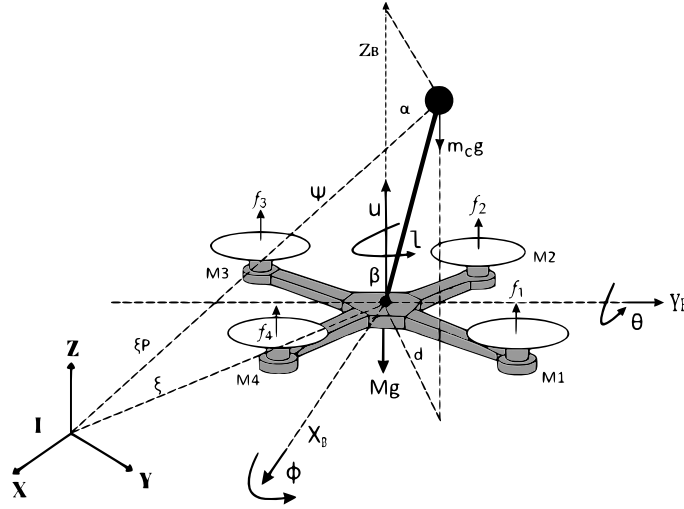




T.C
KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



DERS ADI: UYGULAMALI BİLGİSAYAR PROGRAMLAMA
PROJE NUMARASI: 4

Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracı Üzerindeki Küresel Ters Sarkaç

HAZIRLAYANLAR:

Sıla BAYSAL: 210223029

Hazel KÜPE: 210223065

Yunus Emre KAYRA: 210223037

DANIŞMANLAR:

[Prof. Dr.](#) Zafer BİNGÜL

Araş. Gör. Haydar Kerem KARHAN

MAYIS 2025

ÖNSÖZ

Bu proje kapsamında, dört rotorlu bir insansız hava aracı (DRİHA) ile küresel ters sarkaç sisteminin birleşimi; verilen akademik makale referans alınarak MATLAB ortamında modellenmiş ve simüle edilmiştir. Çalışmada, sistemin üç boyutlu modellemesi hem MATLAB Simulink hem de Simscape kullanılarak gerçekleştirilmiş, ayrıca MATLAB GUI aracılığıyla kullanıcı etkileşimine olanak tanıyan bir arayüz tasarlanmıştır. Bu sayede sistemin dinamik davranışı hem görsel hem de kontrol açısından detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Mayıs, 2025

Sıla BAYSAL

Hazel KÜPE

Yunus Emre KAYRA

TEŞEKKÜR

Bu proje çalışması süresince bizlere rehberlik eden ve değerli katkılarını esirgemeyen **Prof. Dr. Zafer BİNGÜL** ve **Araş. Gör. Haydar Kerem KARHAN** hocalarımıza içten teşekkürlerimizi sunarız.

Ayrıca, proje sürecinde bizi her zaman destekleyen ve yanımızda olan ailelerimize ve sevdiklerimize teşekkür ederiz.

ÖNSÖZ.....	2
TEŞEKKÜR.....	3
SİMGE LİSTESİ.....	6
KISALTMA LİSTESİ.....	8
ŞEKİL LİSTESİ.....	9
ÖZET.....	10
BÖLÜM 1	11
GİRİŞ	11
BÖLÜM 2	12
DÖRT ROTORLU İHA KÜRESEL TERS SARKAÇ HAREKET MODELİ VE MATEMATİKSEL DENKLEMİ.....	12
2.1 Eksen Takımları	12
2.1.1 Yerel Eksen Takımı.....	13
2.1.2 Gövde Eksen Takımı	13
2.1.3 Küresel Ters Sarkaç Eksen Takımı	13
2.2 Sistemin Dinamik Denklemlerinin Elde Edilmesi.....	13
2.3 Sistemin Doğrusal Olmamasın Açıklaması.....	15
BÖLÜM 3	16
SİSTEMİN DENKLEM TABANLI MODELLEMESİ.....	16
3.1 Denklem Tabanlı Modelin Tanıtımı	16
3.2 Matlab Fonksiyonu Kodu ve Akış Şeması	17
BÖLÜM 4	21
SİSTEMİN KONTROL ARAYÜZÜ	21
4.1 Arayüz Ekranının Tanıtımı.....	21
4.2 DRIHA Motor Dinamikleri Yöneticisi.....	21
4.3 Simülasyon Kontrol ve Ayarları.....	22
4.3.1 Simülasyon Zaman ve Diferansiyel Çözücü Ayarları	23
4.3.2 Simülasyon Kayıt ve Başlatma Komutları	23
4.4 Sabitler ve Başlangıç Koşulları	23
4.4.1 Başlangıç Durumlarının ve Elde Edilen Türevlerinin Ayarlanması.....	24
4.4.2 Mekanik Sabitlerinin Ayarlanması.....	24
4.5 Ayarlanmış Dört Rotorlu İHA Küresel Ters Sarkaç Hareket Stilleri	24
4.5.1 Havada Asılı Hareketsiz Kalma	24
4.5.2 Parabolik Kalkış	24

4.5.3	Kasırga Parabolik Kalkış.....	25
4.5.4	Serbest Düşüş	25
4.5.5	Ters Sarkaç Devrilmesi	25
4.5.6	Fıçı Tonosu.....	25
4.6	Dört Rotorlu İHA Küresel Ters Sarkaç Diyagramı	25
4.7	Euler Açıları	26
4.8	Görselleştirme Ayarları	26
BÖLÜM 5	27
	SİSTEMİN FİZİKSEL BLOK TABANLI MODELLEMESİ	27
5.1	Kullanılan Alt Kütüphaneler ve Genel Yapı	27
5.2	Blokların Görevleri ve Bağlantıları	28
BÖLÜM 6	31
	BENZETİM ÇALIŞMASI, SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR	31
6.1	Benzetim Çalışması – Dört Rotorlu İHA Küresel Ters Sarkaç Sisteminin Serbest Düşüş Simülasyon ve Sonuçları	31
6.1.1	Pozisyon – Zaman Analizi	32
6.1.2	Hız – Zaman Analizi	33
6.1.3	İvme – Zaman Analizi	33
6.2	Benzetim Çalışması – Dört Rotorlu İHA Küresel Ters Sarkaç Sisteminin Havada Asılı Kalma Simülasyon ve Sonuçları	34
6.3	Gelecek Çalışmalar.....	36
BÖLÜM 7	37
	PROJE EKİBİ VE GÖREV DAĞILIMI.....	37
	REFERANSLAR.....	38

ϕ	Yuvarlanma açısı
θ	Yunuslama açısı
ψ	Sapma açısı
F_1	1. Motor z-eksenindeki itki kuvveti
F_2	2. Motor z-eksenindeki itki kuvveti
F_3	3. Motor z-eksenindeki itki kuvveti
F_4	4. Motor z-eksenindeki itki kuvveti
X_B	Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının gövde eksen takımı x-ekseni
Y_B	Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının gövde eksen takımı y-ekseni
Z_B	Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının gövde eksen takımı z-ekseni
α	Küresel Ters Sarkaç eğim açısı
β	Küresel Ters Sarkaç dönme açısı
g	Yerçekimi ivmesi
M	Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının kütlesi
m_c	Küresel Ters Sarkaç kütlesi
l	Küresel Ters Sarkaç uzunluğu
d	Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının merkezinden motor merkezine olan kol uzunluğu
τ_ϕ	Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının yuvarlanma eksenindeki net torku
τ_θ	Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının yunuslama eksenindeki net torku
τ_ψ	Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının sapma eksenindeki net torku
V_z	z-eksenindeki serbest düşme hızı
V_0	z-eksenindeki başlangıç hızı
t	Süre
Z	z-eksenindeki konum değişimi
Z_0	z-eksenindeki başlangıç konumu
$F_{net_{sol\ kanat}}$	$F_3 + F_2$ Kuvvetlerinin toplamı
$F_{net_{sağ\ kanat}}$	$F_4 + F_1$ Kuvvetlerinin toplamı
$G_{DRIHA-KTS}$	Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının Küresel Ters Sarkaç sisteminin ağırlığı
S_α	$\sin(\alpha)$

$$S_{\beta} \qquad \text{Sin}(\beta)$$

$$C_{\alpha} \qquad \text{Cos}(\alpha)$$

$$C_{\beta} \qquad \text{Cos}(\beta)$$

KISALTMA LİSTESİ

İHA	İnsansız Hava Aracı
DRİHA-KTS	Dört Rotorlu İHA Küresel Ters Sarkaç
DRİHA	Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracı
KTS	Küresel Ters Sarkaç

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2-1: DRİHA-KTS.....	12
Şekil 3-1:DRİHA-KTS simulink modelleme	16
Şekil 3-2: Akış şeması.....	17
Şekil 4-1: Arayüz giriş ekranı.....	21
Şekil 4-2: DRİHA-KTS motor dinamiği yöneticisi.....	22
Şekil 4-3: Simülasyon süresi, çözücü ayarları ve kontrol butonları	22
Şekil 4-4: Sistem sabitleri ve başlangıç değerleri.....	23
Şekil 4-5: Hareket tarzları	24
Şekil 4-6: DRİHA ve KTS bütünleşik sisteminin diyagramı	25
Şekil 4-7: Euler açıları.....	26
Şekil 4-8: Görselleştirme ayarları.....	26
Şekil 5-1: DRİHA-KTS Simscape bütün modeli	27
Şekil 5-2: DRİHA-KTS sisteminin konum-açı, hız-açısal hız, ivme-açısal ivme beslemesi	28
Şekil 5-3: DRİHA 6-DOF fiziksel bloğuna Simscape değişkenlerinin aktarılması	28
Şekil 5-4: DRİHA-KTS sisteminin gövdesinin zemin ile etkileşimi	29
Şekil 5-5: DRİHA sisteminin motor ve pervane konumlandırması ve hareketlendirilmesi	29
Şekil 5-6: KTS sisteminin fiziksel bloklar ile modellenmesi	30
Şekil 6-1: Serbest düşüş başlangıç değerleri	31
Şekil 6-2: Serbest düşüş zaman ve çözücü ayarları	32
Şekil 6-3: Serbest düşüş görselleştirme arayüzü	32
Şekil 6-4: Serbest Düşüş Konum - Zaman Grafiği.....	32
Şekil 6-5: Serbest Düşüş Hız - Zaman Grafiği	33
Şekil 6-6: Serbest Düşüş İvme - Zaman Grafiği	34
Şekil 6-7: DRİHA-KTS serbest düşüşüne ait simülasyon ekran görüntüleri	34
Şekil 6-8: DRİHA-KTS kuvvetleri gösteren serbest cisim diyagramı (1/2).....	35
Şekil 6-9: DRİHA-KTS kuvvetleri gösteren serbest cisim diyagramı (2/2).....	35
Şekil 6-10: DRİHA-KTS sisteminin dengede kaldığını gösteren görsel-zaman grafiği	36

Bu çalışma, dört rotorlu bir insansız hava aracı (DRİHA) üzerine entegre edilen küresel ters sarkaç (KTS) sisteminin, kontrolsüz durumdaki dinamik davranışlarını incelemeyi amaçlamaktadır. Sistem, hem hava aracının hem de sarkacın birlikte hareketini dikkate alan, çok girişli çok çıkışlı (MIMO), doğrusal olmayan ve eksik eylemli bir yapı sergilemektedir. Sistem modellemesi, klasik **Euler-Lagrange yöntemi** ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen diferansiyel denklemler MATLAB/Simulink ortamında uygulanarak simüle edilmiştir.

Modelleme sürecinde, sistemin üç boyutlu fiziksel yapısı **Simscape Multibody** kütüphanesi kullanılarak görselleştirilmiş, böylece hem dinamik analiz hem de fiziksel etkileşimler detaylı şekilde gözlemlenebilmiştir. Ayrıca, kullanıcı dostu bir deneyim sunmak amacıyla **MATLAB App Designer** ile geliştirilen bir arayüz yardımıyla sistem parametrelerinin girilmesi ve simülasyonun kontrol edilmesi sağlanmıştır.

Proje kapsamında, çeşitli hareket senaryoları altında DRİHA-KTS sisteminin serbest düşüşü, havada sabit kalma durumu ve farklı başlangıç koşullarıyla olan davranışları analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen bu simülasyonlar, sistemin kararlılığı, salınım etkisi ve hareket sınırları hakkında önemli çıkarımlar sunmuştur. Elde edilen sonuçlar, gelecekte bu tür yük taşıyan İHA sistemleri için kontrol stratejilerinin geliştirilmesine altyapı sağlaması açısından büyük önem taşımaktadır.

GİRİŞ

Bu proje, bir DRİHA'ya bağlı KTS'nin üç boyutlu uzayda taşınması sırasında ortaya çıkan dinamik davranışlarını incelemeyi amaçlamaktadır. Sistem, hem DRİHA'nın hem de KTS'nin hareketlerini birlikte ele alan bütünlük bir matematiksel model ile temsil edilmektedir. Bu modelde, motorlardan elde edilen itme kuvveti ve torklar sistemin girişleri olarak kabul edilmiştir.

