

PIEZOELEKTRİK EYLEYİCİ İLE TETİKLENEN GÜVE BÖCEĞİ KANADIN AERODİNAMİK KUVVET DENEYSSEL OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI

Fadile Yudum ÇÖMEZ¹ ve Dilek Funda KURTULUŞ²
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada piezoelektrik eyleyici ile tetiklenen güve böceği ön kanadının ve dikdörtgen kanatların deneysel analiz sonuçları incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında dikdörtgen plakaya ek olarak üç boyutlu güve böceği kanat profili de kullanılmıştır. Asıl amaç piezoelektrik malzemenin kanat üzerindeki hareket ettirici etkisiyle, düşük frekanslardan başlanarak frekans değerleri arttırıldıkça, frekans ve taşıma kuvveti arasındaki ilişkiyi analiz etmek ve kuvvet sensörüne etkileyen kuvvet değerini farklı frekanslarda ölçmektir. Piezoelektrik hareketinin kanat profili üzerindeki etkisi çarpma hareketi olarak oluşmaktadır. İki adet aynı boyutta ve farklı şekilde kanat profili test edilmiştir. İlki güve böceğinin ön kanadıyla aynı olarak tasarlanmıştır, CAD çizimlerinden kanat profili çıkarılmış ve alüminyum alaşım plakadan üretilmiştir. Diğer kanat ise dikdörtgen şeklindedir. Ayrıca daha büyük boyutta bir dikdörtgen levha ile de sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kanat profilleri için kuvvet ve momentler, çarpma frekansındaki değişimler sonucunda ölçülerek incelenmiştir.

GİRİŞ

Wu vd. (2008) çırpan kanatlı mikro hava araçlarının tam alanlı deplasman ölçümlerinin dijital görüntüleme teknikleriyle ilişkisini incelemek adına bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma hava ve vakum ortamlarında olmak üzere iki kez tekrarlanmıştır ve çalışmada stroboskopik DIC (digital image correlation) deney düzeneği kurulmuştur. Düzenekte dört adet Flea2 kamera, 12–36 mm F2.8 C- lensler kullanılmıştır. Kalibrasyon işlemleri ise donanımsal uygunluklar göz önüne alınarak yapılmıştır. Kalibrasyon işlemi 5 Hz çarpma frekansı ve 90 derece çarpma büyüklüğü için gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan beklenen en önemli ve gerekli adım, katı kanat (rigid wing) veya vakum içine yerleştirilen esnek kanattan (flexible wing) yeteri ve gerekli kaldırma kuvveti (lift) ve itme kuvvetini üretmemiş olmasıdır. Wu vd. (2010) 2008 yılında yaptıkları çalışmaya ek olarak kanat yapısını daha katı (stiff) hale getirmek için çeşitli denemelerde bulunmuşlardır. Aynı Zimmerman model kanadı en-boy oranı daha önceki çalışmayla aynı olacak şekilde kullanmışlardır. Deneyde fırçasız düz akım motoru kullanarak kanat düzeneğine iki çeşit hareket verilmiştir: ileri geri hareketi (öteleme) ve çarpma hareketi. Böylece aerodinamik kuvvetlerin ölçümünü ve kanatların kinematik deformasyonlarını kuvvet/moment sensörü ve hızlı kamera sistemiyle ölçümleyebilmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda aerodinamik kuvvetleri elde edebilmişler, aerodinamik kuvvetlerin kanat yapısında meydana getirdiği deformasyonları karakterize edebilmişlerdir. Deneysel çalışmaların yanı sıra Kurtulus vd. (2004,2005,2006) ve Kurtulus (2005, 2015, 2016) tarafından düşük Reynolds sayılarında birçok deneysel ve sayısal analizleri içeren çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Nagakalyan vd. (2013) üç farklı tipte (PMNPT, PZT-5A ve PZT-5H) piezoelektrik malzeme için sonlu elemanlar metodunu kullanarak blok kuvvet ve

¹ Doktora öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh., E-posta: yudum.comez@metu.edu.tr

² Doç. Dr. Havacılık ve Uzay Müh., E-posta: funda.kurtulus@ae.metu.edu.tr

piezo ucunun deplasman hareketlerini incelemişlerdir. Piezoelektrik malzemelerin boyutları, geometrik şekilleri ve piezolara uygulanan voltaj değerleri aynı olup COMSOL yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar metodu analizlerini analitik metotlarla karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmalarının sonucunda Alimünyum plaka üzerine yapıştırılan PMNPT piezoelektrik malzemenin blok kuvvet ve piezonun ucunun deplasman değerinin en iyi sonuçları verdiğine karar vermişlerdir. Nguyen vd. (2007) unimorph piezoelektrik malzemeyi çirpan kanat mekanizmasında kullanarak yaptıkları çalışmada iki farklı piezoelektrik malzeme kullanmışlardır (LIPCA-C3 ve THUNDER). Yaptıkları deneysel çalışmaların sağlamlasını sonlu elemanlar metodu ile doğrulamışlardır. Böylece unimorph piezoelektrik malzemelerin yarattıkları deplasman değerlerini karşılaştırabilmişlerdir. Ha vd. (2015) 3 boyutlu görüntü alabilen ARAMIS hızlı kamera sistemiyle yapay kanat modelinin yapısal analizidir. Yaptıkları deneysel çalışmayı ANSYS sayısal analiz programında sonlu elemanlar metoduyla sağlamışlardır. Deneysel çalışmada sinüs dalgasını belirli bir frekans aralığında tetikleyici (shaker) kullanarak kanada vermişlerdir ve hem deneysel hem de sayısal analizlerin sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda deneysel sonuçlara yakın sayısal analiz sonuçları elde etmişlerdir. Comez vd. (2015) arıkuşu ve dikdörtgen kanat profillerini piezoelektrik malzeme (PZT-5H) aracılığıyla çırpma hareketi yaptırmışlardır. Farklı frekanslarda sinüs dalga boyu verdikleri kanatları ARAMIS hızlı kamera ve ATINano kuvvet/tork sensör sistemlerini bir arada kullanarak kuvvet ölçümleri yanı sıra deplasman ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Böylece doğal frekans ve maksimum deplasman arasındaki bağlantıyı incelemişlerdir.

