



**COMPARISON OF ESTIMATION METHODS FOR TROPOSPHERIC
ERRORS IN GPS RAPID STATIC METHOD**

**Kemal Özgür HASTAOĞLU¹, Doğan Uğur ŞANLI², Fatih POYRAZ¹, İsmail
Ercüment AYAZLI¹**

¹*Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Esenler-İSTANBUL*

²*Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Çengelköy-İSTANBUL*

Received/Geliş: 02.07.2009 Revised/Düzeltilme: 11.11.2009 Accepted/Kabul: 30.12.2009

ABSTRACT

One of the important error sources in GPS is the refraction of the signals through the troposphere layer. At the sea level, where we have regular atmospheric conditions, because of the tropospheric refraction, the total vertical correction is about 2-3 meters. In this study, using the GPS rapid static method, different troposphere determination strategies have been tested to seek for the accuracy/precision improvement. To correct these kind of errors, two different methods have been used. The first of these involves modeling the tropospheric refraction without using GPS observations, and the second one is to estimate troposphere during the GPS parameter determination stage. The results of these two methods have been compared to understand the best way to determine the tropospheric error calculations. Apart from this, for each method, different session durations, baseline distances, and baselines having large height differences between their end points has been used to determine the influence in those changes.

Keywords: GPS rapid static, tropospheric error.

MSC number/numarası: 86A30.

**GPS HIZLI STATİK YÖNTEMDE TROPOSFERİK HATA HESAPLAMA YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

ÖZET

GPS'deki en önemli hata kaynaklarından biri troposfer tabakasında GPS sinyallerinde meydana gelen kırılma olarak gösterilebilir. Deniz düzeyindeki standart atmosferik koşullarda troposferik kırılma nedeniyle düşey yöndeki toplam kırılma 2-3 m civarındadır. Bu çalışmada GPS Hızlı Statik yöntemde farklı troposferik hata hesaplama yöntemleri kullanılarak duyarlılığın artırılıp artırılamayacağı sorusuna yanıt aranmıştır. Troposferik kırılmadan kaynaklanan hatayı ortadan kaldırmak için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilki Troposferik kırılmanın GPS gözlemleri olmadan standart modeller kullanılarak modellenmesi, ikincisi ise GPS değerlendirmesi parametre kestirimi aşamasında troposferik hatanın kestirilmesi yöntemleridir. Bu iki yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak GPS hızlı statik yöntem için en uygun troposferik kırılma hesaplama yöntemi belirlenmiştir. Bunun yanı sıra her iki yöntem için farklı oturum süresine, baz uzunluğuna ve noktalar arası yükseklik farkına sahip bazlar kullanılarak kestirilen troposferik kırılma miktarının bu koşullardan nasıl etkilendiği de araştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: GPS hızlı statik, troposferik hata.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: kemalh@yildiz.edu.tr, tel: (212) 383 53 09

1. GİRİŞ

GPS ile konum belirlemede çeşitli ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır bunlardan sıkça kullanılanları statik, hızlı statik ve gerçek zamanlı kinematik GPS' tir [1, 2]. Statik ölçme metodu için ölçüm süresi; mühendislik uygulamalarında 1-2 saat olup, bölgesel ya da evrensel ölçekteki jeofizik çalışmalar için 10 ila 24 saat arasında değişmektedir [1]. Hızlı Statik gözlem süreleri geleneksel statik ölçüm sürelerinden daha kısa olup, uydu geometrisi, gözlenen uydu sayısı ve baz uzunluğunun bir fonksiyonudur. Hızlı Statik yöntemde bir baz için tipik olarak 5-30 dakikalık gözlemler uygundur. Bu teknik 20 km ile sınırlanmaktadır ve duyarlılık cm mertebesindedir. Bu tekniğin temeli; kullanılan yazılımın BTFB (Başlangıç Tamsayı Faz Belirsizliği) çözümünü çok kısa ölçüm periyotları kullanılarak çözebilmesidir [3].

Hızlı Statik ölçüm metodu kontrol ölçümleri ve mühendislik ölçümleri gibi küçük alanlı uygulamalar için çok uygundur [4]. Son yıllarda Hızlı Statik yöntem, özellikle baz uzunlukları 20 km'nin altındaki lokal ağların kullanıldığı mühendislik uygulamaları ve kontrol ölçümlerinde oldukça sık kullanılmaktadır.

GPS ile elde edilen konum bilgisini etkileyen birçok hata kaynağı mevcuttur. Bunlardan birçoğu modellenerek, ölçüler üzerindeki etkileri minimuma indirilmektedir. Günümüzde halen bilim adamları bu etkilerin yok edilmesi veya minimize edilmesi için çalışmalarını sürdürmektedir. Bu etkilerin düşey konum için en önemlilerinden biride atmosferik etkidir. Dünya atmosferi içerisinde iyonosfer ve troposfer birer katmandır ve bu katmanlar GPS ölçülerine etki etmektedirler. Bu durum en çok GPS konum bilgisini ve özellikle de yükseklik bileşenini etkilemektedir. Çift frekanslı GPS gözlemleri saçıcı olan iyonosferin kırıcılık etkisini gidermektedir. Tek frekanslı GPS gözlemleri atmosferik model parametrelerine dayanmalarına rağmen iyonosferik etkinin sadece %50 – 60'ını düzeltebilmektedirler. Troposferin kırıcılık etkisi saçıcı değildir ve bu yüzden çift frekanslı sinyallerin kullanılması troposferik etkinin giderilmesinde yeterli olmamaktadır. Bu yüzden tüm GPS ölçülerinde atmosferik modeller kullanılmalıdır. Bununla beraber troposferik kırılmanın düzeltilmesi yüksek doğruluklu GPS yüksekliklerinin belirlenmesi için önemlidir [2].

