

Burulmanın açısının düşük Reynolds sayısında SD7037 kanat profilinin aerodinamik performansı ve yüzeydeki basınç dağılımına etkisi

Erkan KUZZEY¹, Selim TANGÖZ²

¹Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü, 38039, Kayseri, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, 38039, Kayseri, Türkiye

(Alınış / Received: 18.05.2025, Kabul / Accepted: 25.12.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 24.04.2026)

Anahtar Kelimeler

Düşük Hızlı Kanat, Burulma Açısı, Kanat Performansı, Basınç Dağılımı,

Öz: Bu çalışmada düşük hızlı bir profilden elde edilen kanat modelinde düşük Reynolds sayısında ve farklı hücum açılarında kanat burulma açısının aerodinamik performansa, kanat yüzeyindeki basınç dağılımlarına ve stall davranışlarına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda SD7037 profilinden elde edilen ve -6° , -3° , 0° , 3° ve 6° burulma açısına sahip kanat modelleri düşük hızlı rüzgar tüneline 2×10^5 Reynolds sayısında ve -10° ile 35° arasında değişen hücum açılarında deneysel olarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, en yüksek taşıma katsayısının düşük hücum açılarında 6° pozitif burulma açısına sahip kanat modelinde olduğu, orta ve yüksek hücum açılarında ise burulma olmayan kanat modelinde olduğu görülmüştür. Aerodinamik verimi ifade eden maksimum taşıma/sürüklenme oranı burulma olmayan kanat modelinde elde edilmiştir. Stall açısı bakımından en iyi performans 30° hücum açısı olarak -6° ve -3° burulma açısına sahip kanat modellerinde ölçülmüştür. Sonuç olarak, kanat modelindeki negatif ve pozitif burulmanın aerodinamik performans açısından iyileştirici bir etki göstermediği bununla beraber negatif burulmanın stall davranışlarını olumlu yönde etkilediği gözlenmiştir.

Effect of twist angle on aerodynamic performance and surface pressure distribution of SD7037 wing airfoil at low Reynolds number

Keywords

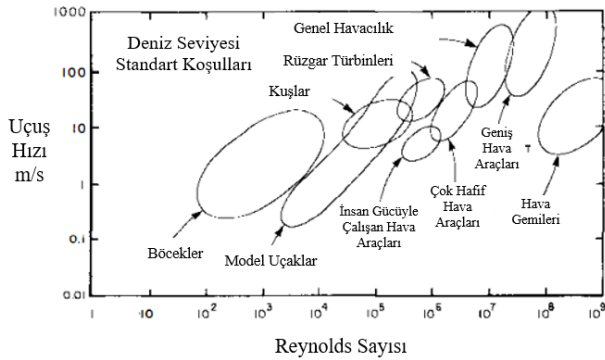
Low Speed Wing, Twist Angle, Wing Performance, Pressure Distribution,

Abstract: This study aimed to investigate the effects of wing twist angle on aerodynamic performance, wing surface pressure distributions, and stall behaviors at low Reynolds numbers and different angles of attack for a wing model obtained from a low-speed airfoil. For this purpose, the wing models obtained from the SD7037 airfoil with twist angles of -6° , -3° , 0° , 3° , and 6° were experimentally tested in a low-speed wind tunnel at a Reynolds number of 2×10^5 and angles of attack ranging from -10° to 35° . The results showed that the highest lift coefficient was achieved on the wing model with a positive twist angle of 6° at low angles of attack, while the non-twisted wing model achieved the highest lift coefficient at medium and high angles of attack. The maximum lift/drag ratio, which represents aerodynamic efficiency, was achieved on the non-twisted wing model. The best stall angle as 30° angle of attack was measured on the wing models with twist angles of -6° and -3° . As a result, it was observed that negative and positive twist on the wing model did not show an improving effect in terms of aerodynamic performance, however, negative twist had a positive effect on stall behaviors.

1. Giriş

Kanat burulması kanat tasarımında kullanılan performans iyileştirici bir özelliktir. Bu nedenle kanat burulma açısının etkilerini araştırmak oldukça önem arz etmektedir. İnsansız hava araçları (İHA) büyük yolcu uçakları ve kargo uçaklarına nazaran düşük hızlarda uçmaktadır. İHA'lar birçok farklı görevde kullanılmakta ve havacılıkta gün geçtikçe daha fazla yer almaktadır. Bu araçlarda düşük hızlı kanat profilleri kullanıldığı için burulma açısının etkilerinin araştırılması önem arz etmektedir.

Hava aracı performansını artırmaya yönelik ilk çalışmalarda uçuş hızı farklılıkları dikkate alınarak farklı uçuş rejimleri tanımlanmaları yapılmıştır. Airfoil yapısı ile kanadın boyutu ve hızı arasındaki ilişki ölçü/boyut etkisi olarak tanımlanmış ve daha sonra Reynolds sayısına göre uçuş rejimleri sınıflandırılmıştır. 2×10^6 değerinden düşük Reynolds sayısına sahip olan uçular düşük hızlı uçular olarak yerini almıştır. Reynolds sayısı ve uçuş hızına bağlı olarak uçan nesnelere sınıflandırıldığı bir görsel Şekil 1'de verilmektedir [1-3].



Şekil 1. Reynolds sayısı ve uçuş hızına göre uçan nesnelere sınıflandırılması [1-3].

Kanatlarda iki tür burulma yapılabilmektedir. Bunlar aerodinamik burulma ve geometrik burulmalardır. Aerodinamik burulma kanat kökü ve kanat ucunda veya kanat boyunca farklı kanat profili kullanarak yapılmaktadır. Geometrik burulma ise kökten uca geliş açısının değiştirilmesi ile elde edilmektedir. Geometrik burulmada kanat ucunun daha yüksek geliş açısına sahip olduğu duruma pozitif burulma, kanat kökünün daha yüksek geliş açısına sahip olduğu duruma negatif burulma denilmektedir [3].

“Prandtl’s Lifting Line Theory” hava aracı kanadının taşıma kapasitesini tespit etmek için kullanılan ilk teknik olmuştur. Bu tekniği kullanarak negatif burulmanın etkisini inceleyen bir çalışmada [4] negatif burulma uygulamasının sınır tabakadaki ayrılmayı geciktirerek aerodinamik özelliklerin iyileşmesine neden olduğu belirtilmiştir. Bunun yüksek hücum açılarında kontrol yüzeylerinin performansını artırdığı görülmüştür [5-8]. Düşük

hücum açılarında pozitif burulma uygulamalarının avantajlı olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarla aileronların kontrol performanslarının arttığı görülmüştür [9].

