

KÜÇÜK TAKTİK SINIFI İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN KANAT

Erdi SİNAN¹ ve Ümran DEMİRCİ²
İzmir Ekonomi Üniversitesi, İzmir

Berkay Burak TOKER³, Eren OKUROĞLU⁴ ve
Dr. Öğr. Üyesi Osman Nuri ŞAHİN⁵
İzmir Ekonomi Üniversitesi, İzmir

ÖZET

Şekil değiştirebilen/dönüştürülen (morphing) kanat yapısına sahip olan hava araçlarında kanat profili üzerinde yapılan şekil değişimi neticesinde hava aracının aerodinamik performansı değiştirilebilir. Bu çalışmada küçük taktik sınıfı İHA'lar için çeşitli hava koşullarında ve gereken noktalarda, farklı kaldırma veya sürükleme kuvveti değerlerine sahip profiller arasında dönüşüm sağlayacak bir kanat tasarımı yapılması amaçlanmıştır. Kanat profilinin şekil değiştirme sonucunda NACA 6412 veya NACA 4412 profillerine benzemesi amaçlanmış ve bu doğrultuda uçak kanadı içerisine yerleştirilmiş bir mekanizma ile şekil değişimi sağlanmıştır. NACA 6412 ve NACA 4412 kanat profilleri seçilmesinin temel sebebi bu iki farklı kanat profilinin havacılık sistemlerinde yüksek kaldırma ve sürükleme kuvvetleri sağlayabilmeleri ve iki profil arasında şekil farkının dönüşüme uygun olmasıdır. Hava aracı, ihtiyaç dâhilinde NACA 4412 kanat profili ile diğer profile göre yüksek kaldırma kuvveti sağlayarak, İHA'nın istenen performans değişimini sağlamasına olanak tanır. Düşük kaldırma kuvveti ve yüksek sürükleme kuvveti değerleri istendiği durumlarda ise NACA 6412'ye mekanizma yardımıyla geçiş yapılarak, bu değerler sağlanabilecektir. Şekil değişimi yapabilen bir kanat için farklı tipteki mekanizmalar iki farklı tasarım yapılmış ve bu tasarımların şekil değişimleri ile kazandıkları performans değerleri analiz ve tester ile ölçülmüştür. Yapılan testler sonucunda mekanizmanın kanat profilleri arası geçişe imkân sağladığı ve kanat performansında değişim yarattığı görülmüştür.

GİRİŞ

Şekil değiştirebilen/dönüştürülen kanat tasarımları, doğada bulunan şahin vb. kuşların ve bazı uçan böceklerin uçuşları sırasında belirli noktalarda kanat şekillerinde yaptığı bazı değişimlerden esinlenilmiş olup, farklı sınıftaki hava araçlarında önemli bir gelişmeye ilham kaynağı olmuştur. Hava araçları görevleri sırasında değişken performans değerlerine ihtiyaç duyabilirler. Hava araçlarının değişken koşullardaki performans ihtiyaçlarını karşılamak için, yapısal elemanların şekil değiştirebilir yapıda olması avantaj sağlar [Beaverstock, 2015].

¹ Ümran Demirci, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: umran.demirci@std.ieu.edu.tr

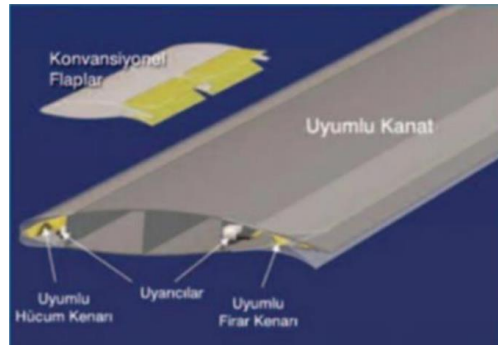
² Eren Okuroğlu, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: eren.okuroglu@std.ieu.edu.tr

³ Berkay Burak Toker, Mekatronik Müh. Böl., E-posta: burak.toker@std.ieu.edu.tr

⁴ Erdi Sinan, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: erdi.sinan@std.ieu.edu.tr

⁵ Dr. Öğr. Üyesi Osman Nuri Şahin, Havacılık Müh. Böl., E-posta: osman.sahin@ieu.edu.tr

