

MHA TASARIMLARINA İLHAM VEREN KANATLI BÖCEKLERİN UÇUŞ ÖZELLİKLERİ

Dilek Funda KURTULUŞ¹

¹ Dilek Funda KURTULUŞ, ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Email: kurtulus@metu.edu.tr

DOI: [10.23890/SUHAD.2017.0203](https://doi.org/10.23890/SUHAD.2017.0203)

ÖZET

Son yıllarda çırpan kanatlı mikro insansız hava araçları aerodinamiği üzerine çokça incelemeler yapılmaktadır. Kuşlar, böcekler gibi doğal uçan hayvanların uçuş mekanizmaları analiz edilerek insan yapımı robotik insansız hava araçları üretilmektedir. Genel olarak düşük Reynolds sayısındaki akışların incelendiği çalışmalar hem biyolojik uçan hayvanları hem de insan yapımı Mikro Hava Araçları (MHA) kapsamaktadır. Bu çalışmada kanatlı böceklerin uçuşları ve özellikleri mikro hava araçları tasarımına ilham teşkil etmeleri adına özetlenmiştir. Çalışmada ayrıca deneysel çalışmalarda kullanılabilecek boyut analizi gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikro hava araçları, çırpan kanat, kanatlı böcekler, boyut analizi

FLIGHT PROPERTIES OF WINGED INSECTS WHICH INSPIRES THE DESIGNS OF MAVS

ABSTRACT

In the last years, there has been lots of investigation on the aerodynamics of flapping wing micro air vehicles. By analysing the flapping mechanics of natural flyers like birds and insects, human made robotical unmanned aircrafts are manufactured. In general, the works which investigates the flows at low Reynolds numbers covers both the biological flyers and human-made Micro Air Vehicles (MAV). In this work, the flight and properties of winged insects are summarized for the purpose of giving inspiration for the designs of Micro Air Vehicles. In addition, dimensional analysis which could be used for the experimental works is shown.

Keywords: Micro air vehicles, flapping wing, winged insects, dimensional analysis

1. GİRİŞ

Son yıllarda, mikro hava araçları özellikle gözlem ve teslimat gibi askeri ve sivil uygulamalarda çok popüler olmuştur (Babinsky vd. 2010, Ol vd. 2012). Gelişen teknolojiler ve yapılan bilimsel çalışmalar sayesinde mini ve nano hava araçlarının üretimi sağlanmaktadır. Son yıllarda özellikle çırpan kanatlı mikro hava araçları sabit kanatlılara alternatif olarak görülmektedir. Çırpan kanatlı mikro hava araçlarının avantajları arasında yüksek manevra kabiliyeti, hızlı konumlanabilme, sessiz olma, hafif olma, küçük boyutlu olma bulunmaktadır.

Düşük Reynolds sayılarındaki çalışmalar hem kuş/böcek gibi uçan hayvanların özelliklerini anlamak açısından hem de mikro insansız hava araçlarının geliştirilmesi açısından önem arz etmektedir. Maksimum boyutu 15 cm olan ve uçuş hızları 10 m/s civarında bulunan MHA'ların farklı çevreleri gözleme, inceleme ve insanın

giremeyeceği tehlikeli ve küçük alanlara girebilme özellikleri sebebi ile son yıllarda bu konudaki çalışmalara büyük hız verilmiştir. Genel olarak düşük Reynolds sayısındaki akışların incelendiği çalışmalar hem biyolojik uçan hayvanları hem de insan yapımı Mikro Hava Araçları (MHA) kapsamaktadır.

Diğer uçakların aksine bu küçük boyutlu araçların uçuş rejimi 105 Reynolds sayısı ve altında olmaktadır. Düşük Reynolds sayılarındaki çalışmaların azlığı sebebiyle de bu rejimdeki akımlar çok iyi bilinmemektedir (Kurtulus 2015, 2016). Aerodinamik karakteristiklerinin yüksek Reynolds sayılarına göre büyük ölçüde değiştiği anlaşılmaktadır (Kurtulus vd. 2007, 2008). Akış ayrılması ve laminar akımdan türbülanslı akıma geçişte efektif kanat şeklinde değişime sebebiyet vermekte ve bu durum aerodinamik performansı etkilemektedir. Çok hafif yapılı olan bu araçlar aynı

zamanda çok düşük hızlarda hareket etmeleri sebebi ile ani rüzgâr değişimlerine karşı da çok duyarlı olmaktadır. Ayrıca kanat yapılarının çok esnek olması sebebi ile uçuş boyunca deforme olurlar. Bunun sonucunda zamana bağlı aeroelastik kuvvetlerin hesaba katılması gerekmektedir ve uçuş performansının analizleri güçleşmektedir (Shyy vd. 2013).

Çırpın kanatlı mini hava araçları için literatürde farklı mekanizma uygulamaları bulunmaktadır. Birçok araştırmacı DC motor ve/veya servo kullanarak mekanizmayı sürmektedir. Benzer mekanizmaların tasarımında daha önce çark ve yay sistemleri, 4 çubuklu mekanizmalar, farklı materyaller ve menteşeler kullanılmıştır. Bu doğrultuda daha kapsamlı bir literatür taranarak hali hazırda mevcut robot sistemlerinden ve doğada canlı bulunan sinek, kelebek veya kuş türlerinin kas yapılarından esinlenilecektir. Dişli ve dört-çubuk mekanizmaları kullanılarak çeşitli tasarımlar yapılmaktadır (Senol vd. 2015, 2017). Son zamanlarda ise gelişen teknoloji ile birlikte piezoelektrik malzemeler kullanılmaya başlanmıştır (Comez vd. 2015).

Biyo-esinlenmiş çırpın kanat tasarımı büyüyen bir araştırma alanı olmakla birlikte mühendisler, çırpın kanat sistemlerini tasarımlarına adapte etmek için çeşitli yollar aramaktalar. Genellikle, bu alanda çalışan insanlar düşük Reynolds sayısı ile uçanları taklit etmek için ornitopter mekanizmasını kullanmaktadırlar (Tanaka vd. 2008, Wang vd. 2010). Fakat, ornitopter mekanizması aktüatöre ek olarak, dişli sistemi, uzun giriş çubuklara ihtiyaç duymakla birlikte uzun montaj süresi gerektirmekte ve biyo-uyumlu bir çözüm sunmamaktadır. Son dönemlerde, kolay üretilen ve sonucunda hafif bir yapı ortaya çıkaran origami tabanlı tasarımlara da odaklanılmıştır (Beker vd. 2017).

