

# Çift Mikrodenetleyicili bir Nano-Dörtpervaneli'nin Tasarımı, Modellenmesi ve Yönelim Kontrolü

## Design, Modelling and Attitude Control of a Nano-Quadrotor with Dual Microcontroller

Mustafa Enes Kırmacı<sup>1</sup>, Hülya Yalçın<sup>2</sup>, Erdinç Altuğ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sistem Dinamiği ve Kontrol Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul  
kirmacim19@itu.edu.tr  
altuger@itu.edu.tr

<sup>2</sup>Görsel Zeka Laboratuvarı  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul  
hulyayalcin@itu.edu.tr

### Özetçe

Bu yayında, biri kontrol algoritması için diğeri de görüntü işleme işlemi için kullanılan iki ayrı mikrodenetleyiciye sahip bir nano-dörtpervaneli tasarımı, modellenmesi ve farklı kontrol yöntemleri ile kontrolü yer almaktadır. Proje kapsamında üzerinde mikrodenetleyicileri ve gerekli sensörleri barındıran ve aynı zamanda da dörtpervaneli gövdesi olarak kullanılan bir elektronik devre kartı tasarlanmıştır. Bu devre kartına uyumlu olacak motor, pervane, batarya seçilmiş ve motor tutucu kollar tasarlanarak 3B yazıcıda basılmıştır. Daha sonra, tasarlanan dörtpervanelinin matematik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modele göre PID kontrolcü ve Durum Geribeslemeli kontrolcü tasarlanmıştır. Tasarlanan PID kontrolcünün parametreleri Ziegler-Nichols yöntemi ile bulunmuştur. Durum Geribeslemeli kontrolcü parametreleri ise sistemin arzu edilen kutup pozisyonlarına göre belirlenmiştir. Daha sonra, bu kontrol yöntemleri ile elde edilen uçuş verileri kullanılarak kontrolcü performansları karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

### Abstract

In this paper, design, modelling and control of a nano-quadrotor that has two microcontrollers with different control methods are explained. One of the microcontrollers is used for control algorithm and the other one is used for image processing. In the project, a printed circuit board (PCB) which is equipped with the microcontrollers and necessary sensors was designed. The PCB was also used as the body of the nano-quadrotor. Suitable motors, propellers, battery were selected based on the PCB and motor holding arms were designed and printed with a 3D printer. Then the mathematical model of the quadrotor was derived. A PID controller and a State Feedback controller were designed based on the mathematical model. The parameters of the PID controller were tuned using the Ziegler-Nichols method. The State Feedback controller parameters were determined based on the desired pole positions of the system.

Then, the performances of the controllers were compared and evaluated using the flight data.

### 1. Giriş

İlk dörtpervaneli uzun bir zaman önce geliştirilmiş olmasına rağmen dörtpervanelilerin popülaritesi geçtiğimiz yıllarda çok hızlı bir yükselişe geçmiştir. Louis Breguet ilk dörtpervaneli hava aracını tasarlayarak yerden bir kac fit yükseklikte uçmayı başarmıştır. 1908 yılında bu dörtpervanelinin birkaç sefer uçtuğu bilinmesine karşın, bu uçuşlar hakkında daha detaylı bir bilgi bulunmamaktadır.

1920'lerde Etienne Oehmichen dörtpervaneliler üzerinde çalışmış ve birkaç farklı tasarım yapmıştır. Bu tasarımlarından birinde dört rotor ve sekiz pervane kullanılıyordu. Çelik tüplerin ucuna bağlanarak gövdeyi oluşturan bu rotor pervane setleri tek bir motor tarafından kontrol ediliyordu. Tüm rotolar tek bir motor tarafından sürüldüğü için motor hızları bağımsız olarak değiştirilemiyordu, dolayısıyla rotolardan farklı itkiler üretmek için pervanelerin hücum açısı değiştiriliyordu. Bu tasarım, diğer tasarımlara göre çok daha stabildi ve 1920'lerin ortasında binden fazla kez uçuş yaptı. Aynı tasarım, 1923'de birkaç dakikalığına havada kalmış ve 1924'de ise 360 metre uçarak en uzun helikopter uçuşu rekorunu kırmıştır.

Dörtpervaneliler sahip oldukları avantajlar sayesinde son yıllarda birçok araştırmacının ilgi odağı olmuştur. Bu avantajlardan bazıları, görece düşük maliyetli olması ve üzerinde bulundurabildiği farklı sensörler ve yüksek manevra kabiliyeti sayesinde birçok farklı alanda kullanıma uyumlu olmasıdır. Bu yayın kapsamında da kamera modülü ve görüntü işleme sistemine sahip bir nano-dörtpervaneli tasarımı, modellenmesi ve kontrolü yer almaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde dörtpervanelinin aynı zamanda gövde olarak da kullanılan elektronik kart tasarımı ve alt bileşenlerinin yanı sıra matematik modelinin elde edilmesi, üçüncü bölümünde PID ve Durum Geribeslemeli kontrolcülerin tasarımı, parametre kestirimi ve implementasyonu, dördüncü bölümünde simülasyon ve test sonuçları ve son olarak beşinci

bölümünde ise sonuç kısımlarına yer verilip, kontrolcü performansları karşılaştırılmıştır.

