

GPS YAPAY UYDU GÖZLEMLERİ İLE KİNEMATİK-TEKTONİK YERKABUĞU HAREKETLERİNİN BELİRLENMESİ

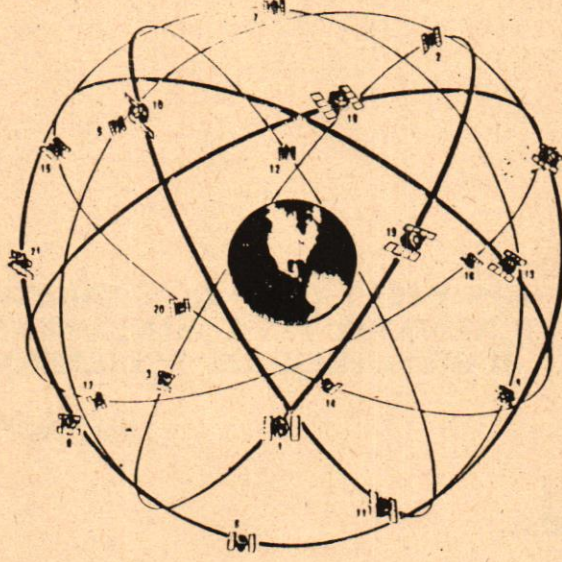
Doç. Dr. Ergün ÖZTÜRK
KTÜ

1. GİRİŞ:

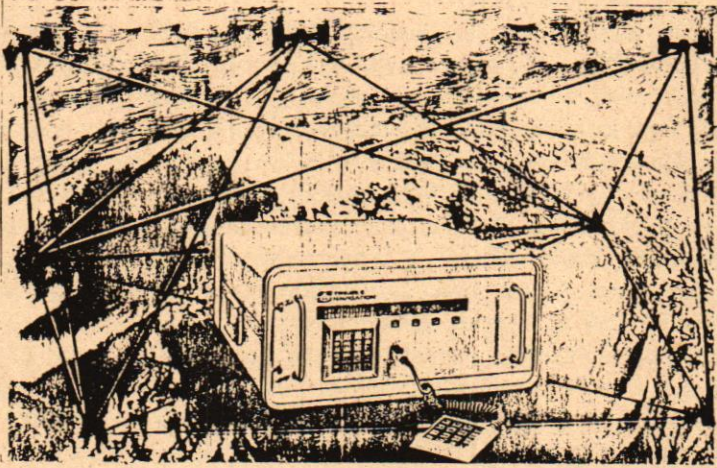
Global Konum Belirleme Sistemi GPS (Global Positioning System) yapay uydulardan yararlanarak navigasyon amacına yönelik, 1970 li yıllardan beri geliştirilmekte olan bir sistemdir. Yaklaşık 20 bin km yükseklikteki 6 yörüngede 3 er uydu olacak biçimde planlanmış toplam 18 uydudan oluşan sistemin halen çalışır durumda 13 uydusu vardır. Sistem tamamlandığında yeryüzünün her yerinde her an en az dört uydu gözlenebilecektir.

Jeodezik amaçlar için özel olarak geliştirilmiş GPS alıcıları, uydulardan taşıyıcı dalgalara yüklenmiş olarak yayınlanan bir dizi bilgiden navigasyon amaçlı olanları ayıklamakta, yalnızca yörünge elemanları ile uydu saatini, taşıyıcı dalga frekans ve fazlarını içeren bilgileri algılamaktadır. Algılanan taşıyıcı dalga bilgileri, alıcıda üretilen aynı özellikli dalgalarla karşılaştırılmaktadır. Dört uyduya aynı anda yapılan gözlemlerle belirlenen faz farklarından yararlanarak uydunun ölçü anındaki konumu ile durak noktası (ölçü istasyonu) arasındaki uzaklık ve durak noktasının global (geosentrik) koordinatları (X,Y,Z) belirlenmektedir. Bölgede seçilen en az üç sabit yer istasyonunda yapılan sürekli gözlemlerle ağın ortalama datumunun (koordinat eksenleri yönünde üç öteleme, eksenler etrafında üç dönme ve bir ölçek faktörü) iyi belirlenebildiği durumlarda günümüzde 50 km den daha küçük kenarlı GPS jeodezik ağlarında ± 2 cm lik koordinat duyarlıklarına ulaşılabilir. İki ve daha fazla yer noktasından üç ya da daha fazla uyduya aynı anda yapılan gözlemlerden peş peşe üç kez fark alınarak bulunan faz farkları yardımıyla hesaplanan Bağıl Konum Belirleme Yöntemlerinde bu duyarlıklar ± 1 cm olmaktadır. Önümüzdeki bir iki yıl içinde tamamlanması beklenen geliştirilmiş GPS teknolojisi ile özellikle ışın kırılması (refraksiyon) modellerinin doğru kurulabildiği aletlerle bir saatlik bir sürede yapılacak ölçülerden ± 5 mm lik koordinat duyarlıklarına ulaşılması amaçlanmaktadır.

Fayların kenarlaştığı bölgelerde yatay ve düşey yönlerdeki atımlar biçiminde



Şekil 1- NAVSTAR uydular



Şekil 2- GPS Alıcısı ve GPS Jeodezik Ağı

oluşan plaka hareketleri, mantodaki kıvrılmalar, dağların oluşumu, ısı ve kimyasal yapıdaki değişimler sonucunda oluşan sıkışma, uzaklaşma ve bükülmeler biçiminde ortaya çıkan yerkabuğu hareketleri tektonik hareketler olarak adlandırılmaktadır. Tektonik yerkabuğu hareketlerinin oluşumunu zamanın bir fonksiyonu biçiminde saptayan ya da bunların hızlarını, ivmelerini belirleyen modellere kinematik modeller denir. Karadeniz Plakası, Anadolu Plakası, İran Plakası, Arap Yarımadası Plakası, Afrika Plakası gibi birçok eski kara parçasının kenarlaştığı bölgede yer alan ülkemiz, bu plakalarda oluşan tektonik yerkabuğu hareketleri nedeniyle aktif deprem kuşağında bulunmaktadır.

