

Taşınabilir Bir Elektrikli Kanallı Fan Test Standı Geliştirilmesi

Emre KARA^{1*}, Mustafa Çağatay ÖZYÜREK², Gamze GÜLSEREN³, Ünal HAYTA⁴

^{1,2,3} Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

⁴ Pilotaj Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

*¹ emrekara@gantep.edu.tr, ² cagatayozyurek@gmail.com, ³ gamzegulsereen@gmail.com, ⁴ hayta@gantep.edu.tr

(Geliş/Received: 15/02/2024;

Kabul/Accepted: 03/09/2024)

Öz: Bu çalışmanın amacı, elektrikli kanallı bir fanın (EDF) farklı güç oranlarında verdiği itkileri test etmektir. Nozul girişine takılan iki servomotorun hareketiyle 3°, -3°, 6°, -6° açılarında itki yönlendirmesi yapılmıştır. Bu çalışma ile EDF motorların performans kapasitesinin belirlenmesi de amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada, EDF motora güç verildiğinde, EDF üzerine yerleştirildiği kızaklı mekanizma sayesinde rahatça hareket edebilmekte ve ürettiği itki, yük hücresi vasıtası ile akış yönünde ölçülebilmektedir. Çalışmamızda geliştirilen test düzeneğine farklı çaplardaki EDF'lerin takılıp çıkarılması mümkündür. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri, daimi akış için farklı dönüş hızlarında elde edilmiştir. Ana çıktılar olan z-yönündeki itki değerleri açılı nozul senaryolarında kaydedilmiş ve grafik halinde verilerek görselleştirilmiştir. Ayrıca YZ düzleminde hız konturları ve üç boyutlu yolak çizgisi tüm akış alanı için hız değerlerine göre HAD analizler sonucunda gösterilmiştir. Nominal itki değerleri ve standart sapmaları farklı güç yüzdeleri için test edilen açılarda verilmiş ve aynı grafik üzerinde HAD analizi sonuçları karşılaştırma amacıyla gösterilmiştir. İtki kuvvetlerinin ölçümü sonucunda, güç yüzdesi arttırıldıkça orantılı bir şekilde itki değerinin artmakta olduğu gözlenmiştir. Deneysel sonuçlarla HAD analiz sonuçları birbirleriyle tutarlı ve yakındır. Elde edilen deneysel değerlere lineer (doğrusal) regresyon yapılmış ve "regresyon katsayısı" 1'e yakın elde edilmiştir. Bu durum güç yüzdesi ile itki değerleri arasında oluşturulan doğrusal regresyonun uyumlu olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Elektrikli kanallı fan, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, motor itki kuvveti ölçümü, test standı, yük hücresi.

Development of a Portable Electric Ducted Fan Test Stand

Abstract: This study aims to test electric ducted fans (EDF) at various power ratios and to determine EDF motor efficiency. Two servomotors were installed at nozzle inlet to control the thrust at specific angles (3°, -3°, 6°, and -6°). The EDF is placed on a slide mechanism, allowing it to move freely when powered. A load cell is used to measure the thrust produced in the direction of flow. The test setup allows the installation and removal of EDFs with different diameters. Computational fluid dynamics (CFD) analyses were conducted on steady flow at various rotational speeds. Z-direction thrust values were obtained and plotted for angled nozzle scenarios. CFD analyses produced velocity contours in YZ plane and three-dimensional pathlines based on the velocity values of the entire flow field. Nominal thrust values and standard deviations are provided for all angles and power percentages. Thrust value increases proportionally as the power percentage increases, as shown by the measurement of the thrust forces. Experimental results and CFD analysis results are consistent and closely aligned. Linear regression was performed on the experimental values obtained, the "regression coefficient" was obtained close to 1. This shows that linear regression between power percentage and thrust values is compatible.

Key words: Electric ducted fan, Computational Fluid Dynamics, motor thrust force measurement, test stand, load cell.

1. Giriş

Fanlar hava akımının enerjisini artırır, bu sayede akışın hızı da artar. Elektrikli kanallı fan, İngilizce terimiyle "Electric Ducted Fan" (EDF) bir kanal içine monte edilmiş kanatçıklı bir fanıdır. Bu fanlar, genel kullanımdaki küçük uçaklar, insansız hava araçları (İHA) ve dikey kalkış iniş (VTOL) uçakları dahil olmak üzere birçok araç türünde kullanılmaktadır. EDF üç ana bileşenden oluşur: İtme veya kaldırmayı sağlayan kanatçıklar, fanı çevreleyen kanal ve fana güç sağlayan motor. Genelde kanallı bir fan, kanatçık sayısı ile karakterize edilir. Kanatçıklar sabit veya değişken hatveli olabilir [1]. EDF kullanılan bir uçakta, kanal sadece ana kaldırma yüzeyi değil, aynı zamanda kanatçıkların/pervanelerin hasar görmesini önleme parçasıdır. Uçuş esnasında deforme olmayacak kadar sert yapıda olmalıdır. Kanallı fanların tercih edilme amacı, kanatçıkların uçlarından kayan havanın yarattığı girdapları azaltmaktır. Böylece aerodinamik kayıplar azalır, verimlilik artar. Kanal, daha çok büyük ölçekli uçaklarda önem arz eden bir unsur olarak kanatçıklardan kaynaklanan gürültü emisyonlarını azaltan

* Sorumlu yazar: emrekara@gantep.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-9282-5805, ² 0009-0001-3714-8450, ³ 0009-0008-1361-3523, ⁴ 0000-0001-6777-7656

akustik koruma da sağlar. Motorun kanallı olması, iniş-kalkış veya test sırasında çevresinde bulunabilecek canlılara kanatçıkların çarpmasından korur.

Bu çalışmanın planlanma amacı, fırçasız motora sahip bir EDF'nin farklı güç oranlarında verdiği itkiyi test etmektir. Ek olarak, nozul girişine takılan iki servomotorun hareketiyle 3° , -3° , 6° , -6° açılarında itki yönlendirmesi (thrust vectoring) yapılmıştır. Özellikle bu tip EDF'lerin kullanıldığı küçük İHA'larda anlık kaçma ve/veya yön değiştirme manevraları için kullanılan itki yönlendirme sistemlerinin deneysel ve sayısal analizlerinin yapılması hedeflenmiştir. Böylelikle bu tip İHA'larda sadece yükselme, alçalma veya belli bir rotada gitme senaryolarının değil, ayrıca manevra kabiliyetlerinin de test edilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışma ile EDF motorların performans kapasitesinin belirlenmesi de amaçlanmıştır. EDF motorların performans kapasitelerinin ölçülmesi için bir test ortamı gerekmektedir. Yapılan çalışmada motora güç verildiğinde EDF üzerine yerleştirildiği kızaklı mekanizma sayesinde rahatça hareket edebilmekte ve ürettiği itki, yük hücresi (load cell) vasıtasıyla akış yönünde ölçülebilmektedir.

