



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



PRESESYON VE NUTASYON HAREKETİNİN
ECİ – ECEF DÖNÜŞÜMÜNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

Samet TEKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Samet TEKER tarafından hazırlanan “Presesyon ve Nutasyon Hareketinin ECI – ECEF Dönüşümüne Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 24/05/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ekrem TUŞAT

.....

Danışman

Prof. Dr. Ekrem TUŞAT

.....

Üye

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

.....

Üye

Doç. Dr. Mustafa Tevfik ÖZLÜDEMİR

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Samet TEKER

24/05/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

PRESESYON VE NUTASYON HAREKETİNİN ECI – ECEF DÖNÜŞÜMÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Samet TEKER

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ekrem TUŞAT

2023, 113 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Ekrem TUŞAT
Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ
Doç. Dr. Mustafa Tefvik ÖZLÜDEMİR**

Uydularla Konum Belirleme Sistemlerinde (GNSS), uydularının konumu yeryüzünün hareketinden bağımsız (uzaya göre sabit) bir koordinat sisteminde, yeryüzündeki bir noktanın ise eksenleri yeryüzü ile eşzamanlı ve aynı hareketi sergileyen bir koordinat sisteminde tanımlanması gerekmektedir. Bu ihtiyaç doğrultusunda jeodezide uyduların konumlarını tanımlamak için ECI (Earth Centered Inertial – Yer Merkezli Uzay Sabit) ve yeryüzündeki bir noktanın konumunu tanımlamak için ECEF (Earth Centered Earth Fixed – Yer Merkezli Yer Sabit) kartezyen koordinat sistemleri kullanılmaktadır. İki koordinat sistemi arasındaki ilişki; presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi adı verilen Dünya'nın hareketlerinin matematiksel olarak tanımlanması ile kurulmaktadır. IAU (Uluslararası Astronomi Birliği) 1976 yılında presesyonun, 1980 yılında ise nutasyon hareketini matematiksel olarak tanımlamıştır. Kutup koordinatları ve yerin gerçek açısız dönüşünü hesaplamak için kullanılan zaman farkı IERS tarafından belirli periyotlarla yayınlanmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşümü birden fazla epok için kısa sürede gerçekleştiren "Eci2ecef" programı tasarlanmıştır. Dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için programın tasarımında IAU 1976 presesyon ve 1980 nutasyon modelleri ile IERS EOP 14 C04 serisi kullanılmıştır. Presesyon, nutasyon, kutup hareketi ve yer dönüklük parametrelerinin iki koordinat sistemi arasındaki dönüşüme etkisini incelemek ve presesyon ve nutasyon hareketinin periyodik hareketini izleyebilmek açısından 1 Ocak 2000 ile 31 Ağustos 2022 tarihleri arasındaki günlere ait ECEF sisteminden ECI sistemine dönüşüm matrisleri hesaplanmış ve GPS – SVN 43 ve 63 uydularına ve IGS NABG00NOR ve SYOG00ATA istasyonlarına parametrelerin etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında yaklaşık olarak 23 yıllık zaman aralığında gün periyotlu parametrelerin dönüşüme etkisi her bir epok için belirlenerek; maksimum ve minimum etkileri, üç boyutlu grafikleri ve zaman değişkenli mutlak etki grafikleri sunulmuştur. Sayısal uygulama sonucunda elde edilen veriler, literatürde presesyon ve nutasyon hareketi için tanımlanan periyotlar ile uyumlu olup oluşturulan grafikler ile detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: ECEF, ECI, Eci2ecef, Kutup Hareketi, Nutasyon, Presesyon, Yer Dönüklük

ABSTRACT

MS THESIS

ANALYSIS OF THE EFFECT OF PRECESSION AND NUTATION MOTIONS ON ECI - ECEF TRANSFORMATION

Samet TEKER

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Geomatics Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ekrem TUŞAT

2023, 113 Pages

Jury

Prof. Dr. Ekrem TUŞAT

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

Assoc. Prof. Dr. Mustafa Tevfik ÖZLÜDEMİR

In Global Positioning Satellite Systems (GNSS), the position of satellites must be defined in a coordinate system that is independent of the movement of the Earth (fixed in space), while a point on the Earth must be defined in a coordinate system that has axes exhibits the same movement of the Earth (Earth-fixed). To define the positions of satellites in geodesy, Cartesian coordinate systems called ECI (Earth Centered Inertial) are used, and to define the position of a point on the Earth, another Cartesian coordinate system called ECEF (Earth Centered Earth Fixed) is used. The relationship between the two coordinate systems is established through the mathematical definition of the Earth's movements, including precession, nutation, Earth's rotation, and polar motion. The International Astronomical Union (IAU) mathematically defined precession in 1976 and nutation in 1980. IERS publishes the polar coordinates and the time difference used to calculate the true angular rotation of the Earth at regular intervals. In this thesis, a program called "Eci2ecef" was designed to perform the conversion between ECI and ECEF coordinate systems for multiple epochs in a short time. The IAU 1976 precession and 1980 nutation models and the IERS EOP 14 C04 series were used in the design of the program to perform the conversion. To examine the effect of precession, nutation, polar motion, and Earth's rotation parameters on the transformation between the two coordinate systems and to track the periodic motion of precession and nutation, the transformation matrices from the ECEF system to the ECI system for each day from January 1, 2000 to August 31, 2022 were calculated, and the impact of parameters on GPS-SVN 43 ve 63 satellites, and IGS NABG00NOR and SYOG00ATA stations were investigated. Within the scope of the study, the effect of the parameters used in the conversion on the transformation was determined for each epoch over an approximately 23-years period, and their maximum and minimum effects, three-dimensional graphics, and absolute time-variable effect graphics were presented. The data obtained from the numerical application were consistent with the periods defined for precession and nutation in the literature, and they were examined in detail with the created graphs.

Keywords: Earth's Rotation, ECEF, ECI, Eci2ecef, Nutation, Polar Motion, Precession

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgisi, birikimleri ve öğreticiliği ile gelişimime katkılarını her an hissettiğim ve tezin planlanması, geliştirilmesi ve uygulanmasına ışık tutan ve desteğini esirgemeyen kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Ekrem TUŞAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin geliştirilmesinde sundukları kıymetli bilgi ve görüşleri ile çalışmama göstermiş oldukları ilgi sebebiyle değerli hocalarım, Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ'ye, Doç. Dr. Serkan DOĞANALP'e ve Arş. Gör. Emre AYSO'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak hayatımın her anında olduğu gibi çalışmam boyunca da desteklerini hissettiğim ve bana motivasyon kaynağı olan sevgili aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

Samet TEKER
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. KOORDİNAT SİSTEMLERİ	6
3.1. Koordinat Tanımının Gelişimi	6
3.2. Koordinat Türleri	7
3.3. Jeodezik Koordinat Sistemleri ve Sınıflandırılması	10
3.3.1. Gök koordinat sistemi	10
3.3.2. Yörünge koordinat sistemi	18
3.3.3. Yerel (Toposentrik) koordinat sistemi	19
3.3.4. Yer merkezli (Jeosentrik) koordinat sistemi	21
3.4. ECI ve ECEF Koordinat Sistemleri Arasındaki İlişki	24
3.4.1. Presesyon ve nutasyon	25
3.4.2. Kutup hareketi	27
3.4.3. Yer dönüklük	27
3.5. ECI ve ECEF Koordinat Sistemleri Arasında Dönüşüm	28
3.5.1. IAU 1976 presesyon modeli	30
3.5.2. IAU 1980 nutasyon modeli	31
3.5.3. Yer dönüklük matrisi	35
3.5.4. Kutup hareketi matrisi	36
4. MATERYAL VE YÖNTEM	37
4.1. Sayısal Uygulama Programının (eci2ecef) Tanıtımı ve Çalışma Prensipleri	37
4.2. Sayısal Uygulamada Kullanılan Veriler	45
4.2.1. IGS duyarlı efemeris	45
4.2.2. IERS EOP 14 C04 (IAU1980)	59
4.3. Sayısal Uygulamada Kullanılan GPS Uydularına Ait Bilgiler	61
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	68
5.1. GPS Uydularında Dönüşüme Etkilerin Sonuçları	68
5.1.1. Presesyon parametresinin koordinatlara etkisi	69
5.1.2. Nutasyon parametresinin koordinatlara etkisi	74
5.1.3. Yer dönüklük parametresinin koordinatlara etkisi	77
5.1.4. Kutup hareketi parametresinin koordinatlara etkisi	79

5.2. IGS İstasyonlarında Dönüşüme Etkilerin Sonuçları	81
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
KAYNAKLAR	95
EKLER	98



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	: Elipsin büyük yarı eksen
a_u	: Yükseklik açısı
A_i, A'_i	: Boylamdaki nutasyon katsayıları
A_u	: Azimut açısı
B_i, B'_i	: Ekliptik eğimindeki nutasyon
D	: Ay'ın Güneş'ten olan ortalama elongasyonu
$D_{ecef \rightarrow eci}$: ECEF sisteminden ECI sistemine dönüşümde kullanılan dönüşüm matrisi
$D_{eci \rightarrow ecef}$: ECI sisteminden ECEF sistemine dönüşümde kullanılan dönüşüm matrisi
f	: Elipsin basıklık değeri
F	: Ay'ın ortalama enlem argümanı
h	: Saat
JD_B	: Başlangıç epoğuna ait jülyen günü
JD_S	: Son epoğa ait jülyen günü
l	: Ay'ın ortalama anomalisi
l'	: Güneş'in ortalama anomalisi
n, e, u	: Yerel jeodezik koordinat sistemi eksenleri
N_0	: Başlangıç epoğunda ekliptik kutup noktası
N_g	: Nadir noktası
N_T	: Son epoğa ait ekliptik kutup noktası
$N(t)$: Nutasyon matrisi
$N^T(t)$: Nutasyon matrisinin tersi
P_0	: Başlangıç epoğunda yer dönme eksenini doğrultusundaki kutup noktası
P_T	: Son epoğa ait yer dönme eksenini doğrultusundaki kutup noktası
$P(t)$: Presesyon matrisi
$P^T(t)$: Presesyon matrisinin tersi
$R(t)$: Yer dönüklük matrisi
R, Q	: Presesyon açılarının başlangıç epoğuna ait ilkbahar noktasını öteleme sonucu oluşan ara noktalar
$R^T(t)$: Yer dönüklük matrisinin tersi
t	: Jülyen asrı biriminde zaman farkı
V_{ECEF}	: ECEF koordinat sistemindeki bir noktanın koordinat vektörü
V_{ECI}	: ECI koordinat sistemindeki bir noktanın koordinat vektörü
$W(t)$: Kutup hareketi matrisi
$W^T(t)$: Kutup hareketi matrisinin tersi
X, Y, Z	: Üç boyutlu kartezyen koordinat sistemi eksenleri
$X_{ECEF}, Y_{ECEF}, Z_{ECEF}$: ECEF sisteminde bir noktanın koordinatları
$X_{ECI}, Y_{ECI}, Z_{ECI}$: ECI sisteminde bir noktanın koordinatları
$X_{TCRS}, Y_{TCRS}, Z_{TCRS}$: TCRS eksenleri
$X_{TTRS}, Y_{TTRS}, Z_{TTRS}$: TTRS eksenleri
X_P, Y_P	: Kutup koordinatları
Z_g	: Zenit noktası

α	: Rektasansiyon açısı
β	: Boylamdaki ve ekliptik eğimindeki nutasyonun hesabında kullanılan ara değer
β_{ec}	: Ekliptik enlem
δ	: Deklinasyon açısı
$\Delta\varepsilon$: Ekliptik eğimindeki nutasyon
$\Delta\psi$: Boylamdaki nutasyon
ε	: Ortalama ekliptik eğimi
ε_t	: Gerçek ekliptik eğimi
ζ, z, θ	: IAU 1976 presesyon modeli presesyon açıları
λ_{ec}	: Ekliptik boylam
λ_k, θ_k, r_k	: Kutupsal koordinatlar
φ_c, λ_c	: Coğrafi koordinatlar
$\varphi_e, \lambda_e, h_e$: Elipsoidal koordinatlar
Ω	: Ay'ın yükselen düğüm noktasının boylamı
\mathcal{V}_0	: Başlangıç epoğuna ait ilkbahar noktası
\mathcal{V}_T	: Son epoğa ait ilkbahar noktası

Kısaltmalar

CCRS	: Conventional Celestial Reference System
CDDIS	: Crustal Dynamics Data Information System
CEP	: Celestial Ephemeris Pole
CIO	: Conventional International Origin
CTRF	: Conventional Terrestrial Reference System
CTRS	: Conventional Terrestrial Reference System
ECEF	: Earth Centered Earth Fixed
ECI	: Earth Centered Inertial
EOP	: Earth Orientation Parameters
FK5	: Fifth Fundamental Catalogue
GAST	: Greenwich Apparent Sidereal Time
GLONASS	: Global Navigation Satellite System
GMST	: Greenwich Mean Sidereal Time
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems
GPS	: Global Positioning System
IAU	: International Astronomical Union
ICRF	: International Celestial Reference Frame
IERS	: International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGS	: International GNSS Service
ITRF	: International Terrestrial Reference Frame
JD	: Julian Day
LLR	: Lunar Laser Ranging
MCRS	: Mean Celestial Reference System
MEO	: Medium Earth Orbit
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NCP	: North Celestial Pole
NEP	: North Ecliptic Pole
NGS	: National Geodetic Survey
PRN	: Pseudo Random Noise
SCP	: South Celestial Pole
SEP	: South Ecliptic Pole
SLR	: Satellite Laser Ranging
SOFA	: Standards of Fundamental Astronomy
SP1	: Standard Product 1
SP3	: Standard Product 3
SVN	: Space Vehicle Number
TCSR	: True Celestial Reference System
TTRS	: True Terrestrial Reference System
USA	: United States of America
USNO	: United States Naval Observatory
UT	: Universal Time
UTC	: Coordinated Universal Time
VLBI	: Very Long Baseline Interferometry
WGS84	: World Geodetic System 1984

1. GİRİŞ

Uydularla konum belirleme sistemleri (GNSS) ile yörüngelerinde hareket halinde bulunan ve bu yörüngedeki konumu zamana bağlı olarak bilinen navigasyon uydularından gelen sinyaller yardımıyla yeryüzündeki bir noktanın konumu zamana bağlı olarak üç boyutlu koordinat sisteminde ifade edilebilmektedir. Yeryüzündeki bir noktanın konumu uzaya göre sabit bir koordinat sisteminde (Koordinat sisteminin eksenleri Dünya'nın hareketlerinden bağımsız) tanımlanıyor olsaydı, yeryüzü her an hareket halinde olduğundan noktanın konumunu ifade eden koordinatlar zamana bağlı olarak değişecektir. Uydu gibi uzay boşluğunda yörüngesi doğrultusunda hareket eden cisimlerin konumu yere göre sabit bir koordinat sisteminde (Koordinat sisteminin eksenleri Dünya ile eş zamanlı aynı harekete sahip) tanımlanıyor olsaydı, cismin konumunu yalnızca yörüngesi doğrultusunda gerçekleştirdiği hareket değil Dünya'nın hareketleri de etkileyecektir. Bu senaryo jeodezide istenmeyen bir durum olacağından iki farklı koordinat sistemi karşımıza çıkmaktadır. Yeryüzündeki bir noktanın konumu yeryüzü hareketlerine göre sabit olan ECEF (Earth Centered Earth Fixed – Yer Merkezli Yer Sabit) koordinat sisteminde tanımlanırken uydu gibi gök cisimlerinin konumu ECI (Earth Centered Inertial – Yer Merkezli Uzay Sabit) koordinat sisteminde tanımlanmaktadır.

Uzaydaki hiçbir cisim sabit olmadığı gibi ECI koordinat sisteminin eksenlerinin doğrultusu da uzaya göre sabit (inertial) değildir. Bu sorunun çözümü için koordinat sisteminin eksen doğrultuları belirli bir zamana göre veya epöğa göre tanımlanmaktadır. ECI ve ECEF koordinat sistemi arasındaki dönüşüm Dünya'nın ve gök cisimlerinin hareketleri ve birbirleri ile etkileşimi sonucunda oluşan presesyon, nutasyon, kutup hareketi ve yer dönüklüğü düzeltmeleri ile sağlanmaktadır. Yer dönüklüğü zaman sistemleri ile ilgili bir konu olup yerin dönmesini tanımlamak amacıyla zaman değişkenli basit matematiksel fonksiyonlar ile ifade edilmektedir. Kutup hareketi ise ilerleyen bölümlerde detaylıca açıklanmış olup ortalama yer dönme eksenini ile anlık yer dönme eksenini arasındaki ilişkiyi kuran IERS tarafından yayınlanan veriler sonucunda belirlenen bir değişkendir.

Presesyonun ve Nutasyonun matematiksel olarak ifade edilebilmesi için IAU tarafından, 1976 yılında presesyonun ve 1980 yılında nutasyonun modelleri

yayımlanmıştır. Yayınlanan modellerde, değişken zaman olarak ele alınmış ve belirli bir epokta sabit alınan sistem parametreleri yardımıyla herhangi bir andaki presesyon ve nutasyon etkisi hesaplanabilmektedir. Literatürde modellere ait zamansal değişimler ve çeşitli gözlem teknikleri ile kıyaslamalar mevcut olup bunlar açısız birimlerde sunulmuştur. Fakat gerçek veriler ile gerçekleştirilen sayısal uygulamalar veya ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşümde koordinatlara etkilerini içeren çalışmalar oldukça azdır.

Bu çalışmada literatürdeki sayısal uygulama eksikliğine katkıda bulunmak ve dönüşümde kullanılan modellerin dönüşüme etkisini incelemek amacıyla ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşümü gerçekleştiren “Eci2ecef” isimli bir program geliştirilmiş ve GPS sisteminin en uzun görev süresine sahip olan GPS – SVN43 uydusu için 1 Ocak 2000’den 31 Ağustos 2022 yılına kadar olan gün periyotlu ECEF sistemindeki koordinatlarından ECI sistemindeki koordinatları IAU 1976 presesyon, IAU 1980 nutasyon modelleri ve IERS EOP 14 C04 serisi kullanılarak elde edilmiştir. Dördüncü bölümde ”Eci2ecef” programının çalışma prensibi, girdi ve çıktı ürünleri hakkında bilgiler verilmiş, IERS tarafından yayınlanan kutup koordinatları (X_p, Y_p) ve $UT1 - UTC$ zaman farkı değerlerinin zamana göre değişimi grafikleri ve GPS-SVN 43 uydusunun sayısal uygulama için ECEF sistemindeki veri setinden elde edilen ECI sistemindeki koordinatlarından oluşturulan grafikler sunulmuştur. Ayrıca GPS-SVN 43 ve 63 uydularının ECEF sistemindeki veri setinden hesaplanan WGS84 datumunda ki elipsoidal koordinatlarının harita üzerinde gösterimi yine bu bölümde verilmektedir. Beşinci bölümde GPS SVN 43 ve 63 uyduları ve IGS NABG00NOR ve SYOG00ATA istasyonları için gerçekleştirilen ECEF koordinatlarından ECI koordinatlarına dönüşüm işleminde presesyon, nutasyon, yer dönüklüğü ve kutup hareketi parametrelerinin koordinatlara etkisi sayısal olarak her bir epok için belirlenmiş, bunların grafikleri oluşturulmuş ve açıklanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tezin konusu olan ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşümü incelemek amacıyla literatürde pek fazla sayısal uygulama içeren kaynak bulunmamaktadır. Fakat koordinat sistemleri arasındaki dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için IAU 1976 presesyon ve IAU 1980 nutasyon modelleri detaylıca açıklanmış olup iki koordinat sistemi arasındaki dönüşümü gerçekleştiren birkaç program bulunmaktadır.

Capitaine ve ark, (2003)'de IAU 1976 presesyon modeli için hata kaynakları açıklanmıştır. Gerçekleştirilen çalışma ile presesyon modeli ve VLBI (Very Long Baseline Interferometry) ölçümleri karşılaştırılmış ve boylamda -3 mas/yıl, ekliptik eğiminde -0.25 mas/yıl değerinde hata tespit edilmiştir. IAU 1976 presesyon modelinde belirlenen J2000 epogu için ekliptik eğimi değeri, LLR (Lunar Laser Ranging) ve gezegensel gözlemler sonucunda elde edildiğinden 0".04 değerinde bir hata bulunduğu belirtilmiştir. Modelin tanımlanmasında kullanılan katsayıların yüzyılda ± 0.1 mas değerinde hata barındıracağı belirtilmiştir.

Krzyzek ve Skorupa (2015), gerçekleştirdikleri çalışmada, ECI – ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşümde iki model kullanmışlardır. Hassas dönüşüm için presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi parametreleri kullanılırken, basitleştirilmiş dönüşümde yalnızca yer dönüklük parametresi kullanılmıştır. Basitleştirilmiş dönüşüm modelinde uyduların kısa tahmin aralıklarında presesyon, nutasyon ve kutup hareketi parametreleri ihmal edilmiştir. GLONASS uydularından GLN17 uydusunun 15.01.2015 tarihli 30 dakikalık veri sıklığında yayımlanan yayın efemerisi verilerinden, her iki dönüşüm modeli kullanılarak ikinci sistem koordinatları elde edilmiş ve yayın efemerisinde yayınlanan koordinatlardan farkları alınarak koordinat sisteminin her bir eksen için 24 saatlik fark grafikleri sunulmuştur. Bu sayısal uygulama neticesinde hassas dönüşüm modeli ve basitleştirilmiş dönüşüm modeli sonuçları kıyaslanarak hassas dönüşüm modeli ile elde edilen ikinci sistem koordinatlarının yayın efemerisi verileri ile daha tutarlı olduğu kanıtlanmıştır. Bir diğer sayısal uygulamada her iki dönüşüm modeli kullanılarak, 24 GLONASS uydusunun belirlenen epok için dönüşümü gerçekleştirilmiş ve yayın efemerisinden alınan koordinatları ile mutlak farkları incelenmiştir. Sayısal uygulamada elde edilen veriler ile hassas ve

basitleştirilmiş dönüşüm modellerinin, iki koordinat sistemi arasındaki dönüşümden beklenen hassasiyet ve gerçekleştirilecek sayısal uygulamadaki zaman aralığına bağlı olarak modellerin uygulanabilirliği üzerine yardımcı olmaktadır.

Doğanalp, (2017)'de 4 Mart 1999 0^h UTC epogunda ECI sisteminde koordinatları ve epoga ait kutup koordinatları ve $UT1 - UTC$ zaman farkı verilen PRN 15 uydusunun ECEF sistemindeki koordinatları hesaplanmış ve hesaplamada kullanılan presesyon, nutasyon, yer dönüklük, kutup hareketi ve dönüşüm matrisleri sunulmuştur. Gerçekleştirilen çalışmada verilen değerler ile “Eci2ecef” programında da aynı hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve aynı sonuçlar elde edilmiştir.

IAU SOFA (Standards of Fundamental Astronomy, 2023) hizmeti temel astronomik modellere ait algoritmalar ile Fortran ve C programlama dillerinde faaliyet gösteren kütüphane tasarlamıştır. Tasarlanan kütüphane içerisinde bulunan fonksiyonlarda presesyon, nutasyon, kutup hareketi ve dönüşüm matrisi çözümleri bulunmaktadır. “PREC76” fonksiyonu ile IAU 1976 presesyon modelindeki presesyon açıları, “NUT80” fonksiyonu ile IAU 1980 nutasyon modelindeki parametrelerin hesaplanması ve farklı senaryolara ait ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşümün çözümleri bulunmaktadır (URL-6).

Anonim uzay mühendisleri tarafından akademik ve ticari çalışmalar için geliştirildiği belirtilen “Astroconverter” web sitesinde (www.astroconverter.com, 2023) tek bir nokta için ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm IAU 1976 presesyon, IAU 1980 nutasyon modelleri ile IERS EOP 14 C04 serisi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan programın doğruluğu santimetre ile desimetre arasında değiştiği belirtilmektedir (URL-5). Bu tezin sayısal uygulaması için tasarlanan “Eci2ecef” programı ve “Astroconverter” programında gerçekleştirilen uygulama sonuçları incelendiğinde metre birimindeki bir koordinat değeri için noktadan sonra beşinci ve altıncı hanelerde farklılıklar gözlenmiştir. İki uygulama arasındaki hassasiyet “Astroconverter” programının vaat ettiği doğruluk sınırları içerisinde.

IERS web sitesinde (www.iers.org, 2023) EOP 14 C04 serisine ait yayınlanan parametrelerin grafikleri bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan verilerin grafiği MATLAB programında oluşturulmuş olup IERS tarafından yayınlanan grafikler ile aynı

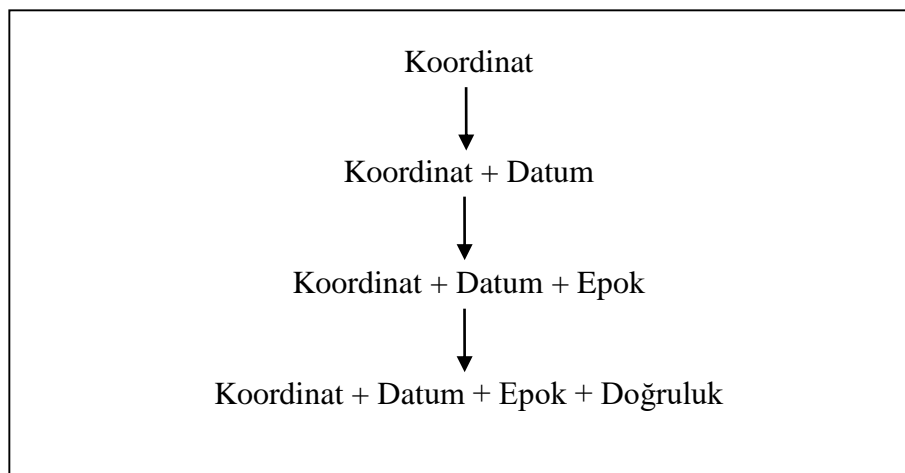
sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada sunulan görsellerin yanı sıra IERS grafiklerinde, kutup koordinatlarına (X_p, Y_p) ait üç boyutlu grafik web sitesinde mevcuttur. IGS tarafından analiz merkezlerinde hesaplanan uydu konumlarına ait veriler CDDIS veri merkezlerinde saklanmaktadır. Bu alışmada IGS Sonuç rnleri ile yayınlanan hassas uydu koordinatları kullanılmış olup NASA web sitesinden (cddis.nasa.gov, 2023) IGS Hızlı ve IGS Ultra Hızlı zmlere ulaşılabilir.



3. KOORDİNAT SİSTEMLERİ

3.1. Koordinat Tanımının Gelişimi

Jeodezi’de Koordinat: bir noktanın konumunu tanımlamak için oluşturulan matematiksel standartlara bağlanmış sistemlerde, noktanın konumunun sistemi tanımlayan eksenlerin üzerindeki başlangıç noktasına olan uzaklığını ifade eden sayısal değer olarak kullanılmaktadır. Bu şekilde konum bilgisi evrensel standartlara dayandırılarak koordinat sistemleri oluşturulmuştur. Zamanla farklı jeodezik çalışmalar ve farklı koordinat sistemleri için gerçekleştirilen konum belirleme çalışmaları bir bütünlük sağlayamadığından ve sürdürülebilir olmadığından koordinatın tek başına yeterli olamayacağı anlaşılmıştır. Bu sorunun çözümü için koordinat sisteminin başlangıcının ve hangi büyüklükler ile ifade edilmesi (Datum) gerektiği tanımlanmalıdır. Bu şekilde tanımlanan koordinatlar statik anlamlar taşımaya rağmen gezegenlerin çekim etkileri, yer kabuğu hareketleri gibi etmenler sonucunda dinamik koordinat sistemi gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bu durum koordinat tanımlamalarında epok bilgisinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Gerçekleştirilen jeodezik çalışmalarda elde edilen koordinat bilgilerinin doğruluğu kullanılan tekniklere veya işten beklenen hassasiyete göre değişiklik gösterebilir, bu nedenle elde edilen veri setinin sürdürülebilirliği açısından koordinat bilgisinin yanında doğruluk bilgisinin sunulması gerekmektedir. Manning ve Steed (2001) tarafından aşamaları sunulan konum tanımının gelişimi Şekil 3.1’deki gibidir.



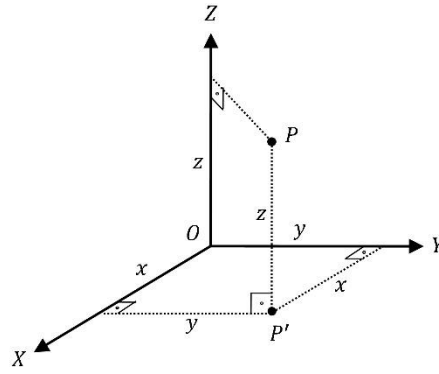
Şekil 3.1. Konum Tanımının Gelişim Aşamaları (Manning ve Steed, 2001).

Günümüzde Uydu Tabanlı Konum Belirleme Sistemlerinde, uzay sabit koordinat sistemleri, tanımlama amacına uygun olarak eylemsiz bir yapıda olabilmesi için belirli bir epöğa göre tanımlanmakta ve yer sabit koordinat sistemi ile uzay sabit koordinat sistemleri arasındaki dönüşümü tanımlayan modellerin hesabında zaman parametresi de hesaba dahil olmaktadır. Bu nedenle Uzay Jeodezisinde üç boyutlu koordinat sistemlerinin yerini dört boyutlu koordinat sistemlerine bıraktığı söylenebilir.

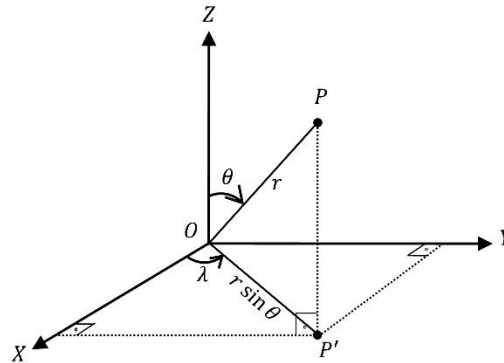
3.2. Koordinat Türleri

Koordinat değeri, koordinat sisteminin tanımlanma şekline bağlı olarak noktanın konumunun; eksene izdüşümünün koordinat sisteminin başlangıcına olan uzaklığı olarak, başlangıç noktası ile yaptığı doğrultu ile eksen doğrultusu arasındaki açıya ve açı ve uzunluk değerlerinden oluşabilmektedir. Jeodezide bir noktanın konumunu tanımlamak için Kartezyen, kutupsal, coğrafi ve elipsoidal koordinatlar kullanılmaktadır. Üç boyutlu kartezyen koordinat sistemi birbirine dik üç eksen (X, Y, Z) oluşmaktadır. Bu sistemde koordinatlar, noktanın konumunun eksenlere izdüşümünün başlangıç noktasına uzaklığı ile tanımlanmaktadır. Jeodezide bu şekilde tanımlanan koordinat sisteminin eksenleri belirli bir fiziksel olaya göre veya fiziksel olaya göre tanımlanan soyut kavramlara (Ekvator ve Greenwich gibi) dayandırılarak tanımlanmaktadır. Kutupsal Koordinatlar açı ve uzunluk değerlerinden oluşmaktadır. Üç boyutlu kutupsal koordinatlar; yatay açı, düşey açı ve uzunluk değerlerinden oluşmaktadır. Şekil 3.3'te P' noktası ve başlangıç noktasının (O) XY düzlemi üzerinde oluşturduğu doğrultu ile X eksenini arasında kalan yatay açıyı (λ_k), P noktası ile başlangıç noktası arasında kalan doğru parçası eğik uzunluğu (r_k), P noktası ile başlangıç noktasından geçen doğru ile Z eksenini arasında kalan açı eğik açıyı (θ_k) ifade etmektedir. Bir noktanın konumunun tanımlanması için hesap yüzeyi olarak kürenin seçilerek konumun enlem ve boylam ile ifade edildiği koordinatlara coğrafi koordinatlar denilmektedir. Yeryüzündeki bir P noktası Kürenin merkezi ile birleştirilirse bu doğrultu küre yüzeyine diktir. P noktasının küre yüzeyine izdüşümü (P') noktası, kürenin merkezi ve ekvator düzlemi bir arakesit oluşturmaktadır. Ekvator düzleminde başlangıç meridyeninden bu arakesite kadar olan yatay açı boylam (λ_c), ekvator düzlemi ile P' ve kürenin merkezinin oluşturduğu doğrultu arasındaki açı enlem (φ_c) olarak adlandırılmaktadır. Enlem değeri kuzey yarım küre için kuzey enlemi, güney yarım küre içinse güney enlemi olarak ifade edilirken, bir noktanın

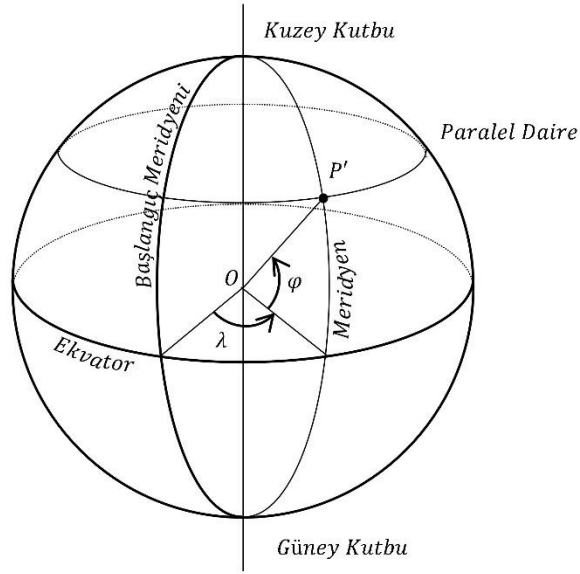
enlem değeri ekvator düzlemi üzerinde 0° iken kutuplarda 90° dir. Nokta başlangıç meridyeninin batısında ise batı boylamı, doğusunda ise doğu boylamı olarak adlandırılmaktadır. Bir noktanın boylamı başlangıç meridyeninin doğusunda ve batısında 0° ila 180° arasında değer almaktadır. Jeodezide hesap yüzeyi olarak dünyanın şekline en uygun geometrik şekil olarak dönelel elipsoit kullanılmaktadır. Bu nedenle elipsoidal koordinatlar, coğrafi koordinatların jeodezik çalışmalar için geliştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Yeryüzündeki bir P noktasının elipsoit yüzeyine izdüşümü elipsoit yüksekliği (h_e) olarak adlandırılır. Bu doğrultu, ekvator düzlemine kadar uzatıldığında elipsoit normali elde edilir ve ekvator düzlemi ile yapmış olduğu açığa jeodezik enlem (φ_e) denir. Bu doğrultudan geçen meridyen ile başlangıç meridyeni arasındaki açı jeodezik boylam (λ_e) olarak adlandırılmaktadır (Kahveci ve ark., 2021).



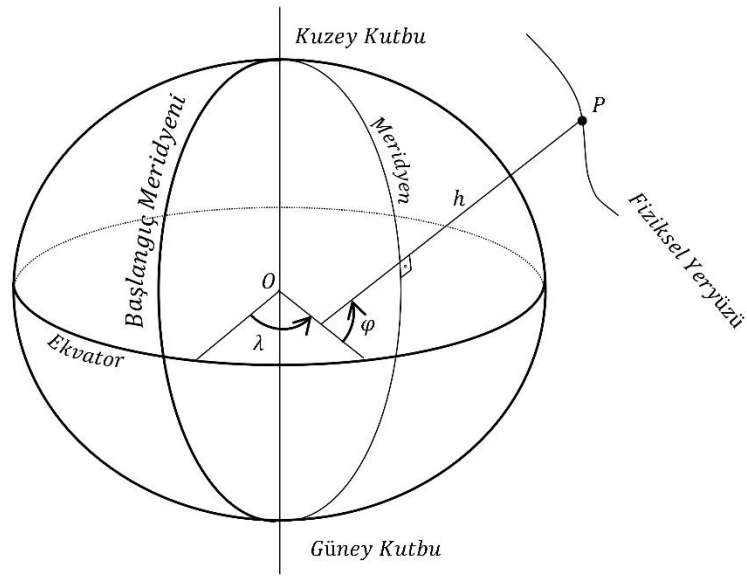
Şekil 3.2. Bir P noktasının kartezyen dik koordinatları (Kahveci ve ark., 2021).



Şekil 3.3. Bir P noktasının kutupsal koordinatları (Kahveci ve ark., 2021).



Şekil 3.4. Küre yüzeyinde bir P' noktasının coğrafi koordinatları (Kahveci ve ark., 2021).



Şekil 3.5. Yeryüzündeki bir P noktasının elipsoidal koordinatları (Kahveci ve ark., 2021).

3.3. Jeodezik Koordinat Sistemleri ve Sınıflandırılması

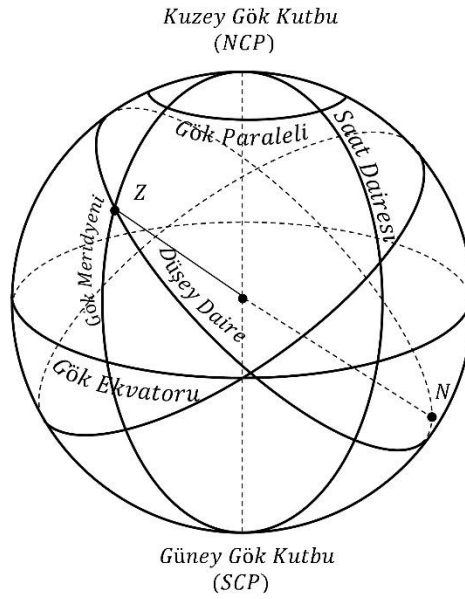
Jeodezide koordinat sistemleri yersel (terrestrial) ve göksel (celestial) olarak sınıflandırılmaktadır. Bunun yanında uyduların hareketleri öncelikle kendi yörünge düzleminde tanımlandığından ve yeryüzünde gerçekleştirilen jeodezik gözlemlerde ölçü anında lokal bir koordinat sistemi tanımlanıp daha sonra gerekli dönüşüm gerçekleştirildiğinden bu sınıflandırmaya yerel (lokal) koordinat sistemi ve yörünge koordinat sistemi de dahil olmaktadır.

3.3.1. Gök koordinat sistemi

Dünya ile en yakın yıldız arasındaki mesafe 4 ışık yılı ($40 \times 10^{12} \text{ km}$) olarak tahmin edilmektedir. Vega yıldızı, 30 ışık yılı uzaklıkta, şu anki kutup yıldızımız Polaris 50 ışık yılı uzaklıkta, Güneş ise 8.25 ışık yılı uzaklıktadır. Bu nedenle Dünya'nın yıldızlara olan uzaklığı söz konusu olduğunda boyutları ihmal edilebilir düzeydedir. Bu büyüklükler sebebiyle yeryüzündeki bir gözlemci tarafından ışık hızında gittiği varsayılan yıldızların konumunda çok az farklılıklar gözlenecektir. Dünya ve yıldızlar arasındaki ilişki, aralarındaki mesafe göz ardı edilip yıldızların devasa çaplı bir küre üzerinde bulunduğu bir gök küresi ile tanımlanmaktadır. Bu gök küresinin merkezinde dünya hatta güneş sistemi boyutsuz olarak kabul edilebilir fakat belirlenen doğrultular yeryüzü üzerindeki bir nokta ve yerin merkezi ile tanımlanabilir. Thomson (1981)'de Gök Koordinat Sisteminin, Yer Koordinat Sistemi ve Yörünge Koordinat Sisteminden farkını; Gök Koordinat Sisteminde mesafeler göz ardı edilip yalnızca doğrultular yardımıyla konum tayin edilmekte ve kullanılan geometri olarak elipsoid yerine küre kullanılması olarak açıklamıştır.

Dünya'nın anlık yer dönme ekseninden geçen doğru gök küreyi kuzey (NCP) ve güney gök kutup (SCP) noktasında kesmektedir. Yerin ekvator düzlemi gök küreye kadar uzatıldığında gök ekvatoru elde edilir. Yeryüzündeki bir gözlemcinin bulunduğu nokta; kuzey yarım küresindeyse bu noktadan geçen gravite doğrultusunun gök küreyi deldiği nokta zenit (Z_g), güney yarım küredeyse gök küreyi deldiği nokta nadir (N_g) olarak adlandırılır. Kutuplardan geçen ve gök ekvatoruna dik olan büyük daire saat dairesi olarak adlandırılır. Zenit noktasından ve kutuplardan geçen dairenin oluşturduğu düzleme gök meridyeni denir. Gök ekvatoruna paralel olan küçük dairelere gök paralelleri denir.

Gözlemcinin ufkunu tanımlamak için kullanılan, gravite doğrultusuna dik ve gök kürenin merkezinden geçen düzleme gök ufuk düzlemi denir. Zenit ve nadir noktalarından geçen, gök ufuk düzlemine dik olan düzleme düşey daire denir. Gök ufuk düzlemine paralel olan küçük daireler almucantar olarak tanımlanmaktadır. Dünya'nın dönüşü nedeniyle; zenit, nadir, düşey daire, almucantarlar, gök ufuk düzlemi ve gök meridyeninin konumları gök küreye göre sürekli olarak değişecektir (Thomson, 1981; Kahveci ve ark., 2021).

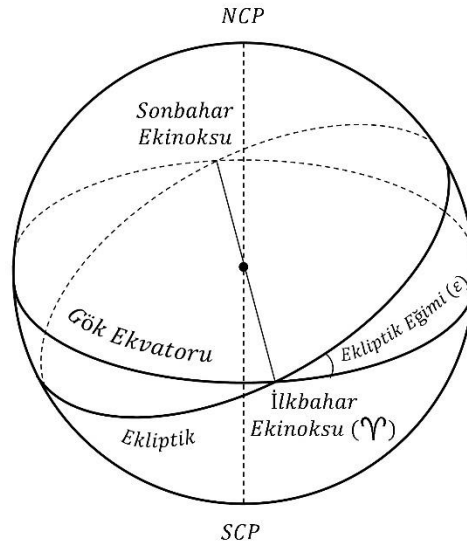


Şekil 3.6. Gök küresi ve gök küresine göre tanımlanan geometrik referanslar (Thomson, 1981).

Herhangi bir an için gök küre üzerinde seçilen bir yıldızdan (S) geçen saat dairesi ve gök meridyeninin oluşturduğu küresel üçgene astronomik üçgen denmektedir ve bu üçgenin köşeleri; kuzey gök kutbu (NCP), zenit ve S noktalarından oluşmaktadır (Thomson, 1981).

Bu tanımlamaların dışında, Dünya'nın Güneş etrafındaki hareketinin gök küresi ile ilişkili tanımlamalarda bulunmaktadır. Dünya'nın Güneş etrafındaki yörüngesi ekliptik olarak tanımlanmaktadır. Yer merkezinden geçen ve ekliptik düzlemine dik olan doğru gök küresini kuzey ekliptik kutbu (NEP: North Ecliptic Pole) ve güney ekliptik kutbunda (SEP: South Ecliptic Pole) keser (Kahveci ve ark., 2021). Ekliptik düzlemi ile yer ekvator düzleminin kesiştiği doğrunun gök küreyi kestiği noktalara ekinoks adı verilmektedir. Görünen Güneş, güney yarımküreden kuzey yarımküreye geçtiği anda bir başka ifadeyle güney yarımküreden kuzey yarımküreye geçerken güneş ışınları

ekvatorun üzerine 90° 'lik açıyla düştüğünde oluşan ekinoks'a ilkbahar ekinoksu (vernal equinox) adı verilmektedir. Diğer ekinoks ise sonbahar ekinoksu olarak adlandırılmaktadır. Gök ekvatoru ve ekliptik düzlemi arasındaki dar açı ekliptik eğimi olarak adlandırılmaktadır. (Thomson, 1981).



Şekil 3.7. Ekliptik düzlemi ile gök ekvatoru arasındaki ilişki (Thomson, 1981).

Ay'ın ve Güneş'in Dünya'ya uyguladığı çekim etkisi sonucunda yer dönme eksenini sabit bir doğrultuda bulunmadığından (Presesyon ve Nutasyon) ve yıldızlar gök küre üzerinde sabit bir nokta olarak bulunmayıp hareket halinde olduklarından yıldızların konumlarının Dünya'ya göre konumlarının gök küresi üzerinde belirtilmesi yalnızca bir yaklaşım olarak kalmaktadır.

Jeodezik Astronomide, dört adet gök koordinat sistemi kullanılmakta olup bunlar; ekliptik, rektasansiyon, saat açısı ve ufuk sistemleridir.

3.3.1.1. Ekliptik koordinat sistemi

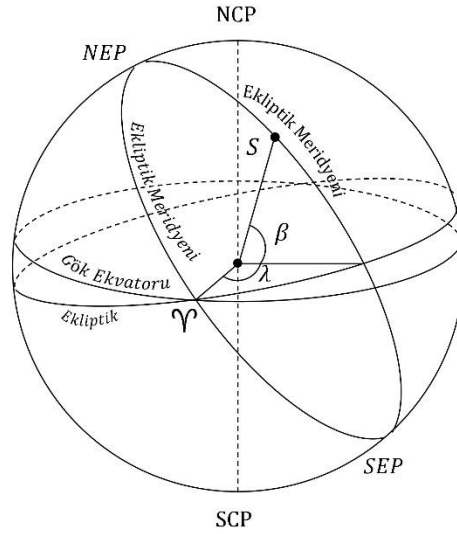
Krakiwsky and Wells (1971)'de ekliptik koordinat sistemi şu şekilde tanımlanmıştır.

- Koordinat Sisteminin merkezi, Güneş'in merkezidir (Kahveci ve ark. (2021)'de koordinat sisteminin merkezinin yer merkezi olabileceği de belirtilmiştir. Gök küresinde Dünya'nın hatta Güneş Sisteminin boyutları göz ardı edilebileceğinden iki tanımlamada aynı ifadeyi açıklamaktadır.).
- Koordinat sisteminin asal düzlemi, ekliptik düzlemi ve asal kutbu (Z eksen), kuzey ekliptik kutbu (NEP) doğrultusunda olarak açıklanmaktadır.
- Koordinat sisteminin asal eksen (X eksen) ilkbahar ekinoksu doğrultusunda ve Y eksen bir sağ el sistemi oluşturmaktadır.

Ekliptik koordinat sistemi, gök koordinat sistemleri arasında uzay sabit (inertial) bir koordinat sistemi olmaya diğer bir ifadeyle yıldızlara göre hareketsiz bir koordinat sistemi olmaya en yakın olanıdır. Buna rağmen gezegenlerin Dünya-Güneş sistemine etkisi nedeniyle ekliptik düzlem, yer dönme eksenini etrafında yavaşça dönmektedir.

Gök küresi yüzeyinde, ekliptik kutupları kesen büyük daire ekliptik meridyeni olarak adlandırılmaktadır. İlkbahar noktasından geçen ekliptik meridyeni ile gök küresi üzerindeki bir yıldızdan geçen ekliptik meridyeni arasındaki ekliptik boylamı, yıldızın ve gök küresinin başlangıç noktasından geçen doğrunun ekliptik düzleme açısız uzaklığı ekliptik enlemi olarak adlandırılır (Krakiwsky and Wells, 1971).

Şekil 3.8'de ekliptik koordinat sisteminde, gök küresi üzerindeki bir yıldız (S) ait ekliptik enlem (β_{ec}) ve ekliptik boylam (λ_{ec}) değerleri görülmektedir. Ekliptik koordinat sisteminde asal düzlem ekliptik düzlemi iken, ikincil düzlem olarak ilkbahar noktasından geçen ekliptik meridyeni kullanılmaktadır.



Şekil 3.8. Bir S Yıldızının Ekliptik Koordinat Sisteminde Gösterimi (Kahveci ve ark., 2021).

3.3.1.2. Rektasansiyon koordinat sistemi

Yıldızların ve gök cisimlerinin koordinatları Rektasansiyon (Right Ascension) koordinat sisteminde yayınlandığından gök koordinat sistemleri arasında büyük öneme sahiptir. Bradt (2004)'te bazı gök cisimlerinin koordinatları örnek olarak Çizelge 3.1'deki gibi verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı gök cisimlerinin Rektasansiyon koordinat sistemindeki koordinatları (Bradt, 2004).

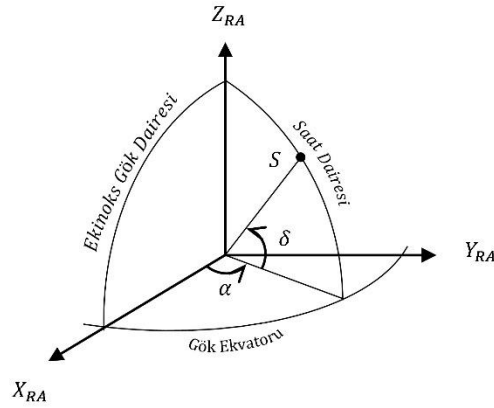
Gök Cismi	Epok	Rektasansiyon (α)		Deklinasyon (δ)	
		h	m	$^{\circ}$	$'$
Sirius	J2000	06	45.1	-16	43
Andromeda Nebula	J2000	00	42.7	+41	16
Crab Nebula	J2000	05	34.5	+22	01
Proxima Cen	J2000	14	29.7	-62	41
Tarantula Nebula	J2000	05	39	-69	06
Vernal Equinox	J2000	00	00	00	00

Rektasansiyon koordinat sistemi; yersel, göksel ve yörünge koordinat sistemleri arasındaki bağlantının kurulmasında da kullanılmaktadır. Koordinat sisteminin ana referans düzlemini gök ekvatoru, ikincil referans düzlemini ise Kuzey ve Güney gök kutbundan ve ekinokslardan geçen büyük daire oluşturmaktadır. Rektasansiyon koordinat sisteminde, S gök cismine ait doğrultu rektasansiyon (α) ve deklinasyon (δ) büyüklükleri

ile tanımlanmaktadır (Krakiwsky ve Wells, 1971; Thomson, 1981). Krakiwsky ve Wells (1971) tarafından sistemin özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Koordinat sisteminin merkezi helyosentriktir,
- Ana referans düzlemini gök ekvator düzlemi ve ana kutbunu (Z-ekseni) kuzey gök kutbu (NCP) oluşturmaktadır.
- Ana eksenini (X-ekseni) ilkbahar noktası doğrultusundadır.
- Y eksenini bir sağ el koordinat sistemi oluşturacak şekilde seçilmiştir.