Hava araçları kalkış, havada icra edecekleri görev ve inişlerini içeren bir görev profiline uygun olarak, bu aşamalarda en optimum performansı sağlayacak şekilde tasarlanırlar. Buna karşın hava aracından beklenen performans görev profilinin farklı noktalarında oldukça farklı olabilir ve en optimum tasarımı bulmak her zaman kolay olmayabilir. Bunun için farklı performans isterlerine göre kendini adapte edebilen şekli değiştirebilir kanat tasarımları geliştirilmektedir. Şekil değiştirebilir kanat tasarımları farklı amaçlar doğrultusunda yapılabilir [Concilio, 2018]. Hava aracının radar izini azaltmaya yönelik şekil değiştirebilir kanat tasarımları, operasyon gizliliğini iyileştirdiğinden ve olağandışı alanlardan hızlı konuşlandırmaya olanak tanıdığından askeri uygulamalar için önemli bir fayda sağlar [NSL Aerospace, 2024]. Örneğin, akıştan etkilenen alanı azaltmak için gövdeye doğru katlanan kanat yapısına sahip Bakshaev LIG-7’de, kalkış ve iniş için, kanat, kanat açıklığının 2/3’ü kadar olan bölümünde daha geniş bir alana sahip hale gelebilmektedir [Weisshaar, 2006]. Dönüştürülebilir kanat teknolojisinin tasarım örneklerinden bir diğerinde ise FlexSys Inc. Firması tarafından geliştirilen (Şekil 1) ve 127 cm açıklığa sahip değişken yapılı tek parça kanadın arka kenarı kanadın genel yapısından ayrılmadan -9 derece – 40 derece aralığında bükülebilmekte ve bu değişim 30 derece/s gibi yüksek hızlarda yapılabilmektedir. Bu sayede azalan ve sürüklenme ve harici yüklerin etkisi ile aerodinamik performans etkin bir şekilde arttırmakta, önemli yakıt ekonomisi sağlamakta ve bunlara bağlı olarak manevra kabiliyetinde önemli artışlar sağlanmaktadır [Özgen vd., 2008]. Bu çalışmalarda, değişebilir kanat yapılarının hava araçlarının kalkış için kullandığı pist uzunluğunu kısalttığı gözlemlenmiştir. Bilindiği üzere pist uzunluğu hava aracının tasarımı sırasında göz önünde bulundurulması gereken noktalardan biridir. Kısa pistlere iniş hava aracı için aşırı performans isterleri doğurabilir ve bu isterleri sağlayacak sabit kanat tasarımı, hava aracının daha fazla sürüklenme kuvvetine maruz bırakacağı için havada kalış süresi ve menzilini olumsuz yönde etkileyebilir. Ayrıca kaldırma ve sürüklenme katsayıları gibi aerodinamik parametreleri farklı olan iki kanat profili arasında farklı uçuş zarflarında aktif olarak geçiş yapılabilmesi hava aracının uyum kabiliyetini önemli ölçüde arttıracaktır. Aynı zamanda bu değişimin kanat ve kontrol yüzeyleri arasında herhangi bir boşluk oluşmadan yani hava akışını bozmadan yapılabilecek olması aerodinamik performansı arttıracaktır.



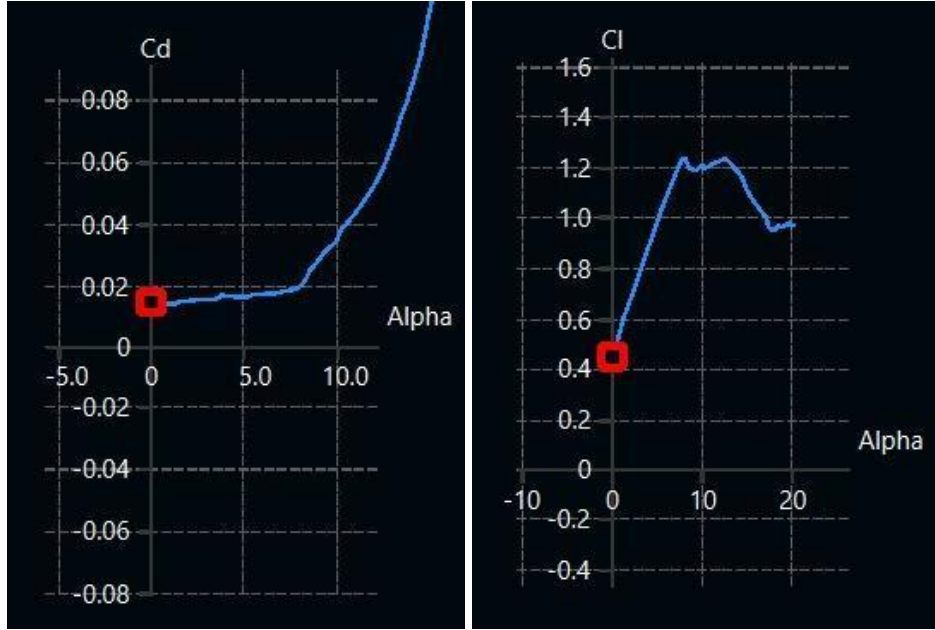
Şekil 1: FlexSys Inc. Firması tarafından geliştirilen "Uyumlu Kanat".

Bu çalışmada küçük taktik sınıfı bir İHA'nın havada performans ihtiyacına göre şekil değiştirebilen bir kanat tasarımı yapılmıştır. Yapılan çalışmada tasarlanan şekil değiştirebilir kanatın hava aracının inişi sırasında ihtiyaç duyduğu pist uzunluğunu kısaltacak şekilde şekil değiştirmesi ve operasyonel kabiliyetlerini iyileştirmesi amaçlanmıştır.

