

## BÜYÜK ORANDA ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN KANATLARIN AERODİNAMİK VE YAPISAL TASARIMI

Levent ÜNLÜSOY <sup>(a)</sup>, D. Sinan KÖRPE <sup>(b)</sup>, Melin ŞAHİN <sup>(c)</sup>,  
Serkan ÖZGEN <sup>(d)</sup>, Yavuz YAMAN <sup>(e)</sup>

<sup>(a)</sup> Arş. Gör. ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06800, Ankara, [lunlusoy@ae.metu.edu.tr](mailto:lunlusoy@ae.metu.edu.tr)

<sup>(b)</sup> Arş. Gör. ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06800, Ankara, [dskorpe@ae.metu.edu.tr](mailto:dskorpe@ae.metu.edu.tr)

<sup>(c)</sup> Yrd. Doç. Dr. ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06800, Ankara, [msahin@metu.edu.tr](mailto:msahin@metu.edu.tr)

<sup>(d)</sup> Prof. Dr. ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06800, Ankara, [sozgen@ae.metu.edu.tr](mailto:sozgen@ae.metu.edu.tr)

<sup>(e)</sup> Prof. Dr. ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06800, Ankara, [yvaman@metu.edu.tr](mailto:yvaman@metu.edu.tr)

### ÖZET

Bu çalışmada, son yıllarda göreve uyumlu havacılık yapıları ve malzemelerinin üretim teknolojilerindeki gelişmelerle ortaya çıkan ve uçakların havadayken farklı görev evrelerinde (dalış, tırmanma, düz uçuş, dönüş, bekleme, vb.) en iyi performansı verebilecek şekilde uçabilmesini sağlayabilecek, büyük oranda şekil değiştirebilen (fully morphing) kanatların aerodinamik ve yapısal tasarım süreci ve en iyileştirilmesi üzerine izlenen yol anlatılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Şekil Değiştirebilen Kanatlar, Kanat Tasarımı, Çoklu Disiplinlerde En İyileştirilme

### ABSTRACT

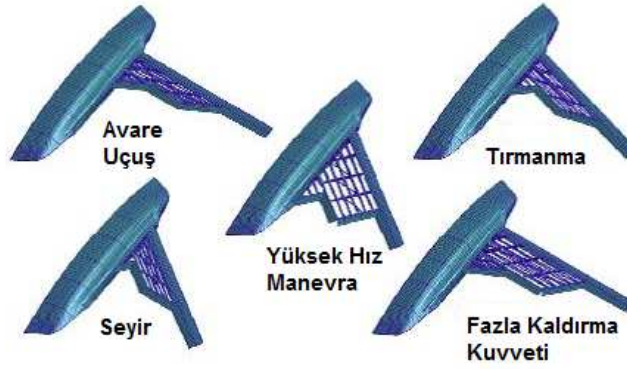
In this study, the developing steps of aerodynamic and structural design and optimization of fully morphing wings were presented. The fully morphing wings are the outcome of recent advances in the production of adaptive aerospace materials and structures and can provide the optimum shape for varying flight conditions such as, diving, climbing, cruising, maneuvering and loitering.

**Keywords:** Morphing Wings, Wing Design, Multidisciplinary Optimization

## 1. GİRİŞ

“Büyük Oranda Şekil Değiştirebilir Hava Aracı” terimi uçuş sırasında kanat plan şekillerini belirgin olarak değiştirebilme yeteneğine sahip hava taşıtlarını tanımlamak için kullanılmaktadır. Böyle bir yeteneğin yakıt tasarrufunu, görev yeteneğini, görev başarımını ve esnekliğini artırma potansiyeline sahip bir etken olduğuna inanılmaktadır.

Konvansiyonel sabit kanatlı uçakların kanat plan şekilleri ve kanat profilleri bu tip uçakların görev profillerinin sadece bir evresi için en iyileştirilmiş olarak tasarlanmaktadır. Örneğin nakliye uçakları seyir performansını, avcı uçakları manevra kabiliyetini, keşif ve gözetleme uçakları ise turlama başarımlarını en iyileştirecek kanat tasarımlarına sahiptirler. Farklı görev evreleri için en iyileştirilmiş bazı kanat şekil örnekleri Şekil 1’de gösterilmektedir [1].



