

AKÜ FEMÜBİD 17 (2017) 035502 (1004-1018)

AKU J. Sci. Eng. 17 (2017) 035502 (1004-1018)

DOI: 10.5578/fmbd.66131

## VLBI Intensive Oturumlarının Analizi ile Evrensel Zamanın (UT1) İzlenmesi

Kamil Teke<sup>(1)</sup>, Mehmet Fikret Öcal<sup>(1)</sup>, Metin Nohutcu<sup>(1)</sup>, Gonca Okay Ahi<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Hacettepe Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara

[kteke@hacettepe.edu.tr](mailto:kteke@hacettepe.edu.tr)

Geliş Tarihi: 12.07.2017 ; Kabul Tarihi: 05.12.2017

### Özet

Yer yönelim parametrelerinden zamana göre en hızlı değişkenlik göstereni Evrensel Zaman, UT1'dir. Yapay uydu ve gezegenlerin yörünge parametrelerinin belirlenmesi ve uzay navigasyonu amaçlı çalışmalar için UT1 vazgeçilmez bir öneme sahiptir. Uluslararası VLBI (çok uzun baz interferometrisi) Jeodezi ve Astrometri Servisi (IVS), UT1'i belirleyebilmek için "Intensive" oturumlar olarak adlandırılan VLBI oturumlarını her gün planlamak ve gerçekleştirmekle yükümlüdür. Ekonomik ve operasyonel anlamdaki güçlüklerden ve her gün gerçekleştirilme zorunluluğundan ötürü IVS, VLBI Intensive oturumlarını bir veya en fazla iki saat süre ile ve iki veya en fazla üç VLBI radyo teleskobu ile gerçekleştirmektedir. Bu kısıtlayıcı faktörler VLBI Intensive oturumlarında ölçü sayısının az olması (15-55 ölçü) sonucunu doğurur. Ölçü sayısının az olması ise, en-küçük-kareler (EKK) yöntemi ile kestirilebilecek bilinmeyen parametre setini kısıtlar. VLBI ölçü modelinde öncül değerlerine sabit alınan parametrelerdeki hatalar veya modele dâhil edilemeyen parametreler (örneğin, troposfer gradyanları) UT1 parametresinin kestirim sonuçlarına olumsuz olarak yansır ve UT1 doğruluğunun azalmasına yol açarlar. UT1 parametresinin Intensive oturumlarının IVS standart analizi ile belirlenmesinde yukarıda belirtilen problemlerden hareketle, bu çalışmada yeni bir analiz stratejisi önerilmektedir. Önerilen IVS Intensive oturumu analizi ile, Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) ölçülerinden elde edilen troposfer gradyanları VLBI ölçülerinin analizine dahil edilerek doğruluğu IVS standart analizinden daha yüksek doğruluklu UT1 (YeniUT1) kestirimi gerçekleştirilmiştir. 2008 yılı başından 2017 yılı Ocak ayı sonunu kapsayan Intensive oturumlarının analizlerinden kestirilen gün-uzunlukları ile GNSS gün-uzunluklarının istatistiksel karşılaştırılmaları sonucu, YeniUT1 gün-uzunluklarının doğruluklarının IVS standart analizi ile elde edilenlere kıyasla 2 ila 3 mikrosaniye/gün daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur.

### Anahtar kelimeler

Evrensel Zaman; UT1;  
gün-uzunluğu;  
troposfer gradyanları;  
VLBI; GNSS

## Monitoring Universal Time (UT1) from the Analysis of VLBI Intensive Sessions

### Abstract

Universal Time (UT1) is the most variable parameter with respect to time among the Earth orientation parameters. UT1 has utmost importance for determining the orbital parameters of the artificial satellites and the planets, and for space navigation. International VLBI (Very Long Baseline Interferometry) Service for Geodesy and Astrometry (IVS) is in charge of planning and realizing exclusive VLBI sessions everyday, so-called Intensive sessions. Due to the drawbacks arising from economic and operational issues and the necessity of daily realization of VLBI Intensive sessions, IVS operates these sessions with two to three VLBI radio telescopes over one or two hours. These restrictions result in a limited number of observations (15-55 observations) in an Intensive session. Thus, the few number of observations constraint the number of parameters to be estimated by the Least-Squares method. The errors of the a priori fixed parameters and the parameters that cannot be included in the observation model (e.g. troposphere gradients) propagate into UT1 estimate and cause UT1 accuracy to decrease. Concerning the above-mentioned restrictions for the UT1 estimation of IVS standard analysis, a new analysis strategy is recommended in this study. In the scope of the new analysis strategy of IVS Intensive sessions, the troposphere gradients from Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are assimilated into the analysis of VLBI Intensive sessions that result in more accurate UT1 estimates, i.e. New UT1, than those derived by IVS standard analysis. Based on the statistical comparisons of the length-of-day (LOD) estimates of the Intensive sessions, observed from the beginning of 2008 till the end of January 2017, with the GNSS LOD, it is proved that the LOD computed from New UT1 estimates have 2 to 3 microseconds/day better accuracies than those estimated from the IVS standard analysis.

### Keywords

Universal Time; UT1;  
length-of-day;  
troposphere gradients;  
VLBI; GNSS

## 1. Giriş

Dünya'nın kendi eksenini etrafındaki hareketini esas alan, Greenwich alt geçiş meridyeninden Güneş'in ortalama saat dairesine gök ekvatoru boyunca saat ibresi yönündeki açı olarak tanımlanan, bu kapsamda; kutup gezinmesi düzeltmesi getirilmemiş, optik astronomi yöntemleri ile ölçümü gerçekleştirilmiş, doğruluğu düşük ve günümüz uygulamalarında kullanılmayan UT0'ı; kutup gezinmesi dikkate alınarak Çok Uzun Baz İnterferometrisi (Very Long Baseline Interferometry, VLBI, Schuh ve Behrend 2012) tekniği ile ölçülen, gökssel ara kutup (Celestial Intermediate Pole, CIP) etrafında Yer'in uzaya göre günlük, mutlak dönüklük faz açısı olan ve günümüzde yaygın kullanıma sahip UT1'i; UT1'deki mevsimsel periyotlardaki gel-git (tidal) harmoniklerinin indirgenmesi ile elde edilen UT2'yi; UT1'deki 35 günden küçük periyotlu gel-git harmoniklerinin indirgenmesi ile elde edilen UTR'yi ve UT1'deki 5 günden 18,6 yıla kadar olan tüm periyotlardaki gel-git harmoniklerinin indirgenmesi ile elde edilen UTS'yi barındıran astronomik zaman sistemine Evrensel Zaman denmektedir. Bu çalışmaya konu Evrensel Zaman, doğruluğu en yüksek olan ve güncel uzay tabanlı konum belirleme çalışmalarında kullanılan, UT1'dir. UT1, beş adet Yer yönelim parametresinden (Earth orientation parameters, EOP) zamana göre en hızlı değişkenlik gösterenidir (Luzum ve Nothnagel, 2010). Diğer Yer yönelim parametreleri ise, kutup gezinmesi bileşenleri (göksel ara kutbun (CIP) kabuk-sabit koordinat sistemindeki konum bileşenleri,  $x_p, y_p$ ) ve nutasyon ofsetleri (CIP'nin uzay-sabit koordinat sistemindeki konum bileşenleri,  $X, Y$ )'dir. Yer yönelim parametreleri, Yer-sabit ekvatorial üç boyutlu kartezyen koordinat sistemi (terrestrial reference system, TRS, Altamimi vd. 2016) ile uzay-sabit ekvatorial üç boyutlu kartezyen koordinat sistemi (celestial reference system, CRS, Fey vd. 2009) arasındaki kinematik ilişkiyi sağlar. Bu sayede, uzaydaki yapay ve doğal gök cisimlerinin koordinatlarının tanımlı olduğu gökssel referans çatısı ile Yeryüzü üzerinde kabuk-sabit jeodezik kontrol noktaları koordinatlarının tanımlı olduğu yerel referans çatısı arasındaki koordinat dönüşümü gerçekleştirilir. Böylece, yapay uydu

