

MİNİ İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN ELEKTRİK MOTORU, PERVANE VE BATARYA SEÇİMİ

Serdar Avşar¹
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara

ÖZET

Bu çalışma kapsamında pal elemanı yöntemiyle (blade element method) elektrik motoru, pervane ve batarya seçimi için kullanılan bir araç anlatılmaktadır. Elektrik motoru, pervane ve batarya kombinasyonunun değişik irtifalarda ve ileri hava hızlarında ürettiği itki, tork, çekilen akım, elektriksel güç, pervane dönme hızı, pervane uç Mach sayısı ve verimlilik terimleri hesaplanabilmektedir. Bu şekilde hava aracının bütün uçuş koşulları için bir model oluşturulabilmekte ve motor, pervane ve batarya seçimleri daha sağlıklı yapılabilmektedir. Bu çalışmada bu aracın çalışma yöntemleri anlatılmaktadır ve bir örnek kombinasyon için sonuçlar verilmiştir.

GİRİŞ

Taktik, MALE ve HALE sınıfındaki hava araçları için kullanılan motorların ve pervanelerin bütün uçuş koşullarındaki performans değerleri, motorları ve pervaneleri üreten şirketler tarafından sağlanmaktadır. Buna karşın, mini sınıftaki insansız hava araçları için kullanılan elektrik motorları ve pervaneler için bu şekilde bir veri sağlanamamaktadır. Çoğu zaman motorların belli pervanelerle deniz seviyesinde yapılan statik itki testleri haricinde bir veri bulunmamaktadır. Özellikle, sabit kanatlı mini İHA sistemlerinin tasarlanmasında ve modellenmesinde bu veriler yeterli olmamaktadır. Bu çalışma kapsamında motorun modellenmesi, pervanenin pal elemanları yöntemiyle modellenmesi ve bu ikisinin eşzamanlı olarak çalıştırılması anlatılmaktadır.

MOTOR MODELLENMESİ

Motor modeli Matlab'da bir fonksiyon şeklinde oluşturulmuştur. Fonksiyonun girdileri voltaj ve motorun rpm cinsinden açısal hızıdır. Fonksiyonun çıktıları ise akım, tork ve elektriksel güçtür. Motor modelinde kullanılan katsayılar ise motorun iç direnci, tork katsayısı ve zit emk katsayısıdır. Fonksiyonun girdileri, çıktıları ve katsayıları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 Motor modelinin girdileri, çıktıları ve katsayıları

Girdi simgesi	Girdi açıklaması	Katsayı simgesi	Katsayı açıklaması	Çıktı simgesi	Çıktı açıklaması
V	Motor girdi voltajı	R	Motor iç direnci (Ω)	T	Motor torku (N^*m)
$\dot{\theta}$	Motor açısal hızı (rpm)	K_b	Zit emk katsayısı ($V/(rad/s)$)	P	Motor elektriksel gücü (W)
		K_t	Tork katsayısı (N^*m/A)	I	Elektrik akımı (A)

Motorun açısal hızı ilk olarak rad/s birimine çevrilmektedir. Daha sonrasında zit emk voltajı hesaplanmaktadır (Eşitlik 1). Girdi voltajından zit emk voltajı çıkarılarak motor direncinin voltajı hesaplanır (Eşitlik 2). Motor direncinin voltajı motor direncine bölünerek akım hesaplanmaktadır (Eşitlik 3).

$$V_b = K_b \cdot \dot{\theta} \quad (1)$$

$$V_r = V - V_b \quad (2)$$

¹ Lider Tasarım Mühendisi, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., E-posta: serdar.avsar@tai.com.tr

$$I = V_r/R \quad (3)$$

Motorun tork katsayısı ile zıt emk katsayısı Tablo 1’de belirtilen birimler kullanıldığı takdirde eşittir (Eşitlik 4). Tork katsayısı ile akım çarpılarak motor torku bulunur (Eşitlik 5). Voltaj ile akım çarpılarak harcanan elektriksel güç bulunur (Eşitlik 6). Tork ile açısal hız çarpılarak da mekanik güç bulunabilir (Eşitlik 7). Mekanik güç elektriksel güce bölünerek motorun verimliliği bulunabilir (Eşitlik 8).