Projenin temel amacı, herhangi bir kontrol uygulanmaksızın sistemin doğal (kontrolsüz) dinamik davranışlarını analiz etmektir. Bu doğrultuda, askıda taşınan yükün hareketlerinin DRİHA dinamiği ile olan etkileşimi incelenmiş ve taşıma sırasında oluşabilecek salınım gibi istenmeyen durumlar değerlendirilmiştir. Sistem, doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerle modellenmiş olup çok serbestlik dereceli, karmaşık ve etkileşimli bir yapıya sahiptir.

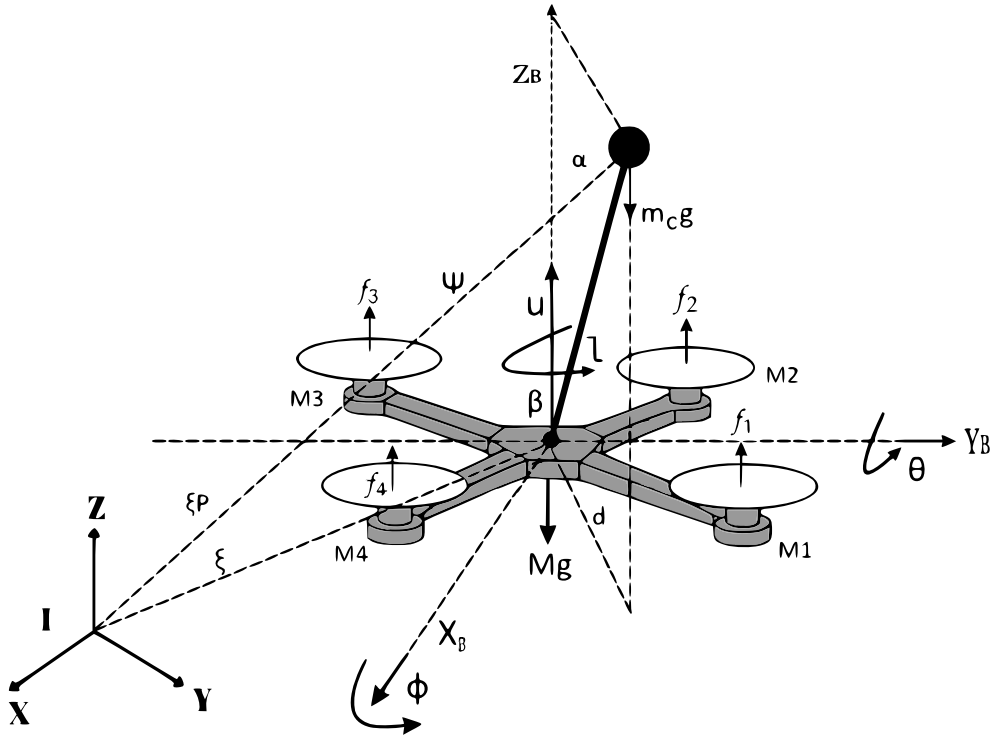
Modelleme süreci, **MATLAB/Simulink** ortamında gerçekleştirilmiştir. Sistem dinamikleri Simulink üzerinde tanımlanmış; ayrıca görselleştirme amacıyla **Simscape Multibody** kütüphanesi kullanılarak fiziksel bir model oluşturulmuştur. Bu sayede sistemin üç boyutlu fiziksel davranışı detaylı bir şekilde gözlemlenebilmiştir.

Buna ek olarak, projenin kullanıcı etkileşimini artırmak ve simülasyon sonuçlarının daha etkin şekilde izlenebilmesini sağlamak amacıyla **MATLAB App Designer** kullanılarak bir grafiksel kullanıcı arayüz (GUI) geliştirilmiştir. Hazırlanan bu arayüz üzerinden kullanıcılar sistem parametrelerini girebilmekte ve simülasyonları görsel olarak takip edebilmektedir.

Bu çalışma, kontrol stratejilerinin geliştirilmesine yönelik ön hazırlık niteliğinde olup, sistemin temel dinamiklerinin anlaşılması açısından önemli bir zemin oluşturmaktadır.

DÖRT ROTORLU İHA KÜRESEL TERS SARKAÇ HAREKET MODELİ VE MATEMATİKSEL DENKLEMİ

Bu çalışma, DRİHA üzerine yerleştirilmiş KTS sisteminin dinamik modellemesini içermektedir. Sistem, hem hava aracının hem de asılı yük olarak modellenmiş olan sarkacın hareketlerini birlikte dikkate alan, çok girişli çok çıkışlı (MIMO), doğrusal olmayan ve eksik eylemli bir yapıya sahiptir. Sistemin eksen takımları, dinamik denklemleri ve doğrusal olup olmadığına ilişkin detaylı teknik açıklamalar aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 2-1: DRİHA-KTS

2.1 Eksen Takımları

Modellemede üç eksen takımı;

1. Yerel Eksen Takımı
2. Gövde Eksen Takımı
3. Küresel Ters Sarkaç Eksen Takımı

olarak tanımlanmıştır.

2.1.1 Yerel Eksen Takımı

Dünya referansına göre sabitlenmiş dik koordinat sistemini temsil eder. Bu eksen takımı $I = [X, Y, Z]$ olarak gösterilir. Sistem elemanlarının mutlak konumları bu koordinat sistemine göre tanımlanmaktadır. Ayrıca yükün konumu ve salınımı, bu eksen sistemine göre ifade edilmektedir.

2.1.2 Gövde Eksen Takımı

Bu eksen takımı, DRIHA'nın gövdesine sabittir ve $B = [X_B, Y_B, Z_B]$ bileşenlerini içerir. DRIHA'nın açısal konumları bu eksen takımı üzerinden Euler açıları ile ifade edilir.

2.1.3 Küresel Ters Sarkaç Eksen Takımı

KTS, 3B uzayda bir noktaya bağlı serbest bir kütle olarak hareket eder ve α, β olarak iki açısal serbestlik derecesine sahiptir.

2.2 Sistemin Dinamik Denklemlerinin Elde Edilmesi

Dört rotorlu insansız hava aracı üzerine yerleştirilmiş küresel ters sarkaç (DRIHA-KTS) sisteminin dinamik modeli, klasik Euler–Lagrange yöntemi ile elde edilmiştir. Bu yöntem, sistemin toplam enerjisini oluşturan kinetik ve potansiyel enerji farkı üzerinden hareket denklemlerini çıkarma esasına dayanır.

Modelde kullanılan genelleştirilmiş koordinatlar aşağıdaki vektörle tanımlanmıştır:

$$q = [X, Y, Z, \phi, \theta, \psi, \alpha, \beta]^T \quad (2.1)$$

Bu vektör, sistemin 3 boyutlu konumu, yönelimi ve sarkacın açısal konumunu temsil etmekte olup, sistemin toplam 8 serbestlik derecesi bulunmaktadır.

Sistemin dinamikleri aşağıdaki formda ifade edilir:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Bu \quad (2.2)$$

Kütle ve atalet etkilerini temsil eden $M(q)$ matrisi, sistemin doğrusal ve açısal ivmelere karşı gösterdiği dirençleri kapsar. Matrisin yapısı şu şekildedir:

$$M(q) = \begin{bmatrix} (M + m_c)I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & \Theta \\ 0_{3 \times 3} & I_Q & 0_{3 \times 2} \\ \Gamma & 0_{2 \times 3} & \Phi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\Theta = m_c l \begin{bmatrix} C_\alpha C_\beta & -S_\alpha S_\beta \\ C_\alpha S_\beta & S_\alpha C_\beta \\ S_\alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\Gamma = m_c l \begin{bmatrix} C_\alpha C_\beta & -S_\alpha S_\beta \\ -C_\alpha S_\beta & S_\alpha C_\beta \\ -S_\alpha & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.5)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} m_c l^2 & 0 \\ 0 & m_c l^2 S_\alpha^2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Coriolis matrisi $C(q, \dot{q})$ ile gösterilir. Bu matris, sistemin hızlara bağlı olarak ortaya çıkan Coriolis kuvvetlerini içerir.

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & \gamma \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 2} \\ 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & \psi \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\gamma = m_c l \begin{bmatrix} -(\dot{\alpha} S_\alpha + \dot{\beta} C_\alpha S_\beta) & -(\dot{\alpha} C_\alpha C_\beta + \dot{\beta} S_\alpha) \\ -(\dot{\alpha} S_\alpha + \dot{\beta} C_\alpha C_\beta) & -(\dot{\alpha} C_\alpha C_\beta + \dot{\beta} S_\alpha) \\ -\dot{\alpha} C_\alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\psi = m_c l^2 \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\beta} S_\alpha C_\alpha \\ \dot{\beta} S_\alpha C_\beta & \dot{\alpha} S_\alpha C_\beta \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Potansiyel kuvvet vektörü $G(q)$ ile gösterilir. DRIHA ve KTS'nin potansiyel enerjisinin türevleri alınarak elde edilir.

$$G(\dot{q}, q) = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ g(M + m_c) \\ 0_{3 \times 1} \\ \zeta_\mu \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\zeta_\mu = \begin{bmatrix} -m_c l g S_\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Girdi dağılım matrisi B ile gösterilirken girdi matrisi \mathbf{u} ile gösterilir. Girdi matrisi, uygulanan kontrol girişlerinin sistem üzerindeki etkilerini belirler. Dört motorun ürettiği toplam itme kuvvetini ifade eden skaler bir büyüklüktür ve u ile gösterilir.

$$B = \begin{bmatrix} R_{e3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 1} & I_{3 \times 3} \\ 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 3} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\mathbf{u} = [u \quad \tau_\phi \quad \tau_\theta \quad \tau_\psi]^T \quad (2.13)$$

$$u = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (2.14)$$

DRİHA-KTS sisteminin hareketlerini tanımlayan denklem 2.3’de yer alan \ddot{q} terimi sistemin genelleştirilmiş parametrelerine ait ivmeleri ifade eder. Fiziksel olarak bu ivmeler, sistemin mevcut konumu ve açıları (q), hızı ve açısal hızları (\dot{q}), uygulanan kontrol girdileri (\mathbf{u}) ile belirlenir. Dolayısıyla, sistemin zamanla nasıl davranacağını modellemek için bu ivme terimini açık biçimde ifade etmek gerekir. Bu işlem, denklemin her iki tarafından da $C(q, \dot{q})$ ve $G(q)$ terimlerinin çıkarılması ve ardından $M(q)$ matrisinin tersi ile çarpılmasıyla gerçekleştirilir. Böylece elde edilen ifade:

$$\ddot{q} = M(q)^{-1}(B\mathbf{u} - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)) \quad (2.15)$$

şeklindedir. Bu denklem, dinamik sistemlerin sayısal olarak çözülmesinde temel alınan standart yapıdır.

2.3 Sistemin Doğrusal Olmamasın Açıklaması

İlgili sistem, çoklu serbestlik derecelerine (DoF), açısal hareketlere ve karmaşık kinematik ilişkilere sahiptir. Sistemin hareket denklemleri Euler–Lagrange formülasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Bu denklemler içerisinde aşağıdaki yapılar nedeniyle sistem doğrusal olmayan bir yapı sergilemektedir:

- Sinüs ve kosinüs gibi doğrusal olmayan trigonometrik ifadelerin bulunması,
- Kuvvet ve momentlerin, sadeleştirilmemiş halleriyle, birden fazla değişkene bağlı olması,
- Açısal ivmelerin, diğer açısal konum ve hızlarla etkileşim içinde yer alması.

Bu nedenlerden dolayı sistemin matematiksel modeli doğrusal olmayan bir karaktere sahiptir.

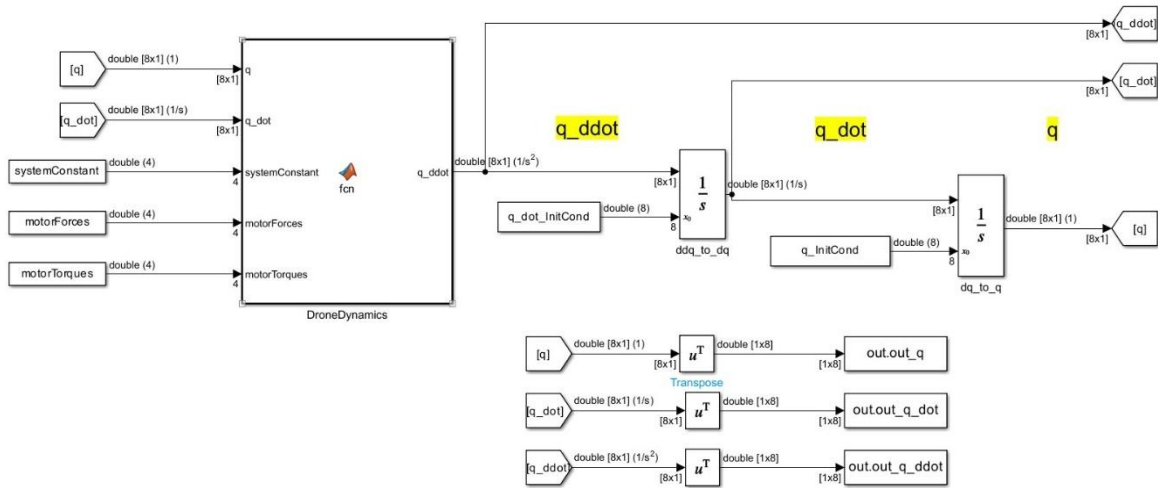
SİSTEMİN DENKLEM TABANLI MODELLEMESİ

3.1 Denklem Tabanlı Modelin Tanıtımı

Bu Simulink modeli sistemin dinamiklerini denklem tabanlı olarak simüle etmek üzere yapılandırılmıştır. Modelin merkezinde yer alan **DroneDynamics** bloğu, sistemin ivme vektörünü (\ddot{q}) hesaplayan kullanıcı tanımlı bir fonksiyon içerir. Bu fonksiyon; konum vektörü (q), hız vektörü (\dot{q}), **sistem sabitleri**, **motor kuvvetleri** ve **motor torklarını** girdi olarak alır. Hesaplanan ivme, iki ardışık **integrator** bloğu üzerinden sırasıyla hıza ve konuma dönüştürülür. Bu bloklar, fiziksel sistemlerde türevli büyüklüklerin zamanla entegrasyonunu temsil eder; bu sayede ivmeden hıza, hızdan konuma geçiş sağlanır.