Özellikle heyelan ve volkanların GPS ile izlenmesinde, çalışma sahasının küçük olmasından (< 20 km) dolayı ölçüm yöntemi olarak hızlı statik GPS seçilmektedir [5, 6, 7, 8, 9]. Yine bu çalışmalarda arazi yüksek eğime sahip olduğu için noktalar arası yükseklik farkı oldukça fazladır. Referans bir nokta ile izlenen nokta arasındaki yükseklik farkının çok olduğu durumlarda GPS sinyalleri üzerindeki troposferik kırılma en önemli hata kaynağı olarak işaret edilebilir [10, 11, 12]. Troposferik modeller yalnızca düz araziler için geçerli olup, baz noktaları arasında büyük yükseklik farkı varsa her 100 m için 2-5 mm civarında bir hata oluşmaktadır [11].

Sonuç olarak troposferik kırıcılık, faz gözlemleri üzerinde bir hataya neden olmaktadır. Bu hatayı ortadan kaldırmak için iki metot vardır bunlar; a) Troposferik kırılma, GPS gözlemleri olmadan, standart troposferik modeller kullanılarak hesaplanır (meteorolojik ölçümler veya su buhar radyometresi vb.. ölçümler kullanılarak). b) GPS değerlendirmesi parametre kestirimi aşamasında, troposfer parametreleri bilinmeyen olarak kestirilerek hesaplanır. Günümüzde araştırma GPS yazılımları her iki seçeneği de kullanıcıya sunmaktadır [13].

Bu noktada iki önemli soru karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan ilki, troposferik kırılma değerlerini standart troposfer model ile hesaplarken kullanılan meteorolojik ölçümler veya su buharı radyometrelerinden elde edilen radyosond verilerinin ölçüm yapılan noktada mı ölçülmesi yoksa daha önceden evrensel ölçekte belirlenen değerlerin mi kullanılmasıdır. İkinci önemli soru ise troposferik kırılmanın hangi yöntemle belirlenirse daha doğru olarak elde edileceği sorusudur. Genel olarak statik ölçüler için, GPS ölçüleri değerlendirilirken troposferik parametrelerin de kestirilmesi önerilirken, hızlı statik yöntemde standart troposferik modellerin kullanılması tavsiye edilmektedir [13].

GPS gözlemleri olmadan standart bir model kullanılarak troposferik kırılma miktarlarını hesaplamak için kullanılan meteorolojik ölçümler veya su buhar radyometresi vb.. ölçümlerin

evrensel ölçümler mi yoksa GPS gözlemi gerçekleştirilen noktaya ait ölçümlerin mi olması gerektiği sorusunu yanıtlamak üzere Robert ve Rizos (2001) tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir [10]. Bu çalışmada SCIGN (Southern California Integrated GPS Network) ve SAGE ağlarında noktaları arası yükseklik farkının çok olduğu küçük ölçekli 6 ayrı ağ üzerinde gerçekleştirilen eş zamanlı meteorolojik gözlemler kullanılmıştır. Çalışmada hem evrensel verileri içeren standart Saastamonien troposfer modeli kullanılarak hem de yerel meteorolojik değerleri içeren troposferik kırılma modeli ile değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. İki yöntem sonucunda hemen hemen eşit ortalama değerler elde edilirken yerel meteorolojik veriler kullanıldığında standart sapma değerinde bir büyüme belirlenmiştir. Brunner ve Tregoning (1994) de paralel sonuçlar elde etmiş ve hata kaynağı olarak “meteorolojik ölçümlerin yeryüzünde gerçekleştirilmiş olmasından dolayı sonuçlar üzerinde bozucu bir etki yaratması” gösterilmiştir [14]. Yine Roberts ve Rizos (2001)’de, Gunung Papandayan yakınlarında bulunan iki radyosond istasyonunda gerçekleştirilen üç yıllık ölçümler yardımı ile sıcaklıktaki sapma oranını hesaplamıştır. Bu yerel değerler ile evrensel kestirim sonuçları uyum göstermiş ve sonuçlarda ihmal edilebilir değişiklikler gözlemlenmiştir. Buda hâlihazırda var olan standart troposferik kırılma modellerinin evrensel ölçüleri kullanarak yeterli sonuçlar ürettiğini göstermektedir [10]. Yukarıda anlatılan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere troposferik kırılma miktarlarının standart bir troposfer model ile hesaplanmasında kullanılan meteorolojik ölçümler veya su buhar radyometresi ölçümlerinin gözlem yapılan noktaya ait olması sonuçları iyileştirmemekte aksine bazen standart sapma değerlerini büyötmektedir.

