İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

QB50 UYDUSUNUN YÖNELİM BELİRLEME VE KONTROL SİSTEMİNİN ENTEGRASYONU VE TESTLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sibel TÜRKOĞLU

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

QB50 UYDUSUNUN YÖNELİM BELİRLEME VE KONTROL SİSTEMİNİN ENTEGRASYONU VE TESTLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sibel TÜRKOĞLU
(511121189)

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. A. Rüstem ASLAN

TEMMUZ 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511121189 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Sibel TÜRKOĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"QB50 UYDUSUNUN YÖNELİM BELİRLEME VE KONTORL SISTEMİNİN ENTEGRASYONU VE TESTLERİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. A. Rüstem ASLAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Yrd. Doç. Dr. Cuma YARIM** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Yrd. Doç. Dr. M. Emre AYDEMİR Hava Harp Okulu	.....

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **31 Temmuz 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. A. Rüstem Aslan'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tüm hayatım boyunca yanımda olan ve hiç bir zaman desteğini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2015

Sibel TÜRKOĞLU
(Uzay Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Amaç ve Kapsam 1
1.2 Tezin Organizasyonu 1
2. QB50 PROJESİ **3**
2.1 Projenin Amacı 3
2.2 Yönelim Belirleme ve Kontrol Gereksinimleri 4
2.3 QB50 ADCS 4
2.4 QB50 ADCS Sağlık Testleri 6
3. UYGULANACAK TESTLER VE DÜZENEKLERİ **9**
3.1 TVAC Testleri 9
3.2 Küresel Havalı Yatak Test Düzeneği 9
3.3 Helmholtz Kafesi ve Manyetik Eyleyici Test Düzeneği 9
4. TERMAL VAKUM ORTAM TESTLERİ **11**
4.1 Test Hazırlıkları 11
4.2 Test Süreci 13
4.3 Test Sonuçları 14
5. HAVALI YATAK TEST DÜZENEĞİ TASARIMI **17**
5.1 IMUduino'nun Programlanması 18
5.1.1 IMUduino algılayıcıların programlanması 18
5.1.2 Tümleştirici filtre 19
5.1.3 Algılayıcı sistemin programlanması sırasında karşılaşılan sorunlar 20
5.1.4 Algılayıcı programı ve elde edilen sonuçlar 21
5.2 Havalı Yatak Tasarımı 27
5.2.1 Havalı yatak hesaplamaları 27
5.2.2 Havalı yatak tasarım çizimleri 30
6. HELMHOLTZ KAFESİ TASARIMI **35**
6.1 Helmholtz Kafesi Bileşenleri 35
6.2 Helmholtz Kafesi Matematiksel Tasarımı 36
6.2.1 Helmholtz kafesi matematiksel tasarımı işlem basamakları 36
6.3 Helmholtz Kafesinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi 40
6.4 Manyetik Alanın Modellenmesi 41
6.4.1 SGP4+IGRF Entegre Kodu 42
7. SONUÇ VE ÖNERİLER **45**
KAYNAKLAR **49**
EKLER **51**
ÖZGEÇMİŞ **67**

KISALTMALAR

ACP **:** Attitude Control Processor (Yönelim Kontrol İşlemcisi)
ADC **:** Attitude Determination and Control (Yönelim Belirleme ve Kontrol)
ADCS **:** Yönelim Belirleme ve Kontrol Sistemi
CUBESAT **:** Cube Satellite
EPS **:** Electrical Power System (Elektrik Güç Sistemi)
FOV **:** Field of View (Görüş Açısı)
IGRF **:** International Geomagnetic Reference Field
IMU **:** Inertial Measurement Unit (Ataletsel Ölçüm Birimi)
IVO **:** Isıl Vakum Odası (TVAC)
MCU **:** Micro-processor Unit (Mikro-İşlemci Birimi)
OBC **:** On Board Computer (Uydu Bilgisayarı)
PCB **:** Printed Circuit Board
SGP4 **:** Simplified Perturbations Model
TLE **:** Two Line Elements
TVAC **:** Thermal Vacuum Chamber (Isıl Vakum Odası)
USTTL **:** Uzay Sistemleri Tasarım ve Test Laboratuvarı
YBKS **:** Yönelim Belirleme ve Kontrol Sistemi (ADCS)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : m-NLP Yükü. 3
Şekil 2.2 : Manyetik Algılayıcı [5]. 5
Şekil 2.3 : Test Kartı Üzerindeki ADCS. 6
Şekil 2.4 : ADCS'nin Eksenleri [5]. 7
Şekil 4.1 : TVAC içerisindeki ADCS test öncesi. 11
Şekil 4.2 : ADCS'nin TVAC'e yerleştirilmesi. 12
Şekil 4.3 : ADCS'nin güç ve UART bağlantıları. 12
Şekil 4.4 : Teker üzerindeki sıcaklık ölçer. 13
Şekil 4.5 : 50 derecede Nadir kamerasından alınan görüntü. 14
Şekil 4.6 : 50 derecede Güneş kamerasından alınan görüntü. 15
Şekil 5.1 : IMU ve Mikroişlemci [6]. 17
Şekil 5.2 : Solda Arduino Shield üzerindeki süngerde GY-87, sağda IMUduino. 20
Şekil 5.3 : X Eksenindeki Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması. 22
Şekil 5.4 : X Eksenindeki Filtreli Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması. 22
Şekil 5.5 : Y Eksenindeki Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması. 23
Şekil 5.6 : Y Eksenindeki Filtreli Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması. 23
Şekil 5.7 : Z Eksenindeki Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması. 24
Şekil 5.8 : Z Eksenindeki Filtreli Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması. 24
Şekil 5.9 : İvmeölçerden alınmış filtresiz XYZ yönelim bilgileri. 25
Şekil 5.10 : Jiroskoptan alınmış filtresiz XYZ yönelim bilgileri. 25
Şekil 5.11 : Tümleştrici filtreli XYZ yönelim bilgileri. 26
Şekil 5.12 : Kalman filtreli XYZ yönelim bilgileri. 26
Şekil 5.13 : Küresel yatağın geometrik bileşenleri [9]. 27
Şekil 5.14 : Küresel yatak yükleme datası, A ve B [9]. 28
Şekil 5.15 : Cd değerinin açıklık akışı için değişim grafiği [9]. 29
Şekil 5.16 : Açıklıktan geçen akım için faktörü [9]. 30
Şekil 5.17 : Hava yatağı test düzeneği. 31
Şekil 5.18 : Küre ve tutmaçların ataletsel özellikleri. 31
Şekil 5.19 : Test sisteminin alt bölümü. 32
Şekil 5.20 : Havalı yatak basınç çıkış noktaları. 32

Şekil 5.21 : Çıkış Delik Çapları. 33

Şekil 6.1 : Elektro-manyetik alan gösteriminde kullanılan dairesel bir bobinin koordinatları ve sistemdeki değişkenler [10]. 37

Şekil 6.2 : Helmholtz Kafesindeki Tüm Bobinlerde Üretilen Manyetik Alanlar. 40

Şekil 6.3 : Bobin Sarımları. 41

Şekil 6.4 : 30x30x30 cm3'lük Hacimdeki Manyetik Alan Dağılımı. 41

Şekil 6.5 : Ek E'deki SGP4+IGRF kodunda da kullanılan Mir Uzay İstasyonu'na ait TLE verisi. 42

QB50 UYDUSUNUN YÖNELİM BELİRLEME VE KONTROL SİSTEMİNİN ENTEGRASYONU VE TESTLERİ

ÖZET

BeEagleSat bir Avrupa Birliği FP7 projesi olan QB50 kapsamında geliştirilen 2 birim küp uydudur. Bu proje iki ve üç birimlik 50 küp uydu yardımıyla alt termosfer katmanının incelenmesini amaçlar. Dünyanın farklı üniversiteleri tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ile üretilmekte olan bu uydular, Belçika von Karman Enstitüsü başkanlığındaki proje birliği tarafından sağlanan 3 faydalı yükten birini seçmek ve taşımakla görevlidir. Atmosferin en üst katmanı olan termosfer'in hakkında yerinde ölçümler ile en az araştırma yapılan bölümüdür. Yüksek eliptiklikte birkaç uydunun ve zaman zaman fırlatılan sonda roketlerinin dakikalar mertebesinde geçtiği bu bölümden alınan bilgiler yeterli düzeyde değildir. Bu eksikliği gidermek üzere, QB50 projesi ile hedeflenen 3-6 aylık görev süresi boyunca 50 uyduyla termosferin deniz seviyesinden 200-380 km yükseklikteki kısmı hakkında yerinde çok noktadan eş zamanlı ölçümler ile daha ayrıntılı bilgiler elde edilecek ve daha hassas atmosfer modellerinin geliştirilmesine olanak sağlanacaktır.

Bu tez çalışmasında BeEagleSat uydusunda kullanılan ve QB50 projesi kapsamında Güney Afrika Cumhuriyeti ve İngiltere ekipleri tarafından geliştirilen yönelim belirleme ve kontrol sisteminin (YBKS-ADCS) testlerini gerçekleştirmeyi ve uydumuza entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. YBKS temel olarak iki görevi üstlenir: fırlatmanın ardından yörüngeye yerleştirme sırasında oluşan dönme hareketlerini sönümlenmesi ve uydunun istenen yöne doğrultulması. Benzer şekilde, QB50 görevleri gereği ayrıntılandırılmış özel YBKS isterleri vardır ve bunlar 3 farklı ana yük için farklıdır: m-NLP taşıyan küp uydular 200 km'ye kadar doğrultma kesinliğini 15° (±5° hata payı ile) sağlamalıdır ve küp uydular yörüngeye yerleştirilmelerinden 3 gün içeresinde 50 derece/sn' ye varan tip-off oranlarını sönümleyebilmelidir. Bu koşulların sağlanabilmesi için yüksek doğrulukla yönelim belirlemesi ve 3 eksende kontrol yapılması gereklidir. Bu koşullar göz önünde bulundurularak QB50 proje birliği tarafından QB50 ADCS geliştirilmiş ve isteyen ekiplerin kullanımına sunulmuştur. İTÜ ekibine de bir adet uyduda kullanılmak üzere tahsis edilmiştir. Birimin alınması sonrasında öncelikle QB50 tarafından belirtilen temel işlerlik testleri gerçekleştirilmiştir. Ancak bu sağlık testleri uzay ortamı benzetiminde yapılmadığından ve sensör/eyleyicilerin çalışma doğrulukları hakkında yeterli bilgi vermediğinden ek testlerin yapılması planlanmıştır.

Ek testlerin ilki ısıl vakum testleridir. USTTL'de bulunan ısıl Vakum Odasında (IVO/TVAC) gerçekleştirilecek bu testler yardımıyla QB50-ADCS'nin uzayın ısıl vakum ortamında beklenildiği şekilde çalışıp çalışmadığı denetlenecektir.

Ayrıca, manyetik eyleyicilerin ve momentum tekerinin performanslarının incelenmesi de hedeflenmiştir. Bu amaçla, homojen manyetik alan oluşturan Helmholtz bobinlerinden meydana gelen Helmholtz kafesi ve uydunun kütlesi ve test sisteminin kararlılık gereksinimleri göz önüne alınarak tasarlanacak basit bir havalı yatak aracılığıyla momentum tekerinin ve manyetik eyleyicilerin testleri

gerçekleştirilecektir. Ayrıca, tasarlanacak bu test sistemleri ileride tarafımızdan geliştirilecek bir küp uydu YBKS sisteminde de kullanılabilecek alt yapıyı oluşturacaktır.

ENTEGRATION AND TESTS OF ATTITUDE DETERMINATION AND CONTROL SYSTEM OF QB50 SATELLITE

SUMMARY

ADC systems basically detumble the satellites after deployment and point them in some desired directions. Furthermore some missions can have specific requirements needs to be fulfilled for accomplishment. In QB50 case it is specified as the CubeSats carrying the m-NLP SU shall have an attitude control with pointing accuracy of 15 and pointing knowledge of 5 from its initial launch altitude down to at least 200 km and the CubeSat shall be able to recover from tip-off rates of up to 50 deg / sec within 3 days. To meet these attitude requirements of the QB50 mission QB50 ADCS is chosen. In this study, QB50 ADCS health check procedure has conducted QB50 ADCS.

Tests are conducted to verify of each component's functionality, power consumption and communication with others via UI called CubeSupport. QB50 ADCS consists of three main components which are named with their functions: CubeComputer, CubeSense and CubeControl.

First step of the process is the confirmation of CubeComputer's which is a onboard computer but in this system ADCS computer functions. ACP (Attitude Control Processor) which is main part of the CubeComputer, connection is primary for a working ADC system is done without any problem.

The second step is to verify communication between CubeSense and CubeComputer whose purpose to control of sensors whose measurements are initiative for attitude determination process. Although the bundle has 3 attiude determination measurements which is sun vector, nadir pointing and magnetic field data; CubeSense has only Nadir sensor and Sun sensor on it. Both sensors are CMOS camera's with 190 degrees FOV lenses. Because of sensor's own requirement Sun sensor has neutral density filter to reduce intensity. These sensors functions depend on light existence besides amount of light. Therefore, it is expected Sun and Nadir sensors don't make detection without a proper stimulus. For testing the sensors, phone flash light is used as stimulant. To test the Nadir sensor a simulator which consists of basically a card box with a paper covered 16cm diameter circular cutout which center is in the bore-sight is used. When the flash light is being moved in the positive X-axis direction, measurement of angle around Y-axis (elevation) increases as expected. Then the movement of the light is reverse, decrease in elevation detected. Again the same process is done in the positive Y-axis direction, measurement of angle around X-axis (azimuth) increases in Sun sensor but decreases in Nadir sensor as expected. Lastly, the movement of the light is reverse, decrease in Sun sensor but increase in Nadir sensor in azimuth detected.

The third step of the test is on CubeControl which could be examined in 2 sub groups: CubeControl Signal and CubeControl Motor. CubeControl Signal group contains its own MCU (micro controller unit), magnetometer, coarse Sun sensors, magnetic torquers and finally GPS receiver (will be integrated). CubeControl group

has also a MCU its own, rate sensor and reaction wheel. After verifying CubeControl Signal MCU communicates with no error, tests of the sensors and actuators are conducted. First phase of this step magnetometer checks. By rotating magnetometer, it's been assured that we can read negative and positive fields in three directions and the vector sizes between 10,000 and 55,000 in normal conditions via UI. The second phase is to check the coarse Sun sensors tested whether they give reasonable outputs with exposure to the light, in this case also used phone flash is used light source. The third phase is checking magnetic fields' direction induced by magnetorquers. In all three axis, verified that the compass which positioned in each working torquer, direction north pole points in the same axis direction. The fourth phase starts with verification of CubeControl MCU communication is error-free. The rate sensor data is +/- 1 deg/s as expected and any tilt in Y- axis gives reasonable outputs. The final phase is on testing reaction wheel. The wheel speed increase/decrease reaches 2000 rpm +/- 200 rpm in 10 seconds condition is met.

Consequently, an ADC system that satisfies the strict attitude requirements of the QB50 mission is chosen. QB50 ADCS health check procedure has conducted without errors which indicates that the system functions properly and ready to go on TVAC , Helmholtz Cage and Spherical Airbearing tests. But for the two latter tests it is needed to design and produce test systems before testing. After all tests are done, it is finally integration phase.

For Helmholtz cage and spherical airbearing tests first step is to build these systems. This thesis is aims to also prepare design prosedures and program codes of these systems.

An spherical air bearing test bed is used to stimulate weightlessness for the satellite. Basically, a spherical air bearing consists of 3 parts, first part is the base of the system which has orifices to transmit the pressurized air to the bearing, second part is the sphere (normally semi-sphere is used in many designs but in this case it is a full sphere) and a compressor with a regulator. But to test the ADCS this sphere is designed hollow in order to put the whole satellite in it and to make the system rotate in 3 axis without limitations. The design of the bearing calculations (diameters of the orifices, needed pressure, compressor power consumption) are coded in Matlab and added to appendix. And to verify the rotation of the satellite, a imu board is added to the system, which is called IMUduino. IMUduino is a 10dof system which has gyro, accelerometer, magnetometer and altimeter. It is chosen beacuse of it is an Arduino, it is easy and open source. So an open source code is used to program the IMUduino and successful results are got. To visualize the outputs a Matlab code is done to import the serial port data and to create graphics of them. This codes are included to the appendix of the thesis.

Helmholtz coils is a system which creates homogeneous magnetic fields through coils. Altough the QB50 satellite has magnetic coils in three axis. Because of this reason, BeEagleSat needs a three axis magnetic modeller which can be possible if a three axis Helmholtz coil groups which is also called "Helmholtz cage".

In a Helmholtz cage design, three main phase exists. First phase is to program a code that calculates the magnetic field of a point which is given by altitude, latitude and longitude information of the satellite position. This code consists of mainly 3 components. SGP4 orbit propagator and perturbation modeller, transformation of the position data for IGRF needs, IGRF the magnetic field calculator.

First component is SGP4 (Simplified Perturbations Model) which is a perturbation modeller which includes drag, Earth's shape effects, gravitation effects of moon and Sun and also radiation. In this code it is used as an orbit propagator which initials with TLE (Two Line Elements) . TLE information gives details about the satellite orbital elements and the time of the information is created. The TLE data and SGP4 code calculates the position of the satellite in XYZ (km) in TEME (True Equator Mean Equniox) frame. Although to get the altitude, latitude and longitude information it is needed to transform the position in to ECEF (Earth Centered Earth Fixed) frame. After getting the suitable position information in the needed frame, this information is converted in to altitude, latitude and longitude data which is requisite for magnteic field modelling called IGRF.

IGRF (International Geomagnetic Reference Field) is model of magnetic field calculator around the World which consists of both mathematical models of magnetic field and magnetic measurings of spacecrafts. In this thesis IGRF code is not used, instead of a Matlab Aerospace Toolbox function "igrf11magm" function is used, which inputs decimal year, height (altitude), latitude, longitude and outputs some magnetic field information, but in this thesis it is used just mangnetic field vector information output. All these codes are included to the appendix of the thesis.

Second phase of the Helmholtz cage design is to calculations. A code which calcultes and visualize magnetic field created by the Helmholtz cage, depending on radius of the coil, number of turns and current.

Third phase is modelling the Helmholtz cage with finite element method. For this process it is used Comsol multiphysiscs modelling software. With this process a 3D magnetic field visualization of the cage is provided.

At the end of these phases, Helmholtz cage procedure needs building one, calibration and the power control of the system with a code. But this is beyond of the scope of this thesis.

To sum up, this thesis basically is on, health checks of the QB50 satellite BeEagleSat, designing procedures and coding the programs of a Helmholtz Cage and an air bearing test bed which is needed before building phase.

1. GİRİŞ

Alt termosferi incelemeyi amaçlayan bir uydu kümesi projesi olan QB50 kapsamında üretilen BeEagleSAt uydusu yaklaşık 3 aylık görev süresi boyunca özel faydalı yükler yardımıyla atmosferik bilgi toplama ve bu bilgilerin iletilmesi görevini üstlenmiştir. Ancak faydalı yükün verimli bir şekilde çalışabilmesi ve görevin başarıyla gerçekleştirilebilmesi için özel yönelim belirleme ve kontrol isterlerinin sağlanması gerekmektedir. Bu sebeple seçilen ADC sisteminin uçuş öncesinde gerçekleştirilmesi gereken testleri titizlikle yürütülmelidir. Bu sebeple sistemin yapılması zorunlu olan işlerlik testlerinin yanı sıra eyleyici ve sensörlerin doğru bir şekilde çalıştıkları teyit edilmelidir.

1.1 Amaç ve Kapsam

Bu tez çalışmasının amacı QB50 projesindeki BeEagleSat uydusunun ADC sisteminin testlerini yaparak incelemektir. Gerçekleştirilen/gerçekleştirilecek testler basit olarak 2 ana grup altında toplanabilir. İlk grupta üretici firmanın ADCS için belirlediği ve QB50 tarafından istenen temel işlerlik testleri (TVAC testleri bu gruba dahildir) bulunmaktadır. Ancak bu testler sistemin kesinliğini ve doğruluğunu sınamadığı için ikinci gruptaki deneylere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar küresel havalı yatak ve Helmholtz kafesi ile gerçekleştirilecek eyleyici testleridir. Ancak bu testler için gerekli sistemler olmadığı için ilk aşama olarak bunların tasarlanıp üretilmesidir. Ardından tüm testler tamamlanarak ADCS'nin doğruluğu ve işlerliği tam olarak sınanmış olacaktır. Tez içerik olarak işlerlik testleri ve üretilecek küresel havalı yatak ve Helmholtz kafesi tasarımlarının yapılmasını kapsamaktadır.

1.2 Tezin Organizasyonu

QB50 uydusunun ADC sisteminin test sürecini incelemeyi amaçlayan bu tezde, ilk olarak QB50 uydu projesinin kapsam ve amaçlarından bahsedilerek, uydumuzun faydalı yükü ve görev isterleri doğrultusunda yönelim belirleme ve kontrol sistem

gereksinimleri belirtilecek. Ardından kullanılması uygun bulunan QB50 ADCS sisteminin donanımsal ve yazılımsal altyapıları incelenerek, yapılacak testler belirlenecek, proje kapsamında uygulanması istenen testler tanıtılacaktır. Sistemin sağlık testleri olarak adlandırılan işlerlik testleri yapılarak bu bölüm sonlandırılacaktır.

İkinci kısım, termal vakum odasının (TVAC) kısa tanıtımının ardından, proje isterleri doğrultusunda gerçekleştirilen testlerin yapım aşamaları ve elde edile sonuçlar sunulacaktır.

Üçüncü bölümde ise manyetik eyleyicilerin testilerinin gerçekleştirilebilmesi için gereken Helmholtz kafesi tanıtılarak, QB50 uydusunun testlerinin sorunsuz bir şekilde yapılabileceği bir kafesinin ön tasarım aşamaları gerçekleştirilecektir.

Dördüncü bölümde, eyleyicilerin testi için gerekli olan "küresel havalı yatak" olarak Türkçe'ye çevrilebilecek 3 eksenli küresel havalı yatak sistemleri tanıtılacak. Uydunun ağırlığı ve test sisteminin stabilite gereksinimleri göz önüne alınarak basit bir havalı yatak matematiksel tasarımları yapılarak, çizimleri gerçekleştirilecektir.

