

VERİMLİ DRONE PAL TASARIMI

Alihan Atilla Çınar¹ ve Özge Özdemir²
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi ve pala elemanı momentum teorisi kullanılarak verimli bir drone pal tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında pal tasarımı için pala elemanı momentum teorisi adım adım kodlanmıştır[MacNeill 2017,Leishman 2006]. Ardından teori için yazılan kodun ürettiği sonuçlar, BO-105 helikopter rotor sisteminin NASA Ames hava tüneline gerçekleştirilmiş deneylerinden elde edilen veriler ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır[Peterson 1995]. Helikopter rotoru için gerçekleştirilen doğrulamanın ardından, koda ölçek etkisi eklenmiştir. Böylece kod drone pal tasarımı için hazır hale getirilmiştir. Ardından tasarımı yapılacak bir drone hedef kitleleri belirlenmiştir. Hedef kitle olarak eğlence amaçlı kullanılan düşük ağırlıklı drone'lar belirlenmiştir. Eğlence amaçlı kullanılan dronelerin ağırlıkları ve pal çapı için bir market araştırması gerçekleştirilmiştir. Market araştırmasının ardından toplanan bilgilerle bu iki özelliğe bir eğri uydurulmuş ve tasarıma bu eğri üzerindeki bir noktadan başlanmıştır. Bu çalışma tasarıma uygun bir noktadan başlamak için yapılmıştır. Tasarıma başlarken pervane çapına uygun yaklaşık bir Reynolds Sayısı hesabı yapılmıştır. Hesaplanan Reynolds Sayısında kullanılan kanat profilleri araştırılmış ve XFLR5 programı ile karşılaştırılmıştır. Tasarıma en uygun olan profil seçimi gerçekleştirilmiştir. Ardından drone için kodlanan pala elemanı momentum teorisi kullanılarak ve optimum bulma ve sivrilme verileriyle drone ağırlığını taşıyabilecek bir pervane tasarımı gerçekleştirilmiştir. Pervane'nin geometrik özellikleri analiz ve üretim kolaylığı için doğrusallaştırılmış ve tasarım CATIA programı kullanılarak çizilmiştir. Çizilen tasarım üzerinden ANSYS – FLUENT programında hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar üzerinden tasarım iyileştirilmiştir. Sonuç olarak belli bir ağırlığı taşıyabilecek itkiyi üreten ve belli bir hedef kitleye hitap eden verimli bir drone pal tasarımı, pala elemanı momentum teorisi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinin eş zamanlı kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Ardından drone pali için kullanılan farklı malzemeler araştırılmış ve bu malzemeler için ANSYS programında yapısal analizler gerçekleştirilmiştir[Ahmad 2019,McAndrew 2018,Rodriguez 2018,Turcanu 2015]. Analizler sonucunda uygun malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. Özetle yukarıda bahsedilen yöntemler aracılığıyla eğlence amaçlı bir drone için verimli bir pal tasarımı gerçekleştirilmiştir.

GİRİŞ

Son yıllarda kullanım alanları genişleyen dronelar, en önemli hava araçlarından biri konumuna geldi. Drone tipleri sabit kanatlı, çok rotorlu ve hibrit olmak üzere 3 gruba ayrılabilir. Bu çalışmada çok rotorlu dronelar üzerinde durulmuştur. Kullanım kolaylığı, uygulama alanı çeşitliliği ve alternatiflerine göre ucuz olması çok rotorlu dronelerin kullanımını son yıllarda fazlasıyla artırmıştır. Askeriye, sinematografi, arkeoloji, meteoroloji, arama kurtarma çalışmaları gibi birçok sayısız farklı alanda drone kullanımının yaygınlaşması, onlar üzerine yapılan inceleme ve araştırmaların sayısını arttırmıştır[Nguyen 2020,Panayotov 2017,Vergouw 2016,Yang 2017]. Özellikle dronelerin

¹ Alihan Atilla Çınar, Uçak Müh. Böl., E-posta: cinali17@itu.edu.tr

² Yrd. Doç. Dr. Özge Özdemir, Uçak Müh. Böl., E-posta: ozdemirozg@itu.edu.tr

hayat kurtarma çalışmaları onları çalışmaların odak noktası haline getirmiştir. Çok rotorlu dronelar küçük boyutta oldukları ve havada asılı kalabildikleri için insanların ulaşamadığı yerlere ulaşabilir ve zor durumda kalan insanlara su, yiyecek ve ilaç taşınımında kullanılabilir. Ayrıca birçok alanda drone kullanımı alternatiflerine göre ucuz kalmaktadır. Örnek olarak bir yayıncının helikopter yerine drone kullanması çok daha ucuz bir yöntemdir. Bahsedilen sebeplerden ötürü drone üzerine yapılan verimlilik çalışmaları önem kazanmıştır. Bu çalışmada aerodinamik verimliliği arttırmak üzere drone pal tasarımı üzerinde durulmuştur. Böylece dronelerin uçuş süresinin arttırılması hedeflenmiştir.

YÖNTEM

İlk tasarım yöntemini geliştirmek için literatürden pala elemanı momentum teorisi araştırılmıştır. Pala elemanı momentum teorisi Gustafson ve Gessow tarafından 1946-1948 yılları arasında geliştirilen hibrit bir yöntemdir[Leishman 2006]. Metot basitçe pala elemanı teorisi ile momentum teorisini birleştirmektedir. Bahsi geçen birleşme iki yöntemden ayrı ayrı elde edilen itki katsayılarının eşitlenmesi ile gerçekleştirilir. Momentum teoriden ve pala elemanı teorisinden elde edilen diferansiyel itki katsayıları formül 1 ve formül 2'deki gibidir[Leishman 2006].

$$dC_T = 4\lambda^2 r dr \quad (1)$$

$$dC_T = \frac{1}{2} \sigma C_l r^2 dr \quad (2)$$

Formül 1 ve formül 2'deki denklemler eşitlenip iç akış oranı(λ) değeri yalnız bırakıldığında ve Prandtl'in uç kayıplarına göre modifikasyonlar yapıldığında denklem 3 elde edilir[Leishman 2006].

$$\lambda = \frac{\sigma C_{l\alpha}}{16F} \left(\sqrt{1 + \frac{32F}{\sigma C_{l\alpha}} \theta r} - 1 \right) \quad (3)$$