Gurtner et al. 1989’u [11] takiben troposferik kırılma değerlerinin, standart bir troposferik model kullanılarak mı yoksa zenith kırılma parametresini bilinmeyen olarak kestirerek mi daha doğru sonuçlara ulaşılacağı sorusunu yanıtlamak için bir çalışma gerçekleştirilmiştir [10]. Bu çalışmada, noktaları arasında 9.2 km baz uzunluğu ve 1350 m yükseklik farkı bulunan bir bazda 21 güne ait 1 saatlik L_1 gözlemleri için iki farklı değerlendirme stratejisi kullanılarak bazlar değerlendirilmiştir. Baz uzunluğu kısa olduğu için iyonosferik etkiler göz ardı edilmiştir. İlk olarak baz değerlendirmelerinde standart Saastamonien troposferik modeli kullanılmıştır. Yükseklik bileşeni üzerindeki değişimin doğu ve kuzey bileşenler üzerindeki değişimlerden fazla olduğu görülmüş ve standart sapma değerleri sırası ile doğu, kuzey, yükseklik bileşenleri 7, 11 ve 43 mm olarak belirlenmiştir. İkinci olarak ise Bernese 4.2 yazılımı ile 1 saatlik oturumlar için her oturumda bir zenith kırılma parametresi kestirilmiştir. Standart sapma değerleri sırası ile doğu, kuzey, yükseklik bileşenleri 7, 9 ve 32 mm olarak belirlenmiştir. Daha sonra her iki yöntem için 3 saatlik oturumlarda değerlendirilmiştir. 3 saatlik verilerin değerlendirilmesi sonucunda parametre kestirim yaklaşımına göre belirlenen yükseklik bileşeni için standart sapma değerinin troposferik kırılma modeline göre daha küçük olduğu görülmüştür. Uzun oturum süresi kullanıldığında bütün bileşenler için hafif bir iyileşme gözlenmiştir. Bu iyileşmenin nedeni başlangıç faz belirsizliğinin daha doğru belirlenmesi ve bağıl troposfer kırılma düzeltmesinin daha iyi kestirilmesi olarak ifade edilmiştir. Sonuç olarak yükseklik farkının bulunduğu küçük ölçekli ağlarda değerlendirme aşamasında kullanılan genel kısa baz değerlendirme stratejisinin gerçekçi sonuçlar vermediği ve bağıl troposferik kırılma parametresinin kestirilmesi ile değerlendirmenin güvenilirliği yükseltilebileceği (zaman serisinin standart sapma değeri küçültülebilir) kanısına varılmıştır.

Yukarıdaki çalışmada vurgulandığı üzere 1 saat ve üzeri GPS gözlemlerinin değerlendirilmesi aşamasında troposferik kırılma parametresinin kestirilmesi ile daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Bunun yanı sıra özellikle noktalar arası yükseklik farkının bulunduğu küçük ölçekli ağlarda standart troposferik modeller yalnızca düz araziler için geçerli olmakta ve baz noktaları arasındaki yükseklik farkı arttıkça her 100 m için 2-5 mm civarında bir hata oluşmaktadır [11]. Bu yüzden troposferik kırılmanın standart troposferik modeller kullanılarak hesaplanması doğru sonuçlar üretmemektedir.

Bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalarda genel olarak statik ölçme yöntemi (1 saat ve üzeri) ile elde edilen GPS gözlemleri için troposferik kırılma hesap yöntemleri karşılaştırılmış ve uygun yöntemler belirlenmiştir. Fakat 1 saatin altındaki hızlı statik yöntem için böyle bir

araştırma gerçekleştirmemiştir. Bu çalışmada küçük ölçekli ağlarda hızlı statik GPS gözlemlerinin (gözlem süresi maksimum 30 dakika) değerlendirilmesi aşamasında troposferik kırılmanın nasıl daha duyarlı kestirilebileceği araştırılmıştır. Bu amaçla SOPAC'dan (Scripps Orbit and Permanent Array Center (<http://sopac.ucsd.edu/>)) elde edilen 6 ayrı baza ait GPS verileri Bernese 5.0 programı yardımı ile değerlendirilmiştir. Seçilen bazlarda baz uzunluğu ve yükseklik farkı sistematik olarak artırılarak bunların troposferik kırılmaya etkisi incelenmiştir. 24 saatlik GPS verileri sırası ile 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 dakikalık veri kümelerine bölünerek troposferik kırılma ile oturma süresi ilişkisi incelenmiştir. Veriler Bernese 5.0 programında iki farklı yöntem ile değerlendirilmiştir. Birinci yöntemde standart troposferik model kullanılmış ikinci yöntemde ise zenit yol kırılma parametresi bilinmeyen olarak kestirtmiştir. Böylelikle Hızlı Statik GPS gözlemleri için hangi yöntemle daha duyarlı sonuçlara ulaşılabileceği sorusu yanıtlanmaya çalışılmıştır.

2. TROPOSFERİK GECİKMENİN HESAPLANMASI

Atmosferin nötr bölümünden kaynaklanan yol kırılması, troposferik kırılma olarak adlandırılır. 15 GHz'e kadar olan frekanslarda nötr atmosfer diye adlandırılan troposfer tabakası saçıcı olmayan bir ortamdır. Bu nedenle frekans bağımlı değildir. Dolayısıyla, İyonosfer tabakasındaki etkileri gidermede kullanılan L_1 ve L_2 frekanslarının kombinasyonu ile troposferik etki giderilemez. Bu nedenle troposferden kaynaklanan hatalar modellenilerek giderilir [15]. Troposferik kırılma L_1 ve L_2 için hemen hemen aynı değerdedir. 20-30 km'den küçük bazların uç kısımlarında troposferik etki birbirine yakındır. Troposferin yükseklik bileşenine etkisi daha fazladır. Troposferik kayıklık, faz gözlemleri üzerinde bir hataya neden olmaktadır. Bu hatayı ortadan kaldırmak için iki metot vardır bunlar,

- Troposferik kırılma GPS gözlemleri olmadan modellenir (meteorolojik ölçümler veya su buharı radyometresi vb.. ölçümler kullanılarak)
- GPS değerlendirmesi, parametre kestirimi aşamasında troposfer parametreleri de kestirilir.

