

ESNEK UÇAK KANATLARININ YÜK AYRIŞTIRMA SİMÜLASYONU

Dağhan Burak Malkoç*
İstanbul

Aykut Tamer†
Imperial College London,
Londra

ÖZET

Hava araçlarında yük kapasitesini arttırmanın en etkili yolu tasarımda verimliliği arttırmaktan geçmektedir. Kanat açıklığını genişletmek bu amaca etkili bir şekilde katkı sağlamakta fakat aynı ağırlıkta olan daha uzun bir kanat genellikle kanadın daha esnek olmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu esneklik sonucu artan aeroelastik etkileşimler ve lineer olmayan dinamik etkiler kanadın kararlılığına etki etmektedir. Eğer bu esnek kanat olağan görevlerine ek olarak yük ayrıştırma da yapacak olursa bahsedilen etkiler kanat dinamiğini daha da karmaşıklatacaktır. Normalde yük ile birlikte kararlı olan kanattan ayrılan kütlelerin sebep olduğu ani hafifleme esnek olan kanadı önemli derecede tahrik edecektir. Bu durumun bilgisayar ortamında simülasyonu kanadın kararlılığını analiz etmek , yük ayrıştırması yapan esnek kanatların tasarımı açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada esnek bir kanattan yük ayrılmasının kanat üzerindeki etkilerinin nasıl incelenebileceği anlatılmaktadır. Bu amaçla esnek bir kanat çoklu elemanlar dinamiği yöntemiyle aeroelastik etkileri de içerecek şekilde modellenmiştir. Yük kanat üzerinden ayrılınca kanadın tepkisi simülasyon ile gözlemlenmiştir. Analizler, yükün konumu ve ağırlığı gibi değişik parametreler için tekrarlanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

GİRİŞ

Harici veya dahili taşıma için tasarlanmış ve hava aracına bir takım ekipmanlar ile monte edilmiş herhangi bir ağırlığı yük olarak adlandırabiliriz. Özellikle uzun ve ince kanatlara sahip insansız hava araçlarına (IHA) silah başta olmak üzere çeşitli ekipmanların kanat altında yüklenmesi yaygın bir kullanımdır. Bunun bir örneği Şekil 1'de görülebilir. Daha fazla havada kalma kapasitesini sağlayan bu kanat geometrisi, yukarıda bahsedilen aeroelastik ve dinamik etkileri düşünüldüğünde yük ayrıştırma açısından dezavantajlı konuma gelecektir, çünkü bu esnek yapılar büyük elastik deformasyonlara ve harici yüklemekten kaynaklanan dinamik tepkilere duyarlıdır [Patil, 1999]. Bu sebepten, kanat yapısal tasarımı yapılırken yük ayrıştırmanın kanat dinamiğine etkisi mutlaka analiz edilmelidir.

*Mekatronik Mühendisi, E-posta: daghanburak61@gmail.com

†Dr., Post-doktora araştırmacı, Makina Müh. Böl., E-posta: a.tamer@imperial.ac.uk



Şekil 1: Kanat altında yük taşıyan insansız hava aracı örnekleri. Yukarı görsel: Bayraktar SIHA [Baykar Savunma, 2020]; Aşağı görsel: TAI Anka [Haber Dergilik, 2020]

Yük ayırmada önemli olan, yükün serbest bırakıldığında, uçuş emniyetini tehlikeye atmadan uçağı güvenli bir şekilde terk edebilmesini sağlamak için kullanılır. Problemin bir vechesi yükün uçağı herhangi bir yere çarpmadan ayrılmasıdır. Bu açıdan, hava aracı çarpmaya karşı emniyette olsa dahi, yükü ayırma öncesinde taşıyan kanatlar yük ayrımına tepki verir. Yükün ağırlığına ve taşıyıcı yapının mukavemetine bağlı olarak, bu tepki kararlı veya kararsız olabilir. Çünkü belli bir anda harici yüklerden birinin serbest bırakılması durumunda, kanat salınma başlayacak ve bu salınımlar yeterli sönümlenme olmadığı durumlarda genliğini arttıracaktır. Sorunun bu yönü, özellikle aeroelastik kararlılık problemlerine daha eğilimli esnek kanatlar için araştırmaya değerdir.