İç akış oranı değeri, pala elemanı teorisi ve momentum teorisinde sabitken, pala elemanı momentum teorisinde burulma açısı dağılımı, veter uzunluğu dağılımı, hatve açısı dağılımı ve kanat profili seçiminin bir fonksiyonu halindedir. F fonksiyonu da λ ya bağlı olduğu için 3. Denklemin her iki tarafında λ bulunmaktadır. Dolayısıyla pala elemanı momentum teorisi için yazılan kodda λ hesabında iteratif bir çözüm gerçekleştirilmiştir. İç akış oranı pala elemanı momentum teorisinde çok kritik bir rol oynamaktadır. İç akış oranı hesaplandığı zaman iç akış açısı (ϕ) da formül 4'teki gibi hesaplanabilir.

$$\phi = \frac{\lambda}{r} \quad (4)$$

İç akış açısı bilindiği zaman efektif hücum açısı " $\theta - \phi$ " eşitliğinden kolaylıkla hesaplanır. Ayrıca pervaneye etkileyen hava hızının iki bileşeni vardır. Bunlardan biri pervanenin dönmesinden kaynaklı olan hızdır. Bu hız dönme düzlemine paraleldir ve formül 5'teki gibi hesaplanır. Diğer ise pervanenin havayı indüklemesinden kaynaklı olan hızdır. İndüklenmiş hız, iç akış oranından yararlanılarak formül 6'daki gibi bulunur. Pervaneye etkileyen iki hızın bileşkesi alındığında formül 7'deki gibi pervaneye etkileyen toplam hız bulunur. Dolayısıyla iç akış oranının bilinmesi hem efektif hücum açısının hesabında hem de bileşke hız hesabında kullanılır.

$$V_R = wR \quad (5)$$

$$v_i = \lambda V_{tip} \quad (6)$$

$$U = \sqrt{v_i^2 + V_R^2} \quad (7)$$

İç akış oranı aracılığı ile yapılan tüm bu hesaplamaların ardından aerodinamik kuvvetler hesaplanabilir konuma gelmektedir. Diferansiyel taşıma kuvveti ve diferansiyel sürüklenme kuvveti formül 8 ve formül 9'daki gibi hesaplanabilir.

$$dL = \frac{1}{2} \rho U^2 c C_l dy \quad (8)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho U^2 c C_D dy \quad (9)$$

Diferansiyel taşıma ve sürükleme kuvvetlerinin dikey ve yatay bileşenleri kullanılarak itki ve güç değerleri denklem 10 ve denklem 11'deki gibi elde edilir.

$$dT = N_b (dL \cos \Phi - dD \sin \Phi) \quad (10)$$

$$dQ = N_b (dL \sin \Phi + dD \cos \Phi) y \quad (11)$$

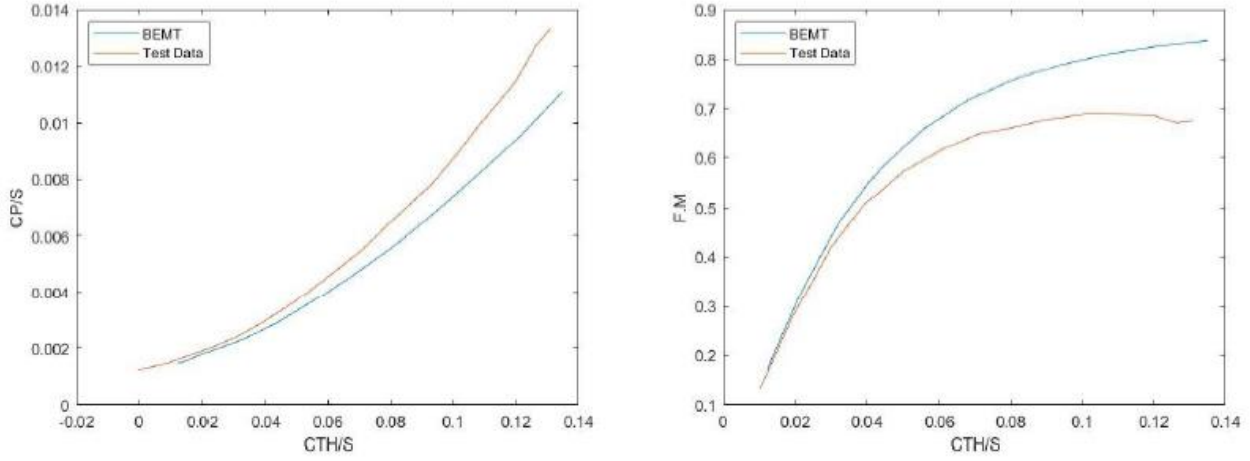
Bu değerler her pala bölmesi için ayrı ayrı hesaplanarak toplanır. Böylece toplam güç ve itki hesaplanmış olur.

Sonuç olarak, bahsi geçen formüller aracılığı ile bir pala elemanı momentum teorisi kodu yazılmıştır. Ayrıca yazılan koda veter uzunluğu, hatve açısı ve kanat profili tipi dışarıdan eklenebilir. Dolayısıyla kod, pal tasarımının ilk aşamasında kullanılabilecek bir araç haline getirilmiştir. Kod kullanılmadan önce validasyon işlemine tabi tutulmuştur. Literatürde BO-105 menteşesiz rotor sisteminin geometrik özellikleri ve NASA 40-80 hava tüneli deney verileri bulunmaktadır [Peterson, 1995]. BO-105 menteşesiz rotor sisteminin geometrik özellikleri tablo 1'de aktarılmıştır [Peterson, 1995].

Tablo 1 - BO-105 Menteşesiz Rotorun Geometrik Özellikleri

Pal Sayısı	4
Yarıçap(m)	4,910328
Veter Uzunluğu(m)	0,27
Pal Burulma Oranı	-8
Katılık Oranı	0,07
Rotor Dönüş Hızı(rpm)	425
Kanat Profili	NACA 23012

Tablo 1'deki özelliklerin tümü koda aktararak deney verileri ile olan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kullanılan NACA 23012 kanat profilinin $C_l - \alpha$ ve $C_D - \alpha$ grafikleri XFLR5 programı aracılığı ile elde edilmiştir. Ortalama taşıma ve sürükleme kuvveti palanın yaklaşık olarak %75'inde olduğu için XFLR5 programında yapılan analizde bu kısımdaki Reynolds değeri kullanılmıştır. XFLR5'ten elde edilen grafikler ayrıştırılarak MATLAB ortamına aktarılmıştır. Sonuçta, deney verileri ile pala elemanı momentum teorisi kodunun çıktısı şekil 1'de olduğu gibi karşılaştırılmıştır.