Duruma göre her iki yöntem de günümüzde kullanılmaktadır. $\Delta \varphi_k^i$ k noktası ile i uydusu arasındaki troposferik yol kırılması olmak üzere;

$$\Delta \varphi_k^i(t, A, z) = \underbrace{\Delta \varphi_{apr,k}(z_k^i)}_{\text{öncül model}} + \underbrace{\Delta^h \varphi_k(t) f(z_k^i)}_{\text{Zenit Yol Gecikmesi (ZPD)}} + \underbrace{\Delta^n \varphi_k(t) \frac{\partial f}{\partial z} \cos A_k^i + \Delta^e \varphi_k(t) \frac{\partial f}{\partial z} \sin A_k^i}_{\text{yatay gradyentler}} \quad (1)$$

Burada t gözlem zamanı, z_k^i , A_k^i k noktasından i uydusuna olan zenit ve azimut değerlerini, $\Delta \varphi_{apr,k}(z_k^i)$ standart bir öncül modele göre troposferik kırılma değerini, $\Delta^h \varphi_k(t) f(z_k^i)$ zenit yol kırılma parametresi (zamana bağlı) ve onun izdüşüm (mapping) fonksiyonunu, $\Delta^n \varphi_k(t)$, $\Delta^e \varphi_k(t)$ yatay troposfer gradyent parametresinin (zaman bağlı) kuzey ve doğu bileşenlerini ifade etmektedir.

Troposferik kırılma, öncül bir modele göre hesaplanırken, zenit yol kırılması ve gradyent parametreleri değerlendirme esnasında kestirilir.

3. ÇALIŞMA ALANI VE GPS VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

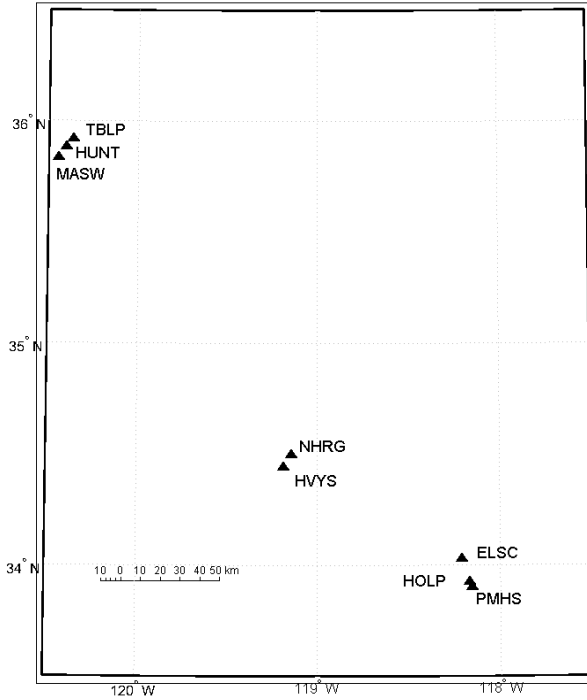
GPS verileri SOPAC' dan elde edilmiştir. Seçilen GPS noktaları güney California, Amerika' da bulunmaktadır. Şekil 1'de nokta dağılımları gösterilmektedir.

GPS verileri BERNESE v.5.0 yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir [13]. Değerlendirme aşamasında, başlangıç tam sayı faz belirsizliği çözümü için Fast Ambiguity Resolution Approach (FARA) [16] tekniğini kullanan ve [17]' de önerilen Hızlı Statik değerlendirme stratejisi kullanılmıştır.

Troposferik kırılma hesaplanırken iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilkinde troposferin ıslak ve kuru bileşenlerinin her ikisi de öncül bir standart troposferik model olan NIELL modeli kullanılarak hesaplanmıştır. İkinci olarak ise troposfer parametreleri, GPS değerlendirmesi parametre kestirimi aşamasında kestirilmiştir. Çizelge 1 de değerlendirme için seçilen bazlar bulunmaktadır.

Çizelge 1. Değerlendirme aşamasında kullanılan bazlar

GPS Noktaları		Baz Uzunluğu (km)	Elipsoidal Yükseklik Farkı (m)
Hunt	masw	6.5	284
Hunt	tblp	5.6	488
Hvys	nhrq	7.8	1275
Elsq	holp	12.2	68
Holp	pmhs	2.7	5



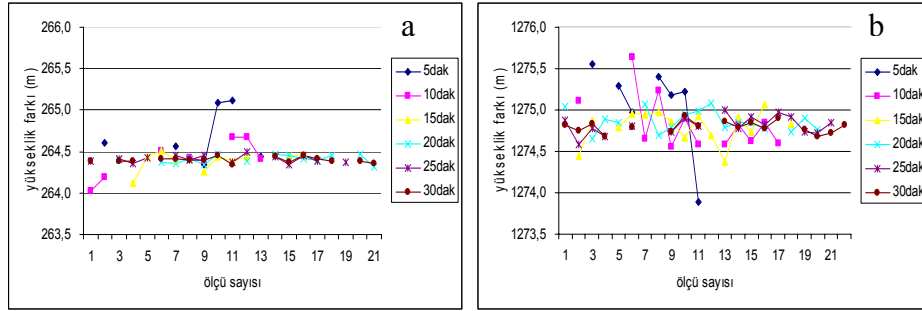
Şekil 1. GPS veri analizinde kullanılan IGS noktaları

