

## SERVİS KÜP UYDUSUNUN BULANIK DENETLEYİCİ KULANILARAK HEDEF KÜP UYDUYA YÖNLENDİRİLMESİ

Onur Silahtar<sup>1\*</sup>, Hasan Hataş<sup>1</sup>, Mustafa Zabun<sup>2</sup>, Mehmet Nuri Almalı<sup>1</sup> and Özkan Atan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Türkiye

\*onursilahtar@yyu.edu.tr

**Özet** – Bu çalışmada servis uydusu olarak tanımlanan bir küp uydunun, hedef uydu olarak tanımlanan bir küp uyduyu takip etme (yönelme) görevi bulanık mantık kontrolcüsü (fuzzy logic controller) (FLC) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle bir deney seti oluşturulmuş ardından servis küp uydusu tasarlanıp üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarımda “FreeCAD” kullanılarak servis uydusunun iskeleti oluşturulmuş ve 3D yazıcı ile küp uydunun elemanları “siyah PLA filament” kullanılarak baskı alınmıştır. Bu aşamadan sonra uydunun diğer elemanları (mikrodenetleyici, motorlar, reaksiyon tekerleri, güç devreleri, mini kamera) uydu iskeletine monte edilerek kontrol aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada öncelikle görüntü işleme algoritmaları yazılarak mini kamera vasıtasıyla alınan görüntüler mikrodenetleyicide değerlendirilmek üzere gönderilmiştir. Görüntü algoritmalarının temel mantığı hareket eden kare geometriye sahip hedef uydusu olarak kabul edilen “mavi” bir düzlemin orta noktasını bulmak ve bu orta noktanın koordinat değerlerini çıkışa vermektir. Servis uydusunun hareketi entegre edildiği deney setinden ötürü 2 eksen (yatay-düşey) olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca kameranın gördüğü alan iki boyutlu olduğundan hedef uyduyu taklit edecek mavi renkli bir kare düzlem kullanılmıştır. Görüntü bloklarından alınan cismin orta noktasına ait konum bilgileri bulanık kontrolcülere aktarıldıktan sonra motorları döndürmeye yarayacak PWM sinyallerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada bulanık mantık teorisine dayalı bulanık kontrolcüler tasarlanmış ve kullanılmıştır. Servis uydusunun hedef uyduyu takip edebilmesi için iki adet motora bağlı iki reaksiyon tekerinin oluşturduğu atalet kuvveti kullanılmıştır. Servis uydusu ve bağlı olduğu platform bu kuvvetin etkisiyle hareketlendirilmiş ve hedef uyduyu takip etmesi yani yönelimi sağlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kontrolcülerin sistem üzerindeki performansı gözlenmiş avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır.

*Anahtar Kelimeler – Bulanık Kontrol, Bulanık Mantık, Görüntü İşleme, Küp Uydu, Yönelme.*

### I. GİRİŞ

Son dönemlerde uzay çalışmaları alanında küp uydu projelerinin sayısı ve popülerliği gittikçe artmaktadır. Özellikle düşük maliyetli, kolay tasarlanabilir ve büyük uyduların yapabileceği bazı görevleri yerine getirebilmesi sebebiyle her geçen gün yeni çalışmalar yapılarak tasarlanan ve üretilen küp uydular gittikçe nitelikli hale gelmektedir. 10x10x5cm, 10x10x10cm, 10x10x15, 10x10x20cm gibi birçok boyutta “küçük uydu” olarak tabir edilen, nispeten tasarımı daha kolay, hafif ve kolay fırlatılabilen uydular

tasarlanarak haberleşme, jeolojik çalışmalar, meteorolojik çalışmalar, iklimsel gözlemler (su kaynaklarının, toprak şekillerinin, iklimsel değişikliklerin vb. görüntülenmesi ve tespiti), beşeri gözlemler (nüfus yoğunluğunun, tarım ve hayvancılık alanlarının vb. gözlenmesi) ve askeri amaçlar gibi birçok alanda kullanılabilecek şekilde üretimleri yapılmış ve uzaya gönderilmiştir. İlk olarak 1999 yılında California Polytechnic State Üniversitesi (Cal Poly) ve Stanford Üniversitesinde tarafından başlatılan küp uydu çalışmaları, bugüne kadar

içerisinde üniversitelerin, özel şirketlerin ve devletlerin olduğu 100 ün üzerinde proje ile devam etmektedir. Ülkemizde de üniversiteler ve özel kuruluşlar başta olmak üzere birçok kurum tarafından da küp uydu çalışması yapılmış, tasarımı yapılmış ve uzaya gönderilmiştir.[1], [2].

Küp uyduların uzayda senkron çalışabilmesi veya büyük uydulara kenetlenebilmesi fikrine dayanan yönelme ve kenetlenme operasyonları da önem kazanır hale gelmektedir. “Stacking” [3] adı verilen kurama göre küp uydular bir ana uyduya ek olarak da çalışabilir veya bir uydu kümesi oluşturabilirler. Bu küpler birbirleriyle bağlantı kurarak veri ve komut iletişimi sağlayabilirler. Örneğin, bir uydu birimi gözleme yaparken diğer birimler iletişim ağı sağlayabilir veya farklı spektral bantlarda veri toplama yeteneklerine sahip olabilir. Stacking yöntemi, uydu tasarımında esneklik sağladığı için küp uyduların modüler bir şekilde genişletilmesini ve iyileştirilmesini kolaylaştırır [4].

