

## GÖREVE UYUMLU BİR İNSANSIZ HAVA ARACI KANADININ YAPISAL MODELLENMESİ VE DENEYSEL DOĞRULANMASI

M. Şahin<sup>(a)</sup>, L. Ünlüsoy<sup>(b)</sup>, E. Sakarya<sup>(c)</sup>, E. T. İnsuyu<sup>(d)</sup>, G. Seber<sup>(e)</sup>,  
S. Özgen<sup>(f)</sup>, Y. Yaman<sup>(g)</sup>

<sup>(a)</sup> Y. Doç. Dr. ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06531, Ankara, [msahin@metu.edu.tr](mailto:msahin@metu.edu.tr)

<sup>(b)</sup> ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06531, Ankara, [lunlusoy@ae.metu.edu.tr](mailto:lunlusoy@ae.metu.edu.tr)

<sup>(c)</sup> ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06531, Ankara, [esakarya@ae.metu.edu.tr](mailto:esakarya@ae.metu.edu.tr)

<sup>(d)</sup> ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06531, Ankara, [tinsuyu@ae.metu.edu.tr](mailto:tinsuyu@ae.metu.edu.tr)

<sup>(e)</sup> Y. Doç. Dr. ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06531, Ankara, [gseber@ae.metu.edu.tr](mailto:gseber@ae.metu.edu.tr)

<sup>(f)</sup> Prof. Dr. ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06531, Ankara, [sozgen@ae.metu.edu.tr](mailto:sozgen@ae.metu.edu.tr)

<sup>(g)</sup> Prof. Dr. ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06531, Ankara, [yaman@metu.edu.tr](mailto:yaman@metu.edu.tr)

### ÖZET

Bu çalışmada bir insansız hava aracının göreve uyumlu kanatlarının, MSC®/PATRAN ve MSC®/NASTRAN kullanılarak yapılan yapısal tasarımları, yapısal analizleri ve bu tasarımların deneysel olarak doğrulanması anlatılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** İnsansız Hava Aracı, Yapısal tasarım, Yapısal analiz, Deneysel doğrulama

### ABSTRACT

This study presents the structural design and analysis aspects of an unmanned aerial vehicle wing having mission adaptive characteristics. After detailing the structural design and analysis studies by using MSC®/PATRAN and MSC®/NASTRAN package programs; the study also presents some experimental studies conducted for the verification of the theoretical modelling and the relevant results.

**Keywords:** Unmanned Aerial Vehicle, Structural design, Structural analysis, Experimental verification

### 1. GİRİŞ

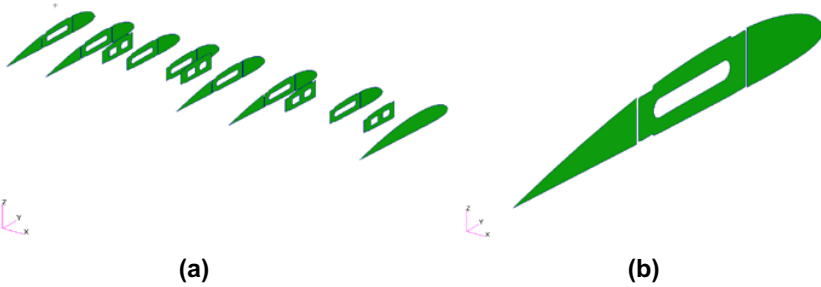
Bu çalışmada bir insansız hava aracının göreve uyumlu kanatları tasarlanmış [1] ve incelenmiştir. Uçuş mekaniği analizleri sonucu boyutlandırılan kanat taşıyıcı kısmı (*torque-box*) MSC®/PATRAN [2] kullanılarak tasarlanmış ve MSC®/NASTRAN [3] kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra TAI, TUSAŞ Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. tarafından üretilen bir adet sağ kanat taşıyıcı kısmı Bruel&Kjaer PULSE [4] sistemi kullanılarak deneysel olarak incelenmiş ve karşılaştırmalı rezonans frekansı ve titreşim biçimi sonuçları verilmiştir.