4. GPS HIZLI STATİK YÖNTEM İÇİN EN UYGUN TROPOSFERİK KIRILMA HESAPLAMA YÖNTEMİNİN BELİRLENMESİ

4.1. Troposferik Parametrelerin Kestirilmesi İçin Minimum Gözlem Süresinin Belirlenmesi

Troposferik kırılmaların kestirilebildiği minimum gözlem süresini bulmak ve troposferik kırılma kestirimi ile oturum süresi arasındaki ilişkiyi ortaya koyabilmek amacı ile HUNT-MASW ve HVNH-NHRG bazlarının Haziran 2005 154. GPS gününe ait 24 saatlik verisi, sırası ile 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 dakikalık oturum sürelerine bölünmüştür. 24 saatlik veriler, her saat başına ait ilk 5 dakikalık veri aralığına bölünerek toplam 24 adet 5 dakikalık veri kümesi elde edilmiştir. Bu, işlem sırası ile 10, 15, 20, 25 ve 30 dakikalık veriler için de uygulanarak hızlı statik veri kümeleri elde edilmiştir. Her bir veri seti için troposfer parametreleri, GPS değerlendirmesi parametre kestirimi aşamasında kestirilerek nokta konum koordinatları hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra her bir bilinmeyen nokta için 24 saatlik verilerden nokta konumları hesaplanmıştır. Her bir bazın, daha önceden değerlendirilen bütün gözlem uzunluklarına (5, 10, 15, 20, 25 ve 30 dakika) ait yükseklik bileşenlerinin, 24 saatlik verilerden elde edilen kesin değerden olan farkları hesaplanmıştır. Daha sonra bu farklar kullanılarak, her baz ve her oturum süresi (T) için Karesel Ortalama Hata (KOH) değerleri hesaplandı. KOH değerleri hesaplanırken uyumsuz ölçüler ölçü kümesinden çıkarılmıştır. Uyumsuz ölçüler belirlenirken, her bir fark değeri, uygun KOH değeri ile karşılaştırılmıştır. Şayet fark değerleri KOH değerinin 3 katından fazla ise bu fark değeri uyumsuz ölçü olarak ölçü kümesinden çıkarılmıştır.

Şekil 2a ve 2b'de bütün gözlem süreleri için troposferik parametrelerin kestirimi ile elde edilen yükseklik değerleri verilmektedir.

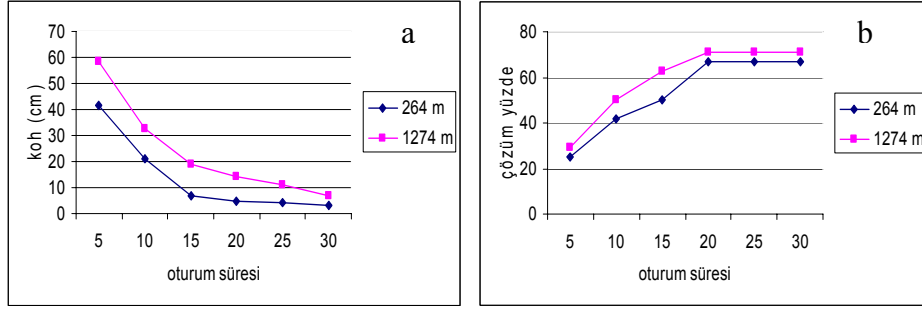


Şekil 2. Bütün gözlem süreleri için troposferik parametrelerin kestirimi ile elde edilen yükseklik değerleri

Kestirilen kısım ıslak bileşendir. Şekil 2'de ıslak bileşenin duyarlılığının (5-10 dk) kısa süreli gözlemlerde ve yükseklik farkı arttıkça dm mertebesine ulaştığı görülmektedir. Özellikle 5 ve 10 dakikalık çözümlerde kesiklikler görülmektedir. Bunun sebebi bu gözlem süreleri için troposferin her oturumda kestirilememesidir. Özellikle 20 dakikadan sonra sonuçlar birbirine oldukça yaklaşmaktadır. Şekil 3a'da her bir oturum süresi için hesaplanan KOH değerleri sunulmaktadır. Şekil 3b'de ise her bir oturum süresi için elde edilen çözüm başarı yüzdeleri verilmektedir. Burada bazlar sahip oldukları yükseklik farkları ile ifade edilmektedir.

Şekil 3 incelendiğinde KOH değerlerinin özellikle 20 dakikadan sonra 10cm'nin altına indiği ve çözüm yüzdesininse %70'lere çıktığı gözlenmektedir. Yine Şekil 3'de troposferik parametrelerin kestirilmesinin oturum süresi ile ilişkisi açıkça gözlenebilmektedir. Şekil 3a'da görüldüğü üzere en iyi sonuçlar 30 dakikalık gözlem süresinde elde edilmekte fakat bu sonuçlarda oldukça büyük değerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bazlara ait KOH değerlerindeki

farklılıkların noktalar arası yükseklik farkından kaynaklandığı daha önceden Hızlı Statik Yöntem için [18]'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Bütün gözlem süreleri için troposferik parametrelerin kestirimi ile elde edilen KOH değerleri ve çözüm başarı yüzdeleri