Problemin çözümü için geliştirilecek modelin, içinde elastik, aerodinamik ve atalet yüklerinin aynı anda dahil edilebileceği multidisipliner araçlar geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca zamana bağlı etkenler olduğundan doğrusal statığe ek olarak, zamana bağlı, geçici ve harekete bağlı yükleri de dahil etmek zaruridir. Bir diğer husus da kanadın deplasmanı arttığında lineer olmayan etmenlerin de probleme önemli etki yapacağıdır. Bundan dolayı kullanılan simülasyon aracının lineer olmayan bir çözücüye sahip olması beklenmektedir. Tüm bu etmenler göz önüne alındığında, aerodinamik elemanlara sahip bir çoklu cisim dinamiği aracının, yukarıda takdim edilen problemin çözümünde en uygun yöntem olacağı değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, bir yükün ayrılmasının ardından kanat aeroelastik tepkisinin, çoklu cisimler dinamiği yöntemi kullanılarak nasıl simüle edilebileceğini göstermektir. Bir sonraki bölüm problemin modellenmesi ve simülasyonunda kullanılan yöntemi anlatmaktadır. Daha sonrasında probleme örnek bir uygulamanın nasıl geliştirildiği anlatılmış ve uygulamanın sayısal ve görsel sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır. Sonuç bölümü ise gelecekte geliştirilmesi düşünülen yönleriyle birlikte çalışmamızın kısa bir özetini vermiştir.

YÖNTEM

Bu çalışmada açık kaynaklı bir genel amaçlı MBDyn [MBDyn, 2020] çoklu cisim dinamiği yazılımı kullanılmıştır. Politecnico di Milano Havacılık ve Uzay Bilimi ve Teknolojisi Bölümünde geliştirilmiş olan MBDyn, genel amaçlı olsa da havacılık odaklı bir çok elemanı kütüphanesinde barındırmaktadır. Her geçen gün bağımsız katılımcılar ile kapasitesini arttırmakta olan MBDyn, aşağıdaki yetkinliklere sahiptir:

- Rijit ve esnek gövdelerin lineer olmayan mekaniği;
- Geometrik olarak kesin kompozit hazır kiriş ve kabuk elemanları;
- Bileşen modu sentez elemanları, topaklı elemanlar;
- Akıllı malzemeler;
- çok modlu, çoklu fizik sistemlerinin entegresini, çok disiplinli simülasyonunu;
- Elektrik şebekeleri, aktif kontrol, hidrolik şebekeler;
- Sabit kanatlı ve rotorlu araçlar aerodinamik ve iç akış elemanları.

MBDyn heterojen dinamik sistemlerin davranışını ilk prensip denklemlerine göre simüle eder. Bir başka ifadeyle:

$$M\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{p} \quad (1a)$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{f}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, t) + \phi_{/\mathbf{x}}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (1b)$$

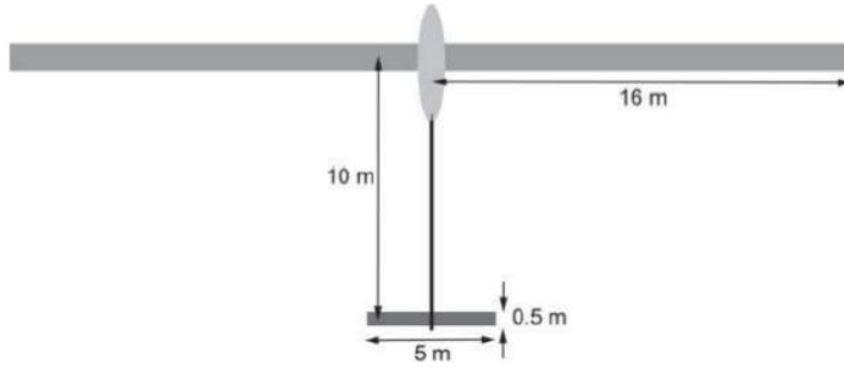
$$\phi(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (1c)$$

