

## ŞEKİL DEĞİŞTİREBİLEN KANAT TASARIM, ANALİZ VE TESTİ

Burak Çavuşoğlu<sup>1</sup> ve Arif Özer<sup>2</sup>  
Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara

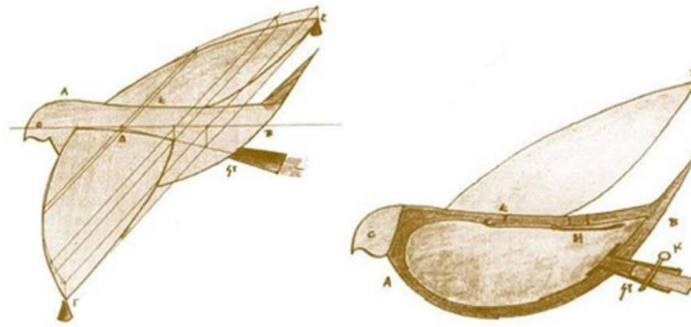
Doç. Dr. Ali Ruhşen Çete<sup>3</sup>  
Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara

### ÖZET

*Bu çalışma, kanat profillerinin aerodinamik performansını arttırmaya yönelik "şekil değiştirebilen kanat" konsepti üzerine yoğunlaşmaktadır. Konseptin temel amacı aerodinamik verimliliği artırarak kanat performansını iyileştirmeye yöneliktir. Çalışma şekil değiştirme mekanizmasına getirilmiş inovatif fikirleri, sayısal çözümleri ve deneysel çalışmaları içermektedir.*

### GİRİŞ

Havacılıkta kanat aerodinamiği üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe iyileştirilmekte, hava araçlarının kanat performansı, uçuş menzili, verimlilik, ağırlık vb. sorunlarını çözmeyi hedeflemektedir. Özellikle yapısal alanda, kompozit malzeme kullanımları hem ağırlığı minimize etmekte hem de verimlilik hususunda büyük fayda sağlamaktadır. Kompozit malzemeler farklı dayanıklılıklara sahip olup, çok geniş kullanım alanlarında kendilerine yer bulabilmektedir. Bu çalışma yeni nesil şekil değiştirebilen kanat yapısı tasarım ve performansını incelemeyi hedeflemektedir. Yapılan çalışma, ilham kaynağını insanlığın uçmaya karşı olan hevesini yüzyıllarca körüklemiş olan kuşlardan almıştır.



Şekil 1 Buharlı Güvercin Eskizler [The Steam-Powered Pigeon of Archytas – The Flying Machine of Antiquity, 2021]

<sup>1</sup> Y.L. Öğrenci, Hv. Uz. Bil. Ens., E-posta: burakcavusoglu@hotmail.com

<sup>2</sup> Öğrenci, Uçak Müh. Böl., E-posta: arifozer.17@gmail.com

<sup>3</sup> Doç. Dr. Öğr. Üyesi, Uçak Müh. Böl., E-posta: arcete@thk.edu.tr

## YÖNTEM

Hava araçlarında verimlilik ve performans iyileştirmelerini hedefleyen konseptlerden biri şekil değiştirebilen kanatlardır. Geleneksel sabit kanatlı taşıtlar, kalkış, iniş, seyir gibi uçuş aşamalarına göre optimize edilmiş kanatlara sahiptir. Öte yandan şekil değiştirebilen kanat konsepti uçuş boyunca ihtiyaç dahilinde geometrilerini dinamik olarak değiştirebilme imkânı sunar.

Bu alanda yapılmış öncül çalışmalar aerodinamik yüklere karşı doğal deformasyon gösteren malzemeler kullanarak pasif şekil değiştirme mekanizmalarına odaklanmıştır [Chng, 2013]. Karmaşık yapılara ihtiyaç duymadan pürüzsüz şekil değişikliği elde etmek için çeşitli doğal materyaller kullanılmıştır. Bu erken çalışmalar aktif şekil değiştirebilen kanat çalışmaları için iyi bir motivasyon kaynağı olmuştur.

Aktif şekil değiştirme mekanizmaları için akıllı malzemeler ya da aktüatörler kullanılır. Şekil hafızalı alaşımlar ve piezoelektrik malzemeler, sıcaklık veya elektrik alan gibi dış uyarıcılara tepki göstererek şekil değiştirme imkânı sunabildiği için yaygın olarak tercih edilmektedir [Choi, Lee, & Kim, 2010; Barbarino, Ameduri, Iannuzzo, & Lecce, 2008]. Bunun yanı sıra doğrusal, döner ve hibrit aktüatör sistemleri de bu konseptin geliştirilmesi için kullanılan metotlardandır. Bu çalışmada kullanılan iskelet ve şekil değiştirme mekanizması, kılıcı baz alınarak oluşturulmuş olup, yapının doğası gereği var olan esnekliğinin kanat üzerine etkileyen kuvvetlerin eşit dağılımını sağlaması amaçlanmıştır. Aynı zamanda yüksek hızlarda, eşit dağılımı beklenen kuvvet tasarım sayesinde eşit direnci göstererek "aerodynamic fluctuation- aerodinamik çarpınma" durumunun önüne geçmesi beklenmektedir.

## UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Uygulamalar ve değerlendirme başlığı altında, önceki başlıklarda anlatımı yapılmış temelleri baz alana projenin tasarım, malzeme seçimi, üretimi, HAD yöntemleri ile yapılmış sayısal analizlerini ve planlanan deneysel çalışmasına dair ayrıntılara ulaşmak mümkündür.