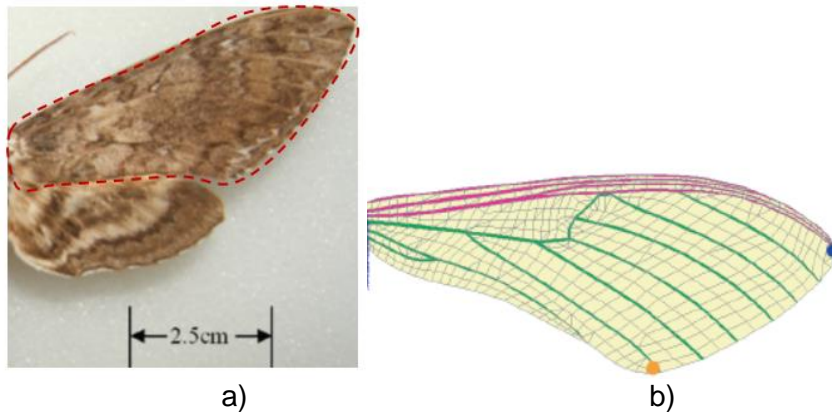
YÖNTEM

Piezoelektrik Malzemenin Kullanıldığı Deneysel Düzenek

Deneyde kullanılan model güve böceğinin ön kanadıdır. Seçtiğimiz kanadın gerçek boyut ölçeği Şekil 1 de verilmiş olup, deneyimiz için küçük olan bu ölçeğe göre gerçek ölçü oranlarına adık kalarak kanat profilinin boyutu büyütülmüştür. Bu işlemi yaparken, kanadın uzunluğu ve ortalama kanat veter uzunluğunu hesaplanmıştır. Dikdörtgen plaka için de bu değerler kullanılmıştır (Çizelge 1). Ayrıca aynı boyutlardaki bu iki farklı kanat modeline ek olarak bir adet büyük dikdörtgen plaka modeli kullanılmıştır. Bu modelin değerleri de Çizelge 1 de gösterilmiştir.

Piezoelektrik malzeme kullanılarak kanat modelleri voltaj yükseltici (amplifier) aracılığıyla $A=200$ V genliğinde ve farklı frekanslarda zamana bağlı voltaj verilerek tetiklenmişlerdir. Bu sayede kanatlarda hareket oluşturulmuştur. Buna bağlı olarak piezoelektrik malzemeye girdi olarak verilen hareket Denklem 1' deki şekilde ifade edilmiştir.

$$T = A * (2\pi * f * t) \quad (1)$$

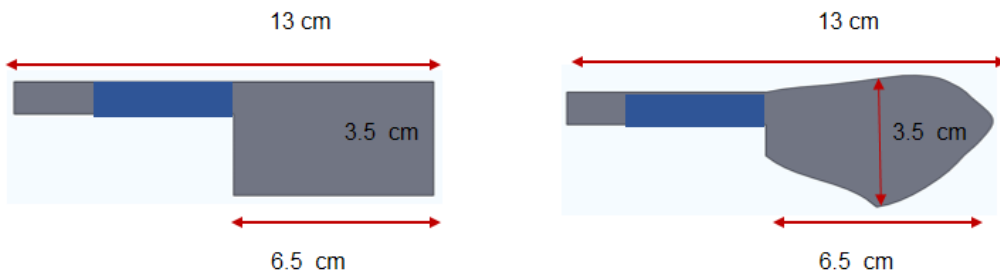


Şekil 1: a) Gerçek yetişkin dişi güve böceği kanadı (Sims vd., 2010), b) Örnek çizim olarak alınan kanat modeli (Combes vd. 2003).

Çizelge 1: Model kanatların özellikleri

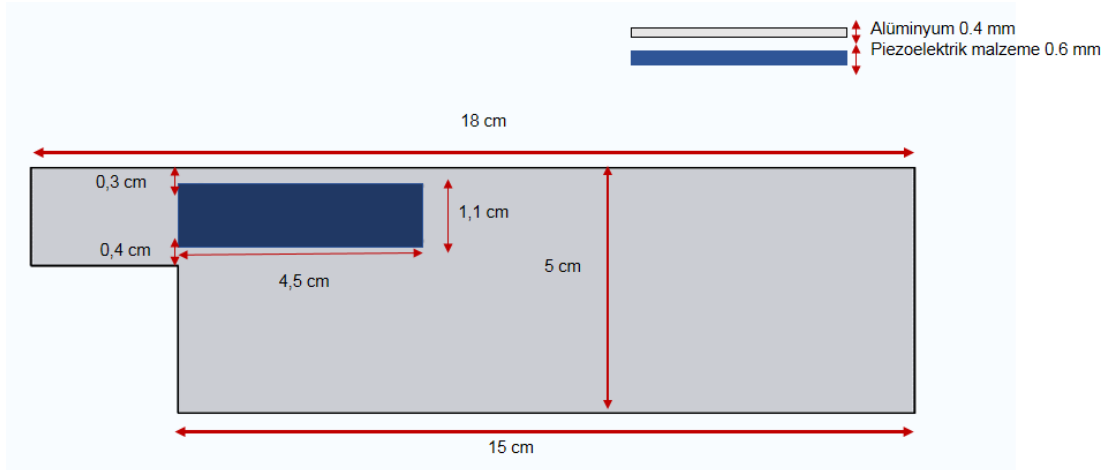
Model	Kanat uzunluğu [mm]	Ortalama Veter uzunluğu [mm]	Çırpma frekansı [Hz]
Güve böceği (Wu, 2010)	35-150	9-46	8 - 30
Deneyisel düzenek için kullanılan güve böceği ön kanat modeli	65	35	-
Deneyisel düzenek için kullanılan dikdörtgen plaka	65	35	-
Deneyisel düzenek için kullanılan büyük dikdörtgen plaka	150 mm	50	-

Şekil 2’de deneyde kullanılan kanat modelleri görülmektedir. Kuvvet/moment sensörünün kartezyen koordinat sistemine göre yerleştirilen kanatlar için sol alt köşedeki yönlerde konumlama yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlarda z- yönünde kaldırma kuvveti, -x yönünde itme kuvveti oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2: Dikdörtgen ve Güve böceği kanat modellerinin 3D CAD çizimleri.

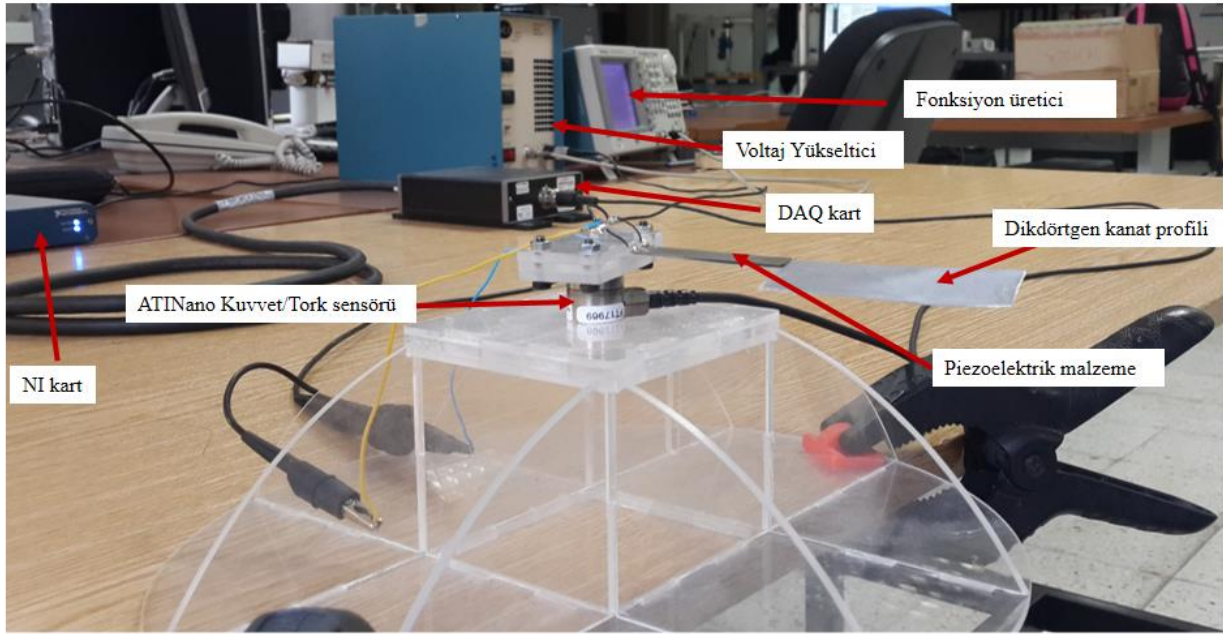
Alüminyum malzeme kullanılarak kesilen kanat modelleri için 3 boyutlu CAD çizimleri yapılmıştır. Şekil 2’de verilen çizimlerden kesilen kanat modelleri üzerine piezoelektrik eyleyici yerleştirilmiştir ve kanatların boş uçları pleksi malzemeden hazırlanan Şekil 4’deki deney düzeneğine sensör aracılığıyla (ATI Nano) veri toplamak üzere tutturulmuştur.



