

# Görüntü İşleme Temelli ve Sezgisel Bulanık Kontrollü Küp Uydu Yönelim Sistemi Tasarımı ve Prototip Üretimi

## Cube Satellite Attitude System Design and Prototype Production Based on Image Processing and Intuitionistic Fuzzy Control

*Onur SİLAHTAR<sup>1</sup>, Özkan ATAN<sup>1</sup>, Hasan HATAŞ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi  
onursilahtar@yyu.edu.tr  
oatan@yyu.edu.tr  
hasanhatas@yyu.edu.tr

### Özetçe

Bu çalışmada, görüntü işleme algoritmaları ve sezgisel bulanık kontrol (intuitionistic fuzzy control) (IFC) yöntemi kullanılarak servis uydusu olarak tanımlanan bir küp uydunun, hedef uydu olarak tanımlanan bir küp uyduya “yönelme (attitude) görevi tasarlanıp prototip üretimi yapılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle bir deney seti oluşturulmuş ardından temel bir servis küp uydusu prototipi tasarlanıp üretimi gerçekleştirilmiştir. Servis uydusu, deney setine monte edildikten sonra kontrol aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada servis uydusunda bulunan bir mini kamera aracılığıyla hedef uydusunun görüntü bilgileri alınıp görüntü işleme algoritmalarında değerlendirilmiştir. Hedef uydunun elde edilen konum bilgileri IFC'ye gönderilerek uçlarına reaksiyon tekerleri bağlı motorları döndürmeye yarayacak uygun (darbe genişlik modülasyonu)(pulse-width modulation)(PWM) sinyallerinin üretimi sağlanmıştır. Son olarak önerilen kontrol algoritmasının performans analizleri yapılmıştır.

### Abstract

In this study, using image processing algorithms and intuitionistic fuzzy control (IFC) method, a cube satellite, defined as a service satellite, was designed and prototyped to perform “attitude mission” with a cube satellite, defined as a target satellite. Firstly, an experimental set was created, and then a basic service cube satellite prototype was designed and produced. Firstly, an experimental set was created, and then a basic service cube satellite prototype was designed and produced. After the service satellite mounted on the experimental set, the control phase was started. The image information of the target satellite was obtained through a mini camera on the service satellite and evaluated in image processing algorithms. The position information of the target satellite was sent to the IFC to generate the appropriate PWM signals to rotate the motors connected to the reaction wheels. Finally, performance analyzes of the proposed control algorithm were made.

### 1. Giriş

Son yıllarda uzay çalışmaları alanında düşük maliyetli, kolay tasarlanabilir ve büyük uyduların yapabileceği bazı görevleri yerine getirebilmesi sebebiyle küp uydu projelerinin sayısı ve popülerliği gittikçe artmaktadır. Haberleşme, jeolojik çalışmalar, meteorolojik çalışmalar, iklimsel gözlemler, beşeri gözlemler ve askeri amaçlar doğrultusunda kullanılan küp uydular ve kontrolleri ile çalışmalar yapılmıştır [1][2]. Bu çalışmaların bir kısmı da yönelme (attitude) ve kenetlenme (docking) operasyonlarını konu almaktadır. Kenetlenme, uyduların mekanik veya elektriksel olarak birbirine bağlanarak uydu birimlerinin bir arada çalışmasını ve belirli görevleri yerine getirmesini sağlayan bir işlemdir. Ancak uyduların birlikte çalışabilmesi için fiziksel olarak birleşme diğer bir deyişle kenetlenme görevini yerine getirme zorunluluğu yoktur. Uydular, belli bir mesafeden ve belli bir açıyla birbirlerini takip ederek de istenilen görevi yerine getirebilirler. Bu amaçla yönelim işlemi uygulanabilir. Bu işlem, uydunun belirli bir hedefe doğru dönmesini ve konumunu kontrol etmesini sağlayan bir süreçtir. Yönelim, uyduyu doğru yönde hizalamak, belirli bir yöne bakmasını sağlamak veya belirli bir nesneyi izlemek için kullanılır. Yönelme ve kenetlenme operasyonlarında kullanılacak bazı kontrol yöntemleri tasarlanmıştır [3][4].

Bulanık mantık kavramının daha genelleştirilmiş bir versiyonu olan sezgisel bulanık mantık (Intuitionistic Fuzzy Logic-IFL) kavramının, Atanassov tarafından tanımlanmasıyla, gerçek hayatta birçok sisteme daha uygulanabilir ve daha işlevsel olan sezgisel bulanık mantık kontrolcülere (Intuitionistic Fuzzy Logic Controller-IFLC) geliştirilmeye başlanmıştır[5]. Sezgisel bulanık denetleyicileri tasarlarken sistemin belirsizlik derecesinin bir fonksiyon olarak tanımlanabilir olması, etkisi tam olarak formülize edilemeyen veya sisteme etkiyen parametrelerin ne olduğu tam olarak bilinmeyen karmaşık ve çok bilinmeyenli küp uydu yönelim kontrol sistemleri gibi yapılarda, gürbüz ve etkili bir denetleyici tasarlanmanın anahtarı olarak düşünülmektedir

