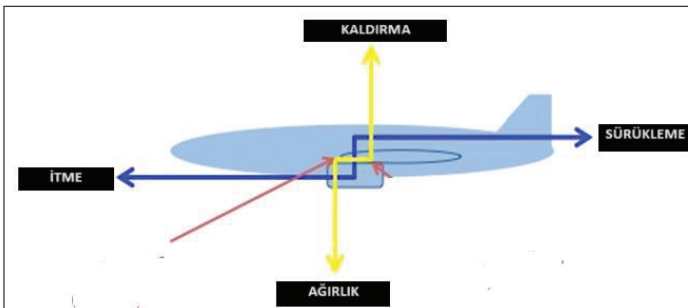


# BELL 407 HELİKOPTERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE DİNAMİK ANALİZİ

Ahmet Öven<sup>1</sup>, Fatih Şenel<sup>2</sup>, Nedim Sülyak<sup>3</sup>

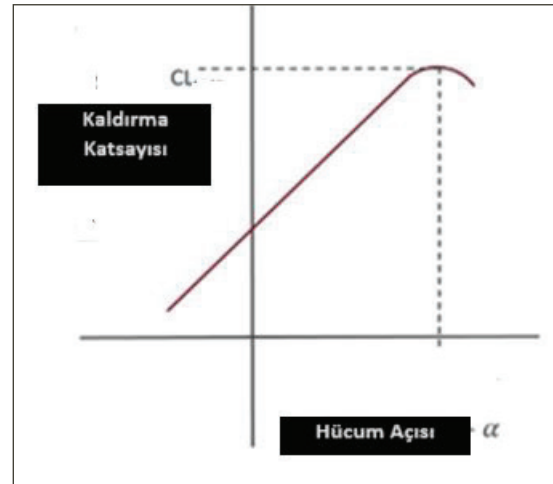
## 1. GİRİŞ

Helikopter, dikine havalanabilen, döner kanatları olan, havada sabit bir noktada hareketsiz kalabilen, uçağın basit halidir. Havada durmasını sağlayan kaldırma kuvveti, hava aracının üzerinde düşey bir eksen etrafında yatay olarak dönen bir rotora bağlı pervaneler aracılığıyla sağlanır. Pervane kollarına pal denir, paller açılı olarak konumlandırılmıştır.



Şekil 1. Helikoptere Etki Eden Ağırlık ve Kuvvetler [5]

Bir helikopter, itme ve kaldırma etmenlerini denetleyen ve aynı zamanda rotorların yardımıyla uçan bir makinedir. Bir helikopterde, boyut ve hız gibi gereksinimlere bağlı olarak birkaç rotor ana ve kuyruk) vardır. Rotorlar hare-



Şekil 2. Kaldırma Katsayısı ve Hücum Açısı Grafiği [6]

<sup>1</sup> Mak. Yük. Müh., Yıldız Teknik Üniversitesi & Makine Mühendisliği & Makine Teorisi, Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı - [ahmetoven@gmail.com](mailto:ahmetoven@gmail.com)

<sup>2</sup> Mak. Yük. Müh. - [fsenel@mapa.com.tr](mailto:fsenel@mapa.com.tr)

<sup>3</sup> Genel Müdür - [nedim@sulyak.net](mailto:nedim@sulyak.net)

ket ettikçe, helikopteri yukarı doğru kaldırmak için havayı kullanır. Hava, gökyüzünde bir yüzdürme (pervanenin süpürme alanı) oluşturmak için kanatlar yardımıyla aşağı doğru hareket ettirilir. Bu durum, helikopteri havada tutar. Kaldırma kuvveti, helikopterin ağırlığından daha büyük olmalıdır. Bu özellik, daha fazla itme gücü üreten bıçakların/pal hücum açısı (attack angle) ile kontrol edilir.[1]