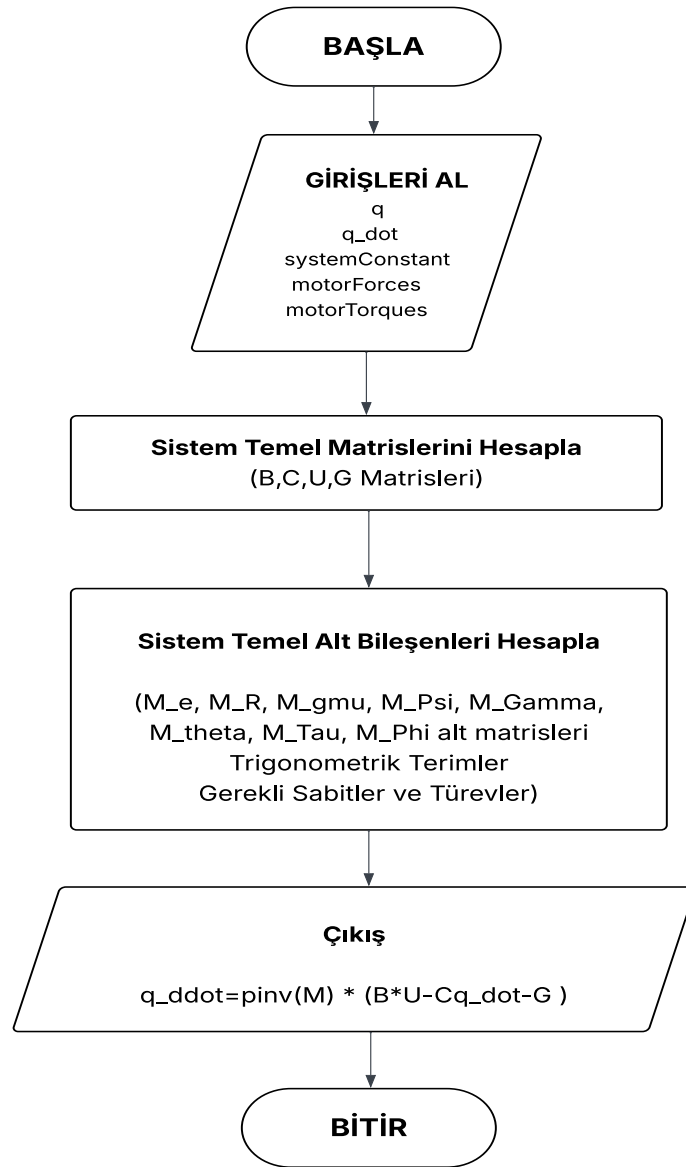
Modeldeki **transpose** (u^T) blokları, MATLAB/Simulink ortamında matris işlemleri uyumluluğu için gereklidir. Drone durumunu q , \dot{q} ve \ddot{q} 8x1 sütun vektörleri hâlinde tanımlanmıştır. Bu vektörler, 1x8 satır vektörüne çevrilerek **GoTo** blokları aracılığıyla sistemden dışa aktarılır. GoTo blokları, sistem içinde verilerin daha okunabilir ve düzenli biçimde yönlendirilmesini sağlar. Bunlara karşılık gelen **From** blokları ise ihtiyaç duyulan yerlerde aynı verileri tekrar kullanmak için yerleştirilmiştir.

Arayüzden gönderilen modelin giriş parametreleri **Constant** blokları aracılığıyla sağlanır. **systemConstant** bloğu; *drone kütlesi*, *pendulum kütlesi*, *uzunluk* ve *kol mesafesi* gibi fiziksel sabitleri içerir. **motorForces** ve **motorTorques** blokları sırasıyla her bir motorun ürettiği itme kuvvetleri ve torkları vektör biçiminde girdi olarak sağlar. Bu sabitler, fiziksel modele parametrik destek sağlar ve drone üzerindeki etkileşimleri doğrudan etkiler. Son olarak, başlangıç koşulları olan **q_InitCond** ve **q_dot_InitCond** blokları, integrator'lara başlangıç değerlerini vererek simülasyonun doğru şekilde başlatılmasını mümkün kılar.



Şekil 3-1:DRİHA-KTS simulink modelleme

3.2 Matlab Fonksiyonu Kodu ve Akış Şeması



Şekil 3-2: Akış şeması

```
function q_ddot = fcn(q, q_dot, systemConstant, motorForces, motorTorques)

q_ddot = zeros(8, 1); % Boyut sabit: 8x1

%% ==== [ System Constants ] ====%%

M_drone = systemConstant(1); % kg, Mass of the drone (without pendulum)
mc = systemConstant(2); % kg, Mass of the pendulum (without drone)
l = systemConstant(3); % m, Length of the pendulum stick
g = 9.81; % m/s^2, Gravitational acceleration
DroneArmLength = systemConstant(4); %m, Distance from the center of the drone to
the center of the motor
```

```

% Thrust force per motor
MotorForce_1 = motorForces(1);
MotorForce_2 = motorForces(2);
MotorForce_3 = motorForces(3);
MotorForce_4 = motorForces(4);
force_total = MotorForce_1 + MotorForce_2 + MotorForce_3 + MotorForce_4;

% Thrust Torque per motor
MotorTorque_1 = motorTorques(1);
MotorTorque_2 = motorTorques(2);
MotorTorque_3 = motorTorques(3);
MotorTorque_4 = motorTorques(4);

%Changed sign of the variable MotorTorque 2 and 4, because of its
%rotations are CW, other ones are CCW, they are opposite of each other
torque_total = MotorTorque_1 - MotorTorque_2 + MotorTorque_3 - MotorTorque_4;

% Roll, pitch, and yaw torques applied to the frame
Torque_phi = (MotorForce_2-MotorForce_4)*DroneArmLength;
Torque_theta = (MotorForce_3-MotorForce_1)*DroneArmLength;
Torque_psi = (torque_total);

%% ==== [ State Variable Extraction ]====

% Extract values and their derivatives from q and q_dot arrays
% and assign them to respective physical quantities

% Content of q array ==> [x; y; z; fi; teta; psi; alfa; beta]
% ==> [q(1); q(2); q(3); q(4); q(5); q(6); q(7); q(8)]
% derivatives ==> [x_dot;y_dot;z_dot;phi_dot;theta_dot;psi_dot;alfa_dot;beta_dot]

% ==> [q_dot(1);q_dot(2);q_dot(3);q_dot(4);q_dot(5);q_dot(6);q_dot(7);q_dot(8)]

x = q(1); x_dot = q_dot(1); % x position and its derivative
y = q(2); y_dot = q_dot(2); % y position and its derivative
z = q(3); z_dot = q_dot(3); % z position and its derivative

phi = q(4); phi_dot = q_dot(4); % phi angle and its derivative
theta = q(5); theta_dot = q_dot(5); % theta angle and its derivative
psi = q(6); psi_dot = q_dot(6); % psi angle and its derivative
alfa = q(7); alfa_dot = q_dot(7); % alfa angle and its derivative
beta = q(8); beta_dot = q_dot(8); % beta angle and its derivative

%% ==== [ Trigonometric Shorthand Notations ]====

% To simplify the mathematical model representation, the following notation is used
C_alpha = cos(alfa);
S_alpha = sin(alfa);
C_beta = cos(beta);
S_beta = sin(beta);
C_phi = cos(phi);
S_phi = sin(phi);
C_theta = cos(theta);
S_theta = sin(theta);
C_psi = cos(psi);

```

```

S_psi = sin(psi);

%% ==== [ SUBMATRICES FOR SYSTEM MATRIX M,C,G and B ]====

% -----%
% Submatrices Contained in the System Matrix B %
% -----%

% Matrix e
M_e = [0;
        0;
        1];

% Rotation matrix from body to inertial frame based on ZYX Euler angles
M_R = [...
C_psi*C_theta, C_psi*S_theta*S_phi - S_psi*C_phi, C_psi*S_theta*C_phi + S_psi*S_phi;
S_psi*C_theta, S_psi*S_theta*S_phi + C_psi*C_phi, S_psi*S_theta*C_phi - C_psi*S_phi;
-S_theta, C_theta*S_phi, C_theta*C_phi];

% -----%
% Submatrices Contained in the System Matrix G %
% -----%

% Matrix gmu
M_gmu = [-mc*l*g*S_alpha;
          0];

% -----%
% Submatrices Contained in the System Matrix C %
% -----%

% Matrix Psi
M_Psi = (mc*(l^2))*[
0, -beta_dot*S_alpha*C_alpha;
beta_dot*S_alpha*C_beta, alfa_dot*S_alpha*C_beta];

% Matrix Gamma
M_Gamma = (mc*l)*[-(alfa_dot*S_alpha+beta_dot*C_alpha*S_beta),
-(alfa_dot*C_alpha*C_beta+beta_dot*S_alpha);
-(alfa_dot*S_alpha+beta_dot*C_alpha*S_beta),
-(alfa_dot*C_alpha*C_beta + beta_dot*S_alpha);
-alfa_dot*C_alpha, 0];

% -----%
% Submatrices Contained in the System Matrix M %
% -----%

% Matrix Theta
M_theta = (mc*l)*[C_alpha*C_beta, -S_alpha*S_beta;
C_alpha*S_beta, S_alpha*C_beta;
S_alpha, 0];

% Matrix Tau(Transposed version)
M_Tau = (mc*l)*[C_alpha*C_beta, -C_alpha*S_beta, -S_alpha;

```

```

        -S_alpha*S_beta, S_alpha*C_beta ,      0    ];

% Matrix Phi
M_Phi = [mc*l^2,      0      ;
         0      , mc*(l^2)*(S_alpha^2)];

%% ==== [ SYSTEM MATRIX M,C,G,U and B ]====
% q_ddot = M \ (B*U - C*q_dot - G );

% ----- %
%                               % Matrix B %
% ----- %

B = [ M_R*M_e , zeros(3,3) ;
      zeros(3,1), eye(3)   ;
      zeros(2,1), zeros(2,3) ];

% ----- %
%                               % Matrix G %
% ----- %

G = [ zeros(2,1) ;
      g*(M_drone + mc);
      zeros(3,1) ;
      M_gmu      ];

% ----- %
%                               % Matrix C %
% ----- %

C = [zeros(3,3), zeros(3,3), M_Gamma ;
      zeros(3,3), zeros(3,3), zeros(3,2);
      zeros(2,3), zeros(2,3), M_Psi  ];

% ----- %
%                               % Matrix M %
% ----- %

M = [(M_drone+mc)*eye(3), zeros(3,3) , M_theta ;
      zeros(3,3)      , eye(3)      , zeros(3,2);
      M_Tau           , zeros(2,3) , M_Phi  ];

% ----- %
%                               % Matrix U %
% ----- %

U =[force_total;Torque_phi;Torque_theta;Torque_psi];

%% ==== [ SOLVING SYSTEM DYNAMIC EQUATION ]====%%

%q_ddot(:) = M \ (B*U - C*q_dot - G );

q_ddot = pinv(M) * (B*U - C*q_dot - G);

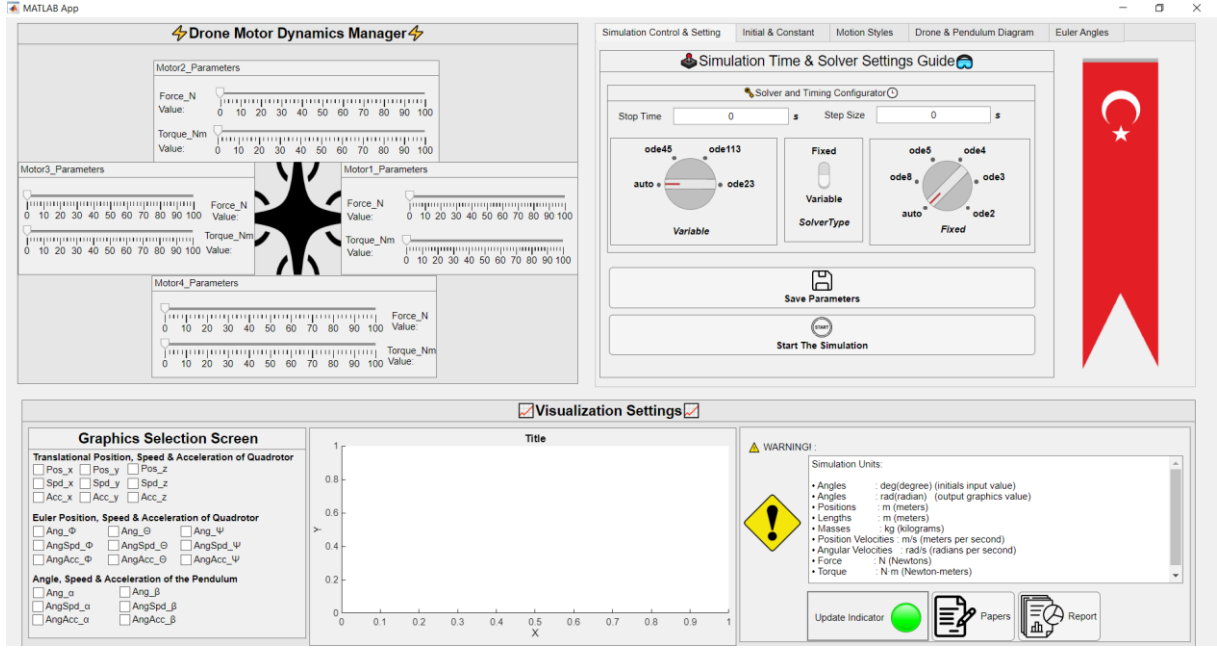
end