2. YÖNTEM

2.1 Kanatlı böcekler ve uçuş özellikleri

Dünyamızda milyon mertebesinde uçan böcek türü bulunmaktadır. Buna ek olarak 9000'e yakın kuş ve 1000 yarası türü vardır (Shyy vd. 2013). Kuşlar arasında arıkuşu (hummingbird) türünün havada asılı konumda durabilme özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Kanatlı böceklerin havada asılı konumda kalabilme yetenekleri ağırlıklarına, kanat sayısına, kanat çırpma frekansına ve genliğine, kanat alanına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, arılar (Şekil 1) iki kanatlı yapıya sahip iken kelebekler (Şekil 2) veya yusuçuk böcekleri (Şekil 3) dört kanatlı yapıya sahiptirler.

Böcekler iki alt sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar kanatsız böcekler (*Apterygota*) ve kanatlı böcekler (*Pterygota*)'dır. Kanatlı böceklerden bir kısmı kanatlarını karınlarına karşı düz bir şekilde katlama yeteneğine sahiptirler. Bunların büyük bir kısmı *Neoptera* (yeni kanat) olarak adlandırılmaktadır. Kanatlı böceklerden bir diğer kısmı da *Paleoptera*

(eski kanat) olarak adlandırılırlar çünkü *Neoptera* böceklerinin karmaşık kanat katlanma mekanizmasından yoksundurlar. *Paleoptera* takımındaki kanatlı böcekler farklı bir mekanizma kullanarak kanatlarını karınlarına geri katlayamazlar. *Neoptera* böceklerinden olan kelebekler ise kanatlarını karınlarına karşı katlayamazlar ama atalarının bu şekilde kanatlarını katlayabildikleri ve bu geçen süre zarfında bu özelliklerini kaybettikleri düşünülmektedir (New World Encyclopedia, 2008).

Kanatlı böcekler ayrıca kanat yapılarına göre de *Neuroptera* (sinir kanatlılar), *Hymenoptera* (zar kanatlılar), *Hemiptera* (yarım kanatlılar), *Coleoptera* (kın kanatlılar), *Lepidoptera* (pul kanatlılar) ve *Diptera* (çift kanatlılar) gibi çeşitli takımlara ayrılırlar.



Şekil 1: İşçi Arı (*Apis mellifera*) havada asılı konumda uçarken (© D. Funda Kurtuluş-Nikon D90, 2017)

Bazı böceklerde (örneğin düz kanatlar (Orthoptera), sinir kanatlılar (Neuroptera), termit (Isoptera), kızböcekleri (Odonata)) ön ve arka kanatlar uçuş sırasında bağımsız hareket ederler. Örneğin, ön kanat aşağı hareket ederken arka kanat yükselir, ön kanat yükseldiğinde de arka kanat aşağı doğru hareket eder (Wigglesworth, 1972).

Tek bir fonksiyonel şekil oluşturmak için kanatların modifikasyonu, ön kanatlar tarafından üretilen türbülanslı bölgede çırpın arka kanatların dezavantajını ortadan kaldırır. Bu durum düz kanatlar (Orthoptera)'da gözlemlenmekte olup, bir faz farkı yaratılarak ön kanatların yukarı ve aşağı vuruşu arka kanatların önünde gerçekleşmektedir. Yusuçuk böcekleri bu zorluğa aşmış ve kanat çırpma hareketinin sırasını tersine çevirerek nispeten daha etkili bir uçuş tipi geliştirmişlerdir. Arka kanat ilk önce çırpmakta ve gelen akımı ön kanadın çırpma hareketi etkisi olmadan yani akışın bozulmasına izin vermeden önce kullanmaktadır (Wigglesworth, 1972).

Arı, ileri ve geriye doğru hareketini veya havada asılı durmasını bir seferde çırpma hareketini yaptığı düzlemi değiştirerek elde etmektedir. Kanat çırpma

düzlemi yataya yaklaştığında yukarı doğru hareket artmakta ve ileri doğru hareket azalmaktadır. Her iki kanadının çırpma genliğini değiştirerek de yanal hareketler yarattığı görülmektedir. Çırpma frekansı aynı kalmakta ama çırpma hareketinin genliğini bir tarafta azaltarak ve hatta tamamen duruncaya kadar devam edebilmektedir ve böylece yanal hareketler sağlanmaktadır (Wigglesworth, 1972).



Şekil 2: Lahana kelebeği (Large White, *Pieris brassicae*) kanadının yukarı ve aşağı çırpma hareketleri (© D. Funda Kurtuluş-Nikon D90, 2017)

Yarasalar ve kelebekler gibi kanadın gövdeye ağırlık oranı ve atalet momenti büyük olan türler, bir çırpma hareketinde ani yön değişikliklerini kolaylıkla yapabilmektedir (Şekil 2). Bunların büyük atalet momentleri bir iki çırpma periyodunda dönüş manevraları yapabilmelerini sağlamaktadır. Fakat bununla beraber kanat ağırlığının fazla olması sebebiyle kanat çırpma hareketi için daha fazla enerji tüketmektedirler. Zamana bağlı çırpma hareketinin aerodinamiği direk olarak uçuş performans karakterini etkilemektedir. Bu sebeple zamana bağlı aerodinamik kuvvetler, bu tip türler için hem uçuş dinamiği hem de kontrolü ile çok yakından ilişkilidirler (Shyy vd. 2016).

Kaldırma kuvvetinin değişimi kanatlar arasındaki farklı kanat bükme şekilleri ile çoğunlukla kontrol edilmekte ve kanat çırpma frekansı ve çırpma açısının toplam genliği gibi parametreler çoğunlukla sabit kalmaktadır. Güç ise birçok kas lifinin hareket ettirilmesi ile kontrol edilmektedir. Arka kanatlar toplam kaldırma kuvveti ve itki kuvvetinin %70'ini karşılamaktadır ve bunun %80'i aşağı vuruş halinde oluşmaktadır. Aynı zamanda kanat kaslarının bazılarının ayrıca bacak kaslarına alternatif olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir (Wigglesworth, 1972).