Belirtilen görevlerin gerçekleştirilebilmesi için küp uyduların temel olarak iki yeteneğe sahip olması gerektiği anlaşılabilir. Bu yetenekler yönelim ve kenetlenme olarak bilinir. Uyduların uzay ortamında fiziksel olarak birleşebilmesi için “kenetlenme” görevini yapabilecek yeteneğe sahip olması gerekir. “Kenetlenme (docking)” [5],[6] olarak bilinen bu işlem; küp uyduların mekanik veya elektriksel olarak birbirine bağlanarak uydu birimlerinin bir arada çalışmasını ve belirli görevleri yerine getirmesini sağlayan bir işlemdir. Küp uyduların birlikte çalışabilmesi için fiziksel olarak birleşme diğer bir deyişle kenetlenme görevini yerine getirme zorunluluğu yoktur. Uydular belli bir mesafeden ve belli bir açıyla birbirilerini takip ederek de istenilen görevi yerine getirebilirler. Bunun için "yönelim (attitude)” [7] 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[8],[9].

Bu çalışmada ise görüntü işleme algoritmaları, bulanık mantık kontrolcüsü ile birleştirilerek bir küp uydu prototipinin yönelim kontrolü sağlanmak istenmiştir. Bunun için öncelikle bir

15x15x15 cm boyutlarında bir küp uydu iskeleti tasarlanmıştır. Ardından uydunun iki eksende serbestçe hareket etmesini sağlayacak bir deney düzeneği yine bu çalışma içerisinde tasarlanıp üretilen uydu prototipinin içine gerekli sistemler yerleştirildikten sonra söz konusu deney düzeneğine entegre edilmiştir. Deney düzeneğinin sağlamış olduğu iki eksenli hareket yeteneği sayesinde daha önceden tanımlanmış bir cisim, küp uydunun üzerindeki kamera vasıtasıyla ve içine gömülü olan kontrol algoritmaları sayesinde takip edilerek uydu yönelim görevi yerine getirilmiştir. Uydunun hareketi, içerisine entegre edilen iki adet fırçasız DC motorun ucuna bağlı reaksiyon tekerlerinin dönmesiyle oluşan atalet momenti vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilerleyen başlıklarında uygulanan yöntemin detaylarına ayrıntılı olarak yer verilerek çeşitli analiz sonuçlarına varılmıştır.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde öncelikle servis uydusu, hedef uydusu ve deney düzeneğinden oluşan bir yönelme sistemi tasarımı ve üretiminde kullanılan materyallerden bahsedilmiştir. Ardından yönelim sistemi FLC kullanılarak denetlenmiş ve gerçek zamanlı uygulama sonuçları alınmıştır.

### A. Deney Düzeneği

Çalışma kapsamında hedef uyduyu takip edecek olan ve servis uydusu olarak tanımlanan küp uydu prototipinin hareketinin yatay ve düşey şeklinde iki eksende olması planlanmıştır. Bunun için servis uydusunun monte edilip hareketin serbest bir şekilde gerçekleşmesini sağlayacak Şekil 1’de gösterilen “Jiroskop Deney Seti” kullanılmıştır.



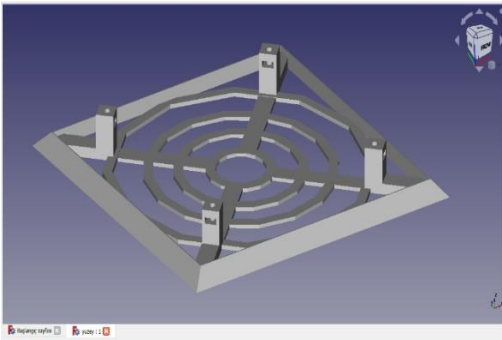
Şekil 1. Jiroskop deney seti

Bu deney seti şu şekilde kullanılmıştır: Jiroskopun uç kısmına entegre edilen servis uydusu prototipine hedef uydu yaklaştırılarak servis uydusunun sensörleri ve içine gömülecek görüntü algoritmaları sayesinde hedef uyduyu takip etmesi sağlanmıştır. Ayrıca iki eksende hareket edebilmesi için 2 adet reaksiyon tekeri kullanılmıştır. Deney setinin arka kısmında bulunan ayarlanabilir ağırlıklar kullanılarak servis uydusunun başlangıçta yere dik bir şekilde veya istenilen açıda konumlandırılması sağlanmaktadır.

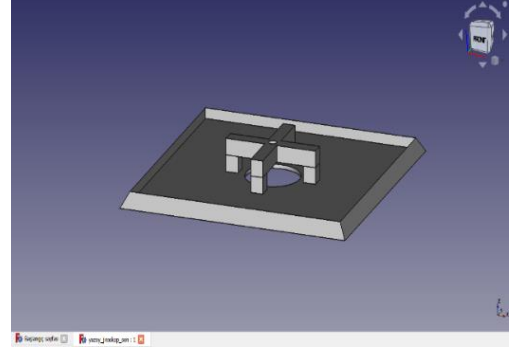
### B. Küp Uydu Prototip Tasarımı ve Üretimi

Üretilen servis küp uydu prototipi; küp uydu iskeleti ve tutucu elemanlar, fırçasız DC motorlar, reaksiyon tekerleri, güç sistemi, mikrodenetleyici 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.

