

IVS-CONT08 OTURUMLARINDAKİ VLBI ve GNSS ÖLÇÜLERİNİN ANALİZLERİNDEN KESTİRİMİ YAPILAN YER DÖNÜKLÜK PARAMETRELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Kamil Teke^{1,2}, Emine Tanır³, Harald Schuh¹

¹Vienna University of Technology, Institute of Geodesy and Geophysics, E128/1, Gusshausstrasse, 27-29, A-1040 Vienna, Austria, kteke@mars.hg.tuwien.ac.at; harald.schuh@tuwien.ac.at

²Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Beytepe Kampüsü, Ankara, Türkiye, kteke@hacettepe.edu.tr

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, etanir@ktu.edu.tr

ÖZET

Çok Uzun Baz Enterferometrisi (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) uzay jeodezi tekniği ölçülerinin analizinden tüm Yer dönme parametreleri (Earth orientation parameters, EOP) kestirilebilir. Küresel Navigasyon ve Uydular Sistemleri (Global Navigation and Satellite Systems, GNSS) ölçülerinin analizinden kutup gezinmeleri (x_p , y_p) duyarlı olarak kestirilir. Fakat GNSS, UT1-UTC (Yer'in uzaya göre mutlak dönüklüğü) ve nutasyon parametrelerini (X , Y), uydu yörünge parametreleri ile olan yüksek korelasyonlarından ötürü belirleyemez. GNSS, Yer'in dönme hızının zamana bağlı değişimini (zamana göre kısmi türevini: $d(UT1-UTC)/dt$) diğer bir ifade ile gün uzunluğunu (length of day: LOD) duyarlı bir şekilde kestirebilir. Bu çalışmada, Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisi (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS) tarafından planlanan ve gerçekleştirilen 15 günlük sürekli VLBI oturumlarının (IVS-CONT08), Vienna VLBI yazılımı ile (Vienna VLBI Software, VieVS) analizi yapılmıştır. VLBI oturumlarının analizi sonucu UTC (Universal Time Coordinated) tam saatlerinde (örneğin; 15:00 UTC, 16:00 UTC) kestirimi yapılan Yer dönüklük parametreleri (Earth rotation parameters, ERP), aynı epoklarda (UTC tam saatleri) GNSS ölçülerinden kestirimi yapılan ERP ve yüksek frekanslı - ERP (HF-ERP) jeofizik modellerinden (örneğin, okyanus gel-gitlerinin ERP üzerindeki etkisi) elde edilenler temel açıklayıcı istatistik ve spektral analiz yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Kutup gezinmelerinde prograde 24 saat periyodunda ~100 ila ~160 mikro açı saniyesi (10^6 açı saniyesi) genliğinde ve gün uzunluğunda (LOD) prograde 24 saat periyodunda ~50 mikro saniye (10^6 zaman saniyesi) genliğinde anlamlı uyumsuzluklar görülmüştür. Bu uyumsuzlukların nedenlerinden biri, VLBI ölçülerinden kestirimi yapılan ERP parametrelerinin üzerinde herhangi bir mutlak veya bağıl kısıtlayıcı denklem uygulamamış olmamız olabilir. VLBI ölçüleri, GNSS ölçüleri ve HF-ERP modellerinden elde edilen kutup gezinmesi koordinatları ve gün uzunluğu değerleri genliklerinin retrograde ve prograde 12 saat periyodunda iyi uyum gösterdikleri belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: VLBI, GPS/GNSS, Yer dönme parametreleri (EOP), Yer dönüklük parametreleri (ERP), CONT08 oturumları

ABSTRACT

COMPARISON OF EARTH ORIENTATION PARAMETERS ESTIMATED FROM THE ANALYSIS OF VLBI AND GNSS OBSERVATIONS DURING IVS-CONT08 SESSIONS

All Earth orientation parameters (EOP) can be estimated from the analysis of the observations of space geodetic technique, Very Long Baseline Interferometry (VLBI). Polar motion coordinates (x_p , y_p) can be estimated precisely from the analysis of the Global Navigation and Satellite Systems (GNSS) observations. However, GNSS cannot observe (sense) UT1-UTC (Earth phase of rotation) and nutation parameters (X , Y) (celestial intermediate pole, CIP coordinates in space, e.g. in ICRF2 celestial frame) because of the high correlation between the orbital parameters of the GNSS satellites and the nutation offsets. GNSS have the capability to observe the rate of the Earth phase of rotation (the partial derivative of UT1-UTC with respect to time, $d(UT1-UTC)/dt$). In other words GNSS can observe length of day (LOD) precisely. In this study, 15 days long continuous VLBI sessions (IVS-CONT08), planned and carried out by International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS), were analyzed using Vienna VLBI Software, VieVS. Earth rotation parameters (ERP: x_p , y_p , UT1-UTC) observed by VLBI and GNSS (for the case of GNSS, LOD) were estimated hourly at the same UTC integer hours (e.g. 15:00 UTC, 16:00 UTC) and compared with those calculated from the high frequency-ERP (HF-ERP) geophysical models (i.e. effects of the ocean tidal mass redistribution on ERP) using basic descriptive statistics and spectral analysis methods. Amplitudes of the polar motion coordinate time series at prograde 24 hour period show discrepancies at about 100 to 160 micro arc seconds (μs) between VLBI, GNSS, and HF-ERP models. LOD amplitudes differ at prograde 24 hour period at about 50 micro seconds (μs) between VLBI, GNSS, and HF-ERP models. One of the reasons of these discrepancies may be due to the parameterization of the analysis of VLBI observations where we did not introduce any absolute or relative constraints on the ERP estimates. Spectra of the polar motion and LOD time series at 12 hour retrograde and prograde were found out in a good agreement between VLBI, GNSS, and HF-ERP models.

Keywords: VLBI, GPS/GNSS, Earth orientation parameters (EOP), Earth rotation parameters (ERP), CONT08 sessions

1. GİRİŞ

Yer-sabit, Yer-merkezli, ekvatorial yersel koordinat sistemi (Earth-fixed, geocentric, equatorial terrestrial coordinate system) konvansiyona (varsayıma) dayalı bir referans sistemi olup Uluslararası Yersel Referans Sistemi (International Terrestrial Reference System, ITRS) olarak adlandırılır. Uzay-sabit, ekvatorial (gök ekvatoru) (Space-fixed, equatorial celestial) göksel koordinat sistemi Uluslararası Göksel Referans Sistemi (International Celestial Reference System, ICRS) olarak adlandırılır. Orijini Yer'in ağırlık merkezi ile çakışık olanına Yer-merkezli Göksel Referans Sistemi (Geocentric Celestial Reference System, GCRS), orijini Güneş sisteminin ağırlık merkezi ile çakışık olanına Barisentrik Göksel Referans Sistemi (Barycentric Celestial Reference System, BCRS) denilmiştir.

Uzaya göre dönüklüğü olmayan durağan (stable) gök cisimleri galaksimiz dışındaki başka galaksilerdir. Bu uzay cisimlerine kuazar (quasi-stellar radio source, quasar) denilmektedir. Bu gök cisimlerinin konumları (declination, right ascension) BCRS'de tanımlıdır. Diğer bir ifade ile örneğin, ICRF2 gök referans çatısı (katalogu), ağırlık merkezi güneş sisteminin ağırlık merkezi olan, üçüncü eksen UTC 12:00, 2000.0 tarihindeki gök ekvatorunu güneş sisteminin ağırlık merkezinde dik kesen, birinci eksen ise aynı epokdaki ilk bahar noktasından geçen bir koordinat çatısıdır.

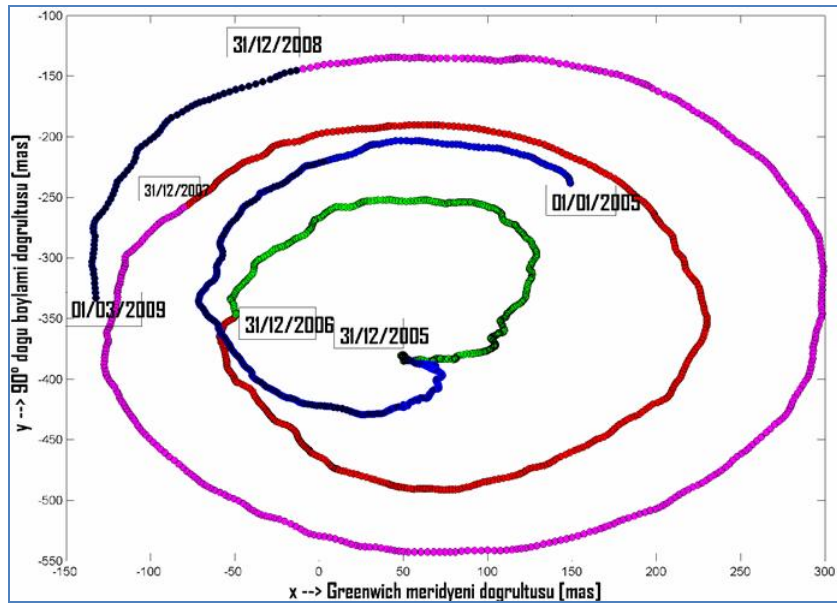
ITRS gerçekleştirmeleri (ITRF, örneğin, ITRF2008) farklı uzay jeodezik tekniklerden elde edilen datumdan bağımsız normal denklem sistemlerinin inter-teknik kombinasyonu ile elde edilir. Her bir uzay jeodezik tekniğinin farklı analiz merkezlerinin ürettiği datumdan bağımsız normal denklem sistemlerinin haftalık bazda teknik içi kombinasyonu (intra-technique combination) yapılır. Her hafta için oluşturulan her bir tekniğe ait datumdan bağımsız normal denklem sistemlerinin yerel bağlantı (local tie) ölçüleri kullanılarak teknikler arası kombinasyonu (inter-technique combination) gerçekleştirilir. Yerel bağlantı ölçüleri aynı yerleşkedeki farklı uzay jeodezik tekniklerinin antenlerinin referans noktalarını (antenna reference point) birleştiren lokal toposentrik veya global kartezyen koordinat sisteminde tanımlı baz vektörleridir. Yerel bağlantı ölçüleri ile oluşturulan pseudo-ölçü denklemlerinin normal denklem sistemleri ile datumdan bağımsız gerçek ölçülerle oluşturulan normal denklem sistemleri katsayıları ve sabitleri her bir ortak bilinmeyen için birbirleri ile toplanarak (accumulating) veya bloklar halinde birleştirilerek (stacking) inter-teknik kombinasyonun çözümüne esas olan katsayılar matrisi (N) ve sabitler vektörü (b) oluşturulur. Bağlantı ölçüleri için yazılan pseudo-ölçü denklemlerine verilecek ağırlıklar bağlantı ölçüsünün duyarlılıkları ile doğru orantılıdır (duyarlık yüksek ağırlık yüksek).

