



Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi
Harita Mühendisliği Bölümü



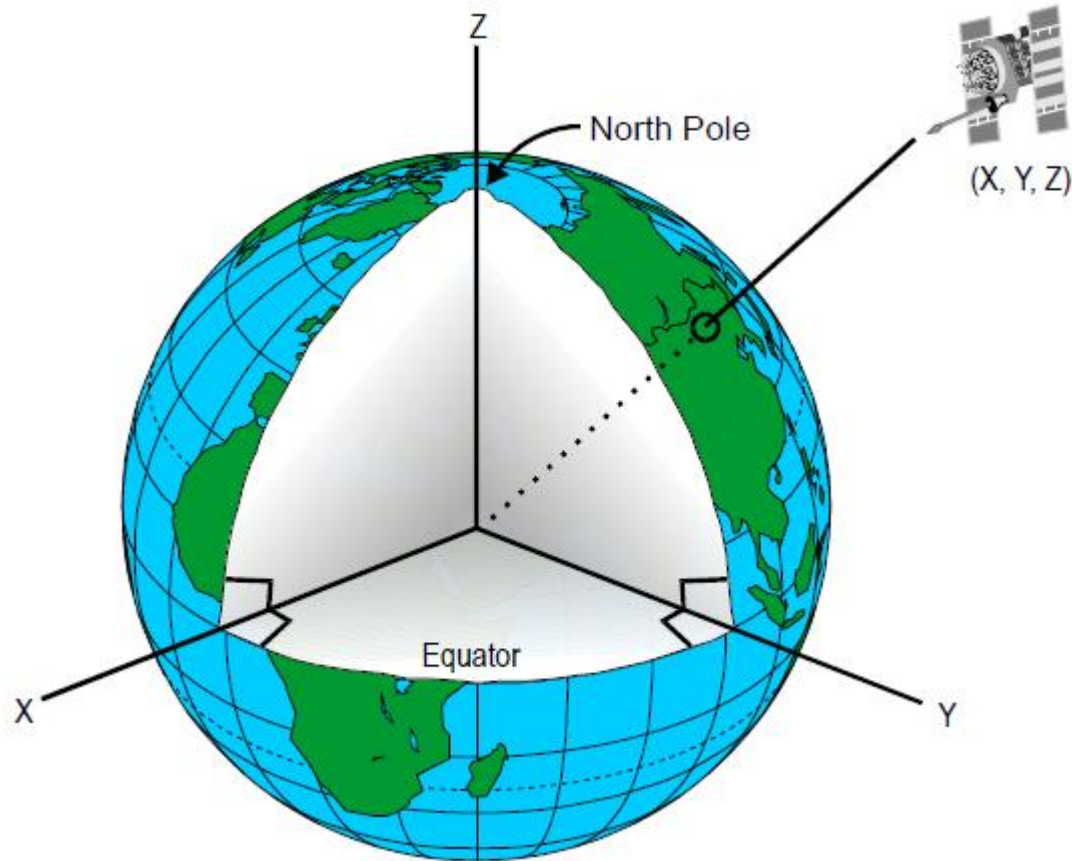
ÖLÇME BİLGİSİ 3 (HRT2322)

Doç.Dr. Taylan ÖCALAN

<https://avesis.yildiz.edu.tr/tocalan/>

tocalan@yildiz.edu.tr

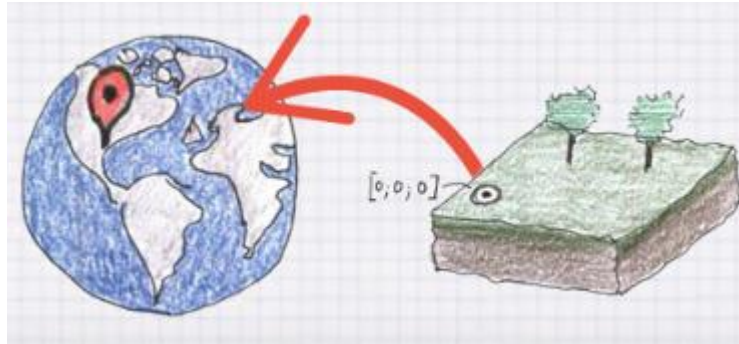
GPS'DE KULLANILAN KOORDİNAT SİSTEMLERİ



GPS'DE KULLANILAN KOORDİNAT SİSTEMLERİ

Ölçme ve konum belirleme sistemlerinin gelişimine paralel olarak koordinat sistemlerinin tanımlamalarında da önemli değişimler ve zorluklar ortaya çıkmaktadır.

Jeodezinin temel amaçlarından biri yeryüzü üzerindeki noktaların 3 boyutlu konumlarının (koordinatlarının) belirlenmesidir.



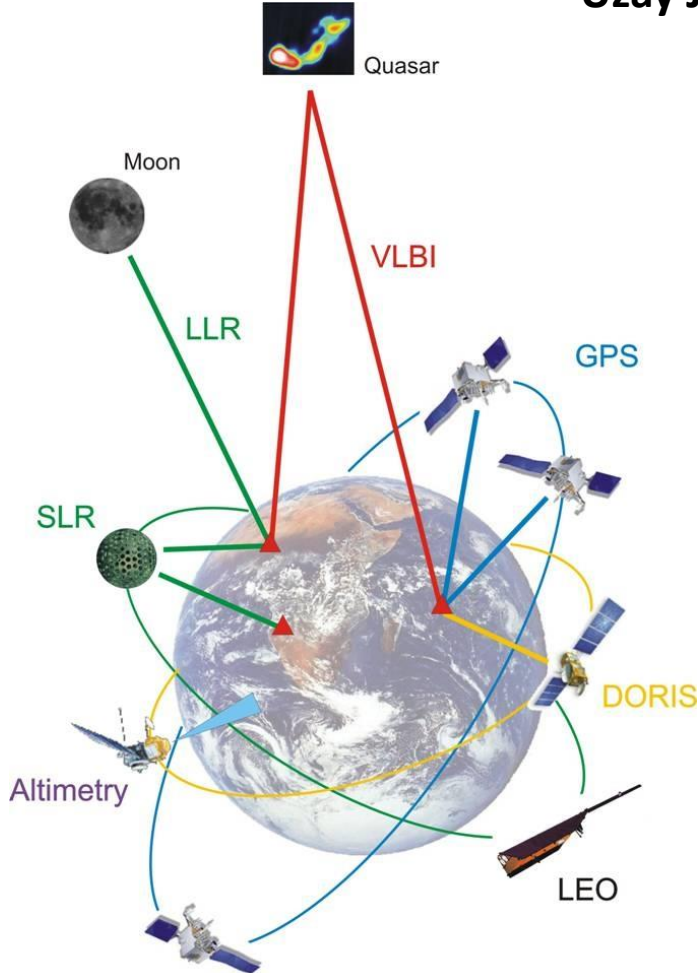
GPS matematiğinde «UYDU» ve «ALICI» durumları Kartezyen Koordinat Sisteminde tanımlanan **konum** ve **hız** vektörleri ile ifade edilmektedir.

GPS' de Kullanılan Koordinat Sistemleri

- Referans sistemleri, Uluslararası Jeodezi Birliği (IAG) ile Uluslararası Astronomi Birliği (IAU)'nin organizasyonunda IERS tarafından yürütülmektedir.
- Uydulara dayalı koordinat belirlerken iki temel koordinat sistemi kullanılmaktadır.
 - Uzay sabit koordinat sistemi (inertial) (space-fixed)
 - Yer sabit koordinat sistemi (earth-fixed)

IERS: Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi

Uzay Jeodezisi Teknikleri: VLBI, SLR, LLR, GPS/GNSS, DORIS



IERS, her bir uydu jeodezisi tekniği için analiz merkezleri kurmuştur.

IERS, bu analiz merkezlerinden gelen verileri birleştirerek, **yer dönme parametrelerini (earth orientation parameters – EOP)** yayınlar.

IERS;

* [International Terrestrial Reference System](#) (ITRS)

* [International Celestial Reference System](#) (ICRS)

sistemlerini tanımlar.



International Earth Rotation and Reference Systems Service

- Dünyamızın içerisinde bulunduğu sistemler sürekli olarak hareket halindedirler. Bu hareketlerin izlenerek koordinat sistemlerine gerekli düzeltmelerin getirilmesi için uluslararası kuruluşlar sürekli olarak çalışmaktadır.
- IERS astronomik, jeodezik ve jeofiziksel veri analiz servislerini şemsiyesi altında toplayan ve ilgili kuruluşlarla/organizasyonlarla sürekli işbirliği halinde olan uluslararası bir servistir.
- IERS sürekli olarak homojen göksel ve yersel referansları ve yerin yöneltme parametrelerini yeryüzünde 1 cm lik doğrulukla sağlar. VLBI, SLR, LLR ve GPS/GNSS gibi farklı uzay jeodezik yöntemlerin herbiri için, IERS analiz merkezleri vardır.
- Merkez Büro, sonuçları birleştirerek, yeryuvarının yönlendirilmesi hakkındaki bilgileri yayınlar ve IERS göksel referans çatısı (ICRF) ve IERS yersel referans çatısı (ITRF)'nın sürekli iyileştirilmesi çalışmasını yapar.
- IERS referans sistemleri, IERS standartları, sabitler ve analiz merkezlerinin kullandığı modellerden oluşur.



IERS'nin GÖREVLERİ:

- Uluslararası göksel referans sistemi (ICRS) nin gerçekleştirilmesi ve bakımının sağlanması,
- Uluslararası yersel referans sisteminin (ITRS) gerçekleştirilmesi ve bakımının sağlanması,
- Bu iki referans sistemi arasında dönüşümü sağlamak için yer yönlendirme parametrelerindeki değişimlerin incelenmesi,
- Bu iki referans sistemindeki zaman/uzay değişimlerini yada yer yönlendirme parametrelerini, ve böyle değişimlerin modellenmesini yorumlamak için jeofiziksel verilerin sağlanması
- Uluslararası bağlılığı sağlayan standartlar, sabitler ve modellerin oluşturulması
- Bu etkinliklere ilişkin gözlemlerin planlanması, verilerin toplanması, analizi, arşivlenmesi ve sonuçların kullanıcılara sunulması.

ECI ve ECEF

Uydulara dayalı konum belirlemede kullanılan 2 temel koordinat sistemi:

1) Earth-centered inertial (ECI) coordinate system

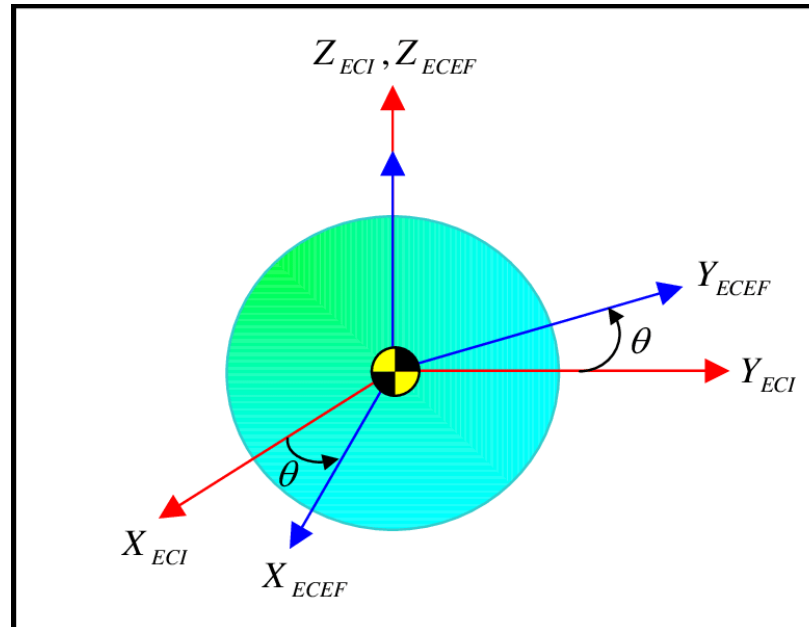
Yer Merkezli İnersiyal Koordinat Sistemi

* ECI, GPS uydu yörüngelerinin ölçülmesi ve belirlenmesinde, dolayısıyla uydu koordinatlarının hesaplanmasında kullanılır.

