

## PALLERİ ESNEK MODELLENMİŞ BİR HELİKOPTER ROTORUNUN AERODİNAMİK ANALİZİ İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ ÇOK GÖVDELİ ANALİZİ

Erkan ÜN<sup>1</sup> ve Prof. Dr. Metin Orhan KAYA<sup>2</sup>  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

### ÖZET

*Bu çalışmada bir helikopter rotorunun rijit ve elastik olarak modellenmesinin rotor performansına etkisi incelenmiştir. Askı uçuşu koşulunda çözülen rotorun farklı kollektif açılarında ve dönüş hızlarında performansının değişimi çalışmada derlenmiştir. Çözüm için 'Simcenter Motion' programında çok gövdeli simülasyon modeli oluşturulmuş ve 'Simulink' programında da aerodinamik model oluşturulup bu iki model birleştirilmiştir. Simcenter'da bulunan yapısal modelin doğrulamasında Euler-Bernoulli giriş teorisi kullanılmıştır. Simulink'te yazılan aerodinamik model için ise, Rotor profilinin aerodinamik özellikleri için Mach sayısına bağlı olan bir aerodinamik tablo kullanılmış, rotorun aerodinamik modellenmesi için de momentum teorisinden faydalanılmıştır. Çıkan sonuçlar rotorun çektiği güç, rotorun ürettiği itki, rotor verimi ve pal eğilme miktarları açısından değerlendirilmiş ve çözümde rijit rotor yerine elastik rotor çözülmesinin çözüm kalitesine katkıları açıklanmıştır.*

### GİRİŞ

Helikopter, dikey kalkış, iniş, ileri uçuş, yana uçuş ve hatta geriye uçuş kabiliyetine sahip özel bir hava aracıdır. Helikopterler bu kabiliyetlerini hem kontrol, hem itki sağlayan ana rotorları sayesinde gerçekleştirmektedirler. Ancak bu kabiliyetleri sağlamanın bedeli olarak helikopter rotoru, uçak kanadına göre daha karmaşık bir tasarıma sahip olmak zorundadır. Bir helikopter rotorunda rotor göbeği, paller, menteşeler, sönümleyiciler vb. birçok ayrı parçadan oluşmaktadır. Rotor sisteminin modellenmesi açısından çok gövdeli benzetim araçları (Multibody simulation) birçok kolaylık sağlamaktadır. Geleneksel olarak rotor ve helikopter analizinde kullanılan Flightlab, CAMRAD vb. ticari yazılımlar mevcuttur ancak bu programların kaynak koduna müdahale edilememesi, programlara ulaşım zorluğu ve tanımlı konfigürasyonlar dışında bir tasarımın analizinin zor olması gibi bazı dezavantajları vardır.

Çok gövdeli simülasyon programlarında teknik çizim üzerinden çalışılabildiği ve çizilen cismin ataletsel özellikleri kolayca hesaplanabildiği/değiştirilebildiği için geleneksel helikopter analiz programlarına göre avantajlıdır. Ayrıca, bazı çok gövdeli benzetim araçlarında çizilen parçanın elastik olarak modellenmesi de mümkündür. Bu çalışmada kullanılan Simcenter motion programında Euler-Bernoulli giriş teorisini kullanan bir modül ile helikopter palleri elastik olarak modellenmiştir. Ancak çok gövdeli analiz araçlarının asıl amaçları arasında helikopter rotoru analizi olmadığı için rotor aerodinamiğini hesaplayabilecek bir altyapıya sahip değildir. Bu sebeple, Simulink ortamında çalışan bir rotor aerodinamik modeli hazırlanmış ve programın Simulink bağlantı özelliği kullanılarak iki modelin birbiri ile eşzamanlı çalışması sağlanmıştır.

Literatürde çok gövdeli benzetim araçları ve program içi denklem kullanarak basit aerodinamik hesaplarla rotor modellenmesi yapan [Özturan 2019], sadece burulma ekseninde elastisiteyi katarak uçuş mekaniğini inceleyen [Akel, 2017] çalışmalar bulunabilir. Sadece pal üzerinde modal özelliklerinin incelendiği çalışmalar da [Arnold 2010] literatürde bulunabilir. Bu çalışmayı diğerlerinden farklı kılmayı hedeflenen alan ise yapısal ve aerodinamik modellerin bağlantısının daha kolay düzenlenebilir bir biçimde sağlanması, gerektiğinde farklı aerodinamik ve yapısal modellerin yerleştirilebilmesi ve çıkan sonuçların aynı zamanda rotor performansı açısından da incelenmesidir.

