

GPS/GNSS Gözlemlerini Değerlendirme Yöntemlerinde Son Gelişmeler

Muzaffer KAHVECİ¹

Özet

GPS/GNSS (Global Positioning System/Global Navigation Satellite Systems) gözlemlerinin yer bilimlerinde kullanımı, ilk olarak 1980 yılında jeodezik amaçlı olarak başlamış ve özellikle son 10 yıl içerisinde bilimsel amaçlı kullanımı en üst seviyeye çıkmıştır. Diğer taraftan, Uluslararası GNSS Servisi (IGS: International GNSS Service), jeodezik ve jeofizik çalışmalarda kullanılmak üzere 1994 yılından bu yana yüksek doğruluklu uydu yörünge ve saat bilgilerini yaklaşık gerçek zamanlı ve sürekli olarak bilim dünyasının ve uygulamacıların hizmetine sunmaktadır.

GPS/GNSS değerlendirmelerinden, tutarlı, homojen ve yüksek doğruluklu sonuçlar elde edilmek hedefleniyorsa, hesaplamalarda mutlaka IGS standartları dikkate alınmalıdır. Bu makalede milimetre mertebesinde sonuçlara ulaşabilmek için, uyulması gereken IGS standartları ve değerlendirme stratejileri özetlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Sözcükler

GPS, GNSS, IGS, IERS, ITRF, ERP, PCV

Abstract

Latest Developments in GPS/GNSS Post-Processing Strategies

Using GPS/GNSS observations in earth sciences started in 1980 for geodetic purposes, and its scientific uses have reached its peak for the last 10 years. Moreover, IGS (International GNSS Service) has been providing the high accuracy orbit and clock information for geodetic and geophysical tasks since 1994.

Given fact that one aims to obtain high accuracy and precision as well as consistent and homogenous results from the post-processing of observations, IGS standards are be taken into consideration. In this paper IGS standards and post-processing strategies are summarized which should be implemented for any tasks seeking mm level accuracy and precision.

Key Words

GPS, GNSS, IGS, IERS, ITRF, ERP, PCV

1. Giriş

Uydularla konum belirleme 1980'li yıllarda jeodezik amaçlı kullanılmaya başlandığında en önemli sorunlar; yüksek doğruluklu uydu yörüngeleri hesabı, uydu ve alıcı saati modellemeleriydi. Örneğin, 1980-1990 yılları arasında gerçek zamanlı olarak 3 boyutta elde edilen mutlak koordinat doğruluğu ortalama 100-150 metreler mertebesindeydi. Yukarıda ifade edilen sorunların dışında, bu düşük doğruluğun en büyük nedenlerinden biri seçimli doğruluk erişimi (SA: Selective Availability) etkisinin, ABD tarafından kasıtlı olarak açık tutulmasıydı. Bunun sonucu olarak, gerçek zamanlı mutlak konum belirleme uygulamalarında hassas koordinat elde edebilmek için 2000'li yıllara kadar beklemek gerekmiştir. Diğer taraftan, mutlak konum belir-

lemedeki bu olumsuzluk bilim insanlarını farklı arayışlara yöneltmiş ve böylece görelî konum belirleme teknikleri ve modellemeler hızla gelişmeye başlamıştır. Gerçekte, GPS/GNSS yazılımı hazırlayanlar kod ve faz gözlemlerine getirilmesi gereken düzeltmelerin neler olduğu konusunda, daha başlangıçtan beri bilgi sahibiydiler (ION 1980, ICD GPS 200). Bu düzeltmelerin büyük bölümü metreler mertebesinde olup, GPS ile konum belirlemede öncelikle dikkate alınmaları gerekmektedir. Diğer taraftan, hesaplamalarda hassas yörünge ve uydu saati bilgileri ile L3 iyonosferden bağımsız lineer kombinasyon kullanıldığında, kod ve faz hesaplamalarında dikkate alınmamış olan bazı diğer etkilerin de hesaba katılması gerekliliği zaman içerisinde ortaya çıkmıştır. Başka bir ifadeyle, büyük etkiye sahip sorunlar giderildikçe, hesaplama ve modelleme algoritmaları geliştikçe daha küçük etkiye sahip hata kaynakları dikkate alınmaya ve gözlemlere düzeltme olarak getirilmeye başlanmıştır. Bozucu etkisi kullanım alanına bağlı olarak küçük olan hata kaynaklarının zaman içerisinde dikkate alınmasında ve giderilmesindeki en büyük katkıyı Uluslararası GNSS Servisi (IGS) yapmıştır. 1989 yılında Planlama Komitesi adıyla kurulan IGS, 1992 yılında ilk test ölçümlerini yapmış, Ocak 1994'te resmi olarak faaliyete başlamış ve ilk hassas ürünlerini (uydu yörünge ve saat bilgileri) bilim dünyasının hizmetine sunmuştur. IGS, yaklaşık 80 ülkeden 200 kurum ve kuruluşun gönüllü işbirliğine dayanan uluslararası bir kuruluştur. IGS'in kurulduğu yıllardaki adı "Uluslararası GPS Servisi" olup, daha sonra GLONASS, Galileo gibi, diğer uydu sistemlerinin de gündeme gelmesiyle adı "Uluslararası GNSS Servisi" olmuştur.

Yüksek doğruluklu IGS ürünlerinin gerçek zamanlı uygulamalar ve büro hesaplamalarında (post-processing) kullanılması sonucunda, günümüzde mm doğrulukta sonuçlar almamızı sağlayacak yer dönmesi, atmosferik parametreler, gel-git etkileri, anten faz merkezi değişimleri gibi birçok hata kaynağı mutlaka giderilmesi gereken önemli hata kaynakları olarak hesaplamalarda dikkate alınmaya başlanmıştır.

Bu makalede söz konusu hata kaynakları kısaca açıklanarak, özellikle jeodezik ve jeofizik amaçlı çalışmalarda neden dikkate alınmaları gerektiği ve etkileri giderilmediği durumlarda GPS/GNSS sonuçlarının hangi büyüklükte etkileneceği gösterilmeye çalışılmaktadır.