- Büyük plakalardaki olası yer değiştirmeler ve deformasyonların saptanması,
- Yeryüzü noktaları arasındaki uzaklık değişimlerinin izlenmesi,
- İki plaka arasındaki yaklaşma ya da uzaklaşmanın relatif hızının belirlenmesi,
- Plakaların kenarlaştığı bölgelerde oluşan yatay ve düşey yöndeki atılım hareketlerinin araştırılması
- Depremlerin önceden kestirilmesi amacıyla yönelik olarak fay bölgelerinde kurulan Jeodezik Ağların depremlerden önce ve sonra ölçülmesi,
- Kıtalararası hareketlerin belirlenmesi için çok uzun bazların ölçülmesi, gibi görevler Yer Bilimlerinin temel araştırma konularındandır. Bu türden yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesi ve çözümlenmesi için gerekli sayısal verilerin elde edilmesi, sınır değerlerin saptanması jeodezicilerin görevidir.

2. GPS ÖLÇÜLERİ İLE DURAK NOKTASI KOORDİNATLARININ HESAPLANMASI

Jeodezik amaçlar için özel olarak geliştirilmiş GPS alıcıları, $\lambda_1=19,05$ cm dalga boylu L_1 ve $\lambda_2=24,45$ dalga boylu L_2 taşıyıcı dalgalarına yüklenmiş navigasyon sinyallerini ayıklar, yalnızca yörünge elemanları ile uydu ve GPS zamanlarına ilişkin bilgileri algılar. Alıcı antenin bulunduğu yer noktasının koordinatları, bu verilerden yararlanarak mutlak ya da bağıl konum belirleme yöntemlerinden biri ile hesaplanabilir.

2.1 Mutlak Konum Belirleme Yöntemi:

Bu yöntemde bir $T_j=0$ zamanında uydudan yayınlanan taşıyıcı dalga ile alıcıda üretilen aynı özellikli dalganın faz farkları ölçülür.

$$L_{ij}^0 = Q_{ij}^0 - S_{ij}^0 / \lambda \quad (2-1)$$

Burada:

- L_{ij}^0 $T_j=0$ anında uydudan yayınlanan dalga ile t_j alım anında alıcıda üretilen aynı özellikli dalganın faz farkı,
- Q_{ij}^0 Uydudan yayınlanan dalganın alıcıya ulaşmaya kadar geçtiği yol, psodyo uzunluk (dalga boyu birimi cinsinden),

λ = Taşıyıcı dalganın dalga boyudur.

Algılanan dalganın yayınlandığı $T_j=0$ anında j numaralı uydu ile alıcı anteni

arasındaki uzaklık.

$$S_{ij}^0 = \sqrt{(X_i - X_j^0)^2 + (Y_i - Y_j^0)^2 + (Z_i - Z_i^0)^2} \quad (2-2)$$

bağıntısı ile bulunabilir. Psoydo uzunluk ölçülerinde sinyalin uydudan yayınlandığı T uydu zamanı ile algılandığı t alıcı zamanı arasındaki zaman farkı da hesaplanabilir.

$$dt = t - T$$

Uydu ve alıcı saatleri yüksek duyarlıklılı olmalarına karşın farklı zaman ölçeklerine sahiptir. Bu nedenle yüksek doğruluklu ve durağan GPS zaman ölçeği kullanılır. Bir sinyal uydudan t_1 anında yayınlanır ve t_2 anında algılanır. Buradan uydu ve alıcı saatleri ile ölçülen zaman aralığı aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanabilir.

$$dt = t(\tau_2) - T(\tau_1)$$

$$dt = (\tau_2 - \tau_1) + (\tau_1 T(\tau_1)) + (t(\tau_2) - \tau_2)$$

$$dt = (\tau_2 - \tau_1) + dT + dt$$

Son yazım biçimindeki dT ve dt büyüklükleri uydu ve alıcı zamanlarının GPS zamanlarından olan farklarıdır. Ayrıca sinyal uydu-alıcı arasında yayılırken Troposfer ve İyonosfer tabakalarının etkileri ile dününün dönme etkisinden kay naklanan d kadar bir gecikmeyle alıcıya ulaştığından bu eşitlik

$$dt = (\tau_2 - \tau_1) + dT + dt + d \quad (2-3)$$

biçimini alır. Eşitliğin heriki tarafı ışığın boşluktaki yayılma hızı c ile çarpılıp, taşıyıcı dalga boyu λ bölünürse aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\frac{c}{\lambda} dt = \frac{c}{\lambda} (t_2 - t_1) + \frac{c}{\lambda} (dT + dt) + \frac{c}{\lambda} d$$

Bir ı yer istasyonundan bir GPS alıcısı ile dört ayrı uyduya aynı anda psoydo uzaklık ölçüleri Q_{ij} yapılırsa elde edilen faz farkları

$$L_{ij} = Q_{ij} - \frac{1}{\lambda} S_i - \frac{1}{\lambda} ds_g - \frac{1}{\lambda} ds_{ati} \quad (2-4)$$

i: Durak noktasının numarası,

j: Uydunun numarası,

$ds_g = c \cdot dt$

$ds_{ati} = ds_{Trp} + ds_{Atm}$

c: Işığın boşlukta yayılma hızı,

dt: Uydu saati ile alıcı saatinin zaman kayıklığı,

ds_{Trp} , ds_{Atm} : Troposfer ve atmosfer tabakalarındaki kırılma etkileri,

$$\lambda y L_{ij} = Q_{ij} \lambda - s_{ij} - c \cdot dt - ds_{Trp} - ds_{Atm} \quad (2-5)$$

$$Q_{ij} \lambda = s$$

ve

$$s_{ij} = S_{ij}^0 + ds$$

yazılarak

$$l_{ij}^0 = s_{ij} - S_{ij}^0 - ds_{Trp} - ds_{Atm}$$

biçiminde kısa gösterilirse

$$\lambda L_{ij} = -ds - c \cdot dt + l_{ij}^0$$

olur.