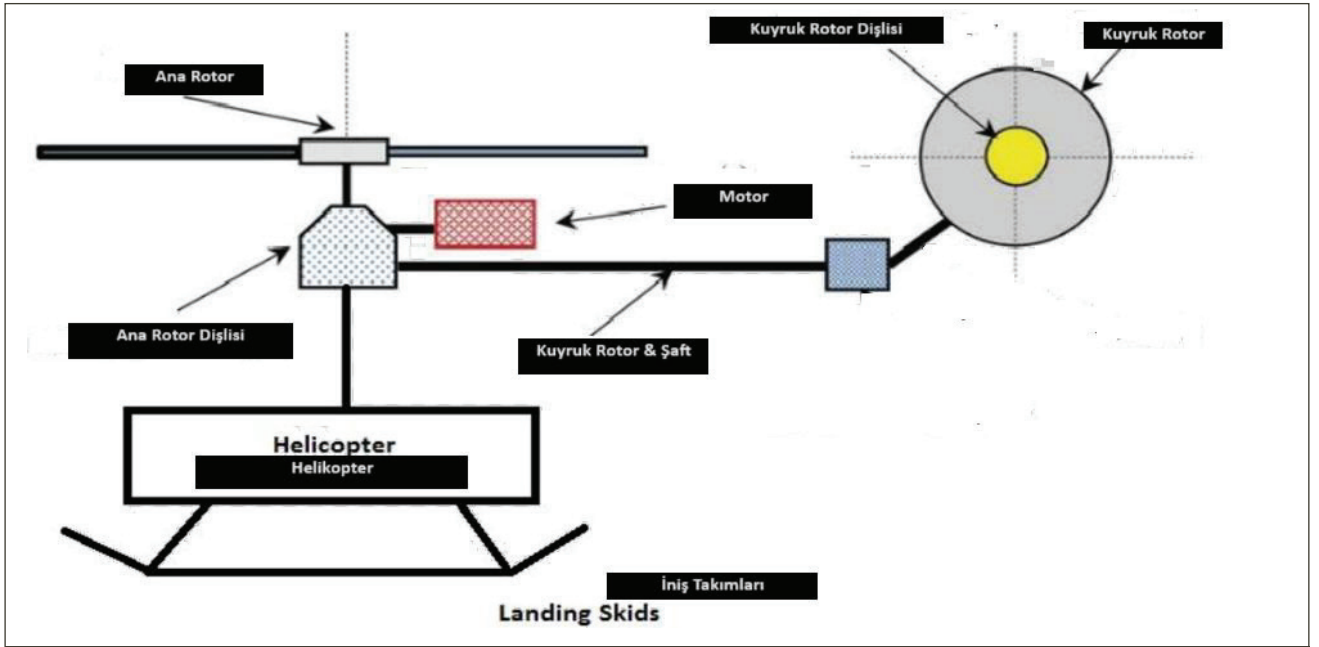
## 2. MODELLEME YAKLAŞIMLARI

Toplamda bir tam model ve bir alt model tasarlanarak Matlab-Simulink için modelleme yapılmıştır.

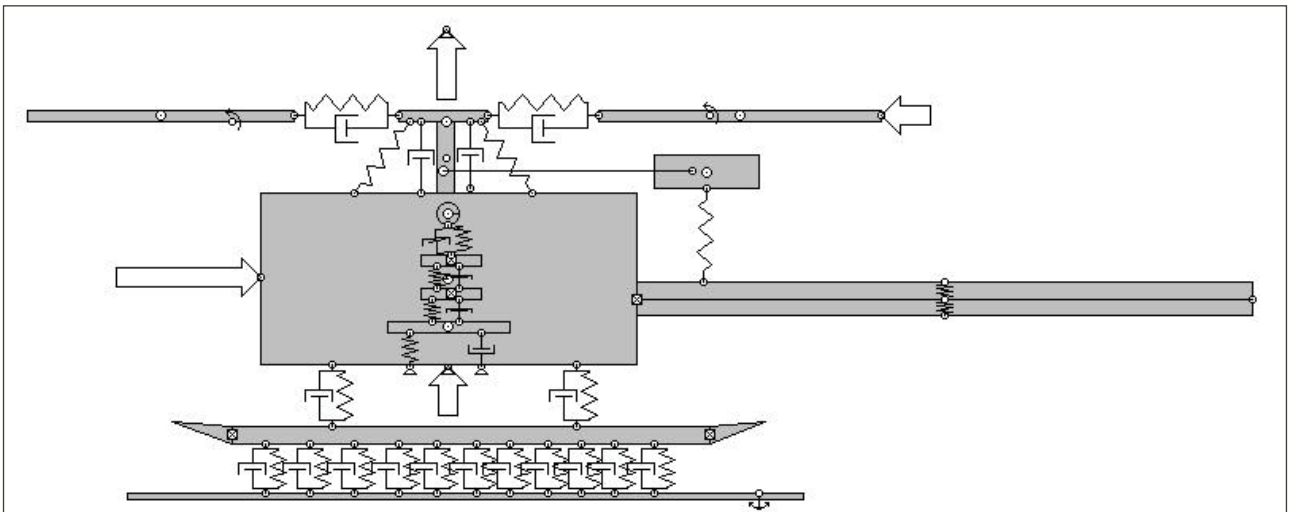
### 2.1 Tarz Model Üzerinden Tam Model Senaryosu

Kızaklı Tip (Landing Skids) ve Lastik Tekerlekli (Landing Gears) olarak iki tipe ayrılan helikopter iniş takımlarının şematik diyagramını esas alarak, kızaklı ve tekerlekli olmak üzere tarz modeller üzerinden modellemeler oluşturulmuştur.

Aşağıda bir helikopterin, yay ve sönüm elamanlarından oluşan konsept tam model çalışması bulunmaktadır ve bu model baz alınarak BELL 407 ve Skorsky S76C'nin iniş takımlarının matematiksel modellerinin oluşturulması için model senaryosu aşağıda ortaya konulmuştur.

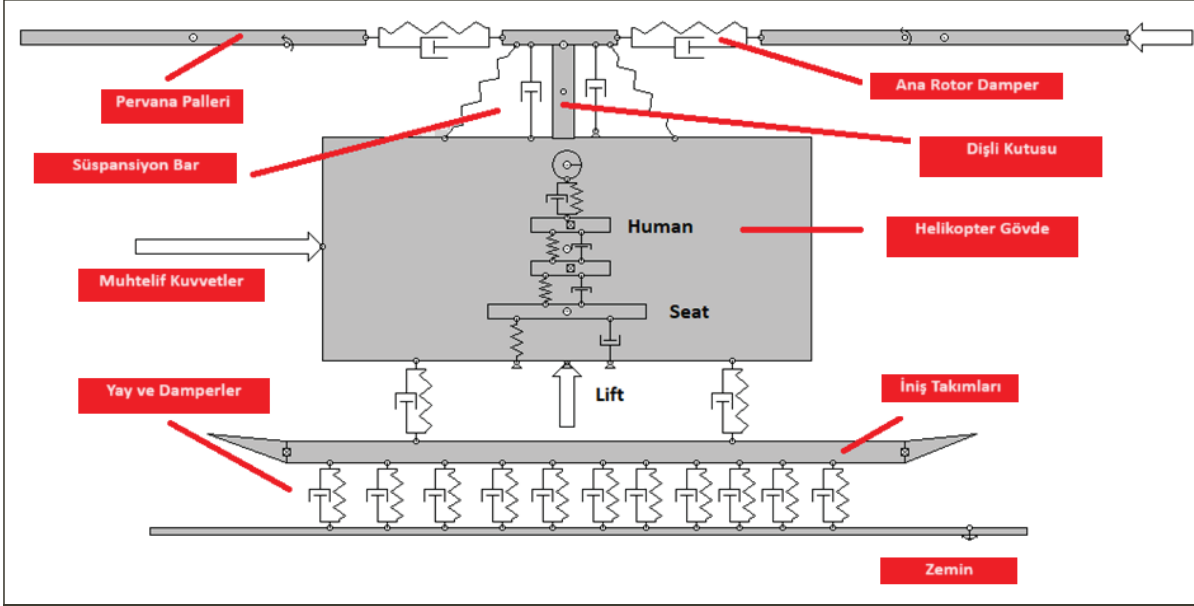


Şekil 3. Şematik Diyagram [7]