Rektasansiyon, ekinokslardan geçen büyük daire ile gök cisminin geçen saat dairesi arasında kalan açıdır. Gök ekvatoru üzerinde ilkbahar noktasından doğuya doğru ölçülmektedir ve 0^h ile 24^h arasında değer almaktadır (Thomson, 1981). Deklinasyon; gök ekvator düzlemi ile gök cismini koordinat sisteminin merkezi ile birleştiren doğrultu arasındaki açıdır ve 0° ile 90° arasında ölçülür. Deklinasyon değeri kuzey yarımkürede artı, güney yarımkürede eksi değer almaktadır (Krakiwsky ve Wells, 1971; Kahveci ve ark., 2021).



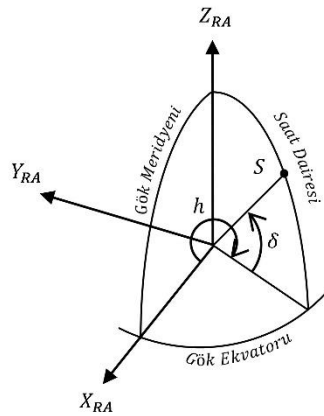
Şekil 3.9. Bir gök cisminin (S) rektasansiyon ve deklinasyon açıları (Krakiwsky ve Wells, 1971).

3.3.1.3. Saat açısı koordinat sistemi

Krakiwsky ve Wells (1971) koordinat sisteminin özelliklerini aşağıdaki gibi tanımlamıştır.

- Koordinat sisteminin merkezi helyosentriktir.
- Ana referans düzlemi gök ekvator düzlemidir.
- İkincil referans düzlemi gözlemcinin gök meridyenidir. Ana eksen (X-ekseni) gök ekvatoru ile gök meridyeninin kesiştiği noktadan geçer.
- Y eksenini bir sol el koordinat sistemi oluşturmaktadır.

Koordinat sistemi gök ekvatoruna göre tanımlandığından Z eksenini Kuzey Gök Kutbu (NCP) doğrultusundadır (Thomson, 1981; Jekeli, 2016). Saat açısı koordinat sistemi gözlemcinin gök meridyenine göre tanımlandığından, koordinat sisteminin eksenlerinin doğrultusu gözlemcinin hareketine bağlı olarak hareket halinde olacaktır. Koordinat sisteminde bir gök cisminin konumu, saat açısına ve deklinasyon açısına göre tanımlanmaktadır. Saat açısı; gök ekvator düzlemi üzerinde, gök meridyeninden batıya doğru gök cisminin geçen saat dairesine olan açısal uzaklık olarak tanımlanmakta ve 0^h ile 24^h arasında değer almaktadır. Deklinasyon açısı ise Rektasansiyon sisteminde anlatıldığı gibi ölçülmektedir (Krakiwsky ve Wells, 1971).



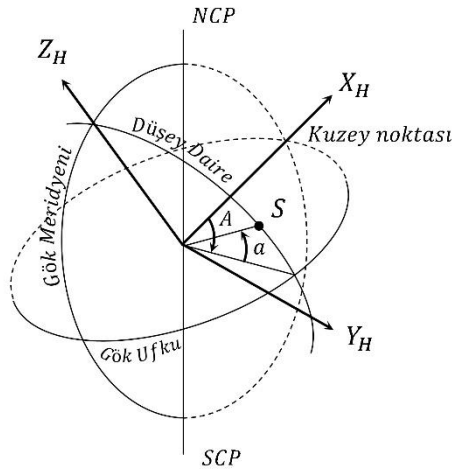
Şekil 3.10. Bir gök cisminin saat açısı ve deklinasyon açısı (Krakiwsky ve Wells, 1971).

3.3.1.4. Ufuk koordinat sistemi

Krakiwsky ve Wells (1971) koordinat sisteminin özelliklerini aşağıdaki gibi tanımlamıştır.

- Koordinat sisteminin merkezi helyosentriktir.
- Ana kutup (Z-ekseni) gözlemcinin zenit noktası doğrultusundadır ve ana referans düzlemi gözlemcinin ufuk düzlemidir.
- Ana referans eksen (X-ekseni) kuzey doğrultusundadır.
- Y eksenini bir sol el koordinat sistemi oluşturacak şekilde seçilir.

Koordinat sisteminin ikincil referans düzlemi gözlemcinin gök meridyenidir. Ufuk koordinat sistemi, bir gök cisminin gözlemciye göre konumunu tanımlamak için kullanılmaktadır. Koordinat sistemi gözlemciye göre tanımlandığından saat açısı koordinat sisteminde olduğu gibi gözlemcinin hareketi koordinat sistemini oluşturan eksenlerin doğrultularını etkileyecektir. Bir gök cisminin doğrultusu, yükseklik (a_u) ve Azimut (A_u) açıları ile tanımlanmaktadır. Yükseklik, gök ufuk düzlemi ile gök cismini koordinat sisteminin merkezi ile birleştiren doğrultunun saat dairesi üzerindeki açısal uzaklığıdır ve 0° ile 90° arasında değer alır. Azimut ise gök ufuk düzlemi üzerinde, gözlemcinin gök meridyeni ile gök cisminin geçen düşey daire arasındaki kuzeyden güneye ölçülen açısal uzaklıktır ve 0° ile 360° arasında değer alır (Thomson, 1981, Duffet – Smith ve Zwart, 2011).



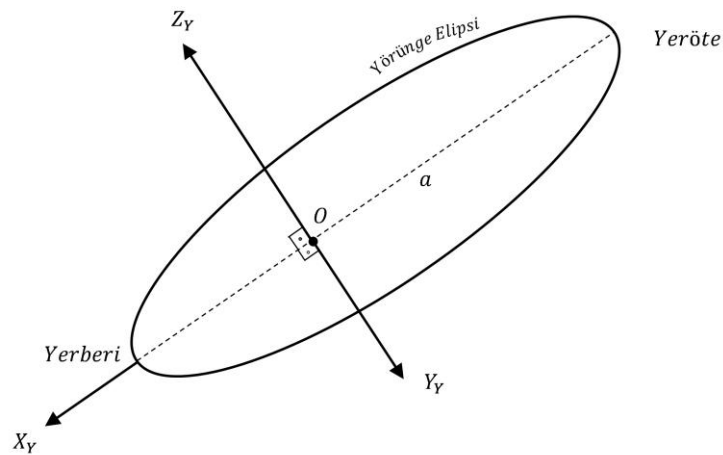
Şekil 3.11. Bir gök cisminin yükseklik ve azimut açısı (Thomson, 1981).

3.3.2. Yörünge koordinat sistemi

Kepler'in birinci yasasına göre gezegenler Güneş'in etrafında elips şeklinde hareket ederler ve Güneş bu elipsin odak noktalarından birisindedir. Bu tanıımı yer etrafında yörüngede hareket eden uydular içinde kullanmak doğrudur. Uyduların yer etrafında izlediği yörüngeye yörünge elipsi adı verilmektedir ve yerin gravite merkezi bu elipsin odak noktalarından birindedir. Uydunun izlediği bu yörüngede yere en yakın olduğu nokta yerberi (perigee), en uzak olduğu nokta yeröte (apogee) olarak adlandırılmaktadır. Yerberi ve yeröte noktaları elipsin büyük yarı eksenini üzerinde bulunurlar ve bu eksene apsis eksenini adı verilir (Krakiwsky ve Wells, 1971).

Krakiwsky ve Wells (1971)'de koordinat sisteminin özellikleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

- Koordinat sisteminin merkezi yerin gravite merkezidir.
- Ana referans düzlemi yörünge elipsidir ve Z eksenini bu düzleme diktir.
- Ana eksenini (X-eksenini) apsis eksenini üzerindedir. X ekseniniin pozitif yönü yerberi noktası doğrultusundadır (Kahveci ve ark., 2021).
- Y eksenini bir sağ el koordinat sistemi oluşturmaktadır.



Şekil 3.12. Yörünge koordinat sistemi eksen doğrultuları (Krakiwsky ve Wells, 1971).

3.3.3. Yerel (Toposentrik) koordinat sistemi

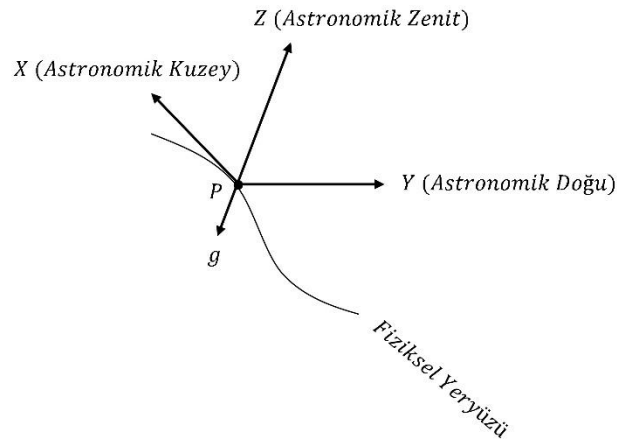
Toposentrik koordinat sistemleri ana referans kutup doğrultusunun tanımlanmasına göre ikiye ayrılmaktadır. Ana referans kutup doğrultusu; (Z eksen) astronomik zenit doğrultusunda (Seeber, 2003) bir diğer ifade ile eşpotansiyel yüzeye dik ise (gravite doğrultusu ile çakışık ise) yerel astronomik sistem, elipsoit normali doğrultusu ile çakışık ise yerel jeodezik sistem olarak adlandırılmaktadır (Krakiwsky ve Wells, 1971).

3.3.3.1. Yerel astronomik koordinat sistemi

Seeber (2003)'te koordinat sisteminin merkezini ve eksen doğrultularını aşağıdaki gibi açıklamaktadır.

- Koordinat sisteminin merkezi gözlem yapılan noktadır.
- Z eksen astronomik zenit (Z_g) doğrultusundadır.
- X eksen kuzey (astronomik meridyen) doğrultusundadır.
- Y eksen doğuyu göstermektedir.

Ana referans düzlemi, gözlem yapılan noktadan geçen gravite doğrultusuna dik düzlemdir (Krakiwsky ve Wells, 1971).



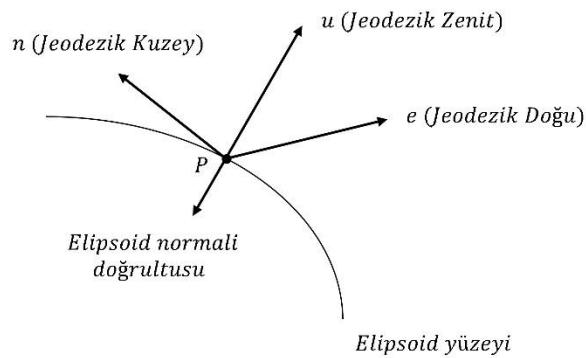
Şekil 3.13. Lokal astronomik koordinat sistemi eksen doğrultuları (Krakiwsky ve Wells., 1971).

3.3.3.2. Yerel jeodezik koordinat sistemi

Soler ve Hothem (1988)'de yerel jeodezik koordinat sisteminin merkezi ve eksen doğrultuları aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

- Koordinat sisteminin merkezi elipsoid yüzeyinde tanımlanan gözlem noktasıdır.
- u-ekseni, elipsoid normali doğrultusunda pozitif yönü elipsoidin dışına (jeodezik zenit) doğrudur ve yukarı doğrultu olarak adlandırılmaktadır.
- e-ekseni, u eksenine dik ve elipsoid yüzeyindeki gözlem noktasında jeodezik paralele teğet doğrultudur. Doğu doğrultusunda pozitif değer almaktadır.
- n-ekseni, e ve u eksenlerine dik, elipsoid yüzeyindeki gözlem noktasından geçen jeodezik meridyene teğettir ve pozitif yönü kuzey doğrultusudur. Sağ el koordinat sistemi oluşturmaktadır.

Yerel jeodezik koordinat sistemi, GPS anten yüksekliklerinin jeodezik ölçü noktasına indirgenmesinde, baz vektörlerinin yatay ve düşey bileşenler şeklinde ifade edilmesine ve ölçü noktasındaki merkez dışı değerlerin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Kahveci ve Yıldız, 2022).



Şekil 3.14. Lokal jeodezik koordinat sistemi eksen doğrultuları (Kahveci ve ark., 2021).

3.3.4. Yer merkezli (Jeosentrik) koordinat sistemi

Jeodezinin en önemli amaçlarından birisi yeryüzündeki bir noktanın konumunun üç boyutlu bir koordinat sisteminde ifade edilmesi gerekliliğidir. Uydularla konum belirleme sistemlerinde (GNSS) uyduların ve ölçü yapılan noktaların konumları kartezyen koordinat sisteminde konum ve hız vektörleri ile ifade edilmektedir. GNSS matematiğinde uyduların konumlarının tanımlanması için uzay sabit (inertial, space-fixed) ve yeryüzündeki noktaların konumlarının tanımlanması için yer sabit (earth-fixed) koordinat sistemleri kullanılmaktadır (Kahveci ve ark., 2021). Eğer uydu konumları yer sabit koordinat sisteminde tanımlanmaya çalışılırdı, uydu konumunu etkileyen yörünge hareketine ek olarak yerin dönüşü ile beraber uydunun konumu da değişecektir. Yeryüzündeki bir nokta uzay sabit bir koordinat sisteminde tanımlanmaya çalışılırdı, nokta konumu zamana bağlı olarak değişecektir. Bu sebeple GNSS matematiğinde iki farklı koordinat sistemi kullanılmaktadır.

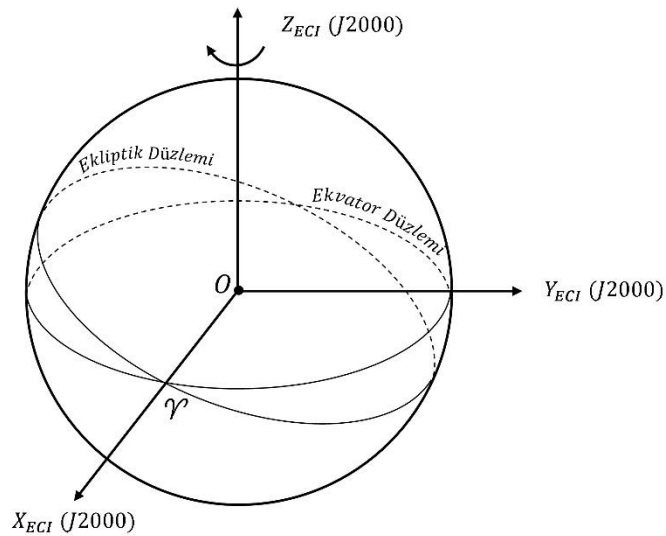
3.3.4.1. Yer merkezli uzay sabit (ECI) koordinat sistemi

Yer merkezli uzay sabit (ECI – Earth Centered Inertial) koordinat sistemi uyduların yörüngelerinin belirlenmesi ve konumlarının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. ECI koordinat sisteminin merkezi yerin ağırlık merkezidir ve eksenlerinin yıldızlara göre sabit olması amaçlanmaktadır. ECI koordinat sisteminde XY düzlemi yer ekvator düzlemi ile çakışık, +X eksenini gök küreye göre belirli bir yönde sabit, +Z eksenini XY düzlemine dik ve kuzey kutup doğrultusunda ve +Y eksenini sağ el koordinat sistemi oluşturacak şekilde seçilmiştir. Dünya'nın şeklinin kutuplardan basık ve ekvatorunda şişkin bir yapıda olması ve Güneş'in ve Ay'ın ekvator üzerindeki çekim etkileri nedeniyle ekvator düzlemi gök küreye göre hareket halindedir. ECI koordinat sisteminde X eksenini gök küreye göre ve Z eksenini ekvator düzlemine göre tanımlandığından, ECI koordinat sistemi amaçlandığı gibi eylemsiz bir koordinat sistemi olamamaktadır. Bu sorunun çözümü için koordinat sisteminin eksenleri belirli bir zamana veya epoğa göre tanımlanmaktadır (Tuşat, 2003; Kaplan ve Hegarty, 2006; De Ruitter ve ark., 2013).

ECI koordinat sistemi, GPS matematiğinde J2000 epoğunda (1 Ocak 2000 12^h UTC) zamanındaki ortalama ekvator ve ekinoks ile çakışık kabul edilmektedir. Bu şekilde tanımlanan koordinat sistemine Ortalama Gök Referans Sistemi (MCRS; Mean Celestial

Reference System) ya da Geleneksel Gök Referans Sistemi (CCRS) adı verilmektedir. Bu sistemde +X eksenini yeryüzü kitle merkezinden ilkbahar noktası doğrultusundadır, Y ve Z eksenini yukarıda tanımlandığı gibidir. Eğer ECI koordinat sistemi J2000 epöğü yerine herhangi bir an için tanımlanırsa bu şekilde tanımlanan koordinat sistemine Gerçek Gök Referans Sistemi (TCRS; True Celestial Reference System) adı verilir (Tuşat, 2003; Kahveci ve Yıldız, 2022).

1991 yılında IAU tarafından ECI sistemi, 1 Ocak 1998 yılından itibaren geçerli olmak üzere FK5 yıldız kataloğı yerini almıştır. ECI koordinat sisteminin uygulamadaki hali ICRF (International Celestial Reference Frame), Samanyolu Galaksisi'nin dışında yer alan 608 gök cisminin ekvatoryal koordinatlarının VLBI yöntemiyle J2000 epöğünde gözlenmesi ile oluşturulmuştur (Seeber, 2003; Kahveci ve ark., 2021).



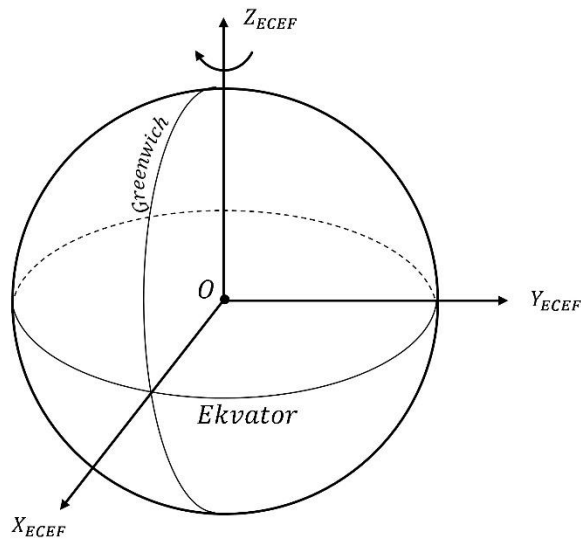
Şekil 3.15. ECI (J2000 Epöğü) koordinat sistemi eksen doğrultuları (Kahveci ve Yıldız, 2022).

3.3.4.2. Yer merkezli yer sabit (ECEF) koordinat sistemi

GNSS matematiğinde yeryüzündeki bir noktanın konumunun tanımlanabilmesi için koordinat sisteminin eksenlerinin yerin dönüşü ile eş zamanlı hareket halinde bulunan bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. ECEF (Earth Centered Earth Fixed) koordinat sistemi bu amacı gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. ECEF koordinat sisteminde GNSS

alıcısı koordinatlarının elipsoidal koordinatlar olarak sunulması kolaydır (Kaplan ve Hegarty, 2006).

ECEF koordinat sisteminin merkezi yerin kitle merkezi ile çakışık, Z eksenini ortalama yer dönme eksenini (1900-1905 yılları arasındaki ortalama yer dönme eksenini – CIO; Conventional International Origin) çakışık, X eksenini ortalama ekvator düzlemi üzerinde koordinat sisteminin merkezinden ortalama Greenwich meridyeni doğrultusundadır. Y eksenini sağ el koordinat sistemi oluşturmaktadır. ECEF koordinat sistemi CTRS (Conventional Terrestrial Reference System) olarak bilinmektedir. Yer Dönme eksenini sürekli hareket halindedir. ECEF koordinat sistemine gerekli düzeltmeler getirilerek gerçek yer dönme eksenine göre tanımlanmasına TTRS (True Terrestrial Reference System) adı verilmektedir (Xu ve Xu, 2016). CTRS ifadesi soyut bir kavram olup uygulamadaki adı CTRF (Conventional Terrestrial Reference Frame) olarak bilinmektedir. CTRF yeryüzünde tesis edilmiş yer kontrol noktalarında yapılan ölçümler sonucunda belirlenmektedir. Bu kontrol noktaların çoğunda SLR (Satellite Laser Ranging) ve VLBI (Very Long Baseline Interferometry) sistemleri tesis edilmiştir (Kahveci ve Yıldız, 2022). CTRF sistemine örnek olarak IERS (International Earth Rotation Service) tarafından kurulmuş ITRF (IERS Terrestrial Reference Frame) verilebilir. ITRF düzenli olarak güncellenmektedir. Yayınlanan sistemlerin kısaltması çerçevesinin oluşturulması için kullanılan verinin zamanına göre belirlenmektedir (Tuşat, 2003; Hofmann-Wellenhof ve ark., 2008).

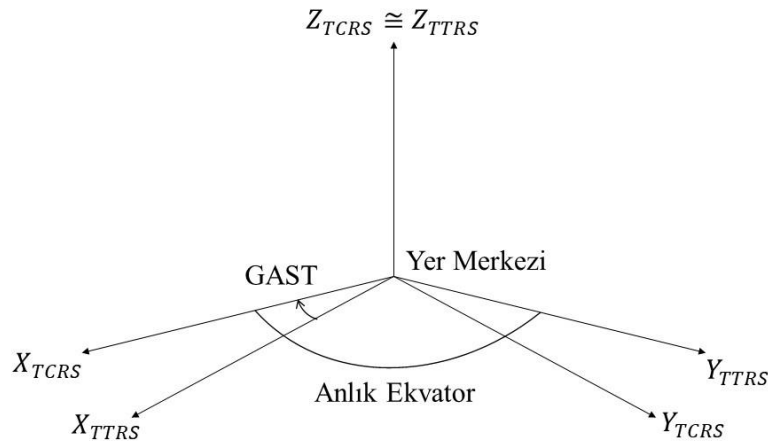


Şekil 3.16. ECEF koordinat sistemi eksen doğrultuları (Kahveci ve Yıldız, 2022).

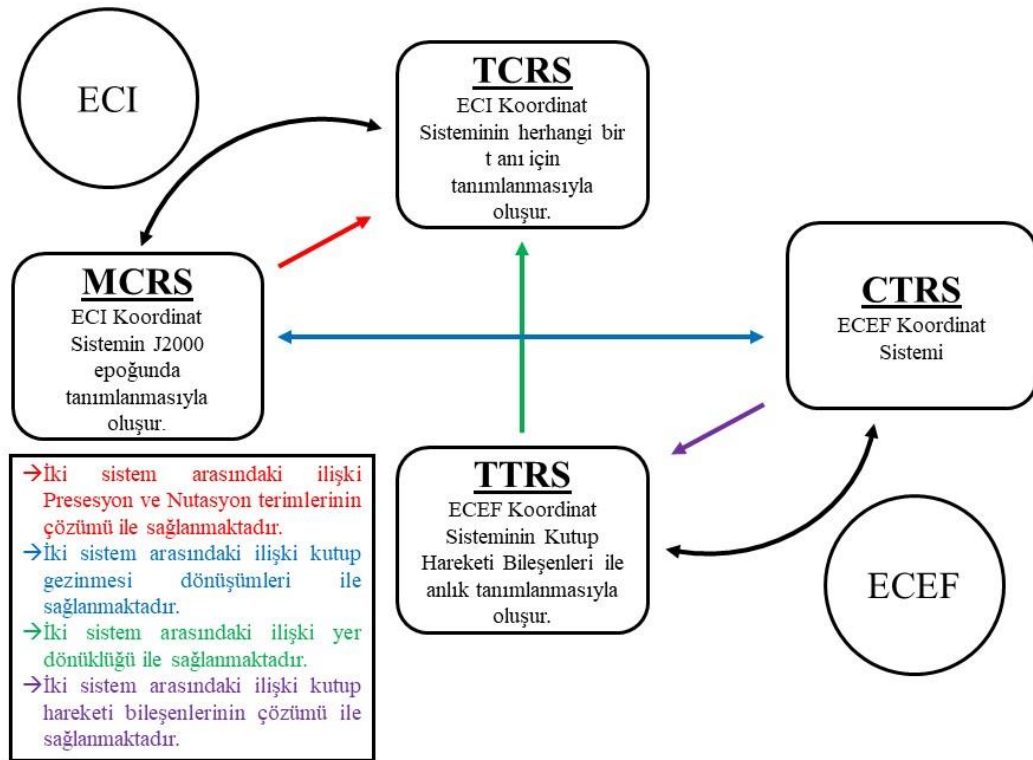
3.4. ECI ve ECEF Koordinat Sistemleri Arasındaki İlişki

ECI ve ECEF koordinat sistemleri, amaçlarına uygun olarak sabit olması için belirli bir ana veya sabit bir eksen doğrultusuna göre tanımlanmaktadır. ECI koordinat sisteminin J2000 epoğuna göre tanımlanmasına MCRS, herhangi bir an için tanımlanmasına TCRS adı verilmektedir. ECEF koordinat sistemi tanımlanmasında Z eksenini CIO'ya göre tanımlanmaktadır. Gerekli düzeltmeler getirilerek ECEF koordinat sisteminin Z eksenini gerçek yer dönme eksenine göre tanımlanmasına TTRS adı verilmektedir.

Tanımlanan bu sistemler arasındaki ilişkiler Presesyon, Nutasyon, Yer Dönüklüğü ve Kutup Hareketi ile tanımlanmaktadır. MCRS ve TCRS sistemleri arasındaki ilişki presesyon ve nutasyon kavramları ile kurulmaktadır. Yalnızca presesyon etkisinin dikkate alındığı durumda elde edilen ekvator düzlemi ve ekinoks konumuna ortalama ekvator ve ortalama ekinoks adı verilmektedir. Nutasyon etkisinin ortalama ekvator ve ortalama ekinoksa eklenmesi ile anlık ekvator ve anlık ekinoks elde edilmektedir. CTRS ve TTRS arasındaki ilişki kutup hareketi bileşenleri ile kurulmaktadır. Ayrıca kutup hareketi dönüşümleri CTRS ile CCRS sistemleri arasındaki dönüşümü tamamlamaktadır. ECI ve ECEF koordinat sistemlerinin anlık olarak tanımlanması ile oluşan TCRS ve TTRS'nin Z eksenleri ve XY düzlemleri çakışık kabul edilmektedir. İki sistem arasındaki ilişki Greenwich Görünen Yıldız Zamanı (GAST; Greenwich Apparent Sidereal Time) ile kurulmaktadır (Kahveci ve Yıldız, 2022).



Şekil 3.17. TTRS ve TCRS ilişkisi (Kahveci ve Yıldız, 2022).



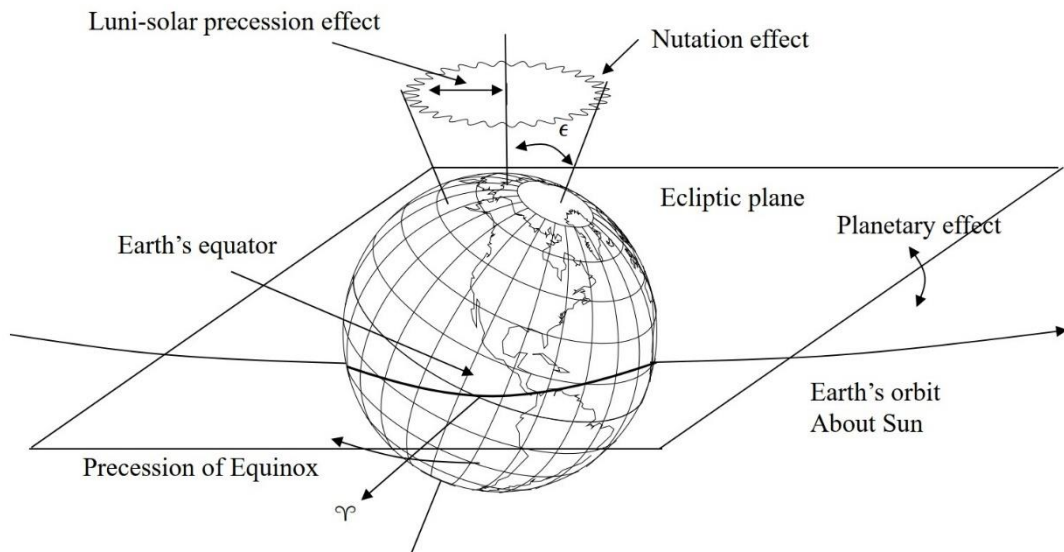
Şekil 3.18. MCRS, TCRS, CTRS ve TTRS arasındaki ilişki.

3.4.1. Presesyon ve nutasyon

Dünya'nın ve başta Güneş ve Ay olmak üzere diğer Güneş sistemindeki gezegenlerin kütle çekiminden kaynaklanan etkileşimi, Dünya'nın yörüngesel hareketini etkilemektedir. Bunun yanında dünya kutuplardan basık ve ekvatorunda şişkin bir yapıda olmasından dolayı bu etkileşim yer dönme eksenini de etkilemektedir. Güneş sistemindeki diğer gezegenler göz ardı edildiğinde Dünya ve Ay'ın Güneş'in etrafında izlediği yörünge ekliptik düzlemi olarak adlandırılmakta ve sabit bir yapıda olmaktadır fakat gezegenlerin kütle çekiminden dolayı ekliptik düzlemi dinamik bir şekilde hareket etmektedir ve bu hareketin sebebine gezegensel presesyon adı verilir. Ekliptik eğimi sıfır ve Dünya'nın şekli küre olarak düşünülürse, yer dönme ekseninin dönüklüğünü etkileyecek bir kütle çekim kuvveti olmayacaktır. Fakat ekliptik eğimi ve Dünya'nın basıklık değeri (f) sıfır olmadığından Güneş'in, Ay'ın ve gezegenlerin ekvatora uyguladığı çekim etkisi sonucu oluşan harekete luni-solar presesyon adı verilmektedir. Gezegensel presesyon ve luni-solar presesyon birlikte genel presesyon olarak bilinmektedir (Jekeli, 2016).

Gezegensel presesyon; ekinoksun her yüzyılda $12''$ batıya doğru kaymasına ve ekliptik eğiminin her yüzyılda $47''$ azalmasına neden olmaktadır. Luni-solar presesyon yer dönme eksenini ifade eden Kuzey Gök Efemeris Kutbunun (CEP), Kuzey Ekliptik Kutup (NEP) etrafındaki dairesel hareketidir ve periyodu yaklaşık 26000 yıldır. Luni-solar presesyonun bu kadar uzun periyoda sahip olmasının nedeni ekliptik eğiminin yaklaşık olarak 23.5° olmasından kaynaklanmaktadır (Vallado, 2013; Kahveci ve Yıldız, 2022). Presesyon hareketinin etkisi ile günümüzde Polaris yıldızından yaklaşık 1° uzakta olan yer dönme eksenini doğrultusu, yaklaşık 12000 yıl sonra Vega yıldızı doğrultusunda olacaktır (Karttunen ve ark., 2007).

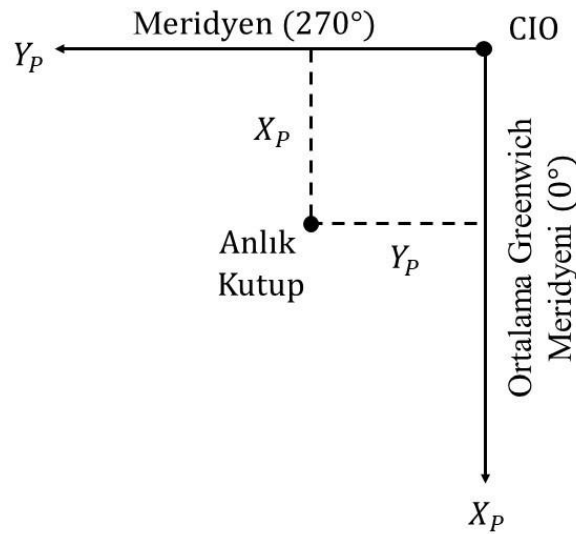
Ay, Dünya'nın ekvator çıkıntısı üzerinde presesyona ek olarak yer dönme ekseninin Kuzey Ekliptik Kutup etrafındaki hareketinde küçük salınımlara neden olan bir tork üretir ve bu harekete nutasyon adı verilmektedir. Nutasyon hareketi ekliptiğe dik ve paralel etkilerin bileşkesi olarak tanımlanmaktadır. Ekliptiğe paralel olan bileşen gök cisimlerinin göksel boylamını etkileyen boylamdaki nutasyon, ekliptiğe dik olan bileşen ekvator düzlemi ile ekliptik arasındaki eğikliği etkileyen ekliptik eğimindeki nutasyon olarak tanımlanmaktadır (Meeus, 1998). Ay'ın Dünya etrafındaki yörüngesi 5° eğimli olduğundan Dünya'nın ekvatoruna uyguladığı periyodik torkta aylık değişimlere neden olmaktadır. Nutasyon hareketi maksimum genliğinde ekliptik eğiminde $9''$ ve boylamda $17''$ etki etmektedir (Vallado, 2013). Nutasyon, presesyona göre çok daha kısa süreli periyoda sahip olup 14 gün ila 18.6 yıl arasında periyoda sahiptir (Xu ve Xu, 2016).



Şekil 3.19. Presesyon ve nutasyon hareketi (Vallado, 2013).

3.4.2. Kutup hareketi

Yer Sabit bir referans sistemi tanımlamak oldukça güçtür. Bunun nedeni litosfer tabakasının (yeryuvarının 100 km'lik dış tabakası) bağımsız olarak hareket eden yaklaşık 20 rijit (sert, katı) tabakadan oluşmasıdır. Bu plakalar yer içindeki hareketleri nedeniyle yılda 1-10 cm yer değiştirirler (Kutoğlu, 2001). Bunun sonucu olarak yer kabuğuna göre yerin dönme ekseninin konumu değişmektedir. Bu harekete kutup hareketi adı verilmektedir. Anlık yer dönme eksenini matematiksel olarak tanımlamak için 1900 ile 1905 yılları arasındaki ortalama yer dönme eksenini ifade eden CIO (Conventional International Origin) referans yer dönme eksenini kullanılmaktadır ve anlık yer dönme eksenini CIO'ya getirilen düzeltme değerleri ile tanımlanmaktadır (Thomson, 1981). CIO'dan anlık yer dönme eksenine geçişte kutup koordinatları olarak bilinen X_p ve Y_p açıları kullanılmaktadır. X_p açısı ECEF sisteminin +X eksenini doğrultusunda pozitif olup, Y_p açısı 270 derece meridyeni doğrultusunda pozitifdir (Kahveci ve Yıldız, 2022).

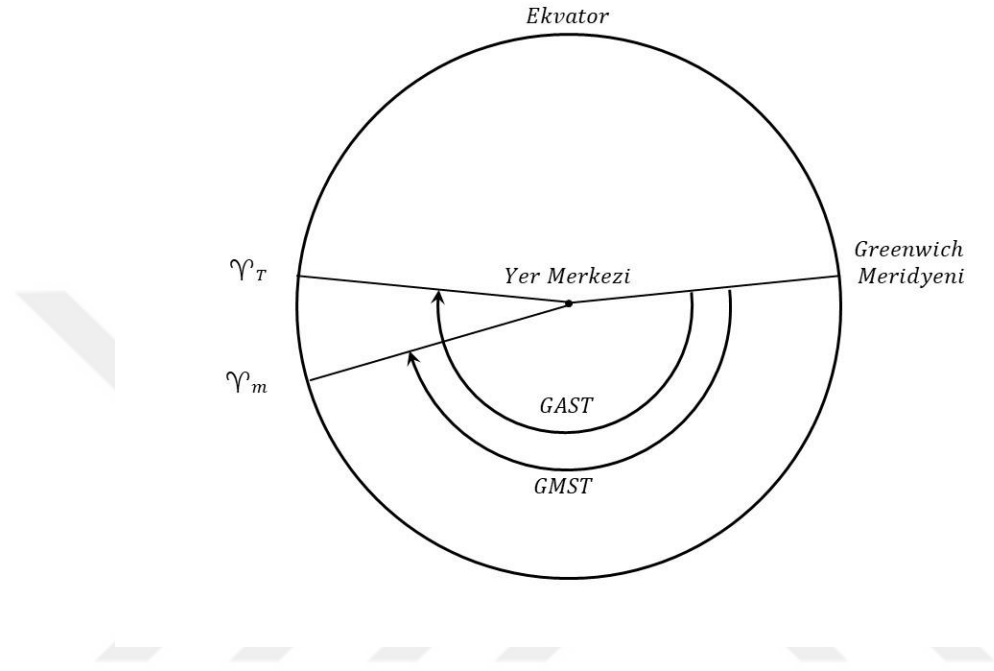


Şekil 3.20. Kutup koordinatları (X_p , Y_p) eksen doğrultuları (Kahveci ve Yıldız, 2022).

3.4.3. Yer dönüklük

TCRS ve TTRS sistemlerinin Z eksenleri ve XY düzlemleri çakışık olduğundan ve ECEF sisteminin X eksenini ortalama Greenwich meridyeniye göre, ECI sisteminin X eksenini ilkbahar noktasına göre tanımlandığından X ve Y eksenleri arasındaki ilişki yerin

dönüşünü tanımlamak için kullanılan yıldız zamanının bir terimi olan Greenwich Apparent Sidereal Time (GAST) ile kurulmaktadır. GAST; Greenwich ortalama meridyeninden, presesyon ve nutasyon düzeltmesi getirilmiş anlık ilkbahar noktası doğrultusuna olan açıdır (Kahveci ve Yıldız, 2022).



Şekil 3.21. GMST ve GAST açısı (Subirana ve ark., 2011).

3.5. ECI ve ECEF Koordinat Sistemleri Arasında Dönüşüm

ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm presesyon, nutasyon, yer dönüklüğü ve kutup hareketi matrislerinin çözümü ile elde edilen dönüşüm matrisi ile sağlanmaktadır. Uluslararası Astronomi Birliği (IAU – International Astronomical Union) tarafından 1976 yılında Presesyon'un ve 1980 yılında Nutasyon'un matematiksel modelleri tanımlanmıştır. Presesyon, Nutasyon ve Yer dönüklüğü parametreleri zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır.

Kutup koordinatları, Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (IERS – International Earth Rotation and Reference System Service) tarafından Bülten A ve Bülten B olmak üzere periyodik olarak yayınlanmaktadır. Bülten içerikleri UT (Universal Time), yer kutbunun koordinatları ve gök kutbunun kayıklık değerleridir. Bülten A USNO (Amerika Birleşik Devletleri Deniz Gözlemevi – United States Naval

Observatory) tarafından, Bülten B ise Paris Gözlemevindeki Merkez Büro tarafından hazırlanmaktadır (Kahveci ve Yıldız, 2022).

Capitaine (1990), Subirana ve ark. (2013) ve Xu ve Xu (2016)'da ECI sisteminde koordinatları verilen bir noktanın ECEF sistemindeki koordinatları (3.1) bağıntısındaki gibi ifade edilmektedir. Bağıntıda $W(t)$ kutup hareketi matrisini, $R(t)$ yer dönüklük matrisini, $N(t)$ nutasyon matrisini, $P(t)$ presesyon matrisini V ise koordinat vektörünü ifade etmektedir.

$$V_{ECEF} = W_{(3,3)}(t) \times R_{(3,3)}(t) \times N_{(3,3)}(t) \times P_{(3,3)}(t) \times V_{ECI} \quad (3.1)$$

ECEF koordinatları verilen bir noktanın ECI sistemindeki koordinatlarını hesaplamak için ise (3.2) bağıntısı kullanılmaktadır. $P^T(t)$ presesyon matrisinin tersini, $N^T(t)$ nutasyon matrisinin tersini, $R^T(t)$ yer dönüklük matrisinin tersini, $W^T(t)$ kutup hareketi matrisinin tersini ifade etmektedir (Subirana ve ark, 2011; Capitaine, 2015).

$$V_{ECI} = P_{(3,3)}^T(t) \times N_{(3,3)}^T(t) \times R_{(3,3)}^T(t) \times W_{(3,3)}^T(t) \times V_{ECEF} \quad (3.2)$$

ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşümde zaman parametresi jülyen asrı biriminde kullanılmaktadır. Herhangi bir tarihin jülyen günü (JD) (3.3) bağıntısı yardımıyla hesaplanmaktadır. Hesaplanan tarih için Ay, Ocak veya Şubat ise Ay değerine 12 eklenir ve Yıl değerinden 1 çıkartılır.

$$JD = Tamsayı(365.25 \times Yıl) + Tamsayı(30.6001 \times (Ay + 1)) + Gün + \frac{Saat}{24} + 1720981.5 \quad (3.3)$$

Dönüşüm için kullanılacak matrislerde başlangıç (JD_B) ve son epok (JD_S) arasındaki zaman değişimini jülyen asrı biriminde ifade eden değer (t) (3.4) bağıntısı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$t = (JD_S - JD_B) / 36525 \quad (3.4)$$

Yıldız zamanı ile atomik zaman arasındaki ilişki $UT1 - UTC$ ile kurulmaktadır. $UT1 - UTC$ değeri yerin dönüşündeki düzensizlikleri tanımlamaktadır ve bir saniyeden

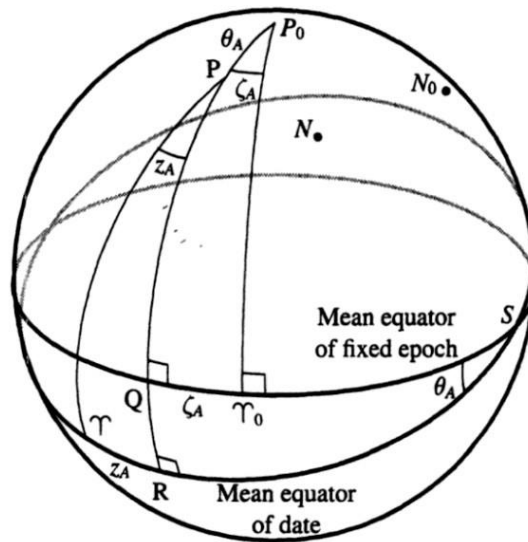
az bir değere sahiptir. Dönüşüm matrisini elde etmek için jülyen günü hesaplanırken saat değeri olarak (3.5) bağıntısı ile hesaplanan $UT1$ kullanılmaktadır. Ardından (3.6) bağıntısı kullanılarak son epok ve J2000 epogu arasındaki zaman farkı jülyen asrı olarak ifade edilir (Kahveci ve Yıldız, 2022).

$$UT1 = UTC + (UT1 - UTC) \quad (3.5)$$

$$t = (JD (UT1) - 2451545.0) / 36525 \quad (3.6)$$

3.5.1. IAU 1976 presesyon modeli

IAU 1976 presesyon modeli üç dönüklük açısı (ζ, z, θ) ile tanımlanmaktadır. Şekil 3.22'de başlangıç epogunda yer dönme eksenini ifade eden kutup noktası P_0 ve ekliptik kutbu ifade eden nokta N_0 olarak verilmiştir. Son epoga ait yer dönme eksenini ifade eden kutup noktası P_T ve ekliptik kutup noktası N_T olarak ifade edilmektedir. Başlangıç epoguna ait ilkbahar noktası \mathcal{V}_0 son epoga ait ilkbahar noktası \mathcal{V}_T olarak verilmektedir. $-\zeta$ açısı, başlangıç epoguna ait ortalama ekvator düzlemi üzerinde P_0 \mathcal{V}_0 doğrultusunu P_T noktasından geçirmektedir. Bu düzeltme ile kartezyen koordinat sisteminin X eksenini Q noktası doğrultusundadır. $+\theta$ açısı ile P_0 kutup noktasından P_T noktasına geçiş sağlanır ve X eksenini R noktası doğrultusundadır. XY düzlemi son epoga ait ortalama ekvator üzerindedir. $-z$ açısı ile X eksenini \mathcal{V}_T noktası doğrultusundadır (Seidelmann, 1992).



Şekil 3.22. Presesyon açıları (Seidelmann, 1992).

Presesyon açıları (3.7), (3.8) ve (3.9) bağıntıları yardımıyla hesaplanmaktadır (Uzel ve Eren, 1995; Doğanalp, 2013).

$$z = 2306''.2181t + 1''.09468t^2 + 0''.018203t^3 \quad (3.7)$$

$$\theta = 2004''.3109t - 0''.42665t^2 - 0''.041833t^3 \quad (3.8)$$

$$\zeta = 2306''.2181t + 0''.30188t^2 + 0''.017998t^3 \quad (3.9)$$

Hesaplanan presesyon açıları (3.10) bağıntısında yerlerine konularak presesyon matrisi elde edilmektedir (Lieske, 1979).

$$\begin{bmatrix} \cos z \cos \theta \cos \zeta - \sin z \sin \zeta & -\cos z \cos \theta \sin \zeta - \sin z \cos \zeta & -\cos z \sin \theta \\ \sin z \cos \theta \cos \zeta + \cos z \sin \zeta & -\sin z \cos \theta \sin \zeta + \cos z \cos \zeta & -\sin z \sin \theta \\ \sin \theta \cos \zeta & -\sin \theta \sin \zeta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.5.2. IAU 1980 nutasyon modeli

IAU 1980 nutasyon modeli ile nutasyon matrisi (3.11) bağıntısı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \cos \Delta\psi & -\sin \Delta\psi \cos \varepsilon & -\sin \Delta\psi \sin \varepsilon \\ \sin \Delta\psi \cos \varepsilon_t & \cos \Delta\psi \cos \varepsilon_t \cos \varepsilon + \sin \varepsilon_t \sin \varepsilon & \cos \Delta\psi \cos \varepsilon_t \sin \varepsilon - \sin \varepsilon_t \cos \varepsilon \\ \sin \Delta\psi \sin \varepsilon_t & \cos \Delta\psi \sin \varepsilon_t \cos \varepsilon - \cos \varepsilon_t \sin \varepsilon & \cos \Delta\psi \sin \varepsilon_t \sin \varepsilon - \cos \varepsilon_t \cos \varepsilon \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Nutasyon matrisinin hücreleri gerçek ekliptik eğimi (ε_t), ortalama ekliptik eğimi (ε), boylamdaki nutasyon ($\Delta\psi$) ve ekliptik eğimindeki nutasyon ($\Delta\varepsilon$) parametreleri ile hesaplanmaktadır. Ortalama ve gerçek ekliptik eğimi sırasıyla (3.12) ve (3.13) bağıntısındaki gibidir.

$$\varepsilon = 84381''.448 - 46''.8150t - 0''.00059t^2 + 0''.001813t^3 \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon + \Delta\varepsilon \quad (3.13)$$

Boylamdaki ve ekliptik eğimindeki nutasyon değerleri sırasıyla (3.14) ve (3.15) bağıntıları yardımıyla hesaplanmaktadır (McCarthy, 1996).

$$\Delta\psi = \sum_{i=1}^{106} (A_i + A'_i t) \sin \beta \quad (3.14)$$

$$\Delta\varepsilon = \sum_{i=1}^{106} (B_i + B'_i t) \cos \beta \quad (3.15)$$

Burada A_i ve A'_i boylamdaki nutasyona, B_i ve B'_i ekliptik eğimindeki nutasyona ait katsayılar olup, β ile gösterilen değer bir ara değerdir ve (3.16) bağıntısı yardımıyla hesaplanmaktadır (McCarthy, 1996).

$$\beta = N_1 l + N_2 l' + N_3 F + N_4 D + N_5 \Omega \quad (3.16)$$

(3.16) bağıntısında belirtilen; Ay'ın ortalama anomalisi (l), Güneş'in ortalama anomalisi (l'), Ay'ın ortalama enlem argümanı (F), Ay'ın Güneş'ten olan ortalama elongasyonu (D) ve Ay'ın yükselen düğüm noktasının ortalama boylamını (Ω) ifade etmektedir ve sırasıyla (3.17), (3.18), (3.19), (3.20), (3.21) bağıntıları ile hesaplanmaktadır. $N_i (i = 1, \dots, 5)$ sırasıyla ilgili parametrenin katsayılarını ifade etmektedir (McCarthy, 1996).

$$l = 134^\circ.96340251 + 1717915923''.2178t + 31''.8792t^2 + 0''.051635t^3 - 0''.00024470t^4 \quad (3.17)$$

$$l' = 357^\circ.52910918 + 129596581''.0481t - 0''.5532t^2 - 0''.000136t^3 - 0''.00001149t^4 \quad (3.18)$$

$$F = 93^\circ.27209062 + 1739527262''.8478t - 12.7512t^2 - 0''.001037t^3 + 0''.00000417t^4 \quad (3.19)$$

$$D = 297^\circ.85019547 + 1602961601''.2090t - 6''.3706t^2 + 0''.006593t^3 - 0''.00003169t^4 \quad (3.20)$$

$$\Omega = 125^\circ.04455501 - 6962890''.2665t + 7''.4722t^2 + 0''.007702t^2 - 0''.00005939t^4 \quad (3.21)$$

Boylamdaki nutasyonun ve ekliptik eğimindeki nutasyonun hesaplanmasında kullanılan katsayılar IAU 1980 nutasyon modelinde tanımlanmış olup Çizelge 3.2'deki gibidir (Seidelmann, 1982; McCarthy, 1996).

