

Terimler: (Terimler Büyük ölçekli harita ve harita bilgileri üretim yönetmeliğinden – BÖHHBÜY- alınmıştır.)

ETRF (European Terrestrial Reference Frame): Avrupa Yersel Referans Çerçevesi.

GNSS (Global Navigation Satellite Systems): Küresel Seyrüsefer Uydu Sistemleri (GPS, GLONAS, GALILEO ve benzeri).

GRS80 (Geodetic Reference System-1980): Jeodezik Referans Sistemi 1980. (Uluslararası Jeodezi ve Jeofizik Birliğinin 1979 yılında benimsediği aşağıda geometrik ve fiziksel parametreleri verilen referans elipsoidi (Plag, 2006):

$a = 6378137.0$ m (Dünyanın ekvator dairesinin yarıçap değeri),

$b = 6356752.3141$ m (küçük yarı eksen – kutup yarıçapı)

$e^2 = 0.00669438002290$ (birinci eksentrisite değeri),

$f = 1/298.257222101$ (basıklık değeri),

$J_2 = 0.00108263$ (dinamik form faktörü),

$\omega = 7292115 \times 10^{-11}$ rad s⁻¹ (Dünyanın açısal hızı),

$GM = 398600.5 \times 10^9$ m³ s⁻² (Yer merkezli yer çekim sabiti).

GZK: Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK = Real Time Kinematik)

ITRF (International Terrestrial Reference Frame): Uluslararası Yersel Referans Çerçevesi.

ITRF 96: 1996 yılında güncellenmiş ITRF = Datum

RINEX (Receiver Independent Exchange Format): Alıcıdan Bağımsız Değişim Formatı

TUDKA-99 (Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı-1999): I. ve II. derece nivelman ağının gravite ölçüleri ile birlikte Antalya ortalama deniz seviyesine (sıfır yüzeyi) göre 1999 yılında dengelemesiyle belirlenen Helmert ortometrik yüksekliklerinden oluşan düşey referans çerçevesi.

TUREF: Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi (Koordinatları ITRF96 ile 2005.0 referans epoğunda çakışık ve koordinatlarının zamana göre doğrusal değişimi -hızlar- ITRF96'nın Sıfır Net -Dönüklüğüne (No-Net-Rotation) göre tanımlı dört boyutlu ulusal datumdur.]

TUSAGA-Aktif: Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı-Aktif (GZK hizmeti veren GNSS Ağı)

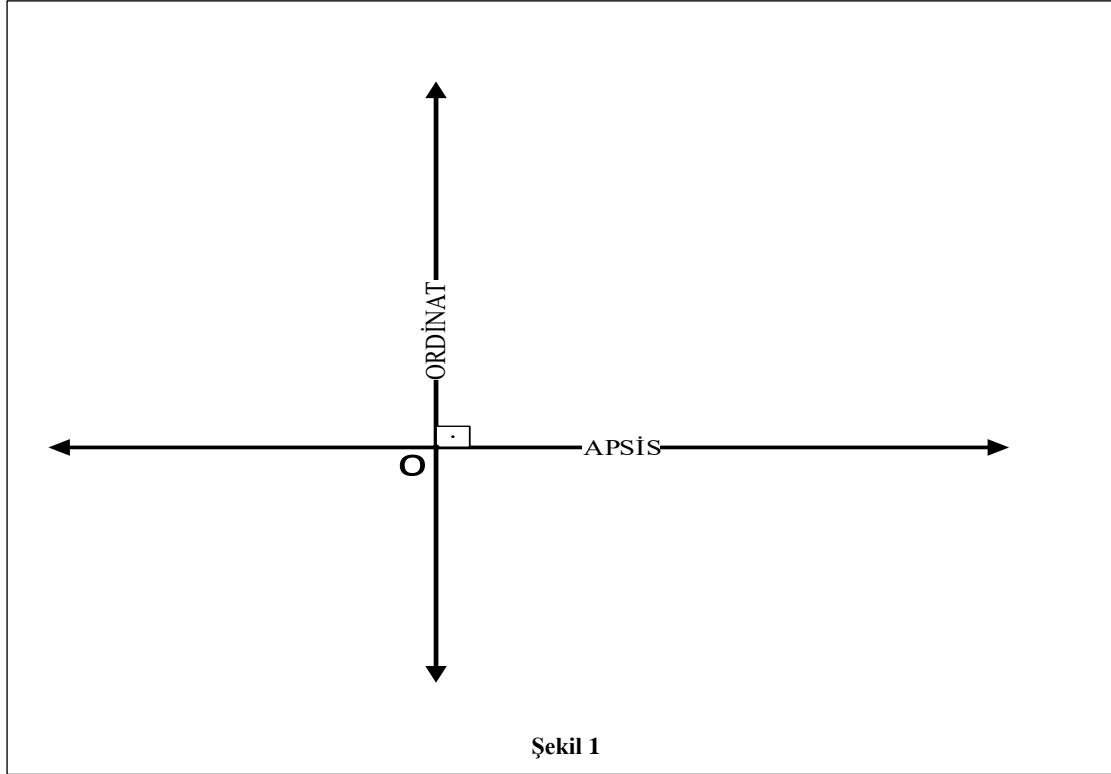
TUTGA: Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı

BÖHHBÜY: Büyük ölçekli harita ve harita bilgileri üretim yönetmeliği.

Koordinat Sistemleri

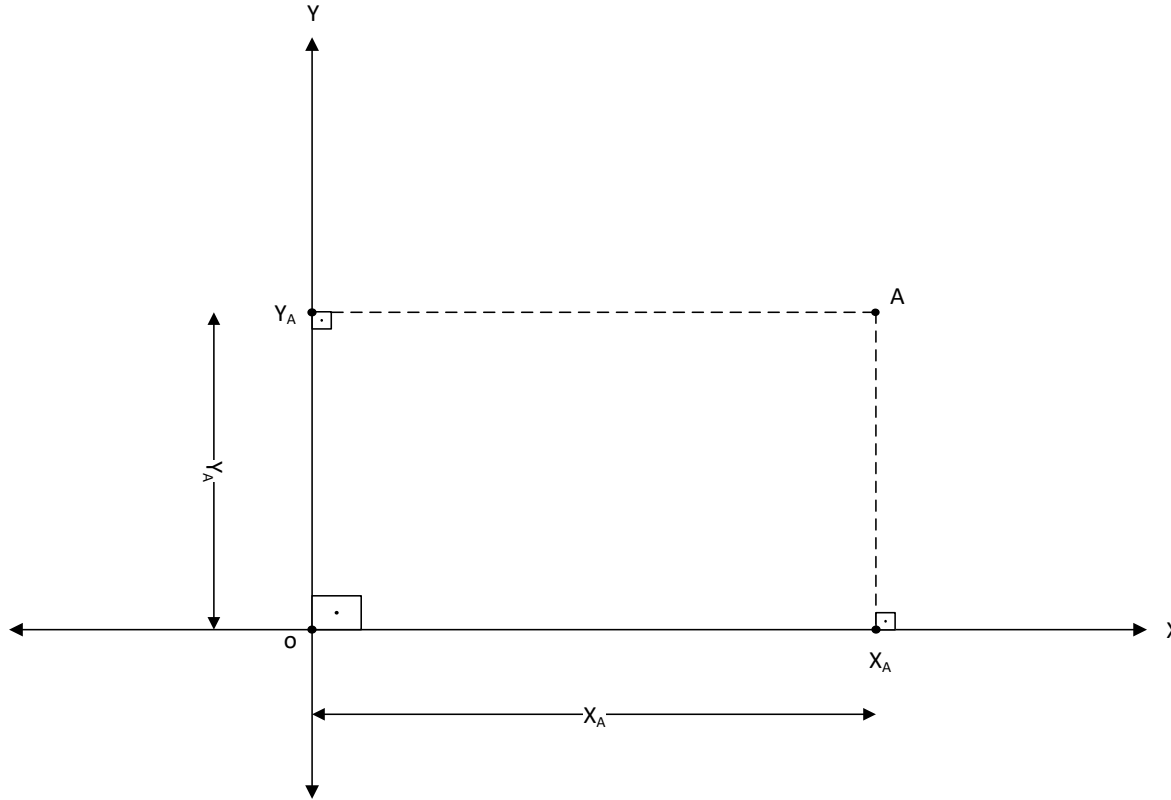
Fransız Filozof ve matematikçi olan René Descartes, uzaydaki bir noktayı numaralar seti olarak işaretleyebilmeyi ve cebirsel denklemleri iki boyutlu koordinat sisteminde geometrik şekiller olarak göstermeyi (ve tam tersini) sağlayan Kartezyen koordinat sistemini bulmuş ve ismini vermiştir (Makshud, 2017).

Koordinat, bir yüzey üzerinde veya uzayda bir noktanın yerini bulmaya yarayan veridir (Türk Dil Kurumu, 2019). Bir noktanın bir düzlem üzerindeki konumu, koordinat eksenleri olarak anılan birbirleriyle dik kesişen (kesiştikleri nokta orijin olarak adlandırılır) koordinat eksenleriyle belirlenir (Makshud, 2017). Bir diğer deyişle nokta konumu, Descartes'in tanımladığı 2 boyutlu Kartezyen koordinat sistemi üzerinde belirlenir.



Şekil 1 birbirleriyle dik kesişen eksenlerin oluşturduğu koordinat sistemini tasvir etmektedir. O noktası iki eksenin kesişim yeri olan orijin noktasını temsil eder. Sağa ve sola doğru yön belirten (kuvvet değerleri) eksen *Apsis*; yukarı ve aşağıya yön belirten eksen *Ordinat* olarak adlandırılır. Apsis eksenine orijin noktasından itibaren sağa doğru pozitif değerli şekilde artarken, ordinat eksenine orijin noktasından itibaren yukarı doğru pozitif değerli artış gösterir.

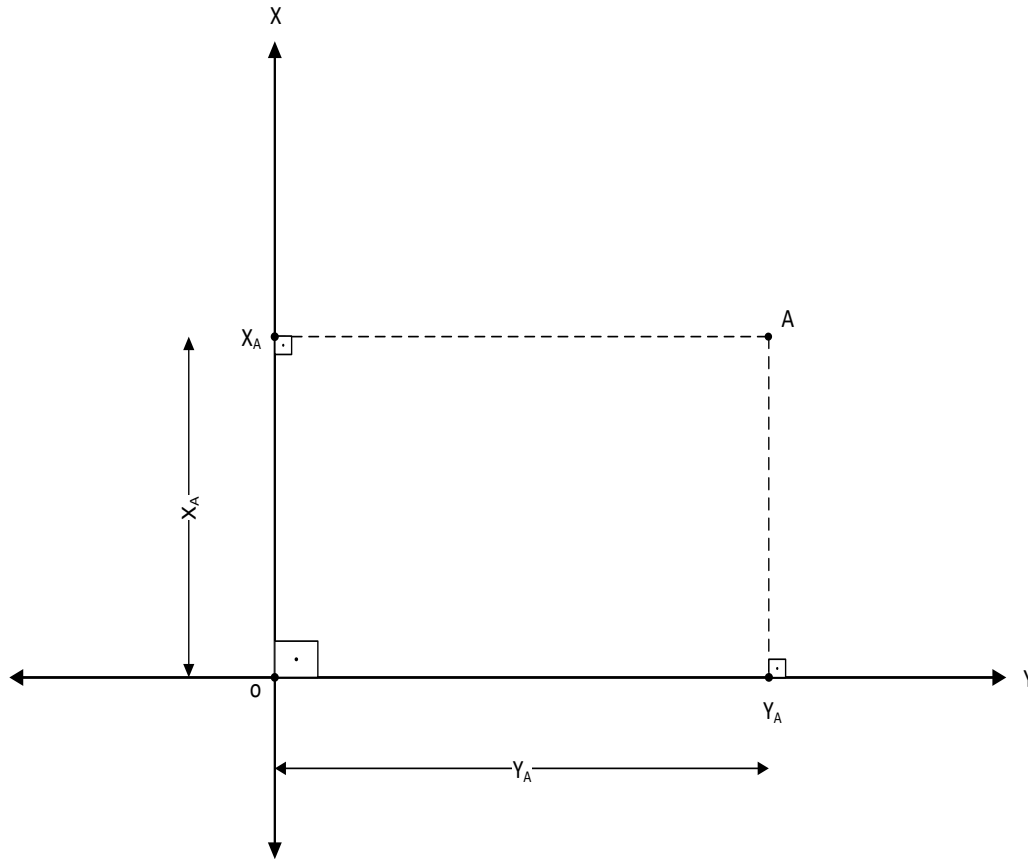
Geometride Kullanılan İki Boyutlu Kartezyen Sistem (Yatay Düzlem)

GEOMETRİDE KULLANILAN İKİ BOYUTLU KARTEZYEN SİSTEM
(YATAY DÜZLEM)

Şekil 2

Şekil 2 Geometride kullanılan iki boyutlu Kartezyen koordinat sistemini tasvir etmektedir. Kartezyen kelimesi eksenlerin birbirine dik olmasını ifade eder. İki boyutlu Kartezyen koordinat sistemi aynı zamanda yatay düzlem olarak adlandırılır. Şekil 2 tasvirinde ordinat eksenini Y ile Apis eksenini X ile gösterilmektedir. Şekil 2 tasvirinde yatay düzlemdeki bir A noktasının konum değerini ifade eden koordinatlar olan X_A ve Y_A değerlerinin, A noktasından eksenlere inilen diklerle oluştuğu görülmektedir. X_A ve Y_A koordinat değerleri A noktasının her bir ekseninde orijin noktasına olan uzaklığıdır. Koordinat değerleri metre uzunluk biriminde ifade edilir.

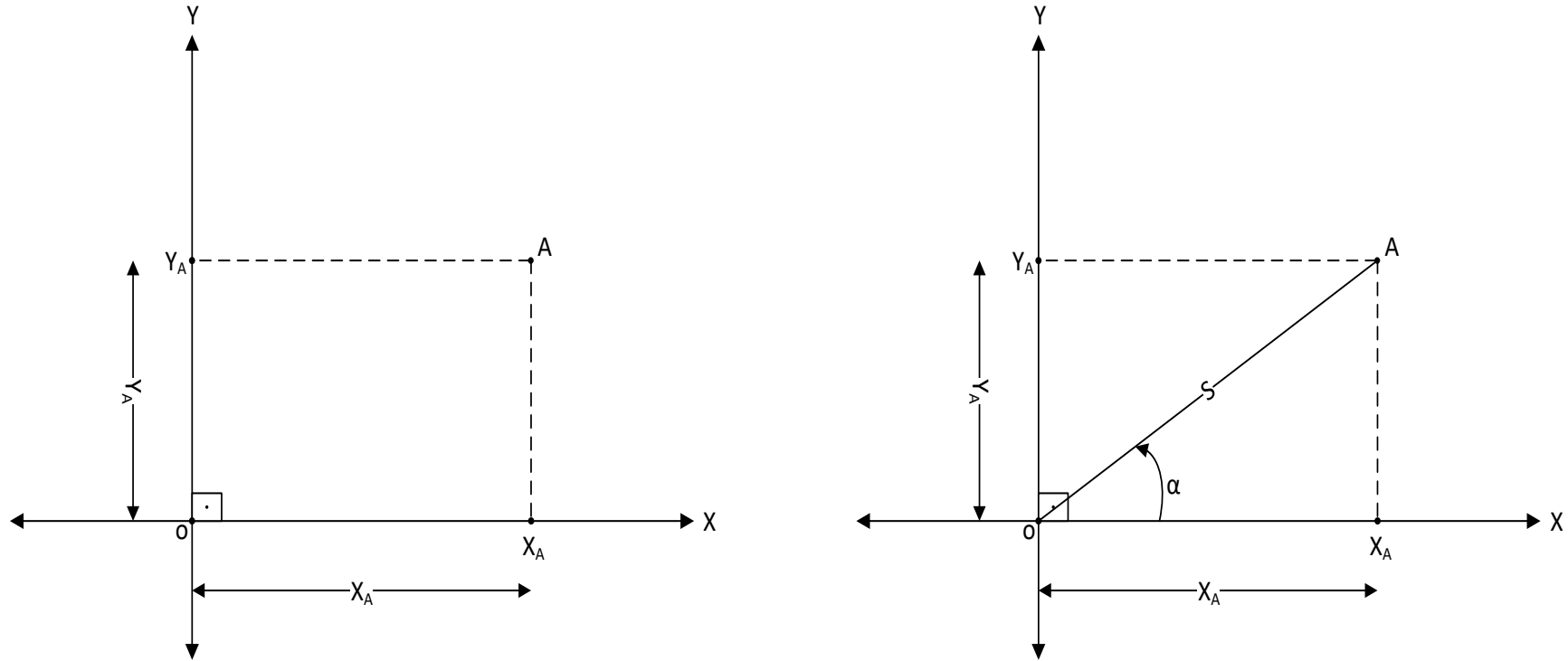
Haritacılıkta Kullanılan İki Boyutlu Kartezyen Koordinat Sistemi (Yatay Düzlem)

HARİTACILIKTA KULLANILAN İKİ BOYUTLU KARTEZYEN KOORDİNAT SİSTEMİ
(YATAY DÜZLEM)

Şekil 3

Şekil 3 Haritacılıkta kullanılan iki boyutlu Kartezyen koordinat sisteminin tasviri vardır. Geometride kullanılan koordinat sisteminden farklı olarak sağa doğru artan koordinatlar Y ekseninde; yukarı doğru artan koordinatlar X ekseninde gösterilmektedir. Şekil 4 ve Şekil 5 incelendiğinde geometride kullanılan Kartezyen koordinat sistemi ile haritacılıkta kullanılan Kartezyen koordinat sistemi arasındaki fark daha kolay anlaşılacaktır. Haritacılıkta kullanılan takeometrik ölçüm aletlerinde oluşan yatay düzlemde ki yatay açının artışı saat yönünde olduğu için sadece X ile Y eksenlerinin yerleri değişmiştir. Açılar her iki sistemde de X ekseninden Y eksenine doğru artmaktadır.

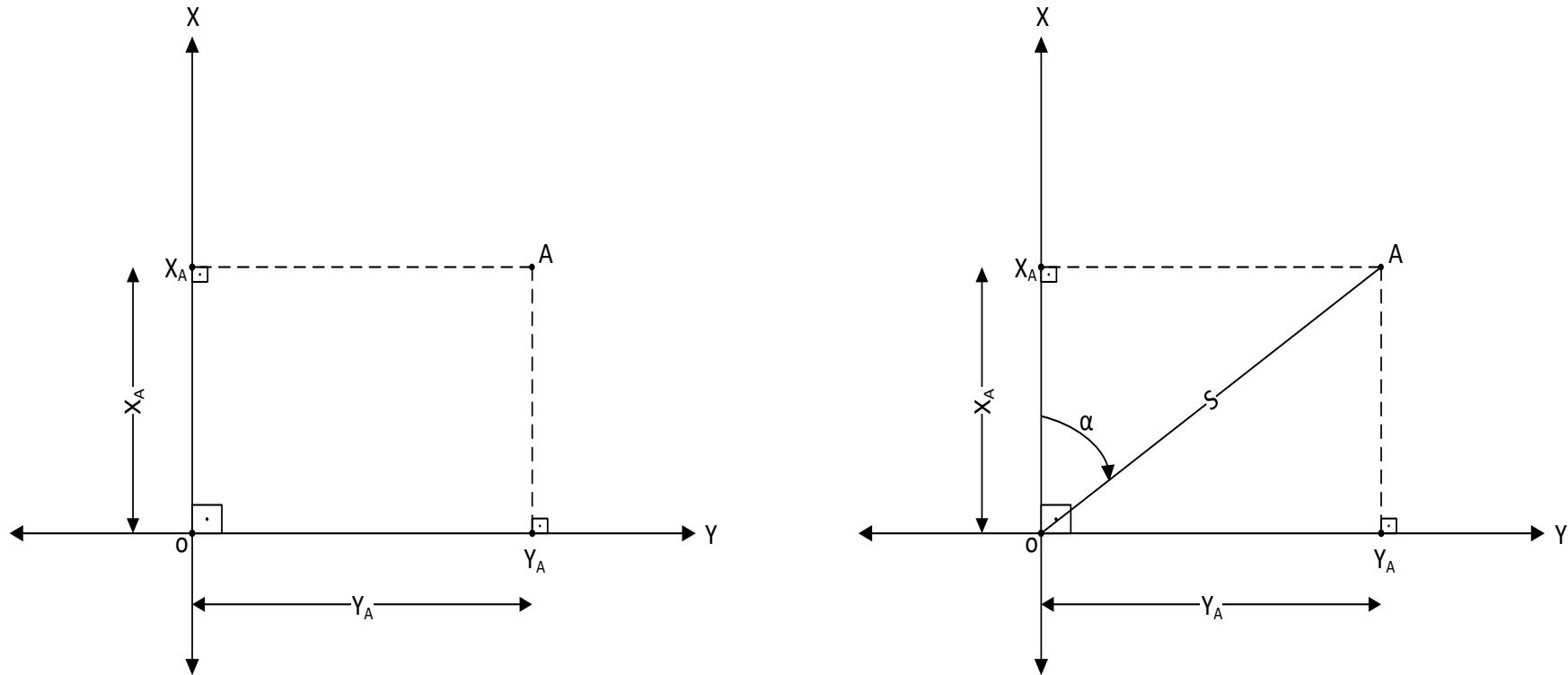
Haritacılıkta Kullanılan 2 Boyutlu Kartezyen Koordinat Sisteminin Geometride Kullanılardan Farkı

GEOMETRİDE KULLANILAN İKİ BOYUTLU KARTEZYEN KOORDİNAT SİSTEMİ
(YATAY DÜZLEM)

Açı saatin ters yönünde, X ekseninden Y eksenine doğru artıyor.

Şekil 4

HARİTACILIKTA KULLANILAN İKİ BOYUTLU KARTEZYEN KOORDİNAT SİSTEMİ (YATAY DÜZLEM)

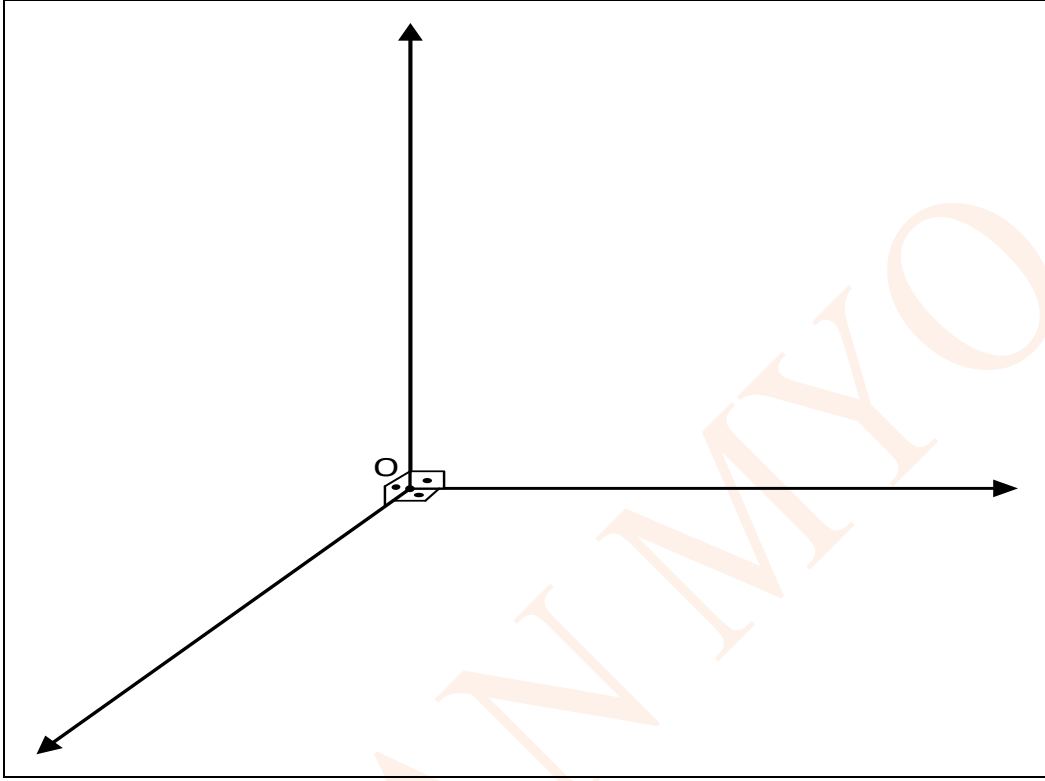


Açı saat yönünde ve X ekseninden Y eksenine doğru artıyor.