2) Earth-centered, Earth-fixed (ECEF) coordinate system

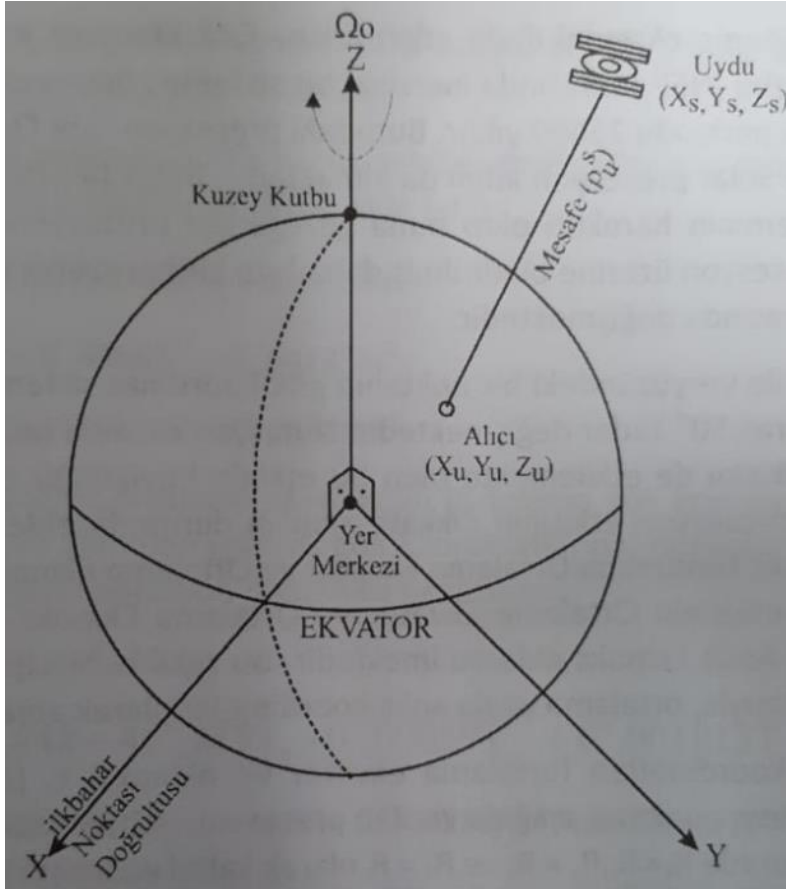
Yer Merkezli-Yer Sabit Koordinat Sistemi

* ECEF, yeryüzü üzerinde bulunan GPS alıcı anteni koordinatlarının hesaplanmasında kullanılır.



Yer Merkezli İnersiyal Koordinat Sistemi

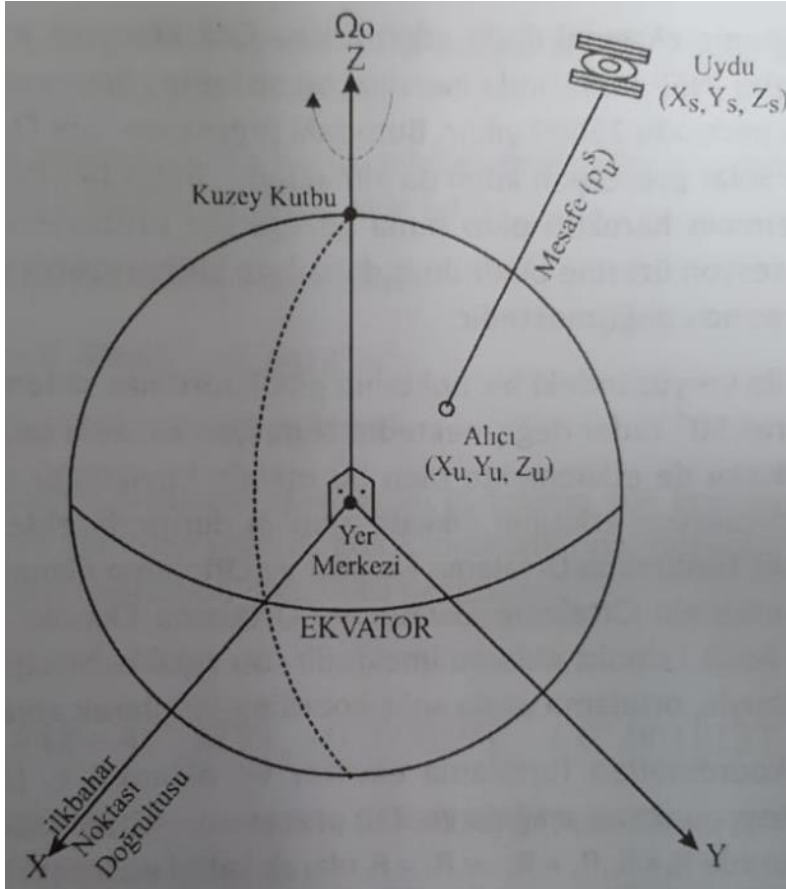
Earth-Centered Inertial (ECI) Coordinate System



- ECI koordinat sistemi, yıldızlara göre sabit inersiyal bir koordinat sistemidir. ECI'nın yıldızlara göre sabit olmasının anlamı, yeryüzü ile birlikte dönmemesi (non-rotating) anlamı taşımaktadır.
- ECI, GPS uydu yörüngelerinin ölçülmesi ve belirlenmesinde, dolayısıyla uydu koordinatlarının hesaplanmasında kullanılır.
- ECI, koordinat sisteminin başlangıç merkezi yeryüzünün ağırlık-kitle merkezidir.
- ECI koordinat sisteminde, yeryüzü etrafındaki yörüngelerinde hareket eden GPS uyduları Newton'un hareket ve yerçekimi kanunlarına uymaktadır.
- ECI koordinat sisteminde, XY düzlemi yer Ekvator düzlemi ile çakışık, +X eksenini Gök Küreye göre belirli bir yönde sabit, +Z eksenini kuzey kutup doğrultusunda ve XY düzlemine dik, +Y eksenini ise bir sağ el koordinat sistemi oluşturacak şekilde seçilmiştir.
- ECI koordinat sisteminin tanımındaki en temel sorunlardan biri yeryüzünün hareketindeki düzensizliklerdir. Özellikle Ay ve Güneş'in Ekvator üzerindeki çekim etkileri nedeniyle sistem tam anlamıyla inersiyal olamamaktadır.

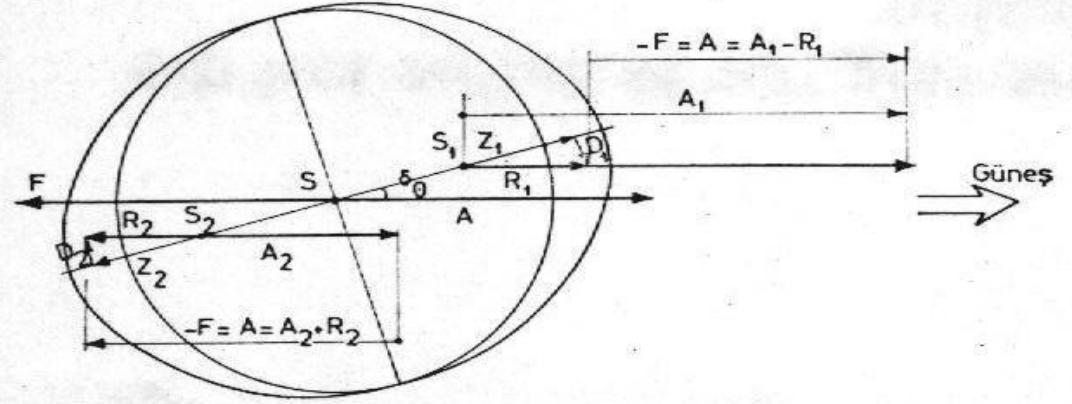
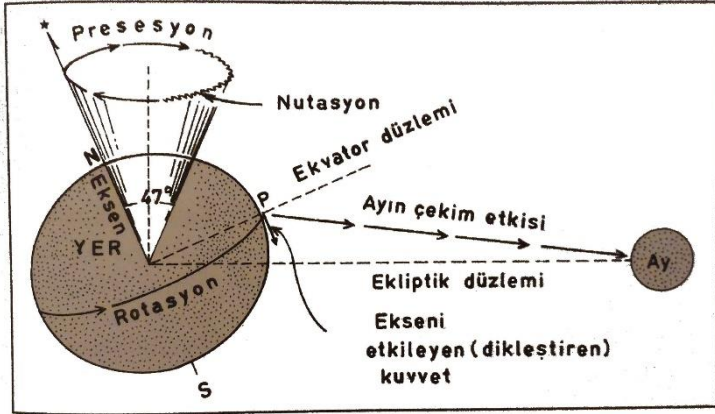
Yer Merkezli İnersiyal Koordinat Sistemi

Earth-Centered Inertial (ECI) Coordinate System



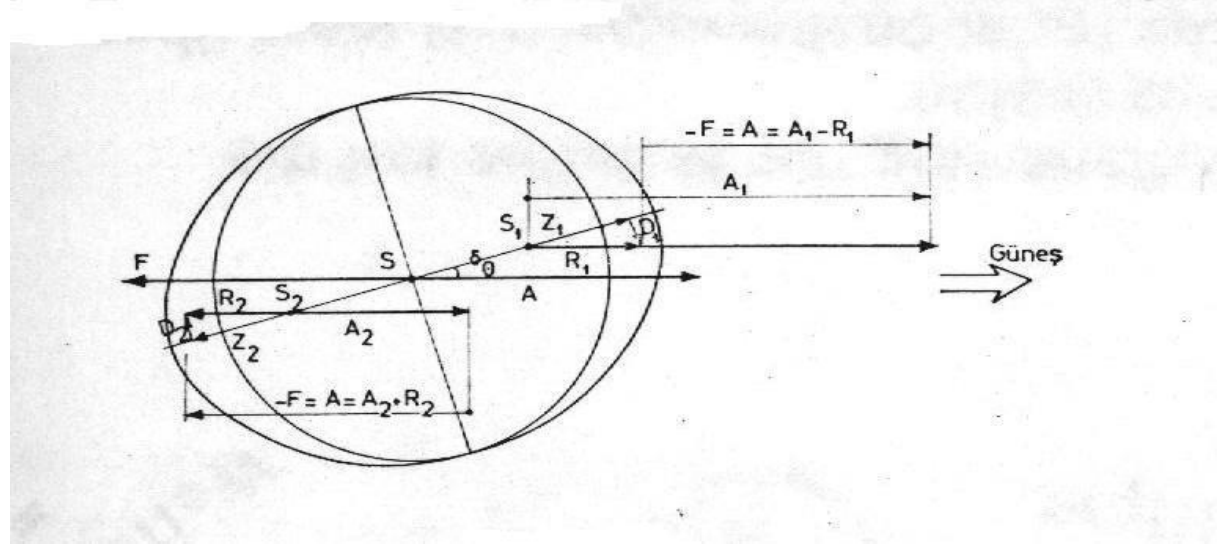
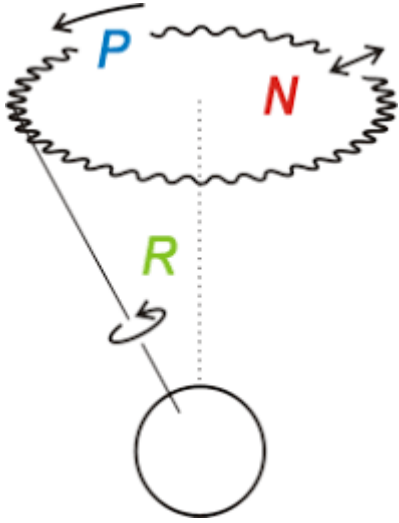
- Ay ve Güneş'in Ekvator üzerindeki çekim etkileri nedeniyle, yeryüzünün hareketindeki düzensizlikler ECI koordinat sisteminin tanımlanmasını zorlaştırmaktadır.
- Bu nedenle ECI koordinat sistemi eksenlerinin yönlendirilmesi belirli bir epöğa göre tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, GPS ECI koordinat sistemi 1 Ocak 2000 tarihi saat 12:00 UTC zamanındaki (J2000.00) ortalama Ekvator ve ekinoks (ilkbahar noktası) ile çakışık kabul edilmektedir.
- Bu şekilde tanımlanan koordinat sistemine Ortalama Gök Referans Sistemi (MCRS) yada Geleneksel Gök Referans Sistemi (CCRS) denilmektedir.
- Bu sistemde;
- +X eksenini yeryüzü kitle merkezinden ilkbahar noktası (vernal equinox) doğrultusunda; +Z eksenini kuzey kutup doğrultusunda ve XY düzlemine dik, +Y eksenini ise bir sağ el koordinat sistemi oluşturacak şekilde seçilmiştir.

