

GPS ÖLÇÜLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE İYONOSFERİK ETKİ

Muzaffer KAHVECİ

ÖZET

Uydu tekniklerinden yararlanla yapılan ölçümlerde yüksek duyarlık elde etmek için atmosferin söz konusu ölçümlere olan etkisinin bilinmesine gereksinim vardır. Bu etkiler Global Konumlama Sistemi (GPS) ölçülerinden yararlanla büyük ölçüde giderilebilmektedir.

Günümüzde GPS, jeodezik ve jeodinamik amaçlarla yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek duyarlık isteyen bilimsel amaçlı çalışmalarda göreceli statik konumlama yöntemi ve faz ölçüleri tercih edilmektedir. Bu ölçülerdeki en önemli hata kaynağı ise atmosferik gecikme etkisidir. Dolayısıyla, GPS ile elde edilen ölçülere çeşitli işlem ve hesaplamalar sonucu jeodezik, jeodinamik ve astronomik amaçlarla kullanılmadan önce mutlaka atmosferik düzeltmeler getirilmelidir.

Bu yazıda söz konusu atmosferik etkilerden yalnızca iyonosferin GPS ile ölçülen kısa ve uzun bazlardaki etkisi incelenmekte ve ayrıca faz ölçülerinin değerlendirilmesiyle ilgili bazı önerilerde bulunmaktadır.

ABSTRACT

In order to obtain high precision measurements via space techniques, it is essential to know the influence of the atmosphere on these measurements. These influences can largely be eliminated using Global Positioning System (GPS) measurements.

Today, GPS is being used intensively for geodetic and geodynamics purposes. For scientific studies which require high precision the relative static positioning technique using phase observations are preferred. However, in phase observations the most important error source is atmospheric delay. Consequently, atmospheric corrections should be applied to the measurements obtained via GPS before using them for geodetic, geodynamics and astronomical purposes.

In this paper, only the influence of ionosphere on short and long baselines is investigated and some suggestions are presented relevant to processing of the phase observations.

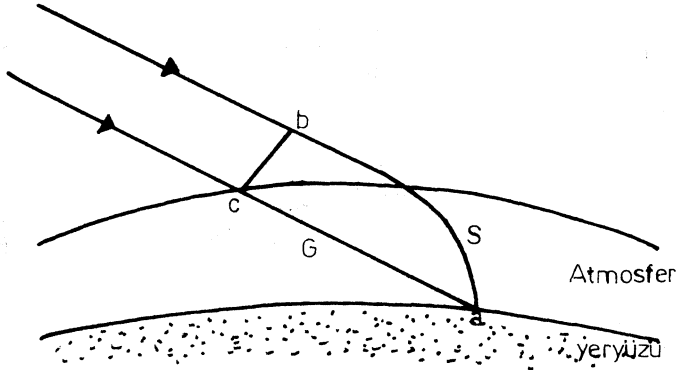
1. GİRİŞ

Gerek uzay tekniklerinde gerekse jeodezik ve jeodinamik amaçlı olarak kullanılan aletlerde son yıllardaki gelişmeler, bu teknik ve aletlerle elde edilen duyarlılıkların çok büyük değerlere ulaşması nedeniyle atmosferin ölçüler üzerindeki etkisinin çok daha dikkatli olarak ele

alınması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Diğer bir ifadeyle, atmosferik etkiler artık günümüzde yüksek duyarlık isteyen çalışmalarda doğruluğu sınırlayıcı en önemli faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle GPS ile ölçüm tekniğinde radyo dalgalarının uydu-alıcı arasında atmosfer boyunca katettiği yol dikkate alınır, bu radyo dalgalarının uydulardan alıcıya gelene kadar geçtiği atmosfer katmanları boyunca maruz kaldığı çeşitli bozucu etkilerin yeterince doğru olarak modellendirilmesi ya da hesaplanması gerekmektedir.

Günümüzde GPS ile duyarlı konum, hız ve zaman bilgisi sağlanmakta, gerek statik ve gerekse kinematik yöntemlerle mutlak ya da görelî konumlama yapılabilir. Tüm diğer ölçü yöntemlerinde olduğu gibi GPS ölçülerinden elde edilen sonuçları da etkileyen bazı rastlantısal ve sistematik sapmalar (bias) söz konusu olup bunlarla ilgili bilgi /10/'da verilmektedir. Söz konusu sapmaların bazıları görelî konumlama yöntemi kullanılması durumunda bile bozucu etkilerini sürdürmektedir. Dolayısıyla, GPS ölçülerinden yüksek duyarlık beklendiği durumlarda söz konusu etkilerin davranışı ve büyüklüğü çok iyi modellendirilmeli ve kontrol altında tutulmalıdır.

Bilindiği gibi elektromanyetik dalgalar uydulardan yeryüzüne atmosferden geçerek ulaşırlar. Atmosferden geçen bu sinyallerin hem izlediği yolda hem de hızında değişme olur, (Şekil-1), /15/.



Şekil-1: Atmosferik kırılma

Normal olarak GPS ölçüleri sonucu elde edilmesi gereken uzunluk atmosfer dışında kalan sinyal yolu ile Şekil-1'de görülen G geometrik uzaklığının toplamıdır. Burada,

$$G = \int_a^c dG \quad (1.1)$$

ile verilmektedir /6/. Ancak gerçekte durum böyle değildir. Elektromanyetik dalgalar iki nokta arasındaki en kısa yolu izledikleri için ölçülen uzunluk minimum sinyal yolu (Fermat yasası) olarak bilinen L_e uzunluğu olup bu da,

$$L_e = \int_a^b n \cdot dS \quad (1.2)$$

ile verilmektedir /6/,/1/. Burada n , atmosferik kırılma indisi (refractive index)'dir. Bir elektromanyetik dalganın dalga boyu

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.3)$$

ile bellidir. Hava gibi saçıcı (dispersive) bir ortamdan geçen elektromanyetik dalganın hızı, bu ortamın n kırılma indisine bağlı olarak,

$$v = \frac{c}{n} \quad (1.4)$$

ile verilmektedir /1/,/25/.

GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde sinyal yolundaki fazlalığın (ekses) belirlenmesi önemli olduğundan söz konusu bu fazla uzunluk

$$L_e - G = \int_a^b (n - 1) \cdot dS + (S - G) \quad , \quad S = \int_a^b dS \quad (1.5)$$

ile verilmektedir /6/. (1.5) eşitliği ile ölçülerdeki hatanın iki bileşenden oluştuğu ifade edilmekte olup bunlar,

a. Sinyal gecikmesinden dolayı sinyal yolundaki fazla uzunluk (propagation delay),

$$\int_a^b (n - 1) \cdot dS$$

b. Elektromanyetik dalganın eğilmesinden (bending) dolayı sinyal yolundaki fazla uzunluk (S-G)'dir.

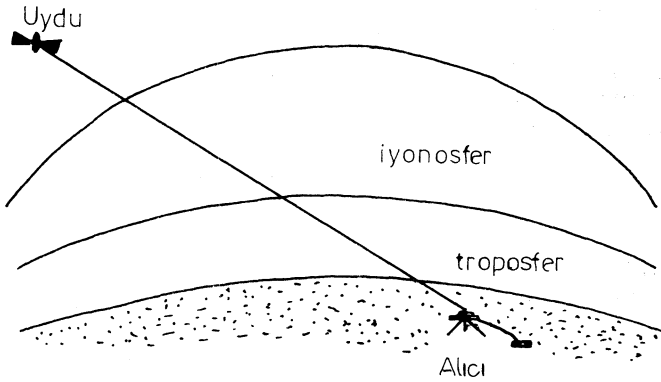
Bunlardan ikinci (b) durumdan dolayı oluşan hata düşük veri toplama açıları dışında ihmal edilebilecek kadar küçüktür (Tablo-1).