Çizelge 3.2. IAU 1980 nutasyon modeli katsayıları (McCarthy, 1996).

Katsayılar									
Sıra No (i)	l	l'	F	D	Ω	A_i	A'_i	B_i	B'_i
1	0	0	0	0	1	-171996	-174.2	92025	8.9
2	0	0	0	0	2	2062	0.2	-895	0.5
3	-2	0	2	0	1	46	0	-24	0
4	2	0	-2	0	0	11	0	0	0
5	-2	0	2	0	2	-3	0	1	0
6	1	-1	0	-1	0	-3	0	0	0
7	0	-2	2	-2	1	-2	0	1	0
8	2	0	-2	0	1	1	0	0	0
9	0	0	2	-2	2	-13187	-1.6	5736	-3.1
10	0	1	0	0	0	1426	-3.4	54	-0.1
11	0	1	2	-2	2	-517	1.2	224	-0.6
12	0	-1	2	-2	2	217	-0.5	-95	0.3
13	0	0	2	-2	1	129	0.1	-70	0
14	2	0	0	-2	0	48	0	1	0
15	0	0	2	-2	0	-22	0	0	0
16	0	2	0	0	0	17	-0.1	0	0
17	0	1	0	0	1	-15	0	9	0
18	0	2	2	-2	2	-16	0.1	7	0
19	0	-1	0	0	1	-12	0	6	0
20	-2	0	0	2	1	-6	0	3	0
21	0	-1	2	-2	1	-5	0	3	0
22	2	0	0	-2	1	4	0	-2	0
23	0	1	2	-2	1	4	0	-2	0
24	1	0	0	-1	0	-4	0	0	0
25	2	1	0	-2	0	1	0	0	0
26	0	0	-2	2	1	1	0	0	0
27	0	1	-2	2	0	-1	0	0	0
28	0	1	0	0	2	1	0	0	0
29	-1	0	0	1	1	1	0	0	0
30	0	1	2	-2	0	-1	0	0	0
31	0	0	2	0	2	-2274	-0.2	977	-0.5
32	1	0	0	0	0	712	0.1	-7	0
33	0	0	2	0	1	-386	-0.4	200	0
34	1	0	2	0	2	-301	0	129	-0.1
35	1	0	0	-2	0	-158	0	-1	0
36	-1	0	2	0	2	123	0	-53	0
37	0	0	0	2	0	63	0	-2	0
38	1	0	0	0	1	63	0.1	-33	0
39	-1	0	0	0	1	-58	-0.1	32	0
40	-1	0	2	2	2	-59	0	26	0
41	1	0	2	0	1	-51	0	27	0
42	0	0	2	2	2	-38	0	16	0

Katsayılar									
Sıra No (i)	l	l'	F	D	Ω	A_i	A'_i	B_i	B'_i
43	2	0	0	0	0	29	0	-1	0
44	1	0	2	-2	2	29	0	-12	0
45	2	0	2	0	2	-31	0	13	0
46	0	0	2	0	0	26	0	-1	0
47	-1	0	2	0	1	21	0	-10	0
48	-1	0	0	2	1	16	0	-8	0
49	1	0	0	-2	1	-13	0	7	0
50	-1	0	2	2	1	-10	0	5	0
51	1	1	0	-2	0	-7	0	0	0
52	0	1	2	0	2	7	0	-3	0
53	0	-1	2	0	2	-7	0	3	0
54	1	0	2	2	2	-8	0	3	0
55	1	0	0	2	0	6	0	0	0
56	2	0	2	-2	2	6	0	-3	0
57	0	0	0	2	1	-6	0	3	0
58	0	0	2	2	1	-7	0	3	0
59	1	0	2	-2	1	6	0	-3	0
60	0	0	0	-2	1	-5	0	3	0
61	1	-1	0	0	0	5	0	0	0
62	2	0	2	0	1	-5	0	3	0
63	0	1	0	-2	0	-4	0	0	0
64	1	0	-2	0	0	4	0	0	0
65	0	0	0	1	0	-4	0	0	0
66	1	1	0	0	0	-3	0	0	0
67	1	0	2	0	0	3	0	0	0
68	1	-1	2	0	2	-3	0	1	0
69	-1	-1	2	2	2	-3	0	1	0
70	-2	0	0	0	1	-2	0	1	0
71	3	0	2	0	2	-3	0	1	0
72	0	-1	2	2	2	-3	0	1	0
73	1	1	2	0	2	2	0	-1	0
74	-1	0	2	-2	1	-2	0	1	0
75	2	0	0	0	1	2	0	-1	0
76	1	0	0	0	2	-2	0	1	0
77	3	0	0	0	0	2	0	0	0
78	0	0	2	1	2	2	0	-1	0
79	-1	0	0	0	2	1	0	-1	0
80	1	0	0	-4	0	-1	0	0	0
81	-2	0	2	2	2	1	0	-1	0
82	-1	0	2	4	2	-2	0	1	0
83	2	0	0	-4	0	-1	0	0	0
84	1	1	2	-2	2	1	0	-1	0
85	1	0	2	2	1	-1	0	1	0
86	-2	0	2	4	2	-1	0	1	0

Katsayılar									
Sıra No (i)	l	l'	F	D	Ω	A_i	A'_i	B_i	B'_i
87	-1	0	4	0	2	1	0	0	0
88	1	-1	0	-2	0	1	0	0	0
89	2	0	2	-2	1	1	0	-1	0
90	2	0	2	2	2	-1	0	0	0
91	1	0	0	2	1	-1	0	0	0
92	0	0	4	-2	2	1	0	0	0
93	3	0	2	-2	2	1	0	0	0
94	1	0	2	-2	0	-1	0	0	0
95	0	1	2	0	1	1	0	0	0
96	-1	-1	0	2	1	1	0	0	0
97	0	0	-2	0	1	-1	0	0	0
98	0	0	2	-1	2	-1	0	0	0
99	0	1	0	2	0	-1	0	0	0
100	1	0	-2	-2	0	-1	0	0	0
101	0	-1	2	0	1	-1	0	0	0
102	1	1	0	-2	1	-1	0	0	0
103	1	0	-2	2	0	-1	0	0	0
104	2	0	0	2	0	1	0	0	0
105	0	0	2	4	2	-1	0	0	0
106	0	1	0	1	0	1	0	0	0

3.5.3. Yer dönüklük matrisi

Yer dönüklük matrisi (3.22) bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$R(t) = \begin{bmatrix} \cos(GAST) & \sin(GAST) & 0 \\ -\sin(GAST) & \cos(GAST) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

İlkbahar noktası, ortalama ve anlık olmak üzere iki farklı durum ile tanımlanmaktadır. Ortalama ilkbahar noktası, ortalama ekvatora (yalnızca presesyon etkisinin dikkate alındığı ekvator düzlemi) göre tanımlanırken anlık ilkbahar noktası, anlık ekvator düzlemine göre tanımlanmaktadır. Greenwich Mean Sidereal Time (GMST), Greenwich meridyeninden ortalama ilkbahar noktasına olan saat açısı iken, Greenwich Apparent Sidereal Time (GAST), Greenwich Meridyeninden anlık ilkbahar noktasına olan saat açısıdır (Subirana ve ark., 2011). GAST açısının hesabı için öncelikle, GMST açısı (3.23) bağıntısındaki gibi hesaplanmakta ardından (3.24) bağıntısı ile GAST açısı hesaplanmaktadır (Doğanalp, 2013).

$$GMST(UT1)_{radyan} = 4.894961212823058751375704430 + t[6.300388098984893552276513720 + t(5.075209994113591478053805523 \times 10^{-15} - 9.253097568194335640067190688 \times 10^{-24}t)] \quad (3.23)$$

$$GAST = GMST(UT1) + \Delta\psi \cos(\varepsilon) \quad (3.24)$$

3.5.4. Kutup hareketi matrisi

Kutup hareketi matrisi, kutup koordinatlarının (X_p, Y_p) radyan birimine çevrilerek (3.25) bağıntısında yerine konulmasıyla elde edilmektedir (Doğanalp, 2013).

$$W(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_p \\ 0 & 1 & -Y_p \\ -X_p & Y_p & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Sayısal Uygulama Programının (eci2ecef) Tanıtımı ve Çalışma Prensipleri

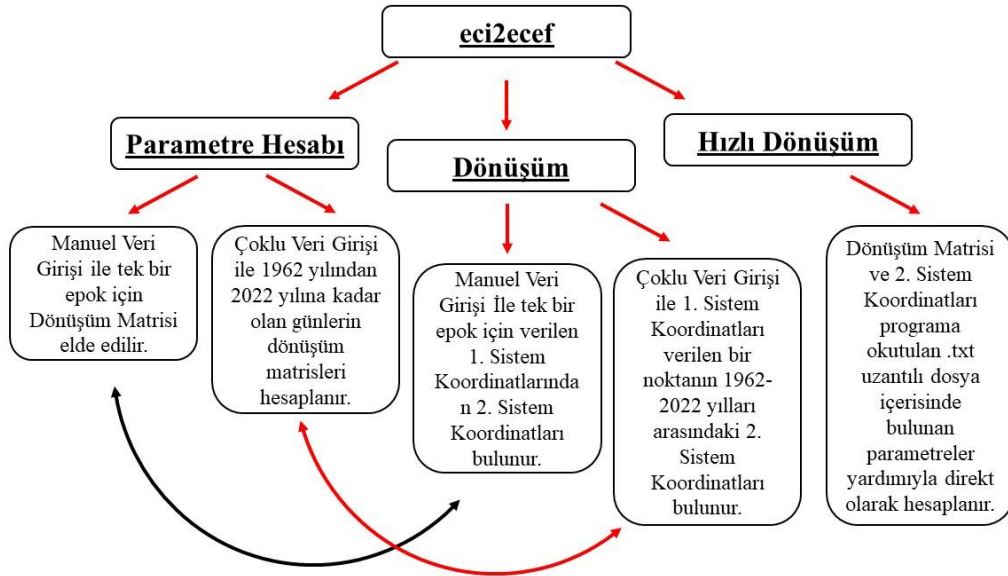
ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşümü incelemek amacıyla Visual Studio programında Visual Basic programlama dilinde “Eci2ecef” programı geliştirilmiştir. Visual Basic programlama dili nesne tabanlı bir dil olup kullanıcı ve geliştirici açısından görsel bir arayüzüne sahiptir. Bu sebeple kullanıcıya kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Eci2ecef programı Windows işletim sistemine sahip bütün bilgisayarlarda çalışabilmektedir. Programa kurulum (installer) tanımlandığından gerekli iş parçacıkları kullanıcı işletim sistemine yüklenmektedir. Programın kurulması ile beraber kullanıcı masaüstünde programın çalıştırılması için dosya (.exe dosyası kısayolu), hesaplarda kullanılmak için; IAU 1980 nutasyon modeli katsayılarını içeren metin dosyası (iau1980nutaton.txt) ve IERS EOP 14 C04 verilerini içeren metin dosyası (eopdata.txt) oluşmaktadır.



Şekil 4.1. Eci2ecef programı ana menü.

Eci2ecef programında üç menü bulunmaktadır. Bunlar; “Parametre Hesabı”, “Dönüşüm” ve “Hızlı Dönüşüm” menüleridir. “Parametre Hesabı” menüsünde tek bir epok veya 1962’den 2022’ye kadar olan günler (0^h UTC) için dönüşüm parametreleri belirlenebilir. Belirlenen Dönüşüm parametreleri yardımıyla “Dönüşüm” menüsünde birinci sistem koordinatı verilen bir noktanın ikinci sistem koordinatları bir epok için veya

1962’den 2022’ye kadar olan günlerin epoğuna göre hesaplanabilmektedir. İki sistem arasındaki dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için “Parametre Hesabı” ve “Dönüşüm” menüleri birbiri ile bağlantılı olarak kullanılmaktadır. “Hızlı Dönüşüm” menüsü diğer menülerden bağımsız olarak, programa tanıtılan metin dosyası yardımıyla birinci sistem koordinatları verilen noktaların ikinci sistem koordinatları hesaplanmaktadır.



Şekil 4.2. Eci2ecef programı çalışma prensibi.

“Parametre Hesabı” menüsünde, Şekil 4.3’deki gibi tek bir epok için başlangıç ve son epoğu, $UT1 - UTC$ zaman farkı ve kutup koordinatları (X_P, Y_P) programa girdi olarak verilen verilerden; başlangıç ve son epoğa ait jülyen günü, iki epok arasındaki zaman farkının jülyen asrı biriminde ifadesi (t) , presesyon, nutasyon, yer dönüklük, kutup hareketi ve dönüşüm matrisleri elde edilmektedir. Dönüşüm matrisini oluşturan dört parametre birim matris alınarak dönüşüm matrisleri hesaplanabilmektedir. Nutasyon matrisinin hesaplanmasında kullanılan katsayılar “Data Oku” butonu yardımıyla kullanıcı masaüstünde oluşan “iau1980nutatation.txt” dosyası programa tanıtılarak hesaplanmaktadır. Verilerin girilmesiyle “Hesapla” butonu yardımıyla sonuç ürünleri hesaplanmaya başlamaktadır. Durum çubuğu tamamen yeşil renkte olduğunda sonuç ürünleri elde edilmektedir. Tek bir epok için saniyeden daha kısa sürede sonuç ürünleri elde edilebilirken, birden fazla epok için gerçekleştirilen hesaplamalarda veri yoğunluğuna göre bir dakikadan az bir sürede sonuç ürünleri elde edilebilmektedir.

Parametre Hesabı Manuel Veri Girişi Tüm Parametreleri Kullan Durum: ■ Geri

Son Epok: 2000 Başlangıç Epoğu: 2000

Yıl: 2000 Ay: 1 Gün: 1 Saat: 0

UT1-UTC: 0.355388

X_p ("): 0.043282

Y_p ("): 0.377909

iau1980nutation: C:\Users\samet\OneDrive\Mi

Julien Günü: 2451544.5 2451545

t: -1.368925393564

Presesyon Matrisi

1	3.061E-07	1.33E-07
-3.061E-07	1	0
-1.33E-07	0	1

Nutasyon Matrisi

0.9999999977	6.19314E-05	2.68505E-05
-6.19321E-05	0.9999999977	2.79438E-05
-2.68488E-05	-2.79455E-05	0.9999999992

Yer Dönüklük Matrisi

-0.1730591278	0.9849114368	0
-0.9849114368	-0.1730591278	0
0	0	1

Kutup Hareketi Matrisi

1	0	2.098E-07
0	1	-1.8322E-06
-2.1E-07	1.8322E-06	1

ECI'den ECEF'e Dönüşüm Matrisi

-0.1731204266	0.9849006637	2.30623E-05
-0.9849006636	-0.1731204258	-3.32445E-05
-2.875E-05	-2.84693E-05	0.9999999992

ECEF'ten ECI'ye Dönüşüm Matrisi

-0.1731204266	-0.9849006636	-2.875E-05
0.9849006637	-0.1731204258	-2.84693E-05
2.30623E-05	-3.32445E-05	0.9999999992

Geri Data Oku Hesapla

Şekil 4.3. Parametre hesabı menüsü tek bir epok için tüm parametreler kullanılarak gerçekleştirilen hesap.

Parametre Hesabı Manuel Veri Girişi Presesyon Durum: ■ Geri

Son Epok: 2000 Başlangıç Epoğu: 2000

Yıl: 2000 Ay: 1 Gün: 1 Saat: 0

UT1-UTC: 0.355388

X_p ("): 0.043282

Y_p ("): 0.377909

iau1980nutation: C:\Users\samet\OneDrive\Mi

Julien Günü: 2451544.5 2451545

t: -1.368925393564

Presesyon Matrisi

1	0	0
0	1	0
0	0	1

Nutasyon Matrisi

0.9999999977	6.19314E-05	2.68505E-05
-6.19321E-05	0.9999999977	2.79438E-05
-2.68488E-05	-2.79455E-05	0.9999999992

Yer Dönüklük Matrisi

-0.1730591278	0.9849114368	0
-0.9849114368	-0.1730591278	0
0	0	1

Kutup Hareketi Matrisi

1	0	2.098E-07
0	1	-1.8322E-06
-2.1E-07	1.8322E-06	1

ECI'den ECEF'e Dönüşüm Matrisi

-0.1731201251	0.9849007167	2.30853E-05
-0.9849007166	-0.1731201243	-3.31135E-05
-2.8617E-05	-2.84693E-05	0.9999999992

ECEF'ten ECI'ye Dönüşüm Matrisi

-0.1731201251	-0.9849007166	-2.8617E-05
0.9849007167	-0.1731201243	-2.84693E-05
2.30853E-05	-3.31135E-05	0.9999999992

Geri Data Oku Hesapla

Şekil 4.4. Parametre hesabı menüsü tek bir epok için presesyon parametresi birim matris alınarak gerçekleştirilen hesap.

Birden fazla epok için dönüşüm matrisleri hesaplanırken, “Parametre Hesabı” menüsünde “Çoklu Veri Girişi” kısmı kullanılmaktadır. Bu kısımda başlangıç epoğu olarak J2000 epoğu (1 Ocak 2000 12^h UTC) kullanılmaktadır. Kullanıcı programa yalnızca, “iau1980nutation.txt” dosyasını ve sırasıyla her bir satırda; son epoka ait yıl, ay, gün değerleri, X_p ve Y_p kutup koordinatları ve $UT1 - UTC$ zaman farkı değerlerini virgüllerle ayrılmış bir şekilde oluşturulan metin dosyasını okutmaktadır. Programın kurulması ile beraber kullanıcı masaüstünde oluşan “eopdata.txt” dosyası 1 Ocak 1962 tarihinden 30 Aralık 2022 tarihine kadar olan verileri içermektedir. Kullanıcı bu dosya standartını koruyarak kendi dosyasını metin dosyası (.txt) uzantısı ile oluşturabilmektedir.

Bu hesaplama türünde son epoga ait saat değeri 0^h UTC olarak alınmaktadır. Elde edilen sonuç ürünleri Şekil 4.5'teki gibi liste şeklinde sunulmaktadır.

Sıra No	Yıl (Son Epok)	Ay (Son Epok)	Gün (Son Epok)	Saat (Son Epok)	Jülyen Günü (S)	Jülyen Günü (B)	t	Xp (°)	Yp (°)	UT1-UTC (s)	P (1,1)
1	1962	1	1	0	2437865.5	2451545	-0.38	-0.0127	0.213	0.0326338	0.999957086
2	1962	1	2	0	2437866.5	2451545	-0.379972621...	-0.0159	0.2141	0.0320547	0.999957092
3	1962	1	3	0	2437867.5	2451545	-0.379945242...	-0.019	0.2152	0.0315526	0.999957099
4	1962	1	4	0	2437868.5	2451545	-0.379917864...	-0.021999	0.216301	0.0311435	0.999957105
5	1962	1	5	0	2437869.5	2451545	-0.379890485...	-0.024799	0.217301	0.0308154	0.999957111
6	1962	1	6	0	2437870.5	2451545	-0.379863107...	-0.027599	0.218301	0.0305353	0.999957117
7	1962	1	7	0	2437871.5	2451545	-0.379835728...	-0.030189	0.219301	0.0302682	0.999957123
8	1962	1	8	0	2437872.5	2451545	-0.379808350...	-0.032788	0.220202	0.029928	0.999957130
9	1962	1	9	0	2437873.5	2451545	-0.379780971...	-0.035198	0.221102	0.0294869	0.999957136
10	1962	1	10	0	2437874.5	2451545	-0.379753593...	-0.037498	0.222002	0.0289268	0.999957142
11	1962	1	11	0	2437875.5	2451545	-0.379726214...	-0.039697	0.222803	0.0282797	0.999957148
12	1962	1	12	0	2437876.5	2451545	-0.379698836...	-0.041797	0.223703	0.0276136	0.999957154
13	1962	1	13	0	2437877.5	2451545	-0.379671457...	-0.043797	0.224503	0.0270075	0.999957160
14	1962	1	14	0	2437878.5	2451545	-0.379644079...	-0.045697	0.225203	0.0265403	0.999957167
15	1962	1	15	0	2437879.5	2451545	-0.379616700...	-0.047496	0.226004	0.0262572	0.999957173
16	1962	1	16	0	2437880.5	2451545	-0.379589322...	-0.049196	0.226704	0.0261751	0.999957179
17	1962	1	17	0	2437881.5	2451545	-0.379561943...	-0.050796	0.227404	0.026274	0.999957185
18	1962	1	18	0	2437882.5	2451545	-0.379534565...	-0.052295	0.228005	0.0265299	0.999957191
19	1962	1	19	0	2437883.5	2451545	-0.379507186...	-0.053595	0.228705	0.0268868	0.999957197
20	1962	1	20	0	2437884.5	2451545	-0.379479808...	-0.054895	0.229305	0.0273077	0.999957204
21	1962	1	21	0	2437885.5	2451545	-0.379452430...	-0.056195	0.229905	0.0277286	0.999957210

Şekil 4.5. Parametre hesabı menüsü birden çok epok için gerçekleştirilen hesap.

“Dönüşüm” menüsünde birinci sistem koordinatları verilen bir noktanın ikinci sistem koordinatları, “Parametre Hesabı” menüsünde hesaplanan dönüşüm matrisi ile hesaplanmaktadır. “Manuel Veri Girişi” seçildiğinde “Parametre Hesabı” menüsünde tek bir epok için hesaplanan dönüşüm matrisi, “Çoklu Veri Girişi” seçildiğinde birden çok epok için hesaplanan dönüşüm matrisleri kullanılmaktadır. Ayriyeten Şekil 4.6’daki gibi kullanıcı ECI koordinatlarından ECEF koordinatlarını elde etmek istediğini veya tersi durumu seçmelidir. Hesaplama kullanılan açısal değerler radyan biriminde olup girdi ve çıktı koordinat değerleri kilometre birimindedir.

“Manuel Veri Girişi” ile gerçekleştirilen dönüşümde belirlenen epok için yalnızca bir noktanın koordinatları hesaplanabileceği gibi birden fazla nokta içinde hesaplama gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 4.6’da 1 Ocak 2000 0^h UTC epogunda ilk satırda ECEF koordinatları verilen bir noktanın ECI sistemindeki koordinatları, ikinci satırda ECI sistemindeki koordinatları verilen bir noktanın ECEF sistemindeki koordinatları hesaplanmıştır. “Çoklu Veri Girişi” ile gerçekleştirilen dönüşümün avantajı sabit bir noktanın farklı epoklara ait ikinci sistem koordinatlarının kısa bir süre içerisinde hesaplanmasıdır. Şekil 4.7’de sabit bir noktanın ikinci sistem koordinatları “eopdata.txt” ile hesaplanan dönüşüm matrisleri ile elde edilmesine ait bir örnek hesap sunulmuştur. Gerçekleştirilen hesapta 22279 epoga ait dönüşüm matrisleri kullanılmıştır.

Dönüşüm

ecitoecef Manuel Veri Girişi Durum: ■ Geri

X: 17398.43554 km Y: -4401.05534 km Z: -19561.94339 km Hesapla

Sıra No	Julyen Günü (S)	Julyen Günü (B)	X (ECI)	Y (ECI)	Z (ECI)	X (ECEF)	Y (ECEF)	Z (ECEF)
1	2451544.5	2451545	17398.43554	-4401.05534	-19561.94339	-7347.078052	-16373.167...	-19561.94339
2	2451544.5	2451545	17398.43554	-4401.05534	-19561.94339	-7347.07805	-16373.16781	-19561.94339

Şekil 4.6. Dönüşüm menüsünde tek bir epok gerçekleştirilen hesaplar.

Dönüşüm

ecftoeeci Çoklu Veri Girişi Durum: ■ Geri

X: -7347.078052 km Y: -16373.167811 km Z: -19562.318281 km Hesapla

Sıra No	Julyen Günü (Son Epok)	X (ECI)	Y (ECI)	Z (ECI)	X (ECEF)	Y (ECEF)	Z (ECEF)
1	2437665.5	17521.84810...	-4192.07382...	-19497.5852...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
2	2437666.5	17591.38782...	-3891.30104...	-19497.3158...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
3	2437667.5	17655.74213...	-3589.37603...	-19497.0671...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
4	2437668.5	17714.89182...	-3286.38877...	-19496.8390...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
5	2437669.5	17768.81954...	-2982.42979...	-19496.6315...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
6	2437670.5	17817.50994...	-2677.58980...	-19496.4439...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
7	2437671.5	17860.94959...	-2371.95932...	-19496.2756...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
8	2437672.5	17899.12669...	-2065.62855...	-19496.1257...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
9	2437673.5	17932.03072...	-1758.68739...	-19495.9936...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
10	2437674.5	17959.65215...	-1451.22550...	-19495.8794...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
11	2437675.5	17981.98241...	-1143.33275...	-19495.7835...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
12	2437676.5	17999.01405...	-835.099537...	-19495.7066...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
13	2437677.5	18010.74107...	-526.616829...	-19495.6497...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
14	2437678.5	18017.15917...	-217.976217...	-19495.6133...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
15	2437679.5	18018.26598...	90.73025340...	-19495.5978...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
16	2437680.5	18014.06103...	399.4104156...	-19495.6034...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
17	2437681.5	18004.54579...	707.9723085...	-19495.6298...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...
18	2437682.5	17989.72253...	1016.323001...	-19495.6766...	-7347.078052	-16373.1678...	-19562.3182...

Şekil 4.7. Dönüşüm menüsünde 22279 epok için gerçekleştirilen hesaplar.

“Hızlı Dönüşüm” menüsünde birden fazla nokta için farklı epoklara ait dönüşüm işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Bu menüyü diğer menülerden ayıran iki temel özelliği

bulunmaktadır. Birinci sistem koordinatlarından ikinci sistem koordinatları tek bir menü üzerinden hesaplanmaktadır. Özellikle uydu gibi sabit olmayan ve yörüngesi doğrultusunda harekete sahip olan ve zamana bağlı olarak koordinatları değişen cisimlerin birden çok epokta ikinci sistem koordinatlarının hesaplanmasında “Hızlı Dönüşüm” menüsü diğer menülerde gerçekleştirilen işlemlere kıyasla daha hızlı ve pratik sonuçlar vermektedir.

“Hızlı Dönüşüm” menüsünde, birinci sistem koordinatlarından ikinci sistem koordinatları hesaplanırken diğer menülerden bağımsız bir çalışma gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde kullanıcıdan; birinci ve ikinci sistem koordinatının tanımlanması, “iau1980nutation.txt” dosyasının programa okutulması, dönüşüm matrisinin hesabında kullanılacak parametrelerin belirlenmesi ve son epok, başlangıç epogu $UT1 - UTC$ farkı, kutup koordinatları (X_p, Y_p) ve birinci sistem koordinatlarını içeren metin dosyasının tanıtılması gerekmektedir. Eci2ecef programına kutup koordinatları açısız saniye, $UT1 - UTC$ farkı saniye biriminde programa girdi olarak verilmelidir. “Hızlı Dönüşüm” menüsü için hazırlan girdi dosyasında veriler virgüller ile ayrılmış şekilde sırasıyla; son epoga ait saat, gün, ay, yıl, başlangıç epoguna ait saat, gün, ay, yıl, kutup koordinatı (X_p) , kutup koordinatı (Y_p) , $UT1 - UTC$ farkı ve Birinci sistem koordinatları X, Y, Z değerlerinden oluşmaktadır.

Çıktı ürünündeki veriler virgüller ile ayrılmış olarak sırasıyla, son epoga ait saat, gün, ay, yıl, başlangıç epoguna ait saat, gün, ay, yıl değerleri, $UT1 - UTC$ farkı, kutup koordinatları (X_p, Y_p) , son ve başlangıç epoguna ait jülyen günü, son ve başlangıç epogu arasındaki zaman farkının jülyen asrı biriminde ifadesi (t) , presasyon matrisi $(P(1,1), P(1,2), P(1,3), P(2,1), P(2,2), P(2,3), P(3,1), P(3,2), P(3,3))$, nutasyon matrisi $(N(1,1), N(1,2), N(1,3), N(2,1), N(2,2), N(2,3), N(3,1), N(3,2), N(3,3))$, yer dönüklük matrisi $(R(1,1), R(1,2), R(1,3), R(2,1), R(2,2), R(2,3), R(3,1), R(3,2), R(3,3))$, kutup hareketi matrisi $(W(1,1), W(1,2), W(1,3), W(2,1), W(2,2), W(2,3), W(3,1), W(3,2), W(3,3))$, ECI sisteminden ECEF sistemine dönüşüm matrisi $(D_{ecitoecef})$, ECEF sisteminden ECI sistemine dönüşüm matrisi $(D_{ecefteeci})$, ECI sistemindeki koordinatlar $(X_{ECI}, Y_{ECI}, Z_{ECI})$ ve ECEF sistemindeki koordinatlardan $(X_{ECEF}, Y_{ECEF}, Z_{ECEF})$ oluşmaktadır. Hesaplanan sonuç ürünleri Şekil 4.8’deki “Kaydet” butonu yardımıyla kullanıcı bilgisayarına programdan bağımsız metin dosyası olarak kaydedilebilmektedir. Kaydedilen metin

dosyasının her bir satırında virgüllerle ayrılmış 75 adet hücre bulunmaktadır. Bu hücreler yukarıda açıklanan parametrelerden oluşmaktadır.

Hızlı Dönüşüm

eceftoeci Tüm Parametreleri Kullan

iau1980notation: C:\Users\samet\OneDrive\Ma Data Oku Dönüşüm Verileri: C:\Users\samet\OneDrive\Ma Data Oku

Sıra No	Saat (S)	Gün (S)	Ay (S)	Yıl (S)	Saat (B)	Gün (B)	Ay (B)	Yıl (B)	UT1
1	0	1	1	2000	12	1	1	2000	0.35
2	0	2	1	2000	12	1	1	2000	0.35
3	0	3	1	2000	12	1	1	2000	0.35
4	0	4	1	2000	12	1	1	2000	0.35
5	0	5	1	2000	12	1	1	2000	0.35
6	0	6	1	2000	12	1	1	2000	0.35
7	0	7	1	2000	12	1	1	2000	0.35
8	0	8	1	2000	12	1	1	2000	0.35
9	0	9	1	2000	12	1	1	2000	0.35
10	0	10	1	2000	12	1	1	2000	0.35
11	0	11	1	2000	12	1	1	2000	0.34
12	0	12	1	2000	12	1	1	2000	0.34
13	0	13	1	2000	12	1	1	2000	0.3
14	0	14	1	2000	12	1	1	2000	0.34
15	0	15	1	2000	12	1	1	2000	0.34
16	0	16	1	2000	12	1	1	2000	0.34
17	0	17	1	2000	12	1	1	2000	0.34
18	0	18	1	2000	12	1	1	2000	0.34

Durum: Geri Hesapla Kaydet

Şekil 4.8. Hızlı dönüşüm menüsü örnek hesaplama.

Sayısal uygulamada kullanılan SVN – 43 ve SVN – 63 GPS uyduları ile NABG00NOR ve SYOG00ATA IGS istasyonlarının, tez çalışması için belirlenen zaman aralığındaki ECEF koordinat sisteminde yayımlanan koordinatlarından, ECI koordinat sistemindeki koordinatlarının hesaplanması için oluşturulan girdi dosyalarının her biri programda, dönüşümde kullanılan tüm parametreler hesaba dahil edilerek, presesyon matrisi birim matris alınarak, nutasyon matrisi birim matris alınarak, yer dönüklük matrisi birim matris alınarak ve kutup hareketi matrisi birim matris alınarak ECI koordinat sisteminde koordinatları her bir epok için hesaplatılmıştır. Sonuç olarak sayısal uygulamada kullanılan GPS uyduları ve IGS istasyonlarının her biri için toplamda beş farklı ECI koordinat sistemindeki koordinatları elde edilmiştir.

Üçüncü bölümde açıklandığı gibi (3.1) ve (3.2) bağıntısı ile birinci sistem koordinatları ve bu koordinatların elde edildiği epoğa ait presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi matrisleri verildiğinde ikinci sistem koordinatları

hesaplanabilmektedir. Kullanıcı ikinci sistem koordinatlarının hesaplanmasında presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi parametrelerinin hesaba dahil edilmesini istediğinde ilgili alanda “Tüm Parametreler Dahil” seçeneğini işaretlemelidir. Bu seçenek seçildiğinde program, IAU 1976 presesyon modeli ve IAU 1980 nutasyon modeli ile IERS EOP 14 C04 serisinde yayınlanan UT1-UTC zaman farkı ile X_P ve Y_P kutup koordinatlarını kullanarak presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi matrislerini hesaplayarak ikinci sistem koordinatlarını hesaplayacaktır. Eğer kullanıcı ikinci sistem koordinatlarının hesaplanmasında presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi parametrelerinden birisini hesaba dahil etmeyi istemediğinde ve ilgi alanda hesaba dahil etmek istemediği parametreyi belirttiğinde, (3.1) ve (3.2) bağıntısı ile ikinci sistem koordinatlarını hesaplayan program, ilgili formülde hesaba dahil edilmeyecek parametrenin matrisini, birim matris olarak yerleştirecek ve dönüşüm matrisinin hesaplanmasında, hesaba dahil edilmek istenmeyen parametre etkisiz eleman olarak görev alacaktır. Şekil 4.9’da ECEF koordinat sisteminde koordinatları verilen bir noktanın ECI koordinat sistemindeki koordinatlarının hesaplanmasında kullanıcının ilgili alanda, hesaplamada kullanılmayacak parametreyi belirtmesine göre programın dönüşüm matrisini hesaplamakta kullanacağı formüller belirtilmiştir.

Birim Matris Alınacak Parametreyi Seçiniz.	Hesap Formülü
↓	↓
Tüm Parametreler Dahil	$V_{ECI} = P_{(3,3)}^T(t) \times N_{(3,3)}^T(t) \times R_{(3,3)}^T(t) \times W_{(3,3)}^T(t) \times V_{ECEF}$
Presesyon	$V_{ECI} = I_{(3,3)} \times N_{(3,3)}^T(t) \times R_{(3,3)}^T(t) \times W_{(3,3)}^T(t) \times V_{ECEF}$
Nutasyon	$V_{ECI} = P_{(3,3)}^T(t) \times I_{(3,3)} \times R_{(3,3)}^T(t) \times W_{(3,3)}^T(t) \times V_{ECEF}$
Yer Dönüklük	$V_{ECI} = P_{(3,3)}^T(t) \times N_{(3,3)}^T(t) \times I_{(3,3)} \times W_{(3,3)}^T(t) \times V_{ECEF}$
Kutup Hareketi	$V_{ECI} = P_{(3,3)}^T(t) \times N_{(3,3)}^T(t) \times R_{(3,3)}^T(t) \times I_{(3,3)} \times V_{ECEF}$

Şekil 4.9. Eci2ecef programında kullanıcının hesaba dahil etmek istemediği parametreyi belirtmesine göre dönüşüm matrisinin hesaplanması için kullanılan formüller.

4.2. Sayısal Uygulamada Kullanılan Veriler

4.2.1. IGS duyarlı efemeris

IGS (International GNSS Service – Uluslararası GNSS Servisi) 1994 yılından itibaren, yüksek kalitede GNSS veri ürünlerini açık erişim ile sağlamaktadır. IGS analiz merkezleri CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) için veri türüne bağlı olarak; bir günden az bir sürede, günlük veya haftalık olarak uydu yörünge çözümleri sağlamaktadır. CDDIS 1992'den itibaren IGS için veri merkezi görevini yerine getirmektedir. IGS tarafından yayınlanan üç farklı uydu yörünge çözümü bulunmakta olup bunlar analiz merkezlerinden elde edilen verilerin ağırlıklı olarak işlenmesi sonucu belirli periyotlar ile yayınlanmaktadır. Bu çözümler IGS Sonuç (IGS Final), IGS Hızlı (Rapid; IGR) ve IGS Ultra Hızlı (IGS Ultra Rapid; IGU) efemerisleridir. IGS Ultra Hızlı efemerisi; gerçek zamanlı uygulamalar veya gerçek zamana yakın uygulamalar için kullanışlıdır ve günde düzenli aralıklarla dört kez yayınlanmaktadır. Ultra Hızlı çözüm, hem gözlemlenen hem de hesaplanan uydu yörüngelerini içermektedir. Hızlı çözüm UTC zamanına göre gün bitiminden yaklaşık olarak 17 saat sonra yayınlanmaktadır. Final çözümü içerdiği veri setine ait zamanın bulunduğu haftanın bitiminden yaklaşık olarak 13 gün sonra yayınlanmakta olup en tutarlı ve en hassas çözümdür. IGS tarafından bu çözüm yöntemlerine ait bilgiler Çizelge 4.1'deki gibidir (URL-3).

Çizelge 4.1. IGS uydu yörünge çözümlerine ait bilgiler (URL-3).

Yörünge Çözümleri	Doğruluk (cm)	Elde Etme Süresi	Yayınlanma Periyodu	Veri Sıklığı
IGS Ultra Hızlı	3	3-9 Saat	3, 9, 15, 21 UTC	15 dk
IGS Hızlı	2.5	17-41 Saat	17 UTC (günlük)	15 dk
IGS Sonuç	2.5	12-18 Gün	Cuma günleri	15 dk

IGS tarafından hesaplanan uydu yörünge çözümleri CDDIS tarafından arşivlenmekte ve yayınlanmaktadır. Çizelge 4.2'de dosya isimlendirilmesinde kullanılan kodlar Çizelge 4.3'de uydu yörünge çözüm yöntemlerinin dosya adları bulunmaktadır.

Çizelge 4.2. Uydu yörünge çözümü dosya isimlendirilmesinde kullanılan kodlar ve anlamları (URL-3).

Kod	Açıklama
WWWW	GPS haftası
AAA	Analiz merkezi ismi / çözüm yöntemi (IGS, IGR, IGU)
D	Haftanın günü (0-6)
HH	İki haneli saat değeri (00, 06, 12, 24)
TYP	Çözüm yönteminin sunulduğu dosya formatı kısaltması
.Z	UNIX sıkıştırılmış dosya
Uydu yörünge çözüm dosyası ismi: WWW/AAAWWWWD.TYP.Z	

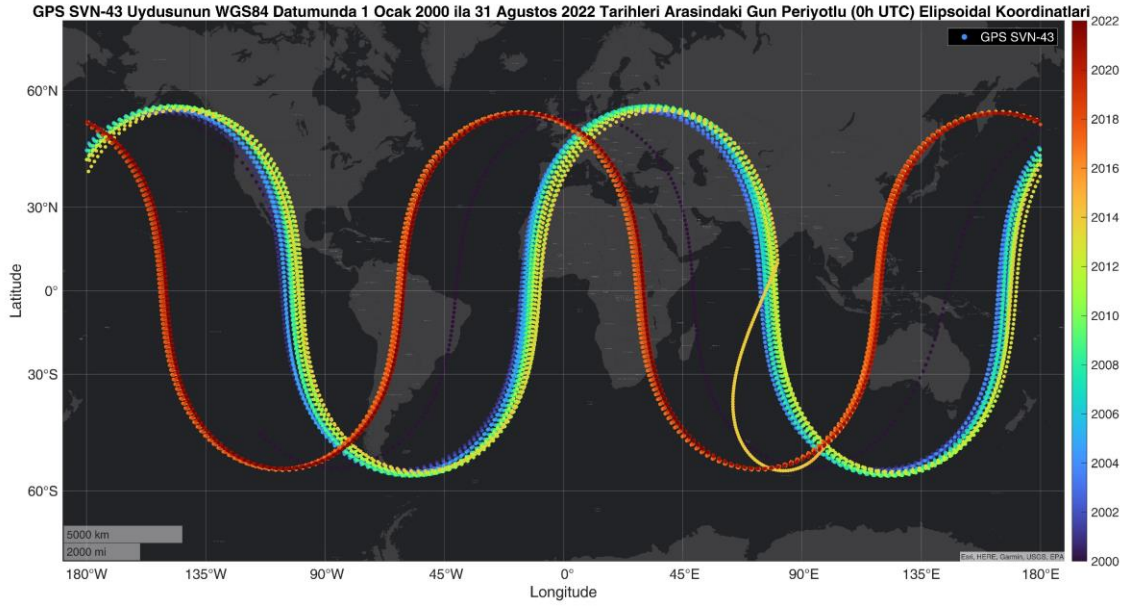
Çizelge 4.3. Uydu yörünge çözümleri dosya isimlendirmeleri (URL-3).

Ürün Adı	Açıklama
WWW/igsWWWWD.sp3.Z	IGS Sonuç uydu yörünge çözüm ürünü
WWW/igrWWWWD.sp3.Z	IGS Hızlı uydu yörünge çözüm ürünü
WWW/iguWWWWD.sp3.Z	IGS Ultra Hızlı uydu yörünge çözüm ürünü

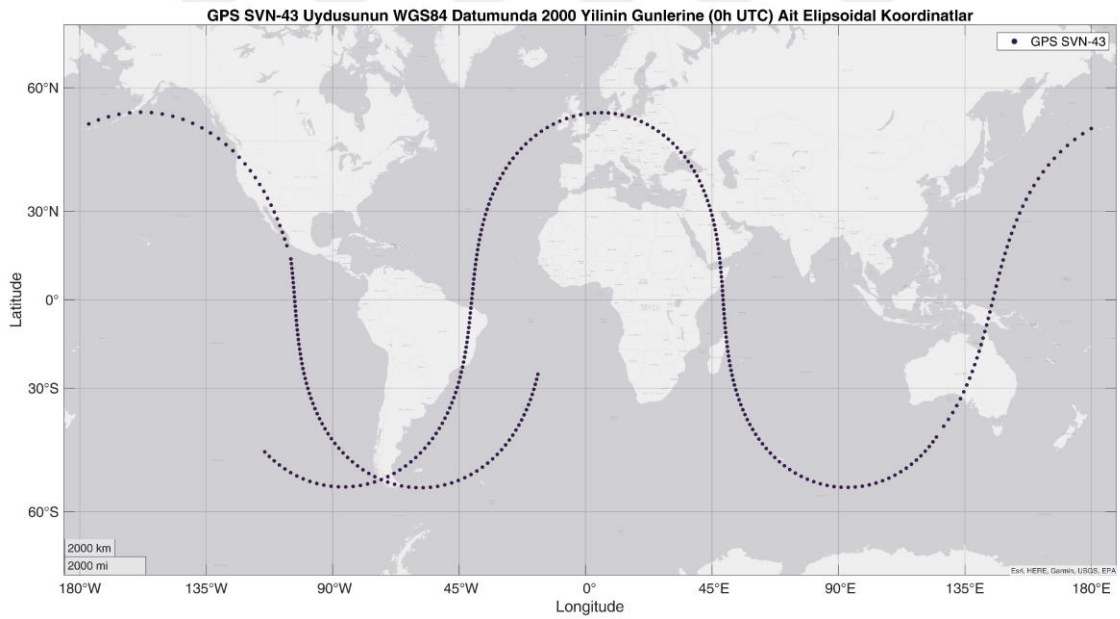
Uydu yörünge çözümleri kullanıcılara sp3 (Standard Product 3) dosya formatında sunulmaktadır. Sp3 veri formatında GPS uydularının konumlarına PRN numaraları ile ECEF koordinat sisteminde ulaşılabilmektedir. Zaman içerisinde üç farklı sp3 dosya formatı yayınlanmıştır ve bunlar sp3-a, sp3-b ve sp3-c olarak isimlendirilmiştir. Sp3 dosya formatının ilk ürünü, sp3-a versiyonu NGS (National Geodetic Survey) SP1 (Standard Product 1) ürününe benzer olarak içerisinde uydu saati düzeltmesi, yörünge doğruluğu bilgisi, yorum satırları, GPS haftası verilerini içerecek şekilde tasarlanmıştır. 1998 yılında Gurtner ve Rothacher sp3-a formatı ile uyumlu olacak GPS ve GLONASS uydularının yörüngesini birlikte tanımlamak için sp3-b formatını tanımlamışlardır. 2000 yılında USNO (United States Naval Observatory – A.B.D. Deniz Gözlemevi) ev sahipliğinde gerçekleştirilen IGS Analiz Merkezi Çalıştayında IGS'in konum ve saat doğruluğunu sp3 dosyası ile yayınlatabilmesi için sp3 dosya formatının güncellenmesi gerekliliği önerilmiştir. Sp3-a ve sp3-b formatlarında 60 sütun bulunurken konum ve saat doğruluğu bilgisi için 61 ila 80 sütunları tanımlanan sp3-c dosya formatı ortaya konulmuştur. Günümüzde sp3-c formatı kullanılmaktadır (Hilla, 2010).

Bu tez çalışması kapsamında incelenen GPS SVN - 43 uydusunun IGS Sonuç ürünlerinin yayınlandığı sp3 dosyalarından elde edilen 1 Ocak 2000 ila 31 Ağustos 2022 tarihleri arasındaki günlerin 0^h UTC zamanına ait ECEF sistemindeki koordinatlarından

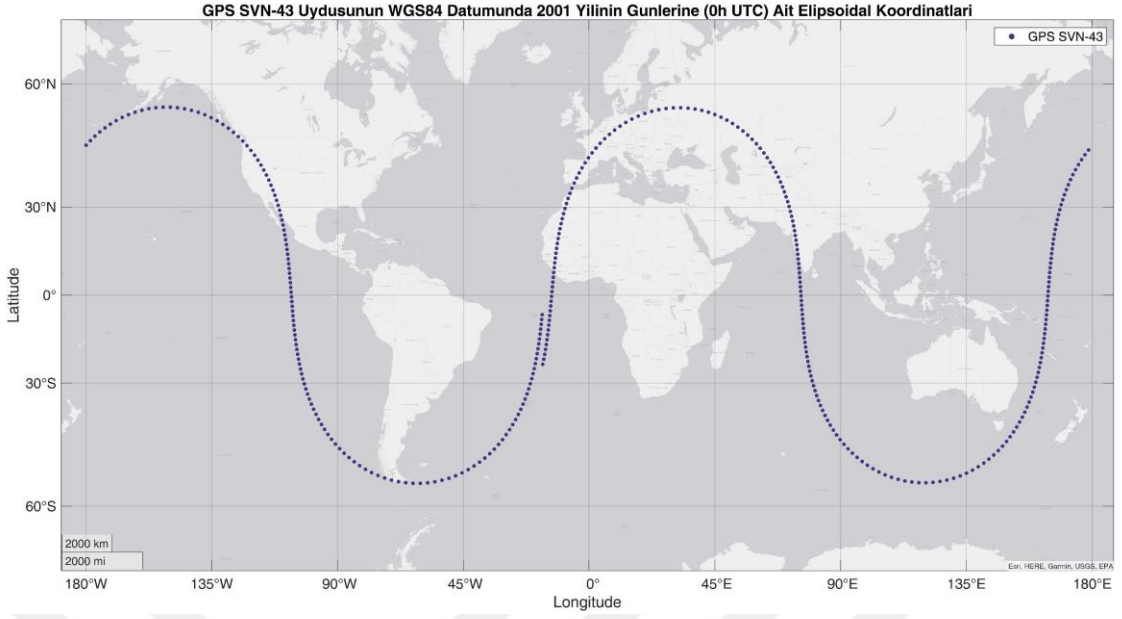
üretilen WGS84 datumunda ki elipsoidal koordinatları Şekil 4.10 ila Şekil 4.33 arasında sunulmuştur.



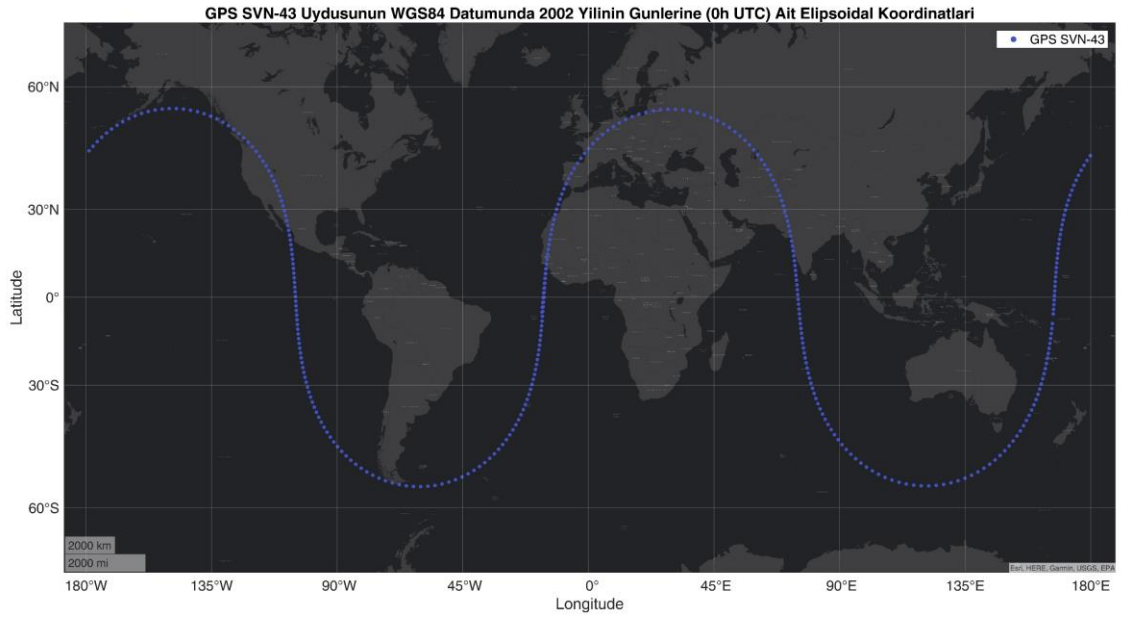
Şekil 4.10. GPS-SV43 uydusunun yaklaşık 23 yıllık IGS Sonuç ürünlerinin harita üzerinde gösterimi.