Birçok çalışmada [10-11] uçan canlıların kanat sistemi örnek alınmıştır. Böcek ve kelebek gibi uçan canlıların kanat yapısı taklit edilerek burulmanın etkileri ifade edilmiştir.

Kanat performansını artırmak için burulma açısının etkilerini araştıran birçok sayısal ve deneysel çalışma yürütülmüştür. Sayısal ve deneysel çalışmalardan [12-15] elde edilen sonuçlar incelendiğinde pozitif burulma uygulamasının kanatta sarsıntıyı arttırdığı, negatif burulma uygulamasının ise kanat açıklığı boyunca taşıma istikrarını arttırdığı fakat taşımayı bir miktar düşürdüğü görülmüştür.

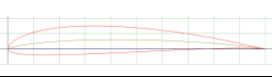

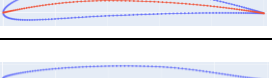
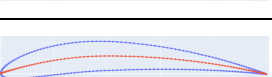
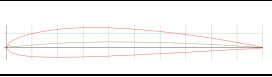
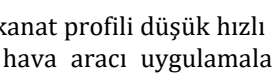
Bu çalışma ile düşük Reynolds sayılı hızlarda SD7037 kanat profilinde pozitif ve negatif burulmanın aerodinamik performansa ve basınç dağılımına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Elde edilen bulgular ışığında düşük hızlı kanat tasarımlarında burulmanın performans ve stall davranışlarını etkilediği ve negatif burulmanın stall davranışları üzerinde olumlu sonuçlar doğurabileceği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında sunulan çalışmanın literatüre önemli katkılar sunabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca bu çalışma içerisinde sunulan şekiller, veriler ve bulgular [16] numaralı tez çalışması kapsamında elde edilmiş olup aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

Bölümler; 2. Materyal ve Yöntem, modellerin taşıma performansları ve kanat üst yüzeyi basınç verilerini kapsayan 3. Bulgular ve 4. Tartışma ve Sonuç olarak sıralanmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Burulma açıları kökten -6, -3, 0, 3, 6 derece olan 5 farklı kanat modeli 3D yazıcıda PLA malzemesinden üretilmiştir. Yapılan çalışmada düşük hızda geometrik burulmanın basınç dağılımına etkisi araştırılmıştır. Üretilen modellerde SD7037 kanat profili kullanılmıştır. SD7037 kanat profili ve düşük Reynolds sayılı uçularda tercih edilen birkaç kanat profili ve özellikleri Tablo 1’de yer almaktadır.

Tablo 1. SD7037 ve diğer düşük hızlı profillerin özellikleri [17-18].

Profil	Profil Görüntüsü	Maksimum kalınlık ve konumu (% veter)		Maksimum kamburluk ve konumu (% veter)	
SD7037		9.2	26.1	2.5	44.7
NACA0012		11.9	30.14	0	0
NACA4410		10	29.9	3.8	40.65
NACA6609		9	45.8	0	0
NACA6410		10	28.31	5.8	40.67
NACA2410		10	29.9	2	40

SD7037 kanat profili düşük hızlı bir kanat profili olup insansız hava aracı uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir [19-20]. Ayrıca, SD7037 kanat profili ile yürütülen rüzgar türbini çalışmalarında düşük Reynolds sayıları için iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir [21-23].

SD7037 kanat profili kullanılarak üretilen modellerle hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi ile sayısal analiz yapılmıştır [20]. Yapılan sayısal incelemelerin deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak doğrulandığı çalışmalar da mevcuttur [21]. SD7037 kanat profili ayrıca Mars'ta kullanılmak üzere tasarlanan bir hava aracı denemelerinde üstün performans göstermiştir [24].

Düşük hızı kanat uygulamalarında sıklıkla tercih edilmesinden dolayı bu çalışmada SD7037 kanat profili kullanılmıştır. Tablo 2'de SD7037 kullanılarak üretilen kanat modellerinin özellikleri yer almaktadır.

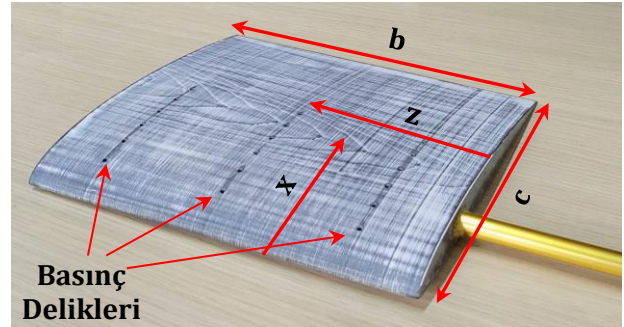
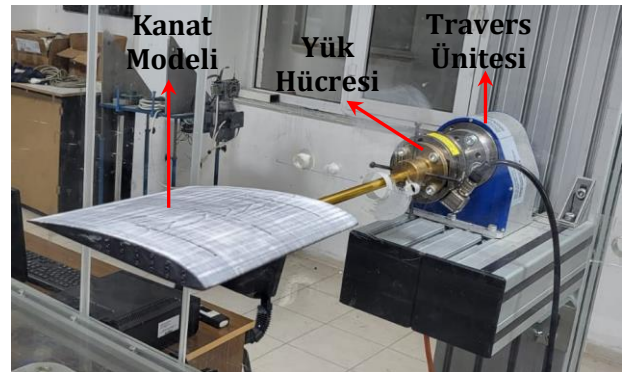
Tablo 2. Kanat modellerinin özellikleri.

Özellikler	Boyutlar
Kanat Uzunluğu (mm)	200
Kanat Kökü Veter Uzunluğu (mm)	200
Kanat Ucu Veter Uzunluğu (mm)	200
Ortalama Kanat Kordu	200
Çeyrek Veter Açısı (Ok Açısı)	0
Açıklık Oranı	1

Kanat modellerinin üst yüzeylerinde basınç değişikliklerini tespit edebilmek için basınç delikleri kullanılmıştır. -6, -3, 3, 6 derece burulma açısına sahip modellerde hücum kenarından başlayarak 3 sıra basınç hattı oluşturulmuştur. Basınç deliklerinin konumları ve boyutsal ifadeler Şekil 2'de verilen -3

derece burulma açısına sahip kanat modeli üzerinde gösterilmiştir. Şekil üzerinde görülen z : kanat açıklığı yönünde kökten uca doğru uzaklığı, b : kanat açıklığını, x : kord hattı yönünde hücum kenarından firar kenarına doğru mesafeyi ve c : kord uzunluğunu temsil etmektedir.