<sup>1</sup> Erkan ÜN, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: une15@itu.edu.tr

<sup>2</sup> Prof. Dr. Metin Orhan KAYA, Uçak Müh. Böl., E-posta: kayam@itu.edu.tr

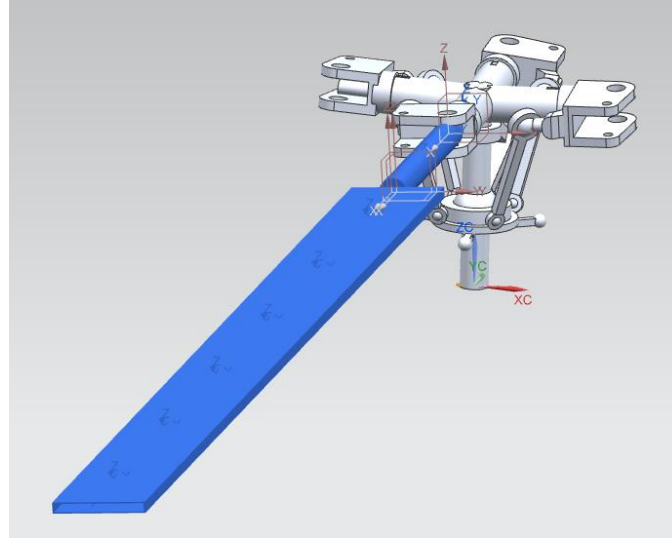
## YÖNTEM

Bu çalışma rotorun dinamik modellenmesi, yapısal modellenmesi ve aerodinamik modelin oluşturulması olarak nitelendirilebilecek aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak bir rotor modellemesi yapılmış ve yapılan modele uygun kütle özellikleri verilmiştir. Analizi yapılan rotor geometrisi, deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere yapılmış, ölçeklendirilmiş bir rotor olan HART-II rotoru olarak seçilmiştir. Bu rotorun geometrik, yapısal ve ataletsel özellikleri için test sonuçlarından yararlanılmıştır [Van der Wall, B. G., Junker, B., Burley, C.L., 2002]. Rotorun temel özelliklerine Çizelge 1’de yer verilmiştir:

Rotor Yarıçapı	2 m
Rotor Türü	Menteşesiz (Hingeless)
Pal Sayısı	4
Pal Profili	NACA23012
Veter uzunluğu	0.121m
Katılık oran ( $\sigma$ )	0.077
Pal Lineer Burulması	$-8^\circ/r$
Dönüş Hızı	1041dev/dak
Boyutsuz sıfır burulma yarıçapı	0.75r
Boyutsuz pal başlangıç yarıçapı	0.22r

Çizelge 1: HART-II Rotorunun temel özellikleri

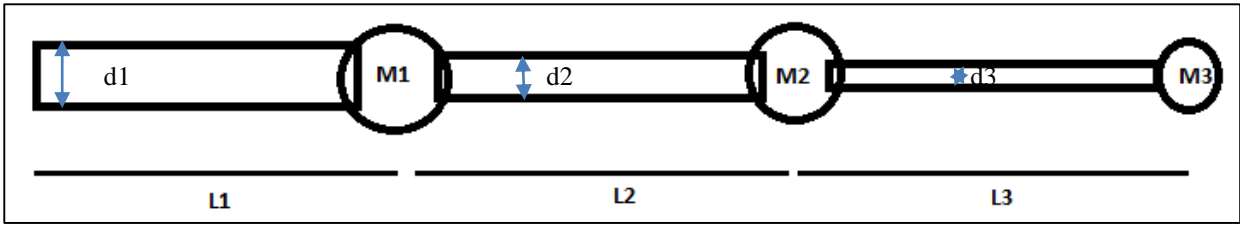
Rotor geometrisi tanımlanıp kütle özellikleri girildikten sonra rotor sisteminin menteşe vb. mekanizmaları ve dönüşten kaynaklanan ataletsel yüklerin dinamik modellemesi çoklu eleman dinamik analizinde kullanılan Simcenter 12 programı ile yapılmıştır. Çalışmadaki elastik rotor pal modellemesi de yine Simcenter’da bulunan ‘flexible link’ tanımlaması ile yapılmıştır. Bu modelleme aracı temel olarak Euler-Bernoulli kiriş modelini kullanmaktadır. Şekil 1’de Simcenter ortamında modellenen rotor görülebilir. Burada görünen rotor pali sadece eşdeğer yapısal özelliklere sahiptir, geometrik açıdan gerçek palle aynı olması beklenmemelidir. Aerodinamik hesaplar gerçek pal geometrisine göre yapıldığı için bu durumun çözüme bir etkisi olmamıştır.



Şekil 1: Simcenter’da modellenen rotor. Pal modellemesi yapısal verilen özellikleri sağlayacak şekilde tanımlanmış ‘Flexible Link’ ile yapılmıştır. Neden tek palin modellendiği ileriki bölümlerde açıklanacaktır.

### Yapısal Modelin Doğrulanması

Bu çalışmada Simcenter’da tanımlanmış olan ‘Flexible Link’ yapısal modelin doğrulanması için basit bir kiriş modeli kurulmuş ve sonuçlar, tanımlanan kiriş için yapılan el hesabıyla karşılaştırılmıştır. Tanımlanmış kirişin özellikleri Şekil 2 ve Çizelge 2’de verilmiştir.



Şekil 2: Tanımlanan örnek kiriş sistemi Kiriş sol taraftan duvara mesnetlidir.