Şekil 3: Piezoelektrik malzeme (PIC 255) ve büyük dikdörtgen plaka.

Piezoelektrik malzemenin kanat üzerindeki hareket ettirici etkisiyle, farklı frekans değerlerinde kuvvet ve deplasman arasındaki ilişkiyi analiz etmek bu çalışmanın amacıdır. Şekil 4’te görüldüğü üzere ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü’ nün Aerodinamik Laboratuvarında kurulan sistem ile kuvvet/moment sensöründen ölçüm alınan mekanizma daha önceki çalışmada başarı göstermiştir. Böylece kuvvet/moment sensöründen ölçümler aynı yöntem kullanılarak daha küçük boyutlarda hazırlanan dikdörtgen ve güve böceği kanat modelleri için de alınabilmektedir.

Deneyin en önemli parçalarından biri olan tetikleme mekanizmasıdır. Çırpın kanat çalışmasında tetikleyici olarak piezoelektrik eyleyici kullanılmıştır. Daha önceki çalışmadan piezoelektrik



Şekil 4: Kuvvet/moment sensörü sisteminin kullanıldığı mekanizma.

malzemenin kanat modelleri üzerinde çarpma hareketi oluşturabildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma içinde kanat modelleri yeni bir piezoelektrik eyleyici kullanılarak tetiklenecektir. Çizelge 2'de yeni deneysel kanat modelleri için kullanılacak olan piezoelektrik eyleyicinin ve kanat yapımında kullanılmış olan alüminyum plaka malzemelerinin özellikleri verilmiştir. Piezoelektrik malzeme eğme özelliğinde olan büyük deplasman değeri veren türden seçilmiştir. Bu sayede kanat modelleri üzerine yapıştırılan piezoelektrik eyleyici sayesinde çarpma hareketi elde edilebilmiştir.

Çizelge 2: Piezoelektrik eyleyicinin ve alüminyum malzeme özellikleri.

Parametre	Piezoelektrik Değerler	Alüminyum Plaka Değerler
Elastisite Modülü	-	6.804E11 N/m ²
Uzunluk	4.5 cm	13 cm
Genişlik	1.1 cm	3.5 cm
Kalınlık	0.06 cm	0.04 cm
Yoğunluk	7.80 g/cm ³	2.70 g/cm ³

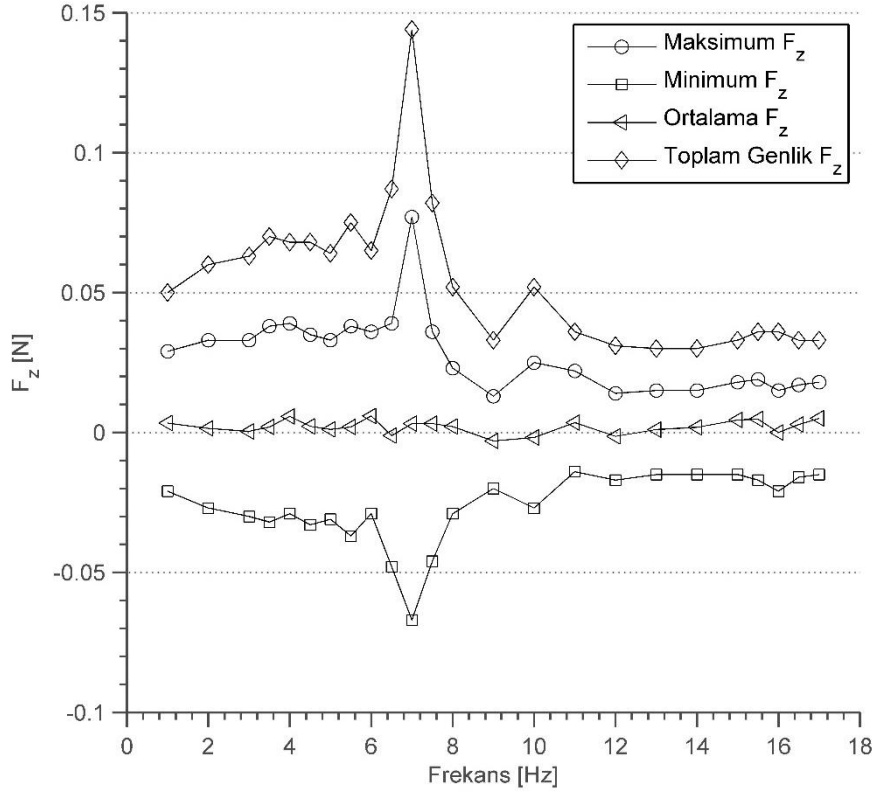
Güve böceğinin ön kanadı ve iki farklı büyüklükteki dikdörtgen plaka modelleri daha önce yapılan çalışmalar için hazırlanmış olan test standı üzerinde modellerin kök veterinden tutturularak birleştirilmiştir. Böylece modellerin piezoelektrik eyleyici ile tetiklenmesi sonucunda yaptığı çarpma hareketinin gözlemlenmesi ve aynı zamanda kuvvet/ moment değerlerinin toplanması sağlanmıştır.

DENEYSEL SONUÇLAR

Altı adet serbestlik derecesinde veriler (x, y ve z düzleminde kuvvet ve momentler) sensör aracılığıyla toplanmıştır. Kanat üzerine yerleştirilen piezoelektrik eyleyici vasıtasıyla modelin ürettiği kaldırma kuvveti- frekans ve itme kuvveti - frekans arasındaki ilişki incelenmiştir. Temel olarak taşıma kuvveti (z yönündeki kuvvet) değerleri parametrik açıdan incelenmiştir. Toplanan veriler MATLAB' da yazılan kod aracılığıyla işlenmiştir. Deneysel verilere ait sonuçlar elde edilmiştir. Sensör verilerine filtre uygulanmamıştır ve oluşan F_z genliklerinin frekans ve çarpma periyodu değerlerine karşılıkları grafiklerde verilmiştir.