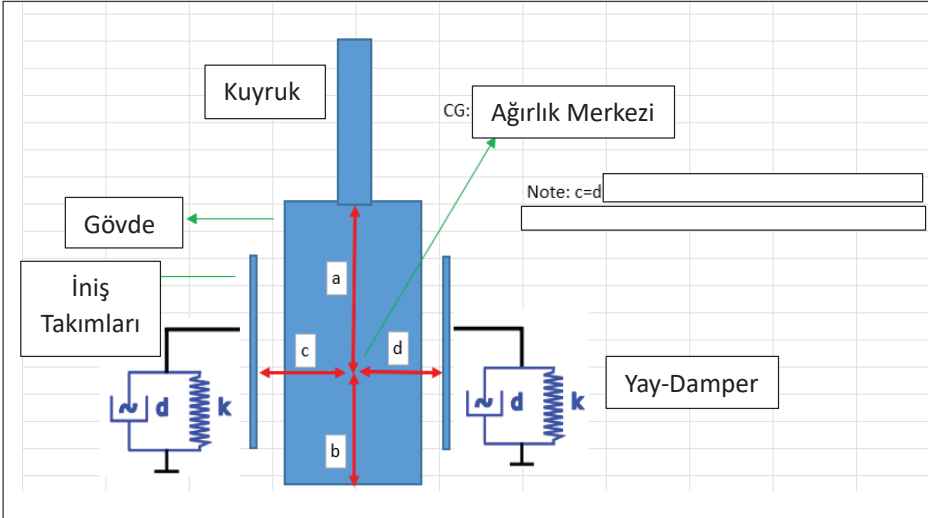
Şekil 4. Helikopter ve Konsept Tam Model (Oven ve Demir Modeli)

Helikopterlerin özellikle rotor kısmında çok fazla sönümleme sistemi bulunmaktadır. Manyetoreolojik sönümleyici (MR Damper), şok emici (shock absorber) gibi titreşimi emen farklı elemanlar kullanarak, sönümleme aygıtları çoğaltılabilir.

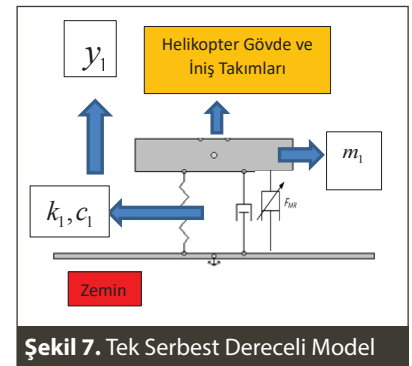


Şekil 5. Konsept Tam Model Bileşenleri ve Tanımlamaları

## 2.2 Tek Serbestlik Dereceli (TSD) Modelleme

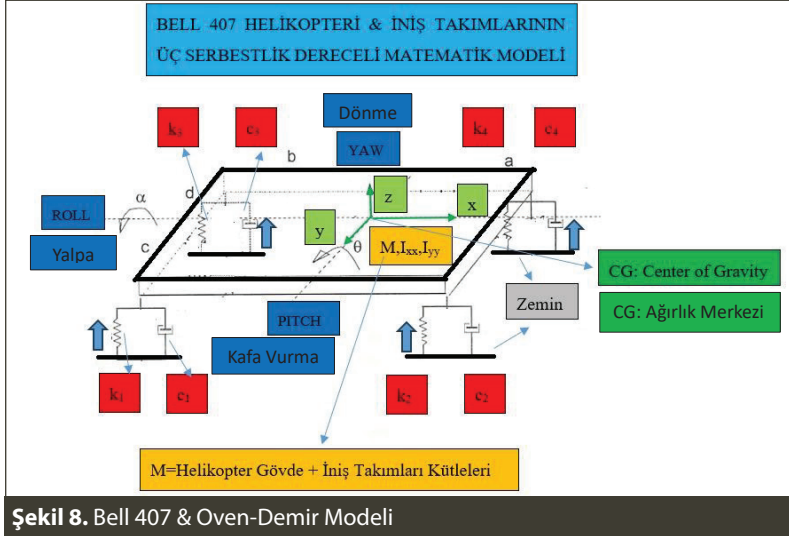


Şekil 6. Bell 407 ve Oven-Demir Modeli



Şekil 7. Tek Serbest Dereceli Model

## 2.3 Üç Serbestlik Dereceli Tam Modelleme



Şekil 8. Bell 407 & Oven-Demir Modeli

Modellemede, iniş kızakları 1,3 ön ayaklar; 2,4 ise arka ayaklar olarak tanımlanmıştır.[3]