L1, L2, L3	1m, 1m, 1m
M1, M2, M3	5kg, 3kg, 1kg
Kiriş kesitleri	dairesel
Kesit çapları (d1, d2, d3)	60mm, 40mm, 20mm
Elastik modül	70GPa

Çizelge 2: Örnek kirişin temel özellikleri

Verilen parametrelerden faydalanarak kiriş için katılık matrisi çıkartılabilir. Katılık (K) matrisinin hesaplanmasının bir kolay yolu ise esneklik (E) matrisinin tersinin alınmasıdır. Esneklik matrisindeki değerlerin hesaplanması için, kiriş üzerinde ilgili noktalara birim kuvvet uygulanır ve bu uygulanan kuvvetin her noktada oluşturduğu yer değiştirmeler yazılır. Esneklik matrisinin tersi alınınca katılık matrisinin geldiği aşağıdaki denklemlerle gösterilmiştir:

$$\vec{F} = K * \vec{X}$$

$$\vec{X} = E * \vec{F}$$

$$K^{-1} * \vec{F} = K^{-1} * K * \vec{X} = I * \vec{X} = \vec{X}$$

(I matrisi birim matristir)

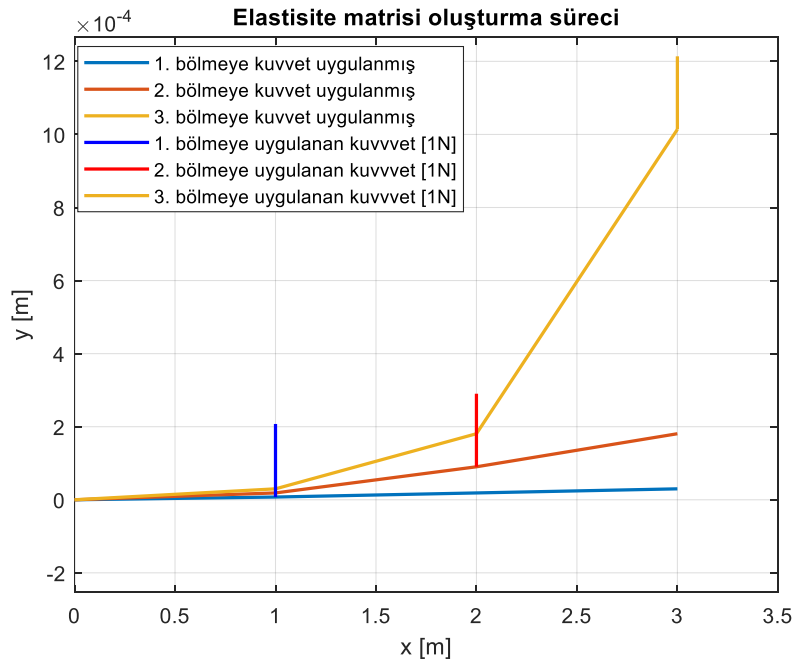
$$\vec{X} = E * \vec{F} = K^{-1} * \vec{F}$$

$$K^{-1} = E$$

Şekil 3 ve aşağıdaki denklemlerde matrisinin oluşturulma süreci anlatılmıştır:

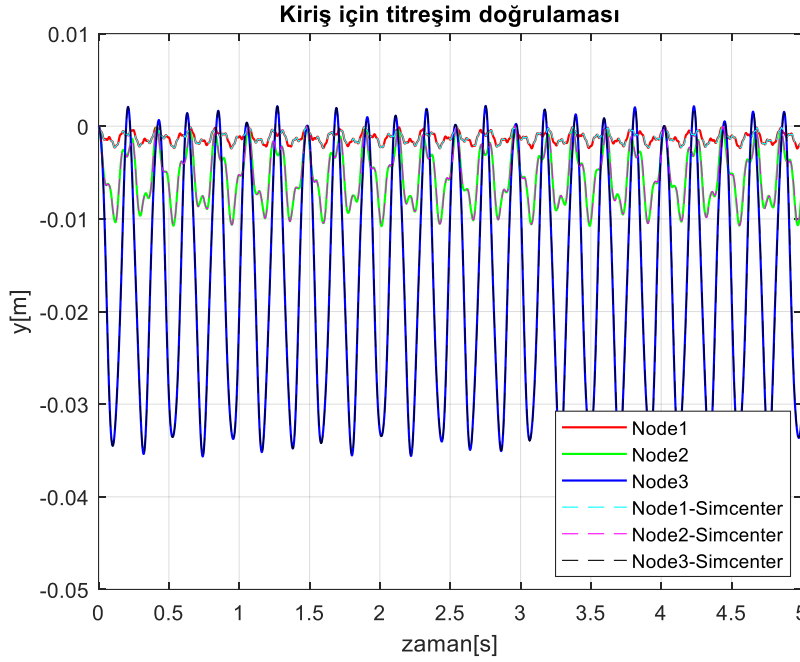
$$E = \begin{bmatrix} \delta_{y1_{F1}} & \dots & \delta_{yn_{F1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{y1_{Fn}} & \dots & \delta_{yn_{Fn}} \end{bmatrix}$$

$$K = E^{-1}$$



Şekil 3: Birim kuvvet altında örnek kirişte oluşan eğilme

Katılık matrisi bulunduktan sonra oluşan sistem için  $m\ddot{y} = K\vec{y} + m\vec{g}$  sisteminin zamana bağlı olarak çözümü yapılabilir. Bu karşılaştırma için giriş sisteminin başlangıç anında sıfır kuvvetle, hemen sonrasında yerçekimi ivmesi altında hareketi incelenmiştir. Girişin bu durum altında yaptığı titreşim hesaplanmış ve Simcenter'dan alınan sonuç ile üst üste çizdirilmiştir. Yapılan karşılaştırmada simcenter'daki 'Flexible Link' özelliği ile bulunan sonucun hesaplananla birebir aynı geldiği ve modülün doğru çalıştığı kanıtlanmıştır. Karşılaştırma grafiği Şekil 4'te görülebilir:

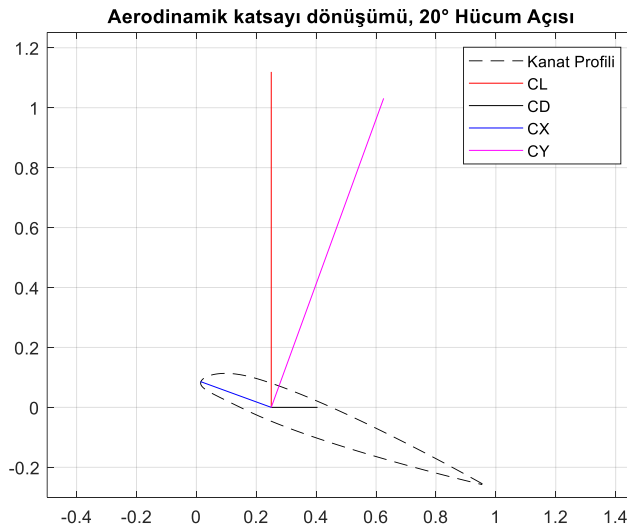


Şekil 4: Kiriş titreşiminde Simcenter sonucu ile hesaplanan sonucun karşılaştırması

### Aerodinamik Modelleme

Pallerde bulunan NACA23012 profilinin için  $[-180, 180]$  derece arasındaki ve Mach sayısına bağlı olarak deneysel yollarla elde edilmiş olan aerodinamik katsayıları tablo olarak bu çalışmada kullanılmıştır.. [Van der Wall, B. G., Junker, B., Burley, C.L., 2002] Kurulan Simcenter modelinde rüzgar/akış ekseninde kuvvetleri tanımlamak gövde ekseninde kuvvet tanımlamaktan daha zor olduğu için CL ve CD aerodinamik katsayıları gövde ekseninde CY ve CX olarak yeniden tanımlanmıştır. Rüzgar ekseninden gövde eksenine geçiş aşağıdaki denklemde ve Şekil 5'te gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} CX \\ CY \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} CD \\ CL \end{bmatrix}$$



Şekil 5: Aerodinamik katsayılarında rüzgar ekseninden gövde eksenine geçiş

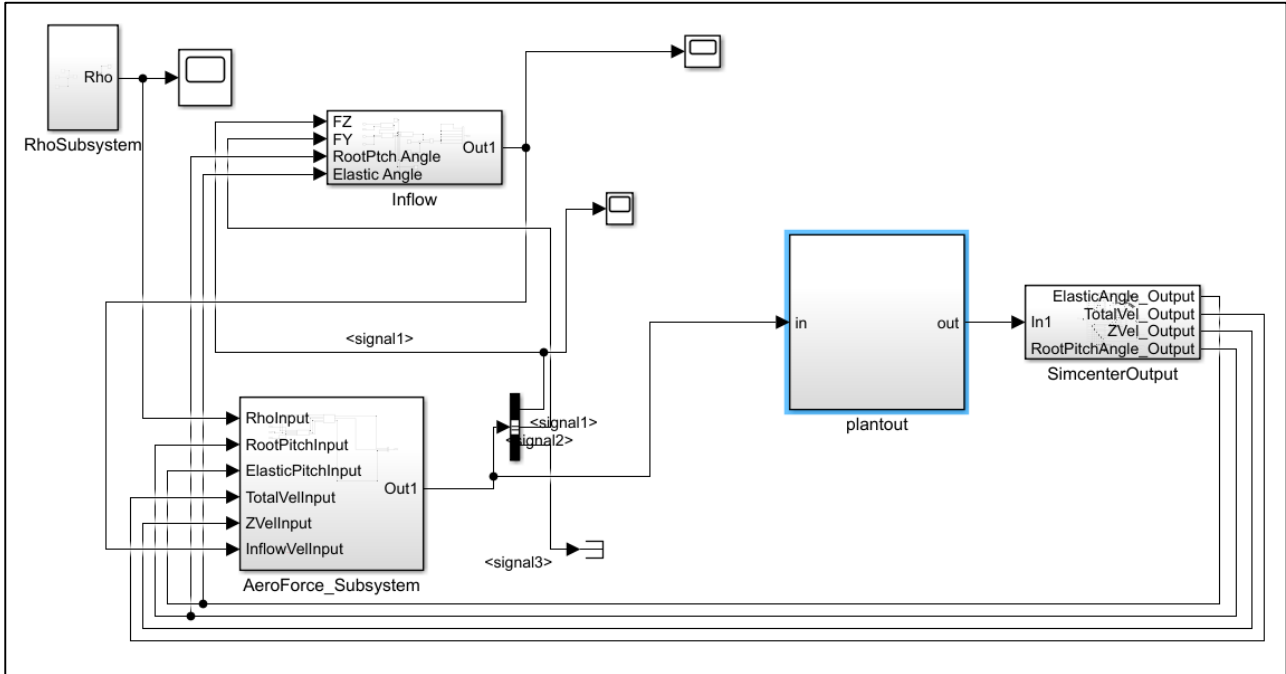
Rotorlarda itki ve güç hesabı yaparken indüklenen akışın da göz önüne alınması gerekmektedir. İndüklenmiş akış hesabı için kullanılabilir en temel yöntemlerden birisi momentum teorisidir [Leishman, 2006]. Bu teoride rotorun indüklediği akış rotorun itkisine bağlıdır:

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}}$$

Yukarıdaki denklemde T rotor itkisini,  $\rho$  hava yoğunluğunu, A ise rotorun disk alanını temsil etmektedir. Denklemden indüklenmiş akış hızının üretilen itkinin kareköküne bağlı olduğu görülebilir. Şekil 6'da gösterilen Simulink modelindeki 'Inflow' bloğu, temelde bu denklemi ve hesaplanan itkiyi kullanarak indüklenmiş akış hızı vermektedir. Hem indüklenmiş akış hızı, hem de üretilen itki birbirine bağlı parametreler olduğu için gerçek zamanlı bir sistemle çalışmak programlama açısından kolaylık sağlamaktadır. Hesaplanan indüklenmiş akış hızı da hücum açısı hesabına eklenerek hem itki hem de güç üzerinde iç akışın etkisi gözlemlenebilmiştir

### Aerodinamik-Yapısal Model Etkileşimi

Aerodinamik model ile gerçek zamanlı çözüm alınabilmesi ve Simcenter'da kurulan modellerle iki yönlü etkileşim kurabilmesini kolaylaştırmak için Simulink ortamında hazırlanmıştır. Kurulan modelin akış şeması Şekil 6'daki gibidir:



Şekil 6: Hazırlanan Simulink Modeli

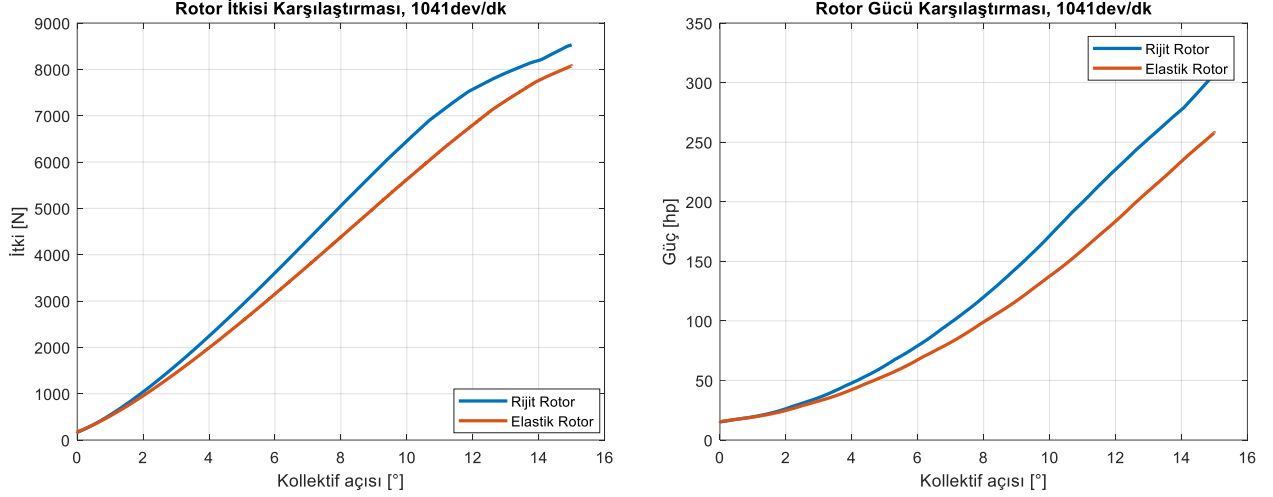
Üstte gösterilen Simulink modelinde çift yönlü iletişimi sağlayan blok 'plantout' olarak adlandırılmıştır. Bu blok Simcenter ortamında oluşturulmuş modelden, çözüm için gerekli olan açılma hızı, pal burulma miktarı vb. hesaplama için gereken bilgilerin alınması ve bu bilgilerle hesaplanan aerodinamik kuvvetlerin Simcenter modeline yollanmasını sağlamaktadır.

Simcenter modelinden alınan hız, açılma hızı, pal istasyon konumları, eğilme ve burulma çıktıları kullanılarak paller üzerindeki her kesitin üzerindeki hücum açıları hesaplanmıştır. Bulunan hücum açıları, dinamik basınç ve her pal istasyonuna düşen kesit alanı kullanılarak pal üzerindeki taşıma ve sürüklenme kuvvetleri hesaplanmıştır. Hesaplanan taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin de shaft eksenine dik ve paralel bileşenleri kullanılarak rotorun toplam itkisi ve rotorun ihtiyaç duyduğu güç bulunmuştur.

Hesaplanan aerodinamik kuvvet ve momentlerin Simcenter modeline tekrar yollanması sonucunda yapıda oluşan deformasyonlar hesaplanmış ve yeni pal deformasyonları tekrar Simulink modeline yollanarak analiz döngüsü ilerletilmiştir.