$$l_{ij} = l_{ij}^0 - \lambda L_{ij}$$

$$l_{ij} = l_{ij}^0 - \lambda l_{ij} \quad (2-6)$$

elde edilir. s_{ij} büyüklüğü

$$s_{ij}^0 = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2}$$

yaklaşık değerinden yararlanarak TAYLOR serisine açılırsa

$$ds_{ij} = a_{ij} dx_i + b_{ij} dy_i + e_{ij} dz_i \quad (2-7)$$

bağıntısı ve

$$l_{ij} = ds + c \cdot dt$$

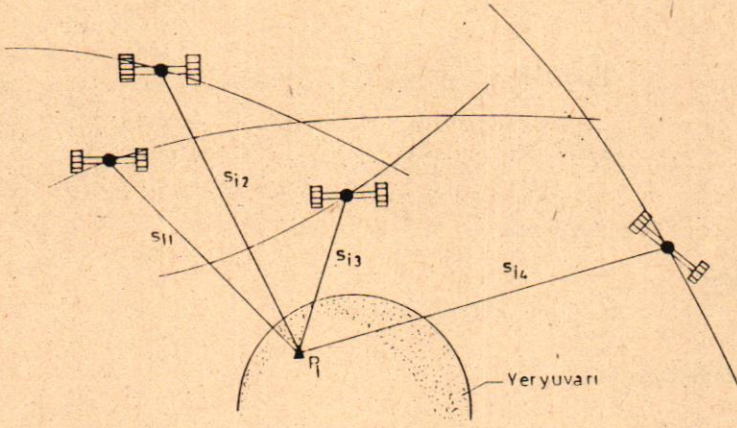
$$a_i dx_i + b_{ij} dy_i + e_{ij} dz_i + c dt_j = l_{ij} \quad (2-8)$$

eşitliği elde edilir.

$$a_{ij} = \frac{\partial s_{ij}}{\partial X_i} = \frac{K_b - X_j}{S_{ojj}} \quad b_{ij} = \frac{\partial s_{ij}}{\partial X_j} = \frac{K_b - X_j}{S_{ojj}}$$

$$e_{ij} = \frac{\partial s_{ij}}{\partial Z_i} = \frac{Z_b - Z_j}{S_{ojj}} \quad \begin{array}{l} i: \text{İstasyon numarası,} \\ j: \text{Uydu numarası.} \end{array}$$

Aşağıdaki matris gösterimlerinden yararlanarak



Şekil: 3- Mutlak Konum Belirleme Yöntemi

$$x = \begin{bmatrix} dx_j \\ dy_j \\ dz_j \\ c \cdot dt \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} a_{i1} & b_{i1} & e_{i1} \\ a_{i2} & b_{i2} & e_{i2} \\ a_{i3} & b_{i3} & e_{i3} \\ a_{i4} & b_{i4} & e_{i4} \end{bmatrix} \quad l = \begin{bmatrix} l_{i1} \\ l_{i2} \\ l_{i3} \\ l_{i4} \end{bmatrix}$$

$$A x = L$$

(2-9)

biçimini alır. Bu matris eşitliğinin heriki tarafı A^T ile çarpılıp GAUSS dönüştürümü yapılırsa

$$A^T x = A^T L \quad (2-10)$$

bağıntısından

$$x = (A^T A)^{-1} A^T l$$

Bilinmeyenler

$$Q = (A^T A)^{-1}$$

Bilinmeyenlerin Ters Ağırlık Matrisi

(2-11)

(2-12)

elde edilir.

i numaralı durak noktasından bir GPS alıcısı ile dört ayrı uyduya aynı anda yapılan psyo uzaklık ölçüleri n kez tekrarlanırsa bilinmeyenler vektörünün kesin değeri, Birkaç Kez Belirlenen Bilinmeyenler Vektörlerinin Dengelenmesi yöntemi ile

aşağıdaki yoldan elde edilir (ÖZTÜRK 1985, 1987 s.238).

Dört uyduya aynı bir k anında yapılan dört gözlemden yararlanarak hesaplanan bilinmeyenler, ikinci bir dengeleme adımında gözlemler gibi ele alınır.

$$L_k = \begin{bmatrix} X_{i_k} & 0 \\ Y_{i_k} & 0 \\ Z_{i_k} & 0 \end{bmatrix}, Q_k = \begin{bmatrix} X_{xx_k} & Q_{t_k} \\ Q_{xt_k} & Q_{tt_k} \end{bmatrix}, P = Q^{-1} = \begin{bmatrix} P_{xx_k} & P_{t_k} \\ P_{xt_k} & P_{tt_k} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

biçiminde alt matrislere ayrılarak

$$P_k = P_{xx_k} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2-14)$$

stokastik model oluşturulur.

$$x_0 = \frac{1}{n} (L_1 + L_2 + \dots + L_n) \quad \begin{array}{l} \text{Bilinmeyenlerin} \\ \text{Yaklaşık Değerleri} \end{array} \quad (2-15)$$

$$\bar{x} = x_0 + x \quad \begin{array}{l} \text{Bilinmeyenler vektörünün Kesin Değeri} \\ \text{Ötelenmiş Gözlemler} \end{array} \quad (2-16)$$

Ötelenmiş Gözlemler	Ağırlık Merkezleri
$L_1 = L_1 - x_0$	P_1
$L_2 = L_2 - x_0$	P_2
:	:
.	.
$L_n = L_n - x_0$	P_n

(2-17)

biçimini alırlar. Buradan

Fonksiyonel Model	Stokastik Model
$v_1 = x - L_1$	P_1
$v_2 = x - L_2$	P_2
:	:
.	.
$v_n = x - L_n$	P_n

(2-18)

$$(P_1 + P_2 + \dots + P_n) x - (P_1 L_1 + P_2 L_2 + \dots + P_n L_n) = 0 \quad (2-19)$$

Normal Denklemler

$$x = (P_1 + P_2 + \dots + P_n)^{-1} \cdot (P_1 L_1 + P_2 L_2 + \dots + P_n L_n) \quad (2-20)$$

Dengeleme Bilinmeyenleri

$$x = x_0 + \Delta x \quad \text{Kesin Koordinatlar} \quad (2-21)$$

$$Q_{xx} = (P_1 + P_2 + \dots + P_n)^{-1} \quad \text{Kesin Koordinatların Ters Ağırlık Matrisi} \quad (2-22)$$

$$v_i = x - L_i \quad \text{Düzeltilmeler} \quad (2-23)$$

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{v_1^T P_1 v_1 + v_2^T P_2 v_2 + \dots + v_n^T P_n v_n}{(n-1) \cdot 3}} \quad (2-24)$$

