

GPS KOORDİNALARI VE KARŞILIKLI BAŞUCU AÇI ÖLÇÜLERİ İLE KIRILMA KATSAYISI HESABI

M.Emin AYHAN
Mustafa ŞİMŞEK

ÖZET

GPS koordinatları ve eşzamanlı karşılıklı başucu açıları ile görünen ışığın geometrisini ifade eden kırılma katsayısını belirlemeye basit bir yöntem geliştirilmiştir. Aynı amaçla kullanılan eğik kenar ve başucu açıları ile yalnızca atmosferik parametrelerden (ısı, basınc, nem) kırılma katsayısı hesap yöntemleri ANKARA GPS Test Ağında (AGTA) sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Yeni geliştirilen yöntem ile AGTA bölgesi için kırılma katsayısı 0,10 bulunmuş olup bu değer görünen ışık için standart kabul edilen 0,13 değerinden farklıdır. Ayrıca ısının düşey gradyeni dT/dh için test bölgesinde deneyel olaraq $-13,7^{\circ}\text{C}/\text{km}$ değeri bulunmuştur.

ABSTRACT

A simple method convenient for determining the refraction coefficient expressing the geometry of light with GPS coordinates and the simultaneous reciprocal zenith angles has been developed. Slope distances and zenith angles used for the same purpose and the computational methods for the refraction coefficient only from atmospheric parameters (temperature, pressure, humidity) have been compared numerically in the ANKARA GPS test network, while determining the value of 0,10 for the refraction coefficient in ANKARA GPS test network region with the developed method, this coefficient differs from the value of 0,13 adopted as a standart value for light. Besides, the value of $-13,7^{\circ}\text{C}/\text{km}$ has been obtained empirically for the vertical gradient of temperature dT/dh in the test region.

1. GİRİŞ

İşik ısını boşlukta iki nokta arasında sabit bir hızda ve düz bir çizgi boyunca yayılır. Ancak yükseklikle ters orantılı olarak yoğunluğu azalan ve her noktasında farklı kırılma özelliği gösteren atmosfer içinde ise üç boyutlu bir eğri boyunca daha yavaş ve değişik hızlarda yol alır. Fermat yasasına göre iki nokta arasındaki en kısa yolu izleyen ışık ısını, n kırılma

indisi ve Z ışının belirli yoğunluklu atmosfer içine giriş açısı olmak üzere ışın yolu boyunca Snell yasasına göre

$$n \cdot \sin Z = \text{sabit} \quad (1.1)$$

eşitliğini sağlayacak biçimde kırılarak yayılır (Hotine, 1969; Vanicek-Krakiwsky, 1982). Işığın atmosfer içinde yayılma hızı ve ışın yolu diferansiyel özelliklerinin belirlenebilmesi için öncelikle uygun bir modelle atmosferin ifade edilmesi gereklidir. Atmosfer çok karmaşık ve zaman ile değişen bir yapıda olduğundan kırılma ile ilgili incelemeler matematiksel olarak kontrol edilebilen "model atmosfer" içinde yürütülmektedir. Atmosferin model atmosferden farklı olmasından kaynaklanan bozucu kırılma çok değişken ve kontrolu zor olduğundan jeodezik uygulamalarda genellikle gözardı edilmektedir (Saastamoinen, 1974; 1975). Atmosferik kırılmanın ışık ışınına dayalı jeodezik ölçüler üzerindeki etkisini belirlemek üzere atmosfer modelleri tanımlanmıştır. Hotine (1969) da tanımlanan jeodezik atmosfer modelinin yanısıra daha basit modeller de kullanılmaktadır (Saastamoinen, 1975; Laurila, 1983). Bu modellerin genel özelliği ışın yolunun torsiyonu sıfır ve iki noktadaki düşey doğrultuları içine alan düzlem eğri olarak tanımlanmasına olanak vermemeleridir. Bir atmosfer modelinde ışının atmosfer içindeki hızı kırılma indisini ve ışın yolunun eğriliği kırılma katsayısı k ile tanımlanır. Kırılma katsayısı;

$$k = \frac{\text{Işın yolu eğriliği}}{\text{Dünyanın eğriliği}} = \frac{1/r}{1/R} = \frac{r}{R}, \quad (1.2)$$

δ kırılma açısı ve γ merkezi açı olmak üzere (şekil-1)

$$k = \frac{2\delta}{\gamma} \quad (1.3)$$

veya (1.1) eşitliğinden yararla

$$k = - \frac{R}{n} \cdot \sin Z \cdot \frac{dn}{dh} \quad (1.4)$$

eşitliklerinden biri ile hesaplanabilir (Rüeger, 1980; Bomford, 1980; Rapp, 1976; Saastamoinen, 1974; Hotine, 1969; Hradilek, 1984; Vanicek-Krakiwsky, 1982). Burada dn/dh , kırılma indisinin yükseklik (h) boyunca düşey türevidir.

(1.4) eşitliğinden görüldüğü gibi n ve k arasında fonksiyonel bir ilişki söz konusudur. n ve k , atmosfer içinde noktadan noktaya değiştiğinden konumun fonksiyonu ve ayrıca izotrop bir fonksiyon olması beklenir. Ancak k ve n 'nin konumun yanısıra doğrultuya bağlı non-izotrop bir fonksiyon olduğu jeodezik uygulamalarda gözlenmektedir (Ramsayer, 1974; Hradilek, 1984; Grafarend v.d., 1987; Kakkuri, 1988; 1989).

Jeodezik ölçülerde elektromagnetik dalga spektrumunun görünen ışık ve mikrodalga bandları kullanılır (Rüeger, 1980). Örneğin, yeryüzü noktasından bir gök cismine yapılan astronomik ölçüler, hava fotoğrafı üzerinde yeryüzünün izdüşümü, iki yeryüzü noktası arasında başucu ölçüsü, EDM (elektromagnetik uzunluk ölçümü) kenar ölçüsü ve SLR (Uydu Laser Ölçüsü) ölçülerini görünen ışığa dayalıdır. Buna karşılık uzaktan algılama, GPS, Transit-Doppler, uydu altimetresi ve bir bölüm EDM ölçüler mikrodalgaları kullanır. Görünen ışık ve mikrodalga üzerinde atmosfer farklı kırılma özelliği gösterdiginden kırılma katsayıları da farklı olup ortalama değerleri görünen ışık için 0,13, mikrodalga için 0,25 verilmektedir. Ancak uygulamada kırılma katsayısının %25 farklılık gösterdiği belirtilmektedir (Brunner, 1977; Rüeger, 1980). Bu çalışmada atmosferin alt tabakalarında yayılan görünen ışığın kırılma katsayısunun belirlenmesi ile ilgilenilmektedir. Görünen ışıkla yapılan diğer uygulamalarda ve mikrodalga ölçülerine atmosferik kırılmanın (astronomik, fotogrametrik, EDM, uydu teknikleri) etkisi diğer kaynaklarda verilmektedir (Brunner, 1977; Seeber, 1989; Saastamoinen, 1974; Vanicek-Krakiwsky, 1986).