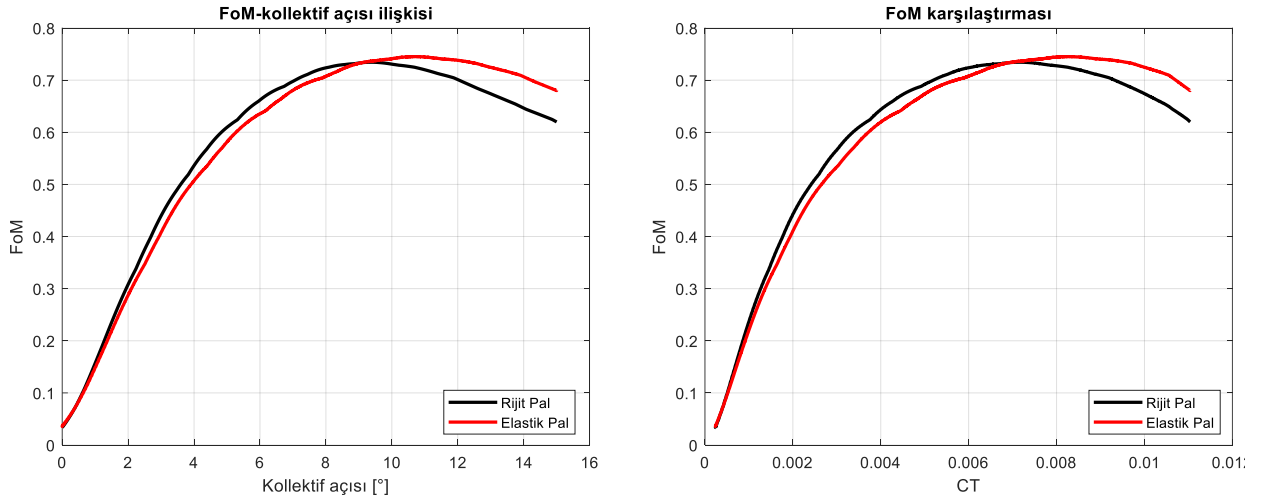
## UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada HART-II rotorunun askı uçuşu koşulunda, yani uçuş hızının sıfır olduğu durumda rijit ve elastik pallerle analizleri yapıp karşılaştırılmıştır. Kurulan modelde rotor 1041 dev/dak hızla döndürülmüş ve kollektif açısının değişimi ile rotorun itkisi, gereken güç miktarı ve elastik pal için eğilme ve burulma miktarları incelenmiştir. Aerodinamik analizler için hava yoğunluğu  $1.225\text{kg/m}^3$  olarak alınmıştır. Askı uçuş koşulu eksenel simetriye sahip olduğu için çözüm süresini kısaltmak amacıyla sadece tek pal modellenmiştir. Performans açısından Rijit pal ve elastik pal çözümünde görülen farklar itki-kollektif açısı ve gereken güç-kollektif açısı ilişkileri Şekil 7’de sunulmuştur:



Şekil 7: Rijit ve elastik rotorun itki ve güç açısından karşılaştırılması

Şekil 7’de görülebileceği üzere rotor elastik olarak analiz edildiğinde rijit rotordan daha az itki üretmekte, bu nedenle aynı kollektif açısında daha az güç çekmektedir. Rotorun verimi açısından daha etkili bir karşılaştırma yapmak için FoM (Figure of Merit-Fayda oranı) kullanılmalıdır. Bu parametre, bir rotorun o itkide harcaması gereken ideal gücün gerçekte harcadığı güce bölünmesiyle bulunmaktadır. FoM karşılaştırması Şekil 8’de verilmiştir:



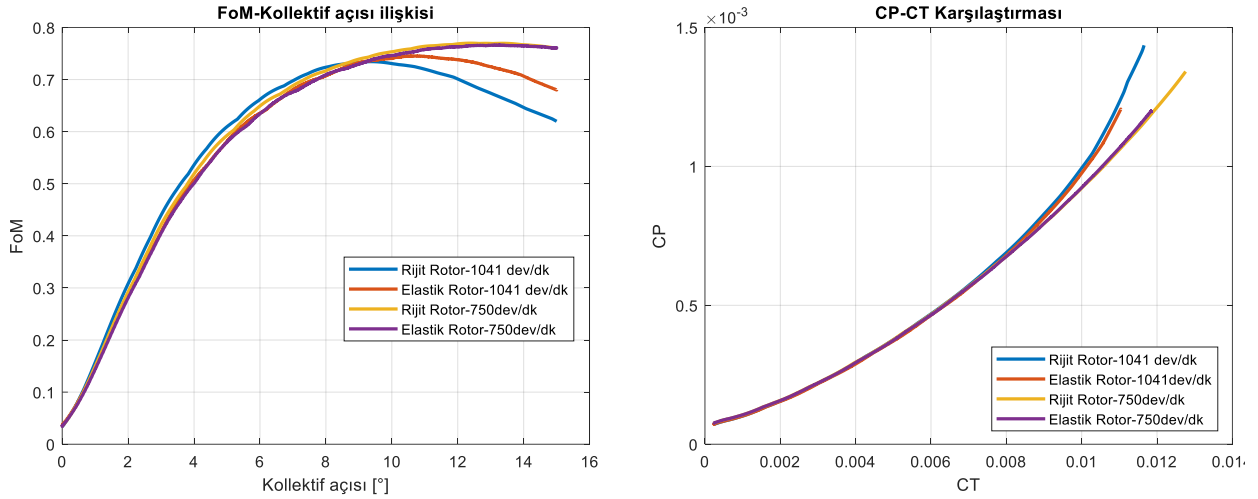
Şekil 8: FoM değerinin Kollektif açısına göre (solda) ve itki katsayısına göre (sağda) rijit ve elastik pal için karşılaştırılması