Makalede, literatür araştırması Bölüm 1.1'de verilmiştir. Düzeneğin tasarımı Bölüm 1.2'de paylaşılmıştır. Sayısal çalışma olan test edilen EDF'nin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışması ve test düzeneğinin hem üretimi Bölüm 2'de gösterilmiştir. Yapılan deneyler ve bu deneylerin HAD analizi ile karşılaştırmaları bulgular kısmında Bölüm 3.1'de tamamlanmıştır. Oluşan sonuçlara göre yorumlar Bölüm 3.2'de yapılmıştır. Bu adımlar sırasıyla aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

1.1. Literatür taraması

EDF motorunun ulaşabildiği hızlarda akışkan havanın davranışın incelenmesi, olası türbülans alanlarının ve akış kopma alanların incelenmesi akışkanlar mekaniği alanına dahildir. Mekanik aksamının yorumlanması demek ise motorun platformdaki doğrusal ve eksenel hareketi, fiziksel sınırlamaları, motor kapasitesinin ulaşabileceği hız ve üreteceği itki kuvvetinin incelenmesi anlamına gelmektedir. Bu iki alanı da inceleyen yayınlar dışında, bu çalışmada tasarlanması, sayısal analizlerinin yapılması ve üretilmesi öncesi EDF test standının literatürde yapılmış benzer örnekleri incelenmiş ve en uygun olanlar aşağıda kısaca gösterilmiştir.

Son yıllarda EDF; kompakt yapısı, kanatçıkları ucundaki aerodinamik kayıpları ve sürtünmeyi azaltabilmesi, bir kanal içinde olması nedeniyle çevresindeki insanlar için daha güvenli uçuş sağlaması gibi getirdiği avantajlar ile havacılık alanında kullanımda yaygınlaşmaya başlamıştır. Kullanımı artan bu fanlı motor tipi için akla gelen ilk çalışmalar, akışkan mekaniğinin incelenmesi ve mekanik aksamının yorumlanması olarak ikiye ayrılabilir.

Corva vd. [2] EDF motorunun itki kuvvetini bir yük hücresi yardımıyla ölçmüşlerdir. Bu çalışmada aynı zamanda motorun gürültü seviyesi de ölçülmüştür. Çalışmamızda gürültü seviyesine bakılmamıştır. Corva vd.'nin düzeneğinden daha basit bir şekilde sadece hassas terazi ile ölçüm yapılan çalışmalar da literatürde vardır ama itki ölçümü için yük hücresi daha hassas ölçüm elde etmek için gerekmektedir. Bu nedenle çalışmamızda yük hücresi kullanılmıştır. Abrego vd. [3] büyük çaplı bir EDF motorunu, değişken kanatçık açılarında göre test ederek farklı itki kuvvetleri elde etmişlerdir ve NASA'daki rüzgâr tüneline performans karakteristiği çalışması yapmışlardır. Buradaki test düzeneği tek bir EDF çapına uygundur. Testin yapılabilmesi için rüzgâr tüneline ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmamızda geliştirilen test düzeneği modülerdir, farklı çaplardaki EDF'lerin takılıp çıkarılması mümkündür. Ayrıca bir rüzgâr tüneli ihtiyaç olmadan deneyler yapılabilmektedir. Yakın zamanda yapılan başka bir çalışmada ise araştırmacılar [4] EDF motoruna vana ve nozul sistemi ekleyerek çeşitli nozul açılarında ölçümler yapmıştır. Urban vd. [4] Çek Teknik Üniversitesi'nde yaptıkları EDF'nin yapısal olarak akış yönlendirmede nasıl etkilerinin olduğu üzerine çalışmışlardır. 64 mm ve 50 mm için denemeler yapmışlardır. Test düzeneği küçük ve taşınabildir. Çalışmamızda geliştirdiğimiz sisteme en benzer düzenek budur. Ancak, bizim sistemimizde ek olarak, elde edilen deneysel veriler Arduino seri portundan bilgisayara aktarılarak veri grafiği oluşturulabilmektedir. Salazar vd. tarafından yapılan çalışma [5] bir öğrenci projesidir. Yukarıda değinilen çalışmalardan daha günceldir. 2020 yılında çalışılmıştır. Eğitim amaçlıdır. Yapılan bu çalışmadan üstünlüğümüz farklı çaplarda EDF motor testi yapabilmemizdir. Bu yayında sadece 90 mm EDF motor kullanılmıştır. Literatür araştırmasına göre çalışmanın amacı ve çıktıları Bölüm 1.2'de belirlenmiştir.

Yukarıdaki paragraftaki literatür araştırmasına ek olarak, test düzeneğimizle benzerlik gösteren patentler ve yeni tarihli yayınlar da incelenmiştir:

Yang [6] buluşunda bir İHA sistemi için geliştirdiği bir simülasyon test yöntemini açıklamaktadır. İHA sistemi, çok eksenli bir platform üzerine yerleştirilmektedir. Simüle edilen hareketin yerdeki bu platform üzerindeki İHA'ya aktarımı sağlamaktadır. Çalışmamızda geliştirilen düzenek de gerçek uçuşun yerini alan, uçuş risklerini azaltan ve test doğrulama süresini kısaltan bir simülasyon test yöntemi ve simülasyon test sistemi sağlamaktadır. Her iki çalışma da servomotor sistemi vasıtasıyla çok eksenli hareket kabiliyetine sahiptir. Bu çalışmadan farklı olarak geliştirdiğimiz test düzeneği modülerdir, farklı çaplardaki EDF'lerin takılıp çıkarılması mümkündür. Ayrıca Yang [6], İHA ile test düzeneğinin bağlantılarının nasıl yapıldığı göstermemiştir. Bizim

çalışmamızda tüm parçaların nasıl birbirleriyle birleştirildiği gösterilmiştir. Dolayısıyla çalışmamız adım adım prosedürler uygulanarak tekrarlanabilir bir çalışmadır.

Yüzgeç vd. [7], çok rotorlu döner kanat insansız hava araçları için kontrol algoritmalarının ve uçuş denetim parametrelerinin test edilebileceği bir düzenek tasarımı sunmuştur. Bu çalışmadaki İHA test düzeneği ile çalışmamızın ortak yanı farklı eksenlerde hareket ettirilebiliyor olmasıdır. Çalışmada döner kanatlı İHA'lar için bir düzenek geliştirilmiştir, herhangi bir yük ölçümü verisi alınmamış sadece yalpalama, yunuslama ve dönme açılarının PID kullanılarak 100 iterasyon boyunca ölçümleri alınmıştır. Çalışmamızda sabit kanatlı İHA'larda kullanılan EDF ve motor üniteleri için bir test düzeneği hazırlanmıştır ve yük hücreleri kullanılarak kuvvet ölçümleri elde edilmiştir, elde edilen deneysel veriler, Arduino seri portundan bilgisayara aktarılarak ve kaydederek veri grafiği oluşturulmuştur. Ayrıca Yüzgeç vd. [7] tarafından geliştirilen test düzeneğinden farklı olarak test düzeneği modülerdir, farklı çaplardaki EDF'lerin takılıp çıkarılması mümkündür ve iki servomotor kullanılarak itki yönlendirmesi yapılabilmektedir.