Atmosferin alt tabakalarında yayılan görünen ışığın kırılma katsayısı; EDM kenar ölçülerinde ikinci hız düzeltmesinin getirilmesinde, başucu ölçüsü ile iki nokta arasında trigonometrik yükseklik fark hesabında, astrojeodezik çekül sapması interpolasyonunda ve özellikle üç boyutlu ağ dengelemesi ile bütünsel jeodezi uygulamasında önemli bir role sahiptir (Hradilek, 1984; Tilk-Thies, 1986; Heiskanen-Moritz, 1967; Rüeger, 1980; Grafarend v.d., 1987; Ramsayer, 1974; Wunderlich-Gold, 1986). Bu amaçlarla görünen ışığın kırılma katsayısunu belirlemek için değişik yöntemler uygulanmakta olup bu yöntemler iki genel gruba ayrılabilir. İlk grubu oluşturan yöntemler atmosferik kırılma etkisini doğrudan ölçmek üzere geliştirilmiş olup teknolojik yeniliklere bağlıdır ve henüz yaygın kullanılamamaktadır (Prilepin, 1974; Munck, 1974; Brunner, 1984). Atmosferik kırılmanın elemine edilmesi veya hesaplanarak ölçüle rin düzeltmesi ikinci grup yöntemlerin temel özelliğidir. Jeodezik çalışmalarda ikinci grubu oluşturan yöntemler yaygın olarak kullanılmakta olup bu

yöntemlerin en eskisi ve en iyi bilineni eş zamanlı karşılıklı başucu açı ölçüleri ile (1.2) veya (1.3) eşitliklerinden kırılma katsayısını belirleyen yöntemdir (Heiskanen-Moritz, 1967; Saastamoinen, 1974; Rüeger, 1980). Bu yöntem iki nokta arasında ışın yoluna ait kırılma katsayısını bağımsız olarak belirlemekte kullanıldığı gibi bir trigonometrik yükseklik ağının üç boyutlu veya bütünleşik jeodezi kapsamında jeodezik ağın dengelenmesi sonunda ağ noktalarında ve doğrultular boyunca tanımlanan kırılma katsayıları topluca da belirlenmektedir (Ramsayer, 1974; Hradilek, 1984; Grafarend v.d., 1987). İkinci gruba giren diğer bir yöntem ise atmosferik parametre (ısı, basınc, nem) ölçülerinden (1.4) eşitliği ile kırılma katsayısını belirlemeye dayanır (Hotine, 1969; Saastamoinen, 1974; Brunner, 1977; Bomford, 1980; Laurila, 1983; Kakkuri, 1988).

Bu çalışmada ise GPS ölçüleri ile WGS84 sisteminde koordinatları bilinen noktalar arasında eşzamanlı karşılıklı başucu açı ölçüleri bulunması durumunda (1.3) eşitliğindeki δ ve γ açılarını doğrudan belirleyip kırılma katsayısını hesaplamaya uygun basit bir yöntem geliştirilmiştir. GPS ve başucu açıları ile kırılma katsayısını belirlemeye yönelik bu yöntem ikinci bölümde açıklanmaktadır. Ayrıca atmosferik parametre ve eşzamanlı karşılıklı başucu açıları ile kırılma katsayısı belirleme yöntemleri de sırasıyla üçüncü ve dördüncü bölümde kısaca verilmiştir.

Yukarıda sözü edilen ve atmosferik kırılma etkisini elemeye etmek veya hesaplayıp ölçülere düzeltme getirmeyi amaçlayan üç yöntem (GPS ve karşılıklı başucu açı yöntemi, atmosferik parametre yöntemi, karşılıklı başucu açı yöntemi) ANKARA GPS Test Ağında uygulanmıştır. Her üç yöntem ile bulunan sonuçlar doğruluk, güvenilik ve özellikle bu çalışmada geliştirilen GPS ve karşılıklı başucu açı yönteminin uygulanabilirliğini belirlemek üzere karşılaştırılmıştır. ANKARA GPS Test Ağında yapılan uygulama ve karşılaştırmalar beşinci bölümde, sonuç ve öneriler ise altıncı bölümde açıklanmaktadır.

2. GPS VE KARŞILIKLI BAŞUCU AÇISI İLE KIRILMA KATSAYISI HESABI

Yeryüzü noktalarında GPS alıcıları ile kaydedilen NAVSTAR uydu yayınları uygun değerlendirilerek nokta koordinatları görelî veya nokta konumlama ile WGS84 sisteminde belirlenir. Bir P yeryüzü noktasının GPS ile bulunan koordinatları (X_p , Y_p , Z_p), WGS84 koordinat sisteminin başlangıç noktası 0 olmak üzere bu iki nokta arasındaki konum vektörü \vec{R}_p 'nin büyüklüğü R_p ;

$$R_p = \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2} \quad (2.1)$$

ile bulunur. P ve Q yeryüzü noktalarının GPS koordinatlarından bulunan, noktalar arasındaki baz vektörü uzunluğu;

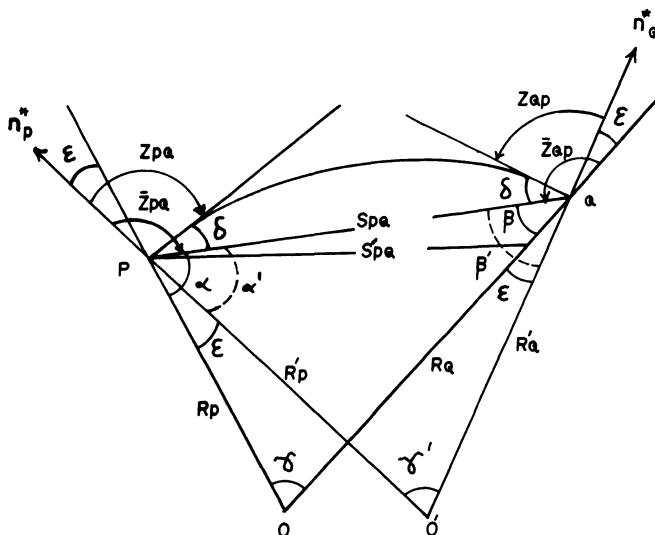
$$s_{PQ} = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2 + (z_p - z_q)^2} \quad (2.2)$$

ve şekil-1'deki OPQ düzlem üçgeninin iç açıları (α, β, γ);

$$\alpha = \text{arc Cos } \left(\frac{R_p^2 - R_q^2 + s_{PQ}^2}{2 R_p s_{PQ}} \right)$$

$$\beta = \text{arc Cos } \left(\frac{R_q^2 - R_p^2 + s_{PQ}^2}{2 R_q s_{PQ}} \right) \quad (2.3)$$

$$\gamma = \text{arc Cos } \left(\frac{R_p^2 + R_q^2 - s_{PQ}^2}{2 R_p R_q} \right)$$