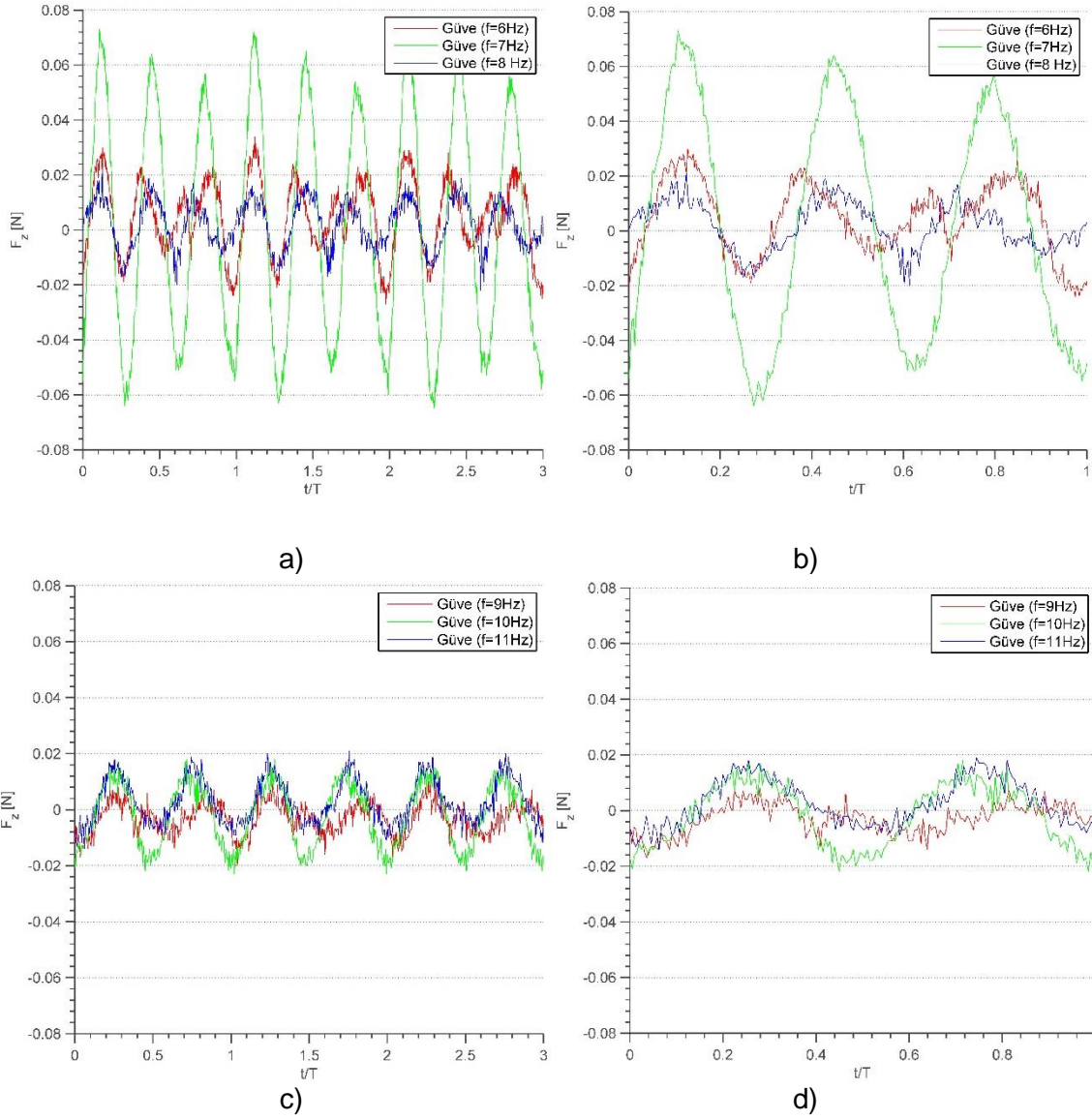
KALDIRMA KUVVETİ

Güve Böceği: MATLAB aracılığıyla deneysel veriler okunarak güve böceği kanat modelinin z- yönlü maksimum kaldırma kuvveti (F_z) genliği elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 5'de görüldüğü üzere güve böceği kanat modelinin en yüksek genlikte tepe yaptığı frekans değeri doğal frekansı olarak alınmıştır ve bu frekans değeri de 7 Hz olarak bulunmuştur. Güve böceğinin çırpma hareketinin doğal frekansında okunan z- yönlü toplam kuvvet genliği 0.144 N dur.



Şekil 5: Güve böceğinin farklı frekanslarda z- yönündeki kuvvet genlikleri.

Güve böceğinin pozitif net kaldırma kuvveti oluşturduğu Şekil 5 de ortalama F_z -kuvveti ile gösterilmiştir. Bu durum bize güve böceğinin ön kanadının kaldırma kuvvetini oluşturulabileceğini göstermiştir.

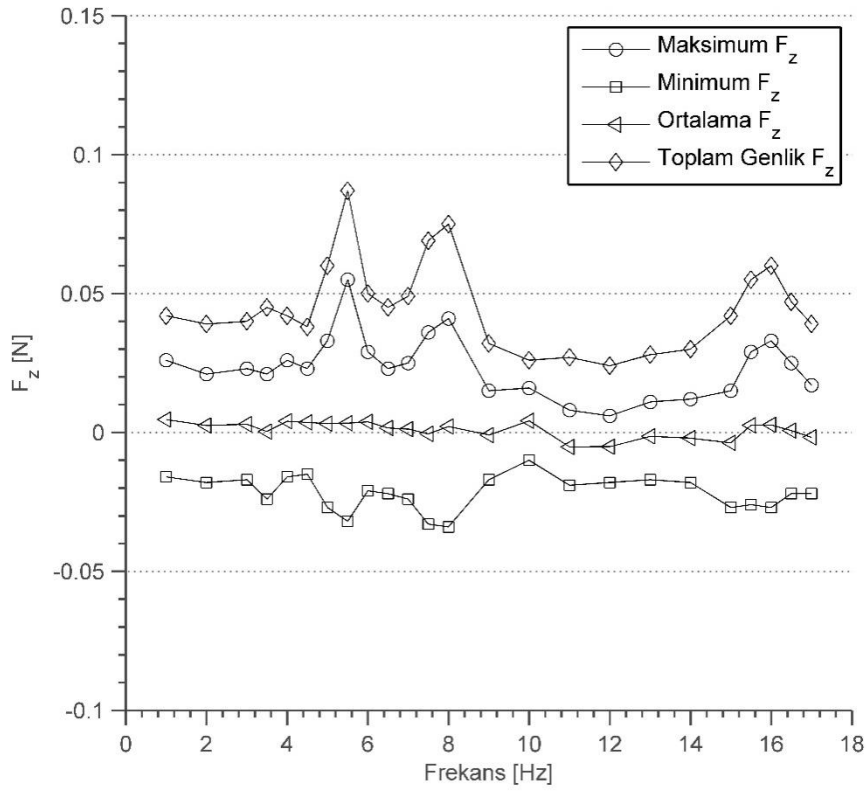


Şekil 6: a) Güve böceğinin ilk tepe (peak) noktası (7 Hz) civarındaki 3 periyotluk kuvvet değişim grafiği, b) Güve böceğinin ilk tepe (peak) noktası (7 Hz) civarındaki 1 periyotluk kuvvet değişim grafiği. c) Güve böceğinin ikinci tepe (peak) noktası (10 Hz) civarındaki 3 periyotluk kuvvet değişim grafiği, b) Güve böceğinin ikinci tepe (peak) noktası (10 Hz) civarındaki 1 periyotluk kuvvet değişim grafiği.