4.2. Troposferik Parametrelerin Kestirilmesi ve Standart Model Kullanılarak Hesaplanması Yöntemlerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Standart model ile kestirim yönteminin karşılaştırılması ve en uygun troposferik kırılma hesap yöntemini belirlemek amacı ile iki farklı ölçü kümesi kullanılmıştır. Bunlardan ilkinde bir kısa baz birde uzun baz seçilerek bu bazlara ait 30 dakikalık veriler değerlendirilmiştir. Böylelikle baz uzunluğunun troposferik kırılma hesaplama yöntemleri üzerine etkisi incelenmiştir. İkinci olarak ise noktalar arası yükseklik farkı artış gösteren üç farklı baza ait 30 dakikalık veriler değerlendirilmiş ve yükseklik farkının troposferik kırılma hesaplama yöntemleri üzerine etkisi incelenmiştir. Her iki ölçü kümesinin değerlendirme işleminde de iki farklı troposferik kırılma hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemlerden ilkinde troposferik kırılma NIELL standart atmosferik modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Bernese 5.0 NIELL modelinin yanında SAASTAMOINEN, HOPFIELD vb. diğer Standard modelleri de sunmaktadır ve tüm modeller $> 10^\circ$ yükseklik açısı için benzer sonuçlar vermektedirler. Bu çalışmada NIELL modelinin seçilmesi, sunulanlar arasında en yeni modellerden biri olmasıdır. İkinci yöntemde ise troposferik parametreler GPS değerlendirme aşamasında kestirilerek hesaplanmıştır. Unutmamak gerekir ki troposferik parametrelerin kestiriminde yükseklik açısı daha da önemli bir rol oynamakta ve bu çalışmada $> 10-15^\circ$ yükseklik açıları seçildiğinden kestirilen troposferik parametreler en az zararı görmektedir.

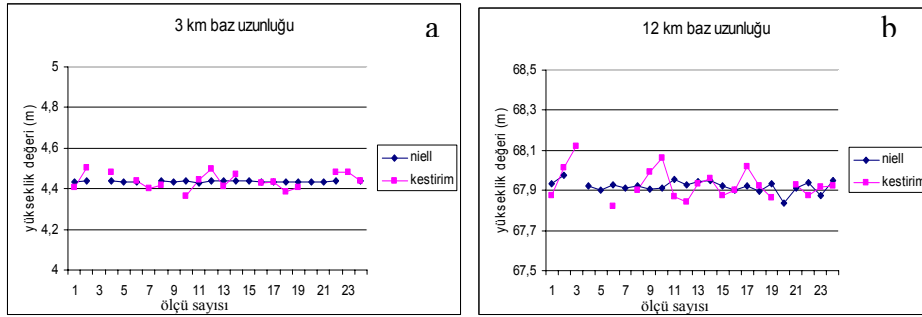
Noktalar arası yükseklik farkı az olan ve baz uzunluğu sırası ile 2.7 km ve 12.2 km olan ELSC-HOLP ve HOLP-PMHS bazlarının Nisan 2004 100. GPS gününe ait 24 saatlik verileri ve baz uzunluğu 8 km'nin altında, noktalar arası yükseklik farkları ise sırası ile 264 m, 468 m ve 1275 m olan HUNT-MASW, HUNT- TBLP ve HVNH-NHRG bazlarının Haziran 2005 152, 153 ve 154 GPS günlerine ait 24 saatlik verileri 30 dakikalık oturum sürelerine bölünerek 30 dakikalık veri kümeleri elde edilmiştir. Bu veriler iki farklı troposferik kırılma hesap yöntemine göre değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler yardımı ile hızlı statik yöntem için en uygun troposferik kırılma hesap yöntemi belirlenmeye çalışılmış ve farklı troposferik hesap yöntemlerinin baz uzunluğu ve yükseklik farkından nasıl etkilendiği incelenmiştir.

Şekil 4a ve Şekil4b'de farklı baz uzunluklarına sahip bazlar için her iki troposferik kırılma hesap yöntemi kullanılarak hesaplanan yükseklik bileşenlerine ait değerler verilmektedir. Şekil 4a'da baz uzunluğu 3km iken Şekil4b'de 12 km' dir. Bu iki bazda da noktalar arası yükseklik farkları 100 m'nin altındadır. Çizelge 2'de troposferik kırılma miktarları hem standart model hem de kestirim yöntemi kullanılarak elde edilmiş yükseklik değerlerine ilişkin KOH

değerleri verilmektedir. Gerek Şekil 4 ve gerekse Çizelge 2 incelendiğinde baz uzunluğu 10 km'nin üzerine çıktığında KOH değerlerinde bir artış gözlenmektedir. Standart model kestirim yöntemine göre daha duyarlı sonuçlar vermektedir. Parametre kestiriminde ikili farklar kullanıldığından ve ikili farklar ile kısa bazlarda troposferik hata neredeyse tamamen yok edildiğinden standart model kısa bazda oldukça duyarlı sonuç vermiştir. Baz mesafesi büyüdükçe noktalar arasında troposferik korelasyon düşmüş ve biraz da başlangıç faz bilinmeyen belirlenmesi kötüleştiği için standart model sonuçları kötüleşmiştir. Çizelge 2 incelendiğinde kestirim sonuçlarının da kötüleştiği görülmekte bu da troposferik kestirimin kısa gözlem süreleri ile iyi yapılamadığı yani kısa gözlemlerde kestirim hatasının arttığı ve bunun yüksekliğe bire üç oranında yansıdığı şeklinde izah edilebilmektedir.