Şekil 1- Deney verilerinin ve Teorinin karşılaştırılması

Verim ölçüsü, C_T / σ ve C_P / σ değerleri, rotorun geometrik özelliklerinin koda aktarılması ile elde edilmiş ve sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 1'den de görüldüğü üzere teori sonuçları deney sonuçlarıyla uyumludur. Verim ölçüsünün değerleri beklentinin biraz üzerindedir. Bunun sebebi, bütün kayıpların teoride modellenememiş olması ve üç boyutlu etkilerin göz ardı edilmiş olmasıdır. Kodun helikopterler için uygun hale getirilmesinin ardından ölçek etkisi koda yansıtılmıştır. Bunun için ufak pervaneler için Snel tarafından geliştirilen bir düzeltme denklemi kullanılmıştır [MacNeill,2017]. Bahsedilen denklem sınır tabaka denklemlerinden geliştirilmiştir. Ölçek etkisi denklem 12 aracılığı ile tasarım koduna yansıtılmıştır.

$$C_l = C_{l_0} + \frac{r}{R} \tanh \left(3.1 \left(\frac{wr}{V} \right)^2 \left(\frac{C}{r} \right)^2 \right) (2\pi - C_{l_0}) \quad (12)$$

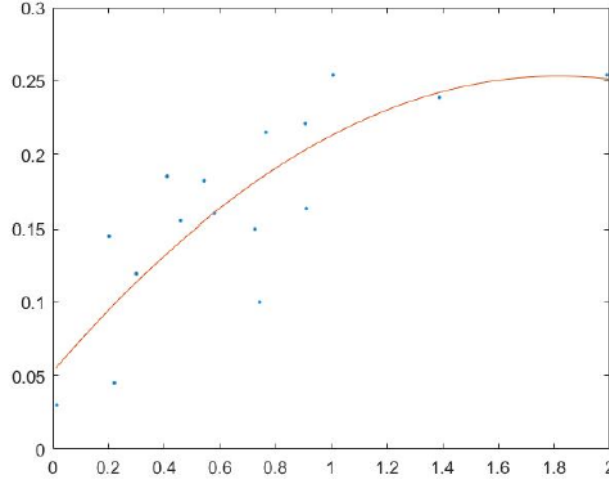
Ölçek etkisinin de verilmesinin ardından kod drone pal tasarımı için tamamen kullanılabilir hale gelmiştir.

Drone pal tasarımının ilk aşamasında öncelikle hedef kitle belirlenmiştir. 2 kilogramdan düşük kütleyle sahip olan dört rotorlu dronelar için pazar araştırması yapılarak pal çapı ve drone ağırlığı araştırılmıştır. Bu tipteki droneların çoğu eğlence amaçlı olup fotoğraf ve video çekiminde kullanılabilir. Araştırılan droneların ağırlık ve pal çapları tablo 2'deki gibidir.

Tablo 2 - Benzer Drone Araştırması

	Drone Ağırlığı	Pal Çapı
3D Robotics Solo	1.99 kg	0.254 m
DJI Phantom 4 Pro	1.388 kg	0.23876 m
DJI MAVIC 2	0.907 kg	0.22098 m
Syma Cheerwing	0.910 kg	0.16307 m
SKEYE NANO	0.014 kg	0.03 m
Hubsan X4 H501S drone	0.410kg	0.185 m
SIMREX X300C Mini Drone	0.2211263 kg	0.045 m
DJI SPARK	0.3 kg	0.1194 m
CSJ S167	0.202 kg	0.145 m
HS720	0.4581283 kg	0.155 m
B20 EUS GPS	0.543 kg	0.182 m
DJI MAVIC PRO PLATINUM	0.743 kg	0.1 m
CSJ S161 Mini Pro	0.580 kg	0.16 m
Xiaomi FIMI x8 SE 2020	0.765 kg	0.215 m
Go Pro Karma Drone	1.006 kg	0.254 m
X708W	0.726 kg	0.14986 m

Elde edilen veriler aracılığıyla şekil 2'deki eğri oluşturulmuş ve bu eğri üzerinden bir noktada tasarıma başlanmıştır. Bu çalışmanın amacı tasarıma gerçeğe uygun bir noktadan başlayabilmektir. Dolayısıyla başlangıçta bilinenler drone ağırlığı ve pal çapıdır.



Şekil 2 - Market Araştırması Verilerine Uydurulan Eğri

Tasarıma drone pal çapı ve drone ağırlığı ile başlanmıştır. Ardından kanat profili seçimi gerçekleştirilmiştir. Drone pali çok küçük boyutlarda olduğu için, kanat profilindeki akışın Reynolds sayısı çok düşük olmaktadır. Yaklaşık bir Reynolds hesabı yapıldığında 100000-150000 civarında olduğu görülmektedir. Bahsedilen reynolds aralığında kullanılan kanat profilleri araştırılmıştır. Araştırma sonucu elde edilen NACA 4412, Clark Y, SD7062, Eppler E63 ve NACA0015 kanat profilleri XFLR5 programında karşılaştırılmıştır. NACA 4412 profilinin C_l/C_D oranı üstünlüğü bu profilin seçiminin temel sebebi olmuştur. Kanat profili seçiminin ardından sivrilme ve burulma oranı belirlenmiştir. Bunun için pallerde drone ağırlığını taşıyabilecek şekilde optimum sivrilme ve burulma verilmiş ardından üretim ve analiz kolaylığı açısından sivrilme ve burulma oranları doğrusallaştırılmıştır.

