

# Küçük Ölçekli Jet İHA Türbin Motoru Deneysel Performans Testleri

## Subscale Jet UAV Turbine Engine Experimental Performance Tests

*Haluk Altay<sup>1</sup>, Bilal Yuçel<sup>2</sup>, Berkcan Ulçay<sup>3</sup>,  
Yuçel Aydın<sup>4</sup>*

<sup>1,2,3</sup>Modelleme Simülasyon  
Türk Havacılık Uzak Sanayii, İstanbul  
[haluk.altay@tai.com.tr](mailto:haluk.altay@tai.com.tr)  
[bilal.yucel@tai.com.tr](mailto:bilal.yucel@tai.com.tr)  
[berkcan.ulcay@tai.com.tr](mailto:berkcan.ulcay@tai.com.tr)

<sup>2</sup>Kontrol Otomasyon Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul  
[aydinyu@itu.edu.tr](mailto:aydinyu@itu.edu.tr)

### Özetçe

Bu çalışmada, küçük ölçekli insansız hava araçlarında kullanılan jet motorlarının performans testleri için gerekli ölçüm sistemlerinin tasarımı, entegrasyonu ve testleri anlatılmaktadır. Performans testleri itme ve yakıt tüketimi olarak iki sınıfta gerçekleştirilir. İtme testleri için bir yük hücresi kullanılarak ölçümler yapılır. Yük hücresinin istenilen hassasiyette doğru ölçüm yapılabilmesi için yükseltici ve filtre tasarlanmıştır. Farklı itme seviyelerinde çoklu ölçümler yapılarak yük hücresi kalibre edilmiştir. Bu işlemler sonucunda devir - itme grafiği elde edilmiştir. Yakıt tüketim testleri için debimetre kullanılarak testler gerçekleştirilmektedir. Motorun farklı RPM seviyeleri için yakıt tüketimi bulunarak performans grafikleri çıkarılmıştır. Bu parametreler sayesinde hava aracının görev profilinde maksimum hız ve maksimum menzil mesafeleri elde edilmiştir.

### Abstract

In this study, the design, integration and testing of measurement systems required for performance tests of jet engines used in small-scale unmanned aerial vehicles are described. Performance tests are carried out as thrust and fuel consumption. For thrust tests, measurements are made using a load cell. Amplifier and filter designs have been made for the load cell to measure accurately to meet the desired sensitivity. It was calibrated by making multiple measurements at different thrust levels. As a result of these processes, the rpm - thrust graph was obtained. For fuel consumption tests, tests are carried out using a flow meter. Performance graphs were obtained by finding the fuel consumption for different RPM levels of the engine. Thanks to these parameters, maximum speed and maximum range distances were obtained in the mission profile of the aircraft.

### 1. Giriş

İHA performans ölçümleri, uçak tasarım döngüleri için çok önemlidir. Performans ölçümlerinde çoğunlukla uçağın menzil ve dayanıklılık parametreleri dikkate alınmaktadır. Bu parametrelerin elde edilebilmesi için devir karşılığı kullanılan türbin motorunun ürettiği itki ve yakıt tüketimi izlenmelidir. Bu çalışmada bu iki test yapılmaktadır.

Jet motorunun egzoz gazlarının uyguladığı yatay kuvvet doğrudan uçağın yapısına aktarılır. Bu mekanik kuvvet ölçülerek itme kuvveti belirlenebilir. İtme ölçümü için birden fazla yöntem vardır. Bu yöntemlere örnek olarak dinamometre, yay vb. Bunlar hafızasız cihazlar olduğu için itme kuvvetinin zamana bağlı ölçümünde problem vardır. Bu sistemlerle, itmenin geçici dinamiği izlenemez. Bu nedenle Şekil 1'de gösterilen Kingtech K180G4 motorunun itme testlerinin load cell ile yapılması uygun görülmüştür.