ITRS ve ICRS arasında zamana bağlı değişen geometrik (kinematik) bir ilişki vardır. Bu ilişki toplam beş Yer dönme parametresi (Earth orientation parameters, EOP) ile ortaya konulur. Yer'in ortalama dönme eksenini kuzey kutbunun gök küresindeki izdüşümü, Uluslararası Astronomi Birliği (International Astronomical Union, IAU) 2000 konvansiyonlarında: "Gök Ortalama Kutbu" (Celestial Intermediate Pole, CIP) olarak isimlendirilmiştir ve varsayıma dayalı olarak tanımlanmıştır. CIP'nin uzaya göre dönüklüğü olmayan (No-Net-Rotation koşulunu sağlayan) bir gök koordinat sistemindeki (örneğin, International Celestial Reference Frame2, ICRF2) zamana bağlı konum değişimine (gök küresindeki izine) nutasyon denilmektedir. Her bir epok için iki adet nutasyon ofseti $((X, Y)_{IAU/2000\ A}, (\Delta X, \Delta Y)_{IERS05\ C04}, (dX, dY)_{VLBI})$ tanımlanır. Yer'in ortalama dönme ekseninin, Yer sabit bir koordinat sistemine göre dönüklüğü ise kutup gezinmesi $((x_p, y_p)_{IERS05\ C04}, (\Delta x_p, \Delta y_p)_{HF-ERP\ models}, (dx_p, dy_p)_{VLBI})$ olarak adlandırılır. Kutup gezinmesi, Yer'in ortalama dönme eksenini kuzey kutbunun kabuk (ITRF, örneğin, International Terrestrial Reference Frame, ITRF2008) üzerindeki zamana bağlı konum değişimi olarak da tarif edilebilir. Yer'in dönme hızı $(\Delta UT1 = UT1 - UTC)$ ise CRF ve TRF arasındaki üçüncü eksen dönüklüğüdür $(\Delta UT1_{IERS05\ C04}, \Delta UT1_{HF-ERP\ models}, dUT1_{VLBI})$. Her bir epok için üç adet Yer dönüklük parametresi (Earth Rotation Parameters, ERP : $x_p, y_p, \Delta UT1$) tanımlanır. Bu durumda, Yer sabit (TRF) ve Gök sabit (CRF) iki koordinat sistemi arasındaki dönüklükler toplam beş Yer dönme parametresi ile (Earth Orientation Parameters, EOP: $X, Y, x_p, y_p, \Delta UT1$) tek anlamlı modellenebilir veya izlenebilir (uzay jeodezik teknikleri ölçülerinin analizi sonucu kestirilebilir) (Moritz ve Mueller, 1987; Chao vd., 1991; Sovers vd., 1998; Capitaine vd., 2002; McCarthy ve Petit, 2004; Schuh, vd., 2008; Bizouard ve Gambis, 2009; Gross, 2009; Mathews, 2009; Boehm vd., 2010).

Bu çalışmada, CIP'nin ICRF'deki günlük (0:00 UTC) konumu (nutasyon), CIP'nin ITRF'deki UTC saat başlarındaki konumu (kutup gezinmesi) ve ITRF'nin ICRF ile olan üçüncü eksen (Z eksen) dönüklüğünün (Yer'in uzaya göre mutlak dönüklüğünün) UTC saat başlarındaki değerleri: VLBI ile kestirilenler, uzay jeodezik tekniklerinin kombinasyonundan elde edilenler (örneğin, IERS 05 C04: EOP kombinasyonu serisi (Bizouard ve Gambis, 2009)) ve modellerden hesaplananlar (örneğin, IAU 2000A presesyon-nutasyon modeli (McCarthy ve Petit, 2004)) ile karşılaştırılmıştır.

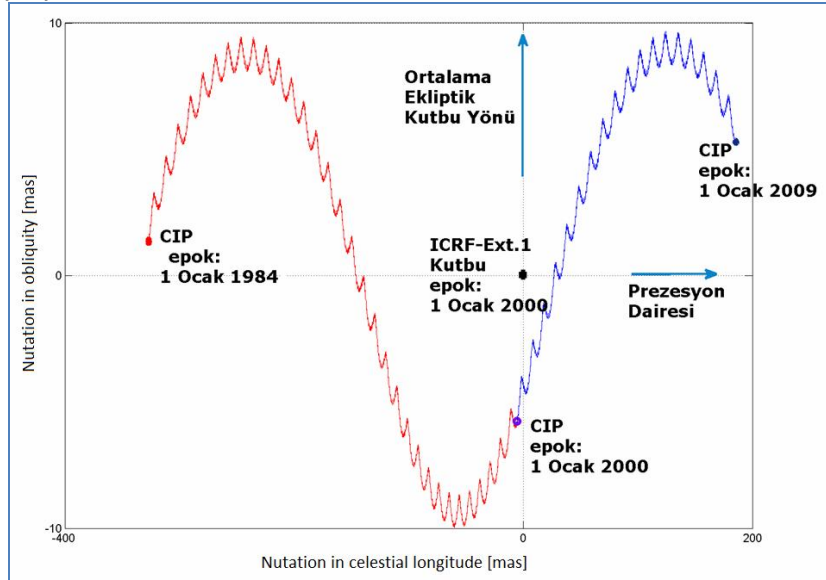
2. YER-SABİT (ITRS) ve GÖK-SABİT (GCRS) KOORDİNAT SİSTEMLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

İki adet üç boyutlu kartezyen koordinat sistemi (örneğin, ITRF2008-ICRF02) arasındaki dönüklükler üç Euler açısı ile tek anlamlı bilinir. Beş adet dönüklüğe (Earth Orientation Parameters, EOP: X , Y , x_p , y_p , $\Delta UT1$) konvansiyonlarda neden ihtiyaç duyulduğu ise eksenin uzay ve Yer kabuğu üzerindeki hareketlerinin ayrı ayrı izlenmesi ve arkasındaki fiziksel etkenlerin farklı olduğunun düşünülmesidir. Bilindiği gibi jeodezik kontrol noktaları Yer kabuğu üzerindedir. Bu noktalar ana kayalara tesis edildiği sürece yalnızca kabuğu temsil ederler. Fakat Yer kabuktan başka iç çekirdek, dış çekirdek, manto tabakası gibi farklı kalınlıklarda ve yoğunluklarda tabakalardan oluşur. Bu tabakaların kendi etraflarındaki dönmesi farklı periyotlarda gerçekleşir. Bunun doğal sonucu olarak Yer'in ortalama dönme eksenini tüm bu katmanların dönme eksenlerinin bileşenidir ve sadece kabuğu temsil etmez. Yer'in ortalama dönme eksenini (Yer'in açısal dönme momentini maksimum yapan eksen, şekil eksen, figure axis) kabuk üzerinde 18-21 metre çapında (0.6-0.7 açı saniyesi) saat ibresinin tersi yönünde daireler çizer. Bu harekete kutup gezinmesi denir (Şekil 1). Kutup gezinmesi, periyotları yaklaşık 430 gün (Chandler wobble), bir yıl ve konvansiyonlar (McCarthy ve Petit, 2004) gereği 2 günden az olan (Yüksek frekanslı – Yer dönüklük parametreleri, High frequency-Earth rotation parameters, HF-ERP) tüm anlamlı harmonik eksen hareketleridir. VLBI ve diğer uzay jeodezik tekniklerinin gözleyebildiği bu Yer'in ortalama dönme eksenini gök kutbunun (Celestial Intermediate Pole, CIP) kabuk üzerindeki izi (koordinatları) TRF'de tanımlıdır.



Şekil 1: Yer'in ortalama dönme eksenini gök kutbunun (CIP) kabuk üzerindeki izi (kutup gezinmesi) IERS 05 C04 EOP kombinasyon serisi (Bizouard ve Gambis, 2009) günlük (0:00 UTC) değerleri. Periyodu ~433 gün olan Chandler Wobble (Dairelerin Çapı ~0.6-0.7 açı saniyesi (as) ≈ 18-21 metre).