Yukarıdaki karşılaştırmalarda görülebileceği üzere, elastik rotor ve rijit rotor arasında aynı kollektif açısı değerinde itki ve güç farkı çıkarken, itki boyutsuzlaştırılıp CT halinde incelendiğinde rotor verimlerinin birbirine çok yakın olduğu ancak rotordan elastik çözüm alındığında rotor veriminin çok az iyileştiği görülmüştür. Bu iyileşme, rotor palideki burulmanın ideal burulma açısına yaklaşması ile açıklanabilir. İdeal burulma açısı hakkında detaylı bilgiye Rotorcraft Aeromechanics kitabından erişilebilir [Johnson, 2013]

Mach sayısının etkisinin rotor verimine etkisini incelemek için 1041 dev/dk dönüş hızı ile alınan sonuçlar ile 750 dev/dk ile alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 9’da

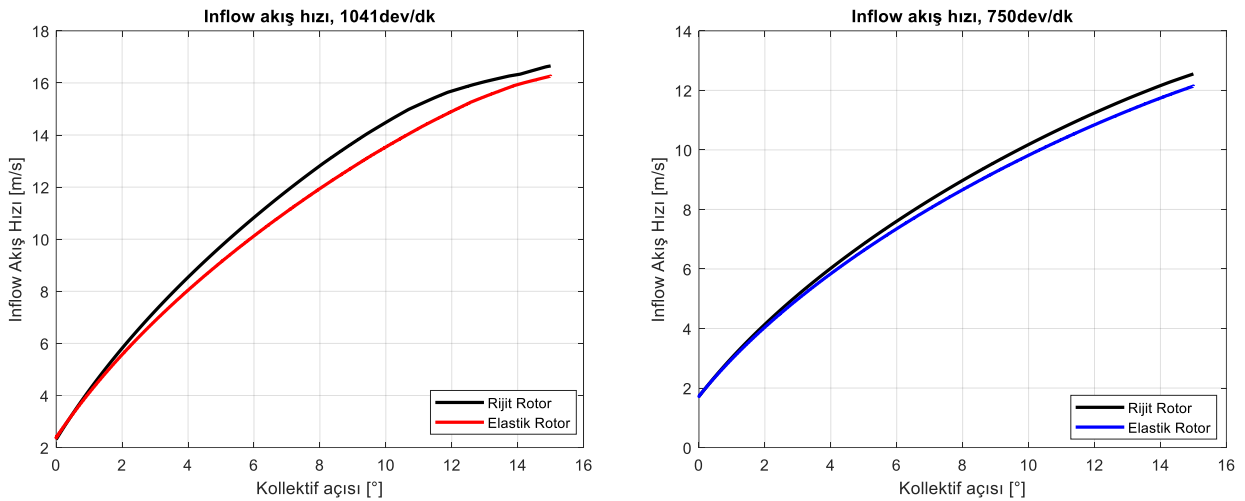
sunulmuştur. FoM grafiğinden görülebileceği üzere 750 dev/dk ile dönen rotorda rijit ve elastik rotor çözümleri neredeyse üst üste gelmekte ve iki sonuçta da rotorlar 1041 dev/dk'dan az da olsa daha verimli olmaktadır.

CP-CT grafiğinde ise, düşük itki katsayılarında güç katsayılarının neredeyse eşit olduğu, ancak yüksek itki katsayılarında 1041 dev/dk ile dönen rotorun aynı itki katsayısı için daha yüksek güç katsayısına ihtiyacı olduğu, çözümün rijit veya elastik rotorla alınmasının sonucu çok etkilemediği gözlemlenebilir.



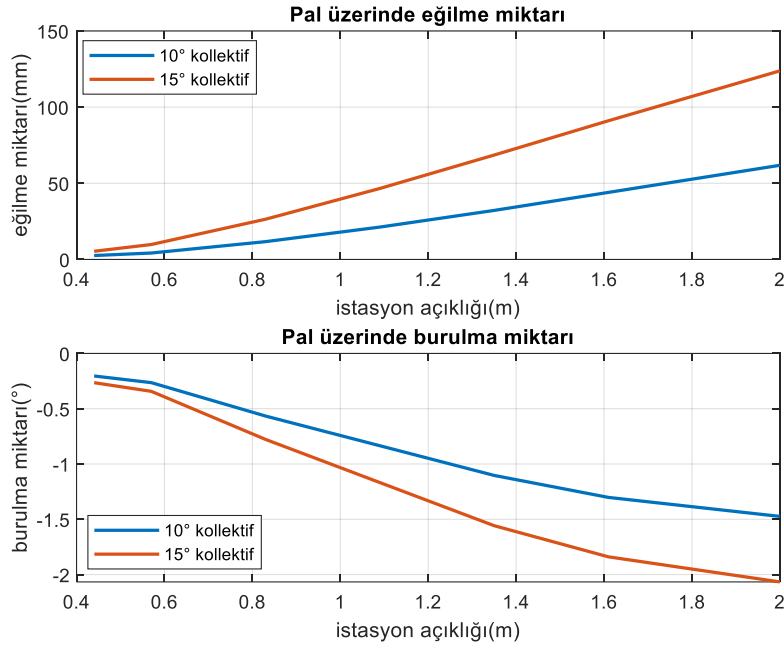
Şekil 9: Farklı rotor dönüş hızlarında FoM değerinin Kollektif açısına göre (solda) güç katsayısının itki katsayısına göre (sağda) değişiminin rijit ve elastik pal için karşılaştırılması

Inflow hızının Rijit-elastik rotor farkına ve devir sayısına göre değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Her iki dönüş hızında da rijit rotor aynı kolektif açısında daha yüksek itki verdiği için aynı koşulda daha yüksek inflow hızları hesaplanmıştır.