PRESESYON VE NUTASYON



- Yerin dönme kutbu uzayda sabit değildir, ekliptik kutbu etrafında döner. Bu hareket iki bileşenden oluşur: Prezesyon ve nutasyon. Şekil de görüldüğü gibi güneş (S doğrultusunda işaretlenmiş). A_1 , A_2 ($A_1 > A_2$) kuvvetleri ile karşılıklı duran ekvator kabarıklığını çeker. Yerin güneş çevresindeki dönüşü nedeniyle kabarıklıkların ağırlık merkezlerindeki merkezkaç kuvvetler F_1 ile F_2 ($F_1 < F_2$) dir.

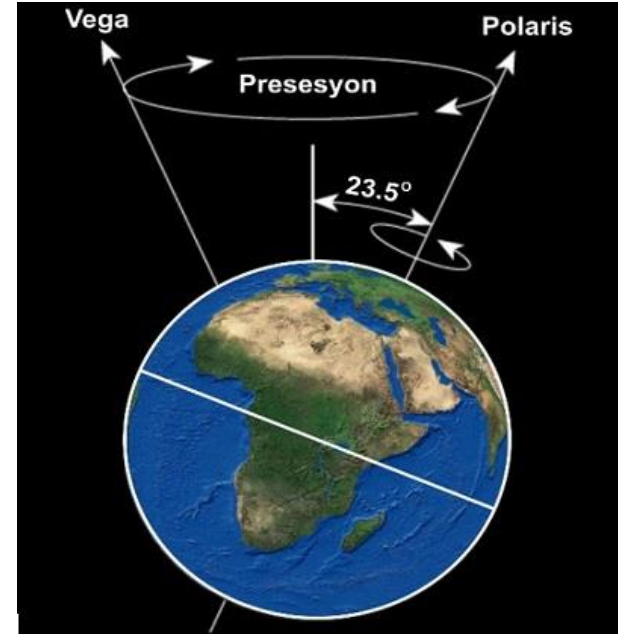
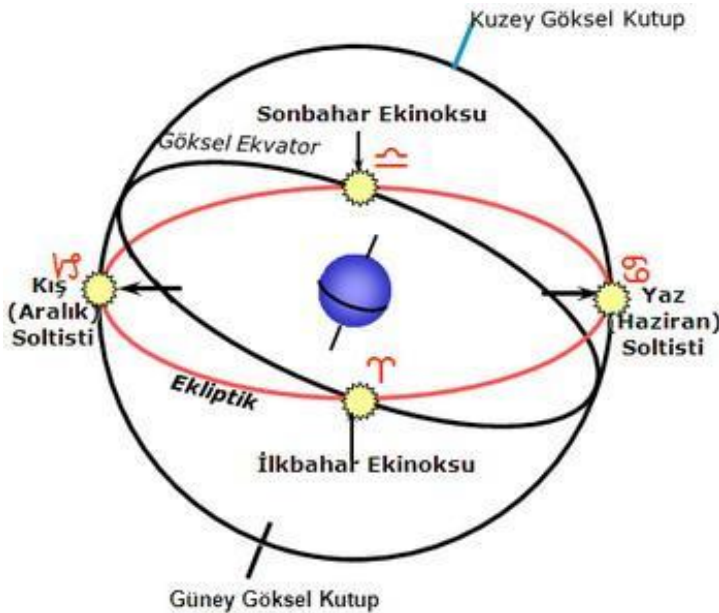
PRESESYON VE NUTASYON

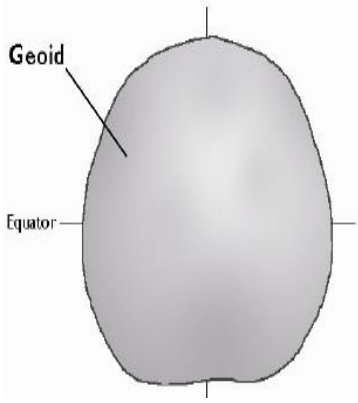


- Şekil de görüldüğü gibi, çekim ve merkezkaç kuvvetlerinin sonuç (bileşke) kuvvetleri R_1 , R_2 karşı yönlerde yer alır. R_1 , R_2 kuvvetlerinin biri ekvatora paralel, diğeri ekvatora dik duran bileşenler ekvatoru ekliptik düzlemine doğru döndürmeyi deneyen bir moment oluşturur.
- Bu moment, yer dönme momenti ile birleşerek aslında presesyon olarak adlandırılan bir harekete neden olur.

PRESESYON VE NUTASYON

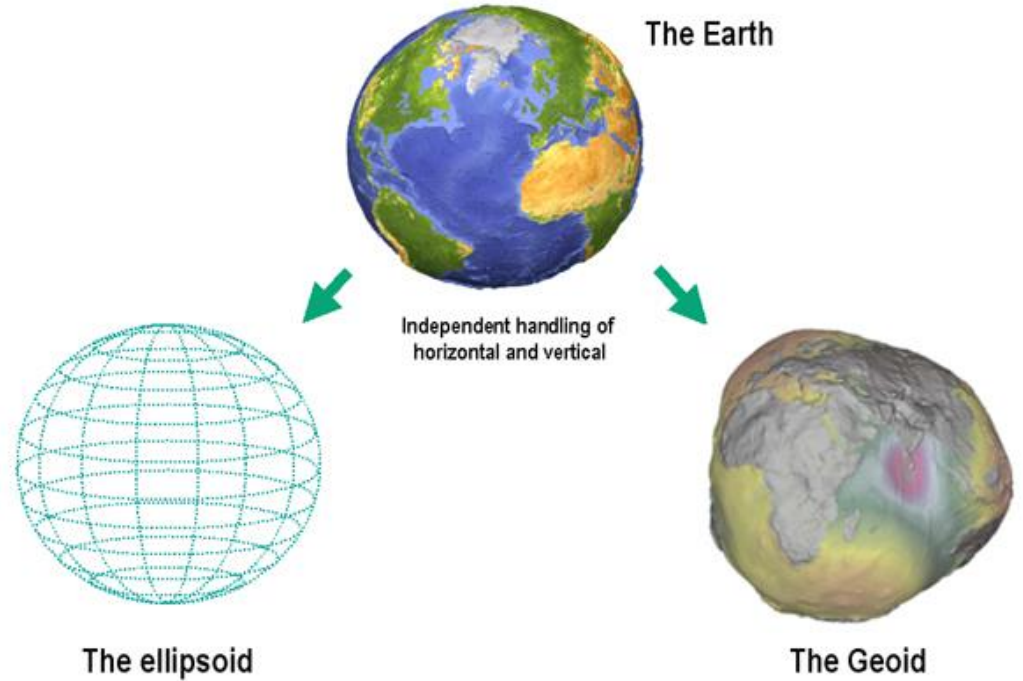
- Ay ve güneş presesyonu gök kutbunun 25 800 yıllık peryotlu yavaş dairesel bir hareketidir ve genliği ekliptiğin eğimine eşittir ve yaklaşık 23.5 derecedir.
- Bunun sonucunda, ilkbahar noktası (equinox) nın ekvator üstünde batıya doğru yıllık yaklaşık 50.3 saniyelik bir hareketi oluşur. Gezegensel presesyon, her yüzyılda yaklaşık 12.5 saniyelik ilkbahar noktasının doğuya doğru bir hareketini doğurur
- Nutasyon ise bağıl olarak dönme kutbunun kısa peryotlu, en büyük genliği 9.2 saniyeye ulaşan ve 1 günden 18.6 yıla kadar değişen peryotlara sahip salınımlardan oluşur.





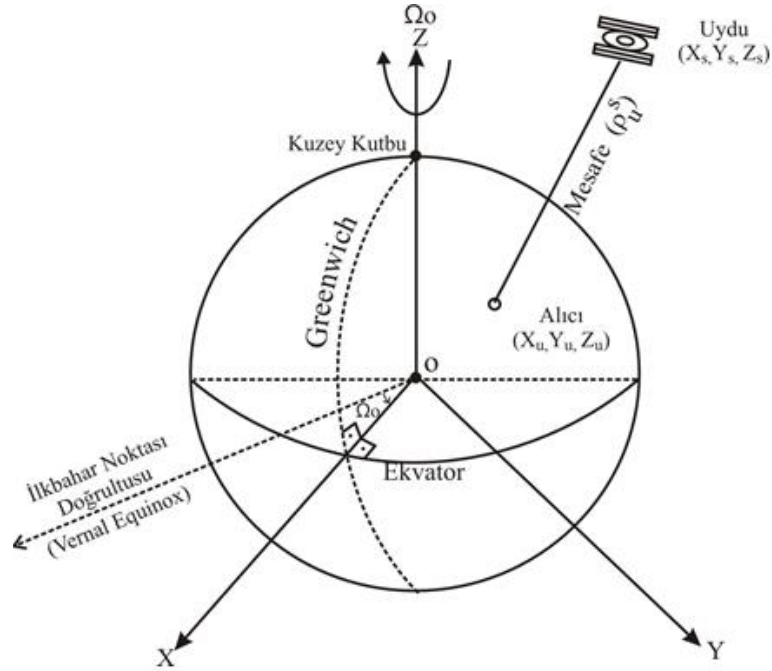
DÜNYANIN ŞEKLİ

- Dünyanın katı yüzeyi düzensiz, devamsız ve heterojen katmanlardan oluştuğu için matematiksel olarak uygun modellemek mümkün değildir
- Dünyanın bu yüzeyi durgun denizlerin karaların altında da devam ettiği düşünülerek oluşturulan geoid olarak tanımlanmıştır.
- Hesap yüzeyi olarak dönel elipsoid kullanılmaktadır. Dönel elipsoid bir elipsin küçük eksenini etrafında döndürülmesi ile oluşan şekildir.
- Geoide mümkün olduğu kadar yakın bir dönel elipsoidin boyutlarının tanımlanması, jeodezinin başlıca problemi olmuştur.