Şekil-1 : Kırılma

ile hesaplanır. Bu durumda P ve Q noktalarında karşılıklı başucu açıları

$$\begin{aligned}\bar{\gamma}_{PQ} &= 180^\circ - \alpha \\ \bar{\gamma}_{QP} &= 180^\circ - \beta\end{aligned}\tag{2.4}$$

ile doğrudan belirlenebilir. Ancak (2.4) ile hesaplanan başucu açıları; atmosferik kırılma, çekül sapma açısı ve O noktasının konumu nedeniyle ölçülecek başucu açılarından farklıdır. Çekül sapma açısının etkisi küçük olduğu düşünüлerek burada gözardı edilmekte, diğer iki etki ise aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

P noktasında alet kurulduğunda aletin düşey ekseni o noktadaki çekül doğrultusu (n_p^*) ile çakışır. GPS ile O ve P noktaları arasında tanımlanan \vec{R}_P konum vektörü n_p^* ile çakışık değildir. P noktası yeryüzündeki bir nokta olmasına karşılık O noktası yerin ağırlık merkezine yakın ancak farklı olduğu bilinen tanımsal bir noktadır. n_p^* ekseni, dünyanın gravite alanında bir kuvvet çizgisi olan ve P noktası çevresindeki kitle dağılımının büyük ölçüde etkisi altında bulunan çekül eğrisinin o noktadaki teğeti ile çakışmaktadır. Bu nedenle n_p^* ekseninin ayakcu yönündeki uzantısının O noktasından veya yerin ağırlık merkezinden geçtiğini düşümmek olanağı da değildir. Benzer düşünelerle Q noktasındaki n_Q^* 'nun ayakcu yönündeki uzantısı da O noktasından geçmeyebilir. Ancak P ve Q birbirlerine yakın iki nokta olduklarından n_p^* ve n_Q^* 'nun ayakcu yönündeki uzantılarının O noktasından farklı bir O' noktasında kesişikleri varsayılsın (Şekil-1). O, O' , P ve Q noktaları ile oluşturulan OPQ ve $O'PQ$ düzlem üçgenlerinin O ve O' noktaları birbirine yakın olduğu düşünüлerek aynı düzlem üzerinde oldukları varsayılmaktadır. Bu varsayımla iç açıları farklı olan OPQ ve $O'PQ$ düzlem üçgenlerinin iç açıları arasında;

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha' + \epsilon \\ \beta &= \beta' - \epsilon \\ \gamma &= \gamma'\end{aligned}\tag{2.5}$$

ilişkisi şekil-1'den yazılabilir. (2.5) eşitliğindeki ϵ açısı küçük bir açı olup O ve O' noktalarının farklı noktalar olmasından kaynaklanmaktadır ve şekil-1'de gösterilmektedir. Aslında P ve Q noktalarında farklı olan ϵ değerleri iki noktanın birbirine yakın olması nedeniyle eşit varsayılmıştır.

Ölçülen başucu açısının (2.4) eşitliği ile hesaplanan başucu açısından farklı olmasının diğer nedeni atmosferik kırılma nedeniyle P ve Q noktaları arasında ışığın bir eğri boyunca yayılmasıdır. Atmosferik kırılma nedeniyle ölçülen başucu açısı, kırılma açısı δ kadar farklı ölçülür (Şekil-1). P ve Q arasında ışın yolu eğriliği değişken olmasına karşılık bu iki nokta birbirine yakın olduğundan ışın yolu eğriliği sabit varsayılabılır. Böylece P ve Q noktalarındaki kırılma açıları da birbirlerine eşit olur.

Yukarıdaki incelemeler gözönünde tutularak (2.4) ile hesaplanan başucu açısı \bar{Z} ve ölçülen başucu açısı Z arasında

$$\begin{aligned} Z_{PQ} &= \bar{Z}_{PQ} + \varepsilon - \delta \\ Z_{QP} &= \bar{Z}_{QP} - \varepsilon - \delta \end{aligned} \quad (2.6)$$

ilişkisi yazılabilir. (2.4) eşitliği (2.6)'da yerine konulursa

$$Z_{PQ} = 180^\circ - \alpha + \varepsilon - \delta \quad (2.7.a)$$

$$Z_{QP} = 180^\circ - \beta - \varepsilon - \delta \quad (2.7.b)$$

bulunur. Bu iki eşitlik taraf tarafa toplanır ve δ için düzenlenirse

$$\delta = 180^\circ - \frac{Z_{PQ} + Z_{QP}}{2} - \frac{\alpha + \beta}{2} \quad (2.8)$$

yazılır. δ kırılma açısının bu değeri (1.3)'de yerine konulursa kırılma katısayısı k için bir uygulama eşitliği;

$$k = \frac{360^\circ - (Z_{PQ} + Z_{QP}) - (\alpha + \beta)}{\delta} \quad (2.9)$$

ile bulunur.

3. ATMOSFERİK PARAMETRELERLE KIRILMA KATSAYISI HESABI

Giriş bölümünde verilen (1.4) eşitliği ile kırılma katsayısı belirlemek için bu eşitlikte geçen üç değişkenin ($n, dn/dh$, $\sin Z$) tanımlanması gereklidir. Yeryüzündeki noktalar arasında ölçülen başucu açısı genellikle 90° ye yakın olduğundan bu değişkenlerden $\sin Z \approx 1$ alınır ve (1.4) yerine

$$k = - \frac{R}{n} \cdot \frac{dn}{dh} \quad (3.1)$$

yazılır. Bu eşitlikte görünen ışığın kırılma indisini $n \approx 1$ ve kırılma indisini düşey gradyeni (dn/dh) ile yerin ortalaması yarıçapı $R \approx 6371$ km yerine konulup düzenlenirse