2. GPS/GNSS Gözlemlerinin Modellenmesi ve Değerlendirilmesindeki Bazı Gelişmeler

IGS, yukarıda da belirtildiği gibi, istasyon koordinatlarının ve uydu yörüngelerinin doğruluklu olarak belirlenebilmesi amacıyla, yaklaşık gerçek zamanlı ve sürekli hesaplamalar yapmaktadır. Bu hesaplamalara ilişkin model ve değerlendirme yöntemleri, IGS'in resmi başlangıç tarihi olan 1994

¹ Doç.Dr. GNSS Harita Teknik Danışmanlık, Ankara, muzaffer@gnssteknik.com.tr

yılından bu yana sürekli geliştirilmektedir. Çünkü; GPS/GNSS gözlemlerindeki kesiklikler, farklılıklar ve belirsizlikler GPS zaman serilerinin kalitesini düşürmektedir (Kahveci 2009). Örneğin, jeodezik datumun değiştirilmesi, zaman serilerindeki belirsizliklerin artmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda da, söz konusu zaman serilerinin jeofizik yorumu olanaksız hale gelmektedir.

1994 yılından bu yana, GPS ölçülerini değerlendirme stratejilerinde ve modellendirmelerde önemli değişiklikler olmuştur. Bunlara ek olarak ITRF (International Terrestrial Reference Frame) tanımları da: ITRF88, ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005 isimleri ile çok sayıda değişmiştir. Her bir ITRF değişikliğinin zaman serilerinde (ölçek ve kayıklık nedeniyle) süreksizliğe yol açtığı birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur (Kouba 2009, Weber vd. 2002, Steienberger 2009). Bunlardan daha da önemlisi sondan bir önceki ITRF (ITRF2000) tanımından itibaren datum tanımlaması da değiştirilmiştir. ITRF2000 ve sonraki tanımlamalarda, belirli sayıda ana nokta (fiducial point) koordinatlarının bir önceki değerleri sabit alınarak, bu koordinatlara göre NNR (No-Net-Rotation) koşulu uygulanmaya başlanmıştır. Buradaki referans sistemi değişikliği, önceki hesaplamalara ilişkin varyans-kovaryans bilgisine ve normal denklemler matrisine dayalı olarak, tekrar hızlı bir yeniden değerlendirme yoluyla sağlanabilecek bir durumdur. Oysa, model ve/veya parametre tanımlarındaki değişiklikler, homojen ve tutarlı sonuçlar elde edebilmek için, ham verilerden başlayarak tüm hesaplamaların yinelenmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda; geçmişten bugüne modellerde, parametre tanımlarında ve hesaplama stratejilerindeki farklılıklara özet olarak bakılacak olursa, Tablo 1'deki genel durum oluşturulabilir:

2005 yılında IGS, geçmişteki GPS/GNSS gözlem değerlendirmelerinin, gelişmeler bağlamında yenilenmesi çağrısında bulundu (IGSMAIL 5175). Bu çağrı üzerine 2006 yılında Darmstadt/Almanya'da GPS ölçülerinin "yeniden değerlendirilmesi, standartların belirlenmesi ve yeni modeller" konulu bir IGS çalışmayı gerçekleştirildi. Bu çalıştayın dikkat çekici önerilerinden biri de modelleme ve diğer yeniliklere paralel olarak GPS/GNSS gözlem değerlendirmelerini yenilemenin sürekli bir IGS faaliyeti olduğudur.

Tablo 1: Hesaplama ve modellerdeki gelişmeler

Model/Hesaplama/Değişiklik Adı	Tarihi
IGS Ürünleri	Ocak 1994
ITRF92 → ITRF93	Ocak 1995
Gölgedeki uydular (Eclipsing Satellites) modeli	Nisan 1995
"RPR (Radiation Pressure)" parametreleri	Mayıs 1995
Ağ dengelemesinde tam korelasyon	Haziran'95
QIF (Quasi-Ionosphere-Free) faz belirsizlikleri çözümü	Haziran'95
GIM (Global Ionosphere Model) parametreleri	Ocak 1996

ITRF93 → ITRF94	Haziran'96
Anten faz merkezi düzeltmeleri	Haziran'96
İyileştirilmiş yörünge	Haziran'96
IERS standartları	Ekim 1996
Sinyal yükseklik açısı 20°'den 10°'ye düşürüldü	Ekim 1997
Yükseklik açısına bağlı ağırlıklandırma	Ekim 1997
Troposferi modeller (örn. Niell)	Ekim 1997
ITRF94 → ITRF96	Mart 1998
Okyanus Yükleme (Ocean Loading)	Mart 1998
ITRF96 → ITRF97	Ağustos'99
PIC1-DCB etkileri	Ekim 2000
Troposferik gradyan hesabı	Ağustos'01
Sinyal yükseklik açısı 10°'den 3°'ye düşürüldü	Ağustos'01
ITRF97 → ITRF2000	Aralık 2001
Katı yeryüzü gelgiti (Solid Earth Tide)	Temmuz'04
Nutasyon Modeli IAU80 → IAU2000A	Kasım 2005
Anten mutlak faz merkezi modeli (GPS Haftası:1400)	Kasım 2006
ITRF2005 yayımlandı	Kasım 2006
IGS sonuç (final) saat dosyaları 30 sn aralıklı (GPS Haftası: 1410)	Ocak 2007

Sonuç olarak tüm bu yenilikler/ geliştirmeler/ değişiklikler/ eklemeler, IGS öncesinde olduğu gibi bugüne kadar yapılmış olan değerlendirmelere ait zaman serilerinde süreksizliklere ve/veya tutarsızlıklara neden olmaktadır. GPS zaman serilerindeki bu süreksizlik ve/veya sorunlar ise sonuçların jeofizik yorumlarını zorlaştırmakta ve güvenilirlik sorununu karşımıza çıkarmaktadır.

