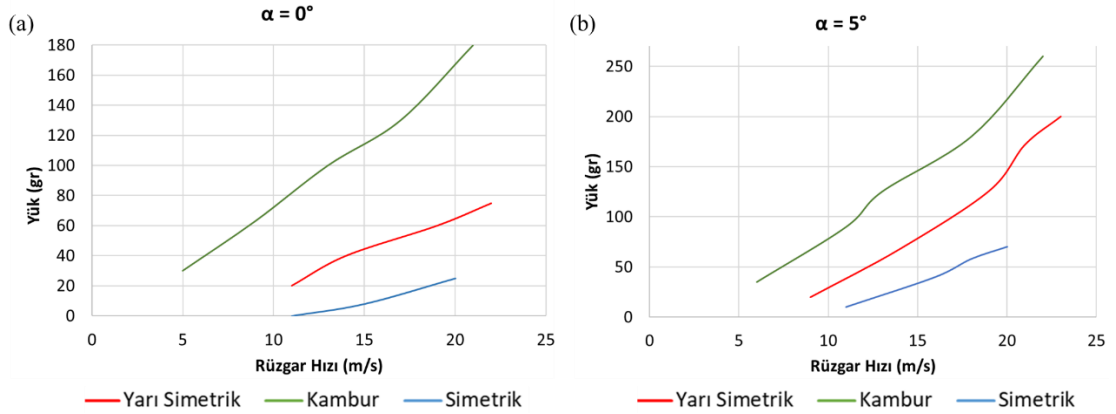
Şekil 6. Üretilen prototip şekil değıştürülebilir kanat modeli, (a) Kanat montajı, (b) Şekil değışikliği ile elde edilen kanat profilleri

Rüzgâr tüneli cisimlerle havanın etkileşiminin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Dönüştürülebilir kanat rüzgâr tüneli (SubSonic Rüzgâr Tüneli, Elkimak, Elazığ, Türkiye) kanat test alanına sabitlenmiştir. Dönüştürülebilir kanadın rüzgâr tüneli içerisinde hareket ettirilebilmesi için servo motor kullanılmıştır. Servo motoru sürmek için 3S Lipo batarya ve Radiolink AT10 kumanda kullanılmıştır. Test düzeneği Şekil 7'de verilmiştir. Kambur, yarı simetrik ve tam simetrik kanat profili için rüzgâr tüneli testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. Şekil değiştirebilir kanat rüzgâr tüneli test düzeneği

İlk olarak Şekil 4'te verilen 3 farklı durumdaki kanat profili için  $0^\circ$  hücum açısında farklı rüzgâr hızları için üretilen kaldırma kuvvetleri ölçülmüştür. Şekil 8(a)'da verilen, 20 m/s rüzgâr hızı için kanat profillerinin kaldırma kuvvetleri karşılaştırıldığında, kambur kanat profilinin yarı simetrik kanat profiline göre 2.2 kat, simetrik kanat profiline göre ise 6.8 kat daha fazla kaldırma kuvveti ürettiği görülmektedir. Şekil 8(b)'de,  $5^\circ$  hücum açısında farklı rüzgâr hızları için üretilen kaldırma kuvvetleri ölçülmüştür.  $5^\circ$  hücum açısı ile 3 farklı kanat profili için elde edilen kaldırma kuvvetleri ölçülmüştür. Kambur kanat profili için hücum açısı  $0^\circ$ 'den  $5^\circ$ 'ye çıkarıldığında kaldırma kuvvetininin 1.3 kat arttığı görülmektedir. Yarı simetrik ve tam simetrik kanat profili için ise sırasıyla 2 ve 3 kat kaldırma kuvvetininin arttığı görülmüştür.



Şekil 8.  $0^\circ$  hücum açısında 3 farklı kanat profili için (rüzgâr hızı-yük) rüzgâr tüneli testi