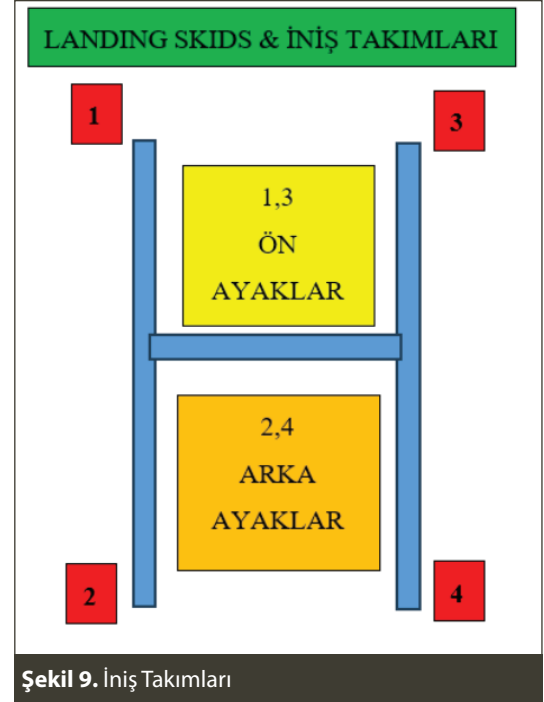
## 3. SAYISAL SİMÜLASYONLAR

### 3.1 Take-Off (Kalkış)

Üç Serbestlik Dereceli oluşturulan modelde, itki kuvveti ve ağırlık etkisi altında "gövde+iniş takımı" titreşim de-

Tablo 1. BELL 407 Parametreler. [2],[4]

Parametreler	Bell 407
İniş Takımları Mesafe 1(c=d)	2450 mm
İniş Takımları Mesafe (c=d)	1650 mm
Helikopter Boş Ağırlık	1609,35 Kg
İniş Takımları Kütle	94,52 Kg
Helikopter Datum ve Ağırlık Merkezi Mesafe	3300 mm
Ağırlık Merkezi İniş Takımları Mesafe	a=1 m, b=2 m
BO 105 Atalet Momenti(x,x)	1515 kgm <sup>2</sup>
BO 105 Atalet Momenti(y,y)	4863 kgm <sup>2</sup>
BO 105 Atalet Momenti(z,z)	3869 kgm <sup>2</sup>
BO 105 Yay Sertlik Değeri(x)	320000 N/m
BO 105 Yay Sertlik Değeri(y)	425000 N/m
BO 105 Yay Sertlik Değeri(z)	370000 N/m
BO 105 Sönüm Katsayısı (x)	400000 Ns/m
BO 105 Sönüm Katsayısı (y)	1000000 Ns/m
BO 105 Sönüm Katsayısı (z)	1100000 Ns/m



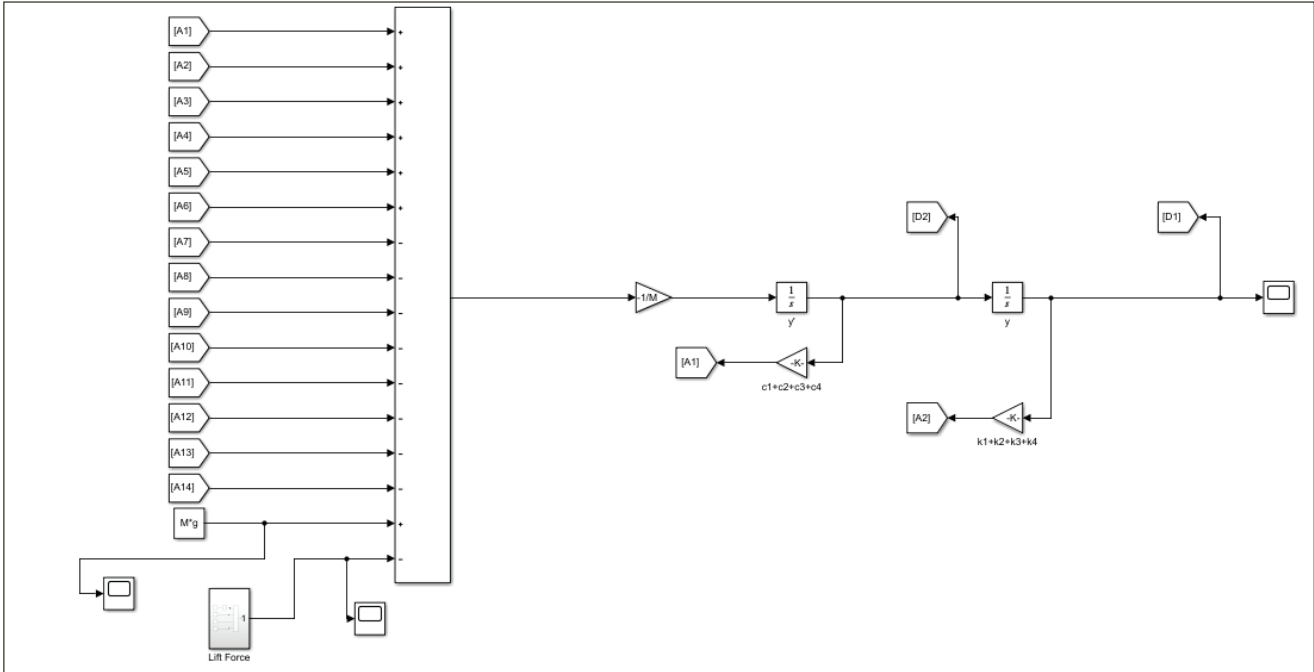
Şekil 9. İniş Takımları

ğerleri ve Simulink modellerinde itki kuvvetinin yanı sıra, kütlelerin normal ve artırılmış hali farklı k, c değerleri ve ayakların gecikme zamanı esas alınarak incelenmiştir.