Pala elemanı momentum teorisinden elde edilen sonuçlara göre burulma olmayan pallerde iç akış oranı pervanenin uçlarına doğru yoğunlaşmaktadır. İç akış oranının uçlara doğru artması, pervanenin ideallikten uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bu durum aşağıdaki denklemler aracılığı ile kanıtlanabilir [Leishman,2006].

$$\lambda(r) = \lambda_{tip} \cdot r^n \quad (13)$$

$$C_T = 4 \int_0^1 \lambda^2 r dr = \frac{2\lambda_{tip}^2}{n+1} \quad (14)$$

$$\lambda_{tip} = \sqrt{n+1} \sqrt{\frac{C_T}{2}} \quad (15)$$

$$C_{pi} = 4 \int_0^1 \lambda^3 r dr = \frac{4\lambda_t^3}{3n+2} \quad (16)$$

$$C_{pi} = \frac{2(n+1)^{\frac{3}{2}}}{3n+2} * \frac{C_T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

İç akış oranının pervane uçlarına artması denklem 13'teki gibi modellenebilir. Denklem 13'teki iç akış oranı C_T formülünde yerine konulduğunda denklem 14 elde edilmektedir. Denklem 14'teki λ_{tip} değeri yalnız bırakılırsa denklem 15 elde edilir. Önerilen iç akış oranı, indüklenmiş güç katsayısı formülünde yerine konulursa denklem 16'daki eşitliğe ulaşılır. Denklem 15'te elde edilen λ_{tip} değeri denklem 16'da yerine konulursa, indüklenmiş güç katsayısı denklem 17'de olduğu gibi bulunur. "n" değerinin sıfır olması durumu iç akış oranının pal boyunca sabit olması durumudur ve ideal durumu temsil eder. "n" değeri 1'den büyükken iç akış oranı pervane ucuna doğru artmaktadır. Dolayısıyla burulmamış bir pervaneye uygulanan pala elemanı momentum teorisi sonucunda elde edilen λ karakteristiği n değeri 1'den büyükken elde edilir. "n" değerinin sıfırdan büyük olduğu durumda denklem 17'deki formülden de anlaşılacağı üzere indüklenmiş güç katsayısı artmaktadır ve pervane ideallikten uzaklaşmaktadır. İç akış oranının dağılımı palin geometrik özelliklerine bağlıdır. Dolayısıyla palin geometrik özellikler değiştirilerek iç akış oranı dağılımı değiştirilebilir. Bu çalışmada pervanenin geometrik özellikleri değiştirilerek yüksek verimli bir pervane tasarımı gerçekleştirilmiştir. Pervanenin güç tüketiminde indüklenmiş güç ve profil gücü olmak üzere iki tip güç bileşeni vardır. Pervanenin profil gücünü minimize etmek için iki güç bileşeninin de minimize edilmesi gerekmektedir. Denklem 13-17'den de anlaşılacağı üzere indüklenmiş güç iç akış oranının r'den bağımsız hale getirilmesi ile minimize edilebilir. Aynı zamanda profil gücünün de minimize edilmesi gerekir. Profil gücünün minimize edilmesi için her pala bölmesinde hücum açısı C_l/C_D oranının maksimum olduğu açıda olması gerekmektedir. Hücum açısının her bölmede aynı kalmasını sağlayan iç akış oranı denklem 18'deki gibi ifade edilebilir.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sigma r C_{l\alpha} \alpha_1}{8}} \quad (18)$$

Denklem 18'deki α_1 açısı C_l/C_D 'nin maksimum olduğu açıdır. İç akış oranının aynı zamanda r'den bağımsız hale gelmesi gerekmektedir. Katılık oranının(σ) formülü denklem 19'daki gibidir.

$$\sigma = \frac{N_b c}{\pi R} \quad (19)$$

İç akış oranının r'den bağımsız hale gelmesi için veter dağılımının denklem 20'deki gibi olması gerekmektedir.

$$c(r) = \frac{c_{tip}}{r} \quad (20)$$

Veter uzunluğunun denklem 20'deki gibi elde edilmesiyle oluşan dağılıma optimum sivrilme denmektedir. Optimum burulma açısı dağılımı ise denklem 21'deki gibi elde edilebilir.

$$\theta(r) = \alpha_1 + \frac{\lambda}{r} \quad (21)$$

Sonuç olarak, optimum sivrilme ve burulma dağılımı ile elde edilen bir tasarımda iç akış oranı pal boyunca sabit kalacak ve palin gördüğü hücum açısı pal boyunca maksimum C_l/C_D oranını veren hücum açısına eşit olacaktır. Tasarıma şekil 2'deki eğri üzerinde bulunan bir noktadan başlanmıştır. Bu noktada ağırlık 930 gram iken pal çapı 20.556 cm'dir. 930 gramı kaldıracak bir optimum pal tasarımı, pala elemanı momentum teorisi kodu kullanılarak tablo 3'teki gibi elde edilmiştir.

Tablo 3 - Optimum Pal Tasarımı

Pal Sayısı	2
Pal Çapı	20,556 cm
Burulma Dağılımı (derece)	$35,06r^2 - 66,52r + 43,91$
Sivrilme dağılımı(m)	$0,0088/r$
Pal başlama noktası	3 cm

Tablo 3'teki tasarım aerodinamik açıdan daha verimli olsa da üretim ve analiz kolaylığı için pervane geometrisi tablo 4'te olduğu gibi doğrusallaştırılmıştır. Lineer burulma ve lineer sivrilmeye sahip geometri optimum geometriye göre daha az verimli olsa da dikdörtgen ve burulmamış bir geometriye göre çok daha verimlidir. Doğrusallaştırma için burulma ve sivrilme dağılımı denklemleri denklem 20 ve 21'den denklem 22 ve 23'e dönüştürülmüştür.

$$C(i) = C_{tip} + (R - y(i)) \cdot C_s \quad (22)$$

$$\theta(i) = \theta_{tip} + (R - y(i)) \cdot \theta_s \quad (23)$$

22. ve 23. Denklemlerde C_s değeri sivrilmenin eğimi iken θ_s değeri burulmanın eğimidir. Doğrusallaştırmadan sonra pervanenin özellikleri Tablo 3'ten Tablo 4'e dönüşmüştür.