diferansiyel cebirsel denklem sistemini doğrudan çözer[Masarati, 2014]. MBDyn, çoklu fizik problemlerinin birlikte simülasyonu için harici çözücülere kolayca bağlanabilir; örneğin: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD), toprak dinamiği, C, C ++ veya Python eş tarafı API kullanarak Scicos, Scicoslab ve Simulink gibi blok diyagram çözücüler. Bütün bu özellikleriyle MBDyn, havacılık alanında (uçak, helikopterler, tilt rotorlar, uzay aracı), rüzgar enerjisi alanında (rüzgar türbinleri), otomotiv alanında (otomobiller, kamyonlar) ve mekatronik sahalarda (endüstriyel robotlar, paralel robotlar, mikro hava araçları (MAV)), karmaşık sistemlerin dinamiklerinin analizi ve simülasyonunda aktif olarak geliştirilmekte ve kullanılmaktadır.

Okuyucu MBDyn ile ilgili teorik bilgiyi [Masarati, 2014]'de bulabilir. Kodun kurulumu, yeni sürümler, kullanma kılavuzu ve örnekler ise web-sitesinden takip edebilmektedir [MBDyn, 2020]. Ayrıca MBDyn, açık kaynaklı ve genel amaçlı bir yazılım olduğundan, bilimsel çalışmalarda yapılmaktadır [Mataboni, 2012; Cavagna, 2011; Attolico, 2005; Cavagna-2, 2011].

Hava Aracı

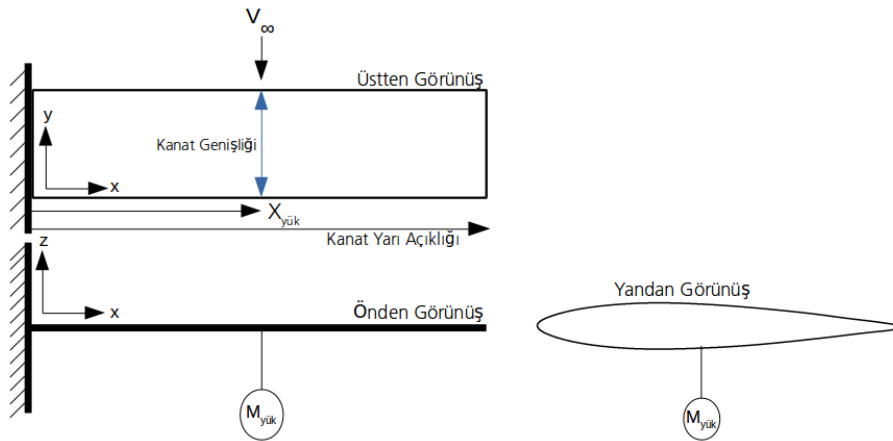
Şekil 2'de temsil edilen uçak yüksek irtifa uzun seyir operasyonuna imkan tanıyacak şekilde tasarlanmıştır. Bu amacın gerçekleşmesini sağlayan ince ve uzun kanatları artan alan ile taşıma kuvvetini arttırmakta ve aerodinamik verimliliğe katkı sağlamaktadır. Bunun sonucunda ise kanat rijitliğinden ödün verilmekte ve deplasmanlar artmaktadır. Bu yapıyla bu çalışmanın amacına uygun olan bu uçakla ilgili sayısal veriler Tablo 1'te verilmiştir ve Şekil 3'de resmedilmiştir. Yük ayrıştırma simülasyonu için uçağın tek kanadı, kanat kökünden sabitlenmiş bir şekilde kullanılmıştır ve bir sonraki bölümde açıklandığı şekilde MBDyn'da modellenmiştir.



Şekil 2: Çalışmada kullanılan uçağın geometrisi [Ripepi, 2011].