```

SİSTEMİN KONTROL ARAYÜZÜ

4.1 Arayüz Ekranının Tanıtımı

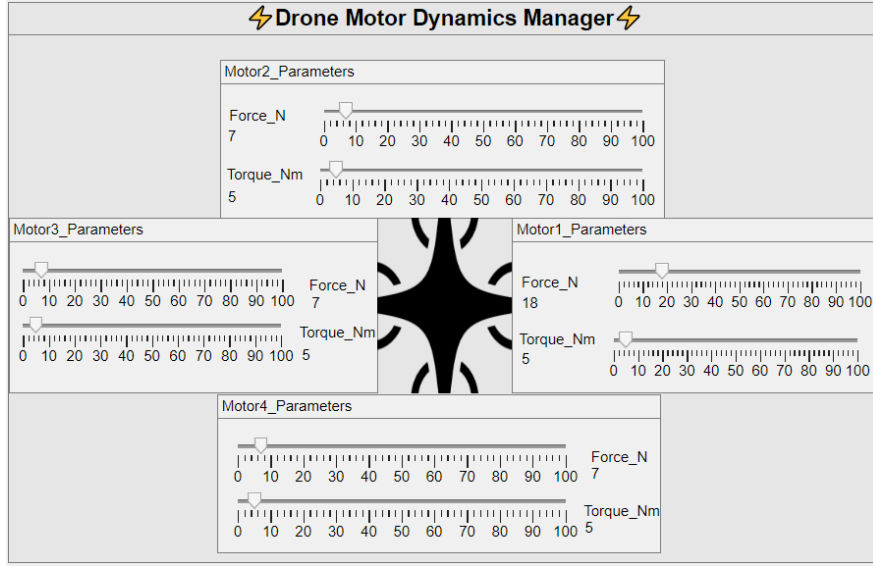
MATLAB dosyası çalıştırıldığında, kullanıcı öncelikle arayüz bölümüne yönlendirilmelidir; çünkü sistemle ilgili tüm yapılandırmalar ve kontrol işlemleri bu arayüz üzerinden gerçekleştirilmektedir. Arayüz dosyası çalıştırıldığında, kullanıcıya Şekil 4-1’de gösterilen arayüz ekranı sunulmaktadır.



Şekil 4-1: Arayüz giriş ekranı

4.2 DRİHA Motor Dinamikleri Yöneticisi

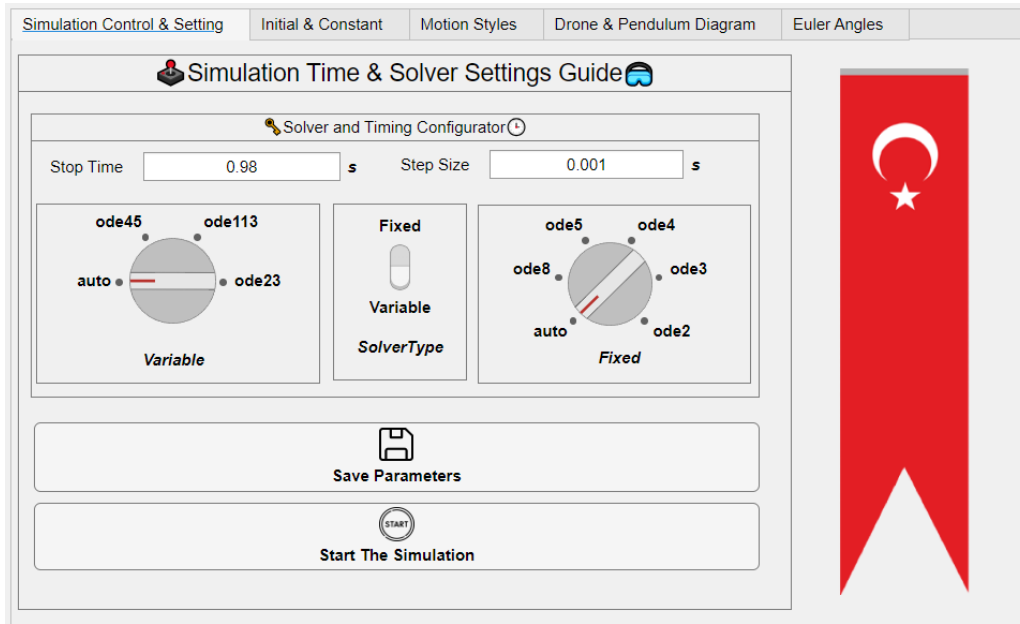
DRİHA Motor Dinamiği Yöneticisi bölümünde, her bir DRİHA motoruna ait itme kuvveti ve tork değeri ilgili kaydırıcı kontrol pencereleri aracılığıyla ayarlanabilmektedir. Yapılan değişiklikler gerçek zamanlı olarak güncellenmekte ve mevcut değerler *Force_N* ve *Torque_Nm* etiketlerinin altında görüntülenmektedir. Şekil 4-2’de daha ayrıntılı şekilde gösterildiği üzere, İHA Motor Dinamiği Yöneticisi menüsündeki motorların konumları ve birbirleriyle olan hizalanmaları, SimScape modeliyle tam uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4-2: DRIHA-KTS motor dinamiği yöneticisi

4.3 Simülasyon Kontrol ve Ayarları

Bu arayüz, bütünleşmiş DRIHA-KTS sisteminin Simulink ortamında çalıştırılabilmesi için gerekli olan simülasyon süresi ve çözücü (solver) yapılandırmalarının kullanıcı tarafından yapılmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 4-3: Simülasyon süresi, çözücü ayarları ve kontrol butonları

4.3.1 Simülasyon Zaman ve Diferansiyel Çözücü Ayarları

Bu bölüm, kullanıcıya simülasyonun süresini ve çözüm algoritmasını yapılandırma imkânı sunar. Arayüz üzerinden "**Stop Time**" alanı kullanılarak simülasyonun toplam süresi saniye cinsinden tanımlanabilir. Benzer şekilde, "**Step Size**" parametresi sayesinde çözümleme sırasında kullanılacak zaman adımı belirlenir. Bu ayar, simülasyonun doğruluğu ve performansı açısından kritik öneme sahiptir. Kullanıcı, diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılacak algoritmayı belirlemek amacıyla iki farklı kontrol göstergesi ile karşılaşır. Sol tarafta, **değişken adımlı çözücüler** (örneğin: ode45, ode113, ode23) seçilebilirken; **sağ tarafta sabit adımlı çözücüler** (örneğin: ode5, ode4, ode3, ode2) tercih edilebilmektedir. Ortada yer alan "**Solver Type**" seçeneği ise çözücünün sabit mi yoksa değişken adımlı mı olacağını belirlemek için kullanılır. Bu yapılandırma, Simulink modelinin çözümleme davranışını doğrudan etkileyerek sistemin kararlılığı ve doğruluğu üzerinde belirleyici rol oynar.

4.3.2 Simülasyon Kayıt ve Başlatma Komutları

Bu bölüm, yapılandırılan simülasyon parametrelerinin MATLAB çalışma alanına aktarılması ve simülasyonun başlatılması işlemlerini içermektedir. Kullanıcı, tüm ayarları tamamladıktan sonra arayüzde yer alan "**Save Parameters**" butonuna tıklayarak tanımlanan değerlerin MATLAB ortamına kaydedilmesini sağlar. Bu adım, modelin doğru verilerle başlatılabilmesi açısından zorunludur. Ardından, "**Start The Simulation**" butonuna basılarak Simulink modeli çalıştırılır. Bu komut sayesinde, kullanıcı yapılandırılmış modelin 3B görsel simülasyonunu izleyebilir ve sistemin dinamik davranışlarını analiz edebilir. Bu işlem sırasında, daha önce belirlenen zaman, adım büyüklüğü ve çözücü ayarları doğrudan kullanılır. Bu kontroller, kullanıcının simülasyonu baştan sona yönetebilmesini sağlar ve kullanıcı deneyimini sadeleştirerek sistem doğrulama süreçlerine katkı sunar.

4.4 Sabitler ve Başlangıç Koşulları

Bu bölümde, simülasyonun başlangıç konumları, hızları ve sistemin fiziksel sabitleri tanımlanarak, modelin doğru ve kontrollü bir şekilde başlatılması sağlanmaktadır.

Simulation Control & Setting		Initial & Constant		Motion Styles		Drone & Pendulum Diagram		Euler Angles	
Initial Conditions									
Position_x	0	m	Speed_x	0	m/s				
Position_y	-6	m	Speed_y	0	m/s				
Position_z	3	m	Speed_z	0	m/s				
Angle_phi	0	°deg	AngleSpeed_phi	0	°deg/s				
Angle_theta	0	°deg	AngleSpeed_theta	0	°deg/s				
Angle_psi	0	°deg	AngleSpeed_psi	0	°deg/s				
Angle_alpha	2	°deg	AngleSpeed_alpha	0	°deg/s				
Angle_beta	0	°deg	AngleSpeed_beta	0	°deg/s				
Drone & Pendulum Mechanical Constants									
Mass of Drone	1.5	kg	Length of Drone Arm	2	m				
Mass of Pendulum	0.65	kg	Length of Pendulum	1.2	m				

Şekil 4-4: Sistem sabitleri ve başlangıç değerleri

4.4.1 Başlangıç Durumlarının ve Elde Edilen Türevlerinin Ayarlanması

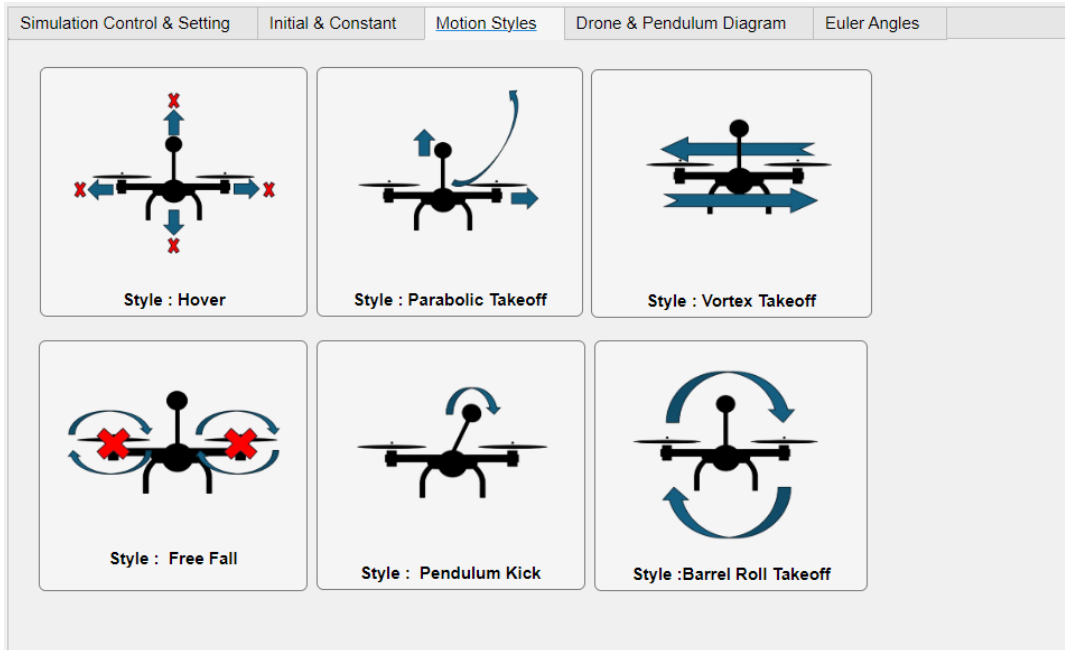
DRİHA-KTS sisteminin q ve \dot{q} parametrelerinin yapılandırılmasıyla simülasyon, belirli $x-y-z$ konumları ve hızları, *roll-pitch-yaw* açıları ve açısal hızları ile *alfa-beta* açıları ve bu açılara karşılık gelen açısal hızlardan başlatılabilir. Arayüzdeki giriş alanlarının yanında birim bilgileri görüntülenmekte olup, sistem SI birim sistemi kullanılarak çalışmaktadır. Örneğin, açı ve açısal hız değerleri arayüzde derece ve derece/saniye cinsinden girilebilmekte; ancak sistem içerisinde bu değerler radyan ve radyan/saniye cinsine otomatik olarak

4.4.2 Mekanik Sabitlerinin Ayarlanması

Bu bölümde, DRİHA ve KTS kütleleri birbirinden bağımsız olarak tanımlanmaktadır; DRİHA kütlesi ile KTS kütlesi ayrı ayrı girilmektedir. Tüm kütle değerleri SI birim sistemine uygun olarak kilogram cinsinden belirtilmektedir. DRİHA kol uzunluğu, DRİHA merkezinden motor merkezine olan mesafeyi metre cinsinden ifade eder. Benzer şekilde, KTS çubuğunun uzunluğu da metre olarak tanımlanmaktadır.