Şekil 1: Kingtech K180 G4+ jet motoru [1]

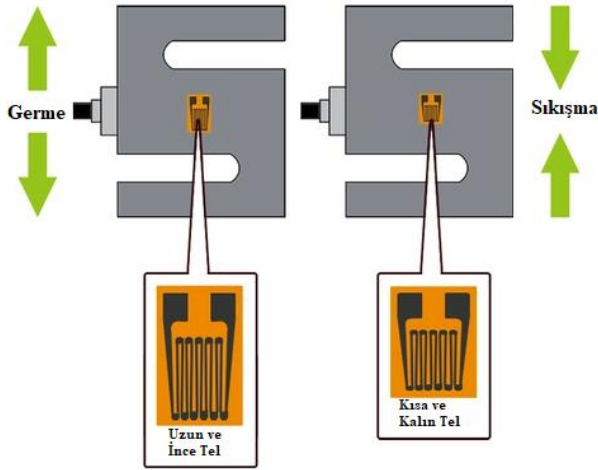
Uçağın uçuş koşulları nedeniyle, gerçek çalışma koşullarında yakıt tüketiminin izlenmesi çok önemlidir. Buna göre uçağın maksimum hızı ve havada kalma süresi belirlenmektedir.

## 2. Metot

Bu bölümde öncelikle sistemde itme testleri için kullanılan load cell ve bu ölçüm sistemi için kullanılan yükselteç ve filtreleme yöntemi anlatılmaktadır. Bir yük hücresi, enerjii bir formdan diğerine dönüştüren bir cihaz olarak kabul edilir. Spesifik olarak yük hücreleri, gerilim, sıkıştırma, basınç ve itme gibi bir kuvvetin kinetik enerjisini ölçülebilir bir elektrik sinyaline dönüştüren kuvvet transdüserleridir. Bu elektronik sinyal, kullanılan yük hücresi ve devre tipine bağlı olarak voltaj değişimi, akım değişimi veya frekans değişimi olabilir. Birçok farklı yük hücresi türü vardır. Dirençli yük hücreleri, piezo dirençli prensipte çalışır. Sensöre bir yük/kuvvet/stres uygulandığında direncini değiştirir. Dirençteki bu değişiklik, bir giriş gerilimi uygulandığında çıkış geriliminde bir değişikliğe neden olur. Kapasitif yük hücreleri, bir sisteme voltaj uygulandığında belirli bir miktarda yükü tutma yeteneği olan kapasitans değişimi prensibine göre çalışır. Ortak paralel plakalı kapasitörler için kapasitans, plaka üst üste binme miktarı ve plakalar arasındaki dielektrik ile doğru orantılıdır ve plakalar arasındaki boşlukla ters orantılıdır.

Endüstriyel uygulamalarda en sık kullanılan yük hücresi türü gerinim ölçerdir. Bir katıya uygulanan dış kuvvetleri değerlendirmenin çok ilginç bir yolu, mekanik deformasyonu ölçülerek belirlenebilen bu gerilime karşı direnci incelemektir [2]. Gerinim ölçer yük hücresi, üzerine gerinim ölçerlerin sabitlendiği katı bir metal gövdeden (veya "yay elemanından") oluşur. Gövde genellikle alüminyum, alaşımlı çelik veya paslanmaz çelikten yapılır, bu da onu çok sağlam ama aynı zamanda minimum düzeyde elastik yapar. Bir yük uygulandığında, yük hücresinin gövdesi hafifçe deforme olur, ancak aşırı yüklenmediği sürece her zaman orijinal şekline döner. Gerinim ölçerler ayrıca vücut şekli değişikliklerine yanıt olarak şekil değiştirir.

Bu, gerinim ölçerin elektrik direncinde bir değişikliğe neden olur ve bu daha sonra bir voltaj değişikliği olarak ölçülebilir. Çıkıştaki bu değişiklik uygulanan ağırlık miktarı ile orantılı olduğundan, cismin ağırlığı gerilimdeki değişiklikten belirlenebilir. Yük hücresinin çalışma prensibi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Yük hücresi çalışma prensibi

İletken veya yarı iletken bir kabloya bir kuvvet uygulandığında, kablo gerildiğinde artan ve kablo

sıkıştırıldığında azalan elektrik direncinde bir değişiklik takdir edilebilir [4]. İletken tel sıkıştırıldığında, kesit alanı artar, bu da elektronların içinden geçmesi için daha yüksek bir kapasiteye neden olarak telin direncini azaltır. Bununla birlikte, malzemenin gerilmesi nedeniyle kesit alanı küçüldükçe genel direnç artar. Yük hücrelerinde ölçüm yapılacak sistemin özelliklerine göre seçim kriterleri belirlenir. Elektrik dirençli gerinim ölçerlerde iki ana karakteristik parametre vardır. Bunlar; direnç ve gösterge faktörü. Gerinim ölçerlerin direnç değerleri 30 ile 3000 Ohm arasında değişmekte olup, stres analizinde kullanılan en yaygın değerler 120 Ohm ve 350 Ohm'dur [5]. Gerinim ölçer faktörü (G), göstergenin gerinim ile direncindeki değişiklik ile ilgilidir.