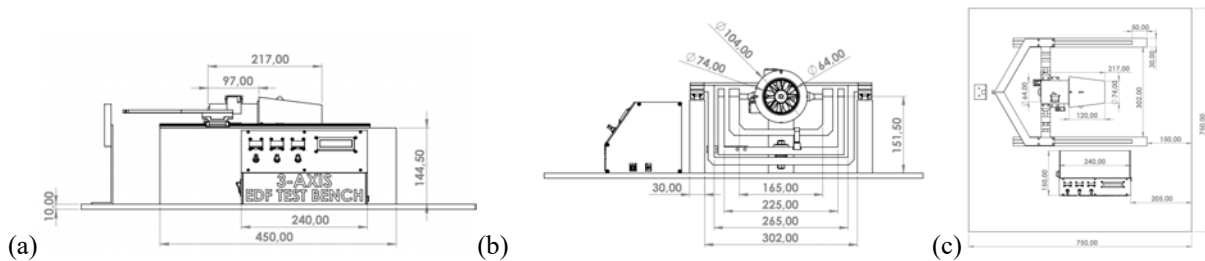
Küçüksezer ve Sancaktar [8] tarafından yapılan çalışmada döner kanatlı insansız hava araçları için üç eksen kontrollü uçuş test düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışmada, hareket açılarının ve ivmelenmelerin ölçümleri alınmıştır. Çalışmamızla ortak yanı üç eksen kontrollü bir test düzeneği sahip olmalarıdır. Bizim çalışmamızda, bu çalışmadan farklı olarak yük hücreleri kullanılarak kuvvet ölçümleri elde edilmiştir, elde edilen deneysel veriler, Arduino seri portundan bilgisayara aktarılarak ve kaydederek veri grafiği oluşturulmuştur. Test düzeneğimiz modülerdir, farklı çaplardaki EDF'lerin takılıp çıkarılması mümkündür. Bu çalışmadan bir başka fark, düzeneğimizin sabit kanatlı İHA'lar için hazırlanmasıdır.

Baran vd. [9] tarafından geliştirilen İHA test düzeneği ile çalışmamızın birinci ortak yanı farklı eksenlerde hareket ettirilebiliyor olmasıdır. İkinci ortak yanı, yük ölçümü yapma kapasitesine sahip olmalarıdır. Çalışmalarında döner kanatlı İHA'lar için bir düzenek geliştirilmiştir. Yukarıda özetlenen diğer çalışmalarda da görülen modüler olmama ve itki yönlendirmesine sahip olmama farklılıkları bulunmaktadır.

1.2. Çalışmanın amacı ve çıktıları

Bu çalışmada amaç, literatürdeki sistemlerden daha kolay kullanım olanağı sunan ve taşınabilir bir EDF test düzeneği yapmaktır. Çalışmanın planlanma amacı EDF motorlarının, üretici firma tarafından verilen teknik özellikler sayfasına uygun olarak itki üretip üretemeyeceğini test etmektir. Kullanım alanı oldukça geniş olan EDF motorlarının itki kapasitelerini gözlemlemek amacıyla bir test düzeneği oluşturmak hedeflenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilenler sırasıyla şu şekildedir:

- Literatürdeki çalışmalar incelenip tasarım yapılmış, Solidworks'te çizimi (Şekil 1) tamamlanmıştır.
- Çalışma fikir itibarıyla düşünüldüğünde, akışkanlar/HAD ve mekanik olarak iki ana başlık altında organize edilmiştir. Sayısal yöntemler kullanılarak tasarımın son hali ortaya çıkarılmıştır.
- HAD analizleri, ANSYS Fluent 2022 R2 [10] versiyonunda yapılmıştır. Daimi (steady) akış için farklı dönüş hızlarında veriler elde edilmiştir.
- Raylı sistemde motorun farklı eksenlerde ürettiği itki, deneysel ve HAD analizlerinde hesaplanmıştır.
- Düzenek farklı motorlara adapte edilebilir şekilde tasarlanmıştır.
- Verilerin işlenmesinde açık kaynaklı elektronik kart olarak Arduino kullanılmıştır. Kart, donanım kolaylığı ve bilgi erişimi açılarından kullanıma elverişlidir.
- Elde edilen deneysel veriler, Arduino seri portundan bilgisayara aktarılarak kaydederek veri grafiği oluşturmuştur, bu sayede verilerin yorumlanması kolaylaştırılmıştır.



Şekil 1. Tasarımın teknik çizimi: (a) Yandan görünümü, (b) cepheden görünümü, (c) üstten görünümü.

Literatürdeki genel test düzeneklerinden farklı olarak yarattığı yenilikçi avantajlar şunlardır:

- Modüler olup farklı çaplardaki (50 mm, 55 mm, 60 mm, 64 mm, 70 mm, 80 mm, 90 mm, 100 mm, 105 mm, 110 mm, 120 mm, 130 mm) EDF'lerin testi için kullanılabilir. Modülerdir.

- b. Test edilen EDF çıkışına takılan nozulun yalpalama (yaw) hareketi iki servomotor ile kontrol edilerek itki yönlendirmesi yapılabilmektedir.
- c. Tasarlanan test düzeneği, elektrikli motora güç verilmesiyle birlikte kızak üzerinde kayarak hareket etmektedir. Motor ürettiği itkiyle birlikte harekete başlayıp rayın sonuna konumlandırılmış yük hücresine dayanmaktadır.
- d. Elde edilen deneysel veriler, Arduino seri portundan bilgisayara aktarılarak kaydederek veri grafiği oluşturulabilmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Daimi, basınç temelli, üç boyutlu, sıkıştırılamaz hava akışının viskoz akışkanlarda çözüm için girişteki hava yoğunluğunun $1,225 \text{ kg/m}^3$ ve dinamik viskozitesinin $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ olduğu çözüm, ANSYS Fluent akış çözücüsü ile koşturulmuştur. Çözümde basınç-hız eşleşmesi için bağlaşıklık çözüm, uzaysal ayrıklaştırma yöntemi için en küçük kareler hücre tabanlı gradyanı kullanan 2. dereceden basınç, momentum, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerji özgül yayılma hızı çözümü kullanılmıştır.

Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerinin SST $k-\omega$ türbülans modeliyle kapatıldığı (tamamlandığı) denklemlerinin üç boyutlu, sıkıştırılamaz, viskoz akışkanlarda çözümü için akış alanının diferansiyel denklem formu çözümün temelinde her sonlu hacimde ANSYS Fluent içinde çözülmüştür. Bu denklemler sırasıyla, kütle korunumu (Denklem 1), momentumun korunumu (Denklem 2) ve Denklem 2 içindeki $\overline{\rho u_i u_j}$ Reynolds kaymazlık terimini modellemek için SST $k-\omega$ türbülans modelinde kullanılan denklemler (Denklem 3 ve 4) aşağıda gösterilmiştir [11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial (-\overline{\rho u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* f_\beta \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \frac{\omega}{k} (-\overline{\rho u_i u_j}) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \beta f_\beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemlerde, ρ akışkanın (hava) yoğunluğunu, t zamanı, p akışkanın statik basıncını, u_i ve u_j z- ve y-yönündeki hız bileşenlerini, μ is dinamik viskoziteyi, x_i ve x_j seçilen düzleme göre akışa dik ve paralel yönleri temsil etmektedir. β^* , f_β , α ve β $k-\omega$ türbülans modeli değişkenleridir. Denklemler 3 ve 4'teki sağdaki ilk üç terim, hem k (türbülans kinetik enerjisi) hem de ω (türbülans kinetik enerji özgül yayılma hızı) için, sırasıyla üretim, yıkım ve difüzyon terimleridir. Denklem 3 ve 4'ün çözümü sonucu elde edilen türbülans viskozitesi (μ_t) terimi çözülmekte ve Denklem 2'yi kapatmak için kullanılmaktadır.