yörünge parametrelerinin ve gezegenlerin yörünge parametrelerinin belirlenmesi mümkün olduğu gibi, derin-uzay navigasyonu amaçlı çalışmalarda uzay araçlarının gökssel referans çatısında tanımlı konumlarının belirlenmesi sağlanır.

Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) yukarıda bahsedilen beş adet Yer yönelim parametresinin izlenmesi ve sunulmasından sorumludur. Yer yönelim parametrelerinden, kutup gezinmesi koordinatları ve UT1 aynı zamanda Yer dönme parametreleri (Earth rotation parameters, ERP) olarak adlandırılırlar. IERS'e kutup gezinmesi koordinatlarını, küresel navigasyon uydu sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS), uydu/Ay'a lazer uzaklık ölçme sistemi (Satellite/Lunar Laser Ranging, SLR/LLR), Doppler ölçüleri ile yörünge ve konum belirleme uydu sistemi (Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite, DORIS) ve çok uzun baz interferometrisi (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) uydu-uzay jeodezisi teknikleri servislerinin tümü sağlar. IERS Yer yönelim merkezi (Earth Orientation Center, EOC), Yer yönelim parametreleri için uzay jeodezisi teknikleri kombinasyon merkezlerince hesaplanan normal denklem sistemlerinin teknikler-arası kombinasyonunu gerçekleştirerek IERS 14 C04 Yer dönme parametreleri serilerini (Bizouard vd. 2017) günceller.

Çok uzun baz interferometrisi tekniği (VLBI) 5 adet Yer yönelim parametresinin tamamını ölçebilen tek tekniktir. GNSS ölçüleri ile UT1 parametresinin zamana göre kısmi türevi olan gün-uzunluğu (length-of-day, LOD) yüksek doğruluklu izlenebilir. UT1 ve nutasyon ofsetleri ile GNSS uydularının yörünge parametreleri arasındaki yüksek korelasyondan ötürü (özellikle uyduların yörünge düzlemlerinin sağ açıklıkları ile UT1'in yüksek korelasyonundan ötürü), UT1 ve nutasyon ofsetleri GNSS ölçüleri ile elde edilemez (Rothacher vd. 1999). UT1-benzeri (UT1-like) olarak adlandırılan parametre GNSS ölçülerinin analizinden elde edilebilir. Şöyle ki, ilk epok için UT1 ofseti VLBI ile belirlenmiş bir seriden sağlanır ve üstüne her

kestirim epogu için GNSS ölçüleri ile elde edilen gün-uzunluğu değerleri eklenir. Bu yöntemle UT1-benzeri parametre GNSS'den sağlanmış olur (Gambis ve Luzum 2011). Evrensel zaman (UT1), gün-uzunluğu (LOD), Yer'in açıl dönme hızı ( $\omega$ ) ve kutup gezinmesi bileşenleri ( $x_p, y_p$ ) saatlik periyotlardan Ay'ın presesyonu periyoduna (18.6 yıl) değin gel-gitsel değişimler gösterir. Güneş ve ayın gel-git oluşturan potansiyelinin zonal bileşeninin (paraleller boyunca: ekvatora paralel yönlerde) UT1'de, gün-uzunluğunda, ve Yer'in açıl dönme hızında gel-gitsel değişimlere yol açtığı ilk kez Yoder vd. (1981) tarafından bulunmuştur. IERS 14 C04 serisi 5 günden 18.6 yıla varan gel-gitsel periyotlara sahip zonal gel-gitlerin oluşturduğu UT1 harmonik değişimlerini içerir. 62 adet gel-gitsel harmonik bileşenden oluşan UT1 zonal gel-git harmonik modeli, Yoder vd. (1981), Wahr ve Bergen (1986), Kantha vd. (1998), Defraigne ve Smits (1999) tarafından geliştirilmiştir. UT1 öncül değerleri uydu-uzay jeodezisi teknikleri ölçü denklemlerinde yer alan TRF-CRF dönüşüm modelinde kullanılır. IERS 2010 konvansiyonlarında UT1 öncül değerlerinin elde edilmesi için önerilen modellerden biri UT1 zonal gel-git harmonik modelidir (Petit ve Luzum 2010). Ayrıca, IERS 2010 konvansiyonlarında Yer dönme parametrelerinin (kutup gezinmesi bileşenleri ve UT1) öncül değerlerinin elde edilmesi için önerilen diğer bir model; okyanus gel-gitlerinin UT1, gün-uzunluğu ve kutup gezinmesi bileşenlerinde oluşturduğu yüksek frekanslı (1 günlük ve 12 saatlik periyotlu) harmonik değişimleri 71 adet gel-gitsel bileşen ile ifade eden Ray vd. (1994) tarafından geliştirilmiş modeldir (Petit ve Luzum 2010).

UT1 periyodik değişimlerinin günlük ve gün-içi periyotlu olanlarının genlikleri büyük oranda (yaklaşık toplam genliğin %90'ı) okyanus gel-gitlerinin oluşturduğu eksenel dönme momenti değişimlerinden, mevsimlik olanların genlikleri ise büyük oranda atmosferik gel-gitlerin oluşturduğu eksenel dönme momenti değişiminden kaynaklanmaktadır (Moritz ve Mueller 1987; Gross 2009).