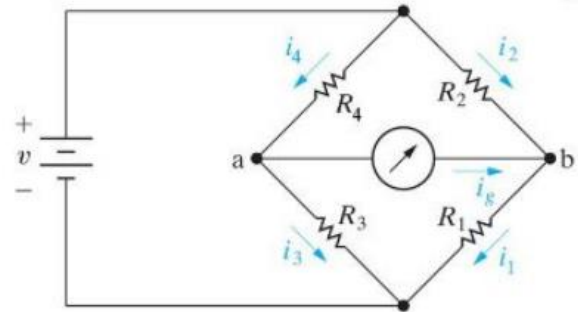
$$G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (1)$$

Denklem 1'de görülebileceği gibi, k değeri ne kadar düşükse gerinim ölçer o kadar az hassastır. Bu eşitliğin geçerli olabilmesi için ölçülecek yapının elastik çalışması gerekir. Elastik olma özelliğini yitirmiş bir sistemden verimli ve gerinim-gerim gerilim korelasyonu sağlamak mümkün görünmemektedir. Elastik olma durumu ürünün seçilebilmesi için bir kriterdir. Bu nedenle, uygulanan maksimum kuvvet ve gerinim faktörü dikkate alınmalıdır. Birden fazla faktör göz önünde bulundurularak, itme ölçümü için en uygun yük hücresi olarak ESIT BB tipi seçilmiştir. Şekil 3'te gösterilen BB yük hücreleri, kuvvet ölçüm uygulamalarında ve endüstriyel ortamlarda kullanılmak üzere eğilme kuvveti prensibine ve çalışan elektronik ağırlığa uygun olarak geliştirilmiştir [6].



Şekil 2: ESIT BB yük hücresi

Wheatstone köprüsü, yük hücrelerinin elektronik çalışmasının temelidir. Şekil 4'te gösterilen, dört dirençten oluşan bir devredir. Voltaj ölçümü, bir veya daha fazla dirençteki değişikliklerle yapılır. Çıkış ve giriş gerilimleri arasındaki matematiksel ilişki Denklem 2'de gösterilmiştir.



Şekil 3: Wheatstone köprüsü devresi [7]

$$V_{out} = V_{in} \left[ \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right] \quad (2)$$

Tam köprü konfigürasyonunda dört farklı dirençteki değişim gözlenebilecek şekilde tasarlanmıştır. Köprü direnç değişimi Denklem 3'teki gibi ise dengelenir ve çıkış gerilimi gözlenmemektedir.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \rightarrow V_{out} = 0 \quad (3)$$

Burada herhangi bir direnç arttığında veya azaldığında köprü kararsız hale gelir. Daha sonra ampermetreden akım geçer ve bir potansiyel farkı gözlenir. Burada köprü voltaj bölücü olarak çalışır. Tam köprü konfigürasyonunda, ölçümlerde daha fazla hassasiyet elde edilebilir. Burada köprü, voltajsız durumda dengelenmesi gerektiği için aynı nominal dirençlere sahiptir. Ardından, çıkış gerilimindeki değişim için Denklem 4'teki denklem kullanılır.

$$V_{out} = V_{in} \left[ \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right] \quad (4)$$

Gerinim ölçümleri için eşdeğer dirençler ( $R_1 R_2$  ile  $R_3 R_4$ ) birbirine eşit olmalıdır. Denklem 5, birkaç varsayım ve basitleştirme ile elde edilmiştir.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{4} \left[ \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \quad (5)$$

Gerinim ölçer faktörü ile gerinimin ürünü, dirençteki değişime eşittir.

$$\frac{\Delta R}{R} = G * \varepsilon \quad (6)$$

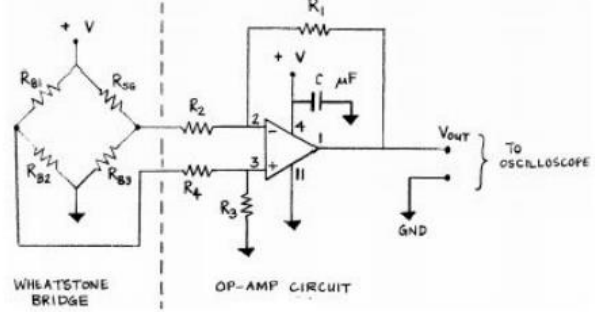
Gerilime göre çıkış giriş gerilimi oranı, Denklem 7'deki matematiksel denklemle ifade edilir.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{G}{4} [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4] \quad (7)$$