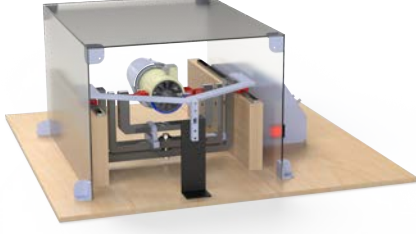
Düzeneğin oluşturulmasında ilk adım olan EDF motorun seçimi yapılırken farklı çaplardaki motorlar araştırıp, masa üzerine uyarlanabilecek, kolay kullanım sağlayacak ölçülerde olmasına dikkat edilmiştir. Test standının, masa üzerine uyarlanabilecek kolay kullanım sağlayacak ölçülerde olmasına özen gösterilmiştir. Kaydırılma mekanizmasının itki ölçümünde herhangi bir engel yaratmayacak olmasına dikkat edilmiştir. Motor çalışır haldeyken itkisinin ne şekilde ölçülebileceğinin kararını verebilmek için yük hücreleri kullanılmıştır.

Farklı çaplarda EDF'lerin kullanımına uygun şekilde özgül bir tasarım yapılmıştır. Bu tasarım için, patent başvurusunda bulunulmuştur. Verilerin doğruluğunu sağlayabilmek amacıyla her ölçüm için 30 değer okunup ortalamaları ve standart sapmaları alınmıştır. Motorun arkasına yerleştirilen nozulun iki eksende hareketini kolay bir şekilde sağlayabilmek için 2 adet servomotor kullanılmıştır. Yük hücrelerinden okunan veri Arduino Mega aracılığı ile OLED ekranlara yansıtılmıştır. Motora verilen akım Arduino Uno'ya bağlanan potansiyometre aracılığıyla ayarlanmış, ayarlanan değer LCD ekranda gösterilmiştir. Motorun pitch (yunuslama) ve yaw (yalpalama) eksenlerinde kullanılan servomotorların hareketleri Arduino Uno [12] aracılığıyla kontrol edilmiş, Arduino Mega aracılığıyla LCD ekrana yansıtılmıştır. Çalışmanın bitiş tarihi olan 2023 Şubat tarihi itibarıyla TL cinsinden bütçesi 8000 TL'nin altındadır. Bu bütçe dahilinde test düzeneği üretimi ve deneysel çalışmalar altı ay içinde başarı ile tamamlanmıştır.

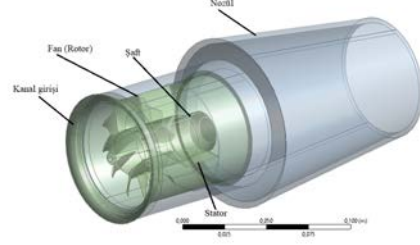
3. Bulgular ve Tartışma

Test standında kullanılacak olan EDF'nin gerçek ölçüleri kullanılarak SolidWorks programında çizim yapılmıştır (Şekil 2). Çizim step formatında kaydedilmiş ve ANSYS [10] ortamına aktarılmıştır. Akış analizine uygun hale getirmek için ANSYS DesignModeler içinde geometride iyileştirmeler (Şekil 3) yapılmıştır. Akış alanı

kati duvarlar arasında alınıp “ANSYS Fluent Meshing” modülüne aktarılmıştır. Aşağıda detayları verilen ağ yapısı ve çözücü modülleri AMD Ryzen 7 6800H 8 çekirdek 16 iş parçacıklı işlemcisi, 32 GB 4800Mhz RAM belleği olan taşınabilir bir bilgisayarda çalıştırılmıştır.



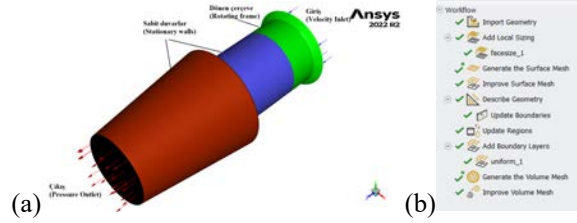
Şekil 2. EDF test standının bilgisayar destekli çizimi.



Şekil 3. Akış alanının bilgisayar destekli çizimi.

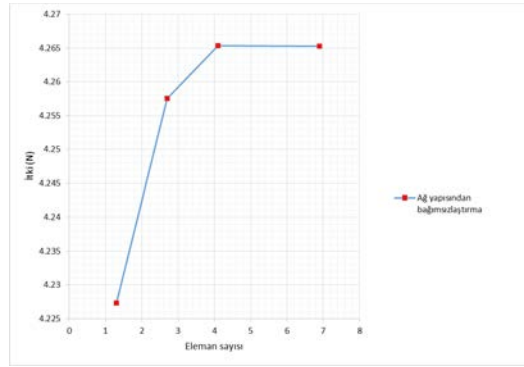
Geometri aşamasından sonra analizin doğru sonuç vermesinde önemli bir etken olan ağ yapısı (mesh) oluşturma aşamasına geçilmiştir. Ağ yapısı kalitesi ne kadar yüksek olursa analiz sonucu da o kadar stabil olmaktadır. Ağ yapısı için ANSYS Fluent ağ yapısı çözümü su geçirmez geometri analiziyle kullanılmıştır. Bu çözümün kullanılmasındaki neden, diğer ağ yapısı oluşturma modülüne göre daha hızlı olması, kademe kademe ilerleyen bir modül olmasından dolayı hatalı ağ yapısı olasılıklarını en aza indirmesidir.

Geometri, Şekil 4.a’da gösterildiği gibi 3 bölgeye ayrılmıştır: hareketsiz ön bölge (mavi bölge), hareketli referans çerçevesi bölgesi (yeşil bölge) ve yarı hareketli (açısal değişimli) arka bölge (kırmızı bölge). Hareketli referans çerçevesi içerisinde rotoru barındırdığı için diğer bölgelere nazaran daha sıkı bir şekilde ağ atılmıştır. Ayrıca bu bölgeler itki sonucunu doğrudan etkileyen, itkiyi yaratan bölgelerdir. Dolayısıyla en yüksek sıklıkta ağ yapısı buradadır. Duvar üzerinde, sınır tabakadaki yüksek gradyanlı hız profilini yakalamak için y^+ değerinin düşük olması hedeflenerek ilk katman kalınlığı 0.038 mm alınmış ve akışa dik yönde 10 katman 1,2 artış oranıyla eklenmiştir. y^+ duvardan itibaren, akışa dik yönde ölçülen boyutsuz mesafedir. Bir duvardan uzaktaki ilk düğümün konumunu kontrol etmek için kullanılır. Bu çalışmada kullanılan SST k- ω türbülans modeli için $y^+ < 10$ olmasının yeterli olduğu belirtilmektedir [13]. Şekil 5’te sınır tabakadaki ağ yapısının giriş bölümünde görünümü verilmiştir. Ağ yapısının oluşturulmasında kullanılan adımların tüm akış şeması Şekil 4.b’de verilmiştir.

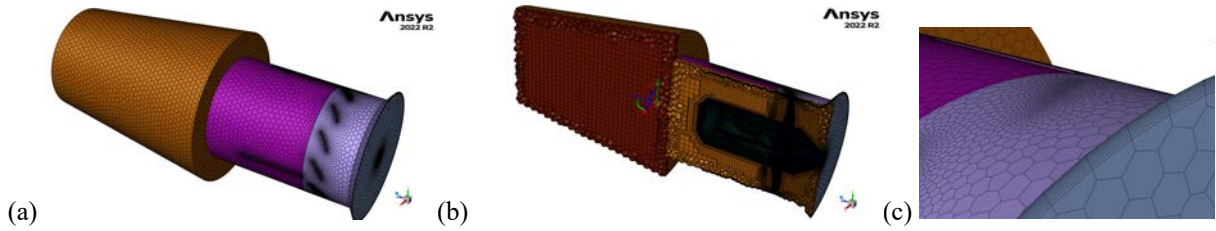


Şekil 4.(a) Akış bölgeleri, (b) ağ yapısı oluşturma akış şeması.