Yer'in ortalama dönme eksenini gök kutbu (CIP) uzayda seküler (lineer olmayan trend) ve periyodik (harmonik) hareketler yapar. Diğer bir ifade ile CIP'nin konumu uzaya göre dönüklüğü olmayan inersiyal bir koordinat sisteminde, örneğin, ICRS, zamana bağlı değişir (Şekil 2). CIP'nin bu hareketinin başlıca nedenleri Güneş, Ay ve diğer gök cisimlerinin dünya üzerindeki bozucu gravite potansiyelidir. Bunlarla birlikte diğer bir neden ise serbest çekirdek nutasyonudur (free core nutation, FCN). Yer'in farklı yoğunluklarda ve farklı kalınlıklardaki katmanlarının her birinin belirlediği açısal dönme momentini ve dolayısı ile dönme eksenini farklıdır. İç çekirdeğin manto ile farklı frekanslardaki dönme hareketi sonucu oluşan etki FCN olup nutasyon üzerinde kendisini gösterir (periyodu 2 günden fazla).

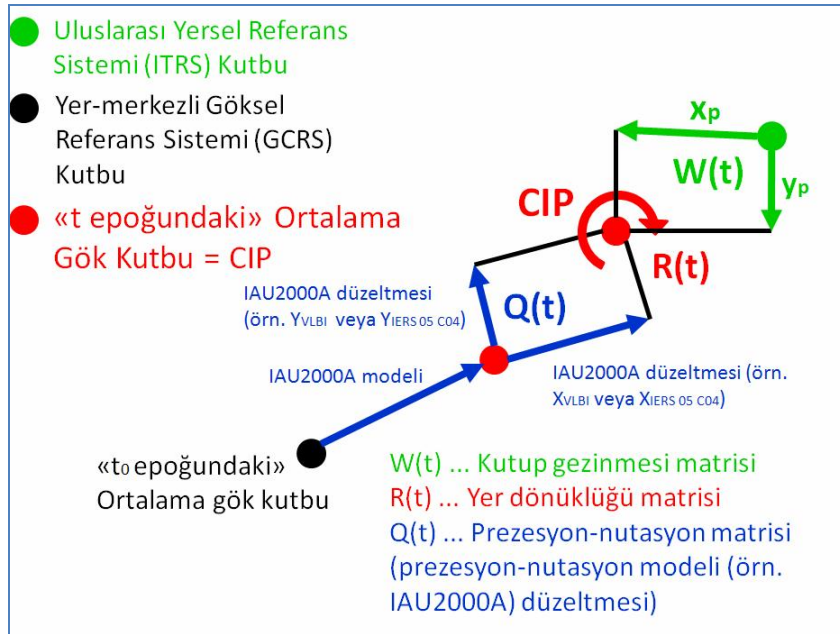


Şekil 2: IAU2000A presesyon-nutasyon modelinden hesaplanan günlük (0:00 UTC) nutasyon ofsetleri değerleri.

Yer-sabit ve gök-sabit koordinat sistemleri arasındaki ilişki bir dizi dönüklük matrisi ile aşağıdaki eşitlikle sağlanır:

$$X_{GCRS} = Q(t) \cdot R(t) \cdot W(t) \cdot X_{ITRS} \quad (1)$$

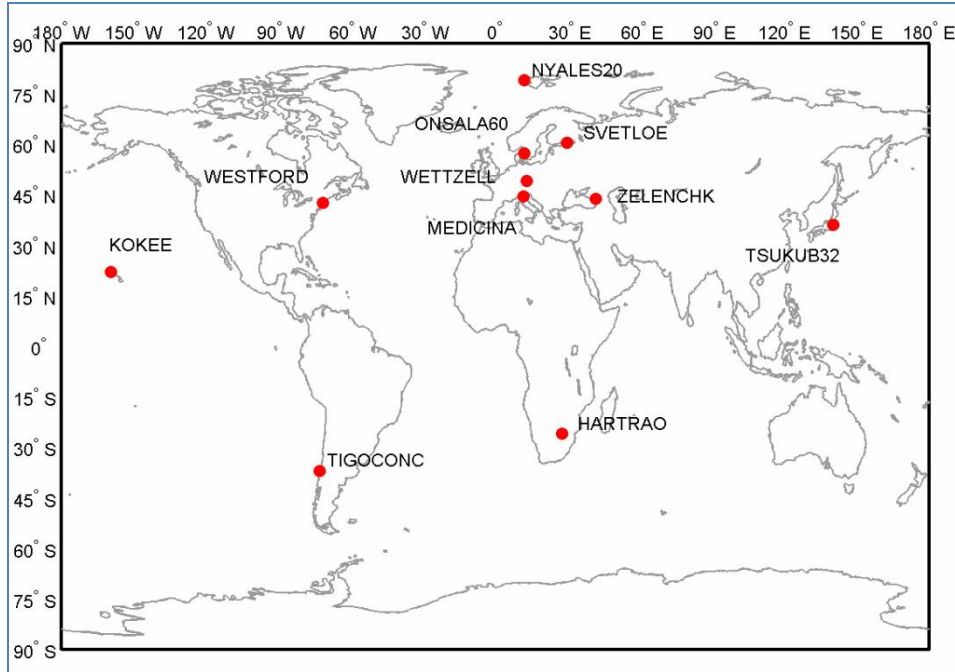
Eşitlik (1)'de verilen X_{GCRS} Yer üzerindeki bir noktanın t epoğunda GCRS'deki (Yer-merkezli, ekvatorial, Göksel Referans Sistemi) kartezyen koordinatlarını (birim vektör cinsinden), X_{ITRS} Yer üzerindeki bir noktanın t epoğunda ITRS'deki (Yer-merkezli, ekvatorial, Yersel Referans Sistemi) kartezyen koordinatlarını, $Q(t)$ t epoğunda CIP'nin GCRS'deki konumundan (nutasyon) kaynaklanan dönüşüm matrisini, $R(t)$ t epoğunda CIP (Yer'in ortalama dönme eksenini gök kutbunun) ekseninin uzaya göre dönüklüğünden kaynaklanan dönüşüm matrisini (3. eksen dönüklüğü) ve $W(t)$ t epoğunda CIP'nin ITRS'deki konumundan (kutup gezinmesi) kaynaklanan dönüşüm matrisini göstermektedir. Şekil 3'de ITRS ve GCRS (~BCRS) arasındaki geometrik ilişki basitçe tasvir edilmiştir. Göksel ve Yersel referans çatıları arasındaki geometrik ilişki IERS Konvansiyonları 2003, Bölüm 5'de ayrıntıları ile verilmiştir (McCarthy ve Petit, 2004).



Şekil 3: Yer-sabit ITRS ve gök-sabit GCRS koordinat sistemleri arasındaki ilişki (Schuh, vd., 2008).

3. IVS-CONT08 OTURUMLARI VLBI ÖLÇÜLERİNDEN GÜNLÜK NUTASYON ve YÜKSEK FREKANSLI (SAATLİK) YER DÖNÜKLÜK PARAMETRELERİNİN (EARTH ROTATION PARAMETERS, ERP) KESTİRİMİ

IVS-CONT08 oturumları Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisi (IVS) (Schlüter ve Behrend, 2007) tarafından planlanan ve gerçekleştirilen 15 günlük, 24 saatlik sürekli VLBI oturumlarıdır (Schuh ve Behrend, 2009). IVS-CONT08 VLBI oturumları IVS-CONT94, -CONT95, -CONT96, -CONT02 ve -CONT05 oturumlarının devamı niteliğinde olup bu VLBI oturum türünde VLBI uzay jeodezik tekniğinin ulaşabildiği en yüksek teknik ve duyarlık düzeyini test etmek ve belirlemek amacı hedeflenir. IVS-CONT08, 12-26 Ağustos 2008 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. 5 kıtayı kapsayan 11 noktalı bir polihedron ile Yer'i saran global bir geometri oluşturulmaya çalışılmıştır (Şekil 4). IVS-CONT08 oturumları diğer IVS-CONT oturumlarından farklı olarak UT ile 24 UT arasında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kestirimi yapılan global jeodezik parametrelerin (örneğin, EOP) zaman serilerindeki kopuklukların önlenmesi için VLBI istasyonlarındaki günlük kesintiler (sabit disk değişimi vs.) sıralı diziler şeklinde yapılmış aynı zamana rastlamasının önüne geçilmiştir (Schuh ve Behrend, 2009).



Şekil 4: IVS-CONT08 oturumlarındaki VLBI istasyonları: (Ny-Ålesund (Norveç), Svetloe (Rusya), Onsala (İsveç), Wettzell (Almanya), Medicina (İtalya), Zelenchukskaya (Rusya), Westford (ABD), Tsukuba (Japonya), Kokee Park (ABD), Hartebeesthoek (Güney Afrika Cumhuriyeti), Tigo Concepcion (Şili)).

IVS-CONT08 oturumlarının Viyana VLBI yazılımı (VieVS, Boehm vd., 2009) ile analizinde nutasyon ofsetleri parçalı lineer ofsetler formunda günlük (0:00 UTC) kestirilmiştir. Nutasyon ofsetlerinin yaklaşık değerleri Uluslararası Astronomi Birliği 2000A presesyon-nutasyon modelinden hesaplanmıştır $(X, Y)_{IAU2000A model}$. Nutasyon ofsetlerinin kestirimi yapılan değerleri, $(dX, dY)_{VLBI}$ yaklaşık değerleri $(X, Y)_{IAU2000A model}$ ile toplanarak

$$(X, Y) = (X, Y)_{IAU2000A model} + (dX, dY)_{VLBI} \quad (2)$$

şeklinde elde edilir. IVS-CONT08 oturumlarındaki VLBI ölçülerinin analizinde Gauss Markoff modeli en küçük kareler (EKK) kestirim yöntemi kullanılmıştır. Nutasyon ofsetlerinin kestiriminde parçalı lineer ofsetler arasında zorlayıcı bağıl kısıtlayıcılar uygulanmıştır ($10^{-4} mas/gün$). Nutasyon ofsetlerinin kestiriminde uygulanan parametrisasyon Tablo 1 ve Tablo 2'de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 1: IVS-CONT08 oturumlarındaki VLBI ölçülerinin analizi için seçilen genel parametrisasyon (Yer dönme parametrelerinin (EOP) kestirimine yönelik)

Öncül CRF	ICRF2 (tüm kuazar koordinatları katalog koordinatlarına sabitlendi).
Öncül TRF	VTRF2008 (NNT ve NNR koşul denklemleri).
Öncül Yer dönüklük parametreleri (Earth rotation parameters, ERP)	Tablo 2 ve 3'e bakınız.
Öncül nutasyon ofsetleri	Tablo 2 ve 3'e bakınız.
Parametre kestirimi öncesi VLBI antenlerinin TRF koordinatlarına getirilen düzeltmeler	Katı Yer gel-gitleri (McCarthy ve Petit (2004), Bölüm 7.1.1). Okyanus gel-git yüklemeleri (FES 2004, Lyard vd., 2006). Seküler ve gel-git atmosfer yüklemeleri (Petrov ve Boy, 2004). Kutup gel-gitleri (McCarthy ve Petit (2004), Bölüm 7.1.4).