Denklemler, köprüdeki tüm dirençlerin değiştiğini varsayar. Örneğin, benzer işlevleri yerine getiren yük hücrelerinde veya test nesnelerinde bu durum oluşur. Deneysel testlerde, bu neredeyse hiçbir zaman böyle değildir ve genellikle köprü kollarının yalnızca bir kısmı aktif gerinim ölçer içerir, geri kalanı köprü tamamlama dirençlerinden oluşur. Basınç veya çekme gerilimi ve eğilme, kesme veya burulma kuvvetleri gibi farklı gerilim durumları bu yöntemle açıkça ayırt edilebilir. İtme test cihazında önemli çekme gerilimi ölçülür. Ölçümün doğru çalışması için gerinim ölçerin doğru seçilmesi kadar ölçümün anlamlandırılması da önemlidir. Ölçümü anlamlandırmak Wheatson köprüsü, çıkış voltajının okunabilir olması için amplifikatör tasarımından ve sinyale özgü gürültüyü filtrelemek için filtre tasarımından oluşur.

## 2.1. Amplifikatör (Yükselteç) İşlemi

Gerinim ölçerin direnç değişiklikleri çok düşüktür, bu nedenle Wheatson köprüsü çıkış voltajı milivolt cinsinden değişir. Bu değişikliği uçak sistemlerinde kullanılan 1-10 V seviyelerine getirmek için bir amplifikatör tasarımına ihtiyaç vardır. Wheatstone köprüsü ile amplifikatör devresinin kullanımı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4: Wheatstone köprüsü ve yükselteç devresi [8]

Amplifikatörler, büyük ortak mod voltaj sinyallerinin varlığında yük hücresinin küçük çıkış sinyalini (mV cinsinden) yükseltmek için tasarlanmış bileşenlerden yapılmış elektronik cihazlardır. Bu amaçla kullanılacak temel olarak iki farklı yükselteç türü vardır; işlemsel yükselteçler ve enstrümantasyon yükselteçleri. Op-amp olarak da adlandırılan bir işlemsel amplifikatör, herhangi bir analog elektronik devrenin en önemli bileşenlerinden biridir. Sinyal koşullandırma sistemlerinde amplifikasyon, filtreleme ve ayrıca bazı matematiksel işlemleri gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılırlar. Bu enstrümantasyon amplifikatörü, devresindeki çoklu direnç değerlerini değiştirmeden kapalı döngü kazanç ayarına izin verir. Kazanç, aşağıda gösterildiği gibi matematiksel olarak ifade edilir:

$$\left( 1 + \frac{2R_1}{R_{gain}} \right) * \frac{R_3}{R_2} \quad (8)$$

Bu çalışmada kullanılan yük hücresi koşullandırma cihazında, yükselteç de kazanç değerinin bir bilgisayar programı ile ayarlanabilmesini sağlayan programlanabilir özellikte kurulmuştur. Testler, kalibre etmek için koşullandırma kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## 2.2. Filtreleme İşlemi

Filtreleme, yük hücresi çıkış sinyaline müdahale edebilecek istenmeyen elektriksel gürültüyü ortadan kaldıran işlemdir. Bu elektriksel gürültü, özellikle yük hücresi çıkış sinyali bir baskılı devre kartından yönlendirildiğinde, komşu ekipmandan veya diğer bileşen parçalarından kaynaklanan elektromanyetik parazit olabilir. Bu gürültüler, istenmeyen frekanslarda istenmeyen sinyaller olarak ortaya çıkar ve dolayısıyla AC sinyalleri gibi davranırlar. Bir yük hücresi devresinin tasarımında kullanılan filtre tipi alçak geçiren bir filtredir. Alçak geçiren bir filtre, yük hücresinde gelen düşük frekanslı sinyalin geçmesine izin verirken yüksek frekanslı gürültüyü reddetmek için tasarlanmıştır. Pietrzak tarafından 2014 yılında önerilen zamanla değişen IIR alçak geçiren filtre, sabit bir kesme frekansı olmadan ve yüksek frekanstan düşük

frekansa değişen filtre katsayılarının değiştirilmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu filtre, özellikle itme ölçümleri gibi mobil sistemlerde gürültü gidermede çok başarılı bir yaklaşımdır [9].