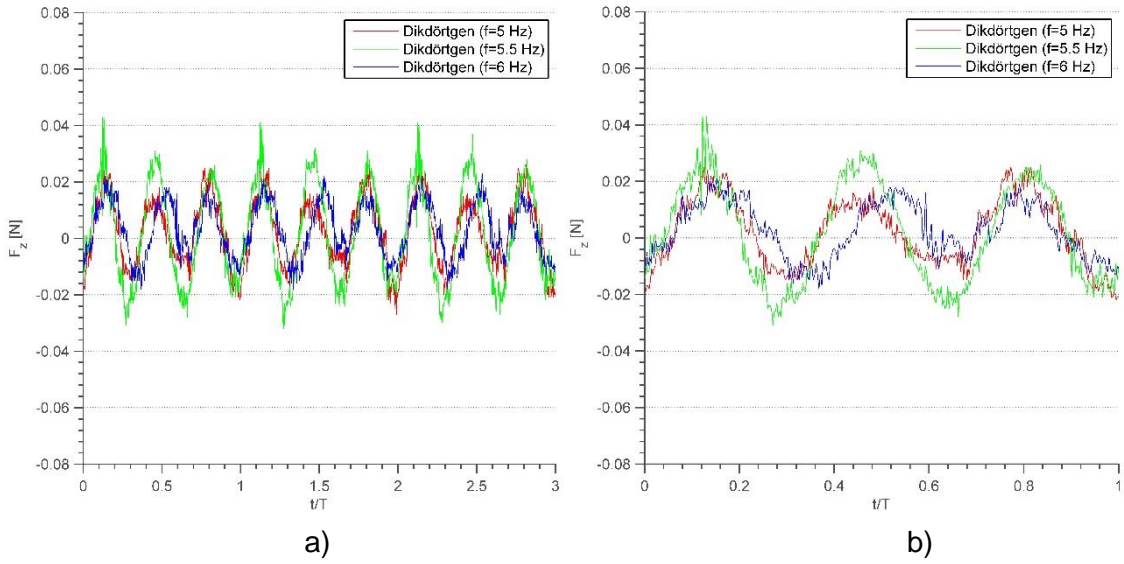
Şekil 5'deki grafik ile doğal frekansı belirlenen güve böceğinin bu frekans değerinde ve bu değer çevresindeki frekans değerlerinde periyota bağlı kaldırma kuvveti grafikleri elde edilmiştir. Şekil 6 a) ile üç periyotluk kısmı verilen kaldırma kuvveti grafiğinin 7 Hz en fazla kaldırma kuvveti oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bir çırpma periyodu içinde güve böceği kanat modeli üç adet tepe yapmıştır. Doğal frekans değeri dışında 6 Hz ve 8 Hz frekanslarında elde edilen kaldırma kuvvetlerinin genliklerinin yarı yarıya azaldığı grafiklerden açıkça görülebilmektedir. Ayrıca Şekil 6 b) ve d)' de 1 periyotluk zamanlar için çizilen grafikler karşılaştırıldığında kanadın hareketi esnasında oluşturduğu ikinci belirgin frekans değeri olan 10 Hz civarında sinüs hareketinin 2 tepe yaptığı sonucu elde edilmiştir. Bu durum bize doğal frekans aşıldıktan sonra hareketin sönümlendiğini göstermektedir.

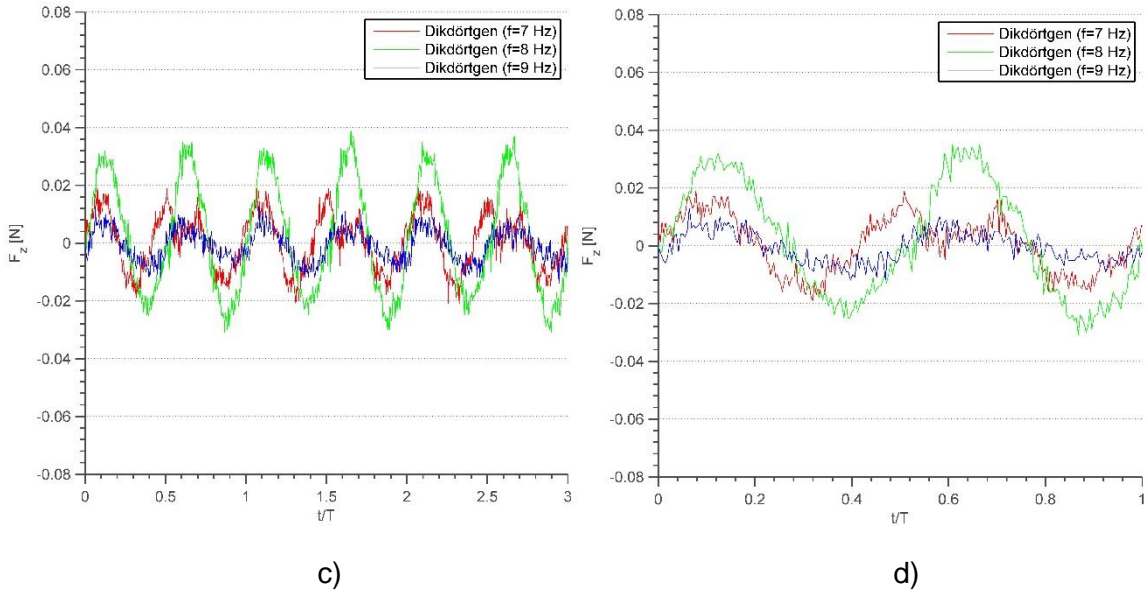
Dikdörtgen Plaka: Güve böceğinin ön kanadının boyutlarında kesilen dikdörtgen kanat modelinin z-yönlü maksimum kaldırma kuvveti (F_z) genliği elde edilmiştir. Şekil 7' de görüldüğü üzere dikdörtgen kanat modelinin en yüksek genlikte tepe yaptığı frekans değeri doğal frekansı olarak değerlendirilmiştir. Plakanın doğal frekans değeri 5.5 Hz olarak bulunmuştur ve bu frekansa denk

gelen z- yönlü toplam kuvvet genliği 0.087 N dur. Güve kanadına göre düşük bir değer elde edilmiştir.