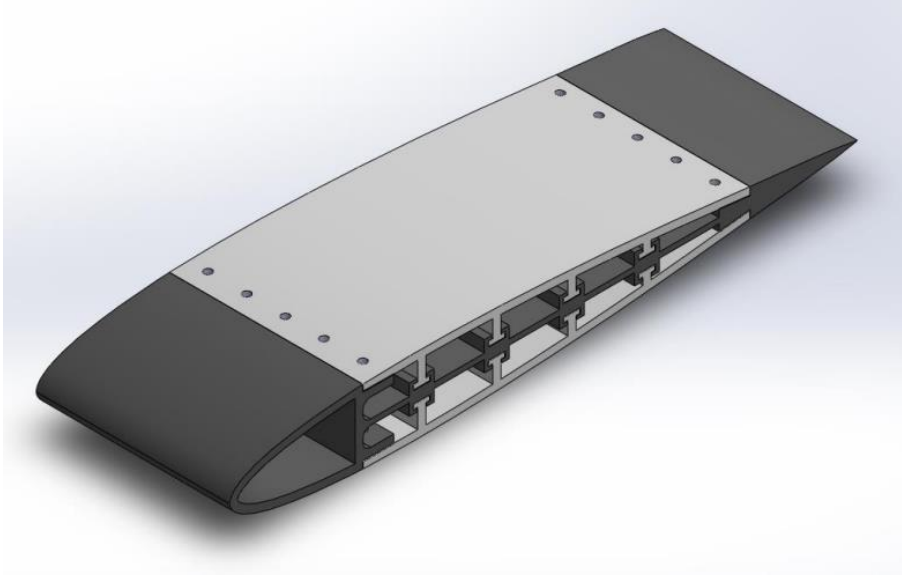
## TASARIM VE ÜRETİM SÜREÇLERİ

Projenin konsept tasarım aşamasında havacılıkta yaygın olarak kullanılan malzemeler incelenmiş ve bu malzemeler arasında hangisinin gerçek uygulamalarda kullanılabileceği konusu irdelenmiştir. Alüminyum ve kompozit malzemelerin esnek olması gereken model için uygun olmayacağı, silikon, kauçuk ve termoplastik malzemelerin ise esneklikleri sebebiyle uygulamaya daha müsait olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra silikon malzemelerin burulma gibi problemler çıkartabileceği ve aerodinamik yüzeylerin yeteri kadar düzgün olmayacağı kaygısıyla bu malzemeler de geride bırakılmıştır. Son olarak TPU ve PLA gibi düşük maliyetli, üretimi kolay ve görece esnek malzemeler ile çalışılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Aşağıdaki tabloda malzemelerin özelliklerine dair birtakım ayrıntılara yer verilmiştir.

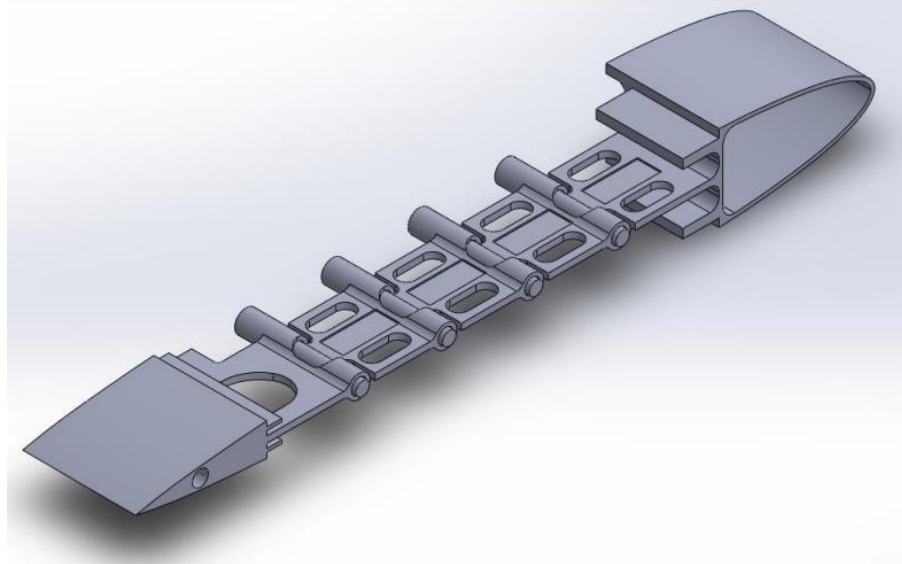
**Tablo 1** Malzeme Karşılaştırmalı Tablosu

| Candidate Material | Young's Modulus | Density              | Stiffness | Flexibility | Durability | Weight | Problem             |
|--------------------|-----------------|----------------------|-----------|-------------|------------|--------|---------------------|
| ALUMINUM           | 70-80 GPa       | 2.7g/cm <sup>3</sup> | Good      | Poor        | Good       | Heavy  | Heavy               |
| RUBBER             | 0.01-0.1 GPa    | 0.9g/cm <sup>3</sup> | Poor      | Good        | Good       | Medium | Buckling            |
| TPU                | 0.6-5 GPa       | 1.3g/cm <sup>3</sup> | Poor      | Good        | Good       | Medium | Heavy               |
| PLA                | 2.5-6 GPa       | 1.4g/cm <sup>3</sup> | Medium    | Medium      | Medium     | Medium | Low Heat Resistance |
| LW-PLA             | 2-3 GPa         | 1.2g/cm <sup>3</sup> | Medium    | Medium      | Medium     | Light  | Low Heat Resistance |
| SILICON            | 1-3 MPa         | 1.3g/cm <sup>3</sup> | Poor      | Good        | Good       | Medium | Buckling            |

Tasarım aşamasında iki ana fikir ortaya atılmıştır ve bunlar: eğimli kiriş sistemi ve bölünmüş kirişli menteşe sistemleridir. Görselleri aşağıdaki figürlerde sunulmuştur. İki sistemin de kendince avantaj ve dezavantajları olduğunu göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Kabaca inceleyecek olursak eğimli kiriş sistemi basit yapısı artısının yanında sistemin çalışması için iyi bir kuvvet aktarımı ve kuvvet kaynağı gerektirecektir. Öte yandan bölünmüş kirişli menteşe sistemi düşük kuvvet gereksinimi ve sunduğu esneklik kabiliyeti ile öne çıkmaktadır. Bu yüzden de tasarım bu metoda dayandırılarak oluşturulmuştur.