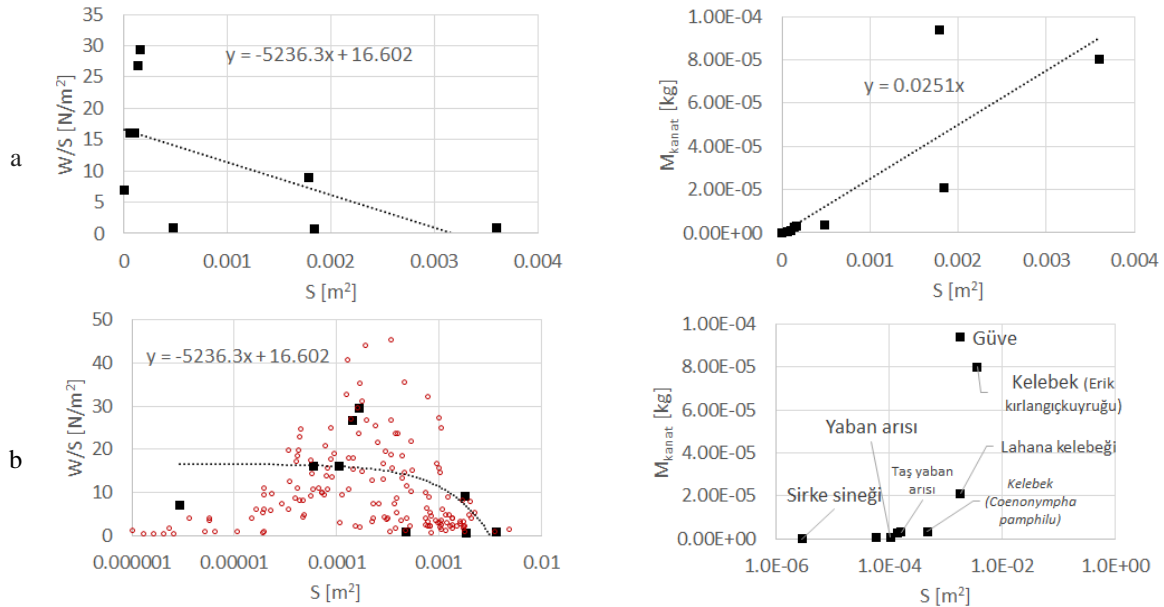
Şekil 3: Yusufçuk böceği (Dragonfly) kanatları esneklik ve anizotropik oluklu yapılar sergiler. Yusufçuk kanadının yakın plan görüntüsü (© D. Funda Kurtuluş, 2015)

Birçok küçük uçan türlerden düşük kanat-gövde ağırlık oranı (M_k/M_g) olanlar, arıkuşu ve böcekler gibi (kelebekler hariç), tüm gövdenin manevra kabiliyetine nazaran daha hızlı kanat çırpma hareketine sahiptirler (Tablo 1). Kaldırma ve sürüklenme ve itki kuvvetlerinin bir çırpma periyodundaki değişimleri daha yumuşak bir şekilde değişmekle birlikte çırpan kanat aerodinamiğinin neredeyse statik olarak kabul edileceği anlamına gelmemektedir (Shyy vd. 2016). Şekil 4'de Tablo 1'deki verilerden yararlanılarak farklı kanatlı böceklerin kanat yükleri (W/S) ve kanat kütleleri (M_k), kanat alanına (S) göre çizilmiştir. Kanat alanı (S) çift kanatlı böcekler için her iki kanadın toplam alanını, dört kanatlı böcekler için de ön ve arka kanatların alanlarının toplamını ifade etmektedir. Farklı boyutlardaki böceklerin oluşturduğu dağılımın daha geniş bir alanda gözlemlenebilmesi amacı ile Şekil 4b'de kanat alanı (S) logaritmik ölçekte çizilmiştir. Şekil 4b'de kırmızı yuvarlak semboller ile gösterilen verilen Byrne (1988)'den elde edilen 160 farklı kanatlı böcek türüne ait verilerdir.

Tablo 1'deki verilerden yararlanılarak oluşturulan Şekil 5'teki grafikler incelendiğinde, kanat/gövde ağırlık oranının yüksek olduğu kanatlı böcek türü olan güve ($f=15$ Hz), kelebek vb. gibi böceklerin kanat çırpma frekanslarının düşük olduğu gözlemlenmektedir. Daha düşük kanat/gövde ağırlık oranına sahip arı veya sirke sineği gibi kanatlı böceklerde ise frekans 150 Hz ve üzerinde olmaktadır (Şekil 5a). Bu böceklerin kanat alanları da güve veya kelebeğe göre çok düşüktür (Şekil 5b).

Tablo 1: Arı, kelebek ve diğer bazı kanatlı böceklerin özellikleri (Shyy vd., 2013; Byrne, 1988)