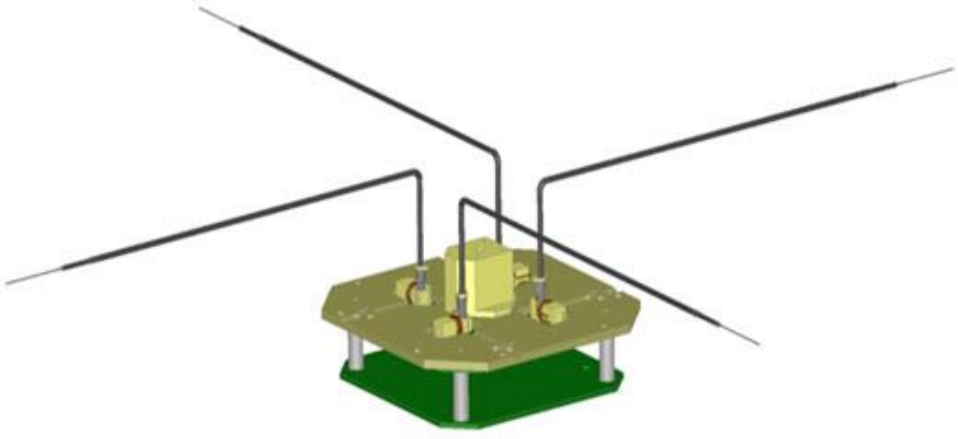
Ardından QB50 projesi kapsamında yapılan BeEagleSat uydusunun yönelim belirleme sisteminin test sonuçları özetlenecek, küresel havalı yatak ve Helmholtz kafesi tasarımları için yapılanlar kısaca belirtilerek, projenin sonunda gerçekleştirilmesi planlananlardan bahsedilerek tez sonlandırılacaktır.

2. QB50 PROJESİ

2.1 Projenin Amacı

QB50 bir Avrupa Birliği projesidir. İki birimlik 50 uydudan oluşan bir kümeden meydana gelen bu proje termosfer katmanının incelenmesini amaçlar. Üniversiteler tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ile üretilmekte olan bu uydular, Von Karmam Enstitüsü tarafından sağlanan 3 faydalı yükten seçilen birini taşımakla görevlidir. Atmosferin deniz seviyesinden 200-380 km yükseklikteki kısmı olan alt termosfer, atmosferin hakkında en az araştırma yapılan bölümüdür. Eksantrisitesi yüksek birkaç uydunun ve sondaj roketlerin dakikalar mertebesinde geçtiği bu bölümden alınan bilgiler yeterli düzeyde değildir. Ancak QB50 projesi hedeflenen 3 aylık görev süresi boyunca 50 uyduyla termosfer hakkında daha ayrıntılı bilgilerin elde edilmesiyle atmosfer modellerinin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

Projede kullanılacak bilimsel yükler, Ion-Mass Spectrometer (INMS), Flux-ΦProbe Experiment ve multi-Needle Langmuir Probe (m-NLP) olmak üzere üç tanedir. Her bir yük birbirinden farklı ölçümler alacaktır. BeEagleSat için ise m-NLP (Şekil 2.1) seçilmiştir.



Şekil 2.1 : m-NLP Yükü.

Uydunun ilerleme yönünde yerleştirilen m-NLP üzerindeki 4 prob sayesinde akım ölçümü yapar. Elde edilen ölçümler voltaja dönüştürülür, filtrelenir ve dijitize

edilerek telemetri sistemine iletilir. 4 probdan elde edilen farklı ölçüm değerlerine dayanarak elektron yoğunluğu ölçümü yapılır.

M-NLP'nin yanı sıra X-Ray detektörü içeren BeEagleSat ile alt termosfer araştırmalarına katkı sağlanacaktır.

2.2 Yönelim Belirleme ve Kontrol Gereksinimleri

ADC sistemi temel olarak iki görevi üstlenir; fırlatmanın ardından oluşan dönme hareketlerini sönümlenmesi ve uydunun istenen yöne doğrultulması. Ancak QB50 görevleri gereği özel yönelime belirleme ve kontrol isterleri vardır. 3 farklı ana yük için belirlenen farklı kriterler vardır. Bunlar "M-NLP taşıyan CubeSatlar 200 km'ye kadar doğrultma kesinliğini 15° (±5° hata payı ile) sağlamalıdır." [1] ve "Cubesatlar 3 gün içerisinde 50 derece/sn' ye varan tip-off oranlarını sönümleyebilmelidir." [2]. Bu koşulların sağlanabilmesi için yüksek doğrulukla yönelim belirlemesi ve 3 eksende kontrol yapılması gereklidir.

Günümüz CubesSatlarında en çok kullanılan yönelim kontrol yöntemi olan manyetik eyleyicilerin bu görevde de kullanılması planlanmıştır. Ancak 3 eksende kontrol için (özellikler kutup bölgelerinde manyetik kontrolün yeterli olmaması sebebiyle) ek olarak bir momentum tekeri gereklidir. Yönelim belirleme için kullanılması planlanan Güneş, nadir ve manyetik sensörlerinin istenen kesinliği sağlayamaması sebebiyle uydumuzun alçak yörüngede bulunması sebebiyle GPS kullanması gerekli görülmüştür. Ancak projenin ilerleyen zamanlarında üretilen "QB50 ADCS" tasarladığımız sistemi karşılaması sebebiyle satın alınmıştır.

2.3 QB50 ADCS

QB50 ADCS, CubeComputer, CubeSense ve CubeControl olarak adlandırılan 3 ana bileşenden oluşur.

CubeControl sistemin anabilgisayarı olarak adlandırılabilir. Basitçe ADCS'nin bileşenleri arasında haberleşme ve güç dağıtımı görevini yerine getirmekle görevlidir ana bileşen ACP'dir (Attitude Control Processor).

CubeSense sistemi, Güneş ve nadir sensörlerini üzerinde bulunduran karttır.

Nadir ve Güneş sensörleri 190 derecelik görüş alanına sahip CMOS kameralardan oluşmaktadır. Ayrıca sensörün kendi gereksiniminden dolayı, Güneş sensörü ışık yoğunluğu azaltmak için nötr yoğunluk filtresi taşımaktadır.

CubeControl ise CubeControl Signal ve CubeControl Motor olmak üzere iki bölümde incelenebilir. CubeControl Signal MCU (Micro Controller Unit) manyetometre, kaba Güneş sensörleri (6 adet), manyetik eyleyiciler (3 adet) ve henüz eklenmemiş olan GPS alıcısının işlevlerinden sorumludur. Manyetik algılayıcı açılabilir bir sistem üzerinde uydunun dışına Dünya'ya dönük yüze monte edilir. Uydunun fırlatılmasının ardından meydana gelen kontrolsüz dönme hareketinin sönümlenmesinin ardından açılarak ölçüm almaya başlar. Ancak QB50 projesi kapsamında sistemlerin işlerliğini kontrol etmek için gönderilen 2 uydudan elde edilen verileri göre, manyetik algılayıcı açılmadan daha sağlıklı ölçümler almıştır. Dolayısıyla Şekil 2.2'de görülen manyetik algılayıcının açılma sistemi kullanılmaksızın çalıştırılması olasıdır.



Şekil 2.2 : Manyetik Algılayıcı [5].

Kaba güneş sensörleri ise oldukça düşük doğrulukları sebebiyle destekleyici algılayıcılar olarak kullanılacaklardır. Uydunun her bir yüzeyine yapıştırılması planlanmasına rağmen ilerleme yüzeyindeki faydalı yük ve karşı uçtaki X-Ray detektörü bulunması sebebiyle sadece 4 tane anlamlı veri alınabilecektir, ancak yönelim belirleme algoritmalarındaki önemi büyük olmadığı için bu bir sorun oluşturmayacaktır. CubeControl Motor MCU ise momentum tekerinden ve jiroskop (rate sensor) sorumludur.

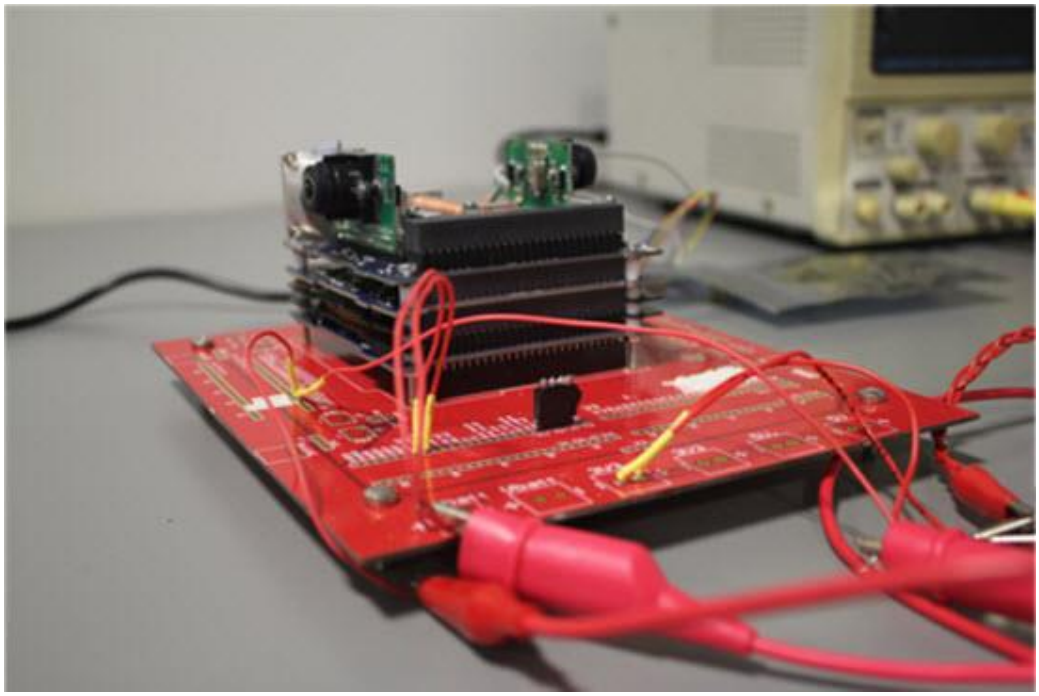
Özetle ADCS bilgisayar, sensör ve eyleyici bölümlerinden oluşur. Sensörlerden elde edilen veriler CubeComputer kısmında çeşitli filtreler yardımıyla işlenerek, kontrol

algoritmalarına uygun hale getirildikten sonra eyleyici kontrolü ile hedeflenen yönelim durumunu geçiş gerçekleştirilir.

2.4 QB50 ADCS Sağlık Testleri

ADCS'nin her bir alt birimin işlerliğini test etmeyi amaçlayan prosedür (healthcheck) yürütülmüştür. Ancak bu test eyleyici ve sensörlerin sadece çalıştıklarını teyit etmektedir, ancak doğrulukları ve kesinlikleri hakkında bilgi vermez. Ancak uzay ortamında başarılı yönelim belirleme ve kontrol için bunlardan emin olunması elzemdir. Bu sebeple bir sonraki bölümde eksik olan testler ve testler için gereken cihazlar incelenecektir.

Sağlık testlerinin gerçekleştirilebilmesi için sistemin uyduda EPS (Electric Power System) tarafından sağlanacak olan gücün güç kaynağı tarafından sağlanması ve uçuş sırasında OBC'nin (On Board Computer) göndereceği komutların bilgisayar aracılığıyla alınması gerekir. Bu işlemler uydunun bir test kartı üzerinde yerleştirilerek ADCS'nin üzerinde bulunan PC104 pinleriyle sağlanmıştır. Kart üzerindeki bu sistem Şekil 2.3'te görülebilir.



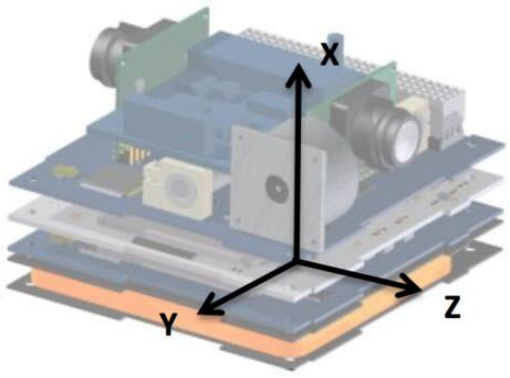
Şekil 2.3 : Test Kartı Üzerindeki ADCS.

Bu sistemde ADCS ile bilgisayar arasındaki bağlantı UART yolu ile CubeSupport adı verilen bir arayüz programıyla gerçekleştirilmiştir.

Yapılan testler incelenen birime gücün geldiğinin doğrulanması, birimin diğer birimlerle iletişim kurabildiğinin gösterilmesi, birimlerin üretici tarafından ölçülen değerlerde güç tükettiğinin teyidi, birimin kendinden beklenen görevi kabaca yerine getirdiğinin doğrulanması olarak özetlenebilmektedir.

İlk test CubeComputer'ın çalışır durumda olduğunun teyit edilmesidir. ADCS sorunsuz bir şekilde bilgisayarla bağlantı kurabildiği ve CubeSupport programıyla sisteme komut verilebildiği için bu şart sağlanmıştır.

İkinci test ise CubeSense'in CubeComputer'la iletişimini, Güneş ve nadir sensörlerinin çalışırlığını sorgulamaktadır. Arayüz programında CubeSense için bir hata bayrağı görülmediği ve daha önemlisi arayüzden CubeComputer'a oradan da CubeSense komut verebildiğimiz için iletişim şartı sağlanmıştır. Ayrıca Güneş ve nadir sensörleri birer kameradan oluştukları için arayüz aracılığıyla bunlardan fotoğraf çekilerek uydunun SD kartına yüklenmiş oradan da bilgisayara aktarılarak hem sensörlerin hem de telemetrinin çalıştığı teyit edilmiştir. Ayrıca telefon flaşı ile gerçekleştirilen testlerle sensörlerin görevlerine uygun çalıştığı tespit edilmiştir. Bahsedilmek üzere olan test için, 8 cm yarıçapa sahip karton bir kutudan Nadir simülatörü tasarlanmış ve test her iki sensöre de uygulanmıştır. Pozitif x ekseni doğrultusunda hareket eden ışığın elevasyon açısında artışa sebep olduğu, ters yönde hareketinde ise elevasyon açısının beklendiği gibi azaldığı gözlemlenmiştir. ADCS'nin eksenleri Şekil 2.4 görülebilir.



Şekil 2.4 : ADCS'nin Eksenleri [5].

Aynı işlem pozitif y ekseninde tekrarlandığında ise Güneş sensörü azimutta artış tespit ederken, nadir sensörü ise azalma tespit etmiştir, ters yönde hareketinde ise

nadir sensörü artma tespit ederken, Güneş sensörü azalma tespit ederek CubeSense'in sorunsuz çalıştığını göstermişlerdir.

Son aşamada ise CubeControl testleri yer almaktadır. CubeControl Signal MCU'nun CubeComputer'la iletişim kurduğu arayüz aracılığıyla, sensörlerden uyaran değişimiyle alınan mantıklı sonuçlarla ve manyetik eyleyicilerin oluşturduğu manyetik alanın etkilerinin görülmesi sayesinde anlaşılmıştır. Kaba güneş sensörlerinin ışık değişimine verdikleri olası cevaplar ve manyetometrenin el ile hareket ettirilmesi sonucunda elde ettiği tüm değerlerin Dünya üzerinde olası manyetik alan değerleriyle uyuşması sebebiyle sensörler testten başarıyla geçmiştir. Manyetik eyleyicilerin teker teker çalıştırılarak pusula üzerindeki etkileri incelenmiş, test sonucunda her birinin pusulansın kuzey ucunu çalışan eyleyici doğrultusuna getirdiği görülmüştür. Böylelikle Signal MCU'nun sorunsuz çalıştığı teyit edilmiştir. Motor MCU ise sadece momentum tekerinden sorumludur ve teker çalıştırılarak 2000 rpm ±200 rpm değerine ulaştığı süre gözlenmiştir. Beklenen değer 10 sn olmasına rağmen elde edilen değerler 12-13 sn arasındadır. Olası gecikme sorunları incelenmiş, tekere sağlanan gücün düşük olabileceği düşünülmüştür ancak sistemin daha fazla güç çekmesine izin verilmesine rağmen bir değişiklik gözlenmemiştir. Son olarak testlerin Dünya'da yapılması sebebiyle istenmeyen gecikmeler olduğu, dolayısıyla bu değerlerin kabul edilebilir olduğu kanısına varılmıştır. Bahsedilen tüm testlerin yansıra sistemlerin çeşitli durumlar için (eyleyici aktif/pasif vb.) çektikleri akım miktarları incelenmiş ve üreticinin değerleriyle tutarlı bulunmuştur.

Uygulanan sağlık testleri sonucunda ADCS'nin üreticinin öngördüğü biçimde çalıştığı belirlenmiştir.

3. UYGULANACAK TESTLER VE DÜZENEKLERİ

3.1 TVAC Testleri

Uydunun uzaydaki zorlu vakum ve sıcaklık koşullarında çalışabilirliğini test eder. USTTL' de bulunan TVAC'de QB50 tarafından belirtilen $+50^{\circ}C$ ve $-20^{\circ}C$ testlerde ADCS'nin çalışıp çalışmadığı ve hayati bileşenlerdeki sıcaklık değişimleri incelenecektir.

3.2 Küresel Havalı Yatak Test Düzeneği

Gerek sadece ADC sistemlerindeki eyleyicilerin yerçekimsiz ortamda oluşturacakları etkinin incelenebilmesi için kullanılan sistemler küresel havalı yataklardır (spherical air bearing). 1 tanesi 360°, diğerleri ise yatağın tasarımına göre değişen değerlerde (optimal şartlar için tasarlanmış küresel havalı yataklarda bu değer yaklaşık $30^{\circ}-35^{\circ}$ civarındadır.) hareket serbestisi sağlar. Özellikle tekerlerin testleri için uygun olan bu sistemler, iyi tasarlanmaları durumunda (çok düşük sürtünme) manyetik eyleyicilerin de testlerinde kullanılabilmektedirler.

3.3 Helmholtz Kafesi ve Manyetik Eyleyici Test Düzeneği

Manyetik eyleyicilerin gerçekçi bir şekilde test edilebilmesi için Dünya manyetik alanın başarılı bir şekilde modellenmesi ve elde edilen değerlerin homojen bir manyetik alan oluşturabilen bir test düzeneği gereklidir. Helmholtz kafesleri, Helmholtz bobinlerinden oluşmaktadır. Bu bobinler arasında oldukça homojen manyetik alanlar oluşturulabilmektedir. Helmholtz kafesi de istenen eksenlerde yerleştirilmiş Helmholtz bobinlerinden oluşmaktadır. İdeal bir test için 3 boyutta manyetik alan üretilmesi gerekmektedir. Eyleyicilerin oluşturdukları etkiler oldukça küçük olduğu için iyi tasarlanmış bir havalı yatak sistemine ya da sadece bir eksende test yapılacaksa sistemin bir iple tutturulmasına ihtiyaç vardır.

4. TERMAL VAKUM ORTAM TESTLERİ

4.1 Test Hazırlıkları

Termal vakum testleri uydunun yörüngesinde karşılaşacağı ortam şartlarını simule ederek sistemlerin bu koşullar altında işler olacağını kanıtlamak için gerçekleştirilir. Dolasıyla her bir uydu ve alt sistemi için uygulanacak sıcaklık-vakum koşulları farklıdır. QB50 ADCS üreticisinin tavsiyesi üzerine $-20^{\circ}C$ ve $+50^{\circ}C$ arasında vakum koşullarında testin gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

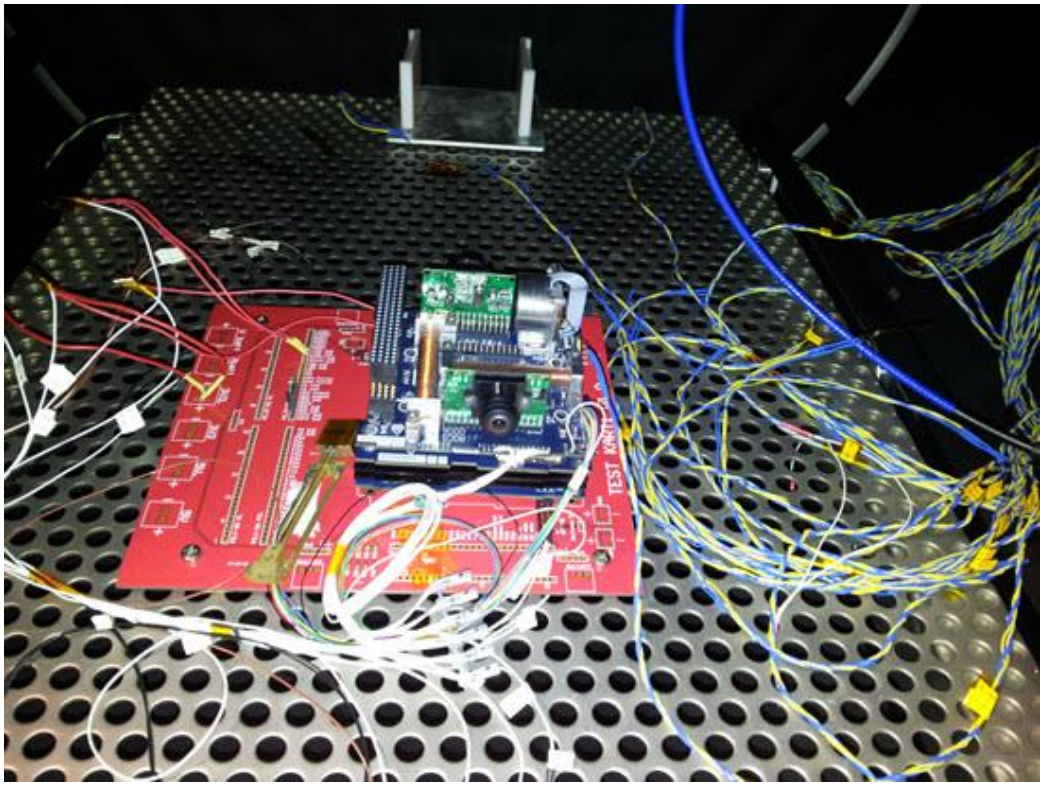
Her bir $10^{\circ}C$'lik aralıklarla sağlık testleri tekrarlanarak her bir alt bileşenin uzay koşullarında çalışıp çalışmadığı sorgulaması planlanmıştır. Test planının tamamlanmasının ardından sistemin TVAC içerisine yerleştirilmesi aşamasına geçilmiştir. Şekil 4.1'de ADCS' nin TVAC içerisindeki görüntüsü testlerin hemen öncesinde çekilmiştir.