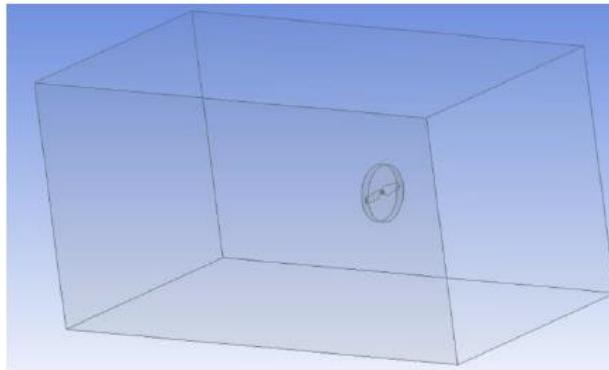
Tablo 4 Doğrusallaştırılmış Pal Tasarımı

Pal Sayısı	2
Pal Çapı	20,556 cm
Burulma Dağılımı (derece)	20,52534 -153*y
Sivrilme dağılımı(m)	0,0303892 – 0.14*y
Pal başlama noktası	1,02785 cm

Belirlenen geometrik özelliklerden yararlanılarak pal Catia programında çizilmiştir. Ardından çizilen parçaya ANSYS-Fluent programında hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulanmıştır. HAD sonucu elde edilen itki ile teoriden elde edilen itki karşılaştırılmış ve tasarım HAD sonucuna dayanarak düzeltilmiştir. Böylelikle iteratif bir yöntemle, drone ağırlığını taşıyabilen verimli bir pervane tasarımı gerçekleştirilmiştir. Son olarak Dış geometri sabitlendikten sonra ANSYS programının "Static Structural" modülünde yapısal analizler gerçekleştirilmiş ve malzeme seçimi yapılmıştır.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

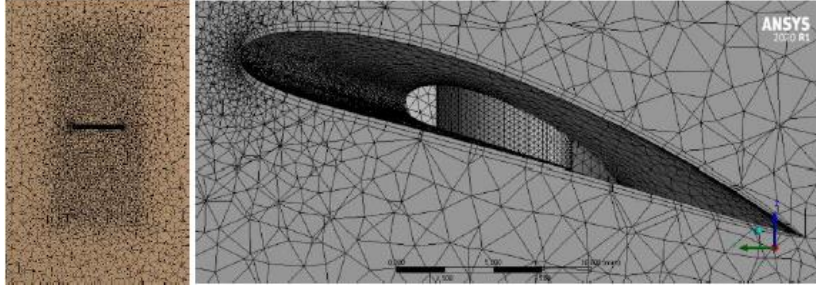
Lineerleştirilmiş pal, CATIA programında çizilerek ANSYS Fluent'e aktarılmıştır. Bu kısımda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizinin gerçekleştirilmesinin amacı teoriden elde edilen sonuçların HAD analizinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmasıdır. HAD analizleri zaman açısından maliyetlidir. Pala elemanı momentum teorisi, HAD analizlerine başlayabilmek için iyi bir başlangıç noktası elde edilmesini sağlar. ANSYS programında geometri için 2 adet hacim oluşturulmuştur. Bu hacimlerden biri pervaneyi kapsayacak şekilde ufaktır. Bu hacmin amacı pervanenin döndüğünü programa tanıtabilmektir. Diğer hacim ise statik bölgeyi tanımlamak için oluşturulmuş ve görece büyüktür. Dönen ve statik hacimler şekil 3'deki gibidir.



Şekil 3 - Dönen ve Statik Hacimler

Statik ve dönen hacimlerin arasında ek olarak bir gövde tanımlaması daha yapılmıştır. Bu gövde tanımlaması aracılığı ile ağ elemanları pervaneye doğru kademeli olarak sıklaştırılmıştır. Tüm bu tanımlamaların ardından pervane dönen hacimden çıkarılmış ve dönen hacim de statik hacimden çıkarılmıştır. Böylelikle geometrinin kendisi değil, uzayda kapladığı hacim analiz edilmiştir. Bu işlem

ağ oluşturma sürecini kısaltmaktadır. Hacimler oluşturulduktan sonra ağ elemanları şekil 4'te kesitlerde görüldüğü gibi oluşturulmuştur.



Şekil 4 - Ağ yapısından bir kesit

Ağ elemanlarının genel boyutları belirlendikten sonra , pervanenin yakınlarındaki akış fiziğinin yakalanabilmesi için “inflation” tabakası tanımlanmıştır. İlk meshin yüksekliği çözüm aşamasında seçilecek türbülans modeline ve yaklaşık olarak belirlenen sınır tabakası kalınlığına göre hesaplanmıştır [Cengel,2014]. İlk ağ hücresinin yüksekliği denklem 24,25,26 ve 27 aracılığı ile elde edilmiştir.

$$y = \frac{y^+ \mu}{U_\tau \rho} \quad (24)$$

$$U_\tau = \sqrt{\frac{T_w}{\rho}} \quad (25)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U_\infty^2 \quad (26)$$

$$c_f = 0.058 (Re_l)^{-0.2} \quad (27)$$

Çözüm yöntemi olarak “realizable K-epsilon” türbülans modeli kullanılmıştır. Bu türbülans modeli ayrılan ve dönen akış fiziğinde iyi sonuçlar vermektedir [Shaheed,2019]. Ayrıca bahsedilen modelin avantajlarından biri de ayrılan akışta resirkülasyon fiziğini çok iyi yakalamasıdır. Bahsi geçen türbülans modeli “scalable wall function” ile beraber kullanılmıştır. “Realizable k-epsilon” türbülans modelinin 30-300 arasında bir y^+ değeri ile kullanılması önerilmektedir. y^+ değeri 50 seçilerek ilk ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu hesaplamaların yanında, kaç tane “inflation” katmanının oluşturulacağını öğrenmek için sınır tabaka kalınlığının da hesaplanması gerekmektedir. Sınır tabaka kalınlığı denklem 28 aracılığı ile yaklaşık olarak hesaplanabilir [Cengel,2014].

$$\delta = \frac{0,37x}{Re^{\frac{1}{5}}} \quad (28)$$

Denklem 29 kullanılarak kaç “inflation” katmanının kullanılacağı elde edilmiştir. Denklemdeki “GR” ağ yapısının büyüme oranıdır. “NL” değeri ise katman sayısıdır.