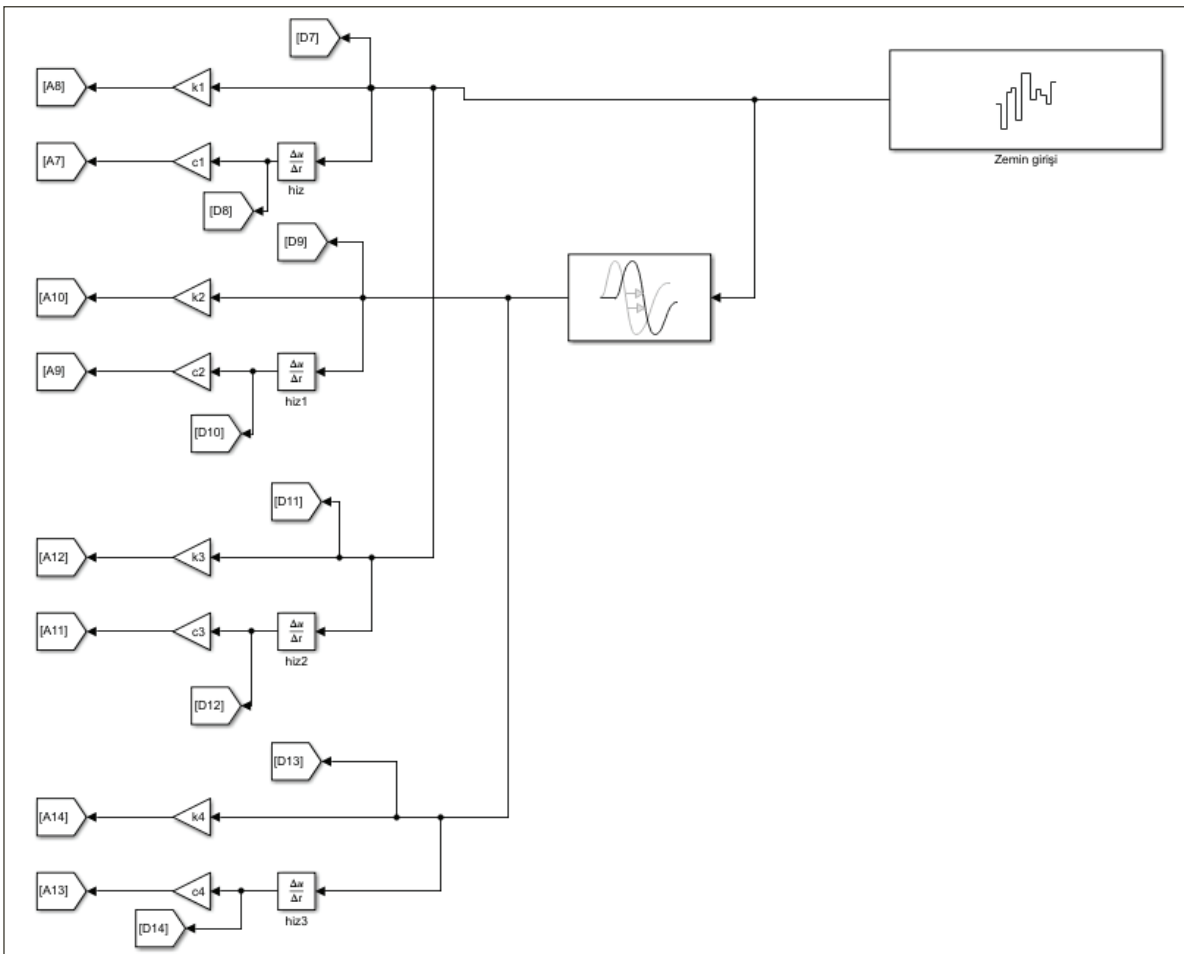
### 3.1.1 BELL 407'nin Dinamik Analizi ve Parametreleri

Tablo 2. BELL 407 Hesaplanan Parametreler.[4]

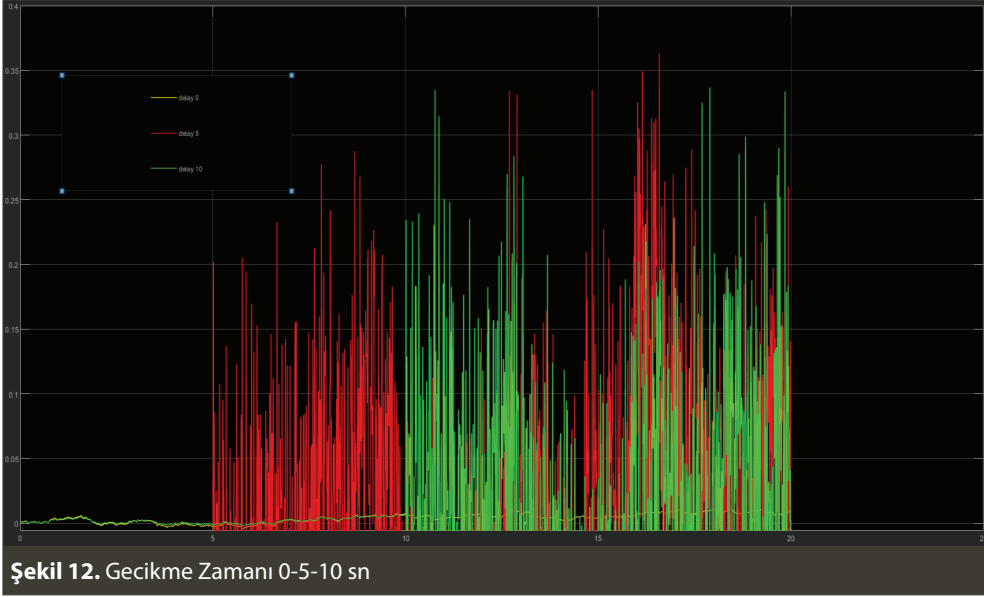
Kaldırma Kuvveti Parametreleri & Bell 407		
Kaldırma Katsayısı(CL)	1.35	Tablodan
Hava Yoğunluğu(ρ)	1.225	101.3 kPa 15 C°
Hız(v) m/s	72	10 knot= 5,14 m/s
Total Kanat Alanı(S) m <sup>2</sup>	5.76	0,27*5,33*4=5,76 m <sup>2</sup>
Lift Force	24690.36	N(Newton)