Şekil 5

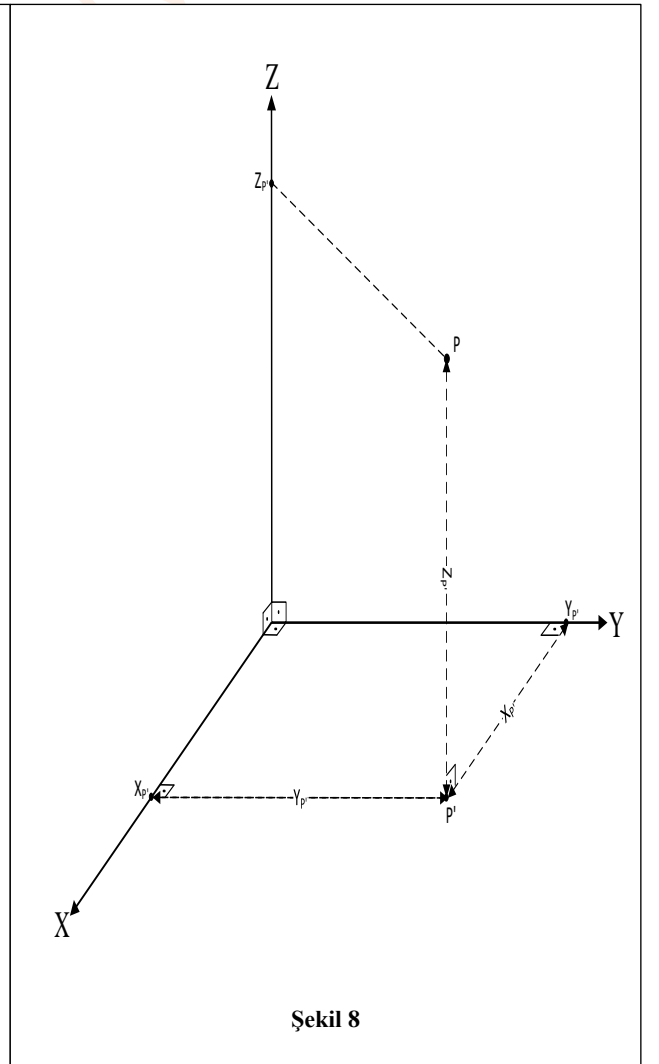
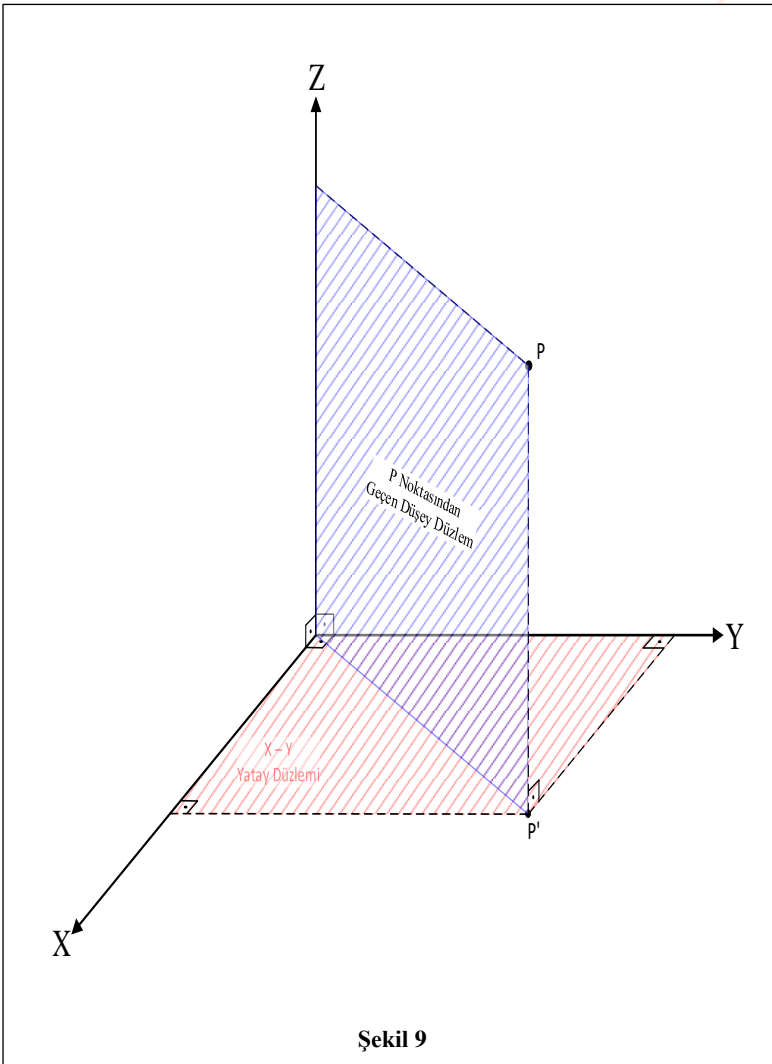
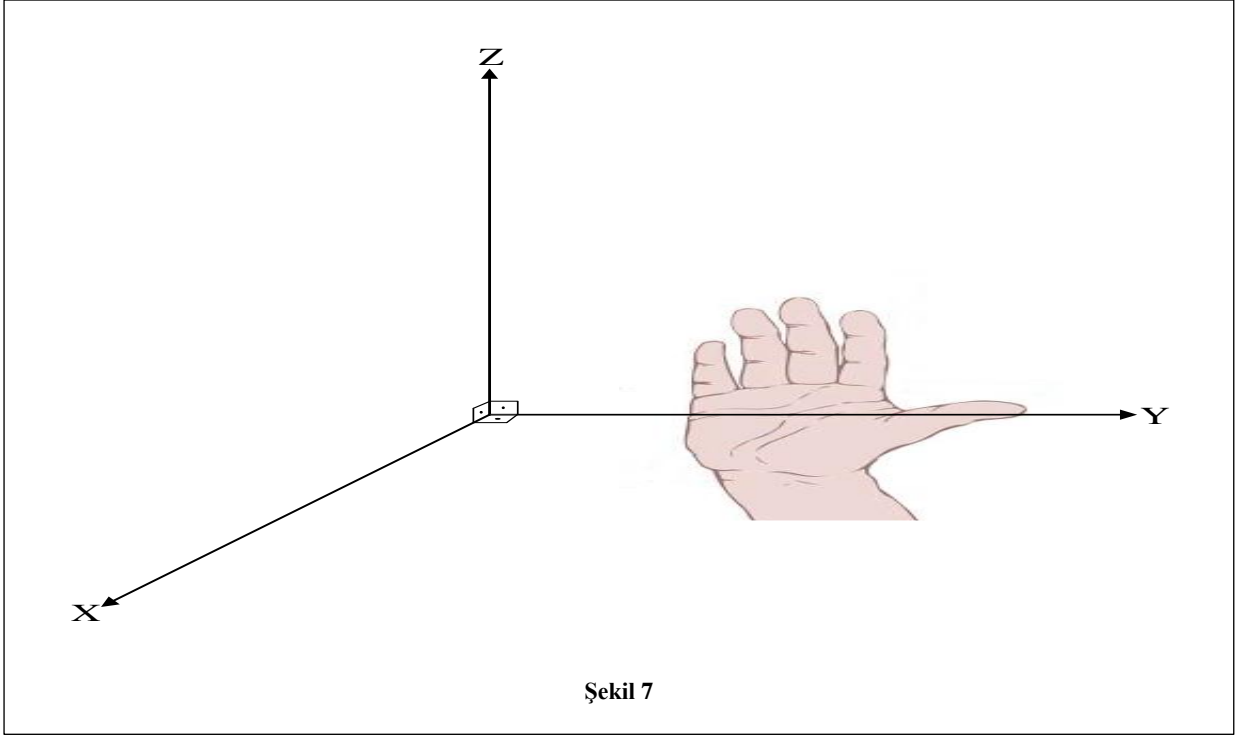
Reference Frame (Referans Çerçevesi - Sistemi) ve 3 Boyutlu Kartezyen Koordinat Sistemi

Referans çerçevesi, objelerin 3 boyutlu uzaydaki hareketini algılamada kullanılan bir fiziki tabiridir.



Şekil 6 Referan Çerçevesi tasviri

Coğrafik objeleri sadece 2 boyutlu bir koordinat sistemi ($X - Y$ yatay düzlemi) kullanarak gerçekteki konum değerlerini belirleyemeyiz. Nokta konum değerlerini ifade etmek için 3 boyutlu Kartezyen koordinat sisteminin kullanılması gerekir. Referans çerçevesi 3 boyutlu Kartezyen koordinat sisteminin şeklini oluşturmaktadır. Şekil 6 koordinat sisteminin eksenleri belirtilmeden tasvir edilmiştir. Eksenler sağ el kuralına göre belirlenir. Şekil 7 sağ el kuralına göre referans çatısında koordinat eksenlerinin tanımlanması için kullanımı tasvir etmektedir. *Sağ el kuralına göre, el avuç içi Y eksenini kavrayacak ve sağ el baş parmağı Y eksenini artış yönünü gösterecek şekilde yerleştğinde diğer eksenlerin artış yönleri belirlenmiş olacaktır.* X eksenini, Y eksenine dik olacak şekilde aynı düzlemde oluştur. Z eksenini X ve Y eksenlerinin kesişim noktası olan O (orijin noktası) noktasından, X ve Y eksenlerinin oluşturduğu yatay düzleme dik olacak şekilde oluştur (Şekil 7). Z eksenini kullanıma göre düşey doğrultu, Nadir, çekül doğrultusu olarak da adlandırılır.

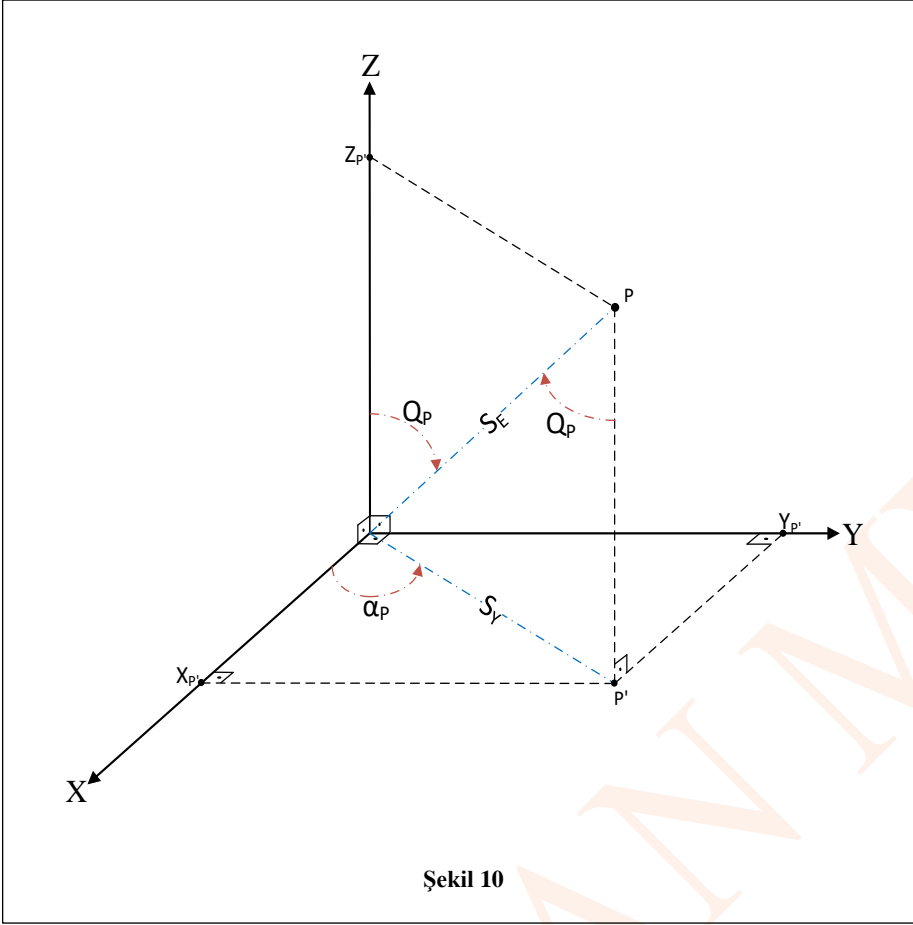


Şekil 9, 3 boyutlu Kartezyen koordinat sisteminde bir P noktasının koordinatlarının eksenler üzerindeki temsili yapılmıştır. Şekil 8 incelendiğinde koordinat sisteminde P noktasının eksenler üzerindeki koordinatlarını bulabilmek için iki farklı düzlem kullanılmıştır. Z eksenini üzerindeki koordinatı bulabilmek için P noktasından geçen düşey düzlem kullanılmıştır. P noktasından geçen düşey düzlemde P noktasından Z eksenine dik inilmiştir. X ve Y eksenini üzerindeki koordinatları bulabilmek için P noktasından, X – Y eksenlerinin oluşturduğu yatay düzleme dik inilmiş ve yatay düzlemi kestiği nokta olan (Şekil 8’de P' noktası) P' noktasından X ve Y eksenlerine dik inilerek P noktasının yatay koordinatları elde edilmiştir. 3 Boyutlu Kartezyen Koordinat Sistemi, haritacılıkta noktaların harita düzlemine aktarılması için, ölçüm yapılan yeryüzündeki referans noktası koordinat sisteminin başlangıcı olacak şekilde ve dünyanın ağırlık merkezini koordinat sisteminin merkezi olacak şekilde tüm dünyada temel bir koordinat sistemi olacak şekilde ayrı ayrı kullanılmaktadır.



Büyük ölçekli harita ve harita bilgileri üretim yönetmeliği (BÖHNBÜY) Madde 10, Türkiye’de kullanılan referans çerçevesinin Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi olarak tanımlanmış ve parametrelerini belirlemiştir.

Kutupsal Koordinat Sistemi



Şekil 10

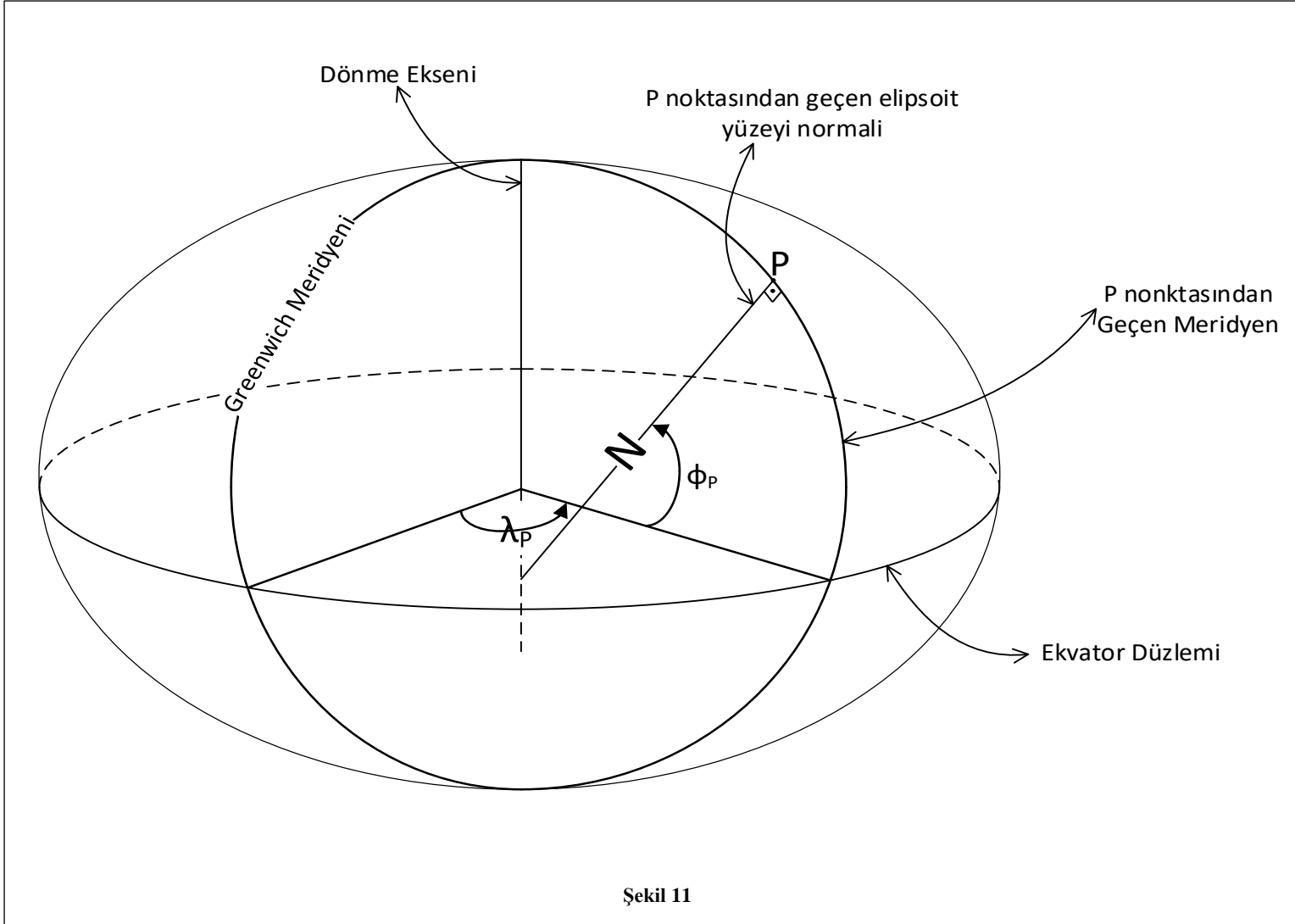
Şekil 10 kutupsal koordinat sistemine göre P noktasının koordinat parametrelerini göstermektedir. P noktasının kutupsal koordinat sistemine göre yatay düzlemdeki koordinatları α_p yatay açısı (semt açısı) ve S_Y yatay mesafesidir. P noktasının kutupsal koordinat sistemine göre düşey düzlemdeki koordinat parametreleri Q_P düşey açısı ve S_E eğik mesafesidir. Kutupsal koordinat sistemi noktaların zeminde tespit edilmeleri (aplikasyon işlemi - yer tespiti) için kullanılan sistemdir. Bu işleme haritacılıkta nokta aplikasyonu denilmektedir.

3 Boyutlu Kartezyen koordinat sistemi ile Kutupsal koordinat sistemi arasında ki bağlantı:

$$\begin{aligned} S_Y &= S_E * \sin Q_P \\ X_{P'} &= S_Y * \cos(\alpha_P) \\ Y_{P'} &= S_Y * \sin(\alpha_P) \\ Z_P &= S_E * \cos(Q_P) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_Y &= \sqrt{(X_{P'}^2 + Y_{P'}^2)} \\ Q_P &= \tan^{-1}(S_Y/Z_P) \\ \alpha_P &= \tan^{-1}(Y_{P'}/X_{P'}) \end{aligned}$$

Coğrafi Koordinat Sistemi



Şekil 11 Coğrafi koordinat sisteminin döl elipsoit yüzeyi üzerindeki tasviridir. Dünya yerine referans yüzey olarak en uygun düzgün geometrik yüzey döl elipsoittir. Sonraki konularda ki anlatımlarda paralellik sağlaması için Coğrafi Koordinat sistemini ifade etmek amacıyla tasvirde döl elipsoit seçilmiştir. Coğrafi koordinat sisteminde koordinat parametreleri enlem (ϕ) ve boylam (λ) değerlerinin derece açı birimindedir. Alman literatüründe enlem “Breite” (enlem) ve “Länge” (Boylam) kelimelerinin baş harfleri kullanılarak *B* ve *L* harfleriyle de ifade edilir (TORGE, 1991). P noktasının Enlem koordinatı (ϕ_P), P noktasından geçen meridyen yüzeyi üzerinde ki, P noktasının elipsoit normalinin ekvator düzlemi arasındaki açı değeridir.

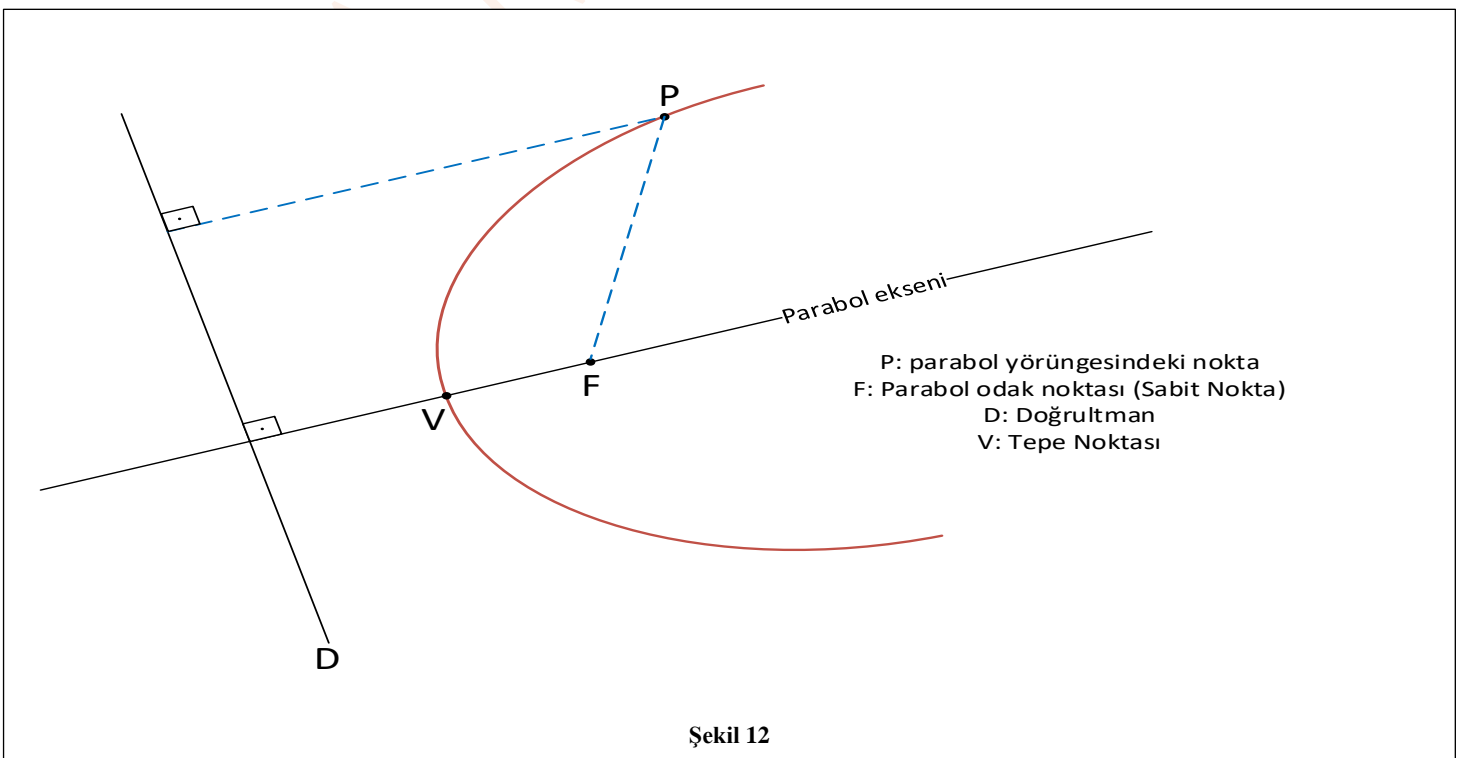
P noktasının Boylam Koordinatı (λ_P), boylam koordinatının başlangıç meridyen düzlemi olarak kabul edilen Greenwich Meridyen düzlemi ile P noktasından geçen meridyen düzleminin arasında kalan ekvator düzlemindeki açı değeridir. Enlem koordinatları ekvator düzleminde 0° (sıfır derece) değeri olacak şekilde bu düzlemden itibaren kuzeye doğru pozitif (+) olarak artarken, güneye doğru negatif (-) değer fakat mutlak artış gösterir. Enlem değerleri, 0° ile $+90^\circ$ aralığında kuzey enlem; 0° ile -90° aralığında güney enlem değerleri arasındadır. Boylam koordinatları Greenwich başlangıç meridyeni 0° (sıfır derece) değeri olacak şekilde bu düzlemden doğuya doğru pozitif (+) olarak artarken, batıya doğru negatif (-) değer fakat mutlak artış gösterir. Boylam değerleri 0° ile $+180^\circ$ aralığında doğu boylam; 0° ile -180° aralığında batı boylam değerleri arasındadır.

Şekil 11 dünya yerine referans yüzeyi olarak kullanılan dönел elipsoidin temsili şeklini vermiştir. Şekil de dikkat edilmesi gereken P noktasının dönел elipsoit üzerinde olmasıdır. P noktasının düzlem harita üzerine aktarılması için bir projeksiyon kullanılması gerekecektir. Projeksiyon işlem aşamalarında matematiksel ve geometrik işlem adımlarında elipse dair bazı detaylı bilgilerin bilinmesi gerekmektedir. Bir sonraki konuda elipse dair bilgiler aktarılacaktır.

Parabol, Elips, Elipsoit ve Elips Parametreleri

Harita yapımı amaçlı kullanılan projeksiyonlarda geoit yerine kullanılan referans yüzeyi elipsoit, düzgün geometrik şekillerden elipsin bir türevidir. Dünyanın çeşitli bölgelerinde kullanılan referans elipsoidi seçimi, tanımlanan yerel geoitten etkilenmiştir, fakat büyük ölçekli harita projeksiyonları geoit değil referans elipsoidine uyacak şekilde tasarlanmıştır (Snyder, 1987). Hesaplamalarda kullanılacak elipsoit için ilk önce düzgün geometrik şekil olan elipsin nasıl oluştuğunu elipse dair parametrelerin kullanım amaçlarının bilinmesi gereklidir.

Parabol



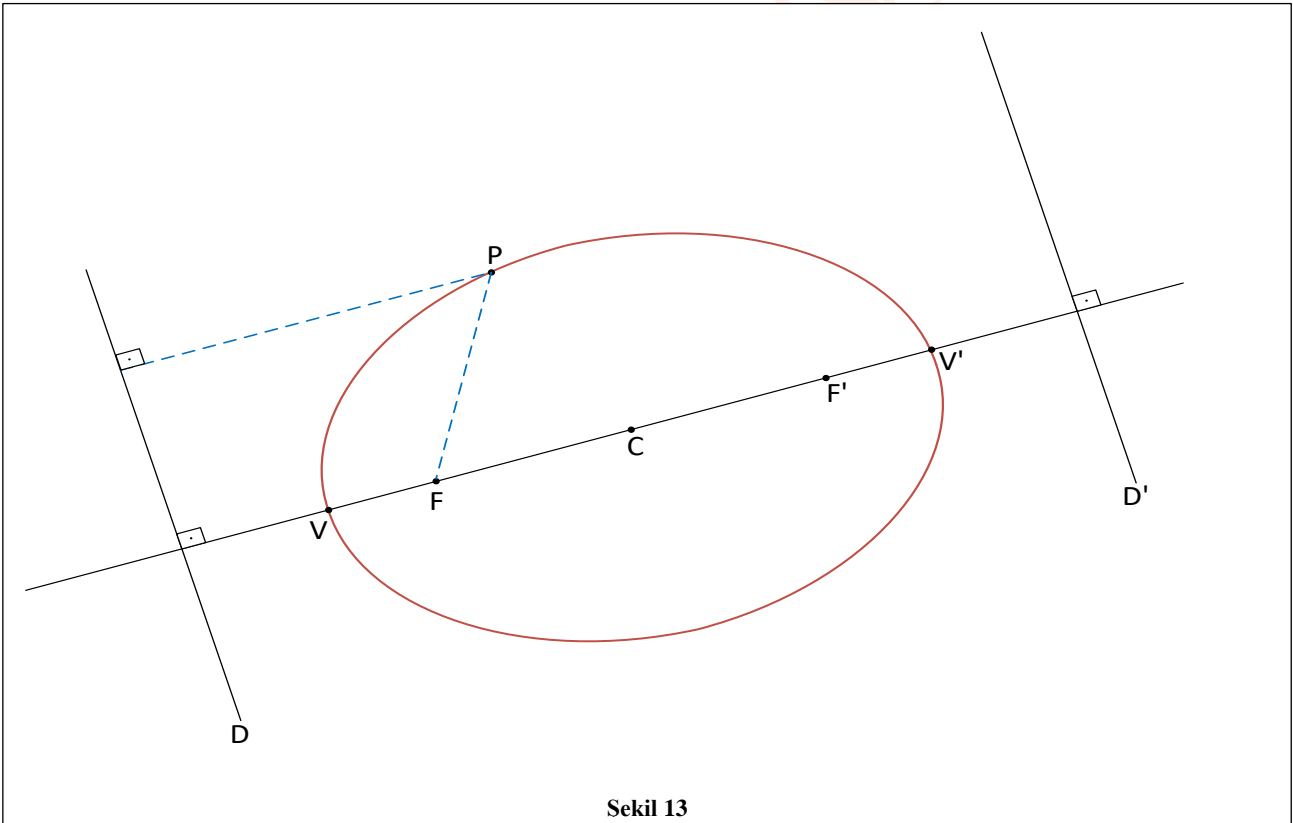
Şekil 12

Parabol, yörünge (kırmızı renkli çizgi) üzerinde ki noktanın (Şekil 12 P noktası) sabit bir noktaya (Şekil 12 F noktası) olan **uzaklığı** ile P noktasının sabit bir doğrultmana (Şekil 12 D doğrultmanı) olan dik inme değeri (Şekil 12 mavi kesik kesik olan çizgi) **uzaklığının oranı 1** (Bir) olduğu sürece hareket etmesiyle oluşan düzgün geometrik şekildir (Vossler, 1981). P noktasının, F noktasına olan uzaklığı ile D doğrultmanına olan dik inmesinin mesafesinin oran değeri her daim 1 olacak şekilde hareketiyle parabol şekli ortaya çıkacaktır. Oran *E* harfi ile gösterilir ve eksentrisite (dış merkezlik) olarak adlandırılır.

$$e = \frac{\overline{PF}}{\overline{PD}} = \text{Eksentrisite} = \text{Eccentricity}$$

F odak noktasından çıkan ve D doğrultmanını dik kesen doğruya parabol eksenidir. Bu doğrunun parabol yörüngesini kestiği noktaya (V = vertex) düğüm noktası veya tepe noktasıdır.