Şekil 2 Eğimli Kiriş Sistemi Cad Modeli



Şekil 3 Bölünmüş Kirişli Menteşe Sistemi Cad Modeli

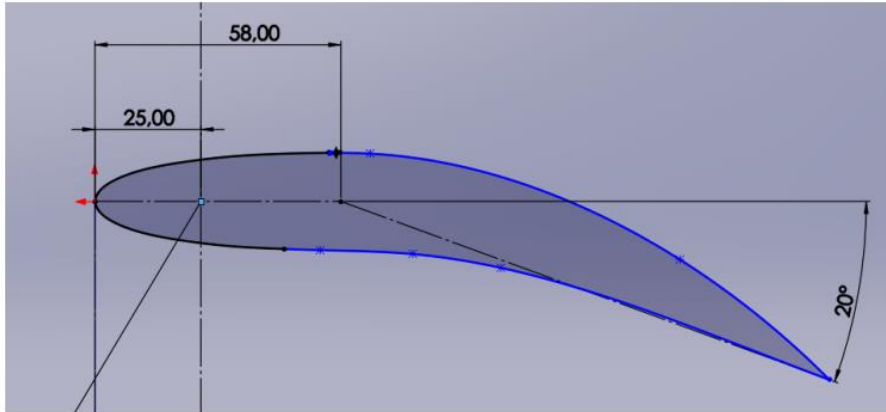
Tasarlanan model üretim kolaylığı ve düşük maliyetleri sebebiyle 3D yazıcı kullanılarak PLA (polylactic acid) ile üretilmiştir.



Şekil 4 PLA ile Üretilmiş Prototip İskelet

### SAYISAL ANALİZLER VE ÇÖZÜCÜ AĞ YAPISI

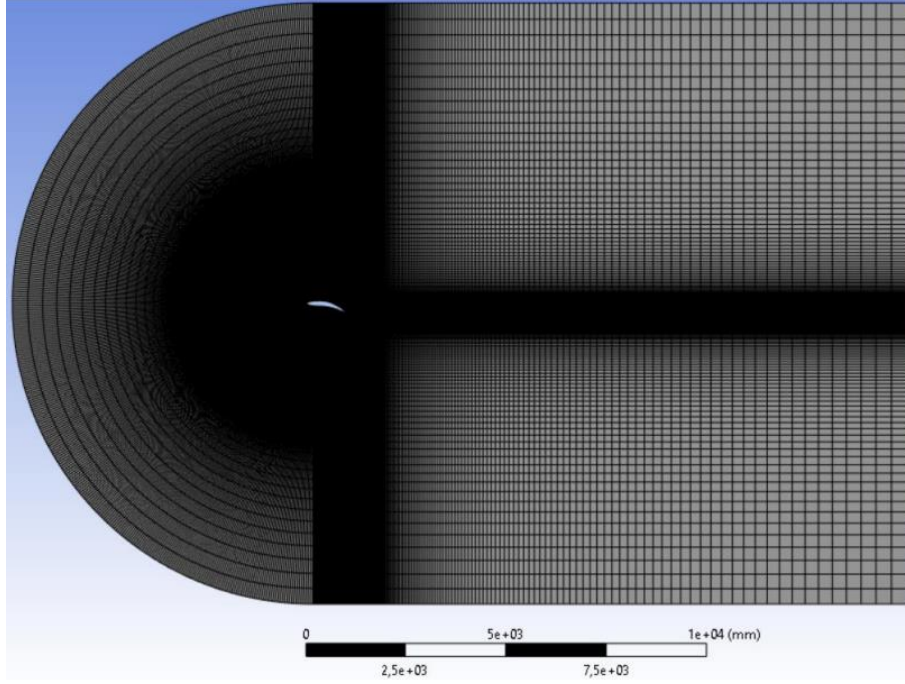
Çalışmanın performans karşılaştırmasının yapılabilmesi adına NACA 0012 kanat profili plain flap konfigürasyonu ile incelenmiştir. Karşılaştırma esnasında NACA 0012 kanat profilinin plain flap açıları 10, 20, 30 ve 40 derece; şekil değiştirebilen kanadın ise değişim açısı 5, 10, 15 ve 20 derece olarak seçilmiştir. Şekil 5 ve 6'da karşılaştırılması yapılan alternatiflerden 20 derece açı verilmiş kanat görülmektedir. Şekil 7 ve 8 ise çözüm yapılan ağ yapısının genel görselleridir. Bunun yanısıra şekil 9 ve 10'da kanat profili etrafındaki sınır tabaka ağının detaylı yapısına yer verilmiştir.



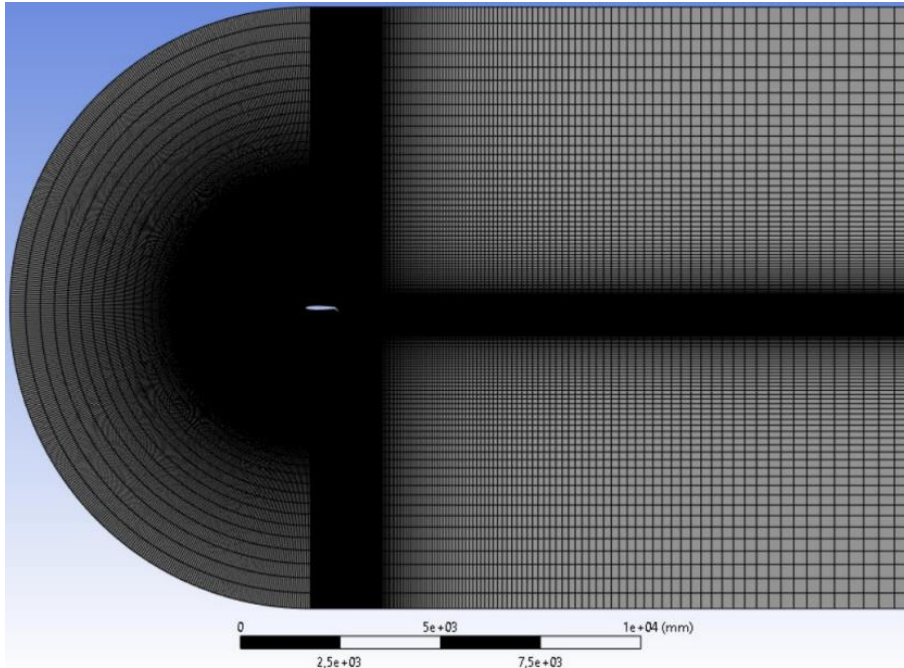
Şekil 5 20 derece deflection açısı verilmiş kanat çizimi