	f [Hz]	Re	AR	S [m ²]	M _g [kg]	M _k [kg]	M _k /M _g [%]	W/S [N/m ²]
ARI								
Bal arısı (<i>Apis mellifera</i>)	240	1900	6.62	5.98×10 ⁻⁵	9.75×10 ⁻⁵	4.25×10 ⁻⁷	0.44	15.98
Taş yaban arısı (<i>Bombus lapidaries</i>)			6.60	1.65×10 ⁻⁴	4.95×10 ⁻⁴	3.10×10 ⁻⁶	0.63	29.40
Toprak yaban arısı (<i>Bombus terrestris</i>)			7.21	1.42×10 ⁻⁴	3.88×10 ⁻⁴	2.50×10 ⁻⁶	0.64	26.78
<i>Bombus terrestris</i>	150	1200-3000	6.6	1.06×10 ⁻⁴	1.75×10 ⁻⁴	9.0×10 ⁻⁷	0.51	16
Yaban arısı (<i>Hymenoptera</i>)	156	4800	6.6					
KELEBEK								
Erik kırlangıçkuyruğu (Scarce Swallowtail)			1.52	3.6×10 ⁻³	3.00×10 ⁻⁴	8.00×10 ⁻⁵	26.67	0.82
Lahana kelebeği (Large White, <i>Pieris brassicae</i>)	12		2.09	1.84×10 ⁻³	1.27×10 ⁻⁴	2.10×10 ⁻⁵	16.54	0.68
Küçük zıpzıp perisi (Small Heath- <i>Coenonympha pamphilus</i>)			2.13	4.8×10 ⁻⁴	4.60×10 ⁻⁵	3.50×10 ⁻⁶	7.61	0.94
Diğer Kanatlı Böcekler								
Sirke sineği (Fruit fly, <i>Drosophila melanogaster</i>)	200	130-210	2.4	2.9×10 ⁻⁶	2.0 × 10 ⁻⁶	9.6 × 10 ⁻⁹	0.48	7
Güve (Hawkmoth, <i>Manduca sexta</i>)	25	4200-5300	5.3	1.782×10 ⁻³	1.579×10 ⁻³	9.4×10 ⁻⁵	5.95	9



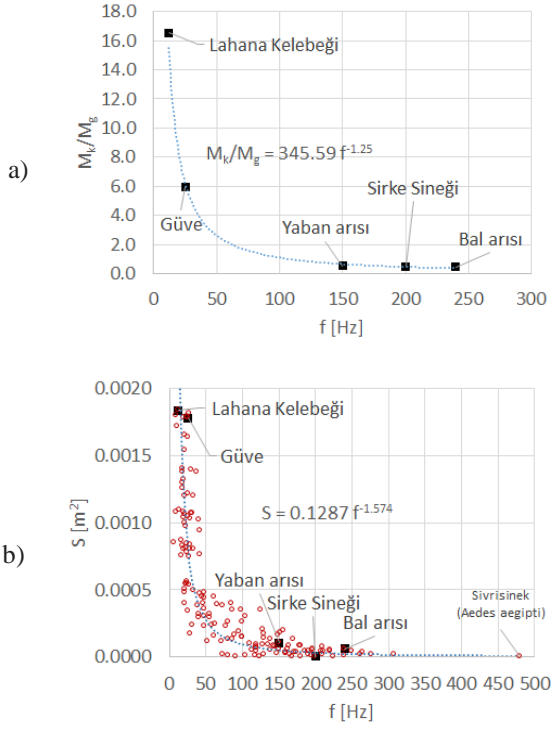
Şekil 4: Farklı kanatlı böceklerin kanat yükünün ve kanat ağırlığının, kanat alanına göre grafikleri (a) lineer b) yarı-logaritmik (o Byrne (1988); ■ Tablo 1 verileri)

Şekil 5'deki veriler kullanılarak eğri uydurulmuştur ve kanat/gövde ağırlık oranının kanat frekansına göre denklemi Denklem 1' de verilmiştir. Şekil 5b'de Byrne (1988)'den elde edilen 160 farklı kanatlı böcek türüne ait veriler (kırmızı yuvarlak semboller) de Tablo 1 verilerine ek olarak kullanılmıştır. Kanat alanının kanat çırpma frekansına göre denklemi tüm bu veriler

kullanılarak oluşturulmuş ve Denklem 2'de gösterilmiştir.

$$\frac{M_k}{M_g} = 345.59f^{-1.25} \quad (1)$$

$$S = 0.1287f^{-1.574} \quad (2)$$

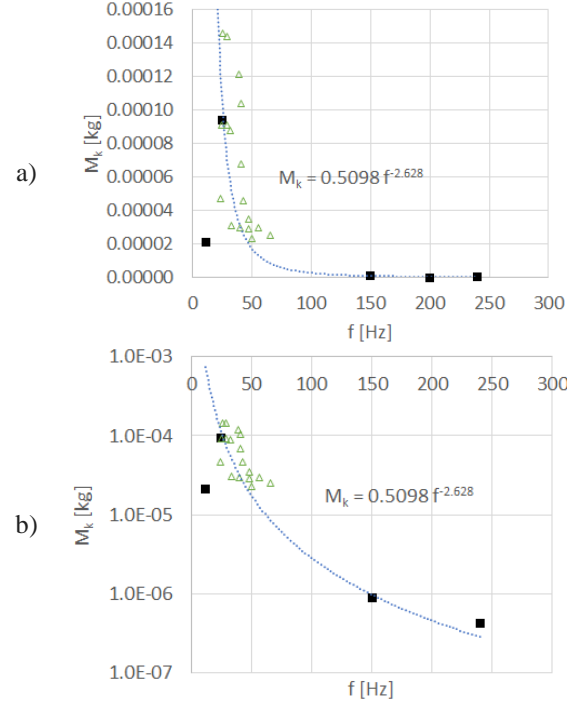


Şekil 5: Kanatlı böceklerin a) kanat-gövde ağırlık oranının ve b) kanat alanının kanat çırpma frekansına göre grafikleri (○ Byrne (1988); ■ Tablo 1 verileri)

Casey (1981) özellikle güveler üzerinde yaptığı çalışmasında kanatların uzunlukları, ağırlıkları ve kanat çırpma frekansları ile ilgili veriler vermiştir. Bu çalışması ile Tablo 1 verilerinden kanat kütlelerinin frekans ile grafikleri Şekil 6a'da lineer ve Şekil 6b'de yarı logaritmik olarak gösterilmektedir. Bu veriler sonucunda da Denklem 3'de verilen kanat kütlelerinin kanat çırpma frekansına interpolasyon denklemi elde edilmiştir.