Birim Ölçünün Ortalama Hatası

$$m_x = \pm m_0 q_{xx} \quad \text{Kesin Koordinatların Ortalama Hataları} \quad (2-25)$$

$$x = L_k + v_k \quad k = 1, 2, \dots, n. \text{ Sonuç Denetimleri elde edilir.} \quad (2-26)$$

2.2. Bağıl Konum Belirleme Yöntemi

GPS Alıcıları ile ölçülen faz farkları L_{ij} uydudan yayınlanan taşıyıcı dalganın fazları Q_{ij}^s ile alıcıda üretilen aynı özellikli dalganın fazları Q_{ij}^a nın farklarıdır. Taşıyıcı dalganın uydudan yayımlandığı an T ve alıcıda algılandığı an t ile gösterilirse

$$L_{ij} = Q_{ij}^s(T) - Q_{ij}^a(t) - dQ_g - dQ_{ati} \quad (2-27)$$

olur. Bu bağlamda

dQ_g : Dalganın uydudan alıcıya kadar olan yol boyunca uğradığı gecikmeye ilişkin düzeltme (uydu ve alıcı saatlerinin kararsızlıkları nedeniyle oluşan etki),

dQ_{ati} : Dalganın atmosfer ve iyonosfer tabakalarından geçerken uğradığı kırılmalara ilişkin düzeltme (atmosfer ve iyonosfer etkileri),

i : Alıcı anteninin bulunduğu durak noktasının numarası,

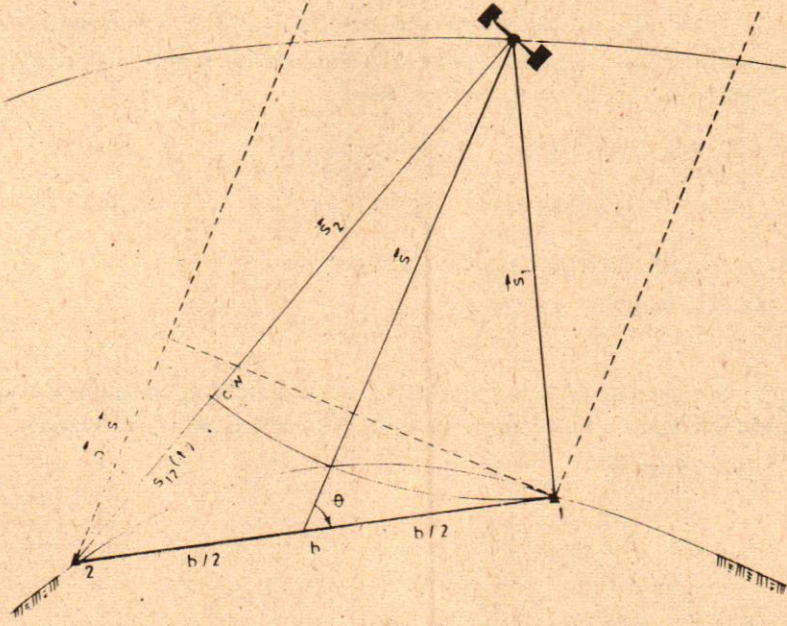
j : Gözlenen NAVSTAR uydusunun numarasıdır.

GPS alıcıları ile gözlenen bağımsız faz farkları L_{ij} yüksek duyarlılık gerektiren jeodetik problemlerin çözümünde doğrudan kullanılmazlar. Bu gözlemlerin çeşitli kombinasyonları, aşağıda açıklanan değerlendirme modellerinde ölçüler olarak ele alınır.

2.2.1- Basit Farklar Yöntemi ile Konum Belirleme:

Bir tek GPS uydusundan sürekli yayınlanan dalgalar, iki ya da daha fazla istasyondan aynı anda algılanır. Uygulamada İnterferometrik Ölçme ya da Diferansiyel

Yol ile Çok Nokta Belirleme Yöntemi olarak adlandırılan bu yöntemde, aynı bir sinyalin iki ayrı GPS alıcısında algılandıkları zamanların farkı, bir gözlem olarak ele alınır. Söz konusu zaman farkı, faz farkları $L_{ij}(t)$ nin bir fonksiyonu olarak yazılır. Bu yolla elde edilen farklar yalnızca bir dalga uzunluğu içinde tek anlamlıdır. Bunlardan bir uzunluk hesaplanmak istenirse, tam dalga sayısı n ile hesaplanan $n \cdot \lambda$ büyüklüğü de gözönüne alınır.



Şekil 4- Basit Farklar Yöntemi ile Konum Belirleme

Şekil 4 deki s_{12} uzunluğu ya zaman farkı $t=t_1-t_2$ ve ışığın boşluktaki hızı c yardımıyla

$$s_{12} = t \cdot c$$

bağıntısından ya da faz farkı L_{12} yardımıyla

$$s_{12}(t) = \frac{1}{2\pi} L_{12}(t) \cdot \lambda + n \cdot \lambda \quad (2-28)$$

eşitiğinden hesaplanabilir. Basit farklar yönteminin matematik modeli,

$$L_{12}(t) = L_{1j}(t) - L_{2j}(t) \quad (2-29)$$

$$L_{12}(t) = Q_{1j}(T_1) - Q_{1j}(t) - dQ_{g1} - dQ_{ai} - Q_{2j}(T_2) + Q_{2j}(t) + dQ_{g2} + dQ_{ai}$$

$$L_{12}(t) = Q_{1j}(t - s_1(T_1)/c) - Q_{2j}(t - s_2(T_2)/c) - \Delta Q_{g12} - \Delta Q_{ai12}$$

$$L_{12}(t) = \frac{f}{c} [s_2(T_2) - s_1(T_1)] - \Delta Q_{g12} - \Delta Q_{ai12} \quad (2-30)$$

$Q_{ij}(T)$: Uydudan T anında yayınlanan sinyalin fazı,

$Q_{ij}(t)$: Alıcıda üretilen aynı özellikli sinyalin fazı,

f : Yayın frekansıdır.