Elips



Sekil 13

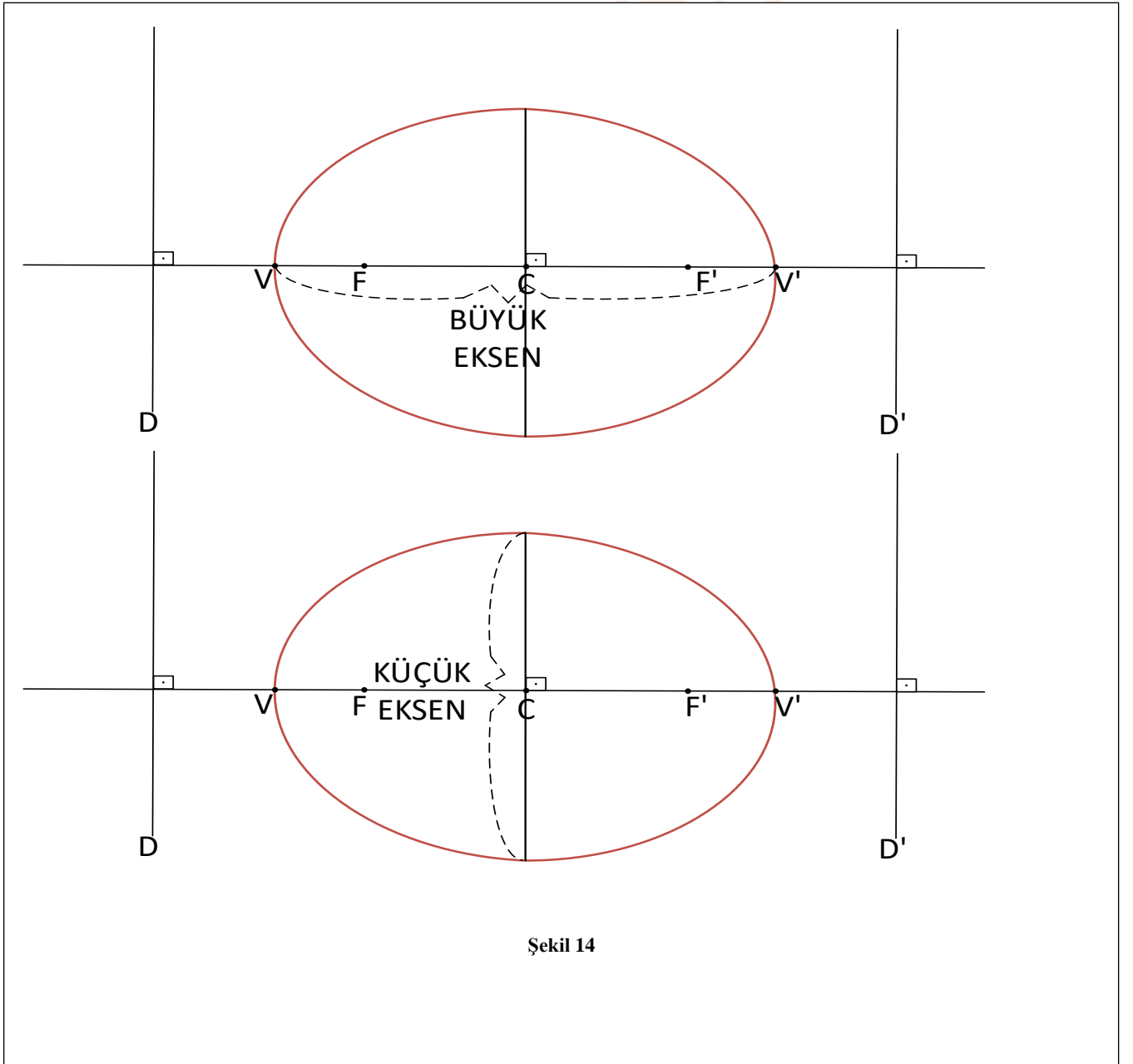
Elips, yörünge (Şekil 13 kırmızı renkli çizgi) üzerinde ki noktanın (Şekil 13 P noktası) sabit bir noktaya (Şekil 13 F noktası) olan **uzaklığı** ile P noktasının sabit bir doğrultmana (Şekil 13 D doğrultmanı) olan dik inme (Şekil 13 mavi kesik kesik olan çizgi) **değerinin oranı** (bir değerinden küçük sabit bir pozitif sayı) korunduğu sürece hareket etmesiyle oluşan düzgün geometrik şekildir (Vossler, 1981). Tanım incelendiğinde parabol ile benzerlik gösterdiği görülecektir. Parabolden farklı olarak oran

değeri yani $e = \text{eksenrisite}$ değeri 1'den küçük ve pozitif bir **sabit** sayıdır ($e < 1$). *Eksenrisite, elipsoidin ne kadar yuvarlaklaştığının bir ölçüsüdür. Bir çemberin eksentrisite değeri sıfırdır.*

$$0 < e = \frac{\overline{PF}}{\overline{PD}} < 1$$

P noktası, E eksentrisite oranına sabit kalacak şekilde hareket ettiğinde oluşan elips yörüngesi, F odak noktasından D doğrultmanına olan dik doğrultuyu V noktasından keser, eş zamanlı olarak Şekil 13'de görüldüğü gibi \overline{FD} vektör doğrultusunu V' tepe (düğüm) noktasında da keser. Oluşan VV' elips kirişi, **elips büyük eksen** olarak adlandırılır. Ana eksen boyunca F odak noktasının simetrisi F' odak noktası ve D' doğrultmanı oluşur. Oluşan bu simetrik F' odak noktası ve D' doğrultmanı sayesinde elips ortaya çıkacaktır. $\overline{FF'}$ ve VV' elips kirişi orta noktası C noktasıdır. C noktası elipsin merkezidir.

Odak noktaları olan F ve F' odak noktalarından geçen aynı zamanda V ve V' düğüm noktalarından geçen elipsin büyük eksenine dik olacak şekilde C noktasından geçen kirişte küçük eksen olarak adlandırılır (Şekil 14).



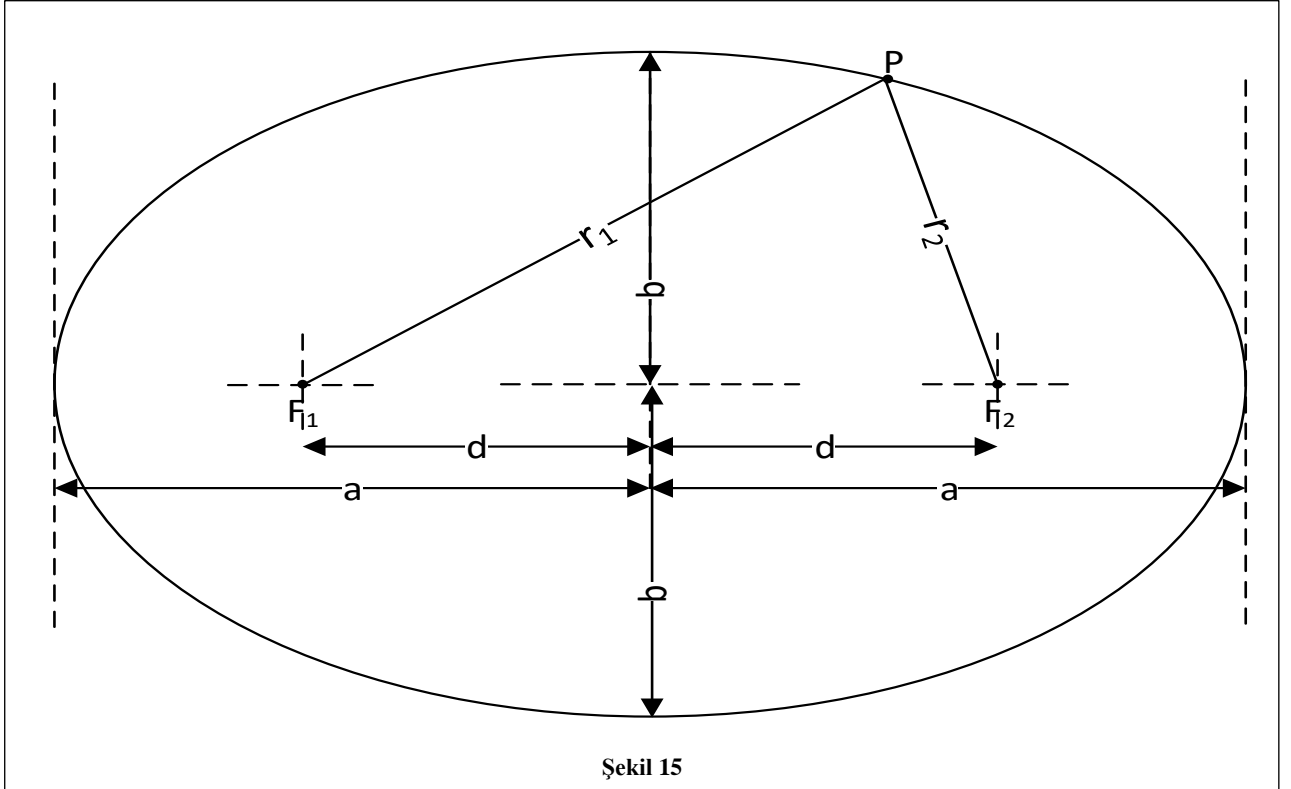
Şekil 14

Elips Denklemi ve Eşitlikleri

Şekil 15 bir elips düzgün geometrik şekline ait temel uzunlukları göstermektedir. P elips şekli (yörüngesi) üzerindeki bir noktayı göstermektedir. F_1 ve F_2 olarak ifade edilen odak noktalarının büyük eksen üzerinde elips merkezine uzaklığı d (liner/doğrusal eksentrisite) olarak ifade edilmiştir. Büyük eksen elips merkezi dikkate alınarak ikiye bölündüğünde yarı eksenin mesafe değeri a ile ifade edilmiştir. Küçük eksen elips merkezi dikkate alınarak ikiye bölündüğünde yarı eksenin mesafe değeri b ile ifade edilmiştir. Elips yörüngesi üzerindeki herhangi bir P noktasından elipsin odak noktalarına olan uzaklıkların toplamı:

$$\overline{PF_1} = r_1 \quad r_1 + r_2 = 2 * a$$

$$\overline{PF_2} = r_2$$



Şekil 16 incelendiğinde elipse ait a , b ve d parametreleri arasında ki bağıntıya bakıldığında:

$$a^2 = b^2 + d^2$$

$$d^2 = a^2 - b^2$$

$$d = \sqrt{(a^2 - b^2)}$$

$$e = \text{birinci eksentrisite} = \frac{d}{a} = \frac{\sqrt{(a^2 - b^2)}}{a} = \sin(\omega)$$

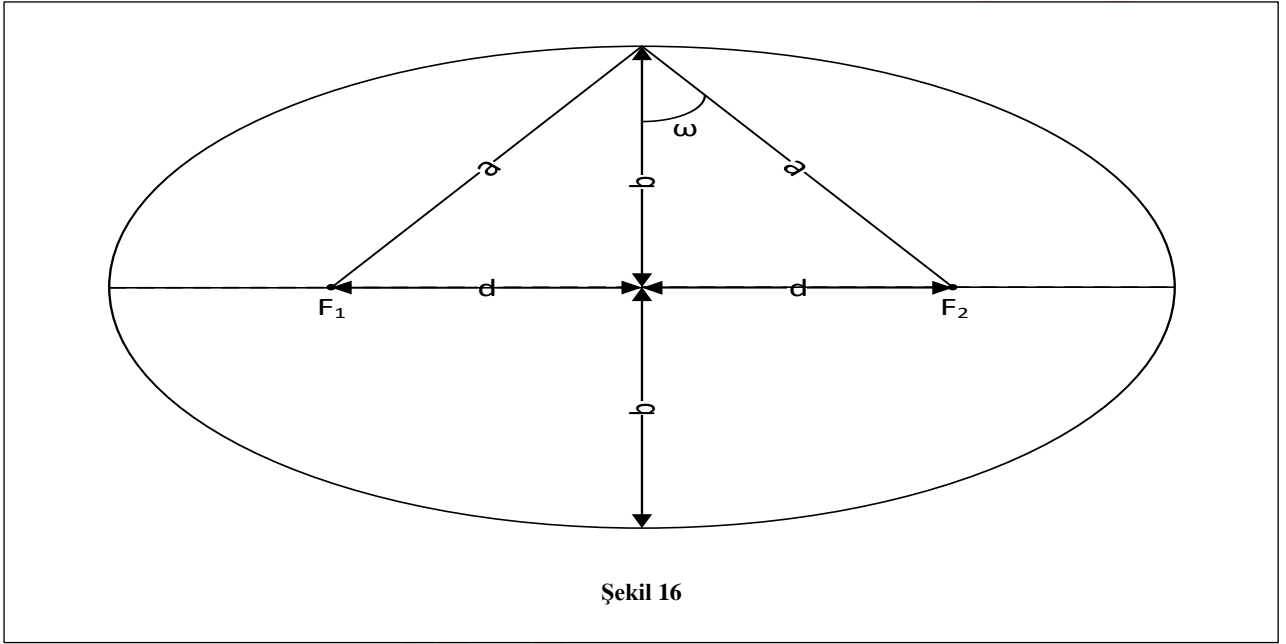
$$e' = \text{ikinci eksentrisite} = \frac{d}{b} = \frac{\sqrt{(a^2 - b^2)}}{b} = \tan(\omega)$$

$$f = \text{elipsoid basıklık değeri} = \frac{a - b}{a}$$



e = eksentrisite elipsin ne kadar yuvarlaklaştığını gösteren orandır, f değeri ise elipsin basıklık oranıdır. e ve f arasındaki ilişki aşağıdaki formüllerde verilmiştir.

$$e^2 = 2f - f^2 \quad \text{veya} \quad f = 1 - \sqrt{(1 - e^2)}$$



Elips denklemini çıkarmak için elips iki boyutlu Kartezyen düzlem üzerinde ifade edilmelidir (Şekil 17). Şekil 17’de, elips analitik geometride ifade edilen X – Y yatay düzlemi üzerinde tasvir edilmiştir. Elips merkezi Kartezyen sistemin merkezi ile çakışık vaziyettedir. Elips yörüngesi üzerindeki P noktası ile F₁ ve F₂ odak noktaları arasındaki mesafelerin toplamı bilindiğine göre, koordinat değerlerinden yola çıkarak elips denklemini elde edilir.

$$r_1 + r_2 = 2 * a$$

$$\sqrt{((d + X_p)^2 + Y_p^2)} + \sqrt{((d - X_p)^2 + Y_p^2)} = 2 * a$$

$$\sqrt{((d + X_p)^2 + Y_p^2)} = 2 * a - \sqrt{((d - X_p)^2 + Y_p^2)}$$

$$\left(\sqrt{(d + X_p)^2 + Y_p^2}\right)^2 = \left(2 * a - \sqrt{(d - X_p)^2 + Y_p^2}\right)^2$$

$$4 * d * X_p - 4 * a^2 = -4 * a * \sqrt{(d - X_p)^2 + Y_p^2}$$

$$(d * X_p - a^2)^2 = \left((-1) * a * \sqrt{(d - X_p)^2 + Y_p^2}\right)^2$$

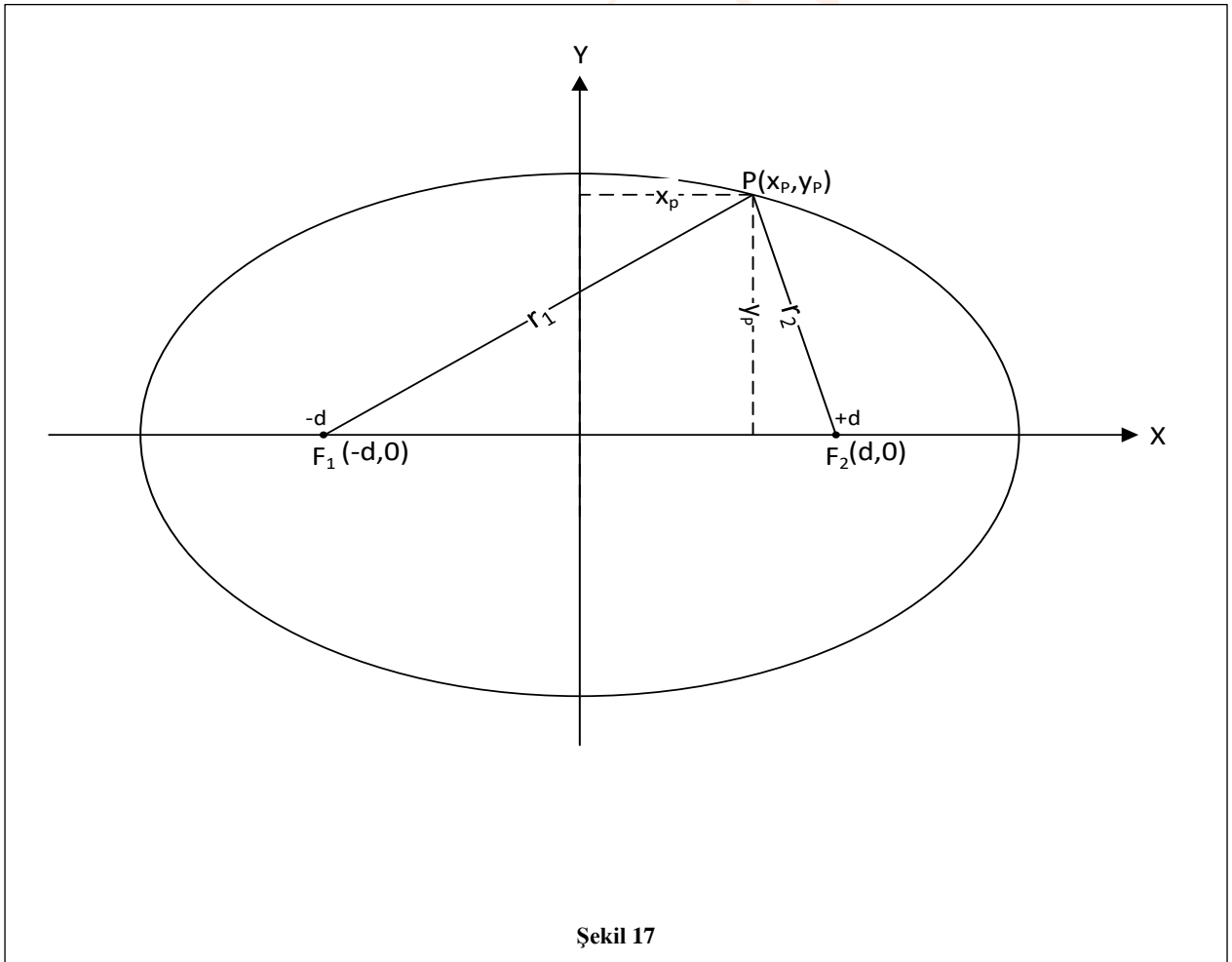
$$a^4 - a^2 * d^2 = a^2 * X_p^2 - d^2 * X_p^2 + a^2 * Y_p^2$$

$$a^2 * (a^2 - d^2) = X_p^2 * (a^2 - d^2) + a^2 * Y_p^2$$

$$a^2 * b^2 = X_p^2 * b^2 + a^2 * Y_p^2$$

$$\frac{a^2 * b^2}{a^2 * b^2} = \frac{X_p^2 * b^2 + a^2 * Y_p^2}{a^2 * b^2}$$

$$\frac{X_p^2}{a^2} + \frac{Y_p^2}{b^2} = 1$$

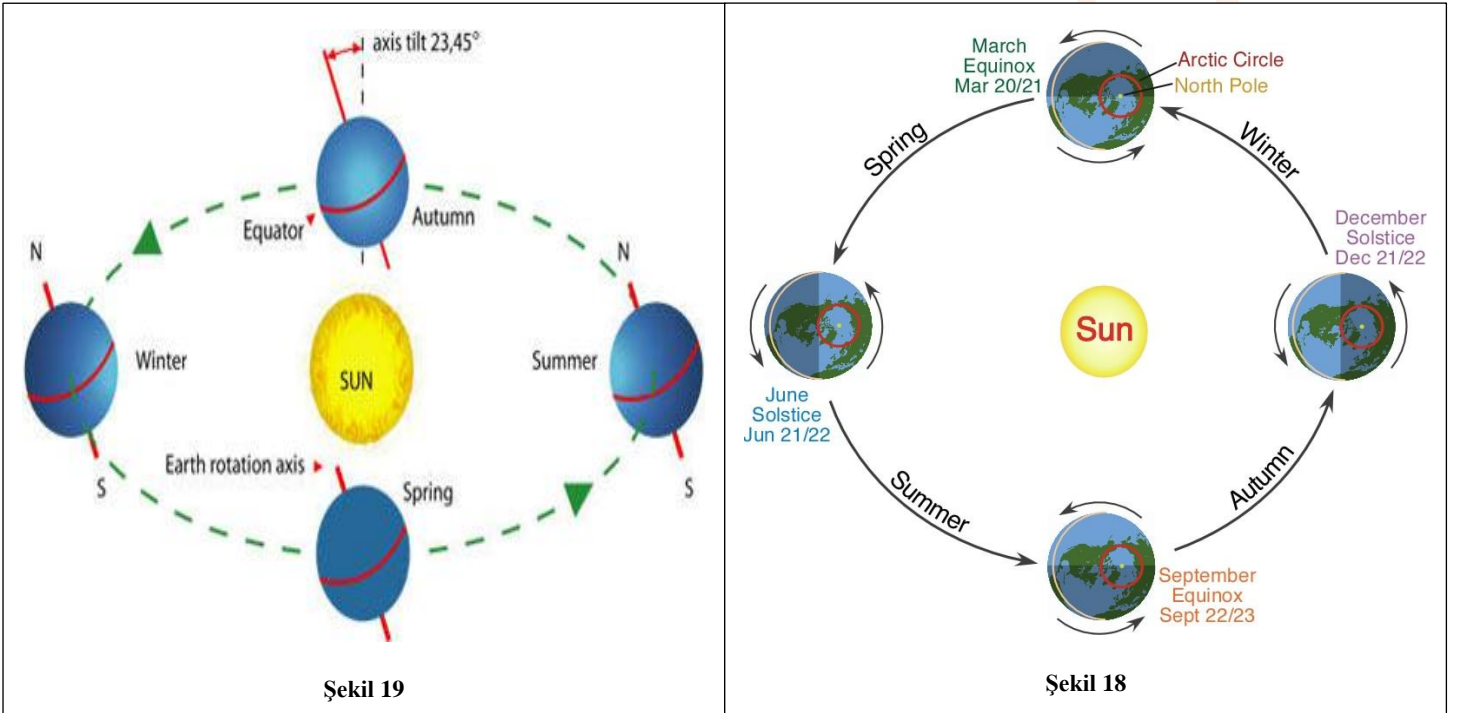


Jeodezi'de Kullanılan Koordinat Sistemleri

Bir koordinat sistemini tanımlamak için (Krakiwsky & Wells, 1971)

- Başlangıç noktasının konumu,
- Referans çatısının üç eksenin dönüklükleri ve artış yönleri,
- Bir noktanın konumunu tanımlayan parametreler gereklidir.

Dünyanın uzayda iki farklı periyodik hareketi vardır. Bunlardan biri kendi eksenini etrafında dönmesi, bir diğeri de güneş etrafında devir yaparak dönmesidir (Şekil 19 ve Şekil 18) (Krakiwsky & Wells, 1971).



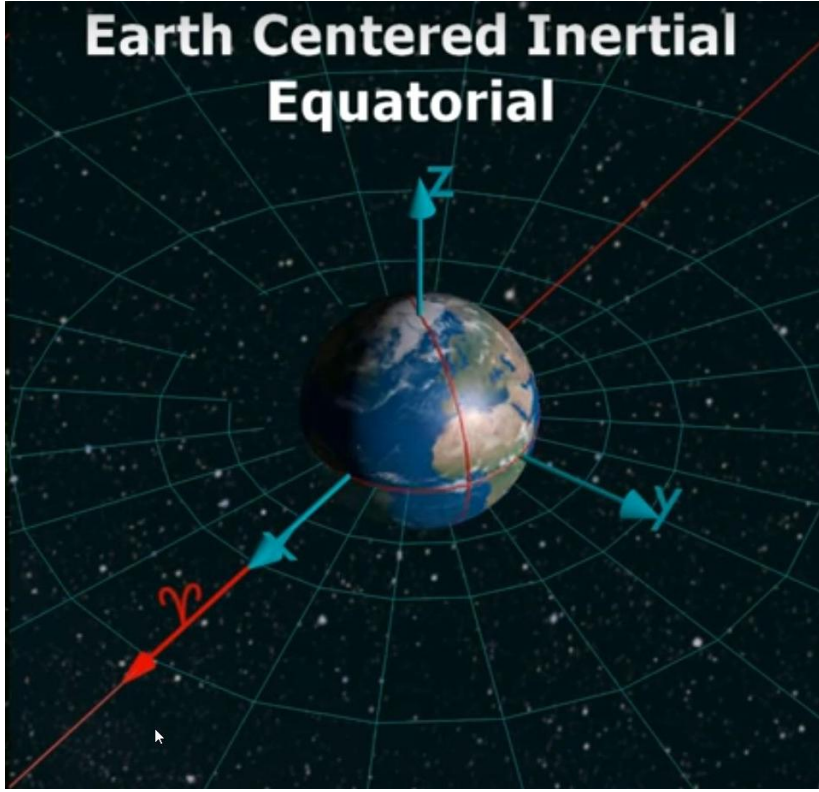
Bu uzaydaki iki periyodik hareket dışında Ay gibi dünyanın doğal uydusu veya birçok yapay uyduların dünya etrafında ve kendi yörüngeleri üzerinde yaptıkları yörüngesel hareket vardır. Dünyanın ve/veya uyduların (ay gibi doğal uydular veya yapay uydular) yaptıkları periyodik hareketler koordinat sistemlerinin tanımlanmasının ve zaman sisteminin (gün, ay, yıl, gün beri, gün öte, mevsimler gibi zaman sistemleri) tanımlanmasının temellerini oluşturur (Krakiwsky & Wells, 1971).

Krakiwsky ve Wells'e göre, temelde üç koordinat sistemi oluşur ve kullanılır. Bahsi geçen koordinat sistemleri (Krakiwsky & Wells, 1971):

- Yeryüzündeki coğrafik objelerin koordinatlarının elde edilmesi için kullanılan Yersel (Terrestrial) Koordinat sistemi,
- Uzaydaki yıldız gibi objelerin ve uydu yörüngelerinin koordinatlarının elde edilmesi için kullanılan Göksel (Celestial) koordinat sistemi,

- Yerküre etrafındaki uydu yörüngelerinin koordinatlarının belirlenmesi için kullanılan Yörünge (orbital) koordinat sistemidir.

Göksel Koordinat Sistemleri



Şekil 21 (Space Universities Network, 2019)

Doğanalp'e göre göksel koordinat sistemleri, uydu yörüngelerinin ve dolayısıyla yapay veya doğal uyduların uzaydaki konumlarının belirlenmesi için kullanılır (DOĞANALP, 2013). *Hareketsiz (yani atalette kalan) (inertial) koordinat sistemleridir. Atalette olmasından kast edilen, uyduların ve/veya gök cisimlerinin hareketlerinden etkilenmemesidir.* Bu sayede **uydu yörüngeleri** (uyduların hareketlerinde izledikleri yörünge) sabit bir koordinat sistemine göre belirlenir.

Jeosantrik Ataletle kalan (inertial) Koordinat Sistemi (Earth – Centered Inertial Coordinate System – ECI / Yer Merkez Hareketsiz Sistem)

Ana konu başlığında bir koordinat sisteminin tanımı için üç temel kavram belirtilmişti. Bu kavramlara göre Jeosantrik Yersel koordinat sistemi tanımlanırsa:

- Koordinat sistemi başlangıç noktası yaklaşık yerkürenin ağırlık merkezidir,
- Koordinat sistemi X – Y – Z eksenlerinden oluşur. Z eksen her zaman referans çatisının başlangıç noktasından başlayarak yeryuvarının dönme eksenini boyunca kuzey kutup noktasını (manyetik kutup noktası değil) işaret edecek şekildedir. X ve Y eksenleri ekvatorial düzlemedir ve dünyayla beraber dönmezler (Groves, 2013),
- X eksen ekliptik ile ekvatorun arakesit doğrultusunda ilkbahar noktası yönündedir (DOĞANALP, 2013),
- Y eksen, ekvatorial düzlem üzerinde X eksenine dik olacak şekilde sağ el koordinat sistemine göre oluşmuştur.