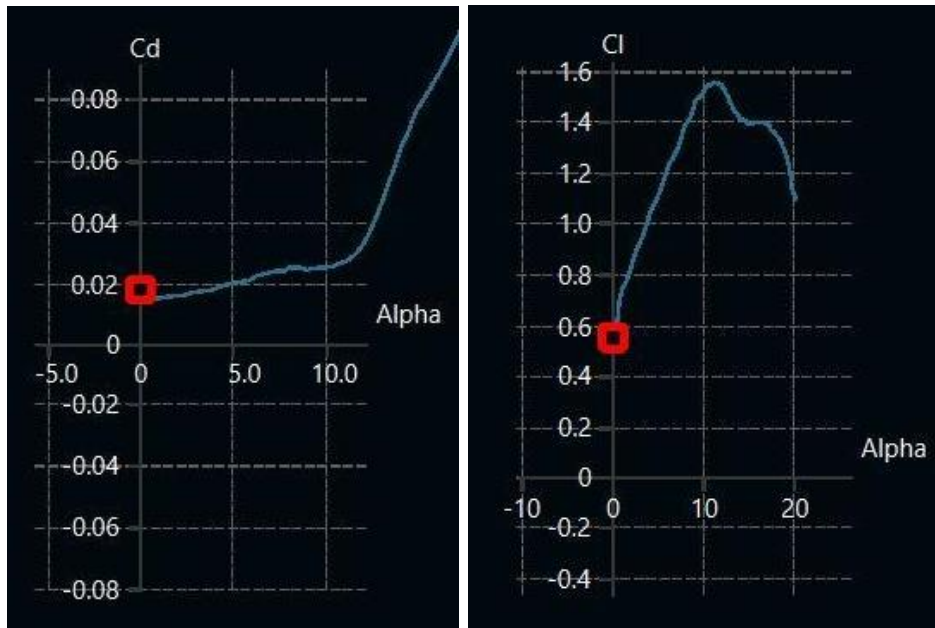
ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN KANAT TASARIMI

Şekil değişimi sırasında dönüşüm yapılacak olan kanat profillerinin uygun olarak seçimi, hava aracının kalkış ve iniş durumlarında istenen performans değerlerinin veya havadaki manevra yeteneklerinin geliştirilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle kaldırma kuvvetinde veya sürüklenme kuvvetinde farklı değerlere sahip, kalkış ve iniş sırasında ya da havadaki görevi sırasında avantaj sağlayacak iki farklı kanat profili seçilerek, şekil değiştirebilir kanatın bu iki kanat profili arasında geçiş yapabilecek şekilde tasarlanması amaçlanmıştır.

Bu amaçla, yüksek kaldırma kuvveti değerlerine sahip NACA 2412, NACA 4412 ve NACA 23012 kanat tipi profilleri, yüksek sürüklenme kuvveti için ise NACA 0012, NACA 0024 ve NACA 6412 kanat profilleri Xflr5 analiz programı kullanılarak kaldırma kuvveti katsayıları (C_L) ve sürüklenme kuvveti katsayıları (C_D) yönünden ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, karşılaştırma yapılan kanat profilleri içerisinde en yüksek kaldırma kuvvetine sahip kanat profilinin NACA 4412, ve en yüksek sürüklenme kuvvetine sahip kanat profilinin ise NACA 6412 olduğu görülmüştür. Ayrıca bu iki kanat profilinin küçük derece şekil farklılıkları içerdiği ve kanat içerisine yerleştirilebilecek bir mekanizma ile akıcı bir dönüşümünün mümkün olabileceği görülmüştür. Bu nedenle şekil değiştirebilen kanat tasarımı bu iki kanat profili temel alınarak yapılmıştır. Xflr5 ile yapılan analizler sonucu NACA 4412 ve NACA 6412 için elde edilen C_d/AoA ve C_l/AoA grafikleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



(a)

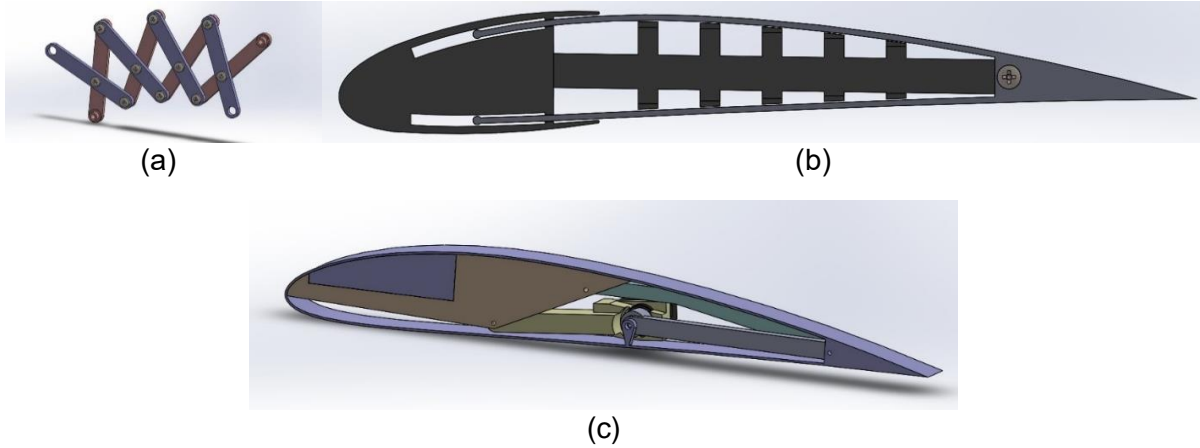


(b)

Şekil 2: NACA 4412 ve NACA 6412'nin C_d/AoA ve C_l/AoA grafikleri: (a) NACA 4412 (b) NACA 6412