4.5 Ayarlanmış Dört Rotorlu İHA Küresel Ters Sarkaç Hareket Stilleri

Hareket Stilleri bölümünde, seçilen stilin simülasyonu, DRİHA-KTS operasyon sırasında kararsız hale gelene kadar gerçekleştirilir. Şekil 4-5’de verilen bu menüdeki altı hareket stilinden herhangi biri seçildiğinde, Simülasyon ve Kontrol Ayarları altındaki “*Kaydet*” butonuna tıklanmalı ve ardından “*Simülasyonu Başlat*” butonuna tıklanarak simülasyon başlatılmalıdır.



Şekil 4-5: Hareket tarzları

4.5.1 Havada Asılı Hareketsiz Kalma

Bu hareket stilinde, DRİHA-KTS sistemi, tüm dört motorun itme kuvveti uygulanmasıyla herhangi bir eksen boyunca hareket etmeden havada asılı kalır. Bu modun daha ayrıntılı açıklamaları ve ilgili hesaplamalar, *Bölüm 6*’da yer alan *Benzetim Çalışması – Dört Rotorlu İHA Küresel Ters Sarkaç Sisteminin Serbest Düşüş Simülasyon ve Sonuçları* altında verilmiştir.

4.5.2 Parabolik Kalkış

DRİHA-KTS sistemi, $x-z$ düzleminde parabolik bir yörünge izler. Bu hareket, x eksenı boyunca 5 m/s başlangıç hızı ve z eksenı boyunca 0,3 m başlangıç yüksekliği ile başlatılır. Motorlara verilen eşit büyüklük ve aynı yönlü f kuvvetleri ile de aynı zamanda yukarıya doğru tırmanır.

4.5.3 Kasırga Parabolik Kalkış

DRİHA-KTS sistemi, *kendi etrafında dönerek parabolik bir yörüngede yükselir*. Bu hareket, yaw eksenini etrafında 150 °/s açısal hız, x eksenini boyunca 5 m/s başlangıç hızı ve z eksenini boyunca 0,3 m başlangıç yüksekliği ile gerçekleştirilir.

4.5.4 Serbest Düşüş

Bu hareket stilinde, DRIHA-KTS sistemindeki *tüm motor kuvvetleri 0 N olarak ayarlanır* ve sistem kendi ağırlığıyla serbest düşüş yapar. Bu davranışın detaylı analizi ve hesaplamaları, Uygulamalar ve Sonuçlar bölümünde, Verilen Başlangıç Koşullarıyla *Bölüm 6*'da yer alan *Benzetim Çalışması – Dört Rotorlu İHA Küresel Ters Sarkaç Sisteminin Havada Asılı Kalma Simülasyon ve Sonuçları* altında verilmiştir.

4.5.5 Ters Sarkaç Devrilmesi

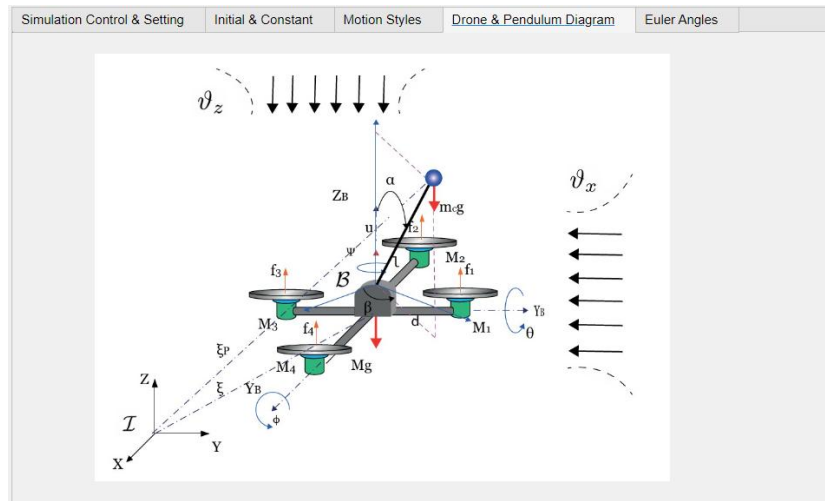
Bu stilde, *KTS ile ana Z eksenini arasındaki açı* 2° olarak ayarlanır; x eksenini boyunca 5 m/s başlangıç hızı ve z eksenini boyunca 2 m başlangıç yüksekliği verilir. Bu hareketin DRIHA-KTS üzerindeki etkisi daha sonra analiz edilir.

4.5.6 Fıçı Tonosu

Bu stil, sabit kanatlı İHA’larda ve savaş uçaklarında yaygın olan agresif bir manevra olan barrel roll’u DRIHA-KTS sistemi içinde simüle eder. Başlangıç koşulunda DRIHA-KTS yerden 3 m yukarı kaldırılır; dört motordan üçü sabit itme kuvveti uygular, kalan motorun itme kuvveti ise dönüş yönünü kontrol etmek için değiştirilir (bu simülasyonda üç motora 7 N, kalan motor ise 18 N kuvvet uygular). Ayrıca, sarkaca Z eksenine göre 2° açı verilmiş ve manevra sırasında devrilmesine izin verilmiştir.

4.6 Dört Rotorlu İHA Küresel Ters Sarkaç Diyagramı

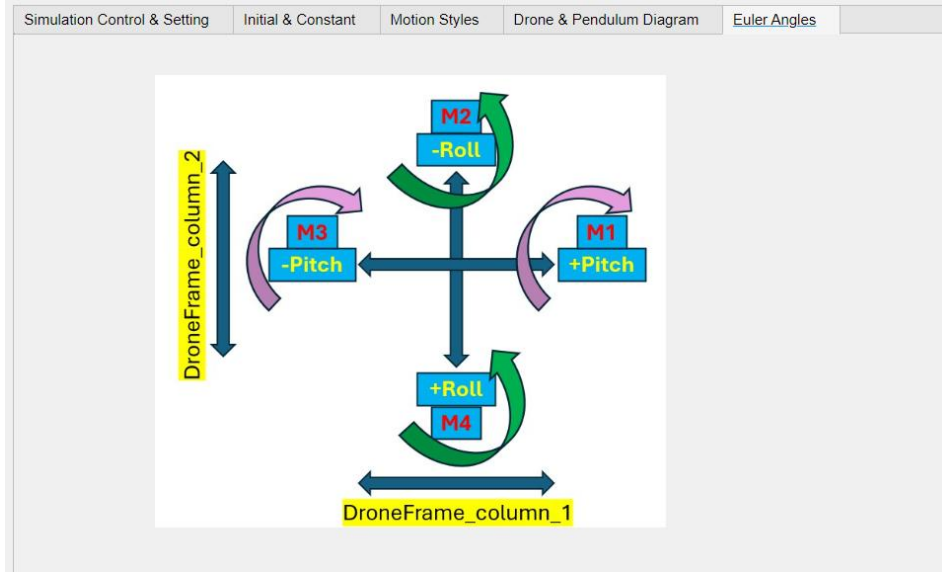
Şekil 4-6, DRİHA-KTS sistemini modellemek için referans alınan makaleden kullanılan diyagramı göstermektedir. Kullanıcılar, herhangi bir parametre girerken veya hareket stillerini test ederken bu diyagrama başvuracaktır. V_x ve V_z parametreleri, rüzgâr etkisini temsil eden değerler olarak bu şekilde göz ardı edilmelidir; çünkü bu parametreler, DRİHA-KTS sistemine çeşitli kontrol yöntemleri uygulanırken bozulma girdileri olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır.



Şekil 4-6: DRİHA ve KTS bütünleşik sisteminin diyagramı

4.7 Euler Açıları

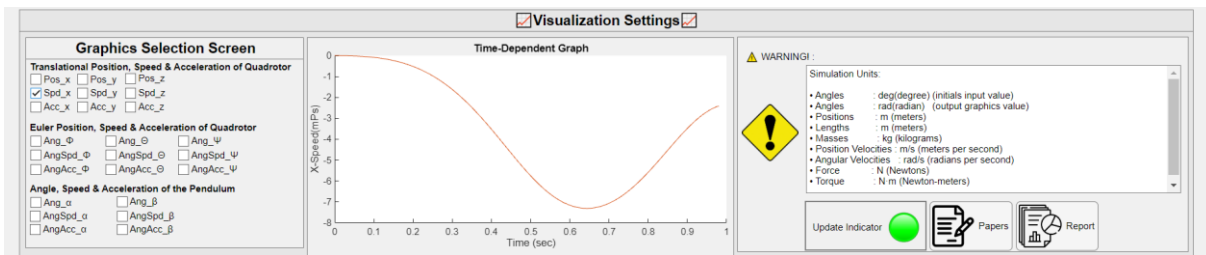
Şekilde gösterilen 2D DRİHA illüstrasyonu, motorların dönme yönlerini belirtir ve Simscape arayüzü açıldığında motorların hangi kollarda bulunduğunu gösterir.



Şekil 4-7: Euler açıları

4.8 Görselleştirme Ayarları

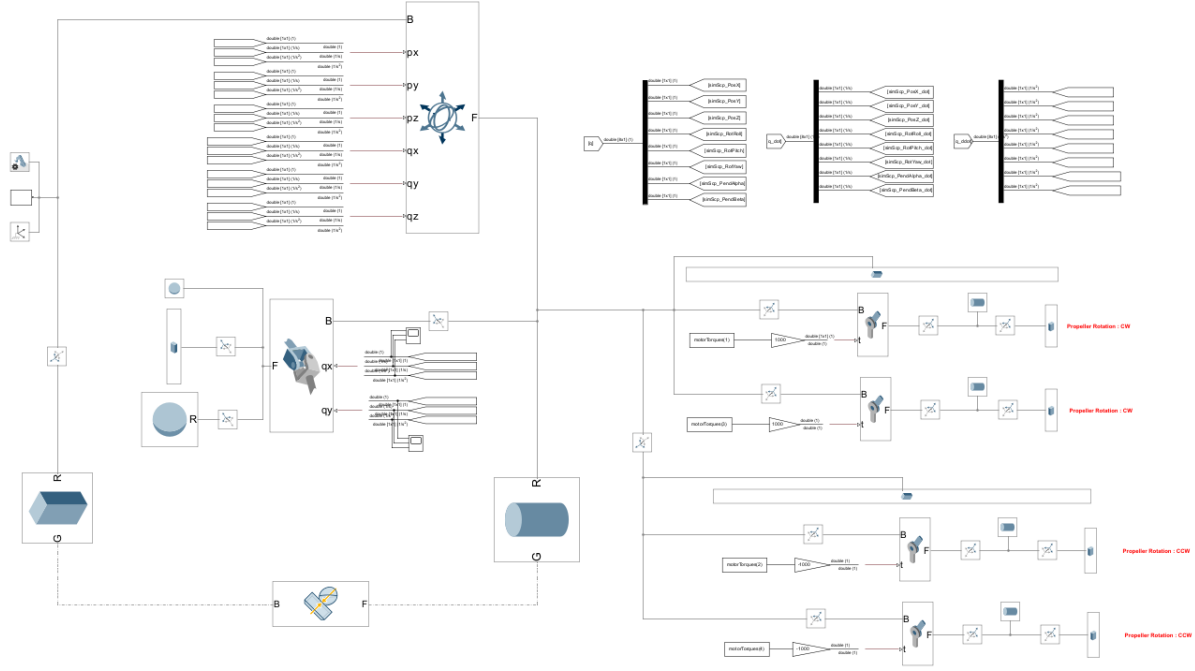
Simülasyon tamamlandıktan sonra, sistem çıktıları MATLAB çalışma alanına aktarılır. Arayüzün arka planda çalışan kodu sayesinde, sistem durumları, türevleri ve daha yüksek mertebedeki türevler simülasyon süresi boyunca görüntülenebilir. Bunun için, Görselleştirme Ayarları altındaki Grafik Seçim Ekranı panelinde ilgili grafiklerin yanındaki kutucuklar işaretlenerek istenilen grafikler seçilir ve ardından merkezdeki grafik arayüzünde gösterilir. En sağda, uyarı simgesi ile işaretlenmiş bölüm, parametre girilirken ve çıktı görüntülenirken kullanılan birimler hakkında kullanıcıyı bilgilendirir. Hemen altında, Güncelleme Göstergesi herhangi bir sistem parametresi değiştirildiğinde kırmızıya döner ve kullanıcıyı uyarır. Göstergenin tekrar yeşile dönmesi için, Simülasyon Kontrol ve Ayarları bölümündeki Kaydet butonuna tıklanmalıdır. Makale bölümü, bu modelin oluşturulmasında kullanılan makaleleri açarken, Rapor bölümü proje ekibi tarafından hazırlanmış raporu açar.