ECI sisteminde, koordinat elde edilmesi için, referans çatisının ataletle kalması gerekir. Ataletle kaldığı sürece uydu yörüngeleri koordinatları hesaplanabilecektir. Yörünge Koordinatları hesaplanması, uyduların yörünge üzerinde gezinti yapacakları yol belirlenmiş olur. Yörünge belirlenmesi, yörünge üzerindeki sinyal gönderecekleri an konumları bilinmesi için önemlidir. Fakat yeryuvarının kendi dönme hareketine dayalı, gök cisimlerinin yörünge hareketine dayalı ve uydulardan çıkan sinyallerin yeryuvarına gelene kadar ki sürece dayalı oluşan fiziksel ve zamansal farklılıklar ECI sisteminin ataletle kalmasını (hareketsiz kalmasını) önler. Aşağıda fiziksel ve zamansal farklılıkların hangileri olduğu listelenmiştir (ÜSTÜN, 2012):

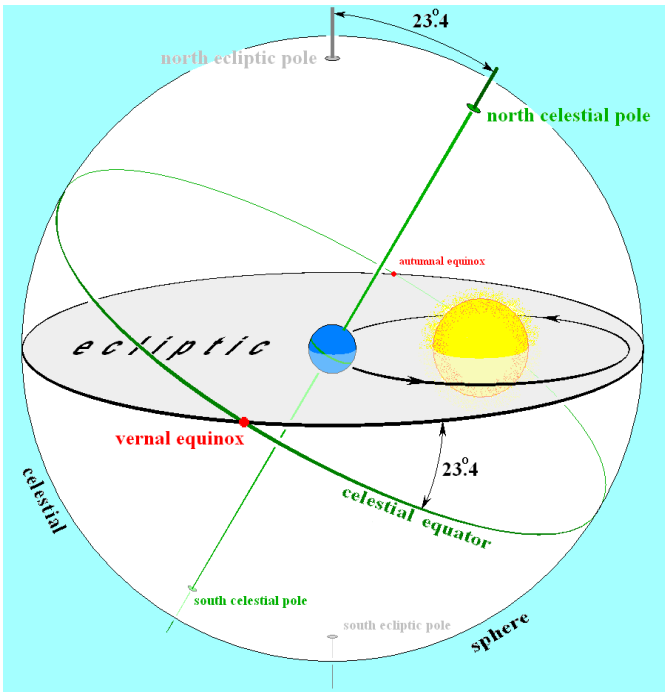
- Yerin kendi eksenini etrafındaki dönme hareketine dayalı olarak, yeryüzünde gerçekleştirilen gözlemlerin zaman kaydı için:
 - UT (UT1) dünya zamanı,
 - UTC dünya zamanı (UT1 ile uyumlu atomik),
 - GST yıldız zamanı kullanılır.
- Gök Cisimlerinin yörünge hareketine dayalı, uydu hareketlerinin izlenmesi için:
 - TT yersel zaman: Güneş sisteminin efemeris zaman standardı,
 - TCG (yermerkezli) ve TCB (barisentrik) koordinat zamanı,
 - TDB Barisentrik dinamik zaman kullanılır.
- Fiziksel (nükleer) süreçlere dayalı, uydudan çıkan sinyalin yol alma sürelerinin ölçümü ve gözlem denklemlerinin oluşturulması için:
 - TAI uluslararası atomik zaman,
 - GPS zamanı (GPS konum ölçmelerinin zaman sistemi) kullanılır.

Tablo 1 bu farklı zamanların, eş bir zamandaki farklılıklarını gösteren bir örnektir (ÜSTÜN, 2012).

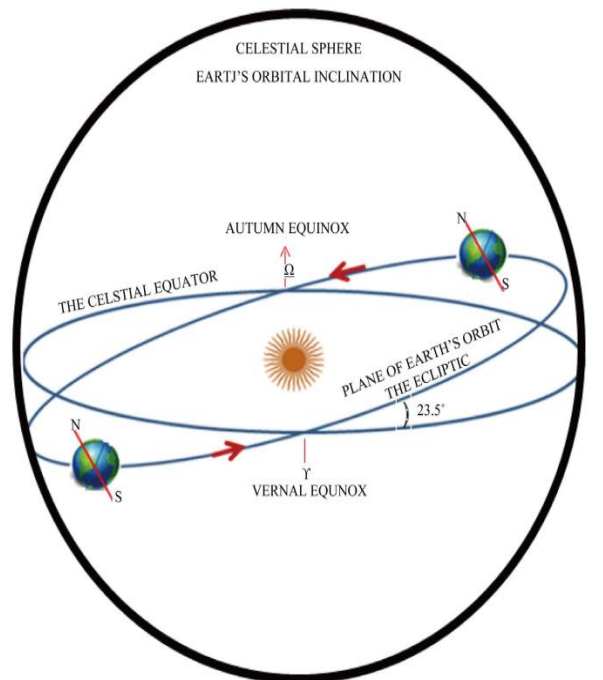
Tablo 1 (ÜSTÜN, 2012)

Sistem	Tarih	Zaman
UTC	15.01.2006	21:24:37.500000
TAI	15.01.2006	21:25:10.500000
GPS	15.01.2006	21:24:51.500000
UT1	15.01.2006	21:24:37.834100
TT	15.01.2006	21:25:42.684000
TCG	15.01.2006	21:25:43.322690
TDB	15.01.2006	21:25:42.683799
TCB	15.01.2006	21:25:56.893378

Bu sorunun çözümü yani ECI sisteminin referans çatısının eksenlerinin ataletle kalabilmesi (hareketsiz kalması) için belirli bir epoğa (zamana) göre tanımlanması gereklidir (eksenlerin belirlenen bir zamana göre sabit kalınması). Bu sayede eksenler ataletle kalacak ve devamlı hareket eden uyduların uydu yörünge koordinatları bu sabit değişmeyen referans çatısına göre anlık olarak belirlenmiş olacaktır.



Şekil 23 (Ekliptika, 2019)



Şekil 22 (Mothe, 2014)

Bu epok değeri 01/01/2000 tarih 12:00 UTC (güneşe göre hesaplanmayan) zamanıdır. UTC atomik olarak hesaplanan Coordinated Universal Time kelimesinin baş harflerinin kısaltmasıdır. Türkçe 'de karşılık bulunduğu tabir ise *Eş Güdümlü Evrensel Zaman* tabiridir. Bazı kaynaklarda Türkçe karşılık olarak *Koordinatlandırılmış Dünya Zamanı* çevrilmiştir (ÜSTÜN, 2012). Teknik tanımlama olarak “01/01/2000 tarih 12:00 zamanındaki J2000.00 olarak adlandırılan epok” (J2000.00 epogu) olarak da tanımlanmıştır (DOĞANALP, 2013).

Yersel (Terrestrial) Koordinat Sistemleri



Şekil 24

Yersel (Terrestrial) koordinat sistemi, koordinat sisteminin başlangıç noktasına göre ikiye ayrılır.

1) Jeosantrik (Geocentric) yersel koordinat sistemi: Koordinat sisteminin başlangıcı yaklaşık dünyanın ağırlık merkezidir.

2) Toposentrik (Topocentric) yersel koordinat sistemi: Koordinat sisteminin başlangıcı yeryüzündeki bir noktadır (Ölçüm noktası).

Toposentrik Sistem:

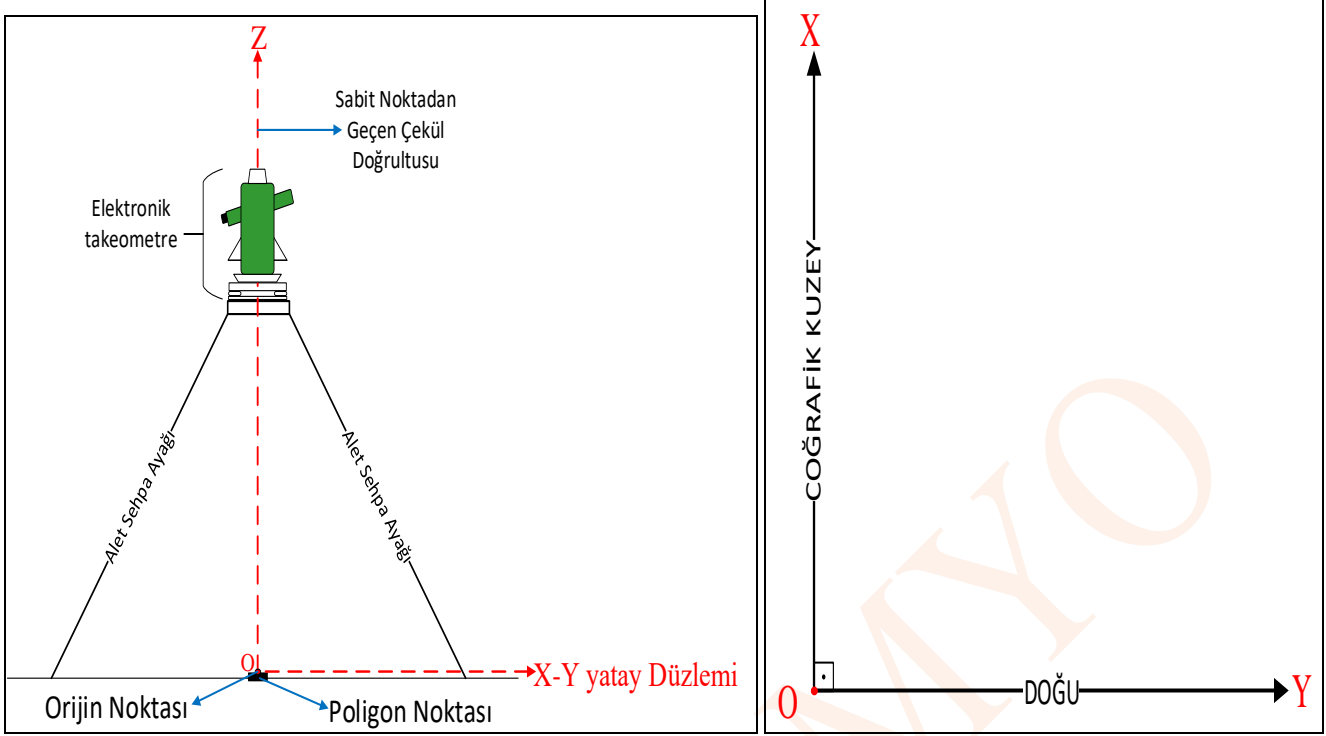
Toposentrik sistem, orijin noktasının yeryüvarı üzerinde olduğu referans sistemidir. Toposentrik sistem, harita yapımı için gerekli yersel ölçümlerde kullanılmaktadır. Elektronik takeometre kullanılarak, coğrafik objelerin detay noktalarının koordinatlarının hesaplanması için, ölçüm yapılması

gerektiğinde iki adet sabit noktaya (koordinatı bilinen nokta - poligon noktası,...) ihtiyaç vardır. Noktalardan bir tanesi elektronik takeometrenin kurulu olduğu noktadır, diğer nokta ise başlangıç doğrultusunun oluşturulması için gerekli noktadır. Elektronik takeometrenin kurulu olduğu sabit noktada toposentrik referans çerçevesi oluşur. Bu referans çerçevesinin oluşması için gereken kriterler:

- a) Orijin noktası elektronik takeometrenin kurulu olduğu sabit noktadır,
- b) Z eksenini elektronik takeometrenin kurulu olduğu sabit noktadan geçen düşey doğrultusudur (çekül doğrultusu) ve Z ekseninin pozitif artışı sabit noktadan çekül doğrultusu boyunca yukarı doğrudur. Elektronik takeometre Z eksenini etrafında döner,
- c) X eksenini, elektronik takeometrenin kurulu olduğu sabit noktada oluşan coğrafik kuzey doğrultusuyla çakışiktır ve X koordinatının pozitif artışı kuzey yönündedir,
- d) Y eksenini, elektronik takeometrenin kurulu olduğu sabit noktada oluşan X eksenine dik açıyla oluşacak şekilde, doğu yönüyle çakışiktır ve Y koordinatının pozitif artışı doğu yönündedir,
- e) X – Y – Z eksenleri metre uzunluk birimiyle ifade edilirler.

Yukarıdaki toposentrik sistemde referans çerçevesi üzerinde eksenler için tanımlamalar yapılmıştır. Bu sayede Elektronik takeometrenin üzerine kurulu olduğu her sabit noktada yeniden toposentrik koordinat sistemi oluşur.

Şekil 25 sol ve sağ resimlerde 3 boyutlu toposentrik koordinat sistemi (toposentrik referans çerçevesi) temsili vardır. Sol resimde, elektronik takeometrenin üzerine kurulu olduğu poligon noktasında toposentrik referans çerçevesinin orijin noktası oluşmuştur. Poligon noktasından geçen çekül doğrultusu toposentrik referans çerçevesinin Z eksenini geçmektedir. X-Y yatay düzlemi poligon noktasından geçmektedir (Şekil 25 **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** sol resim). Şekil 25 sağ resim orijin noktasına (takeometrenin üstünden) kuş bakışı görünüşüdür. Şekil 25 sağ resim, poligon noktasında oluşan toposentrik referans çerçevesinin yatay düzlemi gözükmektedir. *X eksenini coğrafik kuzey ile çakışık olduğu* ve artış yönü gözükmektedir. Şekil 25 sağ resimde Y ekseninin X eksenine dik bir şekilde doğu yönünde oluştuğu ve artış yönünün doğu yönü olduğu gözükmektedir. Bu tanımlamalar yapılarak toposentrik referans çerçevesini oluşturur.



Şekil 25

Jeosantrik Yersel Koordinat Sistemi (Geocentric Terrestrial Coordinate System) / Yer Sabit Yer Merkez Koordinat Sistemi (Earth Centered Earth Fixed Coordinate System)

Ana konu başlığında bir koordinat sisteminin tanımı için üç temel kavram vardı. Bu kavramlara göre Jeosantrik Yersel koordinat sistemi tanımlanırsa:

- Jeosantrik Yersel koordinat sisteminin başlangıç noktası yaklaşık yerkürenin merkezidir,
- Koordinat sistemi X – Y – Z eksenlerinden oluşur. Z eksenini yerin dönme eksenini ile çakışıkır. X eksenini ekvator düzlemi üzerindedir. Ayrıca Greenwich meridyeninin ekvatoru kestiği noktadan X eksenini geçer (Şekil 27 X eksenini Kırmızı çizilmiş Greenwich meridyeni ile ekvator düzleminde kesişir). Y eksenini, ekvator düzlemi üzerinde X eksenine dik olacak şekilde 90° boylamında ve sağ el kuralına göre oluşur,
- Yersel koordinatlar bu koordinat sisteminde X – Y – Z koordinatları ile ifade edilir.

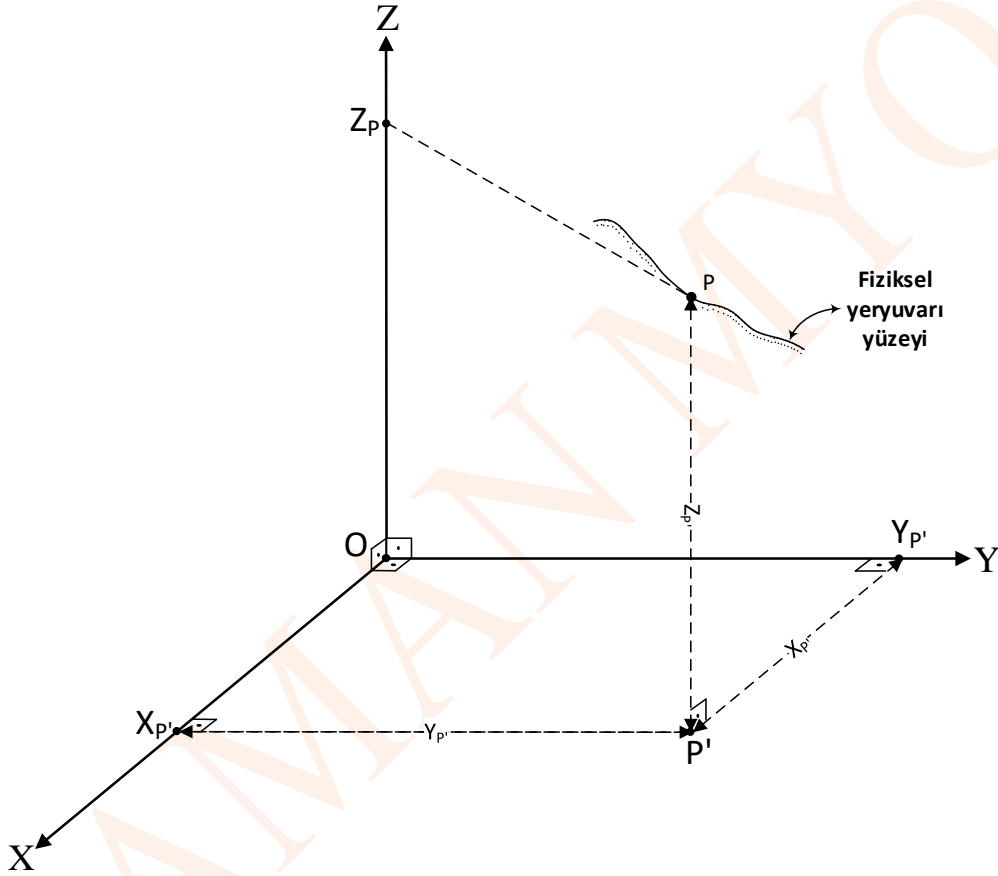
Jeosantrik (geocentric) kelimesi, koordinat sisteminin başlangıç noktası olan noktanın (orijin noktasının) yerin ağırlık merkezi ile çakışık olduğunu belirtmek için kullanılır. Şekil 27 jeosantrik yersel koordinat sisteminin tasvir etmektedir. Jeosantrik yersel koordinat sisteminde, X eksenini Greenwich meridyeni ile ekvator düzleminde kesişir. Bu sebepten ötürü dünya dönme eksenini etrafında döndükçe X – Y – Z Kartezyen koordinat sistemi de dönmektedir (Şekil 24).



Jeosantrik yersel koordinat sisteminde, X eksenini Greenwich meridyeni kapsar. Bu sebepten ötürü dünya dönme eksenini etrafında döndükçe X – Y – Z Kartezyen koordinat sistemi de dönmektedir



Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) koordinatları bu koordinat sisteminde sunulmaktadır (BAYKAL, 2009).



Şekil 26

Şekil 26 jeosantrik yersel koordinat sistemi tasviridir. Şekildeki O noktası yerin ağırlık merkezi ile çakışık olduğu farz edilen noktadır (Şekil 27 dünya yer ağırlık merkezi ile jeosantrik yersel koordinat sisteminin daha iyi bir tasviri görülmektedir.). P noktası fiziksel yeryüzü üzerindeki herhangi bir noktayı temsil etmektedir. Jeosantrik yersel koordinat sistemine göre P noktasının koordinatları $X_{p'} - Y_{p'} - Z_p$ ile ifade edilir.

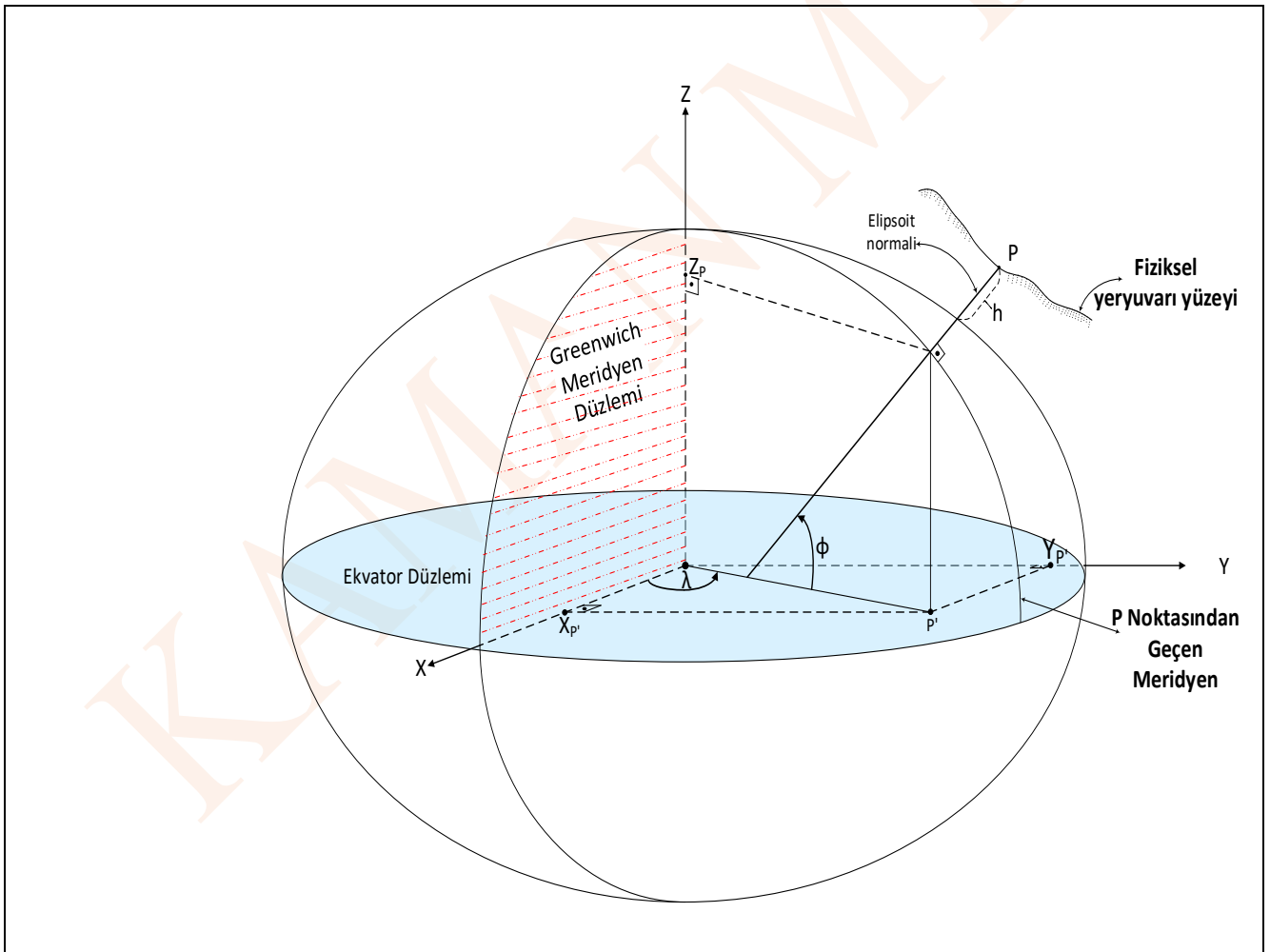


Jeosantrik Yersel Koordinat Sistemi bazı ulusal kaynaklarda, Yer Merkezli Dik Koordinat Sistemi olarak ifade edilebilir (BAYKAL, 2009).

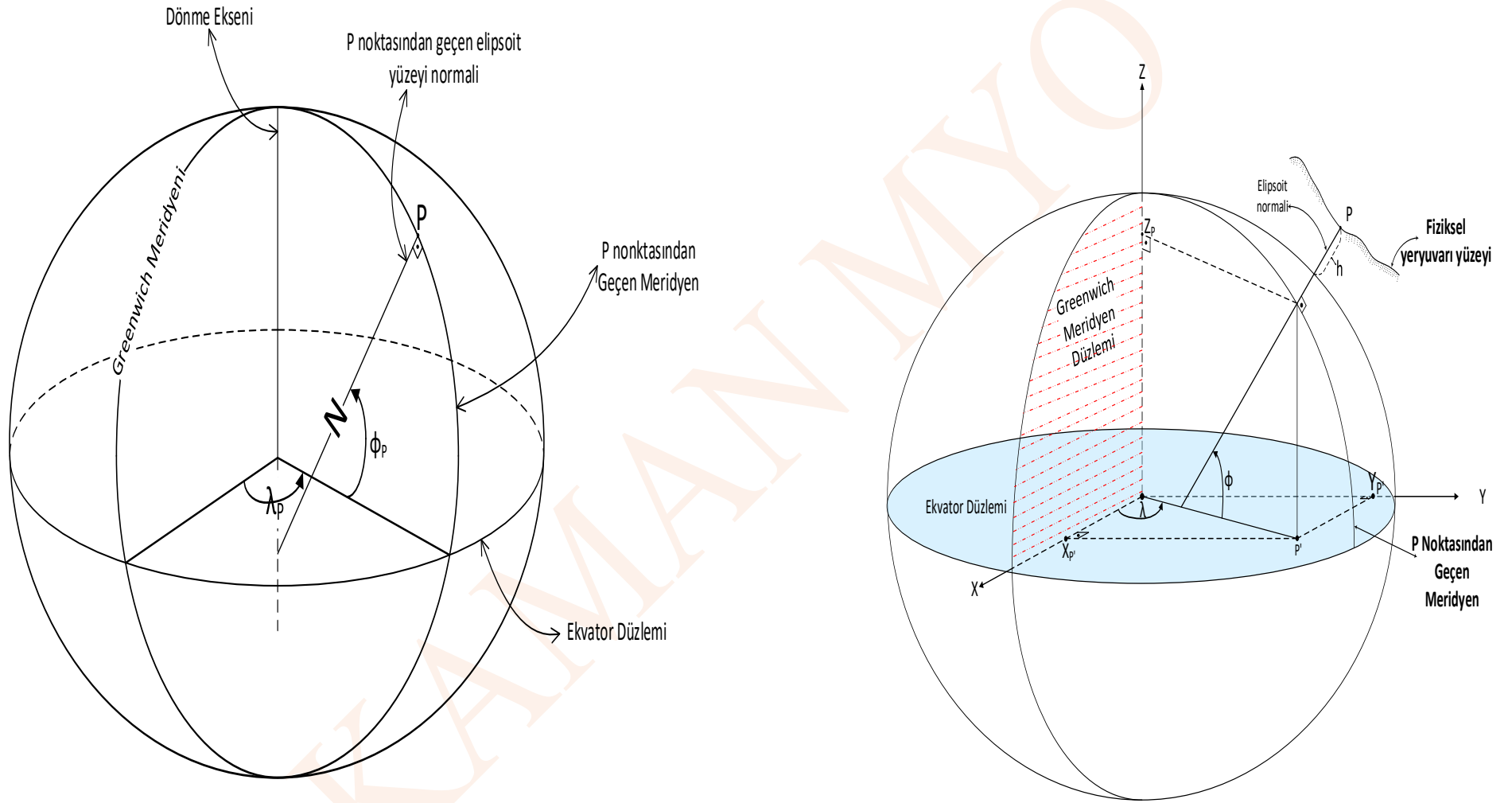
Jeosantrik Yersel Koordinat Sisteminde (ECEF) Referans Yüzeyinin Kullanılma Nedeni

Fiziksel yeryüzü geometrisinin belirlenmesi (dünya şeklinin belirlenmesi) açısından bir hesap yüzeyine (dünya yerine kullanılacak projeksiyon işlemlerindeki hesaplama yüzeyi – döl elipsoit) gerek olmadığı düşünülebilir, ancak (BAYKAL, 2009):

- Jeosantrik yersel koordinat sisteminde elde edilmiş koordinatlar, doğrudan doğruya harita düzlem koordinatlara dönüştürülemediğinden (dönüştürmek için bir ara yüzey – döl elipsoit kullanılmaktadır) ve sonuç olarak düzlem haritaya aktarılamadığından,
- Çekül doğrultusunu temel olarak çalışan elektronik takeometre (total station), nivo gibi donanımlarla üretilen ölçüm değerlerini ve üretilen dik koordinatları, jeosantrik yersel koordinat sisteminde kullanarak yeni büyüklükler hesaplamak mümkün olmadığından, dünya yerine kullanılacak bir hesap yüzeyine (referans yüzeyine) ihtiyaç vardır.