Kanadın havadaki aerodinamik yüklerle karşı dayanıklılığında bir diğer önemli etken ise şekil değişiminde gerekli esnekliğe sahip malzeme seçimi konusudur. Şekil değiştiren kanat yapılarının kaplama malzemesi seçiminde, yapısal özelliklerde yüksek geri kazanım, dayanıklılık, esneklik, elastisite gibi çeşitli özellikler konusunda maksimum verimliliğe ve dayanıklılığa sahip olması önemlidir. Bu uygulamalarda genellikle Elektroaktif polimerler (EAP) ve şekil hafızalı polimerler (ŞHP) kullanılmaktadır. Bu malzemeler özelinde, polimer Terfenol-D kompozit malzemesi [S.H. Lim, S.R. Kim] ve güçlendirilmiş karbon fiber Plastik malzemesi stres ve esneklik/elastisite değerleri bakımından incelenmiş ve kanat dış kaplamada kullanılacak en uygun malzemenin esnekliği yüksek, güçlendirilmiş AS4D tipi karbon fiber plastik materyali olduğu görülmüştür. (Tensile Strength = 4729 MPa, Tensile Modulus = 241 GPa, Ultimate Elongation at Failure = 1.8 %) [Atlı, 2020]. Çalışmada şekil değiştirebilir kanatta kullanılacak malzemeler konusunda araştırma yapılmış olsa da ilk prototiplerin üretilmesinde ve tasarımın doğrulanması çalışmalarında 3d yazıcı teknolojilerinden yararlanılmış ve ilik prototipler PLA malzemeden baskı alınarak yapılmıştır.

Tasarım aşamasında NACA 4412 ve NACA 6412 profilleri arasında dönüşümü sağlayabilecek 3 farklı mekanizma örneği üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunlar dört kol mekanizması, balık sırtı (FishBAC) mekanizması ve makas mekanizmasıdır (Şekil 3).

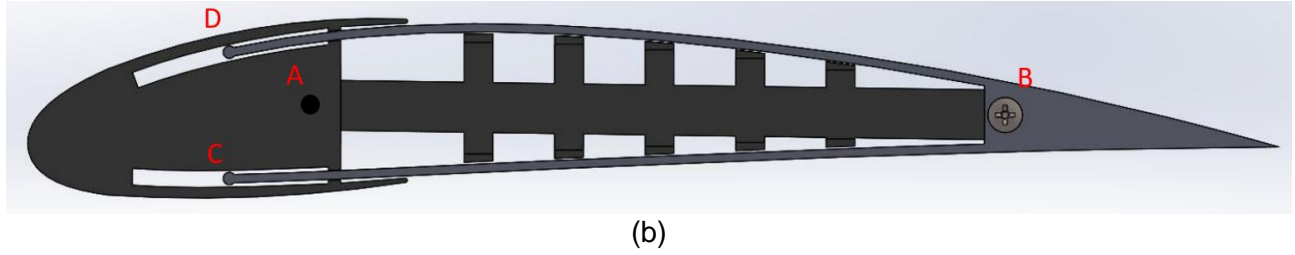
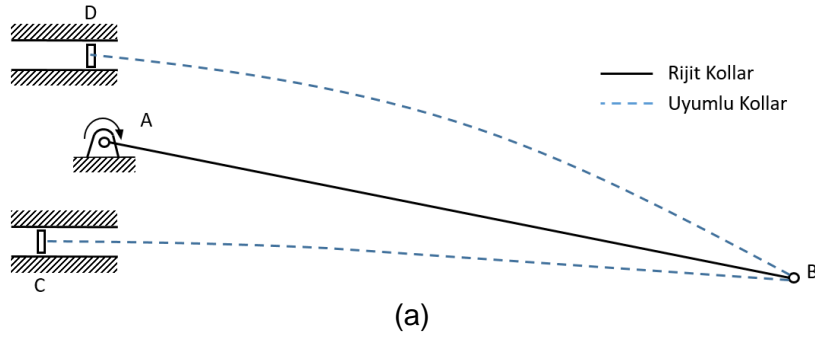


Şekil 3: a-Makas Mekanizması , b-Raylı Balık Sırtı Mekanizması , c-Dört-Kol Mekanizması tasarımları

Kanat profili içerisine yerleştirilecek dört kol, balık sırtı (FishBAC) ve makas mekanizmaları, aerodinamik kuvvetlere dayanım, şekil değiştirmede kolaylık ve üretim kolaylığı gibi konularda incelenmiştir. Yapılan tasarım örnekleri ve analizler sonucu makas mekanizmasının kanat profili içerisine yerleştirilebilecek boyutlarda üretilmesinde yaşanabilecek zorluklar göz önünde bulundurulurken, balık sırtı ve dört-kol mekanizmalarını temel alan tasarımlara yoğunlaşmıştır.

Raylı Balık Sırtı Mekanizmalı Şekil Değiştirebilen Kanat

Geleneksel flap ve hava freni kontrol yüzeylerinde, kanat ile bu kontrol yüzeyleri arasındaki boşluktan ötürü, aerodinamik performansta düşüş yaşanabilmektedir. Şekil değiştirebilen kanat yapısı sayesinde, hem bu boşluğun kapatılması hem de flap yada hava freni etkilerinin tüm kanat açıklığı boyunca uygulanabilmesi, hava aracının toplam aerodinamik performansında kayda değer artışlar sağlayabilecektir. Bu etkinin sağlanabilmesi için kanatın firar kenarındaki bükülmenin yüksek miktarda olması gerekmektedir. Kanat yüzeyi esnek yapıda olan ve kanat içerisine yerleştirilmiş bir mekanizma ile kanat alt ve üst yüzeyinin eğilmesi ile şekil değişikliğine neden olan mekanizmalar flap ve hava freni etkilerini yaratmak için yeterli deformasyon oranına ulaşamayabilirler. Doğru bir kanat profilinin sağlanması açısından kanat yüzeyleri eğilirken aynı zamanda boyunda uzama veya kısalma meydana gelmesi gerekebilir. Bu denklemlerle kanat alt ve üst yüzeylerinin eğilirken aynı zamanda boylarının uzayıp kısalmasına olanak sağlayacak raylı bir mekanizmayı içeren şekil değiştirebilir bir kanat tasarlanmıştır. Yapılan tasarım Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4: Raylı balıksırtı mekanizması ile tasarlanan şekil değiştirebilir kanat tasarımı: (a) Şematik gösterim (b) CAD model.