3. Yüksek Doğruluklu Konum ve Hız Vektörü Hesabı İçin Getirilmesi Gereken Düzeltmeler

IGS standartlarında 100 km'den küçük baz uzunlukları yerel, 500 km ile 1000 km arasındakiler bölgesel ve 1000 km'yi aşanlar global baz olarak adlandırılmaktadır. 100 km'den küçük bazlarda faz gözlemleriyle görelî konum belirlemede birçok etki göz ardı edilebilmektedir.

Bugüne kadar yapılmış olan hesaplamalarda, yerel denilebilecek ağlarda (<100 km) göz ardı edilen, ancak global ölçekteki ağlar, jeofizik ve jeodinamik amaçlı ağlar ve hassas mutlak konum belirleme (PPP: Precise Point Positioning) bakımından önemli görülen bazı bozucu etkiler aşağıda kısaca açıklanmaktadır. Bu etkilerin bir kısmının hesaplanabilmesi için güneş ve ayın konumlarının da bilinmesi gerekmekte olup bu bilgiler gezegenler efemeris tablolarından alınmaktadır.

Bu etkiler:

1. Yeryuvarı dönme parametreleri (ERP: Earth Rotation Parameters):

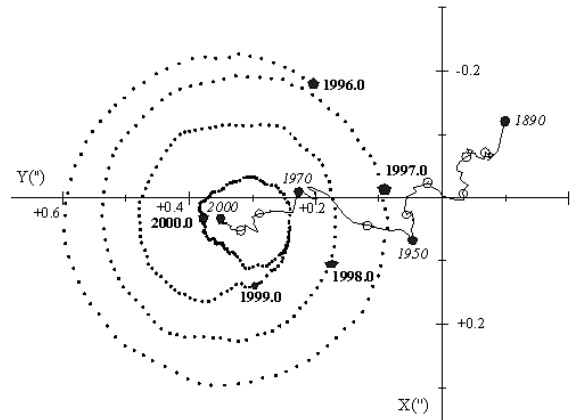
GPS gözlemlerinin modellendirilmesi ve değerlendirilmesi ile elde edilen jeodezik büyüklükler (nokta koordinatları, baz bileşenleri vb.) için uygun koordinat sistemlerinin tanımlanması gerekmektedir. Bilindiği gibi uydu hareket denklemleri göksel koordinat sisteminde (inersiyal), yeryüzündeki nokta koordinatları ise yersel koordinat sisteminde tanımlanmaktadır. Uluslararası gök koordinat sistemi (ICRS:International Celestial Reference System) uygulamada gökyüzünde düzgün dağılan dünya dışı radyo kaynaklarının J2000.0 epoğundaki ekvatorial koordinatlar ile tanımlanmakta ve bu sisteme ICRF (International Celestial Reference Frame) adı verilmektedir. Uluslararası yersel koordinat sistemi (ITRS; International Terrestrial Reference System) farklı uzay teknikleri (VLBI, SLR, GPS, DORIS) kullanılarak elde edilen sabit istasyon koordinatları ve hızları ile belirlenmekte ve buna ITRF (International Terrestrial Reference Frame) adı verilmektedir. GPS verilerinin değerlendirilmesi aşamasında nokta koordinatları ile uydu koordinatları aynı referans sisteminde tanımlanmalıdır. Bu da ITRF ve ICRF sistemleri arasındaki dönüşüm parametrelerinin bilinmesini gerektirmektedir. Bu dönüşüm parametreleri, yeryuvarı yönlendirme parametreleri (EOP; Earth Orientation Parameters) olarak bilinmektedir. Yeryuvarı yönlendirme parametreleri $X_p, Y_p, d\psi, d\epsilon$, UT1-UTC ITRF'in zamana bağlı olarak ICRF'e göre yönlendirilmesini sağlamaktadır. Bu parametrelerden X_p ve Y_p gök efemeris kutbunun (CEP:Celestial Ephemeris Pole) ITRF sistemindeki konumunu belirlemektedir. $d\psi$ ve $d\epsilon$ parametreleri, Uluslararası Astronomi Birliğinin (IAU; International Astronomy Union) 1980 nutasyon modeline göre tanımlanan, CEP ile gerçek CEP arasındaki farkı, (UT1-UTC) ise IERS (International Earth Rotation Service) referans meridyeninin ICRF'deki doğrultusunu tanımlamaktadır (CASTRIQUE 1996). Uygulamada, GPS verilerinin değerlendirilmesinde bu parametrelerden 3'ü (X_p, Y_p ve UT1) kullanılmakta, bunlara yeryuvarı dönme parametreleri (ERP;Earth Rotation Parameters) adı verilmektedir. Buna göre ERP, kutup gezinmesi bileşenleri ve UT1 zaman ölçeğini kapsamaktadır (McCARTHY ve PETIT 2003).

Sonuç olarak yeryuvarı dönme ekseninin doğrultusu zamana bağlı olarak değişmektedir. Değişim vektörünün doğrultusu anlık dönme eksenini doğrultusu, büyüklüğü ise yeryuvarının dönme hızına eşittir. Yeryuvarının dönmesi düzenli bir hareket olmayıp, bunun nedenleri; presesyon, nutasyon, kutup gezinmesi ve üniversal zaman (UT1)'dir. Başka bir deyişle, Yer dönme vektöründeki değişimlerin nedenleri olarak; güneşin, ayın ve gezegenlerin çekim etkileri ile yeryüzündeki okyanus ve yeraltı su hareketleri, atmosferik etkiler sayılabilir (KAHVECİ 2002). Bu parametreler inersiyal referans sistemi (ICRF) ile yersel referans sistemi (ITRF) arasındaki dönüşümü sağlar. Bu dönüşümün sonucunda uydu yörüngeleri ITRF sisteminde elde edilmiş olur.

Bilimsel amaçlı yazılımlarda belirtilen dönüşümün daha hassas yapılabilmesi için yarı günlük ERP değişimleri de dikkate alınmaktadır. Çünkü, ERP okyanus yüklemesinin günlük ve yarı günlük periyotlarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu etki yeryüzünde 0.1 mas (3 cm) büyüklüğündedir.