Şekil 4.1 : TVAC içerisindeki ADCS test öncesi.

ADCS'nin güç ve UART bağlantıları TVAC'in dışına çıkan kablolar yardımıyla bir breadboard aracılığıyla güç kaynağı ve bilgisayar bağlantıları oluşturulmuştur.

Şekil 4.2’de bu bağlantılar TVAC içerisinden, Şekil 4.3’te ise TVAC dışından görülebilmektedir



Şekil 4.2 : ADCS'nin TVAC'e yerleştirilmesi.



Şekil 4.3 : ADCS'nin güç ve UART bağlantıları.

Ayrıca ADCS' de yüksek sıcaklık değişiminin reaksiyon tekerini genleşme sebebiyle olumsuz etkilenebileceğinden sıcaklık değişimi termo eleman ile ölçülmüştür. Teker üzerindeki termo eleman Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4 : Teker üzerindeki sıcaklık ölçer.

Üstteki resimde de görüldüğü gibi bağlantılar yapılırken, uzay uygulamaları için güvenilirliği kanıtlanmış kapton kullanılarak test sırasında olası bağlantı problemlerinin önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Çünkü yapılan testin uzun süreli ve yekpare olması sebebiyle oluşacak küçük sorunlar bile testin baştan tekrarlanmasını gerektirecektir.

4.2 Test Süreci

Test sırasında, daha önceden gerçekleştirilen sağlık testleri ve QB50'nin şart koştuğu testler yapılacak. ADCS sisteminde gerekli görülen noktalardaki sıcaklık değişimleri incelenecektir. İlerleyen konularda tasarlanan Helmholtz kafesi ile manyetik ortam benzetmesi de oluşturulacaktır. Gerçekleştirilen bu standart testin yanı sıra Helmholtz kafesinin tasarlanmasının ardından uygulanacak manyetik alan etkisinin eklenmesiyle testler aynı şekilde tekrarlanarak sonuçlar kıyaslanmalıdır. Böylelikle uzay ortamının sıcaklık-vakum-manyetik alan üçlü etkisi ile test sonuçlar daha

gerçekçi olacaktır. Ancak ideal koşullarda ışıma etkilerinin incelenmesi ile çok daha güvenilir sonuçlar elde edilecektir.

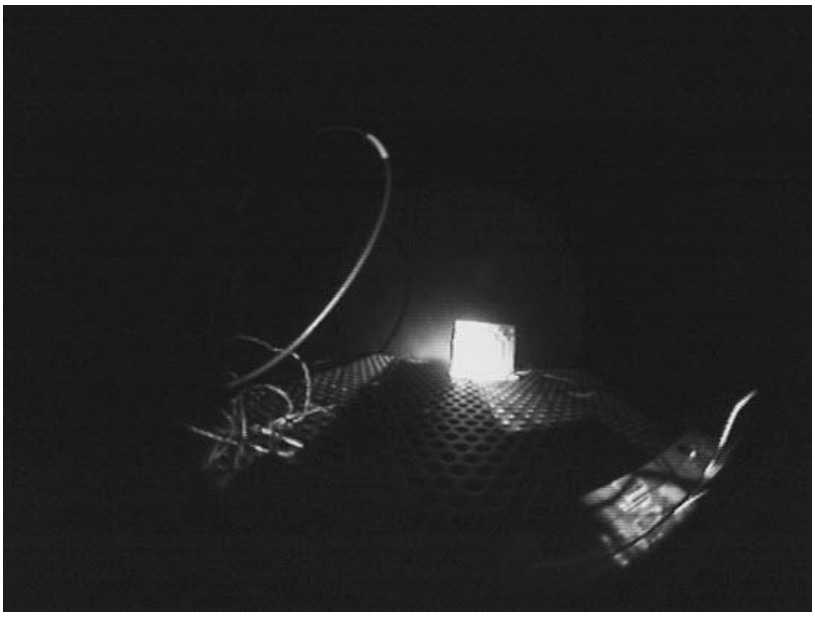
4.3 Test Sonuçları

TVAC testleri -20° ile $+50^{\circ}$ dereceler arasında yapılması planlanmasına rağmen, sadece $+20^{\circ}$ ile $+50^{\circ}$ derecelerde gerçekleştirilebilmiştir. Bunun temel sebebi test sırasında karşılaşılan sorunlardır.

Sağlık testleri ilk aşamada ADCS'nin TVAC içerisine yerleştirilip kapak kapanmadan yani oda koşullarında gerçekleştirilmiş, herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır. Ardından testler kapağın kapatılıp vakum ya da sıcaklık değişikliği oluşturulmadan tekrar edilmiştir. Bu aşamadan da başarıyla geçen sistem için vakum ve termal testlerin yapılmasına geçilmiştir.

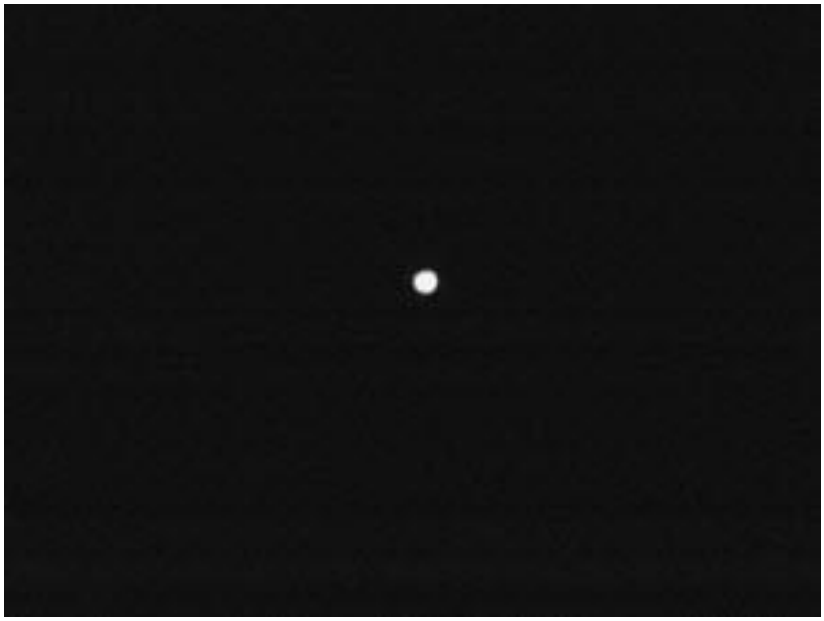
Vakum ortamında $+20^{\circ}$ ile $+50^{\circ}$ arasında 10°'lik farklarla gerçekleştirilen testler başarıyla sonuçlanmıştır. Hedeflenen -20°'lik alt sınıra ulaşabilmek için sıcaklıklar 10°'lik aralıklarla azaltılmaya başlanmıştır.

Her 10°'lik değişimde tüm sağlık testleri tekrarlanmıştır. Ayrıca Güneş ve Nadir kameralarından da görüntüler alınmıştır. Şekil 4.5' te $+50^{\circ}$'de Nadir kamerasından alınan siyah beyaz görüntü verilmiştir.



Şekil 4.5 : 50 derecede Nadir kamerasından alınan görüntü.

Şekil 4.6’ te $+50^{\circ}$’de filtreli Güneş kamerasından alınan, sadece ışık kaynağının görülebildiği fotoğraf bulunmaktadır. Algılayıcının işlevi göz önünde bulundurulduğunda beklenen türde bir görüntü olduğu anlaşılabilir.



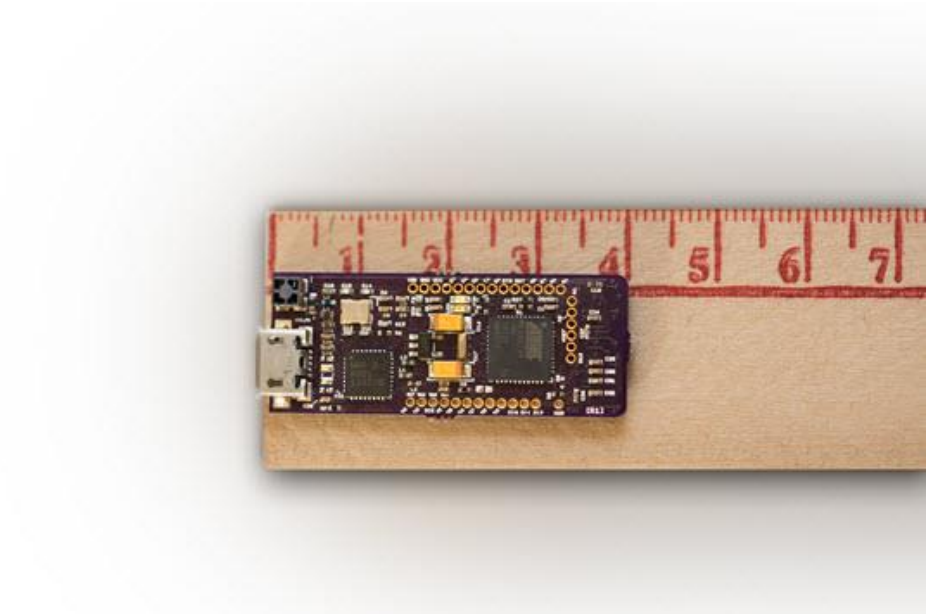
Şekil 4.6 : 50 derecede Güneş kamerasından alınan görüntü.

$+40^{\circ}$’ ye geri dönüldüğünde, sistemde CubeComputer, CubeSense bileşenlerinin başarıyla çalışmasına rağmen; CubeControl Motor MCU’sunun çalışmadığı gözlenmiştir. Buna rağmen teste devam edilmiş ancak Motor MCU bileşeni oda koşullarına dönene kadar çalışmamıştır.

Olası sorunların tespiti için TVAC testinin Eylül 2015’te tekrarlananması planlanmaktadır.

5. HAVALI YATAK TEST DÜZENEĞİ TASARIMI

Bu bölümde amaç, küresel bir hava yatağı için ön tasarımın yapılarak üretimden önce kullanılması gereken hesaplama ve programların tamamlanmasıdır. Küresel hava yatağı ağırlıksız ortam şartlarını sağlayabilmek için kullanılacaktır. Temel olarak 3 parçadan oluşur. İlk parça, basınçlı havanın küreye ulaştırıldığı alt bölüm, ikinci kısım ise küre (normal tasarımda yarı küre olmasına rağmen, tezdeki amaç doğrultusunda tam küredir.), üçüncü kısım ise regülatörlü bir kompresördür. Bahsedilen küre uydunun içine yerleştirilebilmesi için boş bir pleksi küre olarak tasarlanacaktır. Bu sayede tüm uydunun 3 eksende herhangi bir engel olmaksızın dönebileceği şartlar sağlanabilir. Bunun için ilk olarak hesaplamaların gerçekleştirildiği (gereken kompresör basıncı, açıklık çapı ve kompresörün harcayacağı gücü) bir Matlab kodu oluşturulacak ve Catia'da yapılacak çizimler de bu doğrultuda gerçekleştirilecektir. Ayrıca uydunun ölçümleri ve hareketlerinin doğruluğunun kıyaslanabilmesi için sisteme ek bir IMU (inertal measurement unit) eklenmesi planlanmıştır. Bunun için de Şekil 5.1'de görülen IMUduino seçilmiştir.



Şekil 5.1 : IMU ve Mikroişlemci [6].

4 cm uzunluğundaki ve 2 gr ağırlığındaki bu ürün hem mikroişlemci hem IMU (10 DOF) hem de BLE (Bluetooth Low Energy) özelliği taşımaktadır. Böylelikle sensör

ve mikroişlemci için ayrı sistemlerin kullanılması önlenecek ve BLE özelliği sayesinde kablosuz veri alımı sağlanabilecektir. Böylelikle hava yatağında gereksiz ağırlık ve yer işgalleri minimuma indirilecektir. Bir tür Arduino olan bu sistem üzerinde ivmeölçer, jiroskop, yükseklikölçer ve manyetometre bulundurmaktadır. Bu sistemin çalıştırılabilmesi için açık bir kaynak kodu kullanılmıştır. Ancak seri porttan alınan ölçüm verilerinin bir Matlab dosyasına alınması ve bunların görselleştirilmesi için Matlab kodları oluşturulacaktır.

5.1 IMUduino'nun Programlanması

Test düzeneği için gereken programlar iki ana başlık altında incelenebilir. Algılayıcıların fitlereler yardımıyla yönetimi ve elde edilen verilerin BLE yardımıyla kablosuz olarak bilgisayara iletilmesi. Bu ana başlıklardan sadece algılayıcılar kısmı gerçekleştirilmiştir.

5.1.1 IMUduino algılayıcıların programlanması

Test düzeneğini yapısı göz önüne alındığında 3 eksende dönme hareketini yüksek başarı ile ölçümleyebilen ve sistemin atalet momentinde önemli bir değişiklik oluşturmayacak bir sistem oluşturmak amaçlanmıştır. Bu doğrultuda seçilen IMUduino'nun üzerinde jiroskop, ivmeölçer, manyetometre ve barometre algılayıcıları bulunmaktadır. Ancak barometrenin görevimizde kullanılması için çok düşük çözünürlüğe sahip olması (10 cm) ve test düzeneğin sadece 3 eksende dönme yeterliliği bulunması sebebiyle bu algılayıcı kullanılmayacaktır.

ADCS'ye gönderilen komutlar doğrultusunda oluşan yönelim hareketlerinin sonucunda elde edilen yönelim değişimlerini kıyaslayabilmek amacıyla elde edilen açı değişimleri roll, pitch ve yaw olmalıdır.

3 eksendeki açı değişimlerinin gözlemleyebilmek için jiroskop ve ivmeölçer kullanılması planlanmıştır. Ancak ivmeölçerin yaw açısı verisi verememesi sebebiyle elde edilen ölçümler yüksek hata değerlerine sahiptir. Bu hatayı engellemek amacıyla manyetometre verileri kullanılarak yaw açısı elde edilmesi planlanmıştır.

Algılayıcılardan elde edilen verilerde hata oranını düşürmek amacıyla Kalman Filtresi kullanılmıştır. Ayrıca jiroskop ve ivmeölçer verileri benzer özellikler taşımaktadır. Ancak hata mekanizmalarının farklılıkları sebebiyle bu verileri

birleştirerek daha yüksek doğruluklu sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu işlem "Tümleştirici Filtre" (Complementary Filter) kullanılmıştır. Ayrıca daha karmaşık olan Kalman filtresi ile kıyaslanmıştır. Bahsedilen bu çalışmalarda ön aşama olarak, referans adresinde bulunan "MPU6050_HMC5883L.ino" kodu kullanılmış, başarılı sonuçlar elde edilmiştir [7].

5.1.2 Tümleştirici filtre

Tümleştirici filtrede, aynı olayı ölçümleyen iki farklı algılayıcıdan alınan veriler birleştirilerek daha yüksek doğruluklu sonuçlar elde etmek amaçlanır. Basit deyişle algılayıcıların füzyonu olarak ifade edilebilir.

Bu çalışmada x ve y eksenlerindeki yönelim verileri ivmeölçer ve jiroskoptan alınırken, z eksenindeki ölçümler manyetometre ve jiroskoptan alınır. Jiroskoplar hızlı cevap vermelerine rağmen, zaman kayması hatasına maruz kalır. Bu hata açı bilgisinin integrasyon yoluyla (oran jiroskobu olduğu için) elde edilmesi sebebiyle zamanla giderek artan bir seyir izler. Bunun yanı sıra ivmeölçer de sürekli-kararlı durumlarda oldukça doğru sonuçlar vermesine rağmen sistemin hareketinden kaynaklanan hatalar (gürültü) tarafından bozuntuya uğrar. Benzer sorun manyetometre ve jiroskop ikilisinde de meydana gelmektedir. Bunlar göz önüne alındığında bu iki verinin uygun koşullarda birleştirilerek daha doğru sonuçlar alınması sağlanabilir.

Tümleştirici filtresinin denklemi şu şekilde yazılabilir [8];

$$y(k) = a\left(y(k-1) + x_{Gy}(k)\cdot \Delta t\right) + (1-a)\,x_{Acc}(k) \qquad \textbf{(5.1)}$$

$x_{Gy}(k)$, $x_{Acc}(k)$ sırasıyla jiroskop ve ivmeölçer verileri iken Δt ise örnekleme zaman aralığıdır. a filtre katsayısı olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$a = \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \qquad \textbf{(5.2)}$$

$$\tau = \frac{a \cdot dt}{1-a} \qquad \textbf{(5.3)}$$

τ ise zaman sabiti olarak adlandırılır, algılayıcı karakteristikleriyle ilgilidir ve deneme-yanılma yöntemi ile elde edilir. Alçak geçirgen filtrelerde bu sabit değerinden büyük olan sinyaller herhangi bir değişime uğramadan geçerken, daha

küçük değerler geçemez. Yüksek geçirgen filtrelerde ise tam tersi geçerlidir [9]. Dolayısıyla bu sabitin sinyal süresi ile ilgili olduğu çıkarılabilir.

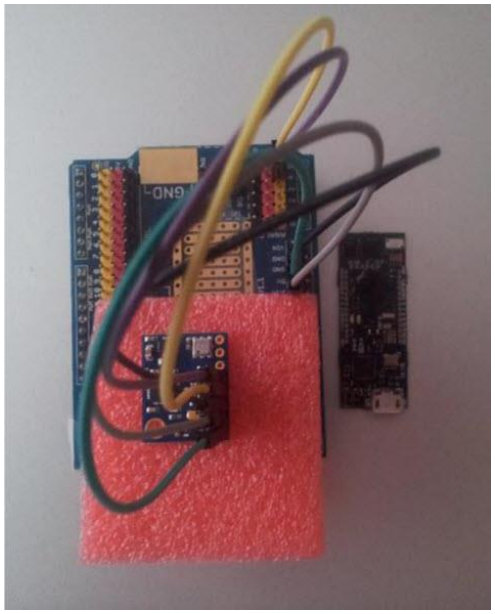
İvmeölçer ve jiroskop ikilisinden oluşan bir sistemde ivmeölçer verilerinin bulunduğu kısım alçak geçirgen filtreyi temsil ederken, jiroskop verileri ise yüksek geçirgen filtre kısmındadır. Yani uygun seçilirse ivmeölçer uzun süreli veri alımlarında daha etkin olacak, jiroskop ise kısa süreli veri alımlarında etkili olarak daha doğru sonuçlar verecektir.

IMUduino'da da x ve y eksenlerinde için jiroskop ve ivmeölçer verilerini birleştirirken, z ekseninde jiroskop ve manyetometre verilerini tümleştiren bir kod kullanılarak, tümleştirici filtrenin etkileri gözlenmiştir. Kalman filtresi ile kıyaslama şansı da değerlendirilmiştir.

5.1.3 Algılayıcı sistemin programlanması sırasında karşılaşılan sorunlar

IMUduino'nun beklenmedik arıza oluşmuş ancak, aynı sensörleri üzerinde barındıran GY- 87 algılayıcı birimi Arduino Uno aracılığıyla kullanılmasıyla bu sorun aşılmıştır.

Ancak oldukça hantal ve hava yatağında kullanılmak için uygun bir sistem olmadığı GY-87+Arduino ve IMUduino'nun kıyaslandığı Şekil 5.2'de açıkça görülebilir.



Şekil 5.2 : Solda Arduino Shield üzerindeki süngerde GY-87, sağda IMUduino.

Bu sebeple test yatağında kullanılacak sistemde değişiklik yapılmayarak, yeni bir IMUduino ile devam edilecektir.

5.1.4 Algılayıcı programı ve elde edilen sonuçlar

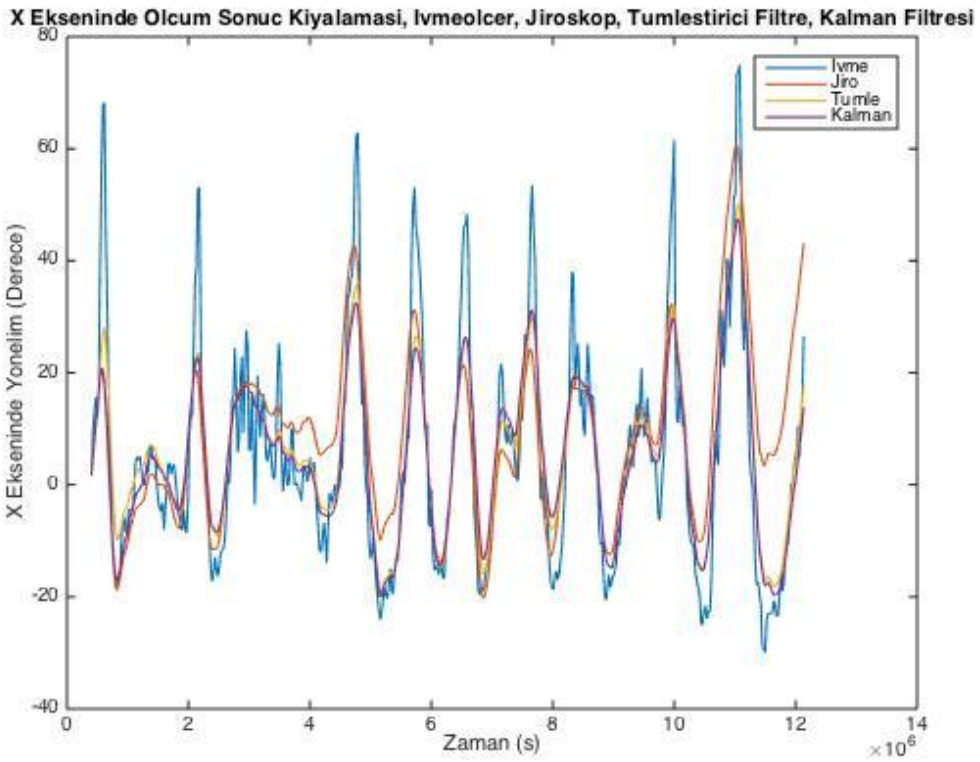
Bu sonuçlar MPU6050_HMC5883L.ino kodunun IMUduino üzerinde koşturulması ile seri porttan elde edilen verilerin EK B' de verilen Matlab kodu yardımıyla, Matlab' a aktarılmış ardından da, EK C' deki kod ile grafikler haline getirilmiştir. Buradaki asıl amaç, sistemden elde edilen verilerin, ham (algılayıcı türleri belirtilerek), Kalman filtreli ve tümleştirici filtreli hallerin kıyaslanmasıdır.