Geometri tanımlandıktan sonra sınır koşulları kontrol edilmiş ve sınır koşulları da, akış şeması (Şekil 4.b) içinde tanımlanmıştır. Bu aşamalar sonucunda sıra hacimsel ağ yapısı oluşturma aşamasına gelmiştir. Yüzeysel ağ atıldıktan sonra ağ yapısı maksimum çarpıklık değeri 0,93 ve hacim ağ atıldıktan sonra da minimum ortogonal kalitesi 0,010564 bulunmuştur. Kaliteli bir ağ yapısı için, minimum ortogonal kalitenin 0,01’den yüksek olması ve maksimum çarpıklık oranının 0,95’ten düşük olması beklenmektedir [11], dolayısıyla bu değerler uygun bir ağ yapısı oluşturulduğunu göstermektedir. Poly-hexcore (honeycomb) hücre tipi tercih edilmiştir. Bu tip hücreler, çok farklı büyüklüklerde parçalar içeren zor geometrilerde verimli sonuçlar vermektedir. Şekil 5’te ağdan bağımsızlaştırma çalışması %30 güçte iken gösterilmiştir. Tüm bu aşamalar sonucunda 4.099.271 eleman sayısındaki ağ yapısı tamamlanmıştır. Ağ yapısının son hali Şekil 6’da verilmiştir.

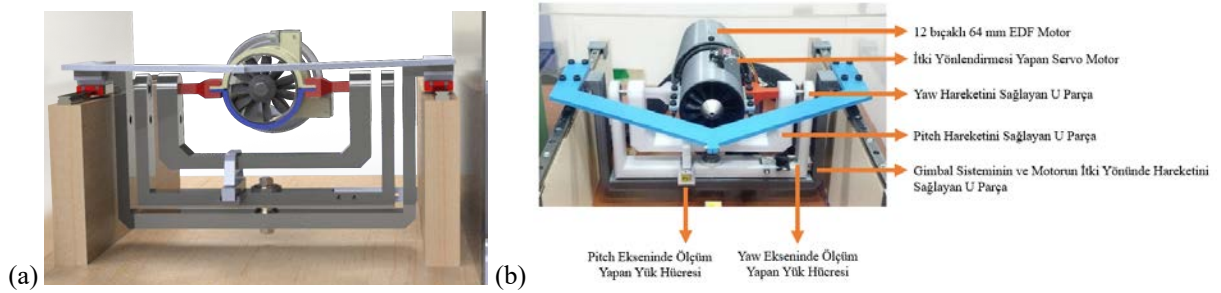


Şekil 5. Ağ yapısından bağımsızlaştırma grafiği.



Şekil 6. (a) Ağ yapısı, (b) kesit gösterimi, (c) sınır tabaka ağına yakından bakış.

Şekil 4.a'da yeşille gösterilen hareketli referans çerçevesi bölgesi (MRF), rotor (blade-main) ve rotor duvarı (blade-root) çerçeve dönüş hızıyla Z yönünde (XY düzleminde) döncek şekilde düzenlenmiştir. Kalan bölgelerde giriş hızı 0,1 m/s (akışı başlatılmak için), çıkış basıncı bağlı değerde 0 Pa, rotor ve rotor duvarı dışındaki tüm duvarlar için kaymazlık (no-slip) sınır koşulu kullanılmıştır. Ana çıktılar olan z-yönündeki itki (thrust force) değerleri, açılı nozul senaryolarında alınmış ve grafik halinde verilerek görselleştirilmiştir. Ayrıca YZ düzleminde hız kontürleri ve üç boyutlu yolak çizgisi (pathline) tüm akış alanı için hız değerlerine göre HAD analizler sonucunda gösterilmiştir. Bulgular kısmında, deney sonuçlarıyla birlikte gösterilmiştir ve tartışma kısmında yorumlanmıştır. Motorun gimbalden esinlenerek tasarlanmış bir sistem üzerine yerleştirilerek (Şekil 7), yaw (yalpalama) hareketi ile itki yönlendirmesi (thrust vectoring) yapılmıştır.



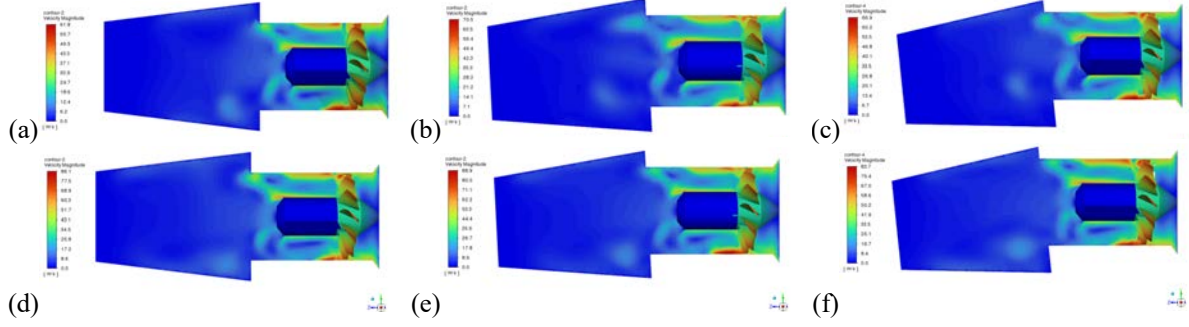
Şekil 7. Motor ve eksen hareketlerini sağlayan Gimbal sistemi (a) tasarımı, (b) bileşenlerinin gösterimi.

3.1 Bulgular

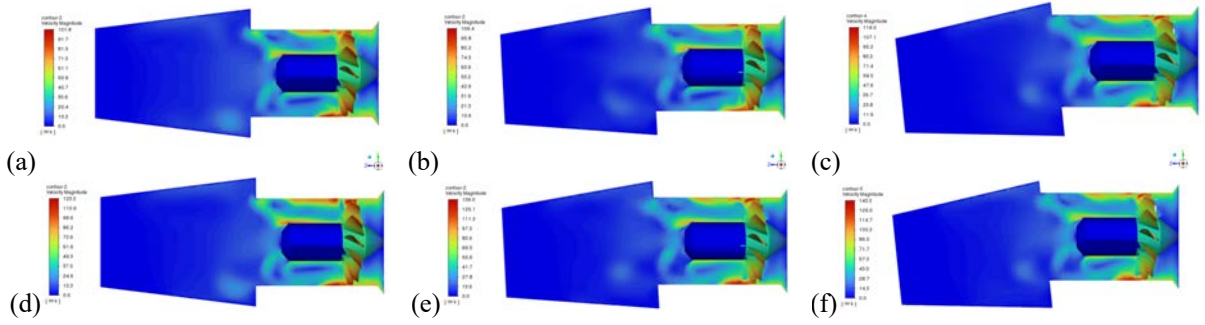
Çalışmanın bu bölümünde, HAD analizi ile deneysel yakın sonuçların sağlanması hedeflenmiştir. HAD analizi ile EDF ve nozul kısmı, ANSYS analiz programı kullanılarak modellenmiş ve yorumlanmıştır.