Dolayısıyla, bu yazıda yalnızca esas etkiye sahip olan ortamın kırılma etkisinin varolduğu düşünülecektir.

Tablo-1: Veri toplama açısı-eğilme miktarı ilişkisi

Veri Toplama Açısı (Cut-Off Angle) ($^{\circ}$)	Eğilme Miktarı (m)
2	0.417
5	0.075
10	0.019
20	0.005
45	0.001
90	0.000

Uydulardan yayınlanan elektromanyetik dalgaların atmosferden geçerek alıcıya ulaştığı düşünülürse, söz konusu dalgaların yayılmasında iki temel atmosfer katmanının bozucu etkisi mevcut olup bunlar troposfer ve iyonosferdir (Şekil-2). Bunlardan troposfer, iyonosfer katmanının altındaki katman olup yeryüzündeki ölçü noktasından iyonosfer tabakasının alt sınırına kadar olan bölgeyi kapsamaktadır. İyonosfer ise yaklaşık olarak 70 ile 3000 km arasındaki üst-atmosfer tabakasıdır. Bu her iki atmosfer tabakasının uydu sinyalleri üzerindeki etkileri farklıdır. Bu nedenle GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde bunların dikkate alınmalarında farklı modellendirme ve yöntemler kullanılmaktadır.



Şekil-2: İyonosfer ve Troposfer

Bu yazıda GPS uydu sinyallerinin alıcıya ulaşınca kadar maruz kaldığı ortam etkileri ve bunların göreceli konumlama yöntemi ile elde edilen bazı uzunluklarına etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Ancak, söz konusu ortam etkilerinin tamamının incelenmesi çok büyük bir hacim gerektirdiğinden bu çalışmada iyonosfer katmanının GPS sinyalleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Diğer ortam etkilerinden olan troposfer ve multipath ile ilgili incelemeler ise bir başka yazıda verilmeye çalışılacaktır.

İyonosfer katmanı ve bu katmanın GPS kod ve faz ölçülerinde neden olduğu etkiler ile ilgili genel bilgiler ikinci bölümde verilmiştir. Üçüncü bölümde ise bununla ilgili sayısal bir uygulama yapılmış olup kısa ve uzun bazlarda dikkate alınmayan iyonosfer etkileri gösterilmektedir. GPS ölçülerinin değerlendirilmesi sırasında dikkat edilmesi gereken konular ise sonuçların yer aldığı dördüncü bölümde açıklanmaktadır.

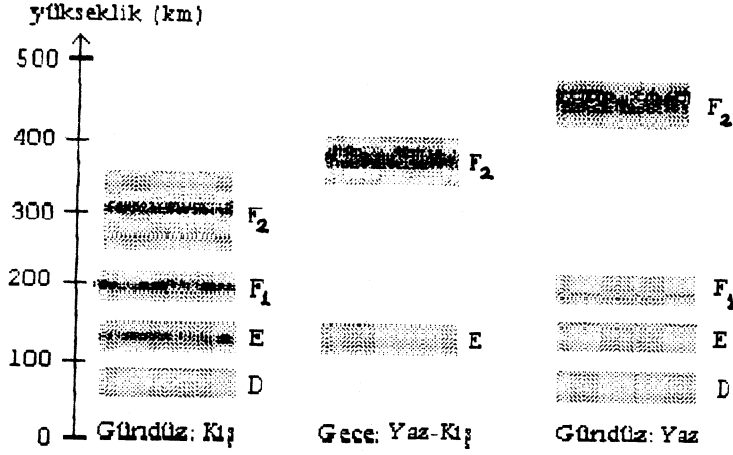
2. İYONOSFER

İyonosfer, hava moleküllerinin ileri derecede iyonlaşmış halde bulunduğu ve dolayısıyla elektrik iletkenliği kazandığı yüksek atmosfer bölgelerinin tümüdür. İyonosfer'de atomlardan kopmuş serbest elektronların sayısı, elektromanyetik dalgaların yayılmasını değiştirmeye yetecek kadar çoktur. İyonlaşma şiddeti, elektron yoğunluğu ile ifade edilmekte olup çok değişken olan bu yoğunluk cm^3 'te 100000 ile bir kaç milyon serbest elektron arasında değişir //17/. Dolayısıyla iyonosfer genel olarak, elektromanyetik dalgaların yayılmasını etkileyebilecek kadar serbest elektron yoğunluğuna sahip üst atmosfer tabakası ($\sim 70-3000\text{km}$) olarak tanımlanabilir /5/. İyonlaşma ve serbest elektron sayısı genellikle doğrudan doğruya güneş ışınımına (radyasyon yoğunluğuna) bağlıdır. Buradan, iyonosferin elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkisinin geceye göre gündüz daha fazla olacağı sonucuna varılabilir.

İyonosfer bölgesinin radarlardan yararlı yapılan ayrıntılı incelemesinde elektron dağılımı ile ifade edilen bir tabakalaşmanın varlığı ortaya çıkarılmıştır /8/. Bu tabakalar Şekil-3'de gösterilmekte olup bunların yükseklikleri ile ilgili olarak verilen sınırlar kesin olmayıp farklı kaynaklarda farklı değerlerle ifade edilmektedir /7/, /8/, /23/. Şekil-3'de görüldüğü gibi söz konusu tabakalaşma, iyonosfer tabakasının 50 ile 500 km lik bölümünde oluşmaktadır. Bu tabakaların yükseklikleri kısa ve uzun süreli atmosferik değişimlere bağlıdır. Örneğin tüm tabakalar geceleyin gündüze göre daha incedir. Gece F_1 ve D tabakaları tamamen yok olmaktadır /4/.

İyonosferin elektromanyetik dalgaların yayılmasındaki etkisi Toplam Elektron Yoğunluğu (TEC) ile ifade edilmektedir. İyonosferik değişimi ifade eden TEC zamana ve konuma bağlı olarak değişim göstermektedir. TEC, zenit doğrultusunda m^2 'deki toplam elektron sayısı ($\text{elektron}/\text{m}^2$)

* D-tabakası 50-90 km; E-tabakası 90-140 km; F_1 -tabakası 140-240 km ve F_2 -tabakası 240-500 km olarak çok genel değerlerle ifade edilebilir.



Şekil-3: İyonosfer tabakaları

olarak da ifade edilebilir /11/. TEC genel eğilimini belirlemek için bir çok araştırma yapılmış olup günümüzde bu parametrenin davranışı özellikle Türkiye'nin de içinde bulunduğu orta enlem bölgelerinde oldukça iyi bir şekilde bilinmektedir. Bununla birlikte gerek Ekvator'da ve gerekse yüksek enlem bölgelerinde bu bilgiler henüz tam değildir.