## 2. KANADIN YAPISAL TASARIMI

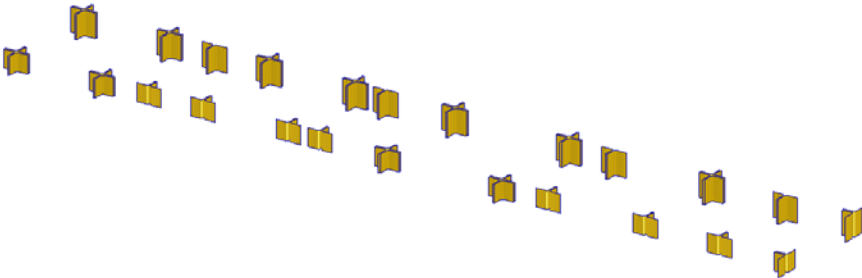
Kanadın yapısal tasarımı MSC®/PATRAN paket programı kullanılarak yapılmıştır. Kanat dört ana yapısal eleman grubundan oluşmaktadır. Bunlar kirişler, sınırlar, köşebentler ve kabuktur. Kirişler, gövde (*web*) ve flanjlardan oluşmaktadır. Kiriş gövdesi ve bu gruptaki diğer tüm yapısal elemanlar 2-boyutlu yüzeyler olarak modellenmiştir. Kiriş flanjlarda ise geometrik modelleme kullanılmamıştır. Şekiller 1-3 bu eleman gruplarından sırasıyla kiriş gövdelerini, sınırları ve köşebentleri göstermektedir. Şekiller 4 ve 5 ise sırayla tüm modelin iç ve kabuğun da eklendiği dış görünüşlerini vermektedir.



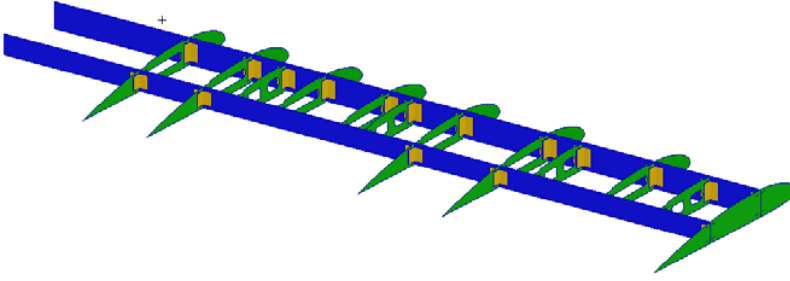
Şekil 1. Kanatta tasarlanan kiriş gövdelerinin geometrik modeli



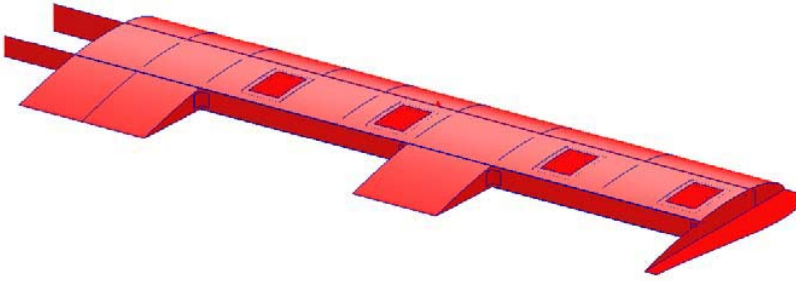
Şekil 2. (a) Kanatta tasarlanan sınırların geometrik modeli  
(b) Bir sınır geometrisinin yakından görünümü