2. Kutup gezinmesi/kutup gelgiti (Polar Motion/Polar Tides):

Yeryuvarını etkileyen dış kuvvetler olmasa bile, yeryuvarının elastik yapısı, atmosfer ve okyanusların katı yeryuvarı (litosfer) etkileri nedeniyle yine de onun dönme ekseninde değişim olacaktır (HERRING 1988). Yeryuvarı merkezkaç kuvveti potansiyelindeki küçük değişimler nedeniyle dönme ekseninin (yada anlık kutbun) katı yeryüzüne göre hareketi, kutup gezinmesi olarak bilinmektedir. Sonuç olarak, Ayın ve Güneşin çekim etkileri, istasyon koordinatlarında periyodik değişimlere neden olmaktadır. Aynı şekilde yeryuvarı dönme ekseninin, katı yeryuvarına (litosfer) göre yer değiştirmesi (kutup gezinmesi), periyodik deformasyonlara neden olmaktadır. Yeryuvarı dönme ekseninin 1900 – 2000 yılları arasında izlediği yolu gösteren grafik Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: 1900-2000 yılları arasında kutup gezinmesi

Anlık kutbun bu hareketi, üst üste bindirilmiş iki hareketten oluşmaktadır. Bunlardan birincisi yaklaşık periyodu 435 gün olan serbest presesyon (Chandler periyodu) hareketi olup, bu elastik yeryuvarı modeli ile açıklanabilmektedir. İkincisi ise yeryuvarı kitlesinde, hava ve su akıntıları nedeniyle oluşan mevsimsel değişimlerin neden olduğu yıllık harekettir. Dolayısıyla, presesyon ve nutasyon modellerinin tersine, anlık kutbun katı yeryuvarına göre hareketi mevcut gelişmiş yeryuvarı modelleri ile açıklanamamakta, aynı zamanda kutup gelgit etkisi, değişimi çok yavaş olduğu için, diğer gelgit etkilerinde (okyanus, katı yeryuvarı) olduğu gibi uzun süreli gözlem yapılarak giderilememektedir. Bu nedenle 1900–1905 yılları arasında ortalama kutup hareketi kutup gezinmesi gözlemleri için genellikle başlangıç kabul edilmektedir.

Günümüze kutup gezinmesi gözlem doğruluğu yaklaşık $0''.3-0''.5 \times 10^{-3}$ mertebesinde olup bu da yeryüzünde yaklaşık 1.0–1.5 cm büyüklüğe karşılık gelmektedir,

(KLEUSBERG ve TEUNISSEN 1998, MONTENBRUCK ve GILL 2000). Kutup gelgit etkisinin yükseklikte en çok 25 mm, yatay doğrultuda ise en çok 7 mm'ye ulaşabildiği belirlenmiştir (KOUBA 2009).

3. Okyanus yüklemesi (Ocean Loading):

Okyanus gelgitlerinin alttaki yer kabuğuna baskısı olarak tanımlanabilir. Günlük ya da yarım günlük periyotlar gösterir. Yeryüzü gelgitine göre etkisi daha küçüktür, yerel etki gösterir ve sabit kısmı yoktur. 24 saat süreli statik gözlemlerde ve okyanus kıyısından uzaktaki (> 1000 km) istasyonların hesabında göz ardı edilebilir. Ancak, istasyon okyanusa yakınsa ve troposferik ıslak bileşen ve alıcı saat hatası hesaplanacaksa, 24 saatlik statik gözlemlerde bile bu etki mutlaka dikkate alınmalıdır (KOUBA 2009). Aksi durumda okyanus yüklemesi troposferik etki ve alıcı saat hataları olarak çözümlere yansımaktadır (DRAGERT vd. 2000).

4. Katı yeryuvarı gelgiti (Solid Earth Tides):

Katı yeryuvarı, aslında okyanus gelgitine neden olan çekim kuvvetlerine karşı yeteri kadar esnek yapıdadır. Gelgitler nedeniyle oluşan düşey ve yatay doğrultudaki istasyon yer değiştirmeleri küresel harmoniklerle (Love Number h_{nm} ve Shida number l_{nm}) ifade edilmektedir. İstasyon konumlarında 1 mm mertebesinde doğruluklar hedefleniyorsa dikkate alınması gereken bir etkidir (McCARTHY ve PETIT 2003). 5 mm doğruluk için gelgit teriminin ikinci dereceye kadar alınması ve yükseklik düzeltmesinin yapılması yeterlidir (McCARTHY 1989). Gelgit düzeltmesi, enlem bağımlı sabit kısım ve periyodik kısım olmak üzere iki bileşenle ifade edilmektedir. Bu düzeltme ölçü noktası mutlak konumunda yatay doğrultuda 5 cm, radyal doğrultuda 30 cm değerlerine ulaşabilmektedir. Periyodik kısım, 24 saatlik statik gözlem yapılarak ortalama bir değere getirilmektedir. Ancak sabit kısım (orta enlemlerde 12 cm kadar) 24 saatlik statik gözlem ile giderilememektedir. Bu nedenle, gelgit etkileri hesaplamalarda ITRF ile uyumlu olarak dikkate alınmalıdır. Bu etkinin ihmal edilmesi özellikle hassas mutlak konum belirlemede (PPP: Precise Point Positioning) önemli sistematik hataya neden olacaktır (KOUBA 2009). Eğer bu etki hesaplamalarda dikkate alınmazsa, hassas mutlak konum belirlemede uzun süreli statik gözlem yapılsa bile ölçü noktası mutlak konumunda radyal doğrultuda 12 cm, kuzey doğrultusunda ise 5 cm sistematik hata olması olasılığı vardır. Diğer taraftan baz uzunluklarının 100 km'den küçük olduğu görece konum belirlemede ise bu etki bazın her iki ucunda da aynı kabul edilebileceğinden büyük oranda giderilmektedir (KOUBA 2009).