Bu çalışmada ise görüntü işleme algoritmaları, sezgisel bulanık mantık kontrolcüsü ile birleştirilerek bir küp uydu

prototipinin yönelim kontrolü sağlanmak istenmiştir. Bunun için öncelikle servis uydusunun iki ekseninde (aşağı-yukarı, sağ-sol) hareket etmesini sağlayacak bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Ardından tasarımı ve üretimi yapılan servis uydusu, deney düzeneğine monte edilerek hedef uyduya yönelimi sağlanmaya çalışılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu bölümde öncelikle tüm sistemde kullanılan materyallerin tasarım ve üretim aşamaları kısaca sunulacak ardından görüntü işleme ve kontrol algoritmaları tanıtılacaktır.

### 2.1. Deney Düzeneği

Servis uydusunun monte edilip hareketin serbest bir şekilde gerçekleşmesini sağlayacak Şekil 1’de gösterilen “Jiroskop Deney Seti” kullanılmıştır. 2 ekseninde hareket edebilen deney setinin arka kısmında bulunan ayarlanabilir ağırlıklar kullanılarak servis uydusunun başlangıçta yere dik bir şekilde veya istenilen açıda konumlandırılması sağlanmaktadır.

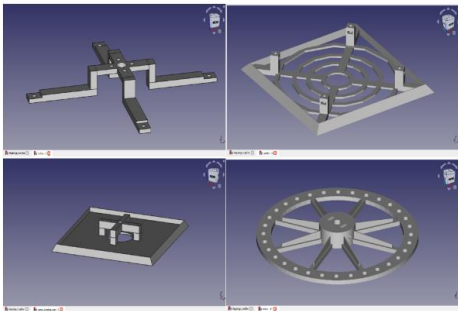


Şekil 1: Jiroskop deney seti

### 2.2. Küp Uydu Tasarımı ve Üretimi

Üretilen servis küp uydusu prototipi; küp uydusu iskeleti ve tutucu elemanlar, fırçasız DC motorlar, reaksiyon tekerleri, güç sistemi, mikrodeneleyici ve mini kamera modülü ve bağlantı kablolarından oluşmuştur. Bunun dışında genellikle gerçek bir küp uyduda kullanılan güneş pilleri, faydalı yükler, haberleşme sistemleri, manyetik çubuklar vb. donanımlar bu çalışmanın kapsamı dışındadır ve çalışmada kullanılmamıştır.

Uydu yanal yüzeyleri, uydu içindeki motorların tutucuları ve reaksiyon tekerleri, 3 boyutlu yazıcı vasıtasıyla siyah PLA filament kullanılarak üretilmiştir. Söz konusu parçaların “freecad” programı yardımıyla Şekil 2’deki gibi 3 boyutlu çizimleri yapılmıştır.

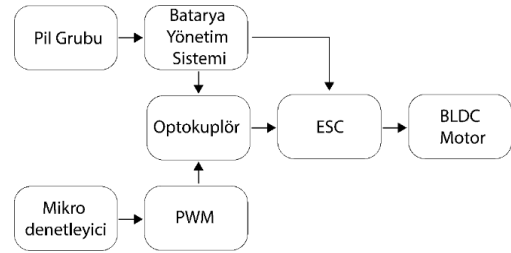


Şekil 2: Üç boyutlu çizimler

Servis uydusunun hareketlendirilmesini sağlayan 2 adet reaksiyon tekerini döndürmeye yarayacak olan elektrik motorları için “Emax” marka “RS2205” model Fırçasız DC Motorlar (Brushless DC Motor) (BLDC) tercih edilmiştir. İki adet DC motorun her birisi maksimum 12.6V ile tetiklenmiş olup motorlara verilen doluluk oranına (Duty Cycle) göre 20.000 RPM seviyelerine kadar bir dönüş hızı elde edilmiştir.

Üretilen küp uydunun güç ihtiyacı, hazır bataryalar yerine Lityum İyon (Li-on) piller ve onlara entegre güç devreleri kullanılarak karşılanmıştır. Reaksiyon tekerlerine bağlı BLDC motorların daha verimli ve elektronik anlamda birbirlerinden bağımsız çalışabilmesi için her iki motorun güç sistemleri ayrı ayrı tasarlanıp motorlara ve mikrodeneleyiciye entegre edilmiştir. Güç sistemi; Lityum İyon (Li-on) piller, Batarya Yönetim Sistemi (Battery Management System) (BMS), Optokuplör ve motor sürücüsü (ESC) elemanlarından oluşmaktadır. Çalışma kapsamında iki farklı motora bağlı iki adet reaksiyon tekeri kullanıldığından iki adet güç sistemi tasarlanmıştır. Güç sistemi ve onlara bağlı mikrodeneleyici ve motorların devre şeması Şekil 3’de gösterilmiştir.