$$\delta = y * \frac{(1 - (GR)^{NL})}{1 - GR} \quad (29)$$

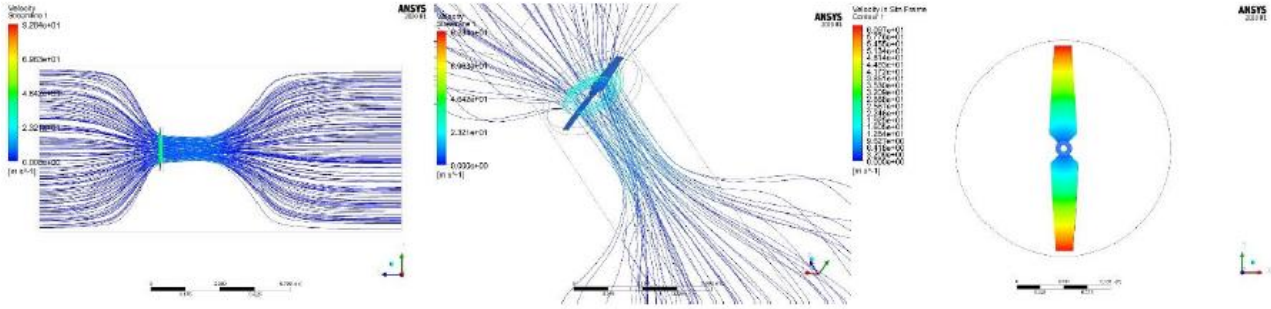
Dönme hareketinin fiziğinden dolayı pervanenin farklı kısımları farklı hızlara maruz kalmaktadır. Bu sebeple sınır tabakanın kalınlığı değişmektedir. İlk ağ hücresinin yüksekliği olarak pervanenin uç bölgesindeki en ince ağ yüksekliği alınırken sınır tabaka kalınlığı için kökteki en yüksek sınır tabaka kalınlığı alınmıştır. Böylece pervane boyunca duvar yakınlarındaki fizik yakalanırken sınır tabaka kalınlığı da yeteri kadar modellenebilmiştir.

Analiz çalıştırıldığında elde edilen itki kuvveti incelenmiştir. HAD sonucu elde edilen itki kuvveti, pala elemanı momentum teorisinden elde edilen itkiye göre %30 civarlarında daha düşük çıkmıştır. Bu sebeple teoriye dayanarak elde edilen tasarımın burulma ve sivrilme oranları tablo 5'te görüldüğü gibi artırılmış ve çizim ve analizler tekrarlanmıştır.

Tablo 5 - Düzeltilen tasarımın geometrik özellikleri

Pal Sayısı	2
Pal Çapı	20,556 cm
Burulma Dağılımı (derece)	24,9865 -175*y
Sivrilme dağılımı(m)	0,04453 – 0.19*y
Pal başlama noktası	1,02785 cm

Bu döngü tek tekrarda sonuca erişmiştir. Çünkü pala elemanı momentum teorisi her ne kadar tüm kayıpları ve 3 boyutlu akış fiziğini modelleyemese de HAD analizleri için iyi bir başlangıç noktası vermektedir. Sonuç olarak 930 gram civarında tasarlanması planlanan drone için Tablo 5'teki özellikler ile 9.44 Newton itki üreten bir pal tasarımı gerçekleştirilmiştir. Analizlerin tamamlanmasının ardından akış fiziği incelenmiştir. Gözlemlenen sonuçların olması gereken akış fiziğine uygun olduğuna karar verilmiştir. Bu sonuçlar şekil 5'te aktarılmaktadır.

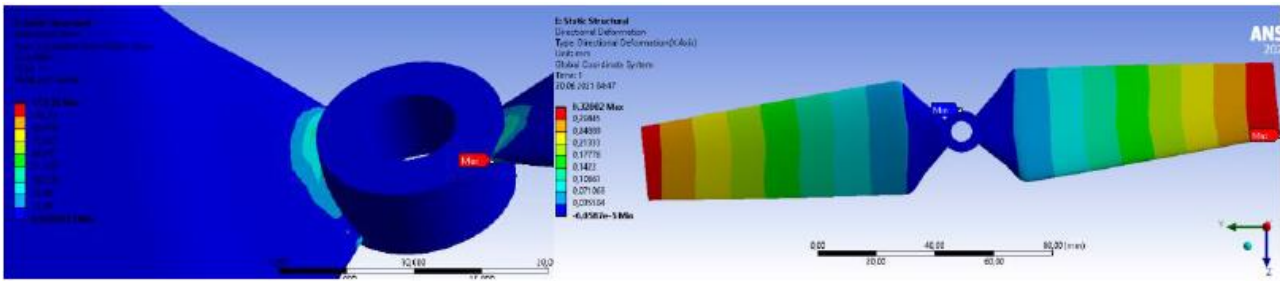


Şekil 5 - HAD analizi sonucu gözlemlenen akış fiziği

En soldaki şekilde pervaneye ZY eksenine doğrultusunda bir düzlem atanmış ve bu düzlem üzerinden akım çizgileri gözlemlenmiştir. Beklendiği gibi, pervane önünde bulunan akışı içerisine çekmekte ve akım çizgileri pervaneye doğru daralmaktadır. Pervaneden geçen akım çizgileri belli bir mesafe sonra dönüş fiziğinin etkisinden çıkarak tekrar eski haline dönmektedir. Ayrıca Şekil 5'in ortasında yer alan figürde görüldüğü üzere akış pervaneden geçerken dönmektedir. Ayrıca geçtikten sonra da dönmeye devam etmektedir. Son olarak pervaneden geçen akış hızı kontrol edilmiştir. Şekil 5'in en sağdaki figürde görüldüğü üzere pervanenin göbeğine doğru hız 0 olurken , pervanenin uçlarında hız maksimuma ulaşmaktadır. Sonuç olarak, incelenen sonuçlardan programın dönme fiziğini iyi yakaladığı ve sonuçlara yansıttığı anlaşılmaktadır. Pal geometrisinin tamamen belirlenmesi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin yapılmasının ardından malzeme seçimine geçilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında dronelar için akademik çalışmalarda ve şirketler tarafından kullanılan malzemeler araştırılmıştır. Ayrıca drone malzeme seçimindeki kriterler de incelenmiştir. Drone için en önemli parametrelerden biri hafif olmasıdır. Bu sebeple her ne kadar pal malzeme seçiminin ağırlığa etkisi düşük mertebelerde olsa da seçimdeki en önemli parametre hafifliktir. Ayrıca daha hafif bir tasarım atalet momentini düşürecektir. Atalet momentinin düşürülmesi dronenun kontrol edilebilirliğini artırır [Turcanu,2015]. Bu durumun bir sonucu olarak drone, hız değişimlerini daha hızlı bir şekilde gerçekleştirebilir. Atalet momentinin olabildiğince düşük tutulmasını sağlamak için pervanenin içi doldurulmamış ve bir kabuk şeklinde tasarlanmıştır. Bir diğer önemli malzeme seçim kriteri ise malzemenin üzerine gelen yüklemelere dayanabilmesidir. Eğer malzemeye etkiyen gerilmeler, malzemenin kaldırabileceği maksimum gerilmeyi aşarsa malzeme plastik deformasyona uğrayabilir hatta kırılabilir. Ayrıca drone'un kullanım alanı da malzeme seçiminde büyük öneme sahiptir. Örneğin tarım için kullanılan dronelerde çok sert çevre koşulları olmadığı için çok güçlü dayanıma sahip bir pervane kullanılmasına gerek yoktur. Ucuz ve tamiri kolay olduğu için bu alanda alüminyum kullanılabilir.