Genel olarak dünyanın büyük bölümünde TEC değeri yerel zamanla yaklaşık olarak saat 14:00 civarında maksimum günlük değere ulaşmaktadır /14/. Diğer taraftan TEC ile doğru orantılı olan iyonosferik etki yerel zamana göre gece yarısı ile sabah 05:00 saatleri arasında minimum değere ulaşmaktadır. Bu ise gündüz oluşan etkinin yaklaşık % 10-20 si kadardır /22/. Gece süresince olan ortalama iyonosferik etki 10 nano saniye (~3 m), gündüz ise 50 nano saniye (~15 m) kadardır. Uydu alıcı arasındaki uzaklığa iyonosfer nedeniyle getirilecek olan düzeltme kışın ve ekinoks aylarında (Mart, Nisan, Eylül, Ekim) maksimum olup yaz aylarında ise minimum değere ulaşmaktadır /24/. Ayrıca, jeomanyetik konuma bağlı olarak ekvatorun ± 15 derece enlemlerinde TEC değeri maksimum değere ulaşmakta olup ekvatordaki iyonosferik etkiler orta enlem bölgelerine göre iki kat daha fazladır /14/, /22/. Bunların dışında gözlenen uydunun yüksekliğinin de iyonosferik etkinin büyüklüğü üzerinde etkisi vardır. Örneğin, düşük yükseklik açılarında iyonosferik etki gündüz ve gece için verilen değerlerin yaklaşık üç katı kadardır. Yani, gündüz 30 nano saniye, gece ise 150 nano saniye'ye kadar çıkmaktadır /24/.

İyonosferik etkinin bir bölümü uygun atmosferik modellendirme ile giderilebilmektedir. Ancak, en etkili yöntem çift frekanslı aletler kullanarak, L1 ve L2 frekanslarının her ikisinde de ölçüler yapılarak ve değerlendirme aşamasında uygun frekans kombinasyonları kullanarak bu etkinin elimine edilmesidir.

İyonosferin GPS ölçülerinde neden olduğu sorunlar özellikle uydudan yayınlanan sinyallerin alıcı (receiver) tarafından alınması sırasındaki sinyal kesiklikleridir. Bu ise ölçülen taşıyıcı dalga fazının sürekliliğini engellediğinden faz kesikliklerine (Cycle Slips) neden olmaktadır. Bu da GPS ölçülerinin değerlendirilmesi (postprocessing) aşamasında oldukça yorucu ve zaman alıcı işlemler gerektirmektedir. Eğer ölçüler tek frekanslı (single frequency) alıcılar kullanılarak yapılmışsa sorun daha da karmaşık hale gelmektedir. Dolayısıyla, yüksek doğruluk isteyen jeodezik ve jeodinamik amaçlı GPS ölçülerinde iyonosferik etkinin dikkate alınması daha büyük bir önem kazanmaktadır.

İyonosferin GPS ile yapılan kod ve faz ölçülerine olan etkileri farklıdır. Diğer bir ifadeyle kod ölçüleri için iyonosferik grup gecikme etkisi (group delay) söz konusu iken faz ölçüleri için faz hızlanması (phase advance) söz konusudur /5/,/26/. İyonosfer, radyo dalgalarını saçıcı (dispersive) bir özelliğe sahip olup bu bozucu etki radyo dalgalarının frekansına bağlı olarak değişim gösterir. Dolayısıyla bu etkiler modellendirilirken öncelikle iyonosferin kırılma indisinin belirlenmesi ve daha sonra da uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca integral alınarak ölçülere getirilecek olan düzeltmenin bulunması gerekmektedir.

Frekans ile iyonosferik kırılma indisi arasındaki ilişki,

$$n = 1 \pm \frac{A_1 \cdot N_e}{f^2} + (\text{Yüksek dereceden terimler}) \quad (2.1)$$

olarak verilmektedir /6/. Burada A_1 , birkaç fiziksel sabitenin basit bir kombinasyonu olup $A_1 = 40.3 \text{ m}^3/\text{sn}^{21}$ olarak verilmektedir /24/. N_e , iyonosfer bölgesindeki serbest elektron yoğunluğunu (10^{16} elektron/ m^3 biriminde), f ise uydu sinyalinin frekansını (GHz) ifade etmektedir. (2.1) eşitliğinin sağındaki ikinci terim kod ölçüleri için (+), faz ölçüleri için ise (-) işaretini almaktadır. (-) işareti faz ölçüleri için kırılma indisinin gerçekte 1'den küçük olduğunu ve iyonosferden geçerken sinyal fazının hızının arttığını ifade etmektedir. Şekil-1'den de görüleceği gibi ölçülen uydu-alıcı uzunluğunda iyonosferden dolayı bir azalma ya da fazlalık (ekses) söz konusudur. Bu artık uzunluk (S uydusu ile R alıcısı arasındaki) $\Delta \rho_R^S$ ile gösterilirse,

$$\Delta \rho_R^S = \int_a^b (n-1) d\rho_R^S \quad (2.2)$$

(2.1) eşitliği (2.2)'de yerine konursa sonuç olarak

$$\Delta \rho_R^S = \frac{A_1}{f^2} \int_a^b N_e \cdot d\rho_R^S \quad (2.3)$$

elde edilir.

Elektron yoğunluğunun uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca olan uzaklığa göre integrali Toplam Elektron Sayısı (TEC) olarak ifade edildiğinden buradan (2.3) ifadesi birinci dereceden bir eşitlikle,

$$\Delta p_R^S(Li) = \frac{A_1 \cdot TEC}{f^2(Li)} \quad (2.4)$$

halini alır. (2.4) eşitliğinde $A_1=40.3$ ve $Li=L1$ ve $L2$ frekanslarını ifade etmektedir. (2.4) eşitliğinde Δp_R^S değeri uzunluk biriminde elde edilmektedir. (2.4) eşitliğinin zaman biriminde karşılığı ise,

$$\Delta t(Li) = \frac{\Delta p_R^S(Li)}{c} = \frac{40.3}{c \cdot f^2(Li)} \cdot TEC \quad (2.5)$$

c : boşluktaki ışık hızı, olarak verilmektedir /15/,/7/. (2.5)'den de görüleceği gibi iyonosferik etki TEC ile doğru orantılı ve sinyal frekansının karesi ile ters orantılıdır. Yine aynı eşitlikten görüleceği gibi iyonosferik etki frekans bağımlıdır ve yüksek frekanslarda Δt değeri azalmaktadır. Bu frekans bağımlılığı nedeniyle çift-frekanslı alıcılar kullanılarak iyonosferik etki büyük oranda giderilebilmektedir.