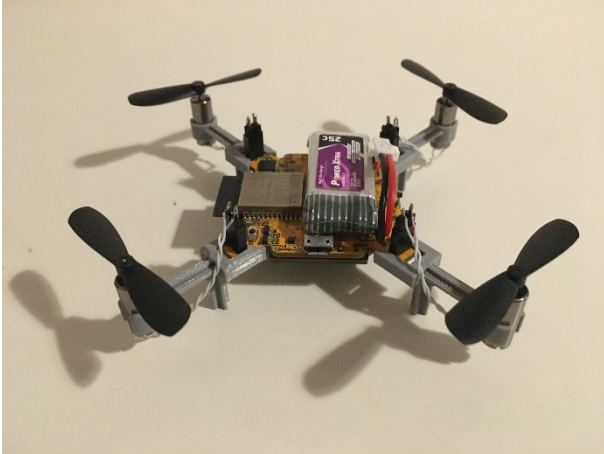
## 2. Donanım ve Modelleme

Bu bölümün birinci kısmında nano- dörtpervanelinin ana gövdesi olarak kullanılan elektronik kart ve alt bileşenlerinin tasarımından, ikinci kısmında ise matematik modelinin oluşturulmasından bahsedilmiştir.

### 2.1. Donanım Tasarımı

Piyasada bulunan birçok nano- dörtpervaneli oldukça küçük bir elektronik uçuş kontrol kartına (UKK) ve dörtpervanelinin hafif olması ve uçabilmesi amacıyla plastik gövdeye sahiptir. Fakat bu tip dronlar programlanabilir özellikte değildirler ve bunlara harici sensör eklenemez. Dolayısıyla bu dronlar farklı amaçlara göre yazılımsal veya donanımsal olarak geliştirilemez [1]. Bunun yanı sıra programlanabilir özellikte olan bazı nano- dörtpervaneliler de mevcuttur [2] ancak bunlar görüntü işleme için bir yer istasyonuna ihtiyaç duymaktadır.

Bu proje kapsamında görüntü işleme için bir yer istasyonuna ihtiyaç duymayan, çift mikrodeneleyiciye sahip, üzerinde gerekli minimum sensörleri barındıran ve harici donanım eklenebilen, tamamen programlanabilir özgün bir nano-dörtpervaneli tasarımı ortaya konmuştur. Tasarlanan dörtpervanelide [2]'de olduğu gibi uçuş kontrol kartı aynı zamanda gövdeyi oluşturmaktadır. Tasarlanan nano- dörtpervanelinin son hali tüm bileşenleriyle birlikte Şekil 1'de görülmektedir.



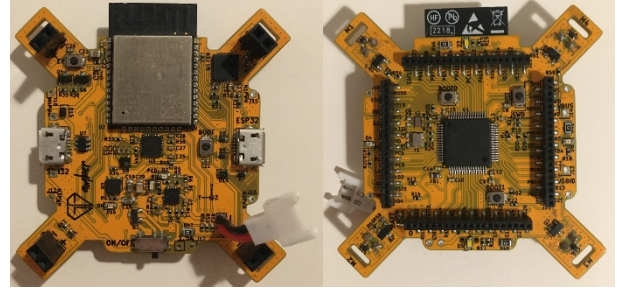
Şekil 1: Tasarlanan nano-dörtpervaneli.

Şekil 1'de görüldüğü üzere dörtpervaneli, elektronik uçuş kontrol kartı (UKK), motor tutucu kollar, motorlar, pervaneler ve bataryadan oluşmaktadır.

#### 2.1.1. Uçuş Kontrol Kartı (UKK)

Uçuş kontrol kartı bu tasarımın en önemli ve özgün olan bileşenidir. Kartın tasarımında gerekli olan bileşenler hassas bir şekilde araştırılmış, belirlenen alternatifler arasında karşılaştırma yapılmış ve sonuç olarak maliyet ve performans açısından en uygun bileşenler seçilmiştir. Gerekli devre elemanları seçildikten sonra devre ve kart tasarımı KiCad programı kullanılarak yapılmıştır. Oluşturulan devrenin kompleks yapıda olması ve çok küçük bir alana sığdırılması gerektiğinden devre kartı dört katmanlı olarak tasarlanmıştır. Devre tasarımında mikrodeneleyici ve sensörlerin birbiriyle

sorunsuz haberleşebilmesi, kartın herhangi bir bölgesinde fazla ısı oluşmaması, gereksiz manyetik alan oluşmaması, güç iletim ağında (GİA) herhangi bir darboğaz olmayıp motorlara gerekli akımın iletebilmesi ve benzeri birçok konu göz önünde bulundurularak kartta olabilecek muhtemel problemler minimize edilmeye çalışılmıştır. Şekil 2'de uçuş kontrol kartı gösterilmektedir.