Ancak arama kurtarma çalışmalarında kullanılan dronelar için havada kalma süresi ve dayanım çok kritiktir. Bu sebeple kompozit malzeme kullanımı daha uygundur. Eğlence sektöründeki dronelarda genellikle kompozit ve plastik malzeme kullanılmaktadır. Kompozit malzeme fotoğraf ve video çekiminde kullanılan dronelarda yaygındır. Çünkü bu amaçla kullanılan dronelarda performans önemlidir. Ayrıca daha hafif paller titreşimin azaltılmasını sağlayacaktır. Düşük yaş gruplarının kullandığı dronelarda ise plastik kullanımı yaygındır. Plastik hem ucuz olması hem de esnek olması sebebiyle çocuklar için üretilen droneların kullanımında uygun bir malzemedir. Tasarımın başında eğlence amaçlı drone için pal tasarımı hedeflendiği için kompozit ve plastik malzemeler drone pali için denenmiştir. Ayrıca kullanım kolaylığı ve ucuzluğu sebebiyle alüminyum malzemesi de analiz edilmiştir.

Analizler ANSYS'in "static structural" modülünde gerçekleştirilmiştir. Her ne kadar modülde gerçekleştirilen analiz tipi statik olsa da, ANSYS'de "inertia relief" modu açılarak problemin dinamik fiziği programa tanıtılmıştır. HAD analizinde kullanılan geometri, içeri doğru kalınlık verilerek yapısal analizde kullanılmaya uygun hale getirilmiştir. Malzeme ve ağ yapısının atanmasının ardından HAD analizi sonucunda hesaplanan yüklemeler pervaneye tanımlanmıştır. Analizler seçilen tüm malzemeler için tekrarlanmıştır. Analiz sonuçlarında güvenlik faktörü, Von Mises gerilmeleri ve deformasyonlar şekil 6'da görüldüğü gibi kontrol edilmiş ve tablo 6'da olduğu gibi ifade edilmiştir.



Şekil 6 - Maksimum gerilme bölgesi ve deformasyon miktarı

Tablo 6 Analiz sonucunda malzeme karşılaştırması

Malzeme	Pervane ağırlığı	Maksimum Gerilim	Maksimum deformasyon	Güvenlik faktörü	Young Modülü	Kayma modülü	Akma gerilimi
Alüminyum Alaşım	8,0955 gr	115,55 MPa	0,3200 mm	2,4231	71000 MPa	26692 MPa	280 MPa
Epoksi/Karbonfiber,QI [0,+45,-45,90]	4,7807 gr	115,89 MPa	0,5221 mm	3,9641	43430 MPa	16266 MPa	459,4 MPa
Epoksi/ Cam elyaf ,UD prepreh,QI	5,7898 gr	117,34 MPa	1,1384 mm	4,0897	19970 MPa	7642,6 MPa	479,9 MPa
ABS Plastik	3,4894 gr	112,04 MPa	9,3681 mm	0,3695	2390 MPa	854,18 MPa	41,4 MPa
Naylon(PA6)	3,7557 gr	114,65 MPa	21,307 mm	0,3759	1060 MPa	392,59 MPa	43,1 MPa
Naylon 6 - cam elyaf destekli(PA6-GF)	4,3148 gr	114,61 MPa	3,7905 mm	1,082	5960 MPa	2207,4 MPa	124 MPa