Şekil 7: Dikdörtgen plakanın farklı frekanslarda z- yönündeki kuvvet genlikleri.

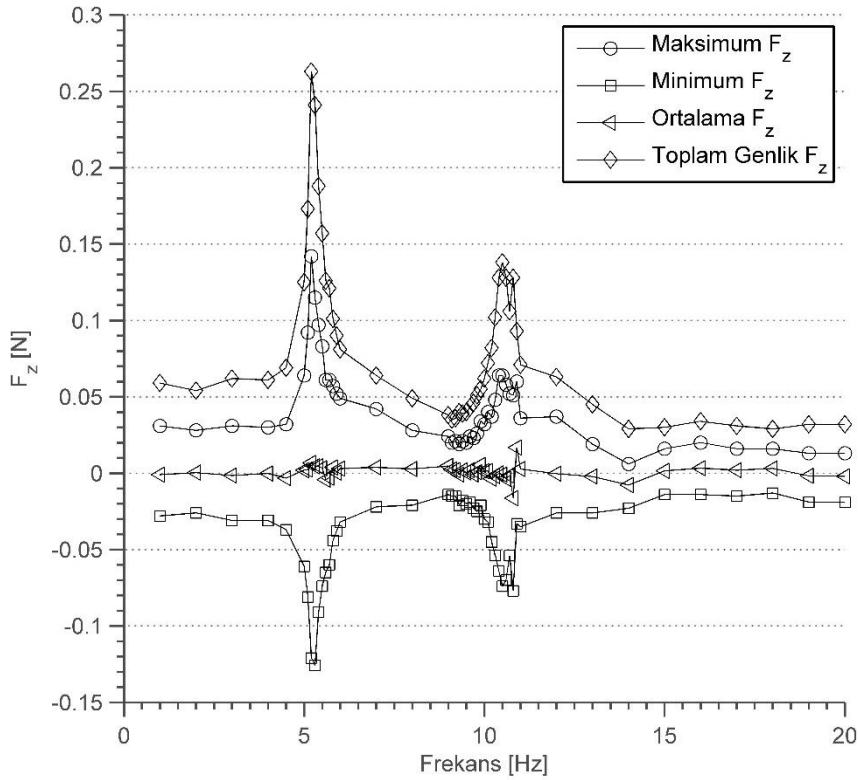




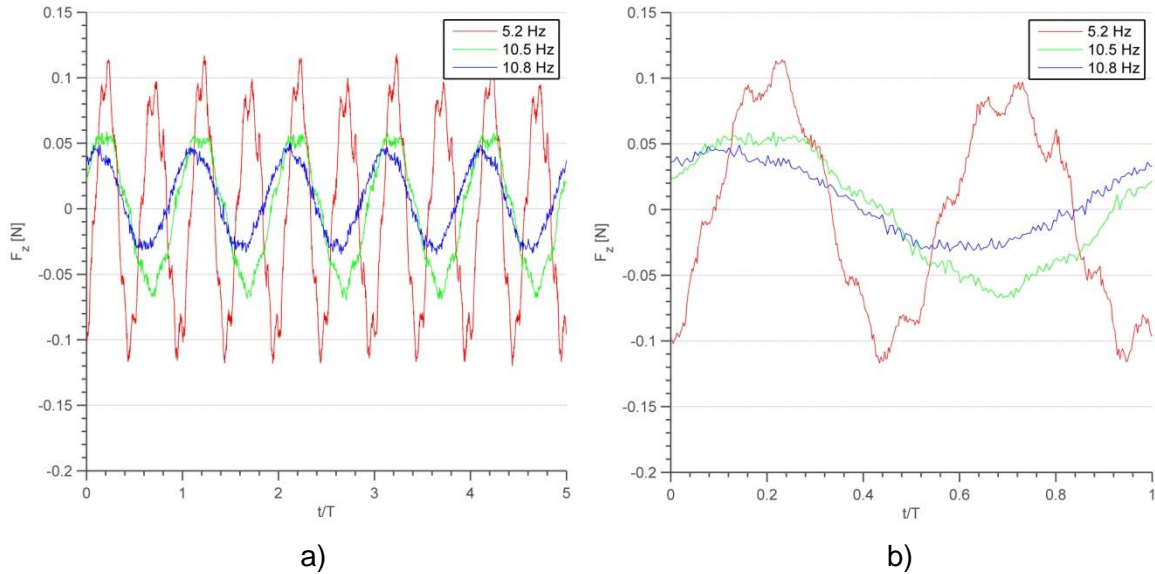
Şekil 8: a) Dikdörtgen kanat modelinin ilk tepe (peak) noktası (5.5 Hz) civarındaki 3 periyotluk kuvvet değişim grafiği, b) Dikdörtgen kanat modelinin ilk tepe (peak) noktası (5.5 Hz) civarındaki 1 periyotluk kuvvet değişim grafiği, c) Dikdörtgen kanat modelinin ikinci tepe (peak) noktası (8 Hz) civarındaki 3 periyotluk kuvvet değişim grafiği, d) Dikdörtgen kanat modelinin ikinci tepe (peak) noktası (8 Hz) civarındaki 1 periyotluk kuvvet değişim grafiği.

Şekil 7'deki grafik ile doğal frekansı belirlenen dikdörtgen modelin bu frekans değerinde ve bu değere yakın iki frekans değerlerinde de periyoza bağlı kaldırma kuvveti grafikleri elde edilmiştir. Şekil 8 a) ile üç periyotluk kısmı verilen kaldırma kuvveti grafiğinin 5.5 Hz' de en fazla kaldırma kuvveti oluşturduğu her iki grafikten de açık bir şekilde görülmektedir. Dikdörtgen model de güve böceği kanat modeli gibi bir çırpma periyodu içinde üç adet tepe yapmıştır. Doğal frekans değerine en yakın iki frekans değeri 5 Hz ve 6 Hz için kaldırma kuvvetleri de sırası ile 0.06 N ve 0.05 N olarak elde edilmiştir. Şekil 8 b) ve d)' de de güve böceğinde gözlemlenen karşılaştırma söz konusudur. Dikdörtgen plaka şeklindeki kanat modelinde de doğal frekans aşıldıktan sonra harekette sönümlenme gözlemlenmiştir.

Büyük Dikdörtgen Plaka: Güve böceği ve dikdörtgen plaka modellerinin çırpma hareketi sonucunda ürettikleri aerodinamik kuvvetleri, kanatların boyutuna bağlı olarak inceleyebilmek için yine aynı malzeme alüminyumdan kesilmiş olan bir dikdörtgen plaka modeli de aynı piezoelektrik eyleyici kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Büyük dikdörtgen plaka modelinin doğal frekansı Şekil 9'dan 5.2 Hz olarak okunmuştur. Bu doğal frekans değerinde kanat 0.263 N' luk toplam genlik değeriyle z yönlü maksimum kuvvet oluşturmuştur.



Şekil 9: Büyük dikdörtgen plaka için farklı frekanslarda z- yönlü kaldırma kuvvetleri genliği.