5. Uydu anteni faz merkezi kayıklıkları:

Uydulara bağlı düzeltmelerin temelini, uydu ağırlık merkezi ile uydu antenin faz merkezi arasındaki fark oluşturmaktadır. Çünkü uydu yörünge hesabında kullanılan uydulara etki eden kuvvetlerin modellendirilmeleri uydu ağırlık merkezine göre yapılmaktadır. Aynı şekilde, IGS sonuç yörünge ve saat bilgileri de uydu ağırlık merkezine göre yapılır. Oysa, uydu navigasyon mesajı anten faz merkezine göre yapılır.

Ayrıca, uydu gözlemleri de anten faz merkezine göre yapılmaktadır. Dolayısıyla, ağırlık ve faz merkezleri arasındaki kayıklık değerleri modellendirilmeli ve hesaplamalarda dikkate alınmalıdır (KOUBA 2009), (Şekil 2).



Şekil 2: Uydu anteni faz merkezi kayıklıkları

Uydularda L1 ve L2 taşıyıcılarının faz merkezi aynı kabul edilmektedir. Uydular Yer'in gölgesinden geçerken (yaklaşık 55 dakika) uydu antenleri kendini Güneş'e göre doğru olarak yönlendiremez ve böylece uyduların hatalı doğrultusundan dolayı uydu-alıcı uzaklıklarında çok uzun bazlar için 10 cm'ye varan hatalar ortaya çıkacaktır. Buna geometrik etki adı da verilmektedir. Bunun dışında bir de dinamik etki vardır. Uydu Yer'in gölgesine girdiğinde ortaya çıkan hatalı doğrultu nedeniyle uydunun güneş panelleri Güneş-uydu doğrultusuna dik olamayacağı için uydu yörünge hesaplamalarında kullanılan radyasyon ışıması parametrelerinin modellenmesi de neredeyse olanaksız hale gelmektedir (HUGENTOBLE vd. 2001).

05 Kasım 2006 tarihine kadar bu kayıklıklar için sıfır değerleri kullanılmıştır. Bu tarihten itibaren uydu ve alıcı antenleri mutlak faz merkezi değerleri kullanılmaya başlanmıştır.

6. Alıcı anteni faz merkezi kayıklıkları (PCV: Phase Center Variations):

GPS/GNSS uydu sinyalleri her doğrultudan geldiği için alıcı antenleri için durum uydu antenlerine göre daha da karmaşık hal almaktadır. Alıcı anteni faz merkezi konumu da bu doğrultulara bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu doğrultu bağımlılığına "alıcı anteni faz merkezi değişimleri" adı verilmektedir. Bu değişimler uyduların tersine L1 ve L2 için farklıdır. Çünkü söz konusu değişimler, anten-tipine bağımlı olarak farklılık göstermektedirler. Özellikle aynı ağda farklı anten modelleri kullanılıyorsa bu etki daha da önem kazanmaktadır. Bu etkinin dikkate alınmaması, baz uzunluğundan bağımsız olarak genellikle istasyon yüksekliğinde 10 cm'ye varan hataya neden olmaktadır. Eğer ağda aynı anten modeli kullanılıyorsa, bu etki kendini ölçek faktörü olarak göstermekte ve büyüklüğü yaklaşık 0.015 ppm olarak verilmektedir (HUGENTOBLE vd. 2001).

05 Kasım 2006 (GPS haftası 1400) tarihinden önceki hesaplamalarda IGS ürünleri kullanılırken, Dorne Margolin anten dışındaki modeller için görece faz merkezi değerleri kullanılmaktaydı. Bu tarihten sonra ise, farklı anten modellerinden gelecek hataları da dikkate alabilmek için, alıcı ve uydu antenleri için mutlak faz merkezi değerleri kullanılır.

maktadır. Hesaplamalarda farklı anten modelleri için PCV değerlerini içeren “igs05.atx” dosyası kullanılıyorsa ve bu dosya içerisinde ölçüme kullanılan anten modeline ilişkin bilgi yoksa, en uygun çözüm “sıfır” ya da “görelî PCV” değerlerinin kullanılmasıdır. Diğer taraftan, görelî ve mutlak uydular ve alıcı anteni faz merkezi değerleri karışık olarak kullanılırsa, özellikle yükseklik bileşeninde 10 cm’ye varan hatalar olmaktadır.

Eğer GNSS ağına değişik tip ve model antenler kullanılıyorsa ve troposferik parametreler de hesaplanacaksa, mutlak faz merkezi değişimlerini içeren PCV dosyaları mutlaka kullanılmalıdır. Ayrıca, PPP yöntemi ile konum belirlenecekse yine PCV dosyaları mutlaka kullanılmalıdır.

7. Uyduların faz dönmesi (Phase Wind Up):

Bilindiği gibi GPS uyduları sağa polarizasyonlu (RHCP:Right Hand Circularly Polarized) sinyal yayınlamaktadır. Bu nedenle, taşıyıcı dalga faz gözlemi, alıcı ve uyduların antenlerinin karşılıklı yönlendirilmelerine bağlıdır. Alıcı ya da uyduların anteninin kendi düşey eksenine etrafında bir tur döndürülmesi, taşıyıcı dalga fazının 1 dalga boyu kadar kaymasına neden olmaktadır. Bu etkiye “faz dönme etkisi” adı verilmektedir (Wu vd. 1993).

GPS/GNSS ölçülerinde bu ve benzeri hata kaynaklarından kaçınmak için, gerçek zamanlı GNSS (RTK:Real Time Kinematic) amaçlı ölçümler hariç statik ölçümlerde alıcı antenleri genelde kuzeye yönlendirilmektedir. Ancak, durum uyduların antenleri için biraz farklıdır. Uyduların antenleri güneş panelleri güneşe doğru ayarlanırken küçük dönemlere maruz kalmakta ve böylece uyduların geometrisi olumsuz etkilenmektedir. Daha da ötesi, uyduların belirli bir süre karanlıkta kaldığı (eclipsing) dönemlerde uyduların güneş panelleri tekrar güneşe doğru ayarlanmaktadır. Bunun sonucunda uyduların anteni için yaklaşık yarım saat süre içerisinde tam bir dönüşe karşılık gelen faz dönemleri söz konusu olmaktadır. Bu durumlarda da faz ölçülerine düzeltme getirilmesi gerekmektedir (BAR-SEVER 1996, KOUBA 2008). Bu etki 100 km’lik baz uzunluklarında ve görelî konum belirlemelerde göz ardı edilebilmektedir. Örneğin, 4000 km’lik bir baz uzunluğunda bu etkinin yaklaşık 4 cm’lik hataya neden olduğu belirlenmiştir (WU vd. 1993). Ancak, bu etkinin özellikle PPP uygulamalarında dikkate alınması çok önemlidir. Çünkü bu yöntemde IGS saat bilgisi hatasız kabul edilmektedir ve bu da hesaplamalarda yaklaşık yarım dalga boyu bir hataya karşılık gelebilmektedir.