Şekil 6 20 derece deflection açısı verilmiş prototip

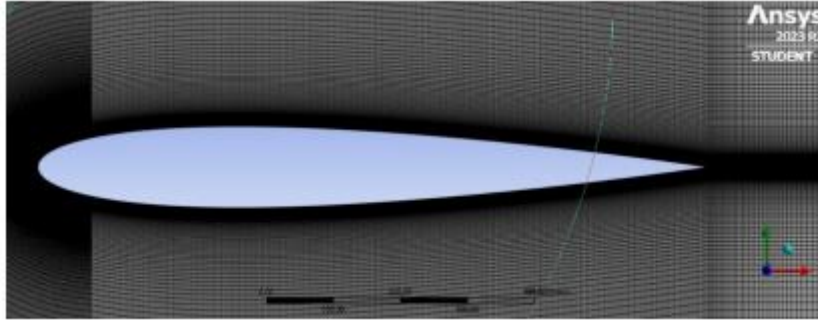


Şekil 7 20 derece deflection açılı kanadının çözücü ağ yapısı

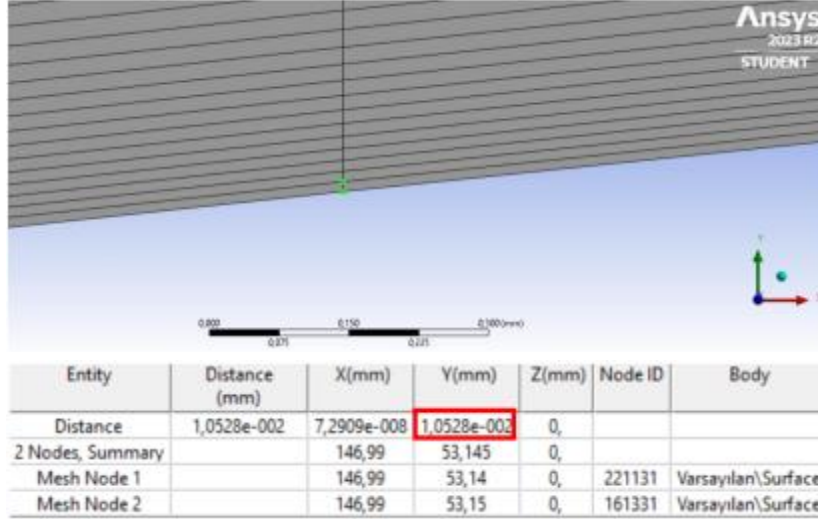


Şekil 8 Karşılaştırması yapılan NACA 0012- 40 derece açılı plain flap



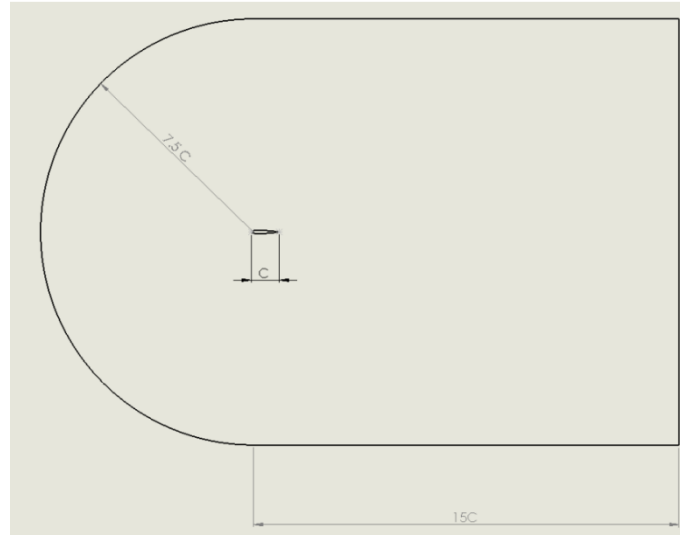


Şekil 9 Çözüm yapılan ağın detaylı görseli



Şekil 10 Ağ yapısının detayları

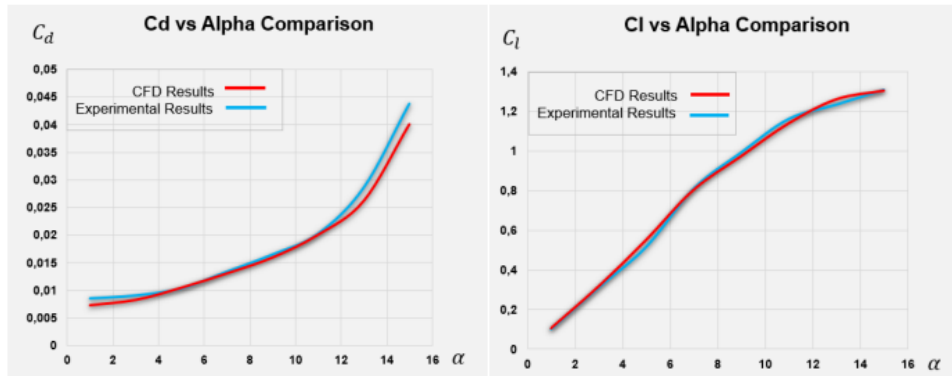
Çalışma esnasında 350000 elemanlı çözüm ağı kullanılmıştır. Şekil 11'da çözüm ağının ölçüm detaylarını göstermektedir. Ansys Fluent ile yapılan sayısal çözümlerde farklı türbülans modelleri denenmiş ve sonuçlar arasında büyük ölçüde uyum sağladığı görülen Spalart-Allmaras modelinin uygulanmasına karar verilmiştir. Tablo 2'de ise NACA 0012 kanat profiline ait deneysel ve sayısal çalışmanın sonuçlarına yer verilmiştir [Khalid & Haseeb, 2022; Eftekhari & Al-Obaidi, 2019]. Tabloda verilmiş olan hata (error) değerleri % hata oranını ifade etmektedir. Bu tablodaki değerlerin elde edilme metodolojisi temel alınarak ileri çözümlerin güvenilirliği görülmüş, bu da çalışmanın sayısal olarak doğrulanmasını sağlamıştır.