İlk şekil değiştirebilir kanat tasarımı kanat içerisine yerleştirilen bir rijit kol ve kanatın esnek yapıda olan alt ve üst yüzeylerini içeren iki uyumlu kollardan oluşmaktadır. Kanadın şekil değiştirmesi için uygulanması gereken kuvvet B noktasına, A noktasında bulunan bir eyleyici ve A ve B noktaları arasında bulunan rijit kol sayesinde iletilmektedir. Bu kuvvet neticesinde kanadın alt ve üst yüzeyleri bükülerek kanadın şekil değiştirmesi sağlanmaktadır. Kanat profili kanat firar kenarının deformasyonu öncesinde NACA 4412 şeklinde olup aşağı yöndeki düşük deformasyon ile NACA 6412 profiline yakın bir şekli alabilmektedir. Yüksek sürüklenme etkisi istendiği durumlarda ise aşağı ya da yukarı yönde yüksek deformasyon miktarları ile şekil değiştirmeye de olanak sağlamaktadır. Kanat profilinin şekil değişimi Şekil 5'te görülmektedir.



(a)

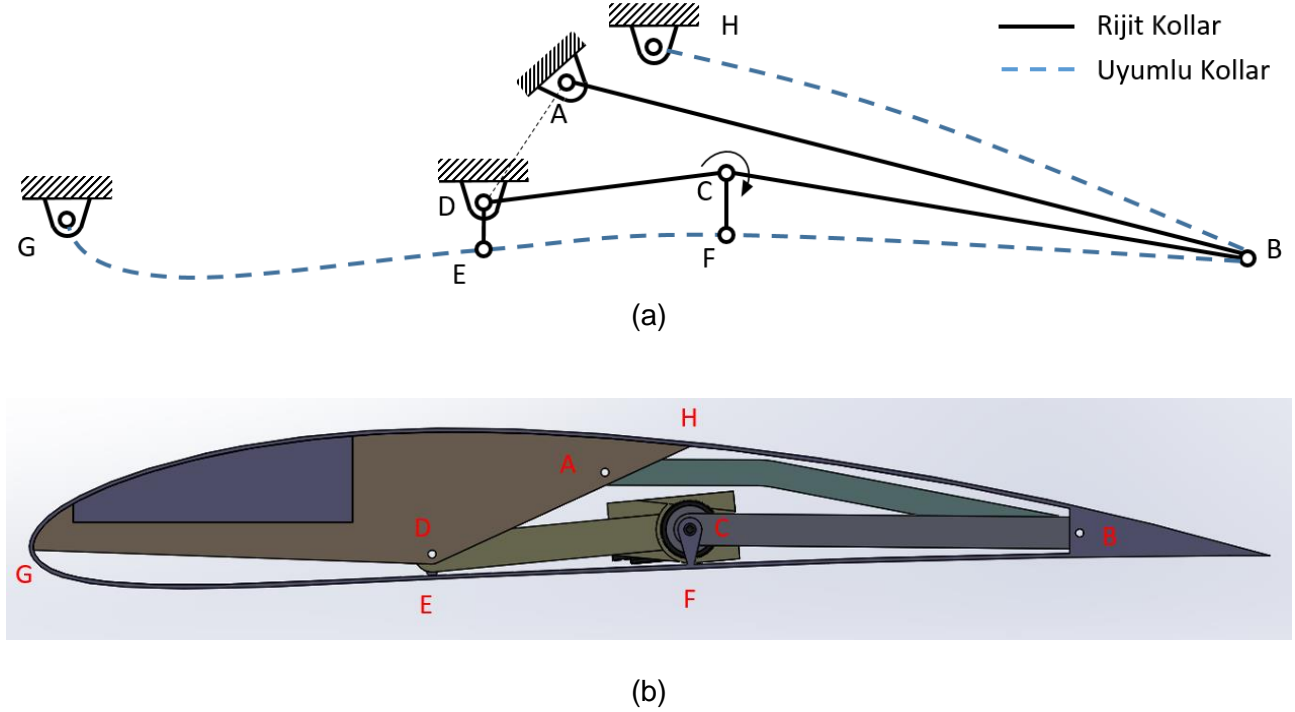


(b)

Şekil 5: Raylı balık sırtı mekanizmalı kanadın şekil değişimi: (a) şekil değişimi öncesi (b) şekil değişimi sonrası

Dört Kol Mekanizmalı Şekil Değiştirebilen Kanat

Çalışmada ikinci olarak tasarlanan kanat, NACA 4412 ve NACA 6412 arasında geçişi daha hassas bir şekilde sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. İkinci tasarım kanat içine yerleştirilen bir dört kol mekanizması ve kanat alt ve üst yüzeyinin oluşturduğu uyumlu kollardan meydana gelmektedir. İkinci şekil değiştirebilen kanat tasarımı Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6: Dört-kol mekanizması içeren şekil değiştirebilen kanat tasarımı: (a) Şematik gösterim (b) CAD model