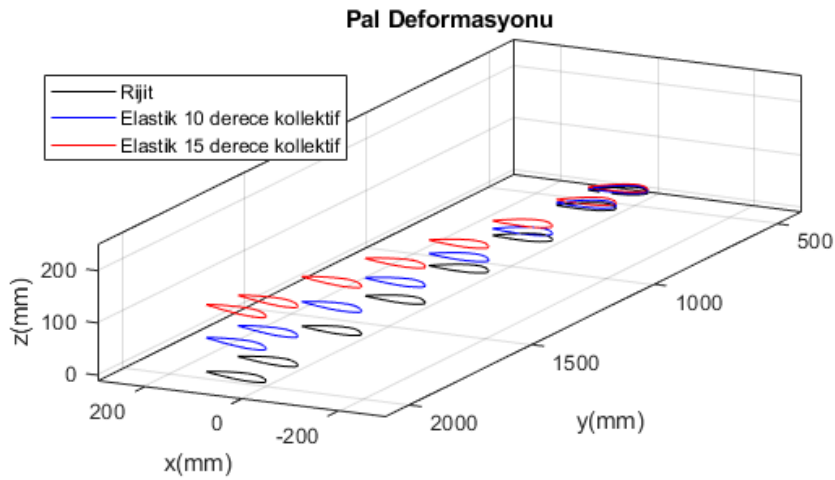


Şekil 10: 1041 dev/dk (solda) ve 750 dev/dk (sağda) için inflow hızının kolektif ile değişimi

Rotor pallerinde oluşan eğilme ve burulmanın itkiye göre değişimi de bu çalışmada ayrıca incelenmiştir. Burulmanın ve eğilmenin kolektif açısına, yani rotor itkisine bağlı olarak arttığı görülmüştür Şekil 12'de 10 ve 15 derece kolektif açılarındaki pal üzerindeki deformasyonlar verilmiştir:



Şekil 11: 1041 dev/dk'da dönen rotor için 10° ve 15° kolektif açılarındaki eğilme ve burulma miktarları



Şekil 12: 1041 dev/dk hızla dönen rotor için 10° ve 15° kolektif açılarındaki deformasyon grafiği

## SONUÇ

Çalışmada HART-II rotoru referans alınarak rotor modeli Simcenter ortamında oluşturulmuş, rotor aerodinamik kuvvet ve momentlerini hesaplamak için bir Simulink modeli hazırlanmış ve bu iki sistem birbirine bağlanarak dinamik, elastik ve aerodinamik olarak rotorun askı uçuşunda analizi yapılmıştır. Çıkarılan sonuçlar elastik etkilerin ihmal edildiği, rijit palli rotor çözümleri ile karşılaştırılmış, itki, güç gereksinimi ve pal yapısındaki deformasyonlar bakımından incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde elastik rotor çözümünün aynı koşullarda rijit rotor çözümünden daha düşük itki ve güç verdiği, FoM'nin ise koşula göre daha iyi veya daha kötü çıkabildiği görülmüştür. Rotor çözümlerinin ileri uçuş koşullarında da yapılması amaçlanmıştır, ancak bu çözümlerde tüm pallerin modellenmesi gerekmektedir, ancak simcenter-simulink etkileşiminde olan eleman sayısı arttıkça işlem süresi üstel olarak arttığı için rotor trim analizlerinin yapılması mümkün olmamıştır. İlerleyen çalışmalarda askı uçuşu dışındaki çözümlerin alınabilmesi için daha yüksek güçlü bilgisayar kullanılması veya daha hızlı çalışabilecek ve amaca özel yazılmış bir çok gövdeli benzetim aracı yazılması amaçlanmaktadır.



**Kaynaklar**

- Akel, E. (2017). The Effect of blade torsional elasticity on helicopter flight dynamics (Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi).
- Arnold, J. (2010). Using multibody dynamics for the simulation of flexible rotor blades-Modelling of an innovative blade layout based on beam approach.
- Johnson, W. (2013). Rotorcraft aeromechanics (Vol. 36). Cambridge University Press.
- Leishman, Gordon J.,2006 Principles of helicopter aerodynamics. Cambridge university press
- Özturan, B. İ. (2019). Multibody simulation of helicopter rotor with structural flexibility (Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi).
- Van der Wall, B. G., Junker, B., Burley, C.L., Brooks, T., Yu, Y.H., Tung, C., Raffel, M., Richard, H., Wagner, W., Mercker, E., Pengel, K., Holthusen, H., Beaumier, P., Prieur, J., 2002, "The HART-II Test in the LLF of the DNW-a Major Step towards Rotor Wake Understanding," submitted to the 28th European Rotorcraft Forum, 17-20 Eylül, Bristol, İngiltere