Tablo 1: Kanada Karşılık Gelen Verilerde Yük Ayrımı

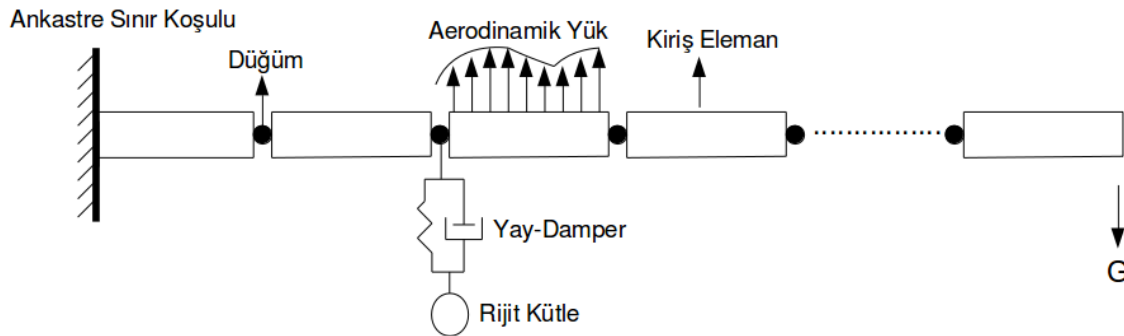
Kanat Test Parametresinde Yük Ayrımı	Değer
Yük Kütlesi	1.0 kg
Yük Katılığı N/m	1e8
Motor Kuvveti	3750
Yük Ayrışma Süresi	25 sn
Kanat Yarı Açıklığı	16 m
Kanat Genişliği	1 m
Birim uzunluk başına kütle	0.75 kg/m
Eylemsizlik Momenti (% 50 Kanat Açıklığı)	0.1 kgm
Açıklıklı Elastik Eksen	%50 kanat açıklığı
Ağırlık Merkezi	%50 kanat açıklığı
Bükülme Sertliği	$2 \times 10^4 \text{ Nm}^2$
Burulma Sertliği	$1 \times 10^4 \text{ Nm}^2$
Bükülme sertliği (Kiriş yönünde)	$4 \times 10^6 \text{ Nm}^2$



Şekil 3: Yüksek esnekliğe sahip kanat ve yük görünümleri (ölçeksiz)

Aeroelastik Kanat Modeli

MBDyn yapısal modelinde üç düğümlü sonlu hacimli kiriş elemanı [Ghiringhelli, 2000] kullanılır. MBDyn Simülasyon ortamında öngörülen 32 düğüm üzerinde 16 kiriş elemanı tanımlanmıştır. Her kiriş elemanı için bir düğüm ortaktır. Kesit özellikleri 6x6 yapısal yasa matrisi olarak verilmiştir. Ayrıca, sabit ve düzensiz aerodinamik kuvvetleri içeren taşıma hattı teorisi kullanılarak formüle edilen aerodinamik elemanlar tarafından da ayrıştırılır. Bu modelin üzerine, kanada tek bir noktada bağlı bir yükü temsil eden bir kütle eklenir. Yükün üzerinde aerodinamik bir model yoktur ve kanat arasındaki bağlantı kütsüz bir yay ve sönümlendirici çifti ile temsil edilir. MBDyn kanat modelinin elemanları Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4: MBDyn kanat modelinin elemanları.

Yük Ayrışma İşlemi

Kanat, rüzgar tüneli testinde olana benzer şekilde tek taraftan sabitlendi. Simülasyonun bir noktasında bağlantı sürücü (drive) elemanları vasıtasıyla serbest bırakılır ve kanat kökünden 7 m uzağında bulunan yük ayrılır. Bu anın sonrasında kanat ve yük bağımsız davranır. Yük serbest düşüşe devam ederken, kanat ise hafifler ve ayrılan kütleye tepki verir. Kanat ucu yer değiştirmesinin yanıtı, ayrılmadan önce ve sonra gözlenir. Bu nedenle, aksi belirtilmedikçe, yer değiştirme, kanat ucunda bulunan düğümüne karşılık gelir. Yük ankastre kanadın altındadır. Simülasyon devam ederken, 25.saniyede kanattan serbest bırakılır ve herhangi bir engelle karşılaşmadığı varsayılarak serbest düşüşe geçer. Bu 25 saniyelik süre, aerodinamik yükler tedricen sisteme verildiği için başlangıç konfigürasyonunun (kanat ve yük) bir dengeye ulaşmasını sağlamak için seçilir. Bu sayede simülasyonun sayısal olarak yakınsaması sağlanır.