IVS-CONT08 Oturumlarındaki VLBI ve GNSS Ölçülerinin Analizlerinden Kestirimi Yapılan yer Dönüklük parametrelerinin karşılaştırılması

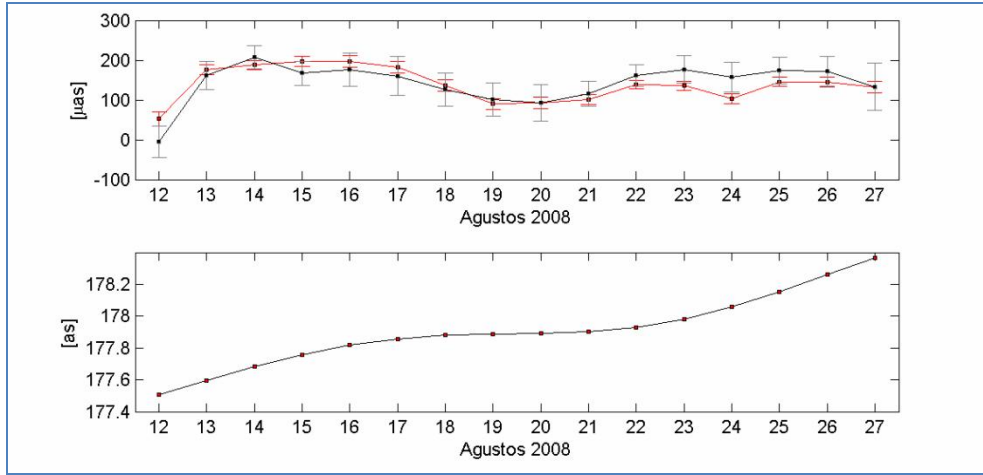
Parametre kestirimi öncesi ölçülere getirilen düzeltmeler	Antenlerin termal deformasyonları (Nothnagel, 2009) Antenlerin eksen kesişmesi ofset düzeltmeleri.
Troposfer ızdışım fonksiyonları	Vienna İzduşım Fonksiyonu (Vienna Mapping Function, VMF1) (Boehm vd., 2006).
Kaba hatalı ölçüler	$v_i \geq 3m_{v_i}$ olan ölçüler atılmıştır.
Kestirimi yapılan jeodezik parametreler:	
Saat hataları	İkinci derece polinom uydurularak katsayıları en küçük kareler (EKK) yöntemi ile kestirildi (ilk EKK kestirimi). UTC saat başı (örneğin; 12:00, 13:00) parçalı lineer ofsetler, tüm 24 saatlik oturum için bir rate ve bir kuadratik terim EKK yöntemi ile kestirildi (ikinci EKK kestirimi). Parçalı lineer ofsetler arasında bağıl gevşek kısıtlayıcılar uygulandı ($0.5 \text{ ps}^2 / s = 13 \text{ mm/saat}$).
Troposfer zenit gecikmesi (nem) (zenith wet delay)	UTC yarım saat başı (30 dakika, örneğin; 12:30, 13:00, 13:30) parçalı lineer ofsetler kestirildi. Ofsetler arasında bağıl gevşek kısıtlayıcılar uygulandı ($0.7 \text{ ps}^2 / s = 10.6 \text{ mm/30 dakika}$).
Troposfer gradyanları (troposphere gradients)	6 saat aralıklı (UTC tam saatleri, örneğin; 6:00, 12:00, 18:00) parçalı lineer ofsetleri kestirildi. Bağıl gevşek kısıtlayıcılar kullanıldı ($2 \text{ mm/gün} = 0.5 \text{ mm/6 saat}$).
Yer dönme parametreleri (Earth orientation parameters, EOP)	Tablo 2 ve 3'e bakınız.
VLBI anteni TRF koordinatları	Her oturum (gün) için bir ofset kestirildi. NNT ve NNR denklemleri (6 adet) VTRF2008 TRF kataloğu koordinatları ile oluşturuldu ve datumdan bağımsız normal denklem sistemine uygulandı. Böylece her bir oturumun analizi sonucu kestirilen VLBI antenleri koordinatlarının belirlediği TRF ile VTRF2008 koordinat sistemi arasında öteleme ve dönüklük olmaması (öteleme ve dönüklüklerin sıfır olması) koşulu sağlanmış oldu.

Tablo 2: Yer'in ortalama dönme eksenini gök kutbunun (celestial intermediate pole, CIP) uzaydaki günlük (0:00 UTC) konumunun (dX , dY) zamana bağlı değişiminin (nutasyon) VLBI ölçüleri ile izlenmesi için IVS-CONT08 oturumları analizi parametrisasyonu

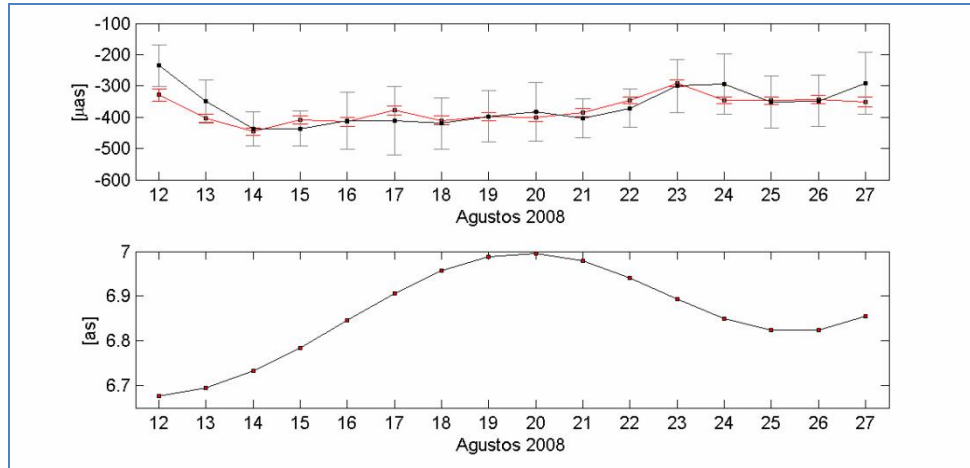
Öncül Yer dönüklük parametreleri (Earth rotation parameters, ERP)	IERS 05 C04 EOP kombinasyonu serisi (Bizouard ve Gambis, 2009) ve HF-ERP modellerinden* hesaplanan ERP değerlerinin toplamı. *Okyanus gel-gitleri ve libration (McCarthy ve Petit (2004), Bölüm 5 ve 8).
Öncül nutasyon ofsetleri	IAU2000A presesyon-nutasyon modeli (McCarthy ve Petit, 2004).
Yer dönme parametreleri (Earth orientation parameters, EOP) kestirimi	Tüm beş EOP aynı epoklarda, 0:00 UTC (günlük) kestirildi. Parçalı lineer ofsetler arasında zorlayıcı bağıl kısıtlayıcılar uygulandı (10^{-4} mas/gün tüm EOP parametreleri için).

Şekil 5 ve Şekil 6'da üstteki çizimlerde IVS-CONT08 oturumları boyunca VLBI ölçülerinden 0:00 UTC epoklarında kestirimi yapılan parçalı lineer dX ve dY nutasyon ofsetleri formal hataları ile birlikte micro açı saniyesi (μas) biriminden verilmiştir. Aynı şekillerde 0:00 UTC epoklarındaki IERS 05 C04, EOP kombinasyonu serisindeki (Bizouard ve Gambis, 2009) $\Delta X_{IERS05 \text{ C04}}$ ve $\Delta Y_{IERS05 \text{ C04}}$ nutasyon ofsetleri formal hataları ile birlikte görülmektedir. Kombinasyon serisi nutasyon ofsetleri ile VLBI oturumları analizi sonucu elde edilenler arasındaki farkın az olmasının bir nedeni nutasyon ofsetini kestiren tek uzay jeodezik tekniğinin VLBI olması ve diğer tekniklerin nutasyon ofsetleri yerine zamana bağlı değişimlerini (türevini) kestirebilmesi böylece VLBI tekniğinin nutasyon ofsetlerinin kombinasyonlarında ağırlığının fazla olmasıdır.