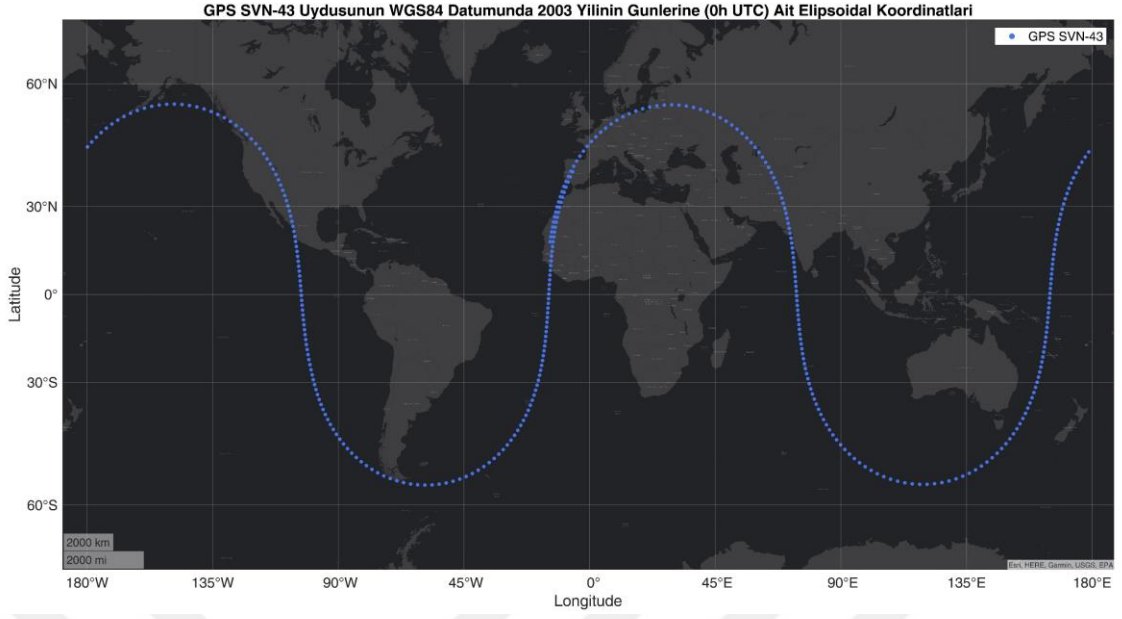
Şekil 4.11. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2000 yılının günlerine ait konumları.



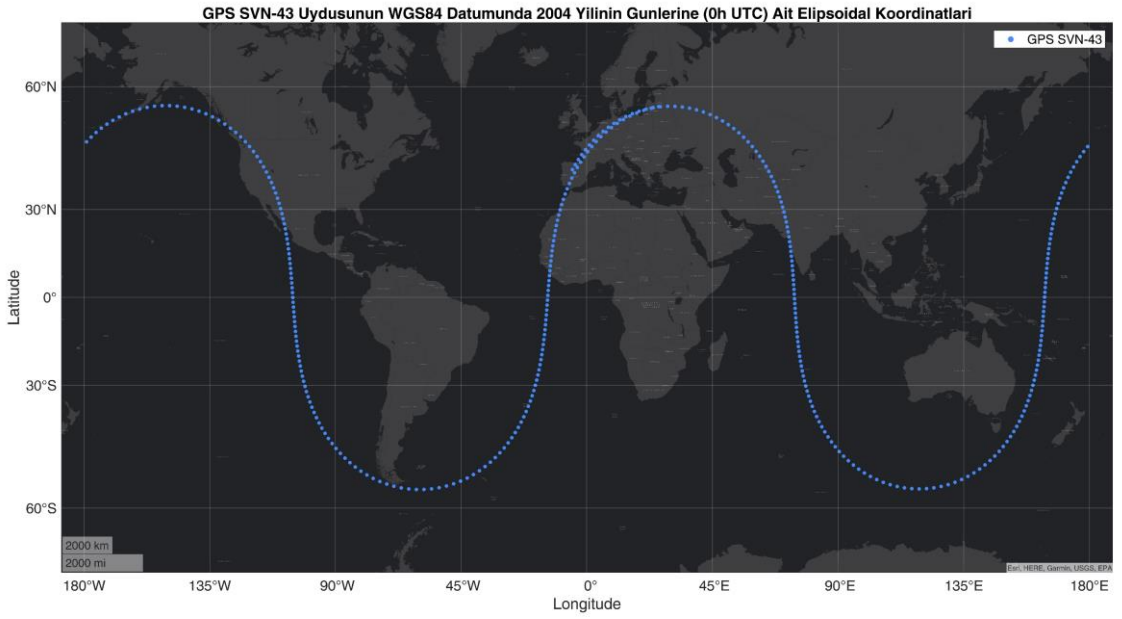
Şekil 4.12. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2001 yılının günlerine ait konumları.



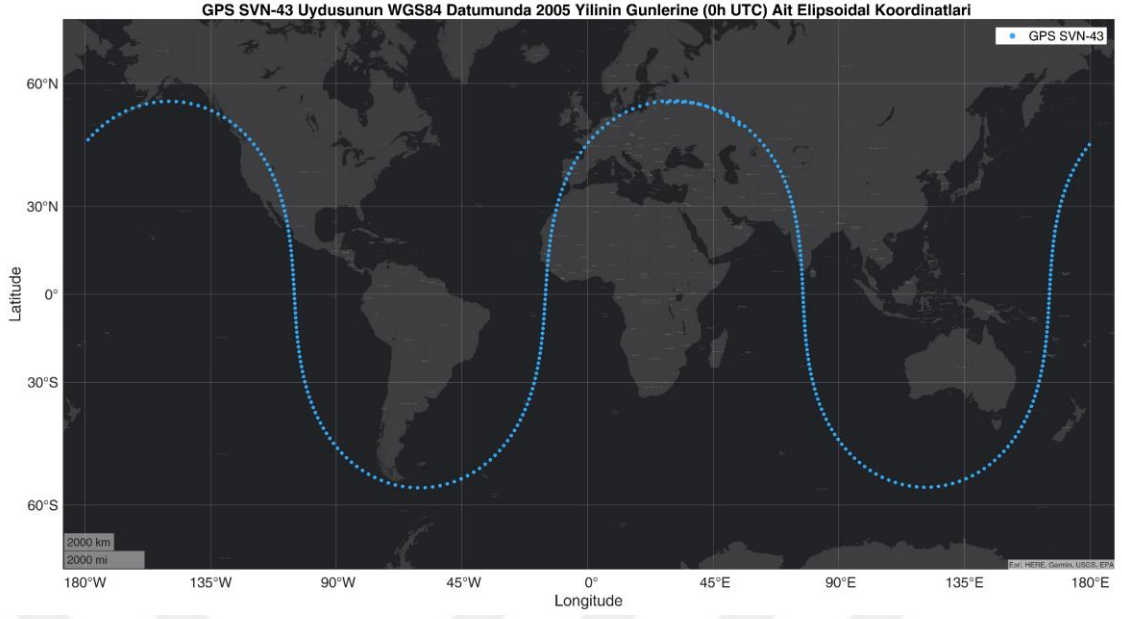
Şekil 4.13. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2002 yılının günlerine ait konumları.



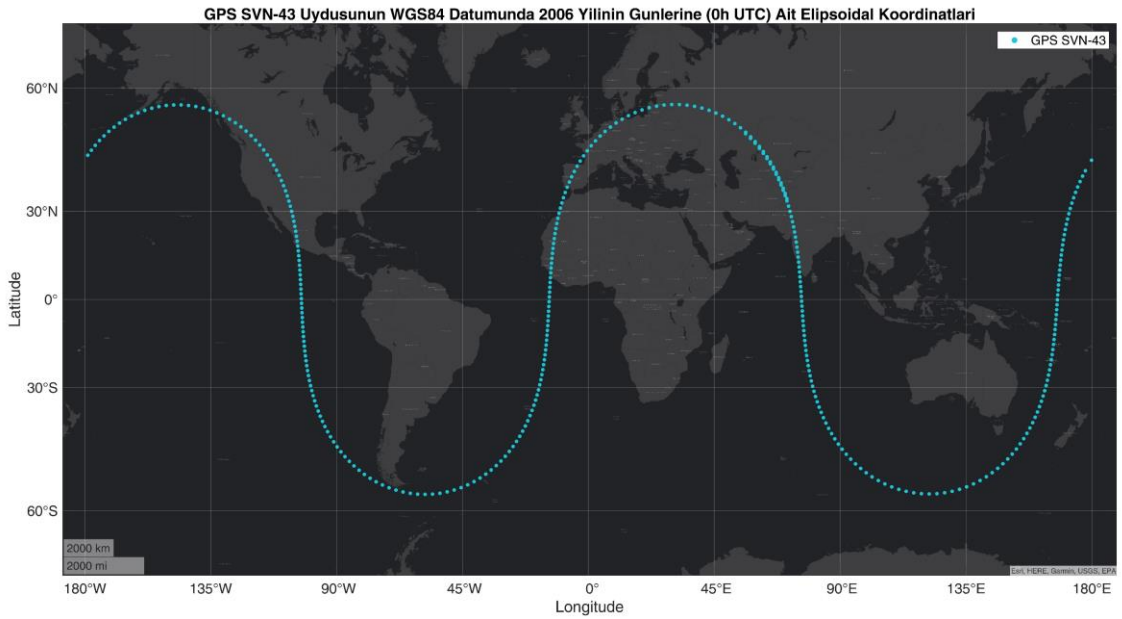
Şekil 4.14. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2003 yılının günlerine ait konumları.



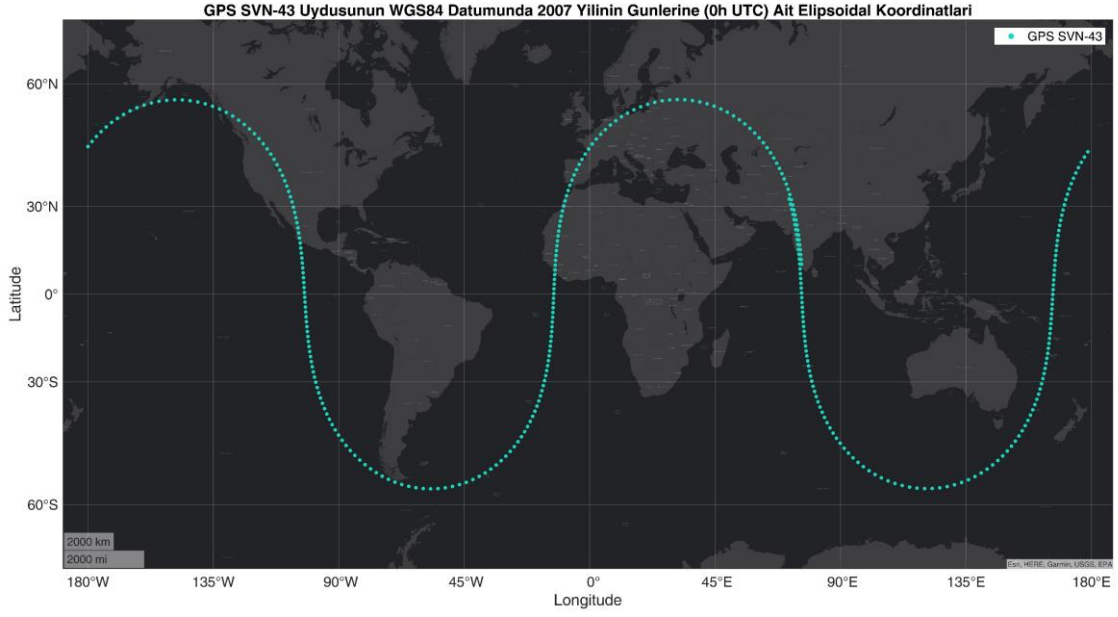
Şekil 4.15. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2004 yılının günlerine ait konumları.



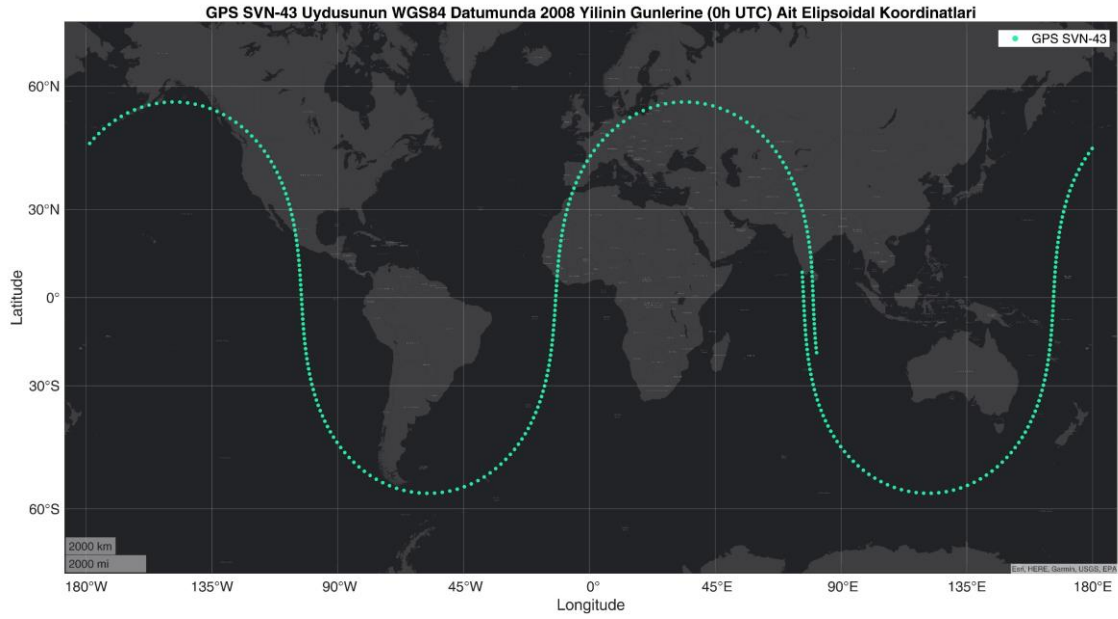
Şekil 4.16. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2005 yılının günlerine ait konumları.



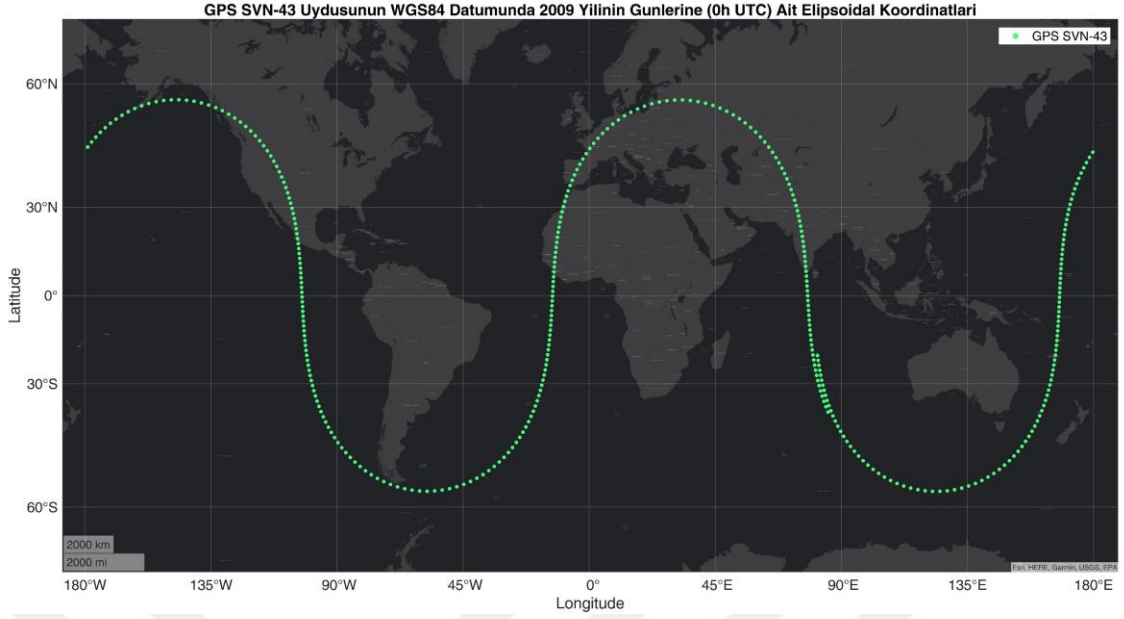
Şekil 4.17. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2006 yılının günlerine ait konumları.



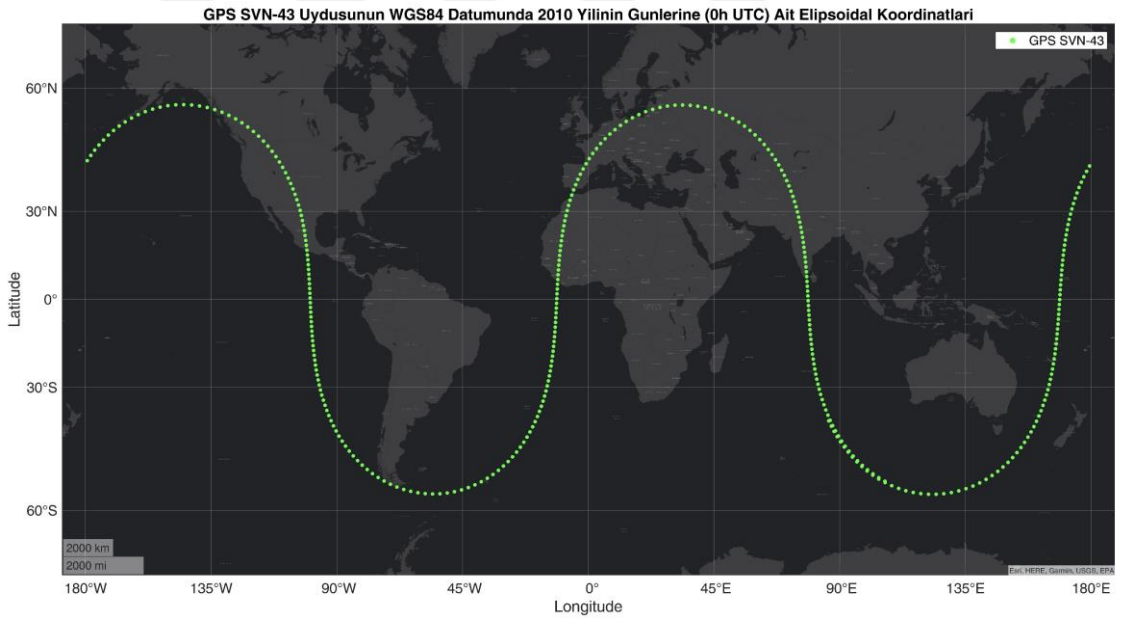
Şekil 4.18. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2007 yılının günlerine ait konumları.



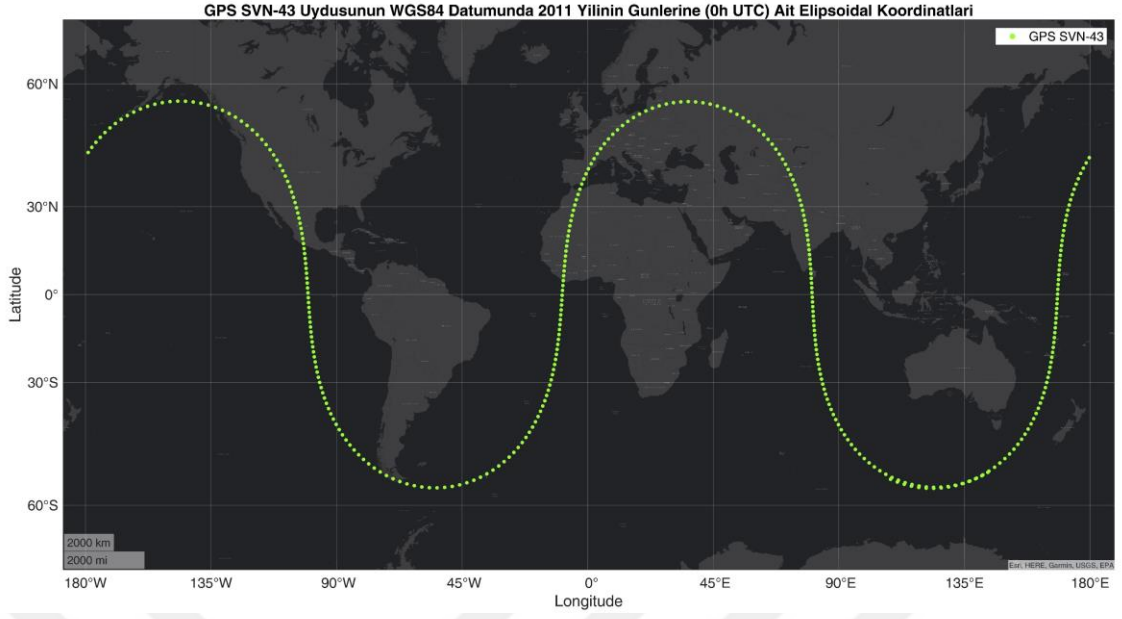
Şekil 4.19. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2008 yılının günlerine ait konumları.



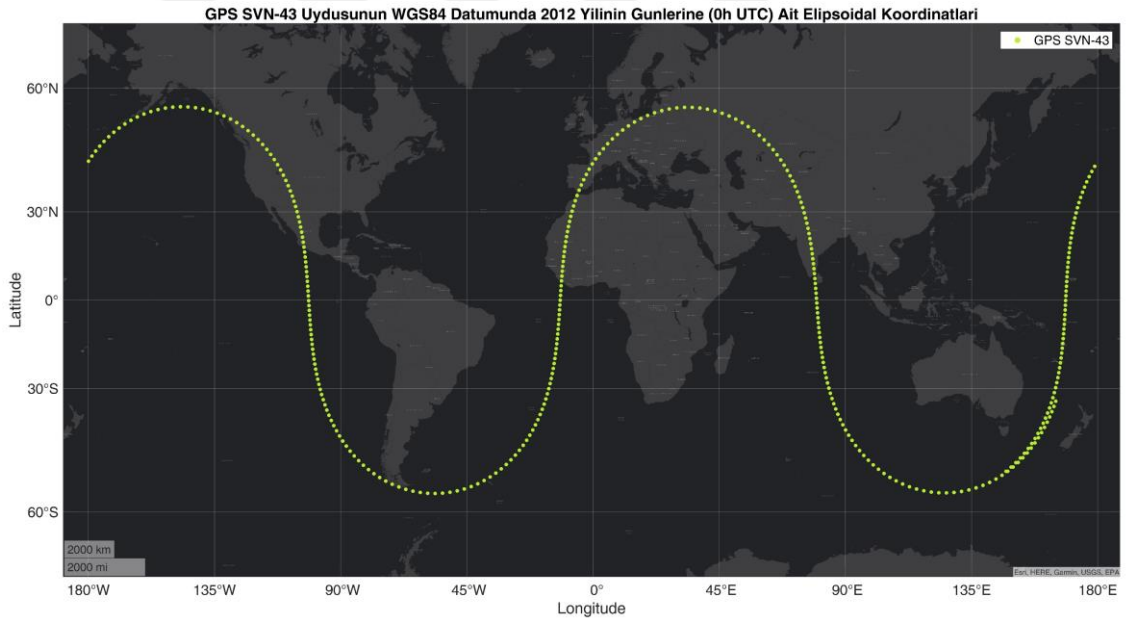
Şekil 4.20. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2009 yılının günlerine ait konumları.



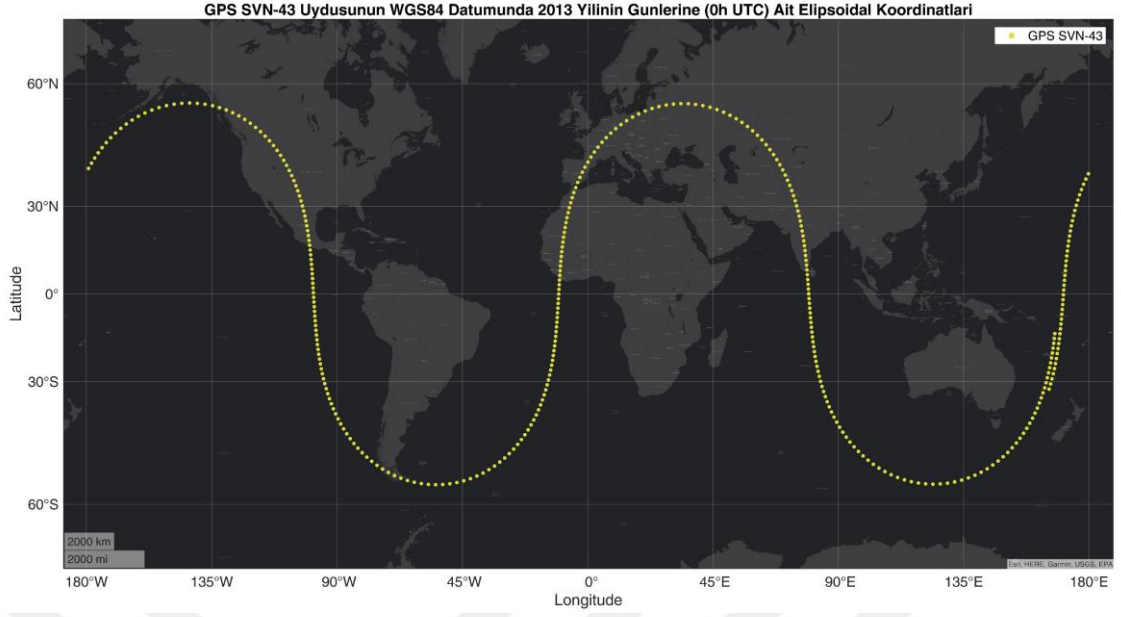
Şekil 4.21. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2010 yılının günlerine ait konumları.



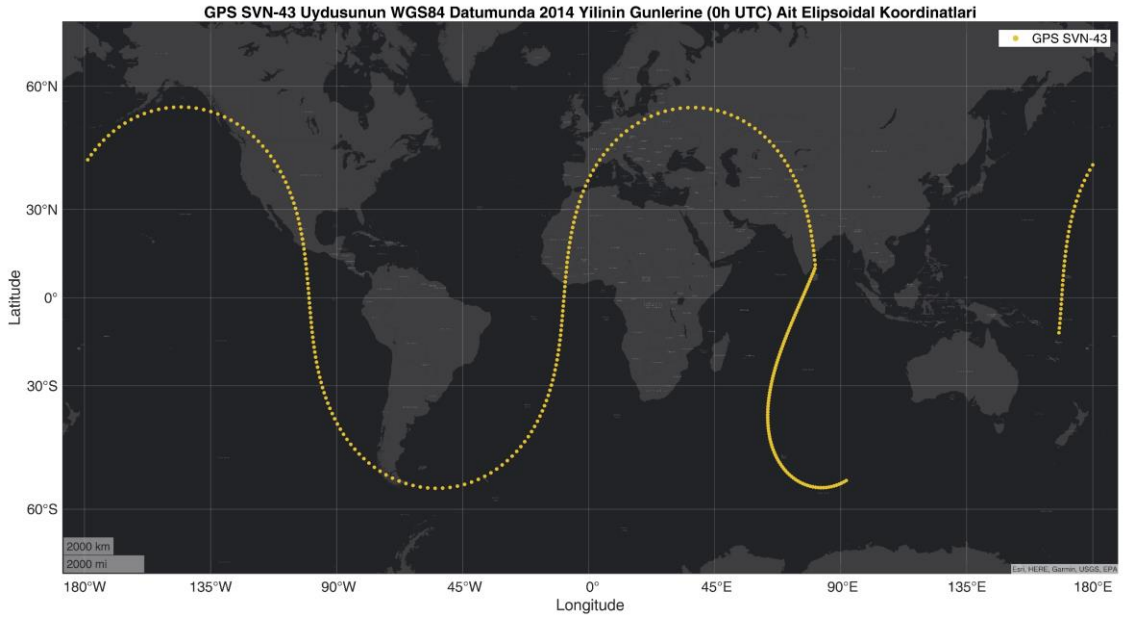
Şekil 4.22. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2011 yılının günlerine ait konumları.



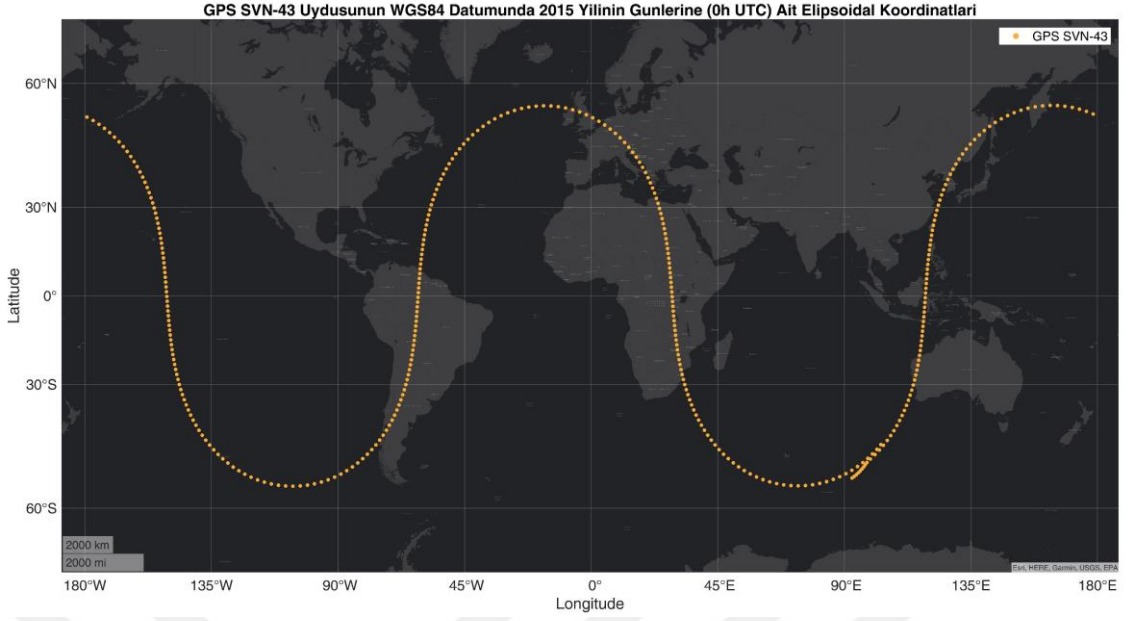
Şekil 4.23. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2012 yılının günlerine ait konumları.



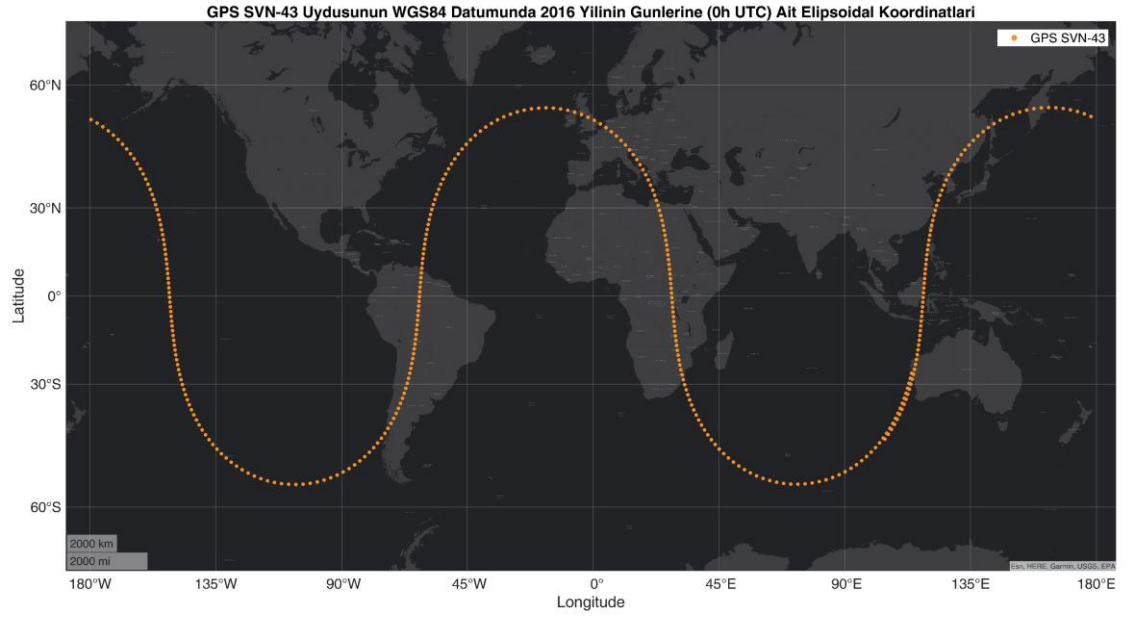
Şekil 4.24. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2013 yılının günlerine ait konumları.



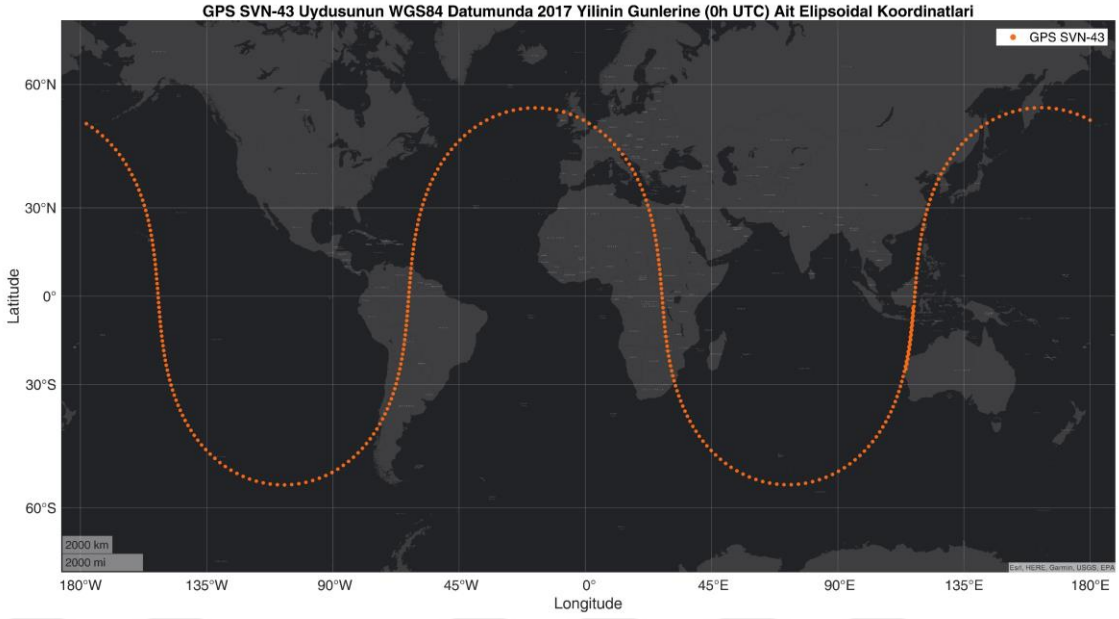
Şekil 4.25. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2014 yılının günlerine ait konumları.



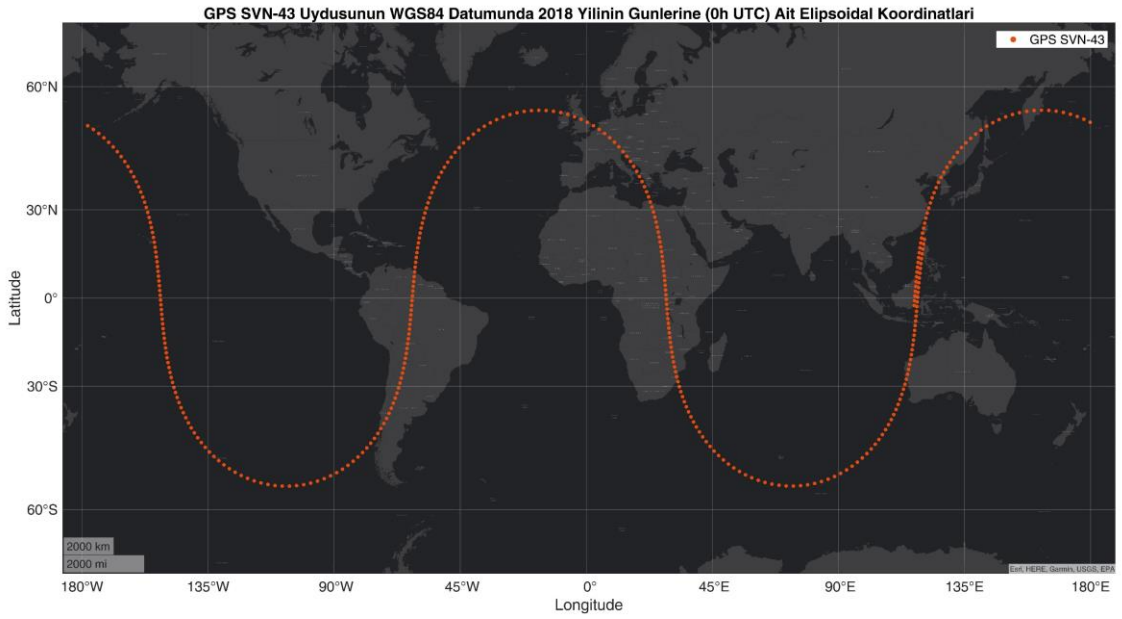
Şekil 4.26. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2015 yılının günlerine ait konumları.



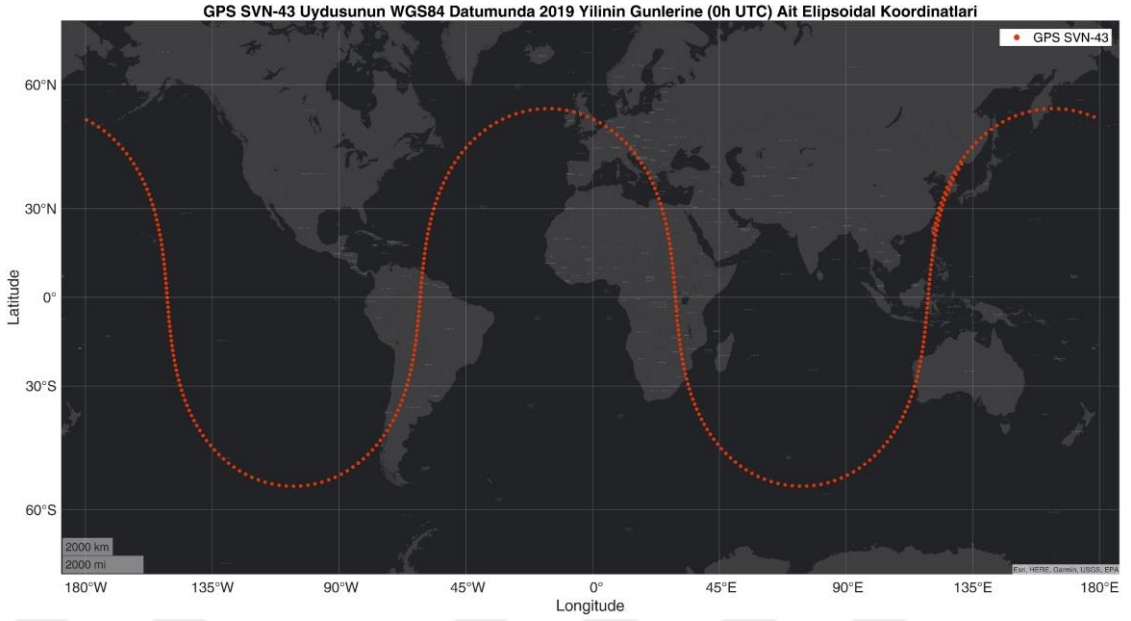
Şekil 4.27. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2016 yılının günlerine ait konumları.



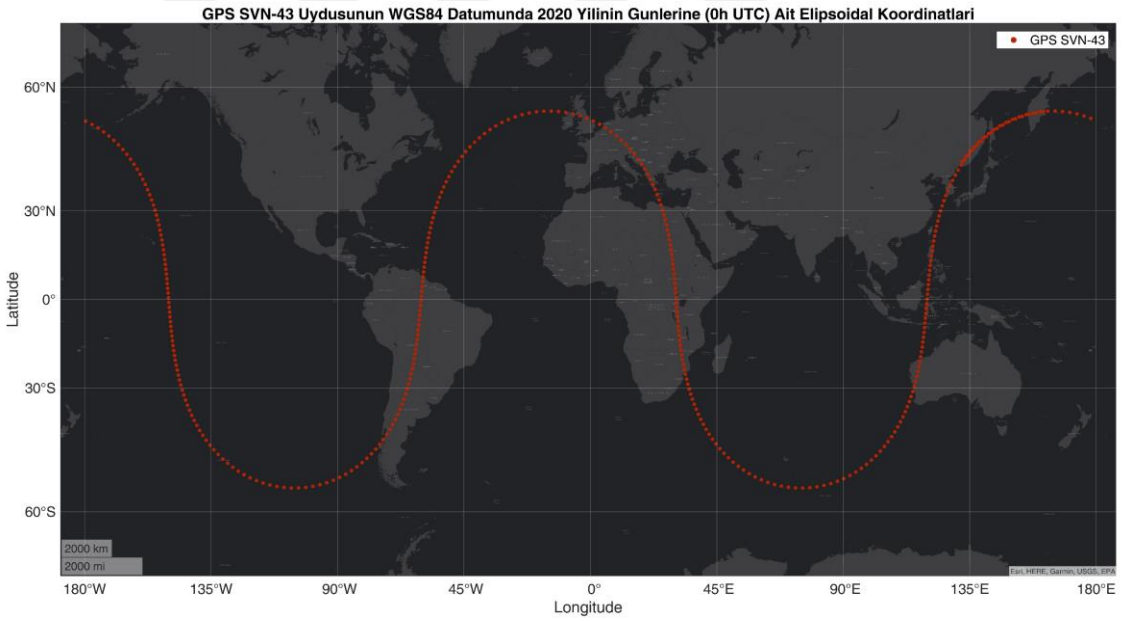
Şekil 4.28. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2017 yılının günlerine ait konumları.



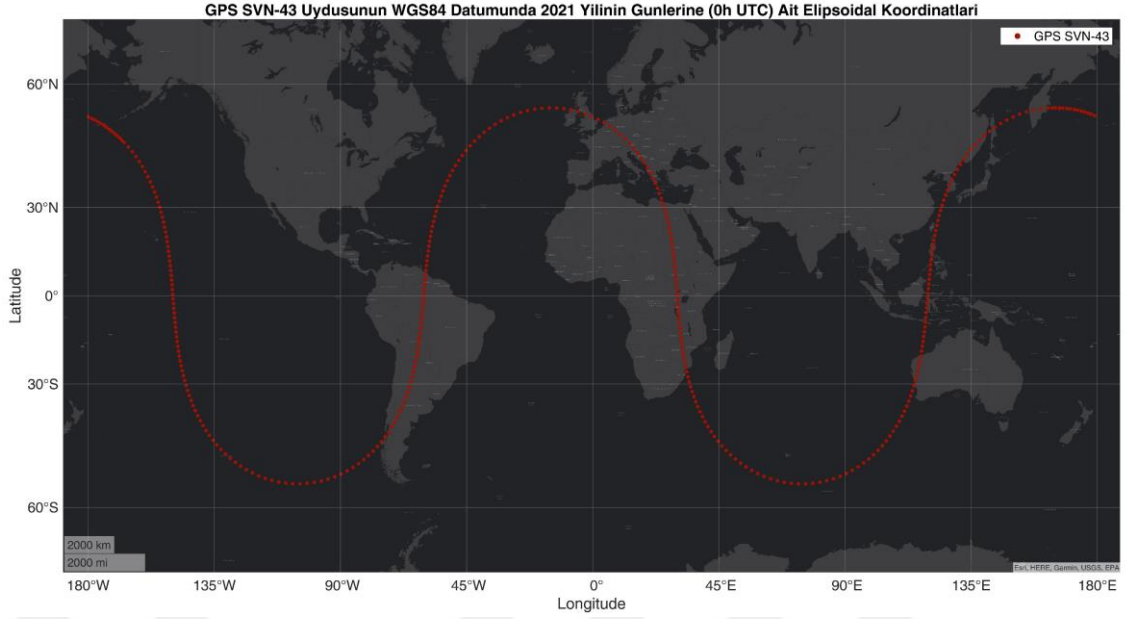
Şekil 4.29. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2018 yılının günlerine ait konumları.



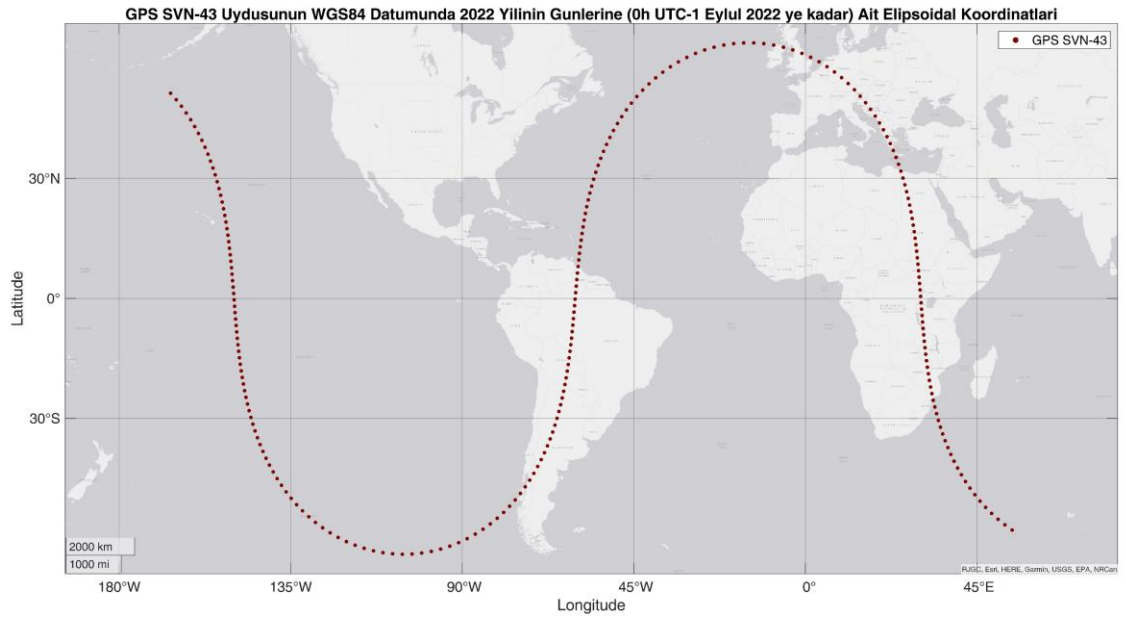
Şekil 4.30. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2019 yılının günlerine ait konumları.



Şekil 4.31. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2020 yılının günlerine ait konumları.

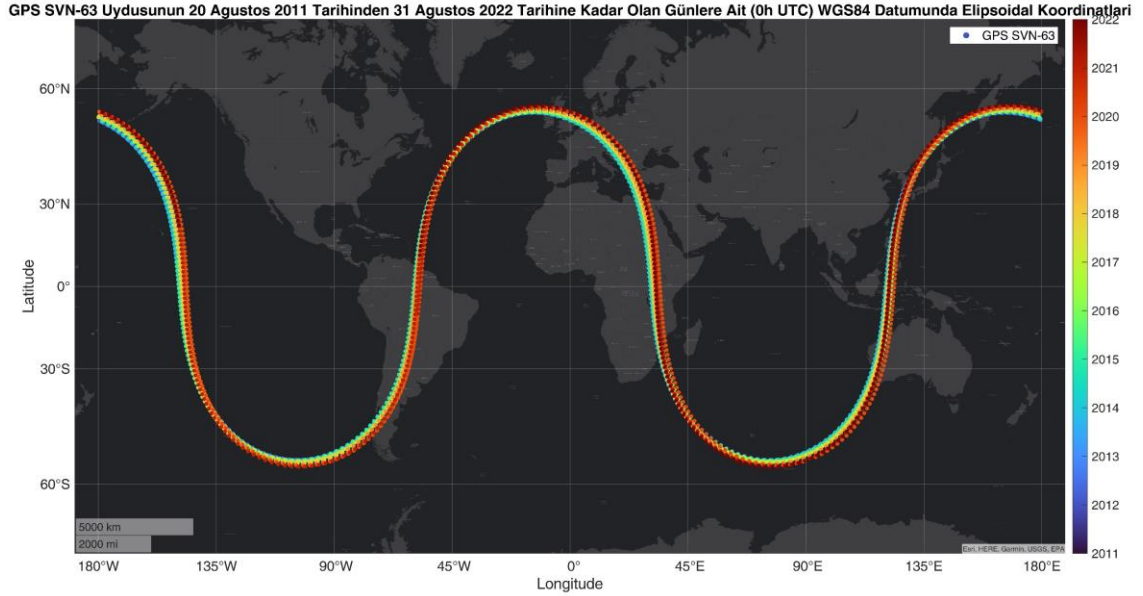


Şekil 4.32. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2021 yılının günlerine ait konumları.



Şekil 4.33. GPS-SV43 uydusunun IGS sonuç ürünlerinden elde edilen 2022 yılının günlerine ait konumları.