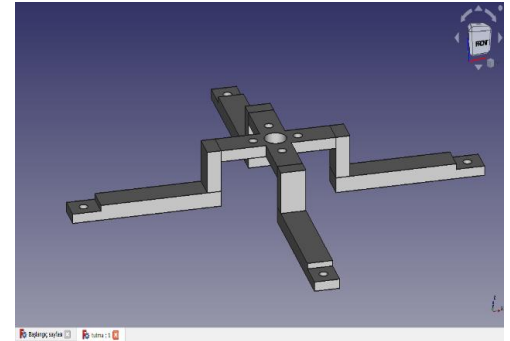
Uydu iskeleti ve uydu içindeki motorların tutucuları, 3 boyutlu yazıcı vasıtasıyla PLA filament kullanılarak üretilmiştir. Bunun için yanal yüzeyler ve motorları tutacak olan parçaların "freecad programı yardımıyla" Şekil 2-4'deki gibi bilgisayar ortamında 3 boyutlu çizimleri yapılmıştır.



Şekil 2. Dış yüzey 1



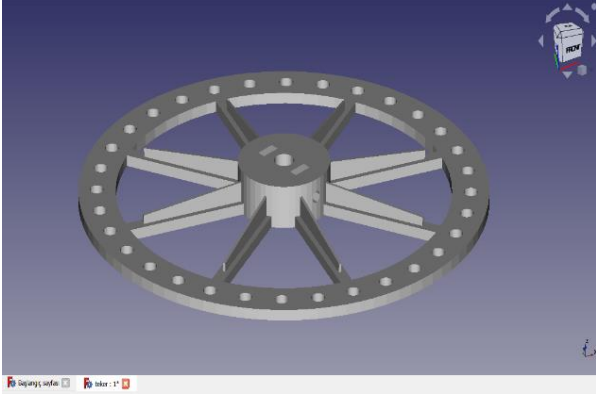
Şekil 3. Dış yüzey 2



Şekil 3. Tutucu

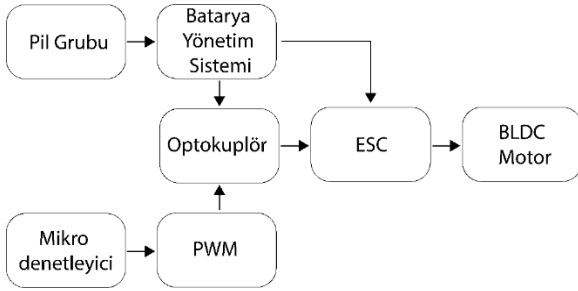
Servis uydusunun hareketlendirilmesini sağlayan reaksiyon tekerlerinin döndürmeye yarayacak olan elektrik motorları için "Emax" marka "RS2205" model Fırçasız DC Motorlar (Brushless DC Motor) (BLDC) tercih edilmiştir. İki adet DC motorun her birisi maksimum 12.6V ile tetiklenmiş olup motorlara verilen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

Küp uydunun hareketini sağlayacak olan reaksiyon tekerleri yine küp uydu iskeletinde olduğu gibi üç boyutlu yazıcı vasıtasıyla siyah PLA filament kullanılarak üretilmiştir. Şekil 4.12'de gösterildiği gibi Freecad çizim programı kullanarak 3 boyutlu tasarlanan reaksiyon tekerleri, yatay ve düşey ekseninde hareketi sağlamak üzere 2 adet üretilmiştir. Reaksiyon tekeri tasarımı yapılırken kenar yüzeylerinde birbirine eşit uzaklıkta ve eşit çapta delikler oluşturulmuştur. Bu deliklere gelişigüzel bir şekilde vidalar takılarak tekerlerin dönerken dengesiz yük oluşturması ve bu sayede dönme ataletinin biraz daha artırılması sağlanmıştır. Vidalar, somonlar yardımıyla monte edilip sıkıştırıldıktan sonra sağlamlığı arttırmak ve dönüş esnasında tekerlerden fırlamalarını engellemek amacıyla sıcak silikon ile tekerlere iyice yapıştırılmıştır.



Şekil 4. Reaksiyon tekeri 3 boyutlu çizimi

Üretilen küp uydunun güç ihtiyacı hazır bataryalar kullanmak yerine Lityum İyon (Li-on) piller ve onlara entegre güç devreleri vasıtasıyla karşılanmıştır. Reaksiyon tekerlerine bağlı fırçasız DC motorların daha verimli ve elektronik anlamda birbirlerinden bağımsız çalışabilmesi için her iki motorun güç sistemleri birbirinden bağımsız olarak tasarlanıp motorlara entegre edilmiştir. Güç sistemi; Li-on piller, Batarya Yönetim Sistemi (Battery Management System) (BMS), Optokuplör ve motor sürücüleri (ESC) elemanlarından oluşmaktadır. Çalışma kapsamında iki farklı motora bağlı iki adet reaksiyon tekeri kullanıldığı için iki adet güç sistemi tasarlanmıştır. Güç sistemi ve ona bağlı mikrodenetleyici ve motorların devre şeması Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Güç sistemi devre şeması

Güç sisteminde kullanılan elemanların bazı özellikleri aşağıdaki gibi kısaca tanımlanabilir.