Şekil 5 ve 6'da alttaki çizimlerde kestirim epoklarında (0:00 UTC) IAU 2000A presesyon-nutasyon modelinden hesaplanan ve parametre kestiriminde yaklaşık değer olarak alınan nutasyon ofsetleri, $X_{IAU2000A}$, $Y_{IAU2000A}$ mili açı saniyesi (mas) biriminden verilmiştir. IVS-CONT08 oturumları boyunca VLBI ölçülerinden 0:00 UTC epoklarında kestirimi yapılan parçalı lineer nutasyon ofsetleri formal hataları dX , [10, 19] μas aralığında ve dY , [11, 20] μas aralığındadır. IERS 05 C04 kombinasyon serisinin aynı epoklardaki değerlerinin formal hataları ise $\Delta X_{IERS05 \text{ C04}}$, [27, 60] μas aralığında ve $\Delta Y_{IERS05 \text{ C04}}$, [54, 109] μas aralığındadır. $dX - \Delta X_{IERS05 \text{ C04}}$ farkları (VLBI ölçülerinden kestirilen nutasyon değerleri ile IERS 05 C04 kombinasyon serisi değerleri farkı) [-54, +57] aralığında değişmektedir. $dY - \Delta Y_{IERS05 \text{ C04}}$ farkları ise [-94, +32] aralığındadır.



Şekil 5: Üstteki çizimde IVS-CONT08 oturumları boyunca VLBI ölçülerinden 0:00 UTC epoklarında kestirimi yapılan parçalı lineer dX nutasyon ofsetleri formal hataları ile birlikte kırmızı renkte görülmektedir. Aynı çizimde 0:00 UTC epoklarındaki IERS 05 C04, EOP kombinasyonu serisi $\Delta X_{IERS05\ C04}$ nutasyon ofsetleri formal hataları ile birlikte siyah renkte görülmektedir. Altteki çizimde 0:00 UTC epoklarındaki IAU 2000A presesyon-nutasyon modelinden hesaplanan $X_{IAU2000\ A}$ nutasyon değerleri görülmektedir.



Şekil 6: Üstteki çizimde IVS-CONT08 oturumları boyunca VLBI ölçülerinden 0:00 UTC epoklarında kestirimi yapılan parçalı lineer dY nutasyon ofsetleri formal hataları ile birlikte kırmızı renkte görülmektedir. Aynı çizimde 0:00 UTC epoklarındaki IERS 05 C04, EOP kombinasyonu serisi $\Delta Y_{IERS05\ C04}$ nutasyon ofsetleri formal hataları ile birlikte siyah renkte görülmektedir. Altteki çizimde 0:00 UTC epoklarındaki IAU 2000A presesyon-nutasyon modelinden hesaplanan $Y_{IAU2000\ A}$ nutasyon değerleri görülmektedir.

IVS-CONT08 oturumlarının Viyana VLBI yazılımı (VieVS, Boehm vd., 2009) ile analizinde Yer dönüklük parametreleri (ERP: x_p , y_p , $\Delta UT1$) parçalı lineer ofsetler formunda UTC tam saatlerinde (örneğin; 12:00, 13:00 UTC) kestirilmiştir. ERP yaklaşık değerleri günlük (0:00 UTC) IERS 05 C04, EOP kombinasyonu serisinden saat başlarına lineer enterpolasyon ile elde edilmiştir. ERP ofsetlerinin kestirimi yapılan değerleri: $(dx_p, dy_p)_{VLBI}$, $\Delta UT1_{VLBI}$ yaklaşık değerleri: $(x_p, y_p)_{IERS05\ C04}$, $\Delta UT1_{IERS05\ C04}$ ile toplanarak

$$\begin{aligned} (x_p, y_p) &= (x_p, y_p)_{IERS05\ C04} + (dx_p, dy_p)_{VLBI} \\ \Delta UT1 &= \Delta UT1_{IERS05\ C04} + \Delta UT1_{VLBI} \end{aligned} \quad (3)$$

şeklinde elde edilir. IVS-CONT08 oturumlarındaki VLBI ölçülerinin analizinde Gauss Markoff modeli en küçük kareler (EKK) kestirim yöntemi kullanılmıştır. Kestirimi yapılan ERP parçalı ofsetlerine mutlak veya bağıl hiçbir kısıtlayıcı uygulanmamıştır. ERP ofsetlerinin kestirimi için yapılan analizlerde uygulanan parametrisasyon Tablo 1 ve Tablo 3'de detaylı bir şekilde verilmiştir.

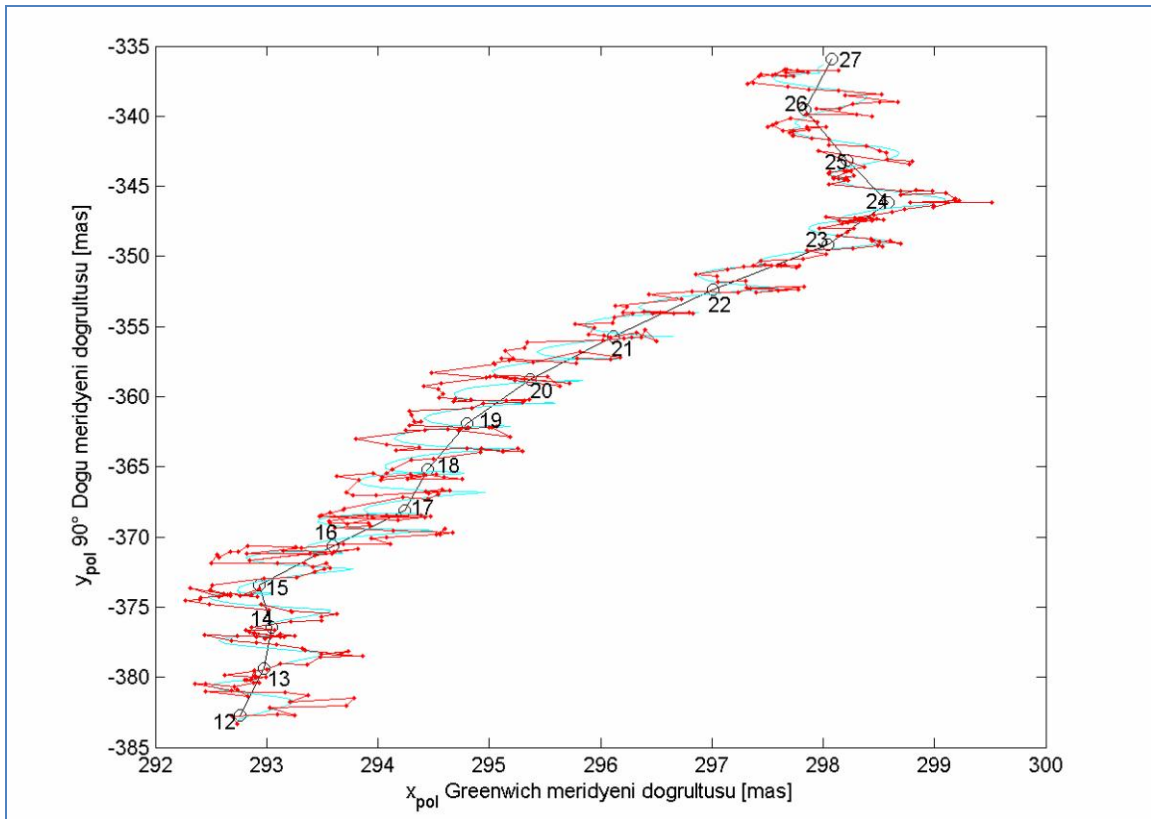
Tablo 3: Yüksek frekanslı - Yer dönüklük parametrelerinin (High frequency - Earth rotation parameters, HF-ERP) zamana bağlı değişiminin (kutup gezinmesi (x_p, y_p) ve Yer'in uzaya göre mutlak dönüklüğü, $\Delta UT1$) VLBI ölçüleri ile izlenmesi için IVS-CONT08 oturumları analizi parametrisasyonu

Öncül Yer dönüklük parametreleri (Earth	IERS 05 C04 EOP kombinasyonu serisi.
---	--------------------------------------

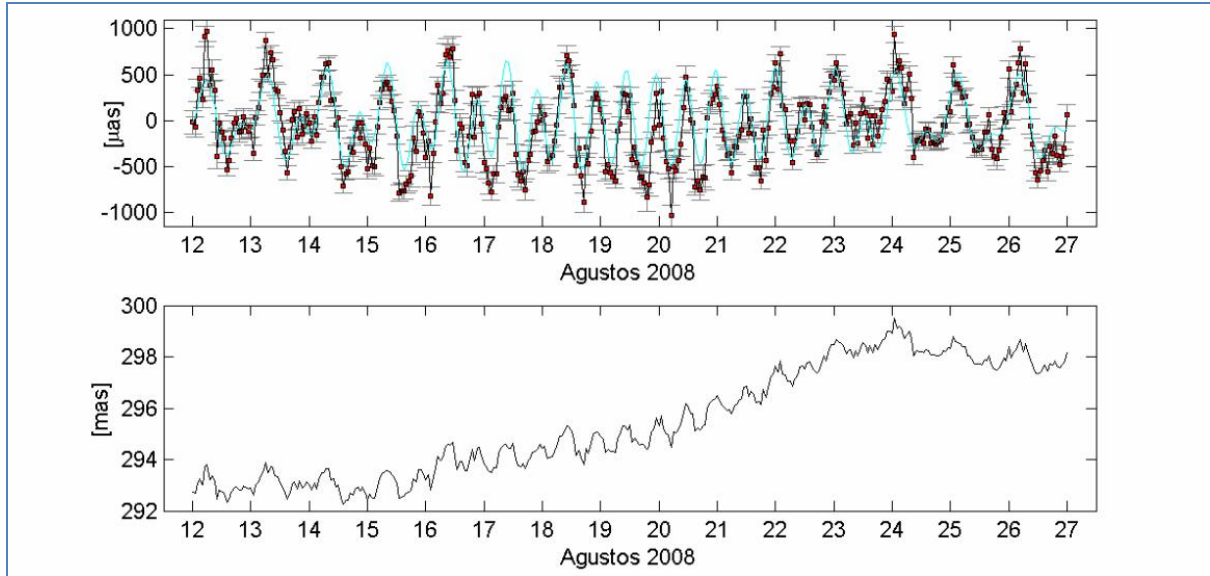
IVS-CONT08 Oturumlarındaki VLBI ve GNSS Ölçülerinin Analizlerinden Kestirimi Yapılan yer Dönüklük parametrelerinin karşılaştırılması

rotation parameters, ERP)	
Öncül nutasyon ofsetleri	IAU2000A presesyon-nutasyon modeli ve IERS 05 C04, EOP kombinasyonu serisi değerleri toplamı (McCarthy ve Petit, 2004).
Yer dönme parametreleri (Earth orientation parameters, EOP) kestirimi	Nutasyon ofsetleri öncül değerlerine sabitlendi. UTC saat başları epoklarında (1 saat aralıklı) ERP (kutup gezinmesi koordinatları (x_p, y_p) ve Yer'in uzaya göre mutlak dönüklüğü, $\Delta UT1$) parçalı lineer ofsetleri kestirildi. Kestirimi yapılan ERP parçalı ofsetlerine mutlak veya bağıl hiçbir kısıtlayıcı uygulanmadı.