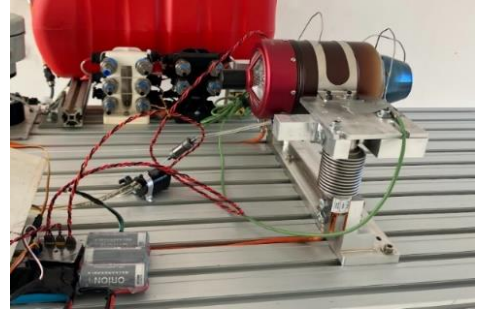
Sadece tek bir direnç ve kondansatör ile basit bir alçak geçiren filtre oluşturulabilir. Daha gelişmiş filtreler, aktif filtreleme sağlamak için bir indüktör veya hatta op-amp'ler içerebilir. Yukarıdaki RC filtresi, öncelikle bir kapasitörün davranışından dolayı bir düşük geçiş filtresi görevi görür. Bir kapasitörün empedansı, frekans arttıkça azalır. Bu nedenle, yüksek frekanslı bir sinyaldeki bir kondansatör toprağa kısa devre yapmış gibi görünebilir. Bu nedenle, tüm yüksek frekanslar çıkış yerine toprağa iletilir. Düşük frekanslarda, kapasitör yüksek empedans veya açık devre olarak görünür, bu nedenle çıkışa düşük frekanslar iletilir.

Sonuç olarak, sinyal koşullandırmanın sensör çıkış sinyallerinin kalitesini iyileştirmek için kullanılan teknikleri içerdęi söylenebilir. Aşağıdaki işlevlere sahiptir:

- Çıkış akımı/gerilim sinyallerini kontrol ederek genel sistemin diğer bileşenlerini korur.
- Yük hücresi çıkış sinyalini, sistemin diğer dijital bileşenleri tarafından işlenebilecek bir voltaj/akım seviyesine dönüştürür.
- Ayrıca komşu ekipmanlardan gelen zemin gürültülerini veya diğer elektriksel gürültüleri azaltmaya/filtrelemeye yardımcı olur.

### 3. Test ve Bulgular

Bu çalışmada, türbin jet motorunun modellenmesi için deneysel ölçümler yapılmıştır. Turbojet motorunun modellenmesinde motor bileşenlerinin kararlı durumda çalışması dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, her bir bileşenin matematiksel ilişkisi yerine verilen gaz kelebeği girişi karşılığında motorun itme çıkışı alınacak şekilde modelleme yöntemi kullanılmıştır. İtme testlerinde yük hücresindeki direnç değişimlerinden kaynaklanan voltaj farkını ortaya çıkarır. Daha sonra bu gerilim farkını anlamlandırmak ve ilgili kuvvete çevirmek için farklı testlerle kalibrasyon yapılmıştır. Deneysel verilere dayalı bu modelleme yöntemini gerçekleştirmek için RPM aralıkları belirlenir ve bu aralıklar için ortaya çıkan itki için ölçümler yapılır. Testlerde kullanılan Kingtech K180 G4 türbin jet motorunun test platformu tasarımı Şekil 5'te gösterilmektedir.



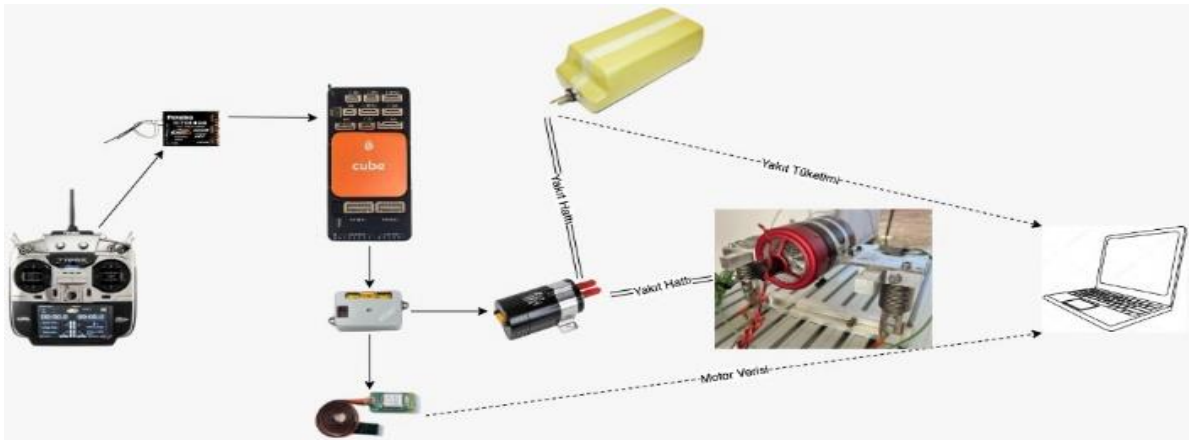
Şekil 5: İtme ve yakıt tüketimi test platformu