$$K_t = K_b \quad (4)$$

$$T = K_t \cdot I \quad (5)$$

$$P = V \cdot I \quad (6)$$

$$P_{mek} = T \cdot \dot{\theta} \quad (7)$$

$$\eta = P_{mek}/P \quad (8)$$

Motor katsayılarının bulunması

Motorun değişik pervanelerle ve değişik voltajlarda statik test sonuçları varsa bunlar kullanılarak motorun iç direnç ve tork katsayıları bulunabilir. Tmotor U3 KV700 motoru [Tmotor, 2023] için örnek bir test sonucu Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2 Elektrik motoru statik testleri

Voltaj (V)	Açısal hız (rpm)	Güç (W)
11.1	6600	123.21
11.1	6400	139.86
11.1	5800	192.03
14.8	8700	192.40
14.8	8300	248.64
14.8	7850	287.12

Voltaj ve açısal hız girdileri verilerek benzer güç değerleri bulunana kadar katsayılar değiştirilerek bir optimizasyon yapılır. Burada aradaki farkların rms değerleri minimize edilecek şekilde bir optimizasyon yapılabilir.

PERVANE MODELLENMESİ

Pervane modeli de yine bir Matlab fonksiyonu şeklinde oluşturulmuştur. Fonksiyonun girdileri açısal hız, hava hızı, hava yoğunluğu ve ses hızıdır. Fonksiyonun çıktıları ise pervane torku, pervane mekanik gücü, itki ve pervane uç Mach sayısıdır. Fonksiyonda değiştirilmesi gereken katsayılar ise pervane çapı, pervane adım değeri, pal sayısı, pervane veter uzunluğu ve kayıp katsayısıdır. Çap ve adım değerleri zaten belli değerlerdir. Veter uzunluğu ise ölçülerek ortalama bir değer girilebilir. Kayıp katsayısı ise pervanenin uç kayıplarını ve pervanenin akışını etkileyen kanat, gövde gibi elemanlardan kaynaklı kayıplardır. Kayıp katsayısının yaklaşık olarak ne olması gerektiği Tablo 3’te verilmiştir. Burada pervane alanıyla pervanenin önünde veya arkasında bulunan gövdenin kesit alanı arasındaki ilişki önemlidir. Tablo 3’teki bu katsayılar çeşitli statik testler sonucunda bulunmuştur.

Tablo 3 Kayıp katsayısı değerleri

Test veya uçuş konfigürasyonu	Katsayı değeri
Statik test (akışı bozan bir gövde yok)	0.9
Akışı bozan küçük çapta bir gövde var (Pervane alanının yüzde 15'inden büyük)	0.85
Akışı bozan orta boyutta bir gövde var (Pervane alanının yüzde 30'undan büyük)	0.8
Akışı bozan büyük bir gövde var (Pervane alanının yarısından büyük)	0.75

Pervane alanını bulmak için kullanılan formül Eşitlik 9'da verilmiştir. Burada $r_{dış}$ pervane yarıçapı, $r_{iç}$ ise pervanenin pal olmayan iç kısmının yarıçapıdır. $r_{iç}$ değeri genel olarak $r_{dış}$ değerinin yüzde 20'si alınabilir. Pal elemanlarının lokal hatve açısını hesaplamak için ise Eşitlik 10 kullanılabilir. Burada da r_{ele} pal elemanının bulunduğu yarıçaptır, p ise adım değeridir.

$$A = \Pi(r_{dış}^2 - r_{iç}^2) \quad (9)$$

$$\theta_{ele} = \tan^{-1}(p/r_{ele}) \quad (10)$$

Pervanelerin çeşitli farklı profilleri olabilir. Bunu ölçmek çoğu zaman mümkün değildir. Bu çalışmadaki analizlerden genel bir sonuç almak için ise bir profil varsayılarak ona göre hesaplamalar yapılmalıdır. Bu çalışmada profil olarak NACA 4412 varsayılmıştır.