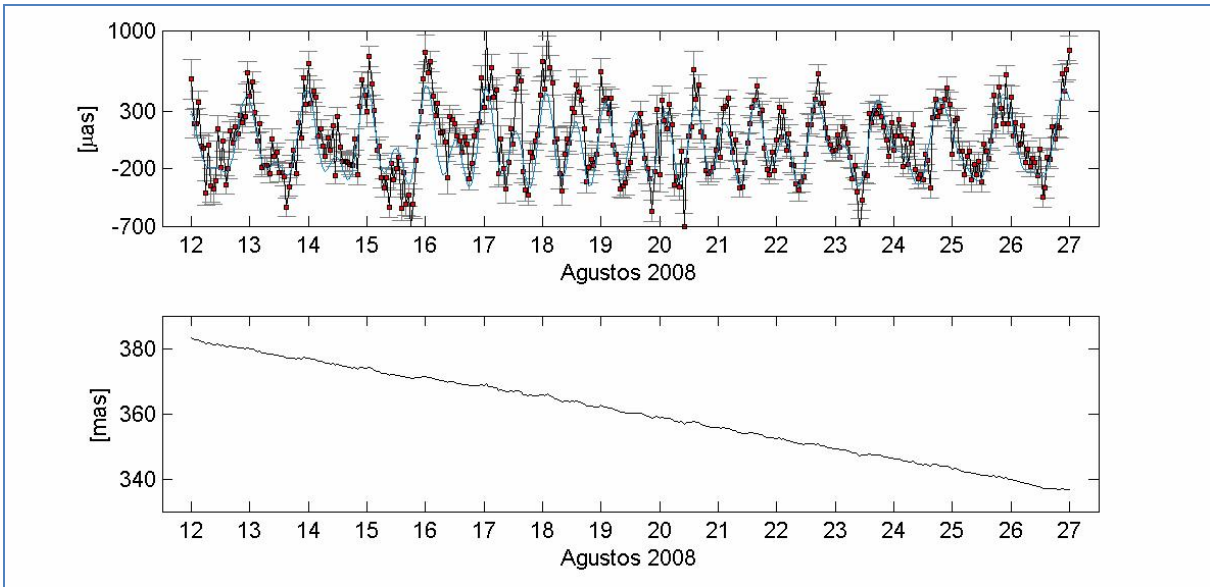
Şekil 7, 8, 9, 10, 11, ve 12'de IVS-CONT08 oturumları boyunca VLBI, GPS ölçülerinden kestirimi yapılan ve yüksek frekanslı - Yer dönüklük parametreleri (HF-ERP) modellerinden (okyanus gel-gitlerinin oluşturduğu kitle değişimlerinin Yer dönüklüklerine etkisi $(\Delta x, \Delta y)_{okyanus\ gel-git}$ (Ray vd., 1994; McCarthy ve Petit, (2004), Bölüm 8.2) ve bozucu gravite potansiyelinin Yer'in asimetrik olan kitleleri üzerinde oluşturduğu dönme momentinin Yer dönüklüklerine etkisi $(\Delta x, \Delta y)_{libration}$ (McCarthy ve Petit, (2004), Bölüm 5.5.1)) hesaplanan kutup gezinmesi koordinatları, Yer'in dönme hızı (uzaya göre mutlak dönüklüğü) karşılaştırmaları verilmiştir. Jeofizik modellerden hesaplanan ERP ile VLBI ve GPS ölçülerinden kestirilenler arasındaki uyum jeofizik modellerin başarısını göstermektedir.



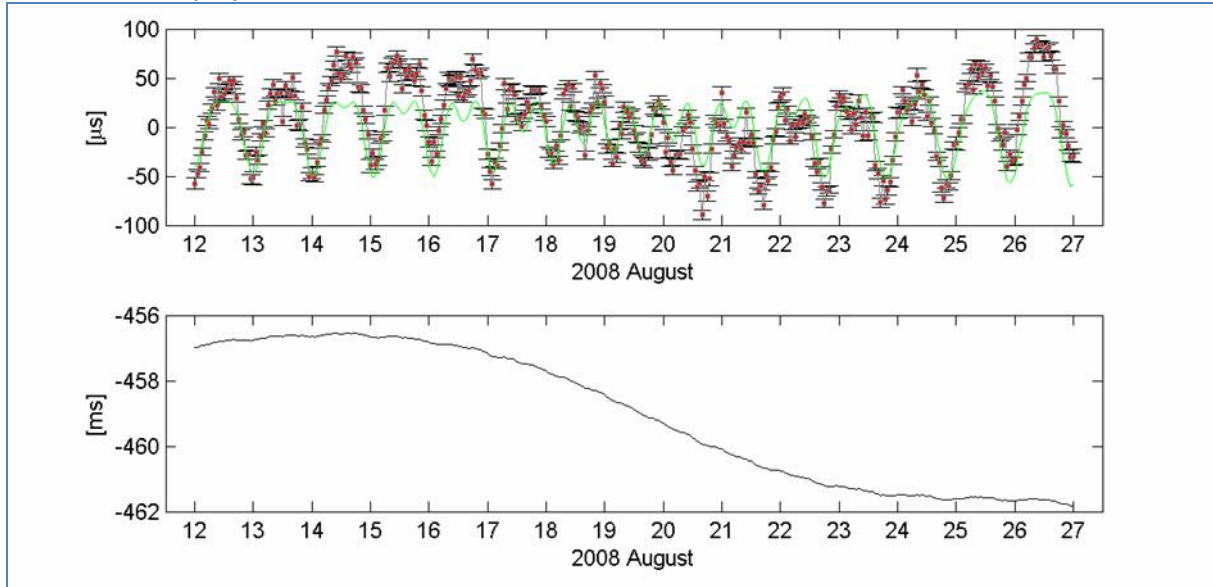
Şekil 7: Siyah halkalar 0:00 UTC epoklarındaki IERS 05 C04, EOP kombinasyonu serisi $(x_p, y_p)_{IERS\ 05\ C04}$ değerlerini göstermektedir. Halkaların yanındaki sayılar ise Ağustos 2008'in günlerini ifade etmektedir. Kırmızı çizgi üzerindeki noktalar IVS-CONT08 oturumları boyunca VLBI ölçülerinden kestirimi yapılan UTC saat başı epoklarındaki kutup gezinmeleri (dx_p ve dy_p) ile kestirimde yaklaşık değerler olarak alınan saat başlarına lineer enterpole edilmiş $(x_p, y_p)_{IERS\ 05\ C04}$ değerlerinin toplamını göstermektedir. HF-ERP modellerinden hesaplanan değerler, $(\Delta x, \Delta y)_{okyanus\ gel-git} + (\Delta x, \Delta y)_{libration}$ ile saat başlarına lineer enterpole edilmiş IERS 05 C04, EOP kombinasyonu serisi değerleri $(x_p, y_p)_{IERS\ 05\ C04}$ toplamı ise mavi çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 8: Yukarıdaki çizimde siyah çizgi üzerindeki kare noktalar IVS-CONT08 oturumları VLBI ölçülerinden UTC saat başları epoklarında kestirimi yapılan parçalı lineer dx_p ofset değerlerini (kutup gezinmesinin ilgili epoktaki Greenwich meridyeni doğrultusu koordinatı) formal hataları ile birlikte göstermektedir. Yine yukarıdaki çizimde HF-ERP modellerinden hesaplanan Δx değerleri mavi ile çizilmiştir. Alttaki çizimde ise UTC saat başlarına lineer enterpole edilmiş IERS 05 C04, EOP kombinasyonu serisi $(x_p)_{IERS05\ C04}$ değerleri ile VLBI ölçülerinden kestirimi yapılan parçalı lineer dx_p ofset değerleri toplamı görülmektedir.