Yer Merkezli-Yer Sabit Koordinat Sistemi

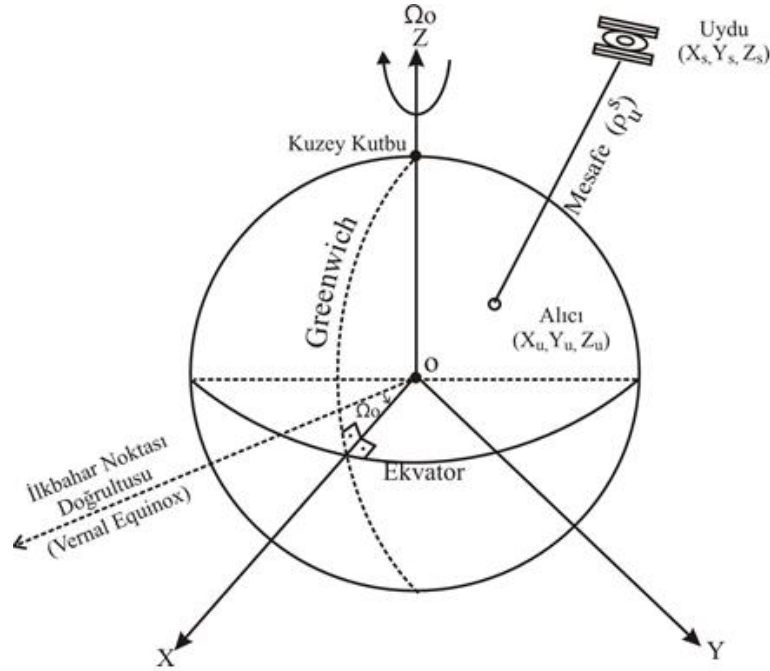
Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) Coordinate System



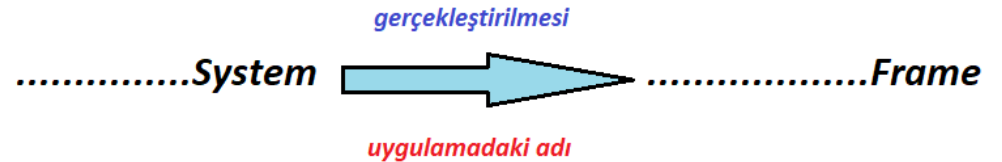
- ECEF, yeryüzü üzerinde bulunan GPS alıcı anteni koordinatlarının hesaplanmasında kullanılır.
- Yeryüzü üzerinde ölçü yapılan noktanın koordinatları, yeryüzü ile birlikte dönen bir koordinat sistemi olan ECEF'de hesaplanır.
- ECEF, sistemine Geleneksel Yersel Referans Sistemi (CTRS) adı da verilmektedir.
- ECEF koordinat sisteminin başlangıç merkezi yeryüzünün ağırlık-kitle merkezidir.
- ECEF'de, +Z eksenini coğrafi kuzey kutbu doğrultusunda Ekvator düzlemine diktir. Başka bir deyişle ortalama yer dönme eksenini ile aynıdır. Ortalama yer dönme eksenini, yerin 1900-1905 yılları arasındaki dönme eksenini ortalama konumunu ifade etmektedir.
- ECEF'de, +X eksenini ortalama Greenwich meridyeni ile çakışık olup, doğrultusu sıfır derece boylamıdır.
- ECEF'de, +Y eksenini 90 derece Doğu boylamı doğrultusundadır ve sağ el koordinat sistemi oluşturmaktadır.

Yer Merkezli-Yer Sabit Koordinat Sistemi

Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) Coordinate System

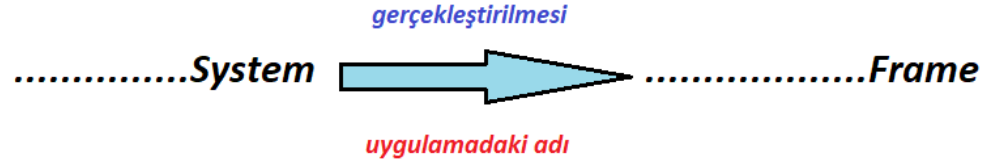


- ECEF koordinat sisteminde X ve Y eksenleri yer ile birlikte dönmektedir. Bu nedenle uzayda sabit doğrultular tanımlanamamaktadır.
- Fakat yeryüzü üzerindeki sabit bir noktanın ECEF sistemindeki konumu (koordinatları) sürekli sabittir.
- ECEF koordinat sisteminin temel amacı, yeryüzünde GPS ölçüsü yapan ve bunun sonucunda zamana bağlı koordinat elde eden kullanıcının ulaşabileceği uygun bir referans sistemi oluşturmaktır.
- Geleneksel Yersel Referans Sistemi (Conventional Terrestrial Reference System-CTRS) olarak adlandırılan ECEF soyut bir kavramdır. Yeryüzü üzerindeki UYGULAMADAKİ (GERÇEKLEŞTİRİLMESİNDEKİ) adı (Conventional Terrestrial Reference Frame-CTRF) olarak bilinmektedir.



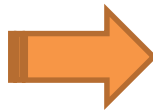
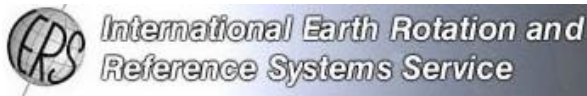
Yer Merkezli-Yer Sabit Koordinat Sistemi

Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) Coordinate System

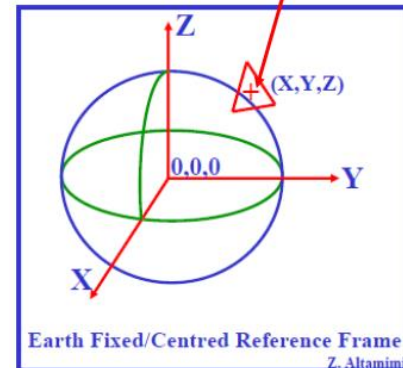


- *Conventional Terrestrial Reference Frame-CTRF, yeryüzünde tesis edilmiş ve referans (sabit) fiziksel nokta olarak bilinen çok sayıdaki yer kontrol noktasında yapılan ölçümler sonucu belirlenmiş Jeosentrik (yer merkezli) koordinatlar (X, Y, Z) ile tanımlanmıştır.*
- *Bu sabit noktaların çoğunda SLR (Satellite Laser Ranging) ve VLBI (Very Long Baseline Interferometry) uzay jeodezisi ölçme sistemleri tesis edilmiştir.*

Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (**IERS**) tarafından yeryüzünde sabit (fiziksel) noktalardan oluşan ve farklı uzay jeodezisi tekniklerine dayalı olarak koordinatları (X,Y,Z) belirlenerek kurulmuş olan yer merkezli - yer sabit referans koordinat sistemine **International Terrestrial Reference Frame (ITRF)** adı verilmektedir.



Origin, Scale & Orientation





International Earth Rotation and
Reference Systems Service

- *Kısa adı (IERS) olan Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi, 1988 kurulmuştur. Merkezi Fransa-Paris'de bulunmaktadır.*
- *IERS'nin temel amacı tüm dünyayı kapsayan, uluslararası boyutta kabul edilmiş göksel ve yersel referans sistemlerini tanımlamak, yer dönme/yönlendirme parametrelerini hesaplamaktır.*
- *IERS, Uluslararası Astronomi Birliği (IAU) ve Uluslararası Jeodezi ve Jeofizik Birliği (IUGG) ile birlikte çalışmaktadır.*
- *IERS'e ITRF'i oluşturma ve sonuçlarını güncelleyerek yayınlama sorumluluğu verilmiştir.*

*IERS, yer dönme parametrelerini belirlerken ve de ITRF sistemini oluştururken, **SLR, LLR, VLBI, GPS/GNSS ve DORIS** gibi uzay jeodezi tekniklerinden yararlanmaktadır.*

*Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

*Satellite Laser Ranging (SLR)

*Lunar Laser Ranging (SLR)

*Global Navigation Satellite Systems (GNSS)
GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU

*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS)



SLR/LLR



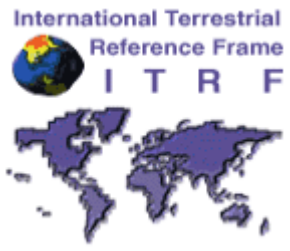
VLBI



GPS/GNSS

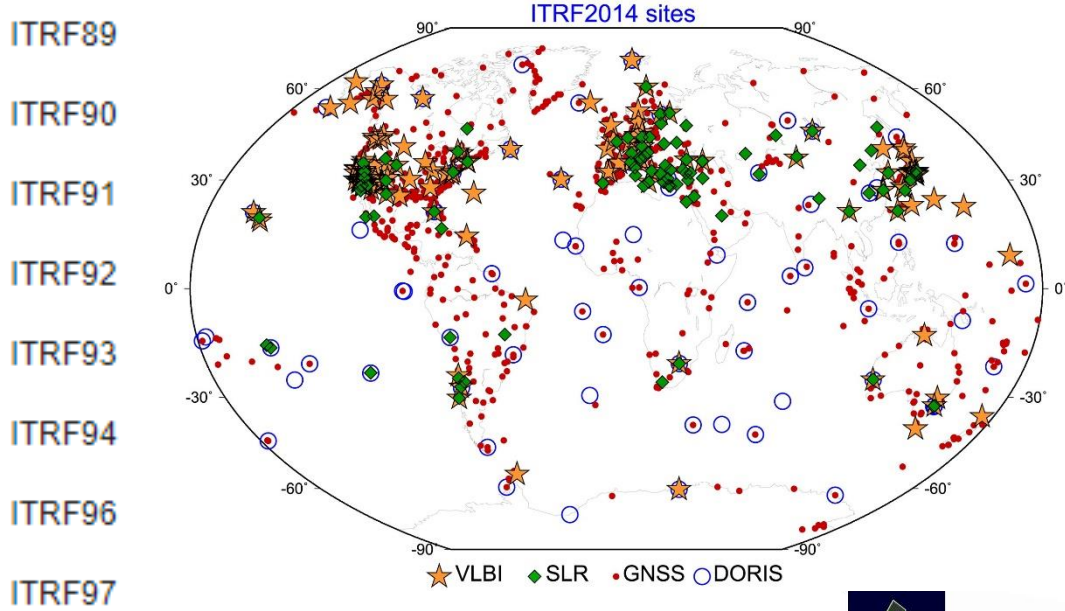


DORIS



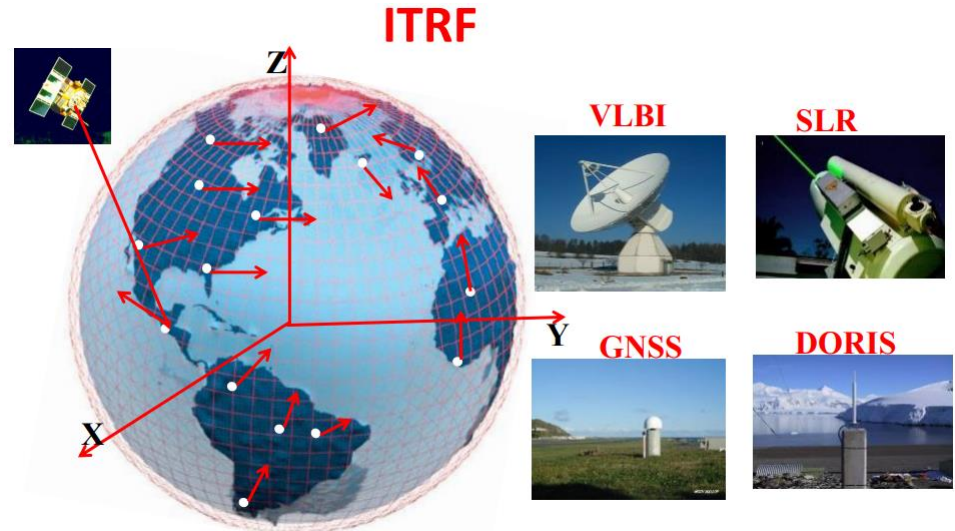
ITRF, belirli yıllarda GÜNCELLENEN dinamik bir koordinat sistemidir. Güncelleştirmeleri arasındaki dönüşümler, dönüşüm parametreleri ve hız vektörleri kullanılarak gerçekleştirilir.

ITRF_{yy} ----- «yy» güncellenen ilgili yılın son iki harfini ifade etmektedir.



ITRF noktalarının birbirine karışmasını önlemek için DOMES numaralama (DOMES Number) sistemi kullanılmaktadır. İstasyon sayısının artmasına paralel olarak DOMEX (DOMES Extended) sistemine geçilmiştir.