Güç sistem şeması incelendiğinde seri bağlı pillerin oluşturduğu pil grubunun çıkışına BMS bağlandıktan sonra üretilen voltaj optokuplör ve ESC elemanlarına aktarılmıştır. Ayrıca mikrodeneleyiciden elde edilen PWM sinyalleri, optokuplör devresinin diğer girişini oluşturarak mikrodeneleyici ve BMS’nin elektriksel bağlantılarının yalıtımı sağlanmıştır. Böylece ESC’lerin, BMS’den alınan besleme gerilimleri ve mikrodeneleyiciden alınan pwm sinyalleri ayrı kanallar ile taşınmış olmuştur. ESC’de işlenen sinyaller BLDC motorlara verilerek mekanik hareket elde edilmiştir.



Şekil 3: Güç sistemi şeması

#### 2.1.1 Güç Sistemi Devre Elemanları

Güç sisteminde kullanılan elemanların özelliği aşağıdaki gibi özetlenebilir.

**Li-on Piller:** Her biri “S” yani 3.7V değerinde gerilim üretebilecek şarj edilebilir Li-on piller kullanılmıştır. Her bir güç devresi için 3S, toplamda 6S değerinde gerilim üretebilecek 6 adet pil çalışma kapsamında kullanılmıştır.

**BMS:** Esasında bir batarya koruma kartı olarak bilinen bu entegreler her bir kaynaktan bir tane kullanılacak şekilde 3S’lik seri pil bağlantısının çıkışına bağlanmıştır. Başlıca görevi, terminal noktalarına bağlanan pillerin uzun ömürlü kullanımını sağlamak ve devrede oluşabilecek aşırı akım ve kısa devre durumlarında devreyi kesip devre elemanlarını koruyacak bir anahtar gibi davranmak olan BMS’lerden çalışma kapsamında her biri 3S-40A kapasiteli 2 güç sisteminde çalıştırılmak üzere 2 adet kullanılmıştır.

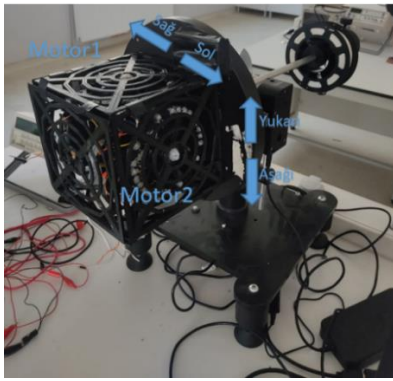
**Optokuplör Devresi:** Birbiri ile optik bağlantılı ışın verici ve fotohıcından oluşan, elektriksel bir bağlantı olmadan düşük gerilimlerle, yüksek gerilim ve akımları kontrol edebilen ve iki

devrenin elektriksel izolasyonunu (yalıtılmasını) sağlayan bir devre elemanıdır. Başta mikrodenetleyici ve diğer elemanları korumak için her bir güç devresi için bir, toplamda iki adet optokuplör kullanılmıştır.

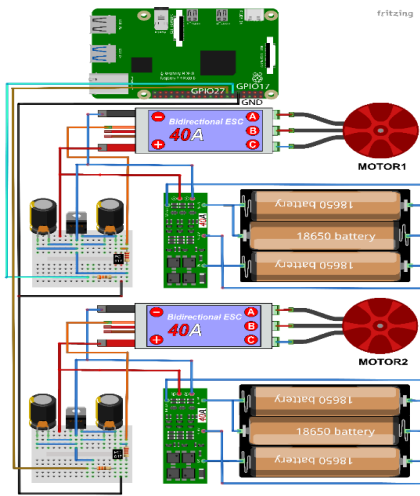
**Motor Sürücülere:** BLDC motorların sürülebilmesi için motor sürücülerine ihtiyaç vardır. Fırçasız DC motorların iki yönde sürülebilmesi için “Çift Yönlü Elektronik Hız Kontrollüsü (Bidirectional Electronic Speed Controller) (ESC)” kartları kullanılmıştır. 40A akım taşıma kapasitesine sahip, ESC’lerden her bir güç devresi için bir, toplamda iki adet kullanılmıştır.

Giriş-çıkış sinyallerinin üretilmesi ve ESC’ler yardımıyla motorlara verilmesi, motorlardan alınan veriler ışığında kontrol işleminin yapılabilmesi için mini bilgisayar olarak da bilinen “Raspberrypi 4B” mikrodenetleyici kartı kullanılmıştır. Bu kart sahip olduğu birçok özelliğin yanında dahili wifi modülü özelliği ve kolay entegre edilebilir kamera modülü girişi sayesinde küp uyduya uzaktan bağlanma ve kolaylıkla kamera kullanımına olanak sağlamıştır. Ayrıca Raspberrypi kartına entegre “Sunny” marka mini kamera kullanılarak görüntü alma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Servis uydusunun tüm elektriksel ve mekanik bağlantıları yapıldıktan sonra Şekil 4.’deki gibi Jiroskop deney setine montajı yapılarak yönelim hareketini yapmaya hazır hale getirilmiştir. Ayrıca sistemin tüm elektriksel bağlantı şeması Şekil 5’de verildiği gibidir