Şekil 27



Şekil 28

Şekil 28 Jeosantrik Yersel Koordinat sistemine göre elde edilmiş koordinatların, harita yüzeyine aktarılmasında kullanılacak referans yüzey ile olan ilişkisini tasvir etmektedir. Referans yüzey olarak dönел elipsoit kullanılmıştır. Dönел elipsoit, elipsin küçük yarı ekseninin (b yarı eksen) Jeosantrik Yersel Koordinat sistemindeki Z eksenine etrafında dönmesiyle oluşan düzgün geometrik şekildir. Elipsin büyük yarı eksen (a yarı eksen) ekvator düzleminin yarıçapı olacak şekilde belirlenmiştir. Elipsin basıklık değeri (f değeri) yerkürenin kutupları arasında basıklık değerine göre belirlenmiştir. Yerküre üzerinde yapılan ölçümler ile belirlenen a , f , e^2 ve e'^2 parametreleri ile yeryuvarı yerine referans yüzey belirlenmiş olur.

Şekil 28 incelendiğinde fiziksel yeryüzü üzerindeki P noktasından geçen ve ekvator düzlemini kesen elipsoit normalinin, ekvator düzlemi ile arasında kalan açı P noktasının **Jeodezik enlemi** (ϕ_p), P noktasından geçen meridyen ile başlangıç meridyeni olarak kabul edilen Greenwich meridyeni arasında kalan (ve ekvator düzlemi üzerinde oluşan) açı P noktasının **Jeodezik boylamı** (λ_p) olarak ifade edilir. Fiziksel yeryüzü üzerindeki P noktasının, referans yüzey olan dönел elipsoide olan düşey mesafesine, P noktasının **elipsoidal yüksekliği** (h_p) denir.



Jeosantrik Yersel Koordinat sisteminde nokta konum değeri, dik (Kartezyen) koordinat sistemi ile $X - Y - Z$ koordinatlarıyla ifade edilebileceği gibi Jeodezik Koordinat Sistemi ile ϕ (Jeodezik Enlem), λ (Jeodezik Boylam) ve h (elipsoit yüksekliği) ile de ifade edilebilir.



Jeosantrik Yersel Koordinat Sistemi bazı uluslararası kaynaklarda, Earth Centered Earth Fixed (Yer merkezli Yer Sabit) Coordinate System olarak ifade edilir.



Jeosantrik Yersel Koordinat sistemi yeryüzündeki noktaların anlık koordinatlarını elde etmek için kullanılır. Bu sebepten dolayı referans çatısı yerin ağırlık merkezi ile çakışıktır ve referans çatısı yer ile beraber dönmektedir.

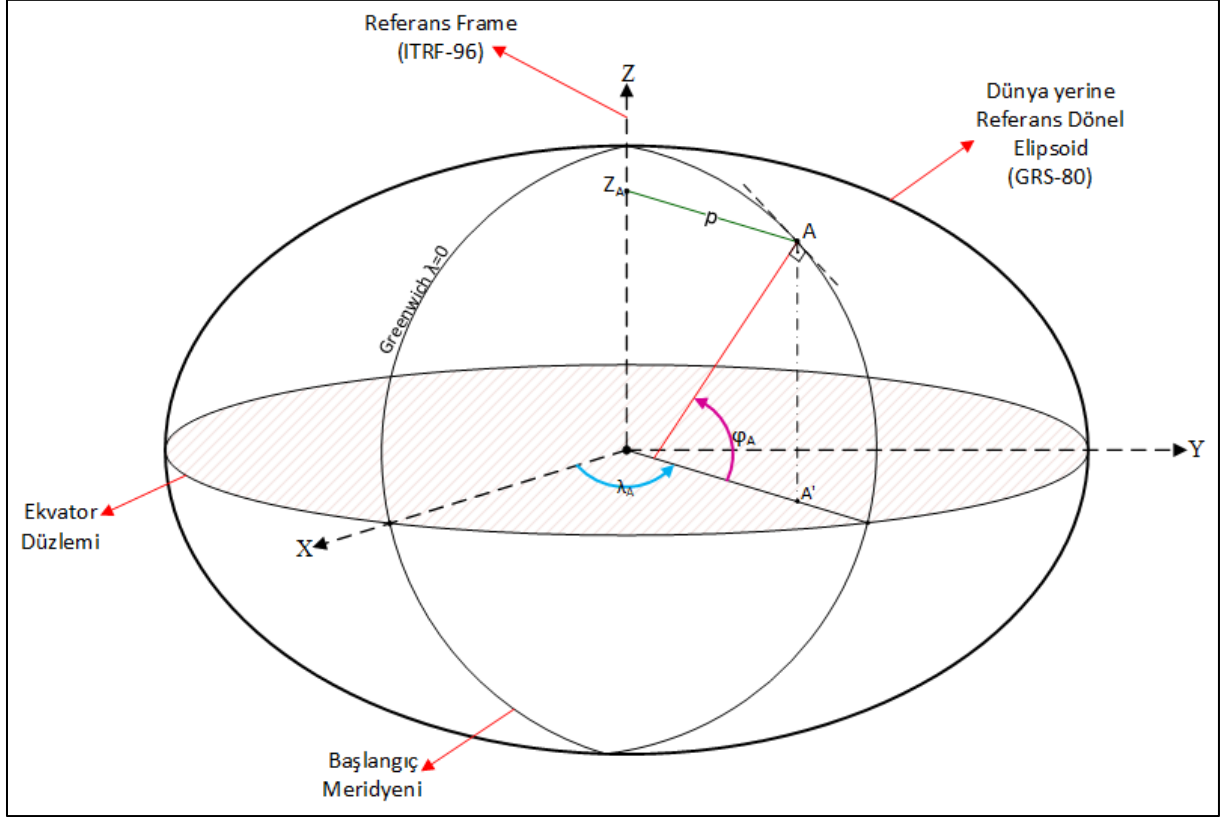
Jeodezik Koordinat Sistemi ile Jeosantrik Yersel Koordinat Sistemi Arasındaki Geometrik İlişki

Jeodezik koordinat sisteminde:

- Dünya yerine dünyayı temsil eden referans yüzeyi dönел elipsoittir,
- Koordinat sisteminde bir noktanın koordinat değeri enlem (B veya ϕ) ve boylam (L veya λ) açı değeri ile ifade edilir,
- Koordinat sisteminin başlangıcı yeryuvarının (Dünya) ağırlık merkezi ile çakışık olan referans dönел elipsoidin merkezi olarak belirlenmiştir.

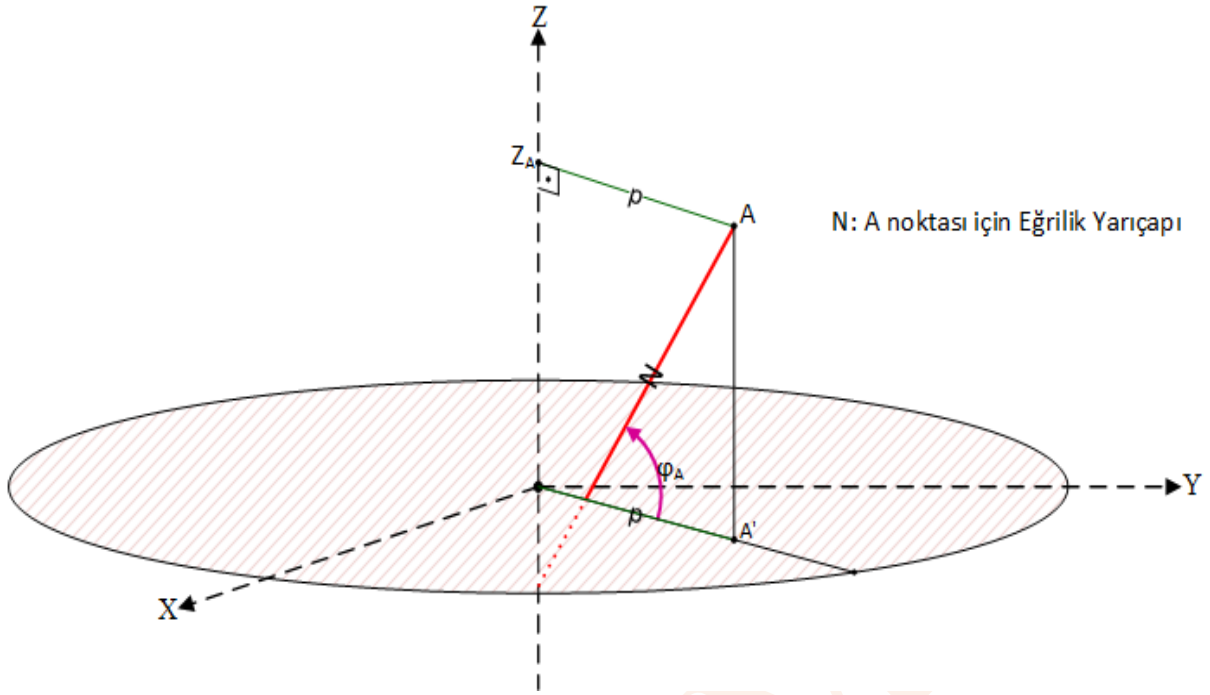
Şekil 29 A noktasının jeodezik koordinatlarının temsili gösterilmektedir. A noktasının Jeodezik enlemi, A noktasından geçen elipsoit normalinin ekvator düzlemini kesmesiyle oluşan doğru ile ekvator

düzlemi arasında kalan açı değeridir (Şekil 29 φ_A açısı). A noktasının jeodezik boylamı, başlangıç meridyeni ile referans elipsoid yüzeyi üzerindeki A noktasından geçen meridyen arasında kalan açı değeridir (Şekil 29 λ_A). Enlem ve boylam değerleri derece açı biriminde ifade edilmektedir.



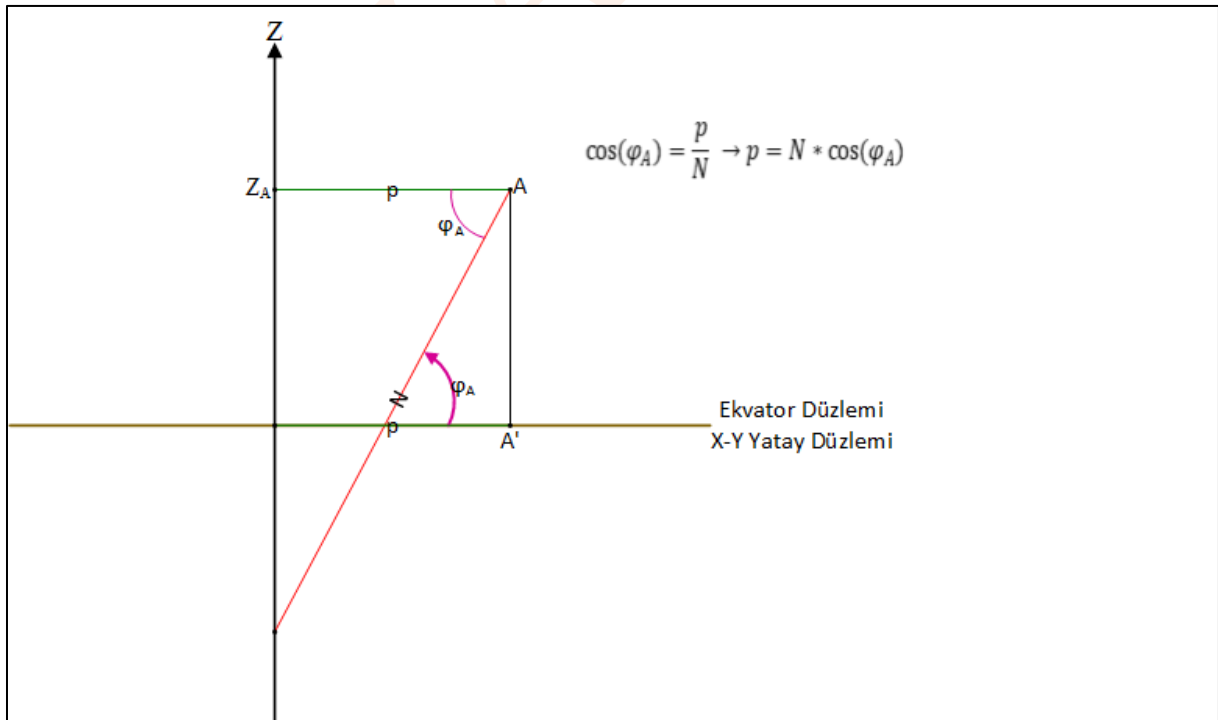
Şekil 29

Referans elipsoidinin yüzeyi üzerindeki her bir noktanın referans merkezine olan uzaklığı, kürede olduğu gibi sabit değildir. Şekil 29 ve Şekil 30'a dikkat edilirse A noktasının elipsoid yüzey normali elipsoid merkezi ile çakışmamaktadır. Referans elipsoidi üzerindeki A noktasından geçen elipsoid normali, ekvator düzlemini geçip Z eksenini kesmektedir. Bu doğruya A noktasının eğrilik yarıçapı (N) olarak ifade edilir.



Şekil 30

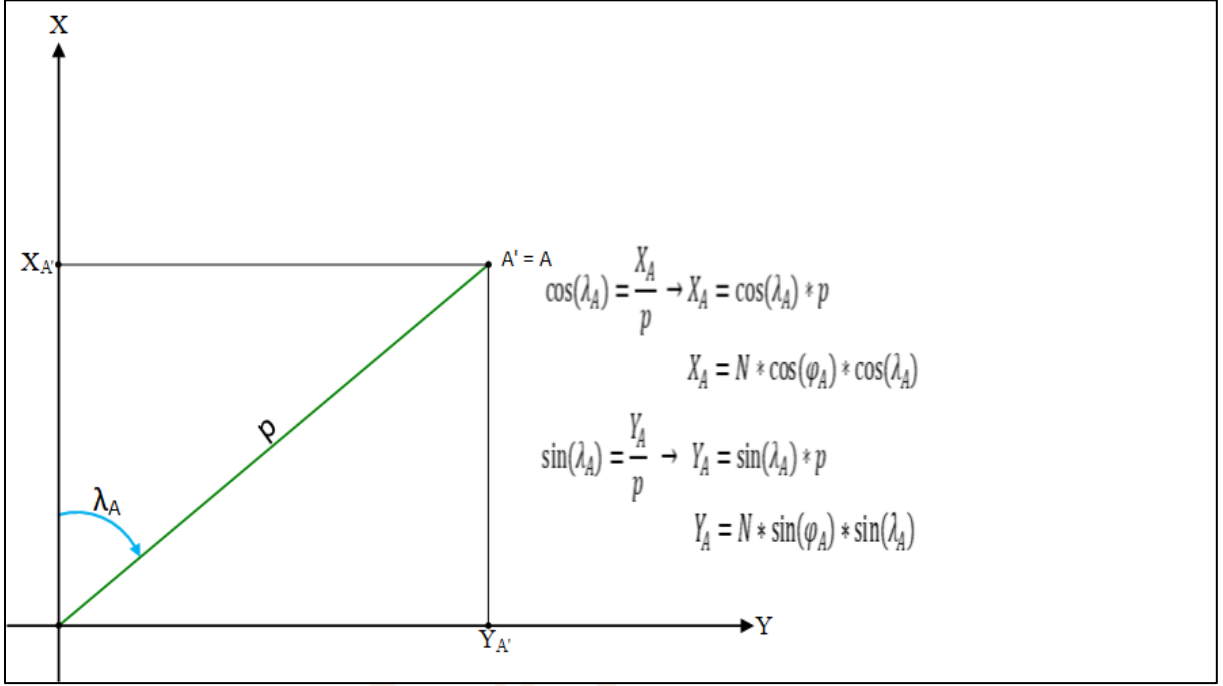
Şekil 31 referans elipsoidi üzerindeki A noktasının kesiti gözükmektedir. A noktasından jeosantrik koordinat sistemindeki Z eksenine inilen dik ile oluşan doğrunun (p doğrusu) uzunluğunun uzunluk değerinin N eğrilik yarıçapı ve φ_A A noktasının jodezik enlem koordinatı ile nasıl hesaplandığı gösterilmiştir.



Şekil 31

$$Z_A = \frac{b^2}{a^2} * N * \sin(\varphi_A) = (1 - f)^2 * N * \sin(\varphi_A)$$

Şekil 32 referans elipsoidi üzerindeki A noktasının jeosantrik koordinat sistemindeki X ve Y koordinatlarının hesaplanması gözükmektedir. A noktasından jeosantrik koordinat sistemindeki X-Y yatay düzleminin olduğu ekvator düzlemine inilen dik ile oluşan A' noktası, A noktasının izdüşümüdür.



Şekil 32

Tablo 2 (Özbenli, 2001)

$$B = \varphi = \text{Enlem}$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 1 - (a * (1 - f))^2 / a^2 \rightarrow \text{birinci eksentrisite}$$

$$\frac{b}{a} = \sqrt{1 - e^2} = \frac{1}{\sqrt{1 + e'^2}} = \frac{e}{e'}$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} = \frac{a^2}{(a * (1 - f))^2} - 1 \rightarrow \text{ikinci eksentrisite}$$

$$\frac{a^2}{b} = c = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2}}$$

$$\eta^2 = e'^2 * (\cos(B))^2$$

$$V = \sqrt{1 + e'^2 * (\cos(B))^2} = \sqrt{1 + \eta^2} = \text{Enlemin kullanıldığı bir fonksiyonu}$$

$$W = \sqrt{(1 - e^2 * (\sin(B))^2)} = \text{Enlemin kullanıldığı bir fonksiyonu}$$

$$N = \frac{a}{w} = \frac{c}{V} = \frac{a}{\sqrt{(1 - e^2 * (\sin(B))^2)}}$$

Dikkat edilirse örneklerde verilen A noktası referans elipsoit yüzeyi üzerinde olduğu düşünülmektedir. Yeryüzü üzerindeki nokta referans elipsoitinden daha yüksekte veya daha alçakta olabilir (Şekil 27, Şekil 28). Noktanın kendi elipsoit yükseklik değeri (h) vardır. Bu değerle hesaba katılırsa Tablo 3 içinde listelenmiş formüller kullanılabilir.

Tablo 3 (STRANG & BORRE, 1997), (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Collins, 1994)

$X = (N + h) * \cos(\varphi) * \cos(\lambda)$
$Y = (N + h) * \cos(\varphi) * \sin(\lambda)$
$Z = ((1 - e^2) * (N + h)) * \sin(\varphi) = ((1 - f)^2 * N + h) * \sin(\varphi)$

Jeosantrik kartezyen koordinatlardan jeodezik koordinatlara dönüşüm yapmak için Tablo 4 içinde listelenmiş formüller kullanılabilir.

Tablo 4 (Land Information New Zealand, 2021)- (Xu & Xu, 2016)

$\mathbf{Boylam} = \lambda = \tan^{-1}(Y/X)$
$p = \sqrt{(X^2 + Y^2)}$
$r = \sqrt{(p^2 + Z^2)}$
$\mu = \tan^{-1}((Z/p) * ((1 - f) + (e^2 * a)/r))$
$\mathbf{Enlem} = \varphi = \tan^{-1}((Z * (1 - f) + (e'^2 * a * (\sin(\mu))^3)) / ((1 - f) * (p - e^2 * a * (\cos(\mu))^3)))$
$\mathbf{Elipsoit Yüksekliği} = h = (\sqrt{(X^2 + Y^2)} / \cos(\varphi)) - a * \sqrt{(1 - e^2 * (\sin(\varphi))^2)}$

Örnek: Noktanın Jeosantrik yersel koordinatları aşağıdaki tabloda verilmiştir. Noktanın jeodezik koordinatları olan enlem ve boylam değerlerini bulunuz.

NNO	X	Y	Z
P11	4109443.546	2740359.9611	4023642.2787

Cevap: GRS-80 referans elipsoidinin parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

a	6378137.000 m
b	6356752.31414034 m
f	0.003352810681184
1/f	298.257222100882
e	0.081819191042846
e'	0.082094438151947
c	6399593.62586404

$$\text{Boylam} = \lambda = \tan^{-1}(Y/X) = 33.69712224^\circ$$

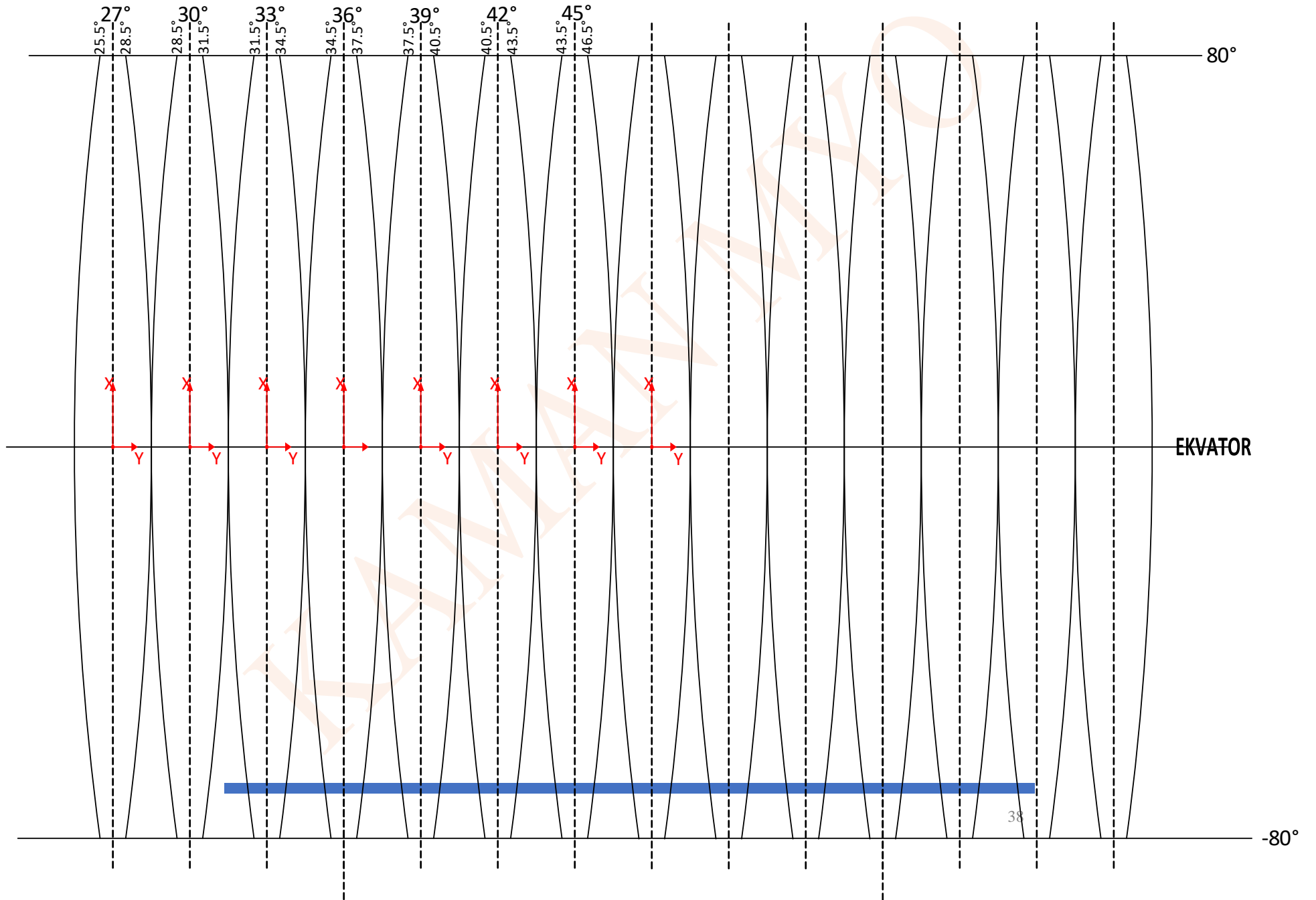
$$p = \sqrt{(X^2 + Y^2)} = 4939341.958 \text{ m}$$

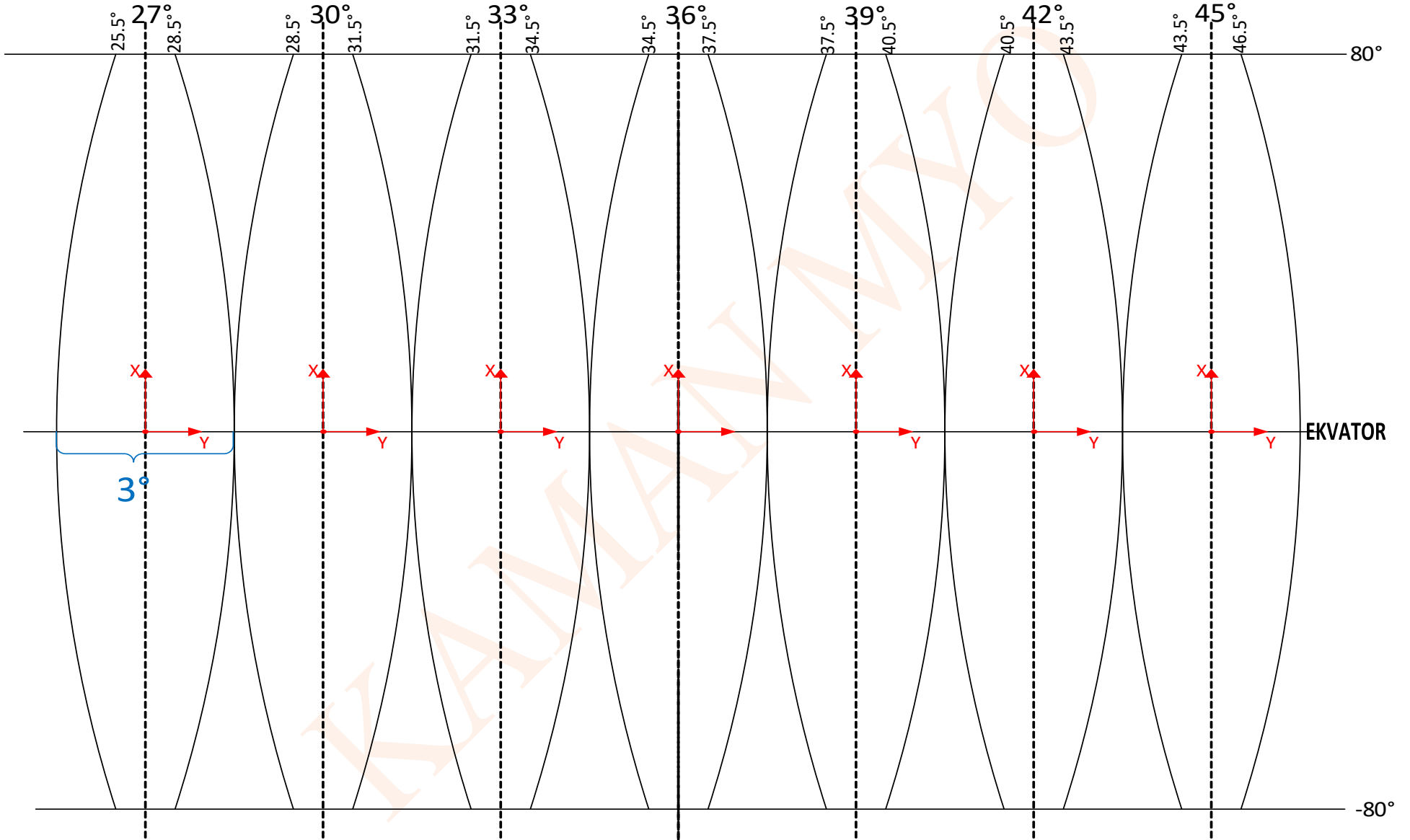
$$r = \sqrt{(p^2 + Z^2)} = 6370776.731 \text{ m}$$

$$\mu = \tan^{-1}((Z/p) * [(1 - f) + (e^2 * a)/r]) = 39.26048171^\circ$$

$$\varphi = \tan^{-1}((Z * (1 - f) + (e'^2 * a * (\sin(\mu))^3)) / [(1 - f) * (p - e^2 * a * (\cos(\mu))^3)]) = 39.35517948^\circ$$

$$h = p * \cos(\varphi) + Z * \sin(\varphi) - a * \sqrt{(1 - e^2 * (\sin(\varphi))^2)} = 1195.723619 \text{ m}$$





Tek Değişkenli Seriler Kullanılarak Jeodezik Koordinatlardan 3 Derecelik UTM Projeksiyon Koordinatlarının Hesaplanması

Noktanın,

- Jeodezik enlem değeri (φ veya B),
- Jeodezik boylam değeri (λ veya L),
- Noktanın içinde bulunduğu 3 Derecelik UTM Projeksiyonu diliminin dilim orta meridyenin boylam değeri (L_0) bilinmektedir.