Şekil 2: Uçuş kontrol kartı tasarımı.

Kontrol kartı devre tasarımında birçok devre elemanı bulunmaktadır. Fakat bunların çoğu ana elemanların düzgün çalışmasını sağlamak için gerekli olan pasif devre elemanlarıdır. Uçuş kontrol kartlarındaki asıl önemli olan bileşenler mikrodeneleyiciler ve sensörlerdir. Bu tasarımda kullanılan bazı önemli bileşenler aşağıda sırası ile belirtilmiştir.

**STM32F446:** Bu mikrodeneleyici ST Microelectronics firmasının ürettiği, ARM Cortex-M4 mimarisine sahip, 180MHz işlemci hızı olan bir mikrodeneleyicidir. Bu projede kontrol algoritması bu mikrodeneleyiciye gömülmüştür. ESP32 ile UART üzerinden, IMU ve barometre ile de I2C veri yolu üzerinden haberleşmektedir. ESP32'den gelen kontrol komutları STM32'deki kontrol algoritmasında işlenerek motorlar için gerekli PWM sinyalleri üretilmektedir. Üretilen bu PWM sinyalleri de yine STM32'ye bağlı olan motor sürücü MOSFET'lere gönderilerek motorların hızları ayarlanmaktadır.

**ESP32WROOM:** Bu mikrodeneleyici ESPRESSIF firmasının ürettiği, Xtensa mimarisi kullanan, 240MHz hızında çift çekirdekli işlemciye sahip bir mikrodeneleyicidir. İşlemci hızı daha yüksek olmasından dolayı görüntü işleme algoritması bu mikrodeneleyiciye gömülmüştür. Manuel moda Bluetooth üzerinden bağlı olduğu bir Playstation kumandasından kontrol komutlarını almaktadır. Otonom moda ise bu komutlar görüntü işleme algoritması ile üretilmektedir. Üretilen bu komutlar UART üzerinden STM32 mikrodeneleyicisine gönderilmektedir.

**MPU6050:** Bu sensör Invensense firmasının ürettiği bir ataletsel ölçü ünitesidir (IMU). İçerisinde üç eksen ivme ölçer ve üç eksen dönüölçer bulundurmaktadır. Bu sensörde dahili dijital hareket işlemcisi bulunmaktadır fakat kontrol algoritmasında kullanılan açı bilgisi Tümler Filtre (TF) kullanılarak elde edilmiştir.

**LPS22DF:** Bu sensör ST Microelectronics firmasının ürettiği bir barometre sensördür. 260 ile 1260hPa arasında basınç ölçebilme kapasitesine sahiptir. Sensörden gelen basınç verisi yükseklik değerine çevrilerek dörtpervanelinin yükseklik kontrolünde kullanılmaktadır.

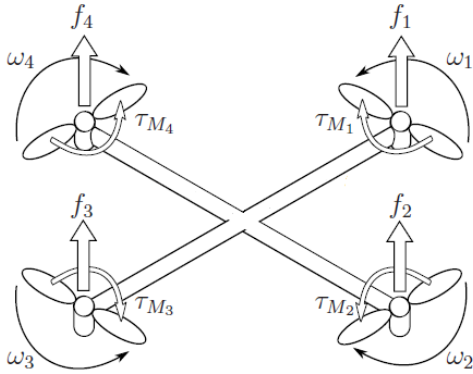
### 2.1.2. Diğer Bileşenler

Dörtpervelinin kolları hariç diğer bileşenleri hazır olarak alınmıştır. Hazır alınan bileşenler için yüksek akım kapasiteli 3.7v Lipo batarya, yüksek tork değerine sahip 17000kv çekirdeksiz motor ve 45mm çapında iki bıçaklı pervaneler tercih edilmiştir. Dörtpervelinin kolları SolidWorks programında tasarlanarak 3B yazıcıda basılmak suretiyle üretilmiştir.

### 2.2. Dörtpervelili Modeli

Dörtperveliler üzerinde yapılan araştırmaların oldukça yaygınlaşması sayesinde dörtpervelili modeli günümüzde çok iyi bilinen bir modeldir. Bu model analizinde genellikle Newton-Euler yöntemi veya Euler-Lagrange yöntemi kullanılmaktadır [3-6]. Bu çalışmada da dörtpervelili matematiksel modeli Newton-Euler yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur.