Şekil 10. Bell & Sistem Simulink Modeli

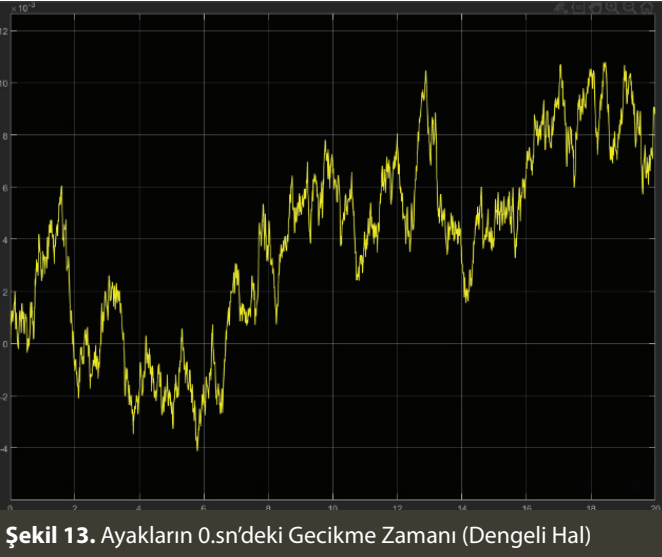


Şekil 11. Bell & İnış Takımları Modeli (Kızak İle Arka ve Ön Ayaklar)



Şekil 12. Gecikme Zamanı 0-5-10 sn

Helikopter Gövdesinde arka ayaklara 0, 5, 10 sn. gecikme zamanı verilmesi halinde gövde deplasman-zaman grafiği;



Şekil 13. Ayakların 0.sn'deki Gecikme Zamanı (Dengeli Hal)

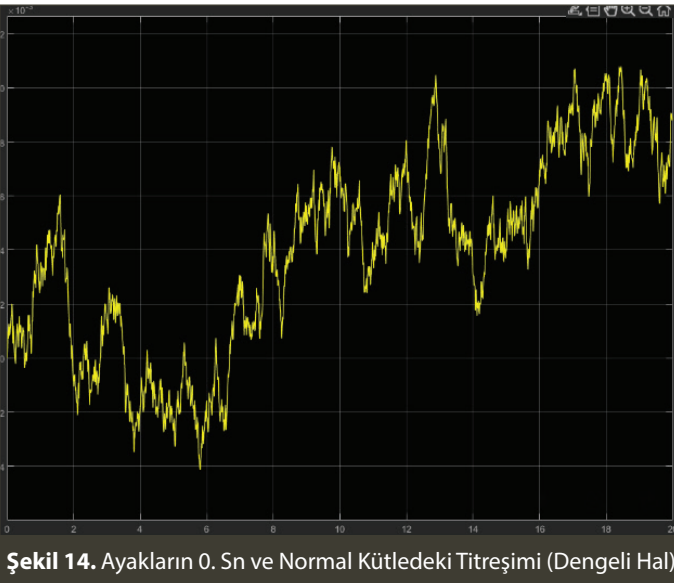
Arka ayaklar ne kadar uzun süre sonra kalkarsa dengesizlik o kadar artıyordu ve sistem dengeli değildir.

Gecikme zamanı (transport delay) 0 saniyedeki titreşim ve ayakların dengeli olma hali (Şekil 13)

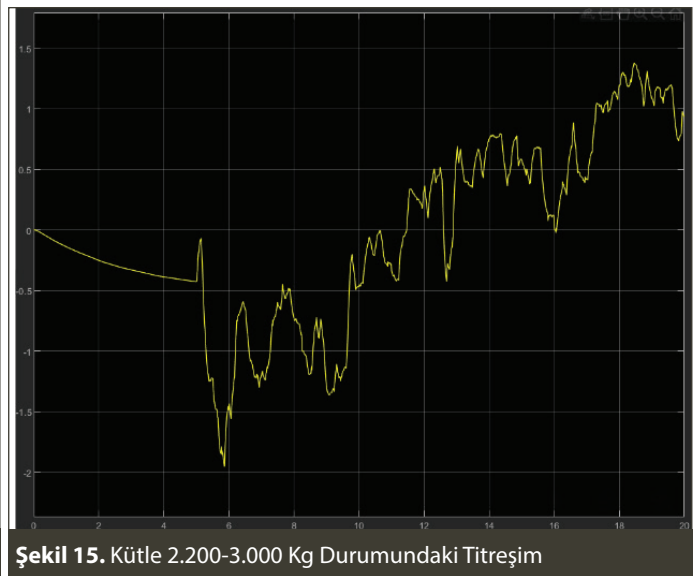
Sistem "0" dolaylarında geziniyorsa ve en fazla 0,01 m. bir yer değiştirme söz konusu ise, helikopter kütlesi artırıldıktan sonra aynı anda gecikme zamanı da 5 sn ise, arka ayakların kalkması halinde titreşimdeki değişim Şekil 14'te verilmiştir.

0,012 m. dolaylarında salınım var normal kütle ve transport delay 0. sn de ise titreşim, Şekil 15'te gösterildi.

Normal Helikopter ağırlığı 1.704 Kg olmasına karşın kütle arttıkça dengesizlik de artmaktadır.