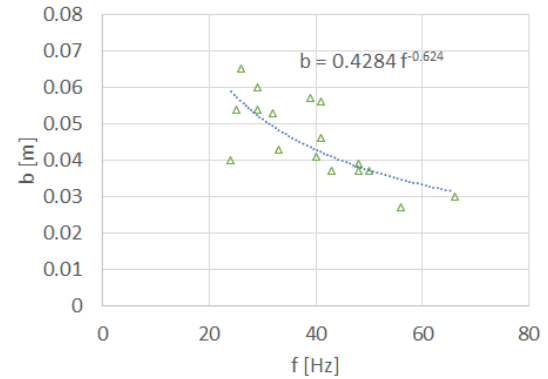
$$M_k = 0.5098f^{-2.628} \quad (3)$$

Kanatların çırpma frekansı farklı türlerde çok değişmektedir. Bazı çalışmalar, çırpma hareketi sonucunda oluşan sesin ölçülmesi ile kanadın çırpma frekansının elde edilmesi yönündedir ama bu yöntem ile elde edilen verilerin çok yüksek çıkması nedeni ile her kanadın iki basınç dalgası oluşturduğu ve oluşan tonların titreşim değerinin bulmakta zayıf bir ölçü olduğu düşünüldü. Sonraki zamanlarda da bu oran, kanat ucuna konan bir izleyici ile izlenerek tahmin edilmiştir. Kymograph, sinematograf veya stroboskopik yöntemler kullanılarak bir ışık kaynağının frekansı kanat çırpma hareketi ile senkronize edilip kanadın hareketsiz gözüktüğü durumda kanadın çırpma frekansı kaydedilmiştir. Farklı çalışmalarda elde edilen frekans değerleri Tablo 2'de verilmektedir. Kanatlı böceklerin çırpma frekansının çoğunluğu uçuşları esnasındaki ses tonundan çıkarılmıştır (Wigglesworth, 1972).



Şekil 6: Kanatlı böceklerin kanat kütlelerinin ve kanat çırpma frekansına göre a) lineer b) yarı logaritmik grafikleri (△ Casey (1981); ■ Tablo 1 verileri)

Casey (1981) tarafından güveler üzerinde elde edilen veriler ışığında kanat açıklığının kanat çırpma frekansına grafiği de Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7: Kanat açıklığının kanat çırpma frekansına grafiği (△ Casey, 1981)

Büyük kelekler (Papilio) için bu değerler 5-9 Hz civarında iken erken sivrisineklerde (Aedes) 587 Hz'e ve uçuş kasları çok gelişmiş olan Ceratopogonid Forcipomyia'larda 988-1047'ye çıkmaktadır. Yapılan çalışmalarda kuşlar arasında en hızlı çırpma frekansına sahip kuş ise 30 Hz - 50 Hz arasında kanat çırpan arıkuşu olduğu belirtilmiştir. Bu güvelere kanat çırpma frekansına yakın bir frekanstır. Çırpma frekansı aynı zamanda böceğin yaşı, ortamın nemi ve derecesi gibi faktörlerle de değişmektedir. Örneğin Drosophila melanogaster'in 10°C'deki kanat çırpma frekansı 150 Hz iken 37°C'de 250 Hz'e ulaşmaktadır. Bu

frekanslar ayrıca böceğin yorulması ile de düşmektedir (Wigglesworth, 1972).

Kanatlı böcekler üzerine yapılan çalışmalar birçok mikro hava aracı aerodinamik çalışmasına esin kaynağı olmuştur. Literatürde en çok atıf yapılan çalışmalardan biri Dickinson ve ekibi tarafından gerçekleştirilen (Dickinson, 1994; Dickinson vd., 1999; Sane ve Dickinson, 2001; Birch ve Dickinson, 2001; vs.) ölçeklendirilmiş bir *Drasophila* kanadının dinamik modelinin testleri ve aerodinamik kuvvetlerin ölçümüdür. Bu çalışmaların özeti ve kullanılan parametreler Tablo 3'de özetlenmiştir (Kurtuluş, 2005).

Dört çubuk mekanizması ve/veya piezoelektrik malzeme kullanılarak üretilen farklı mikro insansız hava araçlarında kullanılan ölçeklendirilmiş böcek kanatlarının özeti Tablo 4'de verilmektedir.

Tablo 2: Farklı kanatlı böceklerin kanat çırpma frekansları ve ileri uçuş hızları (Wigglesworth, 1972, Shyy, 2013)

	Frekans f [Hz]	İleri uçuş hızı [m/s]
Zar Kanatlılar (Hymenoptera)		
Bal arısı (<i>Apis</i>)	190-250	2.5-3.7
Bombus	130, 240	3-5
Eşek arısı (<i>Vespa</i>)	110	
Yaban arısı (<i>Bombus terrestris</i>)	150	4.5
Çift Kanatlılar (Diptera)		
Tipulids	44-73	
Culex	278-307	
Tabanus	96	4, 14
Musca	180- 197, 330	2
Muscina	115-220	
Sirke Sineği (Fruit fly, <i>Drosophila Melanogaster</i>)	200	2
Pul Kanatlılar (Lepidoptera)		
Beyazlar (<i>Pieris</i>)	9, 12	1.8-2.5
Dumanlı Sarılar (<i>Colias</i>)	8	
Saturnia	8	
Macroglossa	72, 85	5
Acidalia	32	
Sphingids		15
Güve (Hawkmoth, <i>Manduca sexta</i>)	25	5
Kın Kanatlılar (Coleoptera)		
Melolontha	46	2.2-3
Uğur böceği familyasının alt cinsi (<i>Coccinella</i>)	75-91	
Rhagonycha	69-87	
Kızböcekleri (Odonata)		
Kızböceğigiller familyasının alt cinsi (<i>Libellula</i>)	20	4-10
Asil Yusufçuk familyasının alt cinsi (<i>Aeschna</i>)	22, 28	

Tablo 3: Dickinson'ın çalışmalarında *Drasophila* kanadı ile ilgili deneylerin parametrelerinin karşılaştırılması (U ileri uçuş hızı, c veter uzunluğu, v kinematik viskozite, f frekans, Re Reynolds sayısı ve k indirgenmiş frekans'dır) (Kurtuluş, 2005)