Şekil 3'de bir dörtpervelili üzerine etki eden motor kaynaklı kuvvet ve momentler görülmektedir. Motorların dönüş yönleri  $\omega_i$  ile gösterilirken, oluşturduğu kuvvetler  $f_i$  ve momentler  $\tau_{M_i}$  ile gösterilmektedir. Buradaki "i" motor numarasını belirtmektedir. Şekilden de görüleceği üzere bütün motorlar yukarı doğru bir kaldırma kuvveti oluşturmaktadır fakat uyguladıkları torklar farklı yönlerdedir. Aynı yönde dönen motorlar karşılıklı yerleştirilerek dörtpervelinin kendi etrafında kontrolsüz şekilde dönmesi engellenmektedir. Yatış (roll) hareketi ( $m_1$ - $m_2$ ) ve ( $m_3$ - $m_4$ ) motor çiftlerinin, yunuslama (pitch) hareketi ( $m_1$ - $m_4$ ) ve ( $m_2$ - $m_3$ ) çiftlerinin, sapma (yaw) hareketi ise ( $m_1$ - $m_3$ ) ve ( $m_2$ - $m_4$ ) çiftlerinin hızlarının birbirine zıt olarak değiştirilmesiyle sağlanmaktadır.



Şekil 3: Dörtpervelili üzerine etki eden kuvvet ve momentler.

#### 2.2.1. Kinematik Model

Dörtpervelili kinematik modeli, dörtpervelili pozisyon ve yönelimini dünya üzerinde sabit bir referans koordinat sistemine göre ifade etmek için kullanılmaktadır. Euler açıları yatış ( $\phi$ ), yunuslama ( $\theta$ ) ve sapma ( $\psi$ ), dörtpervelinin bu referans koordinat sistemine göre yönelimini belirtmek için kullanılır. Denklem 1'de Euler açıları ile dörtpervelinin sahip olduğu açılal hızlar arasındaki bağıntı verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p + q \{s(\phi)t(\theta)\} + r \{c(\phi)t(\theta)\} \\ q \{c(\phi)\} - r \{s(\phi)\} \\ q \{s(\phi)/c(\theta)\} + r \{c(\phi)/c(\theta)\} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada,  $p$ ,  $q$  ve  $r$  sırasıyla dörtpervelili üzerinde sabit olan  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerindeki dörtpervelili açılal hızlarını ifade etmektedir. Ayrıca  $s$ ,  $c$  ve  $t$  de sırasıyla  $\sin$ ,  $\cos$  ve  $\tan$  fonksiyonlarını belirtmektedir.

#### 2.2.2. Dinamik Model

Dinamik model, dörtperveliliye etki eden kuvvet ve momentlerin dörtpervelinin nasıl bir yörüngede hareket etmesine sebep olacağını gösteren denklemler bütünüdür. Dörtperveliliye etki eden bu kuvvet ve momentlerin bazıları kontrollü bazıları ise kontrolsüzdür. Kontrollü olanlar motorlar tarafından üretilen kuvvet ve momentlerken, kontrolsüz olanlar ise rüzgar, çarpma vb. etkilerin oluşturduğu kuvvet ve momentlerdir ve bunlar sistem bozucu etkisi olarak adlandırılır. Bu çalışmada tasarlanan nano-dörtpervelili iç ortamda kullanıldığı için bu bozucu etkiler gözardı edilmiş ve sistemin dinamik modelinde yalnızca kontrollü kuvvet ve momentlere yer verilmiştir. Denklem 2'de dörtpervelili yöneliminin dinamik modeli gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} bl(-\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ bl(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{p} I_{xx} + r q (I_{zz} - I_{yy}) \\ \dot{q} I_{yy} + p r (I_{xx} - I_{zz}) \\ \dot{r} I_{zz} + q p (I_{yy} - I_{xx}) \end{bmatrix}$$

Burada,  $b$ ,  $d$  ve  $l$  sırasıyla motor kuvvet sabiti, motor tork sabiti ve kol uzunluğunu,  $\Omega_i$  "i" numaralı pervane açılal hızını ve  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$  ve  $I_{zz}$  de dörtpervelinin sırasıyla  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerindeki atalet momentlerini ifade etmektedir.

#### 2.2.3. Durum Uzayı Modeli

Durum uzayı modeli, çok giriş çok çıkışlı (MIMO) sistemlerin analizi ve bu sistemler için modern kontrol yöntemlerinin uygulanabilmesine olanak sağlamaktadır. Sistemin durum vektörü  $x$  ve kontrol vektörü  $u$  aşağıdaki denklemlerde görüldüğü gibi belirlenmiştir.

$$x = [\phi \ \theta \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \psi]^T \quad (3)$$

$$u = \begin{bmatrix} bl(-\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ bl(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Oluşturulan durum uzayı modelinde durum vektörü dörtpervelinin yalnızca yatış ve yunuslama açıları ve yatış, yunuslama ve sapma açılal hızları olarak belirlenmiştir. Bu modelde durum vektöründeki her elemanın türevinin ifadesi belirlenmelidir. Yönelim kontrolünde kullanılacak olan Euler açılal hızlarının türevlerinin kontrol vektörü cinsinden lineerleştirilmiş olarak ifadesi aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{xx}} u_2 \\ \frac{1}{I_{yy}} u_3 \\ \frac{1}{I_{zz}} u_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 3. Kontrol

Tasarlanan nano-dörtpervaneli üzerinde iki farklı kontrol yöntemi uygulanmış ve bunların performansları karşılaştırılmıştır. Bu kontrol yöntemlerinden biri PID kontrol diğeri ise Durum Geribeslemeli (DG) kontrolüdür.