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

**BMS:** Kısa adı BMS olarak bilinen ve aslında bir batarya koruma kartı görevi gören bu entegreler her bir kaynaktan bir tane kullanılacak şekilde 3S’lik seri pil bağlantısının çıkışına bağlanmıştır. Başlıca görevi, uçarına bağlanan pillerin uzun ömürlü kullanımını sağlamak ve devrede

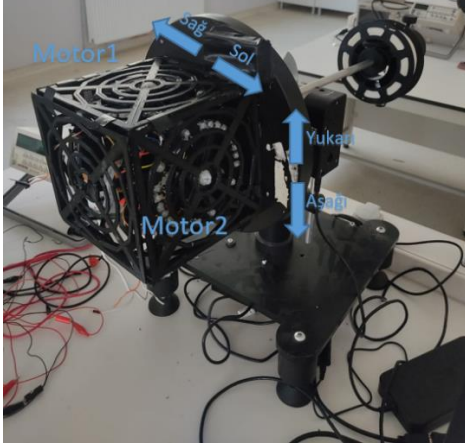
oluşabilecek aşırı akım ve kısa devre durumlarında devreyi kesip devre elemanlarını koruyacak bir anahtar gibi davranmak olan BMS’lerden çalışma kapsamında her biri 3S-40A kapasiteli 2 güç sisteminde çalıştırılmak üzere 2 adet kullanılmıştır.

**Optokuplör Devresi:** Optoizolatör, fotokuplör veya optikal izolatör olarak da bilinen optokuplörler, birbiri ile optik bağlantılı ışın verici ve fotoalıcıdan oluşan, elektriksel bir bağlantı olmadan düşük gerilimlerle, yüksek gerilim ve akımları kontrol edebilen ve iki devrenin elektriksel izolasyonunu (yalıtılmasını) sağlayan bir devre elemanıdır. Çalışma kapsamında yapılan motor testlerinde motorlardan yaklaşık 40A’ya kadar akım çekilebildiği görüldüğü için başta mikrodenetleyici ve diğer elemanları korumak için her bir güç devresi için bir, toplamda iki adet optokuplör kullanılmıştır.

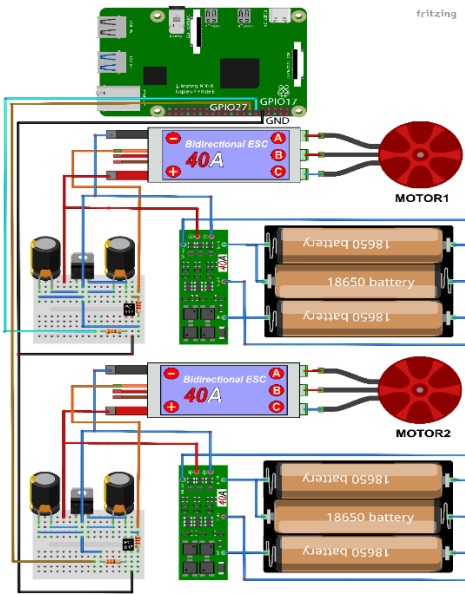
**Motor Sürücüleri:** Motorların tetiklenip çalıştırılabilmesi diğer bir deyişle sürülebilmesi için motor sürücülerine ihtiyaç vardır. Fırçasız DC motorların sürülebilmesi için bir çeşit sürücü devresi olan “Elektronik Hız Kontrolcüsü (Electronic Speed Controller) (ESC)” kartları kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 40A akım taşıma kapasitesine sahip, motorların ileri-geri çift çalışmasına imkân sağlayacak bidirectional (çift yönlü) ESC’lerden her bir güç devresi için bir, toplamda iki adet kullanılmıştır.

Küp uydusu sisteminin beyni olarak kabul edilen, giriş-çıkış sinyallerinin üretildiği ve ESC’ler yardımıyla motorlara verildiği, motorlardan alınan veriler ışığında kontrol işleminin yapıldığı mikrodenetleyici olarak “Raspberrypi 4B” kartı kullanılmıştır. Mini bir bilgisayar olarak da kabul edilen bu kart sahip olduğu birçok özelliğin yanında dahili wifi modülü özelliği ve kolay entegre edilebilir kamera modül 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 uydusu olarak nitelenen küp uydunun tüm bağlantıları yapıldıktan sonra Jiroskop deney setine montajı Şekil 5.’deki gibi montelenerek yönelim hareketini yapmaya hazır hale getirilmiştir. Ayrıca sistemin tüm elektriksel bağlantı şeması Şekil 6’da verildiği gibidir.



Şekil 5. Küp uydu sistemi



Şekil 6. Tüm sistem bağlantı şeması

Ayrıca tüm sistem kablosuz olarak wifi üzerinden kontrol edilmekte olup sistem çıkışları yine kablosuz olarak görüntülenmektedir. Sistemin dışarıyla tek kablo bağlantısı, sistemin hareketini engellemeyecek yeterince uzun olan Raspberriyi güç adaptörüdür

### C. Yazılım Ara Yüzü

Küp uydu sisteminin donanımsal olarak üretimi gerçekleştirildikten sonra yazılım aşamasına geçilmiştir. Bunun için "MATLAB 2022b /Simulink" ara yüzü kullanılarak tüm sistem simule edilmiş ve Raspberriyi üzerinden sinyal alma, gönderme, görüntüleme ve kontrol işlemleri gerçekleştirilmiştir.

MATLAB/Simulink kütüphanesine eklenebilen Raspberriyi araçları (Tools) sayesinde mikrodenetleyicinin programlanmasının kolaylıkla yapılabilmesinin yanı sıra 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 kontrol edilebilmiştir.

### D. Motor Deneyleri

Fırçasız DC motorlar, bir motor sürücüsü vasıtasıyla bir PWM sinyali yardımıyla sürülebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan motorların çalışma frekansı 50Hz olup bu frekansta minimum hızda dönmesi için teorik olarak 1 ms yani %5, maximum hızda dönebilmesi için ise 2ms yani %10 doluluk oranında (duty cycle) çalıştırılması gerekmektedir. Ayrıca BLDC'ler 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 7.2-%10 doluluk oranı arasında motorlar bir yönde hızlanırken %7.1-%5 doluluk oranı arasında aksi yönde hızlanır. Örnelemek gerekirse motor, %6 doluluk oranında %7 doluluk oranına göre daha hızlı bir motor dönme hareketi gözlenmiştir. Şekil 5'de tayin edilen motor ve platform hareket yönleri de göz önüne alınarak bazı sonuçlar elde edilmiştir.