ITRF89
ITRF90
ITRF91
ITRF92
ITRF93
ITRF94
ITRF96
ITRF97
ITRF2000
ITRF2005
ITRF2008
ITRF2014





Dünya Jeodezik Sistemi – 1984

WGS - 84

- WGS-84, GPS sisteminin geliştirilmesinden ve işletilmesinden sorumlu olan ABD Savunma Dairesi (DoD) tarafından tasarlanmış yersel bir referans sistemidir.
- WGS-84'ün pratik uygulamaya dönük jeodezik referans sistemi olarak geliştirilmesinden ABD'nin ilk adıyla Defence Mapping Agency (DMA), sonraki adıyla NIMA (National Imagery and Mapping Agency) ve yeni adıyla NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) kuruluşu sorumludur. (Sistem WGS-60, WGS-66, WGS-72 ve WGS-84 olmak üzere dört farklı versiyonda tanımlanmıştır.)
- GPS uydularından yayınlanan Navigasyon Mesajı içerisindeki uydu yörünge bilgileri (efemeris) WGS-84 sistemindedir.
- WGS-84 sistemi ile ITRF sistemi arasındaki ilişkiyi belirlemek ve WGS-84 sisteminin doğruluğunu artırmak için belli dönemlerde gözlemler yapılarak, GPS kontrol merkezi konumu iyileştirilmiştir.

GPS Kontrol Merkezi Konum Doğrulukları
ve WGS-84'ün ITRF ile uyumu:

- World Geodetic System 1960 (WGS 60)
- WGS66
- WGS72
- WGS84

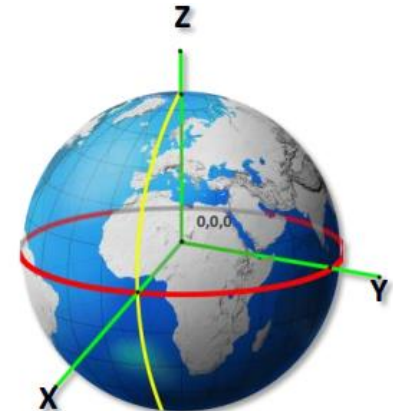
Recent WGS 84 Frame Realizations

Realization	Absolute Accuracy	Date
Original (TRANSIT)	1-2 m	Jan 1987
G730	10 cm	Jun 1994
G873	5 cm	Jun 1997
G1150	2 cm	Jan 2002
G1674	1 cm	Feb 2012
G1762*	1 cm	Oct 2013
GXXXX **	1 cm	Oct 2018

WGS 84 defined in
NGA.STND.0036

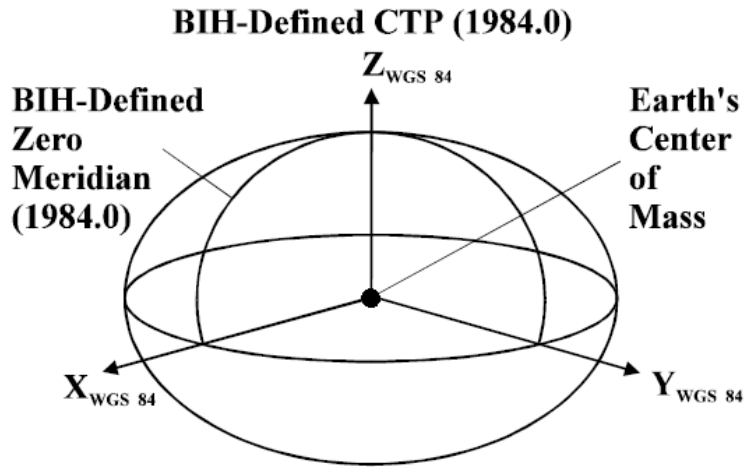
* Aligned to ITRF08

** Aligned to ITRF14



Dünya Jeodezik Sistemi – 1984 (WGS 84)

- Merkezi yaklaşık (1 cm) olarak yeryuvarının ağırlık merkezine çakışıktır. Z eksenini, kutupsal hareket için Uluslararası Saat Bürosu (BIH) tarafından toplanan koordinatlara dayanarak, BIH tarafından tanımlanan yerel kutba doğru yerin dönme eksenine paraleldir. X eksenini ise, referans meridyeni sıfır meridyeni olacak şekilde WGS 84 referans meridyen düzlemi ile yerel kutbun ekvator düzleminin arakesiti olacak şekilde sağ el sistemidir.

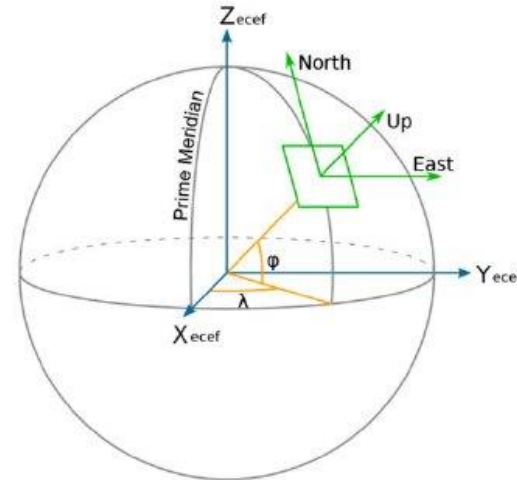
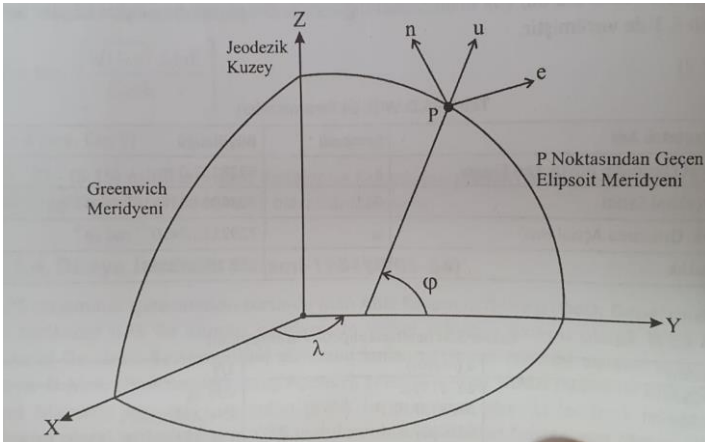


WGS-84

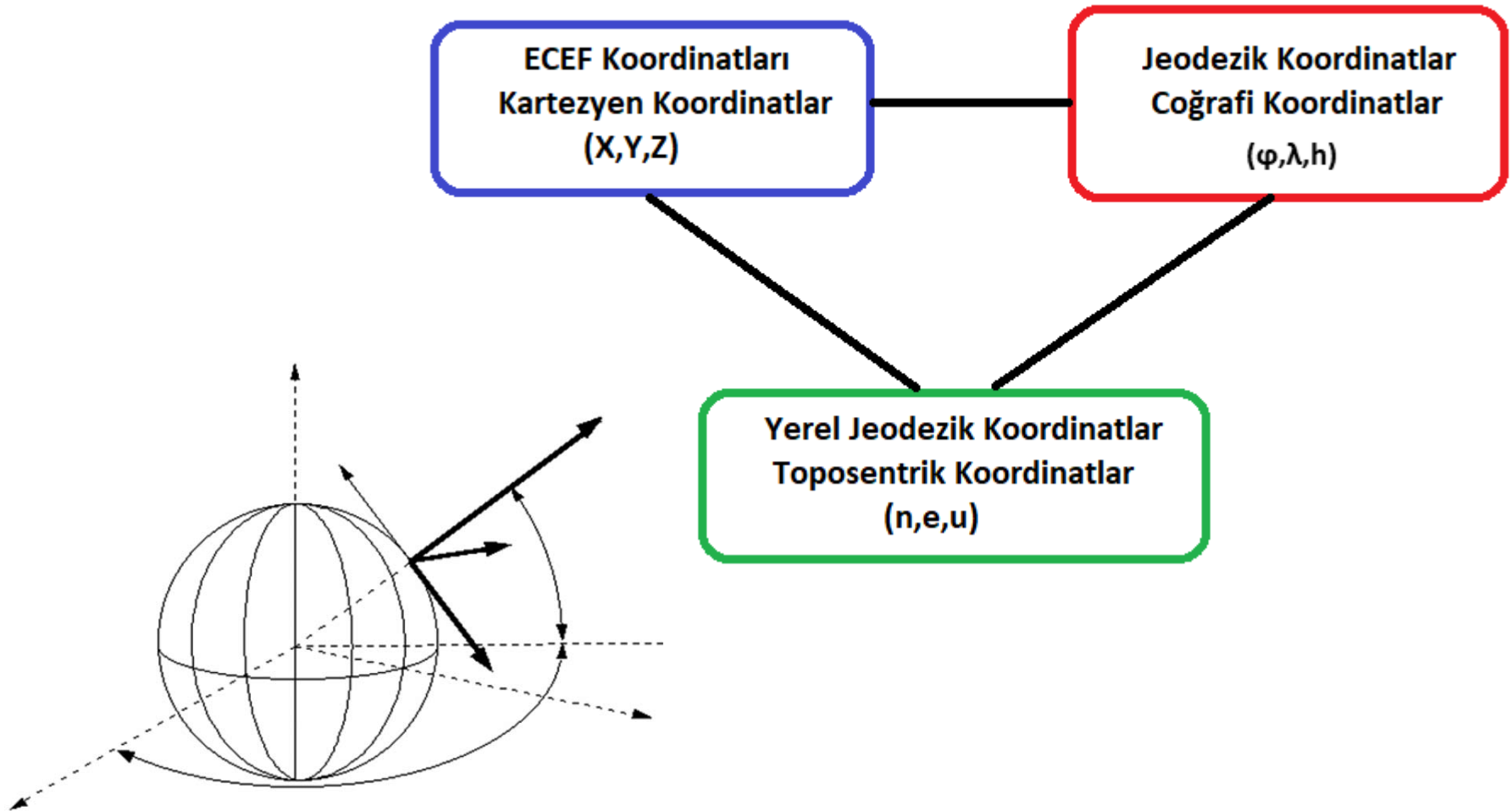
Parametre	Sembol	Değer
Elipsoidin büyük yarı eksenini	a	6378137.0 meters
Basıklık	1/f	298.257223563
Yerin ortalama açısal hızı	ω	7292115×10^{-11} radians/second
Yerçekimi sabiti	GM	$3.986004418 \times 10^{14}$ meter ³ /second ²

Yerel Jeodezik (Toposentrik) Koordinat Sistemi (n,e,u)

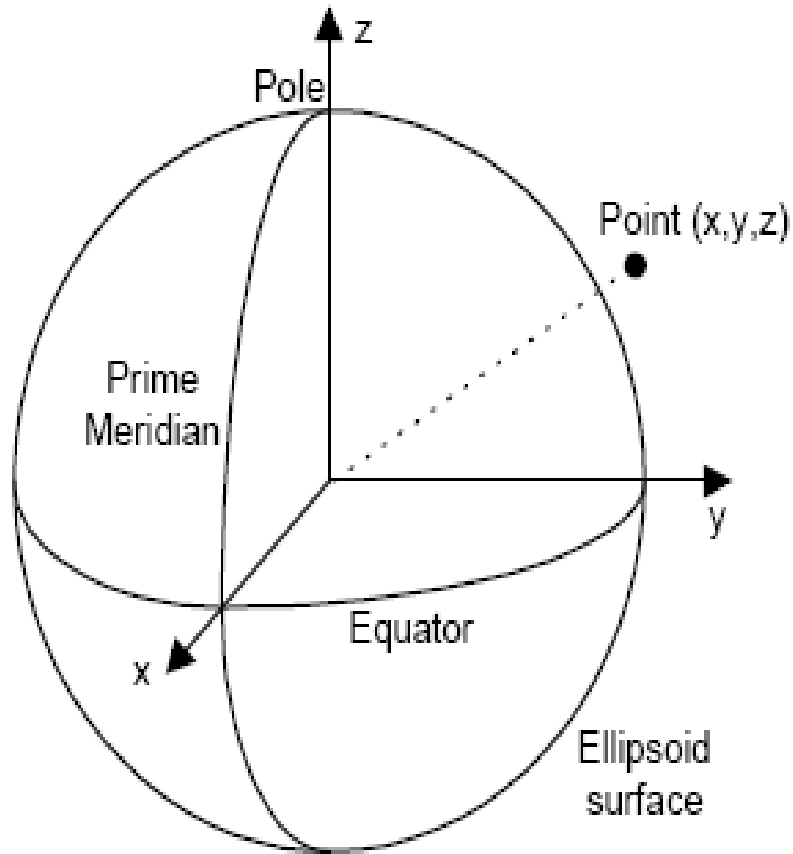
- Yerel Jeodezik Koordinat Sistemi (Local Geodetic System – LGS), Toposentrik Koordinat Sistemi olarak da ifade edilmektedir.
- Bu sistemde sistemin başlangıç noktası GPS alıcı anteninin üzerine kurulduğu noktadır.
- Koordinat eksenleri n (north), e (east), u (up) ile gösterilmektedir.
- n-ekseni, jeodezik kuzeyi
- e-ekseni, doğuyu göstermektedir.
- u-ekseni, GPS alıcı anteninin kurulduğu noktadaki elipsoit normali ile çakışmaktadır.
- n,e,u eksenleri yerel jeodezik ufuk düzlemini oluşturmaktadır.
- Yerel jeodezik koordinat sisteminin yönlendirilmesi jeodezik enlem ve boylama göre yapılmaktadır.