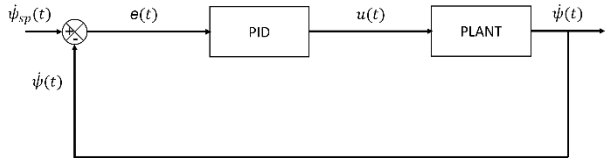
#### 3.1. PID Kontrol

Bu yöntemde referans girişi ile sistemin çıkışı arasındaki fark (hata) kontrolcü girişidir. Kontrolcü hatanın belli bir oranını, integralini ve türevini toplayıp kontrol sinyalini üretir [7]. Üretilen bu kontrol sinyali sisteme gönderilerek hatanın azalması sağlanır.

PID kontrol yöntemi tek giriş tek çıkışlı (SISO) sistemler için tasarlanmış olmasına rağmen çok giriş çok çıkışlı (MIMO) sistemlere de uygulanabilmektedir. Bu yöntemde her bir durumun kontrolü için ayrı PID kontrolcüler kullanılıp kontrolcü çıkışları belirlenen amaç doğrultusunda toplanmaktadır. Bu çalışmada da sapma, yunuslama ve yatış açıları için ayrı PID kontrolcüler tasarlanmıştır.

##### 3.1.1. Sapma (Yaw) Kontrolü

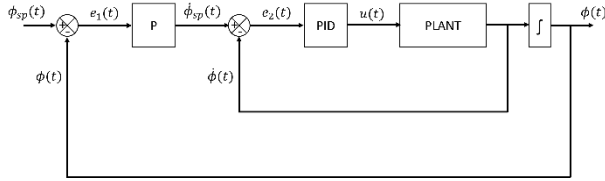
Sapma kontrolü için açıl hız kontrolü tercih edilmiştir. Bunun sebebi kontrol kumandasının açıl hız kontrolüne daha uygun olmasıdır. Tasarlanan sapma açıl hız kontrolcüsünün blok diyagramı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



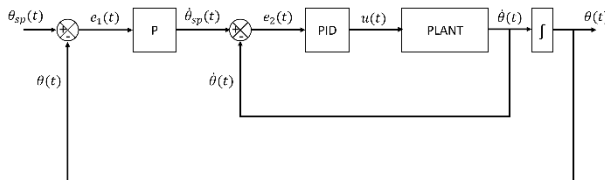
Şekil 4: Sapma PID kontrol blok diyagramı.

##### 3.1.2. Yatış (Roll) ve Yunuslama (Pitch) Kontrolü

Yatış ve yunuslama kontrolü için pozisyon kontrolü kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolcülerin blok diyagramı aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



Şekil 5: Yatış PID kontrol blok diyagramı.



Şekil 6: Yunuslama PID kontrol blok diyagramı.

Şekil 5 ve Şekil 6'da görüldüğü gibi yatış ve yunuslama açıları için katmanlı PID kontrolcüler tasarlanmıştır. Dış katmanda açı kontrolünü sağlayan bir P kontrolcü, iç katmanda ise açıl hız kontrolünü sağlayan bir PID kontrolcü

bulunmaktadır. Açı kontrolcüsü açı hatasını manipüle ederek açıl hız referans sinyaline dönüştürür. Açıl hız kontrolcüsü de bu sinyal ile sistemdeki gerçek açıl hız karşılaştırılarak elde edilen açıl hız hatasını manipüle ederek sisteme gönderilen kontrol sinyalini üretir. Çok katmanlı PID kontrolcülerde daha hızlı dinamiğe sahip olan durumlar da kontrol edildiği için kararlılık daha kolay sağlanır.

##### 3.1.3. PID Parametre Kestirimi

PID parametrelerinin bulunması için Ziegler-Nichols, Tyreus Luyben, Cohen-Coon gibi farklı yöntemler mevcuttur. Bu çalışmada Ziegler-Nichols yöntemi kullanılarak PID parametre kestirimi yapılmıştır [8].

Ziegler-Nichols yönteminin avantajı, herhangi bir modelleme gerektirmemesi ve kolay uygulanabilir olmasıdır. Bu yöntemde öncelikle I ve D katsayıları sıfırlanır ve P değeri sıfırdan başlayarak artırılır. Sistemin kararlı ve sabit osilasyona girdiği P değeri  $K_u$  ve osilasyonun periyodu  $T_u$  olarak belirlenir. Daha sonra bu değerler kullanılarak kullanılan PID yapısına göre P, I ve D parametreleri belirlenir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen parametre değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Sistem sapma ekseninde osilasyona girmediği için sapma parametreleri deneme yanılma yöntemiyle bulunmuştur.