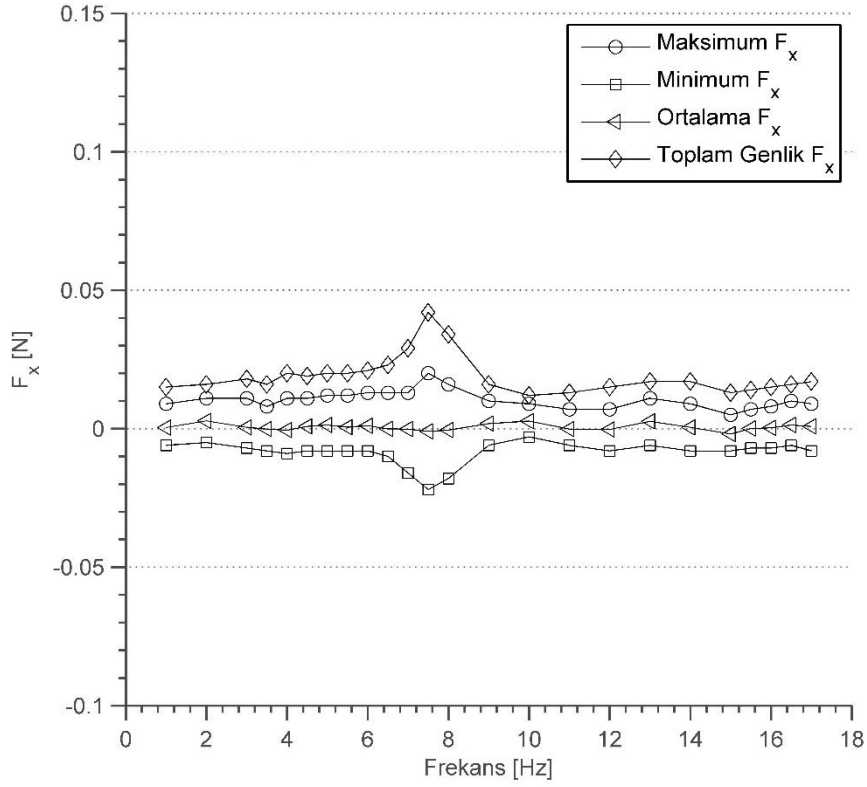
Şekil 10 : a) Büyük dikdörtgen kanat modelinin tepe frekans değerlerinde 5 periyotluk kuvvet değişim grafiği, b) Büyük dikdörtgen kanat modelinin tepe frekans değerlerinde 1 periyotluk kuvvet değişim grafiği.

Şekil 9' dan okunan doğal frekansa karşılık gelen kuvvet genliği ve yine Şekil 9'da gözlemlenen ikinci tepe noktası oluşturan frekans değerinde çırpma periyotuna bağlı kaldırma kuvveti genlikleri grafikleri çizilmiştir.

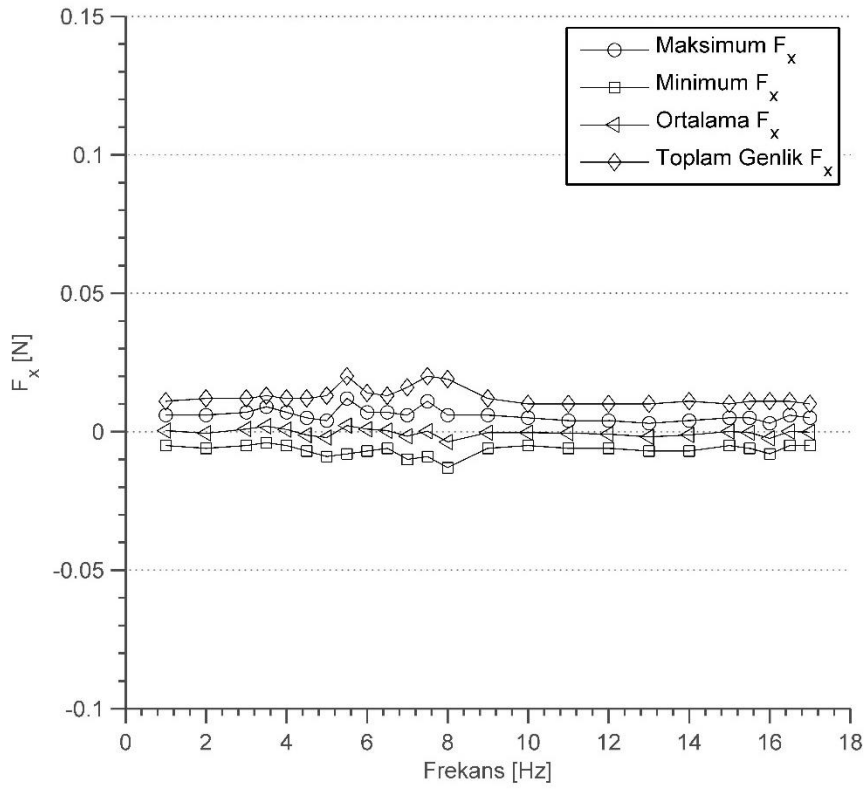
Şekil 8 a) ile üç periyotluk kısmı verilen kaldırma kuvveti grafiğinin 5.2Hz' de en fazla kaldırma kuvveti oluşturduğu her iki grafikten de açık bir şekilde görülmektedir. Büyük dikdörtgen modelinde diğer iki kanat modelinden farklı olarak bir çırpma periyodu içinde 2 adet tepe yapan bir hareket gözlemlenmiştir. Diğer frekans değerleri 10.5 Hz ve 10.8 Hz için maksimum kaldırma kuvvetleri de sırası ile 0.138 N ve 0.128 N olarak elde edilmiştir.

İTME KUVVETİ

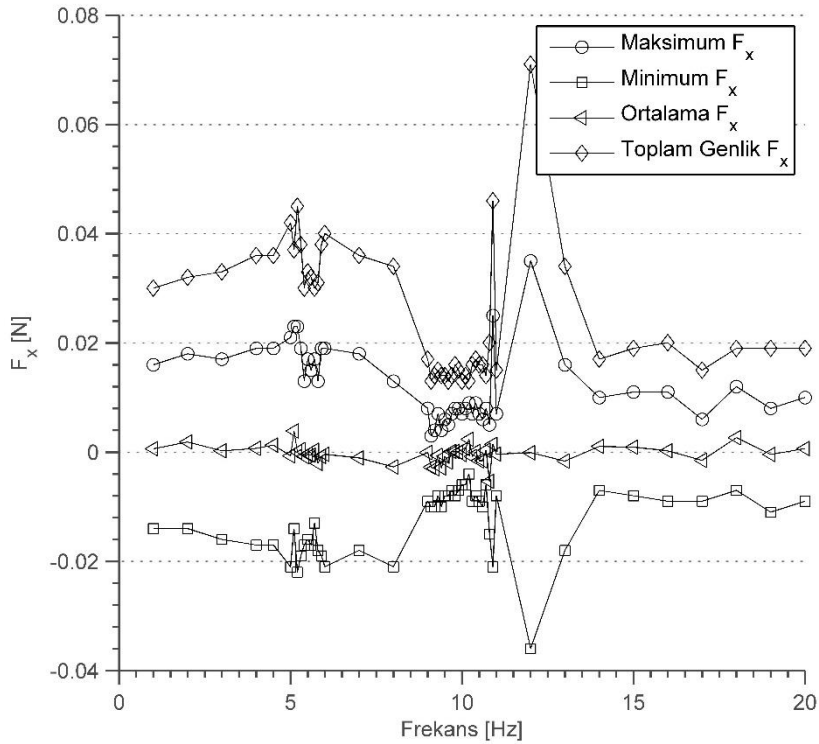
Güve böceği ve aynı boyutlu dikdörtgen kanat modellerinin bazı frekanslardan negatif x -yönlü ortalama kuvvet oluşturdukları Şekil 11 ve Şekil 12' de sırasıyla gözlemlenmiştir. Bu durum, kanatların sürüklenme kuvvetini yenerek itme kuvveti de oluşturduklarını göstermektedir. Bu durumda kanat modellerinde çırpma hareketi yardımıyla da ileri doğru harekete katkı yapılabilmektedir.