İyonosfer tabakası boyunca TEC, z zenit açısının kosinüsü ile ters orantılı olarak,

$$TEC_i^j = \frac{VEC}{\cos z_i^j} \quad (2.6)$$

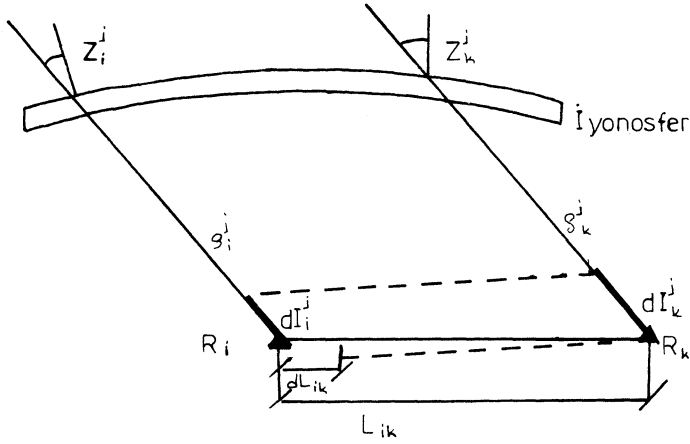
ile verilmektedir, (Şekil-4), /7/. Burada VEC, iyonosfer tabakasının düşey doğrultuda ($z_i^j=0$) sahip olduğu serbest elektron sayısıdır. Dolayısıyla düşey doğrultudaki iyonosferik etki,

$$dV = \frac{40.3}{f^2(Li)} \cdot VEC \quad (2.7)$$

olarak yazılabilir. Ancak, GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde sinyal doğrultusundaki etki dikkate alındığından (2.7) ifadesi daha açık olarak,

$$\Delta p_R^S(Li) = \frac{dV}{\cos z_i^j} = \frac{40.3}{f^2(Li)} \cdot \frac{VEC}{\cos z_i^j} \quad (2.8)$$

ile verilebilir. Burada $1/\cos z_i^j$ ifadesi indirgeme fonksiyonu (mapping function) olarak isimlendirilmektedir. (2.8)'deki VEC değeri güneşin saat açısı (HA)'nın bir fonksiyonu olarak hesaplanmakta olup ayrıntılı bilgi /6/'da bulunabilir.



Şekil-4: Homojen bir iyonosfer tabakasında göreceli etki

L1 ve L2 frekanslarında kod (pseudorange) ölçüsü yapıldığında ölçülen pseudorange uzunluğu $\rho_R^s(L_i)$, geometrik (toposentrik) uzunluk $d_R^s(L_i)$ ile gösterilirse aralarındaki ilişki,

$$\rho_R^s(L_1, L_2) = d_R^s(L_1, L_2) + \Delta \rho_{R_{ion}}^s \quad (2.9)$$

ile belirli olup burada,

$$\Delta \rho_{R_{ion}}^s = c \cdot \Delta t(L_1, L_2)$$

dir /15/. (2.9)'dan görüleceği gibi iyonosferin sinyal hızındaki geciktirme (yavaşlatma) etkisinden dolayı ölçülen pseudorange uzunluğu geometrik uzunluktan daha büyüktür. (2.4) eşitliğinde $A_1 = 40.3 \cdot \text{TEC}$ kabul edilip bu da (2.9)'un ilk eşitliğinde yerine konursa ve $d_R^s(L_1) = d_R^s(L_2)$ kabul edilerek eşitlikler,

$$\rho_R^s(L_1) - \frac{A_1}{f_1^2(L_1)} = \rho_R^s(L_2) - \frac{A_1}{f_2^2(L_2)} \quad (2.10)$$

şeklinde yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında A_1 katsayısı,

$$A_1 = \frac{f_1^2(L_1) \cdot f_2^2(L_2)}{f_1^2(L_1) - f_2^2(L_2)} \cdot (\rho_R^s(L_1) - \rho_R^s(L_2)) \quad (2.11)$$

ile elde edilir. (2.11) eşitliği (2.4)'den yararlanla (2.9) eşitliğinde yerine konursa sonuç olarak L3 (iyonosferden bağımsız kombinasyon) frekansı

$$\rho_R^s(L3) = \frac{f_1^2(L1)}{f_1^2(L1) - f_2^2(L2)} \cdot \rho_R^s(L1) - \frac{f_2^2(L2)}{f_1^2(L1) - f_2^2(L2)} \cdot \rho_R^s(L2) \quad (2.12)$$

şeklinde elde edilmektedir /21/. Daha kullanışlı bir eşitlik olarak (2.12) ifadesi,

$$\rho_R^s(L3) = k_1 \cdot \rho_R^s(L1) - k_2 \cdot \rho_R^s(L2) \quad (2.13)$$

$$k_1 = \frac{f_1^2(L1)}{f_1^2(L1) - f_2^2(L2)} = 2.545728, \quad k_2 = \frac{f_2^2(L2)}{f_1^2(L1) - f_2^2(L2)} = 1.545728$$

ile verilebilir.

Yukarıda verilen eşitlikler aynı yaklaşımla faz ölçüleri için /5/'de çıkarılmıştır. Bilindiği gibi ionosferik etki faz ölçülerinin hızlanması-na neden olmaktadır. Diğer bir ifadeyle, uydudan alıcıya ulaşan faz ölçüleri boşluktaki ışık hızından daha hızlı olarak yeryüzüne gelecektir. Bu durumda ise ölçülen uzunluk gerçek uzunluktan daha kısa olacaktır. Böylece faz ölçüleri için ionosferden bağımsız L3 frekansı,

$$\Phi_R^s(L3) = k_1 \cdot \Phi_R^s(L1) + k_2 \cdot \Phi_R^s(L2) \quad (2.14)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitliğin en önemli sakıncası taşıyıcı dalga faz başlangıç belirsizliklerinin (Initial Ambiguity) tamsayı olma özelliklerinin k_1 ve k_2 çarpanları nedeniyle yok olmasıdır. Bu faz başlangıç belirsizliklerinin bilinmemesi nedeniyle ionosferik faz düzeltmeleri doğrudan hesaplanamamakta, bu amaç için çift frekanslı pseudorange ölçülerinden yararlanılmaktadır /15/.

(2.9)-(2.14) eşitlikleri çift frekanslı alıcılar için geçerli olup, eğer tek frekanslı alıcılar söz konusu ise ya da tek frekansta ölçü yapılmışsa bu durumda ionosferik düzeltme terimleri /5/ ve /14/'de verilen ionosferik modeller kullanılarak hesaplanabilir. Ancak, söz konusu modellerden yararlanla bulunan katsayılarla orta enlem kuşaklarındaki ionosferik etkinin ancak % 50'si giderilebilmektedir /14/. Dolayısıyla

yüksek duyarlık isteyen çalışmalarda ve özellikle uzun bazlarda çift frekanslı aletlerin kullanılması ve değerlendirmelerin ise L3 kombinasyonu kullanılarak yapılması daha uygundur.

Birbirine yakın uzaklıkta ölçü yapan iki alıcı için iyonosferik etki aynı kabul edilebilir. Çünkü, elektromanyetik dalgalar aynı iyonosferik bölgeden geçtiğinden aynı büyüklükteki etkiye maruzdurlar. Bu nedenle kısa baz uzunluklarında (<20-30 km) /10/'da ayrıntılı olarak verilen tekli, ikili ve üçlü faz farkları oluşturularak söz konusu iyonosferik etki hem tek hem de çift frekanslı ölçüler için büyük ölçüde giderilebilmektedir. Ancak, uzun bazlarda (>100 km) mutlaka çift frekanslı alıcılar kullanılmalıdır. Ayrıca, kısa bazların değerlendirilmesinde yalnızca L1 frekansının bir iyonosfer model ile birlikte kullanılması L3 kombinasyonuna göre çoğu zaman daha iyi sonuç vermektedir. Çünkü, L3 kombinasyonunun gürültüsü (noise) L1'e göre daha fazladır. (2.14) eşitliği dikkate alınır, burada $\Phi_R^S(L1)$ ve $\Phi_R^S(L2)$ 'nin aynı standart sapmaya (σ_0) sahip olduğu kabul edilirse bu durumda $\Phi_R^S(L3)$ için standart sapma, hata yayılma yasasından yararlar,

$$\sigma^2(L3) = k_1^2 \cdot \sigma_0^2 + k_2^2 \cdot \sigma_0^2 \quad (2.15)$$

$$\sigma(L3) = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \cdot \sigma_0$$

olarak elde edilir. Burada k_1 ve k_2 katsayıları (2.15) 'de yerine konursa,

$$\sigma(L3) \approx 3 \cdot \sigma_0 \quad (2.16)$$

elde edilir. (2.15)'den de görüleceği gibi L3 lineer kombinasyonunun standart sapması L1 frekansının yaklaşık üç katı kadardır. Bunun anlamı ise küçük baz uzunluklarında L3 kombinasyonu ile çözüm her zaman en uygun çözümü vermemektedir.