Bulguların ilk aşamasında HAD çözümleri yapılmıştır. Buna göre sırasıyla 15000 rpm (Güç yüzdesi % 20), 20000 rpm (Güç yüzdesi % 25), 25000 rpm (Güç yüzdesi % 45) ve 30000 rpm'de (Güç yüzdesi % 55) dönen rotorun oluşturduğu akış analizleri 0, ±3 ve ±6 derecelik nozul yönlendirmesi için başarılıdır. Çalışmanın ikinci

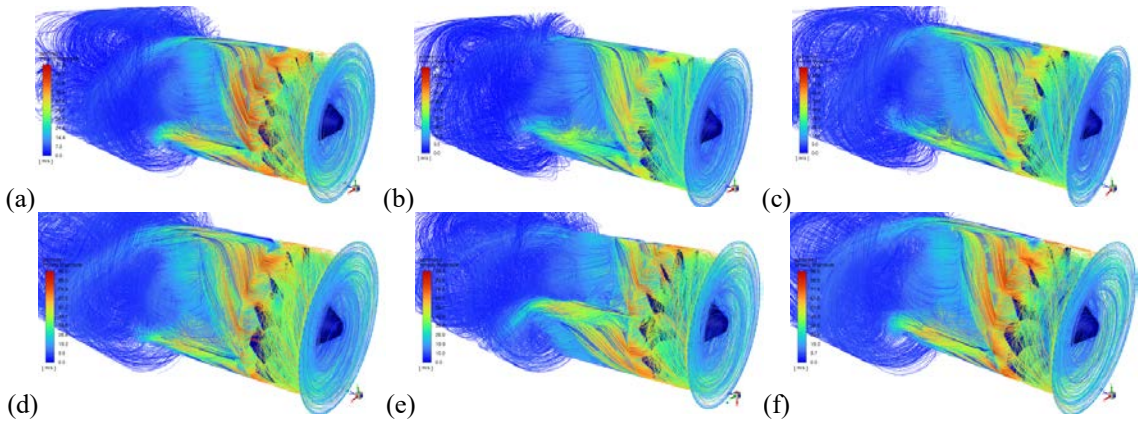
aşamasında kurulan deney düzeneğinde analizler, HAD çözümlerine paralel şekilde gene 0, ± 3 ve ± 6 derecelik nozul yönlendirmesi için test edilmiştir. Analizleri görselleştirme amacıyla hız kontürleri ve akış yönü çizgileri (pathline) test edilen dönüş hızlarında 0, ± 3 ve ± 6 derecelik nozul yönlendirmesi için aşağıda Şekil 8 ve 9'da kontürler için ve Şekil 10 ve 11'de akış yönü çizgileri için verilmiştir.



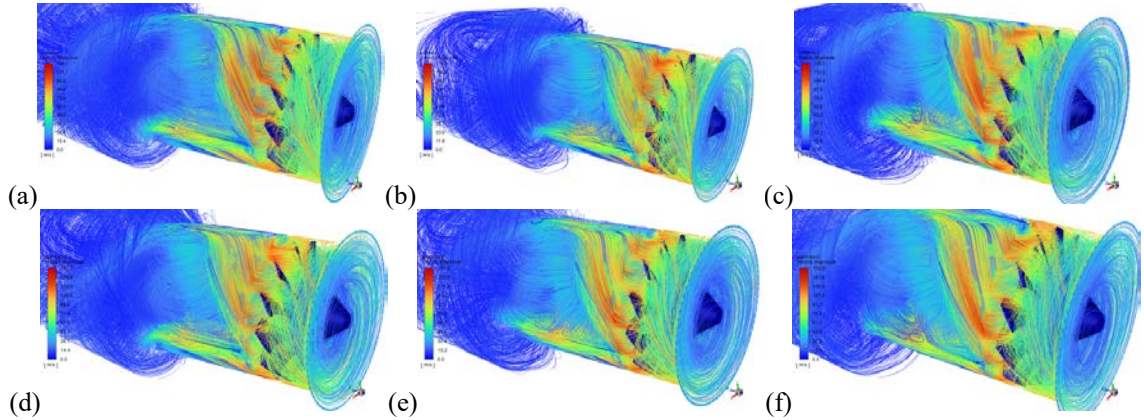
Şekil 8. 15000 rpm dönüş hızındaki rotor için (a) 0, (b) ± 3 ve (c) ± 6 derecelik nozul yönlendirmesi için ve 20000 rpm dönüş hızındaki rotor için (d) 0, (e) ± 3 ve (f) ± 6 derecelik nozul yönlendirmesi için hız kontürleri.



Şekil 9. 25000 rpm dönüş hızındaki rotor için (a) 0, (b) ± 3 ve (c) ± 6 derecelik nozul yönlendirmesi için ve 30000 rpm dönüş hızındaki rotor için (d) 0, (e) ± 3 ve (f) ± 6 derecelik nozul yönlendirmesi için hız kontürleri.

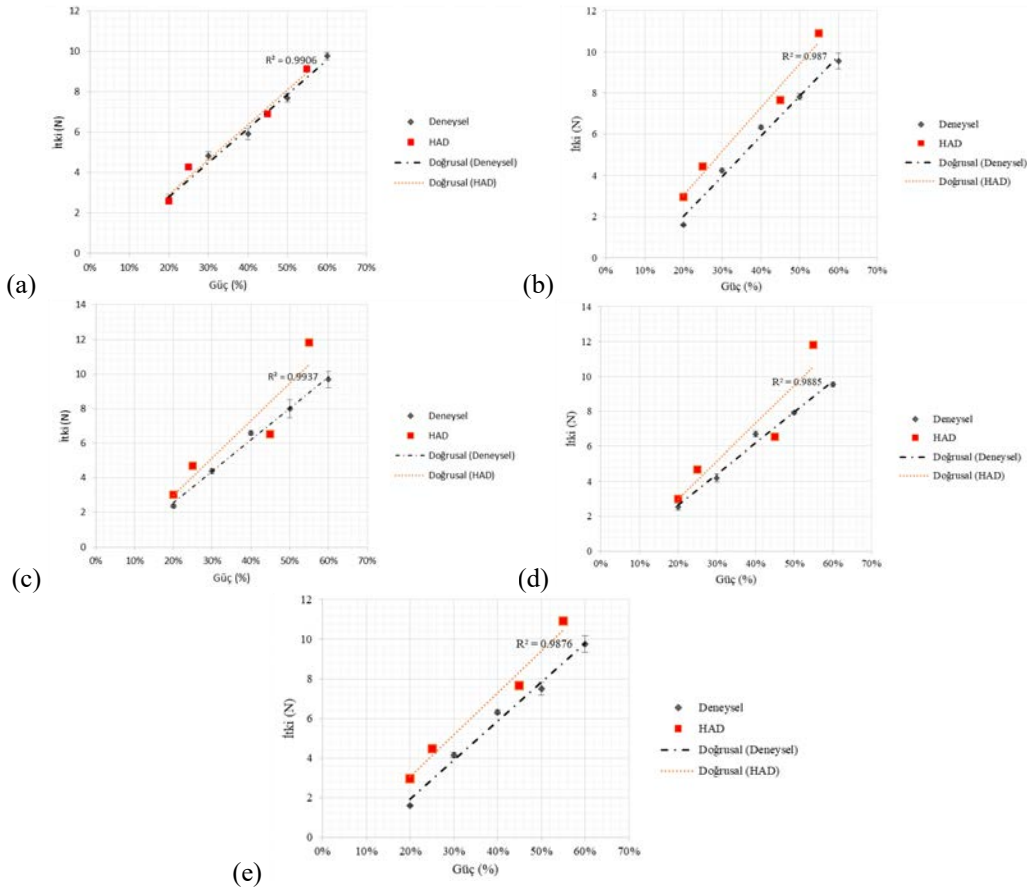


Şekil 10. 15000 rpm dönüş hızındaki rotor için (a) 0, (b) ± 3 ve (c) ± 6 derecelik nozul yönlendirmesi için ve 20000 rpm dönüş hızındaki rotor için (d) 0, (e) ± 3 ve (f) ± 6 derecelik nozul yönlendirmesi için akış yönü çizgilerinin gösterimi.