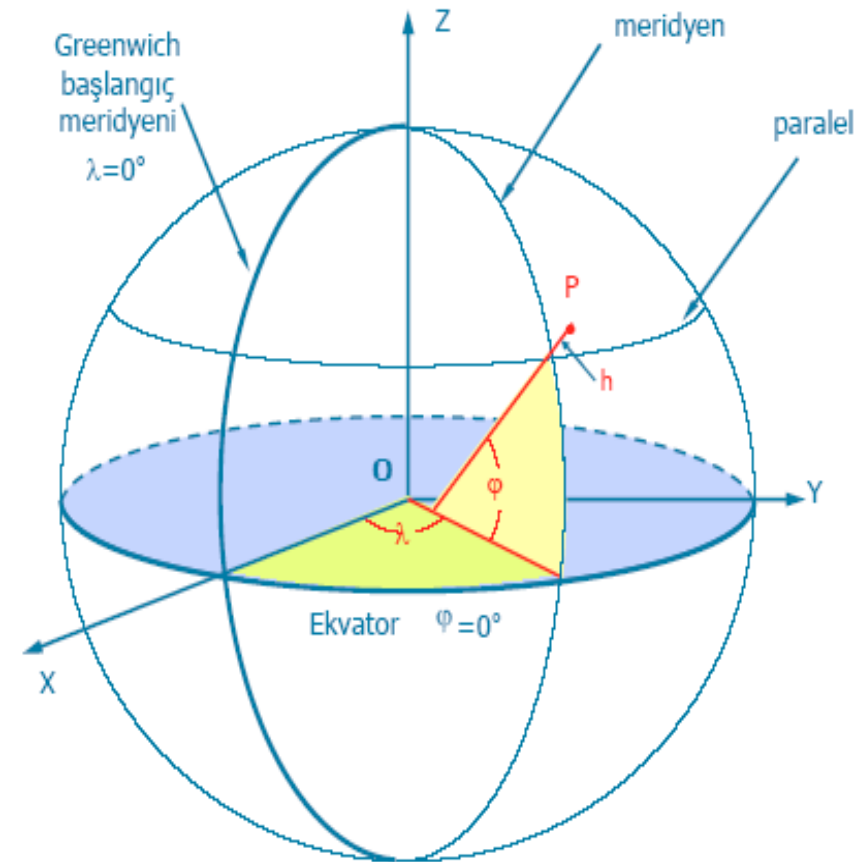
Koordinat Sistemleri Arasındaki Dönüşümler



ECEF Koordinatları
Kartezyen Koordinatlar
(X,Y,Z)



Jeodezik Koordinatlar
Coğrafi Koordinatlar
(φ, λ, h)



Coğrafi (Jeodezik) Koordinatlardan (φ, λ, h) Kartezyen (ECEF) (X,Y,Z) Koordinatlarına Dönüşüm

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

N:meridyen eğrilik yarıçapı

$$X = (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda$$

$$Y = (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda$$

$$Z = [(1 - e^2) \cdot N + h] \cdot \sin \varphi$$

$$a = 6378388m$$



Kartezyen (ECEF) (X,Y,Z) Koordinatlardan Coğrafi (Jeodezik) Koordinatlara (φ, λ, h) Dönüşüm

$$\tan \theta = \frac{z \cdot a}{b \sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$\tan \lambda = \frac{y}{x}$$

$$\tan \varphi = \frac{z + e'^2 \cdot b \cdot \sin^3 \theta}{\sqrt{x^2 + y^2} - e^2 \cdot a \cdot \cos^3 \theta}$$

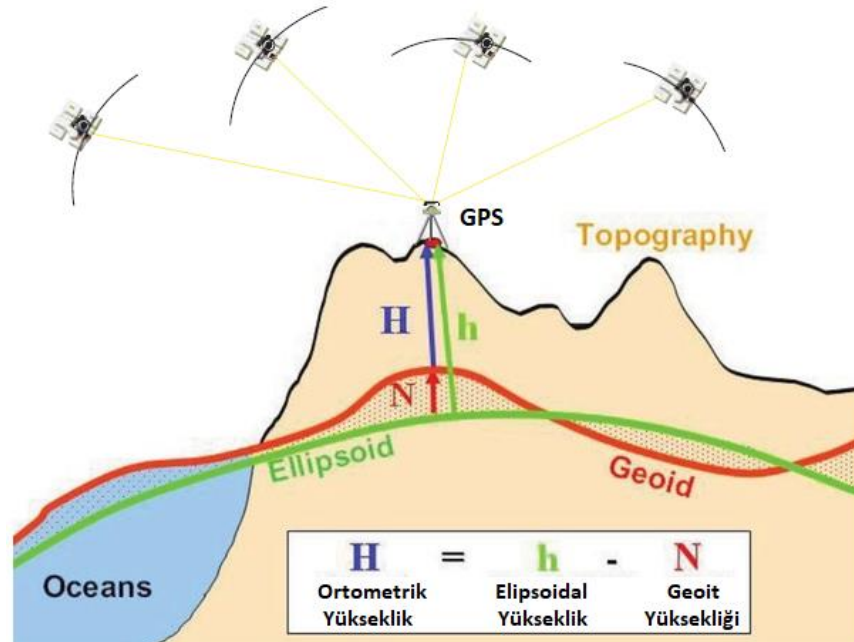
$$h = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos \varphi} - N$$

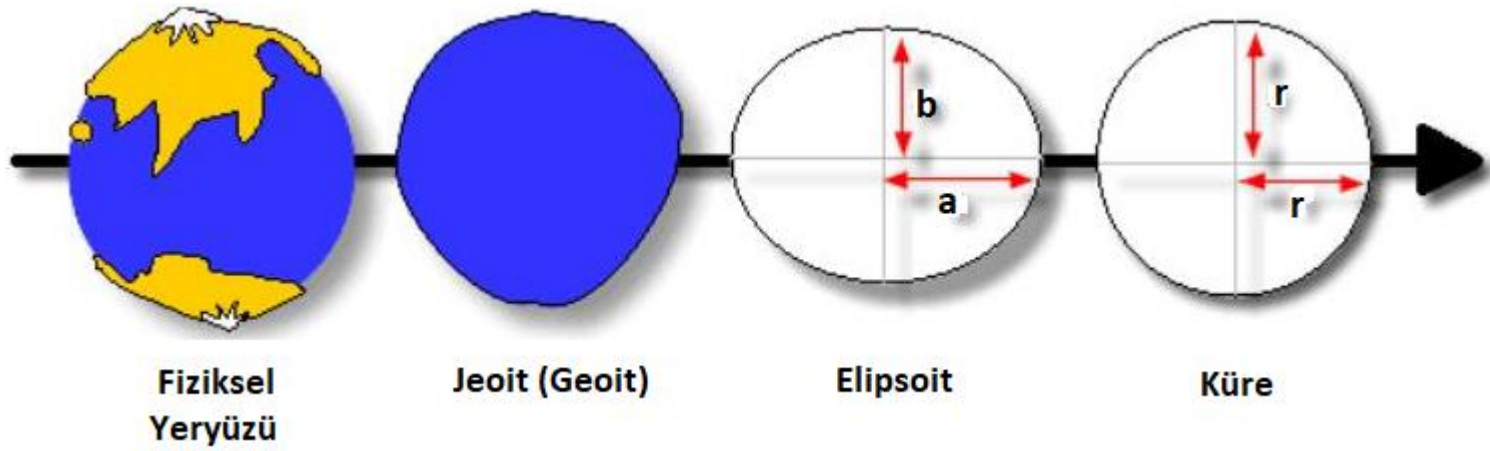


GPS ve Yükseklik



- GPS gözlemleri ile alıcı antenin yer merkezli-yer sabit (ECEF) Kartezyen Koordinatları (X,Y,Z) elde edilmektedir.
- Bu koordinatlar belirli bir referans elipsoidine dayalı olarak jeodezik/elipsoit koordinatlara (Enlem, Boylam, Elipsoidal Yükseklik) / (ϕ, λ, h) dönüştürülmektedir.
- GPS'de el edilen h : Elipsoidal Yükseklik, teorik bir yüksekliktir.
- Pratikteki mühendislik uygulamalarında, harita üretiminde, ulusal projelerde ise H : Ortometrik Yükseklik kullanılmaktadır.
- GPS'nin en önemli dezavantajlarından birisi elde edilen yükseklik bileşenin farklı olmasıdır.
- Bu nedenle GPS ile elde edilen elipsoidal yüksekliklerin (h), ortometrik yüksekliğe (H) dönüşümü için ölçü yapılan noktaya ait Jeoit(geoit) yüksekliğinin (N) bilinmesi gereklidir.



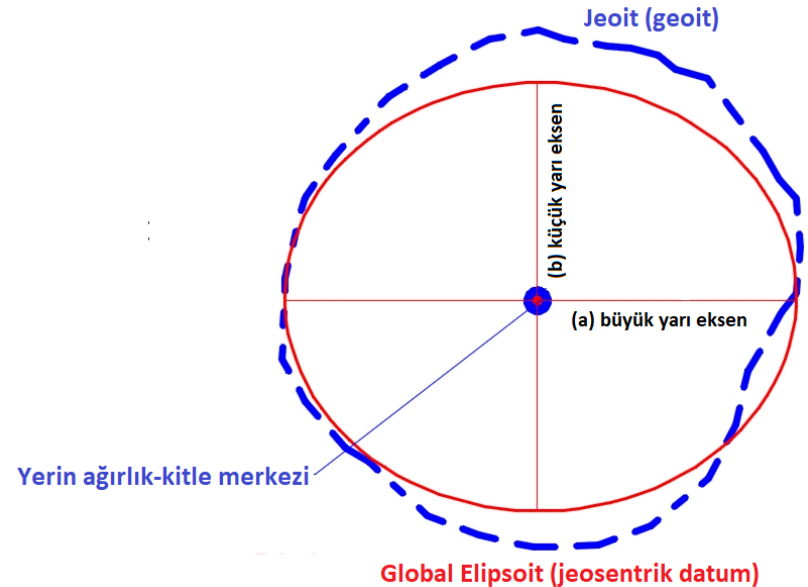


* **Elipsoit**, matematiksel olarak tanımlanmış teorik düzgün bir yüzey iken, **jeoit** ise fiziksel olarak tanımlanmış eş potansiyelli bir yüzeydir ve yer gravite alanındaki değişimleri yansıtmaktadır.

* Elipsoit yükseklikleri (h) geometrik, Ortometrik yüksekliklerin (H) ise fiziksel anlamı vardır.

*Jeoit ve elipsoit arasındaki fark
Jeoit yüksekliği (jeoit ondülasyonu) (N)
Bilinmektedir.