Çizelge 2. Farklı baz uzunlukları için iki farklı troposferik kırılma hesaplama yöntemi kullanılarak kestirilmiş yükseklik değerlerine ait KOH değerleri

Baz Uzunluğu (km)	KOH (cm)	
	Niell	Kestirim
3	1.7	4.2
12	4.0	8.0

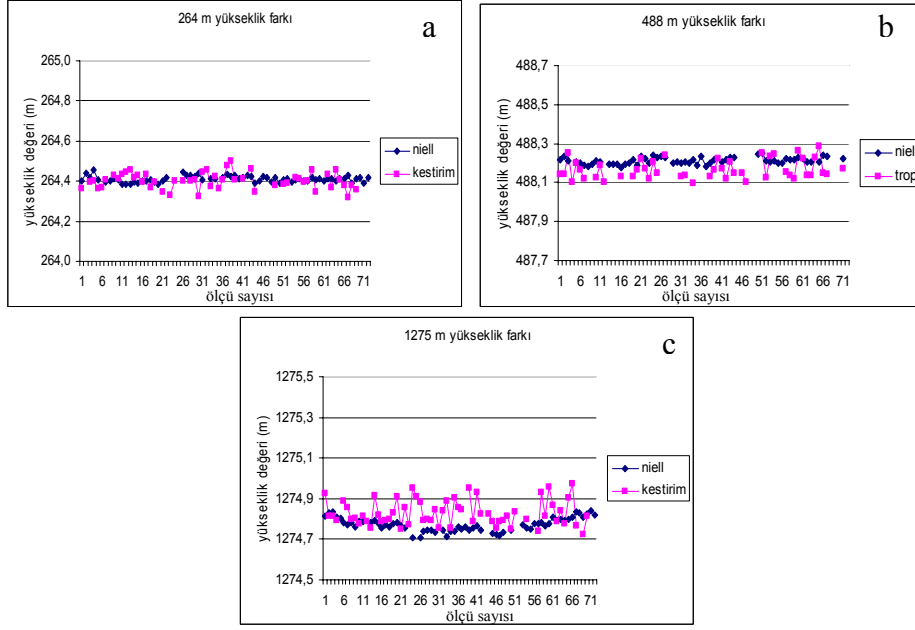


Şekil 4. Farklı baz uzunlukları için iki farklı troposferik kırılma hesaplama yöntemi kullanılarak hesaplanan yükseklik değerleri

Şekil 5'de ise farklı yükseklik farkı değerlerine sahip bazlar için troposferik kırılma hesabında, hem standart model kullanarak hem de kestirim yöntemi kullanarak elde edilen yükseklik değerleri verilmektedir. Çizelge 3'de ise bu değerlerden hesaplanan KOH değerleri verilmektedir.

Çizelge 3. Farklı yükseklik farkları için iki farklı troposferik kırılma hesaplama yöntemi kullanılarak kestirilmiş yükseklik değerlerine ait KOH değerleri

Yükseklik Farkı (m)	KOH (cm)	
	Niell	Kestirim
264	1.6	4.0
488	2.8	5.4
1275	3.9	7.1



Şekil 5. Farklı yükseklik farkları için iki farklı troposferik kırılma hesaplama yöntemi kullanılarak hesaplanan yükseklik değerleri

Şekil 5 incelendiğinde noktalar arası yükseklik farkı arttıkça iki yöntem arasında bir kayıklık olduğu gözlenmektedir. Çizelge 3’de de görüldüğü üzere troposferik kırılma miktarları standart model kullanarak hesaplanan KOH değerleri diğer yöntemlere göre daha küçüktür. Bu KOH değerleri her iki yöntemde de yükseklik farkına bağlı olarak artış göstermektedir. Sonuç olarak GPS hızlı statik yöntemde troposferik kırılma hangi yöntem ile hesaplanırsa hesaplanırsa sonuçlar üzerindeki baz uzunluğu ve yükseklik farkı etkisi kendini göstermekte ve elimine edilememektedir. Çizelge 2 ve Çizelge 3’de görüldüğü üzere GPS hızlı statik yöntemde standart atmosferik modellerin kullanılması daha iyi sonuçlar doğurmaktadır.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Yukarıda gerçekleştirilen değerlendirmeler ışığında GPS hızlı statik yöntemde troposferik parametrelerin GPS değerlendirmesi aşamasında kestirilmesi için minimum 15 dakikalık ölçüye ihtiyaç duyulduğu söylenebilir. Troposferik parametrelerin GPS değerlendirmesi aşamasında kestirilmesi ile elde edilen sonuçlara ait KOH değerleri ölçü süresi arttıkça iyileşmektedir. Bunun yanı sıra yine ölçü süresi arttıkça troposferik parametrelerin kestirim başarı yüzdesi de artmaktadır, 5 ve 10 dakikalık ölçüler için troposferik parametrelerin kestirim yüzdesi oldukça düşüktür. Tüm bunların yanında bu yöntem ile elde edilen sonuçlar oldukça büyük KOH değerlerine sahiptir.