Şekil 11. 25000 rpm dönüştürme hızındaki rotor için (a) 0, (b) ± 3 ve (c) ± 6 derecelik nozul yönlendirmesi için akış yönü çizgilerinin gösterimi ve 30000 rpm dönüştürme hızındaki rotor için (d) 0, (e) ± 3 ve (f) ± 6 derecelik nozul yönlendirmesi için akış yönü çizgilerinin gösterimi.

Önceki bölümde detayları verilen deney düzeneğinin kurulumu sonrası nozul yardımıyla itki yönlendirme yapılarak -6, -3, 0, 3, 6 açılarında itki değerleri elde edilmiştir. Verilerin doğruluğunu sağlayabilmek amacıyla her ölçüm için 30 değer okuyup ortalamaları ve standart sapmaları alınmıştır. Nominal itki değerleri ve standart sapması farklı güç yüzdeleri için tüm açılarda verilmiş, aşağıdaki şekillerde bu değerlere göre Şekil 12’de grafik halinde verilerek görselleştirilmiştir. Grafik üzerindeki HAD sonuçları karşılaştırma amacıyla gösterilmiştir.



Şekil 12. Deneyel ve HAD sonuçları itki kuvveti (N) – güç (%) grafikleri: Nozul yönlendirmesi (a) yokken, (b) -3 derecelik, (c) -6 derecelik, (d) 3 derecelik, (e) 6 derecelik.

Şekil 12’de nozul yönlendirmesinin olduğu senaryolarda deneysel verilerle sayısal çözüm sonuçları arasında bir sapma görülmektedir. HAD analizinde analiz daimi akış için yapılmış olması, deneysel verilerin ise her ölçümde 30 değerinin okunup ortalamaları ve standart sapmaları alınmış olması bu farkı yaratmaktadır. Beklenildiği gibi yüksek güç senaryosu olan %60 için verilerde türbülans etkisi çok yüksek olmaktadır. Bu yüzden deney sisteminin dış duvarlarından geri dönen akış da itkinin yapay şekilde düşüşüne sebep olabilmektedir. 6° için akış, türbülans etkilenip tüm güç oranlarında HAD analizinde gözlemlenen ideal durumdan daha düşük itki oluşturmuştur. Bu durumun daha anlaşılabilir olabilmesi adına eğim çizgilerinin denklemleriyle birlikte Tablo 1’de bu farklılıkların % cinsinden ortalama değerleri verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel ve HAD sonuçları itki kuvveti (N) verilerinin eğim çizgisine göre farklılıklarının % cinsinden değerleri

Nozul yönlendirmesi	Deneysel eğim çizgisi	HAD eğim çizgisi	Güç değeri (%)	Deneysel itki kuvveti (N)	HAD itki kuvveti (N)	Farklılık (%)
0	$y = 17,312x - 0,5549$	$y = 16,935x - 0,5794$	20	2,9075	2,8076	-3,5582
			30	4,6387	4,5011	-3,0570
			40	6,3699	6,1946	-2,8299
			50	8,1011	7,8881	-2,7003
			60	9,8323	9,5816	-2,6165
±3°	$y = 18,237x - 1,0835$	$y = 21,607x - 1,3267$	20	2,5639	2,9947	14,3854
			30	4,3876	5,1554	14,8931
			40	6,21130	7,31610	15,1009
			50	8,035	9,4768	15,2140
			60	9,8587	11,6375	15,2851
±6°	$y = 19,666x - 1,9976$	$y = 21,184x - 1,1848$	20	1,9356	3,052	36,5793
			30	3,9022	5,1704	24,5281
			40	5,8688	7,2888	19,4819
			50	7,8354	9,4072	16,7085
			60	9,802	11,5256	14,9545

3.2 Tartışma ve sonuç

İtki değerleri, HAD analizlerinde yukarıda bahsedilen tüm deneysel senaryolarda sabit bir değere yakınsamıştır. HAD analizleri sonucu elde edilen tüm itki kuvveti değerleri grafiklerde gösterilmiştir. 15000 ve 20000 ve 30000 rpm dönüş hızlarında nozul açısı 0 dereceden 3 dereceye çıktığında, itki kuvveti artmaktadır, sonrasında 6 derece açısına çıktığında bu değer düşmektedir. İlginç bir şekilde, 25000 rpm dönüş hızındaki senaryoda nozul açısı 0 dereceden 3’e yükseltildiğinde itki değeri düşmekte ve 6 dereceye geldiğinde tekrar yükselmektedir. Buradaki HAD analiz sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırmaları şekiller üzerinde, deney verileri ile birlikte gösterilmiştir. Dolayısıyla, yorum kısmı deney sonuçları ile birlikte aşağıdaki paragraflarda, HAD görsel analizi yorumlamaları sonrasında yapılmıştır.

HAD analizlerinde akışın görselleştirilmesi amacıyla YZ merkez kesit düzleminde hız kontürleri incelenmiştir. Rotor ve stator bölgesinde görsel açıdan gözlemlenmese de nozul kısmına açı değiştirildikçe açı yönünde akışın yönlendiği görülmektedir. Gene de istenildiği kadar bir yönlendirme olmamıştır, bunun sebebi açıların çok düşük (3 ve 6 derece) olması ve akışın daimi kabul edilmesidir. İkinci görselleştirme tekniği, akış yönü çizgilerinin gösterimidir. Akışın dönerek geldiği bu üç boyutlu gösterimlerde ortaya konulmuştur. Maksimum hız genelde rotorun kanatçıklarının ucunda görülmüştür, fakat nozul açısı arttıkça bu değer rotor çıkışından nozul girişine dek yayılıp akışın yönüne doğru geniş bir alana yayılmıştır.