$s_1(T_1)$ ve $s_2(T_2)$ uzaklıkları uydudan aynı bir T_j anında yayınlanan sinyal ile hesaplanan uydu-istasyon uzaklıklarıdır. Sinyalin i numaralı alıcıda algılandığı zaman t ile gösterilirse $s_1(t_1)$ ve $s_2(t_2)$ uzaklıkları

$$s_1(T_1) = s_1(t - dT_1) \quad , \quad dT_1 = s_1(T_1)/c$$

$$s_2(T_2) = s_2(t - dT_2) \quad , \quad dT_2 = s_2(T_2)/c$$

biçiminde yazılabilir. Bu durumda (2-30) eşitliği

$$L_{12}(t) = \frac{f}{c} (s_2(t) - s_1(t)) - \Delta Q_{g12} - \Delta Q_{ai12} \quad (2-31)$$

olur. Gözlem yapılan istasyon r ekatları 1 ve 2 arasındaki bazın ortasından uyduya giden doğrultu esas alınarak $s_1(t)$ ve $s_2(t)$ uydu-alıcı uzaklıklarının farkı

$$s_{12}(t) = s_2(t) - s_1(t)$$

$$\vec{s}_1 = \vec{s} - \vec{b}/2 \quad , \quad \vec{s}_2 = \vec{s} + \vec{b}/2$$

$$s_1(t) = \sqrt{\vec{s}^2 + (\vec{b}/2)^2 - 2\vec{s}\vec{b}/2}$$

$$s_2(t) = \sqrt{\vec{s}^2 + (\vec{b}/2)^2 + 2\vec{s}\vec{b}/2}$$

$$s_{12} = \sqrt{\vec{s}^2 + \vec{b}^2/4 + \vec{s} \cdot \vec{b}} - \sqrt{\vec{s}^2 + \vec{b}^2/4 - \vec{s} \cdot \vec{b}}$$

$$s_{12} = s \left(\sqrt{1 + \vec{b}/(4s^2) + \vec{s} \cdot \vec{b}/s^2} - \sqrt{1 + \vec{b}/(4s^2) - \vec{s} \cdot \vec{b}/s^2} \right)$$

$$a_1 = \vec{b}/(4s^2) \quad , \quad a_2 = \vec{s} \cdot \vec{b}/s^2 \quad , \quad a_3 = \vec{s}/s$$

$$a_2 = a_3 \cdot \vec{b}/s$$

$$s_{12} = s \left(\sqrt{1 + a_1 + a_2} - \sqrt{1 + a_1 - a_2} \right)$$

$$c_1 = a_1 + a_2 \quad , \quad c_2 = a_1 - a_2$$

$$s_{12} = s \left(\sqrt{1 + c_1} - \sqrt{1 + c_2} \right)$$

bu son eşitlik $c_i = (0,5)^i$ alınarak BINOM serisine açılırsa

$$s_{12} = 2b \cdot a_3 (c_1 + 2c_2 a_1 + c_3 (3a_1^2 + a_2^2) + \dots) \quad (2-32)$$

$$Q = \arccos a_3$$

$$s_{12} = b \cos \vartheta \cos \vartheta (1 - b^2 \sin^2 \vartheta / (8s^2) + \dots) \quad (2-33)$$

bağıntısı 200 km ye kadar olan bazlar için yeterlidir. 200 km den daha büyük bazlar için (2-31) eşitliği kullanılır. (2-32) bağıntısı (2-28) eşitliğinde yerine konur ve Q12 ye göre düzenlenirse

$$L_{12}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\vec{b} \cdot a_3 + c \cdot w \right) - 2\pi n \quad (2-34)$$

elde edilir. Bu eşitlikteki c.w terimi, dalga yolunun eğrilik düzeltmesi olarak adlandırılır. Söz konusu düzeltmenin duyarlılığı, 1 ve 2 numaralı noktaların yaklaşık koordinatlarına ve uydunun uzaydaki konumuna bağlıdır. Uydunun yörünge parametreleri, koordinatları bilinen yer noktalarından uyduya yapılan gözlemler yardımıyla sürekli olarak yeniden hesaplanır ve saat düzeltmesi ile birlikte yeniden uydu kaydedicisine yüklenir. Alıcıların bulunduğu durak noktalarının koordinatları da 5 ya da 6 iterasyon sonucunda ± 2 cm duyarlılıkla belirlenebilir. Geometrik model eşitliği (2-34), yukarıda verilen (2-30) bağıntısında yerine konursa

$$L_{12}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(b \cdot a_3 + (R_2 a_3) s_{12} / c + c \cdot w_{12}(t) \right) - 2\pi n_{12} + \Delta Qg_{12}(t) + \Delta Qatm_{12}(t) + \Delta Def_{12}(t) \quad (2-35)$$

elde edilir. Bu eşitlikteki

$R_2 a_3 s_{12} / c$: Yerin günlük dönme hareketlerinden kaynaklanan çok küçük istasyon hareketleri,

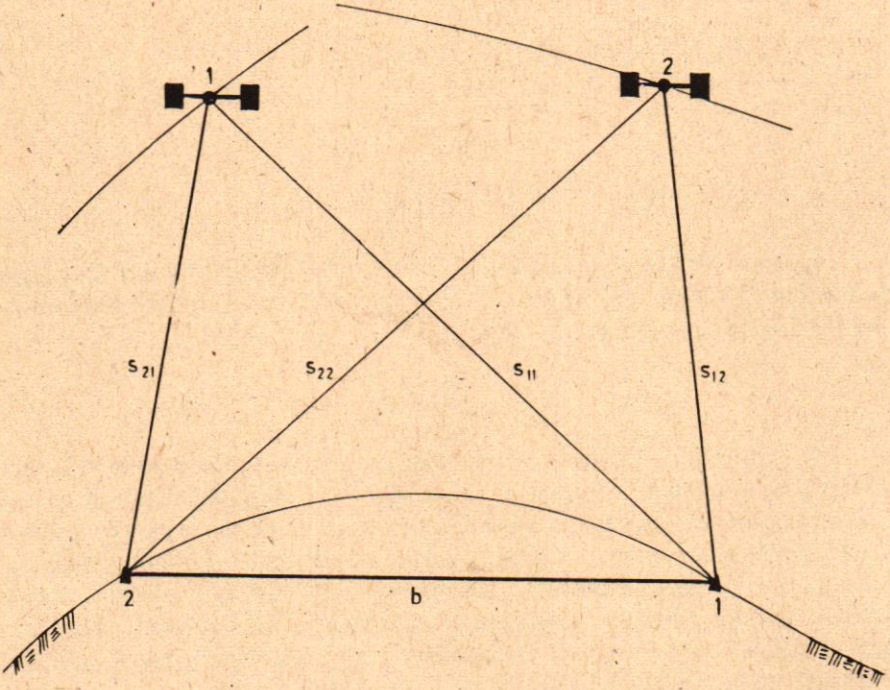
R_2 : İkinci istasyondaki gesentrik hız vektörü,

ΔDef_{12} : Ay ve güneşin çekim etkisiyle oluşan gel-git hareketlerinden kaynaklanan çok küçük yerkabuğu deformasyonlarıdır.