GPS ile iki temel konumlama yöntemi mevcut olup bunlar mutlak (nokta konumlama) ve göreceli konumlama /13/. Bilindiği gibi yüksek doğruluk istenen çalışmalarda göreceli konumlama ile faz ölçüleri kullanılmaktadır. Göreceli konumlama kullanılması durumunda göreceli iyonosferik etki söz konusu olup (2.8) eşitliği ve şekil-4'den i ve k noktalarındaki iyonosferik etkiler sırasıyla

$$\begin{aligned} \frac{dl}{dt} &= \frac{dV}{\cos z} \\ \text{ve} \quad \frac{dl}{dt} &= \frac{dV}{\cos z} \end{aligned} \quad (2.17)$$

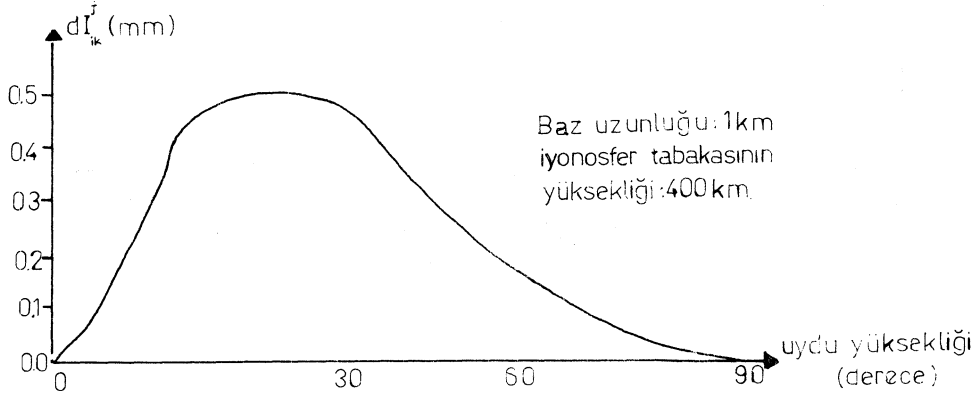
yazılırsa sonuçta göreceli iyonosferik etki,

$$dI_{ik}^j = dI_k^j - dI_i^j = dV \left(\frac{1}{\cos z_k^j} - \frac{1}{\cos z_i^j} \right) \quad (2.18)$$

ile hesaplanmaktadır /7/. $z_k^j > z_i^j$ olduğundan dI_{ik}^j değerinin daima pozitif olacağı açıktır. Daha önceden de belirtildiği gibi iyonosferik etki nedeniyle uydu-alıcı uzaklığı gerekenden daha kısadır. Yine Şekil-4'den görüleceği gibi k noktasının zenit açısı i noktasına göre daha büyük olduğundan (2.17) ve (2.18) eşitliklerinden dolayı k noktasındaki iyonosferik etki daha büyük olacaktır. İyonosferik etkinin dikkate alınmaması durumunda ρ_k^j uydu-alıcı uzaklığı ρ_i^j uzaklığına göre daha fazla kısılacaktır. Bu ise ölçülmek istenen L_{ik}^j bazında bir kısalmaya neden olacaktır. Sonuç olarak görelî konumlama yönteminde söz konusu olan görelî iyonosferik etki ölçülmek istenen bazda daima bir kısalmaya neden olacaktır. Bu kısalma miktarı ise Şekil-4'den yararlanla,

$$dL_{ik}^j = dI_{ik}^j \cdot \cos E^j \quad (2.19)$$

ile hesaplanır. (2.19) eşitliğinde E^j terimi i ve k noktalarında uydulara olan yükseklik açılarının ortalamasıdır. (2.18) eşitliğinin uygulamaya yönelik olan daha açık ifadesi /7/'de verilmekte olup bu formülden yararlanla, düşey doğrultudaki 1 m'lik bir iyonosferik gecikme için uydu yükseklik açısıyla dI_{ik}^j görelî iyonosferik etki arasındaki ilişki Şekil-5' de görülmektedir.



Şekil-5: Görelî iyonosferik etki-uydu yükseklik açısı ilişkisi

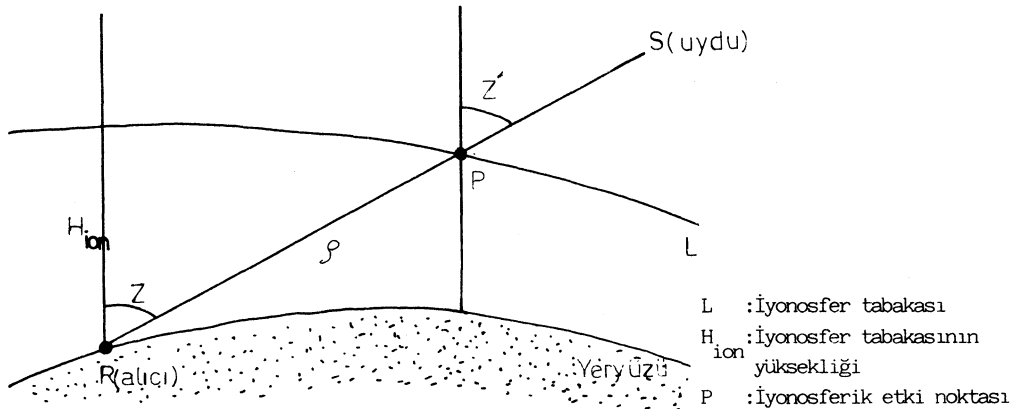
Eğer proje alanında (10-30 km) bir tane çift frekanslı alıcı varsa ve diğer alıcılar tek frekanslı ise söz konusu ölçek hatası büyük ölçüde giderilebilir. Burada, çift frekanslı alıcı ile elde edilen ölçülerden

yararla iyonosferik model oluşturulur ve bu model tek frekanslı alıcılardan elde edilen ölçülere uygulanır. Ancak daha büyük ağlarda (>100km) daha fazla sayıda çift frekanslı alıcıya gereksinim vardır.

3. SAYISAL UYGULAMA

GPS faz ölçüleri ile göreceli konumlama yönteminde dikkate alınmayan iyonosferik etkinin kısa ve uzun bazlardaki etkisini araştırmak için sayısal bir uygulama yapılmıştır. Bu uygulama için 1990 ve 1991 yıllarında Türkiye'de yapılmış olan GPS ölçülerinden yararlanılmıştır. Uzun bazlara örnek olarak 1991 yılında Türkiye'deki üç SLR noktasında (Yığılca/BOLU, Melengiçlik/KARAMAN, Yozgat) yapılmış olan GPS ölçüleri, kısa bazlara örnek olarak ise 1990 yılında Ankara GPS Test Ağı (AGTA)'nda yapılmış olan GPS ölçülerinden yararlanılmıştır. Bu ölçülerle ilgili ayrıntılı bilgi /11/ ve /19/'da verilmektedir.