Tasarımda ABCD noktaları arasında bir dört kol mekanizması bulunmaktadır. Dört kol mekanizması kanat içine kanadın firar kenarında aşağı yönde deformasyona neden olacak şekilde yerleştirilmiştir. Dört-kol mekanizmasının D ve C noktalarından kanat alt yüzeyine döner mafsallar ile bağlantı sağlayan ve şekil değişiminin daha doğru bir şekilde yapılmasına yardımcı olan iki rijit kol bulunmaktadır. Bu kollar kanadın alt yüzeyine E ve F noktalarından bağlanmıştır. Mekanizmanın hareketi C noktasına bağlı bir eyleyici tarafından sağlanmaktadır. C noktasında eyleyici tarafından verilen dönme hareketi B noktasının aşağı yönde deformasyonuna neden olmakta aynı zamanda F noktasından kanat alt yüzeyinin yukarı yönde çekilmesini sağlamaktadır. Bu sayede ilk durumda NACA 4412 formunda olan kanat profili şekil değişikliği sonunda NACA 6412 profiline yaklaşmaktadır. Kanat içine yerleştirilen mekanizmanın kısıtları nedeni ile şekilde değişimi ilk tasarımdan daha küçük miktarda olmakta fakat kanat yüzeyinde akışı bozacak bir girinti veya çıkıntı olmadığı için daha iyi bir hava akışı sağlanabilmektedir. 3D yazıcı ile üretilen kanatın şekil değişimi Şekil 7'de görülmektedir.



(a)



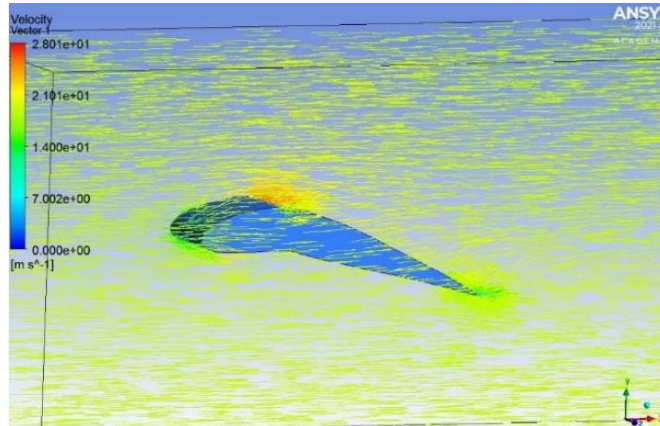
(b)

Şekil 7: Dört-kol mekanizması içeren kanatın şekil değişimi: (a) şekil değişimi öncesi (b) şekil değişimi sonrası

ANALİZLER

Raylı balıksırtı mekanizmasının çeşitli konfigürasyonları için şekil değişimi sonucunda aerodinamik performans parametrelerinin ne kadar değişeceğini test edilmesi için ANSYS Fluent ile akış analizi yapılmıştır. Analizlerde kanat profiline farklı şekiller için kaldırma kuvveti katsayısı ve sürüklenme katsayısı (C_L ve C_D) değerleri bulunmuştur.

Raylı balık sırtı mekanizması küçük deformasyon miktarları ile NACA 4412 ve NACA 6412 profilleri arasında şekil değişimine imkan tanımaktadır. Bunun yanında hava freni etkisini yaratmak için yüksek deformasyon miktarlarında şekil değişimi yapabilmektedir. Flap ve hava freni etkisini görmek adına ANSYS'de maksimum sürüklenme ve kaldırma kuvveti yaratacak, kanadın firar kenarının ekstrem olarak aşağı ve yukarı yönde şekil değiştirdiği iki farklı konfigürasyon için analizler yapılmıştır. Bunlardan ilki (konfigürasyon-1) geleneksel flap etkisini gösterecek olan yani firar kenarının belirli bir açıda aşağı yönlü büküldüğü konfigürasyondur. Analiz sonucunda, şekil değiştirmiş ve değiştirmemiş durumdaki kanat profiline kaldırma kuvveti ve sürüklenme katsayıları Tablo 1'de gösterilmiştir.



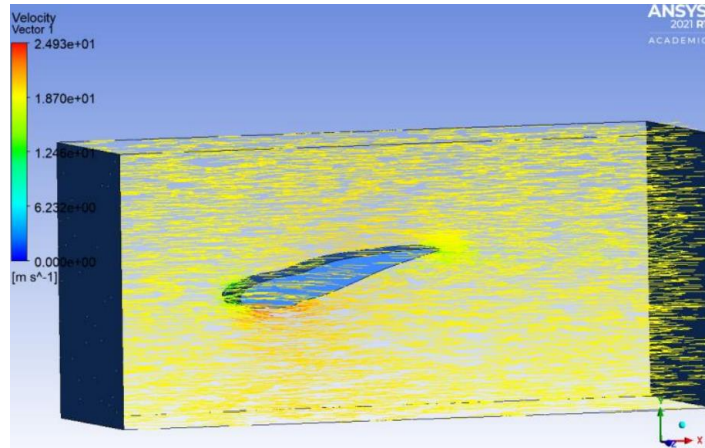
Şekil 8: Aşağı yönde şekil değiştirmiş kanat profiline akış analizi

Tablo 1: Raylı balıksırtı mekanizmasının ilk konfigürasyonu için bulunan analiz sonuçları

Airfoil Types	V (m/s)	C_L	C_D
NACA 4412	19	0.575	0.2385
Morphed Wing (Configuration-1)	19	3	1.0860

Tablo 1’de görülebileceği üzere, aşağı yönde şekil değiştirmiş kanat profilinde, deforme olmadan önceki yani NACA 4412 profilindeki kaldırma katsayısına göre kaldırma kuvveti ve sürüklenme katsayılarında yaklaşık 5 katlık bir artış görülmüştür.