Geçmişte VLBI Intensive oturumları ölçülerinden kestirilen UT1 parametresine ilişkin farklı duyarlık

belirleme çalışmaları, Robertson vd. (1985), Ray vd. (1995) ve Hefty ve Gontier (1997) tarafından gerçekleştirilmiştir. 1984-1996 yıllarını kapsayan bu çalışmalarda çok az sayıda ölçü yapılabildiğinden troposfer başucu ıslak gecikmeleri (zenith wet delay, ZWD) kestirimi yapılamamıştır. Fakat, günümüzde IVS Intensive oturumlarında her bir VLBI radyo teleskobu için her bir oturumda bir adet troposfer başucu toplam sinyal gecikmesi (zenith total delay, ZTD) kestirimi yapılabilmektedir. Böhm ve Schuh (2007) VLBI Intensive oturumlardan kestirimi yapılan UT1 parametreleri ile analizlerine dâhil ettikleri sayısal atmosfer modeli (European Center for Medium Range Weather Forecast, ECMWF, Dee vd. 2011) toplam troposfer doğu gradyanları arasında 15 mikrosaniye/mm düzeyinde doğrusal bir ilişki olduğunu saptamışlardır. Böhm vd. (2010) ve Nafisi vd. (2012), ECMWF sayısal atmosfer modeli profillerini kullanarak sinyal yolu izleme algoritmaları ile elde ettikleri troposfer sinyal gecikmelerini VLBI Intensive (INT2) oturumlarının analizinde kullanmışlardır ve gün-uzunluğu değerlerinin doğruluklarında IVS standart analizinden üretilenlere kıyasla küçük bir iyileşme elde etmişlerdir. Nilsson vd. (2011) IVS-CONT08 VLBI 24 saatlik oturumlarından elde edilen troposfer gradyan değerlerini VLBI Intensive oturumunda gerçekleştirilen ölçülerden indirgeyerek Intensive oturumların analizinden üretilen UT1 parametresinin doğruluğunu artırmışlardır. Titov (2000), öncül değerlerine sabit alınan nutasyon parametrelerinin (IAU 1980 (Wahr 1981) ve IERS 1996 (Herring 1996)) kestirilen UT1 parametresine etkisini araştırmıştır. Thaller vd. (2008), Kasım 2006'dan Şubat 2008'e kadar gerçekleştirilen GNSS ölçüleri ile VLBI Intensive oturumlarının ortak parametrelerinin normal denklem sistemi düzeyinde inter-teknik kombinasyonu sonucunda UT1 kestirim duyarlığında artış olduğunu ortaya koymuşlardır. Nothnagel ve Schnell (2008), VLBI Intensive oturumlarının analizinde, öncül değerlerine sabit alınan kutup gezinmesi bileşenleri ve nutasyon ofset hatalarının UT1 kestirim parametresinin doğruluğuna negatif etkisini incelemişlerdir. UT1 parametresinin troposfer başucu ıslak sinyal gecikmelerine troposfer gradyanları kadar duyarlı

olmadığı, ancak doğu-batı doğrultulu (ekvatorial) bazlardan oluşan Intensive oturumları ölçülerinden kestirilen UT1 ile doğu-batı doğrultulu troposfer gradyanlarının yüksek doğrusal korelasyona sahip olduğu Böhm vd. (2010), Nilsson vd. (2011) ve Teke vd. (2015) ile ortaya konmuştur.

Radyo dalgası X-bandının (8.4 GHz) ve S-bandının (2.3 GHz) alt frekanslarında ölçülen faz değerlerindeki lineer değişim hızı jeodezik VLBI ölçüleri olup, grup gecikmeleri ( $\tau$ ) şeklinde isimlendirilir. Bu ölçülerin (grup gecikmeleri,  $\tau$ ) geometrik karşılığı diğer galaksilerden gelen radyo sinyalinin iki farklı VLBI antenine varış zamanları farkıdır.  $i$  ve  $j$  VLBI istasyonları arasındaki Yer-sabit ekvatorial koordinat sisteminde tanımlı baz vektörü  $b^T = [X_i - X_j \quad Y_i - Y_j \quad Z_i - Z_j]_{TRF}$ , gök-sabit ekvatorial koordinat sisteminde  $\alpha$  ve  $\delta$  sırası ile gözlem yapılan kuazarın sağ açıklık (rektazansiyon) ve dik açıklık (deklınasyon) koordinatları olmak üzere kuazara giden birim vektör,  $k^T = [\cos \delta \cos \alpha \quad \cos \delta \sin \alpha \quad \sin \delta]_{CRF}$  şeklinde ifade edilir ise VLBI ölçü (fonksiyonel) modeli

$$\tau = \frac{-b^T \cdot k_{TRF}}{c} + \tau_{saat} + \tau_{iyon} + \tau_{trop} + \tau_{röl} + \dots \quad (1)$$

elde edilir. Eşitlik (1)'de;  $c$  vakum ortamdaki ışık hızı,  $\tau_{saat}$  hatasız kabul edilen bir saate göre diğer saat okumaları düzeltmeleri,  $\tau_{iyon}$ ,  $\tau_{trop}$  ve  $\tau_{röl}$  sırası ile iyonosfer, troposfer sinyal gecikmeleri ve rölativistik düzeltmeler, ölçülere getirilen düzeltmeleri ifade etmektedir. Ölçülere getirilen bir takım teknik özel düzeltmelerin yanı sıra, Yer yönelim parametreleri, istasyon TRF ve kuazar CRF katalog koordinatları öncül değerlerine de her bir ölçü epöğü için çeşitli düzeltmeler getirilmektedir. VLBI ölçü modeline ilişkin daha detaylı bilgi örneğin; Sovers vd. (1998), Teke vd. (2012) ve Schuh ve Böhm (2013)'te yer almaktadır. VLBI ölçülerinin analizinde ölçüler arasındaki korelasyonlar henüz dikkate alınamamaktadır. Ölçülerin ağırlıkları korelasyon işlemi esnasında kestirilmekte ve analiz merkezlerine gönderilmektedir. Bununla birlikte, troposfer sinyal gecikme modelinin küçük ufuk yükselim açılarındaki modelleme yetersizliklerinden oluşan hataları minimize etmek amacıyla VLBI

yazılımları ölçülerin ufuk yükselim açıları küçüldükçe ölçü ağırlıklarını azaltan algoritmalara sahiptir.