Şekil 1: Farklı Uçuş Koşulları İçin En İyileştirilmiş Kanat Şekilleri [1]

Sabit kanatlı uçaklar tasarım evresi dışında kalan uçuş evrelerinde en iyi performansı sergileyememektedir. Buna karşılık şekil değiştirebilme yeteneği uçuşun tüm evreleri için en iyi performansı sunma potansiyeline sahiptir. Şekillendirilebilme yeteneği sayesinde birden fazla tipte uçak gerektiren görevlerin daha az sayıda, hatta tek tip uçak ile başarılması mümkün olabilecektir. Bunun yanı sıra, şekillendirilebilme yeteneği sayesinde mevcut sabit kanatlı uçaklarda bulunan ve Şekil 2’de de gösterilen karmaşık ve ağır kumanda yüzeyi mekanizmalarının basitleştirilmesi, hatta tamamen ortadan kaldırılması mümkün olabilecek, aerodinamik gürültü ve sürüklenme kuvveti de azaltılabilecektir.



Şekil 2: Günümüz Uçaklarında Bulunan Karmaşık Kumanda Yüzeyleri ve Mekanizmaları

Her ne kadar bir hava aracını “büyük oranda şekil değiştirebilir” olarak nitelendirmek için kesin bir sayısal ölçüt bulunmasa da, kanat açıklığının %200, kanat alanının %50 ve kanat süpürme açısının  $20^\circ$  değiştirilmesi literatürde genel kabul görmüş değerlerdir [2]. Konvansiyonel kumanda yüzeylerine sahip olmayan uçaklar da “şekil değiştirebilir” olarak tanımlanmaktadır. Bu kavram dahilinde ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü’nde Ekim 2007 – Mayıs 2011 tarihleri arasında yürütülen 107M103 kodlu TÜBİTAK projesi kapsamında sürekli kambur ve burulma değişimi yeteneklerine sahip bir uçak tasarlanmış ve 3 Şubat 2011 tarihinde başarıyla uçurulmuştur [3-9].

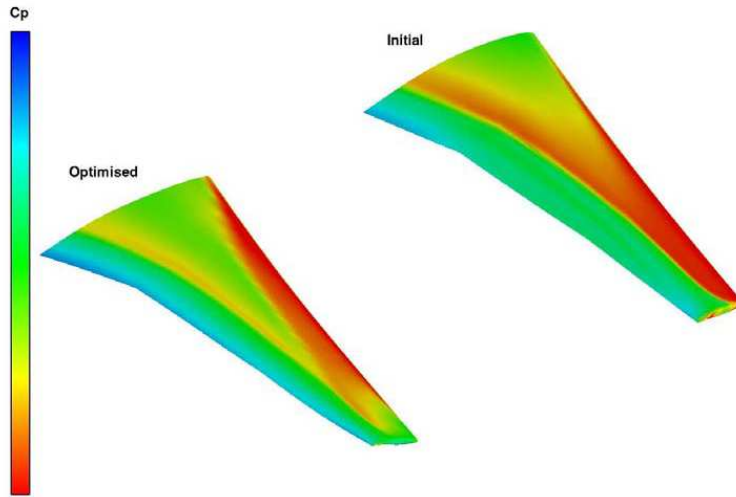
DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)’ya göre bir hava aracının “şekil değiştirebilir” olarak nitelenebilmesi için değişen görev koşullarına uyum sağlamak amacıyla durumunu belirgin bir şekilde değiştirebilme yeteneğine; ancak şekil değişikliği sayesinde mümkün olabilecek sistem kabiliyetine ve ileri malzemeler, uyarıcılar, akış düzenleyiciler ve mekanizmaların yenilikçi bir yaklaşımla entegre edildiği ve durum değişikliğini mümkün kılan bir tasarıma sahip olması gerekmektedir [10]. Böylece aerodinamik etkinliğin (taşıma/ sürükleme oranı) artması, karmaşık ve ağır flap/ kumanda mekanizmalarının ortadan kaldırılması/ basitleştirilmesi, aerodinamik gürültünün azalması, yakıt tüketiminin azalması, titreşimlerin kontrol altında tutulması ve daha yüksek görev esnekliğinin sağlanması mümkün olabilecektir.