Yük hücresi ölçümleri için kuruluma önemli optimizasyonlar yapılmıştır. Yük hücresinin kuvvetin farklı bileşenleri olmayacak şekilde konumlandırılması, titreşim, kauçuk, elektrik gürültüsünü önlemek için güç kaynağından izole edilmesi, yoğun sinyallerin geçtiği lokasyonda bulunmaması gibi önlemler alınmıştır. Titreşim, yüksek hızlı motorlarda itme ölçümlerinde çok önemlidir. Titreşimi en aza indirmek için sistemdeki bağlantılardaki boşluklar dikkate alınarak yutmayı sağlayacak malzemeler kullanılmıştır.

Deneysel platformu aracılığıyla veri toplamak ve doğru veriler üretmek çok önemlidir. Burada, ölçüm cihazlarının kalibrasyonu ve hassasiyeti belirlenmiş test prosedürlerine göre gerçekleştirilmiştir. Ölçüm hatalarını en aza indirmek için yük hücresi kalibrasyonu ve gürültü giderme gibi bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda Throttle-Rpm ve Rpm-Thrust ilişkisini kurmak için motor loadcell'li bir platform üzerine sabitlenmiştir. Loadcell kalibrasyonu için aşağıdaki testler 5 tekrarlı gerçekleştirilmiştir:

- Motor Rölanti (40 krpm) konumunda çalıştırılarak itme değerleri ölçülmüştür. Beş testin sonuçlarının standart sapması hesaplandı.
- Motor %50 gaz kelebeği ile çalıştırılarak itme değerleri ölçülmüştür.
- İtme değerleri, motor %100 gaz kelebeği (130krpm) ile çalıştırılarak ölçülmüştür. Beş testin sonuçlarının standart sapması hesaplandı.

Loadcell katsayısı, yukarıda bahsedilen testler sonucunda elde edilen standart sapma değerlerinin minimize edilmesiyle belirlenmiştir. Deneysel platform üzerinden veri toplamak için oluşturulan mimari Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6: Deneysel platform mimarisi



İtme seviyelerinin doğru ölçümü için sabit ağırlıklarla farklı testler yapılarak kalibrasyonları sağlanmıştır. Daha sonra herhangi bir devir sayısında 5 farklı numune alınarak standart sapmaları incelenmiştir. Örneğin; Rölantide (40000rpm) farklı testlerde ölçülen itme kuvveti aşağıdaki tabloda gösterilmektedir. Buradaki değerler alınarak genel ölçü elde edilmiştir. Burada ölçüm yapılırken devir sayısının artma/azalma yönü dikkate alınır.

Tablo 1: 40000 rpm farklı itki testleri

Devir	İtme Ölçümü (kg)
40000 rpm test 1	0,8265
40000 rpm test 2	0,8431
40000 rpm test 3	0,8349
40000 rpm test 4	0,8305
40000 rpm test 5	0,8318