VLBI Intensive oturumlarının IVS standart analizinde, ölçü sayısının az olması (15-55 ölçü) en-küçük-kareler (EKK) yönteminde kestirime konu bilinmeyen parametre setini kısıtlar. Örneğin iki VLBI radyo teleskobunun katıldığı oturumlarda; teleskopların her biri için birer troposfer başucu toplam sinyal gecikmesi (ZTD), iki adet saat hatası parametresi ve UT1 olmak üzere sadece beş adet parametre kestirilebilir ve VLBI ölçü denkleminin diğer tüm parametreleri öncül (yaklaşık) değerlerine sabit alınır. Öncül değerlerine sabit alınan başlıca parametreler, galaksimize 5 ila 7 milyar ışık yılı uzaklıktaki galaksiler olan kuazarlara (quasi-stellar radio source, quasar) ait CRF koordinatları (dik açıklık ve sağ açıklık açıları), VLBI radyo teleskobu TRF koordinatları, nutasyon ofsetleri ve kutup gezinmesi bileşenleridir. Intensive oturumlardaki ölçü sayısının az olmasından dolayı kestirilemeyen ve öncül (yaklaşık) değerlerine sabit alınan parametrelerdeki hatalar UT1 parametresinin kestirim sonuçlarına olumsuz olarak yansır ve UT1 doğruluğunun azalmasına yol açarlar. Bununla birlikte troposfer azimut bağımlı asimetrik sinyal gecikmeleri (troposfer gradyanları) kestirimi yapılamadığı gibi, troposfer başucu sinyal gecikmeleri yeterli zamansal çözünürlük ile kestirilemezler. Ölçülerden indirgenemeyen bu sinyaller UT1 kestirim değerlerinin doğruluklarını azaltır. UT1 parametresinin belirlenmesi ile ilgili yukarıda belirtilen problemlerden hareketle, bu çalışmanın ana amacı UT1 parametresinin doğruluğunu artırmaktır. Bu amaca yönelik olarak bu çalışma kapsamında küresel navigasyon uydu sistemleri (GNSS) ölçülerinden elde edilen troposfer gradyanları VLBI ölçülerinin analizine dahil edilerek doğruluğu Intensive oturumlarının IVS standart analizinden daha yüksek UT1 (YeniUT1) kestirimi yapılmıştır.

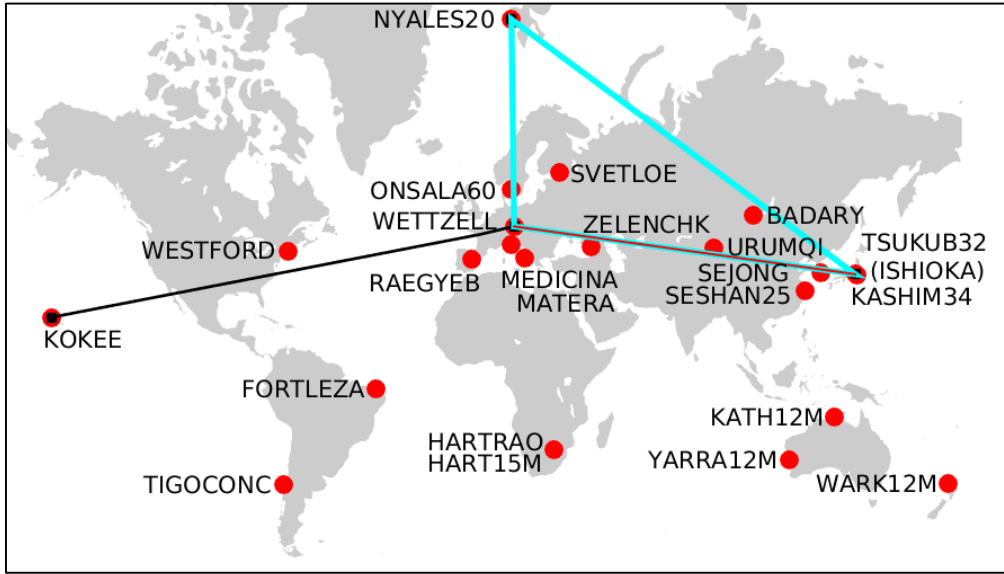
## 2. VLBI Intensive (IVS-INT1, -INT2, -INT3), IVS-R1 ve -R4 Oturumları

VLBI Intensive oturumları (IVS-INT1, -INT2 ve -INT3) IVS tarafından sadece UT1 belirlemek amaçlı günlük sıklıkta, bir veya iki saatlik sürelerde gerçekleştirilen oturumlardır. IVS analiz merkezlerince VLBI

Intensive oturumlarının ölçülerinden kestirilen UT1 ve gün-uzunluğu (LOD) değerleri, IERS tarafından Yer bilimleri ve uzay bilimleri kullanımına sürekli ve bedelsiz olarak sunulan ve tüm uzay tabanlı konum ve yörünge belirleme çalışmalarında kullanılan çok önemli iki parametredir. Altı ya da daha fazla VLBI radyo teleskobunun katıldığı 24 saatlik diğer VLBI oturumlarının aksine, ekonomik ve işletim zorlukları ve her gün düzenli olarak UT1 belirleme gerekliliği nedenleri ile Intensive oturumlarında iki, veya en fazla üç radyo teleskobu kullanılır.

IVS-INT1 oturumları 1984 yılından itibaren hafta içi günlerde (Pazartesi-Cuma) gerçekleştirilen yaklaşık 18:30 UT'de ölçüye başlayan ve bir saat süren Wettzell (Almanya) ve Kokee (Hawaii adaları, ABD) radyo teleskoplarının ölçü yaptığı Intensive oturumlarıdır. Bununla birlikte IVS-INT2 oturumları UT1'i haftanın diğer günlerinde (Cumartesi ve Pazar) belirlemek için 2002 yılından bu yana

gerçekleştirilen, yaklaşık 07:30 UT'de başlayan ve bir ila iki saat süren Tsukuba (Japonya) ve Wettzell (Almanya) radyo teleskoplarının ölçü yaptığı Intensive oturumlarıdır. Ayrıca, Pazartesi günleri Tsukuba (Japonya), Wettzell (Almanya) ve Ny Alesund (Spitsbergen, Norveç) radyo teleskoplarının katılımı ile IVS-INT3 oturumları gerçekleştirilir. IVS-R1 (Rapid turnaround 1) ve -R4 oturumları ise Yer yönelim parametrelerinin (EOP) izlenmesi için haftanın pazartesi (IVS-R1) ve perşembe (IVS-R4) günleri gerçekleştirilen 24 saatlik oturumlardır. VLBI Intensive (IVS-INT1, -INT2, -INT3), IVS-R1 ve -R4 oturumlarına katılan VLBI radyo teleskoplarının yerleri ve VLBI Intensive oturumları baz geometrisi Şekil 1'de, jeodezik ortak yerleşkelerinde bulunan GNSS istasyonlarına ilişkin konum bilgileri Çizelge 1'de sunulmuştur.



**Şekil 1.** IVS-R1 ve -R4 oturumlarına katılan VLBI istasyonları (kırmızı yuvarlak noktalar), Intensive oturumlarına (IVS-INT1, -INT2 ve -INT3) katılan VLBI istasyonları (siyah kare noktalar), IVS-INT1, -INT2 ve -INT3 oturumlarının baz vektörleri (sırası ile siyah, kırmızı ve mavi çizgiler).

Intensive oturumlarında ölçü alan radyo teleskoplarını birleştiren uzun baz vektörlerinin ekvator düzlemine yakın ve doğu-batı uzantılı olarak seçilmesinin nedeni VLBI ölçülerinin UT1 parametresine olan duyarlılığını artırmaktır (Nothnagel ve Schnell 2008; Nilsson vd. 2011). UT1 belirleme amaçlı oluşturulan VLBI Intensive oturumları bazlarının ekvatora yakın, doğu-batı uzantılı ve uzun olması (Wettzell-Tsukuba baz uzunluğu: 8445 km, Wettzell-Kokee baz uzunluğu:

10357 km) geometrik anlamda UT1 doğruluk gereksinimini karşılamakla birlikte, Intensive oturumlardaki ölçü sayısının azlığı kestirimi yapılacak parametre sayısının iki VLBI radyo teleskobunun ölçü yaptığı bir oturum için sadece beş adet ile sınırlı kalmasına yol açmıştır.