Pal elemanları yönteminde sürekli bir durum için çözüm yapılması için tekrarlı bir yöntem kullanılmalıdır. İtke değeri indüklenmiş hıza bağlı bir fonksiyondur. İndüklenmiş hız da yine itki değerine bağlı bir fonksiyondur. Öncelikle indüklenmiş hız 0 varsayılarak tekrarlı hesaplamaya başlanır. Pervane düzlemine dik hız, uçağın ileri hızı ile indüklenmiş hızın toplamıdır (Eşitlik 11). Burada $V_{\infty perv}$ pervanenin gördüğü dikey hız, V_{∞} uçağın ileri hava hızı ve V_i indüklenmiş hava hızıdır.

$$V_{\infty perv} = V_{\infty} + V_i \quad (11)$$

İlk olarak pal elemanının gördüğü hücum açısı hesaplanır (Eşitlik 12). Bu eşitlikte α_{ele} pal elemanının gördüğü hücum açısı, $V_{p_{ele}}$ ise pal elemanının pervane düzlemindeki hızıdır (Eşitlik 13).

$$\alpha_{ele} = \theta_{ele} - \tan^{-1}(V_{p_{ele}}/V_{\infty perv}) \quad (12)$$

$$V_{p_{ele}} = \omega \cdot r_{ele} \quad (13)$$

Pervane düzlemindeki hız ile düzleme dik hızın kareleri toplanıp karekökü alınarak pal elemanının gördüğü toplam hızın büyüklüğü bulunur (Eşitlik 14).

$$V_{toplam_{ele}} = \sqrt{V_{p_{ele}}^2 + V_{\infty perv}^2} \quad (14)$$

Pal elemanının hücum açısı kullanılarak lokal taşıma ve sürükleme katsayıları bulunur. Pal elemanının hücum açısı, lokal taşıma katsayısı ve lokal sürükleme katsayısı kullanılarak lokal itki katsayısı ve tork katsayısı bulunur (Eşitlik 15 ve 16).

$$c_{itki_{ele}} = c_{l_{ele}} \cdot \cos(\alpha_{ele}) - c_{d_{ele}} \cdot \sin(\alpha_{ele}) \quad (15)$$

$$c_{tork_{ele}} = c_{l_{ele}} \cdot \sin(\alpha_{ele}) + c_{d_{ele}} \cdot \cos(\alpha_{ele}) \quad (16)$$

Pal elemanının lokal itkisi ve torku bulunur (Eşitlik 17 ve 18).

$$T_{ele} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{toplam_{ele}}^2 \cdot \Delta r_{ele} \cdot c_{ele} \cdot c_{itki_{ele}} \quad (17)$$

$$T_{ele} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{toplam_{ele}}^2 \cdot \Delta r_{ele} \cdot c_{ele} \cdot c_{tork_{ele}} \cdot r_{ele} \quad (18)$$

Toplam itki ve tork değerleri lokal elemanların değerleri toplanarak ve pal sayısı ile çarpılarak bulunur (Eşitlik 19 ve 20).

$$T = \sum T_{ele} \cdot n_{pal} \cdot \eta_{kayıp} \quad (19)$$

$$T = \sum T_{ele} \cdot n_{pal} \quad (20)$$

İtkinin pozitif olduğu durum için indüklenmiş hız hesabı Eşitlik 21 ve 22'de verilmiştir [Leishman, 2006]. Öncelikle statik durum için indüklenmiş hız bulunur. Daha sonrasında bu değer kullanılarak hava hızı olan durum için indüklenmiş hız hesaplanır.

$$V_h = \sqrt{\frac{T}{2 \cdot \rho \cdot A}} \quad (21)$$

$$V_i = V_h \cdot \left(-\frac{V_{\infty perv}}{2 \cdot V_h} + \sqrt{\left(\frac{V_{\infty perv}}{2 \cdot V_h}\right)^2 + 1} \right) \quad (22)$$

İtkinin negatif olduğu durum için ise hesap Eşitlik 23 ve 24'te verilmiştir.

$$V_h = -\sqrt{\frac{-T}{2 \cdot \rho \cdot A}} \quad (23)$$

$$V_i = -V_h \cdot \left(-\frac{V_{\infty perv}}{2 \cdot V_h} - \sqrt{\left(\frac{V_{\infty perv}}{2 \cdot V_h}\right)^2 + 1} \right) \quad (24)$$

Tekrarlı yöntemde V_i değeri için hafifletme katsayısı (relaxation factor) uygulanırsa tekrarlı çözüm daha kararlı hale getirilebilir. Tekrarlı çözüm sonrasında mekanik güç Eşitlik 7 ile hesaplanır, uça Mach sayısı ise Eşitlik 25 ile hesaplanır. Eşitlik 25'teki a değeri ses hızını göstermektedir.

$$M_{uç} = V_{toplam_{uç}} / a \quad (25)$$

İTKİ SİSTEMİ MODELLENMESİ

İtki sistemi bir fonksiyon olarak modellenmiştir. Bu fonksiyon motor ve pervane fonksiyonlarını kullanır ve tekrarlı bir çözüm yaparak sürekli durum için itki, akım, güç, rpm ve uç Mach sayısı değerlerini bulur. Fonksiyonun girdileri ise voltaj, hava hızı, hava yoğunluğu ve ses hızıdır. Ayrıca rpm değeri için de bir ilk tahmin değerini girdi olarak alır.