Kullanılan GRS-80 referans elipsoidinin parametreleri bilinmektedir. GRS-80 elipsoid parametreleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5

a	6378137.000 m
f	0.003352810681184

Kullanılacak formüller: ((KAYA, 1999))

$$f = \frac{a - b}{a}$$

$$c = \frac{a^2}{b}$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

$$\rho = \frac{180^\circ}{\pi}$$

$$t = \tan(B)$$

$$\eta^2 = e'^2 * (\cos(B))^2$$

$$V = \sqrt{(1 + \eta^2)}$$

$$N = \frac{c}{V}$$

$$\Delta L = L - L_0 = \text{boylam} - \text{dilim orta merid.}$$

$$B = \varphi = \text{enlem}, L = \lambda = \text{boylam}$$

$$A' = c * \left(1 - \frac{3}{4} * e'^2 + \frac{45}{64} * (e'^2)^2 - \frac{175}{256} * (e'^2)^3 + \frac{11025}{16384} * (e'^2)^4 - \frac{43659}{65536} * (e'^2)^5 \right) * \frac{1}{\rho}$$

$$B' = c * \left(-\frac{3}{8} * e'^2 + \frac{15}{32} * (e'^2)^2 - \frac{525}{1024} * (e'^2)^3 + \frac{2205}{4096} * (e'^2)^4 - \frac{72765}{131072} * (e'^2)^5 \right)$$

$$C' = c * \left(\frac{15}{256} * (e'^2)^2 - \frac{105}{1024} * (e'^2)^3 + \frac{2205}{16384} * (e'^2)^4 - \frac{10395}{65536} * (e'^2)^5 \right)$$

$$D' = c * \left(-\frac{35}{3072} * (e'^2)^3 + \frac{315}{12288} * (e'^2)^4 - \frac{31185}{786432} * (e'^2)^5 \right)$$

$$E' = c * \left(+\frac{315}{131072} * (e'^2)^4 - \frac{3465}{524288} * (e'^2)^5 \right)$$

$$F' = c * \left(-\frac{693}{1310720} * (e'^2)^5 \right)$$

$$A_1 = \frac{N * \cos(B)}{\rho} = (N * \cos(B)) / \rho$$

$$A_2 = \frac{N * (\cos(B))^2 * t}{(2 * \rho^2)} = (N * (\cos(B))^2 * t) / (2 * \rho^2)$$

$$A_3 = \frac{N * (\cos(B))^3 * (1 - t^2 + \eta^2)}{(6 * \rho^3)} = N * (\cos(B))^3 * (1 - t^2 + \eta^2) / (6 * \rho^3)$$

$$A_4 = (N * (\cos(B))^4 * t * (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4 * \eta^2 * t^2)) / (24 * \rho^4)$$

$$A_5 = (N * (\cos(B))^5 * (5 - 18 * t^2 + t^4 + 14 * \eta^2 - 58 * \eta^2 * t^2)) / (120 * \rho^5)$$

$$G = A' * B + B' * \sin(2 * B) + C' * \sin(4 * B) + D' * \sin(6 * B) + E' * \sin(8 * B) + F' * \sin(10 * B)$$

Gauss – Kruger Koordinatlarının Hesabı:

$$X_g = G + A_2 * (\Delta L)^2 + A_4 * (\Delta L)^4$$

$$Y_g = A_1 * (\Delta L) + A_3 * (\Delta L)^3 + A_5 * (\Delta L)^5$$

UTM Projeksiyonuna Göre YUKARI Ve SAĞA Koordinatlarının Hesabı:

a) 3 derecelik UTM projeksiyonu için ölçek katsayısı $m_0 = 1$

$$YUKARI = X_g * m_0$$

$$SAĞA = Y_g * m_0 + 500000 \text{ m}$$

b) 6 derecelik UTM projeksiyonu için ölçek katsayısı $m_0 = 0.9996$

$$YUKARI = X_g * m_0$$

$$SAĞA = Y_g * m_0 + 500000 \text{ m}$$

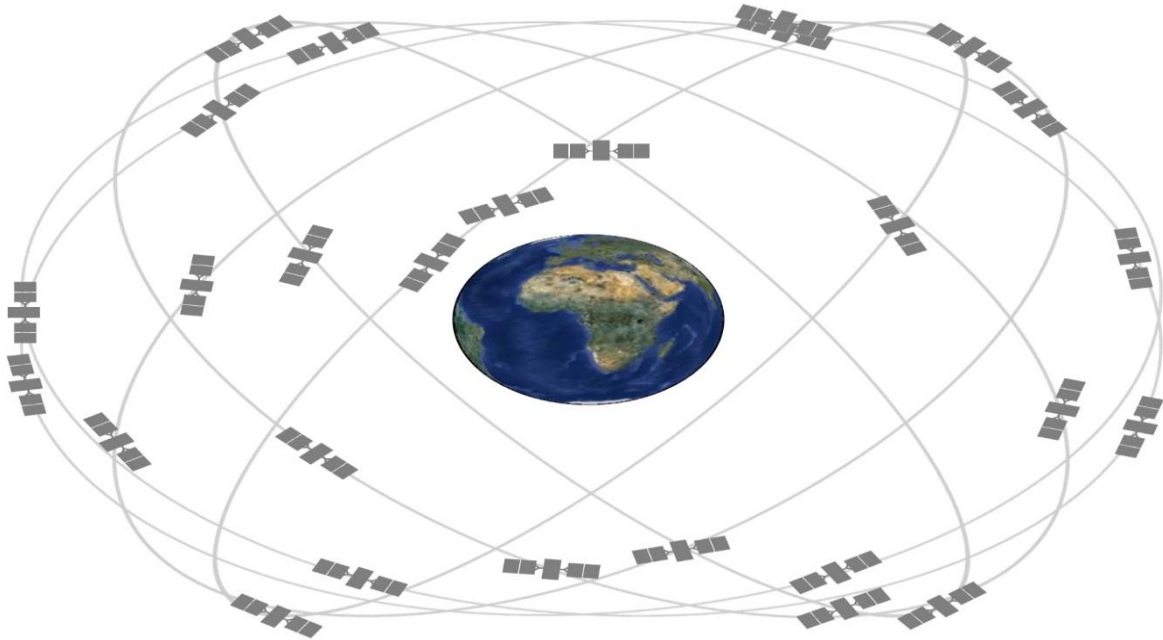
Örnek: P11 noktasının jeodezik koordinatları aşağıdaki tabloda verilmiştir. Nokta, 33° boylam değerine sahip meridyenin dilim orta meridyeni olduğu 3 derecelik UTM projeksiyon dilimi içindedir.

Noktanın TUREF datum değerine göre harita düzlem koordinatlarını tek değişkenli serileri kullanarak hesaplayınız.

Jeodezik Koordinatlar	
Boylam $=\lambda = L$	33.69712223
enlem $=\varphi = B$	39.35517949
Elipsoit Yüksekliği $= h$	1195.723702

Kullanılan Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri

Küresel navigasyon uydu sistemi (Global Navigation Satellite System = GNSS), küresel veya bölgesel bazda konumlandırma, navigasyon ve zamanlama hizmetleri sağlayan herhangi bir uydu takımıyla tanımlanan genel bir terimdir (Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS), 2021). İlk geliştirilme amaçları savunma olan Global Navigation Satellite System (GNSS) günümüzde Navigasyon amaçlı uygulamalar, konum belirleme amaçlı uygulamalar, konum bazlı uygulamaların kullanımı için önem arz etmektedir. GNSS sistemleri yeryüzünden yaklaşık 19000 km ile 36000 km uzaklıkta, kendi sistemlerine ait yörüngeleri üzerinde hareket eden uydulardan oluşmaktadır (Şekil 33). Küresel hizmet veren GNSS sistemleri olduğu gibi, sadece ülke sınırları içinde hizmet veren GNSS sistemleri mevcuttur.



Şekil 33 (Official U.S. government information about the Global Positioning System, 2021)

Global Positioning System (GPS)

Amerika Birleşik Devletleri tarafından kurulan ve kontrol edilen GPS sisteminde 24 uydu yeryüzünden yaklaşık 20200 km yükseklikte çalışmaktadır. Toplamda 6 ayrı yörünge üzerinde 4'er uydu bulunmaktadır. Dünya çapında hizmet vermektedir. İnternet adresi: www.gps.gov

BeiDou Navigation Satellite System (BDS)

BeiDou veya BDS, Çin Halk Cumhuriyeti'nin sahip olduğu ve işlettiği küresel bir GNSS'dir. Çin şu anda sistemi 35 uyduyla küresel kapsama alanı sağlayacak şekilde daha da genişletiyor. BDS daha önce Compass olarak adlandırılıyordu. İnternet adresi: <http://en.beidou.gov.cn/>

Galileo

Galileo, Avrupa Birliği'nin sahip olduğu ve işlettiği küresel bir GNSS'dir. AB, 2016'da Galileo ilk Hizmetlerinin başladığını ilan etti ve 24'ten fazla uydu sistemini tamamlamayı planlıyordu. İnternet adresi: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/system>

Glonass

GLONASS (Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema veya Global Navigasyon Uydu Sistemi), Rusya Federasyonu'nun sahip olduğu ve işlettiği küresel bir GNSS'dir. Tam işlevsel sistem 24+ uydudan oluşur. İnternet adresi: <https://www.glonass-iac.ru/en/index.php>

Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS)

IRNSS, Hindistan Hükümeti tarafından sahip olunan ve işletilen bölgesel bir GNSS'dir. IRNSS, Hindistan bölgesini ve Hindistan anakarasını çevreleyen 1500 km'yi kapsayacak şekilde tasarlanmış otonom bir sistemdir. Sistem 7 uydudan oluşuyor. 2016'da Hindistan, IRNSS'yi Navigation Indian Constellation (NavIC, "denizci" veya "gezgin" anlamına geliyor) olarak yeniden adlandırdı. İnternet adresi: <https://www.isro.gov.in/irnss-programme>

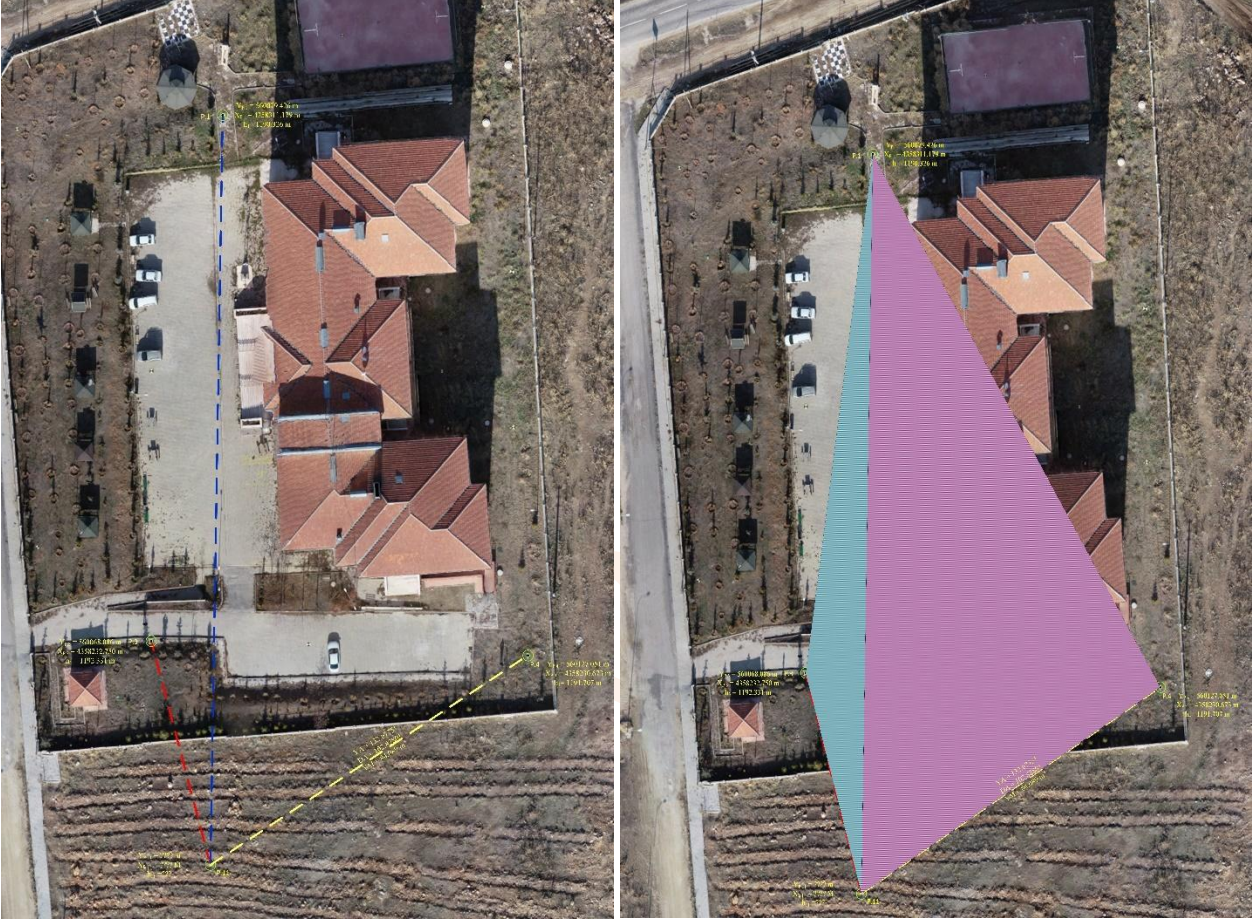
Quasi – Zenith Satellite System (QZSS)

QZSS, Japonya Hükümetine ait olan ve QZS System Service Inc. (QSS) tarafından işletilen bölgesel bir GNSS'dir. QZSS, Doğu Asya ve Okyanusya'da kapsama alanını iyileştirmek için GPS'i tamamlar. Japonya, 4 uydudan oluşan bir operasyonel takımı yıldızına sahip olmayı ve 2023 yılına kadar otonom yetenek için 7 uyduya genişletmeyi planlıyor. İnternet adresi: <https://qzss.go.jp/en/>

Yeryüzündeki Bir Noktanın Küresel Navigasyon Uydu Sistemi ile Konum Bulma Mantığı

Yersel yöntemlerle geriden kestirme yönteminde bir noktanın konumunun bulunması için:

- Ölçüm işlemi koordinatı bulunacak noktadan yapılmalıdır,
- Koordinatı bulunacak noktadan *koordinatı bilinen* noktalara mesafe ve/veya açı ölçümleri yapılarak noktanın yatay (X-Y) ve düşey (Z) koordinatları hesaplanabilir.



Yersel ölçümlerde nokta koordinatı hesaplanırken, koordinatı bulunacak olan noktadan, koordinatı bilinen en az 3 noktaya mesafe ve/veya açı ölçümleri yardımıyla, kontrollü bir şekilde, noktanın koordinatları hesaplanır. 3 noktaya ölçüm yapılmasının temel nedeni, bulunmak istenen X ve Y yatay düzlem koordinatları ve h yükseklik (Z koordinatı) koordinatlarından kaynaklıdır. Yani bulunmak istenen 3 bilinmeyen için koordinatı bilinen 3 noktaya mesafe ölçümleri sonucu nokta koordinatları hesaplanır. Ölçüm işlemini matematiksel olarak ifade etmek için:

- Ölçülen mesafe değerlerini S_3 (kırmızı çizgi uzunluğu), S_1 (mavi çizgi uzunluğu) ve S_4 (sarı çizgi uzunluğu),
- Koordinatları bilinen noktaların koordinatları:
 - P.3 koordinatları $(X_{P.3}, Y_{P.3}, Z_{P.3})$,
 - P.1 koordinatları $(X_{P.1}, Y_{P.1}, Z_{P.1})$,

- P.4 koordinatları $(X_{P.4}, Y_{P.4}, Z_{P.4})$,
- Koordinatı bulunacak olan noktanın koordinatları:
 - P.11 koordinatları $(X_{P.11}, Y_{P.11}, Z_{P.11})$

olarak alınsın. P.11 noktasının koordinatlarını bulmak için tek bir ölçülen mesafe değerinin denklemi:

$$\sqrt{((X_{P.11} - X_{P.3})^2 + (Y_{P.11} - Y_{P.3})^2 + (Z_{P.11} - Z_{P.3})^2)} = S_3 \quad \text{veya}$$

$$(X_{P.11} - X_{P.3})^2 + (Y_{P.11} - Y_{P.3})^2 + (Z_{P.11} - Z_{P.3})^2 = S_3^2$$

formülüyle yazılır. $X_{P.11}, Y_{P.11}$ ve $Z_{P.11}$ 3 bilinmeyen çözüm için yukarıdaki **tek bir denklem** yetmeyecektir. Yapılan diğer iki ölçüm de benzer şekilde denkleme dönüştürülmeli ve bilinmeyenler denklemlerin çözümü sayesinde elde edilmelidir.

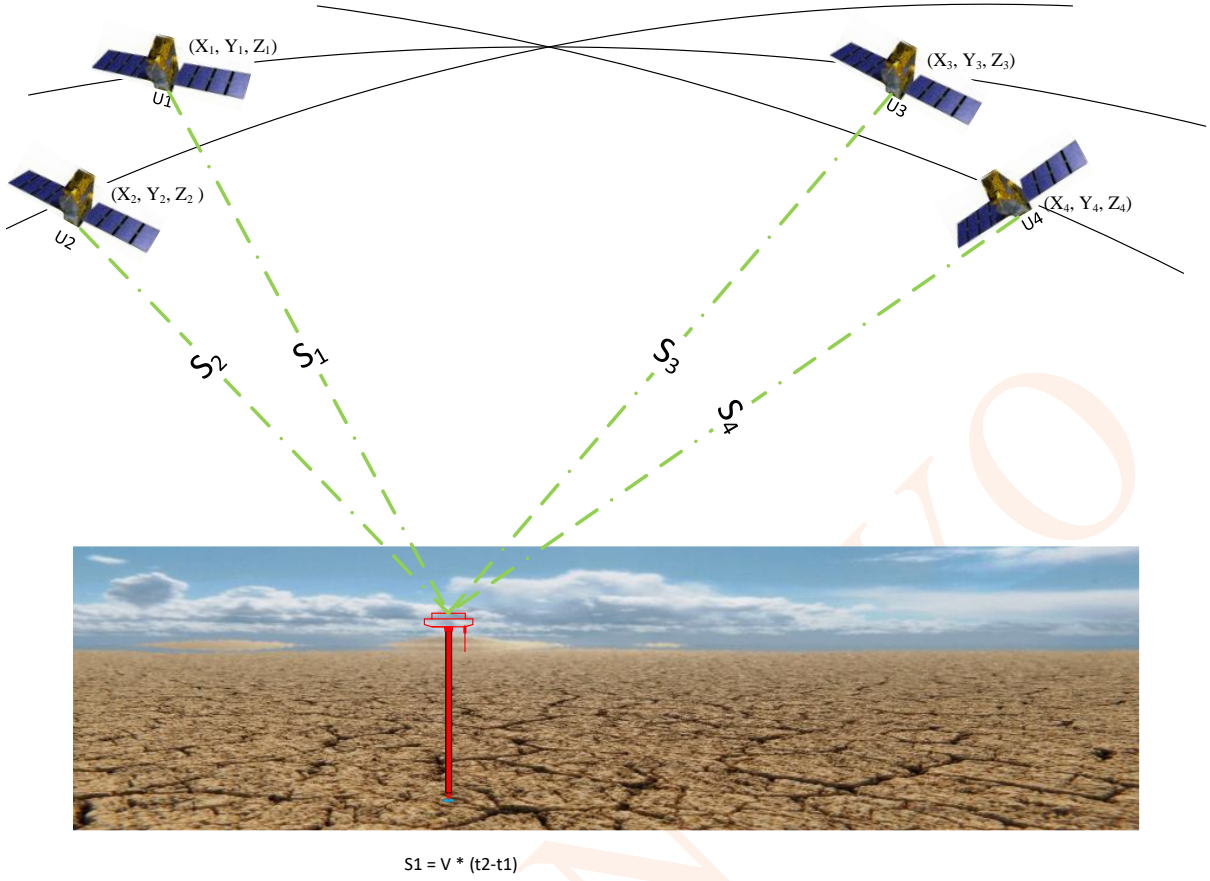
$$(X_{P.11} - X_{P.3})^2 + (Y_{P.11} - Y_{P.3})^2 + (Z_{P.11} - Z_{P.3})^2 = S_3^2$$

$$(X_{P.11} - X_{P.1})^2 + (Y_{P.11} - Y_{P.1})^2 + (Z_{P.11} - Z_{P.1})^2 = S_1^2$$

$$(X_{P.11} - X_{P.4})^2 + (Y_{P.11} - Y_{P.4})^2 + (Z_{P.11} - Z_{P.4})^2 = S_4^2$$

P.11 noktasının bilinmeyen $X_{P.11}, Y_{P.11}$ ve $Z_{P.11}$ koordinatları, koordinatları bilinen 3 noktaya (P.3, P.1 ve P.4 noktaları) yapılan mesafe ölçümlerinin sonuçları yardımıyla (S_3, S_1 ve S_4) yukarıdaki denklemlerin çözülmesi ile elde edilecektir. Denklemlerde P.1'in, P.3'ün ve P.4'ün X, Y ve Z koordinatları yerine konduğunda ve ölçülen S_1, S_2 ve S_3 mesafe değeri yerine konduğunda P.11 noktasının orijin noktasına olan mesafesi hesaplanabilir.

GNSS tekniğinde de aynı yersel ölçümlerle yapılan geriden kestirme hesabı işlemindeki ölçüm mantığı uygulanacaktır. GNSS tekniğinde koordinatı bulunacak nokta üzerinde GNSS sinyal alıcısı bulunmaktadır ve bir nevi ölçüm bu noktadan yapılacaktır (GNSS sinyal alıcısı ölçüm yapmayacak sinyal toplayacaktır). Ölçülen mesafe (hesaplanacak mesafe), GNSS sinyal alıcısı ile GNSS uydu sistemindeki bir uydu arasındaki mesafedir. *GNSS sinyal alıcısı, yersel ölçümde kullanılan elektronik takeometre gibi lazer atımı ile mesafe ölçümü yapmaz, uydulardan gelen sinyalleri toplar ve üzerinde bulunduğu noktanın konumunu hesaplar* (Şekil 34).



Şekil 34

Yersel ölçüm yönteminde uygulanan geriden kestirme yönteminde mesafe ve/veya açı değerleri ölçülüyordu. Ek olarak ölçüm yapılan noktaların koordinatları biliniyordu.

GNSS tekniğinde, GNSS sinyal alıcısı uydulardan gelen radyo sinyallerini algılar. GNSS uydularından sinyaller yollanırken, sinyal üzerine:

- Hangi uydu olduğu (Şekil 34 örneğinde U1 veya U2 isimli uydu olması),
- Yörünge üzerinde sinyali gönderdiği andaki konum değeri (Jeosantrik koordinat sistemi - Yer sabit yer merkez koordinat sistemindeki koordinat değerleri),
- Sinyalin uydudan çıkış zamanı (*U1 uydusu için t_{U1} zamanı*) bilgilerini işlenir.

GNSS sinyal alıcısı uydudan (Örneğin U1 uydusu) sinyali aldığı anda:

- Sinyalin üzerindeki bilgileri ayıklar (uydu koordinat değeri, sinyalin uydudan çıkış zamanı, uydu bilgisi),
- Sinyalin sinyal alıcıya vardığı andaki zamanı (*t_2 zamanı*) kaydeder.

Uydu ile GNSS sinyal alıcısı arasındaki mesafe hesaplanırken uydudan çıkan radyo sinyalinin hızı ile sinyalin kat ettiği süre çarpılır. GNSS uydularının gönderdiği radyo sinyalleri ışık hızı ile aynı

hızdadır. GNSS uydularının gönderdiği radyo sinyallerinin hızı (V) yaklaşık 300000 km/saniye'dir. Bu bağlamda aşağıdaki denklem ile U_1 uydusu ile GNSS sinyal alıcısı arasındaki mesafe:

$$S_1 = V * (t_2 - t_{U1})$$

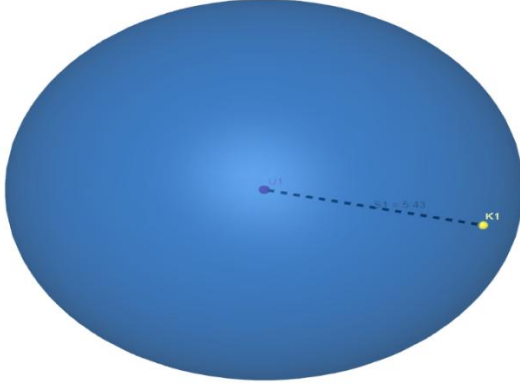
formülü ile **hesaplanmalıdır**.

Yersel ölçüm yöntemleri ile **ölçüm yapılan noktanın X – Y – Z koordinatlarını (3 adet bilinmeyen var)** hesaplamak için geriden kestirme hesabında, koordinatı bilinen en az **3 noktaya** mesafe ölçümü yapılmaktadır. Yersel ölçüm yöntemlerinde noktanın yatay düzlemdeki koordinatları X – Y ve yükseklik değeri olan Z koordinatlarını (**3 bilinmeyen**) geriden kestirme hesabı ile hassas ve dengeli şekilde bulabilmek için, **koordinatı bilinen en az 3 noktaya** ölçüm yapılması yeterli olmaktadır.