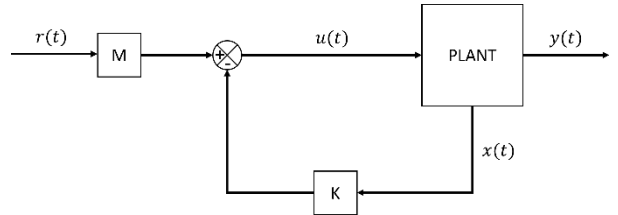
Tablo 1: Bulunan PID kontrolcü parametreleri.

	Sapma*	Yunus.	Yunus.*	Yatış	Yatış*
P	5.15	3.35	0.72	2.085	0.78
I	10.2	-	11.52	-	12.48
D	0.05	-	0.0113	-	0.0122

Tabloda '\*' ile belirtilen parametreler açıl hız, diğerleri ise açı parametreleridir.

#### 3.2. Durum Geribeslemeli Kontrol

Durum Geribeslemeli (State Feedback) kontrol yöntemi sistemin durum uzayı modeli üzerinden tasarlanan bir modern kontrol yöntemidir. Modern kontrol yöntemlerinde klasik kontrol yöntemlerinden farklı olarak tek bir kontrolcü ile aynı anda birden fazla durum kontrol edilebilir. Durum Geribeslemeli kontrol yönteminin blok diyagramı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 7: State Feedback kontrol blok diyagramı.

Burada  $r(t)$  referans giriş sinyalini,  $u(t)$  kontrol sinyalini,  $x(t)$  durum vektörünü ve  $y(t)$  de sistem çıkışını ifade etmektedir. Ayrıca  $K$  kontrol kazanç matrisini ve  $M$  de giriş sinyali normalizasyon matrisini temsil etmektedir [9].

Durum uzayı modelinin genel ifadesi, sistemin zamanla değişimini belirten ve sistemden alınan çıkışları ifade eden iki temel denklemden oluşmaktadır. Bu iki denklem aşağıda gösterilmiştir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6)$$

$$y = Cx + Du \quad (7)$$

Denklem (6) sistem durumlarının zaman içerisindeki değişimini belirtmekte ve denklem (7) sistemin çıkışlarını ifade etmektedir. Şekil 7'deki blok diyagramdan da anlaşılacağı gibi sistemin kapalı çevrim kontrol kanunu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$u = -Kx + Mr \quad (8)$$

Bu kapalı çevrim kontrol kanunu uygulandığında denklem (6) aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\dot{x} = (A - BK)x + (BM)r \quad (9)$$

$$\dot{x} = A_{CL}x + B_{CL}r \quad (10)$$

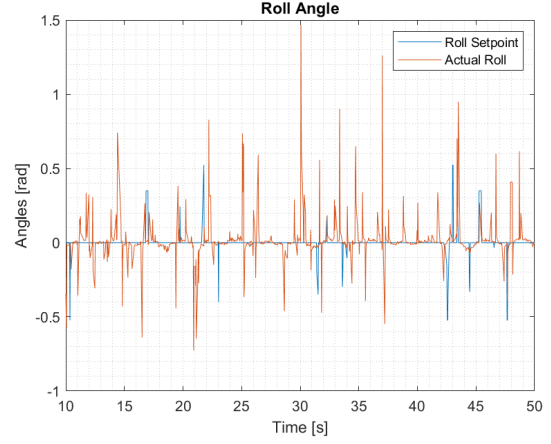
Denklem 10'daki  $A_{CL}$  ve  $B_{CL}$  sırasıyla kapalı çevrim  $A$  ve  $B$  matrislerini ifade etmektedir ve denklem (9) 'dan da anlaşılacağı gibi  $A_{CL}$  matrisi  $(A - BK)$  ve  $B_{CL}$  matrisi de  $(BM)$  olarak elde edilir. Buradaki önemli nokta sistemin dinamiklerini barındıran  $A$  matrisinin kontrol kanunu uygulanarak manipüle edilmesidir. Bu manipülasyondaki asıl hedef sistemin kutuplarının arzu edilen noktalara taşınmasıdır. Bu yüzden Durum Geribeslemeli kontrol yöntemi kutup atama (pole placement) yöntemi olarak da bilinir [10].

Bu çalışmada kullanılan nano-dörtpervaneli için Durum Geribeslemeli kontrolcü tasarımı farklı aşamalardan oluşmaktadır. Öncelikle bölüm 2'de belirtilen durum ve kontrol vektörleri kullanılarak sistemin durum uzayı modeli oluşturulmuştur. Daha sonra sistem kontrol edilebilirliği test edilmiştir. Sistem kontrol edilebilir olarak tespit edildikten sonra sistemin açık çevrim kutupları bulunmuştur. Daha sonra sistemin arzu edilen kapalı çevrim davranışına göre olması gereken baskın kutuplar tespit edilmiştir. Sistemin açık çevrim kutupları ve arzu edilen kapalı çevrim kutupları belirlendikten sonra kutup taşıma işlemini yapacak uygun  $K$  matrisi MATLAB kullanılarak tespit edilmiştir. Son olarak da sistem çıkışlarının kalıcı durumunun istenilen seviyeye getirilebilmesi için gerekli olan  $M$  matrisi yine MATLAB yardımı ile bulunmuştur.