Tekrarlı çözümde ilk olarak voltaj ve ilk rpm tahmini kullanılarak motorun uyguladığı tork bulunur. Daha sonrasında yine bu rpm tahmini, hava hızı, yoğunluk ve ses hızı değerleri kullanılarak pervaneye gereken tork bulunur. Uygulanan torkla gerekli tork arasındaki fark belli bir katsayıyla çarpılarak rpm değerine eklenir ve bu şekilde rpm değeri güncellenir. Bu tekrarlı çözüm torkların arasındaki fark kabul edilen seviyeye düşene kadar devam eder.

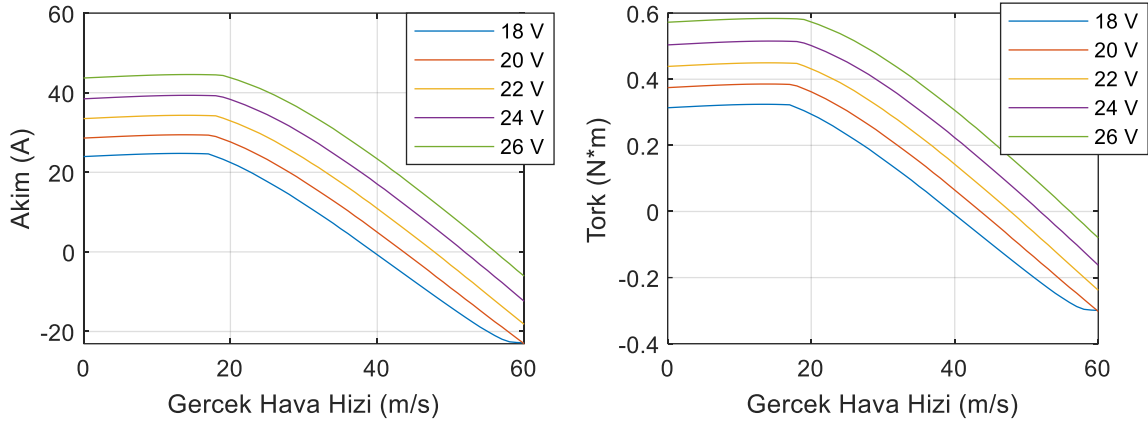
ÖRNEK UYGULAMA

Örnek uygulama olarak yine Tmotor U3 KV700 motoru ve pervane olarak 2 palli Tmotor 13x4.4 pervanesi kullanılmıştır. Motorun katsayıları Tablo 2'deki test sonuçlarından hareketle Tablo 4'teki değerler olarak bulunmuştur.

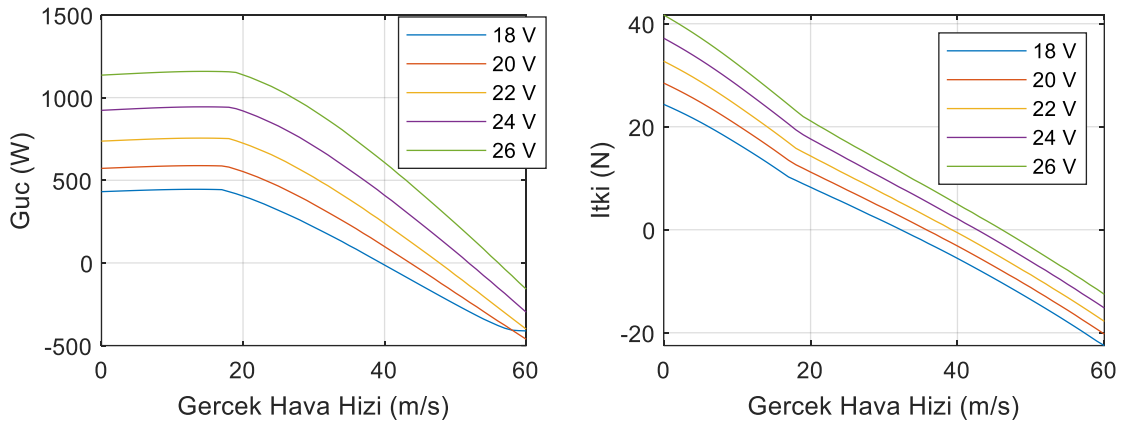
Tablo 4 Motorun bulunan katsayı değerleri