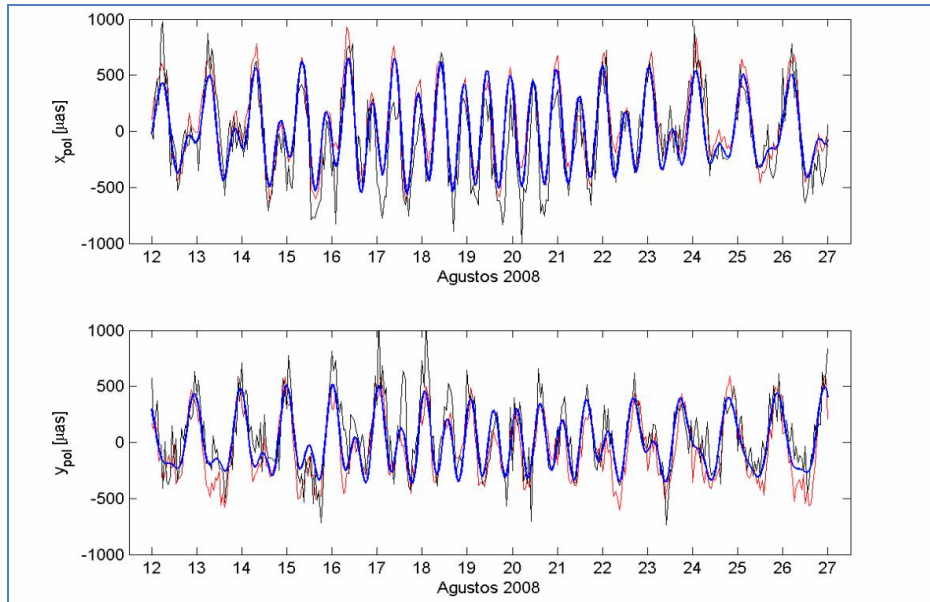


Şekil 9: Yukarıdaki çizimde siyah çizgi üzerindeki kare noktalar IVS-CONT08 oturumları VLBI ölçülerinden UTC saat başları epoklarında kestirimi yapılan parçalı lineer dy_p ofset değerlerini (kutup gezinmesinin ilgili epoktaki 90 derece doğu meridyeni doğrultusu koordinatı) formal hataları ile birlikte göstermektedir. Yine yukarıdaki çizimde HF-ERP modellerinden hesaplanan Δy değerleri mavi ile çizilmiştir. Alttaki çizimde ise UTC saat başlarına lineer enterpole edilmiş IERS 05 C04, EOP kombinasyonu serisi $(y_p)_{IERS05\ C04}$ değerleri ile VLBI ölçülerinden kestirimi yapılan parçalı lineer dy_p ofset değerleri toplamı görülmektedir.

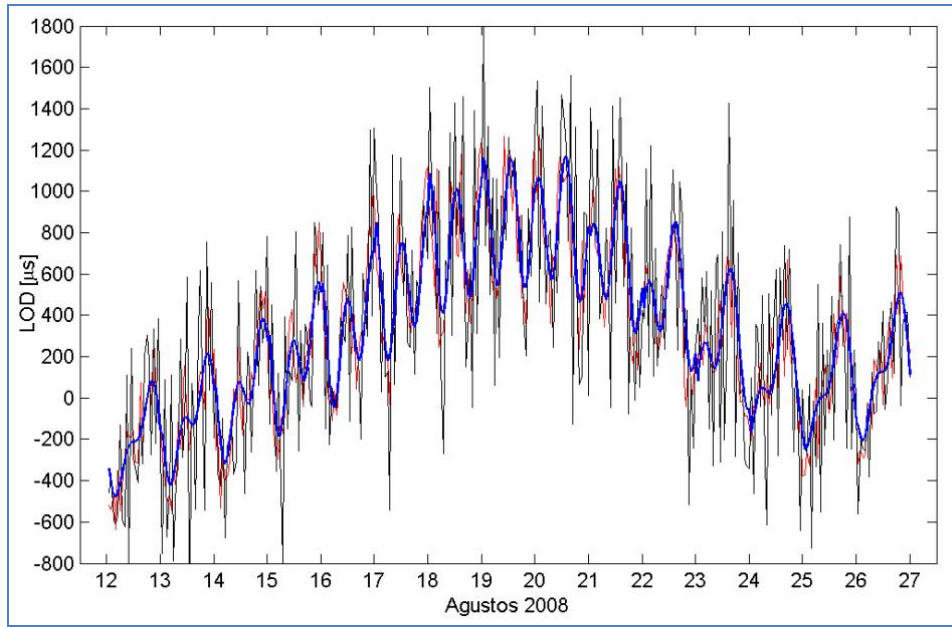


Şekil 10: Yukarıdaki çizimde siyah çizgi üzerindeki kare noktalar IVS-CONT08 oturumları VLBI ölçülerinden UTC saat başları epoklarında kestirimi yapılan parçalı lineer $dUT1$ ofset değerlerini (Yer'in uzaya göre mutlak dönüklüğünü) formal hataları ile birlikte göstermektedir. Yine yukarıdaki çizimde HF-ERP modellerinden hesaplanan $\Delta UT1$ değerleri mavi ile çizilmiştir. Altta çizimde ise UTC saat başlarına lineer enterpole edilmiş IERS 05 C04, EOP kombinasyonu serisi $\Delta UT1_{IERS05\ C04}$ değerleri ile VLBI ölçülerinden kestirimi yapılan parçalı lineer $dUT1$ ofset değerleri toplamı görülmektedir.

IVS-CONT08 oturumları boyunca VLBI ölçülerinden UTC saat başı epoklarında kestirimi yapılan Yer dönüklük parametrelerinin (ERP) formal hataları, dx_p , [59, 155] μas ; dy_p , [64, 174] μas ve $dUT1$, [3, 9] μs aralığındadır. GPS ölçülerinden UTC saat başı epoklarında kestirimi yapılan kutup gezinmesi koordinatlarının formal hataları, dx_p , [15, 20] μas ; dy_p , [17, 21] μas aralığındadır. $(dx_p)_{VLBI} - (\Delta x_p)_{HF-ERP}$ farklarının standart sapması 224.5 μas (fark vektörlerinin ortalama değeri (bias): -52.8 μas), $(dy_p)_{VLBI} - (\Delta y_p)_{HF-ERP}$ farklarının standart sapması 187.2 μas (bias: 58.1 μas), $(dx_p)_{GPS} - (\Delta x_p)_{HF-ERP}$ farklarının standart sapması 122.05 μas (bias: 54.1 μas), $(dy_p)_{GPS} - (\Delta y_p)_{HF-ERP}$ farklarının standart sapması 139.25 μas (bias: -57.5 μas) olarak hesaplanmıştır.

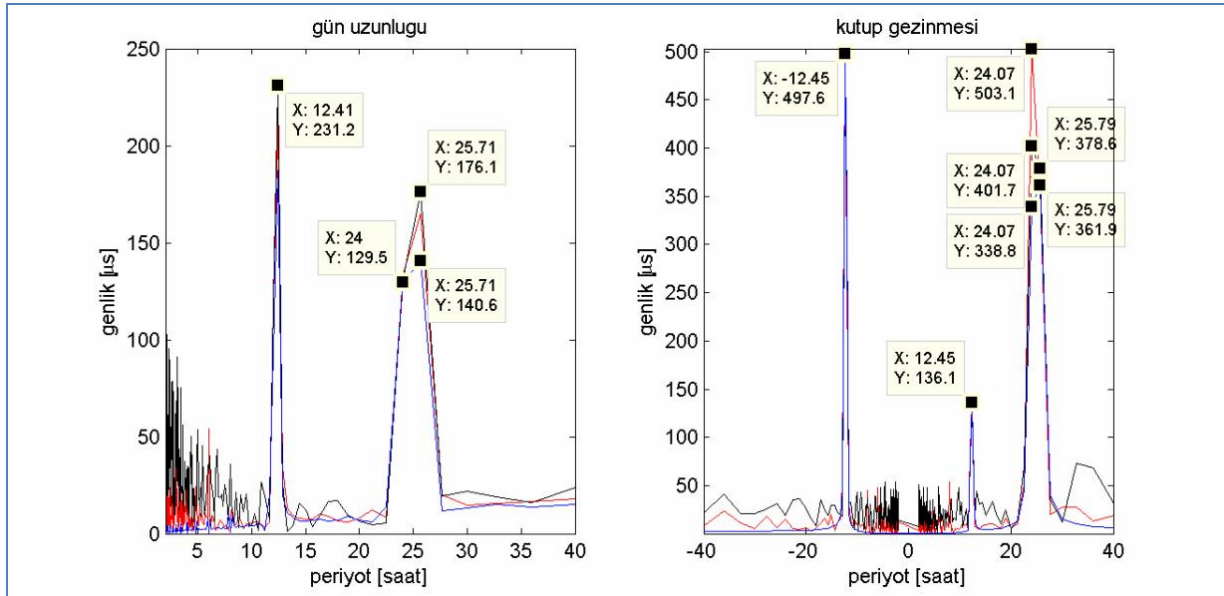


Şekil 11: Yukarıdaki ve aşağıdaki her iki şekilde mavi çizgi HF-ERP modellerinden hesaplanan (yüksek frekanslı) kutup gezinmesi koordinatlarını $(\Delta x_p, \Delta y_p)$ göstermektedir. Kırmızı çizgi GPS ölçülerinden kestirimi yapılan kutup gezinmesi koordinatlarını $(dx_p, dy_p)_{GPS}$ göstermektedir (Steigenberger vd., 2006). Siyah çizgi VLBI ölçülerinden kestirimi yapılan kutup gezinmesi koordinatlarını $(dx_p, dy_p)_{VLBI}$ göstermektedir. Tüm hesaplanan ve kestirimi yapılan kutup gezinmesi koordinatlarının epokları UTC saat başlarıdır.



Şekil 12: Mavi çizgi UTC saat başları epoklarındaki gün uzunluğunun (length of day, LOD) HF-ERP modellerinden hesaplanan değerlerini göstermektedir. Kırmızı çizgi GPS ölçülerinden kestirimi yapılan UTC saat başları epoklarındaki LOD değerlerini göstermektedir (Steigenberger vd., 2006). Siyah çizgi VLBI ölçülerinden kestirimi yapılan UTC saat başları epoklarındaki LOD değerlerini göstermektedir. Gün uzunlukları (LOD) HF-ERP modellerinden hesaplanan $\Delta UT1$ değerlerinin ve VLBI ölçülerinden kestirimi yapılan $dUT1$ değerlerinin zamana göre kısmi türevleri alınarak türetilmiştir (hesaplanmıştır).