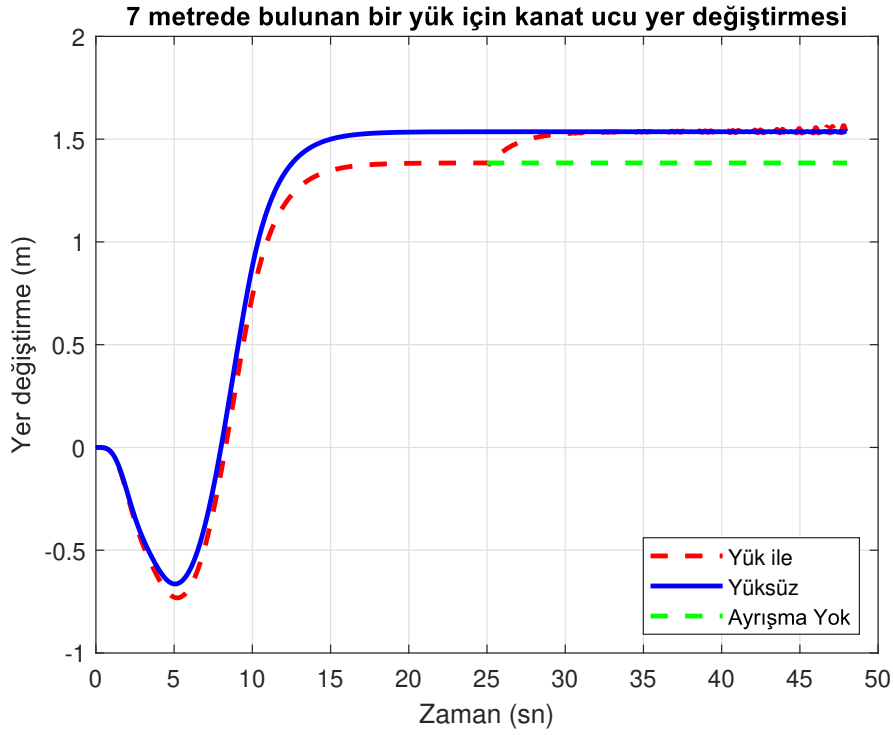
UYGULAMA

Bu bölüm yukarı tanımlanmış kanat modelinin yük ayrımı sonucunda verdiği tepkiyi analiz eder. Birinci analizde kanadın yüklü ve yüksüz farklı konfigürasyonları karşılaştırılmıştır. Bir sonraki analiz, yükün kanat boyunca konumunun kanat tepkisine etkisini incelenmiştir. Son analiz ise yükün ağırlığının kanat deplasmanını ne derece değiştirdiğine bakmıştır.

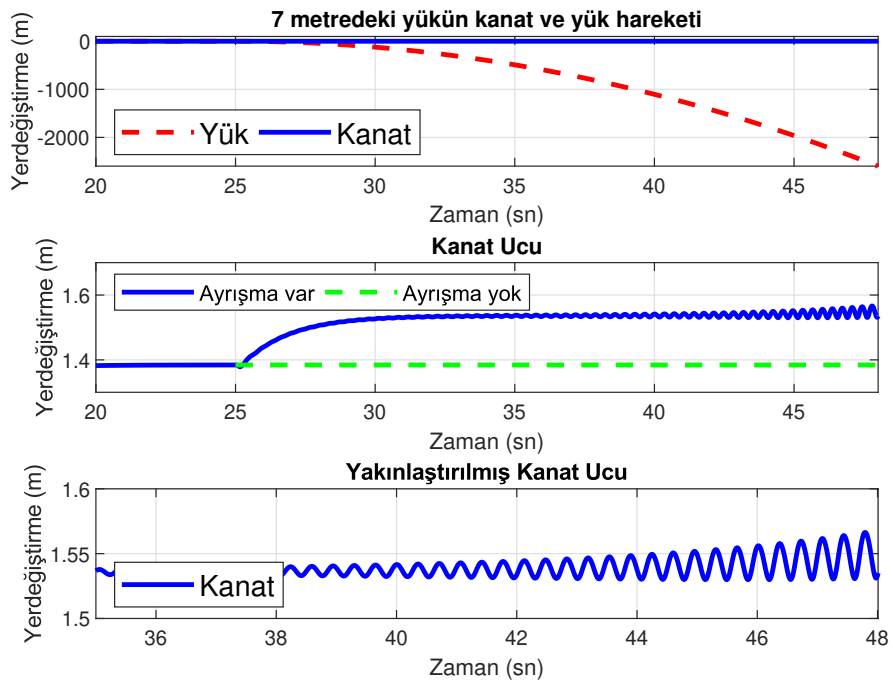
Analiz-1: Kanadın Farklı Konfigürasyonlarının Karşılaştırılması