Analiz sonuçları incelendiğinde en az deformasyona uğrayan malzemenin alüminyum olduğu görülmektedir. Ancak, alüminyum malzemesi analizi yapılan diğer tüm kompozit ve plastik malzemelerinden daha ağır gelmektedir. Malzemelere etkiyen maksimum gerilmeler birbirine yakındır. Ancak malzemelerin akma gerilmeleri çok değişiklik gösterdiği için güvenlik faktörü de malzemeden malzemeye değişmektedir. Havacılıkta güvenlik faktörünün yaygın kullanımı 1.5'tur. Bu sebeple 1.5 güvenlik faktörünün altındaki malzemeler elenmiştir. En iyi iki seçenek karbonfiber ve cam elyaf olarak gözükmektedir. Cam elyaf malzemenin güvenlik faktörü daha çoktur ama malzeme karbonfibre göre daha fazla deformasyona uğramakta ve daha ağır olmaktadır. Bu sebeplerden ötürü karbonfiber malzeme drone pali için uygun görülmüştür. Karbonfiber malzeme güvenli bölgede kalan malzemeler arasından en hafif olmakla birlikte çok az deformasyona uğramaktadır. Yapısal analizlerin sonucunda, aerodinamik yüklemelere ve problemin fiziğine göre kullanılacak en uygun malzemenin karbonfiber olduğu görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada en baştan başlanarak aerodinamik açıdan verimli bir drone pervane tasarımı gerçekleştirilmiştir. Pala elemanı momentum teorisi kodlanmış ve helikopter pali için valide edilmiştir. Ardından kod dronelerde kullanılmak üzere düzenlenmiştir. Market araştırması yapılarak ağırlık ve pal çapı değerleri araştırılmış ve uygun bir noktadan tasarıma başlanmıştır. Düşük Reynolds sayılarında kullanılan kanat profilleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Aralarından NACA 4412 profili seçilmiş ve çalışmaya bu profil ile devam edilmiştir. Pala elemanı momentum teori kodu aracılığı ile 930 gramı taşıyabilecek bir pervane tasarımı gerçekleştirilmiştir. Pala elemanı momentum teori kodu ile tüm kayıplar modellenememektedir. Ayrıca pala elemanı momentum teorisi 2 boyutlu bir temelde oluşturulmuştur. Birçok üç boyutlu akış fiziği etkileri, teorinin gerçekten uzaklaşmasına neden olmaktadır. Ancak teori aracılığı ile tasarıma olması gerekene yakın bir noktadan başlanabilmektedir. Bu sebeplerle tasarlanan pervanenin ürettiği itki HAD analizleri ile kontrol edilmiştir ve pervanenin üretmesi gerekenden %30 daha az itki ürettiği görülmüştür. İtkiyi arttırmak için pala elemanı momentum teorisi kodundan daha fazla itki üretecek bir tasarım yapılmış ve yeni tasarım tekrardan HAD analizine sokulmuştur. Böylece iteratif bir yolla yeterli itkiyi sağlayacak bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın temel amaçlarından biri tasarımcıya hızlı bir şekilde aerodinamik açıdan verimli bir drone pal tasarımı gerçekleştirmeyi mümkün kılmaktır. Ancak malzeme seçimi de verimli drone pal üretimi için çok kritiktir. Seçilen malzemenin gelen aerodinamik yüklere dayanması ve hafif olması gerekmektedir. Dronelerin kontrol edilebilirliğinin yüksek olması çok önemlidir. Malzeme ağırlığının azaltılması, performansla olumlu etki sağlamanın yanı sıra atalet momentini azaltacak ve kontrol edilebilirliği artıracaktır. Ayrıca seçilen malzeme deformasyona çok uğramamalıdır. Malzemenin uğrayacağı deformasyon üretecek itkiyi kötü etkilemektedir. Dronelerde kullanılan malzemeler araştırılmış ve bu malzemeler yapısal analize tabi tutulmuştur. Yapısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Güvenli bölgede kalan malzemeler arasında en düşük ağırlığa sahip malzeme olan ve deformasyona az uğrayan karbonfiber malzemesi aerodinamik tasarımı gerçekleştirilen pervane için en uygun malzeme olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada 2 farklı alanda analizler gerçekleştirilerek verimli pervane tasarımı hedeflenmiştir. Drone pervanelerinin veriminin artırılması uçuş sürelerinin artırılmasını sağlayacaktır. Son yıllarda dronelerin kullanımı her alana yayılmıştır. Özellikle hayat kurtarma alanındaki etkileri göze çarpmaktadır. Dolayısıyla drone veriminin artırılması, felaket sonrası yapılan arama çalışmalarında drone'un daha uzun süre havada kalabilmesi demektir. Başka bir açıdan bakıldığında pil kaynaklarının daha verimli tüketimi çevre kirliliğinin azalması demektir. Sonuç olarak verimli drone pal tasarımı üzerinde hassasiyetle durulması gereken ve araştırılması sonucunda insanları birçok olumlu sonuca götürebilecek elzem bir konudur.

Kaynaklar

- Ahmad, F., Bhandari, A., Kumar, P., and Patil, P. P., 2019. "Modeling and Mechanical Vibration characteristics analysis of a Quadcopter Propeller using FEA," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Cilt. 577, IOP Publishing, s. 012022.
- Andria, G., Di Nisio, A., Lanzolla, A., Spadevecchia, M., Pascazio, G., Antonacci, F., and Sorrentino, G., 2018. "Design and performance evaluation of drone propellers," *2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, IEEE, s. 407–412.
- Bohorquez, F., Pines, D., and Samuel, P. D., 2010. "Small rotor design optimization using blade element momentum theory and hover tests," *Journal of aircraft*, Cilt. 47, Sayı. 1, s. 268–283.
- Cengel, Y., 2014. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*, McGraw-Hill Higher Education,

- Inside a Drone: Propellers. Erişim.2021,20 Haziran. *DJI Official*.
<https://www.dji.com/newsroom/news/inside-a-drone-propellers>.
- Leishman, G. J.,2006. *Principles of helicopter aerodynamics with CD extra*, Cambridge university press,
- MacNeill, R., and Verstraete, D.,2017. “Blade element momentum theory extended to model low Reynolds number propeller performance,” *The Aeronautical Journal*, Cilt. 121, Sayı. 1240, s. 835–857.
- McAndrew, I. R., Navarro, E., and Witcher, K.,2018. “Propeller design requirements for quadcopters utilizing variable pitch propellers,” *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Cilt. 6, Sayı. 1, s. 51.
- Nguyen, D. Q., Loianno, G., et al.,2020. “Towards Design of a Deformable Propeller for Drone Safety,” *2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, IEEE, s. 464–469.
- Panayotov, H., and Penchev, S.,2017. “Determination of propeller characteristics for multirotor drone design,” *FUNDAMENTAL SCIENCES AND APPLICATIONS*, Cilt. 155.
- Peterson, R. L.,1995. “Full-scale hingeless rotor performance and loads”
- Rodriguez, S., and Robalino, R. R.,2018. “Phantom Drone,”
- Shaheed, R., Mohammadian, A., & Gildeh, H. K. ,2019. A comparison of standard $k-\epsilon$ and realizable $k-\epsilon$ turbulence models in curved and confluent channels. *Environmental Fluid Mechanics*, 19(2), s.543-568.
- Turcanu, D., Nicola, I., Prisecaru, T., Predoi, C., Todirica, C., and Ciobanu, M. C.,2015. “The Influence of Carbon Fiber Propeller on the Brushless DC Motor Control,” *Mat. Plast*, Cilt. 52, s. 525–528.
- Vergouw, B., Nagel, H., Bondt, G., and Custers, B.,2016. “Drone technology: Types, payloads, applications, frequency spectrum issues and future developments,” *The future of drone use*, Springer, s. 21–45.
- What to Look For in a UAV Propeller. Erişim 2021,20 Haziran. *KDE Direct*.
<https://www.kdedirect.com/blogs/news/119379779-what-to-look-for-in-a-uav-propeller>.
- Yang, H., Lee, Y., Jeon, S.-Y., and Lee, D.,2017. “Multi-rotor drone tutorial: systems, mechanics, control and state estimation,” *Intelligent Service Robotics*, Cilt. 10, Sayı. 2, s. 79–93.
- Y plus Wall Distance Estimation. Erişim 2021,20 Haziran -- CFD-Wiki, the Free CFD Reference.
https://www.cfdonline.com/Wiki/Y_plus_wall_distance_estimation.