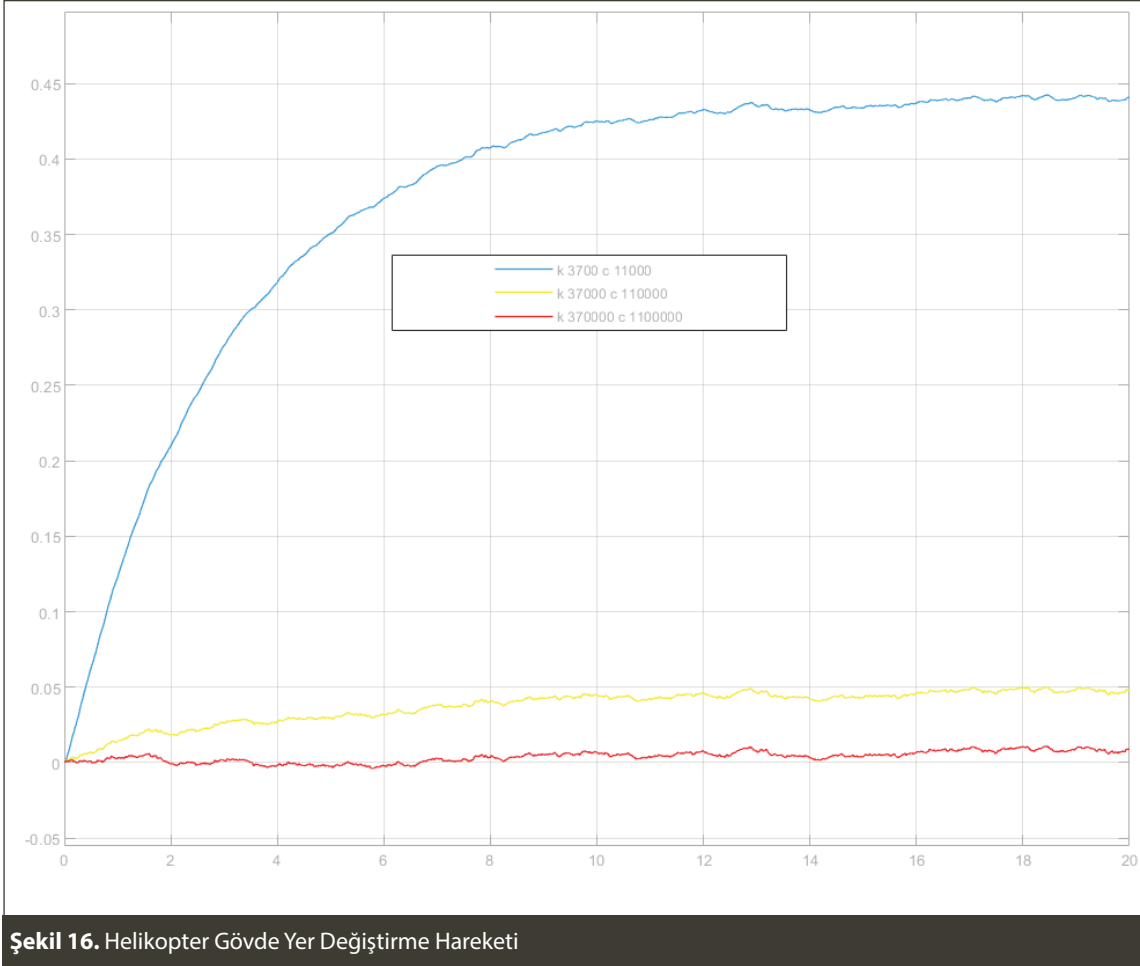


Şekil 14. Ayakların 0. Sn ve Normal Kütledeki Titreşimi (Dengeli Hal)

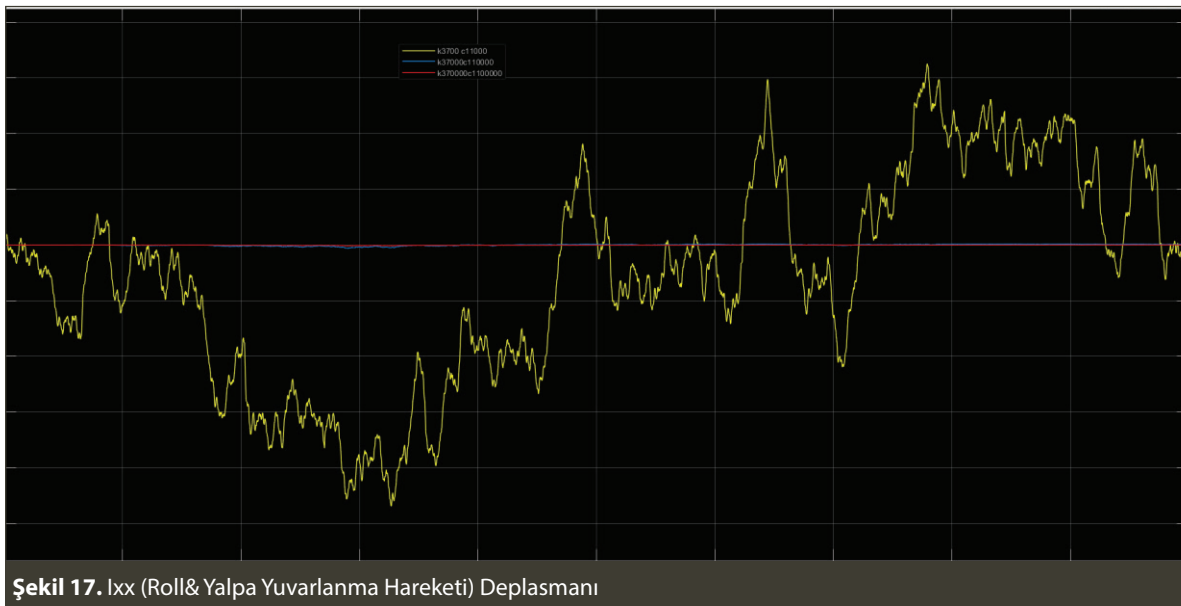


Şekil 15. Kütle 2.200-3.000 Kg Durumundaki Titreşim

Sistemde k (yay sabiti) ve c (sönüm) azaltılması halindeki durumlar;