Şekil 5, tüm simülasyon süresince kanat ucu yer değiştirmesini göstermektedir. Simülasyonun ilk saniyelerinde yapının negatif yer değiştirmesinin nedeni ($T = 15$ öncesi aşağı doğru hareket) yüklemenin kademeli olarak arttırılmasından kaynaklanır. Yük $t = 25$ 'de serbest bırakıldıktan sonra, kanat yükün hareketinin zıt yönünde yer değiştirir. Bu hareket, kanadın yükü muhafaza ettiği 'ayrılmamış' durumla karşılaştırıldığında daha iyi gözlemlenebilir. Şekil 5'deki figürde yük ayrıştığı durumdaki tepki, yük ayrışmamış kanadın kanat ucu tepkisine yaklaşıyor gibi görünüyor.

Fakat, Şekil 6'deki yakınlaştırılmış görsele baktığımızda aslında kanadın salınımlarının genliğinin kararsız bir şekilde büyüdüğünü görmekteyiz. Bu analiz bize, normal ve yeni yük ile ağırlaştırılmış konfigürasyonlarda kararlı olan bir kanadın, yük ayrılması sonucu kararsız bir hale gelebildiğini göstermektedir.



Şekil 5: 7 metrede bulunan bir yük için kanat ucu yer değiştirmesi

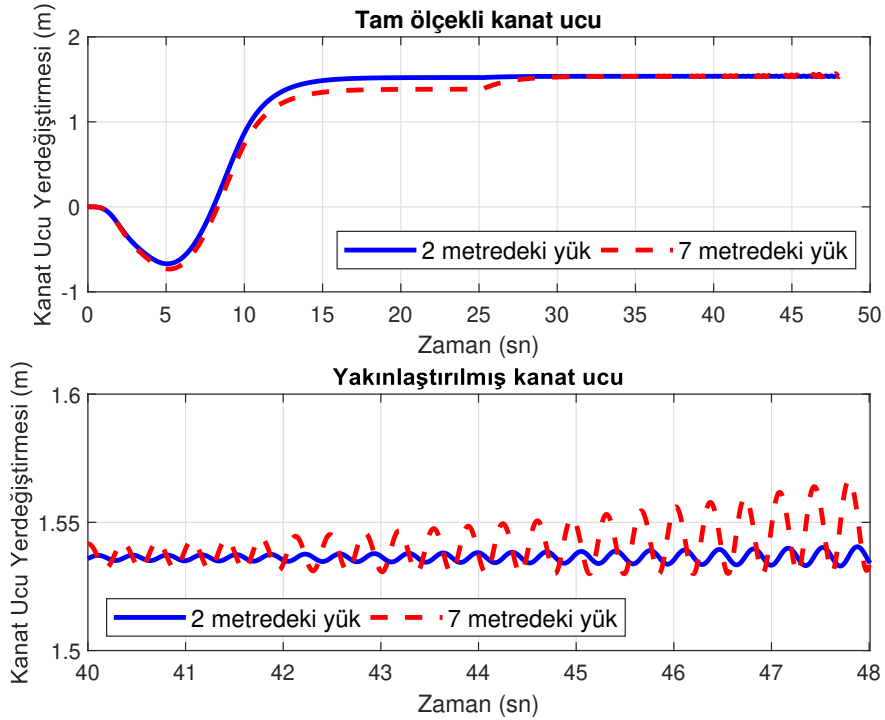


Şekil 6: 7 metrede bulunan bir yük için kanat ve yük hareketinin yakınlaştırılmış hali.