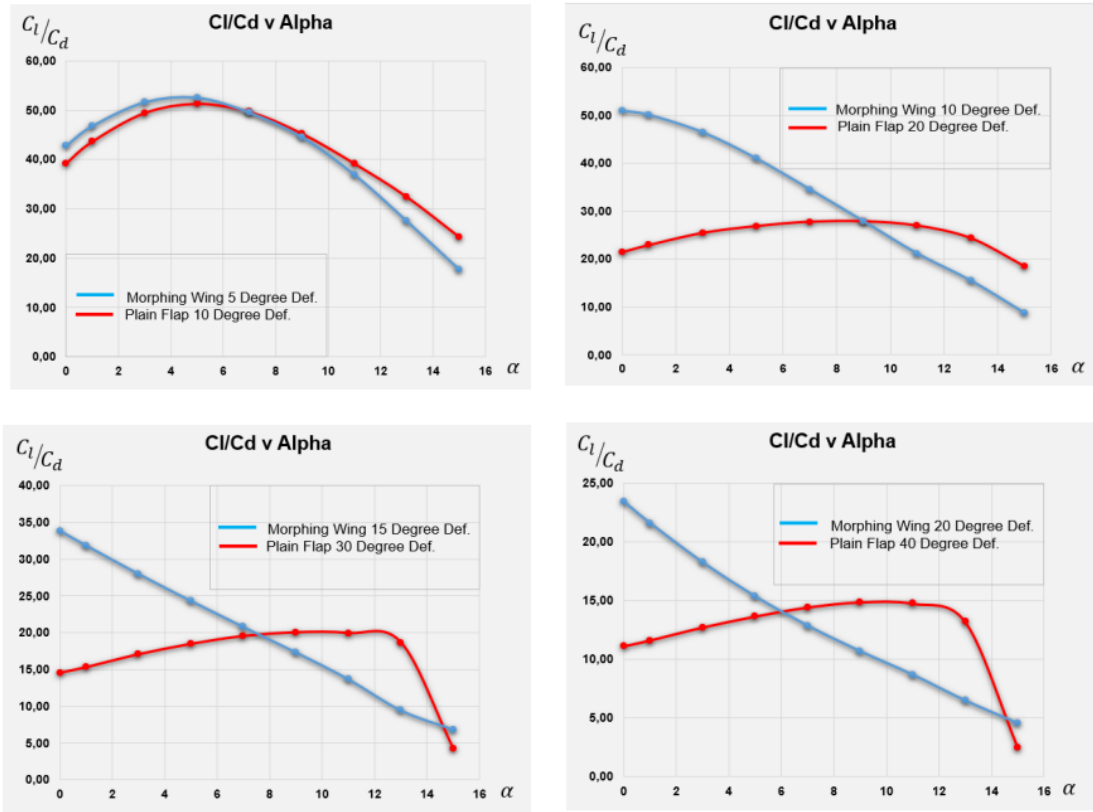
Şekil 11 Çözüm ağı ölçümlendirmeleri

Tablo 2 NACA 0012'e ait HAD ve deneysel veri seti

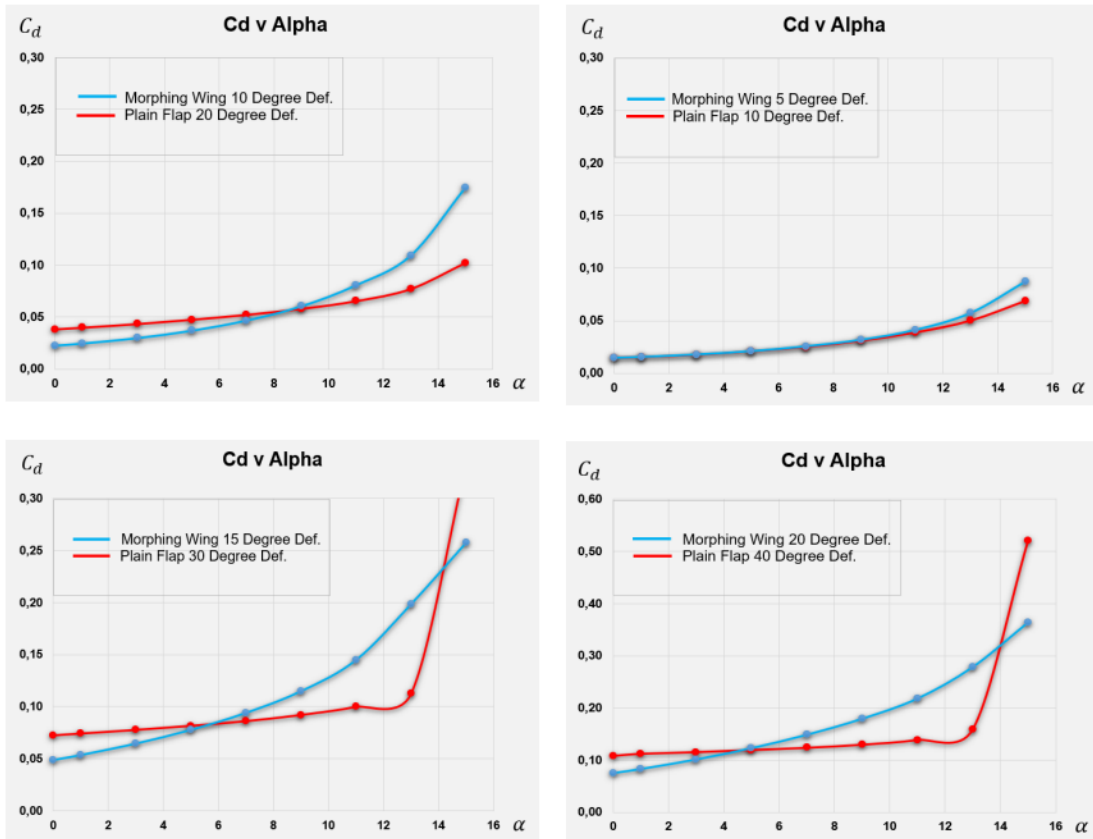
| NACA 0012 AoA Changes |            |             |                       |             |                    |                    |             |              |              |
|-----------------------|------------|-------------|-----------------------|-------------|--------------------|--------------------|-------------|--------------|--------------|
| Angle of Attack       | $C_l$      | $C_d$       | Turbulence Model      | $C_l/C_d$   | Experimental $C_l$ | Experimental $C_d$ | $C_l/C_d$   | Error $C_l$  | Error $C_d$  |
| 15,00                 | 1,3064371  | 0,043765288 | Spallart-Allmaras     | 29,8509883  | 1,3035             | 0,04013            | 32,48193372 | -0,224817559 | -8,306327151 |
| 13,00                 | 1,2317201  | 0,028578602 |                       | 43,09938254 | 1,2599             | 0,02623            | 48,03278689 | 2,287849326  | -8,218043696 |
| 11,00                 | 1,1599487  | 0,020232661 | Transition K-KI Omega | 57,33050635 | 1,139              | 0,02009            | 56,69487307 | -1,806002283 | -0,705102507 |