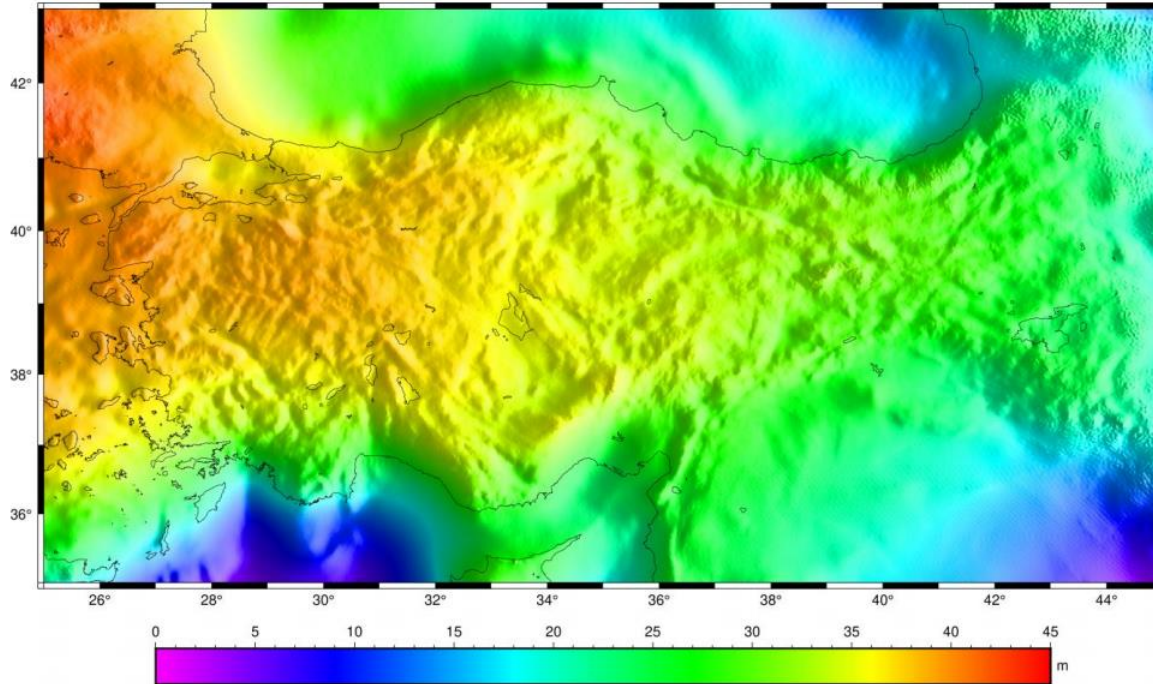
$$H=h-N$$



Türkiye Jeoidi (Geoidi)-2019

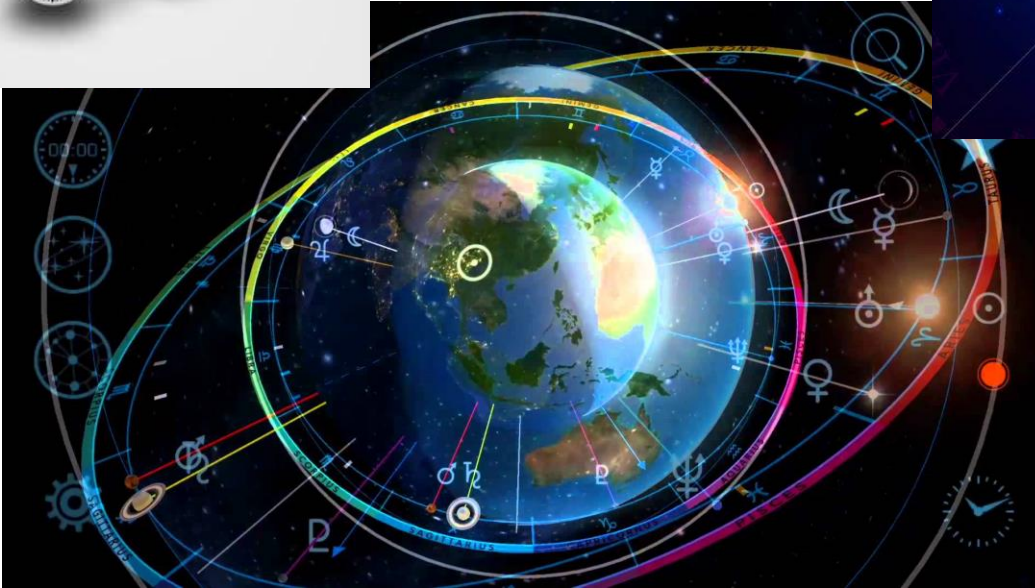
Kısaca TG olarak adlandırılan Türkiye Jeoidinin (Geoidinin) kullanıcılara sunumundan sorumlu kurum Harita Genel Müdürlüğü (HGM)'dür.

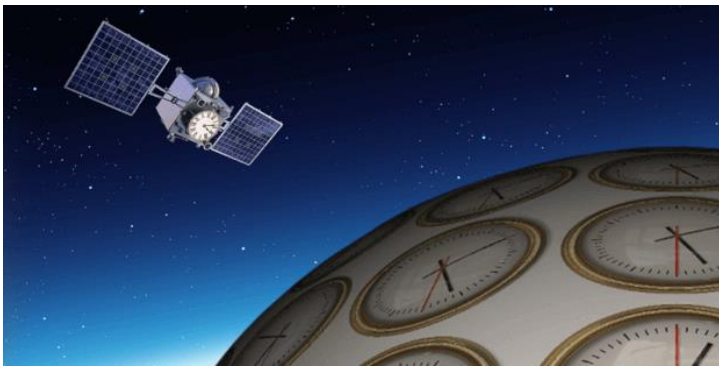
“Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi” projesi kapsamında göreceli (bağıl) ve mutlak gravimetri ölçümleri ile hassas geometrik nivelman ve GPS/GNSS gözlem çalışmaları 2016-2019 döneminde tamamlanmıştır. Böylece **TG-2019** isimli güncel Türkiye Jeoidi kullanıcılara sunulmuştur. Bir sonraki güncel jeoit olan TG-2020'nin hazırlanması çalışmaları HGM tarafından devam ettirilmektedir.



Türkiye Jeoidi – 2019 (TG-19)

GPS'DE KULLANILAN ZAMAN SİSTEMLERİ





GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU) bileşenlerinde farklı zaman sistemleri ve tanımlamaları kullanılmaktadır.

GPS Time (GPST)

GPS Time (GPST) is a continuous time scale (no leap seconds) defined by the GPS Control segment on the basis of a set of atomic clocks at the Monitor Stations and onboard the satellites. It starts at 0^h UTC (midnight) of January 5th to 6th 1980 (6.th0). At that epoch, the difference TAI-UTC was 19 seconds, thence GPS-UTC = n - 19^s. GPS time is synchronised with the UTC(USNO) at 1 microsecond level (modulo one second), but actually is kept within 25 ns.

GLONASS Time (GLONASST)

GLONASS Time (GLONASST) is generated by the GLONASS Central Synchroniser and the difference between the UTC(SU) and GLONASST should not exceed 1 millisecond plus three hours (i.e., $GLONASST = UTC(SU) + 3^h - \tau$, where $|\tau| < 1\text{ms}$), but τ is typically better than 1 microsecond. Note: Unlike GPS, Galileo or BeiDou, GLONASS time scale implements leap seconds, like UTC.

Galileo System Time (GST)

Galileo System Time (GST) is a continuous time scale maintained by the Galileo Central Segment and synchronised with TAI with a nominal offset below 50 ns. The GST start epoch is 0^h UTC on Sunday, 22 August 1999 (midnight between 21 and 22 August).

BeiDou Time (BDT)

BeiDou Time (BDT) is a continuous time scale starting at 0^h UTC on January 1st, 2006 and is synchronised with UTC within 100 ns (modulo one second).

Periodic Process	Time
Earth rotation	Universal Time (UT0, UT1, UT2) Greenwich Sidereal time (Θ)
Earth revolution	Terrestrial Dynamic Time (TDT) Barycentric Dynamical Time (BDT)
Atomic Oscillators	Temps Atomique International (TAI) Universal Time Coordinated (UTC) GPS, GLONASS, Galileo Reference Times

GPS'DE Kullanılan Zaman Sistemleri

Uzay jeodezisinde genel olarak 3 farklı zaman sistemi kullanılmaktadır.

- Dinamik Zaman
- Atomik Zaman
- Yıldız Zamanı

Dinamik Zaman Sistemi

Dinamik zaman sistemi, yerçekimi etkisindeki cisimlerin belli bir yerçekimi teorisine göre belli bir referans sistemindeki hareketlerini tanımlamak için kullanılmaktadır. GPS uydusu yörüngelerinin hesaplanmasında kullanılan dinamik zaman sistemine Yersel Dinamik Zaman (TDT) Sistemi denilmektedir. TDT yer gravite alanı içerisindeki hareket için düzenli bir zaman ölçeği oluşturmaktadır.

Atomik Zaman

Bilimsel çalışmalarda temel zaman ölçeği olarak Uluslararası Atomik Zaman (TAI) kullanılmaktadır. TAI' nin hesaplanmasından BIPM ve IERS sorumludur. TAI sürekli bir zaman ölçeğidir. TDT 'nin uygulamaya uygun şekli gibi de düşünülebilir. Bu nedenle aralarındaki ilişki,

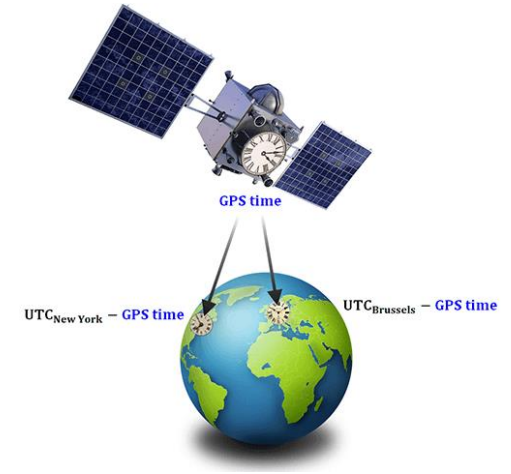
$$TDT = TAI + 32^s.184$$

olarak verilmektedir. TAI ile GPS zamanı arasında 19 saniyelik bir kayıklık vardır.

$$TAI = GPST + 19^s.00$$

Yıldız Zamanı

Yıldız zamanı yerin dönmesi ile ilişkilidir. Atomik saatler yokken eski dönemlerde zaman ölçüsü için yerin dönüşü temel alınıyordu. O zamanlar yıldız ve universal zaman sistemleri arasında dönüşüm yapabilen iki zaman sistemi kullanılıyordu. Yıldız ve UT zaman sistemleri atomik zaman ölçeği ile karşılaştırıldığında çok düzensiz olup, günümüzde TTRS ve TCRS sistemleri arasındaki dönüşümde açısal büyüklük olarak kullanılmaktadır.



Dinamik Zaman

- Dinamik zaman, belirli bir çekim teorisi ve referans ağındaki cisimlerin hareketini tanımlamak için kullanılır.
- Neredeyse tüm inersiyal referans ağlarının orjini, güneş sisteminin kütle merkezinde (barycentre) konumlanmıştır.
- Dinamik zamanda bu sistem içerisinde ölçülür ve TDB (Barycentric Dynamic Time - from the French Temps Dynamique Barycentrique) olarak isimlendirilir. Bugün gezegenlerin hareketlerinin hesaplanmasında TDB kullanılmaktadır.

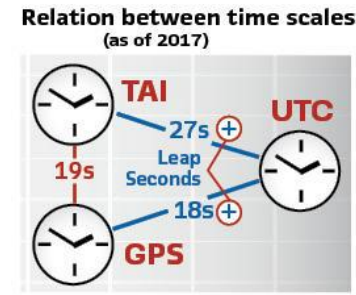
Dinamik Zaman

- $UT = \text{Dinamik zaman} - \Delta T$
- Formülü ile iki zaman arasında geçiş yapılabilir. Fakat ΔT 'nin kesin değerini tahmin etmek imkansızdır.
- Çünkü dünyanın düzensiz dönmesinin oranı önceden bilinmemektedir.
- GPS uydu yörüngelerinin hesaplamalarında kullanılan Dinamik zaman TDT (Terrestrial Dynamical Time) sistemidir.
- TDT, yer gravite alanı içerisindeki hareket için düzenli bir zaman ölçeği oluşturmaktadır.
- Uluslararası Astronomi Birliği'nin önerisi ile 1992 yılından bu yana TDT ifadesi yerine TT (Terrestrial Time) kullanılmaktadır.
- TT, kuramsal olarak jeoit üzerinde ideal bir saat tarafından ölçülebilen düzgün bir zaman ölçeğidir.