$$k = 503.309 \frac{P}{T^2} (0.0342 + \frac{dT}{dh}) \quad (3.2)$$

eşitliği bulunur (Keppke, 1968; Hotine, 1969; Saastamoinen, 1974; Rapp, 1976; Bomford, 1980). Burada P milibar biriminde basınç, T Kelvin biriminde ısısı ve dT/dh ısının düşey gradyeniidir. Kırılma katsayısının atmosferik parametre ölçüleriyle hesaplanması uygulanma eşitliği dT/dh belirle-nerek verilebilir. Jeodezik ölçülere uygun ısının düşey gradyeni Hotine (1969) ve Bomford (1980)'de $-0.0055^{\circ}\text{C}/\text{m}$ sabit değeri ile tanımlanmaktadır. Bilindiği gibi ısının düşey gradyeni gün içinde periyodik bir değişim göst terir. Deneyel değerlerden yararla bu periyodik değişim Kakkuri (1989)'da Fourier serileri ile ifade edilmiş olup dT/dh 'nın aşağıdaki eşitlikle be lerlenmesi yoluna gidilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dh} = & -0.00036 + 0.01137 * \sin(W) + 0.01400 * \cos(W) \\ & + 0.00993 * \sin(2*W) - 0.00094 * \cos(2*W) \\ & + 0.00121 * \sin(3*W) - 0.00534 * \cos(3*W) \\ & - 0.00281 * \sin(4*W) - 0.00187 * \cos(4*W) \\ & - 0.00253 * \sin(5*W) + 0.00101 * \cos(5*W) \\ & - 0.00050 * \sin(6*W) + 0.00142 * \cos(6*W) \\ & + 0.00058 * \sin(7*W) + 0.00054 * \cos(7*W) \\ & + 0.00065 * \sin(8*W) + 0.00021 * \cos(8*W) \\ & + 0.00021 * \sin(9*W) - 0.00015 * \cos(9*W) \\ & - 0.00018 * \sin(10*W) - 0.00022 * \cos(10*W) \\ & - 0.00024 * \sin(11*W) - 0.00003 * \cos(11*W) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Burada $W = \pi \cdot t / 12$ ve t saat cinsinden gün içindeki ölçü zamanıdır.

4. KARŞILIKLI BAŞUCU AÇILARI İLE KIRILMA KATSAYISI HESABI

P noktasından Q noktasına ölçülen başucu açısı Z_{PQ} ve bu iki nokta arasındaki eğik kenar S_{PQ} olmak üzere kırılma katsayısı k ;

$$k = 1 - \frac{2R}{S_{PQ}^2 \cdot \sin^2 Z_{PQ}} \cdot (h_Q - h_P - S_{PQ} \cos Z_{PQ} - a_P + i_Q) \quad (4.1)$$

ile bulunur. Burada h_P, h_Q, P ve Q noktalarının yüksekliği, alet yüksekliği ve i işaret yüksekliğidir. P ve Q noktalarında eşzamanlı karşılıklı başucu açıları (Z_P, Z_Q) ölçüldüğünde kırılma katsayısı k ;

$$k = 1 + \frac{2R}{S_{PQ}} \cdot \frac{\cos Z_{PQ} + \cos Z_{QP}}{\sin^2 Z_{PQ} + \sin^2 Z_{QP}} + \frac{2R}{S_{PQ}^2} \cdot \frac{a_P - i_P + a_Q - i_Q}{\sin Z_{PQ} + \sin Z_{QP}} \quad (4.2)$$

eşitliği ile belirlenir (Rüeger, 1980; Tilk-Thies, 1986; Wunderlich-Gold, 1986).

Eğik uzunluk S_{PQ} yerine yatay uzunluk S'_{PQ} ($S'_{PQ} = \sqrt{S_{PQ}^2 - (h_Q - h_P)^2}$) kullanılırsa (4.1) ve (4.2) formülleri sırayla

$$k = 1 - \frac{2R}{S'_{PQ}^2} (h_Q - h_P - S'_{PQ} \cot Z_{PQ} - a_P + i_Q) \quad (4.3)$$

$$k = 1 + \frac{R}{S'_{PQ}} (\cot Z_{PQ} + \cot Z_{QP}) + \frac{R}{S'_{PQ}^2} (a_P - i_P + a_Q - i_Q) \quad (4.4)$$

biçimine girer (Brunner, 1977; Rüeger, 1980).

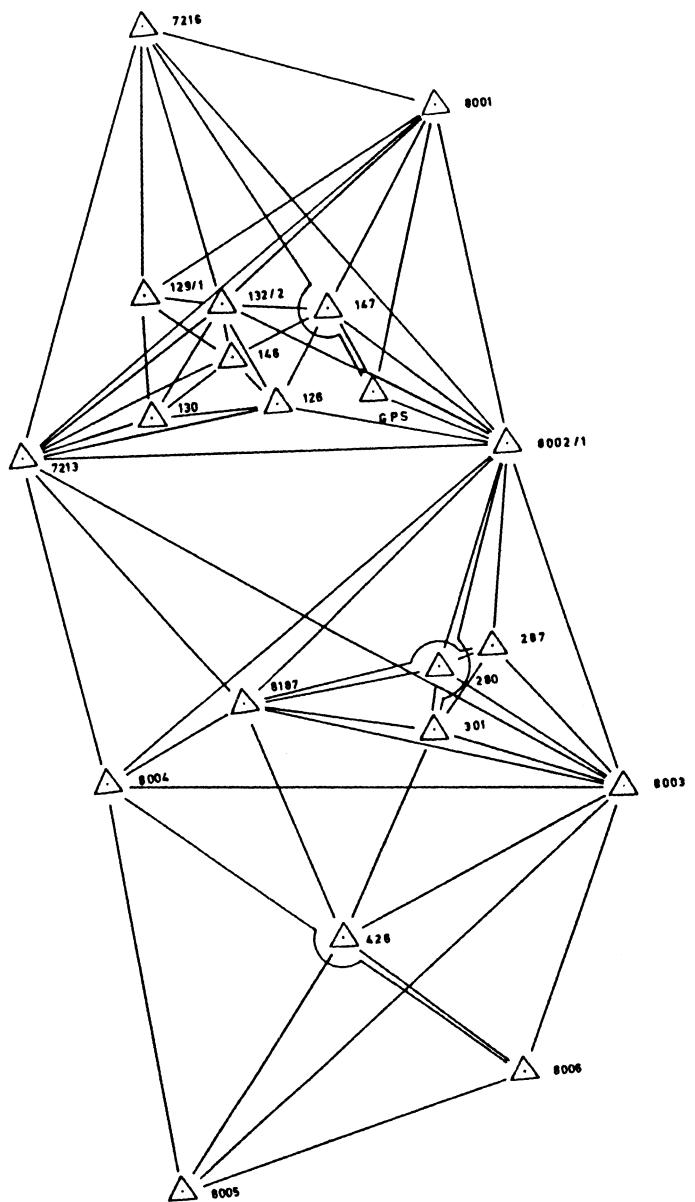
Elipsoidal yay uzunluğu S''_{PQ} ile gösterilir ve $\gamma = \frac{S''_{PQ}}{R} \cdot \rho$ olmak üzere bu değer (2.9) eşitliğinde kullanılırsa elde edilen sonuç (4.2) ya da (4.4) formülleriyle bulunan sonuca eşit olur.