Söz konusu GPS ölçülerinin değerlendirilmesi ise Harita Genel Komutanlığı'nda mevcut Bernese Version 3.3 (VAX 11/780 sisteminde) yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu yazılımda kullanılan iyonosferik düzeltme için gerekli parametrelerin hesabında fonksiyonel model olarak tek tabaka (single layer) modeli kullanılmaktadır (Şekil-6).



Şekil-6: Tek tabaka (single layer) modeli

Bu modelde kullanılan iyonosferik düzeltme faz ölçüleri için,

$$\Delta\Phi^S = - \frac{41}{R_{ion}} \cdot \frac{VEC}{f^2(Li) \cos z'} \quad (3.1)$$

ile verilmektedir /27/. (3.1) eşitliğindeki VEC değeri P noktasındaki elektron yoğunluğunu ifade etmekte olup gece ölçüleri için (20:00-08:00) sabit ve bunun da $10 \times 10^{16} < \text{VEC} < 20 \times 10^{16}$ değerleri arasında olduğu kabul edilmektedir /1/. Aynı eşitlikteki z' ise uydu sinyalinin iyonosfer tabakasını kestiği P noktasından uyduya olan zenit uzaklığı olup bu da

$$\sin z' = \frac{R_e}{R_e + H_{\text{ion}}} \sin z \quad (3.2)$$

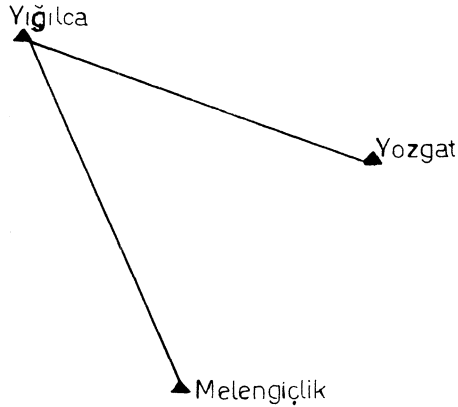
ile verilmektedir /19/. Bu eşitlikte,

R_e = yeryüzünün yarıçapı,

H_{ion} = iyonosfer tabakasının yüksekliği (350 km),

z = alıcıdan uyduya olan zenit uzaklığıdır.

Uzun bazlara örnek olarak seçilen üç SLR noktasındaki GPS faz gözlemlerinden yararlanla Yığılca-Melengiçlik ve Yığılca-Yozgat bazları oluşturulmuş (Şekil-7),



Şekil-7: SLR noktaları GPS bazları

değerlendirmelerde Yığılca noktasının ITRF89 koordinatları sabit olarak alınmıştır. Söz konusu üç SLR noktasında, WEGENER-MEDLAS projesi kapsamında periyodik SLR ölçüleri 1987 yılından bu yana yapılmakta olup bu noktaların ITRF89 koordinatlarının hesaplanması ile ilgili ayrıntılı bilgi /3/'de verilmektedir. Dolayısıyla, bu uygulamada üç SLR noktasında yapılan eşzamanlı GPS gözlemlerinin değerlendirilmesi ile elde edilen bazlar, yine aynı noktaların ITRF89 sisteminde ve GPS'den daha duyarlı olarak belirlendiği umulan SLR koordinatlarından hesaplanan bazlarla karşılaştırılmıştır. GPS gözlemlerinin değerlendirilmesinde;

- Sabit nokta koordinatı olarak Yığılca (SLR) noktasının ITRF89 koordinatları alınmış,

- Yörünge bilgisi olarak Duyarlı (Precise) Efemeris kullanılmış,

- Bazların uzun olması nedeniyle faz başlangıç belirsizlikleri tamsayıya dönüştürülmeyip kesirli değerli (real-valued) olarak EKK dengelemesi ile nokta koordinatlarıyla birlikte hesaplanmış,

- Olası yansıma (multipath) etkisini en aza indirmek için minimum uyu yüksekliği 20 derece olarak alınmış,

- Troposferik zenit gecikme düzeltmesi her nokta için bir tane olarak hesaplanmış,

- Her baz için L1 ve L2 frekanslarındaki faz ölçülerinden yararlanarak iyonosfer modeli katsayıları hesaplanmış, ve

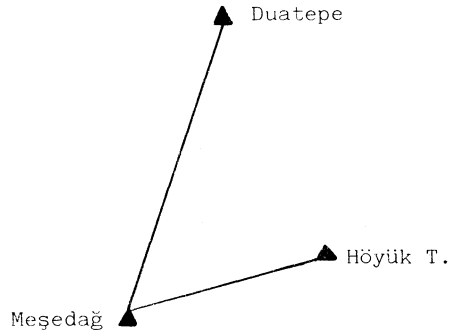
- Değerlendirmelerde L1, L1+L2 ve L3 frekansları kullanılmıştır.

Uzun bazlara ilişkin gözlem bilgileri Tablo-2'de, değerlendirme sonuçları ve bunların SLR bazları ile karşılaştırılmaları ise Tablo-3'de verilmektedir.

Tablo-2: 1991 Yılı SLR noktaları GPS gözlem bilgileri

BAZ	ÖLÇÜ BAŞLAMA	ÖLÇÜ BİTİŞ	İZLENEN UYDULAR (PRN)
ADI	YY MM DD HH:MM	YY MM DD HH:MM	
Yığılca-Yozgat	91 09 07 06:06	91 09 07 17:20	20,3,12,24,16,17,23,21,11,15,14
Yığılca-Meleng.	91 09 07 06:06	91 09 07 17:20	20,3,12,24,16,17,23,21,11,15,14

Kısa bazlara örnek olarak Ankara GPS Test Ağı'nda yaklaşık 6 ve 20 km'lik iki baz seçilmiş olup bunlar Meşedağ-Höyük ve Meşedağ-Duatepe bazlarıdır (Şekil-8).



Şekil-8: AGTA GPS bazları

Tablo-3: Uzun bazlar değerlendirme sonuęları

BAZ ADI	DEğERLENDİRME STRATEJİSİ		GPS BAZI (m)	STD (mm)	SLR BAZI (m)
	Frekans	İyonosfer M.			
Yığılca-Yozgat	L1	Yok	313137.2145	12.8	313137.4939
	L1	Var	313137.6413	14.4	
	L1+L2	Var	313137.6958	13.9	
	L3	---	313137.4720	1.2	
Yığılca-Meleng.	L1	Yok	423156.6739	11.9	423156.9934
	L1	Var	423156.9729	11.6	
	L1+L2	Var	423156.9701	11.3	
	L3	---	423156.9808	0.8	

Bu bazların değerlendirilmesinde;

- Sabit nokta olarak Meşedağ noktası alınmış olup bu noktanın ITRF89 koordinatları Alman Uygulamalı Jeodezi Enstitüsü (IfAG) ile birlikte yürütölen GPS ęalıřmaları kapsamında (1990) hesaplanmıştır /11/,

- Yörünge bilgisi olarak Duyarlı (Precise) Efemeris kullanılmış,

- Bazların kısa olması nedeniyle faz başlangıç belirsizliklerinin yaklaşık olarak tamamı ęözölmüş,

- Olası yansıma (multipath) etkisini en aza indirmek için minimum uydu yüksekliği 20 derece olarak alınmış,

- Her bir baz için L1 ve L2 frekanslarındaki faz ölçülerinden yararlar iyonosfer modeli katsayıları hesaplanmış,

- Troposferik zenit gecikme düzeltmesi her bir nokta için bir tane olarak hesaplanmış,

- Değerlendirmelerde L1, L1+L2 ve L3 frekansları kullanılmıştır.