Hızlı statik ölçülerin değerlendirilmesinde troposferik kırılmanın hesabı için standart atmosferik modellerin kullanılması daha iyi sonuçlar vermektedir. Noktalar arası yükseklik farkı az olan kısa bazlara (<10 km) ait 30 dakikalık verilerin değerlendirilmesinde standart atmosferik modellerin kullanılması ile oldukça iyi sonuçlar elde edilmektedir. Fakat noktalar arası yükseklik farkı arttıkça standart atmosfer modellerin kullanılması da yeterli olamamaktadır. Hızlı statik yöntem ancak kısa bazlarda uygulanabildiği için ölçüm anındaki troposfer tüm ağ noktalarında

yaklaşık benzer karakterdedir. Dolayısıyla kısa mesafede bağıl konum belirleme ile troposferik hata hemen hemen yok edilebilmektedir. Ancak bu durum uzun baz mesafelerinde geçerli değildir. > 100 km için noktalar arasındaki troposferik korelasyon düşer ve baz noktalarında troposferin kestirilmesi önem kazanır. Noktalar arası yükseklik farkı arttıkça da benzer bir durum söz konusudur. Yani baz noktaları arasında troposferik korelasyon düşer ve troposferik hata elimine edilemez duruma gelir. Standart modeller ölçüm anındaki gerçek meteorolojik koşulları dikkate almadığından aşırı yükseklik farkı bulunan bazların değerlendirilmesinde başarısız olurlar. Bunun yanı sıra 10 km' nin üzerindeki bazlarda da standart atmosfer modeller ile troposferik kırılma doğru olarak hesaplanamamaktadır.

Troposferik parametrelerin kestirilmesi statik yöntemde oldukça iyi sonuçlar vermesine karşın hızlı statik yöntemde sonuçları olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun asıl sebebinin ölçü süresinin kısa olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Hızlı statik GPS ölçülerinin değerlendirilmesi aşamasında troposferik parametreler de bilinmeyen olarak kestirildiğinden bilinmeyen sayısında artış meydana gelmekte ve bunun da kısa ölçü kümeleri için çözümü güçleştirdiği tahmin edilmektedir. Bu yüzden kısa ölçü süreleri için troposferik kırılma değerlerinin standart bir atmosferik model yardımı ile hesaplanması önerilir. Ancak noktalar arası yükseklik farkı arttığında standart model kötü sonuç verdiğinden GPS ağı kurulurken referans noktaları, deformasyon alanındaki noktalar ile arasında yükseklik farkı olmayacak şekilde uygun yerlere atılmalıdır.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Stewart, M. and Rizos, C., "GPS Projects: Some planning issues." Manual of Geospatial Science and Technology, J. D. Bossler et al., ed., Taylor&Francis, London and New York, pp 162-182. 2002.
- [2] Featherstone, W.E., Dentith, M.C. ve Kirby, J.F., "Strategies for the Accurate Determination of Orthometric Heights From GPS", Survey Review, 34.267:278-296. 1998.
- [3] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. Ve Collins, J., "Evrensel Positioning System Theory and Practice", Fifth Revise Edition, Springer, New York. 2001.
- [4] Rizos, C., "Satellite Navigation and Positioning Group (SNAP): Principles and Practice of GPS surveying." 1999.
- [5] Gili, J. A., Corominas, J., Rius, J., "Using Evrensel Positioning System Techniques in Landslide Monitoring", Engineering Geology, 55, 167-192. 2000.
- [6] Matsushima T, Takagi A., "GPS and EDM monitoring of Unzen volcano ground deformation". Earth Planets Space 52: 1015-1018. 2000.
- [7] Moss, J. L., McGuire, W. J., Page, D., "Ground Deformation of a Potential Landslide at La Palma, Canary Islands", Journal of Volconology and Geothermal Research, 94, 251-256. 1999.
- [8] Mora P., Baldi P., Casula G., Fabris M., Ghirotti M., Mazini E., Pesci A., "Evrensel Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslide (northern Apennines, Italy)", Engineering Geology 68 (2003) 103-121. 2003.
- [9] Coe J.A., Ellis W.L., Godt J.W., Savage W.Z., Savage J.E., Michael J.A., Kibler J.D., Powers P.S., Lidke D.J., Debray S., "Seasonal movement of the Slumgullion landslide determined from Evrensel Positioning System surveys and field instrumentation, July 1998-March 2002", Engineering Geology 68 (2003) 67-101. 2003.
- [10] Roberts C., Rizos C., "Mitigating Differential Troposphere Effects For GPS-based Volcano Monitoring", Satellite Navigation & Positioning Group School of Geomatic Engineering, The University of New South Wales Sydney NSW 2052, Australia, 2001.

- [11] Gurtner, W., Beutler, G., Botton, S., Rothacher, M., Geiger, A., Kahle, H.-G., Schneider, D., & Wiget, A., "The use of the Global Positioning System in mountainous areas", *Manuscripta Geodetica*, 14, 53-60, 1989.
- [12] Sanli, D. U. and F. Kurumahmut, "Accuracy of GPS Positioning in the Presence of Large Height Differences", FIG Working Week 2008, Stockholm-Sweden, 14-19 June 2008.
- [13] Hugentobler U, Dach R, Fridez P, Meindl M, "Bernese GPS Software Version 5.0" Draft, Astronomical Institute, University of Berne, September 2006.
- [14] Brunner, F.K. ve Tregoning P., " Investigation of height repeatability from GPS measurements", *Aust. J. Photogram. Surv.* 60, 33-48, 1994.
- [15] Brunner, F.K. ve Welsch, W.M., "Effects of the Troposphere on GPS Measurements", *GPS World*, 4:42-51, 1993.
- [16] Frei, E. ve Beutler G., "Rapid Static Positioning based on the fast ambiguity resolution approach "FARA": Theory and First Results", *Manuscripta Geodaetica*, 15:325-356, 1990.
- [17] Hugentobler U, Schaer S and Fridez P, "Bernese GPS Software Version 4.2", Astronomical Institute, University of Berne. 2001.
- [18] Hastaoglu, K., D. U. Sanli, "Accuracy of GPS Rapid Static Positioning: application to Koyulhisar Landslide, Central Turkey", *Survey Review* (Accepted in September 2008), in pres, 2008.