Kanatları şekil değiştirme yeteneğine sahip uçak tasarımının sadece insansız hava araçları ile sınırlı kalabileceği düşünülmemelidir. 2009 yılında Air Force Magazine dergisinde yayınlanan bir yazıda, 6. nesil muharip uçakların tasarımında uçuş sırasında şekil değiştirme yeteneğinin olabileceği ve bu şekil değişikliğinin de hız ya da yapısal özellikler göz önünde tutularak en iyileştirilebileceği belirtilmiştir [11].

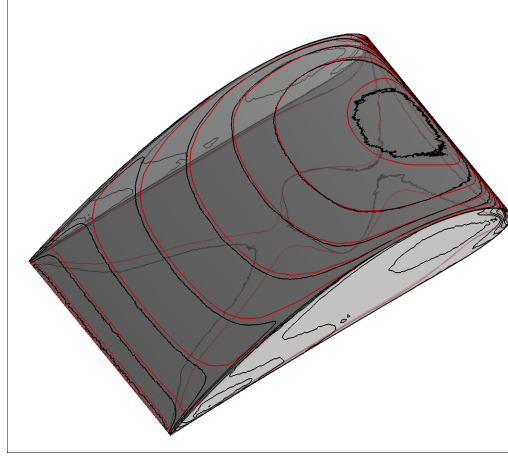
## 2. AERODİNAMİK TASARIM VE EN İYİLEŞTİRME

Şekil değiştirebilen kanatlarla ilgili yapılan tasarım çalışmalarında, şu ana kadar, genellikle uçuş zarfının düz uçuş ya da seyir evresinde sürüklenme kuvvetinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu sayede hava aracı daha az yakıt harcamakta, menzili ve havada kalma süresi artmaktadır [12, 13].

Aerodinamik tasarım ve en iyileştirme yöntemlerine göre, şekil değiştirebilen kanatların bu özelliğini sağlayan tasarım parametreleri (kanat açıklığı, kanat kök ve ucundaki veter boyundaki değişiklik ve burulma açısı) ve bu parametrelerin sahip olabileceği en büyük ve en küçük değerler göz önünde tutularak şekil değiştirebilen kanatların tasarlanması ve en iyileştirilmesi için etkili araçlar geliştirilmiştir. Şekil 3 bu yaklaşımla en iyileştirilmiş bir kanadı göstermektedir. Yaklaşık elli yıldır sürekli gelişmekte olan hesaplamalı akışkanlar mekaniği algoritmaları aerodinamik tasarım sürecinde oldukça etkin bir rol almaktadır. Sürekli olarak gelişen bu algoritmaların güvenilirliğindeki artış beraberinde işlem maliyetlerini de arttırmaktadır. Bundan dolayı ön tasarım sürecinde hala ideal akış çözümleri (panel ve girdap örgü metotları) ve sınır tabakası çözümlerinin birleşiminden oluşan metotlar kullanılmaktadır. Şekil 4'te NACA 4412 kanatçık profiline sahip bir kanadın üzerindeki basınç katsayısı dağılımının ticari bir sonlu elemanlar çözümlerine ve açık literatür kullanılarak geliştirilmiş olan panel metotla bulunmuş değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3: En iyileştirme Sürecinde İlk Kanat (sağ) ve En iyileştirilmiş Kanat (sol) Üzerindeki Basınç Katsayısı Dağılımı [14]



Şekil 4: Basınç Katsayısı Değerleri Karşılaştırmaları (—Ticari Yazılım, — Geliştirilen Panel Metot)