Şekil 4-8: Görselleştirme ayarları

SİSTEMİN FİZİKSEL BLOK TABANLI MODELLEMESİ

Bu bölümde, DRIHA-KTS sisteminin fiziksel davranışlarının modellenmesi amacıyla kullanılan **Simscape** ortamı ve yapı taşları tanıtılacaktır. Fiziksel bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimleri, blok tabanlı yapılarla simüle edilerek sistemin gerçek dünya koşullarına yakın davranışlar sergilemesi sağlanmıştır.



Şekil 5-1: DRIHA-KTS Simscape bütün modeli

5.1 Kullanılan Alt Kütüphaneler ve Genel Yapı

Model oluşturulurken, Simscape'in sunduğu alt kütüphanelerden faydalanılmıştır. Bu kütüphaneler ve içerdiği bileşenler arasında:

Simscape → Gövde Bileşeni (Body Element):

- *Prizmatik Katı (Brick Solid)*: DRIHA ve KTS çubuklarının tasarlanmasında kullanıldı.
- *Silindirik Katı (Cylindrical Solid)*: DRIHA ve motor gövdesi tasarlanmasında kullanıldı.
- *Küresel Katı (Spherical Solid)*: KTS'in küresel ağırlığının tasarlanmasında kullanıldı.

Simscape → Eksen ve Dönüşümler (Frame and Transforms):

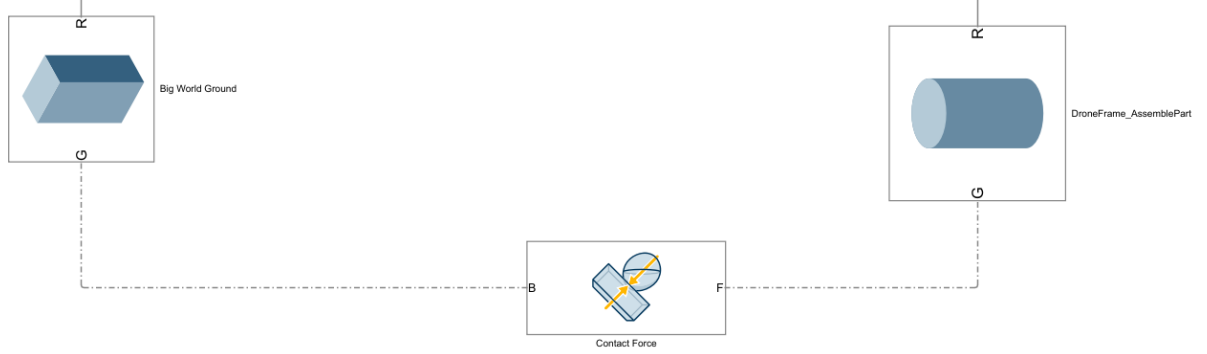
- *Rijit Dönüşüm (Rigid Transform)*: Eksen takımlarının ötelenmesinde ve döndürülmesinde kullanıldı.
- *Dünya Eksen (World Frame)*: Dünya sabit eksenini(I-axis) oluşturulmasında kullanıldı.

Simscape → Mafsallar (Joints):

- *6-Serbestlik Burç Mafsalı (Bushing Joint)*: DRIHA-KTS sisteminin x-y-z, ϕ - θ - ψ konumları ve açıları, 1. ve 2. Türevlerinin simüle edilmesinde kullanıldı.

Şekil 5-4'te görüldüğü üzere, DRİHA-KTS sistemi *Contact Force* fiziksel bloğu aracılığıyla *Big World Ground* ortamıyla etkileşime sokulmaktadır.

Bu yapı sayesinde, sistem zeminle temas ettiğinde modelin yüzeyin içinden geçmesi engellenir ve bunun yerine *gerçekçi bir çarpışma (fiziksel darbe)* etkisi oluşturularak simülasyonun fiziksel doğruluğu artırılır.

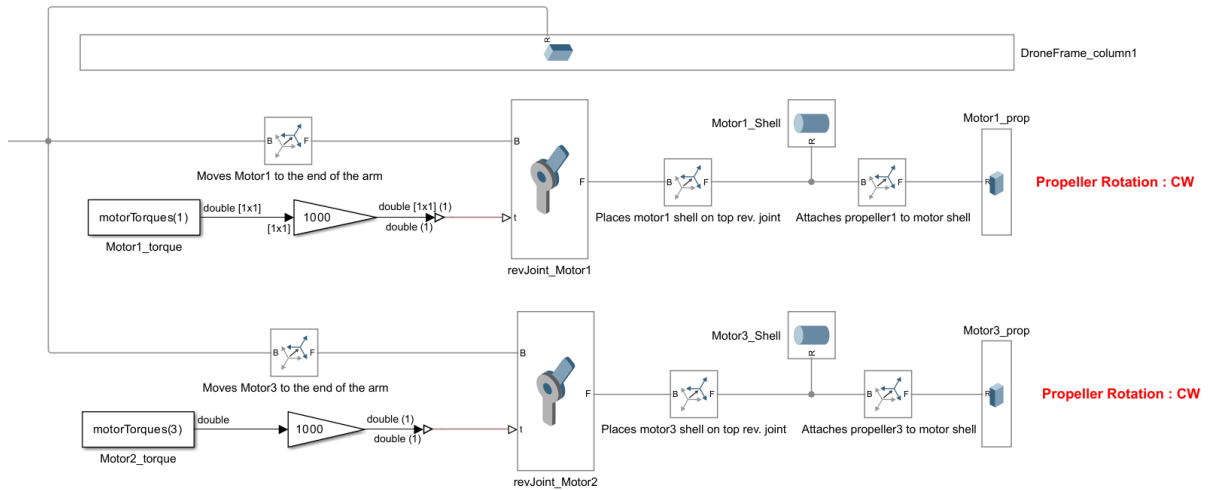


Şekil 5-4: DRİHA-KTS sisteminin gövdesinin zemin ile etkileşimi

Şekil 5-5'te görüldüğü üzere, *DroneFrame_column* bileşeni üzerine karşılıklı iki adet *dönel (revolute)* eklem yerleştirilmiş ve her bir ekleme birer *motor ve pervane* bağlanmıştır.

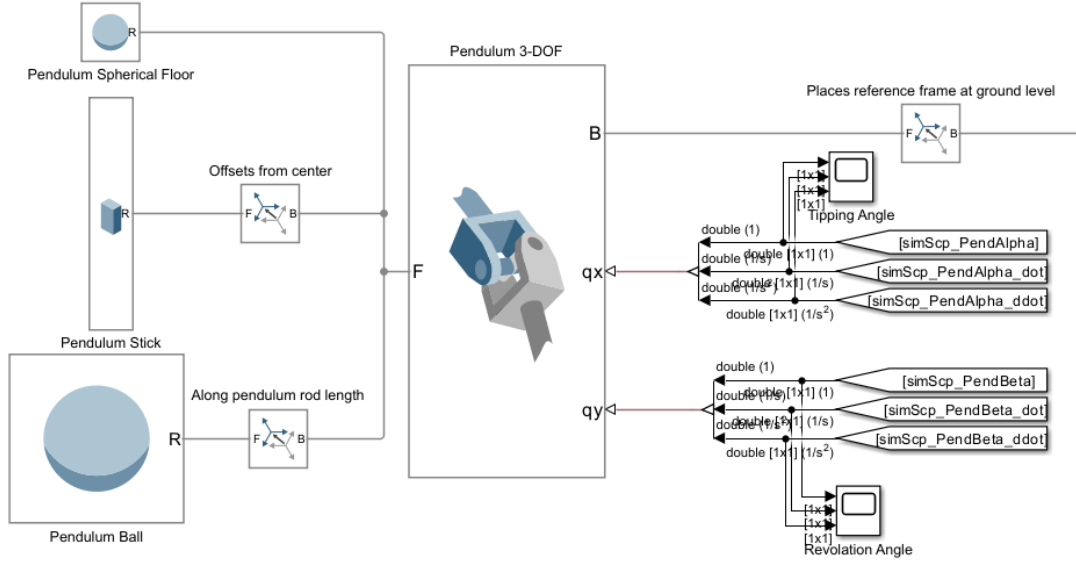
Pervanelerin döndürülmesi için kullanılan *MotorTorque* adlı sabit bloklar, bir *kazanç bloğu (Gain)* aracılığıyla beslenerek dönel eklemlere tork girdisi olarak uygulanmıştır.

Bu yapı sayesinde pervanelerin dönüşü *görsel olarak gerçekçi* şekilde simüle edilmiştir ve sistemin fiziksel davranışı daha doğru bir biçimde modellenmiştir.



Şekil 5-5: DRİHA sisteminin motor ve pervane konumlandırması ve hareketlendirilmesi

Şekil 5-6’te görüldüğü üzere, görüldüğü üzere KTS sistemine α , $\dot{\alpha}$, $\ddot{\alpha}$, β , $\dot{\beta}$, $\ddot{\beta}$ değerleri beslenerek, sistemin hem z-eksenine göre eğimi, eğim hızı ve ivmesi; hem de z-ekseni etrafındaki açısı, açısal hızı ve açısal ivmesi simüle edilmektedir. Takipçi eksen açısından incelendiğinde, KTS sistemini oluşturan çubuk ve ucuna bağlı küresel yük görsel olarak modellenmiştir.



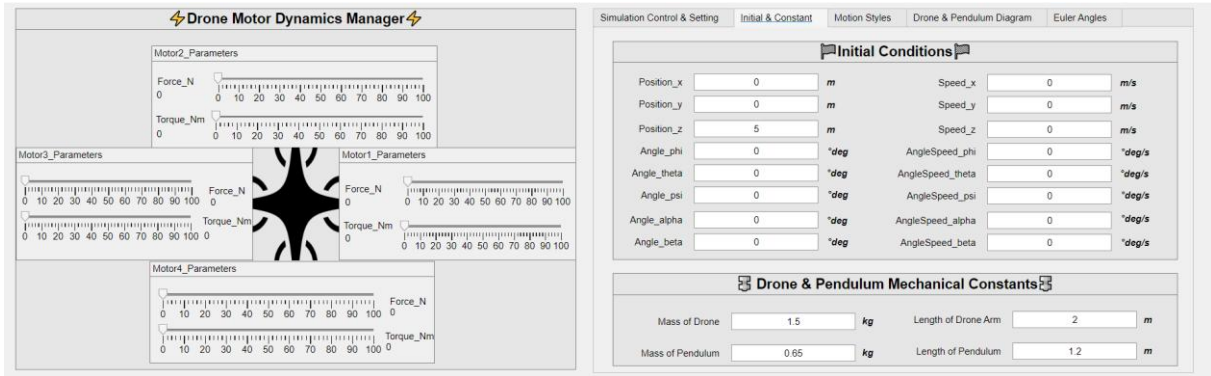
Şekil 5-6: KTS sisteminin fiziksel bloklar ile modellenmesi

BENZETİM ÇALIŞMASI, SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

6.1 Benzetim Çalışması – Dört Rotorlu İHA Küresel Ters Sarkaç Sisteminin Serbest Düşüş Simülasyon ve Sonuçları

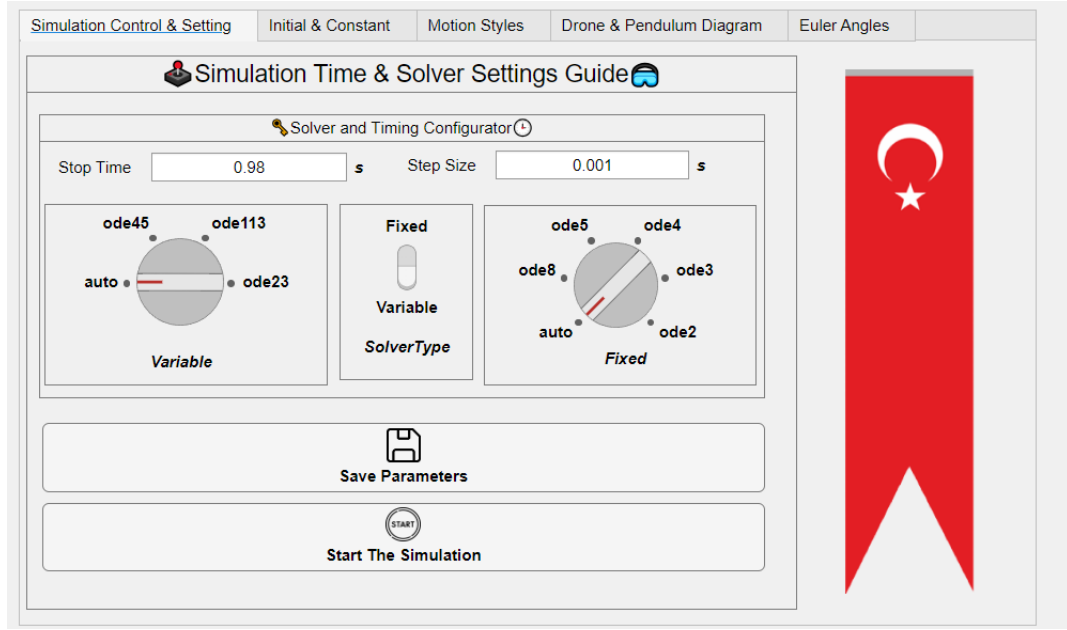
Sistem Beklentisi: Tüm girişlerin sıfır olduğu varsayılarak ve seçilen başlangıç koşulları kullanılarak (örneğin, belirli bir yükseklik ve konumdan DRIHA-KTS'nin serbest düşüşü) sistemin Simulink ortamında simülasyonu gerçekleştirilmelidir. Zamanla değişen davranış, ilgili grafikler ve görsel analizlerle gözlemlenmeli ve sunulmalıdır.