GPS SVN-63 uydusunun PRN1 numarası ile tanımlandığı zaman aralığına ait WGS84 datumunda ki elipsoidal koordinatlarından elde edilen harita üzerinde gösterim Şekil 4.34'teki gibidir.

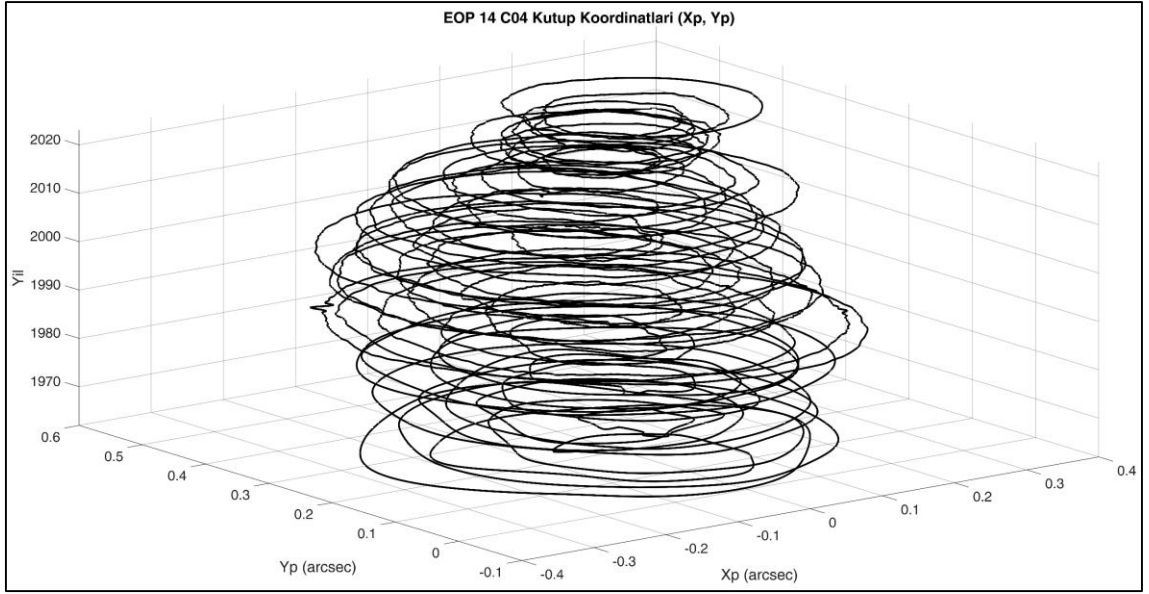


Şekil 4.34. GPS SVN-63 Uydusunun 20 Ağustos 2011 ila 31 Ağustos 2022 tarihleri arasında ki günlere ait elipsoidal koordinatlarının harita üzerinde gösterimi.

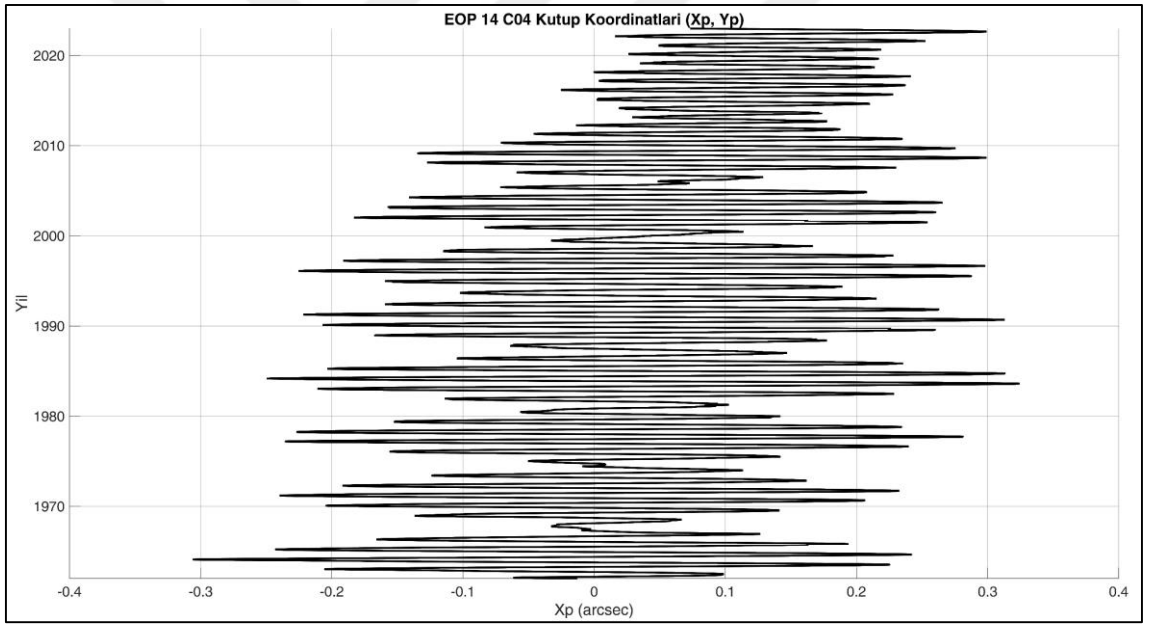
GPS uydularının yapısı ilk olarak 6 yörünge üzerinde 4 uydu konumu olacak şekilde tasarlanmıştır. 2011 yılında 24 uydu konumundan 3'ü genişletilerek 6 adet uydu konumu yörüngede yeniden konumlandırılmış, 3 uydu GPS yapısına dahil edilerek toplamda 27 uydu olacak şekilde faaliyet sürdürülmüştür. Günümüzde GPS uydularının uzaydaki yapısında toplamda 36 adet uydu konumu bulunmaktadır (URL-8). Yukarıda verilen GPS uydularının WGS84 datumunda ki elipsoidal koordinatlarının harita üzerinde gösterimi incelenirken bu konuya dikkat edilmelidir.

4.2.2. IERS EOP 14 C04 (IAU1980)

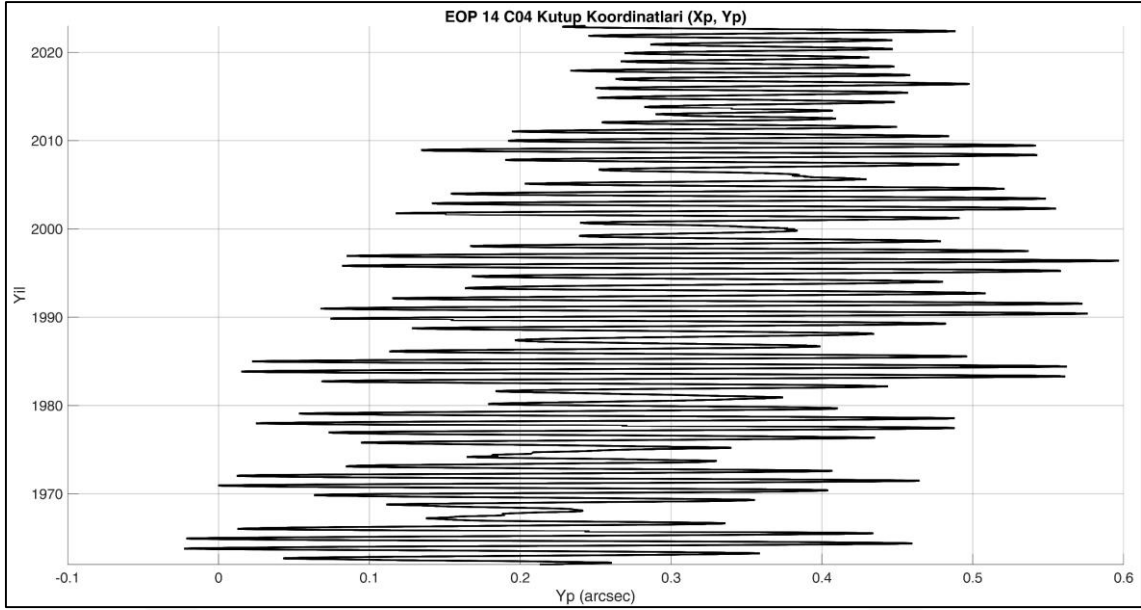
IERS tarafından EOP 14 C04 serisi ile 1962 yılından günümüze kadar olan yer yönlendirme parametreleri ($X_P, Y_P, UT1 - UTC$) IAU 1980 presesyon ve nutasyon modeline uygun olarak yayınlanmaktadır. Yayınlanan veriler Paris Gözlemevi tarafından hesaplanmaktadır ve iki haftada bir güncellenmektedir. Kutup koordinatları açısız saniye biriminde, $UT1 - UTC$ zaman farkı saniye biriminde yayınlanmaktadır. Veriler her bir gün için 0^h UTC zamanına göre yayınlanmaktadır (URL-4). Veri setinden elde edilen kutup koordinatlarının zamana göre değişim grafikleri Şekil 4.35, 4.36 ve 4.37'de, $UT1 - UTC$ zaman farkının yıllara göre değişim grafiği Şekil 4.38'de sunulmuştur.



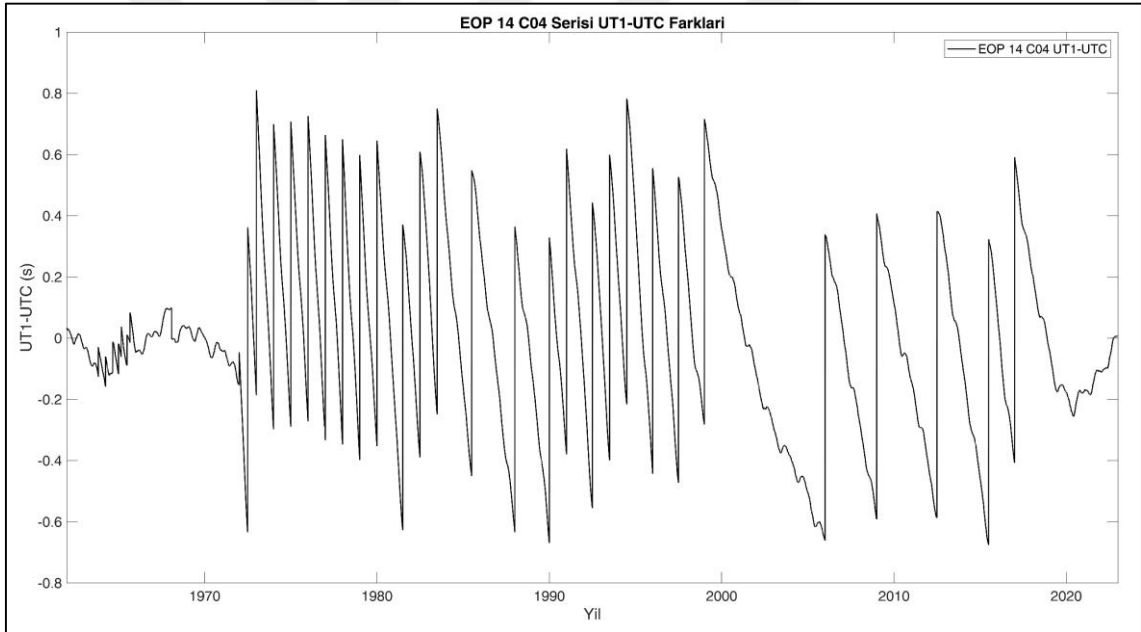
Şekil 4.35. EOP 14 C04 serisi kutup koordinatlarının yıllara göre değişimi.



Şekil 4.36. EOP 14 C04 serisi kutup koordinatının (X_p) yıllara göre değişimi.



Şekil 4.37. EOP 14 C04 serisi kutup koordinatının (Y_p) yıllara göre değişimi.



Şekil 4.38. EOP 14 C04 serisi ($UT1 - UTC$) zaman farkının yıllara göre değişimi.

4.3. Sayısal Uygulamada Kullanılan GPS Uydularına Ait Bilgiler

GPS uyduları MEO (Medium Earth Orbit – Orta Dünya Yörüngesi) yörüngesinde yeryüzünden yaklaşık olarak 20200 km yükseklikte bulunmaktadır. GPS uydularının yörünge periyodu yaklaşık olarak 11 saat 58.8 dakikadır. GPS uyduları Dünya'yı çevreleyen ve eşit aralıklarda bulunan altı yörünge üzerinde belirlenen altı konumdan birinde bulunmaktadır. GPS'in uzay yapısında toplamda 36 adet uydu konumu ve 31

adet faal uydu bulunmaktadır. 4 Şubat 2023 tarihi için uyduların yörüngeler üzerindeki konumları (SV numarası ile) Çizelge 4.4'deki gibidir (URL-2).

Çizelge 4.4 GPS uydularının yörüngeler üzerindeki konumları. (URL-1)

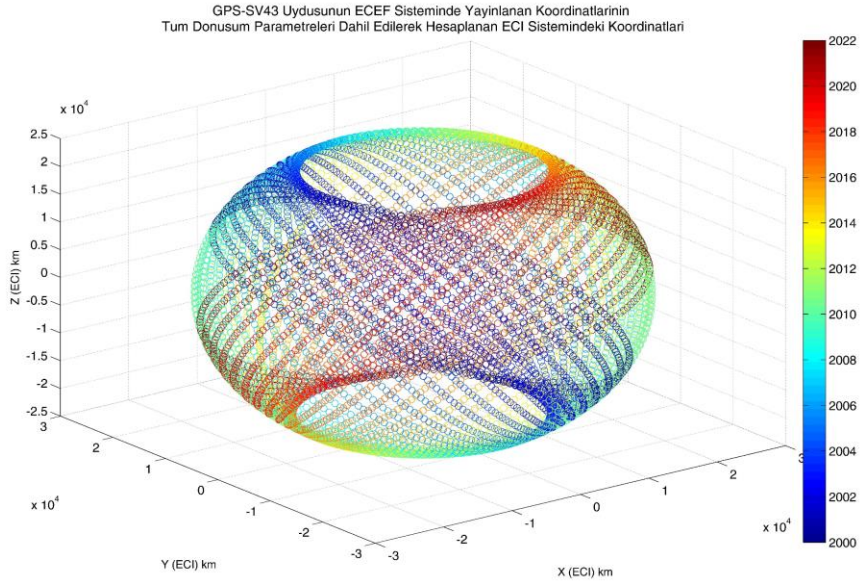
Yörünge \ Uydu Konumu	A	B	C	D	E	F
1	65	56	57	61	69	70
2	52	62	66	63	73	55
3	64		72	45	50	68
4	48	58	53	67	51	74
5		71	59	78	76	
6	79	77		75		43

ABD Hava Kuvvetleri her bir GPS uydusu için bir seri numarası görevi gören SV (Space Vehicle) numarası atamaktadır (Kaplan ve Hegarty, 2006). Bütün GPS uydularının SV numaraları birbirinden farklıdır. GPS uyduları zaman içerisinde ömürlerini tamamlamakta ve görevleri sona erdirilmektedir. Faal GPS uydularını birbirinden ayırt edebilmek ve uyduyu tek anlamlı tanımlamak için PRN (Pseudo - Random Noise) numarası kullanılmaktadır. GPS uyduları görev süreleri içerisinde farklı zaman dilimlerinde farklı PRN numarası ile tanımlanabilmektedirler. Çizelge 4.5'te 4 Şubat 2023 tarihinde bazı GPS uydularına ait SV ve PRN numaralarını içeren bilgiler verilmiştir (URL-7).

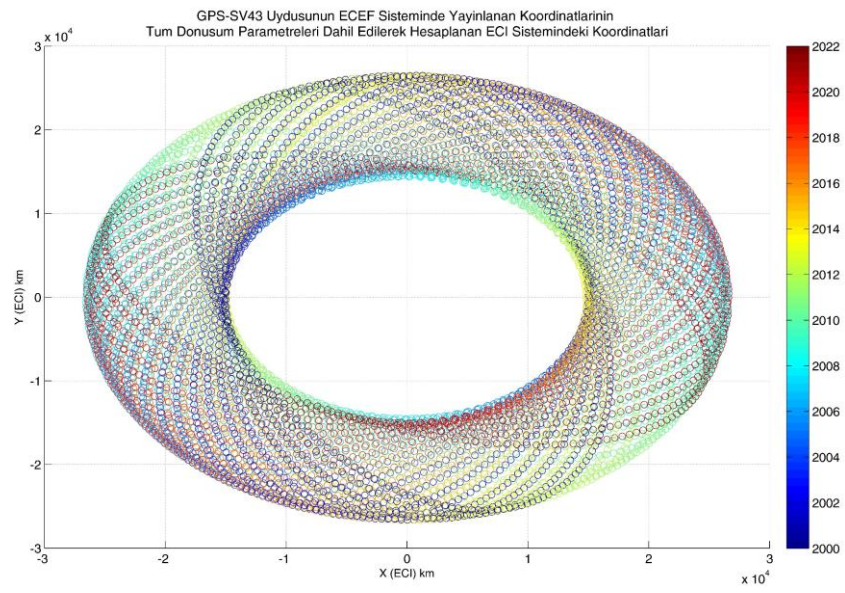
Çizelge 4.5. GPS uydularına ait tanımlama ve durum bilgileri (URL-7).

Uydu Adı	SVN	PRN	GPS Uydusunun Yörünge Konumu	Hizmet Süresi (Gün)	Görev Süresi Sona Erme Tarihi
GPS SVN-43	43	13	F6	9328	Faal
GPS SVN-34	34	04 18	D6	8612	9 Ekim 2019
GPS SVN-37	37	07 01 24	C4	8346	18 Mart 2016
GPS SVN-51	51	20	E4	8305	Faal
GPS SVN-26	26	26	F5	8219	6 Ocak 2015
GPS SVN-38	38	08	A3	8008	9 Ekim 2019
GPS SVN-41	41	14 22	F5	7918	25 Ocak 2023
GPS SVN-23	23	23 32	E5	7720	25 Ocak 2016
GPS SVN-44	44	28	B3	7648	23 Haziran 2021
GPS SVN-39	39	09	A5	7633	19 Mayıs 2014
GPS SVN-32	32	31 01 30	F4	5580	17 Mart 2008
GPS SVN-63	63	1	D2	4222	Faal
GPS SVN-49	49	1 27 30 6	B6	799	Yedek

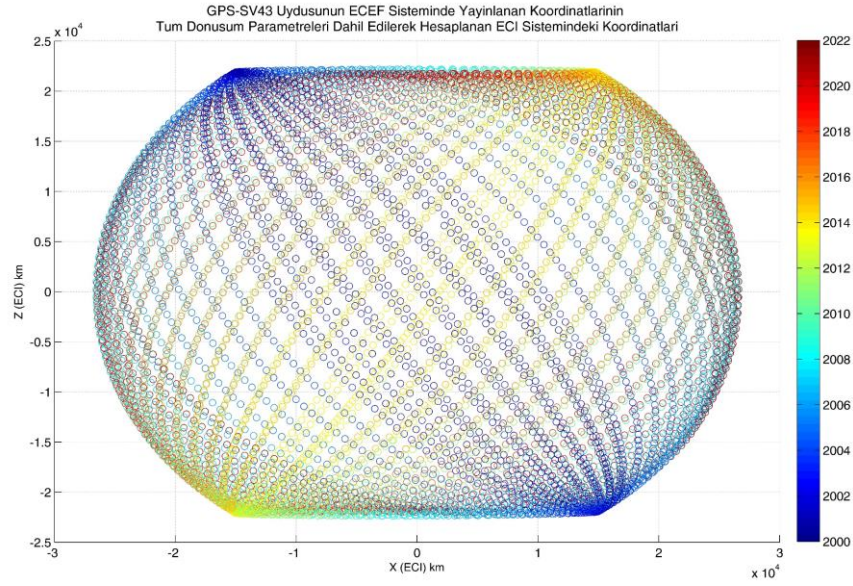
Çizelge 4.5'te uydular hizmet süresine göre sıralanmıştır. GPS SVN-43 diğer adıyla USA-132 uydusu 23 Temmuz 1997 yılında fırlatılmış ve günümüzde hala hizmetine devam etmektedir ve GPS tarihinin en uzun süre hizmet veren uydusudur. Bu özelliğinden dolayı daha uzun veri setine sahip olacağından sayısal uygulamada GPS SVN-43 uydusunun konumları kullanılmıştır. GPS SVN-43 uydusunun 1 Ocak 2000 tarihinden 31 Ağustos 2022 tarihine kadar olan günlere ait (0^h UTC) ECI koordinat sistemindeki koordinatları Şekil 4.39, 4.40, 4.41 ve 4.42'de ve SVN-63 uydusunun 20 Ağustos 2011 tarihinden 31 Ağustos 2022 tarihine kadar olan günlere ait (0^h UTC) ECI koordinat sistemindeki koordinatları Şekil 4.43, 4.44, 4.45 ve 4.46'da sunulmuştur.



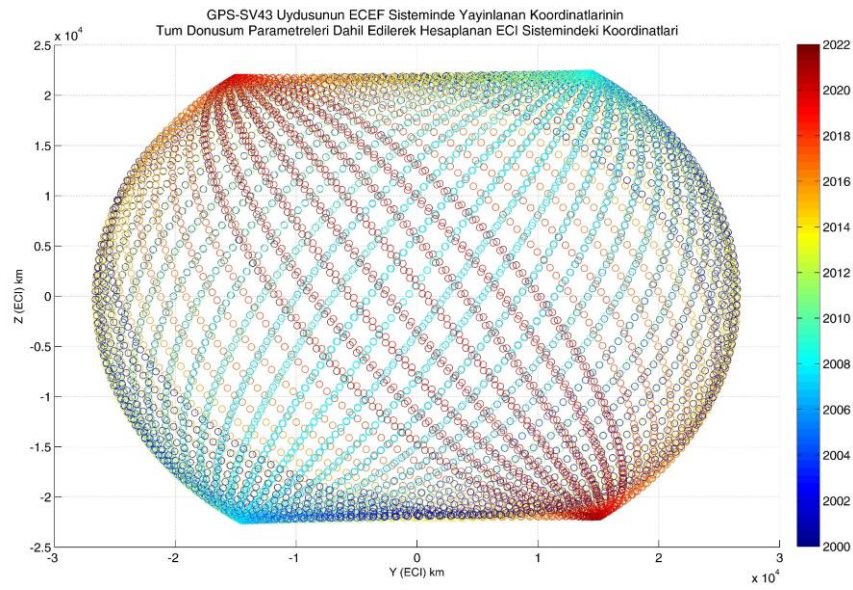
Şekil 4.39. GPS SVN-43 uydusunun ECI koordinat sistemindeki koordinatları.



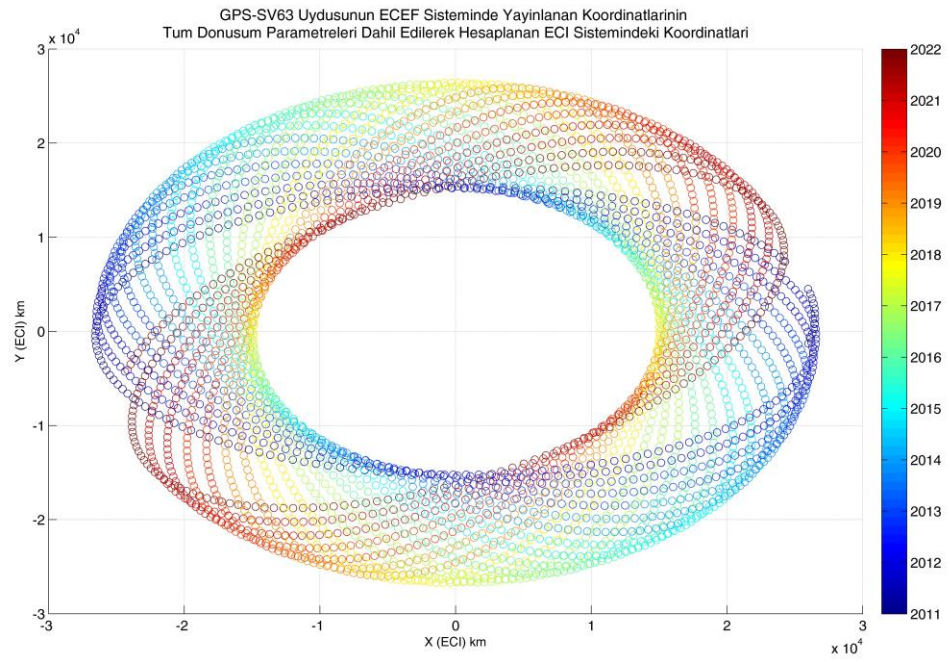
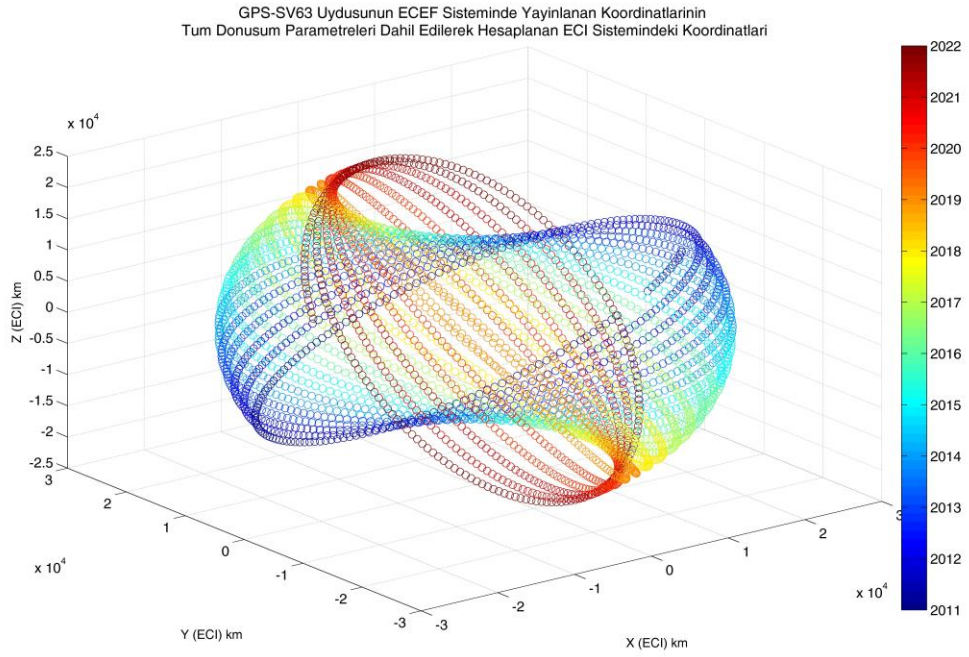
Şekil 4.40. GPS SVN-43 uydusunun ECI koordinat sistemindeki XY düzlemindeki koordinatları.

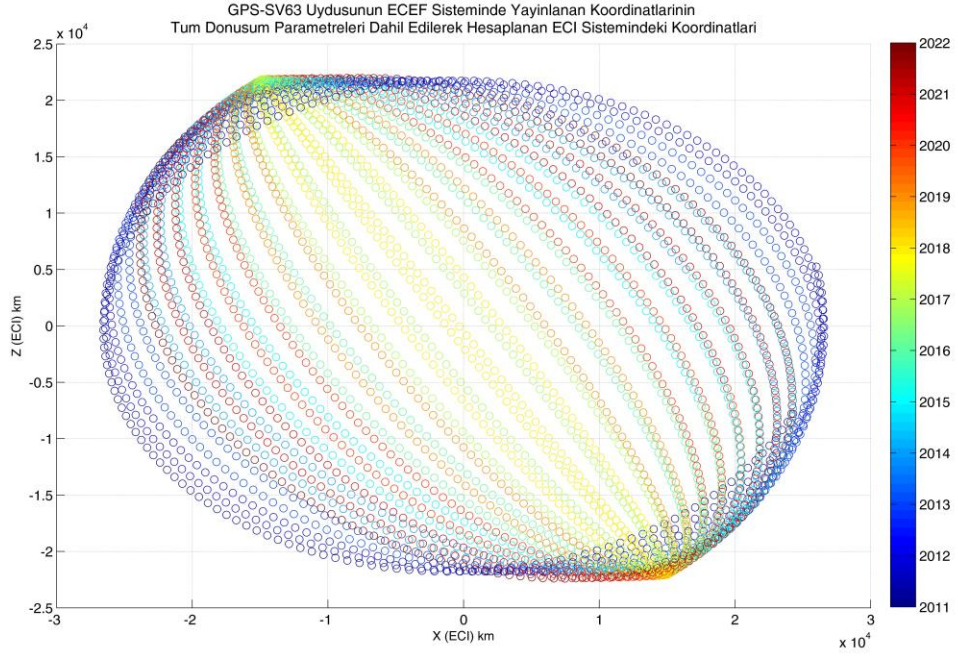


Şekil 4.41. GPS SVN-43 uydusunun ECI koordinat sisteminde XZ düzlemindeki koordinatları.

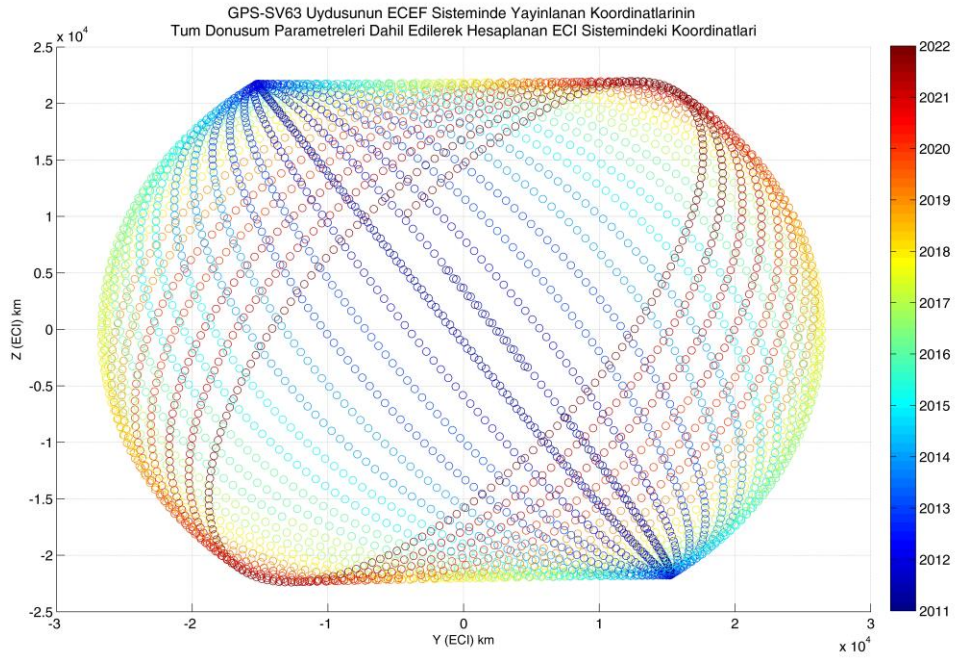


Şekil 4.42. GPS SVN-43 uydusunun ECI koordinat sisteminde YZ düzlemine düşen koordinatları.





Şekil 4.45. GPS SVN-63 uydusunun ECI koordinat sistemindeki XZ düzlemindeki koordinatları.



Şekil 4.46. GPS SVN-63 uydusunun ECI koordinat sistemindeki YZ düzlemindeki koordinatları.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında; presesyon, nutasyon, kutup hareketi ve yer dönüklük parametrelerinin koordinatlara etkisini incelemek amacıyla IAU 1976 presesyon modeli, IAU 1980 nutasyon modeli ve IERS EOP 14 C04 serisi ile kutup hareketi ve yer dönüklük parametrelerinin çözümünü gerçekleştirilen “Eci2ecef” programı tasarlanmıştır.

Çalışma kapsamında; CDDIS tarafından arşivlenen IGS Sonuç ürünleri ve IERS EOP 14 C04 serisi ile yayınlanan kutup koordinatları (X_p, Y_p) ve $UT1 - UTC$ zaman farkı 1 Ocak 2000 tarihinden 31 Ağustos 2022 tarihine kadar elde edilmiştir. GPS – SVN43 uydusu 1997 yılından günümüze kadar GPS sistemindeki yörüngesinde aktif yer aldığından, çalışma için belirlenen zaman aralığındaki günlere ait ($0^h UTC$) ECEF sisteminde ki koordinatları inceleme amacıyla kullanılmıştır. GPS SVN-63 uydusu, tez çalışması kapsamında belirlenen zaman aralığının bir kısmında (20 Ağustos 2011 – 31 Ağustos 2022) PRN1 numarası ile tanımlanmıştır. 20 Ağustos 2011 ila 31 Ağustos 2022 tarihleri arasındaki günlere ait yayınlanan IGS Sonuç ürünlerinden PRN1 numarasına karşılık gelen koordinatlar elde edilerek, GPS SVN-63 uydusu tez çalışması kapsamında tasarlanan inceleme analizine dahil edilmiştir.

5.1. GPS Uydularında Dönüşüme Etkilerin Sonuçları

Belirlenen zaman aralığı ve uyduların ECEF sistemindeki koordinatları “Eci2ecef” programının “Hızlı Dönüşüm” menüsünde, öncelikle dönüşümde kullanılan bütün parametreler (presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi) dönüşüme dahil edilerek her bir epok için ECI sistemindeki koordinatlar belirlenmiş olup ardından presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi matrisleri her bir dönüşümde sırayla birim matris alınarak ECI sistemindeki koordinatlar elde edilmiştir. Toplamda her bir uydu ve belirlenen zaman aralıkları için beş adet ECEF sisteminden ECI sistemine dönüşüm gerçekleştirilmiştir.

Her bir parametre birim matris alınarak dört farklı dönüşümle hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlar, tüm parametreler dahil edilerek hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlardan çıkarılmış ve dört parametre içinde dönüşüm sonucunda elde edilen

koordinatlara etkisi belirlenmiştir. Gerçekleştirilen bu inceleme sonucunda elde edilen değerler ve grafikler ilgili bölümlerde sunulmuştur.

5.1.1. Presesyon parametresinin koordinatlara etkisi

GPS SVN-43 ve 63 uyduları için çalışma kapsamındaki zaman aralığında gerçekleştirilen dönüşümde presesyon parametresinin dönüşüme maksimum ve minimum etkisi her bir eksen için sırasıyla Çizelge 5.1 ve 5.2’de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. GPS SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin maksimum ve minimum etkisi.

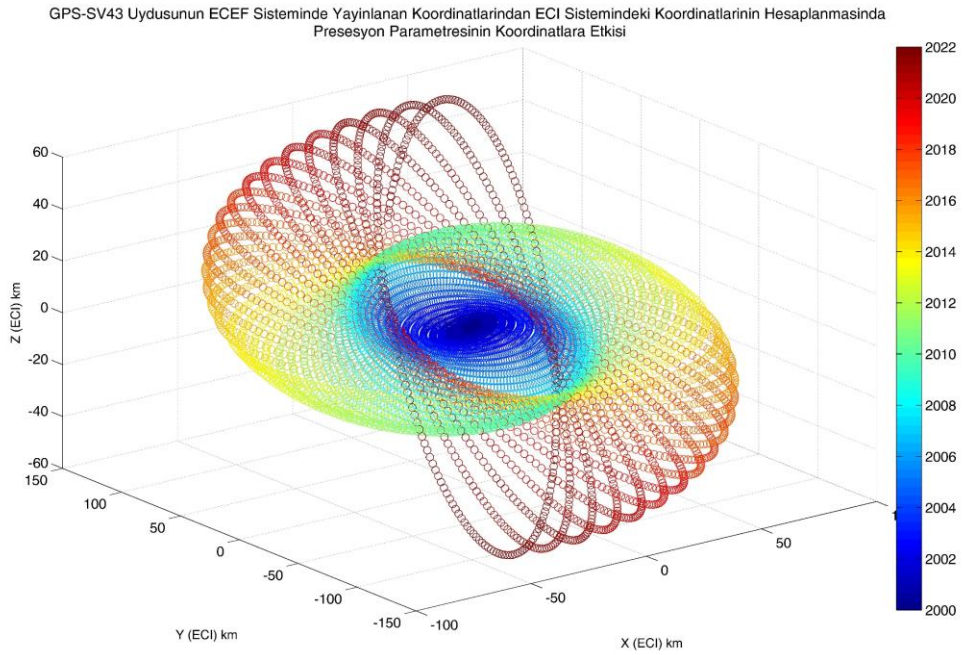
Tarih (0 ^h UTC)	X Fark (km)	Y Fark (km)	Z Fark (km)
05.02.2015 (Maks)	92.2415675739603		
17.09.2014 (Min)	-91.3658164580202		
06.02.2022 (Maks)		126.80477469424	
10.11.2021 (Min)		-125.99919227779	
06.02.2022 (Maks)			55.0960954918996
10.11.2021 (Min)			-54.74614194898

Çizelge 5.2. GPS SVN-63 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin maksimum ve minimum etkisi.

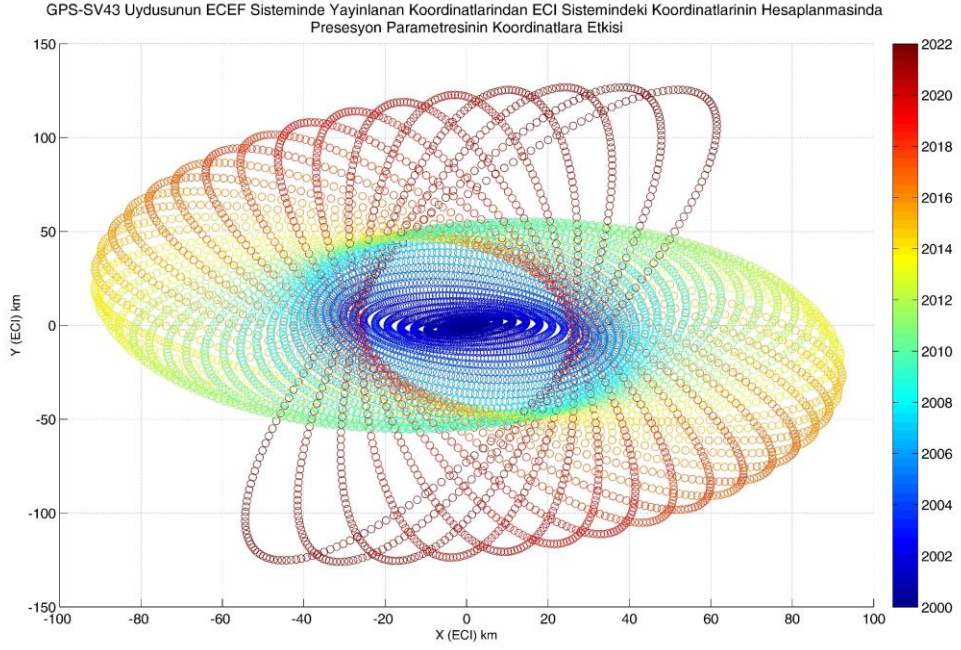
Tarih (0 ^h UTC)	X Fark (km)	Y Fark (km)	Z Fark (km)
28.04.2021 (Maks)	132.160696917221		
28.01.2021 (Min)	-129.432931335669		
11.06.2022 (Maks)		121.378692916989	
31.08.2022 (Min)		-122.57121829174	
11.06.2022 (Maks)			52.7383974333106
31.08.2022 (Min)			-53.2564811414995

Dönüşüm sonucunda elde edilen fark değerleri incelendiğinde, uydunun yer yüzünden yaklaşık 20200 km yüksekte belirli bir yörüngede hareket etmesinden ve presesyonun dairesel bir hareket olmasından dolayı başlangıç epeğundan uzaklaştıkça presesyon parametresinin koordinatlara etkisi zamana göre yarıçapı büyüyen ve daireler çizen bir hareket olarak karşımıza çıkmaktadır. Etkinin görsel olarak incelenebilmesi amacıyla her uydu için belirlenen zaman aralıklarındaki fark değerlerinin üç boyutlu grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4’te SVN-43, 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8’de

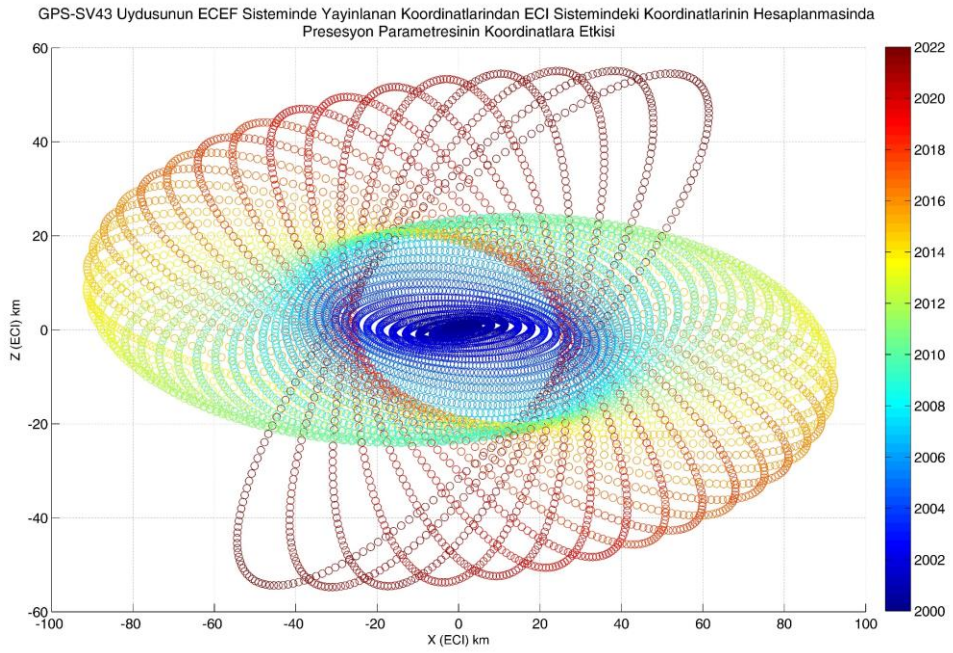
SVN-63 GPS uydularının, presesyon parametresinin koordinatlarına etkisi grafikleri sunulmuştur. Şekil 3.22 incelendiğinde presesyon açılarının üçü de (ζ, z, θ) kartezyen koordinat sisteminin X ekseninin doğrultusuna etki ederken, Y ekseninin doğrultusuna, aynı doğrultu üzerinde bulunan ζ ve z açıları, Z eksenine doğrultusuna θ açısı etki etmektedir. Buradan IAU 1976 presesyon modelinde Y ve Z eksen doğrultularının tanımlanması bir doğrultu üzerinde hareket ettirilerek tanımlandığı sonucu çıkarılabilir. Bu nedenle Şekil 5.4 ve 5.8'deki gibi presesyon parametresinin ECI sistemindeki koordinatlara etkisi X eksenine doğrultusu üzerindeki bir gözlemci tarafından incelendiğinde doğrusal bir hareket olarak gözlenecektir. Şekil 5.4 ve 5.8'deki görselde uydunun hareketi de göz önünde bulundurulacağından presesyon parametresinin maksimum ve minimum etkisi başlangıç epoğundan uzaklaşıldıkça artacağı gözlenmektedir.



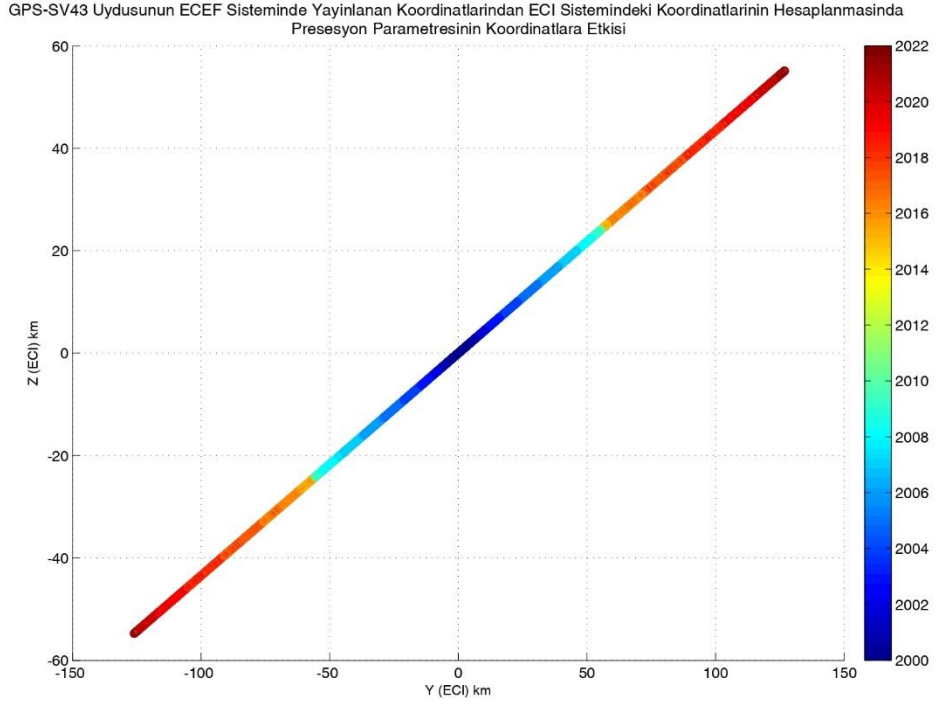
Şekil 5.1. GPS SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin etkisi.



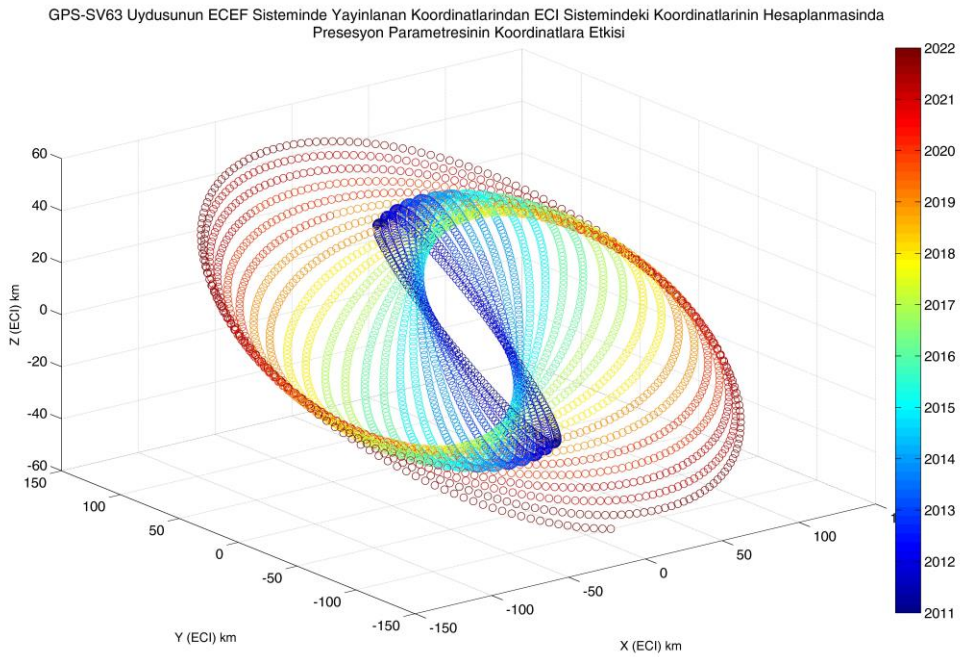
Şekil 5.2. GPS SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin etkisi (XY düzlemi).



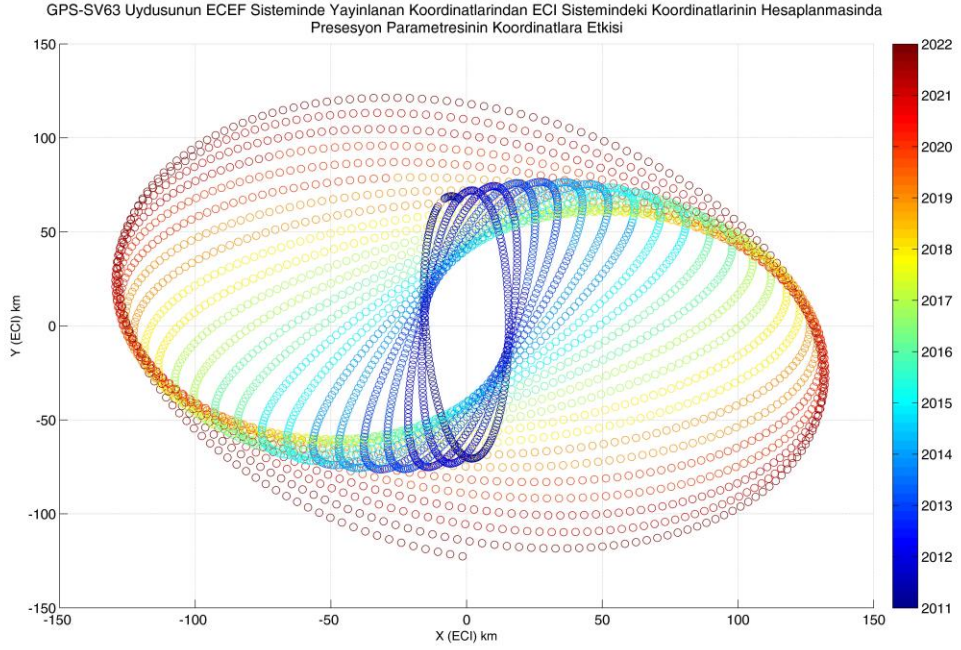
Şekil 5.3. GPS SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin etkisi (XZ düzlemi).