Şekil 3. Kanatta tasarlanan köşebentlerin geometrik modeli



Şekil 4. Kanat taşıyıcı kısmının geometrik modelinin iç görünümü



Şekil 5. Kanat taşıyıcı kısmının geometrik modelinin dış görünümü

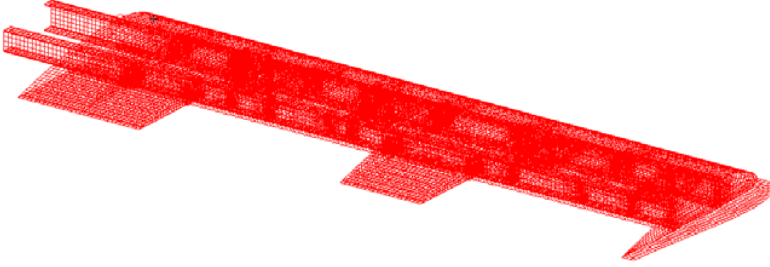
Kanat üretimi esnasında, kirişler için soğuk çekme yöntemi ile üretilmiş Alüminyum 7075-T651 hazır kesitler kullanılmıştır. Köşebentlerin yapımında da, başka kesit özelliklerine sahip, aynı malzeme kullanılmıştır. Sinirler Alüminyum 2024-T3 plakadan 2 eksenli CNC tezgah kullanılarak kesilmiştir. Kabuk için ise 7781 örgü tipi cam elyaf ve LY5052 reçine malzemesi seçilmiştir. Tablo 1 kullanılan malzemelerin özelliklerini vermektedir.

Tablo 1. Yapısal parçalara ait malzeme bilgisi

Yapısal Parça	Malzeme
Kirişler	Alüminyum 7075-T651
Sinirler	Alüminyum 2024-T3
Köşebentler	Alüminyum 7075-T651
Kabuk	7781 Cam-Elyaf LY5052 Reçine

Sonlu elemanlar modeli küçük ağ yoğunluğu (*fine-mesh*) kullanılarak oluşturulmuştur. 1-boyutlu kiriş elemanlar kullanılarak oluşturulmuş kiriş flanjlari dışındaki tüm yapısal parçalar 2-boyutlu kabuk elemanlarla modellenmiştir. Modellenen perçinlerin direngenlikleri çoklu nokta kısıtlanmalı elemanlar (*multi-point-constraint*) kullanılarak modellenmiş, ağırlıkları ise uygulandıkları bölgelere yapısal özellik taşımayan ağırlık (*non-structural mass*)

modelleme tekniğiyle eklenmiştir. Kanat geometrik modeli üzerinde oluşturulan toplamda 18904 düğüm noktasında 85119 serbestlik derecesine sahip ağ Şekil 6' da gösterilmiştir ve eleman detayları Tablo 2 de sunulmuştur.

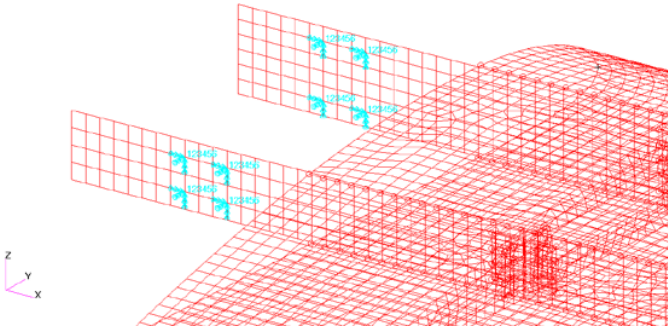


Şekil 6. Kanat taşıyıcı kısmının sonlu elemanlar modeli

Tablo 2. Sonlu elemanlar modeline ait eleman bilgisi

Eleman Türü	Eleman Topolojisi	Adet
1-boyutlu kiriş	Bar2	668
2-boyutlu kabuk	Quad4	17439
2-boyutlu kabuk	Tria3	33
Çoklu nokta kısıtlanmalı (MPC)	RBE2	1650

Sonlu elemanlar analizi için sınır koşulları oluşturulurken, imal edilen kanadın deney düzeneğine montajı temel alınmıştır. Kanat, gerçekte, deney düzeneğine her bir kirişinde dörder noktadan civatalanarak bağlanmıştır. Bu civatalar sonlu elemanlar modelinde o bölgeye karşılık gelen düğüm noktalarında tüm eksenlerdeki yer değiştirme ve dönüş serbestlik dereceleri sıfırlanarak modellenmiştir. Kanat köküne uygulanan bu sınır koşulunun yakınlştırılmış görünümü Şekil 7'de verilmiştir.