Yukarıdaki anlatıma göre GNSS tekniği ile noktanın koordinatı bulunacaksa sorulması gereken sorular:

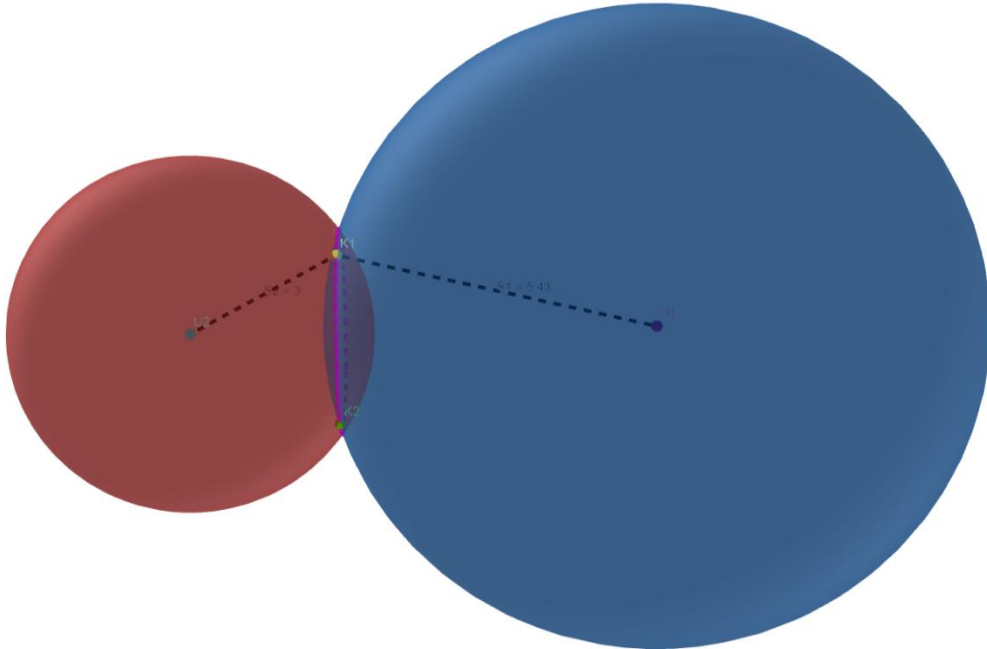
- Noktanın koordinatlarının bulunması için **kaç uydudan sinyal alınması gerekmektedir?**
- Noktanın X – Y – Z koordinatlarının (**3 bilinmeyen**) bulunması için **3 uydudan sinyal alınması yeterli olur mu?**

Soruların cevaplarının bulunması için GNSS uydusu ile GNSS sinyal alıcısı arasındaki mesafeyi dikkate alarak geometrik bir çözüm üretilebilir. GNSS uydusu ile GNSS sinyal alıcısı arasındaki bulunacak olan mesafe, bir kürenin yarıçapı ve GNSS uydusu kürenin merkezi olacak şekilde düşünelim (Şekil 35). Şekil 35 incelendiğinde U_1 uydusu kürenin merkezi. Şekil 35 K1 ifadesi, dünya üzerindeki sinyal alıcısıyı temsil etmektedir. S_1 değeri, U_1 uydusu ile K1 sinyal alıcısı arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. U_1 uydusundan çıkan sinyalin, uydunun etrafında S_1 mesafe uzaklıktaki noktaların oluşturduğu şekil çizildiğinde bir küre oluşur. Küre yüzeyindeki sonsuz sayıda nokta, sinyal alıcısının yeri olabilir. Yani K1 sinyal alıcısı, uzayda U_1 uydusuna S_1 mesafe uzaklıktaki herhangi noktadan birisidir. O zaman K1 sinyal alıcısının konumunu belirlemek için sadece tek bir uydudan sinyal alınması yeterli olmayacaktır.

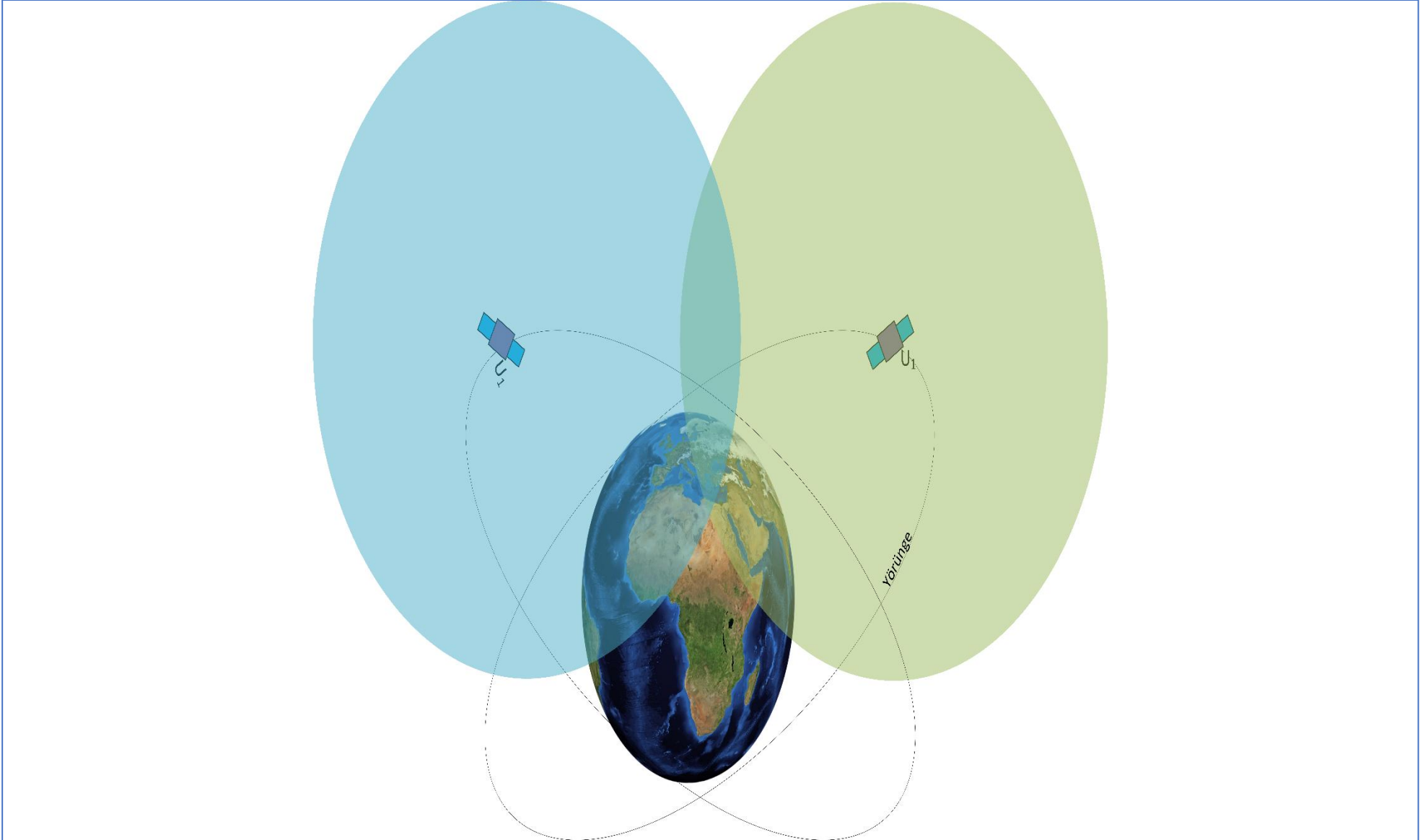


Şekil 35

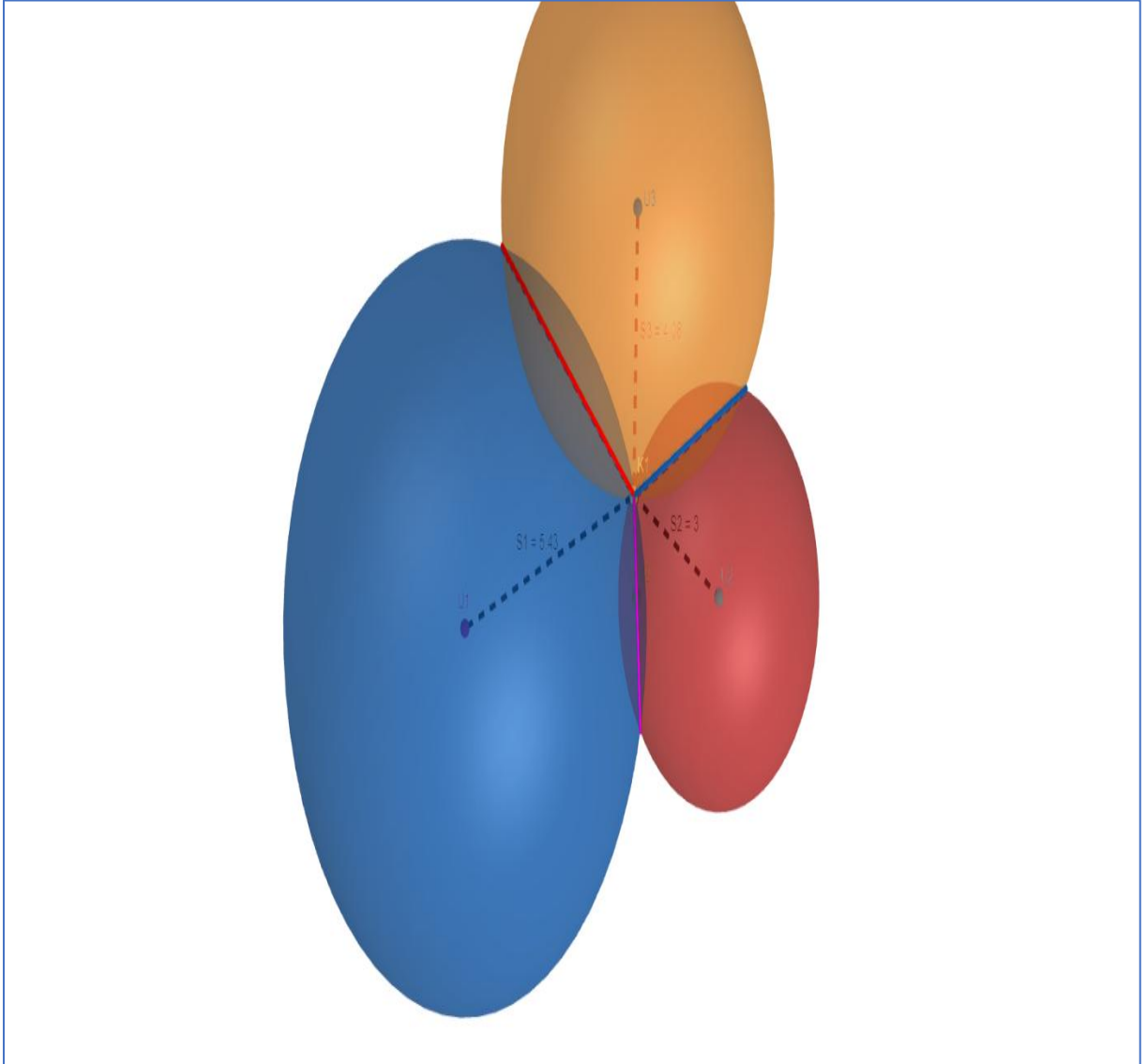
Şekil 36 U_1 ve U_2 uydularının temsili vardır. **Amaç: K1 sinyal alıcısının dünya üzerindeki konumunu uydulara olan mesafesi yardımıyla bulunmasıdır.** K1 noktası U_1 uydusuna S_1 ; U_2 uydusuna S_2 mesafe uzağındadır. Fakat Şekil 36 incelendiğinde U_1 ve U_2 uydusunun yaydığı sinyalleri temsil eden küreler, ikinci bir noktada daha kesişmektedir. K2 noktası, U_1 ve U_2 uydularına benzer mesafelerde uzayda ikinci noktadır. O zaman K1 sinyal alıcısının uzaydaki konumunu tekil bir şekilde belirlemek için iki uydudan sinyal alması da yeterli olmayacaktır.



Şekil 36

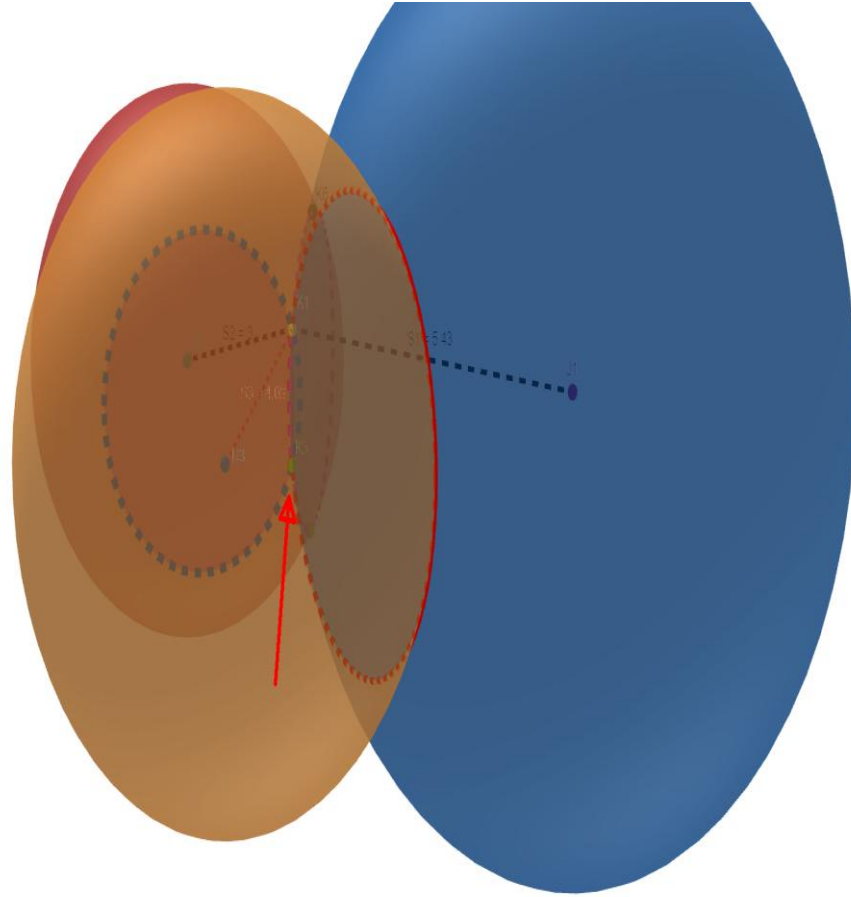


Şekil 37 U_1 , U_2 ve U_3 uydularının temsili vardır. **Amaç: K1 sinyal alıcısının dünya üzerindeki konumunu uydulara olan mesafesi yardımıyla bulunmasıdır.** K1 noktası U_1 uydusuna S_1 ; U_2 uydusuna S_2 ; U_3 uydusuna S_3 mesafe uzağındadır. Şekil 37 dikkatli incelendiğinde U_1 uydusundan çıkan radyo sinyalinin S_1 mesafe uzağında, U_2 uydusundan çıkan radyo sinyalinin S_2 mesafe uzağında ve U_3 uydusundan çıkan radyo sinyalinin S_3 mesafe uzağında ikinci bir nokta daha vardır. K3 noktası, U_1 , U_2 ve U_3 uydularına benzer mesafelerde uzayda ikinci noktadır. 3 uyduyu temsil eden küreler iki noktada kesişmektedir. O zaman K1 sinyal alıcısının uzaydaki konumunu tekil bir şekilde belirlemek için üç uydudan sinyal alması da yeterli olmayacaktır.



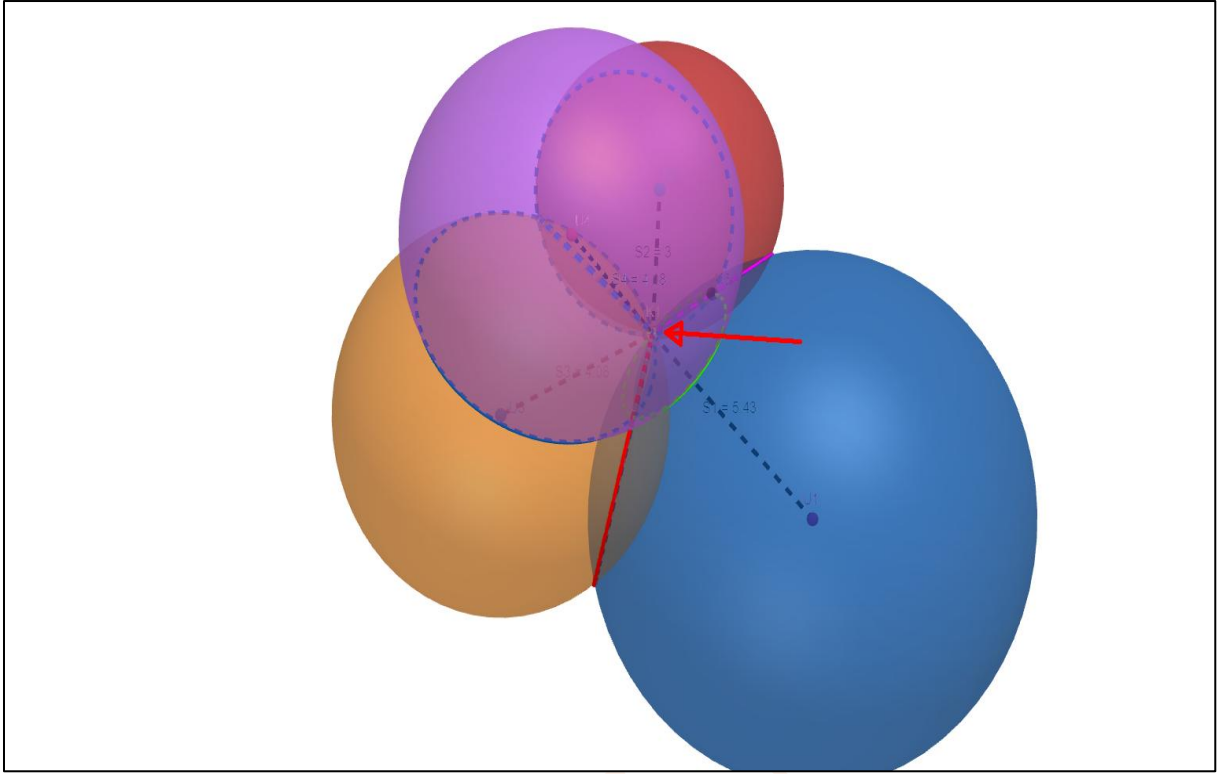
Şekil 37

Şekil 38 U_1 , U_2 ve U_3 uydularının K3 noktasında da kesişimi temsili vardır. K3 noktasının yeri kırmızı renkli ok ile de işaret edilmektedir.

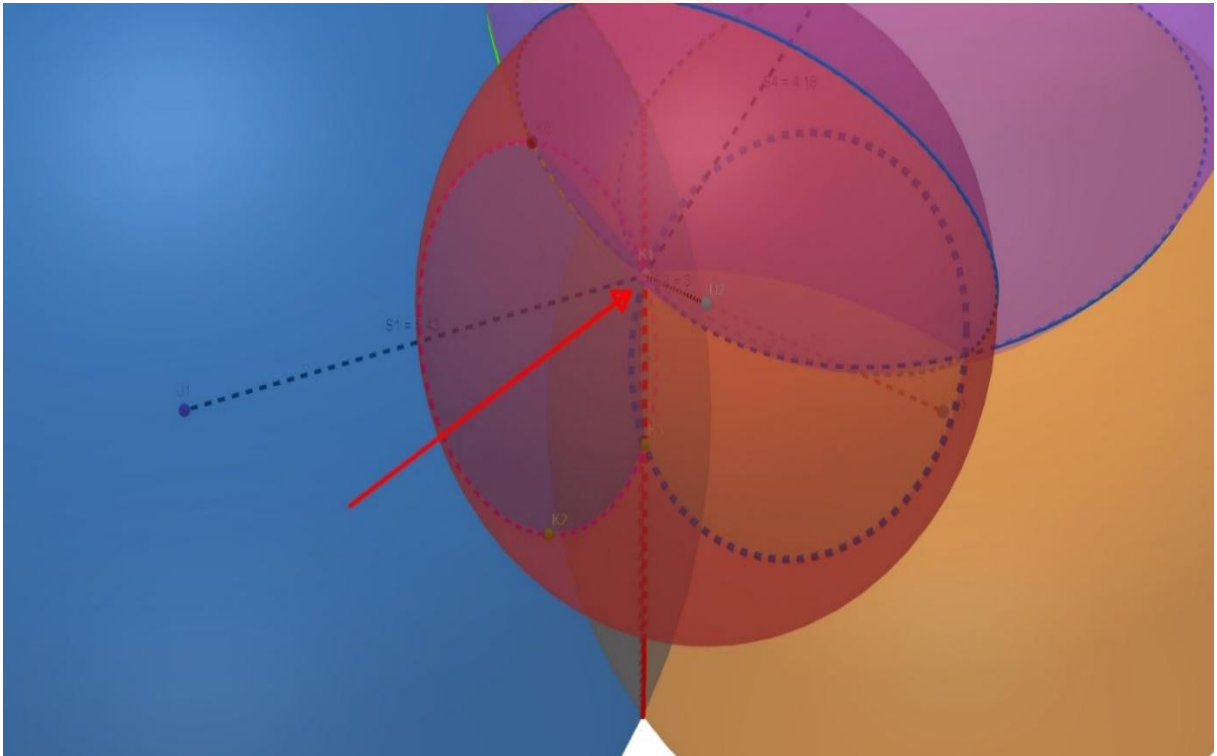


Şekil 38

Şekil 39 ve Şekil 40 daha önceki U_1 , U_2 ve U_3 uydularına ek dördüncü bir uydunun olduğu görülmektedir. U_4 uydusu K1 noktasına S_4 mesafe uzaklıktadır. K1 noktasına farklı uzaklıkta 4 uydunun kesişimi tektir ve K1 noktasıdır. Her iki küre veya her üç küre iki ayrı noktada kesişiyor ve istenildiği şekilde yani tek bir noktada kesişmiyor. Fakat dördüncü küre sayesinde tek bir noktada kesişim sağlanıyor. Şekil 39 kesişimin olduğu K1 noktasını kırmızı ok ile temsilidir.



Şekil 39



Şekil 40

Yukarıdaki anlatıma göre GNSS uydularından gelen sinyaller yardımıyla konum elde edebilmek için aşağıda belirtilen kriterlerin gerçekleşmesi gerekmektedir. GNSS uydularında gelen sinyaller ile konum bilgisinin elde edilebilmesi için:

- GNSS uydularından yayılan sinyaller ile dünya üzerindeki bir noktanın (örnekte K1 noktası) konumunu bulmak için en az 4 uydudan sinyal alınması gerekmektedir,
- GNSS uydularından gelen sinyaller ile nokta konumu bulmak için uyduların sinyal alıcıya olan mesafesi aynı olmak zorunda değildir. Uydular, sinyal alıcıdan farklı uzaklıkta olabilirler,
- GNSS sinyal alıcısı ile nokta konumunu bulmak için, en az 4 uydudan sinyal alıcıya tarih ve saat zaman değeri olarak aynı anda gelen sinyaller kullanılmalıdır,
- GNSS uydusu ile noktanın konumunu bulmak için kullanılan GNSS sinyal alıcısı arasındaki mesafe değerinin hesaplanması için kullanılacak formüldeki (örneğin $S_1 = V * (t_2 - t_{u1})$) hız değerinde değişme olmamalıdır,
- GNSS uydusu ile noktanın konumunu bulmak için kullanılan GNSS sinyal alıcısı arasındaki mesafe değerinin hesaplanması için kullanılacak formüldeki (örneğin $S_1 = V * (t_2 - t_{u1})$) uydunun saat bilgisi ile alıcının saat bilgisi eş zamanlı çalışmalıdır.

Sıralanan kriterler sağlandığı takdirde en az 4 GNSS uydusundan, GNSS sinyal alıcısına eş zamanlı gelen sinyaller ile sinyal alıcının üzerine kurulu olduğu noktanın konumu bulunabilir. Her bir sinyalin üzerindeki bilgiler (uydu bilgisi, uydunun konum bilgisi, sinyalin uydudan çıkış zamanı) sinyal alıcı tarafından çözüldüğünde uydu ile sinyal alıcı arasındaki mesafe $S_1 = V * (t_2 - t_{u1})$ basit formülü ile hesaplanabilir. Mesafe değeri bulunduğu takdirde, yersel ölçüm tekniğindeki geriden kestirme hesabında kullanılan formüller kullanılabilir. Koordinatı bulunacak nokta ile koordinatı bilinen bir GNSS uydusu arasındaki $S_1 = V * (t_2 - t_{u1})$ formüllü ile hesaplanan mesafe değeri, koordinatlar yardımıyla hesaplanan değere eşit olması gerekir:

$$\sqrt{(X - X_{U1})^2 + (Y - Y_{U1})^2 + (Z - Z_{U1})^2} = V * (t_2 - t_{U1}) \quad \text{veya}$$

$$(X - X_{U1})^2 + (Y - Y_{U1})^2 + (Z - Z_{U1})^2 = (V * (t_2 - t_{U1}))^2$$

Yukarıdaki kriterler sağlandığında ve bu formülü en az 4 uydudan gelen sinyaller sayesinde oluşturursak, noktanın koordinat sisteminin orijin noktasına olan mesafe değeri bulunmuş olacaktır. Olması gereken formüller aşağıda listelenmiştir:

Denklem 1

$$(X - X_{U1})^2 + (Y - Y_{U1})^2 + (Z - Z_{U1})^2 = (V * (t_2 - t_{U1}))^2$$

$$(X - X_{U2})^2 + (Y - Y_{U2})^2 + (Z - Z_{U2})^2 = (V * (t_2 - t_{U2}))^2$$

$$(X - X_{U3})^2 + (Y - Y_{U3})^2 + (Z - Z_{U3})^2 = (V * (t_2 - t_{U3}))^2$$

$$(X - X_{U4})^2 + (Y - Y_{U4})^2 + (Z - Z_{U4})^2 = (V * (t_2 - t_{U4}))^2$$

GNSS ÖLÇÜMLERİNDE OLUŞAN HATALAR

GNSS tekniğinde ölçülerden elde edilen sonuçları da etkileyen bazı rastlantısal ve sistematik **sapmalar** söz konusudur. Bu sapmalar GNSS tekniğinin birçok kullanım alanı (Navigasyon uygulamaları, ...) için fazla önemli bir sakınca *oluşturmamakla* birlikte özellikle bilimsel çalışmalarda (yüksek doğrulukta konum belirleme, yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi, jeoid belirleme, vb.) bunların davranışı ve büyüklüğü çok iyi modellendirilmeli ve kontrol altında tutulmalıdır (Kahveci & Yıldız, 2012). Bu sapmalar:

- Uydulara bağlı sapmalar,
- Alıcı donanımına bağlı sapmalar,
- Ortam etkileri şeklindeki sapmalar olarak sınıflandırılabilir.

GNSS tekniğinde konum belirlemede temel kavram olan GNSS uydusu ile GNSS sinyal alıcısı arasındaki uzaklığın belirlenmesinde etkili olan temel hata kaynakları (Kahveci & Yıldız, 2012):

- Uydu efemeris hataları,
- Uydu ve sinyal alıcı saati hataları,
- İyonosferik etki,
- Troposferik etki,
- Sinyal yansıma (Multipath) etkisi,
- Anten faz merkezi hataları.

Uydu efemeris hataları:

Efemeris (ephemeris) bilgileri, uyduların gönderdiği sinyal üzerindeki bilgilerdir. Efemeris verisi sayesinde uydunun konumu, zaman bilgisi ve uydunun sağlığı konusunda bilgi elde edilir. GNSS sinyal alıcısı elde ettiği efemeris bilgisi sayesinde, uydunun konum değeri elde edilir, sinyalin uydudan çıkış zamanı elde edilir ve uzay geriden kestirme işleminin yapılmasını sağlar. Uydular yörüngeleri üzerinde hareket eder ve bu hareket **yer kontrol istasyonlarıyla** kontrol edilir. Uzayda oluşabilecek güneş, yerçekimi gibi etkiler uyduların yörüngelerindeki konumlarını etkiler.

Yer kontrol istasyonları uyduların yörüngelerindeki konumlarının kestirimini yaparlar. Belirlenen hata uydulara yer kontrol istasyonları tarafından iletilir. Bir kontrol istasyonu tarafından yükleme zamanından bir sonraki yüklemeye kadar hata büyür. Uydu ile alıcı arası yaklaşık 20200 km kabul edilirse, efemeris hatası yaklaşık ± 2.5 m olabilir (Kahveci & Yıldız, 2012).

GNSS uygulamalarının sinyalleri üzerinde gönderilen uydu efemeris bilgilerine yayın (Broadcast) efemeris bilgileri denir. Uydunun o an gönderdiği bilgilerdir. Yer kontrol istasyonları GNSS uyduların yörüngelerindeki konumlarını tekrar hesaplayıp internet üzerinde yayınlamaktadırlar. Yer kontrol istasyonlarının ek hesaplamaları ile tekrardan hesaplanan uydu konumlarının olduğu efemeris bilgileri

- Ultra – Rapid,

- Rapid,
- Final olmak üzere 3 farklı formatta kurumlar tarafından yayımlanır.