Basınç hatları kanat kökünden sırasıyla $z/b=0.166$, $z/b=0.5$ ve $z/b=0.83$ sıralarında oluşturulmuştur. 0 derece burulma olan modelde burulma bulunmadığı için kanat açıklığının tam ortasına denk gelen ($z/b=0.5$) tek sıra basınç hattı oluşturulmuştur. Her sıra basınç hattında hücum kenarından firar kenarına doğru eşit aralıklarla 6 basınç deliği bulunmaktadır. Basınç delikleri arasında 15 mm uzaklık bulunmakta ve her basınç hattındaki ilk delik hücum kenarına 20 mm uzaklıktadır. Her üç basınç hattındaki basınç deliklerinin konumları hücum kenarından firar kenarına doğru veter boyunca sırasıyla $x/c=0.1$, $x/c=0.175$, $x/c=0.25$, $x/c=0.325$, $x/c=0.4$ ve $x/c=0.475$ konumlarında bulunmaktadır. Kanat modelinde oluşan aerodinamik yüklerin tespitinde kullanılan yük hücresi, hücum açısı ayarlamada kullanılan travers ünitesi ve kanat modelinin kurulumu Şekil 3'te verilmektedir.

**Şekil 2.** -3° burulma açısına sahip kanat modeli ve üzerindeki basınç deliklerinin konumları.**Şekil 3.** Kanat modeli, yük hücresi, travers ünitesi ve kanat modelinin kurulumu.

Kanat modelleri UltiMaker2 Extended+ 3D yazıcı kullanılarak polilaktik asit termoplastik polyster (PLA) maddesinden üretilmiştir. Bu malzeme üretimden sonra rijit bir yapı haline gelmektedir. PLA'nın bu özelliği ile aerodinamik çalışmalarda

gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Ayrıca PLA malzemesinin maliyeti düşük olup 3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı modellerin üretilmesinde PLA malzemesi tercih edilmiştir. PLA'nın özellikleri Tablo 3'te verilmektedir. Kanat modellerinin 3D baskısı yapıldıktan sonra yüzeylerine macun çekilmiş ve zımpara işlemi ile yüzey pürüzsüz hale getirilmiştir. Daha sonra Şekil 3'de görüldüğü gibi rüzgâr tüneli test ünitesine kurulumu yapılmıştır.

Tablo 3. PLA malzemesinin özellikleri.

Özellikler	Değerler
Materyal cinsi	PLA (Polilaktik Asit)
Efektif çap	2.85 mm +/- 0.10
İşlem sıcaklığı	200 - 220 C°
Ağırlık	750 gr.
Makara çapı	15.5 cm
Makara deliği çapı	3.5 cm

Deneyler Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi (EÜ-HUBF) bünyesindeki Aerodinamik Laboratuvarı'ndaki düşük hızlı rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. 2×10^5 Reynolds sayısına denk gelen hava hızı ile testler yapılmıştır. Deney prosedürleri Tablo 4'te özetlenmiştir. Her kanat modeli için -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 derece hücum açılarında deneysel veriler alınmıştır. Akış stabilizesinin sağlanması için verilerin alınmasından önce 30 sn beklenmiştir. Kanat performans değerleri için 10 ms aralıklarla 5000 örnekleme ile ortalama değerler oluşturulmuştur.

Tablo 4. Deney girdileri.

Özellikler	Değerler
Hava sıcaklığı	15 C°
Kinematik viskozite	1.48×10^{-5} m ² /s
Hava hızı	14.8 m/s
Veter uzunluğu	0.2 m
Hava yoğunluğu	1.2 kg/m ³
Reynolds sayısı	2×10^5

Deneylerde kanat üst yüzeyi basınç farkı değerleri basınç sensörü (Honeywell markası, 163PC01D75 serisi) kullanılarak tespit edilmiştir. Şekil 4'de dinamik basınç sensörü görülmektedir.



Şekil 4. Dinamik basınç sensörü.

Basınç sensörü kullanılarak elde edilen veriler basınç katsayısına (C_p) çevrilerek grafikler halinde dördüncü bölümde sunulmuştur.

DeneySEL çalışmalar; kanat modeli için uygun profilin belirlenmesi (1), model kanatların 3D yazıcı ile üretilmesi (2), kanat modellerinin deney düzeneğine kurulumu (3), deney şartlarının belirlenmesi (4), gerekli kalibrasyonların yapılması ve ön deneylerin yürütülmesi (5), performans ve basınç deneylerinin tamamlanması (6) ve deneysel sonuçların değerlendirilmesi (7) basamaklarından oluşan iş planı doğrultusunda yürütülmüştür.

3. Bulgular

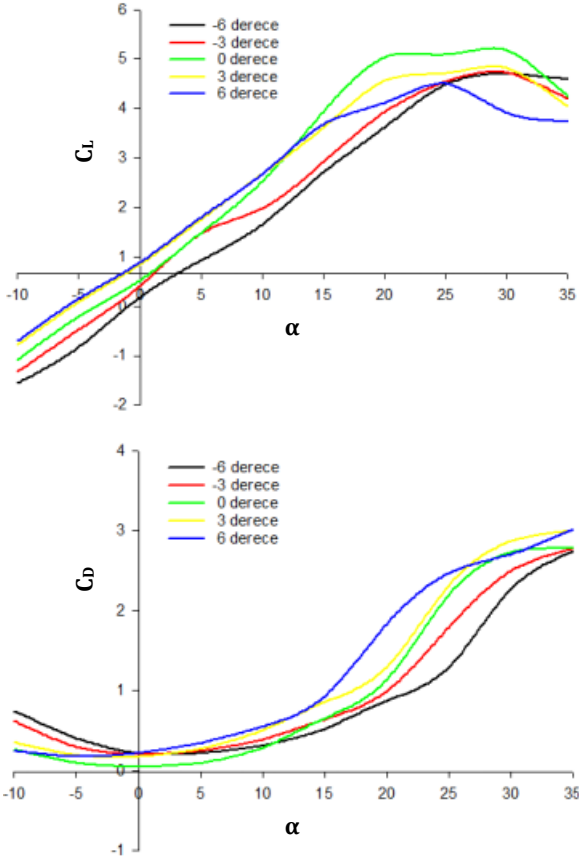
Çalışmada -6°, -3°, 0°, 3° ve 6° burulma açısına sahip düşük hızlı bir profilin 2×10^5 Reynolds sayısında ve farklı hücum açılarında aerodinamik performansı ve kanat yüzeyindeki basınç dağılımları incelenmektedir. Elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmaktadır.