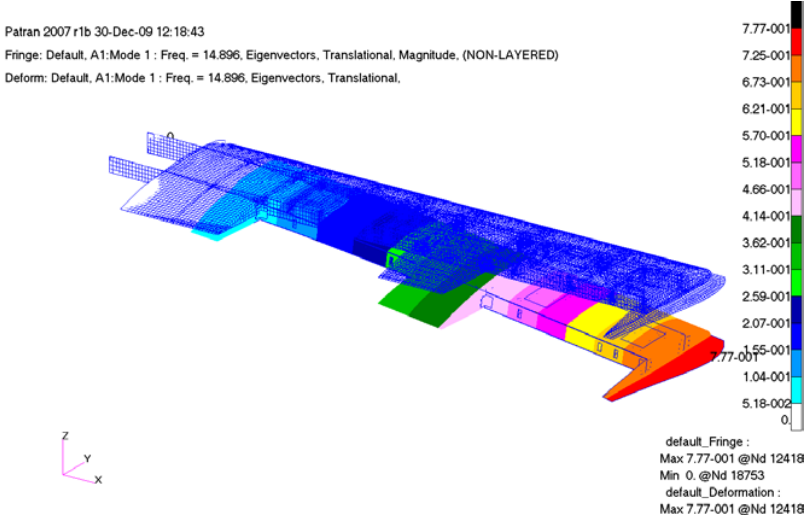
Şekil 7. Kanat sınır koşullarının sonlu elemanlar modeli

### 3. KANAT TAŞIYICI KISMININ YAPISAL ANALİZİ

Oluşturulan sonlu elemanlar modeli MSC®/NASTRAN paket programı doğal frekans analiz modülü (*natural frequency analysis module 103*) kullanılarak incelenmiş ve 0-100 [Hz] aralığındaki doğal frekanslar Tablo 3' de sunulmuştur. Şekil 8 ise ilk titreşim biçimini göstermektedir.

**Tablo 3.** Kanat taşıyıcı kısmının sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan doğal frekansları

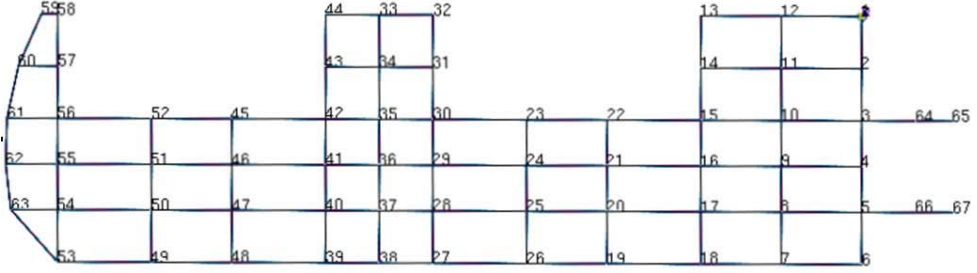
Titreşim Biçimi	Sonlu Elemanlar Yöntemi Doğal Frekans [Hz]
Düzleme dik 1. eğilme	14.90
Düzlemsel 1. eğilme	50.16
1. Burulma	63.30
Düzleme dik 2. eğilme	93.00



**Şekil 8.** Kanat taşıyıcı kısmının düzleme dik 1. eğilme titreşim biçimi (14.90 [Hz])

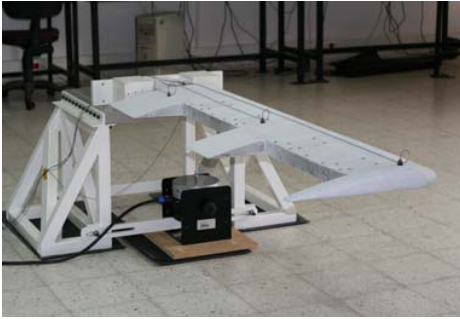
### 4. KANAT TAŞIYICI KISMININ YER TİTREŞİM TESTLERİ

Deneyler için kanadın taşıyıcı kısmı üzerinde 63 ölçüm noktası kanat içyapısını oluşturan sinir ve kırışların buldukları bölgeler göz önüne alınarak belirlenmiştir (1-63). Ölçüm noktalarına ek olarak kanadın sabitlendiği yerleri tanımlayan 4 ayrı nokta da (64-67) bulunmaktadır. Şekil 9 tüm bu noktalarını göstermektedir.