Şekil 11: Güve böceğinin farklı frekanslarda x- yönündeki kuvvet genlikleri.



Şekil 12: Dikdörtgen plakanın farklı frekanslarda x- yönündeki kuvvet genlikleri.



Şekil 13: Büyük dikdörtgen plakanın x- yönündeki kuvvet genlikleri ve doğal frekansı

SONUÇ

Güve böceğinin ön kanadı ve iki adet dikdörtgen kanat modeli kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonucunda her üç kanat modeli de birbirine yakın frekans değerlerinde rezonansa girmiştir. Bu değerler sırasıyla 7 Hz, 5.5 Hz ve 5.2 Hz olarak okunmuştur. Bu durumda açıkça görülmüştür ki güve böceğinin ön kanadı, boyutları farklı iki dikdörtgen plaka modelinden daha yüksek frekansta titreşmektedir. Ayrıca boyutsal olarak büyük dikdörtgen ve küçük dikdörtgen kanat modellerinden çıkarılan önemli sonuçlardan bir tanesi de, kanat modellerinde en- boy oranının artışı ile oluşturulan kuvvetler artışı doğru orantılıdır. Çizelge 3' de deneysel olarak elde edilen çarpma frekansları özetlenmiştir. Bu noktada görülmektedir ki güve böceği için elde edilmiş frekans değeri gerçek böceklerin çarpma frekans değerlerine çok yakın olup, literatüre yakın sonuç vermiştir.

Çizelge 3: Deneysel modeller ve literatürde verilen çarpma frekansları karşılaştırması.

Model	Kanat uzunluğu [mm]	Ortalama Veter uzunluğu [mm]	Çarpma frekansı [Hz]
Güve böceği (Wu, 2010)	35-150	9-46	8 - 30
Deneysel düzenek için kullanılan güve böceği kanat modeli	65	35	7
Deneysel düzenek için kullanılan dikdörtgen plaka	65	35	5.5
Deneysel düzenek için kullanılan büyük dikdörtgen plaka	150	50	5.2

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 213M327 nolu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Dr. Kurtuluş ayrıca desteklerinden dolayı TÜBA GEBİP (Proje no: D.F.K/2012-18)' e teşekkür eder.

Kaynaklar

- Akay B, Kurtulus DF, Alemdaroglu N (2007) Unsteady Aerodynamics of Different Wing Profiles at Low Reynolds Number. RTOMPAVT146, NATO AVT146 Symposium on Platform Innovations and System Integration for Unmanned Air, Land and Sea Vehicles, 14-17 May 2007, Florence, Italy.
- Combes, S.A, and Daniel T.L, (2003), Flexural stiffness in insect wings I. Scaling and the influence of wing venation, The Journal of Experimental Biology 206, 2979-2987 2979.
- Comez, F.Y., Senol M.G., Arıkan K.B. ve Kurtulus D.F., (2015) Unsteady Aerodynamic Analysis of a Flapping Wing Actuated with PZT Material, Workshop on Non-Intrusive Measurements for unsteady flows and aerodynamics, Universite De Poitiers, Poitiers, FRANCE.
- Gunaydinoglu E, Kurtulus DF (2009) Numerical investigation of pure plunge and pitch/plunge motions at low Re number. Proceeding of International Symposium on Light Weight Unmanned Aerial Vehicle Systems and Subsystems, UAS LW 2009, Oostend Belgium.
- Hanrahan, S., Photo of a *Manduca sexta*, Texas A&M University, Department of Entomology, 2006.
- Ha N.S., Vang H.M. and Goo N.S., 2015, *Modal Analysis Using Digital Image Correlation Technique: An Application to Artificial Wing Mimicking Beetle's Hind Wing*, Experimental Mechanics. 55:989-998.
- Kurtulus DF, Farcy A, Alemdaroglu N (2004) Numerical Calculation and Analytical Modelization of Flapping Motion. Proceeding of 1st European Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition. Braunschweig, Germany.
- Kurtulus DF, Farcy A, Alemdaroglu N (2005) Unsteady Aerodynamics of Flapping Airfoil in Hovering Flight at Low Reynolds Numbers. AIAA20051356, 43 rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA.
- Kurtulus D.F., 2005, Numerical and Experimental Analysis of Flapping motion in Hover. Application to Micro Air Vehicles, Ph.D Thesis, UNIVERSITE DE POITIERS, METU, Potiers, France.

- Kurtulus DF, David L, Farcy A, Alemdaroglu N (2006) A Parametrical Study with Laser Sheet Visualization for an Unsteady Flapping Motion. AIAA20063917, 36th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, San Francisco, California USA, 5-8 June 2006.
- Kurtulus DF, David L, Farcy A, Alemdaroglu N (2006) Laser Sheet Visualization for Flapping Motion in Hover. AIAA20060254, 44rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, 9-12 Jan 2006.
- 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, pp 301-326.
- 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, and No:2, pp. 109-139.
- Nagakalyan S, Raghukumar D., and Abhilash K.V., 2013, *Comparative Study of Piezoelectric Materials for Vibration energy Harvesting*, Int. Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering. 1, 7:160-166.
- Nguyen N.T., Yoon K.J. and Park H.C., 2007, *Actuation Displacement of Unimorph Piezoelectric Actuators with External Loading*, Journal of the Korean Physical Society. 51:11-15.
- Sims T.W., Palazotto A.N., Norris A., 2010, *A Structural Dynamic Analysis of a Manduca Sexta Forewing*, International Journal of Micro Air Vehicles, Volume 2, Number 3, pp:119-140.
- Wu, P., Ifju, P., 2009, *Digital Image Correlation Techniques for Full-Field Displacement Measurements of Micro Air Vehicle Flapping Wings*, Experimental Techniques, 53-58.
- Wu, P., Ifju, P., 2010, *Experimental Methodology for Flapping Wing Structure Optimization in Hovering Flight of Micro Air Vehicles*, AIAA SDM Student Symposium.