3.1. Modellerin taşıma performansları

Negatif burulma olan bir kanatta burulma olmayan kanada göre daha az taşıma gözlemlenir. Benzer olarak indüklenmiş sürüklenme de daha az oluşmaktadır. Çalışmada performans deneylerinden elde edilen sonuçlar buna paraleldir. Farklı burulma açısına sahip kanatlardan elde edilen hücum açısına bağlı taşıma katsayısı (C_L) ve sürüklenme katsayısı (C_D) değişimleri Şekil 5'te verilmektedir.

Burulma olan kanatlarda, burulma olmayan kanada göre, maksimum taşıma değerinin daha az olduğu görülmüştür. Kanatta kökten uca daha elverişli taşıma dağılımı elde etmek amaçlandığından bu sonuç bekleneni karşılamıştır. Bu durum çeşitli hücum açılarında kanadın kökü ve ucu arasındaki hücum açısı farkından kaynaklanır. Girdap akımlarının etkisi ile oluşan bu hücum açısı değişikliği taşıma dağılımında farklılıkların oluşmasına neden olmaktadır.

-10° hücum açısında -6° burulma olan kanatta taşıma en az olmuştur. Bu hücum açısında 6° burulma olan kanatta ise taşıma en fazladır. Sürüklenme açısından incelendiğinde ise; -10° hücum açısında en fazla sürüklemeyi -6° burulması bulunan kanat üretmiştir. Negatif hücum açılarında hava lülelerinin -6° burulma olan kanadın üst yüzeyine karşıdan çarpması kanadın üst yüzeyinde hava hızının azalmasına ve statik basıncın artmasına sebep olmuştur. Kanadın alt yüzeyinde ise hava lüleleri yüzeyden ayrılıp türbülans oluşturmuştur. Bu nedenle -6° burulma olan kanatta taşıma diğer kanatlara göre düşük olmuştur. 6° burulma olan kanat için ise negatif hücum açılarında tam tersi sonuçlar mevcuttur.



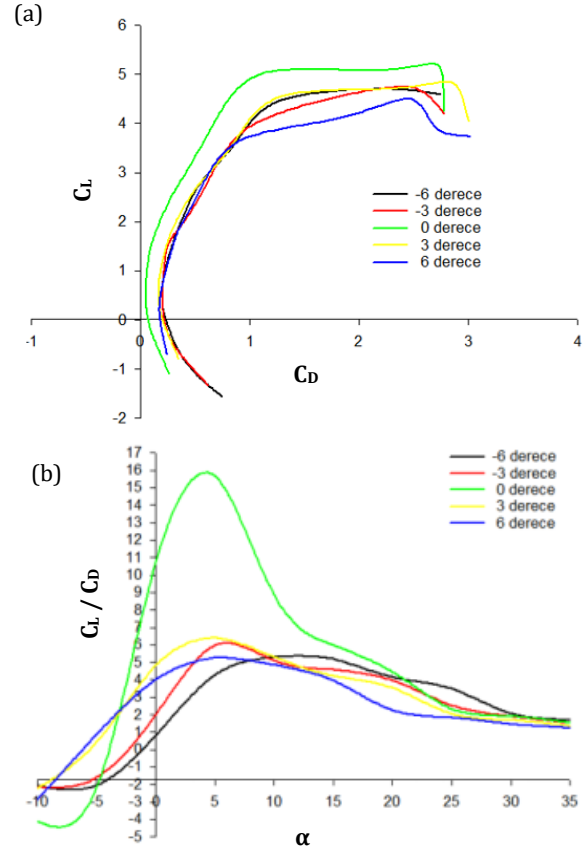
Şekil 5. Farklı burulma açılarındaki hücum açısına bağlı taşıma ve sürüklenme katsayılarındaki değişimler.

Taşıma katsayısında tavan noktalara bakıldığında burulma olmayan kanadın en fazla taşımayı ürettiği görülür. Pozitif burulma bulunan kanadın daha fazla taşıma üreteceği düşünülebilir fakat aksine; 6° burulma olan kanatta oluşan türbülans etkisiyle en yüksek taşıma katsayısının diğer kanat modellerinden daha az olduğu görülmüştür. Hatta taşıma katsayısı eğrisinin 25° hücum açısında boyun vermesi de türbülans etkilerinin şiddetini göstermektedir.

Sürüklenme-hücum açısı grafiğinde 35° hücum açısında 6° ve 3° burulma açılı kanatların ürettiği sürüklemenin yüksek olduğu -6° ve -3° burulma açılı kanatların ürettiği sürüklemenin düşük olduğu görülür. Bu durum pozitif burulmanın yüksek hücum açılarındaki gösterdiği düşük performans sonuçlarını ortaya koymuştur.

Deneylerde kullanılan model kanatların taşıma eğrileri 25° ile 30° hücum açıları arasında boyun vermiştir. Gerçek bir uçuşa göre bu değerler oldukça yüksektir. Bu durum deneylerin düşük hızda yapılması, düşük Reynolds sayılarının kullanılmasının sonucudur. Bu nedenle model kanatların kanat açıklık oranının yüksek olması, oluşan türbülansın kanadın firar kenarının da arkasında etkileşmesi nedeniyle özellikle pozitif burulma açılı kanatlarda sürüklemeye yüksek artış görülmediği sonucuna varılmıştır. Taşıma

ve sürüklenme katsayılarının birbirine göre değişimi bu durumu desteklemektedir. Kanatlara sürüklenme katsayısına bağlı taşıma katsayısındaki değişimler (a) ve farklı burulma açılarındaki hücum açısına bağlı C_L/C_D değişimleri (b) Şekil 6’te verilmiştir.