Şekil 5.3' teki grafikten görüldüğü üzere algılayıcı türlerinden alınan veriler ile filtreli sonuçlar arasında bariz farkların oluştuğu anlaşılmaktadır. Ancak filtreleri kıyaslayabilmek için Şekil 5.4' teki grafiğe bakmak gerekmektedir ki her iki filtrenin de oldukça yakın sonuç verdiği açıkça görülebilir.

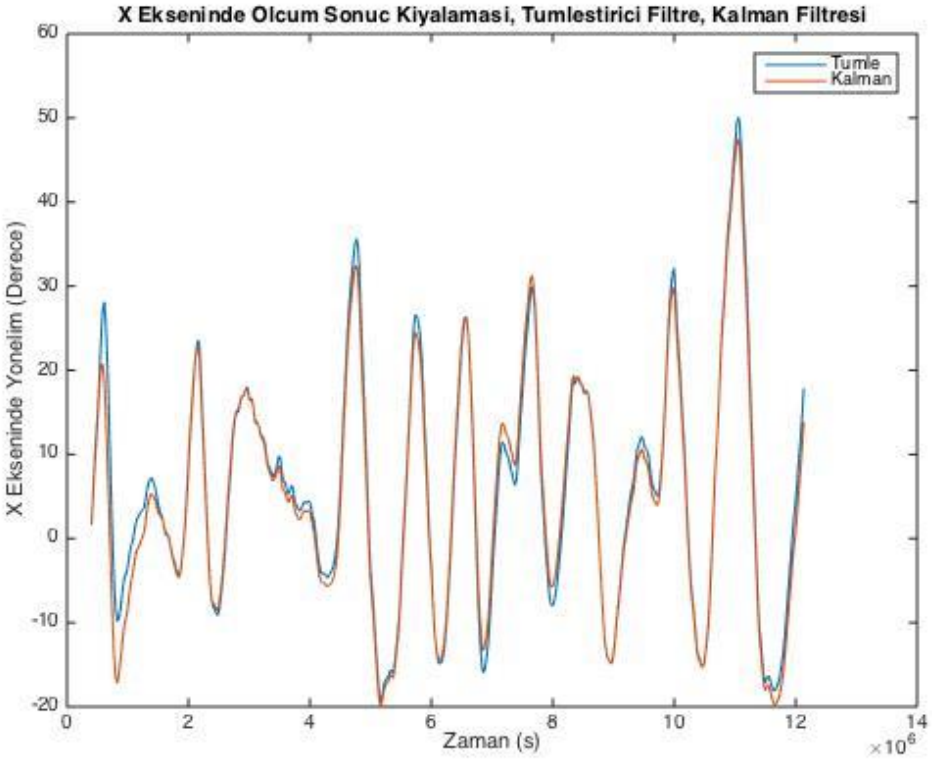
Y ekseninde alıcı ve filtre sonuçlarını inclemek için Şekil 5.5' e bakılmalıdır. Ancak jiroskopta belirgin olan kayma ve ivmeölçerde etkin olan bozuntulara rağmen filtreli sonuçlar (Şekil 5.6' da gösterilen) tıpkı x eksenindeki gibi başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8' de ise z eksenindeki sonuçlar incelenmiştir. Şekil 5.7' de algılayıcı ham verileri Kalman ve tümleştirici verileri kıyaslanmıştır. Her iki grafikte de sıçramalar göze çarpmaktadır. Bunun sebebi ise bu eksende algılayıcıların maruz kaldığı hareketlerdir. Benzer başarılı filtre sonuçları da Şekil 5.8' de görülmektedir.

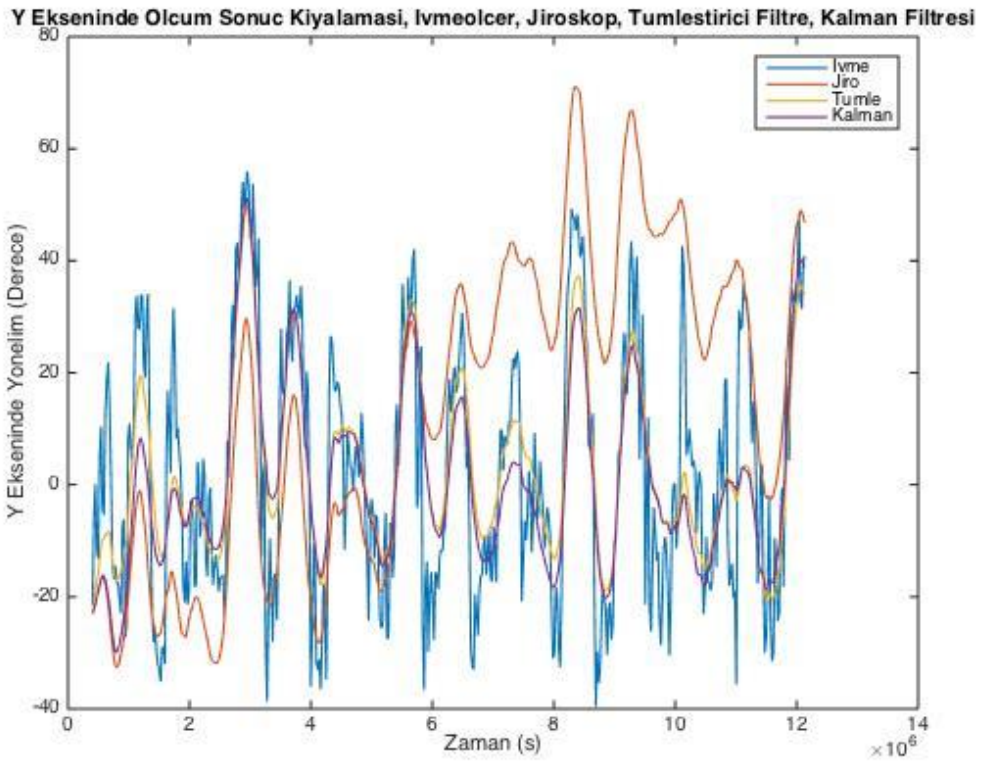
Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 algılayıcıların hareketlerini 3 eksende aynı zamanda ölçümleyerek, 3 eksen sonuçlarının birlikte gözlemlenmesini sağlamıştır. Şekil 5.9' daki grafik incelendiğinde beklendiği gibi ivmeölçerde hareketten kaynaklı bozuntular oldukça belirgindir. Şekil 5.10' da ise jiroskop verileri görülmektedir. Zaman ilerledikçe beklenen üzere kaymalar başlamıştır. Şekil 5.11' de tümleştirici filtre ile kayma ve bozuntuların ortadan kalktığı görülmektedir. Şekil 5.12' de ise benzer şekild algılayıcı bazlı bu sorunların çözümlendiği barizdir.



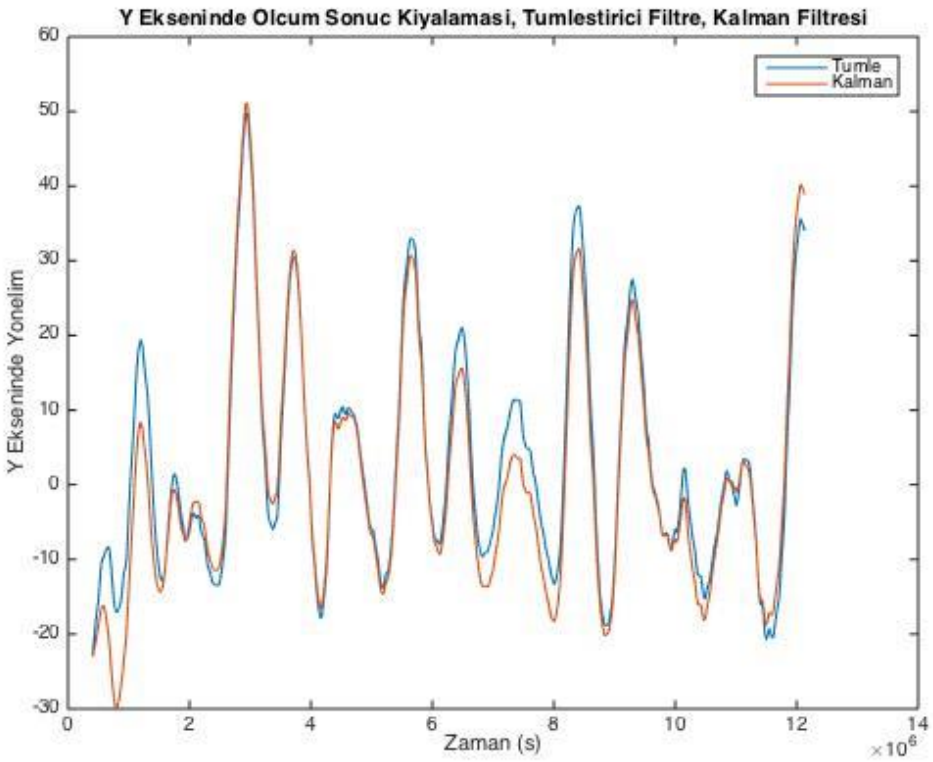
Şekil 5.3 : X Eksenindeki Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması.



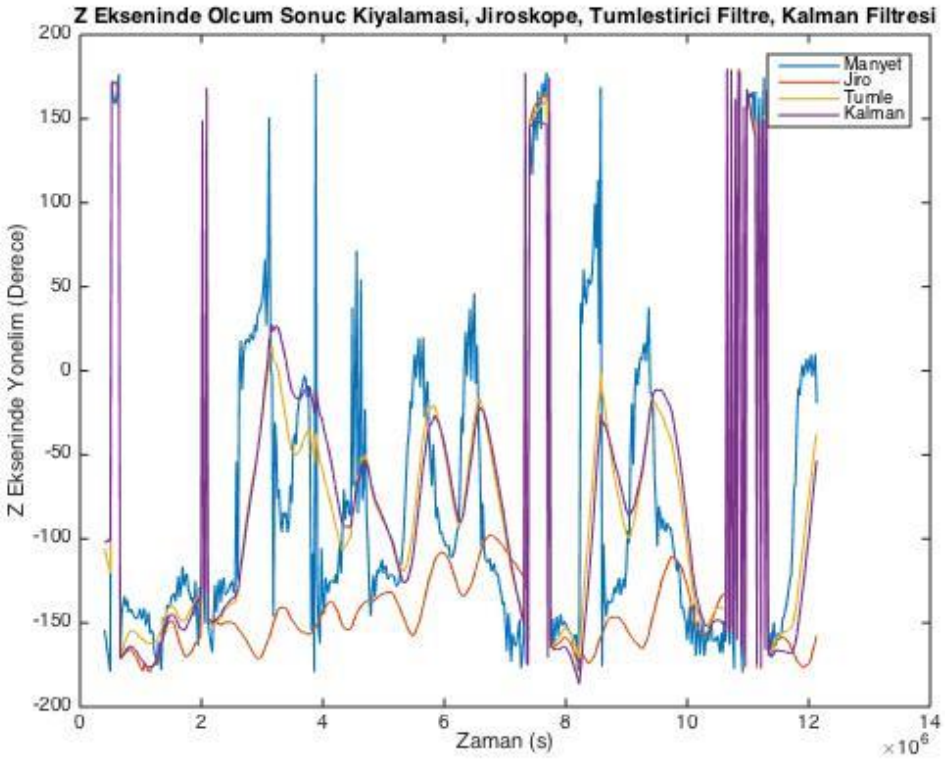
Şekil 5.4 : X Eksenindeki Filtreli Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması.



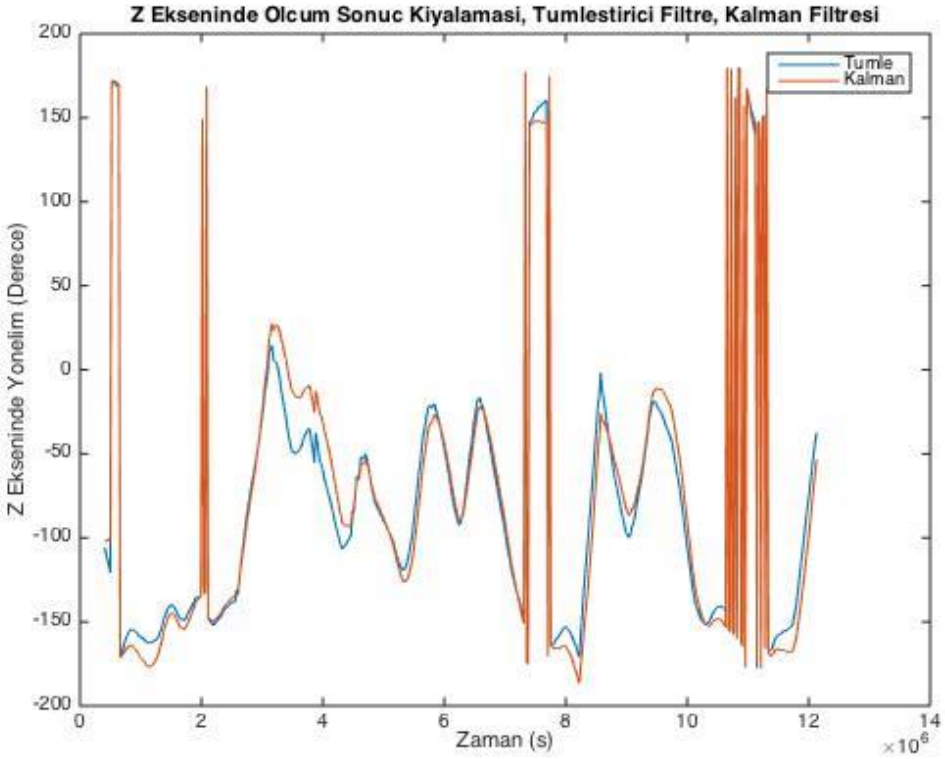
Şekil 5.5 : Y Eksenindeki Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması.



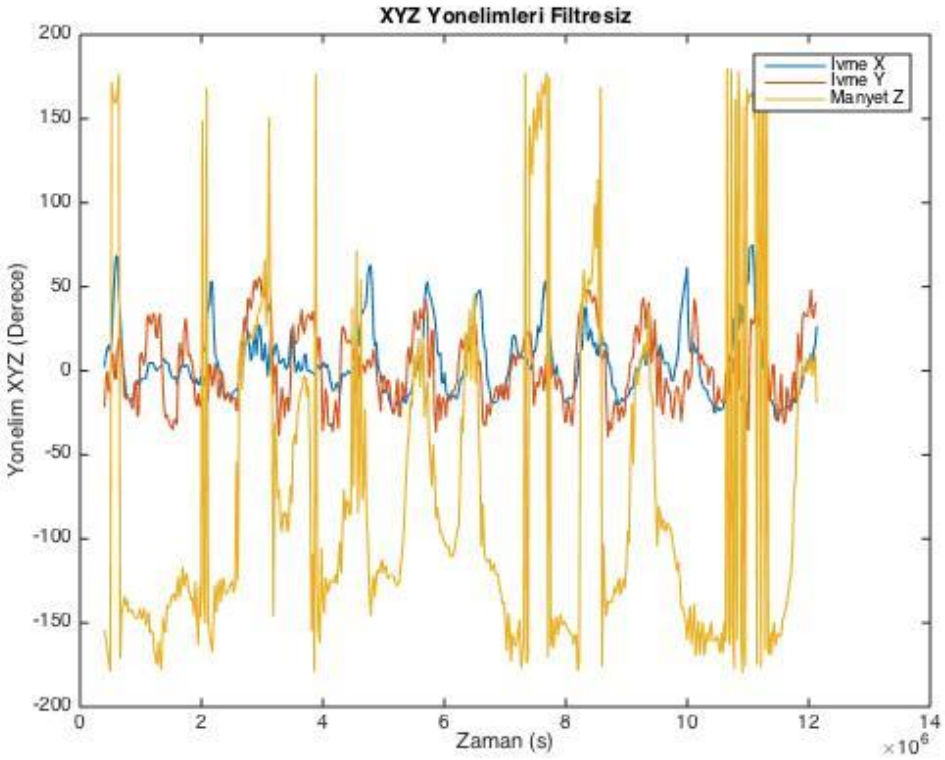
Şekil 5.6 : Y Eksenindeki Filtreli Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması.



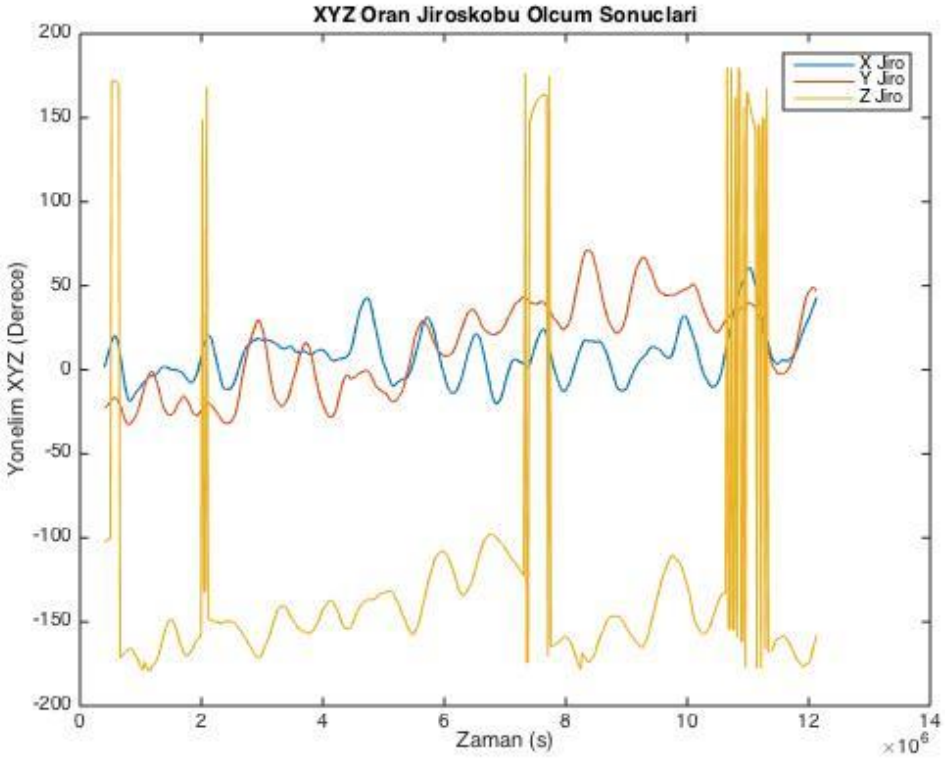
Şekil 5.7 : Z Eksenindeki Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması.



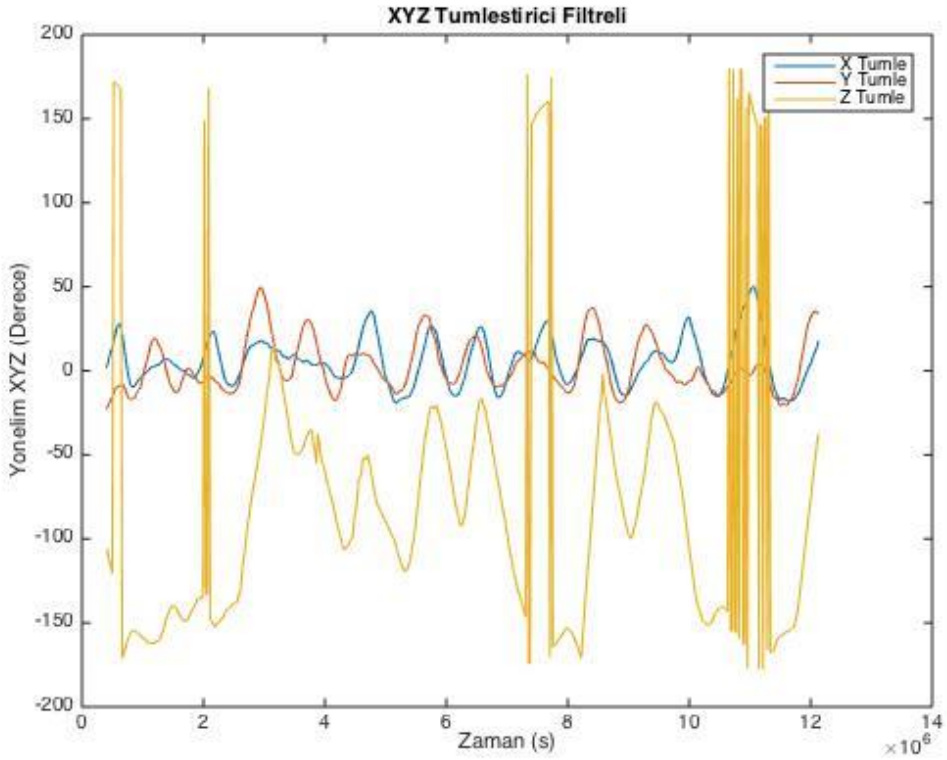
Şekil 5.8 : Z Eksenindeki Filtreli Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslanması.