	U [cm/s]	c [cm]	v [cm ² /s]	f [Hz]	Re=Uc/v	k=2πfc/U
Dickinson (1994)	12	5	0.25 (%54 sakaroz çözümü)	625 rad/s	236	4.5
<i>Drosophila</i> özelliği (Dickinson, 1994)	125	0.0085	0.1454 (hava)	3.8x10 ⁵ rad/s	236	4.5
Sane ve Dickinson (2001)	15-25	6.256	1.15 (mineral yağ)	0.145	136	
<i>Drosophila</i> özelliği (Sane ve Dickinson, 2001; Dickinson vd. 1999)	280 (kanat ucu ortalama hızı)				136	
Sane ve Dickinson (2001)			1.2 (mineral yağ)	0.168	~10 ²	
Birch ve Dickinson (2001)			1.15	0.168	160 (ortalama Re sayısı)	
Dickinson ve Götz (1993)	4 ile 12 arası [62.5 cm/s ² lik ivme ile sıfırtan sabit hıza ulaşarak]	5	0.22-0.25 (%54 sakaroz çözümü)		10m/s için Re=192	

Tablo 4: Dört çubuk mekanizması ve/veya piezoelektrik malzeme kullanılarak tasarlanan mikro hava aracı sistemlerinin özellikleri (Senol, 2016)

	Örnek alınan böcek kanadı	Çırpma hareketi genliği	f [Hz]	Ağırlık	Mekanizma türü	Piezoelektrik malzeme (PZT) türü
Fearing vd. (2000)	Et sineği (<i>Calliphora</i>)	60°	17	43 mg	Dört-çubuk	5H Unimorph
Syaifuddin vd. (2005)	Drosophila	60°	9	20 g	Dört-çubuk	Unimorph
Syaifuddin vd. (2006)	Etsineği (<i>Calliphora erythrocephala</i>)	90°	10	-	Dört-çubuk	Unimorph
Truong vd. (2011)	Güve (<i>Hawkmoth</i>)	92°	17	-	Dört-çubuk	3203 HD
Wood (2007)	Tipula sineği (<i>Diptera</i>)	120°	-	60 mg	Krank-biyel	-
Hines (2012)	Karasinek (<i>Housefly</i>)	100°	26	0.65	Krank-biyel	5H Bimorph

2.2 Boyut Analizi

Kanatlı böceklerin yüksek frekanslarda kanat çırpmaları ve kanat boyutlarının çok küçük olması dolayısıyla deneysel ölçümlerde kullanılan kamera veya ölçüm sistemleri yetersiz kalmaktadır. Çırpma kanat probleminin deneysel olarak laboratuvarında bire bir boyutta test edilmesinin bu gibi sebeplerden ötürü mümkün olmadığı koşullarda boyut analizinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Çırpma kanat probleminde, yedi geometrik ve akış parametresinin aerodinamik kuvvetleri bulmak için önemli olduğu analiz edilmiştir. Bunlar dışında boyutsuz (ünitesiz) olan hücum açısı (α) da kuvveti etkileyen bir diğer parametredir. Kuvvet kanadın hızına (U), akışkanın yoğunluğuna (ρ), kanadın veterine (c), akışkanın viskozitesine (μ), kanat çırpma periyoduna (T), çırpma hareketinin uzunluğuna x_T (İki boyutlu analizlerde kanadın yol aldığı toplam uzunluk, üç boyutlu analizlerde kanat uç noktasının aldığı yol olarak tanımlanabilir. Üç boyutlu analizlerde bu parametre yerine boyutsuz bir değer olan kanat çırpma açısının genliği kullanılmaktadır.) ve yunuslama açısına (ω) bağlıdır (Kurtulus, 2005). Tablo 5 iki boyutlu çalışmalar için örnek olarak verilmiştir. Boyut analizinde esas değişkenler U , ρ ve c olarak alınmıştır. MLT boyut sistemi kullanılarak Buckingham Pi teoremi (Fox vd., 2015) uygulandığında beş boyutsuz parametre elde

edilmiştir (Denklem 4). Analiz sonucu elde edilen parametreler Denklem 5-9'da verilmektedir. Hücum açısı denklemlerde ünitesiz (boyutsuz) bir parametre olduğu için belirtilmemiştir ancak geometrik benzeşim için gerekli bir parametredir.

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5) = 0 \quad (4)$$

$$\Pi_1 = \frac{F'}{\rho U^2 c} \quad (5)$$

$$\Pi_2 = \frac{\mu}{\rho U c} = \frac{1}{\text{Re}} \quad (6)$$

$$\Pi_3 = \frac{TU}{c} = \frac{U}{fc} = \frac{2\pi}{k} \quad (7)$$

$$\Pi_4 = \frac{x_T}{c} \quad (8)$$

$$\Pi_5 = \frac{\omega c}{U} \quad (9)$$

Böceklerin uçtuğu ortamın hava olduğu göz önüne alınarak 1 nolu değerler hava olarak alındığında deneysel olarak yapılan çalışmaların su, yağ veya farklı ortamlarda yapılması sonucunda aşağıdaki benzeşim kuralları uygulanarak 2 nolu deneysel modelin ileri hızı, çırpma frekansı, boyutu ve açılal hızı hesaplanabilir (Denklem 10-13).

Tablo 5: Boyut Analizi

	$F' = \text{Kuvvet/kanat}$ açıklığı [kg/s ²]	U [m/s]	ρ [kg/m ³]	c [m]	μ [kg/ms]	T [s]	x_T [m]	ω [rad/s]
M	1	0	1	0	1	0	0	0
L	0	1	-3	1	-1	0	1	0
T	-2	-1	0	0	-1	1	1	-1

$$\frac{\mu_1}{\rho_1 U_1 c_1} = \frac{\mu_2}{\rho_2 U_2 c_2} \text{ veya } Re_1 = Re_2$$

$$U_2 = U_1 \left(\frac{\mu_2 \rho_1 c_1}{\mu_1 \rho_2 c_2} \right) = U_1 \left(\frac{v_2 c_1}{v_1 c_2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{T_1 U_1}{c_1} = \frac{T_2 U_2}{c_2} \quad T_2 = T_1 \left(\frac{U_1 c_2}{U_2 c_1} \right) \quad (11)$$

$$\frac{x_{T_1}}{c_1} = \frac{x_{T_2}}{c_2} \quad x_{T_2} = x_{T_1} \left(\frac{c_2}{c_1} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\omega_1 c_1}{u_1} = \frac{\omega_2 c_2}{u_2} \Rightarrow \omega_2 = \omega_1 \left(\frac{u_2 c_1}{u_1 c_2} \right) \quad (13)$$

Boyut analizindeki temel amaç, havada yüksek hızda veya frekansta gerçekleştirilen kanat çırpma hareketlerinin mineralli yağ veya su gibi farklı ortamlarda daha düşük frekans ve hızlarda benzeşim parametreleri neticesinde aynı akışı oluşturmalarıdır. Böylece tam benzeşim neticesinde aynı boyutsuz aerodinamik kuvvetler elde edilebilmektedir. Boyut analizi, kuvvet ölçüm sensörleri veya akış görüntüleme için kullanılan Parçacık Görüntü Hız Ölçüm (Particle Image Velocimetry, PIV) sistemi gibi ölçüm sistemlerinin daha düşük frekanslar kullanılabilmesine olanak sağlanmaktadır (Kurtuluş, 2005).