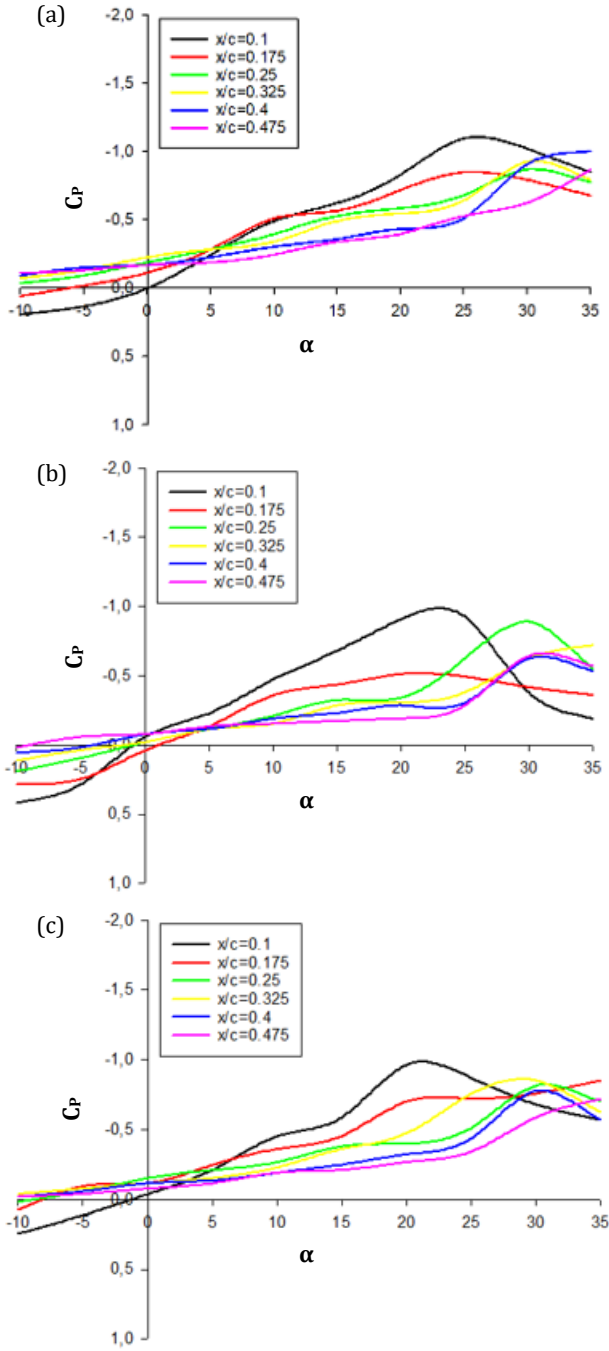


Şekil 6. (a) Sürüklenme katsayısına bağlı taşıma katsayısındaki değişimler (b) Farklı burulma açılarındaki hücum açısına bağlı C_L/C_D değişimleri.

C_L/C_D grafiğinden burulma olmayan kanadın en yüksek oranı elde ettiği görülmektedir. Fakat hücum açısına bağlı C_L/C_D grafiğine bakıldığında 5° hücum açılarından sonra C_L/C_D oranının ani bir şekilde düştüğü görülmüştür. Bu hızlı değişim iniş, kalkış, dönüş ve uçuş zarfının tümü göze alındığında hava aracının kontrollerini zorlaştıracak tahmin edilebilir. Bununla birlikte uçuş zarfında bir stall durumunda burulma olmayan kanatta tutunma kaybının daha fazla olacağı sonucuna varılmıştır.

3.2. Kanat üst yüzeyi basınç verileri

Kanadın üst yüzeylerindeki basınç delikleri yardımıyla kanat üstünde basınç değişimleri düşük Reynolds sayılı bir akışta incelenmiştir. Basınç sensöründen alınan veriler basınç katsayısına dönüştürülmüş hücum açısı - basınç katsayısı grafikleri oluşturulmuştur. Hücum açısı - basınç katsayısı grafikleri Şekil 7, 8, 9, 10 ve 11’deki gibidir.

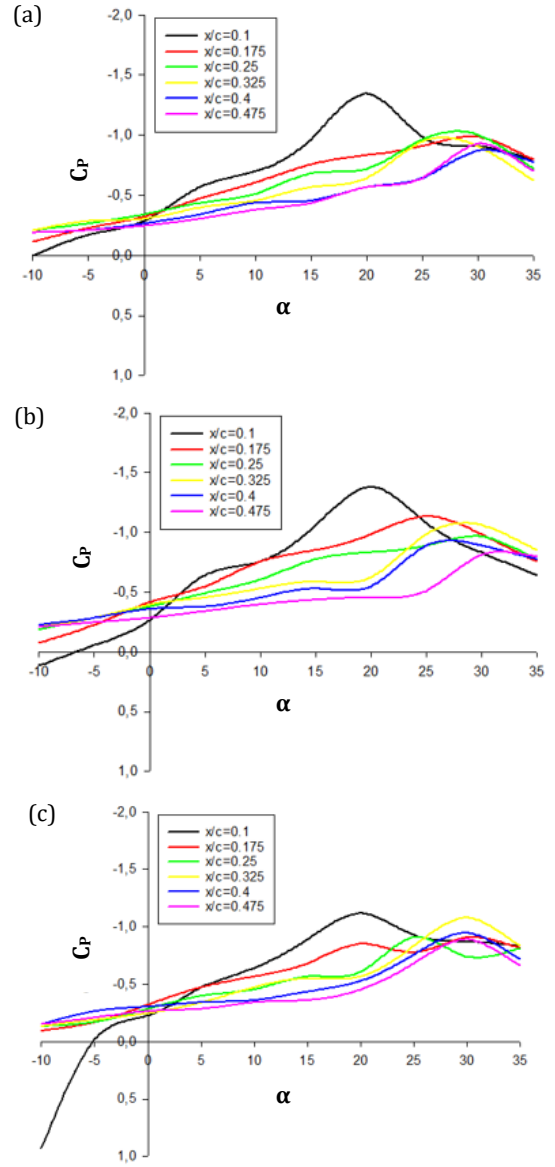


Şekil 7. -6° burulma bulunan kanadın basınç grafikleri (a) $z/b=0.166$, (b) $z/b=0.5$ ve (c) $z/b=0.83$.

Ayrıca grafiklerde negatif basınç (vakum) değerleri y ekseninde negatif değerlerle artacak şekilde (ters şekilde) verilmiştir.

-6 derece burulma açısına sahip kanat modelinde basınç ölçüm sıraları (z/b) karşılaştırıldığında;

- Negatif hücum açılarında kanatta kökten uca ($z/b=0.166$ 'dan $z/b=0.83$ 'e) ilerledikçe basınç farkının azaldığı görülmüştür.
- Negatif burulmadan dolayı kanat ucuna doğru, kanat köküne göre, daha yüksek hücum açısında en yüksek basınç farkı görülmüştür.