| 9,00                  | 0,99126965 | 0,016470317 |                       | 60,18521987 | 0,9731             | 0,01596            | 60,97117794 | -1,832967447 | -3,098404238 |
| 7,00                  | 0,80947137 | 0,013369289 |                       | 60,54707696 | 0,8038             | 0,01308            | 61,45259939 | -0,700626385 | -2,163832347 |
| 5,00                  | 0,51635116 | 0,010338911 | K-Omega Sst           | 49,94250942 | 0,5512             | 0,01046            | 52,6959847  | 6,749058141  | 1,17119685   |
| 3,00                  | 0,31264257 | 0,009061082 |                       | 34,50388813 | 0,3167             | 0,00826            | 38,34140436 | 1,297785519  | -8,840911863 |
| 1,00                  | 0,10401155 | 0,008521919 |                       | 12,20517923 | 0,1058             | 0,00729            | 14,51303155 | 1,719472501  | -14,45588823 |



Şekil 12 Deneysel ve sayısal hesapların karşılaştırma grafikleri

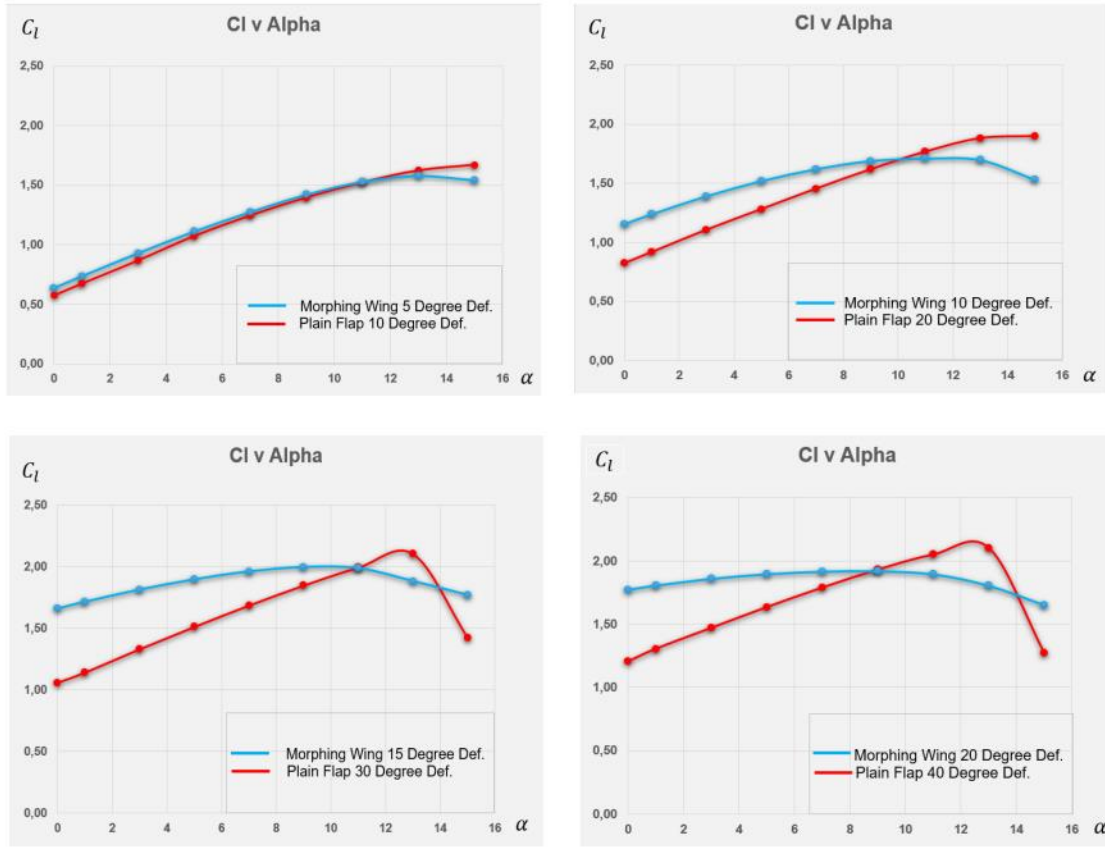


Şekil 13 NACA 0012 ve Şekil Değiştirebilen Kanat HAD analizi  $C_l/C_d$  karşılaştırmalı sonuçları