Bu baz ęözömleri ise yine aynı noktalarda 1991 yılında yapılmış olan EDM (Rangemaster III) ölçü sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Rangemaster III EDM aleti ile ölçölen kenarlarla aę dengelendiğinde, aletin duyarlılığının $m_s = 6 \text{ mm} + 1.5 \text{ ppm}$ olduğu saptanmıştır. Buna göre 20 km uzunluğundaki bir bazın $\pm 3.6 \text{ cm}$ hata ile ölçölmesi beklenebilir/12/.

Kısa bazlara ilişkin ölçü bilgileri Tablo-4'de, değerlendirme sonuçları ve bunların EDM ölçöleri ile karşılaştırılmaları ise Tablo-5'de verilmektedir.

Tablo-4: 1990 Yılı AGTA noktaları GPS gözlem bilgileri

BAZ	ÖLÇÜ BAŞLAMA	ÖLÇÜ BİTİŞ	İZLENEN UYDULAR (PRN)
ADI	YY MM DD HH:MM	YY MM DD HH:MM	
Meşedağ-Höyük T.	90 08 20 01:10	09 08 20 08:00	2,3,6,9,11,12,13,16,18,20
Meşedağ-Duatepe	90 08 20 01:20	90 08 20 08:03	2,3,6,9,12,13,16,18,20

Tablo-5: Kısa bazlar değerlendirme sonuçları

BAZ ADI	DEĞERLENDİRME STRATEJİSİ		GPS BAZI (m)	STD (mm)	EDM BAZI (m)
	Frekans	İyonosfer M.			
Meşedağ-Höyük T.	L1	Yok	5814.0544	0.8	5814.065
	L1	Var	5814.0690	0.7	
	L1+L2	Var	5814.0714	0.7	
	L3	---	5814.0620	1.7	
Meşedağ-Duatepe	L1	Yok	19522.4020	4.7	19522.455
	L1	Var	19522.4369	4.7	
	L1+L2	Var	19522.4414	3.7	
	L3	---	19522.4294	4.0	

Değerlendirmelerde, sonucu etkileyebilecek sistematik sapmalar (Troposferik etki, multipath vb.) olabildiğince giderilmeye çalışılmış, özellikle kısa bazlarda faz başlangıç belirsizliklerinin tamamına yakını çözülmüştür. Dolayısıyla, gerek uzun ve gerekse kısa bazların değerlendirilmesinde yalnızca iyonosferin esas etki olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım gözönüne alınarak değerlendirme sonuçları karşılaştırıldığında, eğer çift frekanslı alıcılar kullanılmışsa, en uygun çözümün L1+L2 frekanslarında iyonosfer model kullanılarak yapılan; uzun bazlarda ise L3 (iyonosferden bağımsız) kombinasyonu kullanılarak yapılan çözümün olduğu değerlendirilmektedir. Eğer, tek-frekanslı alıcılarla ölçü yapılmışsa bu durumda L1 frekansı ve iyonosfer modeli kullanılarak sonuç çözüm elde edilmelidir.

Tablo-3'den görüleceği gibi iyonosfer model kullanılmadan yalnızca L1 frekansında yapılan çözümler uzun bazlarda oldukça farklı sonuçlar vermektedir. Diğer taraftan, kısa bazlarda elde edilen çözümler arasındaki fark daha küçüktür. Çünkü, kısa bazlarda bazın her iki noktasına ulaşan sinyaller aynı iyonosfer bölgesinden geçtiğinden aynı etkiye maruz kalacaklardır. Böylece, faz farkı (differencing) ve görelî konumlama yöntemi ile bu hata kaynağı büyük ölçüde giderilebilmektedir.

Ayrıca, Tablo-2 ve 4'den görüleceği gibi ölçüler uzun süreli olarak yapılmıştır. Dolayısıyla, çözümler arasındaki fark özellikle kısa baz uzunluklarında fazla değildir. Bunun en büyük nedeninin iyonosferin düzensiz olan etkisinin uzun gözlem sürelerinde ortalama bir değere gelmesi olduğu ve böylece esas etkiyi sistematik kısmın oluşturduğu düşünülmektedir. Bu sistematik etki ise uygun yöntem ve modellendirmeler ile büyük ölçüde giderilebilmektedir.

GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde iyonosfer modelinin kullanılması, güneş leke hareketlerinin (sunspot activity) arttığı dönemlerde özellikle önem kazanmaktadır. Örneğin, 1983-1986 yılları arasında güneş leke hareketleri en az seviyede olup 1987 yılından itibaren artan bir sürece girmiştir /2/ ve 1989 yılında maksimum değere ulaşmıştır. Söz konusu leke hareketleri ile ilgili ayrıntılı bilgi /20/'de verilmektedir. Güneş leke hareketlerinin maksimum olduğu dönemlerde yapılan GPS faz gözlemlerinin değerlendirilmesinde (preprocessing) önemli sorunlarla karşılaşılacağı düşünülmektedir. Çünkü, bu hareketlerin artması, atmosferdeki serbest elektron sayısını artıracaktır. Bu ise özellikle tek-frekans-ta yapılan ölçülerde daha fazla ölçek hatasına neden olacaktır. Aynı zamanda, iyonosferik etkinin kısa süreli düzensiz değişimleri de artacaktır. Bu da deneyim isteyen yorucu bir öndeğerlendirme işlemi gerektirecektir.

4. SONUÇLAR

Tüm diğer ölçü sistemlerinde olduğu gibi, GPS ile konumlamada da elde edilen büyüklüklerin doğruluğunu sınırlayan bir çok sistematik ve rastlantısal hatalar vardır. Göreli konumlama yöntemi kullanılması durumunda bile bu hataların bir kısmı (troposferik ve iyonosferik etki, multipath, anten faz merkezindeki değişimler, sabit olarak alınan nokta koordinatlarındaki hatalar vb.) giderilememektedir. Dolayısıyla, bu sistematik ve rastlantısal hataların GPS ile gözlenen büyüklükler üzerindeki etkileri iyi bilinmelidir.

Dikkate alınmamış ya da uygun şekilde modellendirilmemiş iyonosferik etki, göreli GPS ölçülerinde en önemli doğruluk sınırlayıcı faktördür. Bu çalışmada, yapılan değerlendirmeler sonucu, iyonosferik etkinin çift-frekanslı alıcılarda ölçü yapılması durumunda büyük ölçüde giderilebildiği görülmüştür. Ancak, çift-frekanslı alıcılar tek-frekanslı alıcılara göre oldukça pahalıdır ve özellikle araştırma amaçlı kurumlar için ekonomik olmamaktadır. Bu durumda özellikle küçük ağlarda (<20-30 km) bir alıcının çift-frekanslı ve diğer alıcıların ise tek-frekanslı olması en ekonomik çözüm olarak kabul edilebilir. Böylece, konu içinde de ifade edildiği gibi proje alanındaki bu çift-frekanslı alıcıdan yararlanarak o bölge için uygun bir iyonosfer modeli oluşturulmakta ve bu model tek-frekanslı alıcılar tarafından toplanan verilerin değerlendirilmesinde kullanılarak iyonosferin sistematik etkisi büyük ölçüde giderilebilmektedir. Ancak, eğer proje alanı daha büyükse (>100 km) bu durumda daha