Şekil 8. -3° burulma bulunan kanadın basınç grafikleri (a) $z/b=0.166$, (b) $z/b=0.5$ ve (c) $z/b=0.83$.

$z/b=0.83$ noktalarındaki basınç deliklerinde, $z/b=0.5$ noktalarındaki basınç deliklerine göre, negatif hücum açılarında daha fazla vakum görülmesi; kanat kök ve orta kısmındaki hava lülelerinin kanat ucuna doğru yönelip $z/b=0.83$ noktalarında daha düzgün bir akış oluşturması olarak yorumlanmıştır.

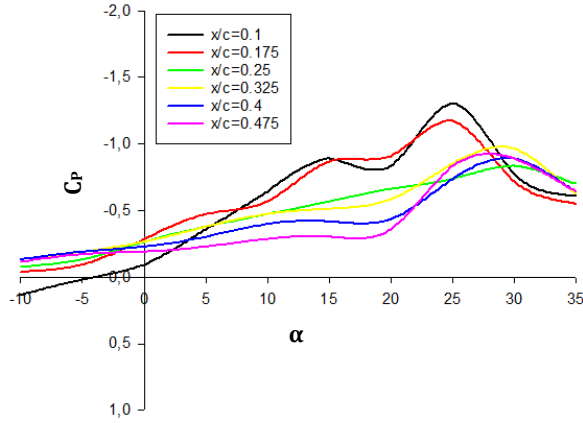
-3° burulma açısına sahip kanat modelinde basınç ölçüm hatlarında ölçülen basınç değerleri incelendiğinde;

- Negatif hücum açılarında kökten uca doğru basınç farkının azaldığı görülmüştür.
- Pozitif hücum açılarında kökten uca doğru basınç farkının arttığı görülmüştür.
- Negatif burulmanın etkisiyle kanat ucunda kanat köküne göre basınç eğrilerinin daha geç boyun vermesi beklenmektedir. Grafiklerde farklı

sıralardaki çoğu eğrinin benzer hücum açısı değerlerinde boyun vermesi hava lülelerinin kanat kökünden ucuna doğru yönelmesi ve basınç ölçüm noktalarında sınır tabakayı inceltmesi olarak yorumlanmıştır.

$x/c=0.1$ ve $x/c=0.175$ noktalarındaki eğrilerindeki aşırı dalgalanmaların ve erken boyun vermelerin sebebi bu noktaların hücum kenarına yakın olmalarıdır. Bu noktalarda çarpan havanın etkisi söz konusudur. Benzer şekilde; $z/b=0.83$ sırasında $x/c=0.1$ noktasının negatif hücum açılarında basınç farkının dik bir eğri oluşturması, bu noktadaki basınç ölçüm deliğine hava lülelerinin dik doğrultularda gelmesi sonucu olduğu söylenebilir.

Negatif hücum açılarında -3° burulma bulunan kanatta basınç farkı -6° burulma olan kanada göre daha yüksek olmuştur. Pozitif hücum açılarında da vakum daha az olmuştur. -3° burulma bulunan kanatta basınç katsayısı eğrileri daha düşük pozitif hücum açılarında boyun vermiştir.



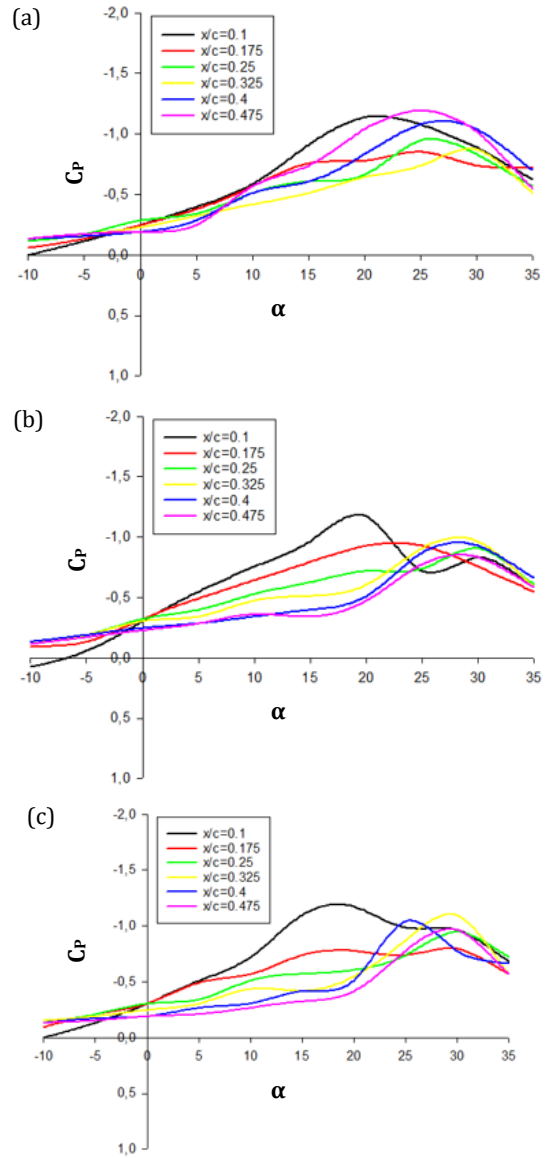
Şekil 9. 0° burulma bulunan kanadın basınç grafiği, $z/b=0.5$.

Burulma olmayan kanat modelindeki basınç katsayısı dağılımını veren şekiller incelendiğinde negatif hücum açılarında taşıma üretildiği, yalnızca $x/c=1$ noktasında -10 ile -5 derece hücum açılarında pozitif basınç farkı olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin çarpan havanın etkisi olduğu varsayılmıştır. $x/c=0.1$ ve $x/c=0.175$ noktalarında 15 derece hücum açılarında meydana gelen basınç artışının sebebinin kanat kökünde oluşan türbülans olduğu sonucu çıkarılmıştır.

$x/c=1$ ve $x/c=0.175$ hariç diğer noktalarda 20 derece hücum açısından 30 derece hücum açısına kadar basınç farkı artış ivmesi oldukça büyümüştür. Bu bölgede hava lülelerinin model kanat üst yüzeyine yakın seyrettiği söylenebilir.