R (Ω)	0.1980
K_b (V/(rad/s))	0.01310

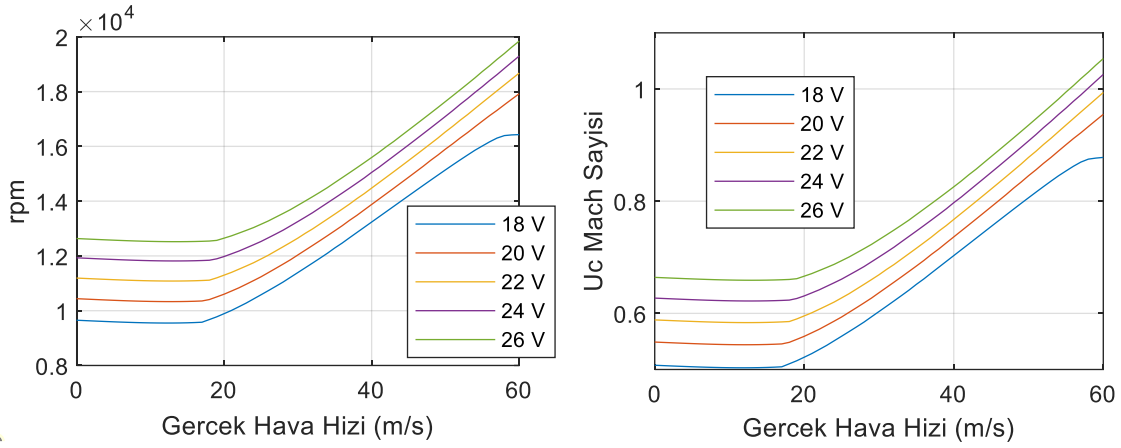
Pervanenin çap ve adım değerleri de girilerek gerekli grafikler hesaplanmıştır.



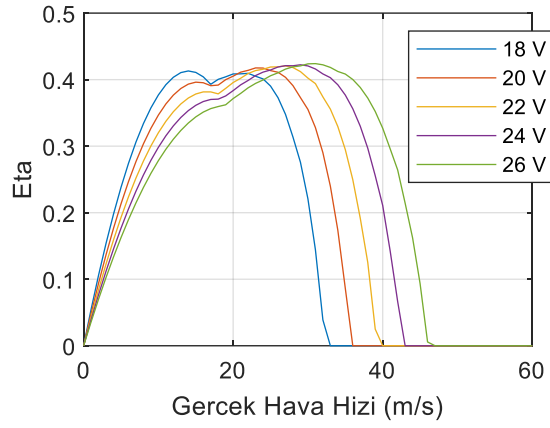
Şekil 1a: Akım vs gerçek hava hızı, Şekil 1b: Tork vs gerçek hava hızı



Şekil 2a: Güç vs gerçek hava hızı, Şekil 2b: İtki vs gerçek hava hızı



Şekil 3a: rpm vs gerçek hava hızı, Şekil 3b: Uç Mach sayısı vs gerçek hava hızı



Şekil 4: Motor ve pervanenin toplam verimliliği vs gerçek hava hızı

SONUÇ

Pal elemanları yöntemi sayesinde özellikle elektrik motorlu sabit kanatlı mini İHA'lar için motor ve pervane seçimi daha sistematik bir şekilde yapılabilmektedir. Bu hesaplama aracının doğruluğu TAI İHA Genel Müdür Yardımcılığı bünyesinde yapılan birçok testle doğrulanmıştır ve birçok uygulamada yaklaşık doğru sonuç vermiştir.

Uygulamada statik testler yapılabilir ve test edilmesi daha zor olan ileri hızlı durumlar için ise bu hesaplama aracı kullanılabilir.

Kaynaklar

Tmotor, url: store.tmotor.com/goods.php?id=317, 24.02.2023 tarihinde ulaşıldı.

Leishman, J.G., Principles of Helicopter Aerodynamics, Cambridge University Press, 2. Baskı, s.83.