- 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.
- 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.
- 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 kablonun farklı bağlantı sıralamasıyla yapıldığı ile ilgilidir.

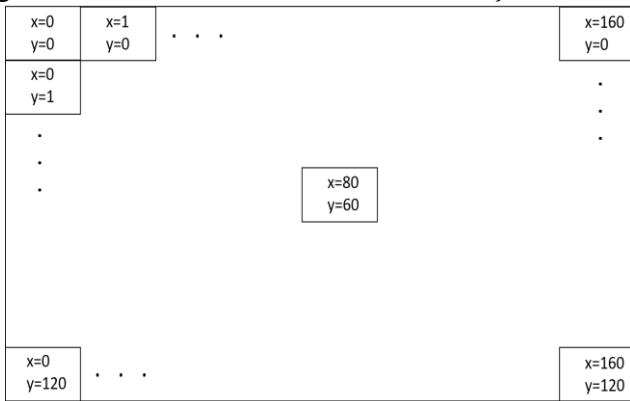
### E. Görüntü İşleme Algoritması ve ve Tasarımı

Bu çalışmada, küp uydunun ön yüzeyinin ortasına entegre edilen kamera ile görüntüler alınır. Alınan görüntüler gerçekte 3 boyutlu olsa da

kamera tarafından iki boyutta algılanır. Bu sebepten ötürü jiroskop deney setine monte edilen 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 tanımlanan kare düzlemin rengini tespit edip görüntüdeki renklerin orta noktasını bulmaya çalışarak yönelim hareketi yapmaktır. Öncelikle, takip edilecek cismin rengi “mavi” olarak belirlenip bir kare düzlem, temsili olarak hedef uydusu olarak tanımlanmıştır. Servis uydusu üzerindeki kameranın gördüğü görüntüdeki mavi renkli pikseller tespit edildikten sonra bu piksellerin orta noktasının yatay ve düşey 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 temel kontrol mekanizmasının amacıdır.

Kullanılan mini kameradan RGB formatında 160x120 piksel boyutunda görüntü alınacaktır. Bunun anlamı kameranın gördüğü alanın x-y ekseninde sırasıyla 160 ve 120 parçaya bölünmesi olarak söylenebilir. Şekil 7’de görüntü üzerinde  $x=y=0$  pikselinden başlayarak aşağı doğru gidildikçe y koordinat değerinin 120’ye kadar arttığı sola gidildikçe de x koordinat değerinin 160’a kadar arttığı görülmektedir. Ayrıca görüntünün tam orta noktasının koordinat değerinin ise (80,60) olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 5’teki hareket yönleri baz alınarak motorlara verilen PWM değerlerine göre dönme ve döndürme yönleriyle ilgili bütün durumlar Tablo 1’de verilmiştir.



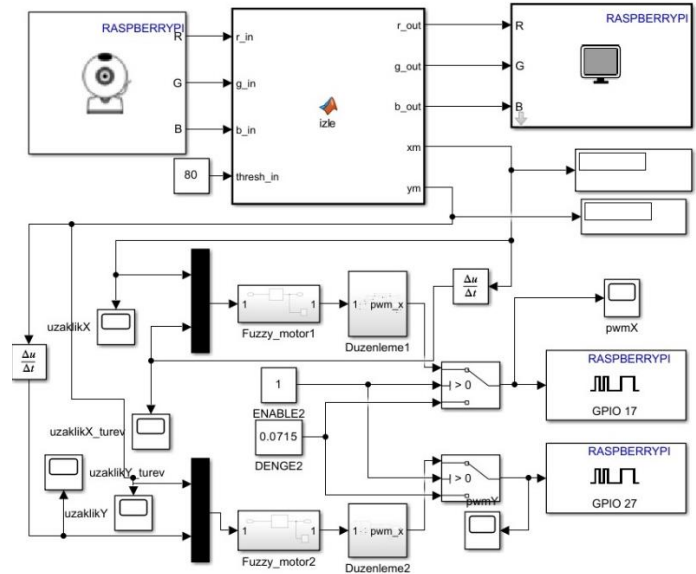
Şekil 7. Görüntü koordinat değerleri

Tablo 1. Verilen PWM – motorların dönme ve döndürme etkileri

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

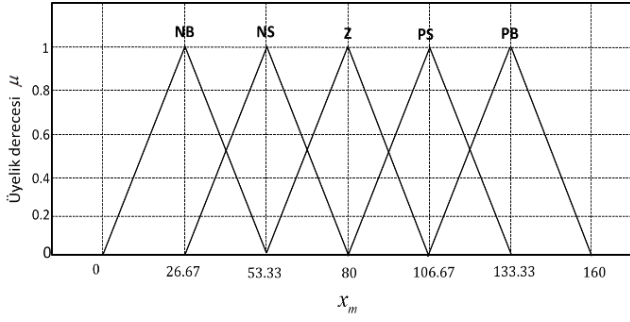
#### F. Bulanık Kontrolcü Tasarımı

Görüntü işleme algoritmasından 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. Tüm sistemin blok diyagramı Şekil 8’de verilmiştir.