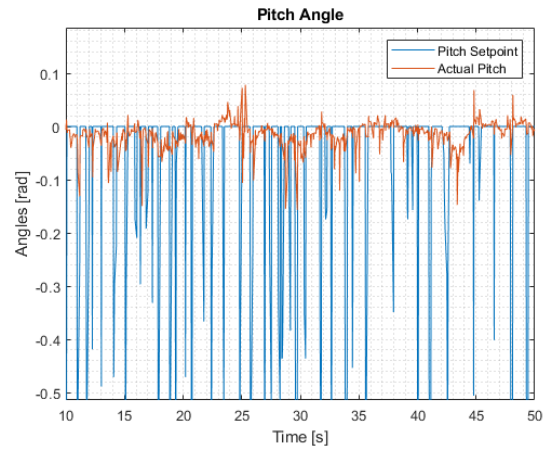
Tasarlanan kontrolcülerin mikrodenetleyicilere gömülebilmesi için önce C koduna çevrilmesi, sonra da bir derleyici ile .hex veya .bin dosyalarının oluşturulması gerekmektedir. C koduna dönüştürme işlemi MATLAB gibi bir program kullanarak otomatik olarak ya da bir bütünleşik yazılım geliştirme ortamında elle yazılarak gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada kontrol kodları STM32 mikrodenetleyicileri için tasarlanmış olan STM32 CubeIDE bütünleşik yazılım geliştirme ortamında elle yazılmış ve mikrodenetleyiciye gönderilmiştir.

#### 4. Deneysel Veriler

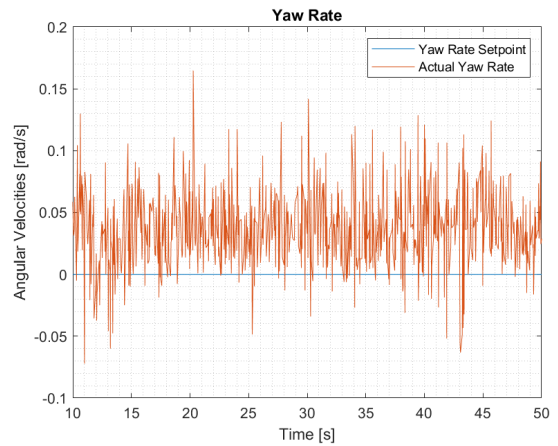
Tasarlanan PID ve Durum Geribeslemeli kontrolcüler C koduna dönüştürülüp mikrodenetleyiciye gömüldükten sonra performanslarını karşılaştırabilmek için uçuş verileri kaydedilmiştir. Veriler bir MicroSD karta kaydedilip daha sonra bilgisayar ortamına aktarılarak MATLAB ile grafikler oluşturulmuştur. Aşağıdaki ilk üç grafik dörtpervanelinin PID kontrolcü ile uçuş verilerini göstermektedir.



Şekil 8: Yatış açısı giriş çıkış grafiği (PID).

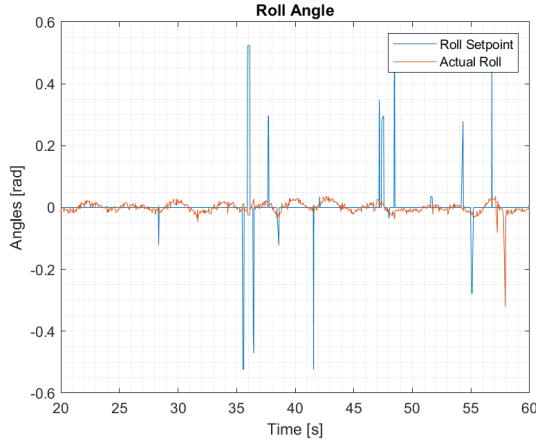


Şekil 9: Yunuslama açısı giriş çıkış grafiği (PID).

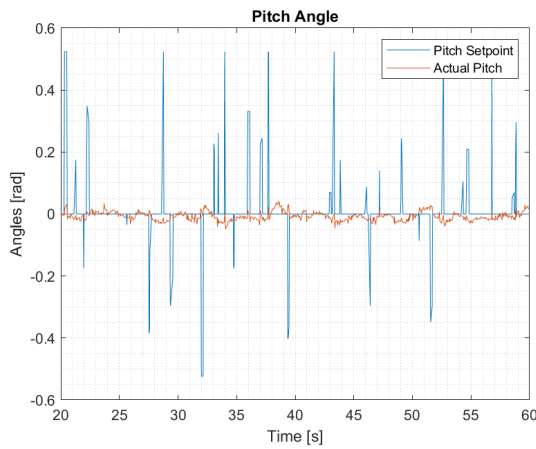


Şekil 10: Sapma açısı hızı giriş çıkış grafiği (PID).