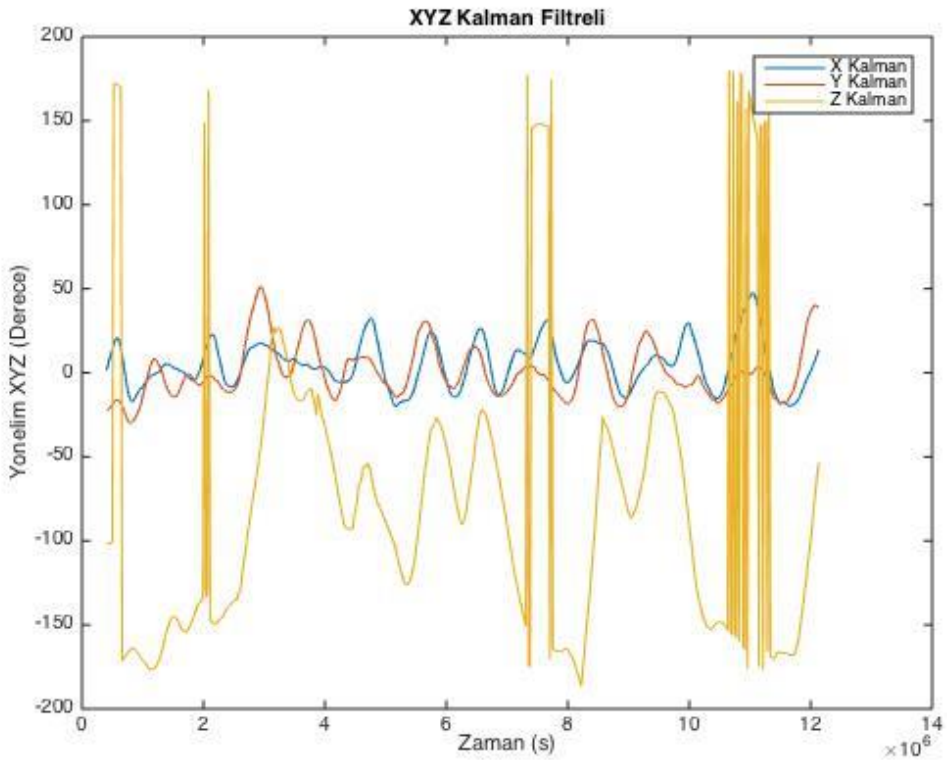
Şekil 5.9 : İvmeölçerden alınmış filtresiz XYZ yönelim bilgileri.



Şekil 5.10 : Jiroskoptan alınmış filtresiz XYZ yönelim bilgileri.



Şekil 5.11 : Tümleştrici filtreli XYZ yönelim bilgileri.



Şekil 5.12 : Kalman filtreli XYZ yönelim bilgileri.

Tüm sonuçlar kıyaslandığında, tümleştirici filtre kullanımının bu uygulama için Kalman filtresi kadar yüksek doğruluklu sonuçlar verdiğinden dolayı, havalı yatak tasarımı için "tümleştirici filtre" kullanılması uygun görülmüştür.

5.2 Havalı Yatak Tasarımı

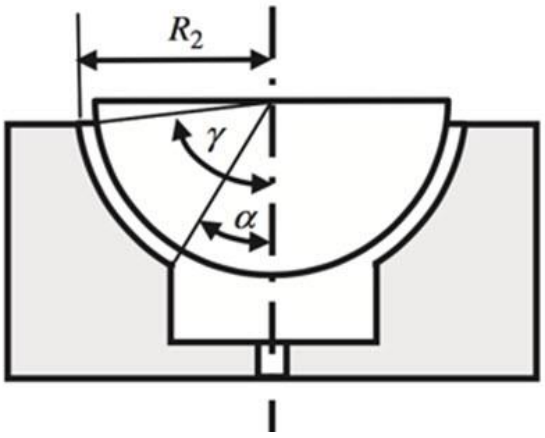
Havalı yatak tasarımı için pek çok çalışmada kullanılmış olan küresel havalı yatak tasarımı yapılması kararlaştırılmıştır.

Ancak bu tasarımlar sadece bir eksende kısıtlama olmadan hareket edebilen sistemlerdir. Bu sebeple tasarımda yarımküre tam küre olarak değiştirilerek 3 eksende de bu hareket serbestisine sahip olunması amaçlanmıştır.

5.2.1 Havalı yatak hesaplamaları

Havalı yatak tasarımının ilk aşamasında, uydunun ağırlığı, başka bir değişle düşey yük T ve yatağın çapı belirlenir. Ardından yatağın çeşitli geometrik ve basınç katsayıları optimum değerler olarak alınarak, uygulanması gereken basınç değerleri ve kompresörün güç ihtiyacı hesaplanır. Son aşamada ise hava çıkışı açıklıklarının çapları elde edilerek sayısal tasarım tamamlanır. Belirtilen işlemler 9 no'lu referanstan faydalanılarak yapılmıştır.

Hesaplardan önce katsayılar (ne anlama geldikleri Şekil 5.13' ten anlaşılabilir), optimum değerler olan $\alpha = 35^{\circ}$, $\gamma = 70^{\circ}$ ve $\beta = K_{go} = 0.5$ olarak alınmıştır.

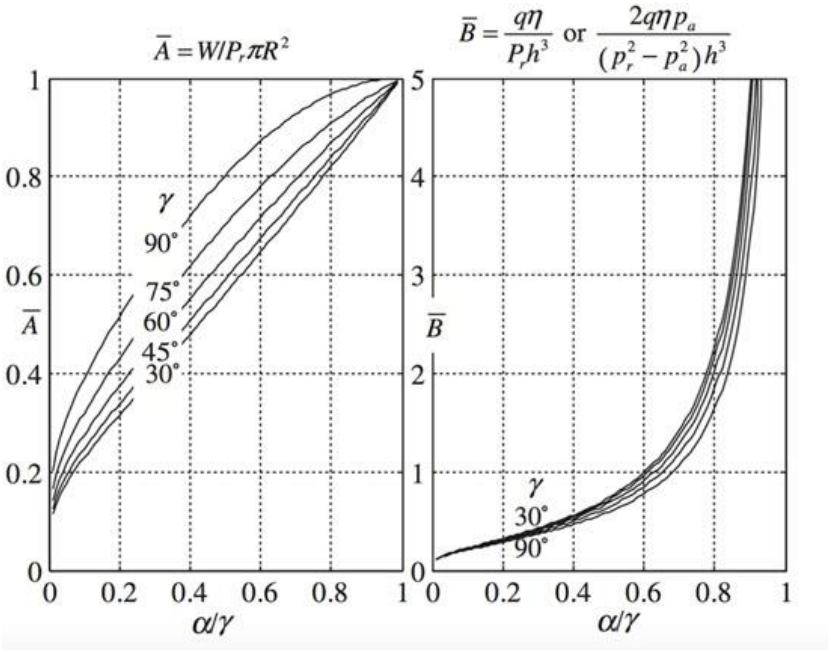


Şekil 5.13 : Küresel yatağın geometrik bileşenleri [9].

Dış ve iç küreler arasındaki fark ise $h_o = 20 \ \mu m$ olarak verilmiştir [9].

Aşağıda ilk adım olan basınç ve güç hesapları verilmiştir.

Düşey eksenel yükün birimsiz versiyonun, düşey eksenel yük ve mafsal çapı ve $\bar{A}$ katsayısı (Şekil 5.14'ten alınır) ile ilişkisi aşağıdaki denklemde görülebilmektedir.



Şekil 5.14 : Küresel yatak yükleme datası, A ve B [9].

Düşey eksenel yükün birimsiz versiyonu $\bar{T}$,

$$\bar{T} = \frac{T}{P_s D^2} = \frac{\beta\pi \sin^2\gamma}{4} \cdot \bar{A} \tag{5.4}$$

Gösterge basıncı,

$$P_s = T / D^2 \bar{T} \tag{5.5}$$

Toplam kaynak basıncı,

$$p_s = P_s + p_a \tag{5.6}$$

Yatağa ulaşan ölçümlenen basınç,

$$P_{ro} = P_s K_{go} \tag{5.7}$$

Yatağa ulaşan toplam basınç,

$$p_{ro} = P_{ro} + p_a \tag{5.8}$$

Akış faktörü,

$$K_{go}\bar{B} \tag{5.9}$$

Serbest akışın hesaplanması,

$$q = P_s h_o^3 K_{go} \bar{B} \cdot \frac{p_{ro} + p_a}{2p_a} \tag{5.10}$$

Pompanın harcayacağı güç,

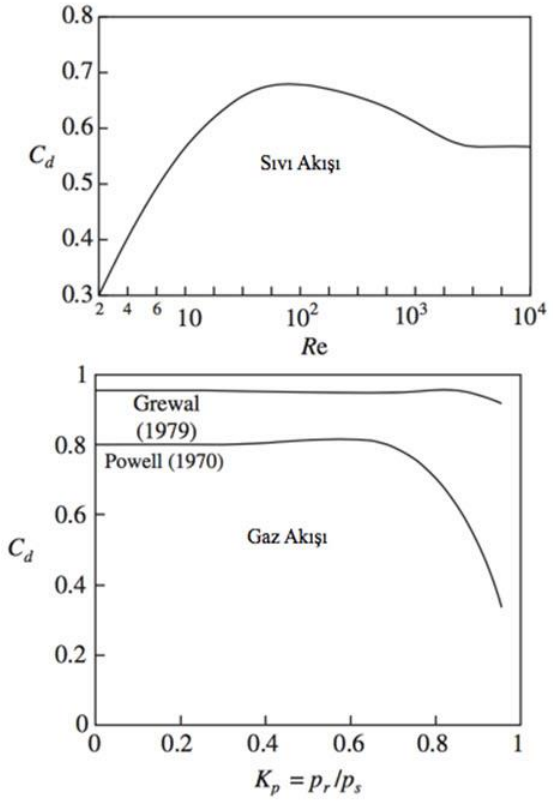
$$H_p = p_a q_a \ln\left(\frac{p_s}{p_a}\right) \tag{5.11}$$

Yatağın genel tasarımı tamamlandıktan sonraki adımda hava çıkışlarının çapının belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşama gerekli taşımanın sağlanması ve akışın boğulmaması, dolayısıyla da stabilite için oldukça önemlidir.

Açıklık tasarımı için öncelikle basınç oranları elde edilir,

$$K_p = p_{ro} / p_s \tag{5.12}$$

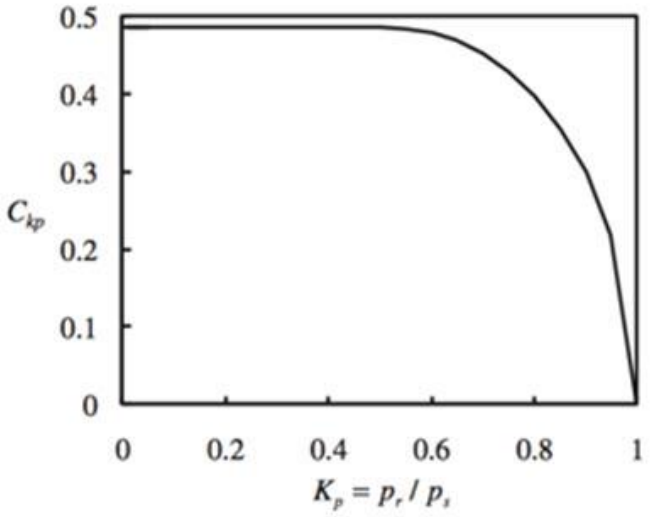
İkinci adımda da Şekil 5.15'teki grafikten açıklık faktörü C_d belirlenir,



Şekil 5.15 : Cd değerinin açıklık akışı için değişim grafiği [9].

Ardından C_{kp} değeri Şekil 5.16' teki grafikten okunur ya da (5.13) no'lu denklemden elde edilir.

$$C_{kp} = \sqrt{\frac{k}{k-1}\left[K_p^{2/k} - K_p^{(1+1/k)}\right]} \tag{5.13}$$



Şekil 5.16 : Açıklıktan geçen akım için faktörü [9].

Dördüncü adım olarak açıklık alanı belirlenir, son işlemde de olan çap değerine ulaşılabilir.

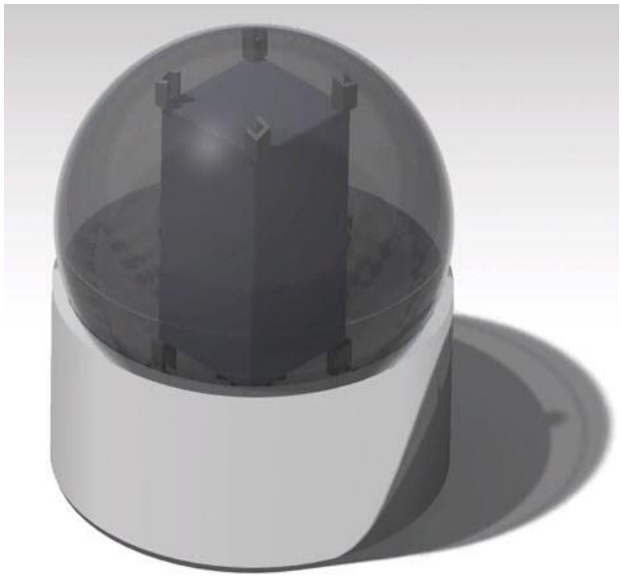
$$A_o = \frac{q_r}{C_d C_{kp}} \frac{p_a}{p_s} \sqrt{\frac{\rho_a}{2p_a}} \tag{5.14}$$

$$d_o = \sqrt{\frac{4A_o}{\pi}} \tag{5.15}$$

5.2.2 Havalı yatak tasarım çizimleri

Havalı yatak tasarlanırken uydunun 3 eksende hareket serbestliğine sahip olması ve üretim kolaylığı ön plana alınmıştır. Dolayısıyla tüm uydunun içerisine yerleştirilebileceği bir sistem tasarlanmıştır. Bu da normalde yarım küre olan bu sistemler mafsalın tüm küre olarak farklı bir tasarıma sahiptir.

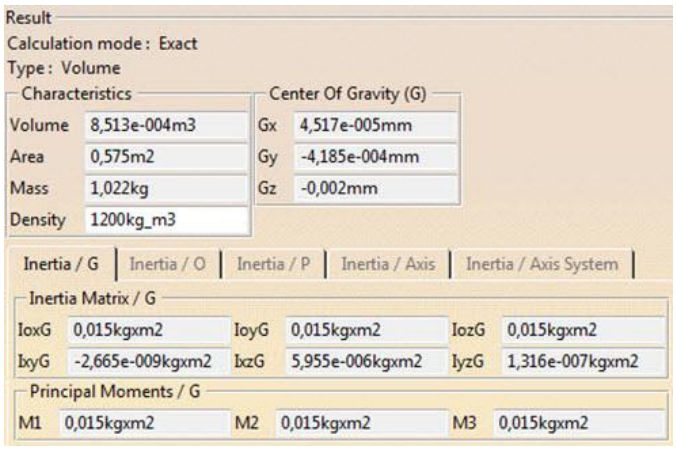
Şekil 5.17’ de görülen bu sistemde şeffaf yapı da olan tam küre mafsal bu sistemi diğer küresel hava yataklarından ayırır.



Şekil 5.17 : Hava yatağı test düzeneği.

Test düzeneği temel olarak 4 bileşenden oluşmaktadır. Yukarıdaki resimde görülen kısımlar, uydunun içerisine yerleştirileceği 30cm çapındaki ve 3mm kalınlığındaki pleksi küre ve 3 boyutlu yazıcıda yazılacak tutmaçlardan oluşmaktadır. Diğer kısımlar ise kompresör ve basıncı istenilen düzeyde tutmak üzere kullanılacak regülatörden oluşmaktadır.

Şekil 5.18 ise sistemin uyduya test esnasında 1 kg’lık bir kütle artışına sebep olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.18 : Küre ve tutmaçların ataletsel özellikleri.

Ancak bu atalet değişikliği sorunu CubeSuppot yapılacak atalet bilgisi güncellemesiyle aşılacaktır.

Alt kısımda ise kompresör ve regülatorden geçerek gelen basınçlı havanın 6 adet 0.25 mm çaplı, 60 derecelik aralıklarla yerleştirilmiş 6 tane delikten oluşan çıkışlara ileten parça bulunmaktadır. Bu parçanın son aşamada üretiminin alüminyumdan yapılması düşünülmektedir, Şekil 5.19' da bir örneği görülebilir.



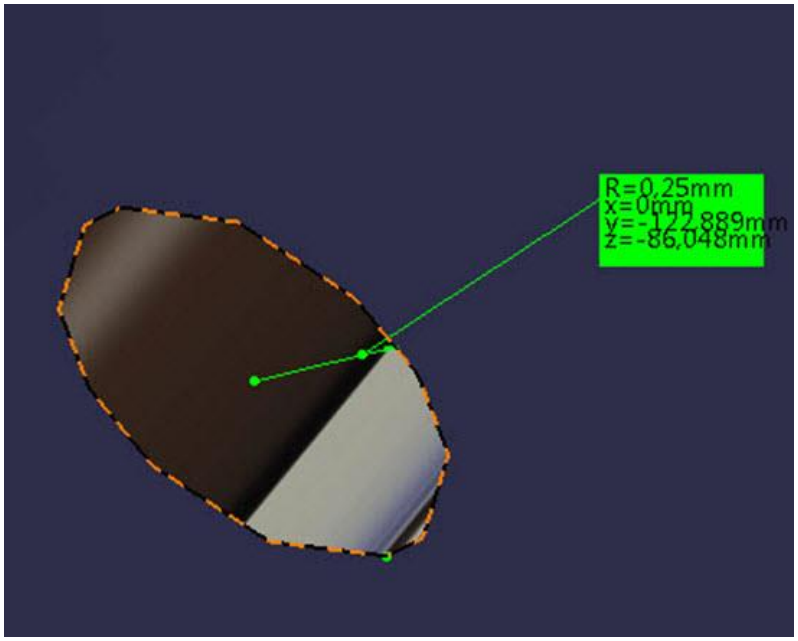
Şekil 5.19 : Test sisteminin alt bölümü.

Delik çapları ve sağlanması gereken basınç değerleri ekte yer verilen Matlab kodu yardımıyla hesaplanmaktadır. Şekil 5.20' de ise bu deliklerin ne kadar küçük oldukları gözlemlenebilir.



Şekil 5.20 : Havalı yatak basınç çıkış noktaları.

Daha önce belirtildiği gibi delikler 0.25 mm çapında olduğu için görülmesi oldukça zordur. Bu sebeple Şekil 5.21’ de yakın bir görünüş verilmiştir.



Şekil 5.21 : Çıkış Delik Çapları.

Çizimlerdeki sistem 5 kg ağırlığındaki 2u’luk bir uydu için tasarlanmıştır. Ancak kütle değişimi aralığı küçük olduğu için çıkış çaplarının değişimi çok küçük olacağından sadece basınç değişimleri hesaplanarak sistem küp uydular için kullanılabilecektir.

6. HELMHOLTZ KAFESİ TASARIMI

6.1 Helmholtz Kafesi Bileşenleri

Bu aşamada ise bir Helmholtz kafesinin ön tasarımı için gereken kodların oluşturulması ve sonlu elemanlar analizi ile tasarımın sonuçları görselleştirilmesi amaçlanmaktadır. Öncelikle Helmholtz kafesindeki her bir Helmholtz bobini için manyetik alan hesabını bobin çapı, uygulanan akım ve sarım sayısına bağlı olarak yapan ve sonuçları görselleyen bir Matlab kodu oluşturulacaktır. Ayrıca tasarlanan bu kafesin Comsol multifizik modelleme programı aracılıyla sonlu elemanlar modeli hazırlanarak analizler gerçekleştirilecek ve elde edilen manyetik alanların 3 boyutlu olarak görselleştirilmesi sağlanacaktır.

Ek olarak uygulanması gereken manyetik alanın hesabı için 3 bileşenden oluşan bir kod grubu oluşturulacaktır. SGP4, eksen dönüştürücü ve IGRF' ten oluşan bu kod grubuyla yörüngedeki bir uydunun istenen bir zamanda üzerinde etkiyen manyetik alanların büyüklüğü xyz ekseninde hesaplanması amaçlanmaktadır. SGP4 Simplified Perturbations Model) bir bozuntu modelleyicidir ve burada TLE (Two Line Elements) verisi yardımıyla yörünge ilerleticisi olarak kullanılacaktır. TLE verisinin alındığı tarihten itibaren dakika cinsinden ilerletme yapılarak uydunu konumu XYZ (km) cinsinden TEME (True Equator Mean Equniox) eksen takımında elde edilecektir. Koordinat dönüştürücü program bu noktada TEME verisini ECEF (Earth Centered Earth Fixed) dönüştürmek için kullanılacaktır. Ayrıca yine XYZ cinsinden olan bu sonuçlar enlem-boylam-irtifa cinsine dönüştürülerek, IGRF için kullanıma hazır hale getirilmelidir.

IGRF (International Geomagnetic Reference Field) dünya etrafındaki manyetik alan hesaplamalarını, hem matematiksel model hem de uzay araçlarından alınan verilerin entegre edilmesi ile elde edilen bir model aracılığıyla yapar. Ancak bu tezde kodun kendisi yerine bir Matlab Aerospace Toolbox fonksiyonu olan "igrf11magm" kullanılacaktır. Enlem, boylam ve irtifa verilerinin yansıra zaman bilgisi girilerek XYZ ekseninde (nT) cinsinden manyetik alan değerleri elde edilmesi amaçlanır.

6.2 Helmholtz Kafesi Matematiksel Tasarımı

Dairesel Helmholtz bobinleri için üretilen manyetik alanlar aşağıdaki prosedür izlenerek elde edilecektir. Dairesel bobinlerde üretilen elektromanyetik alanın kaynağı olan bobinden geçen akım Maxwell denklemleriyle uyumludur.

Düşük frekanslı akım tarafından uyarılan bobinde sistemin kullandığı enerjinin neredeyse tamamı manyetik alan olarak depolanır [10]. Bu enerji miktarı devre teorisini kurallarına uygun olarak hesaplanabilmektedir. Devre teorisi, Maxwell denklemlerinin manyetik alanlar için kuvvet serisinin ilk terimini kullanarak elde edilen çözümü olduğundan Maxwell denklemlerinin özel bir çözüm kolu olarak değerlendirilebilmektedir. Manyetik alanlar kısmi-statik olarak da adlandırılan bu yaklaşımla elde edilir.