Basit farklar yöntemiyle konum belirlemede ana amaç, (2-34) ve (2-35) eşitliklerinden b eğik uzunluğunu ve buna bağlı olarak 1 ve 2 numaralı alıcılar arasında geosentrik koordinat farklarını belirlemektir. Bu amaçla iki yer istasyonundan aynı bir uyduya bir saat içinde yapılabilen 60 ölçü (L_{ij}) değerlendirilerek b eğik uzunluğu ve ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) koordinat farkları ± 2 cm duyarlılıkla belirlenebilmektedir.

2.22 Ard Arda iki kez hesaplanan faz farkları ile konum belirleme:

İki istasyon noktasından iki uyduya yapılan eş zamanlı gözlemlerden elde edilen uzunlukların farkları hesaplanır.



Şekil 5- Çok Katlı Farklar Yöntemi İle Konum Belirleme

$$s_{11}(t_{11}) = s_1(T_1 + dT_1)$$

$$s_{21}(t_{21}) = s_2(T_1 + dT_2)$$

$$ds_1(t_1) = s_1(t_{11}) - s_2(t_{12}), \quad (2-36)$$

$$s_{12}(t_{12}) = s_1(T_2 + dT_1)$$

$$s_{22}(t_{22}) = s_2(T_2 + dT_2)$$

$$ds_2(t_2) = s_1(t_{12}) - s_2(t_{22}) \quad (2-37)$$

1. Uyduya iki istasyon noktasından aynı anda yapılan gözlemlerin farkı
2. Uyduya iki istasyon noktasından aynı anda yapılan gözlemlerin farkı

$t_1 = t_2 = t$ gözlem anında (2-36) ve (2-37) eşitliklerinden bulunan farkların da farkları ile

$$d d_{12}(t) = ds_1(t) - ds_2(t) = s_{12}^1(t) - s_{12}^2(t)$$

$$d d_{12}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\vec{b} \cdot \vec{a}_3^1(t) - \vec{b} \cdot \vec{a}_3^2(t) \right) + 2\pi \left(n_{12}^1 - n_{12}^2 \right) + \dots \quad (2-38)$$

iki kez oluşturulan farklar yardımıyla b eğik uzunluğu ve $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ koordinat farkları hesaplanır. Çift katlı farklar yönteminde sinyalin gecikmesinin etkisi $(dQg_1 - dQg_2)$ büyüklüğü, $dQg_1 = dQg_2$ alınabileceğinden gözardı edilebilir. Troposfer ve iyonosferdeki refraksiyondan (ışın kırılması) kaynaklanan atmosferik düzeltme $(dQatm_1 - dQatm_2)$ de son derece küçük olur.

2.23 Ara üç kez hesaplanan Faz Farkları ile Konum Belirleme

İki istasyon noktasından iki uyduya yapılan eş zamanlı ikişer gözlemin ikişer kez hesaplanan faz farklarının da farkları alınarak uygulanan bir yöntemdir.

$$s_{11}(t_1) = s_1(T_{11} + dT_{11})$$

$$s_{12}(t_1) = s_1(T_{12} + dT_{11})$$

$$s_{21}(t_1) = s_2(T_{11} + dT_{12})$$

$$s_{22}(t_1) = s_2(T_{12} + dT_{12})$$

$$ds_1(t_1) = s_{11}(t_1) - s_{21}(t_1)$$

$$ds_2(t_1) = s_{12}(t_1) - s_{22}(t_1)$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\vec{b} \cdot \vec{a}_3^1(t_1) - \vec{b} \cdot \vec{a}_3^2(t_1) \right) + 2\pi \left(n_{12}^1 - n_{12}^2 \right) + \dots \quad (2-39)$$

Birinci ölçü anında iki istasyondan iki uyduya yapılan faz farkı gözlemlerinin

farkları

$$s_{11}(t_2) = s_1(T_{21} + dT_{21})$$

$$s_{12}(t_2) = s_1(T_{22} + dT_{21})$$

$$s_{21}(t_2) = s_2(T_{21} + dT_{22})$$

$$s_{22}(t_2) = s_2(T_{22} + dT_{22})$$

$$ds_1(t_2) = s_{11}(t_2) - s_{21}(t_2)$$

$$ds_2(t_2) = s_{12}(t_2) - s_{22}(t_2)$$

$$d d_{12}(t_2) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\vec{b} \cdot \vec{a}_3^1(t_2) - \vec{b} \cdot \vec{a}_3^2(t_2) \right) + 2\pi \left(n_{12}^1 - n_{12}^2 \right) + \dots$$

(2-40)

İkinci ölçü anında iki istasyondan iki uyduya yapılan faz farkı gözlemlerinin farkları

Yukarıda hesaplanan (2-39) ve (2-40) farklar farklarında farkları alınarak

$$d d_{12} = d d_{12}(t_1) - d d_{12}(t_2)$$

$$td_{12} \frac{2\pi}{\lambda} \left((b \cdot a_3^1(t_1) - b \cdot a_3^2(t_1)) - (b \cdot a_3^1(t_2) - b \cdot a_3^2(t_2)) \right) + \dots \quad (2-41)$$

Üç kat faz farkları yardımıyla b eğik uzunluğu ve ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) koordinat farkları bulunabilir. n_{12}^j büyüklüğü, bir uyduya yapılan gözlemlerin tümünde aynı kaldığından farklar oluşturularak hesaplanan (2-41) eşitliğinde etkisizdir. Yer dinamiğinden ve atmosferden kaynaklanan etkiler de yaklaşık aynı büyüklükte olduklarından etkileri, çok küçük olur ve gözardı edilebilir.