VLBI Intensive oturumlarının ölçü dosyaları, son oturumun gerçekleştirildiği tarihten itibaren en geç bir hafta sonra IVS analiz merkezlerinin ftp

arşivlerinde ölçülerin analizi için hazır hale getirilir. IVS UT1 serisinin güncellenmesini öteleyen bu bir haftaya varabilen gecikme, ölçü dosyalarının

oluşturulması için gerekli olan korelasyon işlemi nedeniyle yaşanır (Schuh ve Behrend 2012).

**Çizelge 1.** Jeodezik ortak yerleşkelerindeki VLBI ve GNSS istasyonlarının ITRF2008 elipsoid yükseklikleri, aralarındaki yatay uzaklıklar ve yükseklik farkları. Çizelge’de sunulan jeodezik yerleşkeler kuzeyden güneye doğru sıralanmıştır.

Jeodezik ortak yerleşkesi	Enlem (°)	Ülke	VLBI teleskobu IVS adı	VLBI teleskobu yüksekliği (m)	GNSS istasyonu IGS adı	VLBI-GNSS yaklaşık yatay uzaklığı (m)	GNSS anten yüksekliği (m)	VLBI-GNSS yükseklik farkı (m)
Ny-Ålesund	78.9	Norveç	NYALES20	87.3	nya1	106	84.2	3.1
					nyal	112	83.7	3.6
Wettzell	49.1	Almanya	WETTZELL	669.1	wtzr	139	666.1	3.0
					wtza	137	666.0	3.1
Tsukuba	36.1	Japonya	TSUKUB32	84.7	tskb	302	67.3	17.4
Kokee Park	22.1	ABD	KOKEE	1176.6	kokb	45	1167.4	9.2

### 3. Analizler

Bu çalışma kapsamında, IVS Intensive oturumlarının ve IVS-R1 ve -R4 oturumlarının analizinde VieVS (Vienna VLBI and Satellite Software) yazılımı (Böhm vd. 2011) kullanılmıştır. Çalışmamızda, 2008 yılı başından 2017 yılı Ocak ayı sonuna kadar gerçekleştirilen Intensive oturumları (IVS-INT1, -INT2 ve -INT3) ölçüleri farklı analiz yöntemleri ile analiz edilmiştir.

İlk olarak, *Intensive oturumlarının IVS standart analizi* (Analiz 1) gerçekleştirilmiştir. Analiz 1’de iki radyo teleskobunun ölçü yaptığı bir saat süreli bir VLBI intensive oturumunda, her iki radyo teleskobu için birer troposfer sinyal gecikmesi (2 adet parametre), VLBI istasyonlarında yer alan atomik saatlerin aralarındaki senkronizasyon hatasını gidermek amaçlı oluşturulan lineer bir polinomun ofset ve lineer trend kestirim değerleri (2 adet parametre), ve UT1 ofseti (bir adet) olmak üzere beş adet parametre kestirilmiştir. Bu parametreler dışında, ölçülerin analizi için gerekli olan radyo teleskoplarının Yersel referans çatısı koordinatları, gözlem yapılan kuazarların göksel referans çatısı koordinatları, kutup gezinmesi koordinatları ve nutasyon ofsetleri öncül değerlerine sabit alınmışlardır. Kestirim parametre setine giremeyen bu parametrelerin sabit alınmasından kaynaklı hatalar, kestirim sonucu UT1 parametresine aralarındaki korelasyonla doğru orantılı yayılırlar. Kuazarlardan gelen sinyallerden VLBI radyo

teleskopları tarafından algılanan S (2.15-2.35 GHz) ve X (8.0-8.8 GHz) frekanslı radyo dalgalarına etkiyen birinci derece iyonosfer sinyal gecikme etkisi, S ve X frekanslı VLBI ölçülerinin (sinyal gecikmelerinin) lineer bir kombinasyonu ile koralatörlerde belirlenir. Ölçü dosyalarında koralatörlerde belirlenen her bir ölçü için iyonosferin sinyal yolu boyunca gecikme değerleri yer alır. Bu nedenle ölçülerin analizinde ayrıca bir iyonosfer sinyal gecikmesi modellenmemiş, her bir ölçüden ölçü dosyasında yer alan iyonosfer sinyal gecikmeleri indirgenmiştir. Analiz 1, *Intensive oturumların IVS standart analizi* ile tamamen aynı analiz stratejisi ve parametrizasyonunu içermektedir. Analiz 1 sonucunda elde edilen UT1 değerleri StandartUT1(A1) şeklinde adlandırılmıştır. Bu çalışma kapsamında, IVS standart analizi yönteminden (Analiz 1) farklı olarak, detayları aşağıda sunulan, iki yeni analiz yöntemi, Analiz 2 ve Analiz 3, önerilmektedir.

*GNSS troposfer gradyanlarının VLBI ölçülerinden öncül olarak indirgenmesi ile Intensive oturumların analizinde* (Analiz 2), Analiz 1’de olduğu gibi her VLBI radyo teleskobu için birer adet troposfer başucu ıslak gecikmesi (zenith wet delay, ZWD) kestirimi yapılmaktadır. Analiz 2’de troposfer başucu kuru sinyal gecikmeleri (zenith hydrostatic delay, ZHD) (Saastamoinen 1972):

$$ZHD = \frac{0.0022768p}{(1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.28 \cdot 10^{-6} \cdot h)} \quad (2)$$

eşitliği ile VLBI istasyonlarında ölçülen toplam basınç değerlerinden,  $p$  ve istasyon noktasının jeodezik (elipsoidal) enleminden,  $\varphi$  hesaplanmış ve parametre kestirimi öncesi VLBI ölçülerinden indirgenmiştir. GNSS troposfer gradyanları (kuzey ve doğu doğrultulu) VLBI ölçülerinden parametre kestirimi öncesi indirgenmiştir. Bu amaçla GNSS gradyanları VLBI ölçü epoklarına lineer enterpole edildikten sonra VLBI ölçülerinin doğrultularına Chen ve Herring (1997) troposfer gradyan izdüşüm fonksiyonu,

$$m_g(\varepsilon) = \frac{1}{\tan(\varepsilon) \cdot \sin(\varepsilon) + C} \quad (3)$$

kullanılarak ve azimut bağımlı troposfer sinyal gecikmeleri,  $\Delta L_{\text{asimetrik\_gecikme}}$ , (Davis vd. 1985; 1993)

$$\Delta L_{\text{asimetrik\_gecikme}}(\alpha, \varepsilon) = m_g(\varepsilon) \cdot [G_n \cdot \cos(\alpha) + G_e \cdot \sin(\alpha)] \quad (4)$$

eşitliğinden hesaplanmış ve ölçülerden parametre kestirimi öncesi indirgenmiştir. Burada,  $h$  istasyonun elipsoid yüksekliği,  $\varepsilon$  ölçünün ufuk yükselim açısı,  $\alpha$  ölçünün azimutu,  $C = 0.0032$  sabit değeri,  $G_n$  ve  $G_e$  Uluslararası GNSS Servisi (IGS) 5 dakikalık troposfer doğu ve kuzey gradyanları kestirim değerleridir. Özetle, Analiz 2’de, Analiz 1’de olduğu gibi her VLBI radyo teleskobu için birer adet troposfer başucu ıslak gecikmesi kestirimi yapmanın yanı sıra GNSS troposfer gradyanları (kuzey ve doğu doğrultulu) VLBI ölçülerinden parametre kestirimi öncesi indirgenmiştir. Analiz 2 ile YeniUT1(A2) değerleri elde edilmiştir.