Deneyler sonucu elde edilen itki kuvveti değerleri, standart sapmalarıyla beraber grafiklerde gösterilmiştir. Güç ünitesinde dönüş hızı değerleri yerine güç yüzdesi gösterilmiştir. İtki kuvvetlerinin ölçümü sonucunda, beklendiği gibi güç yüzdesi artırıldıkça orantılı bir şekilde itki kuvveti değeri artmakta ve standart sapmaları da $\pm 0,2$ N civarında gözlenmektedir. Deneysel verilere bakıldığında, İtki değerleri nozul yönlendirmesi yokken % 20 güç oranında 2,9075 N ile başlayıp % 60 güç oranında 9,8323 N değerine yükselen doğrusal bir şekilde ($y = 17,312x - 0,5549$) değişmektedir. Aynı doğrusal değişim $\pm 3^\circ$ (2,5639 N değerinden 9,8587 N değerine, $y = 18,237x - 1,0835$ denklemine göre) ve $\pm 6^\circ$ (1,9356 N değerinden 9,802 N değerine, $y = 19,666x - 1,9976$ denklemine göre) nozul yönlendirme açıları için benzer şekilde gözlenmiştir. Deneysel sonuçlarla HAD analiz sonuçları birbirleriyle tutarlı ve yakındır. Bu durum yukarıdaki şekillerde açıkça gözükmemektedir. Elde edilen deneysel değerlere lineer (doğrusal) regresyon yapılmış ve “regresyon katsayısı” 1’e yakın elde edilmiştir. Bu durum güç yüzdesi ile itki değerleri arasında oluşturulan doğrusal regresyonun uyumlu olduğu göstermektedir.

-3 ile +3 açıların verdiği eğim çizgileri (Şekil 11b ve 11d) birbirleriyle örtüşmektedir. Aynı şekilde -6 ile +6 açıların verdiği eğim çizgileri de (Şekil 11c ve 11e) birbirleriyle örtüşmektedir. Tek fark deneylerin R^2 yani korelasyon katsayısının farklı olmasıdır. Bunun nedeni tekrarlanan deneyler sırasındaki yük hücrelerinin hassasiyeti nedeniyle her deneyde yük değerlerini farklı okumak, servomotorlarının açı hassasiyeti nedeniyle aynı açıyı tam okuyamamak gibi, sistematik hataların gösterebilmesidir.

Deneysel verilere bakılırsa güç yüzdesine göre, itki kuvvetleri HAD analizlerindeki gibi doğrusal şekilde artmıştır. Açılarının düşük olması nedeniyle bu kuvvetlerin çok düşük olması beklenmiştir. Açılarının 6’dan daha

yüksek olamamasının nedeni, deneylerde kullanılan servomotorlarının fiziksel sınırdan en fazla bu açığa kadar döndürülebilmesidir. Bu durum, hem nozul geometrisi hem de servomotorun farklı seçilmesiyle giderilebilir.

Literatürde verilen çalışmalar sadece itkiye yönelik olduğu için tek eksenle yapılmıştır. Test edilen EDF motor için 3 eksen ve 3 derece aralıklarda yapılan başka bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Test edilen ürünün (QX-Motor 64mm EDF 12 QF2822-4300kv 3s 64mm kanallı fan) kullanma kılavuzuna bakıldığında sadece 3S pil kullanılarak %100 güç için 1550 gr (15.2 N) yük değeri görülmektedir. Çalışmamızda daha yüksek voltajlı 6S pil ve ona uygun ESC sürücü kullanılarak motor sürülmüştür. Bu nedenle kullanım kılavuzundaki değerden daha fazla yük değeri elde edilmesi beklenmiştir. Deneysel eğim çizgimiz olan $y = 17.312x - 0.5549$ ile hesaplama yapıldığında $y = 17.312 (\%100) - 0.5549 = 16.75$ N çıkmaktadır. HAD eğim çizgimiz olan $y = 16.935x - 0.5794$ ile hesaplama yapıldığında $y = 16.935 (\%100) - 0.5794 = 16.35$ N çıkmaktadır. Çalışmanın planlanma amacı EDF motorlarının, üretici firma tarafından verilen teknik özellikler sayfasına uygun olarak itki üretip üretemeyeceğini test etmektir. Bu durumda üretici firmanın verdiği itki değerlerinin tutarlı olduğu düşünülebilir. Bu çalışmanın ileri aşamasında farklı kV değerlerinde ve farklı ESC sürücülerle bu deneylerin sayısının artırılması planlanmaktadır.

Teşekkür

Projenin maddi kaynağı Gaziantep Üniversitesi Araştırma Projeleri Yönetim Biriminin (BAP) HUBF.OKAP.22.02 kodlu, aynı başlıklı öğrenci katılımlı araştırma projesinden (ÖKAP) sağlanmıştır. Sistem bileşenleri IOM FabLab Uygulama Merkezinde 3B yazıcı ile basılmıştır. E.K. fikir sahibidir. G.G. ve M.Ç.Ö. deneyleri gerçekleştirmiştir. E.K. ve M.Ç.Ö. HAD analizlerini gerçekleştirmiştir, E.K. ve Ü.H. sonuçları yorumlamıştır. E.K. makaleyi yazmıştır. E.K. ve M.Ç.Ö. makalenin düzeltmelerini yapmıştır.

Kaynaklar

- [1] Zhao HW. Development of a dynamic model of a ducted fan VTOL UAV. PhD, RMIT University, 2009.
- [2] Corva DM, Adams SD, Kouzani AZ. Variable-geometry exit nozzle for improving static thrust of drones ducted fans. J Field Robot 2021; 38(8): 1092-1103.
- [3] Abrego AI, Bulaga RW, Rutkowski M. Performance study of a ducted fan system. In: American Helicopter Society Aerodynamics, Acoustics and Test and Evaluation Technical Specialists Meeting; 23-25 January 2002; San Francisco, USA.
- [4] Urban D, Kusmirek S, Socha V, Hanakova L, Hylmar K, Kraus J. Effect of electric ducted fans structural arrangement on their performance characteristics. Appl Sci 2023; 13(5): 2787.
- [5] Salazar DM, Liou WW, Xu J. Development of a portable electric ducted fan engine lab for aircraft electric propulsion education. In: AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum; p. 3910, 24-28 August 2020; Virtual conference.
- [6] Yang S. 2009. CN102109418A Simulation test method and simulation test system for unmanned aerial vehicle (UAV) system. Espacenet Patent. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/044173635/publication/CN102109418A?q=CN102109418A> Yayın tarihi Haziran 2011. Erişim tarihi Temmuz 7, 2024.
- [7] Yüzgeç U, Kesler M, Karakuzu C, Türkyılmaz T, Gün AR, Uçar G, Üçgün H, Ökten İ. 2016. İnsansız Hava Aracı Test Düzeneğinin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. <https://tinyurl.com/5h4uvsbx> Yayın tarihi Eylül 2016. Erişim tarihi Temmuz 7, 2024.
- [8] Küçüksezer HC, Sancaktar İ. Mikrodenetleyicili İHA uçuş test düzeneği tasarımı. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2021; 8(2): 778-787.
- [9] Baran EA, Hançer C, Çalıkoglu E, Duman E, Çetinsoy E, Ünel M, Akşit MF. 2008. İnsansız hava araçları için test düzeneği tasarımı ve üretimi. <https://tinyurl.com/3jes2rvb> Yayın tarihi Kasım 2008. Erişim tarihi Temmuz 7, 2024.
- [10] ANSYS Fluent. User's Guide. <https://tinyurl.com/mrxcbdnf> Yayın tarihi Temmuz 2021. Erişim tarihi Şubat 12, 2024.
- [11] ANSYS Fluent. Theory Guide. <https://tinyurl.com/3tmxvv3t> Yayın tarihi Temmuz 2021. Erişim tarihi Şubat 12, 2024.
- [12] Arduino SA: "Arduino". <http://www.arduino.cc/> Erişim tarihi Şubat 12, 2024.
- [13] CFD Analizleri için Y+. <https://tinyurl.com/38hkw9hk> Yayın tarihi Ekim 2022. Erişim tarihi Temmuz 7, 2024.