Şekil 4: Yönelim sistemi deney düzeneği



Şekil 5: Tüm sistemin elektriksel bağlantı şeması

### 2.3. Yazılım Ara Yüzü

Yönelim sisteminin tüm arayüzü MATLAB/Simulink programında oluşturulmuş olup, veri-alışverişi, kontrol ve görüntüleme işlemleri aynı program üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca MATLAB/Simulink kütüphanesi içinde bulunan bulanık mantık işlemleri ve görüntü işlemeye imkan veren araçlar sayesinde tüm sistem tek bir yazılım ara yüzü içerisinde modellenip gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilmiştir.

### 2.4. Motor Deneyleri

Kontrolcü tasarımı öncesinde motorların, verilen PWM değerlerine göre hareketleri ve platformu döndürme yetenekleri gözlenmiştir. Bu deneylerden alınan sonuçlara göre kontrolcü tasarımı yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan BLDC motorların teorik olarak çalışma frekansı 50Hz olup bu frekansta minimum hızda dönmesi için 1 ms yani %5, maksimum hızda dönebilmesi için ise 2ms yani %10 doluluk oranında (duty cycle) çalıştırılması gerekmektedir. Ayrıca BLDC motorlar ilk çalıştırıldığında sargılarının indüklenmesi için bir “denge” doluluk oranında çalıştırılmalıdır. Ardından doluluk oranı değeri artırılıp azaltılarak motorlar istenen hızda çalıştırılabilir. Bu denge aralığının, kullanılan ESC’den dolayı %7.11-%7.19 olduğu görülmüştür. Ayrıca %7.19-%10 doluluk oranı arasında aksiyonda hızlanır. Örnekleme gerekirse motorlar, %6 doluluk oranında %7 doluluk oranına göre daha hızlı döner. Şekil 4’de tayin edilen motor ve platform hareket yönleri de göz önüne alınarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- i. Motor1 için: PWM > %7.19 olduğunda motorun saat yönünün tersine döndüğü, platformun ise sağa doğru hareket ettiği görülmüştür. PWM < %7.11 olduğunda ise motorun saat yönünde döndüğü, platformun ise sola doğru hareket ettiği görülmüştür.
- ii. Motor2 için: PWM > %7.19 olduğunda motorun saat yönünde döndüğü, platformun ise aşağıya doğru hareket ettiği görülmüştür. PWM < %7.11 olduğunda ise motorun saatin tersi yönünde döndüğü, platformun ise yukarıya doğru hareket ettiği görülmüştür.
- iii. Burada her iki motorun özdeş olmasına rağmen örneğin PWM > %7.19 olduğunda motorların farklı yönlerde dönmesinin sebebi tamamen ESC-motor arasındaki bağlantı yapılırken 3 adet kablunun farklı bağlantı sıralamasıyla yapıldığı ile ilgilidir

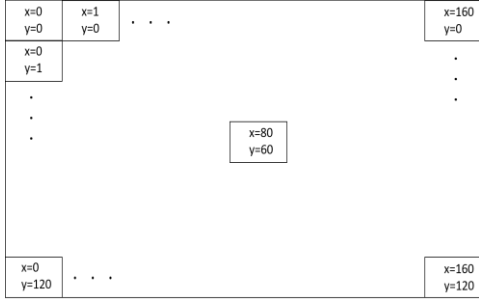
### 2.5. Görüntü İşleme Algoritmasının Tasarımı

Bu çalışmada, küp uydunun ön yüzeyinin ortasına entegre edilmiş mini kamera ile görüntüler alınarak mikrodenetleyiciye aktarılır. Alınan görüntüler aslında 3 boyutlu olsa da kamera tarafından iki boyutlu olarak algılanır. Bundan dolayı servis uydusu tarafından takip edilecek hedef uydusunun, 3 boyutlu bir küp yerine 15cmx15cm boyutlarında düzgün kesilmiş bir kare olması yönelim hareketini sağlamak için yeterli olacaktır.

Servis uydusu, hedef uydusu olarak taklit edilen mavi renkli bir kare düzlemin rengini tespit edip görüntüdeki renklerin orta noktasını bulmaya çalışarak yönelim hareketi yapmaktadır. Kameranın gördüğü görüntüdeki mavi renkli pikseller tespit edildikten sonra bu piksellerin orta noktasının yatay ve dikey düzlemdeki koordinatlarının, çıkış bilgisi olarak elde edilebileceği bir algoritma hazırlanmıştır. Elde edilen çıkış

bilgisi, kontrolcü için bir giriş bilgisi olacak ve bu bilgiye göre iki motoru hareketlendirecek PWM sinyalleri üretilerek servis uydusunun sürekli olarak bahsedilen orta noktayı bulmaya çalışması ve bu noktanın görüntünün tam olarak odağında tutulmaya çalışması kontrol mekanizmasının temelini oluşturmaktadır.