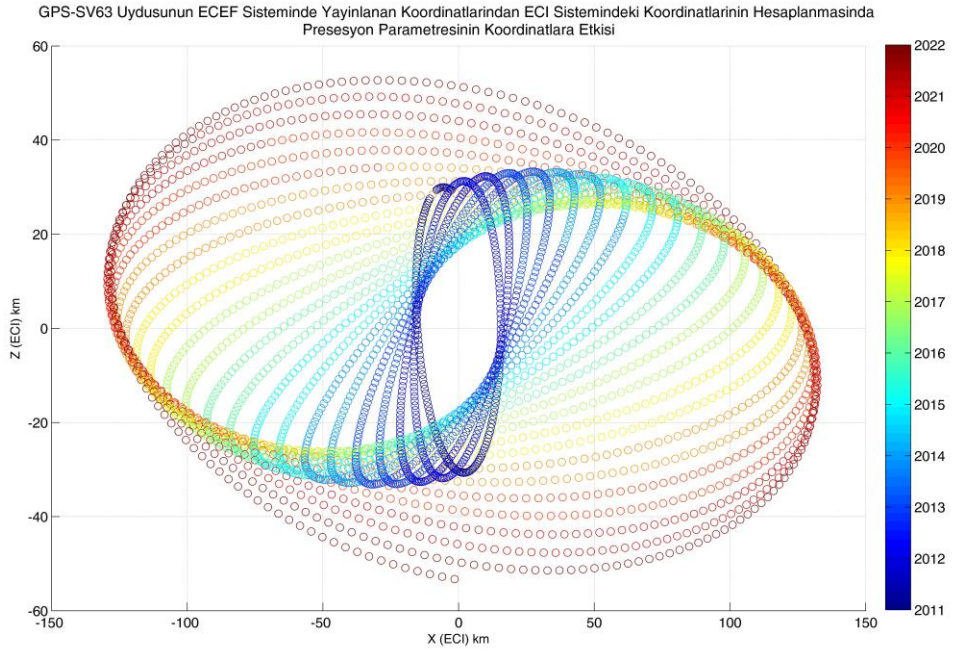
Şekil 5.4. GPS SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin etkisi (YZ düzlemi).



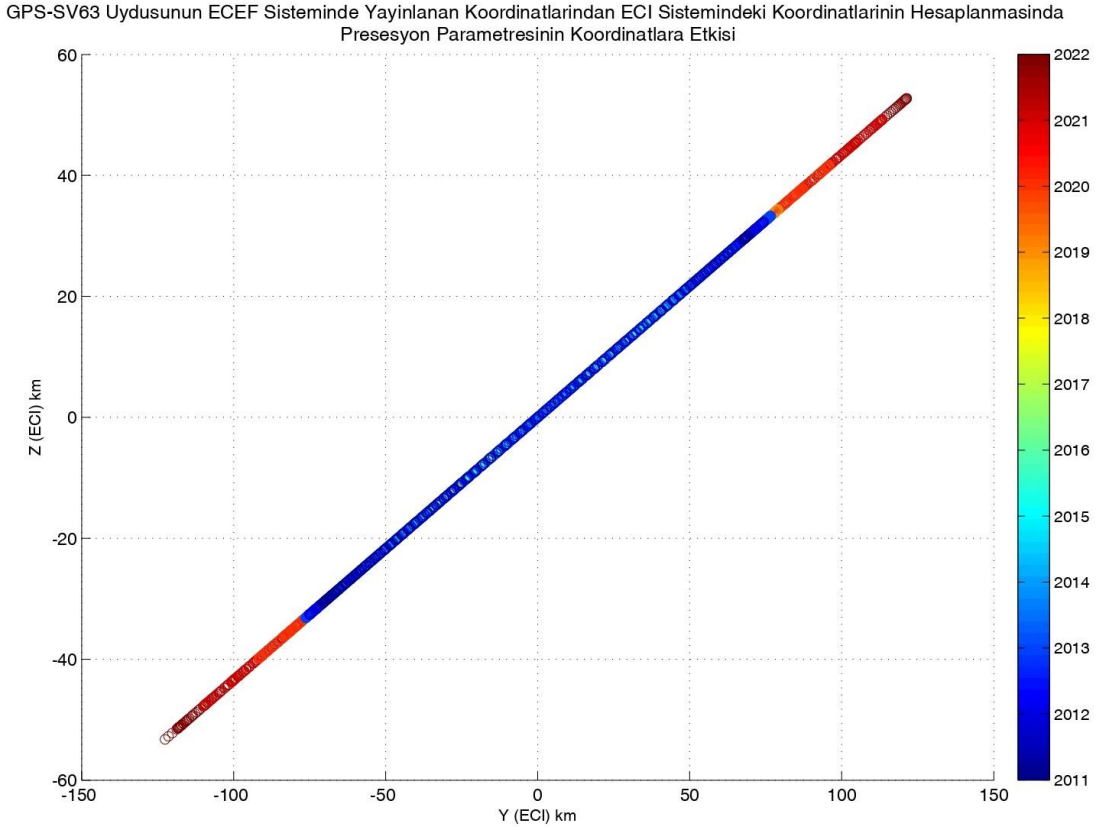
Şekil 5.5. GPS SVN-63 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin etkisi.



Şekil 5.6. GPS SVN-63 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin etkisi (XY düzlemi).



Şekil 5.7. GPS SVN-63 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin etkisi (XZ düzlemi).



Şekil 5.8. GPS SVN-63 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin etkisi (YZ düzlemi).

5.1.2. Nutasyon parametresinin koordinatlara etkisi

Nutasyon, daha çok Ay'ın Dünya'ya uyguladığı çekim etkisi sonucunda oluştuğundan ve periyodu presesyona göre çok daha kısa süreli bir hareket olarak gerçekleştiğinden, dönüşüm sonucunda elde edilen ECI koordinat sistemindeki koordinatlara etkisi de presesyona göre oldukça az ve düzensiz bir hareket olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu farklılığı IAU tarafından hareketlerin tanımlanmasında ve modellenmesinde de görebilmekteyiz. Presesyonun parametresinin matematiksel olarak modellenmesi için IAU 1976 modelinde yalnızca üç açı yeterli bulunmuşken 1980 nutasyon modelinin matematiksel tanımında parametre sayısı oldukça fazladır. GPS SVN-43 ve 63 uyduları için çalışma kapsamındaki zaman aralığında gerçekleştirilen dönüşümde nutasyon parametresinin dönüşüme maksimum ve minimum etkisi her bir eksen için sırasıyla Çizelge 5.3 ve 5.4'te sunulmuştur.

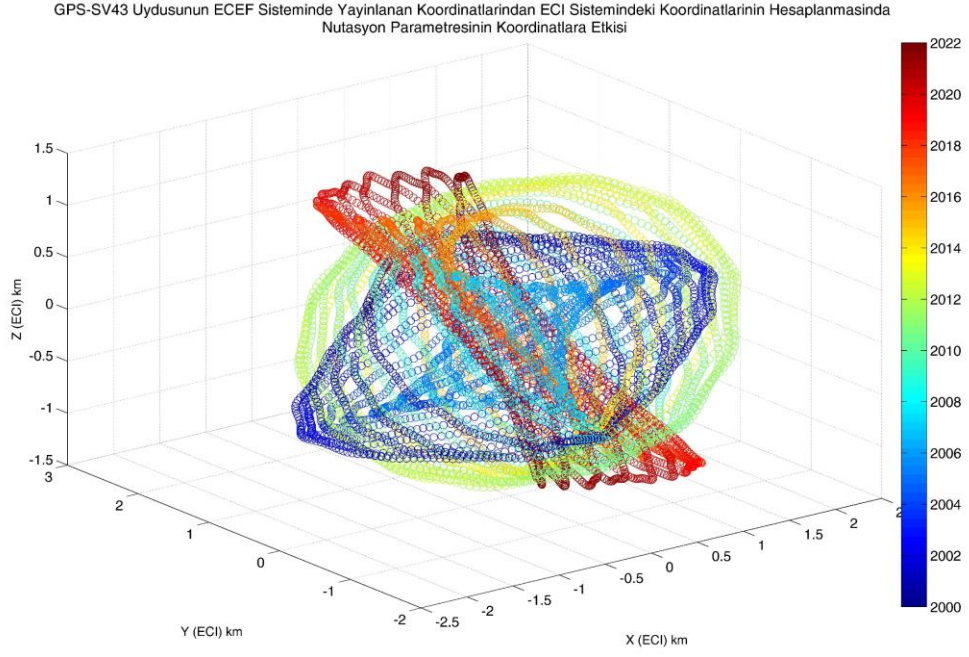
Çizelge 5.3 GPS SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına nutasyon parametresinin maksimum ve minimum etkisi.

Tarih	X Fark (km)	Y Fark (km)	Z Fark (km)
19.07.2011 (Maks)	2.23936947340007		
19.10.2001 (Min)	-2.33025882384936		
15.11.2020 (Maks)		2.18245691698985	
01.03.2020 (Min)		-1.93124905871991	
09.07.2014 (Maks)			1.16932251198978
19.05.2015 (Min)			-1.18259123786083

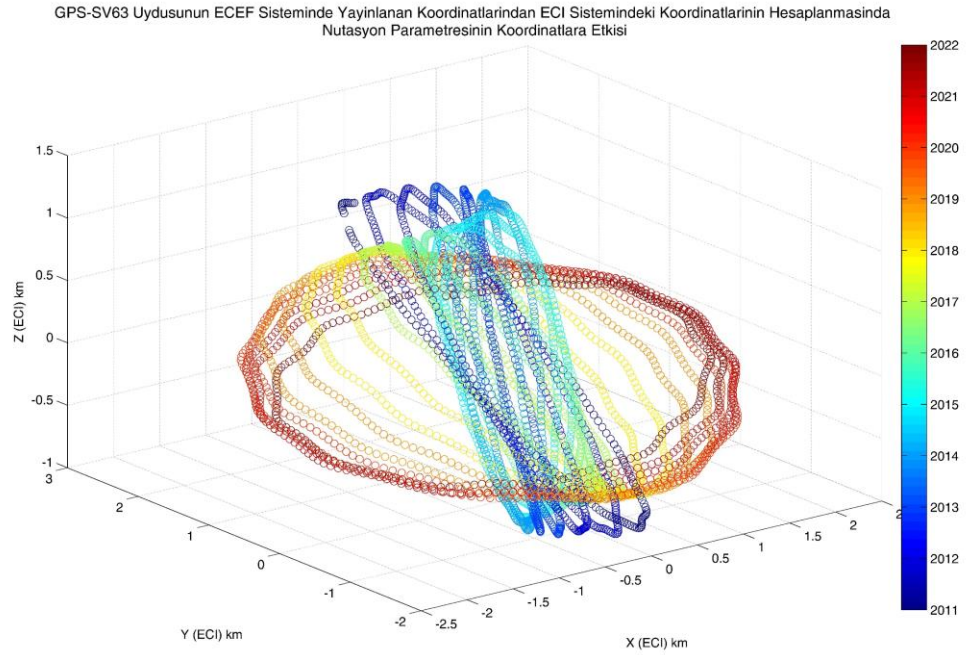
Çizelge 5.4. GPS SVN-63 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına nutasyon parametresinin minimum ve maksimum etkisi.

Tarih	X Fark (km)	Y Fark (km)	Z Fark (km)
04.02.2020 (Maks)	2.00948760059964		
12.11.2019 (Min)	-2.4118064611398		
26.08.2011 (Maks)		2.13277824507009	
18.11.2011 (Min)		-1.85611978267002	
19.06.2015 (Maks)			1.12195648342095
28.08.2016 (Min)			-0.993331352519817

Elde edilen nutasyon parametresinin dönüşüm sonucu elde edilen ECI sistemindeki koordinatlara etkisi incelendiğinde; doğal olarak aynı epoklarda farklı uyduların nutasyon parametresinin etkisi dönüşüme farklı büyüklükte etki ettiği fakat aynı zaman aralıklarında etkinin oranının benzer olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.9 ve 5.10'da iki farklı uyduya ait grafikler incelendiğinde aynı zaman aralıklarında nutasyon parametresinin koordinatlara etki hareketi benzer şekilde karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 5.9. GPS SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına nutasyon parametresinin etkisi.



Şekil 5.10. GPS SVN-63 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına nutasyon parametresinin etkisi.

5.1.3. Yer dönüklük parametresinin koordinatlara etkisi

Yer dönüklük parametresi yerin kendi eksenini etrafındaki dönüklüğü tanımlamak için dönüşümde parametre olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm işleminde koordinatlara etki eden en büyük parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. GPS SVN-43 ve 63 uyduları için belirlenen zaman aralığında gerçekleştirilen dönüşümde yer dönüklük parametresinin dönüşümde maksimum ve minimum etkisi her bir eksen için sırasıyla Çizelge 5.5 ve 5.6'da sunulmuştur.

Çizelge 5.5. GPS SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına yer dönüklük parametresinin minimum ve maksimum etkisi.

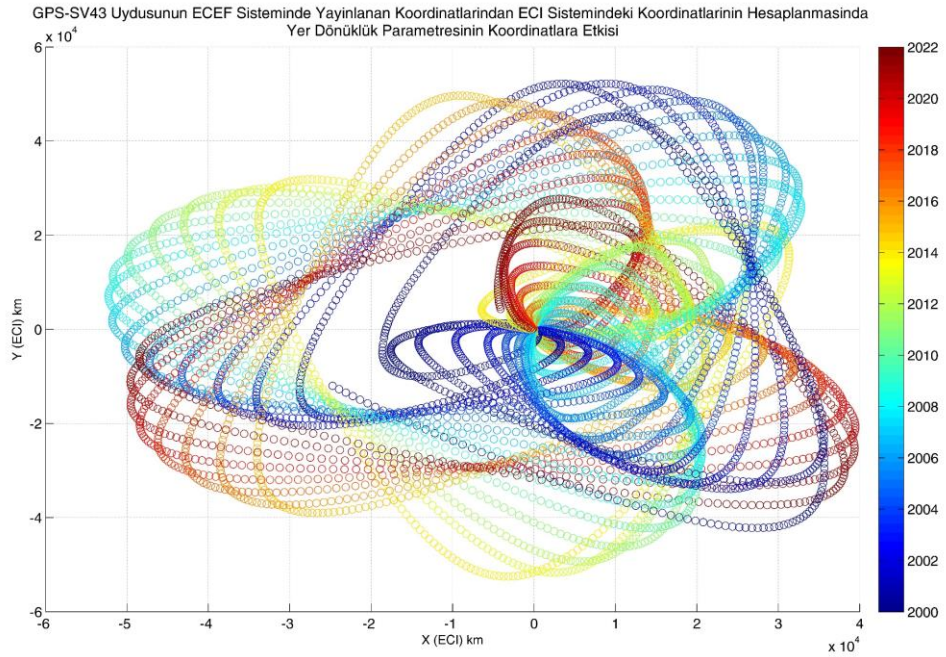
Tarih	X Fark (km)	Y Fark (km)	Z Fark (km)
28.05.2020 (Maks)	39463.6021319031		
04.04.2008 (Min)	-52279.9202482091		
02.04.2002 (Maks)		52220.5587875831	
05.04.2014 (Min)		-52501.7117234358	
04.02.2022 (Maks)			103.03271190505
07.05.2022 (Min)			-81.1717125472496

Çizelge 5.6. GPS SVN-63 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına yer dönüklük parametresinin minimum ve maksimum etkisi.

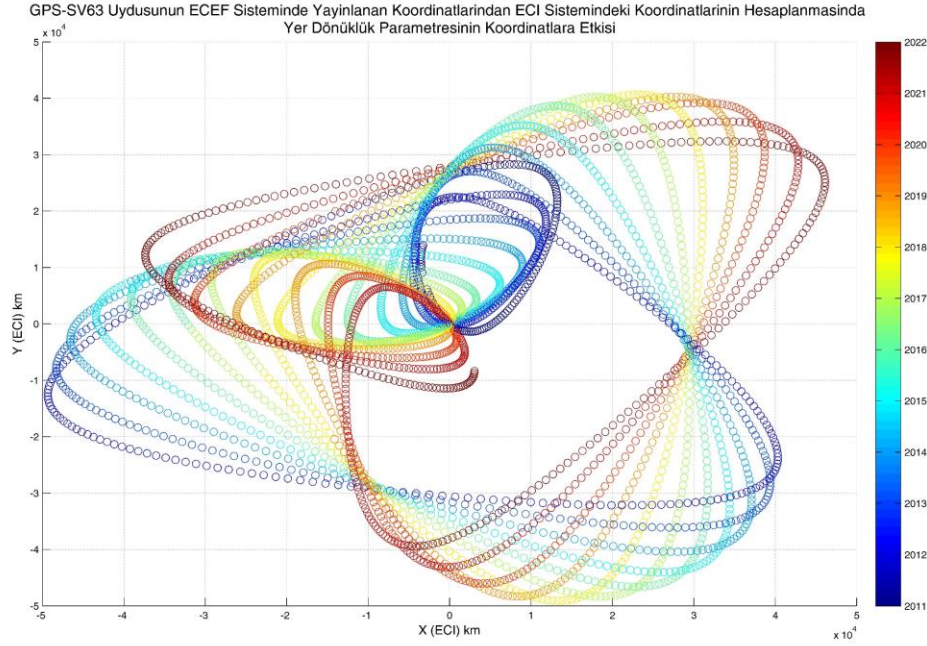
Tarih	X Fark (km)	Y Fark (km)	Z Fark (km)
16.03.2022 (Maks)	46104.5696113191		
18.02.2012 (Min)	-49357.5934197057		
20.05.2018 (Maks)		40665.4373692898	
19.02.2018 (Min)		-49096.1236116743	
15.06.2022 (Maks)			80.3599230045497
16.03.2022 (Min)			-98.8497797872105

Çizelge 5.5 ve 5.6 incelendiğinde X ve Y eksenlerindeki farkların, uydunun yörüngesel hareketinde yer merkezine olan uzaklığının (yaklaşık 26500 km) neredeyse iki katı oranda fazla olduğu görülmektedir. Önceki bölümlerde açıklandığı gibi yer dönüklük parametresi TCRS ve TTRS sistemlerinin X ve Y eksenlerinin çakıştırılması için kullanıldığından ve GAST açısı Greenwich ortalama meridyeni ile ilkbahar noktası doğrultusu arasındaki açısal uzaklık olduğundan yer dönüklük parametresinin dönüşümdeki etkisi oldukça büyüktür. Bu duruma örnek olarak, yer merkezinden

yaklaşık 26500 km uzaklıkta yörüngesi boyunca hareket eden bir uydu ECEF koordinat sisteminin X ekseninde bulunduğu anda ECI koordinat sisteminin X ekseninde ECEF koordinat sisteminin -X eksenine ile çakışık ($GAST = 180^\circ$) olduğunda noktanın X eksenindeki konumu yer dönüklük parametresi dahil edilerek gerçekleştirilen dönüşümde -26500 km olurken yer dönüklük parametresi dahil edilmediğinde +26500 km olacaktır. Bu nedenle yer dönüklük parametresinin ECI sistemine dönüşümdeki etkisi yaklaşık 53000 km olarak karşımıza çıkacaktır. Aynı örnek uydunun Y ekseninde bulunduğu durumda da geçerli olacağından, çalışmada gerçekleştirilen inceleme yönteminde sonuçlar X ve Y ekseninde büyük değerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 5.11 ve 5.12’de GPS SVN-43 ve 63 uydularının çalışma kapsamındaki zaman aralıklarında hesaplanan yer dönüklük parametresinin koordinatlara etki grafikleri (XY düzleminde) sunulmuştur.



Şekil 5.11. GPS SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına yer dönüklük parametresinin etkisi.



Şekil 5.12. GPS SVN-63 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına yer dönüklük parametresinin etkisi.

5.1.4. Kutup hareketi parametresinin koordinatlara etkisi

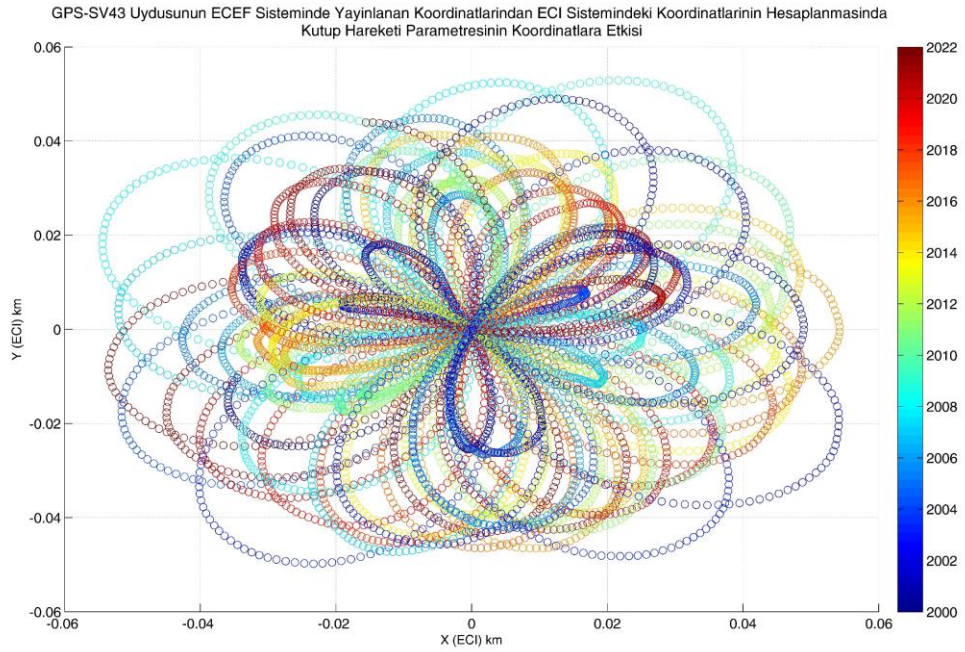
Kutup hareketi parametresi ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşümde koordinatlara, diğer parametrelere göre en az etki eden parametredir. Kutoğlu (2001)'de hareketin kutup noktası için maksimum etkisini 10 metre olarak belirtilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, GPS SVN-43 uydusu için belirlenen zaman aralığında kutup hareketi parametresinin ECEF sisteminden ECI sistemine dönüşümde mutlak etkisinin 0.063 m ila 71.90 m aralığında belirlenmiştir. GPS uyduları yeryüzünden yaklaşık olarak 20200 km yükseklikte bulunduğundan diğer GPS uyduları içinde benzer aralıklar elde edilecektir. GPS SVN-43 ve 63 uyduları için belirlenen zaman aralığında gerçekleştirilen dönüşümde kutup hareketi parametresinin dönüşüme maksimum ve minimum etkisi her bir eksen için sırasıyla Çizelge 5.7 ve 5.8'de sunulmuştur. Şekil 5.13 ve 5.14'te GPS SVN-43 ve 63 uydularına ait kutup hareketi parametresinin çalışma kapsamındaki zaman aralıklarında ECI sistemindeki koordinatlarının hesaplanmasına etkisini gösteren grafikler (XY düzleminde) sunulmuştur.

Çizelge 5.7. GPS SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına kutup hareketi parametresinin minimum ve maksimum etkisi.

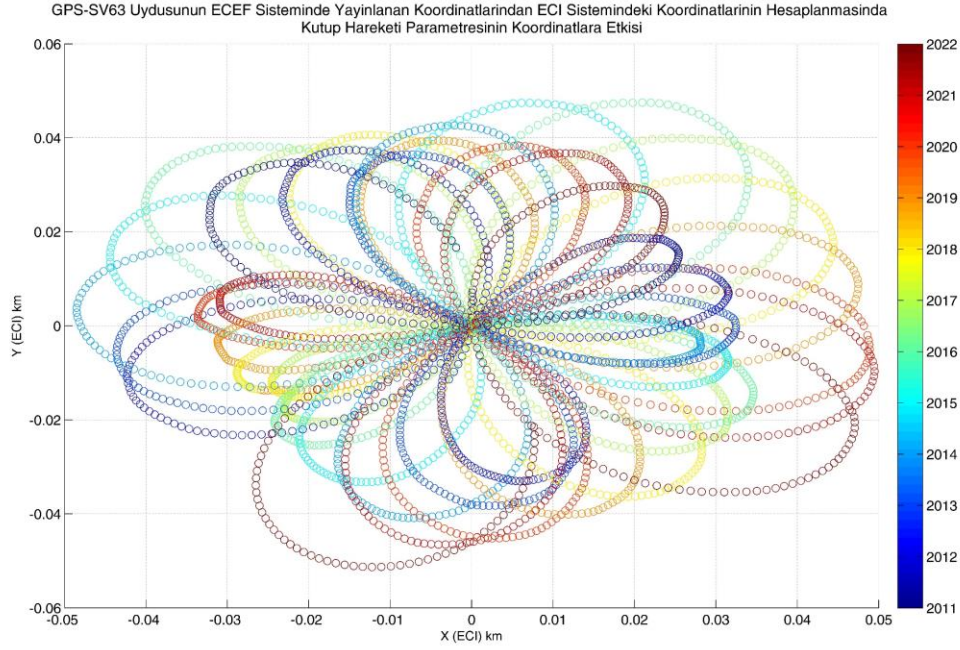
Tarih	X Fark (km)	Y Fark (km)	Z Fark (km)
09.06.2016 (Maks)	0.0542217473994242		
24.05.2008 (Min)	-0.0544239201199161		
04.08.2009 (Maks)		0.0529307830001926	
02.08.2003 (Min)		-0.0498022601220782	
31.03.2002 (Maks)			0.0684977630019716
15.06.2009 (Min)			-0.0657662231640188

Çizelge 5.8. GPS SVN-63 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına kutup hareketi parametresinin minimum ve maksimum etkisi.

Tarih	X Fark (km)	Y Fark (km)	Z Fark (km)
23.05.2021 (Maks)	0.0494853372001671		
01.06.2014 (Min)	-0.0485258853095729		
02.08.2016 (Maks)		0.0475263253683806	
03.08.2022 (Min)		-0.0513178307992348	
20.06.2022 (Maks)			0.0648315754789337
21.04.2014 (Min)			-0.0522323499299091



Şekil 5.13. GPS SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına kutup hareketi parametresinin etkisi.



Şekil 5.14. GPS SVN-63 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına kutup hareketi parametresinin etkisi.

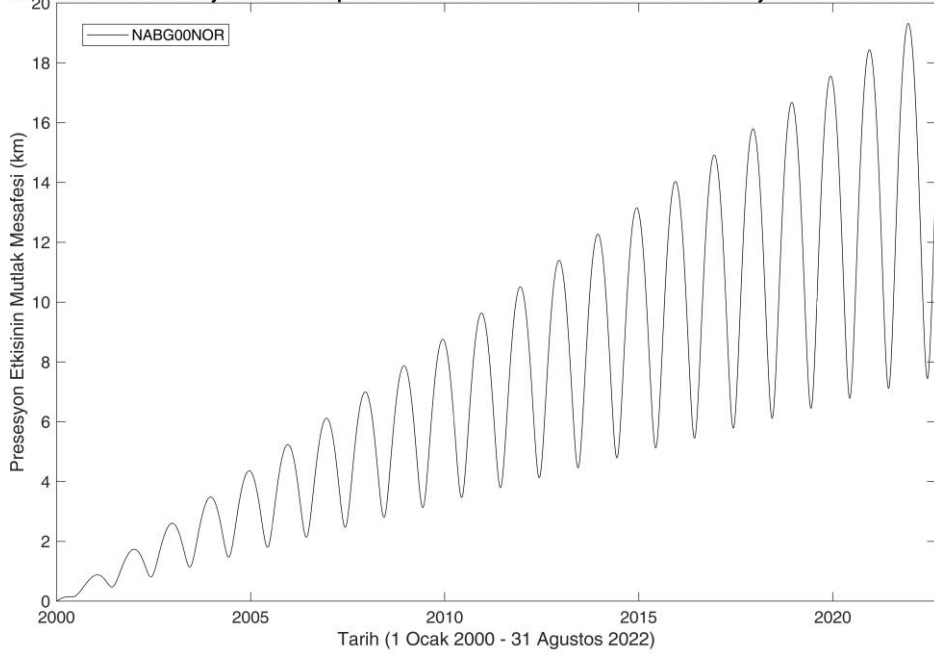
5.2. IGS İstasyonlarında Dönüşüme Etkilerin Sonuçları

Presesyon, Nutasyon, Yer Dönüklük ve Kutup Hareketi parametrelerinin, dönüşüme etkisini cismin konumundan bağımsız olarak incelemek amacıyla yeryüzünde GNSS altyapısının iyileştirilmesi ve gözlenmesi amacıyla tesis edilen IGS istasyonlarından kutuplara yakınlığı sebebiyle NABG00NOR ve SYOG00ATA istasyonları seçilmiştir. 1 Ocak 2000 tarihinden 31 Ağustos 2022 tarihine kadar hesaplanan ECEF sisteminden ECI sistemine dönüşüm matrisleri yardımıyla dönüşümde kullanılan parametrelerin hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlara mutlak etkisinin grafikleri oluşturulmuştur. Çizelge 5.9’da seçilen istasyonların ECEF sistemindeki koordinatları bulunmaktadır. Şekil 5.15 ve 5.16’da sırasıyla NABG00NOR ve SYOG00ATA IGS istasyonlarının hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin mutlak etkisi görülmektedir.

Çizelge 5.9. NABG00NOR ve SYOG00ATA IGS istasyonlarının ECEF sistemindeki koordinatları.

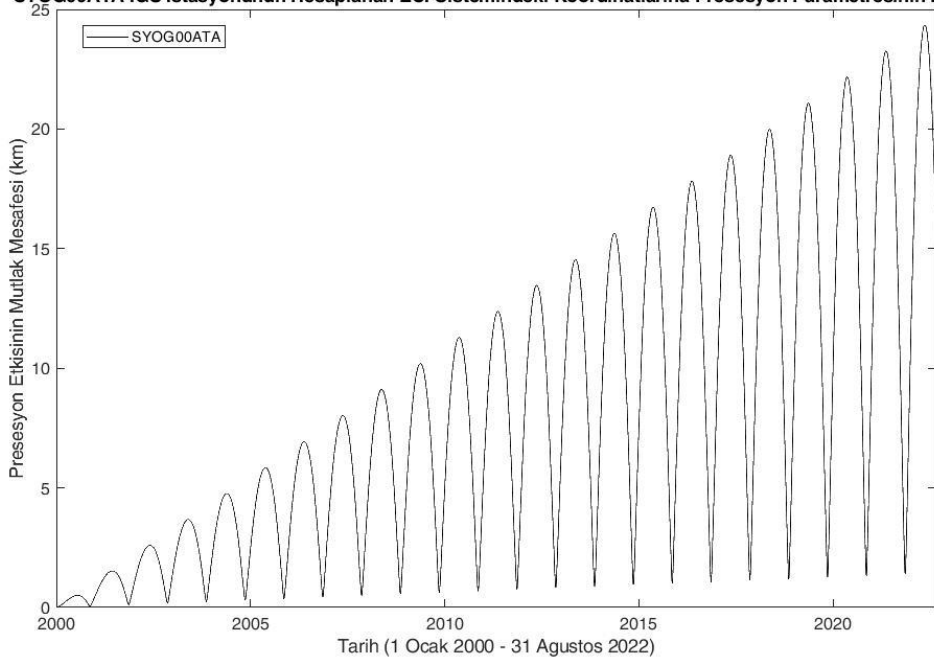
IGS İstasyonu	X_{km}	Y_{km}	Z_{km}
NABG00NOR	1201.00937	252.158016	6238.022126
SYOG00ATA	1766.207869	1460.29038	-5932.297765

NABG00NOR IGS İstasyonunun Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarına Presesyon Parametresinin Etkisi



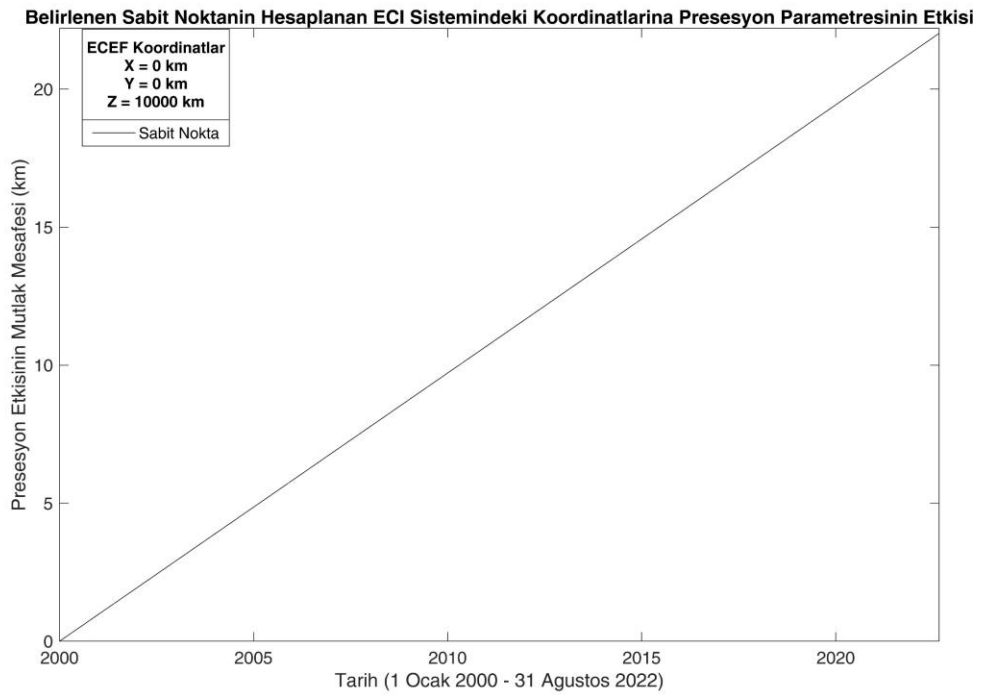
Şekil 5.15. NABG00NOR IGS istasyonunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin X, Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.

SYOG00ATA IGS İstasyonunun Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarına Presesyon Parametresinin Etkisi

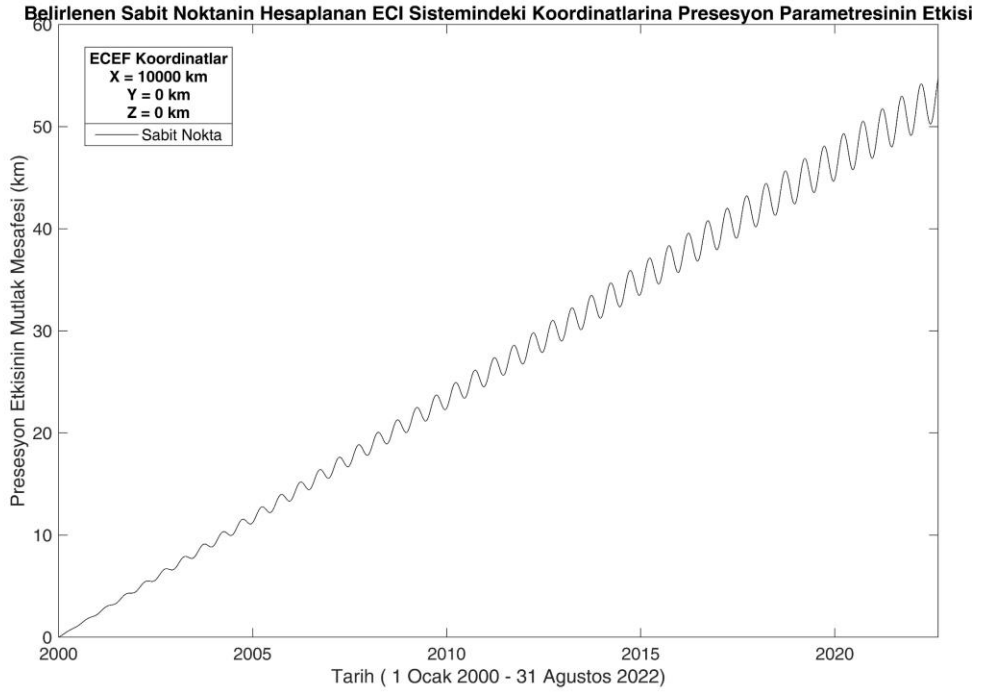


Şekil 5.16. SYOG00ATA IGS istasyonunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin X, Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.

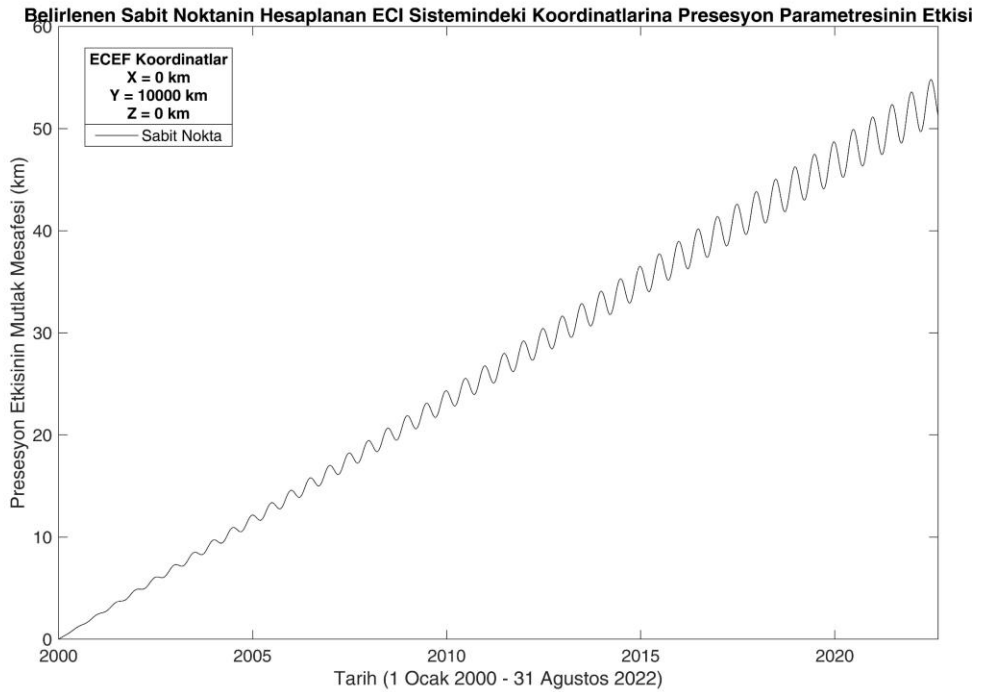
Şekil 5.15 ve 5.16 incelendiğinde başlangıç epoğundan (J2000) uzaklaştıkça presesyon parametresinin dönüşüme etkisi doğrusal olarak büyümektedir. Bu ortalama büyümenin yanında presesyon etkisi dalga şeklinde hareket sergileyerek kısa periyotlu etkinin arttığı ve azaldığı durumlar oluşturmaktadır. Bölüm 3.4.1’de açıklandığı gibi Güneş sistemindeki gezegenlerin kütle çekiminden dolayı ekliptik düzleminin hareketine gezegensel presesyon adı verilmektedir. Ekliptik düzlemindeki hareketler ECI koordinat sisteminin Z eksenini etrafında; ilkbahar noktasına göre tanımlanan X eksenini ve sağ el koordinat sistemi oluşturan Y eksenini etkileyecektir. Şekil 5.17, 5.18 ve 5.19’da bu hareketi daha iyi açıklayabilmek için ECEF koordinat sisteminin üç ekseninde belirlenen sabit noktalar (koordinat sisteminin merkezine 10000 km uzaklıkta) yardımıyla presesyon hareketinin hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlara etkisi grafikleri oluşturulmuştur. Ekliptik düzlemindeki hareketler Z eksenini etkilemeyeceğinden Şekil 5.18 ve 5.19’da görülen dalga hareketi Şekil 5.17’de görülmemektedir fakat Şekil 5.18 ve 5.19’da görüldüğü gibi gezegensel presesyon X ve Y eksenlerini etkilemektedir. Presesyon hareketinin periyodu yaklaşık 26000 yıllık dairesel bir hareket olduğundan ve çalışma için incelenen zaman aralığı yaklaşık 23 yıl olduğundan presesyon etkisi zamana bağlı olarak artmaktadır. 26000 yıl boyunca analiz edildiğinde etkinin, belirli bir zamana kadar artan daha sonra azalan ve periyodunu tamamladığı anda dönüşüme etkisi olmayacak bir hareket ile gözlemlenecektir.



Şekil 5.17. ECEF sisteminde Z eksenini üzerinde belirlenen sabit nokta için hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlara presesyon parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.

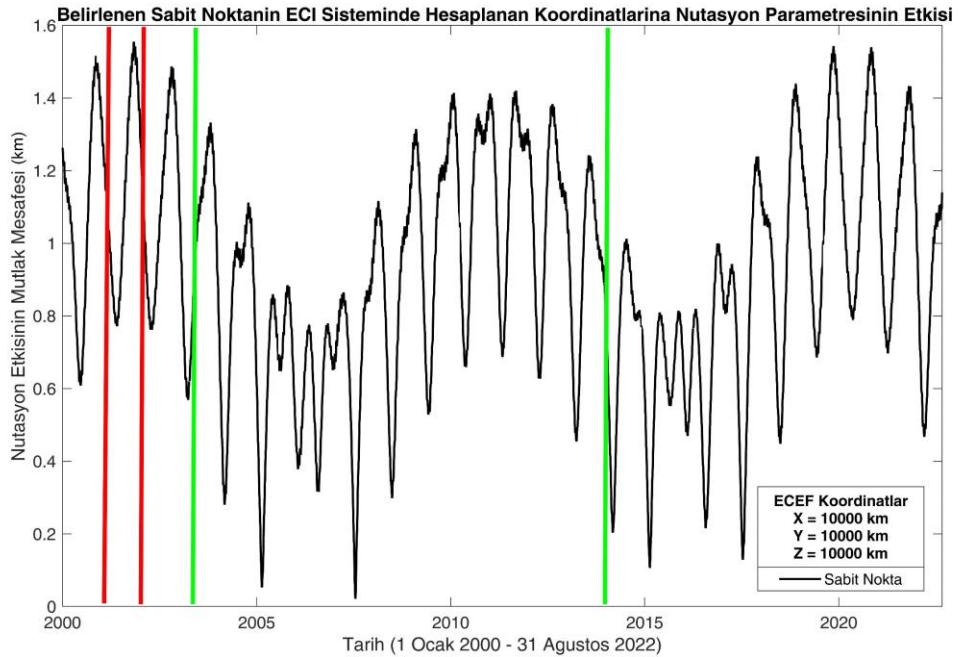


Şekil 5.18. ECEF sisteminde X ekseninde belirlenen sabit nokta için hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlara presesyon parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.

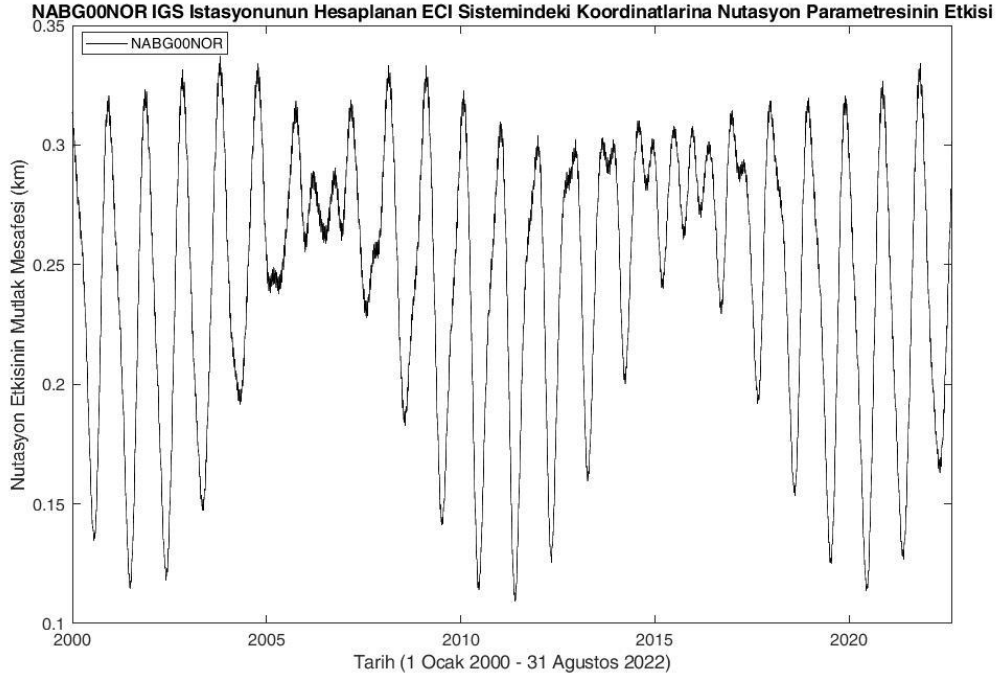


Şekil 5.19. ECEF sisteminde Y ekseninde belirlenen sabit nokta için hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlara presesyon parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.

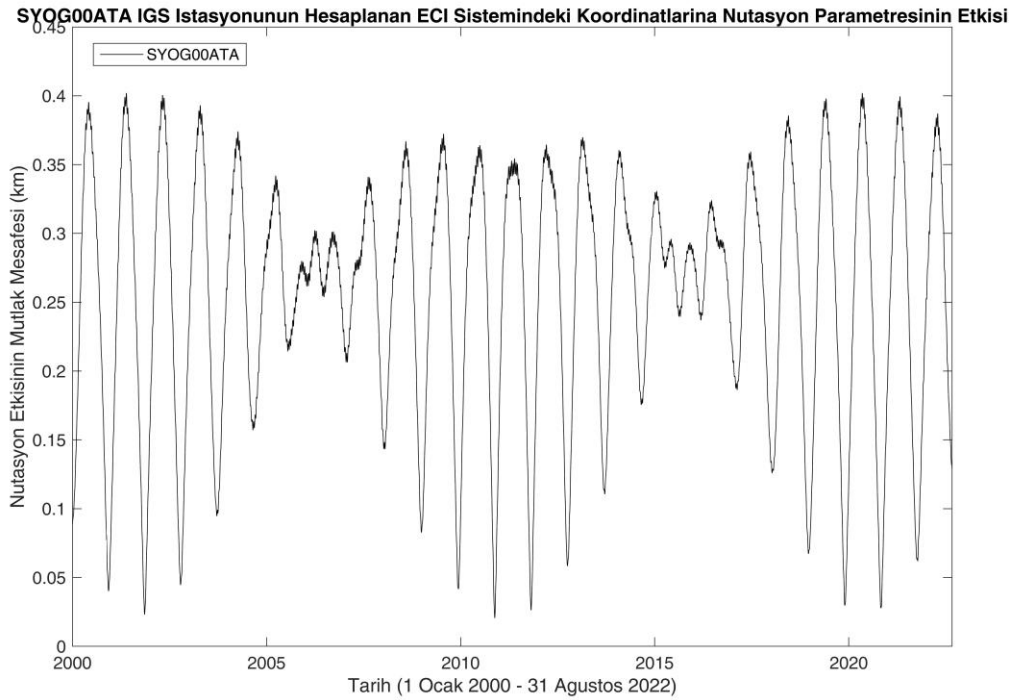
Nutasyon hareketinin periyodu 14 gün ila 18.6 yıl arasında değişkenlik göstermektedir. Şekil 5.20’de ECEF sisteminde belirlenen sabit noktanın, Şekil 5.21 ve 5.22’de sırasıyla NABG00NOR ve SYOG00ATA IGS istasyonlarının hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına nutasyon parametresinin mutlak etkisi görülmektedir. Elde edilen sonuç grafiği incelendiğinde nutasyon parametresinin belirtilen periyodu ardı ardına olarak değil iç içe geçmiş olarak gerçekleştiği görülmektedir. Örnek olarak Şekil 5.20’de kırmızı çubuklar ile sınırlandırılmış dalga periyodu görülmektedir. 23 yıllık zaman aralığı sürecinde buna benzer periyotlar gözlemlenmektedir. Eğer bu hareketlerin denge noktaları birleştirilirse yeşil çubuklar ile sınırlandırılmış, yaklaşık olarak 10 yıl periyotlu hareket elde edilmektedir ve bu periyodik hareket gerçekleşirken kırmızı çubuklar ile sınırlandırılmış harekete benzer olarak yaklaşık 1 yıllık periyotlar elde edilmektedir. Şekil 5.23, 5.24 ve 5.25’teki gibi daha kısa zaman aralığında inceleme gerçekleştirirsek 1 yıl periyotlu hareketin içerisinde de bir aydan daha kısa periyotların olduğu gözlemlenecektir.



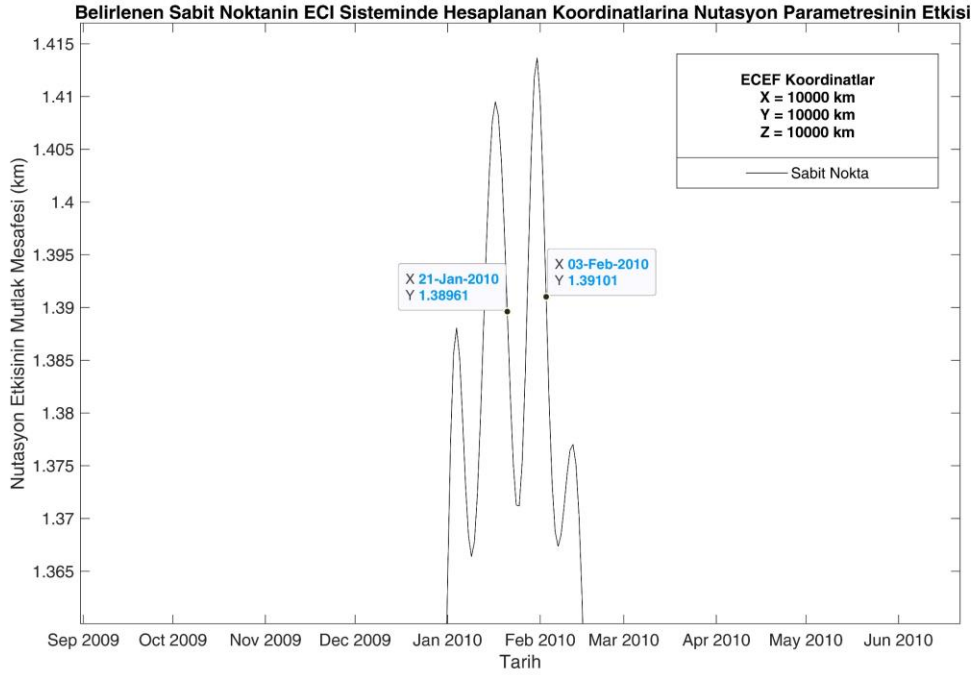
Şekil 5.20. ECEF sisteminde belirlenen sabit nokta için hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlara nutasyon parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.