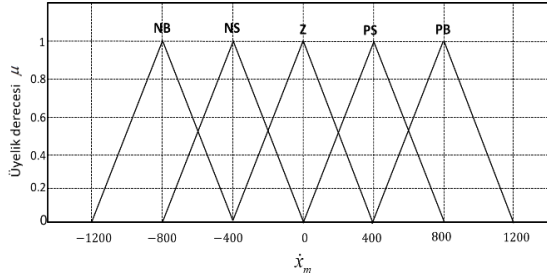


Şekil 8. Tüm sistemin MATLAB/Simulink blok diyagramı

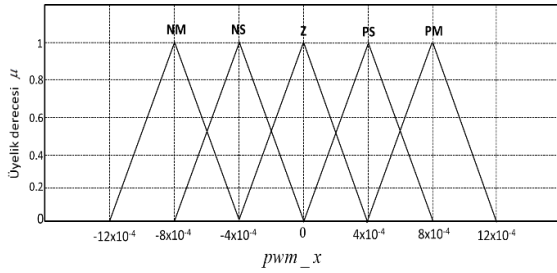
“Fuzzy\_motor1” ve “Fuzzy\_motor2” kontrol blokları içinde sırasıyla bulanıklaştırma (fuzzification), çıkarım (inference), birleştirme (aggregation) ve durulaştırma (defuzzification) işlemleri yapılacaktır. Burada her bir giriş ve çıkış için 5’er adet üçgensel bulanık küme Şekil 9-14’deki gibi tanımlanmıştır. Bu kümeler sırasıyla Negatif Büyük (NB), Negatif Küçük (NS), Sıfır (Z), Pozitif Küçük (PS), Pozitif Büyük (PB) şeklindedir.



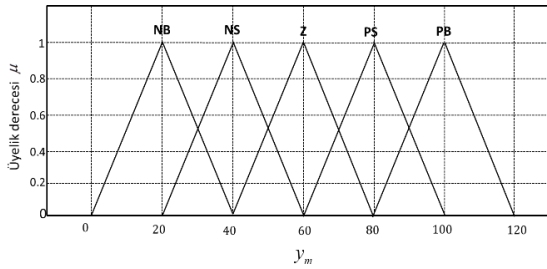
Şekil 9.  $x_m$  girişi için üyelik kümeleri



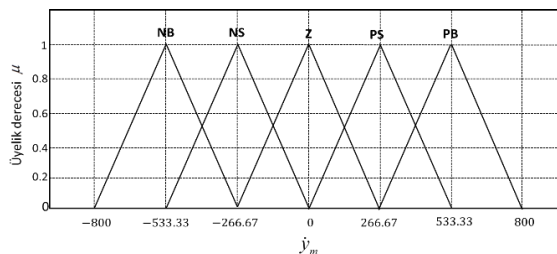
Şekil 10.  $\dot{x}_m$  girişi için üyelik kümeleri



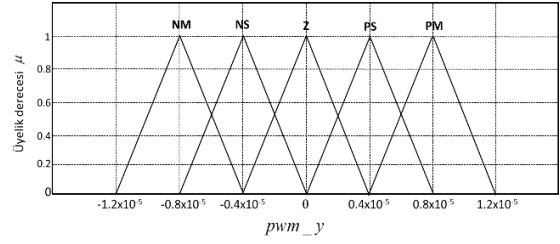
Şekil 11.  $pwm_x$  çıkışı için üyelik kümeleri



Şekil 12.  $y_m$  girişi için üyelik kümeleri



Şekil 13.  $\dot{y}_m$  girişi için üyelik kümeleri



Şekil 14.  $pwm_y$  çıkışı için üyelik kümeleri

Giriş değerleri, her bir bulanık küme için üyelik derecesi aldıktan sonra bulanıklaştırma işlemi tamamlanıp çıkarım işlemine geçilmiştir. Çıkarım işleminde öncelikle kural tabanı oluşturulmalıdır. Bunun için “if-then” yöntemi kullanılarak her bir bulanık kontrol bloğu için 25 adetlik birer kural tabanı oluşturulmuştur. Her bir giriş elemanı için 5 adet bulanık küme tanımlanması dolayısıyla  $5 \times 5 = 25$  adetlik kural tabanı tasarlanmıştır. Ayrıca her iki bulanık kontrol bloğu için de kural tabanı aynı olduğundan burada kullanılan “/” işareti bölüm değil “ya da” anlamında kullanılmıştır. 25 adetlik tüm kural tabanı Tablo.2’de listelenmiştir.

Tablo 2. Kural tabanı

$pwm_x / pwm_y$	$\dot{x}_m / \dot{y}_m$				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
NS	NB	NS	NS	Z	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	Z	PS	PS	PB
PB	Z	PS	PB	PB	PB

Kural tabanı oluşturulduktan sonra çıkarım işleminin tamamlanması için sırasıyla kesişim ve implikasyon işlemi yapılmıştır. Bunun için ise “min T-norm” [10] yöntemi kullanılmıştır. Örneğin “Fuzzy\_motor1” bloğu için herhangi bir kural tabanını aşağıdaki gibi yazalım:

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

Daha sonra tüm kural tabanları için sırasıyla kesişim ve implikasyon işlemi gerçekleştirilebilir.

$$\alpha_j = \mu_{A_j \cap B_j} = \min(\mu_{A_j}(x_m), \mu_{B_j}(\dot{x}_m)) \quad (2)$$

$$\mu_{\text{implied}} = \mu_{C_j} \cdot (pwm_{\bar{x}}) = \min(\alpha_j, \mu_{C_j}(pwm_{\bar{x}})) \quad (3)$$