### 3. YAPISAL TASIRIM VE EN İYİLEŞTİRME

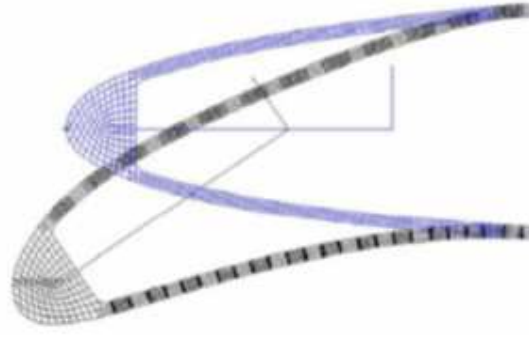
Şekil değiştirebilen yapıların yapısal tasarımı, hedeflenen şekil değişikliğini başarabilecek bir mekanizmanın ve beklenen görevlerin tamamlanmasını sağlayacak mukavemette bir yapının tasarlanmasını içermektedir. Her şekil değişikliği kavramının altında, aslında birbirinden farklı mekanizma sentezleri yatmaktadır. Başlangıç ve hedef geometrileri yapısal tasarımcının esas tasarım kriterleridir. Belirlenen kriterler doğrultusunda dikkat edilmesi gereken alt kriterler de mevcuttur. Bu alt kriterler yapının en iyileştirme parametrelerini içermektedir. Her havacılık yapısında beklendiği şekilde asgari ağırlık kriterinin yanı sıra, asgari gürültü, asgari aktivasyon kuvvet gereksinimi gibi alt belirleyicilere de ihtiyaç duyulmaktadır.

Asgari gürültü kriteri yapısal tasarım açısından aeroelastik en iyileştirme değildir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta hedef şeklin daha önce aerodinamik en iyileştirme sürecinden çıkmış olmasıdır. Bu bağlamda aeroelastik en iyileştirme süreci sabit aerodinamik yük altında yapısal değişiklikler gerektirmektedir. Yapısal en iyileştirme de yapının doğal frekans değerlerinin en iyi aeroelastik karakteri gösterecek biçimde ayarlanmasıdır.

Aktivasyon kuvvetinin asgariye indirilmesi ise temelde aktivasyon kuvvetini oluşturan sistemin (örn: servo motor) konumunun en iyileştirilmesidir. Böylelikle sisteme daha az güç aktaran aktivasyon sistemleri kullanılabilir ve dolaylı olarak hem maliyet hem de ağırlıktan tasarruf edilecektir.

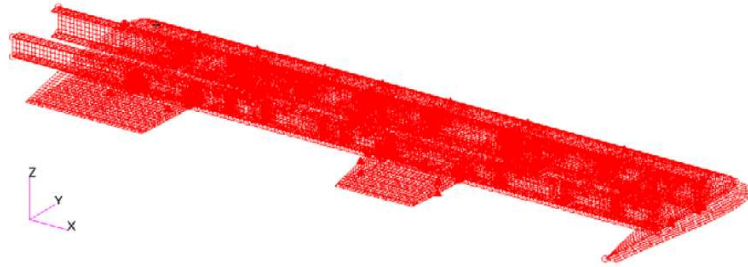
Büyük oranda şekil değiştirebilen kanat/ kontrol yüzeylerinin yapısal tasarım ve en iyileştirme sürecinde izlenecek yaklaşım genelde aşağıda belirtildiği gibidir.

- a. Başlangıç ve hedef geometrilerin belirlenmesi: Aerodinamik tasarım ve en iyileştirme sürecinin ardından kanadın geometrik şekli, son boyutları belirlenerek sabitlenir. Literatürden ilgili bir örnek Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5: Bir Şekil Değişirme Yaklaşımında Başlangıç (mavi) ve Hedef (siyah) Geometriler [15]