3. GPS JEODEZİK AĞLARININ DENGELENMESİ

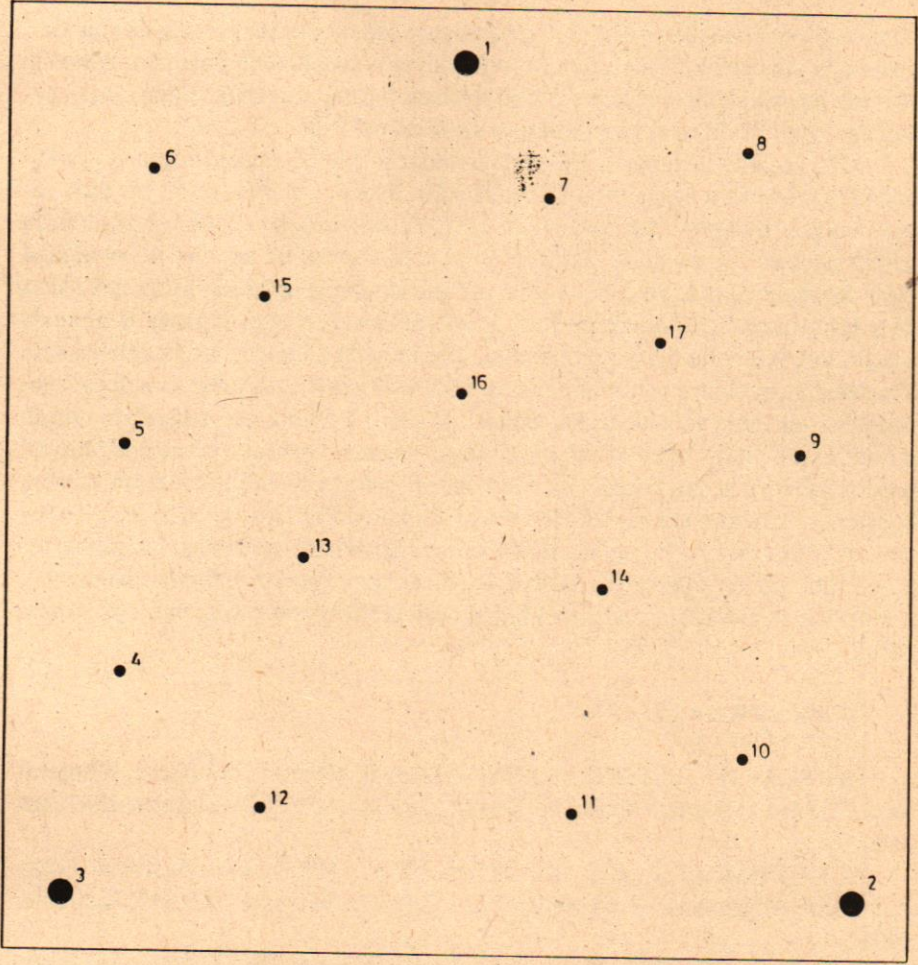
Bir GPS jeodezik ağında iki tür nokta bulunur. Birinci grup noktalar datum noktalarıdır. Şekil 6 da $\theta^1, \theta^2, \theta^3$ biçiminde gösterilen ve aralarındaki uzaklıklar 400 km den küçük olan bu noktaların zemin tesisleri, jeolojik açıdan sağlam ve yer değiştirme (deformasyon) olasılığı bulunmayan yerli kayalar üzerine pilye olarak ya da toprak altındaki 1m X 1m X 1m boyutlarında demirli beton bloklar üzerine pilye olarak yapılır.

Pilyelerin üst ortlasına, GPS alıcısının antenindeki faz merkezi ile pilye merkezi arasındaki kayıklık ± 1 mm den daha az olacak biçimde vidalı bir zorunlu merkezleştirme düzeni konur. Yeryüzünden yansıyan dalgaların etkisini en aza indirmek için pilye yükseklikleri 20 cm. den daha küçük olmalıdır.

İkinci grup noktalar, jeodezik ağın sıklaştırma noktalarıdır. Şekil 6 da $\theta^4, \theta^5, \dots, \theta^{17}$ biçiminde gösterilen bu noktalar arasındaki uzaklıklar 50 km den daha küçüktür. Sıklaştırma noktaları da jeolojik açıdan sağlam zeminlere, yer üstündeki kısımları 20 cm den daha kısa, zorunlu merkezleştirme düzenli pilyeler biçiminde kurulur. Her iki tür noktaları dış etkilerden koruyabilmek için zorunlu merkezleştirme vidaları üzerine dişi birer kapak ve pilyelerin üzerine de birer beton kapak yapılır.

Datum noktalarındaki GPS gözlemleri, ağın sıklaştırma noktalarından herhangi birinde gözlem yapıldığı sürece düzenli olarak devam eder. Sıklaştırma noktalarının herbirindeki ölçüler, aynı anda en az dört uyduya 60 ar gözlem olacak biçimde gerçekleştirilir.

GPS jeodezik ağındaki gözlemlerin dengelemesi üç aşamada yapılır. Birinci aşamada datum noktalarından herhangi biri söz gelimi θ^1 numaralı nokta, koordinat eksenleri yönündeki ötelemeler için başlangıç noktası olarak seçilir. Bu noktada ölçme periyodu boyunca her gün mutlak konum belirleme yöntemiyle (2.1) hesaplanan günlük dengelenmiş koordinatların tümü, birkaç kez belirlenen bilinmeyenler vektörlerinin dengelenmesi yöntemiyle değerlendirilir. İkinci aşamada θ^2 ve θ^3 numaralı datum noktalarının ölçü periyodu boyunca her gün yapılan gözlemlerden bağıl konum belirleme yöntemiyle (2.2) θ^1 numaralı noktadan taşınan günlük dengelenmiş koordinatları, bir kaç kez belirlenen bilinmeyenler vektörlerinin dengelenmesi yöntemiyle kesinleştirilir. Üçüncü aşamada $\theta^4, \theta^5, \dots, \theta^{17}$ numaralı sıklaştırma noktalarından her birine $\theta^1, \theta^2, \theta^3$ numaralı datum noktalarından ayrı ayrı taşınarak elde edilen koordinatlar dengelenir.