Bu sonuçlarda kayda değer bir husus ise yüklü konfigürasyonda olan bir ayrışma olmadığı durumda kararlı, olduğu durumda ise kararsız olmasıdır. Lineer bir model varsayılırsa, yük ayrışsın veya ayrışmasın, kanadın her iki durumda kararlı veya kararsız, aynı özelliğe sahip olması beklenirdi. Çünkü, lineer bir sistemin kararlılık özelliği kanadın tepki genliğinden bağımsızdır, çünkü kararlılığı tanımlayan sönümlenme, katılık ve kütle parametreleri sabittir ve hareketten bağımsızdır [Strogatz, 1994]. Fakat, bu varsayımın olmadığı lineer olmayan sistemlerde, sistem katsayıları değişken ve harekete bağlıdır. Dolayısıyla, lineer analizde kararlı (veya kararsız) olması beklenen bir sistem, lineer olmayan analizde kararsız (veya kararlı) olabilir. Bu sonuç bize lineer olmayan simülasyon sayesinde kanattaki kararsızlığın tespit edilebildiğini göstermektedir.

Analiz-2: Yük Konumunun Etkisi

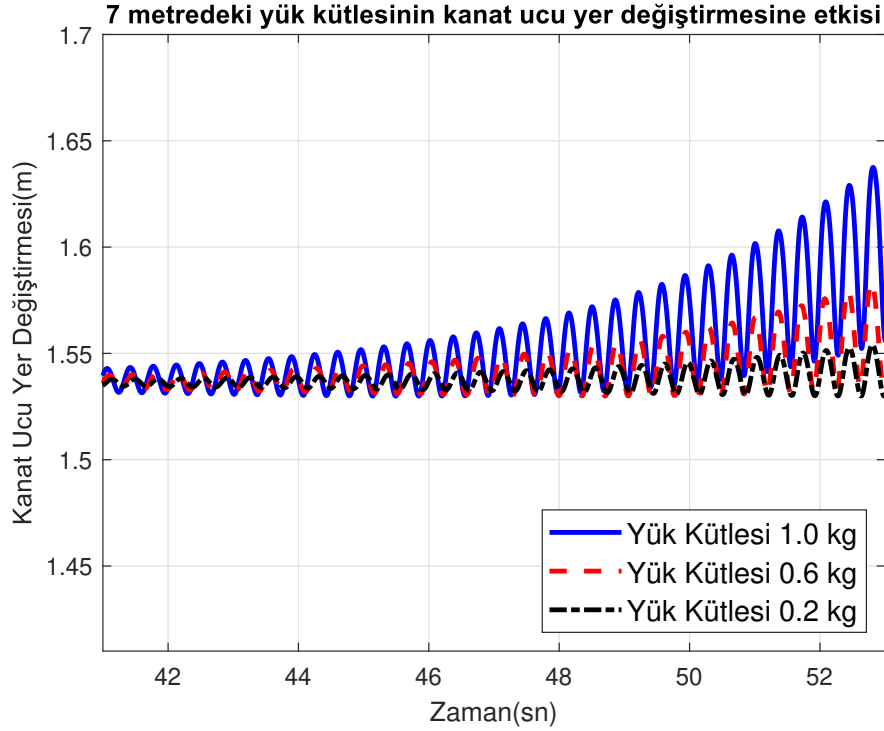
Yükün konumu, kanat ucunun tepkisi üzerindeki etkisi açısından simüle edilmiştir. Yükün farklı konumlarda kanat ucunda yapmış olduğu yer değiştirme miktarı incelenmiştir. Yük 2 metre ve 7 metre konumlarındadır. Şekil 7'deki grafikte gösterildiği gibi, yükün 7 metrede olması durumunda yer değiştirme daha büyüktür. Bununla birlikte, her iki konumdada yük ayrıldıktan sonra salınım genliği artmaktadır. Bu nedenle, yükün konumunun sistem kararlılığına etkisi olmadığı anlaşılmıştır.



Şekil 7: 2 metre ve 7 metredeki yükün kanat ucu yer değiştirmesine etkisi

Analiz-3: Yük Ağırlılığının Etkisi

Şekil 8'deki kanat altındaki yükün ağırlılığının, kanat ucunda meydana gelen salınım (yer değiştirme) üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yük üç ayrı ağırlılık değerine sahiptir. 1.0, 0.6 and 0.2 değerleri ile analiz edilmiştir. Şekil 8'da gösterildiği gibi, yükün 7 metrede ayrıldıktan sonra kanattaki salınımını görüyoruz. Yükün kütlesi azaldıkça, kanadın yer değiştirmesi azalır fakat kanadın kararsız davranışı değişmemektedir.