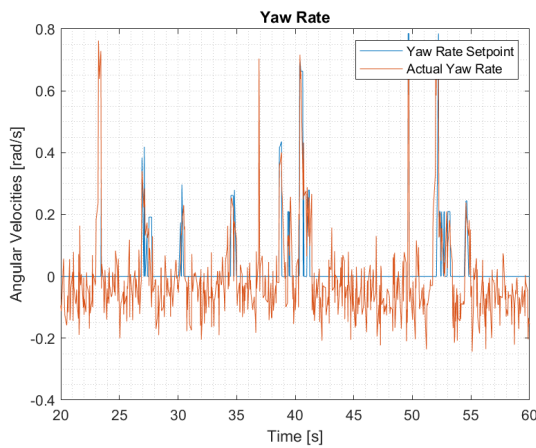
Bu grafikler dörtpervanelinin PID kontrolcü kullanılarak havada asılı kalabilme testinin sonuçlarını göstermektedir. Giriş sinyalinin (mavi renkli sinyal) sıfır olmadığı durumlarda dörtpervanelinin kararlı olmadığı durumlarda kararlılık pozisyonuna getirmek için yapılan manuel müdahaleleri göstermektedir.



Şekil 11: Yatış açısı giriş çıkış grafiği (DGK).



Şekil 12: Yunuslama açısı giriş çıkış grafiği (DGK).



Şekil 13: Sapma açısız hızı giriş çıkış grafiği (DGK).

PID kontrolde olduğu gibi, Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13'deki grafikler dörtlü pervanelinin DGK kullanılarak havada asılı kalabilme testinin sonuçlarını göstermektedir. Burada da yine aynı şekilde mavi renkli

sinyaller giriş sinyalini, turuncu renkli sinyaller de çıkış sinyalini göstermektedir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada çift mikrodüzenleyiciye sahip bir nano-dörtlü pervanelinin elektronik kart ve mekanik bileşenlerinin tasarımı, matematiksel olarak modellenmesi, iki farklı yöntem kullanılarak yönelim kontrolü için kontrolcü tasarımı ve sisteme entegrasyonu anlatılmış ve dörtlü pervanelinin bu kontrolcüler ile gösterdiği performans verileri sunulmuştur. Tasarlanan nano-dörtlü pervaneli her iki kontrolcü ile de başarılı bir şekilde uçuş gerçekleştirmiştir.

Elde edilen verilere göre her iki kontrolcünün de genel performansı birbirine yakın olmasına karşın, yatış ve yunuslama kontrolünde DGK, sapma açısız hız kontrolünde ise PID kontrolcünün daha iyi performans gösterdiği söylenebilir.

Sistemin daha kararlı çalışabilmesi için modelleme ve kontrolcü tasarımı kadar sistem durumlarının doğru şekilde ölçülmesi de önemlidir. Dolayısıyla sonraki çalışmalarda Kalman Filtresi gibi optimal durum kestirim yöntemleri kullanılabilir.

## Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleşmesine laboratuvar ve gerekli ekipmanları sağlayarak katkıda bulunan İstanbul Teknik Üniversitesi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

## Kaynakça

- [1] "Beta65S BNF Micro Whoop Quadcopter." <https://betafpv.com/products/beta65s-bnf-micro-whoop-quadcopter> (accessed Jul. 11, 2023).
- [2] "Crazyflie 2.0." <https://www.bitcraze.io/products/old-products/crazyflie-2-0/> (accessed Jul. 11, 2023).
- [3] M. A. Tofigh, M. J. Mahjoob, and M. Ayati, "Dynamic modeling and nonlinear tracking control of a novel modified quadrotor," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 28, no. 2, pp. 552–567, Jan. 2018, doi: 10.1002/rnc.3885.
- [4] G. Jithu and P. R. Jayasree, *QUADROTOR MODELLING AND CONTROL*. Kollam: IEEE, 2016.
- [5] H. C. T. E. Fernando, A. T. A. De Silva, M. D. C. De Zoysa, K. A. D. C. Dilshan, and S. R. Munasinghe, *Modelling, Simulation and Implementation of a Quadrotor UAV*. IEEE, 2013.
- [6] T. Luukkonen, "Modelling and control of quadcopter," Aalto, Aug. 2011.
- [7] G. Bo, L. Xin, Z. Hui, and W. Ling, *Quadrotor helicopter Attitude Control using cascade PID*. IEEE, 2016.
- [8] B. R. Copeland, "The Design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning," 2008.
- [9] "Introduction: State-Space Methods for Controller Design." <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction&section=ControlStateSpace#24> (accessed Jul. 11, 2023).
- [10] "Full state feedback." [https://en.wikipedia.org/wiki/Full\\_state\\_feedback](https://en.wikipedia.org/wiki/Full_state_feedback) (accessed Jul. 11, 2023).