Devre elemanına uygulanan sinüzoidal akımın/gerilimin dalga boyu fiziksel elemanın boyundan oldukça büyük olması durumunda kısmi-statik yaklaşımından elde edilecek sonuçlar genel başparmak kuralı açısından yüksek doğrulukta olacaktır. Bu kısıtlamanın gerçeklenebilmesi, gerilim/akım fazın fiziksel elemanla aynı uzaysal boyutlara sahip olması gereklidir. Yani dairesel bobinlerde bu boyut çemberin çevresi kadardır. Akımda zamanla değişiklikler olabilir ama her bir zaman aralığında sarımlarda aynı akım değeri ölçülmelidir. Dolayısıyla, kısmi-statik yaklaşımı $2\pi a \ll \lambda$ (a çemberin yarıçapı olmak üzere) şartı sağlandığında başarılı sonuçlar verecektir.

6.2.1 Helmholtz kafesi matematiksel tasarımı işlem basamakları

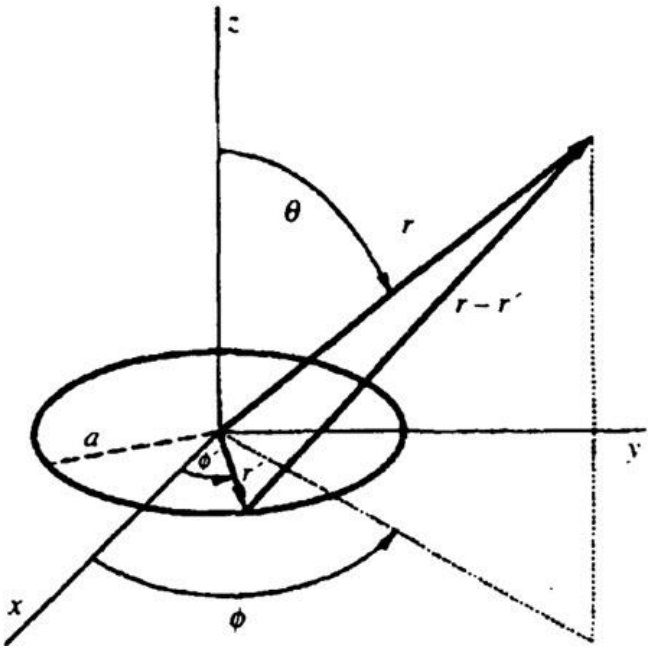
Bu bölümde bir sarımlık bir Helmholtz bobinin tarafından üretilen manyetik alanların hesabı yapılacaktır, izlenen adımlar 10 no'lu referanstan alınmıştır.

Şekil 6.1' de yarıçapı a olan bir Helmholtz bobinin eksenleri görülebilmektedir.

Sarımda I ile gösterilen akımdır. Vektör geriliminin genel bir akım dağılımı için yazılışı aşağıdaki gibidir.

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int \frac{Id\vec{l}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} \tag{6.1}$$

(6.1) denkleminde A vektör gerilimi iken I sarımdaki akımdır. Akımın yöneliminden dolayı vektör gerilimi sadece ϕ bileşeninden etkilenir.



Şekil 6.1 : Elektro-manyetik alan gösteriminde kullanılan dairesel bir bobinin koordinatları ve sistemdeki değişkenler [10].

Ayrıca vektör geriliminin simetriği de bu değişkenden de bağımsızdır. İntegrasyon işleminin yapılması sırasında sonuçların basitleştirilebilmesi için ϕ=0 olarak alınır

$$\vec{dl} = \left(-a\sin\phi', a\cos, 0\right) d\phi' \tag{6.2}$$

$$\vec{r} = \left(r\sin\theta, 0, r\cos\theta\right) \tag{6.3}$$

$$\vec{r}' = \left(a\cos\phi', a\sin, 0\right) \tag{6.4}$$

$$\left|\vec{r} - \vec{r}'\right| = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ra\sin\theta\cos\phi'} \tag{6.5}$$

Şekil 6.1'de görülen değişkenlerin integrasyona uygulanmasının ardından elemanına sahip integral ortadan kalkar ve aşağıdaki denklemde görülen A_ϕ bileşeni ile hesaplamalara devam edilir ki, bu bileşende bulunan $\cos\phi'$ elemanı integrasyon aralığının yarıya indirilmesine olanak tanır. Sonuç olarak (6.6) denklemi elde edilir.

$$A_\phi\left(r,\theta\right) = \frac{\mu_0 IA}{2\pi}\int_0^\pi \frac{\cos\phi' d\phi'}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ra\sin\theta\cos\phi'}} \tag{6.6}$$

(6.6) denklemi silindirik koordinatlar kullanılarak daha rahat ifade edilebilir. Bu durumda $r^2 = z^2 + \rho^2$ ve $\sin\theta = \rho \Big/ \sqrt{\left(z^2 + \rho^2\right)}$ bileşenleriyle denklem,

$$A_\phi(\rho,z)=\frac{\mu_0 IA}{2\pi}\int_0^{\pi}\frac{\cos\phi' d\phi'}{\sqrt{\rho^2+z^2+a^2-2a\rho\cos\phi'}} \tag{6.7}$$

haline gelir.

Bu integralin kapalı formu olmamasına rağmen bir dönüştürme işlemi ile tabule fonksiyonlar elde edilmiştir. İntegralin üst $\phi'=\pi+2\phi$ kullanılarak π/2 olarak değiştirilmiştir. Bunun sonucunda integral,

$$A_\phi(\rho,z)=\frac{\mu_0 IA}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{\left(2\sin^2\phi-1\right)d\phi}{\sqrt{(a+\rho)^2+z^2-4a\rho\sin^2\phi}} \tag{6.8}$$

İntegralin dönüştürülmesinin aşamalarında biri olarak $k^2=\frac{4a\rho}{(a+\rho)+z^2}$ tanımlanır.

$$A_\phi(\rho,\phi)=\frac{\mu_o I}{\pi k}\sqrt{\frac{a}{\rho}}\left[\left(1-\frac{1}{2}k^2\right)K(k)-E(k)\right] \tag{6.9}$$

$$K(k)=\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{d\phi}{\sqrt{1-k^2\sin^2\phi}} \tag{6.10}$$

$$E(k)=\int_0^{\frac{\pi}{2}}\sqrt{1-k^2\sin^2\phi}\,d\phi \tag{6.11}$$

K ve E her ikisi de tabule fonksiyonlardır ve tam eliptik integrallerdir. K birinci tür eliptik integral iken E ikinci tür eliptik integraldir.

Manyetik alanlar, vektör geriliminden hesaplanırken $\vec{B}=\nabla\times\vec{A}$ formülünden faydalanılır,

$$B_\rho(\rho,z)=-\frac{\partial A_\phi}{\partial z} \tag{6.12}$$

$$B_z(\rho,z)=\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\rho}\left(\rho A_\phi\right) \tag{6.13}$$

B_ρ ve B_z bileşenlerini elde edebilmek için K, E ve k türevlerinin hesaplanması gereklidir.

$$\frac{\partial K}{\partial k} = \frac{E}{k\left(1-k^2\right)} - \frac{K}{k} \tag{6.14}$$

$$\frac{\partial E}{\partial k} = \frac{E}{k} - \frac{K}{k} \tag{6.15}$$

$$\frac{\partial k}{\partial \rho} = \frac{k}{2\rho} - \frac{k^3}{4\rho} - \frac{k^3}{4a} \tag{6.16}$$

$$\frac{\partial k}{\partial z} = -\frac{zk^3}{4a\rho} \tag{6.17}$$

Son aşamaya gelindiğinde ise manyetik alan denklemleri şu şekle varır.

$$B_\rho\left(\rho,z\right) = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\frac{z}{\rho\sqrt{\left(\rho+a\right)^2+z^2}}\left[\frac{a^2+\rho^2+z^2}{\left(a-\rho\right)^2+z^2}E\left(k\right)-K\left(k\right)\right] \tag{6.18}$$

$$B_z\left(\rho,z\right) = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{\left(\rho+a\right)^2+z^2}}\left[\frac{a^2-\rho^2-z^2}{\left(a-\rho\right)^2+z^2}E\left(k\right)-K\left(k\right)\right] \tag{6.19}$$

Elde edilen bu denklemler tek sarımlı xy düzleminde uzanan bir bobin için manyetik alanın z ve ρ eksenlerindeki herhangi bir noktada bulmayı sağlar, ancak bunun için öncelikle k belirlenir ardından yukarıdaki denklemlerde yerine konur.

Helmholtz bobini aynı eksene yerleştirilmiş 2 bobinden oluşur ve merkeze (z=0 noktasına) bobin yarıçapının yarısı kadar uzaklıkta (a/4), birbirlerine ise bobin yarıçapı kadar (d=a/2) uzaklıkta bulunurlar. Bu değerler göz önüne alındığında tek bir sarım için elde edilen son denklemler şu şekildedir.

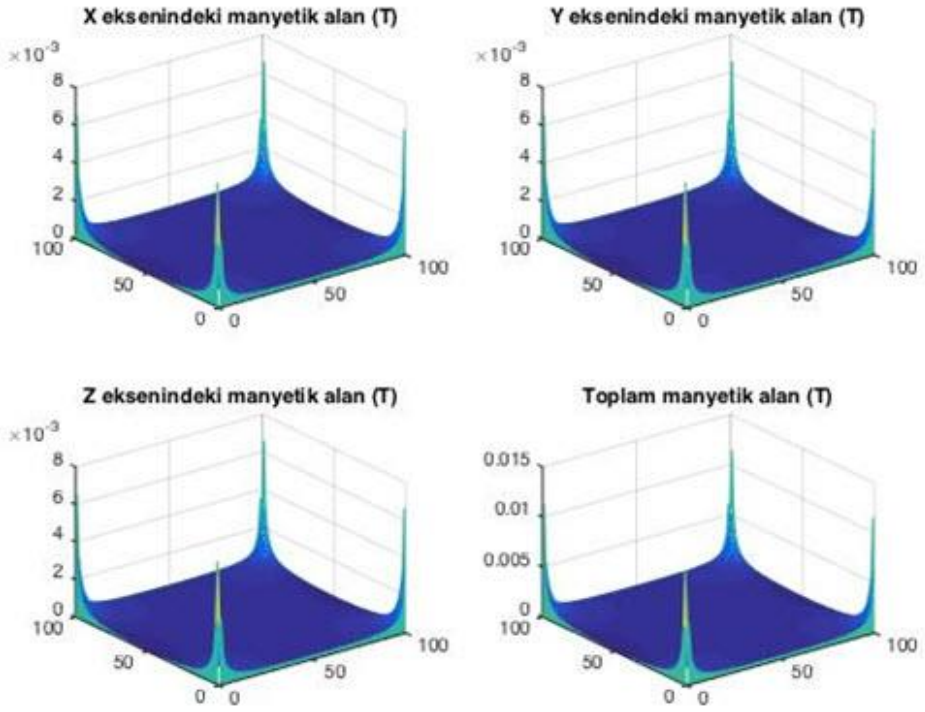
$$B_\rho^{\,total}(\rho,z) = B_\rho\left(\rho,z+d\right) + B_\rho\left(\rho,z-d\right) \tag{6.20}$$

$$B_z^{\,total}(\rho,z) = B_z\left(\rho,z+d\right) + B_z\left(\rho,z-d\right) \tag{6.21}$$

Son aşamada varılan bu denklemler tek bir sarımdan meydana gelen Helmholtz bobini için geçerlidir. Ancak yeterli ve gerekli manyetik alan bileşenlerinin oluşturulabilmesi için sarım sayısının arttırılması ve 3 eksende Helmholtz bobininin olması gereklidir. Bu sebeple xyz eksenlerine yerleştirilmiş 3 tane Helmholtz bobini ile bir Helmholtz kafesi tasarlanmıştır.

Bu bölüm altında verilen denklemler kullanılarak istenen çap, akım ve sarım özelliklerinin belirtilerek, kafes içerisindeki manyetik alanların xyz eksenlerindeki ve

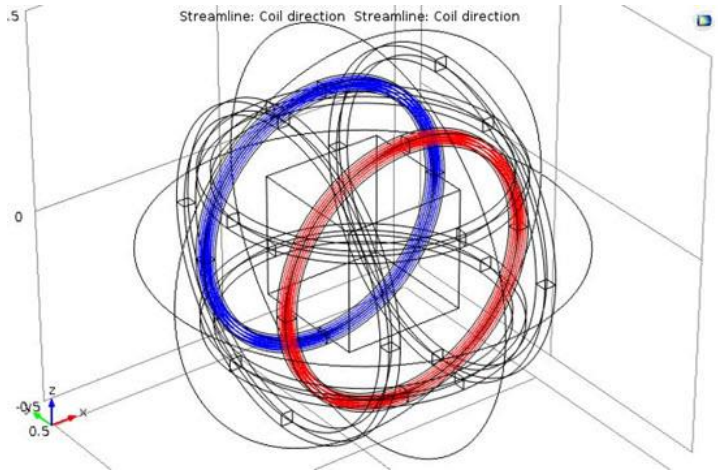
toplam manyetik alanlarının büyüklüklerinin, kullanıcı tarafından belirlenen uzaklıklardaki grid dağılımı üzerinde görülebileceği bir Matlab kodu (EK D) hazırlanmıştır. Her bir bobini 60 cm çapındaki, 20 sarımdan oluşan ve 5A akım verilen Helmholtz kafesinden üretilen manyetik alanların büyüklükleri Şekil 6.2'de görülebilmektedir.



Şekil 6.2 : Helmholtz Kafesindeki Tüm Bobinlerde Üretilen Manyetik Alanlar.

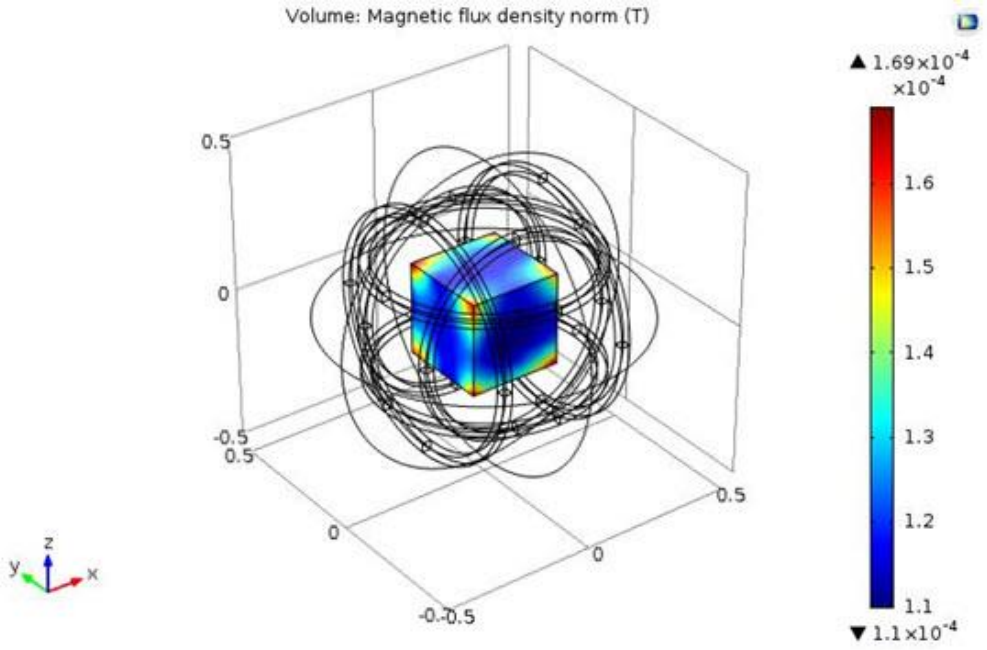
6.3 Helmholtz Kafesinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Bu bölümde amaç sonlu elemanlar yöntemiyle Comsol Multifizik Programı ile bir Helmholtz kafesi modellemesi ve analizi yapmaktır. Başlangıç olarak 100 microTesla değerinde manyetik alan oluşturabilen ve 3u'luk bir CubeSat için gerekli homojen manyetik alanı üretebilen ve bakır teller kullanan bir kafes tasarlanmış (Şekil 6.3' te tel sarımları görülmektedir) ve Comsol sonlu elemanlar programı yardımıyla çeşitli incelemeler yapılmıştır.



Şekil 6.3 : Bobin Sarımları.

Her biri 20 sarım bakır tel içeren bobinlerden geçen 5A ile elde edilen 3 boyutlu manyetik alanlar Şekil 6.4' te görülmektedir.



Şekil 6.4 : 30x30x30 cm3'lük Hacimdeki Manyetik Alan Dağılımı.

İç bölgelerde oldukça homojen bir dağılım ile 100 microTesla' yı geçen bir değer elde edilebilmiştir. Bu değer Dünya' nın manyetik alanını modelleyebilmek için yeterlidir. Ancak akım arttırılarak daha yüksek değerler de elde edilebilir.

6.4 Manyetik Alanın Modellenmesi

Helmholtz kafesinin işlevi tam olarak yerine getirebilmesi için uyduya uygulanacak manyetik alanların yörüngede karşılaşacağı değerlere benzer olması gereklidir. Bu

sebeple uydunun yörüngesinin manyetik alan özelliklerini modelleyebilecek bir programa ihtiyaç duyulur.

Uydunun karşılaşacağı manyetik alanların elde edilmesi ana olarak 2 değişkene bağlıdır. İlk değişken uydunun yörüngesidir. Uydunun yörüngesinin ilerletilerek zamana bağlı konum değişkenlerinin belirlenmesi gereklidir. Yörünge ilerletici olarak QB50 ADCS'inde de kullanılan SGP4 kullanılacaktır. İkinci değişken ise Dünya etrafındaki manyetik alandır. Manyetik alan modellemesi ise IGRF ile enlem, boylam ve irtifa değişkenlerine bağlı olarak değişen manyetik alan değerlerinin elde edilmesini hedefler.

Bu aşamada hedef, SGP4 ve IGRF kodlarının sorunsuz olarak birbirlerine entegre olmasıdır.

6.4.1 SGP4+IGRF entegre kodu

SGP (Simplified General Perturbations) 1960'larda Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri tarafından geliştirilmeye başlanmıştır [11]. Dünya'nın şekli, atmosferik sürükleme, ışıma, Güneş ve Ay'dan kaynaklanan çekim kuvvetlerinin bozuntularını hesaplayan bir programdır. SGP4 kodu, kod hakkındaki ayrıntılı bilgiler için "http://centerforspace.com/downloads/" sitesinden ulaşılabilir [11]. Ancak SGP4 yörünge iterasyonu yapabilmek için TLE (Two Line Element) verisine ihtiyaç duyar. TLE verisi 69 karakterden oluşur ve SGP4 yörünge modeli ile uydunun hız ve konumunu hesaplayabilmeyi sağlar [12]. TLE verisi hakkında ayrıntılı bilgi almak için 12 no'lu referansı incelenebilir. Örnek bir TLE verisi Şekil 6.5' te görülmektedir.

```
1 16609U 86017A   01082.20636684  .00382588  12180-4  29147-4 0  7827
2 16609  51.6362 249.6171 0048914 224.8684 134.9353 16.33569098863305
```

Şekil 6.5 : Ek E'deki SGP4+IGRF kodunda da kullanılan Mir Uzay İstasyonu'na ait TLE verisi.

SGP4 kodu tez çalışması için sadece TLE verisinin alındığı tarihten itibaren dakika cinsinden iterasyon yapan ve tek adımda tamamlanan bu iterasyon sonucunda uydunun yeni konumunu veren bir çıktı dosyası oluşturur. SGP4, TEME koordinat ekseninde XYZ (km) cinsinden konum verirken, bu değerler ECEF (Earth Centered Earth Fixed) koordinatlarına dönüştürülerek, son adımda enlem-boylam-irtifa bilgilerine geçiş gerçekleştirilir.

IGRF (International Geomagnetic Reference Field), manyetik alan modelleri ve uzay araçları tarafından toplanan manyetik alan bilgileri birleştirilerek elde edilen matematiksel bir modeldir.

Bu tezde kodun kendisini kullanmak yerine Matlab Aerospace Toolbox'ın bileşenlerinden biri olan "igrf11magm()" komutu kullanılarak manyetik alan XYZ cinsinden elde edilmiştir.

Sonuç olarak Helmholtz kafesinde kullanılmak üzere gereken manyetik alan bileşenlerine ulaşılmış olur.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

QB50 projesinin bir parçası olan BeEagleSat uydusunun yönelim belirleme ve kontrol sistemin test edilmesini konu edinen bu tez temel olarak 4 başlık altında incelenebilir.

İlk aşamada, ADC sisteminin CubeComputer, CubeSense ve CubeControl bileşenleri incelenerek, her birinin ve onları oluşturan alt bileşenlerin işlerlikleri ve harcadıkları güç miktarları incelenerek, üreticinin belirttiği şekilde işler olup olmadığı sorgulanmıştır. Sistemin çalışmasına engel olacak herhangi bir sorun tespit edilmeyen bu testler sonucunda bir sonraki aşama olan TVAC testlerine geçilebileceğine karar verilmiştir.

İkinci aşama, Dünya'da çalışan bu sistemin uzay koşullarında da işler olduğundan emin olmak için TVAC (Thermal Vakuum Chamber) testlerinin gerçekleştirilmesidir. Bu aşamada uzay ortamına benzer sıcaklık ve vakum koşulları oluşturularak sistem sınanmıştır. Ancak sistemde vakum koşullarında maksimum sıcaklık değerinden aşağı doğru inerken sıcaklıkta Motor MCU'dan cevap alınamamıştır. Buna rağmen oda koşullarına kadar düşürülen sıcaklıklar ve devam ettirilen vakum koşullarında bu bileşen cevap vermemeye devam etmiştir. Ancak oda koşullarında sorunsuz bir şekilde çalışmaya devam etmiştir. Olası sorunları bulabilmek için bu testin Eylül 2015'te tekrarlanması planlanmaktadır.