Kullanılan mini kameradan RGB formatında 160x120 piksel boyutunda görüntü alınacaktır. Bunun anlamı, Şekil 6'da görüldüğü gibi kameranın gördüğü alanın  $x=y=0$  pikselinden başlayarak aşağı doğru gidildikçe  $y$  koordinat değerinin 120'e kadar artması sola gidildikçe de  $x$  koordinat değerinin 160'a kadar artmasıdır. Ayrıca görüntünün tam orta noktasının koordinat değerinin ise (80,60) olduğu görülmektedir.



Şekil 6: Görülen koordinat değerleri.

Şekil 4'deki hareket yönleri baz alınarak motorlara verilen PWM değerlerine göre dönme ve döndürme yönleriyle ilgili bütün durumlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Motorların dönme ve döndürme yönleri

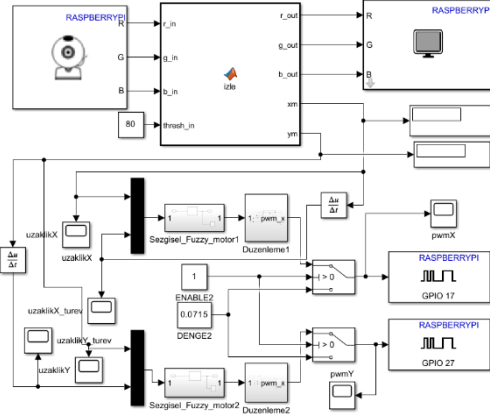
PWM	Motor1 Dönüş Yönü	Motor2 Dönüş Yönü	Motor1'in Servis Uydusuna Etkisi	Motor2'nin Servis Uydusuna Etkisi
> %7.19	Saat yönü tersi	Saat yönü	Sağa	Aşağıya
< %7.11	Saat yönü	Saat yönü tersi	Sola	Yukarıya

## 2.6. Sezgisel Bulanık Kontrolcü Tasarımı

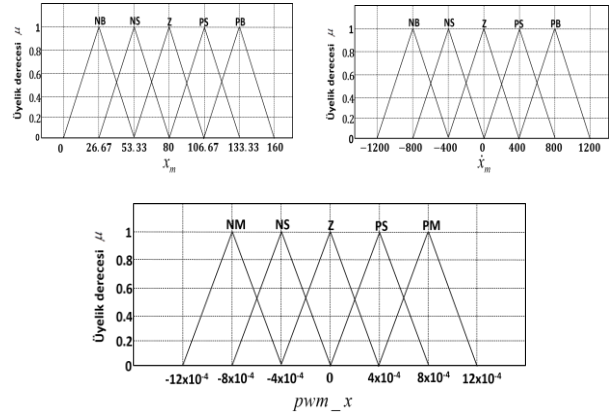
Görüntü işleme algoritmasından alınan  $x_m$  ve  $y_m$  yatay ve düşey konum bilgilerinin türevleri alındıktan sonra her bir ikili, bir bulanık kontrol bloğuna giriş olarak verilecektir. Böylece her bir motor, bir bulanık kontrol bloğu ile kontrol edilecektir. Çıktılardan ise  $pwm_x$  ve  $pwm_y$  reel(crisp) değerler elde edilecektir. Tüm sistemin blok diyagramı Şekil 7'de verilmiştir. Kontrol bloklarında gerekli PWM sinyalleri elde edildikten sonra sinyaller, "Düzenleme1" ve "Düzenleme2" bloklarına ve ardından "switch" bloklarına gönderilerek sırasıyla hız sınırlandırma ve anahtarlama işlemleri gerçekleştirilir. Sınırlandırma işleminde, motorların aşırı hızlanmasını engellemek için maksimum ve minimum PWM değerleri arasında çalışması sağlanır. Anahtarlama işleminde ise simülasyonun başlangıç aşamasında motorların denge noktasında çalışması sağlanır. Ya da simülasyonun

herhangi bir aşamasında motorların denge PWM'inde çalıştırılmak istendiği durumlarda kullanılır.

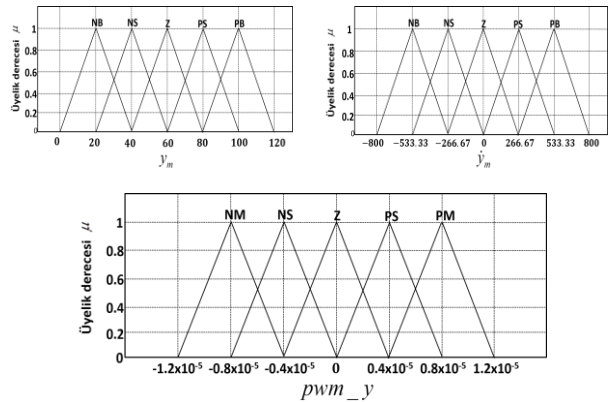
"Sezgisel\_Fuzzy\_motor1" ve "Sezgisel\_Fuzzy\_motor2" kontrol blokları içinde sırasıyla bulanıklaştırma (fuzzification), çıkarım (inference), birleştirme (aggregation) ve durulaştırma (defuzzification) işlemleri yapılacaktır. Burada her bir giriş ve çıkış için 5'er adet üçgensel bulanık küme Şekil 8-9'daki gibi tanımlanmıştır. Bu kümeler, Negatif Büyük (NB), Negatif Küçük (NS), Sıfır (Z), Pozitif Küçük (PS), Pozitif Büyük (PB) şeklinde tanımlanmıştır.