-3 ve -6 derece burulma olan kanatlar ile karşılaştırıldığında 0 derece burulma olan kanadın; negatif hücum açılarında daha fazla, pozitif hücum

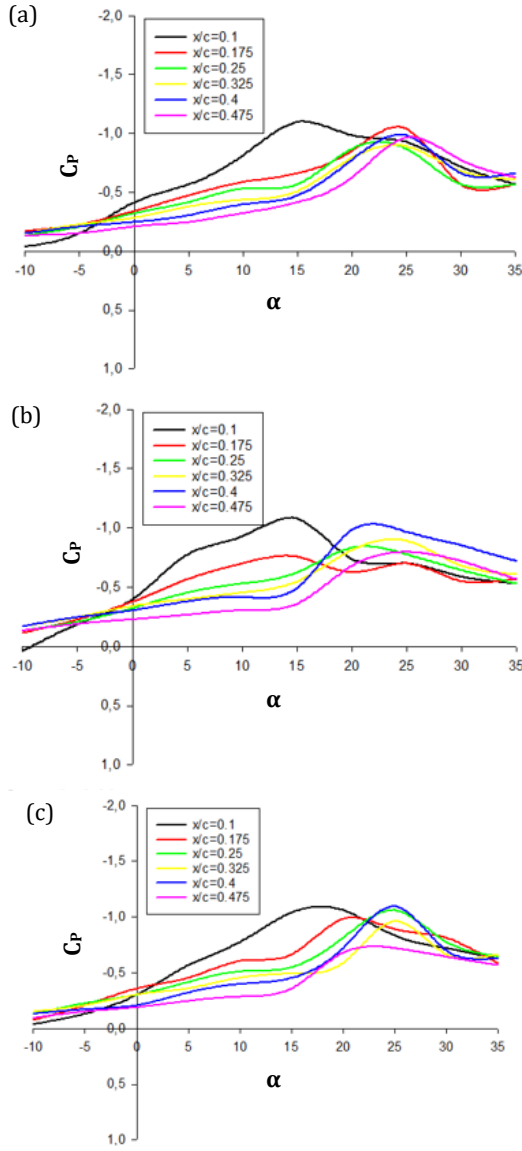
açıları daha az basınç farkı oluşturduğu tespit edilmiştir.



Şekil 10. 3° burulma bulunan kanadın basınç grafikleri (a) $z/b=0.166$, (b) $z/b=0.5$ ve (c) $z/b=0.83$.

3° burulma bulunan modelin basınç ölçüm sıraları birbiri ile karşılaştırıldığında;

- Negatif hücum açılarında kökten uca gidildikçe vakumun dolayısıyla modelde elde edilen taşımanın arttığı görülmüştür.
- Pozitif hücum açılarında ise vakum kökten uca azalmıştır.
- Kanat modelinde 3° burulma olduğu için kanat ucundaki eğrilerin kök kısmındaki göre daha erken boyun vereceği öngörülmüştür. $x/c=0.1$ ve $x/c=0.175$ noktaları hariç diğer noktalarda bu durum gerçekleşmiştir. Hücum kenarına en yakın olan bu iki noktada dalgalanmanın ve erken boyun vermenin sebebi, daha önce bahsedildiği gibi, hava lülelerinin bu noktalara doğrudan gelmesidir.



Şekil 11. 6° burulma bulunan kanadın basınç grafikleri (a) $z/b=0.166$, (b) $z/b=0.5$ ve (c) $z/b=0.83$.

Bu kanat modeli kanat -10 derece hücum açısında negatif basınç farkı üretmiştir. Dolayısıyla bu koşullarda taşıma elde edildiği görülmüştür. Pozitif hücum açılarında negatif burulma bulunan kanatlara göre vakumun daha az olduğu tespit edilmiştir. 6° burulma açısına sahip kanat modelinde üretilen basınç katsayısını veren şekiller basınç ölçüm hatları açısından incelendiğinde;

- Negatif hücum açılarında kanat ucunda daha fazla basınç farkı elde edilmiştir.
- Pozitif hücum açılarında daha az basınç farkı üretilmiştir.
- Kanatta kökten uca ilerledikçe eğrilerin boyun verdiği hücum açısının azaldığı gözlemlenmiştir. Buna aykırı olan basınç noktaları kökten uca yön değiştiren hava lülelerinden etkilenmiştir.

Negatif hücum açılarında neredeyse bütün noktalarda negatif basınç farkı olduğu görülmüştür. Basınç farkı eğrileri diğer kanat modellerine göre daha düşük hücum açılarında tepe noktası oluşturmaktadır. Yüksek hücum açılarında pozitif burulmanın modelin taşıma performansını düşürdüğü tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlarda daha önce yapılmış çalışmaların sonuçlarına paralel tespitler elde edilmiştir. Negatif burulma bulunan kanat modellerinde yüksek hücum açılarında taşıma sağlanması ve sürüklemenin diğer kanat modellerine göre düşük olması bu tespitlere örnek verilebilir. Yapılan çalışmalarda negatif burulmanın taşıma performansını artırdığı güç tüketimini azalttığı ve kanat boyunca taşıma kararlılığını artırdığı görülmektedir [7,10,11].

4. Tartışma ve Sonuç

Bu deneysel çalışmada -6°, -3°, 0°, 3° ve 6° burulma açısına sahip düşük hızlı bir profilin 2×10^5 Reynolds sayısında ve -10 ile 35 derece arası hücum açılarında aerodinamik performansı ve kanat yüzeyindeki basınç dağılımları incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen ana sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Düşük Reynolds sayılı kanat modelleri ile yapılan deneylerde negatif burulmanın daha kararlı bir uçuşu mümkün kıldığı sonucuna varılmıştır. Yani uçuşun her safhasında ortalama taşımaya yakın değerler elde etmek için hava aracının kanadında negatif burulma tercih edilmelidir. Burada negatif burulma kanadın efektif hücum açısını azaltarak akış stabilizesini artırmakta ve kanadın stall açısından uzaklaşmasını sağlamaktadır.

- Ayrıca burulma olmayan bir kanada göre daha yüksek hücum açılarında taşıma elde edilebildiği tespit edilmiştir. Bu stall'un geciktirilmesi anlamına gelir ve büyük bir avantaj sağlayabilir. -6° burulma açısına sahip kanat modelinde stall açısı (boyun verme) 30 derece iken burulma olmayan kanatta 26 derece ve 6° burulma açılı kanat modelinde ise 23 derecedir.