5. ANKARA GPS TEST AĞINDA (AGTA) KIRILMA KATSAYISI HESABI

Kırılma katsayısını GPS ve karşılıklı başucu açıları ile belirlemek için ikinci bölümde geliştirilen yöntemin uygunluğunu göstermek ve bu amaçla uygulanan yöntemler ile (atmosferik parametreler ve karşılıklı başucu açıları) karşılaştırmak üzere ANKARA GPS Test Ağında (AGTA) sayısal uygulama yapılmıştır. AGTA 6 adet düşey kontrol noktası, 19 adet yatay kontrol noktası ile

bir sabit GPS istasyonu olmak üzere toplam 26 noktadan oluşur. Ancak 8001 nolu I ncı derece yatay kontrol noktası test ağından çıkarılarak nokta sayısı 25'e indirilmiştir. Bu çalışmada incelemelerde 26 noktadaki yersel ölçüler gözönünde tutulmuştur. AGTA nokta aralıkları 2 km - 30 km arasında değişmekte olup her noktada yatay doğrultu açısı ölçülen tüm doğrultulara T3 ile 4 dizi başucu açısı ölçülmüştür. Ölçüler karşılıklı ve eşzamanlı yapılmış olup güneşin meridyenden geçiş anından 2 saat önce ve sonrası süresinde karşılıklı ölçülerin en çok 1 saat içinde yapılması sağlanmıştır. Bir doğrultuya yapılan ölçü ortalamasına ait standart sapma $\pm 3.5\text{cc}$ ($\pm 1''.13$) değerini geçmemekte ve alet ile işaret yükseklikleri milimetre doğrulukta ölçülmüştür. AGTA noktalarından üçü (7213,8002/1,8003) dışında diğer noktaların ortometrik yükseklikleri I veya II ncı derece geometrik nivelman ile TUDKA-92'ye dayalı olarak belirlenmiştir. Ayrıca yatay doğrultu ve başucu açısı ölçülen hemen tüm kenarlar (8005-426 kenarı hariç) RANGEMASTER III elektromagnetik uzunluk ölçer (EDM) ile güneşin meridyen geçişinden 3 saat öncesi ve 3 saat sonrasına kadar olan zaman aralığında karşılıklı ölçülmüştür. RANGEMASTER III, laser ile ölçü yapan bir EDM aleti ve ölçü duyarlığı $\pm(5\text{mm} \pm 1\text{ppm.S})$ 'dır. Kenar ölçümünde aletten 20 okuma yapılmış ve okumaların en büyüğü ile en küçüğü arasındaki farkın 15mm'yi geçmemesi sağlanmıştır. Kenar ölçülerinde de alet ve reflektör yükseklikleri milimetre doğrulukta ölçülmüştür. AGTA noktaları ile başucu açısı ve kenar ölçülerine ait ölçü planı şekil-2'de gösterilmektedir. Kenar ölçülerini yapılrken hem aletin hem de reflektörün bulunduğu noktada basınç, kuru ısı ve ıslak ısı değerleri ölçülmüş ve ölçüm zamanı kaydedilmiştir. Isı ölçüsü $\pm 0.1^\circ\text{C}$ duyarlılıkta yerden 2m yüksekte ve 2.5m/sn. vantilasyon hızı uygulanarak psikrometre ile yapılmıştır. Basınç ise $\pm 0.1 \text{ mmHg}$ duyarlılıkta barometre ile ölçülmüştür.

AGTA'nın 6 düşey kontrol ve 9 I,II ve III ncü derece yatay kontrol noktası olmak üzere toplam 15 noktasında 1991 yılı yazında düzenlenen bir GPS kampanyası ile GPS ölçüsü yapılmıştır. Bu kampanyada IfAG (Almanya Uygulamalı Jeodezi Enstitüsü)'ın sağladığı 11 adet TRIMBLE 4000 SST çift frekanslı GPS alıcısı ile günlük 6 saat eş zamanlı ölçü olmak üzere toplam 4 gün ölçü yapılmıştır. Günlük ölçüler GAMIT yazılımı ve yayın efemerisi ile 7213 nolu noktanın daha önce bulunan ITRF 89 (WGS84'e yakın) koordinatları sabit tutularak değerlendirilip diğer 14 noktanın koordinatları ve baz vektör uzunlukları hesaplanmıştır (Kınık v.d., 1992). Ancak GPS ölçüsü yapılan noktalardan 6 tanesi düşey kontrol noktası olup bu noktalarda başucu açısı ve kenar ölçümediğinden GPS ve başucu açıları ile kırılma katsayısı belirleme çalışma-



Şekil-2: Ankara GPS Test Ağı

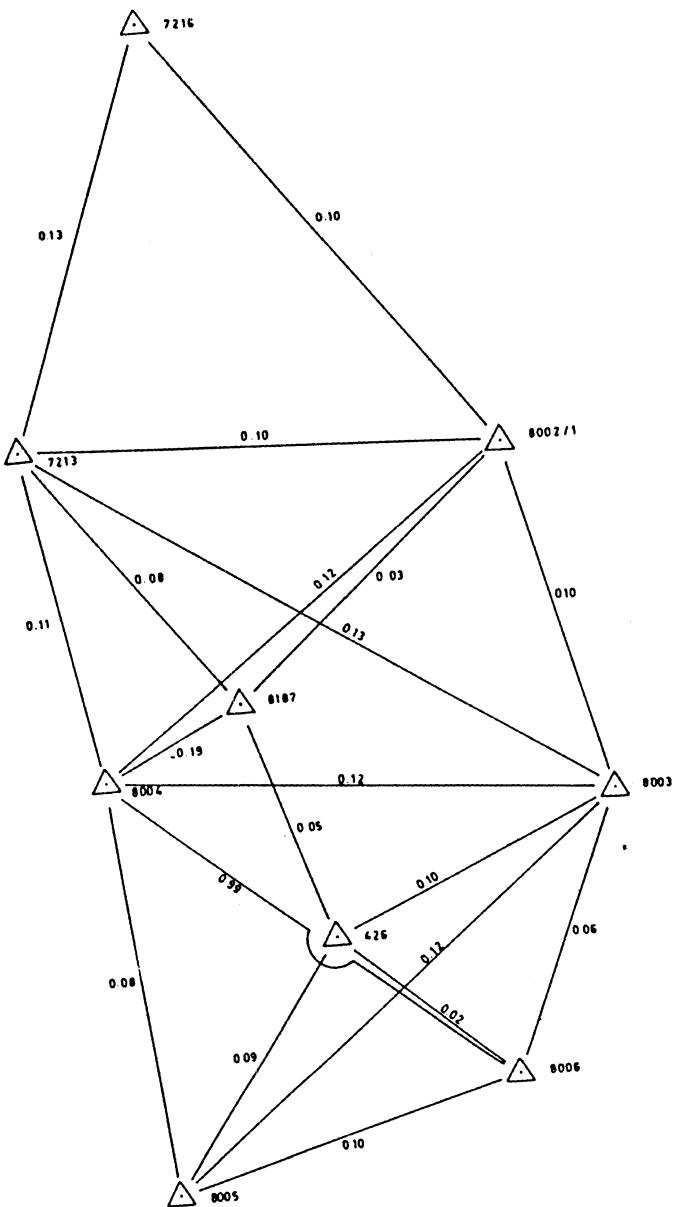
ları şekil-3'de gösterilen 9 nokta arasında oluşturulan birbirinden bağımsız 20 baz boyunca yürütülmüştür.