Böylelikle implikasyon işlemi tamamlanıp birleştirme işlemine geçilebilir. Aynı işlemler “Fuzzy\_motor2” bloğundaki  $y_m$  ve  $\dot{y}_m$  girişleri için de yapılır. İmplikasyon işlemi tamamlandıktan sonra “Fuzzy\_motor1” ve “Fuzzy\_motor2” bloklarından  $25+25=50$  adet bulanık sayı elde edilir. Bu aşamada yine “Fuzzy\_motor1” bloğu üzerinden gidilip elde edilen 25 adet bulanık sayı birleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Bunun için Eşitlik 4’de verildiği gibi “max-aggregation” [10] yöntemi kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} \mu_{C_1}(pwm\_x) &= \mu_{C_1}(pwm\_x) \cup \mu_{C_2}(pwm\_x) \dots \\ \cup \mu_{C_{25}}(pwm\_x) &= \max(\mu_{C_1}(pwm\_x), \mu_{C_2}(pwm\_x) \dots \\ &\mu_{C_{25}}(pwm\_x)) \end{aligned} \quad (4)$$

Böylece 25 adet bulanık sayı, tek bir bulanık sayı haline gelmiştir. Aynı işlemler “Fuzzy\_motor2” bloğu için de yapılır. Bu aşamadan sonra durulaştırma işlemine geçilebilir.

Birleştirme işlemi sonuca her iki bulanık kontrol bloğu için üretilen birer adet bulanık sayı durulaştırılarak tekrardan reel bir değere dönüştürülmüştür. “Fuzzy\_motor1” bloğu üzerinden gidilirse Eşitlik 5’de verildiği gibi “Alan Merkezi (Center of Area) (COA)” [11] yöntemi kullanılarak durulaştırma işlemi tamamlanmıştır.

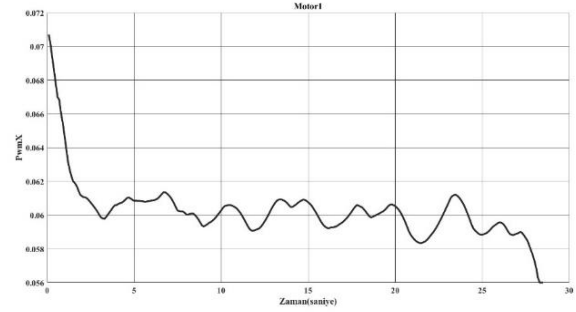
$$pwm\_x = \frac{\int \mu_{C_1}(pwm\_x)(pwm\_x).d(pwm\_x)}{\int (\mu_{C_1}(pwm\_x)).d(pwm\_x)} \quad (5)$$

Kontrolcü blokları tasarlandıktan sonra üretilen PWM sinyaller “düzenleme” ve “switch” bloklarına gönderilerek düzeltilir ve ESC’ler vasıtasıyla motorlara iletilir.

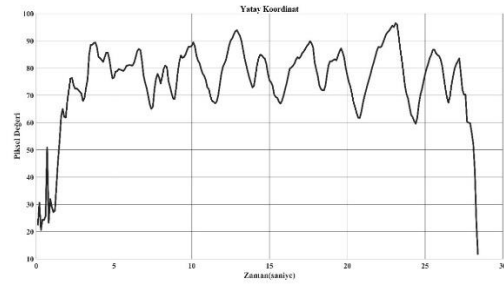
### III. BULGULAR

Öncelikle motor denge aralığındayken hedef uydusu  $t=0$  anında Şekil 5’de verilen yönler göre servis uydusunun sol yukarı yönünde sabit şekilde konumlandırılmıştır. Bu durumda Şekil 7’e göre  $x_m < 80$  ve  $y_m < 60$  olduğundan servis uydusu sol yukarı doğru yönelim yapacaktır. Bunun için Motor1, azalan bir PWM değeriyle saat yönünde hızlanarak servis uydusunu sola, Motor2 ise yine azalan bir PWM değeriyle saat yönünün tersine göre hızlanarak servis uydusunu yukarıya doğru ivmelendirecektir. Bu hareket, piksel değeri yatayda 80, düşeyde ise 60 olana kadar devam

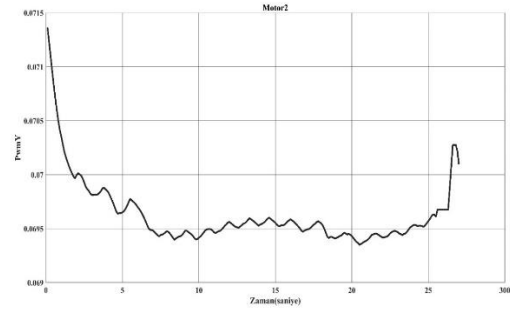
edecektir. Hareket boyunca motorlarda gözlenen PWM değerleri ve hedef uydusunun orta noktasının piksel değerleri Şekil 15-18’de gösterilmiştir.