- Düşük Reynolds sayılı bir kanatta pozitif burulma kullanıldığında daha düşük hücum açılarında taşıma sağlandığı tespit edilmiştir.

- Kanat profilleri aerodinamik verimlilik açısından karşılaştırıldığında en iyi performansın burulma olmayan kanat modelinde elde edildiği görülmüştür. Negatif burulmada efektif hücum açısının azalması taşıma katsayısında azalmaya neden olurken pozitif burulma sürüklenme katsayısında artışa neden olmuştur. Bu iki etki aerodinamik verimliliğin burulma ile düşmesine neden olmuştur.

Bu çalışma düşük Reynolds sayılı uçuşlara uygun bir profil olan SD7037'den elde edilen model kanatın burulma açısındaki değişimlere verdiği tepkinin

araştırılması açısından önem arz etmektedir. Sonuçta, bu profilden oluşturulan ve burulma açısı değiştirilmiş kanat modellerinin düşük hızlarda özellikle stall karakteristiği açısından iyi bir aerodinamik performans vadedebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmanın SD7037 gibi performansı kanıtlanmış diğer kanat profilleri için kanat burulması kullanılarak yapılacak performans iyileştirmelerine ışık tutması beklenmektedir.

Gelecek çalışmalarda, modern İHA platformlarının kanat şekli optimizasyonu için burulma açısının geriye ok açılı veya incelen kanat gibi kanat formları üzerindeki aerodinamik etkisi önemli bir araştırma konusu olabilecektir. Ayrıca etkiyen yüklere göre burulma yapısını değiştirebilen aktif burulmalı kanat modellerinin gelecek çalışmalarda önemli bir yer tutacağı değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Deneyleerin yürütülmesindeki katkılarından dolayı Hatice DOĞAN'a teşekkür ederiz.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Bu çalışmada Erkan Kuzey tarafından başarı ile tamamlanan Düşük Hızlı Bir Kanat Modelinde Burulma Açısının Kanat Performansına Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması isimli yüksek lisans tezinden üretilen bir araştırma makalesidir.

Kaynakça

- [1] Lissaman, P. B. S. (1983). Low-Reynolds-number airfoils. Annual review of fluid mechanics, 15(1), 223-239.
- [2] Carmichael, B. H. (1981). Low Reynolds number airfoil survey, volume 1 (No. NASA-CR-165803-VOL-1).
- [3] Sadraey, M. (2012). Wing design. Aircraft Design: A Systems Engineering Approach, 808.
- [4] Phillips, W. F. (2004). Lifting-line analysis for twisted wings and washout-optimized wings. Journal of aircraft, 41(1), 128-136.
- [5] Prandtl, L. (1925). Applications of modern hydrodynamics to aeronautics. US Government Printing Office.
- [6] Roskam, J. (1985). Airplane Design: Preliminary sizing of airplanes. DARcorporation.

- [7] Lyu, Z., & Martins, J. R. (2014). Aerodynamic design optimization studies of a blended-wing-body aircraft. Journal of Aircraft, 51(5), 1604-1617.
- [8] Phillips, W., Fugal, S., & Spall, R. (2005). Minimizing induced drag with geometric and aerodynamic twist, CFD validation. In 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (p. 1034)
- [9] Rodrigue, H., Cho, S., Han, M. W., Bhandari, B., Shim, J. E., & Ahn, S. H. (2016). Effect of twist morphing wing segment on aerodynamic performance of UAV. Journal of Mechanical Science and Technology, 30(1), 229-236.
- [10] Truong, T. Q., Phan, V. H., Park, H. C., & Ko, J. H. (2013). Effect of wing twisting on aerodynamic performance of flapping wing system. AIAA journal, 51(7), 1612-1620.
- [11] Zheng, L., Hedrick, T. L., & Mittal, R. (2013). Time-varying wing-twist improves aerodynamic efficiency of forward flight in butterflies. PLoS one, 8(1), e53060.
- [12] Fazlzadeh, S. A., Rezaei, M., & Mazidi, A. (2020). Aeroelastic analysis of swept pre-twisted wings. Journal of Fluids and Structures, 95, 103001.
- [13] Qin, N., Vavalle, A., Le Moigne, A., Laban, M., Hackett, K., & Weinerfelt, P. (2004). Aerodynamic considerations of blended wing body aircraft. Progress in Aerospace Sciences, 40(6), 321-343.
- [14] Kelayeh, R. K., & Djavahreshkian, M. H. (2021). Aerodynamic investigation of twist angle variation based on wing smarting for a flying wing. Chinese Journal of Aeronautics, 34(2), 201-216.
- [15] Shevell, R. S. (1989). Fundamentals of flight. Pearson Education India.
- [16] Kuzey, E. (2025) Düşük hızlı bir kanat modelinde burulma açısının kanat performansına etkisinin deneysel olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez No: 920564.
- [17] Airfoiltools. 2023. "Airfoil database". <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=sd7037-il>, Son erişim tarihi: 05 Ocak 2023.
- [18] BigFoil. 2025. "Airfoil database". <https://www.bigfoil.com/>, Son erişim tarihi: 05 Şubat 2025.
- [19] Dahendi, D. D., Yudhono, R., & Erissonia, A. A. (2023). ANALISIS CFD PADA SAYAP MINI GLIDER DENGAN PENAMPANG LOW REYNOLD NUMBER AIRFOIL DAN FOLDED FLAT PLATE AIRFOIL. Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine, 9(2), 387-399.

- [20] Zilstra, A., & Johnson, D. A. (2023). Large eddy simulation of transitional separated flow over a low Reynolds number cambered airfoil. *Journal of Fluids Engineering*, 145(3), 031303.
- [21] Natarajan, K. (2022). Insight aerodynamic analysis on small-scale wind turbines airfoils for low Reynolds number applications. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 41(4), e13807.
- [22] Sangbori, M., Nejat, A., & Gharali, D. K. Aeroacoustics Simulation of a Dynamic Wind Turbine Blade Section Under Yaw Loads for Estimation of Noise Pollution. Available at SSRN 4529476.
- [23] Zilstra, A., & Johnson, D. A. (2024). Validated Dynamic Stall Simulation of Pitching Low Reynolds Number Airfoils. *AIAA Journal*, 62(10), 3700-3712.
- [24] Karpovich, E., & Kombaev, T. (2024). Enhancing the airfoil performance for a fixed-wing Martian aircraft. *Aerospace Systems*, 1-10.