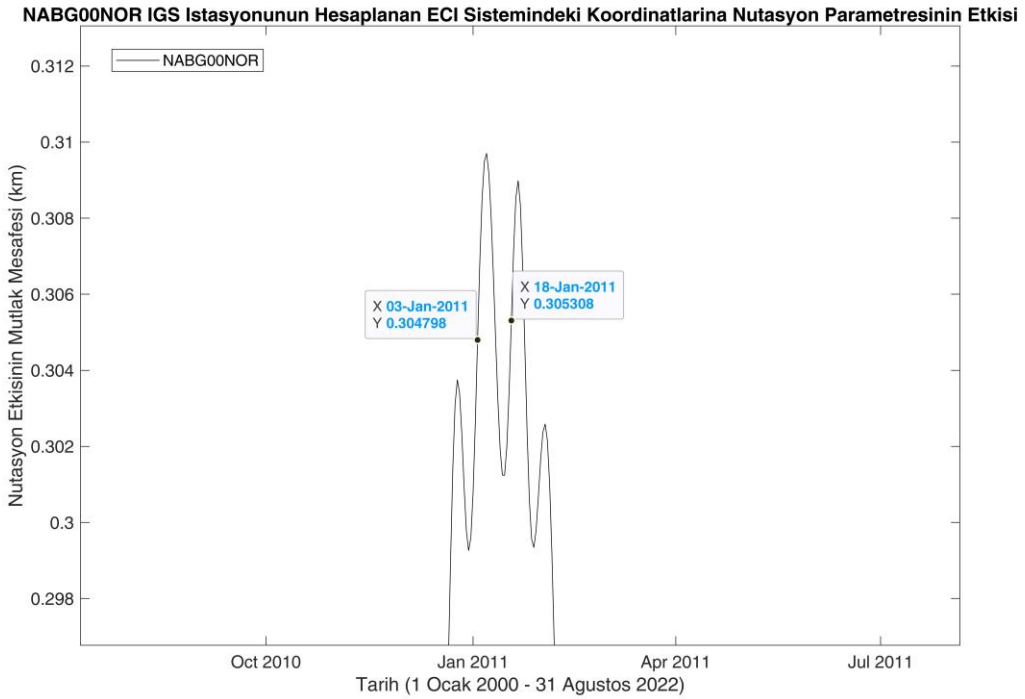
Şekil 5.21. NABG00NOR IGS istasyonunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına nutasyon parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.



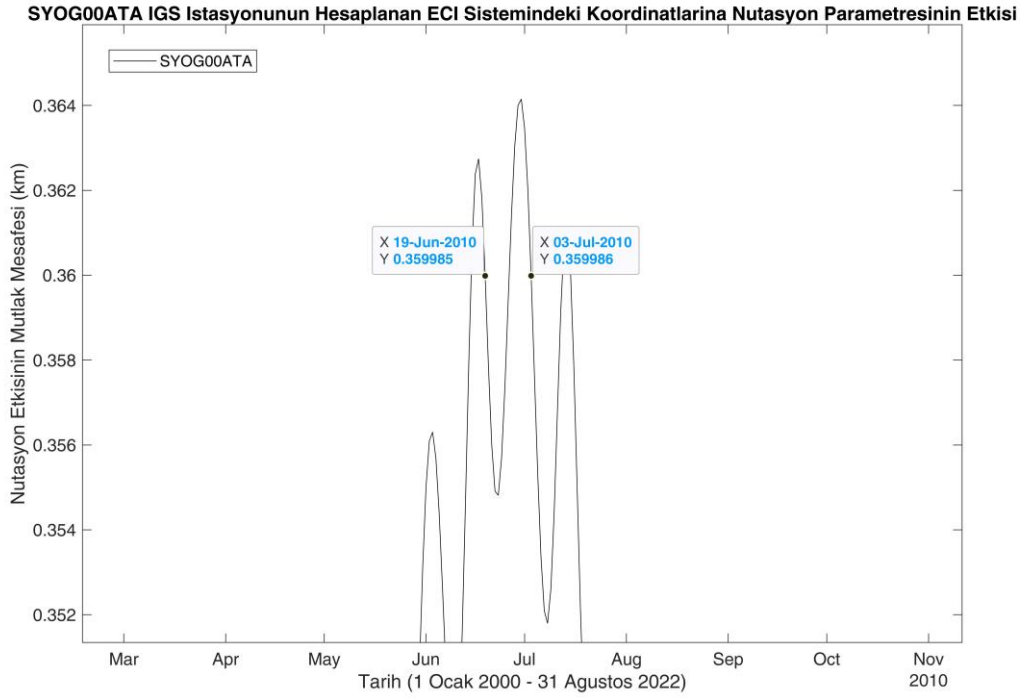
Şekil. 5.22. SYOG00ATA IGS istasyonunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına nutasyon parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.



Şekil 5.23. ECEF sisteminde belirlenen sabit nokta için hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlara nutasyon parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisinin 1 aydan kısa süreli periyodu.

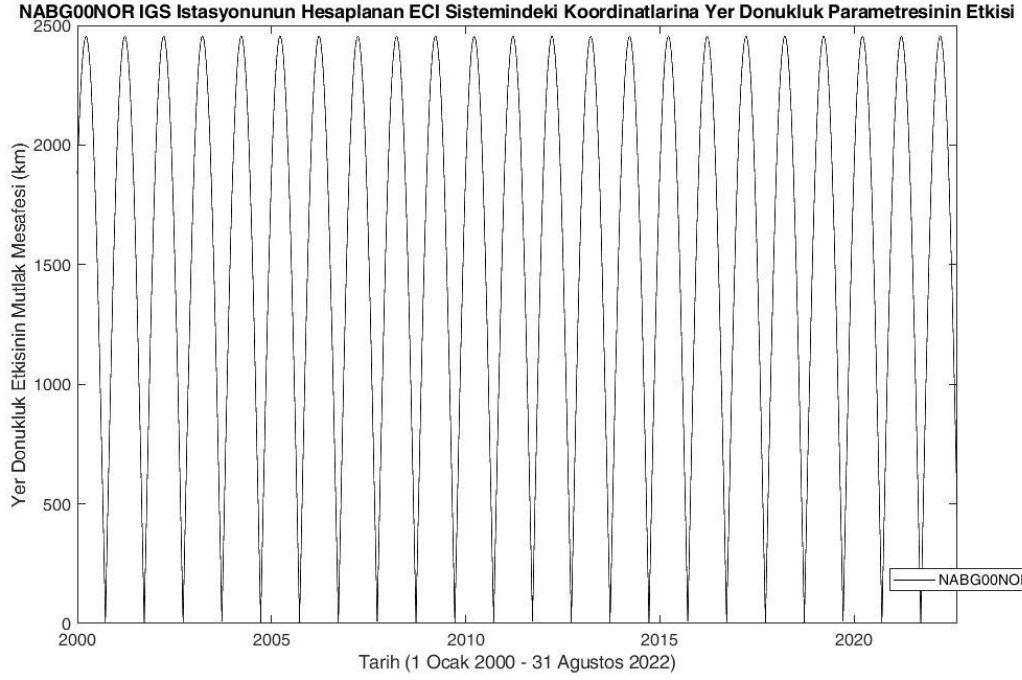


Şekil 5.24. NABG00NOR IGS istasyonunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına nutasyon parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisinin 1 aydan kısa süreli periyodu.

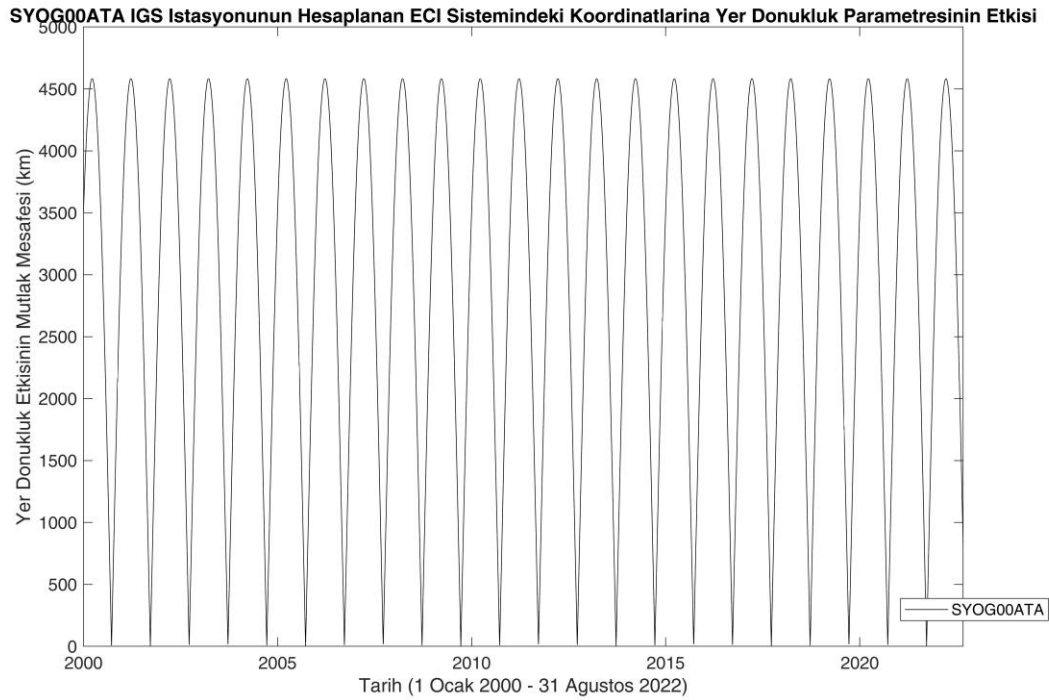


Şekil 5.25. SYOG00ATA IGS istasyonunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına nutasyon parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisinin 1 aydan kısa süreli periyodu.

Yer dönüklük parametresinin mutlak etkisi incelendiğinde NABG00NOR ve SYOG00ATA IGS istasyonlarının kartezyen koordinat sisteminin XY düzlemine izdüşümünün başlangıç noktasına olan uzaklığının ($\sqrt{X^2 + Y^2}$) yaklaşık olarak (bir kilometreden daha az) iki katı oranında dönüşüme maksimum mutlak etki ettiği gözlemlenmiştir. ECEF ve ECI koordinat sistemlerinin X ve Y eksenlerinin neredeyse çakışık olduğu durumlarda ($GAST \cong 0^\circ$) etkinin minimum olduğu 0'a yakın değerler elde edilmektedir. 1 Ocak 2000 ila 31 Ağustos 2022 tarihleri arasındaki yer dönüklük parametresinin NABG00NOR ve SYOG00ATA IGS istasyonlarının hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına mutlak etkisi sırasıyla Şekil 5.26 ve 5.27'de sunulmuştur.

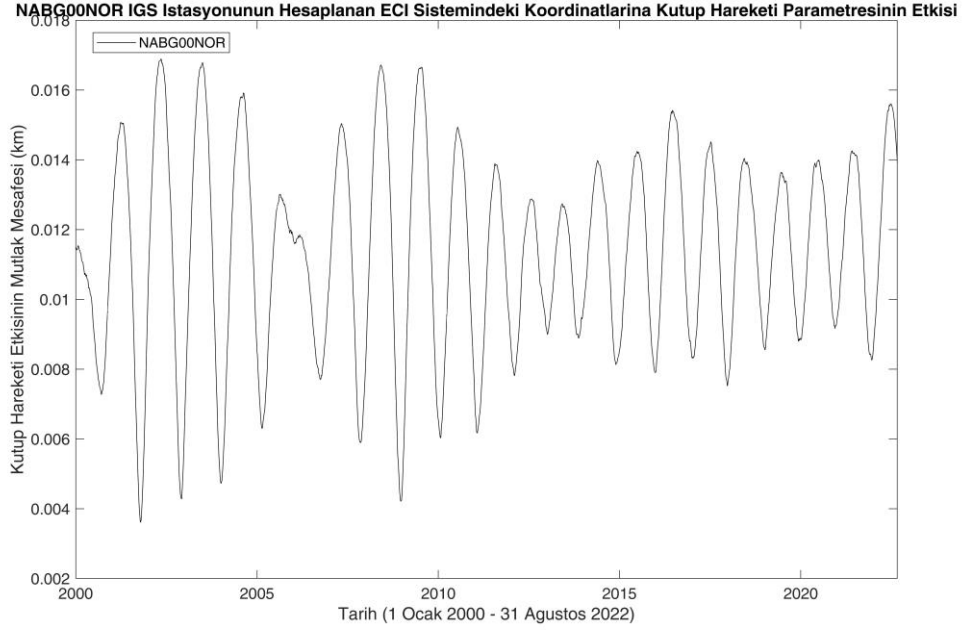


Şekil 5.26. ECEF sisteminde belirlenen sabit nokta için hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlara yer dönüklük parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.

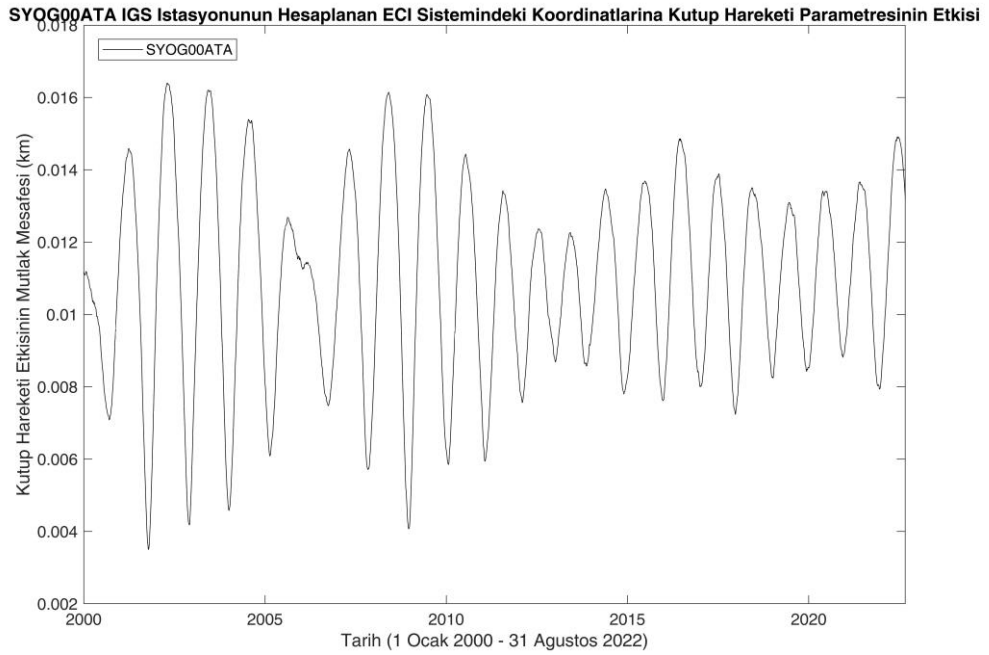


Şekil 5.27. SYOG00ATA IGS istasyonunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına yer dönüklük parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.

ECEF sisteminde sabit bir noktanın hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına kutup hareketi parametresinin mutlak etkisi diğer parametrelere göre en az etkiye sahip olan parametredir. Şekil 5.28 ve 5.29’da sırasıyla NABG00NOR ve SYOG00ATA IGS istasyonlarının hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına kutup hareketi parametresinin mutlak etkisi sunulmuştur.



Şekil 5.28. NABG00NOR IGS istasyonunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına kutup hareketi parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.



Şekil 5.29. SYOG00ATA IGS istasyonunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına kutup hareketi parametresinin X,Y ve Z eksenlerine bileşke etkisi.

Sayısal uygulama sonucunda parametrelerin dönüşüme mutlak etkisi büyükten küçüğe doğru; yer dönüklük, presesyon, nutasyon ve kutup hareketi şeklinde sıralanmaktadır. Dönüşümde kullanılan parametreler her iki koordinat sisteminin eksenlerinin yönlendirmesini açısal olarak etkilediğinden GPS uyduları için gerçekleştirilen dönüşümlerde parametrelerin etkisi IGS istasyonları için gerçekleştirilen dönüşüme göre daha büyük değerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Çizelge 5.10, 5.11, 5.12 ve 5.13'te GPS SVN – 43 uydusu, NABG00NOR ve SYOG00ATA IGS istasyonlarının dönüşüm sonucunda elde edilen ECI sistemindeki koordinatlarına sırasıyla; presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi parametrelerinin mutlak etkileri sunulmuştur.

Çizelge 5.10. Presesyon parametresinin çalışmada incelenen uydu ve istasyonlara mutlak etkisi.

Uydu veya İstasyon	Maksimum Etki (km)	Minimum Etki (km)
GPS – SVN43	146.8864501	0.006848267
NABG00NOR	19.32062926	0.001186696
SYOG00ATA	24.35242608	0.00067104

Çizelge 5.11. Nutasyon parametresinin çalışmada incelenen uydu ve istasyonlara mutlak etkisi.

Uydu ve İstasyon	Maksimum Etki (km)	Minimum Etki (km)
GPS – SVN43	2.421442774	0.014412656
NABG00NOR	0.337156627	0.109082569
SYOG00ATA	0.401996469	0.020598862

Çizelge 5.12. Yer dönüklük parametresinin çalışmada incelenen uydu ve istasyonlara mutlak etkisi.

Uydu ve İstasyon	Maksimum Etki (km)	Minimum Etki (km)
GPS – SVN43	53183.04102	2.797935136
NABG00NOR	2454.403289	0.134086017
SYOG00ATA	4583.408861	0.250398517

Çizelge 5.13. Kutup hareketi parametresinin çalışmada incelenen uydu ve istasyonlara mutlak etkisi.

Uydu ve İstasyon	Maksimum Etki (km)	Minimum Etki (km)
GPS – SVN43	0.071909654	0.00063933
NABG00NOR	0.016892161	0.0036104
SYOG00ATA	0.016407369	0.003497833

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketinin ECI – ECEF dönüşümüne etkisi incelenmiştir. Bu amaçla Eci2ecef isimli Visual Basic tabanlı bir uygulama geliştirilmiştir. Geliştirilen bu Eci2ecef programı sayesinde kısa sürede çok sayıda epokta ECI ve ECEF koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm gerçekleştirilebilmektedir. Eci2ecef programında dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için IAU 1976 presesyon, IAU 1980 nutasyon modelleri ve IERS EOP 14 C04 serisi kullanılmıştır. Ayrıca programda presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi parametrelerinin her biri birim matris alınarak dönüşüm gerçekleştirilebilmektedir. Eci2ecef programının bu avantajı sayesinde, dönüşümde kullanılan parametrelerin zamana bağlı olarak dönüşüme etkisi incelenebilmektedir.

Çalışma kapsamında dönüşüm parametrelerinin, GNSS uygulamalarında kullanılan uydular ve yeryüzündeki sabit noktalara etkisini araştırmak için SVN-43 ve SVN – 63 numaralı GPS uydularının konumları ile NABG00NOR ve SYOG00ATA isimli IGS istasyonlarının konumları kullanılmıştır. İncelemede kullanılan uydu ve istasyon konumlarının ECEF koordinat sistemindeki koordinatları ECI koordinat sistemine 1 Ocak 2000 ila 31 Ağustos 2022 tarihleri arasındaki günlere ait epoklarda dönüştürülmüştür. Uyduların ve istasyonların ECEF sistemindeki koordinatları dönüşümde kullanılan presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi parametresi için her biri ayrı ayrı birim matris alınarak ECI sisteminde dört farklı koordinatlar elde edilmiştir. Birim matris alınarak gerçekleştirilen dönüşümlerin, dönüşümde kullanılan dört parametrenin de dahil edilerek gerçekleştirilen dönüşüme farkları alınarak; presesyon, nutasyon, yer dönüklük ve kutup hareketi parametrelerinin iki sistem arasındaki dönüşümde koordinatlara etkisi her bir epok için belirlenmiştir.

GPS uydularının ECI sisteminde hesaplanan koordinatlarına presesyon parametresinin etkisi, başlangıç epoğundan uzaklaştıkça yarı çapı büyüyen halkalar şeklinde izlenmektedir. IGS istasyonları için presesyon parametresinin dönüşüme mutlak etkisi, çalışma için belirlenen zaman aralığında başlangıç epoğundan uzaklaştıkça büyüyen ve bu büyümeyi gerçekleştirirken kısa periyotlu dalga hareketleri oluşturan bir hareket olarak karşımıza çıkmaktadır. Üçüncü bölümde GPS matematiğinde kullanılan ECI koordinat sisteminin (MCRS), J2000 epoğunda ortalama ekvator ve ekinoks ile

çakışık olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple yaklaşık 26000 yıllık presesyon hareketini tanımlayan IAU 1976 presesyon modelinde kullanılan açısız büyüklükler başlangıç epogunda ki ilkbahar noktasını ve yer dönme eksenini son epokta ki ilkbahar noktasına ve yer dönme eksenine taşıyacağından, çalışma için belirlenen zaman aralığında presesyon hareketinin periyodunun yalnızca küçük bir zaman aralığı kullanılmış ve presesyon parametresinin etkisi başlangıç epogundan uzaklaşıldıkça büyüyen bir etki olarak karşımıza çıkmaktadır. GPS uydularına ve IGS istasyonlarına presesyon hareketinin tam periyodu için bir tahmin gerçekleştirilecek olursa, Şekil 5.1'deki GPS – SVN-43 uydusunun hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına presesyon parametresinin etkisi başlangıç epogundan yaklaşık 13000 yıl sonraya kadar yarı çapı büyüyen halkalar olarak, yaklaşık 13000 yıl ile periyodunu tamamladığı 26000 yıl arasında ise yarı çapı küçülen halkalar olarak ve 26000 yılın sonunda dönüşüme etkisi 0 olacak şekilde bir etki ile gözlemleneceği öngörülmektedir. Şekil 5.15 ve 5.16'da ise IGS NABG00NOR ve SYOG00ATA istasyonları için yaklaşık 13000 yıl sonraya kadar mutlak etkisi büyüyen, daha sonra yaklaşık 13000 ila 26000 yıl arasında ise mutlak etkisi azalan bir hareket olarak, 26000 yılın sonunda ise etkisi 0 olacak bir hareket ile gözlemlenecektir. Presesyon parametresinin mutlak etkisini incelemek amacıyla elde edilen grafiklerde luni-solar presesyon ve gezegensel presesyonun ayrımını yapmak mümkündür. Gezegensel presesyon, Güneş sistemindeki gezegenlerin çekim etkileri sonucunda, ekliptik düzlemdeki hareket olarak tanımlandığından, ECI koordinat sisteminin yalnızca X ve Y eksenini etkilemesi beklenmektedir. Çünkü ECI koordinat sisteminde X eksenini ilkbahar noktasına göre ve Z eksenini yer dönme eksenine göre tanımlandığından ekliptik düzlemdeki hareketler X ve Y eksenini etkilerken Z eksenini etkilemeyecektir. Şekil 5.17, 5.18 ve 5.19'da ECEF sisteminde her bir eksen üzerinde belirlenen sabit noktalar için ECI sisteminde hesaplanan koordinatlarına presesyon parametresinin mutlak etkisi sunulmuştur. Luni-solar presesyon hareketinin dönüşüme etkisinin, bu tez çalışmasında belirlenen zaman aralığında doğrusal olarak artması beklenmektedir. Şekil 5.17'de Z eksenini üzerinde tanımlanan bir sabit nokta için presesyon parametresinin mutlak etkisi sunulduğundan bu grafikteki etki yalnızca luni-solar presesyon ile bağdaştırılacaktır. Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da X ve Y eksenleri üzerinde tanımlanan sabit noktalar için hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlara presesyon parametresinin mutlak etkisi sunulduğundan bu grafiklerde luni-solar presesyon ve gezegensel presesyon etkileri görülecektir. Bu sebeple presesyon parametresinin, hesaplanan ECI sistemindeki

koordinatlara mutlak etkisi grafiklerinde oluşan dalga hareketleri gezegensel presesyon ile bağdaştırılmıştır.

Nutasyon hareketi daha çok Ay'ın çekim etkisi nedeniyle oluşan bir hareket olduğundan ve ekvatora uyguladığı periyodik torkta aylık değişimlere neden olduğundan presesyona göre oldukça düzensiz bir harekettir. Gerçekleştirilen sayısal uygulamada daha çok hareketin dönüşüme etkisi ve periyodu üzerinde durulmuştur. Nutasyon parametresi dönüşüm sonucunda elde edilen koordinatlara, presesyon parametresinden daha az kutup hareketinden daha fazla etki etmektedir. Yeryüzündeki sabit noktalar için hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlara nutasyon parametresinin mutlak etkisi grafikleri yardımıyla nutasyon hareketinin tez çalışması için belirlenen zaman aralığındaki periyotlarının gözlemlenmesi sağlanmıştır. Literatürde nutasyon hareketinin periyodunun 14 gün ila 18.6 yıl arasında değiştiği belirtilmektedir. Oluşturulan grafikler yardımıyla tanımlanan bu periyotların nasıl gerçekleştiğine bir yaklaşım sunulmuştur. Sayısal uygulama sonucunda elde edilen grafikler yorumlandığında nutasyon hareketinin uzun zaman aralıklarındaki periyodu gerçekleştirirken bu aralık içerisinde daha kısa periyotlu hareketlerde gerçekleşmektedir.

TCRS ve TTRS sistemleri anlık yer dönme eksenine göre tanımlandığından koordinat sistemlerinin X ve Y eksenlerinin çakıştırılabilmesi için yer dönüklük parametresi kullanılmaktadır. IGS istasyonlarının ECEF sistemindeki yayınlanan koordinatlarından hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlarına yer dönüklük parametresinin maksimum etkisi istasyonun konumunun X ve Y eksenlerine izdüşümünün başlangıç noktasına olan mesafesinin yaklaşık iki katı olarak gözlemlenmiştir. Bu durum beşinci bölümde detaylıca açıklanmış olup kısaca özetlenecek olursa TTRS sisteminin +X eksenini TCRS sisteminin -X eksenine ile çakışık olduğu durumda ($GAST \cong 180^\circ$) yer dönüklük parametresi dönüşüme maksimum etki ederken, TTRS sisteminin +X eksenini TCRS sisteminin +X eksenine ile çakışık olduğu durumda ($GAST \cong 0^\circ$) yer dönüklük parametresi dönüşüme minimum etki edecektir. Kutoğlu (2001)'de kutup hareketinin genliğinin 10 metreyi geçmeyeceği belirtilmiştir. Bu tanımlama ile IGS NABG00NOR ve SYOG00ATA istasyonları için hesaplanan ECI sistemindeki koordinatlara kutup hareketi parametresinin mutlak etkisi grafiklerinde aynı sonuçlara varılmıştır ve grafiklerde periyodik dalga hareketinin genliği 10 metreyi geçmemektedir.

KAYNAKLAR

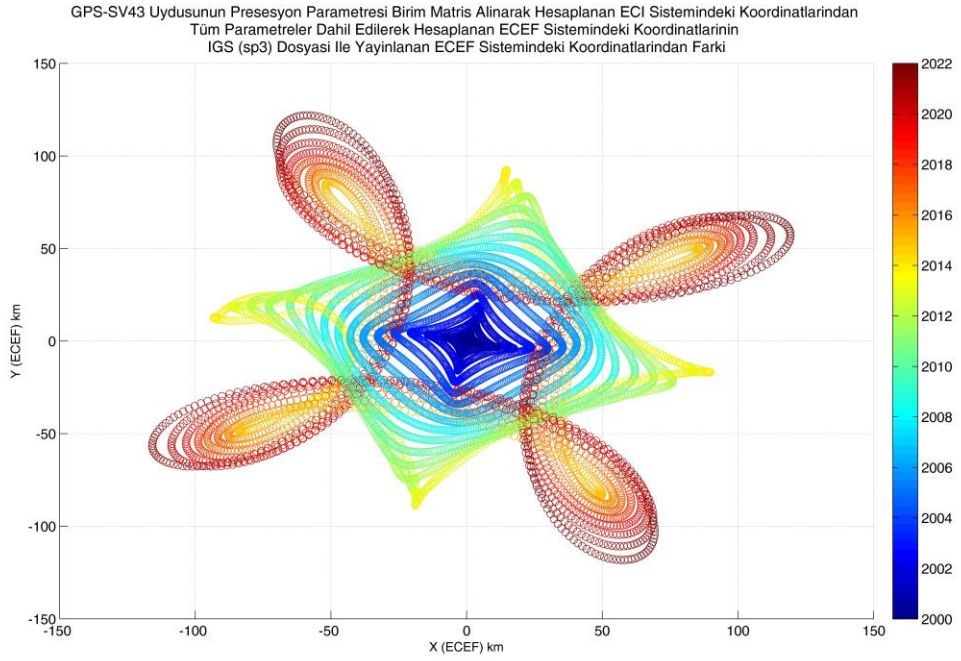
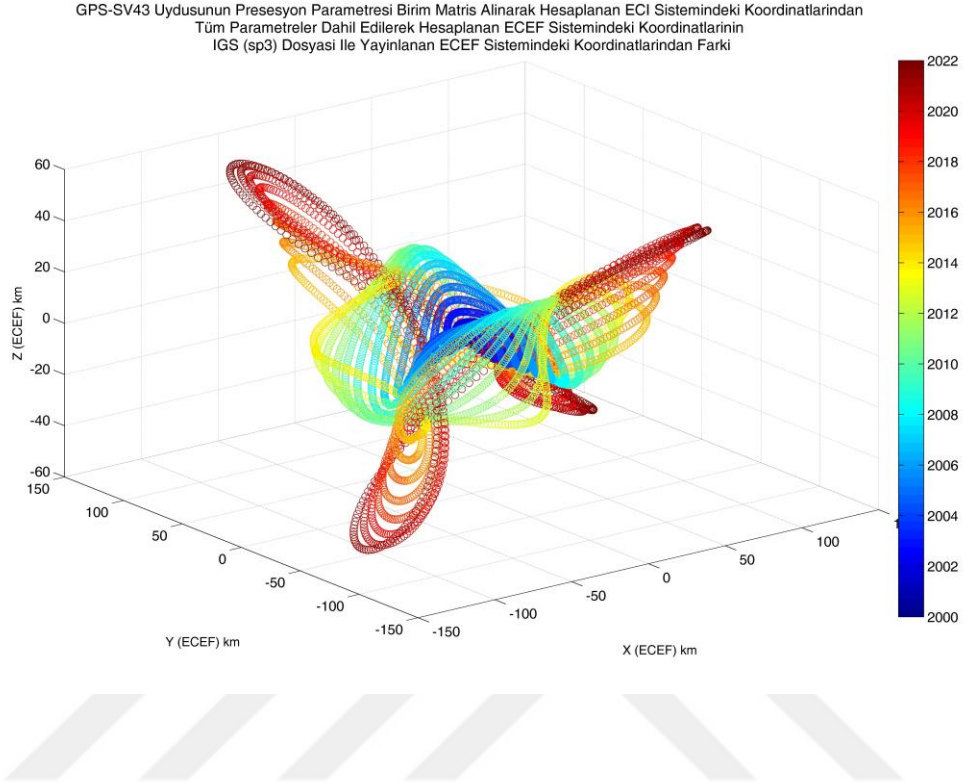
- Bradt, H., 2004, *Astronomy Methods: A Physical Approach to Astronomical Observations*, Cambridge University Press.
- Capitaine N., 1990, The Celestial Pole Coordinates, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 127-143.
- Capitaine, N., 2015, Overview, Formulation and Current Situation For Precession-Nutation, *Cambridge University Press*.
- Capitaine, N., Wallace, P. T. ve Chapront, J., 2003, Expressions for IAU 2000 Precession Quantities, *Astronomy and Astrophysics*.
- De Ruiter, A. H. J., Damaren, C. J., Forbes, J. R., 2012, *Spacecraft Dynamics and Control: An Introduction*, John Wiley and Sons, Ltd.
- Doğanalp, S., 2013, Gravite Alanı Belirleme Amaçlı Yakın Yer Uyduları İçin Duyarlı Yörünge Belirleme Teknikleri, Doktora, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 11- 18.
- Doğanalp, S. 2017. Uydu Jeodezisi Dersi Uygulaması (Yayımlanmadı).
- Duffet - Smith, P., Zwart, J., 2017, *Practical Astronomy with Your Calculator or Spreadsheet*, Cambridge University Press, Fourth Edition.
- Hilla, S., 2010, The Extended Standard Product 3 Orbit Format (Sp3-c), National Geodetic Survey, URL: <https://files.igs.org/pub/data/format/sp3c.txt>, [Ziyaret Tarihi: 11 Şubat 2023].
- Hofmann-Wellenhof, B. ve ark., 2008, GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more, *Springer Science & Business Media*, New York, 13-21.
- Jekeli, C., 2016, Geometric Reference Systems in Geodesy, *Division of Geodesy and Geospatial Science, School of Earth Sciences*, Ohio State University.
- Kahveci, M. ve Yıldız, F., 2022, GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri: Teori ve Uygulama, 11. basım, *Nobel Akademik Yayıncılık*, Ankara.
- Kahveci, M., Tuşat, E. ve Doğanalp, S., 2021, Jeodezik Koordinat Sistemleri: Teori – Uygulama, *Nobel Akademik Yayıncılık*, Ankara.
- Kaplan, E. D. ve Hegarty, C. J., 2005, *Understanding GPS: Principles and Applications*, Artech House, Norwood MA, Second Edition, 26-34.

- Kartunnen, H., Kröger, P., Heikki, O., Poutanen, M., Donner, K., H., 2007, *Fundamental Astronomy, Springer Berlin Heidelberg New York*, Fifth Edition.
- Krakiwsky, E. J. ve Wells, D. E., 1971, *Coordinate Systems in Geodesy. Department of Surveying Engineering Lecture Notes, No.16, University of New Brunswick, Fredericton.*
- Kryzek, R., Skorupa, B., 2015, *The Influence of Application a Simplified Transformation Model Between Reference Frames ECEF and ECI onto Prediction Accuracy of Position and Velocity of GLONASS Satellites, Geodesy and Geoinformatics*, 19-27.
- Kutoğlu, Ş. H., 2001, *GPS Ağlarının Ülke Nirengi Ağlarına Entegrasyonu, Doktora, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- Lieske, J. H., 1979, *Precession matrix Based on IAU 1976 System of Astronomical Constants, Astronomy and Astrophysics*, vol. 73, no.3, Pasadena CA, 282-284
- Lieske, J. H., Lederle, T., Fricke, T. ve Morando, B., 1977, *Expressions for the Precession Quantities Based upon the IAU 1976 System of Astronomical Constants, Astronomy and Astrophysics*, vol. 58, 1-16.
- Manning, J. ve Steed, J., 2001, *Positional Accuracy, A Spatial Data Foundation, International Symposium on Spatial Data Infrastructure (SDI)*, 19-20 November 2001, University of Melbourne, Australia.
- McCarthy, D. D., 1996, *IERS Conventions (1992), IERS Technical Note 21, Observatoire de Paris, Paris*, 20-39.
- Meeus, J., 1998, *Astronomical Algorithms, Willman - Bell, Inc. Second Edition.*
- Seeber, G., 2003, *Satellite Geodesy, Walter de Gruyter, Berlin – New York*, 10-28.
- Seidelmann, P. K. 1982, *IAU 1980 Theory of Nutation – The Final Report of the IAU Working Group on Nutation, Celestial Mechanics*, vol. 27, 79-106.
- Seidelmann, P. K., 1992, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac, University Science Books, Washington D.C.*
- Smart, W. M., 1949, *Textbook on Spherical Astronomy, Cambridge University Press.*
- Soler, T. ve Hothem, L., 1988, *Coordinate Systems Used In Geodesy: Basic Definition and Concepts, Journal of Surveying Engineering.*

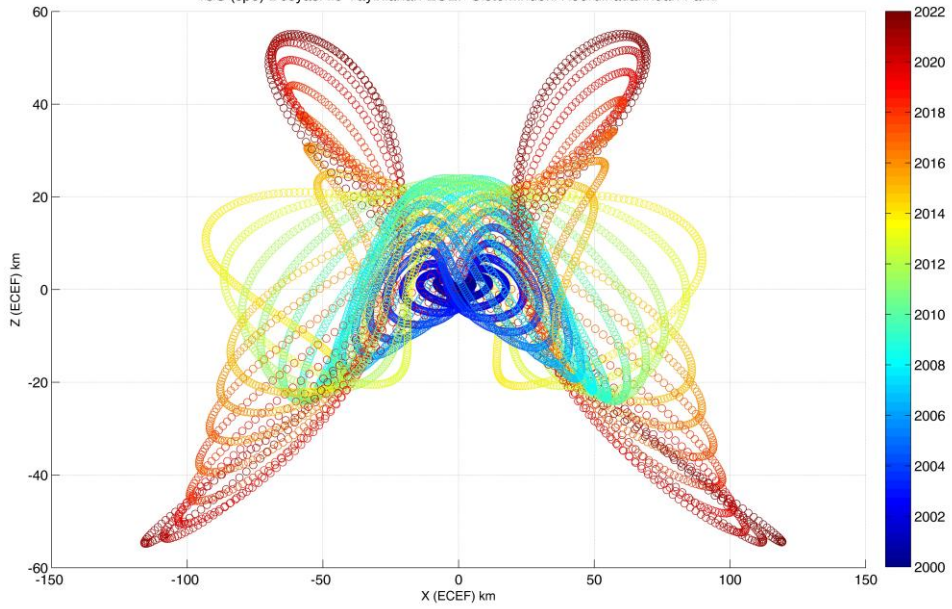
- Subirana, J. S., Zornoza, J. M. J., Hernandez - Pajares, M., 2011, Sidereal Time, *European Space Agency*,
URL:https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Sidereal_Time [Ziyaret Tarihi: 03.04.2023].
- Subirana, J. S., Zornoza, J. J. ve Hernandez- Pajares, M., 2011, Transformation Between Celestial and Terrestrial Frames, *European Space Agency*,
URL:https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transformation_between_Celestial_and_Terrestrial_Frames [Ziyaret Tarihi: 11 Şubat 2023].
- Subirana, J.S., Zornoza, J. J. ve Hernandez-Pajares, M., 2013, GNSS data Processing Volume 1: Fundamentals and Algorithms, *ESA Communications ESTEC, PO Box*, 39-46
- Thomson, D. B., 1981, Introduction to Geodetic Astronomy, *Department of Geodesy and Geomatics Engineering University of New Brunswick Lecture Notes*,
- Tuşat, E., 2003, Büyük Ölçekli Harita Yapımında Jeodezik Amaçlı GPS Ölçü ve Hesap Standartlarının Araştırılması, Doktora, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 5-9.
URL-1 <https://www.navcen.uscg.gov/gps-constellation>, [Ziyaret Tarihi: 11 Şubat 2023].
URL-2 <https://cddis.nasa.gov/>, [Ziyaret Tarihi: 11 Şubat 2023].
URL – 3 <https://igs.org/products/#about>, [Ziyaret Tarihi: 11 Şubat 2023].
URL-4 <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>, [Ziyaret Tarihi: 11 Şubat 2023].
URL-5 <https://astroconverter.com/>, [Ziyaret Tarihi: 11 Şubat 2023].
URL-6 <https://www.iausofa.org/>, [Ziyaret Tarihi: 11 Şubat 2023].
URL-7 https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_GPS_satellites, [Ziyaret Tarihi: 11 Şubat 2023] .
URL-8 <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>, [Ziyaret Tarihi: 14 Şubat 2023].
Uzel, T. ve Eren, K., 1995, GPS Ölçmeleri, *Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası*, İstanbul .
Vallado, D. A., 2013, Fundamentals of Astrodynamics and Applications, Space Technology Library, *Microcosm Press*, Hawthorne, CA, Fourth Edition, 129-237.
Xu, G. ve Xu, Y., 2016, GPS Theory, Algorithms and Applications, *Springer – Verlag*, Berlin Heidelberg, Third Edition, 17-36.

EKLER

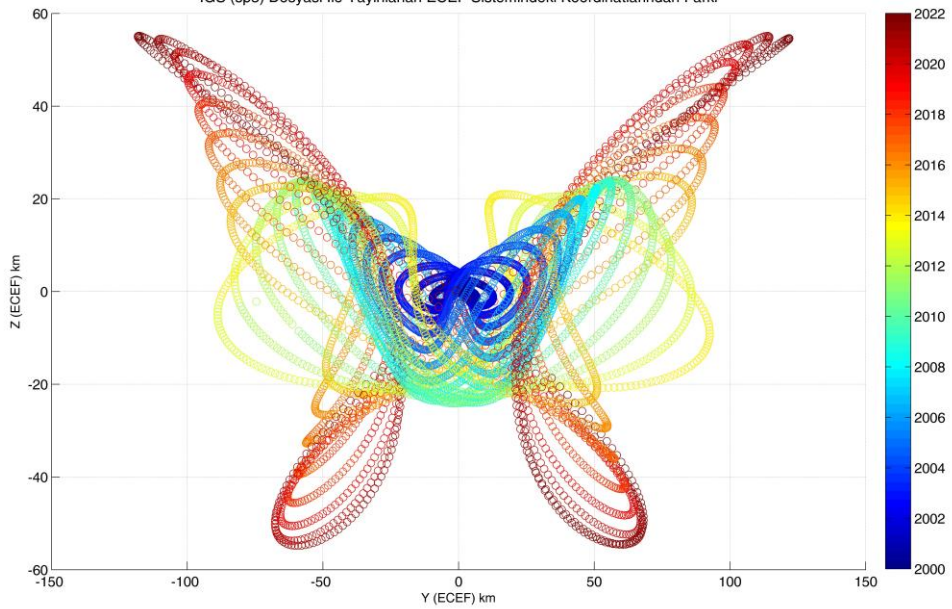
EK – 1 Presesyon Parametresinin, GPS SVN – 43 Uydusunun ECEF Koordinat Sistemindeki Koordinatlarına Etkisi



GPS-SV43 Uydusunun Presesyon Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarindan
Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarinin
IGS (sp3) Dosyasi Ile Yayinlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarindan Farki

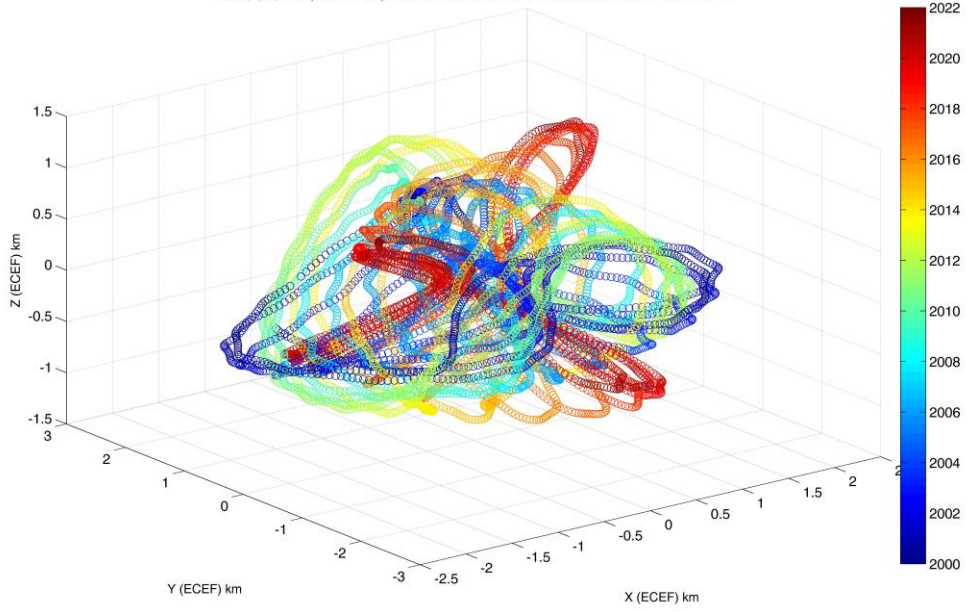


GPS-SV43 Uydusunun Presesyon Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarindan
Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarinin
IGS (sp3) Dosyasi Ile Yayinlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarindan Farki

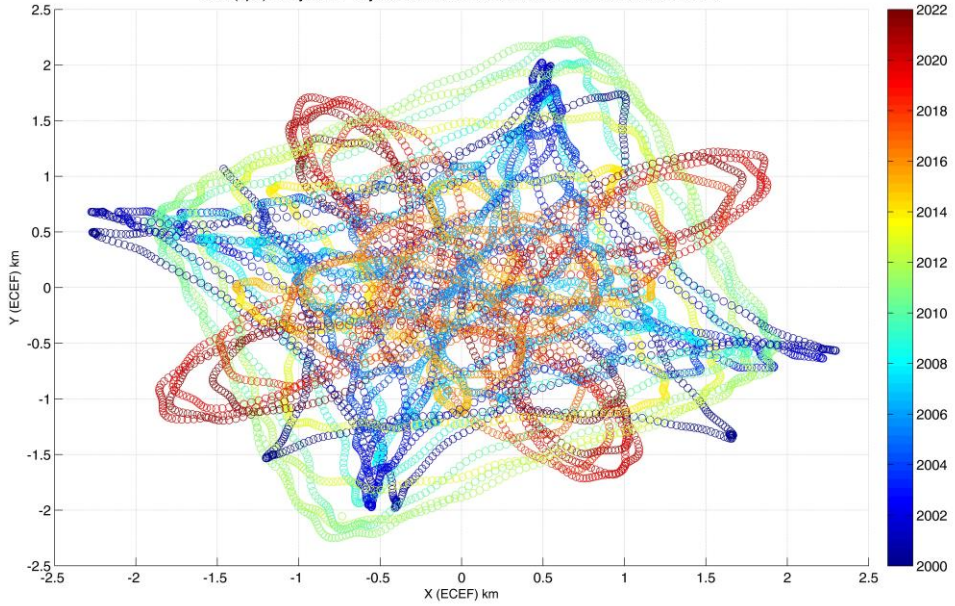


EK – 2 Nutasyon Parametresinin, GPS SVN – 43 Uydusunun ECEF Koordinat Sistemindeki Koordinatlarına Etkisi

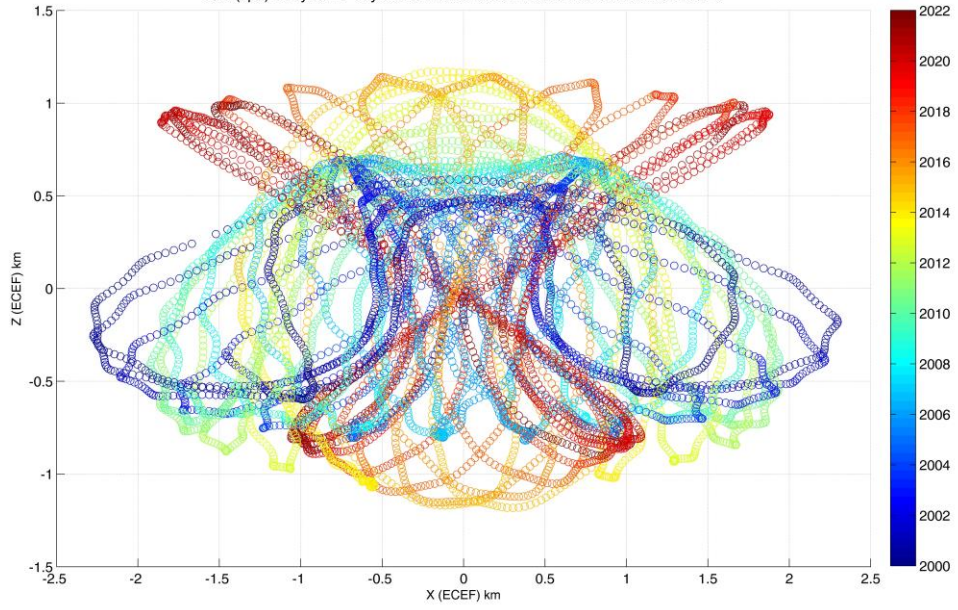
GPS-SV43 Uydusunun Nutasyon Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı



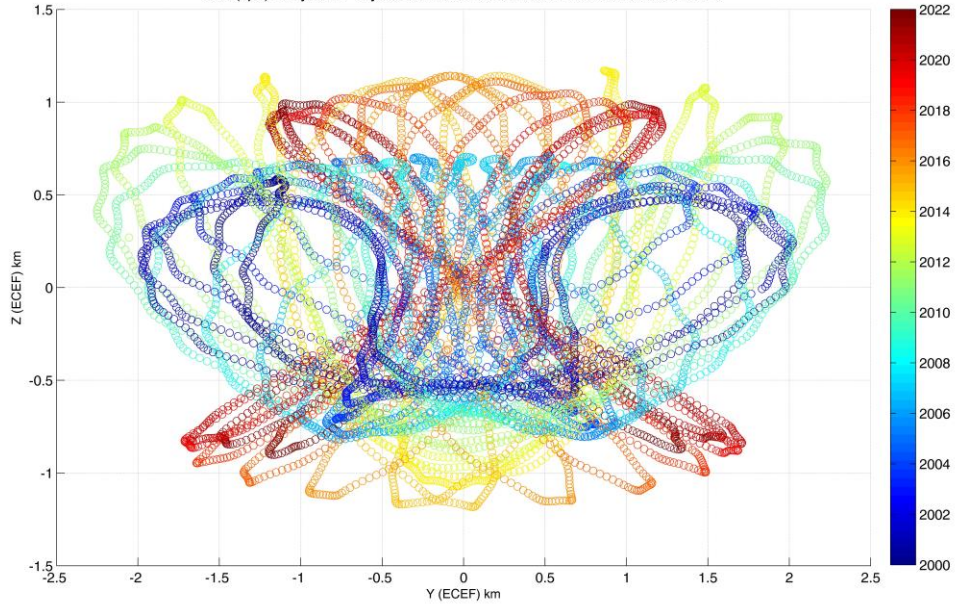
GPS-SV43 Uydusunun Nutasyon Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı



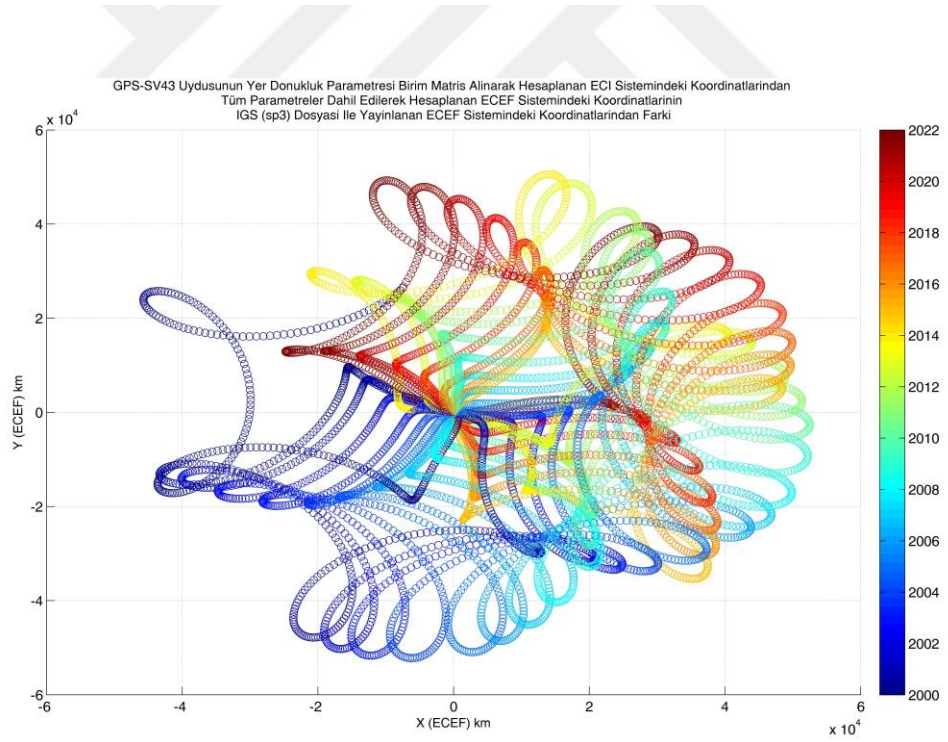
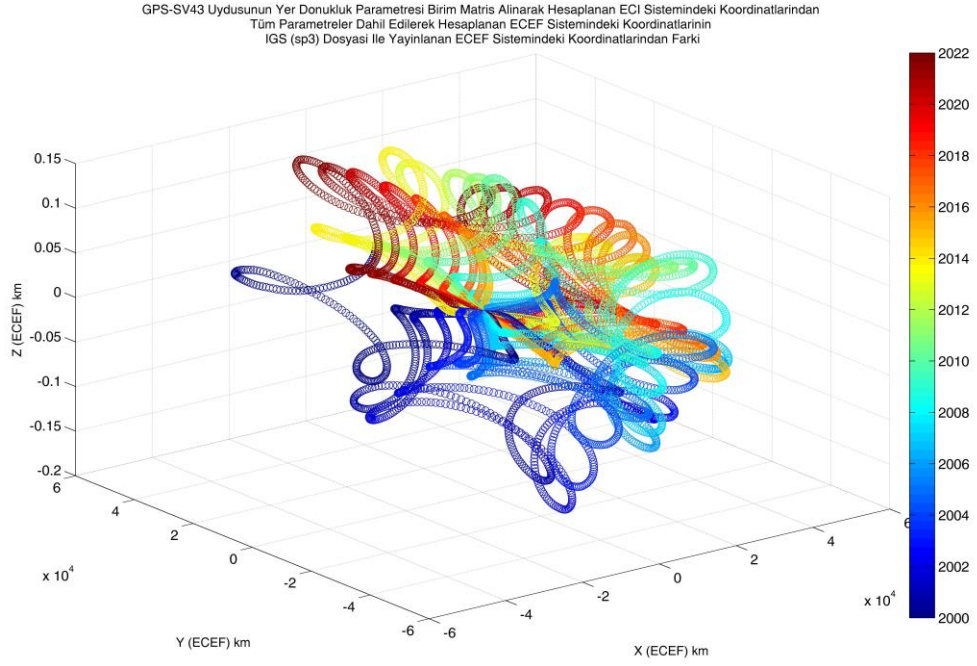
GPS-SV43 Uydusunun Nutasyon Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarindan
Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarinin
IGS (sp3) Dosyasi Ile Yayinlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarindan Farki

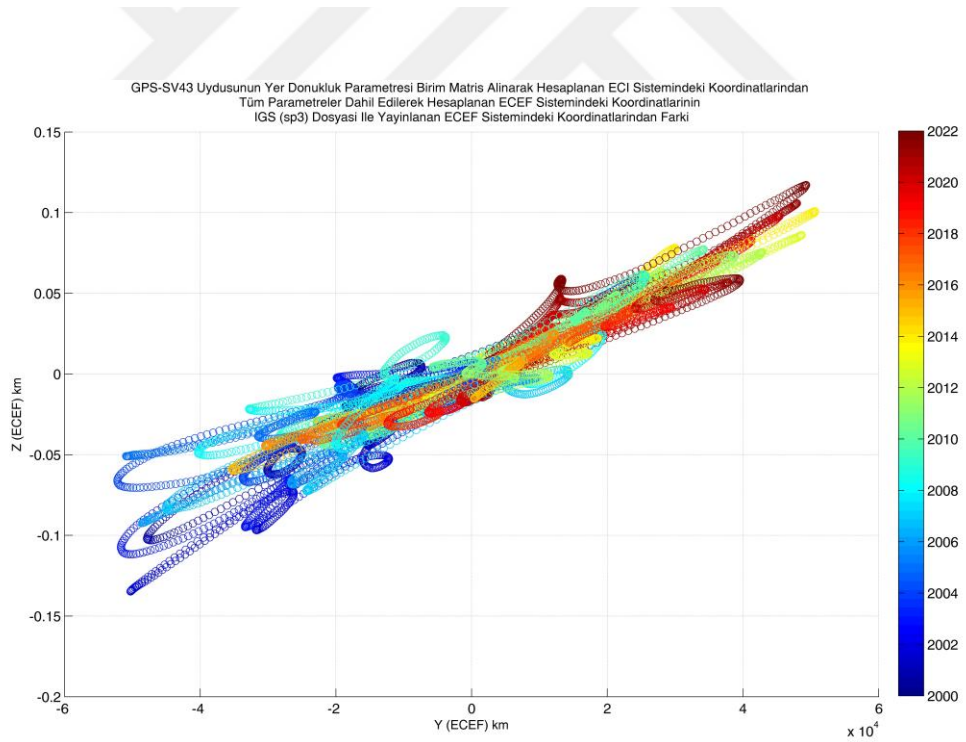
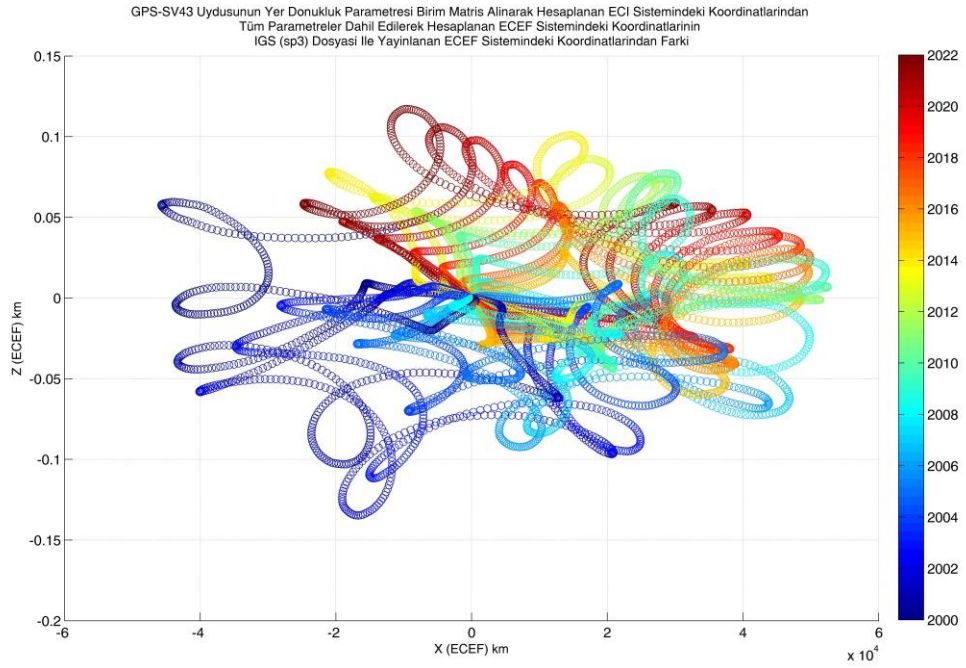


GPS-SV43 Uydusunun Nutasyon Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarindan
Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarinin
IGS (sp3) Dosyasi Ile Yayinlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarindan Farki



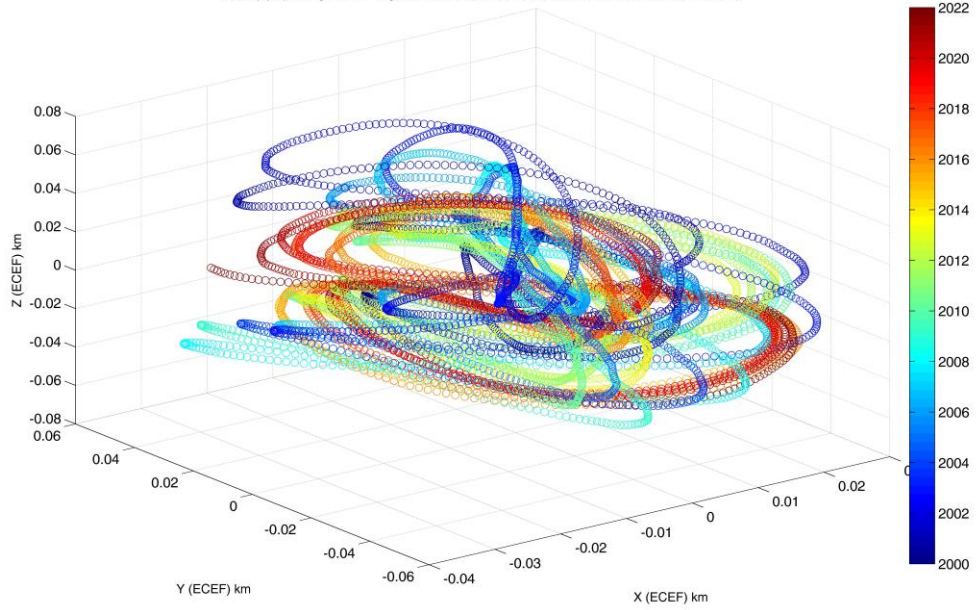
EK – 3 Yer Dönüklük Parametresinin, GPS SVN – 43 Uydusunun ECEF Koordinat Sistemindeki Koordinatlarına Etkisi



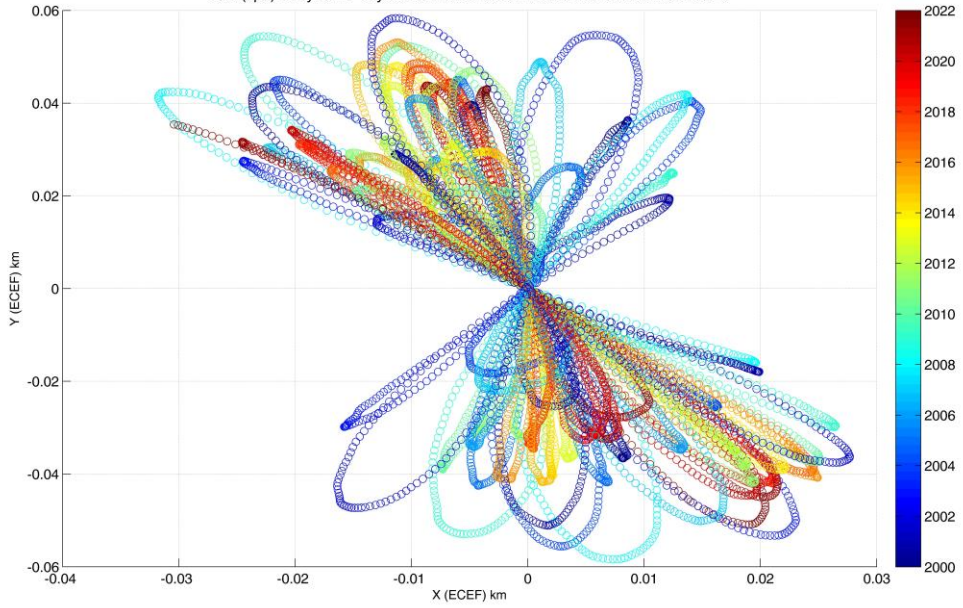


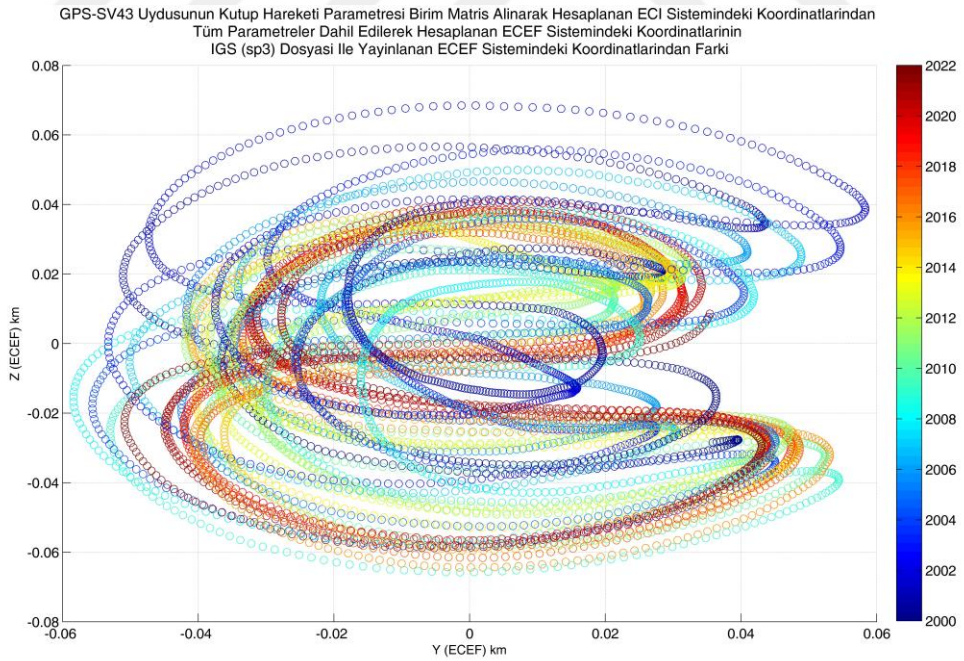
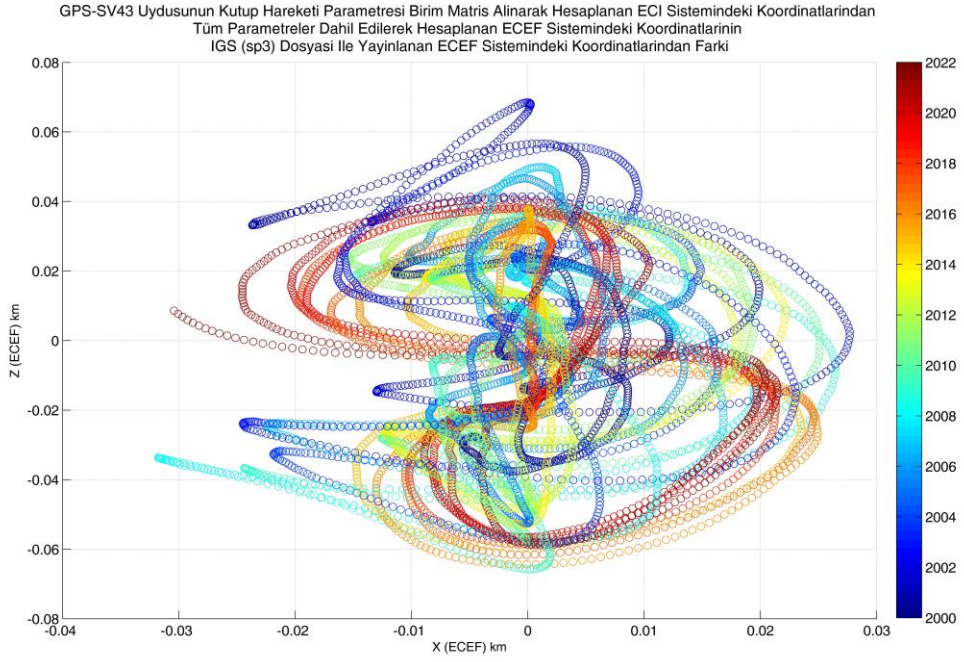
EK – 4 Kutup Hareketi Parametresinin, GPS SVN – 43 Uydusunun ECEF Koordinat Sistemindeki Koordinatlarına Etkisi

GPS-SV43 Uydusunun Kutup Hareketi Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı



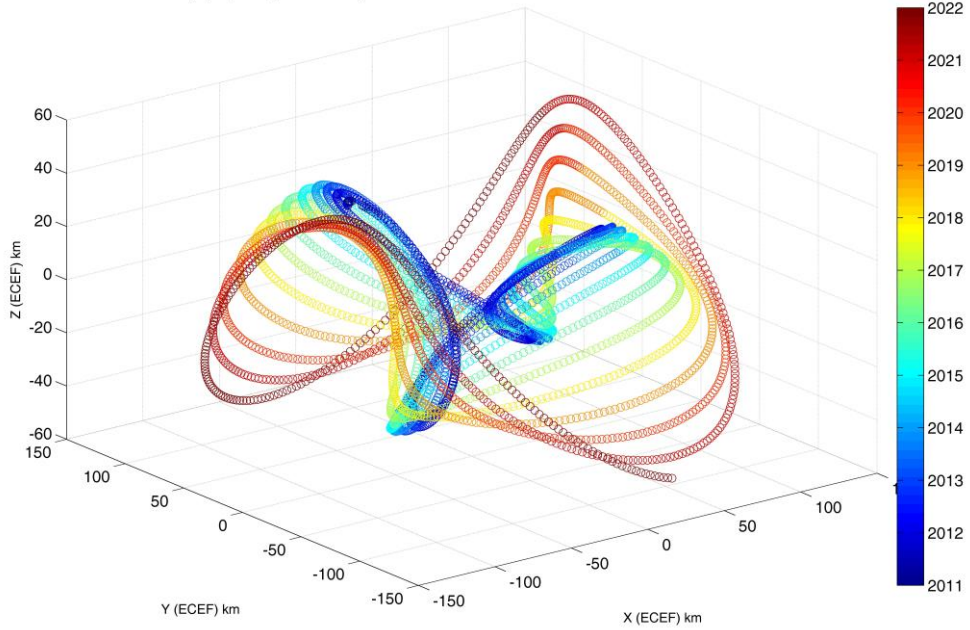
GPS-SV43 Uydusunun Kutup Hareketi Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı



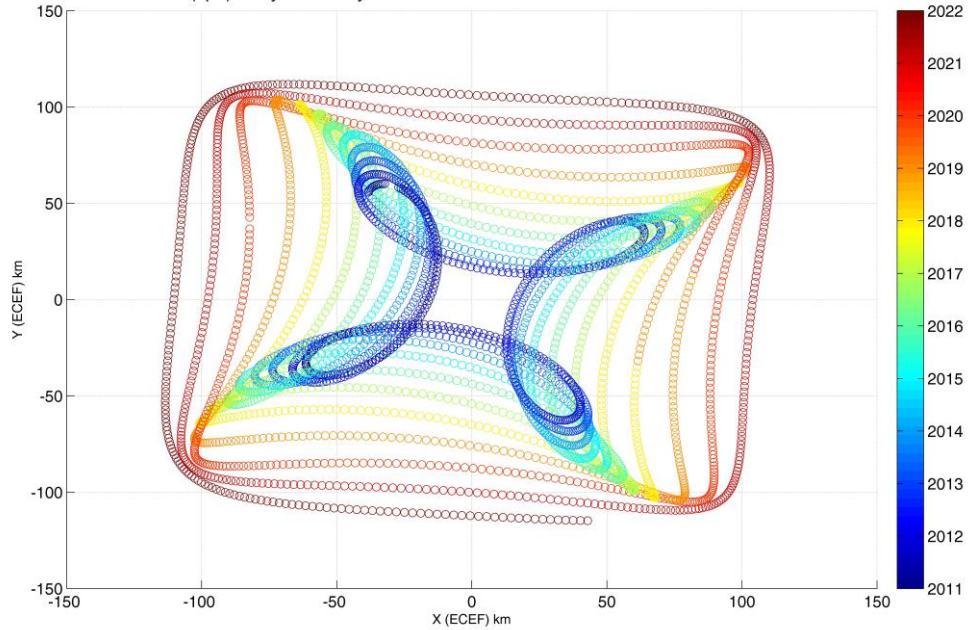


EK – 5 Presesyon Parametresinin, GPS SVN – 63 Uydusunun ECEF Koordinat Sistemindeki Koordinatlarına Etkisi

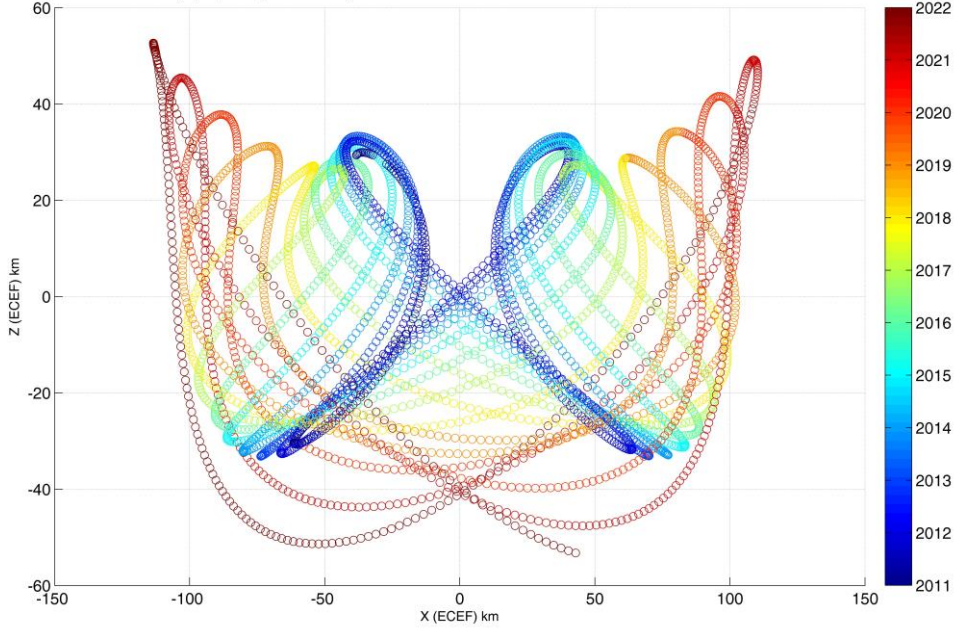
GPS-SV63 Uydusunun Presesyon Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı



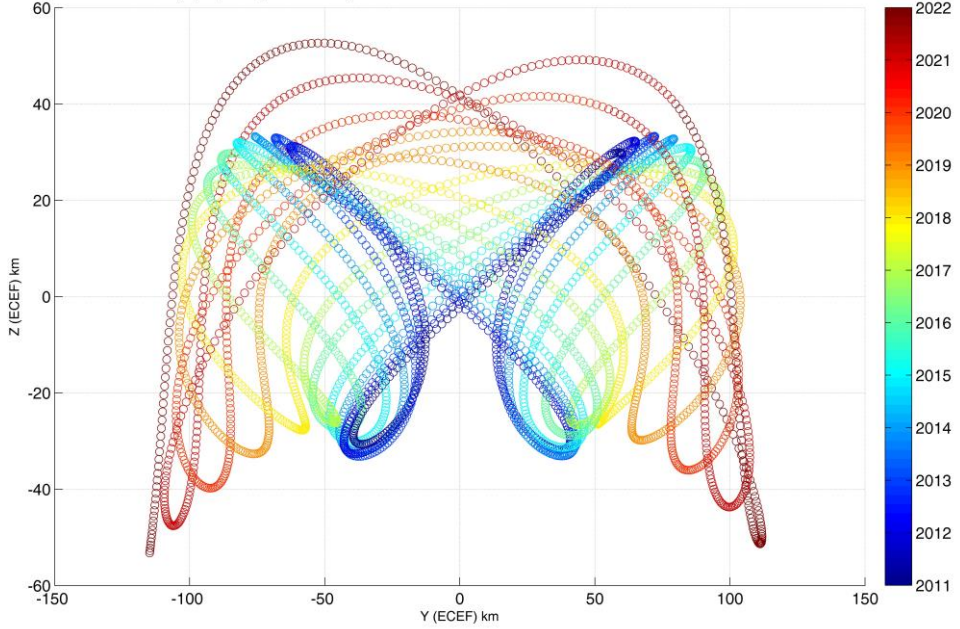
GPS-SV63 Uydusunun Presesyon Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı



GPS-SV63 Uydusunun Presesyon Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farki

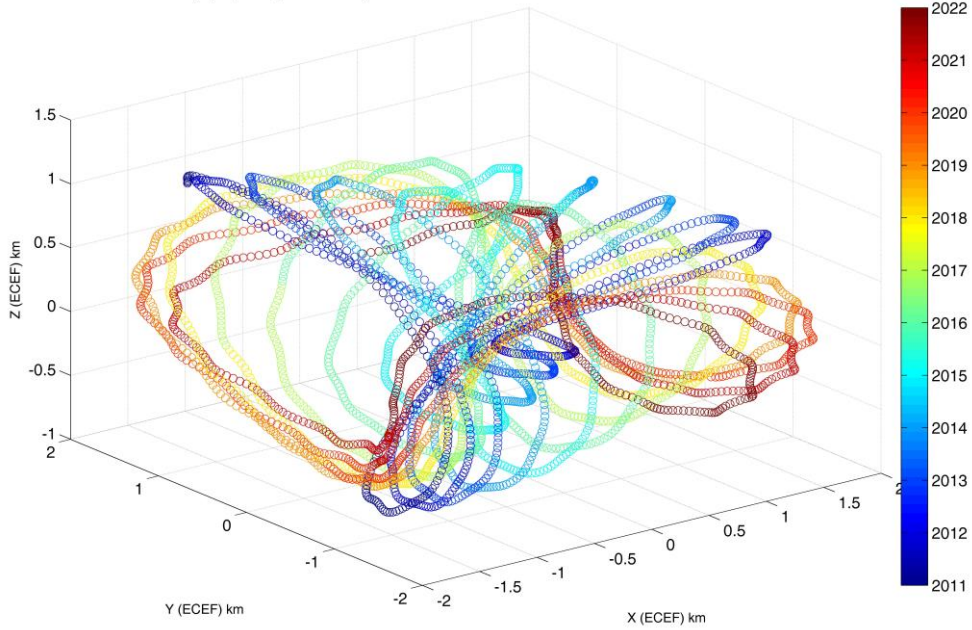


GPS-SV63 Uydusunun Presesyon Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farki

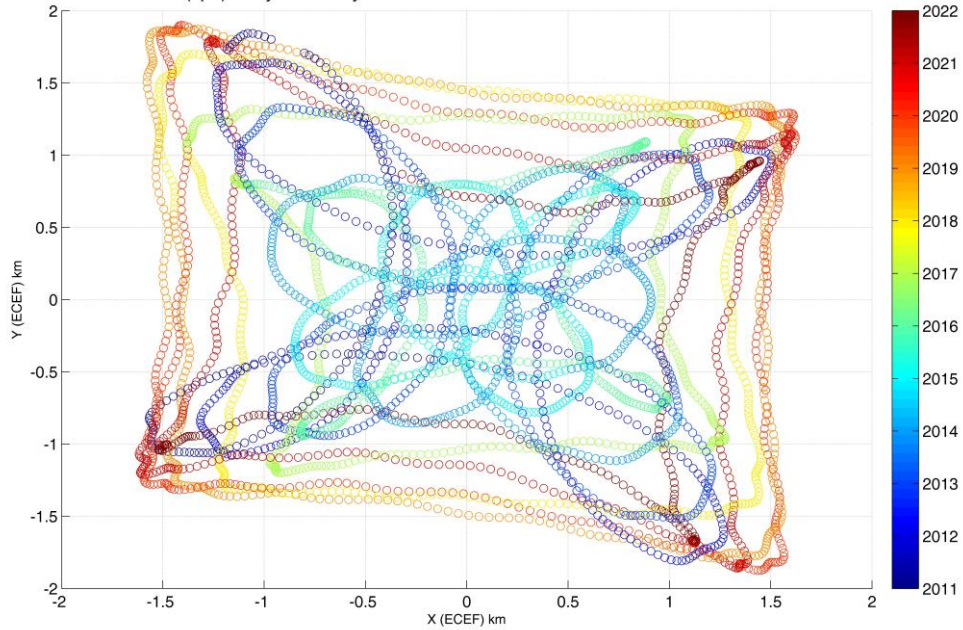


EK – 6 Nutasyon Parametresinin, GPS SVN – 63 Uydusunun ECEF Koordinat Sistemindeki Koordinatlarına Etkisi

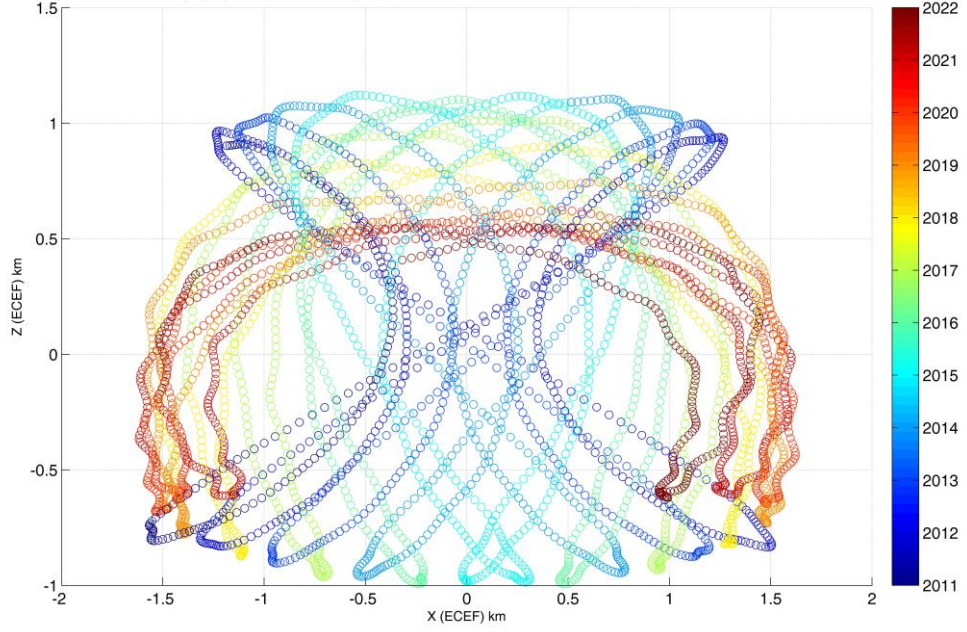
GPS-SV63 Uydusunun Nutasyon Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı



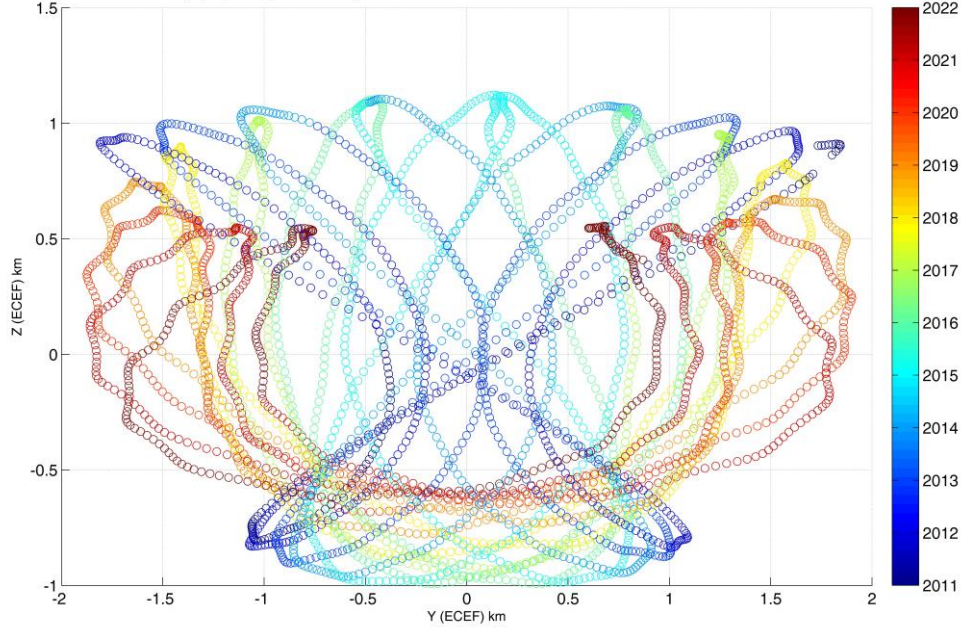
GPS-SV63 Uydusunun Nutasyon Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı



GPS-SV63 Uydusunun Nutasyon Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından
Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının
IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı

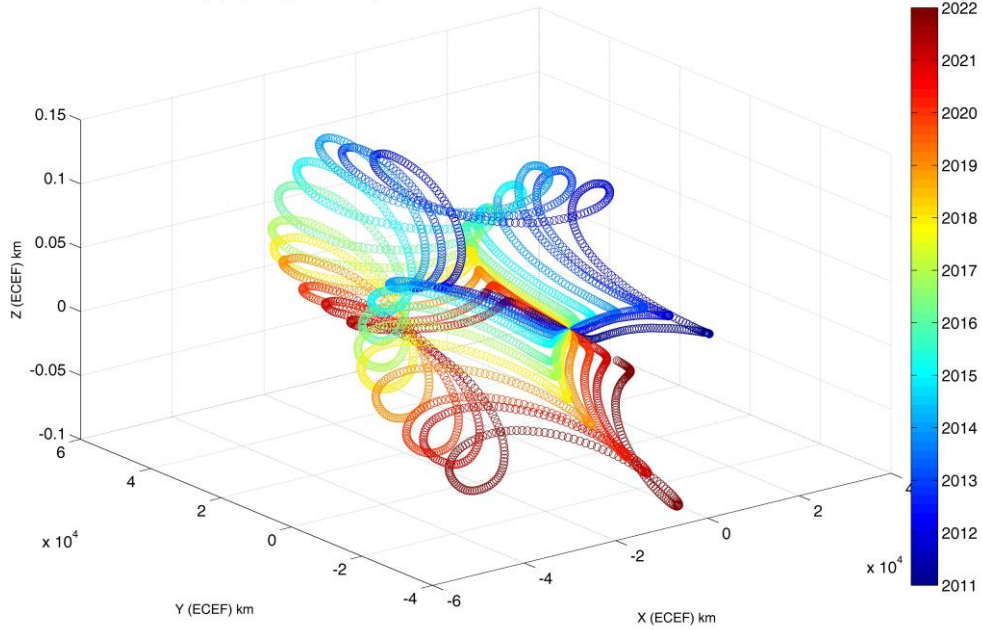


GPS-SV63 Uydusunun Nutasyon Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından
Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının
IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı

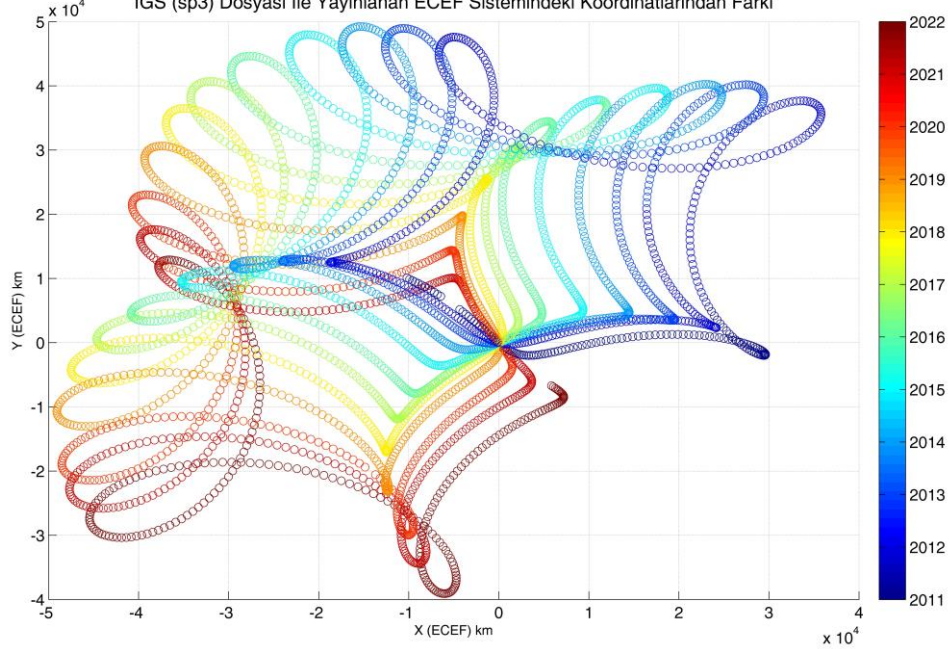


EK – 7 Yer Dönüklük Parametresinin, GPS SVN – 63 Uydusunun ECEF Koordinat Sistemindeki Koordinatlarına Etkisi

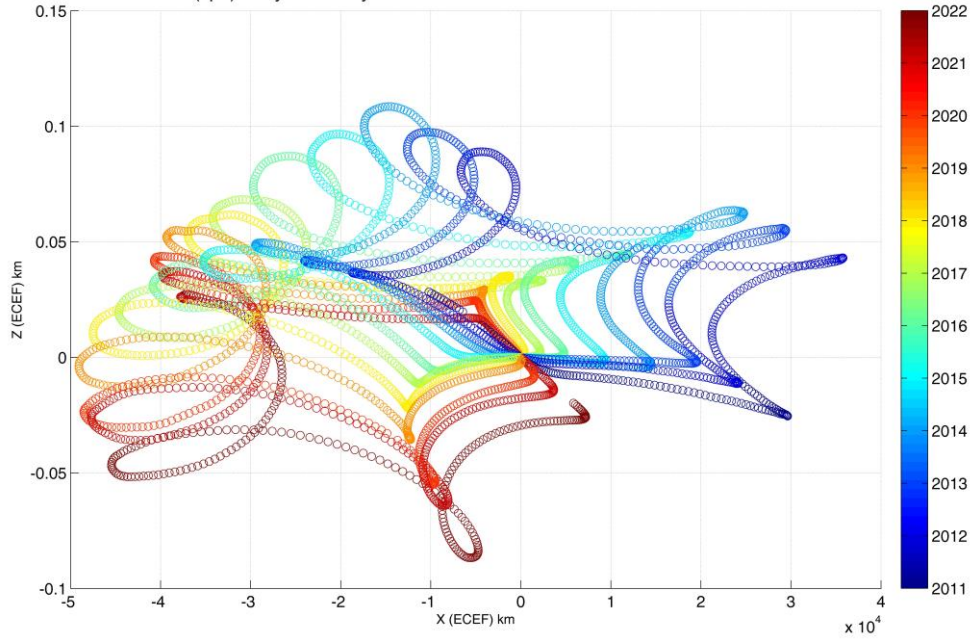
GPS-SV63 Uydusunun Yer Donukluk Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı



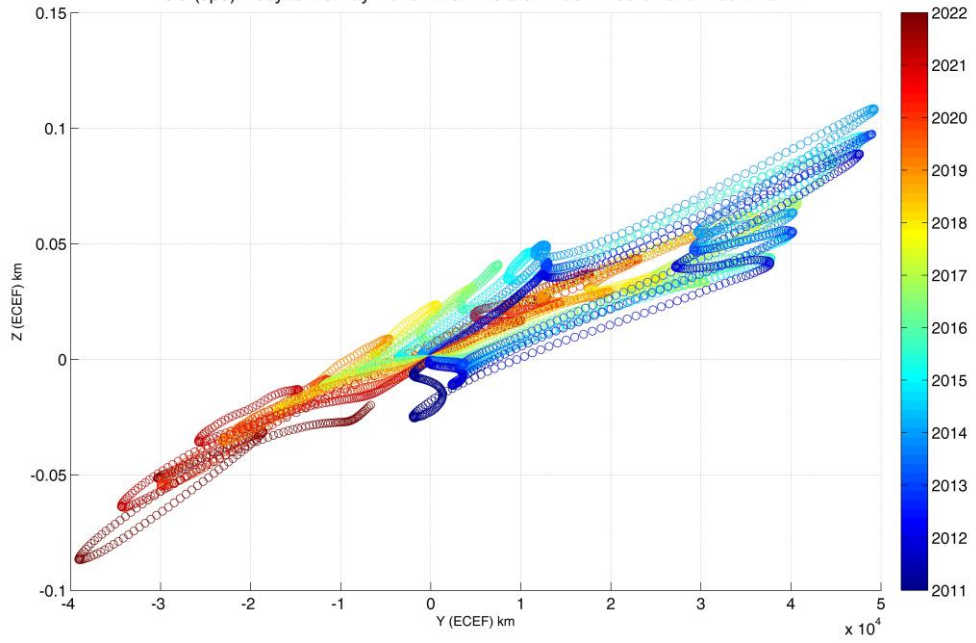
GPS-SV63 Uydusunun Yer Donukluk Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı



GPS-SV63 Uydusunun Yer Donukluk Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarindan
Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarinin
IGS (sp3) Dosyasi Ile Yayinlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarindan Farki

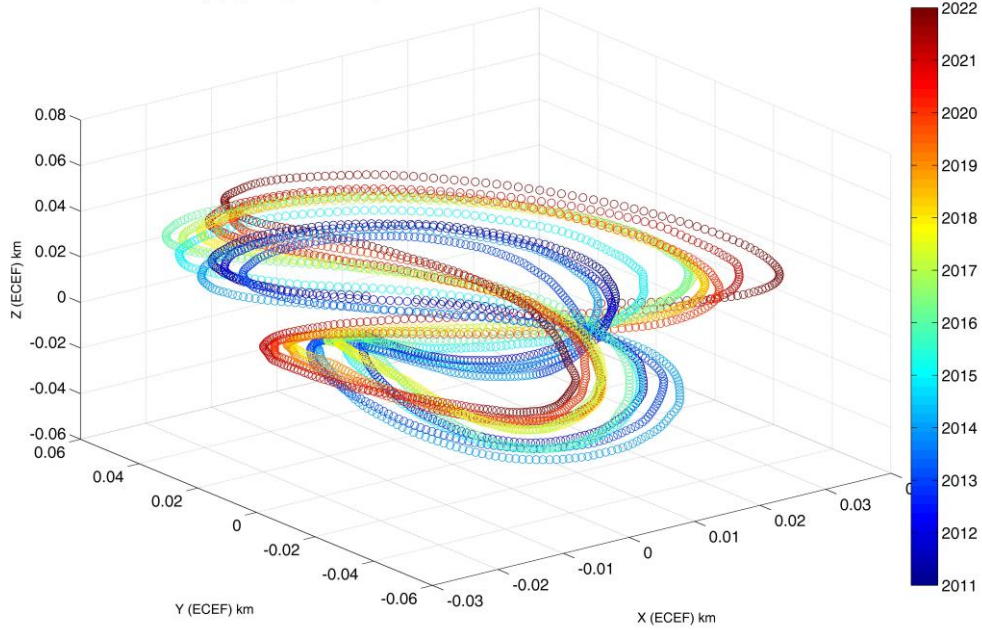


GPS-SV63 Uydusunun Yer Donukluk Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarindan
Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarinin
IGS (sp3) Dosyasi Ile Yayinlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarindan Farki

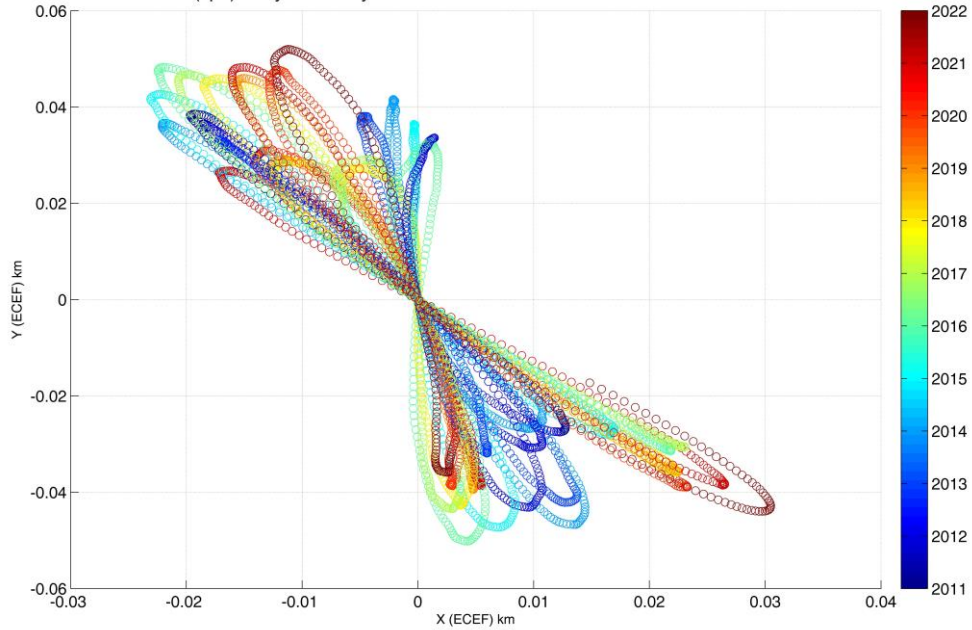


EK – 8 Kutup Hareketi Parametresinin, GPS SVN – 63 Uydusunun ECEF Koordinat Sistemindeki Koordinatlarına Etkisi

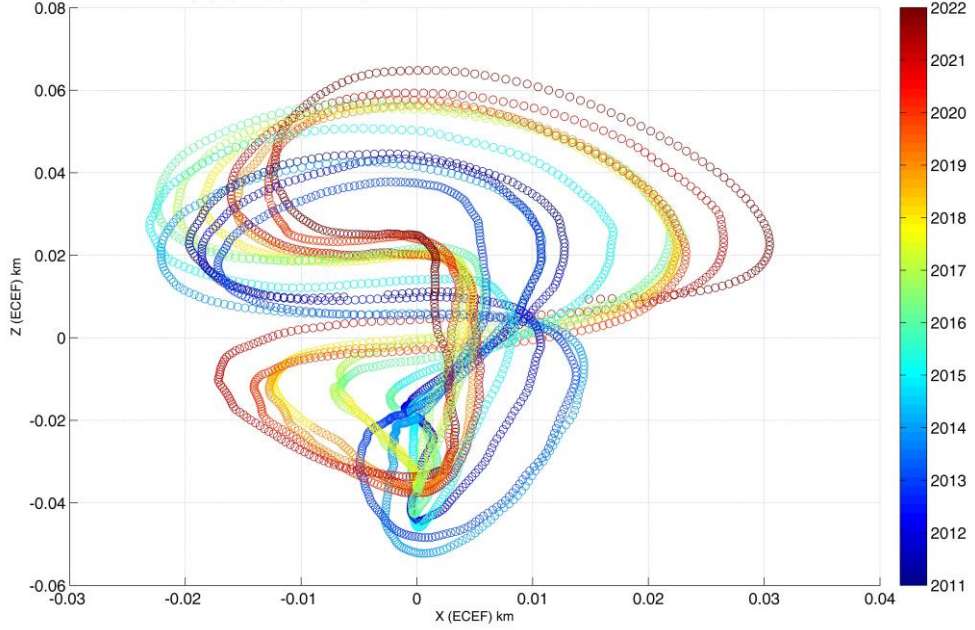
GPS-SV63 Uydusunun Kutup Hareketi Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farki



GPS-SV63 Uydusunun Kutup Hareketi Parametresi Birim Matris Alınarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farki



GPS-SV63 Uydusunun Kutup Hareketi Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından
Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının
IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı



GPS-SV63 Uydusunun Kutup Hareketi Parametresi Birim Matris Alinarak Hesaplanan ECI Sistemindeki Koordinatlarından
Tüm Parametreler Dahil Edilerek Hesaplanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarının
IGS (sp3) Dosyası İle Yayınlanan ECEF Sistemindeki Koordinatlarından Farkı