Şekil 8: 7 metredeki yük kütlelerinin kanat ucu yer değiştirmesine etkisi

SONUÇ

Bu çalışmada, esnek bir kanattan yük ayrılmasının kanat üzerindeki dinamik etkisinin nasıl simüle ve analiz edileceği incelenmiştir. Çalışmada yöntem olarak, çoklu cisim dinamiğini kullanan açık kaynak kodlu bir simülasyon aracı kullanılmıştır. Analizler için, narin ve uzun kanatlara sahip insansız bir uçak seçilmiştir. Uçağın kanadı izole edilmiş ve lineer varsayım kullanılmadan bahsedilen araçla modellenmiş ve yük ayrıştırma simülasyonu yapılmıştır. Sonuçlar, yük bu analizlerin kanat tepkisini anlamak açısından önemli bilgiler sunabileceğini göstermiştir. Ayrıca, lineer olmayan yöntemler kullanmanın esnek yapıların dinamik analizlerinde sunduğu faydalarda tartışılmıştır.

Bu çalışmanın aşağıdakiler ile geliştirilmesi düşünülmektedir:

- ankastre kanat yerine tüm uçak modeli kullanılarak gövde yapısal dinamiğinin kararlılığa etkisinin araştırılması;
- yapılan analizlerle belirlenen kararsızlığın, nasıl elimine edilebileceği;
- yük ile kanat arasındaki aerodinamik etkileşimin eklenerek dinamik analize etkisinin gözlemlenmesi.

Tanıtılan yazılım, yük ayrılma analizleri için bu kapsamı gittikçe artan çalışmaları destekleyebilecek yetkinliktedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmaya sundukları idari ve teknik destekten ötürü Prof. Pierangelo Masarati ve Dr. Andrea Zaroni'ye teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

M. Attolico, P. Masarati, and P. Mantegazza "Trajectory Optimization and Real-Time Simulation for Robotics Applications", International Conference on Advances in Computational Multibody Dynamics ECCOMAS Thematic Conference, Madrid, Spain, June 21-24 2005, Universidad Politecnica de Madrid.

<https://www.baykarsavunma.com//foto-galeri.html>, Son erişim tarihi: 04 Ağustos 2020

<http://ssdergilik.com/tr/HaberDergilik/Turkiye-nin-simsek-i-ANKA-B-den-firlatildi>, Son erişim tarihi: 04 Ağustos 2020

L. Cavagna, A. Fumagalli, P. Masarati, M. Morandini, P. Mantegazza "Real-Time Aeroservoelastic Analysis of Wind-Turbines by Free Multibody Software", Multibody Dynamics: Computational Methods and Applications, Springer, 2011

L. Cavagna, P. Masarati, G. Quaranta "Coupled Multibody/CFD Simulation of Maneuvering Flexible Aircraft", Journal of Aircraft, 0021-8669 48(1):92-106, January-February 2011, doi:10.2514/1.C000253

Ghiringhelli, G. L., Masarati, P., and Mantegazza, P. A multi-body implementation of finite volume beams. AIAA J., 2000, 38(1), 131–138. DOI: 10.2514/2.933.

Masarati, P., Morandini, M., and Mantegazza, P.(July 11, 2014). "An Efficient Formulation for General-Purpose Multibody/Multiphysics Analysis." ASME. J. Comput. Nonlinear Dynam. October 2014; 9(4): 041001. <https://doi.org/10.1115/1.4025628>

M. Mataboni, P. Masarati, G. Quaranta, P. Mantegazza "Multibody Simulation of Integrated Tiltrotor Flight Mechanics, Aeroelasticity and Control" AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, September/October 2012, doi:10.2514/1.57309

<https://www.mbdyn.org/>

M.J.Patil, D.H.Hodges ,C.E.S.Cesnik(5 July 2000). "Limit-Cycle Oscillations in High-Aspect-Ratio Wings" 40th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, St. Louis, Missouri, April 12-15, 1999. <https://doi.org/10.1006/jfls.2000.0329>

M Ripepi and P Masarati Reduced order models using generalized eigenanalysis DOI: 10.1177/14644193JMBD254.

Steven H. Strogatz. Nonlinear Dynamics and Chaos publisher CRC press, 1994.