Kullanıcılar geçmişteki ölçüm değerlerini bu yayınlanan yeni efemeris dosyalarındaki uydu koordinatları ile yeniden değerlendirebilir. Özellikle statik ölçüm yöntemiyle konum değeri elde edilecekse, uyduların hassas efemeris değerlerine ihtiyaç vardır.

GNSS uyduların konumları, GNSS sinyal alıcıların konumlarının belirlenmesi için kullanılan geriden kestirme hesabı için gereklidir. Eğer yapılacak konum belirleme çalışmalarında noktanın koordinat belirleme hassasiyeti yüksek bir çalışma isteniyor uygun GNSS ölçüm yöntemi (statik ölçüm yöntemi) ve gerekli efemeris bilgisi ile sağlanabilir.

Uydu saat hatası ve Sinyal alıcı saat hatası:

GNSS tekniği, uydudan alıcıya sinyal iletim süresinin ölçülmesine bağlıdır; bu da zamanın her iki ucunda da bilinmesine bağlıdır. GNSS uyduları, çok doğru olan ancak bir milisaniyeye kadar kayabilen (doğruluk farkı yaratmaya yetecek kadar) atomik saatler kullanır. Bu hatalar, saat düzeltmelerinin hesaplanmasıyla (izleme istasyonlarında) ve düzeltmelerin GPS sinyaliyle birlikte uygun şekilde donatılmış GPS alıcılarına iletilmesiyle en aza indirilir (Penn state college, 2021).

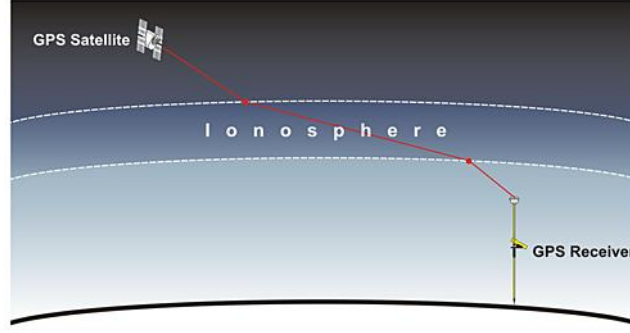
GNSS sinyal alıcıları, GNSS uydularında kullanılan atomik saatlerden daha az kararlı olan quartz kristal saatlerle donatılmıştır. Bununla birlikte, sinyal alıcı saat hatası, iki uydudan (iletim süreleri tam olarak bilinen) gelen sinyallerin varış süreleri karşılaştırılarak ortadan kaldırılabilir (Penn state college, 2021).

GNSS uydusunun kullandığı atomik saat ile GNSS sinyal alıcısının kullandığı quartz saat uyumlu değildir. Atomik saatte enerjinin devamlılığı vardır ve bu sayede saat hassastır. Quartz saat enerjisini pilinden alır ve atomik saate göre hassasiyeti düşüktür. Bu sebeple GNSS uydusunun saati ile GNSS sinyal alıcısının saati eş zamanlı çalışmaz. Bu bağlamda uydudan çıkan sinyalin kat ettiği zamanın hesaplanması tam yapılamaz. 4'den fazla uydudan sinyal alınması saat hatalarının giderilmesinde etki edebilir.

İyonosferik Etki:

İyonosfer, hava moleküllerinin ileri derecede yoğunlaşmış halde bulunduğu ve elektrik iletkenliği kazandığı yüksek atmosfer bölgelerinin tümüdür (Kahveci & Yıldız, 2012).

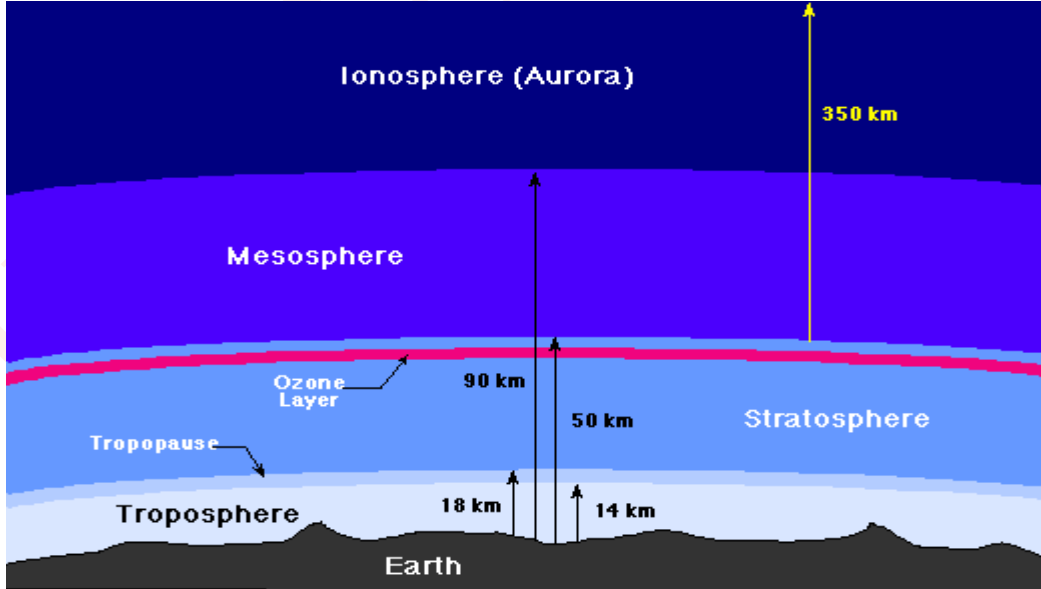
GPS sinyalleri iyonosferden geçerken gecikir. Dünyanın 50 km yukarısından başlar ve 1000 km veya daha fazlasına kadar uzanır. Gecikme elektron sayısı (sinyal yolu boyunca entegre yoğunluk) ile orantılıdır. Serbest elektronların yoğunluğu günün saatine ve enlemine göre büyük ölçüde değişir. Güneş döngülerinden ve mevsimlerden ve özellikle kısa vadeli etkilerden kaynaklanan farklılıklar daha az güçlüdür ancak daha az tahmin edilebilirdir.



Şekil 41 (Pennstate College, 2021)

İyonosfer yoğunluğu değişir; bu nedenle sinyaller bazı yerlerde diğerlerinden daha fazla gecikir. Gecikme aynı zamanda uydunun tepeye ne kadar yakın olduğuna da bağlıdır (sinyalin iyonosferden geçtiği mesafenin en az olduğu yerde). İyonosfer özelliklerini modelleyerek, GPS izleme istasyonları düzeltmeleri hesaplayabilir ve uydulara iletebilir ve bu da bu düzeltmeleri alıcılara iletebilir. Bu gecikmenin yalnızca dörtte üçünü ortadan kaldırılabilir, ancak iyonosfer GNSS hataları arasında en büyük ikinci katkıda bulunur (Penn state college, 2021).

İyonosfer tabakasının GNSS uydularının sinyallerine olan etkileri çift frekanslı ölçülerde (sinyallerin L1 ve L2 sinyalleri ile iletilmesi ve alıcıların bu iki sinyali de çözebilmeleri) büyük oranda giderilmektedir (Kahveci & Yıldız, 2012). Günümüzde kullanılan GNSS sinyal alıcıları çift frekanslı alıcılara sahiptirler.



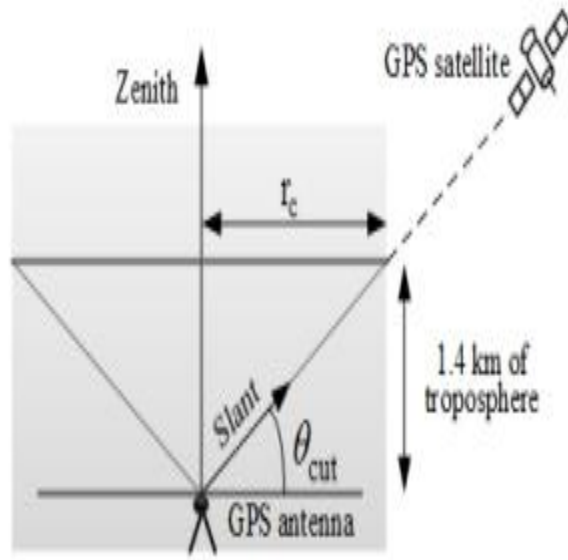
Şekil 42 (Rochester Üniversitesi, 2021)

Troposfer etkisi

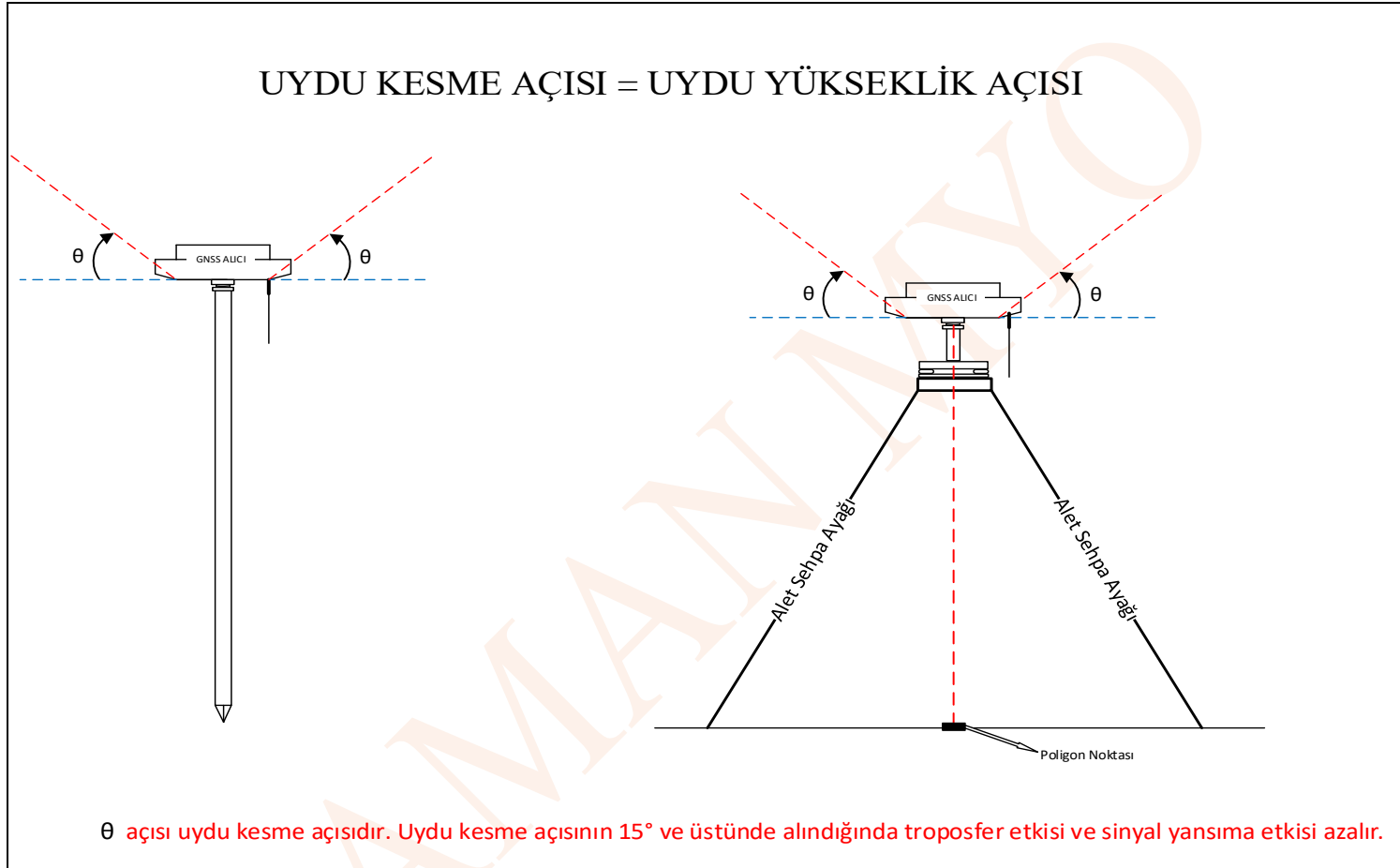
Troposfer, havanın yeryüzü ile temas halinde olan en alt tabakasıdır. Kalınlığı kutuplarda yaklaşık 8 km, ekvatorda 18 km'dir. Hava olayları genel olarak troposferin 3-4 km'lik alt kısımlarında

görülmektedir. Troposferdeki etki radyo frekanslarını dağıtıcı etkisi yoktur. İyonosferik etkinin giderilmesinde GNSS sinyal alıcılarının çift frekans algılamaları (hem L1 frekansı hem de L2 frekansı) kullanılabilirken, troposferin sinyallere olan etkisini gidermede geçerli değildir (Kahveci & Yıldız, 2012).

Troposfer tabakasında GNSS uydularından gelen radyo sinyallerinin hızı ve yönü değişir. Troposfer tabakasındaki gecikme, GNSS uydu sinyalinin troposfer tabakasında kat ettiği yola bağlı olduğundan aynı zamanda uyduya olan zenit açısının da bir fonksiyonudur. Bu nedenle sinyal alıcının yükseklik açısı (uydu kesme açısı) değerinin 15° ve yukarısı seçilmelidir (Şekil 43). Daha küçük açılardan seçilmesinde sinyal yansıma etkisi olacaktır (Kahveci & Yıldız, 2012).



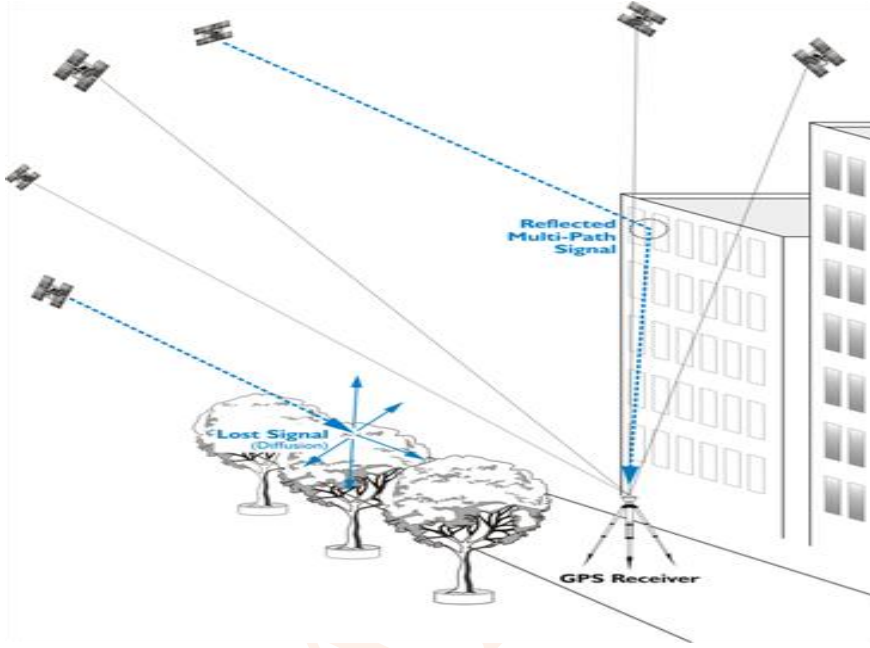
Şekil 43 (Tang, Liao, Zhang, Li, & Yu, 2016)



Şekil 44

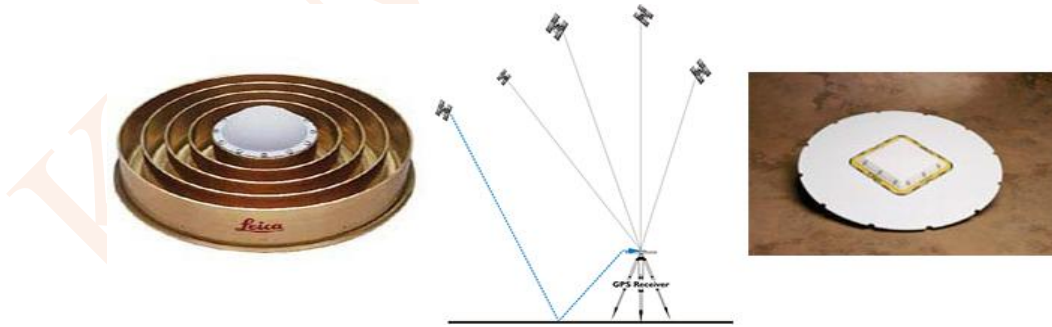
Sinyal yansıma (Multipath) etkisi

GNSS tekniğinde, GNSS uygulamalarından çıkan sinyallerin atmosfer boyunca doğrudan GNSS sinyal alıcılarına gitmesi istenmektedir. Gerçekte olan ise, GNSS sinyal alıcıları doğrudan uydulardan alınan sinyaller ile binalar, ağaçlar ve hatta yer gibi çevredeki nesnelere yansıyan diğer sinyalleri de algırlar. Uydudan algılanacak olan sinyal haricinde farklı yollardan gelen sinyallerin yol açtığı duruma sinyal yansıma etkisi denir (Şekil 45).



Şekil 45 (Pennstate college, 2021)

Antenler, aşağıdan yansıyan sinyallerin neden olduğu paraziti en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 45), ancak yukarıdan yansıyan sinyallerin ortadan kaldırılması daha zordur.

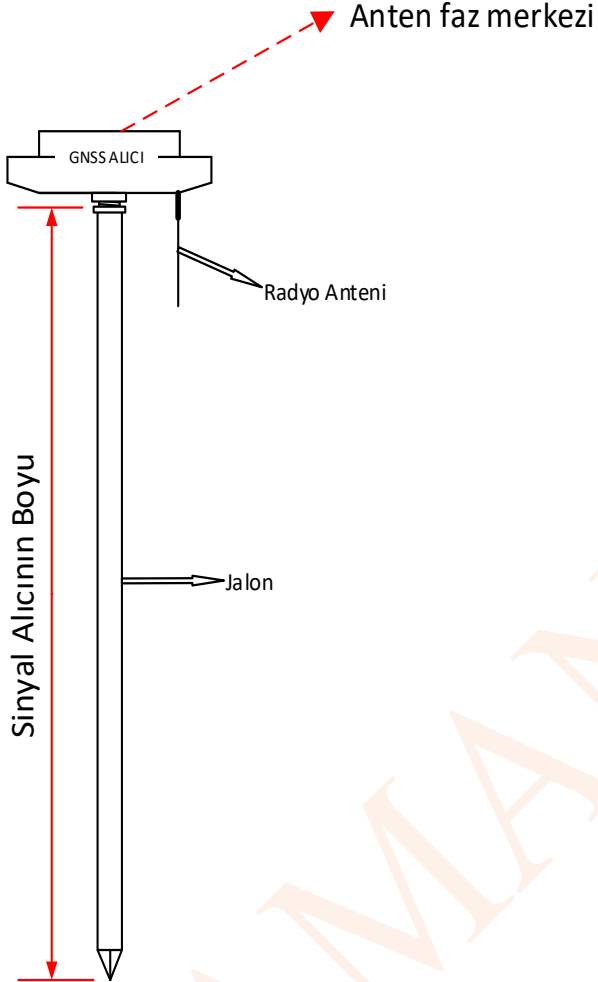


Şekil 46 (Pennstate college, 2021)

Sinyal yansıma hatalarını en aza indirmek için uydu kesme açısı 15° ve üstünde değerlerde alınabilir.

Anten Faz Merkezi Hatası Etkisi

GNSS sinyal alıcı anteni faz merkezi GNSS uydularının antene ulaştığı nokta olup bu noktada geometrik faz merkezinden farklıdır (Kahveci & Yıldız, 2012).

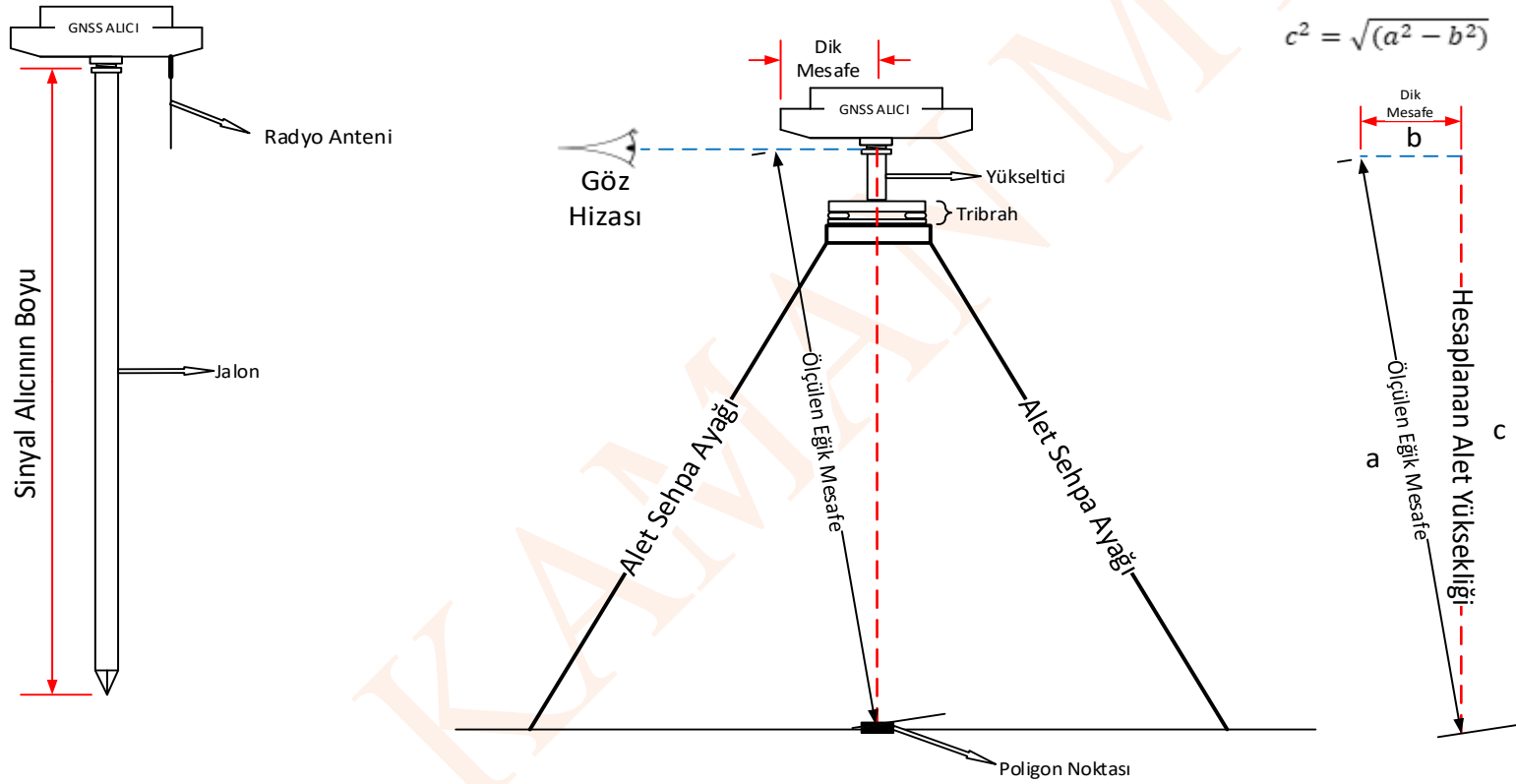


İdeal olarak GNSS sinyal alıcısının faz merkezi, antene ulaşan sinyalin geliş doğrultusundan bağımsız olması gerekir. Ancak uygulamada, uydu sinyalinin geliş açısı ve uydu kesme açısına (yükseklik açısı) bağlı olarak antenlerin faz merkezlerinde küçük değişimler gözükmemektedir (Kahveci & Yıldız, 2012).

Şekil 47

Jeodezik amaçlı antenlerde, genellikle faz merkezi yatay konumda anten fiziksel merkezi ile aynı olup, **esas sorun düşey bileşendedir**. Bu nedenle, ortalama faz merkezleri anten fiziksel referans merkezine göre çok iyi bilinmeli ve arazide yapılan anten yüksekliği ölçümleri yeterli titizlikte ve mm duyarlılıkta yapılmalıdır (Kahveci & Yıldız, 2012) (Şekil 48).

GNSS SİNYAL ALICISININ ALET YÜKSEKLİĞİNİN BELİRLENMESİ



Şekil 48

Özet

GNSS Ölçümlerinde Oluşan Hatalar konu başlığı altında değinilen hatalar dikkate alındığında, **hiçbir GNSS ölçüm yöntemi kullanılmadan**, sadece GNSS sinyal alıcısının topladığı sinyallerle nokta konumunun hassas bir şekilde bulunamadığı görülmüştür. GNSS alıcısının en az dört uydudan aldığı sinyaller üzerindeki efemeris bilgileri yardımıyla, sinyal alıcı ile uydu arasındaki mesafelerin bulunması ve Denklem 1'de belirtilen formüllerin çözümü noktaların hassas bir şekilde konum bulmasına yetmeyecektir.

GNSS ölçüm tekniğinde elde edilen konum doğruluğunu arttırmak için hataların yok edilmesi veya daha aza indirgenmesi için ölçümlerde dikkate alınması gerekenler:

- Jalon üzerine kurulan veya alet sehпасı üzerine kurulan GNSS sinyal alıcısının yüksekliği dikkatlice ölçülmelidir. Ölçülen alet yüksekliği:
 - koordinatı bulunan noktanın yükseklik koordinat değerini doğru ölçmek için,
 - alet faz merkez hatasını önlemek için çok önemlidir.
- GNSS tekniğinde uydu konumlarındaki hatalardan dolayı, koordinatı ölçülecek noktanın konum doğruluğunu arttırmak için yer kontrol birimlerinin hesapladığı yeni efemeris bilgileri (Ultra – Rapid, Rapid, Final) kullanılarak geriye dönük işlemler yapılabilir. Yapılacak bu işlem maliyet ve zaman gerektirecektir.
- GNSS tekniği ile nokta konumu belirlenirken, ölçüm yapılan alan etrafındaki yansıtıcı yüzeylere dikkat edilmelidir. Arabaların olduğu veya kalabalık alanlarda ölçüm yapılıyorsa ve ölçümde jalon kullanıyorsa, araba veya insanlardan yansıtacak sinyallerin engellenmesi için jalon yüksekliği arttırılabilir.
- GNSS tekniği ile nokta konumu belirlenirken, ölçüm yapılan alan etrafındaki bina, elektrik direği, ağaç gibi coğrafik objelere gelen GNSS uydu sinyalleri, bu objelerden yansyıp GNSS sinyal alıcısına gelebilir. Bu sinyallerin yansımından dolayı nokta konumu hatalı bulunabilir. Bu durumu engellemek için uydu kesme açısını 15° ve daha fazla olacak şekilde belirlemek faydalı olacaktır.
- GNSS tekniği ile nokta konumu belirlerken, Troposfer etkilerin önlenmesi için uydu kesme açısı 15° ve daha fazla olacak şekilde belirlemek, nokta konumunun daha doğru bulunması açısından faydalı olacaktır.
- GNSS tekniği ile tek bir noktanın koordinatının daha hassas belirlenmesinde, nokta üzerinde daha uzun süre ölçüm yapılması noktanın konum doğruluğunu arttıracaktır. Ölçü süresi ile nokta konum doğruluğu arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür (YALÇIN, İNAL, & KALAYCI, 2008).

Dikkat edilmesi gereken kriterler ölçüm doğruluğunu muhakkak arttıracaktır. Fakat ölçümün yapılmasında istenilen zaman, maliyet ve hassasiyet dikkate alınarak bir ölçüm yöntemi belirlenmelidir.