fazla sayıda çift-frekanslı alıcıya gereksinim vardır. Diğer taraftan eğer proje alanında yalnızca tek-frekanslı alıcılar varsa bu durumda uygun bir iyonosfer modeli oluşturulamayacağından uydu mesajlarının bir bölümü olarak yayınlanan iyonosferik düzeltme katsayılarından yararlanılabilir. Ancak bu katsayılar kullanılarak iyonosferik etkinin yaklaşık % 50'sinin giderilebileceği (Klobuchar, 1987)'de belirtilmiş olup bu da tek-frekanslı alıcıların özellikle jeodezik ve jeodinamik amaçlı kullanımı için yeterli değildir. Bu nedenle Uluslararası Jeodinamik Amaçlı GPS Hizmeti (IGS) yörünge bilgisi /9/ kapsamında, yayın efemerisi içerisinde yayınlanan iyonosfer modelin doğruluğundan daha yüksek doğrulukta model parametrelerinin yayınlanmasına karar verilmiştir. Bu konudaki çalışmalar halen devam etmektedir /16/.

Diğer taraftan çift-frekanslı alıcılara göre çok ucuz olmaları nedeniyle gelecekte tek-frekanslı alıcıların ülkemizde de jeodezik ve jeodinamik amaçlı olarak yaygın bir şekilde kullanılacağı düşünülmektedir. Bu durumda, Türkiye'de belirli bölgelerde sürekli gözlem yapan ve çift-frekanslı alıcısı olan sabit istasyonlar oluşturulabilir (Örneğin, Ankara'da Harita Genel Komutanlığı tarafından 1991 yılında tesis edilmiş olan bir sabit istasyon bulunmaktadır). Böylece bu sabit istasyonlarda hesaplanan iyonosfer modeli parametreleri gerek proje alanındaki tek-frekanslı alıcılarda gerekse bu sabit istasyonlarda bulunan özel amaçlı telsizlerle, örneğin sabit nokta/noktalar ile diğer noktalar arasındaki düzeltmeleri (sinyal, iyonosfer vb.) gönderme ve alma işlemlerinde uluslararası bir standart olan RTCM SC-104 (Radio Technical for Maritime-Special Committee 104) formatında yayınlanarak söz konusu tek-frekanslı alıcılardan yararlanılarak elde edilen ölçülere iyonosferik düzeltme getirme olanağı süratli bir şekilde sağlanmış olacaktır.

K A Y N A K L A R

- /1/ Beutler, G. : Test of GPS on the CERN-LEP Control Network Presented at the Joint Meeting of FIG-Study Groups 5B and 5C, Munich, 1985.
- /2/ Beutler, G., : Ionosphere and GPS Processing Techniques, W.Gurtner, Mitteilungen Der Satelliten-Beobachtungsstation U.Hugentobler, Zimmerwald, nr.24, Durckerei Der Universitat M.Rothacher, Bern, 1990. T.Schildknecht, U.Wild.
- /3/ Boucher, C. : ITRF89 and Other Realizations of the IERS Z, Altamimi. Terrestrial Reference System for 1989, April, 1991.
- /4/ Burnside, C.D., : Electromagnetic Distance Measurement; Third edition; Oxford, BSP Professional Books, 1991.
- /5/ Delikaraoğlu, D. : On the Stochastic Modelling of GPS Ionospheric Delays. Manuscripta Geodaetica, Vol.14, pp. 100-109, 1989.
- /6/ Dodson, A.H. : Refraction and Propagation Delays in Space Geodesy INT.J.Remote Sensing, Vol.7, No.4, pp. 515-524, 1986.
- /7/ Georgiadou, Y., : On the Effect of Ionospheric Delay on Geodetic A.Kleusberg. Relative GPS Positioning. Manuscripta Geodaetica, 13, pp.1-8, 1988.
- /8/ Hesper, E.T. : Investigations On the Use of GPS for Geodetic and Orbit Determinations Applications. Report LR-649, Delft University, February, 1991.
- /9/ IGS : International GPS Geodynamics Service, Newsletter 2, IGS, 92-3, 1992
- /10/ Kahveci, M. : Ortometrik Yüksekliklerin Belirlenmesinde Global Konumlama (GPS) Sistemi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, 1993.
- /11/ Kınık, İ., İ.Şanlı. : Başlangıçtan Günümüze Türkiye'de Yapılan Uydu Jeodezisi Faaliyetleri; HGK., Astronomi Ş.İç Raporu, Ankara, 1991.
- /12/ Kınık, İ., K.Şahin, : Ankara Test Ağı'nda GPS Ölçülerinin Değerlendirilmesi. Harita Dergisi, Sayı:110, 6-37, Ocak İ.Şanlı. 1994.

- /13/ Kınık,İ., : GPS İle Pratik Konumlama Uygulamaları, TUJJB
M.Kahveci, Genel Kurulu, Ankara, 8-11 Haziran 1993.
A.U.Gönülalan,
M.Akça
- /14/ Klobuchar,J.A. : Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-
Frequency GPS Users. IEEE Transactions on
Aerospace and Electronic Systems, Vol.AES,
23, No.3, May 1987.
- /15/ Leick,A. : GPS Satellite Surveying. Department of Survey-
ing Engineering. University of Maine, Orono,
pp.52, 1990.
- /16/ Leos, M., : Ambiguity Resolution Strategies Using the
G.Beutler, Results of the International GPS Geodynamics
M.Rothacher, Service (IGS). Bulletin Geodesique,pp.29-38,
U.Wild. 1994.
- /17/ Meydan Laurosse : Cilt 6, Sayfa 620, 1971.
- /18/ NATO : Military Agency for Standardisation A Data
Interchange Format for Navstar Global Positi-
oning System (GPS)-Preliminary Draft, Nato
Unclassified, 1993.
- /19/ Özaydın,D., : Ankara GPS Test Ağı (AGTA)'nın Tanıtımı.HKMO,
İ.Kınık, Harita Kurultayı, Ankara, Şubat 1993.
M.Şimşek,
C.Demir,O.Lenk.
- /20/ Özdoğan,İ., : Arzmagnetizması, İlkeler ve Uygulamalar.İstan-
A.Mete Işıkara, bul Üniversitesi Yayınları, Sayı:3386, 1986.
N.Orbay,Z.Düzgit.
- /21/ Rothacher,M., : Bernese GPS Software Version 3.4, Documenta-
G.Buetler, tion, May 1993.
W.Gurtner,
E.Brockmann,
L.Mervart.
- /22/ Santerre,R. : Impact of GPS Satellite Sky Distribution
Manuscripta Geodaetica, Vol.16, pp.23-53,1991.
- /23/ Seeber,G. : Satellite Geodesy, Walter de Gruyter, 1993.
- /24/ Spilker,J.J. : GPS Signal Structure and Performance Characte-
ristics; The Institute of Navigation, Volume
1, Washington D.C., pp.29-54, 1978.
- /25/ Uzel,T. : Jeodezik Amaçlı Elektromagnetik Ölçmeler,
İ.D.M.M.A., Sayı:159, İstanbul, 1981.

- /26/ Wells,D. : Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates 1986.
- /27/ Wild,U. : Estimating the Ionosphere Using One or More Dual Frequency GPS Receivers. Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, March 13-17, 1999