Şekil: 6- GPS Jeodezik Ağı

4. SONUÇ:

Günümüzde kurulan 50 km den daha kısa kenar uzunluklu bir GPS jeodezik ağının en az üç yer noktasında yapılan sürekli gözlemlerle ağın ortalama datumu, çok iyi bir duyarlılıkla belirlenebilmektedir. Ağın sıklaştırma noktaları yukarıda sözü edilen yöntemle dengelenirse yatay konumda ($X, Y; \varphi, \lambda$) ± 1 cm, düşey konumda ($Z; h$) ± 2 cm lik duyarlıklara ulaşılabilir. En az iki yer noktasından üç ya da daha fazla uyduya aynı anda yapılan gözlemlerden ard arda üç kez fark alınarak bulunan fark farkları yardımıyla hesaplanabilen bağıl (görelî, relatif) konum belirleme yöntemlerinde bu duyarlıklar, durak noktaları arasında 50 km ye kadar olan uzunluklarda $\pm 0,6$ cm, yatay konumda ($x, y; \varphi, \lambda$) ± 1 cm, düşey konumda ($z; h$) $\pm 1,2$ cm

olmaktadır. Önümüzdeki bir iki yıl içinde tamamlanması beklenen geliştirilmiş GPS teknolojisi ile özellikle ışın kırılması (refraksiyon) modellerinin doğru kurulabildiği aletlerle bir saatlik bir sürede yapılacak ölçülerden yatay konumda 3 mm, düşey konumda 5 mm lik duyarlıklara ulaşılması amaçlanmaktadır.

GPS alıcıları ile bugün ulaşılan duyarlıklar bile geniş alanları kapsayan yerka- buğu hareketlerinin saptanması için yeterlidir. Sistem için bir saatlik bir ölçü zamanının yeterli olması (dakikada bir ölçü) ve ölçülen noktalar arasında görüş koşulu gerektirmemesi, söz konusu sistemin ekonomik yönden de az masraflı olduğunu göstermektedir. Birkaç yıl içinde sistem tamamlandığında yeryüzünün her noktasında 24 saat boyunca ölçü yapılabilecektir. Alet fiyatlarının da hızla düşmesi durumunda sistem, birçok günlük ölçme probleminin çözümünde rahatlıkla kullanılabilir. Yineleme ölçülerinin çok masraflı olması nedeniyle günümüze kadar sürekli denetlenemeyen teknotik yerka buğu hareketleri, fayların kenarlaştığı bölgelerde oluşan atılım hareketleri, baraj deformasyonları, maden ocakları yöresinde, büyük mühendislik ve sanat yapıları ile fabrikaların yakın çevrelerinde oluşan çökme, kıvrılma ve kayma hareketleri GPS alıcıları yardımıyla 24 saat boyunca denetlenebilecektir. Aktif deprem kuşağı üzerinde bulunan ülkemizde yerka buğu hareketlerinin ikişer yıllık zaman aralıklarıyla sürekli denetlenmesi ve oluşan deformasyonların belirlenmesi, depremlerin önceden kestirilmesi probleminin çözümüne ışık tutulacaktır.

KAYNAKLAR:

AKSOY, A. - AYAN, T. (1987): Global Konum Belirleme Yöntemi GPS. Türkiye I. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı s. 523 23-27 Şubat 1987 Ankara.

ANGERMANN, D.- BLASER, F.: (1988) Die Berliner GPS-Kampagne Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) sayı 10, s.345, Karlsruhe 1988.

AYHAN, E. (1988): Transit Doppler ve Navstar-GPS Ölçüleri ile Nokta Konumlama Yöntemi, Harita Dergisi Sayı 100, s. 22 Ocak 1988 Ankara.

CAMPBELL, J.: Grundlagen zur Nutzung des Global Positioning System (GPS) in Landesvermessung. Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV) sayı 1, s. 19, Stuttgart 1986

FREY-E.- GOUGH, R.-BRUNNER, F. (1986) : PoPSTM A New Generation of GPS Post-Processing Software. Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. Austin, Texas, April 28 - May 2, 1986. Volume I. s. 455

GENLICH, U.-ANGERMANN, D.- LEGEMANN, D. (1988): Zur Modellierung des Fasennessprozesses geodatischer GPS-Empfänger. Festschrift Rudolf SIGL, DGK B287, München 1988.

HARTL, Ph. - SCHÖLLER, W. - THIEL, K.H.: (1985): GPS Technology and Metodology for Geodetic Applications. Proc. of Intertial Doppler and GPS Measurements, Univ. Bundeswehr, ş. 209, München 1985.

HOFFMAN, W.-LANGLEY, R.B.-WELLS, E.D.-DELİKARAOĞLU, D. (1986): GPS-Messungen mit dem Macrometer V-1000. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen (Ö.ZfV) 1986 sayı 1 s.3.

LEGEMANN, D.-GENLICH, U. (1988): GPS-Einsatz in der geowissenschaftlichen Forschung und Landesvermessung. AVN sayı 9-10 s. 481 Karlsruhe 1988.

MANİATİS, A.- CAMPBELL, J.- MÜLLER A.- SCHUH, H.-SEEGER, H. (1987): Zur Auswertung von geodatischen GPS-Beobachtungen. AVN sayı 1, s. 9, Karlsruhe 1987.

ÖZTÜRK, E. (1985): Yapay Uydu Gözlemlerinden Elde Edilen Koordinatların Dengelenmesi. TUJJB Bülteni sayı 14 s. 29, Ankara 1985.

ÖZTÜRK, E. (1987): Dengeleme Hesabı Cilt I. KTÜ Yayınları 119. Trabzon 1987.

SCHÖDLBAUER, A.-GLASMACHER, H.-KRACK, K. (1987): Vergleichsmessungen im Global Positioning System mit Verschiedenen Empfängertypen. AVN sayı 8-9, s. 340, Karlsruhe 1987.

VANÍCEK, P.- LANGLEY, R.B.- WELLS, E.D.-DELİKARAOĞLU D. (1984): Geometrical Aspects of Differential Positioning. Bulletin Geodesy 1984, sayı 58, s. 37.