1994 yılından bu yana tüm IGS analiz merkezleri bu düzeltmeleri hesaplamalarında uygulamaktadır. Bu etkinin göz ardı edilmesi ve IGS yörünge/saat bilgilerinin hatasız kabul edilmesi, konum ve alıcı saati hesabında dm mertebesinde hatalara neden olabilmektedir. Kinematik GNSS ölçülerinde ise bu hata kaynağı ikili faz farkları oluşturularak giderilmekte ve/veya alıcı saati hesabındaki parametrelere dahil (absorbe) olmaktadır.

8. İstasyon hızları (konum değişimleri):

GPS/GNSS istasyonları genel olarak periyodik hareketlere maruz kalmaktadır. Periyodik istasyon hareketlerinin büyük bölümü, yeryüzünün önemli bir kısmı için yaklaşık aynı kabul edilebilir. Görelî konum belirlemede 100 km’den

küçük baz uzunlukları için bu etkilerin yok edildiği kabul edilmektedir. Bunların büyüklüğü yaklaşık dm mertebesindedir.

Ancak;

- PPP yöntemi kullanılarak ve ITRF ile uyumlu istasyon Koordinatları belirlenmek isteniyorsa,
- 500 km ve daha uzun bazlarda görelî konum belirleme yöntemi kullanılacaksa,
- Jeofizik ve/veya ülke datumu belirleme amaçlı çalışmalar yapılyorsa

bu istasyon hareketleri IGS standartlarında belirtildiği/uygulandığı şekilde modellenmelidir. Öte yandan 1 cm’nin altında istasyon hareketlerine neden olan başka etkiler (atmosferik yüklenme, yeraltı suyu/toprak nemi, kar kütlesi etkisi vb.) de vardır.

9. IGS/IERS (International Earth Rotation Service) standartları ile uyum:

Yüksek doğruluklu GNSS değerlendirmelerinde sabit olarak alınan IGS ürünleri ve çözümleri kullanılırken IGS/IERS standartları ve tanımlarına (ağırlıklandırmalar, modellemeler vb.) uyulmalıdır. Bu durum başta PPP çözümleri olmak üzere uzun baz çözümlerinde özellikle önemlidir. Bu bağlamda, GNSS analizleri yapılırken IGS/IERS ürünleri kullanılıyorsa;

- * En son ITRF sürümünün kullanılması,
- * IGS yörünge bilgisi ve IGS Yer dönme parametreleri (ERP:Earth Rotation Parameters) bilgilerinin uyumlu olması,
- * IGS İstasyon log dosyalarının incelenmesi (anten faz merkezi değerleri, anten değişim bilgileri vb.) önemlidir.

10. Referans çerçeve (Datum):

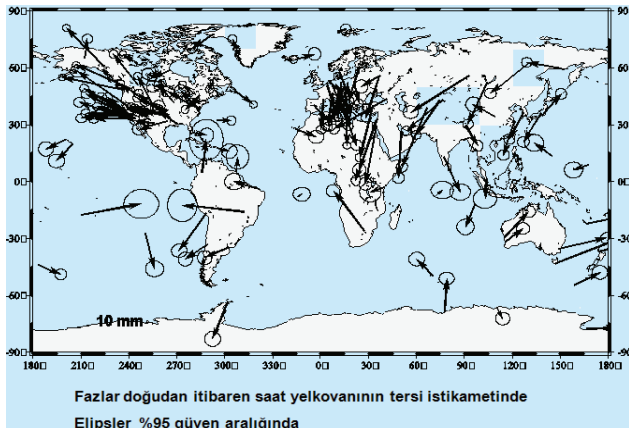
Hesaplamalarda kullanılan (sabit alınan) IGS yörünge ve saat bilgileri, belirlenen konumun referans sistemini tanımlamaktadır. Örneğin, IGS ürünlerini/çözümleri sabit alınarak yapılan PPP hesaplamaları doğrudan global IGS referans (ITRF) sistemindedir. Serbest ya da minimum zorlamalı görelî konum belirlemede ise, yine IGS yörünge/saat bilgilerinin sabit alındığı düşünüldüğünde, ağı yalnızca hassas yönlendirilmekte ve ölçeği belirlenmektedir. Sonuç olarak, GNSS ağı çözümlerine dahil edilecek tüm çözümler aynı referans sisteminde olmalıdır. ITRF çözümleri, yüksek frekanslı gelgit etki modellemeleri hariç, istasyonlarda lineer hareket olduğu varsayımına dayanmaktadır. ITRF çözümlerinde istasyon koordinatları ve bunların hızlarının verilmesinin nedeni budur. Oysa, en stabil istasyonlarda bile 10 mm’yi bulan hareketler olabilmektedir. Sonuç olarak, modellenemeyen bu etkiler belki de gelgit ya da yüklenme etkileri tarafından emilmektedir. Bu nedenle, söz konusu lineer yaklaşım gerçekte mm büyüklüğünde doğruluk için yeterli değildir.

IGS/IERS tarafından bu konuda da çalışma başlatılmış olup, bir sonraki ITRF koordinatlarının mm doğrulukla belirleneceği umulmaktadır.