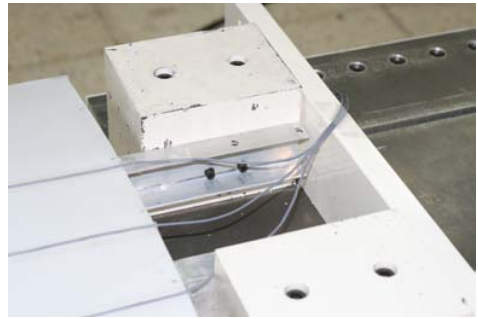


Şekil 9: Kanat taşıyıcı kısmının ölçüm noktaları

Testlerde üç adet tek eksenli Bruel&Kjaer 4508B ivmeölçer [4] kullanılmıştır. Bu ivmeölçerler 10, 29 ve 54 numaralı ölçüm noktalarına yerleştirilmiştir. Titreşim testlerinde hareketli çekiç yöntemiyle ölçümler alınmıştır. Hareketli çekiçle yapılan deneylerde ivmeölçerlerin yerleri sabit tutularak, modal darbe çekiçi (Bruel&Kjaer 8206 [6]) 63 ölçüm noktasında gezdirilerek her kuvvet uygulaması için ivmeölçer bilgileri ve kuvvet bilgisi kaydedilmiştir. Şekiller 10-a ve 10-b sırasıyla kanat taşıyıcı kısmının deney düzeneğindeki konumunu ve kanadın sabitlenmesini göstermektedir.



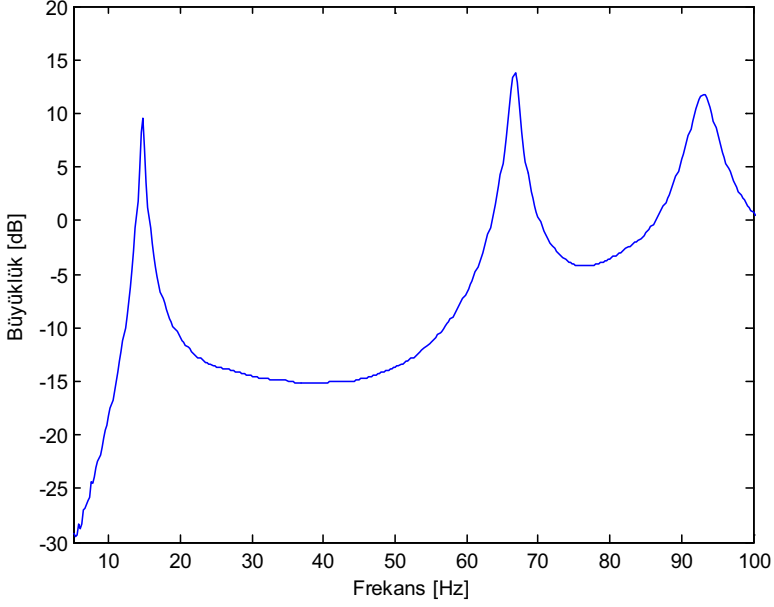
(a)



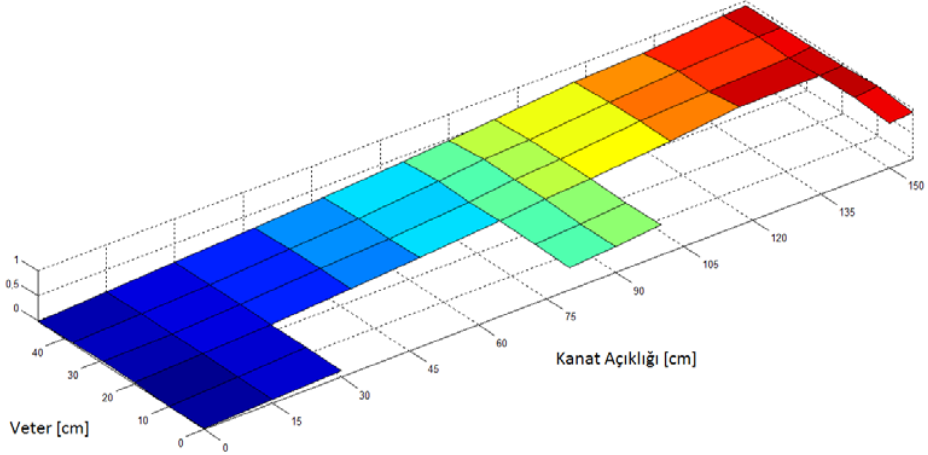
(b)