Şekil 14 NACA 0012 ve Şekil Değiştirebilen Kanat HAD analizi  $C_d$  karşılaştırmalı sonuçları

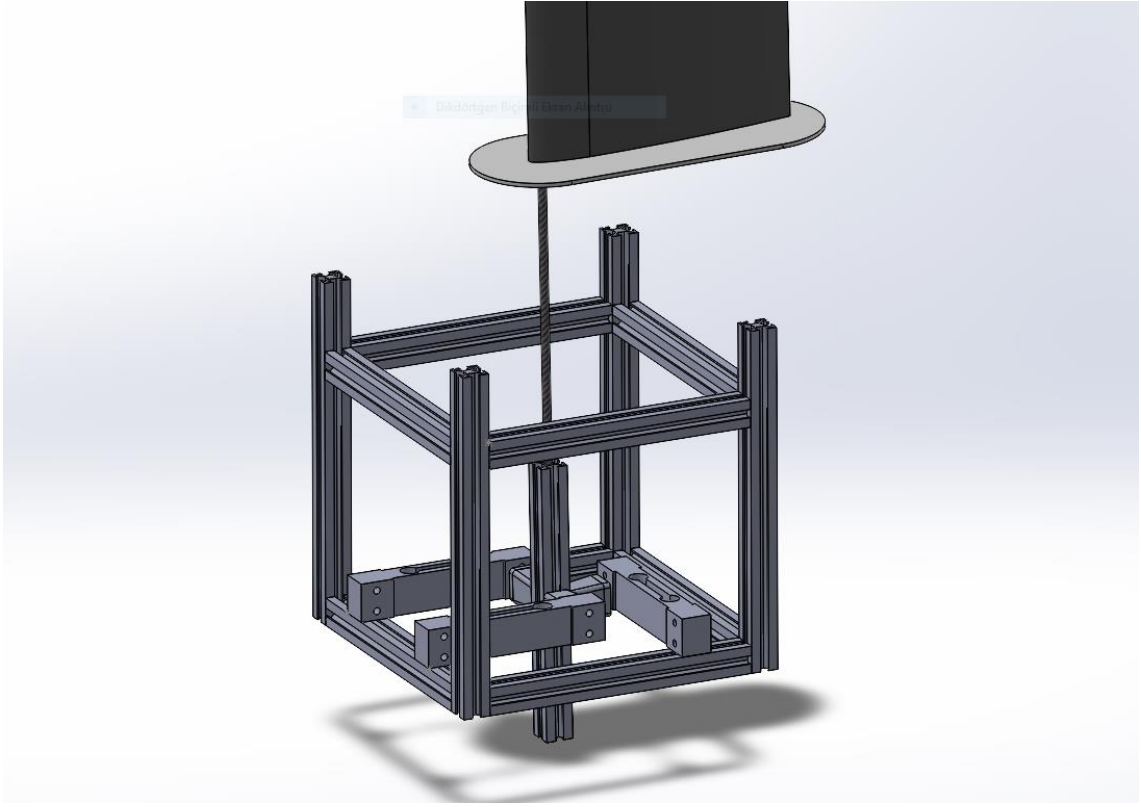




Şekil 15 NACA 0012 ve Şekil Değiştirebilen Kanat HAD analizi  $C_l$  karşılaştırmalı sonuçları

Şekil 13,14 ve 15'te farklı açılardaki şekil değiştirme ile farklı açılardaki flaplı sonuçların hücum açılarına göre aerodinamik verileri verilmiştir. Burada birbirine denk alternatifler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Buradan çıkan sonuç özellikle küçük açılarda (0-6) şekil değiştiren kanat aynı performansı daha düşük sürükleme kuvveti ile sağlayarak daha verimli olmaktadır. Uçakların genellikle bu açı civarlarında aktif olduğu düşünülürse Şekil değiştiren kanatlar flap kullanmaktan daha verimlidir diyebiliriz. Ayrıca bu sonuçlardan yüksek taşıma ihtiyacında hücum açısı yerine şekil değiştirme açısını artırmak daha verimli olacağı görülmektedir.





Şekil 18 Rüzgâr tüneli içindeki kanadın kuvvet ölçüm sistemi

## SONUÇ

Üzerinde çalışılan model sayısal analiz sonuçlarına göre yer yer geleneksel çözümlerden daha iyi performans göstermektedir. Bu çalışma, yenilikçi çözümlerin araştırılması açısından bir teşvik niteliğinde olup yeterli iş gücü ve destek ile çok daha kapsamlı bir hale getirilebilmesi açısından ümit vadetmektedir.