Şekil 7: Tüm sistem blok diyagramı



Şekil 8: Motor1 için kullanılan bulanık kümeler



Şekil 9: Motor2 için kullanılan bulanık kümeler

Sezgisel bulanıklaştırma sonucunda girişlerin üyelik dereceleri ( $\mu_A(x)$ ) ile birlikte üye olmama dereceleri de ( $\eta_A(x)$ ) bulunur. Bunun için Eşitlik 1’de verilen “Sugeno Generatör” [6] denklemi kullanılmıştır. Burada belirtilen aralıklarda tanımlanan “ $\lambda$ ” katsayısı, sugeno katsayısı olarak bilinir ve bu çalışmada  $\lambda = 0.07$  olarak alınmıştır.

$$\eta_A(x) = \frac{1 - \mu_A(x)}{1 + \lambda \mu_A(x)}, \quad \lambda \in (-1, \infty) \quad (1)$$

Bulanıklaştırma sonucu elde edilen ve “sezgisel bulanık çiftler (intuitionistic fuzzy pairs)” olarak adlandırılan ( $\mu_A(x), \eta_A(x)$ ) parametreleri, çıkarım işlemine tabi tutulur. Bunun için öncelikle Tablo 2’de verilen kural tabanı (rule base) kullanılmıştır. Ardından kesişim (intersection) ve implikasyon (implication) işlemleri için “Mamdani intersection and implication” [7] yöntemleri kullanılmıştır.

Tablo 2: Sezgisel kural tablosu

$pwm\_x / pwm\_y$	$\dot{x}_m / \dot{y}_m$				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
	NS	NB	NS	NS	Z
Z		NB	NS	Z	PS
	PS	NS	Z	PS	PS
PB		Z	PS	PB	PB

Herhangi bir kural tabanını aşağıdaki gibi yazalım

$$R_j: \text{If } x_m \text{ is } A_j \text{ and } \dot{x}_m \text{ is } B_j, \text{ then } (pwm\_x) \text{ is } C_j, \quad j = 1, 2, \dots, 25 \quad (2)$$

Bir kural tabanı için kesişim işlemi;

$$(\alpha_j, \beta_j) = (\mu_{A_j \cap B_j}, \eta_{A_j \cap B_j}) = \min(\mu_{A_j}(x_m), \mu_{B_j}(\dot{x}_m)), \max(\eta_{A_j}(x_m), \eta_{B_j}(\dot{x}_m))) \quad (3)$$

Bir kural tabanı için implikasyon işlemi;

$$R_{M_j}(x_m, \dot{x}_m, pwm\_x) = (\min\{\alpha_j, \mu_{C_j}(pwm\_x)\}, \dots, \max\{\beta_j, \eta_{C_j}(pwm\_x)\}) = \{D_{\mu_j}, D_{\eta_j}\} \quad (4)$$

şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çıkarım işlemi sonucu elde edilen bulanık sayıların her biri ayrı ayrı birleştirme işlemine tabi tutulur. Üyelik fonksiyonlarından ve üye olmama fonksiyonlarından gelen bulanık sayılar, sırasıyla Eşitlik 5’deki gibi “max-min” yöntemiyle birleştirilmiştir [8].

$$\mu_{C_j}(pwm\_x) = \max(D_{\mu_1}, D_{\mu_2}, \dots, D_{\mu_{25}}) \quad (5)$$

$$\eta_{C_j}(pwm\_x) = \min(D_{\eta_1}, D_{\eta_2}, \dots, D_{\eta_{25}})$$

Ayrıca  $\mu_{C_j}(pwm\_x)$  ve  $\eta_{C_j}(pwm\_x)$  bulanık sayıları kullanılarak belirsizlik fonksiyonu  $\pi_{C_j}(pwm\_x)$  aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\pi_{C_j}(pwm\_x) = 1 - \mu_{C_j}(pwm\_x) - \eta_{C_j}(pwm\_x) \quad (6)$$

Birleştirme sonucu elde edilen fonksiyonlar, son olarak Eşitlik 7 ve Eşitlik 8’de gösterildiği gibi sezgisel bulanık durulaştırma işlemi [9] kullanılarak reel değerlere dönüştürülüp sezgisel bulanık kontrol işlemi tamamlanmış olur. Yukarıda “Sezgisel\_Fuzzy\_motor1” kontrolcü bloğu için örneklendirilen aşamalarındaki tüm işlemler “Sezgisel\_Fuzzy\_motor2” kontrolcü bloğu için de yapılmıştır.