Üçüncü aşama ise küresel bir hava yatağı için ön tasarımın yapılarak üretimden önce kullanılması gereken hesaplama ve programların tamamlanmasıdır. Küresel hava yatağı ağırlıksız ortam şartlarını sağlayabilmek için kullanılacaktır. Temel olarak 3 parçadan oluşur. İlk parça, basınçlı havanın küreye ulaştırıldığı alt bölüm, ikinci kısım ise küre (normal tasarımda yarı küre olmasına rağmen, tezdeki amaç doğrultusunda tam küredir.), üçüncü kısım ise regülatörlü bir kompresördür. Bahsedilen küre uydunun içine yerleştirilebilmesi için boş bir pleksi küre olarak tasarlanmıştır. Bu sayede tüm uydunun 3 eksende herhangi bir engel olmaksızın dönebileceği şartlar sağlanmıştır. Bunun için ilk olarak hesaplamaların gerçekleştirildiği (gereken kompresör basıncı, açıklık çapı ve kompresörün

harcayacağı gücü) bir Matlab kodu oluşturulmuş (Ek A) ve Catia'da yapılan çizimler bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca uydunun ölçümleri ve hareketlerinin doğruluğunun kıyaslanabilmesi için sisteme ek bir imu (inertal measurement unit) eklenmesi planlanmıştır. Bunun için IMUduino seçilmiştir. Bir tür Arduino olan bu sistem üzerinde ivmeölçer, jiroskop, yükseklikölçer ve manyetometre bulundurmaktadır. Bu sistemin çalıştırılması için gereken kodlar ilgili bölümde bahsedildiği üzere açık bir kaynak kodu kullanılmıştır. Ancak seri porttan alınan ölçüm verilerinin bir Matlab dosyasına alınması ve bunların görselleştirilmesi için Matlab kodları oluşturulmuş ve bunlar Ekler bölümüne (Ek B ve Ek C) konulmuştur.

Dördüncü aşamada ise bir Helmholtz kafesinin ön tasarımı için gereken kodlar oluşturulmuş ve sonlu elemanlar analizi ile tasarımın sonuçları görselleştirilmiştir. Öncelikle Helmholtz kafesindeki her bir Helmholtz bobini için manyetik alan hesabını bobin çapı, uygulanan akım ve sarım sayısına bağlı olarak yapan ve sonuçları görselleyen bir Matlab kodu oluşturulmuştur. Ayrıca tasarlanan bu kafesin Comsol multifizik modelleme programı aracılıyla sonlu elemanlar modeli hazırlanarak analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen manyetik alanların 3 boyutlu olarak görselleştirilmesi sağlanmıştır.

Bunun yanı sıra uygulanması gereken manyetik alanın hesabı için 3 bileşenden oluşan bir kod grubu oluşturulmuştur. SGP4, eksen dönüştürücü ve IGRF' ten oluşan bu kod grubuyla yörüngedeki bir uydunun istenen bir zamanda üzerinde etkiyen manyetik alanların büyüklüğü xyz ekseninde hesaplanması amaçlanmıştır. SGP4 Simplified Perturbations Model) bir bozuntu modelleyicidir ve burada TLE (Two Line Elements) verisi yardımıyla yörünge ilerleticisi olarak kullanılmıştır. TLE verisinin alındığı tarihten itibaren dakika cinsinden ilerletme yapılarak uydunu konumu XYZ (km) cinsinden TEME (True Equator Mean Equniox) eksen takımında elde edilmiştir. Koordinat dönüştürücü program bu noktada TEME verisini ECEF (Earth Centered Earth Fixed) dönüştürmek için kullanılmıştır. Ayrıca yine XYZ cinsinden olan bu sonuçlar enlem-boylam-irtifa cinsine dönüştürülerek, IGRF için kullanıma hazır hale getirilmiştir.

IGRF (International Geomagnetic Reference Field) dünya etrafındaki manyetik alan hesaplamalarını, hem matematiksel model hem de uzay araçlarından alınan verilerin entegre edilmesi ile elde edilen bir model aracılığıyla yapar. Ancak bu tezde kodun kendisi yerine bir Matlab Aerospace Toolbox fonksiyonu olan "igrf11magm"

kullanılmıştır. Enlem, boylam ve irtifa verilerinin yansıra zaman bilgisi girilerek XYZ ekseninde (nT) cinsinden manyetik alan değerleri elde edilebilmektedir. Bahsedilen tüm kodlar gerekli açıklamalarıyla Ekler'de (Ek D-H) görülebilir.

Tezin tamamlanmasının ardından, Helmholtz kafesi ve havalı test sisteminin tasarım ve üretim çalışmalarına devam edilecektir. Kafes sistemi için ilk aşamada bobinler bakır teller ile 3D yazıcıda basılan dairesel şekiller yardımıyla yapısal kısım hazırlanacaktır. Bunun ardından 6 adet (her bir bobin teki için birer tane olmak üzere) güç kaynağı temin edilecektir. Ardından gereken işlem kalibrasyondur. Bu işlem için hazırlanacak bir Matlab kodu ile, güç kaynaklarından iletilen akım, manyetik alan ölçümü için kullanılacak manyetometrelerin yardımıyla belirlenen noktalarda üretilen manyetik alan bilgisi ve hesaplanan manyetik değer bilgileri işlenerek kafes tasarımı tamamlanacaktır. Hava yatağı tasarımında ise çizimi verilen sistemde öncelikle 3D yazıcı ile üretilerek, deneme testleri için hazır hale getirebilir. Tüm sistemlerin tamamlanmasının ardından tüm uydunun toplanmasıyla teker ve manyetik eyleyici testlerine başlanılabilir. Ancak uydunun içine yerleştirildiği kürenin ağırlığı ve uydu ile birlikte oluşturacakları yeni ataletsel bilgilerin QB50 ADCS sisteminin arayüz programı olan CubeSupport yardımı ile ADCS kodunda güncellenmesi gereklidir. İhtiyaç halinde hava yatağının küresi daha hafif olacak şekilde tasarlanarak sistemin testleri tekrarlanabilir.

KAYNAKLAR

[1] **QB50 Project,** (2014). MNLP Requirements Compliancy Table v2

[2] **QB50 Project,** (2015). QB50 System Requirements Compliancy Table v3

[3] **Electronic Systes Laboratory,** (2015). ADCS Health Check Document Ver 1.0,

[4] **Lappas, V.,** (2012). QB50 ADCS + GPS, *3rd QB50 Workshop*, Brussels, Belgium, 2 Şubat.

[5] **Visagie, L.** (2014). ADCS Interface Control Document V3.0

[6] <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0339/2329/products/Imuduino-Yardstick-4mm.png?v=1416856816>, alındığı tarih: 15.08.2015

[7] < https://github.com/TKJElectronics/Example-Sketch-for-IMU-including-Kalman-filter/tree/master/IMU/MPU6050_HMC5883L >, alındığı tarih: 02.05.2015

[8] **Azad, A., Cowan, N., Tokhi, M., Virk , G., Eastman, R.** (2012). Adaptive Mobile Robotics, Proceedings of the 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Baltimore, USA, 23 – 26 Temmuz 2012

[9] **Rowe, B.,** (2012). Aerostatic, and Hybrid Bearing Design

[10] **DeTroye, D., Chase, R.,** (1994). The Calculation and Measurement of Helmholtz Coil Fields

[11] **Vallado, D.** (2013). Fundamentals of Astrodynamics and Applications

[12] < http://www.celestrak.com/columns/v04n03/ >, alındığı tarih: 15.08.2015

EKLER

EK A: Havalı Yatak Tasarım Hesaplamaları

EK B: IMUduino'dan Alınan Verilerin Matlab'a Aktarılması

EK C: IMUduino Grafiklerinin Çizilmesi

EK D: Helmholtz Kafesi Tasarım Hesaplamaları

EK E: SGP4+IGRF ve Dönüşüm Hesapları

EK F: Düzenlenmiş twoline2rv Fonksiyonu

EK G: Düzenlenmiş teme2ecef Fonksiyonu

EK H: Düzenlenmiş SGP4+IGRF Fonksiyonu Çıktısı

EK A

Havalı Yatak Tasarım Hesaplamaları

```
function optimal_hava_yatagi_tasarimi
clc
clear all
fprintf('Optimal kosullar icin kuresel hava yatagi dizayn
fonksiyonu\n')
%Eksenel yukleme (N); T;
T=5*9.81
%Kurenin capi (m) D
D=5.00e-2;
%Optimal kosullar icin onerilen basinc oranlari beta=0.5, Kgo=beta
beta=0.5; Kgo=beta;
%Optimal kosullar icin onerilen yatak acilari alfa=35 derece,
gama=70 derce
alfa=35*pi/180; gama=70*pi/180;
%phi_l=35*pi/180; W_PsD2=0; T_PsD2=0.23; beta_B_ob=0.33;
%Ortam basinci
pa=0.101*10^6;
%Kurenin maksimum devir hizi devir/sn
N=15;
%Sekil faktoru grafikten okunur; A_ob
A_ob=0.67;
%Gosterge basinci Ps hesaplanir;
T_ob=beta*pi*A_ob*(sin(gama)^2)/4
Ps=T/(D^2*T_ob)
%Kompresorun saglamasi gereken basinc ps;
ps=Ps+pa
%Kompresorden kureye ulasan basinc; Pro=Ps*Kgo
Pro=Ps*Kgo
%Kureye ulasan toplam basinc pro=Pro+pa;
pro=Pro+pa
%ilk aciklik degeri (m)
ho=20*10^(-6);
%Akis faktoru; B_ob
B_ob=0.67;
ff=Kgo*B_ob
%Havanin dinamik viskozite degeri 18 derecede (Ns/m^2);
mu=182e-7;
%Serbest hava akışı q (m^/s) ;
q=Ps*(ho^3)*Kgo*B_ob*(pro+pa)/(2*pa*mu)
%Pompa icin gerekn guc Hp (W);
Hp=pa*q*log(ps/pa)
%%DELIK DIZAYNI%%
%Hava yogunlugu 20 derecede ro (kg);
ro=1.208;
%Hava icin isi sigasi k 20 derecede
k=1.41;
%Delik sayisi res_n; res_n=6;
n_res=6;
%Delik debisi qr (m^3/s); qr=q/n_res;
qr=q/n_res
%Kp basinc orai ile akisin bogulup bogulmadigi incelenir.
Kp=pro/ps
% Akisin bogulup bogulmadinin kontrolu
%Bogulan akis icin pc;
pc=(2/(k+1))^(k-1)
if pc>Kp;
    fprintf('Akis bogulmamistir.\n');
else
```

```
     fprintf('Akis bogulmustur.Stabilitenin saglanmasi icin
parametreleri gozden gecirin\n');
end
%Delik faktoru, Cd grafikten okunarak eklenmistir
Cd_x=importdata('cd_x.txt');
Cd_y=importdata('cd_y.txt');
fit_Cd=fit(Cd_x,Cd_y,'smoothingspline');
Cd=fit_Cd(Kp)
%Cd=0.74;
%Ckp=((k/(k-1))*(Kp^(2/k)-Kp^(1+(1+k)));
%Kp=0.5981;
Ckp=((k/(k-1))*(Kp^(2/k)-Kp^(1+(1/k))));
%Delik alaninin hesabi Ao (m^2);
Ao=(qr*pa*((ro/(2*pa))^0.5))/(Cd*Ckp*ps)
%Delik capinin hesaplanmasi do (m);
do=(4*Ao/pi)^0.5
end
```

EK B

IMUduino'dan Alınan Verilerin Matlab'a Aktarılması

```
% Bu program IMUduino'dan alinan verilerin Matlab'a aktarmak icin
% hazirlanmistir.
% https://github.com/TKJElectronics/Example-Sketch-for-IMU-
including-Kalman
% -filter/blob/master/IMU/MPU6050_HMC5883L/MPU6050_HMC5883L.ino
% Adresindeki MPU6050_HMC5883L.ino kodunun ciktisina uyumlu olacak
sekilde
% duzenlenmistir.

% Arduino seri baglantisinin kurulmasi
%'COM12' bolumu cihazin port ismi ile degistirilmelidir
arduino=serial('COM12','BaudRate', 115200);
fopen(arduino);

for i=1:1000

    % 1:22 kisimi alinacak veri sayisina gore degistirilmelidir.
    % MPU6050_HMC5883L.ino kodu degistirilmeden kullaniliyorsa 1:12
    % olarak alinmalidir.
    veri2(i,1:22)=fscanf(arduino, '%f');

end
fclose(arduino);
```

EK C

IMUduino Grafiklerinin Çizilmesi

```
% X Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Ivmeolcer, oran Jiroskobu ,
% Tumlestirici Filtre, Kalman Filtresi Sonuclari
figure
plot(veri2(:,1),veri2(:,2),veri2(:,1),veri2(:,3),veri2(:,1),veri2(:,
4),veri2(:,1),veri2(:,5))
title('X Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Ivmeolcer, Jiroskop,
Tumlestirici Filtre, Kalman Filtresi')
xlabel('Zaman (s)')
ylabel('X Ekseninde Yonelim')
legend('Ivme','Jiro','Tumle','Kalman','Location','northeast')
```

```
% X Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Tumlestirici Filtre, Kalman
Filtresi
figure
plot(veri2(:,1),veri2(:,4),veri2(:,1),veri2(:,5))
title('X Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Tumlestirici Filtre,
Kalman Filtresi')
xlabel('Zaman (s)')
ylabel('X Ekseninde Yonelim')
legend('Tumle','Kalman','Location','northeast')


% Y Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Ivmeolcer, oran Jiroskobu ,
% Tumlestirici Filtre, Kalman Filtresi Sonuclari
figure
plot(veri2(:,1),veri2(:,6),veri2(:,1),veri2(:,7),veri2(:,1),veri2(:,
8),veri2(:,1),veri2(:,9))
title('Y Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Ivmeolcer, Jiroskop,
Tumlestirici Filtre, Kalman Filtresi')
xlabel('Zaman (s)')
ylabel('Y Ekseninde Yonelim')
legend('Ivme','Jiro','Tumle','Kalman','Location','northeast')

% Y Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Tumlestirici Filtre, Kalman
Filtresi
figure
plot(veri2(:,1),veri2(:,8),veri2(:,1),veri2(:,9))
title('Y Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Tumlestirici Filtre,
Kalman Filtresi')
xlabel('Zaman (s)')
ylabel('Y Ekseninde Yonelim')
legend('Tumle','Kalman','Location','northeast')

% Z Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Manyetometre, oran Jiroskobu ,
% Tumlestirici Filtre, Kalman Filtresi Sonuclari
figure
plot(veri2(:,1),veri2(:,10),veri2(:,1),veri2(:,11),veri2(:,1),veri2(
:,12),veri2(:,1),veri2(:,13))
title('Z Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Jiroskope, Tumlestirici
Filtre, Kalman Filtresi')
xlabel('Zaman (s)')
ylabel('Z Ekseninde Yonelim')
legend('Manyet','Jiro','Tumle','Kalman','Location','northeast')

% Z Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Tumlestirici Filtre, Kalman
Filtresi
figure
plot(veri2(:,1),veri2(:,12),veri2(:,1),veri2(:,13))
title('Z Ekseninde Olcum Sonuc Kiyalamasi, Tumlestirici Filtre,
Kalman Filtresi')
xlabel('Zaman (s)')
ylabel('Z Ekseninde Yonelim')
legend('Tumle','Kalman','Location','northeast')

% XYZ Filtresiz
figure
plot(veri2(:,1),veri2(:,2),veri2(:,1),veri2(:,6),veri2(:,1),veri2(:,
10))
title('XYZ Yonelimleri Filtresiz')
xlabel('Zaman (s)')
```

```
ylabel('Yonelim XYZ')
legend('Ivme X','Ivme Y','Manyet Z','Location','northeast')

% XYZ gryo ...
figure
plot(veri2(:,1),veri2(:,3),veri2(:,1),veri2(:,7),veri2(:,1),veri2(:,
11))
title('XYZ Oran Jiroskobu Olcum Sonuclari')
xlabel('Zaman (s)')
ylabel('Yonelim XYZ')
legend('X Jiro','Y Jiro','Z Jiro','Location','northeast')

% XYZ Tumle Filtreli
figure
plot(veri2(:,1),veri2(:,4),veri2(:,1),veri2(:,8),veri2(:,1),veri2(:,
12))
title('XYZ Tumlestirici Filtreli')
xlabel('Zaman (s)')
ylabel('Yonelim XYZ')
legend('X Tumle','Y Tumle','Z Tumle','Location','northeast')

% XYZ Kalman Filtreli
figure
plot(veri2(:,1),veri2(:,5),veri2(:,1),veri2(:,9),veri2(:,1),veri2(:,
13))
title('XYZ Kalman Filtreli')
xlabel('Zaman (s)')
ylabel('Yonelim XYZ')
legend('X Kalman','Y Kalman','Z Kalman','Location','northeast')
```

EK D

Helmholtz Kafesi Tasarım Hesaplamaları

```
% Bu kod,3 eksenli dairesel bir Helmholtz kafesinin sarim, akim ve
yaricap
% bilesenlerini goz onune alarak, olusturulan manyetik alanlarin
x,y,z ve
% toplam degelerinin hesaplanmasini ve  kullanici tarafindan
belirlenecek
% grid eksenlerinde grafiklerinin elde edilmesini amaclar.
% "The Calculation and Measurement of Helmholtz Coil Fields" isimli
% tek eksenli Helmholtz bobin tasarim calismasindan faydananilarak
% hazirlanmistir.

close all
clc
clear all

x_sarim = 20; % sarim sayisi
y_sarim = 20;
z_sarim = 20;

mu = 125663*1e-11;
x_akim=5; % Amper cinsinden akim
y_akim=5;
z_akim=5;
a=.3000; % Bobin yaricapi (metre cinsinden)
d=a/2; % Bobinlerin merkeze olan uzakliklari
```

```
x_ro_grid= 51; % X acisal eksenindeki grid sayisi
y_ro_grid= 51; % Y acisal eksenindeki grid sayisi
z_ro_grid= 51; % Z acisal eksenindeki grid sayisi

x_eksen_grid=101; % X eksenindeki grid sayisi
y_eksen_grid=101; % Y eksenindeki grid sayisi
z_eksen_grid=101; % Z eksenindeki grid sayisi

X_ro_1=linspace(0,a,z_ro_grid);
Y_ro_1=linspace(0,a,z_ro_grid);
Z_ro_1=linspace(0,a,z_ro_grid);

X_ro=[Z_ro_1(z_ro_grid:-1:2) Z_ro_1];
Y_ro=[Z_ro_1(z_ro_grid:-1:2) Z_ro_1];
Z_ro=[Z_ro_1(z_ro_grid:-1:2) Z_ro_1];

X_eksen_1=linspace(-d,d,z_eksen_grid);
Y_eksen_1=linspace(-d,d,z_eksen_grid);
Z_eksen_1=linspace(-d,d,z_eksen_grid);

[x_ro,x_eksen]=meshgrid(X_ro_1,X_eksen_1);
[y_ro,y_eksen]=meshgrid(Y_ro_1,Y_eksen_1);
[z_ro,z_eksen]=meshgrid(Z_ro_1,Z_eksen_1);

% Modul degeri ve eliptik integraller
katsayi_1=(4*a*z_ro)./((a+z_ro).^2 + (z_eksen-d).^2);
[katsayi_11,katsayi_12]=ellipke(katsayi_1);
katsayi_2=(4*a*z_ro)./((a+z_ro).^2 + (z_eksen+d).^2);
[katsayi_21,katsayi_22] = ellipke(katsayi_2);

% X-ro manyetik alan degerleri
b_aci_x_1=((x_eksen-d)./(x_ro.*sqrt((a+x_ro).^2 + (x_eksen-
d).^2))).* ...
    (((a^2 + x_ro.^2 + (x_eksen-d).^2)./((a-x_ro).^2 + ...
    (x_eksen-d).^2)).*katsayi_12-katsayi_11);

b_aci_x_2=((x_eksen+d)./(x_ro.*sqrt((a+x_ro).^2 +
(x_eksen+d).^2))).* ...
    (((a^2 + x_ro.^2 + (x_eksen+d).^2)./((a-x_ro).^2 + ...
    (x_eksen+d).^2)).*katsayi_22-katsayi_21);
b_aci_x=((x_sarim*mu*x_akim)/(2*pi))*(b_aci_x_1+b_aci_x_2);
b_aci_x(1:x_eksen_grid)=zeros(x_eksen_grid,1);
b_aci_x=[b_aci_x(:,x_ro_grid:-1:2) b_aci_x];

% Y-ro manyetik alan degerleri
b_aci_y_1=((y_eksen-d)./(y_ro.*sqrt((a+y_ro).^2 + (y_eksen-
d).^2))).* ...
    (((a^2 + y_ro.^2 + (y_eksen-d).^2)./((a-y_ro).^2 + ...
    (y_eksen-d).^2)).*katsayi_12-katsayi_11);
b_aci_y_2=((y_eksen+d)./(y_ro.*sqrt((a+y_ro).^2 +
(y_eksen+d).^2))).* ...
    (((a^2 + y_ro.^2 + (y_eksen+d).^2)./((a-y_ro).^2 + ...
    (y_eksen+d).^2)).*katsayi_22-katsayi_21);
b_aci_y=((y_sarim*mu*y_akim)/(2*pi))*(b_aci_y_1+b_aci_y_2);
b_aci_y(1:y_eksen_grid)=zeros(y_eksen_grid,1);
b_aci_y=[b_aci_y(:,y_ro_grid:-1:2) b_aci_y];

% Z-ro manyetik alan degerleri
b_aci_z_1=((z_eksen-d)./(z_ro.*sqrt((a+z_ro).^2 + (z_eksen-
d).^2))).* ...
```

```
    (((a^2 + z_ro.^2 + (z_eksen-d).^2)./((a-z_ro).^2 + ...
    (z_eksen-d).^2)).*katsayi_12-katsayi_11);
b_aci_z_2=((z_eksen+d)./(z_ro.*sqrt((a+z_ro).^2 +
(z_eksen+d).^2))).* ...
    (((a^2 + z_ro.^2 + (z_eksen+d).^2)./((a-z_ro).^2 + ...
    (z_eksen+d).^2)).*katsayi_22-katsayi_21);
b_aci_z=((z_sarim*mu*z_akim)/(2*pi))*(b_aci_z_1+b_aci_z_2);
b_aci_z(1:z_eksen_grid)=zeros(z_eksen_grid,1);
b_aci_z=[b_aci_z(:,z_ro_grid:-1:2) b_aci_z];

% X eksenindeki manyetik alan degerleri
b_x_eksen_1=(1./sqrt((a+x_ro).^2 + (x_eksen-d).^2)).* ...
    (((a^2 - x_ro.^2 - (x_eksen-d).^2)./((a-x_ro).^2 + ...
    (x_eksen-d).^2)).*katsayi_12+katsayi_11);
b_x_eksen_2=(1./sqrt((a+x_ro).^2 + (x_eksen+d).^2)).* ...
    (((a^2 - x_ro.^2 - (x_eksen+d).^2)./((a-x_ro).^2 + ...
    (x_eksen+d).^2)).*katsayi_22+katsayi_21);
b_x_eksen=((x_sarim*mu*x_akim)/(2*pi))*(b_x_eksen_1 + b_x_eksen_2);
b_x_eksen=[b_x_eksen(:,x_ro_grid:-1:2) b_x_eksen];

% Y eksenindeki manyetik alan degerleri
b_y_eksen_1=(1./sqrt((a+y_ro).^2 + (y_eksen-d).^2)).* ...
    (((a^2 - y_ro.^2 - (y_eksen-d).^2)./((a-y_ro).^2 + ...
    (y_eksen-d).^2)).*katsayi_12+katsayi_11);
b_y_eksen_2=(1./sqrt((a+y_ro).^2 + (y_eksen+d).^2)).* ...
    (((a^2 - y_ro.^2 - (y_eksen+d).^2)./((a-y_ro).^2 + ...
    (y_eksen+d).^2)).*katsayi_22+katsayi_21);
b_y_eksen=((y_sarim*mu*y_akim)/(2*pi))*(b_y_eksen_1 + b_y_eksen_2);
b_y_eksen=[b_y_eksen(:,y_ro_grid:-1:2) b_y_eksen];

% Z eksenindeki manyetik alan degerleri
b_z_eksen_1=(1./sqrt((a+z_ro).^2 + (z_eksen-d).^2)).* ...
    (((a^2 - z_ro.^2 - (z_eksen-d).^2)./((a-z_ro).^2 + ...
    (z_eksen-d).^2)).*katsayi_12+katsayi_11);
b_z_eksen_2=(1./sqrt((a+z_ro).^2 + (z_eksen+d).^2)).* ...
    (((a^2 - z_ro.^2 - (z_eksen+d).^2)./((a-z_ro).^2 + ...
    (z_eksen+d).^2)).*katsayi_22+katsayi_21);
b_z_eksen=((z_sarim*mu*z_akim)/(2*pi))*(b_z_eksen_1 + b_z_eksen_2);
b_z_eksen=[b_z_eksen(:,z_ro_grid:-1:2) b_z_eksen];

% X eksenindeki toplam manyetik alan
b_x_tot= sqrt(b_aci_x.^2 + b_x_eksen.^2);

% Y eksenindeki toplam manyetik alan
b_y_tot= sqrt(b_aci_y.^2 + b_y_eksen.^2);

% Z eksenindeki toplam manyetik alan
b_z_tot= sqrt(b_aci_z.^2 + b_z_eksen.^2);

% Toplam manyetik alan
b_tot= sqrt(b_x_tot.^2 + b_y_tot.^2 + + b_z_tot.^2)

figure (1)
subplot(2,2,1)
meshz(b_x_tot)
title('X eksenindeki manyetik alan (T)')
subplot(2,2,2)
meshz(b_y_tot)
title('Y eksenindeki manyetik alan (T)')
subplot(2,2,3)
```

```
meshz(b_z_tot)
title('Z eksenindeki manyetik alan (T)')
subplot(2,2,4)
meshz(b_tot)
title('Toplam manyetik alan (T)')
```