VLBI ve GPS UTC saat başı epokları ERP kestirimleri; $(dx_p, dy_p)_{GPS}$, $(dx_p, dy_p)_{VLBI}$, LOD_{GPS} , LOD_{VLBI} Fourier spektra genlikleri IVS-CONT08 oturumları süresince prograde ve retrograde 12 saat periyotlarında iyi uyum göstermektedirler. Fakat prograde 24 saat periyodunda GPS genliği yaklaşık $100 \mu s$ VLBI genliğinden ve yaklaşık $160 \mu s$ HF-ERP modellerinden hesaplananlardan büyük çıkmıştır. VLBI ve GPS LOD değerleri 24 saat periyotlu genliklerine bakıldığında birbirlerine uyumlu oldukları görülmüştür. Fakat VLBI ve GPS LOD değerleri HF-ERP modellerinden hesaplananlar ile yaklaşık $50 \mu s$ farklıdır (Şekil 13).



Şekil 13: IVS-CONT08 oturumları boyunca UTC saat başları epoklarında hesaplanan ve kestirimi yapılan gün uzunluğu değerlerinin (LOD) ve kutup gezinmesi koordinatlarının Fourier spektraları görülmektedir. Mavi çizgi Yer dönüklük parametrelerinin (ERP) HF-ERP modellerinden hesaplanan değerlerinin spektrasını göstermektedir. Kırmızı çizgi GPS ölçülerinden kestirimi yapılan ERP değerlerinin spektrasını göstermektedir. Siyah çizgi VLBI ölçülerinden kestirimi yapılan ERP değerlerinin spektrasını göstermektedir. Gün uzunlukları (LOD) $\Delta UT1$ (HF-ERP modellerinden hesaplanan) ve $dUT1$ (VLBI ölçülerinden kestirilen) değerlerinin zamana göre kısmi türevleri alınarak elde edilmiştir.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisi (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS) tarafından planlanan ve gerçekleştirilen 15 günlük sürekli VLBI oturumlarının (IVS-CONT08), Vienna VLBI yazılımı ile (Vienna VLBI Software, VieVS) analizi yapılmıştır. VLBI oturumlarının analizi sonucu UTC (Universal Time Coordinated) tam saatlerinde (örneğin; 15:00 UTC, 16:00 UTC) kestirimi yapılan Yer dönüklük parametreleri (Earth rotation parameters, ERP), aynı epoklarda (UTC tam saatleri) GNSS ölçülerinden kestirimi yapılan ERP ve yüksek-frekanslı ERP (HF-ERP) jeofizik modellerinden (örneğin, okyanus gel-gitlerinin ERP üzerindeki etkisi) elde edilenler temel açıklayıcı istatistik ve spektral analiz yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- IVS-CONT08 oturumları boyunca VLBI ölçülerinden UTC saat başı epoklarında kestirimi yapılan kutup gezinmesi koordinatlarının formal hataları GPS ölçülerinden kestirilenlere göre daha fazladır. Bunun nedeni GPS ölçülerinin VLBI ölçülerine göre sayıca çok daha fazla olmasıdır (serbestlik derecesi daha fazla).
- VLBI ölçülerinden kestirimi yapılan kutup gezinmesi saatlik koordinatları ile HF-ERP modellerinden hesaplanan kutup gezinmesi koordinatlarının farklarının standart sapması, GPS ölçü ile HF-ERP model farklarının standart sapmasından daha büyük çıkmıştır. Buradan VLBI kutup gezinmesi koordinatlarının GPS ile elde edilenlere göre daha gürültülü olduğu sonucuna ulaşılır. Bunun nedeni VLBI ölçülerinden kestirimi yapılan ERP parametrelerinin üzerinde herhangi bir mutlak veya bağıl kısıtlayıcı denklem uygulamamış olmamız olabilir.
- Kutup gezinmelerinin Fourier spektrası incelendiğinde; prograde 24 saat periyodunda ~100 ila ~160 mikro açı saniyesi (10^{-6} açı saniyesi) genliğinde ve gün uzunluğunda (LOD) prograde 24 saat periyodunda ~50 mikro saniye (10^{-6} zaman saniyesi) genliğinde anlamlı uyuşumsuzluklar görülmüştür. Bu uyuşumsuzlukların nedenleri araştırılmalıdır. VLBI ölçüleri, GNSS ölçüleri ve HF-ERP modellerinden elde edilen kutup gezinmesi koordinatları ve gün uzunluğu genliklerinin retrograde ve prograde 12 saat periyodunda iyi uyum gösterdikleri belirlenmiştir.
- Bilindiği üzere Yer dönüklük parametrelerinin (ERP) duyarlıkları Yer-sabit istasyonların oluşturduğu global polihedronun hacmi ile doğru orantılıdır. Bu bağlamda ve bu çalışmada elde edilen sonuçlar dikkate alındığında nokta sayıları fazla ve dağılımları çok daha homojen olan GPS istasyonları ile gerçekleştirilmiş olan GPS ölçülerinin analizinden elde edilen yüksek frekanslı (saatlik) kutup gezinmesi koordinatları aynı epoklar için VLBI ölçülerinden elde edilen kutup gezinmesi koordinatlarından daha duyarlıdır.

TEŞEKKÜR

Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisine (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS) ve Uluslararası Yer Dönüklük ve Referans Sistemleri Servisine (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) sağlamış oldukları verilerden ötürü teşekkür ederiz. Bildiri metninin revizyonunda emeği geçen Erdem Özer'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Bizouard C. ve Gambis D., 2009. *The combined solution C04 for Earth orientation parameters consistent with International Terrestrial Reference Frame*. In H. Drewes (Ed.), *Geodetic reference frames*, Volume 134 of IAG symp, pp. 265–270.
- Boehm J., Werl B. ve Schuh H., 2006. *Troposphere mapping functions for GPS and Very Long Baseline Interferometry from European Center for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data*, J Geophys Res 111 (B02406).
- Boehm J., Spicakova H., Plank L., Teke K., Pany A., Wresnik J., Englich S., Nilsson T., Schuh H., Hobiger T., Ichikawa R., Koyama Y., Gotoh T., Kubooka T. ve Otsubo T., 2009. *Plans for the Vienna VLBI Software VieVS*, Proceedings of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, 24-25 March 2009, Bordeaux, France.
- Boehm J., Hobiger T., Ichikawa R., Kondo T., Koyama Y., Pany A., Schuh H. ve Teke K., 2010. *Asymmetric tropospheric delays from numerical weather models for UT1 determination from VLBI Intensive sessions on the baseline Wettzell-Tsukuba*, Journal of Geodesy (SCI), 84:319-325, doi:10.1007/s00190-10-0370-x.
- Capitaine N., Gambis D., McCarthy D., Petit G., Ray J., Richter B., Rothacher M., Standish M. ve Vondrak J., 2002. *IERS Technical Note 29*, Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the New IAU Resolutions, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Chao B., Dong D., Liu H. ve Herring T., 1991. *Libration in the Earth's rotation*, Geophys. Res. Letters 18 (11), 2007–2010.

- Gross R., 2009. *Geodesy, Volume 3 of Treatise on Geophysics, Earth Rotation Variations - Long Period*, pp. 239–294. Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Tokyo: Elsevier.
- Lyard F., Lefevre F., Lettelier T. ve Francis O., 2006. *Modelling the global ocean tides, Modern insights from FES2004*. Ocean Dyn, 56 (6), 394–415.
- Mathews P., 2009. *Geodesy, Volume 3 of Treatise on Geophysics, Chapter Earth Rotation Variations*, pp. 295–350. Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Tokyo: Elsevier.
- McCarthy D. ve Petit G., 2004. *Chapter IERS Techn. Note 32, IERS Conventions 2003*, Frankfurt am Main, Germany: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- Moritz H. ve Mueller I., 1987. *Earth Rotation Theory and Observation*, 370 Lexington Avenue, New York, NY 10017: The Ungar Publishing Company.
- Nothnagel A., 2009. *Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI*, J. Geod. 83 (8), 787–792.
- Petrov L. ve Boy J., 2004. *Study of the atmospheric pressure loading signal in Very Long Baseline Interferometry observations*, J. Geophys. Res. 109(B3):B03405.
- Ray R., Steinberg D., Chao B. ve Cartwright D., 1994. *Diurnal and semi-diurnal variations in the Earth's rotation rate induced by oceanic tides*, Science 264 (5160), 830–832.
- Schuh H., Boehm J., Englich S., Heinkelmann R., Mendes Cerveira P.J., Pany A., Tanır E., Teke K., Todorova S. ve Wresnik J., 2008. *Vienna IGG Special Analysis Center Annual Report 2007*, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2008 Annual Report, edited by D. Behrend and K. Baver, NASA/TP-2008-214162, p. 208-211.
- Schuh H. ve Behrend D., 2009. *Report of the International Association of Geodesy 2007-2009*, Volume 36, Chapter International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS), sayfa: 297–306. Travaux de l'Association Internationale de Geodäsie.
- Sovers O., Fanelow J. ve Jacobs C., 1998. *Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results*, Reviews of Modern Physics 70 (4), 1393–1453.
- Steigenberger P., Rothacher M., Dietrich R., Fritsche M., Rülke A. ve Vey S., 2006. *Reprocessing of a global GPS network*, J Geophys Res 111 (B05402).