Bu test düzeneğinde, RC vericisinden gönderilen gaz keleşi komutu alıcı tarafından alınır ve işlenmek üzere uçuş kontrol kartına yönlendirilir. Daha sonra uçuş kontrol kartından önceden programlanmış motor kontrol ünitesine gönderilmek üzere üretilmiş bir sinyaldir. Akabinde motor kontrol ünitesi, motorun istenilen seviyede çalışmasını sağlamak için yakıt pompasının ve motorun çalışmasını düzenler. Test sırasında motor performans verileri telemetri sistemi aracılığıyla ECU'dan bilgisayara aktarılır. Ham sinyal daha sonra sanal motor performans bileşenlerinin Şekil 8'de gösterilen ekranında gerçek zamanlı olarak izlenirken, veriler deney boyunca bir MS Excel elektronik tablosu ile okunabilecek bir formatta kaydedilir. Aynı zamanda itme test cihazındaki yük hücreleri de itme verilerini bu bilgisayara aktarır. Ayrıca farklı zaman aralıklarında RPM değerindeki yakıt tüketimi ölçülmüştür. İtme testleri için 2 farklı senaryoda testler gerçekleştirilmiştir. Test senaryosu 1 için kullanılan gaz pedalı değerleri, aşağıdaki senaryoya göre Pixhawk'a iletildi:

- %0-100 gaz keleşi aralığında 12 s aralıklarla %5 artırılır.

İtme ölçümlerinde kullanılan test matrisi ve ölçüm sonuçları Tablo 2 ve 3'te gösterilmiştir.

Tablo 2: Yükselen gaz kolu itki sonuçları

Gaz Kolu (%)	İtme Ölçümü (kg)
16,86	0,8333
20,78	1,8775
25,1	2,7183
29,02	3,4048
33,33	4,1745
37,65	4,9442
41,57	5,6307
45,88	6,2635
50,2	7,0818
54,12	7,8064
58,43	8,7148
62,75	9,1170
66,67	10,1104
70,98	11,3429
75,29	12,1612
79,22	12,9500
83,53	13,6278
87,84	14,3975
91,76	14,9852
96,08	15,9457
100	17,2979

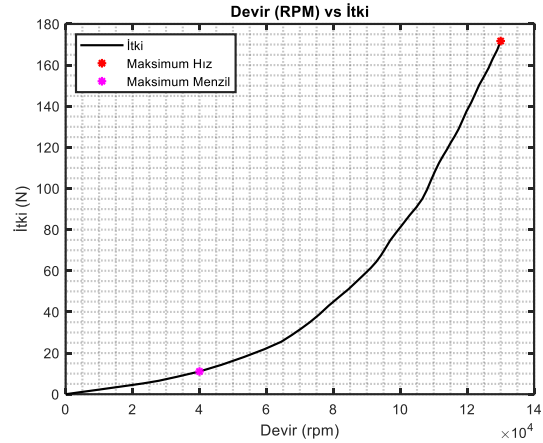
Test senaryosu 2 için kullanılan gaz pedalı değerleri, aşağıdaki senaryoya göre Pixhawk'a iletildi:

- %100-0 kısma aralığında 12 s aralıklarla %5 arttırılır.

Tablo 3: Azalan gaz kolu itki sonuçları

Gaz Kolu (%)	İtme Ölçümü (kg)
100	17,3491
96,08	15,9755
91,76	15,0357
87,84	14,4643
83,53	13,9142
79,22	12,5829
75,29	11,9058
70,98	11,0647
66,67	9,8745
62,75	9,1427
58,43	8,6366
54,12	7,9578
50,2	7,0144
45,88	6,2932
41,57	5,4839
37,65	5,0236
33,33	4,1173
29,02	3,4208
25,1	2,7525
20,78	1,9520
16,86	0,8109

Ölçüm sonuçlarına göre motorun performansı ile ilgili bazı grafikler elde edilmiştir. Deneysel verilerle elde edilen RPM/İtme Kuvveti grafiği Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekle göre hız arttıkça türbinin ürettiği itme kuvveti de artmaktadır. Grafiğin eğim çizgisi 2. dereceden bir polinomdur.

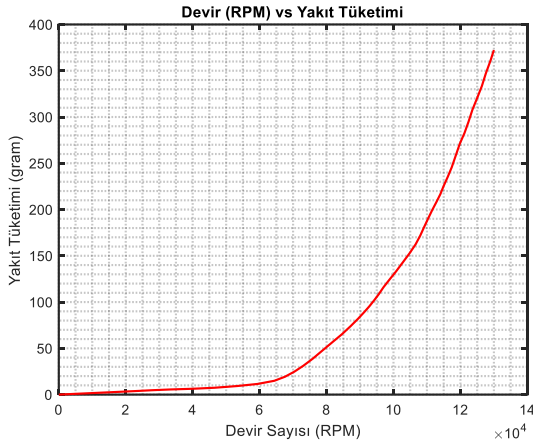


Şekil 7: Devir (rpm) – İtme Grafiği

Deniz seviyesinden 910m yükseklikte yapılan testlerde Kingtech K180G4 jet türbin motorunun rölantide devri 40.000 RPM ve rölantide itme gücü 11.065 Newton'dur. Motor tarafından üretilen maksimum devir sayısı 130000 RPM ve maksimum itme gücü 171.704 Newton idi.