**Kaynaklar**

- [1] "Ajaj, A. M., R. I. Baier, K. J. Mallon, and M. I. Friswell, 'The potential of morphing aircraft in improving the performance of next generation air vehicles,' *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 226, no. 8, pp. 915-929, Aug. 2012."
- [2] "Barbarino, A., B. Ameduri, E. Iannuzzo, and L. Lecce, 'A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft structures,' *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 19, no. 3, pp. 199-220, Mar. 2008."
- [3] "Barbarino, S., E. Bilgen, G. J. Friswell, M. I. Ajaj, and E. P. Botrugno, 'A review of morphing aircraft,' *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 22, no. 9, pp. 823-877, Jun. 2011."
- [4] "Bergamini, M., 'Morphing wing design for aerodynamic performance improvement,' *Journal of Aircraft*, vol. 47, no. 2, pp. 582-590, Mar. 2010."
- [5] "Bottauscio, F., 'Morphing aircraft with variable camber wings,' *Journal of Aerospace Science and Technology*, vol. 26, no. 5, pp. 511-519, May 2014."
- [6] "Cengel, Y. A., and J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, Fourth Edition, 2018."
- [7] "Chng, T. C., 'Morphing wing research and development,' *Journal of Aerospace Science and Technology*, vol. 22, no. 5, pp. 487-499, May 2013."
- [8] "Choi, Y. B., J. H. Lee, and H. S. Kim, 'Morphing wing structure using piezoelectric actuators,' *Smart Materials and Structures*, vol. 19, no. 7, pp. 1-8, Jul. 2010."
- [9] "Cox, D. L., 'Morphing wing configurations for enhanced flight performance,' in *Proc. of 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2006, pp. 1-12."
- [10] "Eftekhari, S., and A. S. M. Al-Obaidi, 'Investigation of a NACA0012 finite wing aerodynamics at low Reynold's numbers and 0° to 90° angle of attack,' *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 11, pp. e1519, 2019."
- [11] "Foo, C. S., 'Smart materials and structures for morphing wing applications,' *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 220, no. 3, pp. 255-265, Mar. 2007."
- [12] "Gallagher, D. F., 'Morphing wings for UAVs,' *Aerospace America*, vol. 46, no. 6, pp. 32-37, Jun. 2008."
- [13] "Gandhi, M., and B. Shankar, 'Review on morphing wing technology,' *Journal of Aircraft*, vol. 52, no. 3, pp. 865-877, May 2015."
- [14] "Gao, E. P. C., and W. X. Xie, 'Morphing wing structure and its application to an unmanned aerial vehicle,' *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 21, no. 5, pp. 462-467, Oct. 2008."
- [15] "Hol, J. K., 'Morphing aircraft for enhanced performance,' in *Proc. of 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2010, pp. 1-10."
- [16] "Jha, K., and V. Kudva, 'Morphing aircraft concepts, classifications, and challenges,' *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 15, no. 4, pp. 251-263, Apr. 2004."
- [17] "King, P. J. H., 'Adaptive wing technology for future aircraft,' *AIAA Journal of Aircraft*, vol. 45, no. 4, pp. 1210-1218, Jul. 2008."
- [18] "Landis, R. M., 'Morphing winglets for improved aerodynamic performance,' *AIAA Paper*, no. 2011-1632, pp. 1-12, 2011."
- [19] "Matsson, John E., *An introduction to ansys fluent 2023*. Sdc Publications, 2023."
- [20] "McCormick, B. W., *Aerodynamics, aeronautics, and flight mechanics*, John Wiley & Sons, 1994."
- [21] "Mohamed, A. S. M., and W. F. Cartwright, 'Morphing wing applications using shape memory alloy,' *Journal of Aircraft*, vol. 48, no. 5, pp. 1286-1293, Sep. 2011."
- [22] "Nguyen, H., K. W. Hollis, D. R. McGowan, M. A. McFarland, M. C. Horta, and L. M. Stover, 'Aeroelastic analysis of morphing aircraft wings using a coupled CFD-CSD method,' *AIAA Journal*, vol. 47, no. 8, pp. 1865-1878, Aug. 2009."
- [23] "Olney, M. W., 'Morphing wing structures for improved aerodynamic efficiency,' *AIAA Paper*, no. 2010-3018, pp. 1-12, 2010."
- [24] "O'Hara, L. S., 'Adaptive structures and materials for morphing aircraft,' *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 129-138, Jul. 2006."

- [25] "Olson, T. W., B. D. Anderson, and M. K. Kassab, 'Morphing aircraft: A challenging overview,' in Proc. of AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2008, pp. 1-10."
- [26] "Pahle, R. D., J. M. Garcia, and D. K. Schmidt, 'Adaptive wing structures for morphing aircraft,' in Proc. of SPIE, 2006, vol. 6173, pp. 1-10."
- [27] "Patel, K. S., et al., 'CFD Analysis of an Aerofoil,' International Journal of Engineering Research, vol. 3, no. 3, pp. 154-158, 2014."
- [28] "Peterson, T. H., 'Shape memory alloys in morphing aircraft structures,' Aerospace America, vol. 48, no. 5, pp. 40-45, May 2010."
- [29] "Rodriguez, A., 'Morphing aircraft technology survey,' 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007."
- [30] "Sahoo, S., and S. Maity, 'CFD analysis of responses of two-equation turbulence models for flow over NACA 0012, NACA 4412 and S809 aerofoils,' in Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICRIDME 2018, Springer Singapore, 2020."
- [31] "Selig, M., et al., 'Experiments on airfoils at low Reynolds numbers,' 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1996."
- [32] "Shelil, N., '2d numerical simulation study of airfoil performance,' Wind Energy Science Discussions, 2021, pp. 1-19."
- [33] "Silva, M. C., 'Morphing wing technologies: Current status and future directions,' Journal of Aircraft, vol. 49, no. 1, pp. 169-182, Jan. 2012."
- [34] "Song, H., L. Qiu, and W. Cui, 'Morphing wing with SMA-actuated corrugated structures,' Smart Materials and Structures, vol. 18, no. 5, pp. 1-6, May 2009."
- [35] "Spinosa, J. P., 'Morphing wing technologies and applications,' in Proc. of the AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2009, pp. 1-11."
- [36] "Stover, L. M., 'Morphing wing concepts for improved aerodynamic efficiency,' AIAA Paper, no. 2013-5106, pp. 1-12, 2013."
- [37] "Tennekes, Hendrik, and John Leask Lumley. A first course in turbulence. MIT press, 1972."
- [38] "The Steam-Powered Pigeon of Archytas – The Flying Machine of Antiquity. (2021, December). Ancient-origins.net: <https://www.ancient-origins.net/history-famous-people/steam-powered-pigeon-002179>."
- [39] "Tropea, C., A. Yarin, and J. F. Foss, 'Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics,' Springer, Berlin, Heidelberg, 2007."
- [40] "Valasek, J., 'Adaptive aerospace vehicle structures,' Aerospace America, vol. 49, no. 3, pp. 34-39, Mar. 2011."
- [41] "van Dam, C. P., 'The aerodynamic design of multi-element high-lift systems for transport airplanes,' Progress in Aerospace Sciences, vol. 38, no. 2, pp. 101-144, Feb. 2002."
- [42] "Zhao, Y., and Z. Yang, 'Morphing wing: A comprehensive survey,' International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 12, no. 1, pp. 1-11, Jan. 2015."