$$pwm\_x = \frac{\int pwm\_x \cdot ((1 - \pi_{C_j}(pwm\_x)) \mu_{C_j}(pwm\_x) + \dots)}{\int ((1 - \pi_{C_j}(pwm\_x)) \mu_{C_j}(pwm\_x) + \dots)} \quad (7)$$

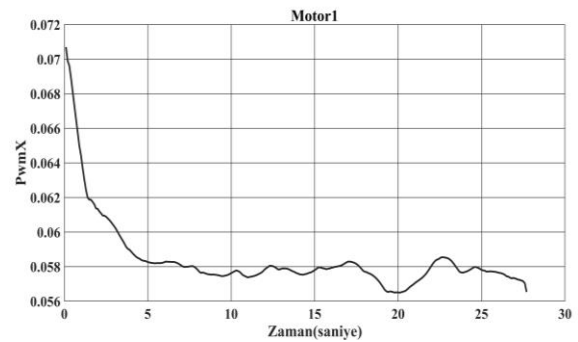
$$\dots \mu_{C_j}(pwm\_x)(pwm\_x) \cdot d(pwm\_x) \\ \dots \mu_{C_j}(pwm\_x)(pwm\_x) \cdot d(pwm\_x)$$

$$pwm\_y = \frac{\int pwm\_y \cdot ((1 - \pi_{C_j}(pwm\_y)) \mu_{C_j}(pwm\_y) + \dots)}{\int ((1 - \pi_{C_j}(pwm\_y)) \mu_{C_j}(pwm\_y) + \dots)} \quad (8)$$

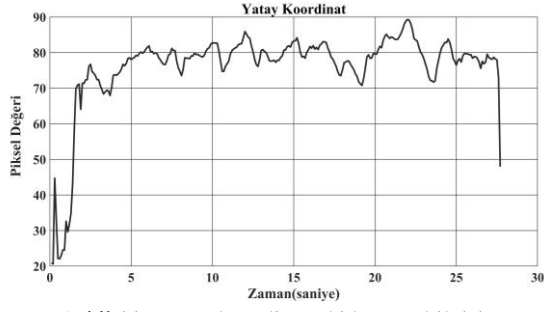
$$\dots \mu_{C_j}(pwm\_y)(pwm\_y) \cdot d(pwm\_y) \\ \dots \mu_{C_j}(pwm\_y)(pwm\_y) \cdot d(pwm\_y)$$

### 3. Bulgular ve Tartışma

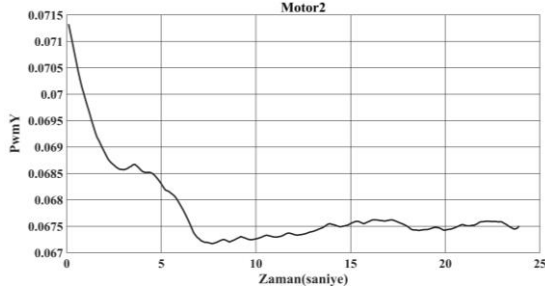
Sistem çalıştırıldığı anda (t=0) hedef uydusu, servis uydusunun sol yukarı yönünde konumlandırılarak servis uydusunun hedef uyduya yönelimi sağlanmaya çalışılmıştır. Beklenildiği gibi Motor1 ve Motor2’nin azalan PWM’e maruz kalarak sırasıyla saat yönü ve saatin tersi yönünde hızlandığı ve bir süre sonra stabil hale geçmeye çalıştığı görülmüştür. Bu esnada hedef uydusunun, mini kameranın odak noktası olan (80,60) piksel değerine gelmeye çalıştığı görülmüştür. Yaklaşık 25 saniye hareket süresi boyunca motorlarda gözlenen PWM değerleri ve hedef uydusunun orta noktasının piksel değerleri Şekil 10- 13’de gösterilmiştir.



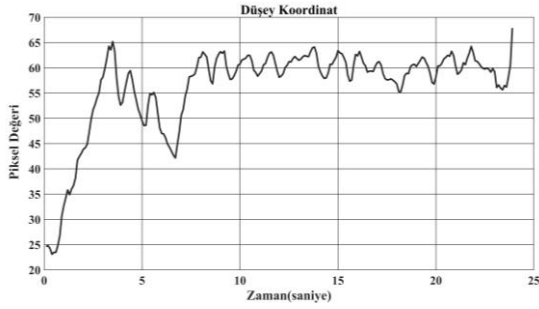
Şekil 10: Motor1’de gözlenen PWM değerleri