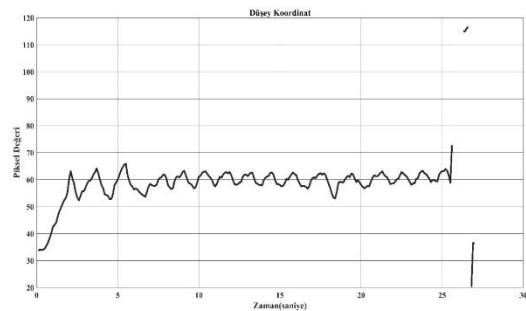
Şekil 15. Motor1’de gözlenen PWM değerleri



Şekil 16. Yatay koordinat üzerinde gözlenen piksel değerleri



Şekil 17. Motor2’de gözlenen PWM değerleri



Şekil 18. Düşey koordinat üzerinde gözlenen piksel değerleri



#### IV. TARTIŞMA

Deney sonuçları incelendiğinde 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 servis uydusundaki mini kameranın odak noktası olan (80,60) piksel değerine gelmeye çalıştığı görülmüştür. Ayrıca aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Sistemin bütünü yaklaşık 10.saniyede kararlılığa ulaştığı ve hedef uydusunun 25. saniyeye kadar sabit tutulduğu sürece sistemin kararlılığını koruduğu görülmüştür.
- Sistemin kararlı kaldığı süre boyunca Motor1'in %5.8-%6.2, motor2'nin ise %6.96-%6.94 arasında küçük sayılabilecek bir PWM değerinde salınım yaptığı görülmüştür.
- Sistemin kararlı kaldığı süre boyunca okunan piksel değerlerinin, yatayda yaklaşık 62-96 arasında düşeyde ise 55-96 arasında salınım yaptığı görülmüştür.
- Sistemde kalıcı durum süresince her ne kadar çatırdama ya da salınım fazla gibi görünse de mevcut salınım değerlerinin pratikte servis uydusunun stabil halde tutmaya yetecek kadar küçük olduğu görülmüştür.

#### V. SONUÇLAR

Bulanık kontrollü yönelim sisteminin gerçek zamanlı uygulama sonuçları incelendiğinde uygulanan algoritmalar sayesinde sistemin, 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 bu çalışma kapsamında tasarlanan algoritmanın da başlangıçta kullanıp ardından geliştirilebileceği değerlendirilmektedir.

Ek olarak ilk defa bir jiroskop deney setinin küp uydu deney düzeneği olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. Ayrıca sunulan küp uydu deney seti, sıfırdan tasarlanmış ve sistemin dinamik hareketini formülize eden herhangi bir dinamik model,

çalışma kapsamında sunulmamıştır. Buna rağmen bulanık mantık kavramının getirdiği yenilik sayesinde dinamik modeli belirsiz olan bir sistem, bahsedilen temel kapsamında kontrol edilebilmiştir. Bu aynı zamanda bulanık mantık temelli kontrolcülerin önemini ne denli büyük olmasını göstermesiyle beraber bu çalışmanın da en önemli sonuçları arasındadır.

Son olarak nispeten kolay temin edilebilecek malzemeler yardımıyla bir yönelim sistemi, laboratuvar ortamında tasarlanıp üretilebilmiştir. Bu durum, Üniversite ve Ar-Ge merkezlerinde de bu çalışmanın konusuyla benzer çalışmaların yapılabilmesini göstermektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] J. Li, M. Post, T. Wright, and R. Lee, "Design of attitude control systems for CubeSat-class nanosatellite," *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2013, p. 15, 2013, doi: 10.1155/2013/657182.
- [2] R. Sutherland, I. Kolmanovsky, and A. Girard, "Attitude control of a 2U Cubesat by magnetic and air drag torques," *arXiv*, vol. 27, no. 3, pp. 1047–1059, 2017.
- [3] J. Sun, S. Tan, H. Wen, and D. Jin, "Contact-free release dynamics of tens of stacked satellites with multiaxial rotations," *Advances in Space Research*, vol. 71, no. 1, pp. 492–506, 2023, doi: 10.1016/j.asr.2022.09.001.
- [4] X. Zhang, H. Wen, D. Jin, J. Yang, and Q. Wang, "Autonomous separation strategies for in-orbit stacked satellites," in *1st International Conference on Mechanical System Dynamics (ICMSD 2022)*, 2022, pp. 1465–1471. doi: 10.1049/icp.2022.2028.
- [5] M. R. Koblishka *et al.*, "Flux Pinning Docking Interfaces in Satellites Using Superconducting Foams as Trapped Field Magnets," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 32, no. 4, 2022, doi: 10.1109/TASC.2022.3147734.
- [6] C. Pirat, F. Ankersen, R. Walker, and V. Gass, "Vision Based Navigation for Autonomous Cooperative Docking of CubeSats," *Acta Astronautica*, vol. 146, no. July 2017, pp. 418–434, 2018, doi: 10.1016/j.actaastro.2018.01.059.
- [7] A. Farhat, J. Ivase, Y. Lu, A. Snapp, M. A. Demetriou, and M. Advisor, "Attitude Determination and Control System for CubeSat," pp. 180–184, 2013.
- [8] L. Franchi, L. Feruglio, R. Mozzillo, and S. Corpino, "Model predictive and reallocation problem for CubeSat fault recovery and attitude control," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 98, pp. 1034–1055, 2018, doi: 10.1016/j.ymsp.2017.05.039.
- [9] K. Gaber, M. B. El\_Mashade, and G. A. A. Aziz, "Real-time implementation of a robust simplified

intelligent proportional–integral control for CubeSat attitude determination system,” *Control Engineering Practice*, vol. 98, no. August 2019, p. 104377, 2020, doi: 10.1016/j.conengprac.2020.104377.

- [10] K. H. Lee., *First Course on Fuzzy Theory and Applications*. Springer Science & Business Media., 2004. doi: 10.1007/3-540-32366-x.
- [11] S. N. Sivanandam, S. Sumathi, and S. N. Deepa, *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*. 2007. doi: 10.1007/978-3-540-35781-0.