- b. Şekil değiştirme mekanizmasının kavramsal tasarımı: Belirlenen başlangıç ve hedef geometriler arasında değişimi sağlayabilecek mekanizmalar bu basamakta sentezlenir. Mekanizma sentezi ve/veya servolar ve/veya akıllı malzemelerin kullanılması bu noktada değerlendirilir.
- c. Şekil değiştirme mekanizmasının kanada yerleştirilmesi: Bu basamakta tasarlanan mekanizmanın işlevini sağlayabilen en küçük kuvvetin büyüklüğünün ve konumunun bulunması hedeflenir.
- d. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve yapısal en iyileştirme: Burada ön yapısal çözümler için gerekli, detaylı bir sonlu elemanlar modelinin oluşturulması süreci gerçekleştirilir. Bu süreçte oluşturulan yapısal model kullanılarak, aerodinamik yükler altında yapısal analizler yapılarak kanadın yapısal en iyileştirilmesi hedeflenir. Her en iyileştirme basamağında yapısal model güncellenir. ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde tasarlanan ve başarıyla uçurulan kısmi şekil değiştirme yeteneğine sahip bir insansız hava aracını kanadının detaylı sonlu elemanlar modeli Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde Tasarlanan Kısmi Şekil Değişirme Yeteneğine Sahip Bir İnsansız Hava Aracını Kanadının Detaylı Sonlu Elemanlar Modeli [16]

- e. Tasarımın tamamlanması: Tüm basamaklar tamamlandıktan sonra en iyi aeroelastik özelliklere sahip ve asgari aktivasyon kuvveti gereksinimindeki yapı belirlenerek son konfigürasyona ulaşılır.
- f. Yapısal analizler: Sabitlenen tasarımın gerekli yapısal analizleri yapılır. Yapısal çözümlerde genellikle sonlu elemanlar programları kullanılmaktadır.

#### 4. SONUÇ

Bu bildiriye geleceğin en önemli teknolojik ilerlemelerinden biri olmaya aday şekil değiştiren yapılarla ilgili olarak ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde sürdürülen çalışmaların hedefleri ve ana hatları anlatılmıştır.

Şekil değiştirebilen hava araçlarının geliştirilmesi süreci çoklu disiplinlerde tasarım ve en iyileştirme süreçlerini de beraberinde getirmektedir. Bu süreçlerin ardından elde edilecek sonuçlar sadece havacılık sektöründe ileriye götürücü tasarım yeniliklerini oluşturmakla kalmayacak; insan hayatında hava ve gürültü kirlilikleri açısından büyük bir iyileştirmeyi de beraberinde getirecektir. Günümüzde insan tarafından oluşturulan sera gazlarının %2'sinin nedeni hava araçlarıdır. Bu oranın 2050 yılında %3 seviyesine yükseleceği beklenmektedir. Bundan dolayı Avrupa Komisyonu ve Avrupa havacılık endüstrisinin büyük ortakları tarafından Clean Sky adı verilen bir teknoloji girişimi oluşturulmuş ve havacılığın yarattığı çevre ve gürültü kirliliklerini azaltmaya yönelik proje çalışmalar başlatılmıştır. Bu projelerden birçoğunda şekil değiştirebilen kanatlar/ kontrol yüzeyleri değerlendirilmektedir [17].

#### KAYNAKÇA

- [1] B. Canfield, J. Westfall, (2008), "Distributed Actuation System for a Flexible In-Plane Morphing Wing", Advanced Course on Morphing Aircraft, Mechanisms and Systems, Lisbon, Portugal.
- [2] M. D. Skillen, W. A. Crossley, (2007), "Modeling and Optimization for Morphing Wing Concept Generation", NASA/CR-2007-214860.
- [3] G. Seber, M. Şahin, S. Özgen, V. Nalbantoğlu, Y. Yaman, (2008), "Göreve Uyumlu Kanat Tasarım ve Geliştirme Çalışmaları", SAVTEK 2008, 4. Savunma Teknolojileri Kongresi, 26-27 Haziran, ODTÜ, Ankara, Bildiriler Kitabı: Cilt I, 609-616
- [4] Y. Yaman, S. Özgen, M. Şahin, G. Seber, V. Nalbantoğlu, E. Sakarya, E. T. İnsuyu, L. Ünlüsoy, (2009), "Göreve Uyumlu Kanatlara Sahip Bir İnsansız Hava Aracının Tasarımı", UMTS2009, 14. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, ODTÜ Kuzey Kıbrıs Kampüsü, 02-04 Temmuz, Güzelyurt, KKTC, Bildiriler Kitabı: 275-281