3. SONUÇ

Bu çalışmada kanatsız böceklerin sınıflandırılması özetlenmiştir. Böcekler iki alt sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar kanatsız böcekler (Apterygota) ve kanatlı böcekler (Pterygota)'dir. Kanatlı böcekler de Neoptera (yeni kanat) ve Paleoptera (eski kanat) olarak iki farklı sınıfta incelenmektedir. Kanatlı böcekler ayrıca kanat yapılarına göre de çeşitli takımlara ayrılırlar.

Kanat/gövde ağırlık oranının yüksek olduğu güve ($f=15$ Hz), kelebek vb. gibi böceklerin kanat çırpma frekanslarının düşük olduğu gözlemlenmektedir. Daha düşük kanat/gövde ağırlık oranına sahip arı veya sirke sineği gibi böceklerde ise frekans 150 Hz ve üzerinde olmaktadır. Bu çalışmada literatürdeki farklı kanatlı böcek türleri verileri toplanarak kanat/gövde ağırlık oranının, kanat kütesinin ve kanat alanının kanat frekansına göre eğri denklemleri verilmiştir.

Doğada bulunan çırpan kanatlı böcekler bakıldığında üç boyutlu kanat çırpma hareketinin farklı frekanslarda ve genliklerde olduğu ayrıca kanatların aeroelastik yapılarının oluşan aerodinamik kuvvetleri büyük ölçüde etkiledikleri gözlemlenmektedir. Gerçek zamanlı uçuş gereksinimlerine bağlı olarak, bu karmaşık hareketler ve kanat şekilleri farklı uçuş ortamlarında istenilen kaldırma ve itme kuvvetlerini üretebilmektedir. Günümüzde, uçan böcek veya kuşlardan esinlenilerek üretilen çırpan kanatlı mikro hava araçları mevcuttur. Fakat bu araçların büyük bir bölümü test aşamasındadır ve doğadaki canlıların özelliklerine ve hızlı manevra kabiliyetlerine büyük ölçüde sahip değillerdir. Bu

çalışmada, mikro hava araçları tasarımında kullanılacak böcek kanat yapılarının, daha büyük boyutlarda veya farklı akışkan tipleri kullanılarak (yağ, su vb.) laboratuvar ortamında test edilebilmesi amacı ile boyutlandırma analizi açıklanmıştır. Teknolojinin gelişmesi; sensör, batarya vb. sistemlerin daha küçük ve verimli hale getirilmesi sonucunda robotik mikro ve nano hava araçlarının kullanımının gelecekte daha da artacağı öngörülmektedir.

SEMBOLLER DİZİNİ

AR	: Kanat açıklık oranı
b	: Kanat açıklığı [m]
c	: Veter uzunluğu [m]
f	: Kanat çırpma frekansı [Hz]
F'	: Kuvvet/kanat açıklığı [kg/s ²]
k	: İndirgenmiş frekans
M _g	: Gövde kütesi [kg]
M _k	: Kanat kütesi [kg]
Re	: Reynolds sayısı
S	: Kanat alanı (dört kanatlı böcekler için ön ve arka kanatların toplam alanı)[m ²]
T	: Kanat çırpma periyodu [s]
U	: İleri uçuş hızı [m/s]
W/S	: Kanat yükü [N/m ²]
x _T	: Kanat çırpma hareketinin uzunluğu [m]
α	: Hücum açısı [°]
ρ	: Akışkanın yoğunluğu [kg/m ³]
μ	: Dinamik viskozite [kg/ms]
ν	: Kinematik viskozite [m ² /s]
ω	: Yunuslama açısal hızı [rad/s]

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK 116M273 nolu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Babinsky, H., Baik, Y., Bansmer, S., Beran, P., Bernal, L., Gunaydinoglu, E., Jones, A., Kang, C.-K., Konrath R., Kurtuluş, D. F., Ol, M., Paquet, J-B., Radespiel, R., Reichert, T., Rival, D. Shyy W., Ukeiley, L., Visbal, M.R., Yuan W. (2010) Unsteady Aerodynamics for Micro Air Vehicles, NATO Technical Report, RTO-TR-AVT-149, ISBN 978-92-837-0118-7, NATO Research and Technology Organisation, Mart 2010.
- Beker C., Turgut A. E. , Ozcan O., Arıkan K. B., Kurtuluş D. F. (2017) Design of a Novel Foldable Flapping Wing Micro Air Vehicle, AIAC-2017-138, 9'uncu Ankara Uluslararası Havacılık-Uzay Konferansı, 20-22 Eylül 2017, Ankara.
- Birch, J. M., Dickinson, M. H. (2001) Spanwise flow and the attachment of the leading-edge