Deneysel verilerle elde edilen RPM/Yakıt tüketimi grafiği Şekil 9'da gösterilmektedir. Şekle göre hız arttıkça türbinin ürettiği yakıt tüketimi de artmaktadır. Grafiğin eğim çizgisi 2. dereceden bir polinomdur. Bu grafiğe göre yüksek devirlerde

yakıt tüketiminde ciddi bir artış gözleniyor. Uçuş süresi için kritik bir aralıktır.



Şekil 8: Devir (rpm) – Yakıt Tüketimi Grafiği

Motorun ürettiği maksimum devir sayısı 130000 RPM ve maksimum yakıt tüketimi 372,38 gramdır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, küçük ölçekli insansız hava araçlarında kullanılan jet motorlarının performans testleri yapılmıştır. Performans testlerinde itme gücü ve yakıt tüketimi ölçüldü.

İtme testleri için bir yük hücresi kullanıldı. Yük hücrelerinin kullanımı ile gerçek zamanlı, hafızalı, kaydedilebilir, hassas ve doğru itme kuvveti ölçülür. Yük hücresinin istenilen hassasiyette doğru ölçüm yapabilmesi için yükselteç ve filtre tasarımları yapılmıştır. Daha sonra kalibre edildi. İtme ve yakıt tüketim testlerinde doğru sonuç alabilmek için testler yapılarak iteratif kalibrasyon sağlanmalı ve sonuca bu şekilde ulaşılmalıdır.

Bu çalışma sayesinde farklı devirlerde itki ve yakıt tüketimi ölçülmüş ve uçağın performans kriterleri hakkında önemli veriler elde edilmiştir. Motorun maksimum itme gücü ürettiği nokta bulundu ve bu noktada uçağın maksimum hızının 90m/s'ye ulaştığı elde edildi. Motorun rölanti itki ürettiği nokta bulundu ve bu noktada uçağın seyir hızı bulundu. Uçağın motor devrinde 40 m/s seyir hızında yakıt tüketim değerleri hesaplanarak uçağın maksimum menzil değeri 43,2 km'dir.

#### Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan itki sistemleri ve test ortamı Türk Havacılık ve Uzay Sanayii tarafından sağlanmıştır. Çalışma süresince desteklerini esirgemeyen ilgili ekiplere ve modelleme simülasyon ekibindeki arkadaşlarımıza teşekkür ederiz.

#### Kaynakça

- [1] <https://kingtechturbine.lu/navi.php?a=7092&lang=en>.
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Load\\_cell#/media/File:Strain\\_gauge\\_deformation.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Load_cell#/media/File:Strain_gauge_deformation.jpg)
- [3] Maritnez, A., (2018). "Design and manufacturing of thrust measurement system for a micro jet engine", Linköpings Universitet. Budapest University of Technology and Economics.
- [4] M.A.Botto,J.Costa,"Robust Pole Placement Controller Design for Flexible Transmission System", 2004.
- [5] N. E. A. Mazlan, S.S.Shamsudin, M.F. Pairan, M.F. Yaakub, M.F. Ramli "The Design of an Automatic Flight Control System and Dynamic Simulation for Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle (UAV) using X-Plane and Labview, 2021.
- [6] A. Pawłowski, F. Rodríguez, J. Sánchez-Hermosilla and S. Dormido, "Adaptive Weighing System With Fast Nonstationary Filtering and Centrifugal Force Compensation," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 12, pp.3210-3217,Dec.2017.
- [7] [https://www.esit.com.tr/tr/yuk\\_hucreleri\\_load\\_cells/bb\\_yuk\\_hucreleri/urun/1](https://www.esit.com.tr/tr/yuk_hucreleri_load_cells/bb_yuk_hucreleri/urun/1)
- [8] <https://www.hbm.com/en/7163/wheatstone-bridge-circuit/>
- [9] P. Pietrzak, "Dynamic mass measurement using a discrete time-variant filter," 2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, 2010, pp. 000151-000155.