4. GPS/GNSS Gözlemleri Periyodik Sinyallerinin Analiz Sonuçlarına Örnek Bir Çalışma (P.FANG 2002)

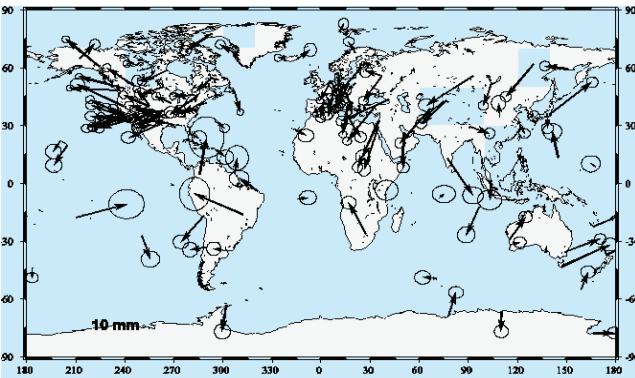
GNSS gözlemlerindeki birçok etkiyi, GNSS koordinat zaman serilerinde yarım günlük, günlük, 6 aylık, yıllık ve birkaç yıllık periyodik sinyaller olarak görmek olanaklıdır. Bu zaman serilerindeki periyodik sinyallerin nokta hızlarını da etkilediği birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur. Örneğin, IGS kaynaklı çalışmalarda, GNSS gözlemlerinin yıllık periyodik değişimlerinin genliğinin yatay koordinatlarda 1-3 mm (fazı 7-15°), düşeyde ise 4-10 mm (fazı 7-15°) olduğu belirlenmiştir (FANG 2002). Aynı çalışmada bu yıllık periyodik etkinin büyük oranda yukarıda anlatılmış olan etkilerden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmaktadır. Söz konusu çalışmada 128 IGS noktasının 1996 yılından itibaren 4.5 yıllık verileri değerlendirilmiştir. GAMIT/GLOBK yazılımı kullanılarak; IGS yörünge ve ERP sabit (sıkı koşullu) alınmış, ITRF kullanılmış, 128 noktalı ağ alt ağlara bölünmüş, troposferik parametreler hesaplanmış, anten PCV değerleri kullanılmış ve katı yeryüzü gelgit düzeltmesi getirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda özet olarak verilmektedir.

Önceki bölümde açıklanan düzeltmelerin getirilmemesi durumunda elde edilen nokta hız vektörleri Şekil 3'de görülmektedir.



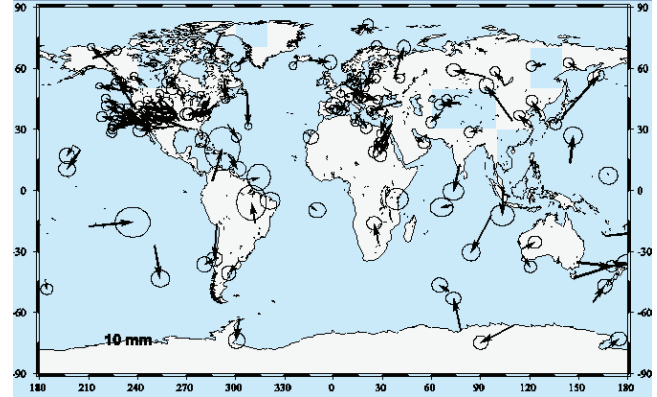
Şekil 3: Düzletme getirilmemiş hız vektörleri

Şekil 3, kutup gelgiti (McCarthy 1996) ve okyanus gelgiti (Scherneck 1991) düzeltmeleri getirilerek yeniden oluşturulmuş ve Şekil 4 elde edilmiştir.



Şekil 4: Kutup ve okyanus gelgit düzeltmesi getirilmiş hız vektörleri

Atmosferik kütle yüklemesi (Normal olarak yatay bileşen <math><0.5\text{mm}</math>, düşey bileşen <math><1.0\text{ mm}</math>, Avrasya ve Arap Yarımadasında ise $\sim 4.0\text{ mm}$) ile kar/toprak nem kütle yüklemesi (düşey bileşen en çok 2-3mm) ve diğer mevsimsel etki düzeltmelerinden sonra Şekil 5 elde edilmiştir.



Şekil 5: Tüm kütle yüklemesi etkileri giderilmiş hız vektörleri

2002 yılında yapılmış olan bu çalışmada henüz tek anlamlı ve yüksek doğruluklu çözümler vermediği için troposferik etki modellenmesi, yerli kaya termal genişmesi, diğer bazı çevresel etkiler dikkate alınmamıştır. Bu çalışmanın bir sonucu olarak jeofizik nedenler (bu çalışmada dikkate alınmamış olanlar dahil) ve model hataları dolayısıyla GNSS gözlemleri ile hesaplanan istasyon konumlarındaki yıllık düşey periyodik değişimler Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2: Yıllık düşey periyodik değişimler ve büyüklükleri

Etki Kaynağı	Etki Büyüklüğü (mm)
Kutup gelgiti	~4 mm
Okyanus gelgiti	~0.1 mm
Atmosferik kütle	~4 mm
Gelgit dışındaki okyanus kütlesi	2-3 mm
Kar/buz kütlesi	3-5 mm
Toprak nemi	2-7 mm
Anakaya termal genişmesi	~0.5 mm
Yörünge, faz merkezi ve troposferik model hataları	Kesin sonuç henüz yok.
Ağ dengeleme hatası	~0.7 mm (ağa göre değişir)
Farklı yazılımlardan kaynaklanan farklar	~2-3 mm, bazı noktalarda 5-7 mm

Bu çalışmada, kutup gelgiti ve diğer tüm kütle yüklemesi etkilerinin dikkate alındığı modellemelerde, söz konusu periyodik sinyallerin ancak %66'sının açıklanabildiği, geriye kalan %34'lük bölüme (artık sinyal, gürültü) ilişkin yeni parametre önerileri üzerinde çalışmaların devam ettiği bilgisi de yer almaktadır. Söz konusu çalışma tarihinden bu

yana, gerek modellemelerde gerekse tanımlamalarda birçok değişiklikler meydana gelmiştir.