Şekil 10: (a) Kanat taşıyıcı kısmı ve deney düzeneği  
(b) Kanat taşıyıcı kısmının deney düzeneğine sabitlenmesi

İvmeölçer ve kuvvet bilgisi kullanılarak hesaplanan frekans cevaplarının ortalaması Şekil 11 de 14.75 [Hz] ile düzleme dik 1. eğilmeyi, 66.75 [Hz] ile 1. burulmayı, 93.00 [Hz] ile düzleme dik 2. eğilmeyi göstermektedir. Şekil 12 ise kanat taşıyıcı kısmının deneysel yolla elde edilmiş ve kanat ucuna göre normalize edilmiş düzleme dik 1. eğilme titreşim biçimini göstermektedir.



**Şekil 11:** Kanat taşıyıcı kısmının deneysel frekans cevabı



**Şekil 12:** Kanat taşıyıcı kısmının deneysel, düzleme dik 1. eğilme, normalize edilmiş titreşim biçimi (14.75 [Hz])

Ölçümlerde kullanılan tek eksenli ivmeölçerlerin yerleşim yönü ve kuvvetin uygulanma yönü düzlemsel eğilmenin gözlemlenmesini, bu test sırasında, engellemiştir. Daha sonra, bu tek eksenli ivmeölçerlerden biri kanadın düzlemsel 1. eğilme frekansına duyarlı olacak şekilde tekrar yapılandırılmış ve uygulanan kuvvetin yönü de değiştirilerek kanadın 1. eğilme frekansı 43.50 [Hz] olarak bulunmuştur.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada bir insansız hava aracının göreve uyumlu kanatlarının, MSC®/PATRAN ve MSC®/NASTRAN paket programları kullanılarak yapılan yapısal tasarımları, yapısal analizleri ve bu tasarımların deneysel olarak doğrulanması anlatılmıştır. Tablo 4, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğruluğunun gösterilebilmesi için kanat taşıyıcı kısmının doğal frekanslarının deneysel sonuçlardan farklılığını % olarak vermektedir.

**Tablo 4.** Kanat taşıyıcı kısmının doğal frekanslarının farkları

Titreşim Biçimi	Deneysel Sonuçlara Göre Doğal Frekans Farkı (%)
Düzleme dik 1. eğilme	~1.00
Düzlemsel 1. eğilme	~15.31
1. Burulma	~ -5.17
Düzleme dik 2. eğilme	~0.00

Tablo 3 den de görüleceği üzere kanadın çırpma analizlerinde etken parametreler olarak kabul edilen düzleme dik 1. eğilme ve 1. burulma frekanslarındaki %1.00 ve % -5.17 farklar, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu göstermektedir.

## KAYNAKÇA

[1] L. Ünlüsoy, "İnsansız Bir Hava Aracının Göreve Uyumlu Kanatlarının Yapısal Tasarım ve Analizi", Yüksek Lisans, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., ODTÜ, Şubat, 2010.

[2] MSC®/PATRAN v2007 r1b (2007), "Reference Manual", MSC.Software.

[3] MSC®/NASTRAN v2007 (2007), "Reference Manual", MSC.Software.

[4] Product Data Sheet: Bruel& Kjaer 3560C Portable PULSE.

[5] Product Data Sheet: Bruel&Kjaer 4508B Miniature DeltaTron Accelerometers.

[6] Product Data Sheet: Bruel&Kjaer 8206 Impact Hammer.

**Teşekkür:** Bu çalışma TÜBİTAK tarafından '107M103, Taktik İnsansız Hava Araçlarının Göreve Uyumlu Kanatlarında Kambur ve Burulma Etkisinin Çırpma ve Kontrol Yönünden Analizi' projesi kapsamında desteklenmektedir.