Hava freni etkisini görmek adına, kanatın yukarı yönde şekil değiştirmesi sağlanmış (konfigürasyon-2) ve analizler bu durumdaki kanat için tekrarlanmıştır (Şekil 9). Elde edilen sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur.



Şekil 9: Yukarı yönde şekil değiştirmiş kanat profilinin akış analizi

Tablo 2: Raylı balıksırtı mekanizmasının ilk konfigürasyonu için bulunan analiz sonuçları

Airfoil Types	V (m/s)	C_L	C_D
NACA 4412	19	0.575	0.2385
Morphed Wing (Configuration-2)	19	-1.5488	0.4984

Bu analiz sonucunda da kaldırma katsayısının negatif (aşağı yönlü) olarak artmış ve sürüklenme katsayısının da yaklaşık olarak pozitif yönde 2 kat arttığı gözlemlenmiştir. Negatif kaldırma kuvvetinden ötürü hava aracının tekerleri ve zemin arasında artacak olan sürtünme kuvveti ve pozitif yönde artan sürüklenme kuvveti sayesinde, hava freni etkileri gözlemlenmiştir.

Bu analizler sonucunda değişen kaldırma ve sürüklenme katsayılarının, herhangi bir hava aracının bir pistte frensiz bir şekilde durma mesafesine nasıl etki edeceğinin gözlenmesi açısından referans bir hava aracı parametreleri ile yalnızca sürüklenme ve kaldırma katsayıları değiştirilerek frensiz iniş mesafesi analitik olarak hesaplanmış ve Tablo 4’te karşılaştırmalı olarak sonuçlar gösterilmiştir.

Tablo 3: İniş mesafesi hesaplaması için kullanılan referans bir hava aracının parametreleri.

Gravitational acceleration	$g \left(\frac{m}{s^2} \right)$	9.81
Thrust at landing roll	T (N)	0
Weight	W (N)	39.29 ~ 4 kg
Friction coefficient of the runway	u	0.5
Density of air	$\rho_{air} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	1.225
Effective area	S (m^2)	1.28
Touchdown velocity	$V_{TD} \left(\frac{m}{s} \right)$	19

Tablo 4: Raylı balıksırtı mekanizması konfigürasyon-2 ve deforme olmamış durum (NACA 4412) için hesaplanan frensiz iniş mesafeleri.

Airfoil Profile	Free stream velocity (m/s)	C_L	C_D	Landing Distance (m)
NACA 4412	19	0.575	0.2385	63.8813
Morphed Wing (Configuration-2)	19	-1.5488	0.4984	5.9391

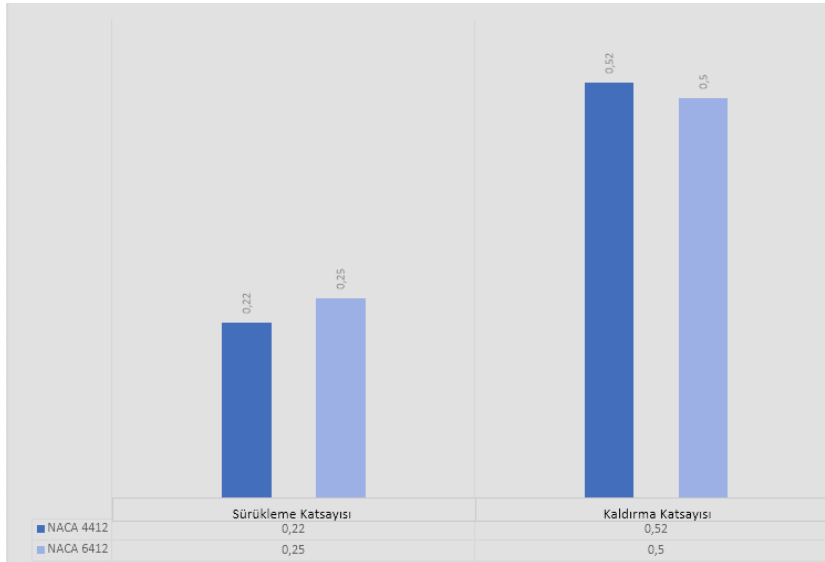
Hava freni etkisi oluşturan konfigürasyon-2' nin maksimum bükülme açısındaki frensiz iniş mesafesi ile deforme olmamış durumundaki (NACA 4412) frensiz iniş mesafesi arasındaki fark yaklaşık 58 metre olarak hesaplanmıştır.