EK E

SGP4+IGRF ve Dönüşüm Hesapları

```
% Bu dosya David Vallado ve Jeff Beck tarafindan hazirlanan SGP4
% ilerleticisi ile Matlab igrf11magm komutunun kolaylikla integre
% edilebilmesi icin hazirlanmistir.
% Bu calismada kullanilan tum kodlar asagidaki adresten alinmistir.
% https://celestrak.com/software/vallado/matlab.zip
% Kodda bulunan, sgp4,testmat, jday,twoline2rv, ijk2lle ve teme2ecef
% bilesenleri Vallado'nun "Fundamentals of Astrodynamics and
Applications"
% kitabi icin David Vallado ve Jeff Beck tarafindan hazirlanmis olan
% programlardir. Kullanilan tum kodlarin kaynagi acik oldugundan
% tez yazarinin kendi ekledigi kisimlar haric aciklama yoktur.
% Gerekli aciklamalar, Vallado ve Beck'in hazirladigi kodlarin
orjinalinden
% okunabilir. Tez yazari kodun okunmasini kolaylastirmak icin mumkun
% mertebe hazir kodlarin girdi ve cikti isimlerinde degisiklilige
gitmemeye
% calismitir.
%
% Bu dosyanin ilk kismi testmat dosyasinin ufak degisiklikler
gecirmis
% halinden olusurken, devami tez yazarinin eklemelerini,
jday,twoline2rv,
% sgp4, ijk2lle ve teme2ecef fonksiyonlari ile Matlab Aerospace
Toolbox'in
% bir parcasi olan "igrf11magm" komutu ile igrf modellemesini
icermektedir.
% Bahsedilen fonksiyonlardan twoline2rv, ijk2lle ve teme2ecef' te
tez
% yazari tarafindan yapilan degisikliker bulunmaktadir. ijk2lle
kodundan
% sadece "rtasc= atan22( r(2), r(1) )" satiri hatadan dolayi
% "rtasc= atan2(r(2), r(1) )" olarak degistirilmistir. Diger
degisiklige
% ugrayan kodlar da ekte bulunabilir.
% teme2ecef fonksiyonunda bulunan xp ve yp "polar hareket
katsayilari"dir.
% Bu degerler ve jday fonksiyonun icin gereken UT1-UTC ve TAI - UTC
zaman
% farklari "http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/" sitesinden 11/08/2015
tarihinde
% alinmistir. Bu sitede xp ve yp mas (mili arc second)cinsindendir.
% Radyana donusturulmelidir.  1 mas --> 4.84813681x10-9 radyandir.
% Ayrica UT1-UTC ve TAI - UTC degerleri girilirken saniye cinsinden
% girilmelidir.

% Bu kodda, input komutuyla alinan TLE datasini iceren dosyadaki
% bilgilerini kullanarak, minimum girdi gereksinimiyle "igrf11magm"
komutu
% formatina uygun ciktilar uretip, manyetik alan bilgisini elde
```

```
etmek
% amaclanmistir.

clc
close all
clear all

global tumin mu radiusearthkm xke j2 j3 j4 j3oj2

global opsmode

opsmode ='a';

typerun='m';

typeinput='m';

whichconst = 72;

rad = 180.0 / pi;

infilename = input('\nTLE dosyasinin ismini giriniz, uzantisi ile:
','s');
infile = fopen(infilename, 'r');

outfile = fopen('Cikti.out', 'wt');

 global idebug dbgfile

      while (~feof(infile))
        longstr1 = fgets(infile, 130);
        while ( (longstr1(1) == '#') && (feof(infile) == 0) )
            longstr1 = fgets(infile, 130);
        end

        if (feof(infile) == 0)

            longstr2 = fgets(infile, 130);

    if idebug
        catno = strtrim(longstr1(3:7));
        dbgfile = fopen(strcat('sgp4test.dbg.',catno), 'wt');
    end

            [satrec, startmfe, stopmfe, deltamin] = twoline2rv(
whichconst, ...
                        longstr1, longstr2, typerun, typeinput);

                    %TLE verisinin alindigi tarih, baslangic tarihi

[yil_bas,ay_bas,gun_bas,saat_bas,dakika_bas,saniye_bas] = invjday (
satrec.jdsatepoch );

                    fprintf('\nTLE verisinin alindigi tarih: \n')
                    fprintf(' %5i%3i%3i %2i:%2i:%9.6f
%16.8f%16.8f%16.8%12.9f%12.9f%12.9f\n',...

yil_bas,ay_bas,gun_bas,saat_bas,dakika_bas,saniye_bas );
```

```
                fprintf('\n')

            [satrec, ro ,vo] = sgp4 (satrec,  0.0);

            tsince = startmfe;

            if ( abs(tsince) > 1.0e-8 )
                tsince = tsince - deltamin;
            end

            while ((tsince < stopmfe) && (satrec.error == 0))

                tsince = tsince + deltamin;

                if(tsince > stopmfe)
                    tsince = stopmfe;
                end

                [satrec, ro, vo] = sgp4 (satrec,  tsince);

                if (satrec.error == 0)
                    if ((typerun ~= 'v') && (typerun ~= 'c'))
                        jd = satrec.jdsatepoch + tsince/1440.0;
                        [year,mon,day,hr,minute,sec] = invjday (jd);

                        fprintf(outfile,...
                            ' %16.8f %16.8f %16.8f\n',...
                            ro(1),ro(2),ro(3));

                        %TLE verisinin SGP4 ile ilerletildigi tarih
                        fprintf('\nTLE verisinin ilerletildigi
tarih: \n')
                        fprintf(2, ' %5i%3i%3i %2i:%2i:%9.6f
%16.8f%16.8f%16.8%12.9f%12.9f%12.9f\n',...
                            year,mon,day,hr,minute,sec );
                        fprintf('\n')
                    end
                end

            end

            if (idebug && (dbgfile ~= -1))
                fclose(dbgfile);
            end

        end

    end

    fclose(infile);
    fclose(outfile);

%Bu kisimda eksen donusumu icin gereken zaman sistemleri donusumu
%yapilmaktadir.

yil = year;
ay = mon;
gun = day;
```

```
saat = hr;
dakika = minute;
saniye = sec;

fprintf('\nBu bolumde ilerletilmis yorunge icin gereken zaman
bilgileri girilecektir\n')
fprintf('\n"http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/" sitesinden gereken
veriler alinabilir.\n')

delta_ut1 = input('\nUT1-UTC degerini saniye cinsinden giriniz: ');
delta_at = input('\nTAI - UTC degerini saniye cinsinden giriniz: ');

fprintf('\n1 mas --> 4.84813681*10^(-9) radyandir\n')
xp = input('\nxp polar hareket katsayisini radyan cinsinden giriniz:
');
yp = input('\nyp polar hareket katsayisini radyan cinsinden giriniz:
');
fprintf('\n');

ut1=saat*3600 + dakika*60 + saniye + delta_ut1;
saat_1= floor(ut1/3600);
dakika_1= floor((ut1-saat_1*3600)/60);
saniye_1= floor(ut1-saat_1*3600-dakika_1*60);
jdut1=jday(yil, ay, gun, saat_1, dakika_1, saat_1);

tai= saat*3600 + dakika*60 + saniye + delta_at;
tt= tai + 32.184;
saat_t= floor(tt/3600);
dakika_t= floor((tt-saat_t*3600)/60);
saniye_t= floor(tt-saat_t*3600-dakika_t*60);
jdt = jday(yil, ay, gun, saat_t, dakika_t, saniye_t);
ttt= (jdt-2451545)/36525;

rteme=[ro(1);ro(2); ro(3)];
teme_yaz = ['TEME koordinat ekseninde konum vektoru (km)
',mat2str(rteme)];
disp(teme_yaz)
fprintf('\n')

% Bu bolum teme-ecef arasindaki gecisi saglar

[recef] = teme2ecef  ( rteme,ttt,jdut1,xp,yp );

ecef_yaz = ['ECEF koordinat ekseninde konum vektoru (km) ',
mat2str(recef)];
disp(ecef_yaz)
fprintf('\n')

r=recef;

% Bu bolumde irtifa, enlem ve boylam bilgileri elde edilir.

[latgc,latgd,lon,hellp] = ijk2ll ( r );

enlem_boylam_irtifa=[latgd,lon,hellp];
enlem_boylam_yaz =['Enlem (rad), boylam (rad) ve irtifa (km)
degerleri ', mat2str(enlem_boylam_irtifa)];
disp(enlem_boylam_yaz)
fprintf('\n')
```

```
%Kodun son kisminda ise igrf11magm yardimi ile manyetik alanin xyz
%degerleri elde edilir.

[XYZ] = igrf11magm(hellp, latgd, lon, decyear(year,mon,day));

manyetik_yaz = ['Manyetik alan vektoru (nT) ',mat2str([XYZ])];
disp(manyetik_yaz)
fprintf('\n')
```

EK F

Düzenlenmiş twoline2rv Fonksiyonu

```
% Bu dosya David Vallado ve Jeff Beck tarafindan hazirlanan SGP4
% ilerleticisi ile Matlab igrf11magm komutunun kolaylikla integre
% edilebilmesi icin hazirlanan altprogramda kullanilan
fonksiyonlardandir.
% Bu calismada kullanilan bu fonksiyon asagidaki adresten
alinmistir.
% https://celestrak.com/software/vallado/matlab.zip
% Bu kodda, belirlenen bir zaman dilimine (TLE verisinin basladigi
andan
% itibaren, dakika cinsinden) tek bir adimda iterasyon seklinde
ilerletme
% yapmasini saglayacak degisiklikler gerceklestirilmistir.

function [satrec, startmfe, stopmfe, deltamin] =
twoline2rv(whichconst, longstr1, ...
          longstr2, typerun,typeinput)

    global tumin radiusearthkm xke j2 j3 j4 j3oj2

    deg2rad  =   pi / 180.0;
    xpdotp   =  1440.0 / (2.0*pi);

    revnum = 0;
    elnum  = 0;
    year   = 0;
    satrec.error = 0;

    for (j = 11:16)
        if (longstr1(j) == ' ')
            longstr1(j) = '_';
        end
    end

    if (longstr1(45) ~= ' ')
        longstr1(44) = longstr1(45);
    end
    longstr1(45) = '.';

    if (longstr1(8) == ' ')
        longstr1(8) = 'U';
    end

    if (longstr1(10) == ' ')
        longstr1(10) = '.';
    end
```

```
for (j = 46:50)
    if (longstr1(j) == ' ')
        longstr1(j) = '0';
    end
end
if (longstr1(52) == ' ')
    longstr1(52) = '0';
end
if (longstr1(54) ~= ' ')
    longstr1(53) = longstr1(54);
end
longstr1(54) = '.';

longstr2(26) = '.';

for (j = 27:33)
    if (longstr2(j) == ' ')
        longstr2(j) = '0';
    end
end

if (longstr1(63) == ' ')
    longstr1(63) = '0';
end

if ((length(longstr1) < 68) || (longstr1(68) == ' '))
    longstr1(68) = '0';
end

carnumb = str2num(longstr1(1));
satrec.satnum = str2num(longstr1(3:7));
classification = longstr1(8);
intldesg = longstr1(10:17);
satrec.epochyr = str2num(longstr1(19:20));
satrec.epochdays = str2num(longstr1(21:32));
satrec.ndot = str2num(longstr1(34:43));
satrec.nddot = str2num(longstr1(44:50));
nexp = str2num(longstr1(51:52));
satrec.bstar = str2num(longstr1(53:59));
ibexp = str2num(longstr1(60:61));
numb = str2num(longstr1(63));
elnum = str2num(longstr1(65:68));

if (typerun == 'v')
    cardnumb = str2num(longstr2(1));
    satrec.satnum = str2num(longstr2(3:7));
    satrec.inclo = str2num(longstr2(8:16));
    satrec.nodeo = str2num(longstr2(17:25));
    satrec.ecco = str2num(longstr2(26:33));
    satrec.argpo = str2num(longstr2(34:42));
    satrec.mo = str2num(longstr2(43:51));
    satrec.no = str2num(longstr2(52:63));
    revnum = str2num(longstr2(64:68));
    startmfe = str2num(longstr2(70:81));
    stopmfe  = str2num(longstr2(83:96));
    deltamin = str2num(longstr2(97:105));
else
    cardnumb = str2num(longstr2(1));
    satrec.satnum = str2num(longstr2(3:7));
```

```
        satrec.inclo = str2num(longstr2(8:16));
        satrec.nodeo = str2num(longstr2(17:25));
        satrec.ecco = str2num(longstr2(26:33));
        satrec.argpo = str2num(longstr2(34:42));
        satrec.mo = str2num(longstr2(43:51));
        satrec.no = str2num(longstr2(52:63));
        revnum = str2num(longstr2(64:68));
    end

    satrec.no   = satrec.no / xpdotp;
    satrec.nddot= satrec.nddot * 10.0^nexp;
    satrec.bstar= satrec.bstar * 10.0^ibexp;

    satrec.a    = (satrec.no*tumin)^(-2/3);
    satrec.ndot = satrec.ndot  / (xpdotp*1440.0);
    satrec.nddot= satrec.nddot / (xpdotp*1440.0*1440);

    satrec.inclo = satrec.inclo  * deg2rad;
    satrec.nodeo = satrec.nodeo * deg2rad;
    satrec.argpo = satrec.argpo  * deg2rad;
    satrec.mo    = satrec.mo     *deg2rad;

    satrec.alta = satrec.a*(1.0 + satrec.ecco) - 1.0;
    satrec.altp = satrec.a*(1.0 - satrec.ecco) - 1.0;

     if (satrec.epochyr < 57)
         year= satrec.epochyr + 2000;
       else
         year= satrec.epochyr + 1900;
     end;

     [mon,day,hr,minute,sec] = days2mdh ( year,satrec.epochdays );
     satrec.jdsatepoch = jday( year,mon,day,hr,minute,sec );

     if ((typerun ~= 'v') && (typerun ~= 'c'))
         startmfe = 0;
         stopmfe  = input('\nIstenen ilerleme suresini dakika
cinsinden giriniz: ');
         deltamin = stopmfe;
     end;

     sgp4epoch = satrec.jdsatepoch - 2433281.5;
     [satrec] = sgp4init(whichconst, satrec, satrec.bstar,
satrec.ecco, sgp4epoch, ...
         satrec.argpo, satrec.inclo, satrec.mo, satrec.no,
satrec.nodeo);
```

EK G

Düzenlenmiş teme2ecef Fonksiyonu

```
% Bu dosya David Vallado ve Jeff Beck tarafindan hazirlanan SGP4
% ilerleticisi ile Matlab igrf11magm komutunun kolaylikla integre
% edilebilmesi icin hazirlanan altprogramda kullanilan
fonksiyonlardandir.
% Bu calismada kullanilan bu fonksiyon asagidaki adresten
alinmistir.
% https://celestrak.com/software/vallado/matlab.zip
% teme2ecef adindaki bu fonksiyon TEME (True Equator Mean Equniox)
```

```
eksen
% takimindan ECEF (Earth Centered Earth Fixed) takimina donusum
yapar.
% Koddaki gereksiz hiz ve ivme bilesenleri silinmistir.
% rteme km cinsinden TEME eksen takimindaki konum bilgisidir.

function [recef] = teme2ecef  ( rteme,ttt,jdut1,xp,yp )


        gmst= gstime( jdut1 );

        st(1,1) =  cos(gmst);
        st(1,2) = -sin(gmst);
        st(1,3) =  0.0;
        st(2,1) =  sin(gmst);
        st(2,2) =  cos(gmst);
        st(2,3) =  0.0;
        st(3,1) =  0.0;
        st(3,2) =  0.0;
        st(3,3) =  1.0;

        [pm] = polarm(xp,yp,ttt,'80');

        rpef  = st'*rteme;
        recef = pm'*rpef;
```

EK H

Düzenlenmiş SGP4+IGRF Fonksiyonu Çıktısı

```
TLE dosyasinin ismini giriniz, uzantisi ile: mir.txt

Istenen ilerleme suresini dakika cinsinden giriniz: 30

TLE verisinin alindigi tarih:
  2001   3 23   4:57:10.094960

TLE verisinin ilerletildigi tarih:
  2001   3 23   5:27:10.094974

Bu bolumde ilerletilmis yorunge icin gereken zaman bilgileri
girilecektir

"http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/" sitesinden gereken veriler
alinabilir.

UT1-UTC degerini saniye cinsinden giriniz: 291.587*10^(-3)

TAI - UTC degerini saniye cinsinden giriniz: 36

1 mas --> 4.84813681*10^(-9) radyandir

xp polar hareket katsayisini radyan cinsinden giriniz:
212.81*4.84813681*10^(-9)

yp polar hareket katsayisini radyan cinsinden giriniz:
403.36*4.84813681*10^(-9)
```

```
TEME koordinat ekseninde konum vektoru (km)
[4454.87209920504;2038.07514938537;4366.52504854309]

ECEF koordinat ekseninde konum vektoru (km) [-
2598.71492951475;4152.85710239643;4366.53585082781]
```



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Sibel Türkoğlu

Doğum Tarihi ve Yeri : 26.12.1989/İstanbul

E-posta : turkoglusi@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Mühendisliği Bölümü (Bölüm İkincisi)
- **Yüksek Lisans:** 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı, Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİMLER:

- Araştırma Görevlisi, Uzay Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi (Şubat 2013- Şu an)
- Vestel Savunma Sanayi Taktik İnsansız Hava Aracı (Karayel) Projesi, Yapısal Analiz Mühendisi (Eylül 2012 – Ocak 2015)

YAYINLAR:

- Aslan, Bas, Uludag, et al, The Integration and Testing of BeEagleSat, The 30th International Symposium on Space Technology and Sceince (ISTS), 34th International Electric Propulsion Conference (IEPC) & the 6th Nano-Satellite Symposium (NSAT), 2015, Japonya
- E. Yakut, M. Suer, M.S. Uludag, E. Bas, S. Turkoglu, QB50 - BeEagleSat Inner-Outer Design Details and ADCS Testing-Integration.n7th European CubeSat Symposium, 2015, Liege, Belçika.
- S. Türkoğlu, M. Uludağ, Ö. Kalenderli, A. Aslan, Küp Uydu İçin Dünya Etrafındaki Manyetik Alan Benzetimi Yapacak Helmholtz Bobini Tasarımı ve Analizi. 3. Ulusal Havacılık Teknolojisi ve Uygulamaları Kongresi, 2015, İzmir.