Bu çalışmada dikkate alınmamış olan mutlak PCV değerleri, nutasyon modelindeki yeni tanımlamalar (IAU2000A), katı yeryüzü gelgit modelindeki ve troposferik modellemedeki yenilikler (Niell) gibi birçok gelişme nedeniyle günümüz GNSS gözlem ve hesaplamaları sonucunda elde edilen periyodik sinyallerin %80 oranında açıklanabildiği, geriye kalan %20'lik bölümün ise GNSS sistemlerinde son yıllarda yaşanan gelişmeler (yeni sinyaller, farklı frekanslarda yayın yapan yeni uydu sistemleri vb.) ve yeni parametre önerileri ile önümüzdeki 10 yıl içerisinde açıklanabilecek duruma geleceği öngörülmektedir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Son 20 yıl içerisinde uydu gözlemlerini değerlendirme stratejilerinde önemli gelişmeler olmuştur. Tüm bunların amacı;

* gelişmiş modeller ve

* daha iyi yaklaşımlar kullanarak sürekliliği olan yüksek doğruluklu konum/baz uzunluğu zaman serilerini belirlemektir.

Hesaplamalar sonucunda yüksek doğruluk ve süreklilik isteniyorsa, ölçü ve değerlendirmelerde IGS/IERS model ve standartlarının uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle, özellikle jeofizik ve jeodinamik amaçlı çalışmalar ile ülke datumu belirleme amaçlı hesaplamalarda, bugüne kadar yapılmış tüm ölçülerin (1994 ve sonrası) değerlendirme yazılımlarında ve modellemelerdeki yenilikler ışığında, ham ölçülerden başlayarak yeniden değerlendirilmesi artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Yeni yapılmakta olan GNSS gözlemlerinden, yüksek doğruluklu ve sürekliliği olan zaman serileri elde edebilmek için yukarıda (3. Bölüm) kısaca açıklanan etkiler dikkate alınmalı, jeofizik yorumlar bu sonuçlara göre yapılmalıdır.

Kaynaklar

- ION: **Global Positioning System**, Vol. I, Papers published in NAVIGATION, 1980.
- ICD-GPS-200: **Interface Control Document**, NAVSTAR GPS Space Segment, July 3, 1991.
- KAHVECİ M., F.YILDIZ: **Uydularla Konum Belirleme Sistemleri (GPS/GNSS): Teori-Uygulama**. Geliştirilmiş 4. Baskı, Nobel Yayın, 2009, Ankara.
- KAHVECİ M.: **Geçmişten günümüze GPS/GNSS ölçülerini değerlendirme stratejileri ve deformasyon analizine katkıları**. TUIJK Deformasyon Analizi Çalıştayı, 11-13 Kasım 2009, Konya.
- KAHVECİ M.: **Yer Dönme Parametrelerinin GPS İle Belirlenen Jeodezik Büyüklükler Üzerindeki Etkileri**. TUIJK Deformasyon Analizi Çalıştayı, 2002, İznik.
- STEIGENBERGER P.: **Reprocessing of a global GPS network**. Dissertation. Fakultät für Bauingenieur und Vermessungswesen, Technische Universität München, 2009.
- WEBER R., RAY J. and KOUBA J.: **Review of IGS Analysis Products**, Proceedings of IGS Network, Data and Analysis Center Workshop 2002, held in Ottawa, Canada, April 8-11.
- CASTRIQUE L. (1996) : **IERS Annual Report 1995**.
- McCARTHY D. D. and G. PETIT (eds.): **IERS Conventions (2003)**, IERS Technical Note 32.

- HERRING T. A. : **Precession and Nutation**. The Interdisciplinary Role of Space Geodesy. Lecture Notes in Earth Sciences No.22, Springer-Verlag, 1988.
- KLEUSBERG A., TEUNISSEN P. J. G. (Eds): **GPS for Geodesy** Springer Verlag, Germany, 1998.
- MONTENBRUCK O., GILL E.: **Satellite Orbits**. Springer – Verlag, 2000.
- KOUBA J.: **A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products**. Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada, May 2009.
- DRAGERT H., JAMES T.S. and LAMBERT A.: **Ocean Loading Corrections for Continuous GPS: A Case Study at the Canadian Coastal Site Holberg**, *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 14, pp. 2045-2048, July 15, 2000.
- McCARTHY D. D.: **IERS Standards**, IERS Technical Note 3, D.D. 1989.
- HUGENTOBLER U., SACHER S., FRIDEZ P.: **Bernese GPS Software Version 4.2**. Astronomical Institute University of Berne, February 2001.
- WU, J.T., WU S.C., HAJJ G.A., BERTIGER W.I., and LICHTENÍ S.M.: **Effects of antenna orientation on GPS carrier phase**, *Man. Geodetica* 18, pp. 91-98.
- UMBERGE J. and GENT G., 2000, **The Demise of selective availability and implication for the International GPS Service**, position paper presented at the IGS Network Workshop 2000, held in Oslo, Norway, July, *Phys. Chem. Earth (A)*, Vol. 26, No.6-8, 1993.
- BAR-SEVER, Y. E.: **A new module for GPS yaw attitude control**, Proceedings of IGS Workshop-Special Topics and New Directions, eds. G.Gendt and G. Dick, GeoforschungsZentrum, Potsdam, pp. 128-140, 1996.
- KOUBA, J.: **A simplified yaw-attitude model for eclipsing GPS satellites**, *GPS Solutions* 2008: DOI:10.1007/s10291-008-0092-, 2008.
- FANG, P.: **Analysis of Seasonal Signals in GPS Position Time Series**. Toulouse Workshop, Sept. 2002 CGPS@TG Working Group.
- McCARTHY, D.: **IERS Conventions, IERS Tech. Note 21**, IERS Cent. Bur., Obs. Paris, Paris, 1996.
- SCHERNECK, H.G.: **A parameterized Solid Earth Tide Model and Ocean Tide Loading Effects for global geodetic baseline measurements**, *Geophys. J. Int.* 106, pp. 677-694, 1991.