Şekil 11: Yatay koordinattaki konum bilgisi



Şekil 12: Motor2'de gözlenen PWM değerleri



Şekil 13: Düşey koordinattaki konum bilgisi

Deneyler sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

1. Sistemin bütünü yaklaşık 13.saniyede kararlılığa ulaştığı ve hedef uydusunun 25. saniyeye kadar sabit tutulduğu sürece sistemin kararlılığını koruduğu görülmüştür.
2. Sistemin kararlı kaldığı süre boyunca motor1'in %5.62-%6.83, motor2'nin ise %6.73-%6.76 arasında oldukça küçük bir PWM aralığında salınım yaptığı görülmüştür. Bu da motorların ve dolayısıyla servis uydusunun stabil bir performans sergilediğini ortaya koymuştur.
3. Sistemin kararlı kaldığı süre boyunca okunan piksel değerlerinin, yatayda yaklaşık 72-88 arasında düşeyde ise 56-64 arasında salınım yaptığı görülmüştür. Bu durum iyi bir sonuç olarak görülmektedir.
4. Sistemde kalıcı durum süresince çatırdama (chattering) ya da salınım oranının ihmal edilebilir seviyede olduğu ve servis uydusunun rahatlıkla stabil hale geldiği söylenebilir.

#### 4. Sonuçlar

Gerçek zamanlı deney sonuçları incelendiğinde servis uydusunun dengeli bir şekilde hedef uydusunu takip ettiği ve

servis uydusunun, hedef uydunun tam karşısına konumlandığında stabil bir şekilde kaldığı gözlenmiştir. Böylece yönelim hareketi tamamlanmış, kenetlenme hareketinin de başlangıç koşulları yerine getirilmiştir. Bu aşamadan sonra servis uydusunun üçüncü bir eksende hareketini sağlayacak uygun bir deney seti kullanıldığında çalışma kapsamında tasarlanan algoritmanın da başlangıçta kullanıp ardından geliştirilebileceği değerlendirilmektedir.

Sistemi etkileyip etkilemediği bilinmeyen ya da sisteme etkisinin olduğu ancak etkisinin ne olduğu tam olarak formülize edilemeyen iç ve dış bozucuların, sezgisel bulanık kavramında var olan "belirsizlik fonksiyonu" ile sisteme dahil edilmesinin, sistem kontrolünde başarılı sonuçlar alınmasının temel sebeplerinden biri olarak düşünülmektedir.

Ek olarak ilk defa bir jiroskop deney setinin küp uydu deney düzeneği olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca sunulan küp uydu deney seti sıfırdan tasarlanmış ve sistemin dinamik hareketini formülize eden herhangi bir dinamik model, bu çalışma kapsamında sunulmamıştır. Buna rağmen sezgisel bulanık mantık kavramının getirdiği yenilik sayesinde dinamik modeli belirsiz olan bir sistem, bahsedilen temel kapsamında kontrol edilebilmiştir. Bu aynı zamanda sezgisel bulanık mantık temelli kontrolcülerin önemini ne denli büyük olmasını göstermesiyle beraber bu çalışmanın da en önemli sonuçları arasındadır.

#### Kaynakça

- [1] J. Auret, *Design of an Aerodynamic Attitude Control System for a CubeSat Ph.D. Thesis*, Stellenbosch University, South Africa, 2012.
- [2] D. T. Gerhardt ve S. E. Palo, "Passive Magnetic Attitude Control for CubeSat Spacecraft," 24th Annual AIAA/USU Small Satellite Conference. Colorado, USA., s: 1–10, 2010.
- [3] K. Gaber, M. B. EL\_Mashade, ve G. A. A. Aziz, "Real-time implementation of a robust simplified intelligent proportional–integral control for CubeSat attitude determination system," *Control Engineering Practice*, Cilt: 98, No: 104377, s: 1-10, 2020.
- [4] O. Silahtar, F. Kutlu, ve O. Castillo, "Rendezvous and Docking Control of Satellites Using Chaos Synchronization Method with Intuitionistic Fuzzy Sliding Mode Control," in *Fuzzy Logic and Neural Networks for Hybrid Intelligent System Design*, Springer International Publishing, s: 177–197, 2023.
- [5] Atanassov, K. (1999). *Intuitionistic Fuzzy Sets*. Springer: Berlin, Germany.
- [6] T. Chaira, *Fuzzy set and its extension: The intuitionistic fuzzy set*, John Wiley and Sons, 2019.
- [7] J. Li ve Z. Gong, "SISO Intuitionistic Fuzzy Systems: IF-t-Norm, IF-R-Implication, and Universal Approximators," *IEEE Access*, Cilt: 7, s: 70265–70278, 2019
- [8] W. Jiang, B. Wei, X. Liu, X. Li, ve H. Zheng, "Intuitionistic Fuzzy Power Aggregation Operator Based on Entropy and Its Application in Decision Making," *International Journal of Intelligent Systems*, Cilt: 33, No: 1, s: 49–67, 2018.
- [9] F. Kutlu, Ö. Atan, ve O. Silahtar, "Intuitionistic fuzzy adaptive sliding mode control of nonlinear systems," *Soft Computing*, Cilt: 24, No: 1, s: 53–64, 2020.