GPS ve karşılıklı başucu açı ölçüleri ile kırılma katsayısını 2 nci bölümde açıklanan yöntem ile hesaplamak için öncelikle bu 9 noktanın tanımladığı konum vektörlerinin büyülüğu ve noktalar arasındaki baz vektörlerinin büyülüğu (2.1) ve (2.2) eşitliği ile bulunmuştur. Daha sonra her baz vektörü için ayrı oluşturulan bir kösesi 0 noktası ile çakisık üçgenlerin α , β , γ iç açıları (2.3) eşitlikleri kullanılarak belirlenmiştir. Her baz vektörünün üç noktalarda karşılıklı ve eşzamanlı başucu açı ölçüleri ve o baz vektörüne ilişkin üçgenin iç açıları (2.9) eşitliğinde yerine konularak kırılma katsayı k hesaplanmıştır. Bu yöntem ile bulunan kırılma katsayı k baz vektörü boyunca ortalama değer olup bir noktada kırılma katsayı k ini belirlemek üzere bu yöntem kullanılamaz. Baz vektörleri boyunca kırılma katsayı k yanısıra (2.7.a) ve (2.7.b) taraf tarafa çıkarılıp düzenlenendiğinde

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left[(Z_{PQ} + \alpha) - (Z_{QP} + \beta) \right] \quad (5.1)$$

ile tanımlanan ε açısı da hesaplanmıştır. (5.1) ile 14 baz vektörü için bulunan ε değerlerinin mutlak değerleri tablo-1'de verilmektedir. Bu yöntemle belirlenen kırılma katsayıları şekil-3'de baz vektörleri üzerine yazılmış ve test bölgelerindeki değişimleri gösterilmeye çalışılmıştır. Yapılan hesaplamalarda belirlenen kırılma katsayıları tablo-1'in ikinci sütununda verilmiştir. 6 baz vektörü için hesaplanan değerler bu vektörlere ilişkin başucu açılarının duyarlıklarının yeterli olmayışı nedeniyle beklenen düzeyde çıkmamıştır (şekil-3). Tablo-1'den de görüldüğü gibi bölge içinde bu yöntemle bulunan kırılma katsayıları 0,075 ile 0,13 arasında değişmekte ve 0,10 olan ortalaması, görünen ışığın kırılma katsayı k için verilen 0,13 değerinden küçük olmaktadır. Bu yöntem ile bulunan kırılma katsayı k ının doğruluğu daha çok karşılıklı başucu açıları ile alet, işaret yüksekliklerinin doğru ölçülmesine bağlıdır. Bu değerlerde olabilecek kaba hatalar hesaplanan kırılma katsayı k ına doğrudan yansımaktadır. Tablodan da görüldüğü gibi kırılma katsayılarının hepsi pozitif değerlerdir. Bunun anlamı ise güneşin meridyen geçişinden ± 2 saat içinde yapılan başucu açı ölçüleri için ışın yolunun beklenildiği gibi yeryüzüne doğru konkav olmasıdır.

GPS ve başucu açısı ölçüleriyle hesaplanan kırılma katsayılarının anlamlığını ve bu yöntemin pratik kullanılabilirliğini göstermek amacıyla; AGTA'daki atmosferik parametre ölçüleri ile eşzamanlı karşılıklı başucu açısı ve EDM ile ölçülen eğik kenarları kullanarak bölüm üç ve dörtte açıklanan yöntemlerle de kırılma katsayı k hesaplanmıştır.



Sekil-3: GPS Baz Vektörleri

Üçüncü bölümde kısaca açıklanan atmosferik parametrelerle kırılma katsayısının (3,2) eşitliği ile belirlenebilmesi için öncelikle bu eşitlikteki dT/dh değerinin tanımlanması gereklidir. Bu değer bölgeden bölgeye değişmesine rağmen burada iki ayrı biçimde belirlenmesi uygun görülmüş ve herbiri ile ayrı ayrı hesap yapılmıştır. İlk olarak dT/dh için jeodezik amaçlı atmosferik kırılma çalışmalarına uygun olduğu belirtilen $-0,0055 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ sabit değeri kullanılarak (3,2) eşitliği düzenlenmiş ve kırılma katsayısı;

$$k = 14,44497 \frac{P}{T^2} \quad (5.2)$$

basit eşitliği ile hesaplanmıştır. Bu eşitlik ile yapılan uygulamada P ve T atmosferik parametre değerlerinin hesabı için iki ayrı yol izlenmiştir. Atmosferik parametreler karşılıklı kenar ölçüleri sırasında alet ve reflektör bulunan noktalarda ayrı ayrı ölçüldüğünden (5.2) eşitliğinde kullanılabilcek dört ayrı ölçü (P, T) mevcuttur. Bu nedenle ilk olarak bir kenarın ölçüsü sırasında alet ve reflektör noktasında ölçülen değerlerin ortalaması ile bulunan P ve T değerleri (5.2)'de kullanılarak bir baz vektörü için geçerli ortalama kırılma katsayısı hesaplanmıştır. Şekil-2'deki ölçü planında her kenar iki kez ölçüldüğünden toplam 129 kenar için bu yöntemle kırılma katsayısı belirlenmiştir. Test bölgesinde 0,136 ile 0,161 arasında değerler alan kırılma katsayılarının ortalaması ise 0,145 olarak bulunmuştur. İkinci olarak alet ve reflektör noktalarda karşılıklı kenar ölçüsü sırasında ölçülen atmosferik parametrelerin aritmetik ortalaması ile bulunan P ve T değerleri (5.2) eşitliği ile kullanılarak toplam 65 baz vektörü için (bir kenar tek taraflı ölçülmüştür) kırılma katsayısı hesaplanmıştır. Bu hesaplamada bulunan kırılma katsayıları bir önceki yol ile bulunanlara benzer olarak 0,139 ile 0,152 arasında değişmekte ve ortalaması 0,145 olmaktadır. Kırılma katsayılarının aldığı değerlerin birbirine çok yakın olması nedeniyle atmosferik parametreleri farklı biçimde hesaplananın (5.2) ile bulunan sayısal sonuçları etkilemediği yargısına varılmaktadır.