İlk olarak, simülasyon arayüzü başlatılmış ve model üzerinde tüm kuvvetler, torklar ve başlangıç koşulları sıfır olarak tanımlanmıştır. Ancak sistemin serbest düşüş dinamiklerini analiz edebilmek için, sabit dünya referans çerçevesine göre z eksenini boyunca 5 m başlangıç yüksekliği tanımlanmıştır. Mekanik parametreler tanımlanırken, DRIHA kütlesi ve KTS kütlesi birbirinden bağımsız değişkenler olarak ele alınmış ve ayrı ayrı tanımlanmıştır. DRIHA kol uzunluğu ve KTS çubuğunun uzunluğu ise yalnızca görsel temsili etkileyen parametreler olarak değerlendirilmiş, sistemin toplam kütlesine katkı sağlamamıştır. İlgili kurulum Şekil 6-1'de gösterilmektedir.



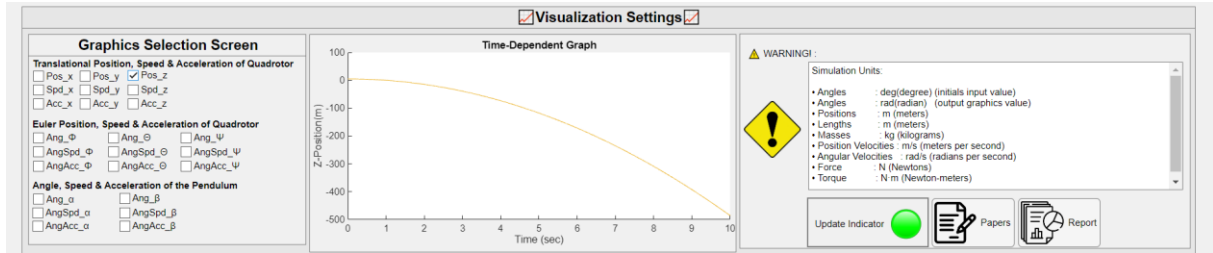
Şekil 6-1: Serbest düşüş başlangıç değerleri

Şekil 6-2'de görüldüğü üzere, simülasyon süresi 10 saniye olarak belirlenmiş ve çözümleme 0.001 saniyelik aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Bu adım büyüklükleriyle, sistemin dinamik davranışı Simscape ortamında görselleştirilmiştir. Ayrıca, değişken adımlı özelliklere sahip sabit adımlı bir çözücü türü seçilmiştir. Parametreler yapılandırıldıktan sonra, “*Parametreleri Kaydet*” seçeneği işaretlenip “*Simülasyonu Başlat*” butonuna tıklanarak simülasyon başlatılmıştır.



Şekil 6-2: Serbest düşüş zaman ve çözücü ayarları

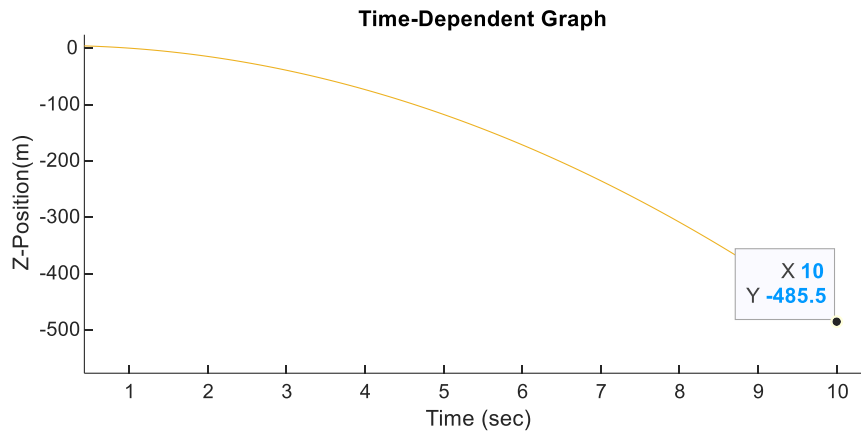
Görselleştirme Ayarları bölümünün altında yer alan panel aracılığıyla, simülasyon sonuçları zamana bağlı olarak grafiksel biçimde gözlemlenebilir. Bu panel sayesinde, simülasyon süresince konum, hız, açı veya açısal hız gibi parametreler detaylı biçimde takip edilebilir.



Şekil 6-3: Serbest düşüş görselleştirme arayüzü

6.1.1 Pozisyon – Zaman Analizi

İlk olarak, z eksenı boyunca gerçekleşen 10 saniyelik serbest düşüş hareketine karşılık gelen konum-zaman grafiğı oluşturulmuş olup, Şekil 6-4'ün altında sunulmuştur:



Şekil 6-4: Serbest Düşüş Konum - Zaman Grafiğı

Serbest düşüş hareketine ait grafiğin doğruluğu, aşağıda denklem (6.1)'de verilen sabit ivmeli konum-zaman kinematik denklemi kullanılarak doğrulanacaktır:

$$Z = Z_0 + V_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (6.1)$$

Burada, Z_0 başlangıç yüksekliğini, V_0 başlangıç hızını ve g yerçekimi ivmesini temsil etmektedir. Burada başlangıç yüksekliği 5 m ve yerçekimi ivmesi $9,81 \text{ m/s}^2$ olarak alınmıştır

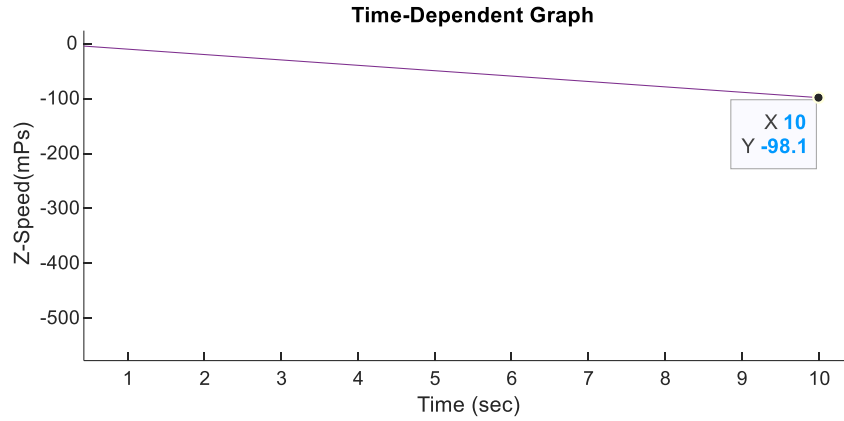
Bilinen değerler sabit ivmeli denkleme yerine konularak, 10 saniye sonunda z eksenindeki konum aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$Z = 5 + 0(10) - \frac{1}{2} 9.81(10^2) \quad (6.2)$$

$$Z = -485.5 \text{ m} \quad (6.3)$$

6.1.2 Hız – Zaman Analizi

Konum-zaman grafiğinin ardından, z eksenini boyunca hız-zaman değişimi de analiz edilmiş ve Şekil 6-5'te sunulmuştur.



Şekil 6-5: Serbest Düşüş Hız - Zaman Grafiği

Serbest düşüş hareketine ait hız-zaman grafiğinin doğruluğu, denklem (6.3) kullanılarak doğrulanacaktır:

$$V_Z = V_0 - g t \quad (6.3)$$

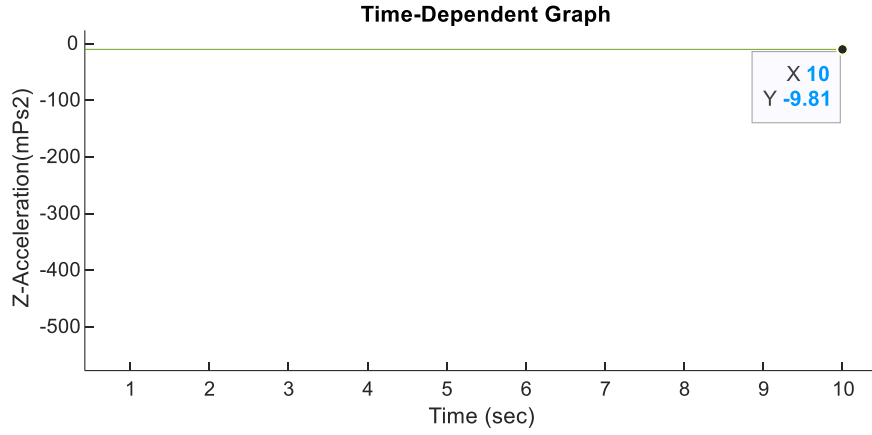
Verilen denkleme değerler yerine konularak, 10. saniyedeki z eksenini üzerindeki hız şu şekilde hesaplanmıştır:

$$V_Z = 0 - 9.81(10) \quad (6.4)$$

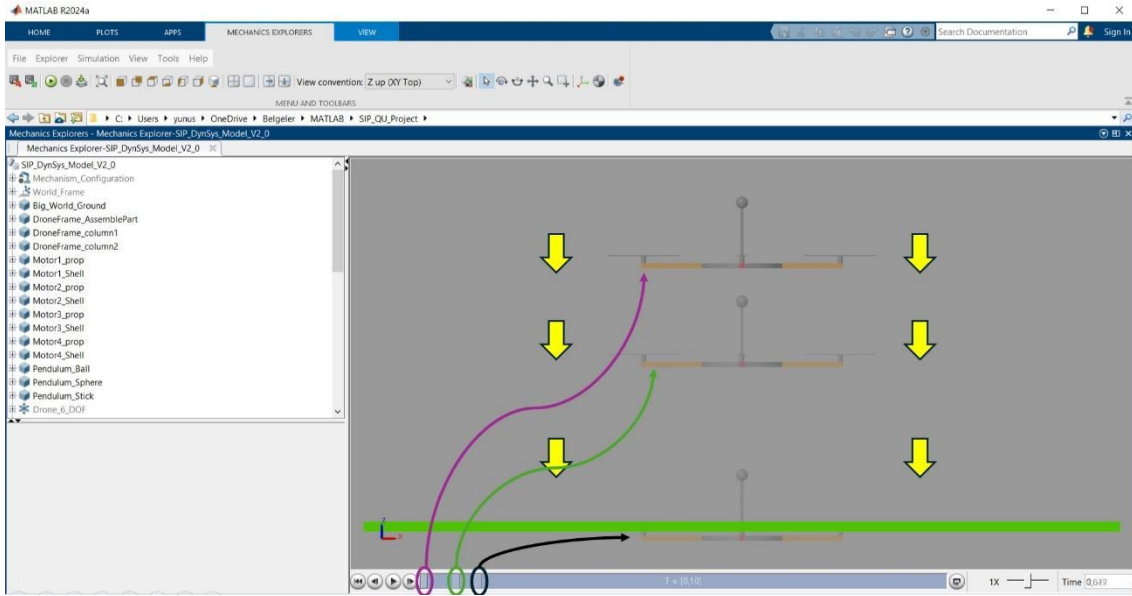
$$V_Z = -98.1 \text{ m/s} \quad (6.5)$$

6.1.3 İvme – Zaman Analizi

Hız-zaman grafiğinin ardından, ivme-zaman grafiği yerçekimi ivmesinin sabit kaldığını göstermektedir. Bunun nedeni, Simulink fonksiyonu içerisinde yerçekimi sabitinin $9,81 \text{ m/s}^2$ olarak tanımlanmış olmasıdır. Simülasyon grafiği Şekil 6-6'da gösterilmiştir.