RUZGAR TÜNELİ TESTİ

Dört kol mekanizmalı şekil değiştirebilen kanat prototipi için şekli değişiminin etkisini ölçmek amacı ile çalışmada rüzgâr tüneli testleri yapılmıştır (Şekil 10). Kanat, rüzgâr tüneli içerisine hücum açısı 10° olacak şekilde yerleştirilmiş ve test 20 m/s hava hızında gerçekleştirilmiştir. Kanada, şekil değişimi için gerekli tork, C noktasına (Şekil 6) yerleştirilen bir servo motor ile sağlanmıştır. Matlab Simulink ile programlanmış bir Arduino kartı kullanılarak kanadın üzerindeki servo motora gerçek zamanlı olarak açı komutları gönderilmiş ve şekil değişimi sağlanmıştır. Test sırasında aktif olarak şekil değişimi sağlanırken, bu değişim sonucunda kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti üzerinde olan değişim kanadın bağlı bulunduğu yük hücresi ile ölçülmüştür. Rüzgâr tüneline yapılan testler sonucunda prototipi yapılan kanadın, kanat profilinin yapısı NACA 4412 şeklinde iken yüksek kaldırma kuvveti, şekli değişimi sonucunda NACA 6412 şeklini alan kanat profili ile yüksek sürüklenme kuvveti verdiği görülmüştür (Şekil 11).



Şekil 10: Dört-kol mekanizması içeren şekil değiştirebilir kanat tasarımına ait rüzgâr tüneli testi



Şekil 11: NACA 4412 ve NACA 6412'nin 10° Hücum Açısındaki Sürükleme Katsayısının ve Kaldırma Katsayısının grafiği

SONUÇ

Bu çalışmada küçük taktik sınıfı bir insansız hava aracı için, şekil değiştirebilir iki farklı kanat tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımlarda insansız hava araçlarında sıklıkla kullanılan NACA 4412 ve NACA 6412 profilleri temel alınmış ve kanadın için yerleştirilen mekanizmalar ile kanadın bu iki profil arasında şekil değişimi yapması amaçlanmıştır. Raylı balık sırtı ismindeki ilk tasarımın prototipi ile yapılan testlerde, seçilen profiller arasında şekil değişiminin sağlanabildiği ayrıca mekanizmada bulunan prizmatik mafsallar sayesinde mekanizmanın yüksek deformasyon miktarlarına çıkabildiği ve bu sayede hava freni için de kullanılabileceği görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda NACA 4412 profilinde kanata sahip bir hava aracına kıyasla bu türden şekil değiştirebilir bir kanada sahip insansız hava aracının iniş mesafesinde yaklaşık %90 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Buna karşın, akış analizleri şekil değiştirebilir kanadın maksimum deformasyon miktarına göre yapılmış bu nedenle bu deformasyon miktarında kanata gelecek yüklerin yüksek boyutlarda olacağı varsayılmaktadır. Bu nedenle gerçek bir hava aracı için üretilecek versiyonu için yapısal analizler yapılmalı ve kanadın, gelen yüklere dayanabileceği optimum deformasyon miktarı belirlenmelidir. Dört kol mekanizmalı şekil değiştirebilir ikinci kanat tasarımında mekanizma, kanadın firar kenarını bükecek şekilde kanat içerisine yerleştirilmiş ve

kanat profilinin NACA 4412 ile NACA 6412 arasındaki şekil değişimine olanak sağlamaktadır. Bu tasarım ile yapılan rüzgar tüneli testlerinde, kanat şekil değiştirdiğinde sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinde değişim olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre şekil değiştirebilen bu kanat ile hava aracı havadaki değişken koşullara uyum sağlayabilir. Bu çalışmada kanadın malzemesi ve aerodinamik yüklere karşı yapısal dayanım gibi unsurlar göz ardı edilerek istenen kanat profilleri arasında şekil değiştirebilen kanat tasarımları yapılmıştır. İleriki çalışmalarda, bu çalışmada temeli oluşturulan iki tasarım, hava araçları için uygun malzemeler kullanılarak ve yapısal olarak güçlendirilmiş bir şekilde yeniden ele alınacak ve küçük taktik sınıfı bir insansız hava aracı üzerinde uygulanacaktır.

Kaynaklar

- Atlı, İ., Kurt, R., & Yeşil, M. 2020. *Karbon Fiber Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozitlerin Bağlantı Bölgelerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi*. Journal of Materials and Mechatronics: A, 1(2), 66-75.
- Beaverstock C.S., Woods B.K.S., Fincham J.H.S.-M., Friswell M.I., 2015 *Performance Comparison between Optimised Camber and Span for a Morphing Wing*. Aerospace, vol. 2, 524-554.
- Concilio A., Dimino I., Lecce L., Pecora R., 2018. *Morphing wing technologies: large commercial aircraft and civil helicopters*.
- NSL Aerospace, 2024. *Military Specifications and Standards for Aviation Sealants Guide*.
- Özgen S., Güçlü S., Şahin M., Yaman Y., Bayram G., Uludağ Y. ve Yılmaz A., 2008. *Şekil Değiştiren Uçaklar Havacılıkta Yeni Bir Devrim Yaratabilir mi*, Savunma ve Havacılık, 22126, 125-128.
- S.H. Lim, S.R. Kim, S.Y. Kang, J.K. Park, J.T. Nam, Derac Son, 1999. *Magneto strictive properties of polymer bonded Terfenol-D composites*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials Volume 191, Issues 1-2, 19 Pages 113-121
- Weisshaar T. A., 2006. *Morphing aircraft technology new shapes for aircraft design*, Multifunctional Structures/Integration of Sensors and Antennas.