- vortex on insect wings, *Nature* 412, sayfa 729-733.
- Byrne D. N. (1988) Relationship between wing loading, wingbeat frequency and body mass in homopterous insects, *J. exp. Biol.*; 135, sayfa 9-23.
- Casey T. M. (1981) A comparison of mechanical and energetic estimates of flight cost for hovering sphinx moths, *J. exp. Biol.*, 91, sayfa 117-129
- Comez Y.F., Senol M.G., Kurtulus D.F., Arıkan K.B. (2015) Unsteady Aerodynamic Analysis of a Flapping Wing Actuated with PZT Material, Workshop on Non-Intrusive Measurements of Unsteady Flows and Aerodynamics, Poitiers, France, 27-29 Ekim 2015.
- Dickinson, M. H., Lehmann Fritz-Olaf, Sane S., P. (1999) Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight. *Science*, Vol.284, sayfa 1954-60,1999.
- Dickinson, M.H., Götz, K. G. (1993) Unsteady Aerodynamic Performance of Model Wings at Low Reynolds Numbers. *J.exp. Biol.*; Vol.174, sayfa 45-64.
- Dickinson, M. H. (1994) The Effects of Wing Rotation on Unsteady Aerodynamics Performance at Low Reynolds Numbers. *Journal of Experimental Biology*, Vol. 192, Issue 1, sayfa 179-206.
- Fearing, R.S., Chiang, K.H., Dickinson, M.H., Pick, D.L., Sitti, M., Yan, J. (2000) Wing transmission for a micromechanical flying insect. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*.
- Fox R, McDonald A. T., Pritchard P. J., Leylegian J. C., Mitchell J. W. (2015), *Fluid Mechanics*, 9. Baskı, John Wiley and Sons, 7. Bölüm.
- Hines, L. (2012) Design and control of a flapping flight micro aerial vehicle, *Doktora Tezi*, Mart 2012.
- Kurtulus DF (2005) Numerical and Experimental Analysis of Flapping Motion in Hover. Application to Micro Air Vehicles. *Doktora Tezi (Çift taraflı)*, Poitiers University/ENSMA-ODTÜ, 17 Haziran 2005, Poitiers, Fransa
- Kurtulus D.F., David L., Farcy A., Alemdaroglu N. (2008) Aerodynamic Characteristics of Flapping Motion in Hover. *Experiments in Fluids*, Vol. 44, sayfa 23–36
- Kurtulus DF, David L, Farcy A, Alemdaroglu N (2007) Flapping Airfoil Analysis of Micro Air Vehicles using Star-CD, *Star-CD Dynamics*, Vol:27, sayfa 22-23 (http://www.cdadapco.com/press_room/dynamics/27/airfoil.html)
- Kurtulus DF (2015) On the unsteady behavior of the flow around NACA 0012 airfoil with steady external conditions at $Re=1000$, *International Journal of Micro Air Vehicles*, Vol. 7, No 3, sayfa 301-326, Eylül 2015
- Kurtulus DF (2016) On the wake pattern of symmetric airfoils for different incidence angles at $Re=1000$, *International Journal of Micro Air Vehicles*, Vol 8, No:2, sayfa 109-139
- New World Encyclopedia (2008) http://www.newworldencyclopedia.org/entry/N_eoptera
- Ol M., Beran P., Radespiel R., Kurtulus D.F., Watkins S., Rival D., Yuan W., Luc-Bouhali A., Konrath R., Tropea C., Voersmann P., Wolf T., Iosilevski G., Lentink D., Ruijsink R., Bayrak M., Caylar S., Icen I, Temiz K, Vardar K., Babinsky H., Bomphrey R., Jones C., Sibilski K., Abate G., Babcock J., Banda S., Bernal L., Chankaya K., Cox C., Fahroo F., Flynn A., Kobayashi M., Shkarayev S., Surampudi S., *Flight Physics in Micro Air Vehicles and in Nature*, Final Report of Workshop AVT-182, RTO TECHNICAL MEMORANDUM, RTO-TM-AVT-182, Ağustos 2012.
- Sane, S., Dickinson, M. H. (2001) The Control of Flight Force by a Flapping Wing: Lift and Drag Production. *J. of Exp. Biology*; 204; sayfa 2607-2626.
- Senol M. G. (2016) Design and Testing of a Four-bar Flapping Wing Mechanism, *Yüksek Tezi*, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Havacılık ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı, Şubat 2016.
- Senol M. G., Arıkan K.B., Kurtulus D.F. (2017) Experimental and Numerical Results of a Flapping Wing Four Bar Mechanism, 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting , AIAA Scitech Forum, AIAA 2017-0498, 9-13 Ocak 2017
- Senol M.G., Comez F.Y., Kurtulus D.F., Arıkan K.B.(2015), Testing of Flapping Wing Four-Bar Mechanism, Workshop on Non-Intrusive Measurements of Unsteady Flows and Aerodynamics, Poitiers, France, 27-29 October 2015.
- Shyy W., Aono H. , Kang C, Hao Liu H. (2013), *An Introduction to Flapping Wing Aerodynamics*, Cambridge Aerospace Series, 1. Baskı, 2013
- Shyy W, Kang C, Chirarattananon P, Ravi S, Liu H. (2016) Aerodynamics, sensing and control of insect-scale flapping-wing flight. *Proceedings Mathematical, Physical, and Engineering Sciences / The Royal Society*. 472(2186):20150712. doi:10.1098/rspa.2015.0712.
- Syaifuddin, M., Park, Yoon, J. K., Goo, N.S. (2005) Design and evaluation of LIPCA-actuated flapping device. *Smart Structures and Materials*, Vol. 5764.
- Syaifuddin, M., Park, H.C., Lee, S.K., Byun, D.Y. (2006) An improved flapping wing system actuated by the LIPCA, *Smart Structures and Materials*, Vol. 6173.

- Tanaka, H., Matsumoto, K. and Shimoyama, I. (2008) Design and Performance of Micromolded Plastic Butterfly Wings on Butterfly Ornithopter, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Eylül 2008.
- Truong, Q.T., Nguyen, Q.V., Park, H.C., Byun, D.Y., Goo, N.S. (2011) Modification of a four-bar linkage system for a higher optimal flapping frequency. Journal of Intelligent Material Systems and Structures
- Wang, C., Zhou, C., Zhang, X. and Liu, C. (2010) An optimization on single-crank-double-rocker flapping wing mechanism, Fourth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, Temmuz 2010.
- Wood, R.J. (2007) Design, fabrication and analysis of a 3 DOF, 3 cm flapping-wing MAV. IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems.
- Wigglesworth V. B. (1972) The Principles of Insect Physiology, Chapman and Hall Ltd., New York, 7. Baskı