*Analiz 3, GNSS troposfer gradyanlarının VLBI ölçülerinden öncül olarak indirgenmesi ile birlikte öncül GNSS gradyanlarının düzeltme değerlerinin VLBI ölçülerinden kestirimini içeren Intensive oturumları analizidir.* Analiz 3’te, Analiz 2’den farklı olarak VLBI ölçülerinden, GNSS troposfer gradyanları öncül değerlerine getirilecek düzeltmeler kestirilmiştir. Diğer bir ifade ile, Analiz 3’te, her oturumdaki her istasyon için doğu-batı,  $G_e$  ve kuzey-güney,  $G_n$  troposfer gradyan bileşenleri (öncül GNSS gradyanlarının düzeltme değerleri) kestirimi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz yöntemi ile troposfer azimut bağımlı sinyal

gecikmelerinin büyük oranda ölçülerden indirgenebildiği düşünülmektedir. Analiz 3 ile YeniUT1(A3) değerleri elde edilmiştir.

Analiz 2 ve Analiz 3’te VLBI istasyonları ile jeodezik ortak yerleşkelerinde yer alan Uluslararası GNSS Servisi (IGS) istasyonlarının (Çizelge 1) GNSS gradyanları kullanılmıştır. IGS son ürünlerinden biri olan GNSS troposfer gradyanları, Temmuz 2011 tarihinden itibaren, Bernese GNSS yazılımı (Dach vd. 2007) kullanılarak, hassas konum belirleme (precise point positioning, PPP, Zumberge vd. 1997) tekniği ile Yer’i saran 350’den fazla GNSS istasyonunun herbiri için günlük dosyalar halinde ve 5 dakika zamansal çözünürlükte, 3 haftalık bir gecikme ile Birleşik Devletler Deniz Gözlemevi (United States Naval Observatory, USNO) tarafından üretilir. USNO bu amaçla gerçekleştirdiği GNSS analizlerinde Yer yönelim parametrelerini, uydu yörünge parametrelerini, uydu ve alıcı saat hatası parametrelerini IGS nihai çözüm değerlerine (IGS final combined) sabit alır. Başucu hidrostatik (kuru) sinyal gecikmelerini Niell izdüşüm fonksiyonu (NMF, Niell 1996) ile ölçülerden indirger ve ıslak troposfer gecikmelerini ise global izdüşüm fonksiyonu (GMF, Böhm vd. 2006a) değerlerini kullanarak kestirir. Analizinde 7 dereceden fazla ufuk yükselim açısına sahip ölçüleri kullanır (Byram vd. 2011). Temmuz 2011 tarihinden önce (Ocak 2000-Temmuz 2011 tarihleri arasında) ise bu ürün seti yaklaşık aynı parametrizasyon ve analiz stratejisi ile NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından Gipsy-Oasis GNSS yazılımı (Webb ve Zumberge 1993) kullanılarak üretilmekte idi (Byun ve Bar-Server 2009).

Intensive oturumlarının Analiz 1, Analiz 2 ve Analiz 3 ile analizleri sonucu elde edilen sırası ile StandartUT1(A1), YeniUT1(A2), YeniUT1(A3) evrensel zaman kestirim değerlerini, referans olarak esas alabileceğimiz UT1 değerleri ile karşılaştırmaya ihtiyaç vardır. Diğer bir ifade ile, örneğin; GNSS (International GNSS Service, IGS, Dow vd. 2009) troposfer gradyanlarının Intensive oturumlarının analizine dâhil edilmesi (Analiz 2) ile elde edilen YeniUT1(A2) kestirim değerlerinin, Intensive oturumlarının Analiz 1 (IVS standart analizi) ile elde edilenlerine, StandartUT1(A1) göre daha doğru olup

olmadığının sorgulanması için referans olarak esas alabileceğimiz UT1 değerlerine ihtiyaç vardır. Bu amaçla oluşturulacak UT1 referans serisinin doğruluğunun Intensive oturumlardan elde edilenlere kıyasla daha yüksek olması gerekmektedir. 24 saatlik IVS-R1 ve -R4 oturumlarının analizi sonucu kestirilen günlük UT1 doğruluğu, Intensive oturumlardan IVS standart analizi sonucu kestirilenlere göre daha yüksektir. Günümüzde, IVS-R1 ve -R4 oturumlarından günlük UT1 belirleme ortalama doğruluğu  $\sim 1-2 \mu s$  (mikrosaniye) iken Intensive oturumlarında (saatlik oturumlar)  $\sim 15-20 \mu s$ 'dir (Schuh ve Behrend 2012). Bu nedenle, çalışmamızda Intensive oturumlarından kestirilen UT1 serilerinin doğruluklarının incelenmesinde, IVS-R1 ve -R4 oturumlarından kestirdiğimiz UT1 değerleri referans alınmıştır.

Intensive oturumlarının analizleri sonucu elde ettiğimiz UT1 kestirim değerlerinin (StandartUT1(A1), YeniUT1(A2), YeniUT1(A3)) doğruluklarının araştırılmasında referans serisi olarak esas alabileceğimiz 24 saatlik IVS-R1 ve -R4 oturumları analizinde, UT1, saatlik aralıklarla ve parçalı lineer ofset fonksiyonları (Teke vd. 2009) kullanılarak, kestirilmiştir. UT1 parçalı lineer ofset kestirimleri üzerinde herhangi bir mutlak veya bağıl kısıtlayıcı kullanılmamıştır. Nutasyon ofsetleri öncül değerleri, IAU2006 presesyon-nutasyon modelinden (Petit ve Luzum 2010) hesaplanan değerlere, IERS 14 C04 Yer yönelim parametreleri (EOP) serisi (Bizouard vd. 2017) düzeltmelerinin eklenmesi ile elde edilmiş ve kestirim aşamasında sabit alınmıştır. Kutup gezinmesi koordinatları ( $x_p$ ,  $y_p$ ) IERS 14 C04 serisi değerlerine ilaveten yüksek frekanslı (yarım-günlük ve günlük periyotlu) kutup gezinmesi değişimleri (Petit ve Luzum 2010) öncül değerleri üzerine her oturum için tek ofset şeklinde kestirilmiştir. UT1 saatlik kestirimleri de (UT saat başı epoklarında) aynı şekilde IERS 14 C04 serisine ilaveten yüksek frekanslı UT1 değişimleri (Petit ve Luzum 2010) öncül değerleri üzerine parçalı lineer ofsetler şeklinde kestirilmiştir. Yer-sabit istasyonların ve gök-sabit kuazarların, ITRF 2014 (Altamimi vd. 2016) ve ICRF2 (International Celestial Reference Frame 2, Fey vd., 2009) Yersel ve Göksel referans çatıları (katalog koordinatları) öncül