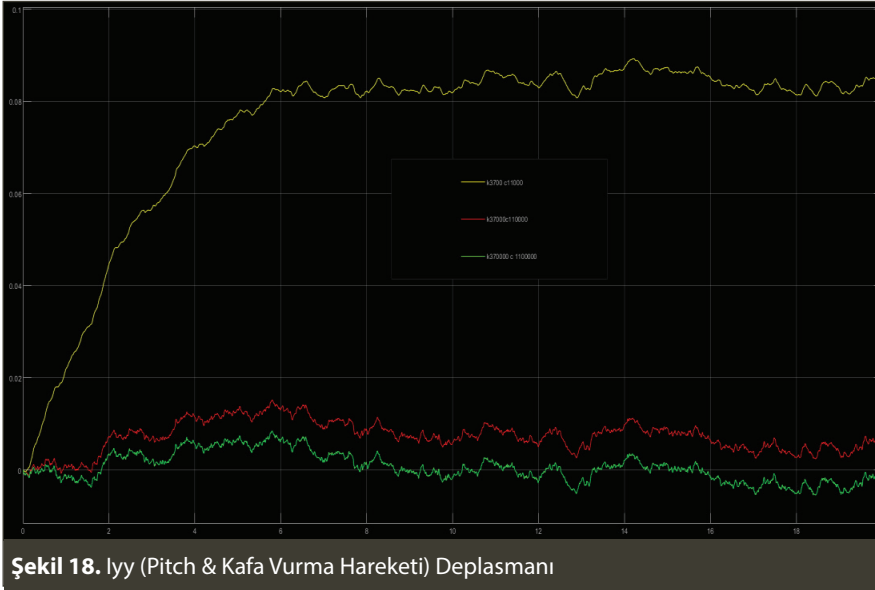
k, c değerleri azaltıldıkça "M" kütleindeki titreşimin artmakta olduğu gözlemlenmiştir.



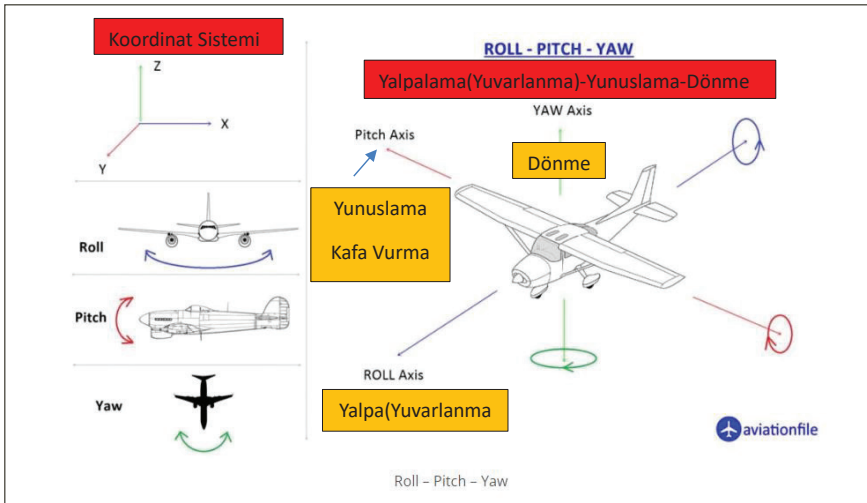
K, c değerleri azaltıldıkça "x" eksenindeki roll hareketi de artmaktadır.

K, c değerleri azaldıkça sistemde y eksenindeki pitch hareketi ve deplasmanı artmaktadır.

(sönüm) değerleri, gerçek değerlerine göre azaltıldıkça x ve y eksenlerindeki deplasman (yer değiştirme) artmıştır. Tüm bu çalışmalarda uç serbestlik dereceli Bell 407 Helikopteri için yapılan nümerik analizler kıyaslanarak doğruluğu kanıtlanmıştır.



Şekil 18. Iyy (Pitch & Kafa Vurma Hareketi) Deplasmanı



Şekil 19. Eksenler ve Hareketler [8]

### 3.2 Test Sonucu

Şekil 19'da, x, y, z eksenlerinde Yalpa (Roll) Yunuslama (Pitch) ve Dönme (Yaw) hareketleri yer almaktadır. Bu çalışmamızda helikopter kazağının arka ayaklarının ön ayaklarından geç kalkması üzerine bir senaryo ortaya konmuş, ayaklardaki dengesizliğin gövde titreşimine de etkisi olduğu görülmüştür. Helikopter kütlelerinin artırılması sonucunda da bu titreşim artmıştır. K (yay) ve c

## 4. SONUÇ

Bir helikopterin iniş takımlarındaki ve gövdesindeki titreşimleri azaltmak ve iniş takımları ömrünü artırabilmek için gecikme zamanı (transport delay) olmaması gerekmektedir. Böylece helikopterin dengeli olarak iniş ve kalkışı sağlamalıdır. Yay ve sönüm değerleri baz alınarak helikopter gövde ya da iniş takımlarına ek şok emiciler konulabilir. Helikopter kütlelerinin ve taşıma kapasitesinin dengesiz bir şekilde sınır değerinin üstünde artırılması durumunda ağırlık merkezi (center of gravity) olumsuz etkilenecek ve titreşim bazlı dengesizlikler oluşacaktır. Dolayısı ile standartlara uygun ve sınır değerinin altında bir ağırlık olmalıdır.

## KAYNAKÇA

1. Sivakumar S, Active Landing Gear Behaviour on Heavy Landing, Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, 2016
2. Dipl.-Ing. Christoph Keßler, Aktive Steuerung aeromechanischer Instabilitäten bei Hubschraubern mit Übergang vom Boden in die Luft, Von der Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1996
3. Sivakumar S, Helicopter landing gear vibration analysis using Lagrange method, Vib-roEngineering Procedia, 2018

4. Skorsky S76C ve Bell 407 Technical Specifications, <https://www.genelhavacilik.com.tr>
5. Şekil 1, <https://www.skybrary.aero/tutorials/liftdrag-ratio-forces-interaction-and-useanswer-2>
6. Şekil 2, <https://aerotoolbox.com/angle-of-attack/>
7. Şekil 3, <https://www.intechopen.com/chapters/57483>
9. Şekil 19, <https://www.aviationfile.com/roll-pitch-yaw-axes/>