- [5] M. Şahin, L. Ünlüsoy, E. Sakarya, E. T. İnsuyu, G. Seber, S. Özgen, Y. Yaman, (2010), "Göreve Uyumlu Bir İnsansız Hava Aracı Kanadının Yapısal Modellenmesi ve Deneysel Doğrulanması", SAVTEK 2010, 5. Savunma Teknolojileri Kongresi, 23-25 Haziran, ODTÜ, Ankara, Bildiriler Kitabı: 663-670
- [6] M. Şahin, E. T. İnsuyu, E. Sakarya, L. Ünlüsoy, G. Seber, S. Özgen, Y. Yaman, (2010), "Göreve Uyumlu Bir İnsansız Hava Aracı Gövdesinin Yapısal Tasarımı ve Analizi", SAVTEK 2010, 5. Savunma Teknolojileri Kongresi, 23-25 Haziran, ODTÜ, Ankara, Bildiriler Kitabı: 671-678
- [7] L. Ünlüsoy, Y. Yaman, M. Şahin, S. Özgen, G. Seber, E. T. İnsuyu, E. Sakarya, (2011), "Göreve Uyumlu Kanatlara Sahip Bir Hava Aracının Uçuş Testleri ve Yapısal Geliştirilmesi", UMTS2011, 15. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, Niğde Üniversitesi, 16-18 Haziran, Niğde, Bildiriler Kitabı: 001-010
- [8] S. Özgen, Y. Yaman, M. Şahin, G. Seber, E. Sakarya, L. Ünlüsoy, E.T. İnsuyu, G. Bayram, Y. Uludağ, A. Yılmaz, (2010), "Morphing Air Vehicle Concepts", International Unmanned Vehicle Workshop, İstanbul, Turkey.
- [9] M. Şahin, E. Sakarya, L. Ünlüsoy, E. T. İnsuyu, G. Seber, S. Özgen, Y. Yaman, (2010), "Design, Analysis and Experimental Modal Testing of a Mission Adaptive Wing of an Unmanned Aerial Vehicle", International Unmanned Vehicle Workshop, İstanbul, Turkey.
- [10] A. M. R. McGowan, (2008), "Overview: Morphing Activities in the USA", *Advanced Course on Morphing Aircraft, Mechanisms and Systems*, Lisbon, Portugal.
- [11] J. A. Tirpak, (2009) "the Sixth Generation Fighter", *Airforce Magazine*, V. 92, No. 10.
- [12] P.Gamboa, J. Vale, F. J. P. Lau, A. Suleman, (2009), "Optimization of a Morphing Wing Based on Coupled Aerodynamic and Structural Constraints", *AIAA J.*, V. 44, No. 9, p. 2087-2104.
- [13] M. Secanell, A.Suleman, P.Gamboa, (2006), "Design of a Morphing Airfoil Using Aerodynamic Shape Optimization", *AIAA J.*, V. 44, No. 9, p. 1550-1562.
- [14] H. Barnewitz, (2009), "Flexible Wing Optimisation Based on Shapes and Structures", *MEGADESIGN and MegaOpt, NNFM*, no. 107, pp. 287-305.
- [15] G. Amiryants. et. al., (2010) "Selectively Deformable Structures for Design of Adaptive Wing Smart Elements as Part of Active Aeroelastic Wing Concept", 1<sup>st</sup> EASN Association Workshop, October 7-8, Paris
- [16] L. Ünlüsoy, (2010) "Structural Design and Analysis of the Mission Adaptive Wings of an Unmanned Aerial Vehicle", MSc. Thesis, METU
- [17] [www.cleansky.eu](http://www.cleansky.eu), (08.12.2011).