CAESIUM



Atomik Zaman



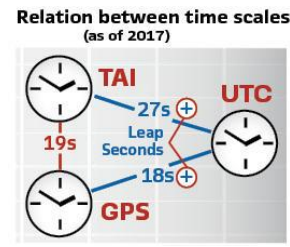
- Uluslararası Atomik Zaman (International Atomic Time – TAI), bugün dünyadaki başlıca zaman standardı, zaman ölçeğidir.
- Fransa-Paris'deki BIPM tarafından birçok ülkeden toplanan atomik saat verilerinin analizi ile elde edilmektedir.
- Dünyadaki tüm saat bilgilerinin birleştirilmiş hali olup, her bir çevresel ve relativistik etki için düzeltmeler getirilmiştir.
- Sürekli bir zaman ölçeği olup uygulamada TT (TDT)'yi tanımlamakta kullanılır. İki zaman sistemi arasındaki ilişki,
$$TT(TDT) = TAI + 32sn.184$$
- Başlangıcı 01.01.1958 tarihinde 0.00.00' da dünya zamanı ile çakışıktır. Atom saniyesi, sezyum 133 atomunun özel koşullarda 9 192 631 770 sayıda titreşimi için geçen süredir.

Atomik Zaman

- TAI sürekli bir zaman ölçeği olduğundan, yerin dönme hızı yavaşladığından güneş günü (evrensel zaman) ile uyuşumu sağlanmaz.
- Bu problem, TAI ile aynı hızda giden fakat periyodik olarak artık (leap) saniyelerle arttırılan evrensel düzenlenmiş zaman **UTC (Coordinated Universal Time)** tanımlanarak çözülür.
- 1972 yılından bu yana UTC atomik saatlerle elde edilir. UTC TAI ile aynı hıza sahip olup, yılda bir kere yapılan değerlendirmelerle UTC'ye 1 saniyelik düzeltme uygulanmakta yada uygulanmamaktadır.

TAI:	UTC:
6728D063	2012-11-04
1730728035	2012-309
13:47:15	13:46:40

Atomik Zaman



- ABD-USNO, GPS uyduları için kendi özel UTC sistemini oluşturmuştur. Buna UTC (USNO) adı verilmektedir.
- UTC (USNO) ve UTC arasındaki uyum 1 milisaniye mertebesinde.
- GPS uyduları tarafından yayınlanan zaman sinyalleri Colorado (ABD) daki ana denetim istasyonunda atom saati ile uyuşturulur.
- Dolayısıyla GPS sistemi zamanı UTC(USNO)'yu referans almaktadır.
- GPS sistem zamanı (GPST) 6 Ocak 1980 saat 0.0 için UTC(USNO) ile aynı kabul edilmiştir. Fakat UTC artık saniyeleri eklenmemiştir.
- Bu nedenle, GPST ile TAI arasında şöyle bir ilişki vardır:
$$\text{TAI} = \text{GPST} + 19.00 \text{ saniye}$$
- GPS uydularındaki tüm saatler GPS zamanına senkronize edilmiştir. Bu nedenle tüm GPS uydularında iki cesium ve iki rubidium saati mevcuttur. GPS sistemi zamanı ABD-USNO'daki ana saate bağlanmıştır.

$$\text{UTC (USNO)} = \text{GPST} \pm \text{leap seconds}$$



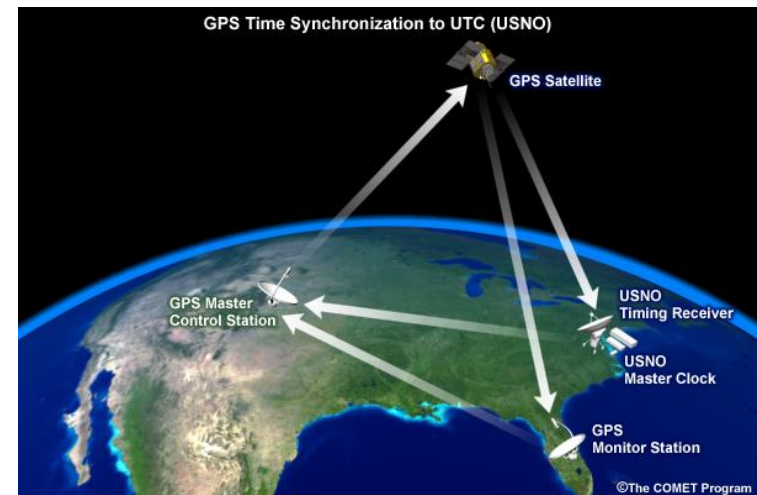
The United States Naval Observatory (USNO)

Astrometry

Astronomical Applications

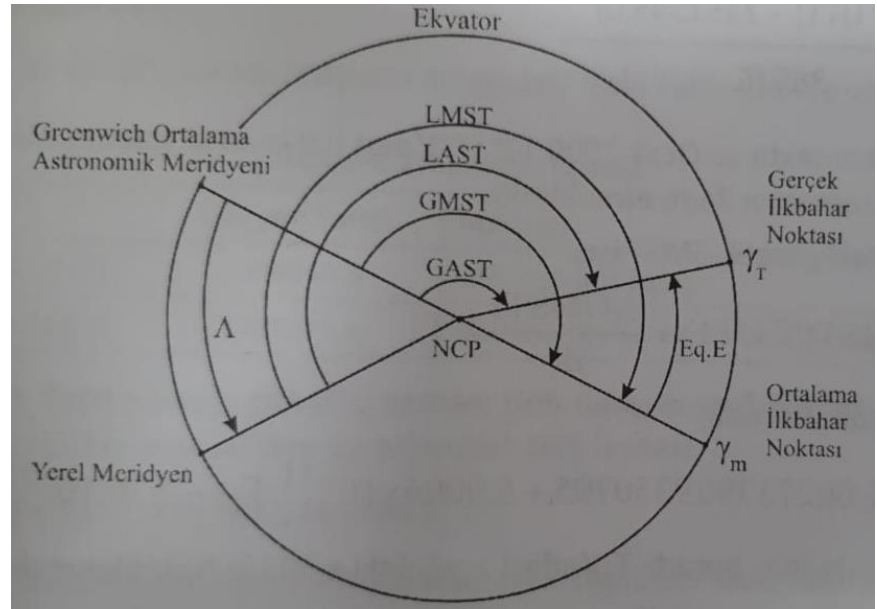
Earth Orientation

Precise Time



Yıldız Zamanı

- Sabit bir yıldızın saat açısı yıldız zamanı olarak tanımlanmaktadır.
- Yıldız zamanında, yıldız yerine hareketi bilinen ilkbahar noktası kullanılmaktadır.
- İlkbahar noktasının sadece presesyon sonucu hareketi ile aldığı konuma ortalama ilkbahar noktası; ortalama ilkbahar noktasının yerel meridyene saat açısına ortalama yıldız zamanı, Greenwich meridyenine göre saat açısına Greenwich Ortalama yıldız zamanı (GMST) denir.



LAST: Local Apparent Sideral Time

Presesyon ve nutasyon düzeltmesi getirilmiş ilkbahar noktasının yerel saat açısına görünen yıldız zamanıdır.

GAST: Greenwich Apparent Sideral Time

Saat açısı Greenwich ortalama meridyeninden itibaren düşünülürse buna Greenwich görünen yıldız zamanı denir.

LMST: Local Mean Sideral Time

GMST: Grennwich Mean Sideral Time

Yukarıdaki tanımlamalar düşünüldüğünde ortalama ilkbahar noktasına göre açısal büyüklükler elde edilirse, bunlara LMST ve GMST denir.

GAST ile GMST arasındaki ilişki Ekinoks denklemi olarak bilinmektedir. Bu fark en çok 1 saniye olmaktadır.

$$Eq.E = GAST - GMST = LAST - LMST = \Delta\psi \cdot \cos(\epsilon + \Delta\epsilon)$$

Yıldız Zamanı

- Ortalama ilkbahar noktasının nutasyon sonucu hareketi ile aldığı konuma gerçek ilkbahar noktası; gerçek ilkbahar noktasının yerel meridyene saat açısına gerçek yıldız zamanı, Greenwich meridyenine göre saat açısına Greenwich gerçek yıldız zamanı (GMST) denir.
- Yıldız zamanı yerin dönmesi ile ilişkilidir.
- Atomik saatlerin olmadığı dönemlerde, zaman ölçümü için yerin günlük dönüşü temel alınarak elde edilmiştir.
- Atom zamanları ile yıldız zamanlarını karşılaştırdığımız zaman, yıldız zamanları çok düzensiz kalmaktadır.
- Yıldız zamanları günümüzde TTRS ile TCRS sistemleri arasındaki dönüşümlerde kullanılmaktadır.

Yıldız Zamanı

- Güneşin yer etrafındaki hareketi düzensiz olduğu için, ekvator üzerinde sabit bir hızla hareket eden hayali bir güneş tanımlanmıştır. Bu hayali Güneş'in saat açısı UT (Universal Time) olarak adlandırılmıştır.
- Gök ekvatoru üzerinde hareket eden; hızı, gerçek güneşin ekliptik üzerinde bir yıllık hızının ortalaması olan sanal güneşe **ortalama güneş** denir.
- UT (Universal Time) zaman ölçeği güneşin günlük hareketi ile ilintili olup çok sayıdaki gözlem evinden, yıldız geçişlerinin gözlenmesi sonucunda anlaşılabilir. *(UTC'den farklı bir kavramdır, UTC bir atomik zaman ölçeğidir)*
- Yapılan gözlemler sonucunda UT'den sonra UT0, UT1, UT2 ve UTC elde edilmektedir.
- Burada yapılan gözlemler gerçek kutba dayanmaktadır.
- Bilindiği gibi gerçek kutup hareketi nedeniyle yer değiştirmektedir. Bunun için yapılan gözlemler CIO(Conventional International Origin) indirgenir, kutup gezinmesi nedeniyle düzeltme getirilmiş Universal zamana UT1 denilmiştir.

Sivil amaçlı bir zaman sisteminin devamlılığını sağlamak için TAI-UTC (leap seconds) farkları hesaplanıp yayımlanmaktadır. Böylece, UT1-UTC farkı kullanılarak atomik zaman ile yıldızın saat açısı arasında ilişki kurulmakta ve yerin dönüşündeki düzensiz değişimler tanımlanmaktadır. UT1-UTC farkı 1 saniyeden azdır.

Jülyen Gün (JD:Jülian Date) Sayısı ve Hesabı

- Jülyen günü (JD), 1 Ocak 4713 (MÖ) 12.00 UT epoğundan itibaren geçen ortalama güneş günü sayısıdır.
- GPS zamanı (GPST), GPS saniyesi ve GPS haftası olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla JD'den yararlanarak GPS haftası hesaplanmaktadır.

$$\text{GPS Haftası} = \text{Tamsayı} [(JD - 2444244.5) / 7]$$

- JD, astronomi kataloglarındaki veri tabloları yardımıyla yada doğrudan hesaplanmaktadır. JD'nin doğrudan hesaplanması yöntemi aşağıdadır:

$JD = \text{Tamsayı} (365,25 \cdot Y) + \text{Tamsayı} (30,6004 \cdot (M+1)) + D + UT/24 + 1720981,5$
eşitliği ile verilmekte olup burada,
Y=yıl, M=ay ve D=gün anlamında kullanılmıştır.
Buna göre,
 $Y = Y - 1$ ve $M = M + 12$ eğer $M \leq 2$
 $Y = Y$ ve $M = M$ eğer $M > 2$

- Standart Epoklar

Sivil Tarih	Jülyen Tarihi	Açıklama
6 Ocak 1980 0.00 UT	2444244.5	GPS Standart Epoku
1 Ocak 2000 12.00 UT	2451545.0	Günümüzde kullanılan standart epok (J2000.0)