koordinatlarına, No-net-translation/No-net-rotation (NNT/NNR, TRF ve NNR, CRF) datum koşulları uygulanarak, günlük düzeltmeler kestirilmiştir. Her bir ölçü epogu için istasyonların TRF katalog koordinatlarına hız düzeltmeleri yanında, katı yer gel-gitleri (Petit ve Luzum 2010), okyanus gel-gitsel yüklemeleri (Lyard vd. 2006), kutup gel-gitleri (Petit ve Luzum 2010) ve atmosferin gel-gitsel ve gel-gitsel olmayan yüklemeleri (Petrov ve Boy 2004) kaynaklı yerdeğiştirme düzeltmeleri getirilmiştir. Troposfer başucu ıslak gecikmeleri saatlik ve troposfer gradyanları 6 saatlik kestirim aralıkları ile Davis vd. (1985; 1993) troposfer modeli kullanılarak parçalı lineer ofsetler şeklinde kestirilmiştir. Troposfer modelinde azimuttan bağımsız gecikmeler için Vienna troposfer izdüşüm fonksiyonu (Vienna mapping function, VMF1, Böhm vd. 2006b), azimuta bağımlı gecikmeler için Chen ve Herring (1997) gradyan izdüşüm fonksiyonu kullanılmıştır. Korelatörlerde kestirilen ve VLBI ölçü dosyalarında yer alan iyonosfer sinyal gecikmeleri değerleri her bir ölçüden parametre kestirimi öncesi indirgenmiştir. Okumaları sabit alınan (hatasız kabul edilen) herhangi bir saate göre diğer saatlerin senkronizasyon ve frekans hataları, her saat için oluşturulan kuadratik bir polinomun ofset ve trend katsayıları kestirilerek ölçülerden indirgenmiştir.

#### 4. Bulgular

2008 yılı başından 2017 yılı Ocak ayı sonuna kadar Intensive oturumlarının (IVS-INT1, -INT2 ve -INT3) analizinden elde edilen UT1 kestirim değerlerinin doğrulukları IVS-R1 ve -R4'dan elde edilenleri (referans UT1 serisi) ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. İlk aşamada, StandartUT1(A1) serisinde karesel ortalama hataları (formal uncertainties)  $50 \mu s$ 'den büyük olan UT1 kestirimleri kaba hatalı olarak kabul edilerek bu seriden atılmıştır. Diğer iki serideki (YeniUT1(A2) ve YeniUT1(A3)) aynı indislere (aynı epoklara) karşılık gelen UT1 kestirimleri bu serilerden de atılmıştır. Böylece, UT1 kestirimi karşılaştırmalarında esas alınmak üzere her bir seride, aynı kestirim epoklarına sahip, 1992 adet UT1 değeri kalmıştır. Bu çalışma kapsamında önerilen yeni analizlerin (Analiz 2 ve Analiz 3) IVS standart analizine (Analiz 1) kıyasla anlamlı bir UT1 değişimi sağlayıp



sağlamadığını görmek adına, hafta içi günlerde gerçekleştirilen IVS-INT1 oturumlarından elde edilen YeniUT1(A2) ve YeniUT1(A3) kestirimlerinin StandartUT1(A1) kestirimlerinden farkları alınmıştır. Farkların ağırlıklı ortalamaları (weighted mean, WM),

$$WM = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{UT1_{Analiz2,i} - UT1_{Analiz1,i}}{\sigma_{UT1_{Analiz2,i}}^2 + \sigma_{UT1_{Analiz1,i}}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{UT1_{Analiz2,i}}^2 + \sigma_{UT1_{Analiz1,i}}^2}} \quad (5)$$

ve farkların ağırlıklı standart sapmaları (WRMS),

$$WRMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(UT1_{Analiz2,i} - UT1_{Analiz1,i} - WM)^2}{\sigma_{UT1_{Analiz2,i}}^2 + \sigma_{UT1_{Analiz1,i}}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{UT1_{Analiz2,i}}^2 + \sigma_{UT1_{Analiz1,i}}^2}}} \quad (6)$$

eşitliklerinden hesaplanmış ve Çizelge 2’de verilmiştir. Eşitlik (5 ve 6)’daki, örneğin;  $UT1_{Analiz1,i}$  Analiz 1’den kestirilen  $i$  indisli StandartUT1(A1) kestirimini,  $\sigma_{UT1_{Analiz2,i}}$  Analiz 2’den kestirilen  $i$  indisli YeniUT1(A2) kestirim değerinin standart hatasını ve  $n$  serilerdeki UT1 kestirim sayısını göstermektedir.

**Çizelge 2.** IVS-INT1 oturumlarından kestirilen UT1 farklarının WRMS değerleri. UT1 kestirimlerinin standart hatalarının medyanı köşeli parantez içerisine (örneğin; [YeniUT1(A2) | StandartUT1(A1)]) şeklinde yazılmıştır.

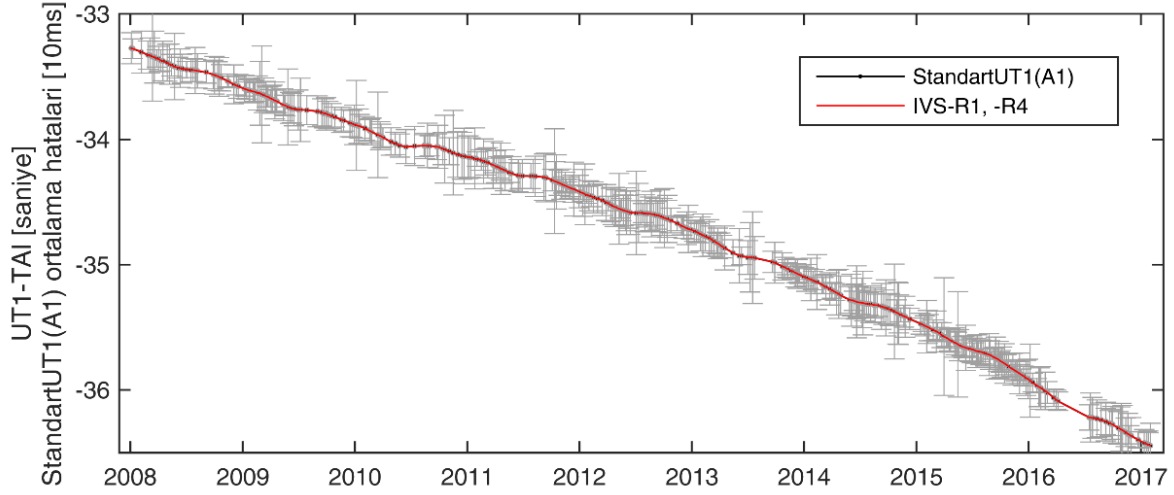
Analizler (1992 UT1 çifti)	UT1 farklarının WRMS değerleri ( $\mu s$ )
YeniUT1(A2) – StandartUT1(A1)	$\pm 11.3$ [11.4   11.4]
YeniUT1(A3) – StandartUT1(A1)	$\pm 17.2$ [18.0   11.4]