Şekil 6-6: Serbest Düşüş İvme - Zaman Grafiği

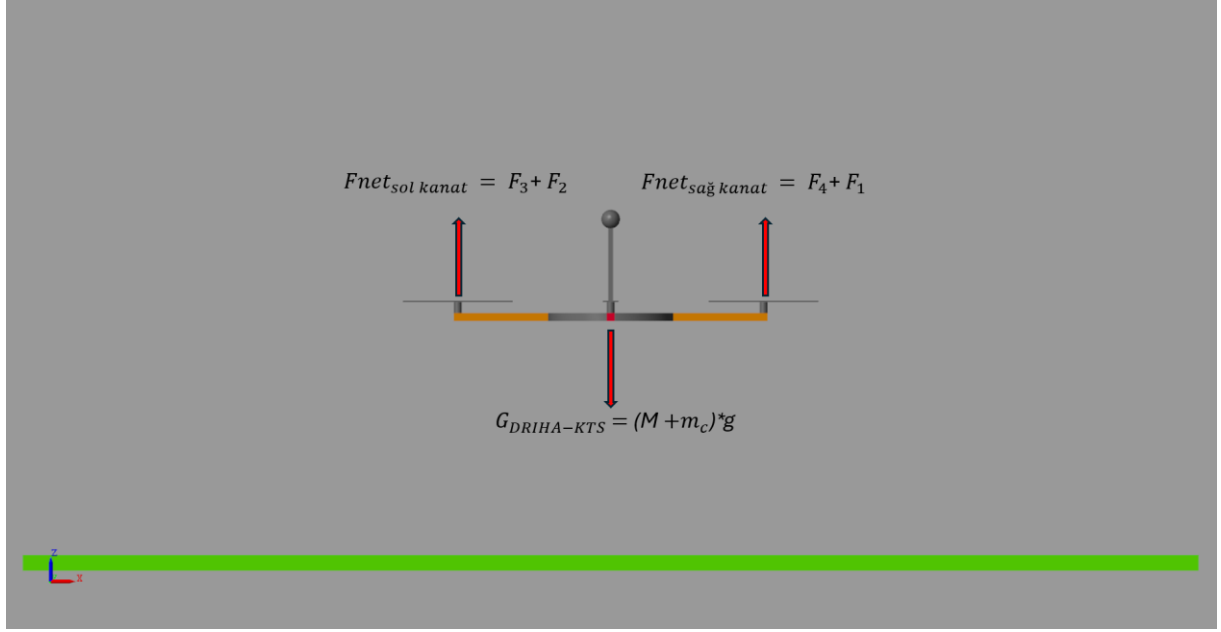


Şekil 6-7: DRİHA-KTS serbest düşüşüne ait simülasyon ekran görüntüleri

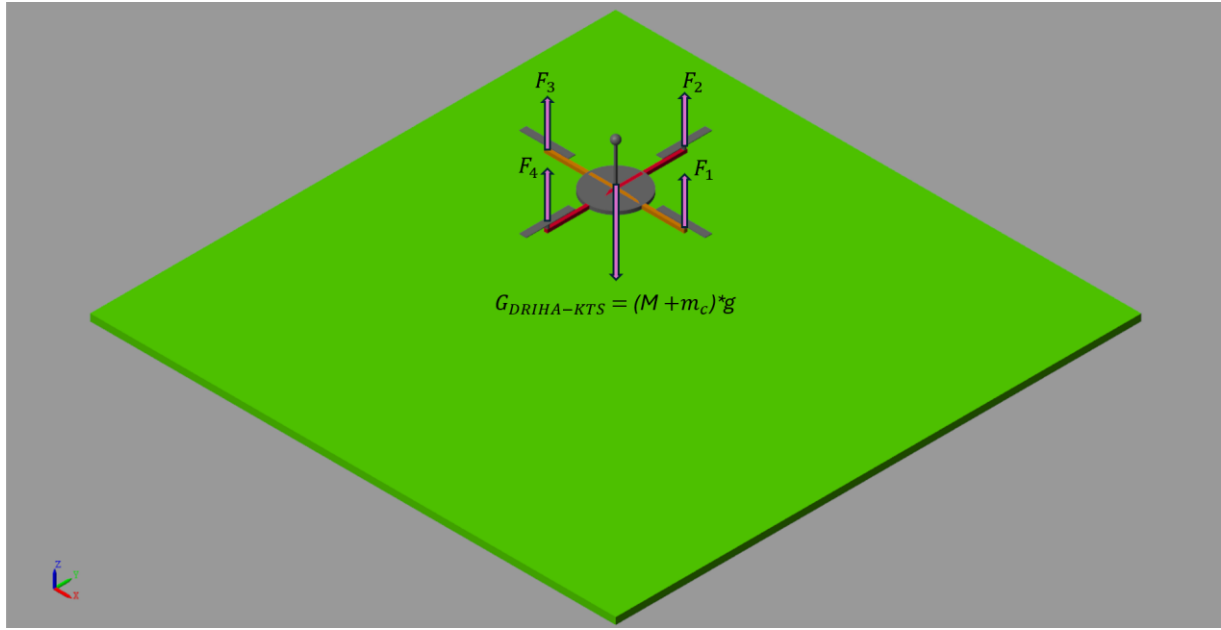
6.2 Benzetim Çalışması – Dört Rotorlu İHA Küresel Ters Sarkaç Sisteminin Havada Asılı Kalma Simülasyon ve Sonuçları

Sistemin tüm başlangıç koşulları sıfır olarak kabul edilmiştir. Bu koşullar altında, DRİHA-KTS stabilizasyonu için gerekli rotor hızları belirlenmiş ve zamana bağlı grafikler halinde sunulmuştur. Rotor hızlarının birbirine eşit olması beklenmektedir ve zamanla sıfırdan çok yakın sapmalar meydana gelse de en yakın kararlı değerler hedeflenmiştir.

İlk olarak, DRİHA ve KTS içeren sistemin serbest cisim diyagramı çizilerek etki eden kuvvetler gösterilmiştir. Şekil 6-8’de görüldüğü üzere, dört motor tarafından üretilen kaldırma kuvvetleri, merkeze eşit uzaklıklarda ve 90° açıyla yerleştirilmiş şekilde gösterilmiştir. Benzer şekilde, DRİHA’nın ve KTS ağırlık kuvvetleri de Şekil 6-8’de belirtilmiştir.



Şekil 6-8: DRIHA-KTS kuvvetleri gösteren serbest cisim diyagramı (1/2)



Şekil 6-9: DRIHA-KTS kuvvetleri gösteren serbest cisim diyagramı (2/2)

Şekil 6-8 ve Şekil 6-9’da gösterilen aşağı yönlü kuvvetlerin toplamı ile yukarı yönlü kuvvetlerin toplamı eşitlendiğinde, net kuvvet sıfır olur. Bu durum, başlangıç hızları ve açıları sıfır kabul edildiğinde, DRIHA-KTS sisteminin havada sabit ve askıda kalmasına neden olur.

$$F_{net_{sol\ kanat}} + F_{net_{sağ\ kanat}} = G_{DRIHA-KTS} \quad (6.6)$$

Denklemimizi daha da genişletirsek:

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = (M + m_c)g \quad (6.7)$$

Sistemin dengede kalması ve yanlara doğru salınım yapmaması için uygulanan kuvvetlerin eşit olduğu varsayılır.

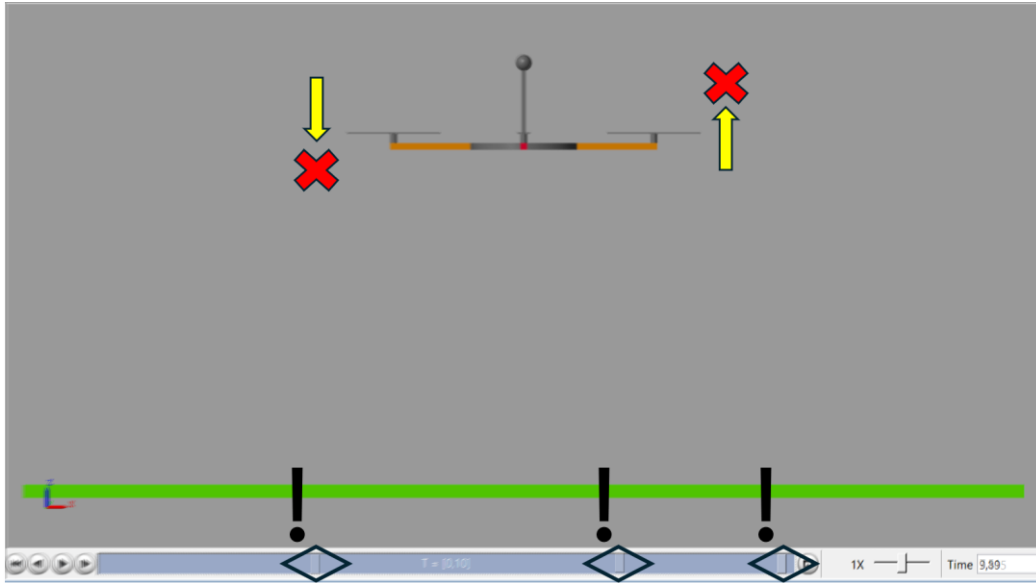
$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F \quad (6.8)$$

Son olarak, bu denklemden her bir motorun uygulaması gereken kuvvet hesaplanacaktır.

$$4 * F = (1.50 + 0.65)(9.81) \quad (6.9)$$

$$F = 5.2728 N \quad (6.10)$$

Bu şekilde, motor başına düşen kuvvet değeri bulunur. Bu değer, sistemin denge noktasını temsil eder ve kararlılığını sağlar. Şekil 6-10 da sistemin dengede kaldığı gösterilmiştir.



Şekil 6-10: DRİHA-KTS sisteminin dengede kaldığını gösteren görsel-zaman grafiği

6.3 Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada, dört rotorlu bir insansız hava aracı üzerine monte edilmiş küresel ters sarkaç sisteminin kontrolsüz durumdaki dinamik davranışları incelenmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin doğrusal olmayan, eksik eylemli ve çok serbestlik dereceli yapısından kaynaklı karmaşık salınım davranışlarını ortaya koymuştur. Ancak sistemin uygulamalı kontrolü, kararlılık artırımı ve görev bazlı hareket senaryolarının gerçekleştirilmesi için daha kapsamlı analiz ve geliştirme gerekmektedir.

İlerleyen çalışmalarda öncelikle, sistemin denge noktası etrafında lineerleştirilmiş hali elde edilerek durum-geri beslemeli (state feedback) veya gözleyici tabanlı kontrol yöntemleri ile kararlı hale getirilmesi hedeflenebilir. Bununla birlikte, tam model üzerinden doğrusal olmayan kontrol stratejileri (PID) tasarlanarak sistemin geniş çalışma aralıklarında stabilitesi sağlanabilir.

Ayrıca, sistem üzerindeki salınımların bastırılması amacıyla aktif sarkaç dengeleme, yük salınım azaltımı veya gelişmiş adaptif kontrol teknikleri de uygulanabilir. Simülasyon ortamında elde edilen modellerin donanım üzerinde gerçekleştirilebilirliği açısından, fiziksel bir test düzeneği oluşturulması ve gerçek zamanlı gömülü sistem entegrasyonu sağlanması da önemli bir adım olacaktır. Bu sayede, teorik olarak tasarlanan kontrol yapılarının pratikteki performansları da değerlendirilebilecektir.

Son olarak, sistem çoklu görevli uçuşlarda kullanılmak üzere genişletilerek, kooperatif taşıma senaryoları, yük bırakma/manevra senaryoları veya çoklu İHA iş birliği altında askıda yük kontrolü gibi ileri düzey uygulamalar geliştirilebilir.

PROJE EKİBİ VE GÖREV DAĞILIMI

Görev dağılımı aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Ekip üyeleri arasında koordineli bir çalışma gerçekleştirilmiş, gerekli durumlarda birbirlerine teknik destek sağlanmıştır. Literatür taraması, rapor hazırlama ve sonuçların yorumlanması tüm ekip üyeleri tarafından oluşturulmuştur.

Ekip Üyesi	Görev Dağılımı
Sıla BAYSAL	Simscape Multibody ortamında drone ve yük sisteminin 3B fiziksel modellemesi, bağlantı elemanlarının kurulumu
Hazel KÜPE	MATLAB/Simulink ortamında dinamik modelleme, sistem denklemlerinin kurulması ve çözüm algoritmaları
Yunus Emre KAYRA	MATLAB App Designer ile arayüz geliştirme, kullanıcı giriş ekranı, grafiksel çıktı bölümleri, veri görselleştirme

Tablo 7-1: Proje ekip dağılımı

[1] A. H. Martinez-Vasquez, R. Castro-Linares, A. E. Rodríguez-Mata, and H. Sira-Ramírez, "Spherical Inverted Pendulum on a Quadrotor UAV: A Flatness and Discontinuous Extended State Observer Approach," *Machines*, vol. 11, no. 6, p. 578, May 2023, doi: 10.3390/machines11060578.

[2] A. H. Martinez-Vasquez and R. Castro-Linares, "Flatness-based sliding mode control for stabilizing a spherical pendulum on a quadrotor," *Asian Journal of Control*, vol. 26, no. 4, pp. 1646–1662, Apr. 2024, doi: 10.1002/asjc.3308.