#### 4. Sonuç

Geleneksel hava araçlarında uçuş koşullarına uygun davranışlar yardımcı kontrol yüzeyleri sayesinde sağlanmaktadır. Bu durum ekstra ağırlık ve karmaşıklığın yanında sürüklenme kuvvetinin de artmasına sebep olmaktadır. Doğada uçabilen canlılara bakıldığında uçuş fazlarına göre dönüşebilir kanat mimarilerine sahip oldukları görülmektedir. Bu çalışmada biyomimetik temelli araştırmalardan yola çıkılarak mini sınıf insansız hava araçları için şekil değiştirebilir kanat tasarımı geliştirilmiştir. Kanadın simülasyonları gerçekleştirilerek optimizasyon sonrasında prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve rüzgâr tüneli testleri ile sonuçlar doğrulanmıştır. İlk olarak üst kanat dış kabuğunun plastik deformasyon limitleri içerisinde hareket edebilmesi için esnek kol mimarisi tasarlanarak statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Kanat alt kabuğunun hareketli olabilmesi için yuva-yol ilişkisi ile

hareket edebilen bir mekanizma geliştirilmiştir. Dönüştürülebilir kanat aerodinamik analizleri XFRL5 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kanadın prototip üretimi 3B yazıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr tüneli kullanılarak şekil değiştirebilen prototip kanadın testleri farklı rüzgâr hızlarında ve hücum açılarında gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda tüm hücum açılarında en fazla kaldırma üreten kanadın kambur kanat olduğu görülmüştür. Yapılan analizler ve rüzgâr tüneli testleri sonucunda şekil değiştirebilir kanadın farklı uçuş koşullarında kullanılmasının uçuş verimliliğini arttırabileceği görülmüştür. Kalkış ve iniş fazlarında kambur kanadın kullanılabilirliği, seyir uçuşu sırasında ise daha düşük sürüklenme kuvveti oluşturduğundan dolayı simetrik kanadın kullanılabilirliği düşünülmektedir. Daha sonraki çalışmalarda, geliştirilen kanadın mini sınıf bir insansız hava aracında kullanılarak uçuş testlerinin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

## Teşekkür

Ü.Ç. ve M.T.G. fikir sahibi, F.İ.A. ve Ü.Ç. deneyleri gerçekleştirdi ve sonuçları yorumladı, Ü.Ç., F.İ.A. ve M.T.G. makaleyi yazdı.

## Kaynaklar

- [1] Sadraey MH. Aircraft design: A systems engineering approach. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2012.
- [2] Jha AK, Kudva JN. Morphing aircraft concepts, classifications, and challenges. Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. San Diego, SPIE Publishing, 2004; 213–224.
- [3] Weisshaar T, Terrence A. Morphing Aircraft Technology-New Shapes for Aircraft Design. Defense Technical Information Center: Fort Belvoir, VA, USA, 2006.
- [4] Kelly FC. The Wright Brothers: A Biography. Courier Corporation, 2012.
- [5] Vasista S, Riemenschneider J, Monner HP. Design and testing of a compliant mechanism-based demonstrator for a droop-nose morphing device. 23rd AIAA/AHS adaptive structures conference; 2015 Jan 5-9; Kissimmee, USA. Reston: AIAA; 2015; pp. 1-16.
- [6] Zhao A, Zou H, Jin H, Wen D. Structural design and verification of an innovative whole adaptive variable camber wing. Aerosp Sci Technol 2019; vol. 89: 11-18.
- [7] Ajaj RM, Jankee GK. The Transformer aircraft: A multimission unmanned aerial vehicle capable of symmetric and asymmetric span morphing. Aerosp Sci Technol 2018; vol. 76: 512-522.
- [8] Fasel U, Keidel D, Baumann L, Cavolina G, Eichenhofer M, Ermanni P. Composite additive manufacturing of morphing aerospace structures. Manuf Lett 2020; vol. 23: 85-88.
- [9] Rodrigue H, Cho S, Han MW, Bhandari B, Shim JE, Ahn SH. Effect of twist morphing wing segment on aerodynamic performance of UAV. J Mech Sci Technol 2016; vol. 30(1): 229-236.
- [10] Parancheerivilakkathil MS. A compliant polymorphing wing for small UAVs. Chin J Aeronaut 2020, vol. 33(10): 2575-2588.
- [11] Parancheerivilakkathil MS, Haider Z, Ajaj RM, Amoozgar M. A polymorphing wing capable of span extension and variable pitch. Aerospace 2022, vol. 9(4), pp. 205.
- [12] Keidel D, Fasel U, Ermanni P. Concept investigation of a lightweight composite lattice morphing wing. AIAA Journal 2021, vol. 59(6): 2242-2250.
- [13] Bishay PL, Burg E, Akinwunmi A, Phan R, Sepulveda K. Development of a new span-morphing wing core design. Designs 2019, vol. 3(1): pp. 12.
- [14] Althaus D, Niedrig F. Niedrig-geschwindigkeits-profile. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1996.
- [15] Deperrois A. XFRL5 Analysis of foils and wings operating at low Reynolds numbers. Guidelines for XFRL5, vol. 142, 2009.