dT/dh yi test bölgesinde sabit bir değer ile ifade etmek yerine (3.3) ile zamanın bir fonksiyonu olarak ifade etmek de mümkündür. Ölçü zamanı için (3.3) ile belirlenen dT/dh değeri ve yalnızca karşılıklı kenar ölçüsü sırasında alet ve reflektör noktalarda ölçülen atmosferik parametrelerin aritmetik ortalaması P ve T değerleri (3.2)'de kullanılarak 65 baz vektörü için kırılma katsayısı hesaplanmıştır. Bu şekilde bulunan kırılma katsayıları 0,108 ile 0,121 arasında değişmekte ve ortalaması 0,113 olmaktadır. dT/dh için

$-0.0055 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ sabit değeri ile belirlenen kırılma katsayılarının $\text{dT/dh}'$ ın zamanın fonksiyonu alınması durumunda hesaplananlardan belirgin olarak büyük olması (3.2) ile kırılma katsayısı hesabında bölgeye uygun dT/dh değeri seçiminin önemli olduğunu göstermektedir. Uygun dT/dh değerinin belirlenmesi konusu daha sonra yeniden ele alınacaktır. Yukarda açıklanan yöntemle 14 baz vektörü için hesaplanan kırılma katsayıları tablo-1'de verilmektedir. Atmosferik parametrelerle bulunan kırılma katsayılarının test bölgesinde hemen hemen homojen ve izotrop dağılım gösterdiği tablodan anlaşılmaktadır. (3.2) eşitliği tek bir noktada kırılma katsayısını hesaplamak için de kullanılabilir. Ancak burada bir baz vektörü boyunca ortalama kırılma katsayısını bulmak için uygulanmıştır. GPS ve karşılıklı başucu açı ölçülerini ve başucu açı yöntemlerinde kırılma katsayısı genellikle bir baz vektörü için doğrultuya bağlı olarak hesaplanır.

GPS ve karşılıklı başucu açı ölçülerini ile kırılma katsayısı yöntemiyle bulunan sonuçları karşılaştırmak üzere son olarak test ağının 20 noktası arasında ölçülen karşılıklı başucu açıları ve EDM kenarları ile bölüm dörtte açıklanan yöntem ile kırılma katsayısı hesaplanmıştır. Bu amaçla önce atmosferik düzeltme ve yay-kırış düzeltmesi getirilen EDM kenar ölçülerinden eğik uzaklık S_{PQ} belirlenir. Z_{PQ} ve Z_{QP} karşılıklı eşzamanlı başucu açı ölçülerini ile S_{PQ} eğik kenarı (4.2) eşitliğinde yerine konularak bir baz vektörü için ortalama kırılma katsayısı hesaplanır. Test ağının şekil-2'deki 20 noktası arasında oluşturulan 97 baz vektörü boyunca bu yöntemle kırılma katsayısı hesaplanmıştır. Kırılma katsayılarının en küçük ve en büyük değeri sırasıyla 0.05 ve 0.28, ortalaması ise 0.11 bulunmuştur. (4.1) ile verilen tek taraflı kırılma katsayısı hesap formülü (4.2) ile belirlenen kırılma katsayılarının (diğer bir deyişle başucu açı ölçülerinin) kontrolünde kullanılmıştır. Bu yöntemle 14 baz vektörü boyunca hesaplanan kırılma katsayıları karşılaştırılarak amacıyla tablo-1'de verilmektedir.

Tablo-1'de verilen kırılma katsayıları incelendiğinde hepsinin pozitif olduğu görülmektedir. Güneşin meridyen geçişinden ± 3 saat içinde atmosferik parametre ve başucu açı ölçülerini yapılmış olması nedeniyle kırılma katsayılarının pozitif olması beklenen bir sonuçtur. Ayrıca GPS ve karşılıklı başucu açı ölçülerile bulunan kırılma katsayılarının (4.2) eşitliği ile bulunanlara benzer, ancak atmosferik parametrelerle bulunanlardan farklı olması dikkat çekmektedir.

Tablo-1: Kırılma katsayısı, ϵ açısı ve deneysel dT/dh

Baz		k				ϵ	dT/dh (Deneysel) $^{\circ}C / km$		
		(2.9) Eşitliği	(3.2) Eşitliği		(4.2) Eşitliği				
			$dT/dh = -5.5 ^{\circ}C / km$	$dT/dh = (3.3) Eşitliği$					
7216	- 7213	0,130	0,150	0,117	0,129	10".65	- 9,3		
7216	- 8002/1	0,096	0,146	0,115	0,106	9".17	-15,4		
7213	- 8002/1	0,095	0,145	0,113	0,109	0".67	-15,4		
7213	- 8003	0,125	0,150	0,118	0,125	6",21	-10,4		
7213	- 8004	0,111	0,147	0,115	0,111	11".17	-12,5		
7213	- 8187	0,080	0,144	0,112	0,079	8".86	-18,3		
8002/1	- 8003	0,095	0,144	0,112	0,096	11".01	-15,2		
8002/1	- 8004	0,118	0,146	0,114	0,105	6".88	-11,1		
8003	- 8005	0,121	0,141	0,110	0,121	7".17	- 9,5		
8003	- 8004	0,116	0,146	0,113	0,115	0".91	-11,4		
8003	- 426	0,103	0,140	0,110	0,102	4".79	-13,1		
8004	- 8005	0,075	0,139	0,108	0,075	11".36	-18,8		
426	- 8005	0,088	0,139	0,109	0,087	9".34	-16,1		
8005	- 8006	0,095	0,141	0,111	0,119	3".35	-14,9		
ORTALAMA		0,103	0,145	0,113	0,106		-13,7		

Atmosferik parametrelerle kırılma katsayısı hesabında dT/dh değerinin bölgeye uygun seçilmesinin önemli olduğu sayısal olarak daha önce gösterilmiş olduğundan GPS ve karşılıklı basucu açı ölçüleriyle bulunan kırılma katsayıları doğru varsayılarak dT/dh 'ın deneysel değerleri, (3.2) eşitliği düzenlenerek bulunan

$$\frac{dT}{dh} = \frac{k*T^2}{503.309*p} - 0.0342 \quad (5.3)$$

ile belirlenmiştir. Bu eşitlikte T ve p değerleri karşılıklı EDM kenarı ölçülürken bulunan ısı ve basınç değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Tablo-1 deki 14 baz vektörü boyunca dT/dh deneysel değerleri hesaplanmış olup tablonun son sütununda verilmektedir. Test bölgesi içinde deneysel dT/dh değerleri beklenildiği gibi eksİ işaretli olup ortalaması -13.7 ± 0.83 $^{\circ}$ /km bulunmaktadır. Deneysel dT/dh değerlerinin ortalamasının (3.3) eşitliği ile bulunan dT/dh ye daha yakın bir değer olduğu gözlelmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Konum belirleme dışında GPS'in jeodezideki diğer kullanım alanlarını ortaya çıkarmayı amaçlayan bu çalışmada GPS ve karşılıklı basucu açı ölçüleri ile görünen ışığın kırılma katsayısını hesaplamaya uygun bir yöntem geliştirilmiştir. İkinci bölümde açıklanan bu yöntem düşünce olarak basit geometrik ilişkilerden türetilmiş olmasına rağmen kırılma katsayısını belirlemek için kullanılan mevcut yöntemlerin dışında yeni ve kendine özgü bir yöntemdir. Geliştirilen bu yöntemin anlamlılığını sayısal olarak test etmek için bu yöntemle elde edilen kırılma katsayılarının, AGTA'da atmosferik parametreler ve ayrıca eğik kenar ve basucu açı ölçüleri yöntemiyle bulunan kırılma katsayıları ile karşılaştırılması düşünülmüştür. Bu çalışmada geliştirilen yöntemle eğik kenar ve basucu açı ölçüleri yönteminin benzer sonuçlar verdiği AGTA'da 14 baz vektörü için yapılan karşılaştırmada görülmüştür ($k \approx 0.10$). Atmosferik parametrelerle uygulanan yöntemde ise dT/dh değerinin uygun seçilmesi durumunda kırılma katsayılarının diğer iki yöntemle bulunan değerlerle uyumlu olabileceği belirlenmiştir. GPS ve karşılıklı basucu açılarıyla bulunan kırılma katsayıları doğru kabul edilerek yapılan hesaplamada dT/dh için test bölgesine uygun deneysel değer -13.7 $^{\circ}$ /km bulunmuştur.

Bu çalışmada geliştirilen yöntem ile bir baz vektörü boyunca ortalama kırılma katsayısını belirlemek olanaklıdır. Özellikle üç boyutlu ağ dengelemesi, trigonometrik yükseklik ağı dengelemesi ve çekül sapması interpolasyonunda, atmosferik kırılmaın bu çalışmada verilen yöntemler ile karşılaştırmalı olarak belirlenip ölçüler düzeltildikten sonra kullanılmasının hesap kolaylığı sağlayacağı da düşünülmektedir.

K A Y N A K L A R

- /1/ Achilli,V.,P.Baldi, : High precision geodetic measurement. Some results on trigonometric levelling. Boll.di Geod. e Sci. Aff. No.1, 1984.
- /2/ Bomford,G. : Geodesy. Clarendon Press, Oxford, 1980.
- /3/ Brunner,F.K. : On the refraction coefficient of microwaves. Bull. Geod., Vol.51, No.4,pp.257-264, 1977.
- /4/ Brunner,F.K.(Ed.) : Geodetic refraction. Springer Verlag, Berlin, 1984.
- /5/ Grafarend,E., H,Kremers,J,Kakkuri, M,Vermeer. : Adjusting the SW Finland triangulation network using the TAGNET 3-D operational geodesy software. Finnish Geodetic Ins;, No : 106, 1987.
- /6/ Heiskanen,W.A., H,Moritz. : Physical geodesy. Freeman. Newyork, 1967.
- /7/ Hotine,M. : Mathematical Geodesy. U.S.Department of Commerce. Environmental Science Services Administration. Monograph 2, 1969.
- /8/ Hradilek,L. : Three-dimensional terrestrial triangulation. Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, 1984.
- /9/ Kakkuri,J. : A physical model developed for computing refraction coefficients. DGK, Reihe B, Heft 287, pp.132-135, 1988.
- /10/ Kakkuri,J. : A physical refraction model for integrated 3-D adjustment of triangulation networks. Modern techniques in geodesy and surveying.National Survey and Cadastre-Denmark, Publ.4, Series Vol. 1, pp.217-222, 1989.

- /11/ Keppke,U. : Kritische Betrachtungen zur Genauigkeit von Höhenwinkelmessungen in Landesnetzen, I.O. unter besonderer Berücksichtigung der terrestrischen refraction. DGK, Reihe C, Nr. 115, 1968.
- /12/ Kınık, İ., İ., Şanlı, K., Şahin. : ANKARA Test Ağında GPS Ölçülerinin Değerlendirilmesi Harita Dergisi, Sayı 110, 1993.
- /13/ Laurila,S.H. : Electronic Surveying in practice. John Wiley & Sons. New York, 1983.
- /14/ Leick,A. : GPS satellite surveying. John Wiley & Sons. New York, 1990.
- /15/ Munck,J.C.,,D. : Limits of the use of dispersion in determining terrestrial refraction angles. Proc.of the Int. Symp. on Terrestrial EDM and Atm. Effects on Angular Meas.,Vol.5, 1974.
- /16/ Prilepin,M.T. : Elimination of angular refraction by means of multiple-wavelength methods. Proc.of the Int.Sym. on Terrestrial EDM and Atm. Effects on Angular Meas., Vol.5, 1974.
- /17/ Ramsayer,K. : Determination of refraction in three dimensional nets and traverses. Proc.of Int.Symp. on Terrestrial EDM and Atm. Effects on Angular Measurements. Vol.5, 1974.
- /18/ Rapp,R.H. : Geometric Geodesy. Vol.II (Advanced techniques). OSU, Dept. of Surv. and Geod., Columbus, 1976.
- /19/ Rüeger,J.M. : Introduction to electronic distance measurement. The University of South Wales, School of Surveying, 1980.
- /20/ Saastamoinen,J. : Theory and calculation of refraction effects on directions from meteorological information. Proc. of Int.Symp. on Terrestrial EDM and Atm. Effects on Angular Meas.,Vol.5,1974.

- /21/ Saastamoinen,J. : On the reduction of electro-optical distance measurements with reciprocal vertical angels. Draft, 1975.
- /22/ Seeber,G. : Satelliten geodäsie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Walter de Gruyter, Berlin, 1989.
- /23/ Tilk-Thies,U. : Theoretical aspects of trigonometric Leveling. Proc. of the symp. on Height Determination and Recent Vertical Crustal Movements in Western Europe, pp.175-190, 1986.
- /24/ Vanicek,P., E.J.Krakiwsky. : Geodesy: The Concepts, Elsevier Science Publishers B.V.. Amsterdam-New York-Oxford-Tokyo, 1986.
- /25/ Wunderlich,T., W.,Gold. : Behaviour of Hradilek Techniques in a local vertical control network. Proc. of the Symp. on Height Determination and Recent Vertical Crustal Movements in Western Europe, pp.191-204, 1986.