Çizelge 2’de sunulan farkların WRMS değerlerine bakıldığında, Analiz 2 ile elde edilen UT1 kestirimlerinin (YeniUT1(A2)) Analiz 3 ile elde edilenlere göre (YeniUT1(A3)) IVS standart analizi sonuçlarına (StandartUT1(A1)) daha yakın olduğu

görülmektedir. Intensive oturumlarının farklı analizlerinin karşılaştırılması bize UT1 kestirim doğruluğuna ilişkin artış sağlanıp sağlanmadığına dair bir bilgi vermez. Fakat, Intensive analizlerimiz arasında anlamlı UT1 değişimlerinin oluştuğunu böylece kullanılan analiz yöntemlerinin UT1 değerlerini anlamlı büyüklüklerde (1 mikrosaniyeden fazla) değiştirebildiğini gösterir.

Daha önce de belirtildiği üzere, bu çalışmada 24 saatlik IVS-R1 ve -R4 oturumlarından saatlik aralıklarla UT1 parçalı lineer ofsetler kestirilmiştir. Intensive oturumlarında ise bir saatlik tüm oturum ölçülerinden bir adet UT1 ofseti kestirimi yapılmış ve kestirim epokları Intensive oturumlarının ortası olarak belirlenmiştir. Karşılaştırmamızda, Intensive oturumları UT1 kestirim epokları ile IVS-R1, -R4 UT1 kestirim epokları arasında 1 saat veya daha az bir süre geçen IVS-R1, -R4 UT1 değerleri, Intensive oturumları UT1 epoklarına lineer enterpole edilmiş ve ardından enterpole edilen IVS-R1, -R4 UT1 değerleri ile Intensive UT1 değerlerinin farkları alınmıştır (Şekil 3).

IVS-R1, -R4 UT1 değerlerinin, Intensive UT1 kestirim epoklarına enterpolasyonlarında, sıçrama saniyeleri (1 Ocak 2017’den itibaren UTC –TAI = -37 saniye) kaynaklı büyük hataların (1 saniye) oluşmasını engellemek için UT1 değerlerinden sıçrama saniyeleri indirgenerek UT1-TAI değerleri kullanılmıştır (Şekil 2). IVS-R1, -R4 oturumlarında standart hatası 20  $\mu s$ ’den küçük olan UT1 kestirimleri, Intensive oturumlarda standart hatası 50  $\mu s$ ’den küçük UT1 kestirimleri ve bunların arasında kestirim epokları farkları 1 saatten küçük olanları (toplam 642 adet UT1 farkı) karşılaştırmalarda (Çizelge 3) dikkate alınmıştır.



**Şekil 2.** 2008 yılı başından 2017 yılı Ocak ayı sonuna kadar gerçekleştirilen IVS-R1, -R4 oturumları ile IVS-INT1 oturumlarının UT1 kestirimleri. StandartUT1(A1) değerlerinin standart hataları, görülebilir olmasını sağlamak amacıyla, 10xmilisaniye (ms) birimine dönüştürülerek çizdirilmiştir.

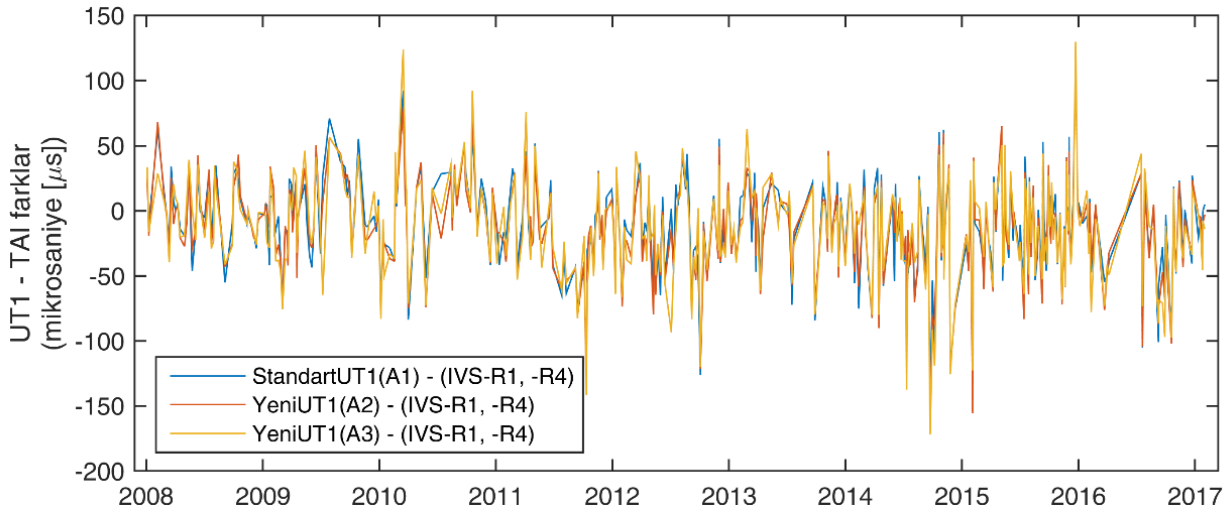
**Çizelge 3.** IVS-INT1 (Intensive) ve IVS-R1, -R4 oturumlarından kestirilen UT1 değerlerinin farklarının WRMS değerleri. UT1 kestirimlerinin standart hatalarının medyanı köşeli parantez içerisinde [IVS-INT1 | IVS-R1, -R4] şeklinde yazılmıştır.

Analizler (642 UT1 çifti)	UT1 farklarının WRMS değerleri ( $\mu s$ )
StandartUT1(A1) – R1R4	$\pm 35.8$ [10.9   12.8]
YeniUT1(A2) – R1R4	$\pm 35.7$ [11.0   12.8]
YeniUT1(A3) – R1R4	$\pm 36.6$ [18.1   12.8]

IVS-INT1 oturumları ile IVS-R1, -R4 oturumları saatlik UT1 parçalı lineer ofset kestirim değerleri farklarının WRMS değerlerine bakıldığında (Çizelge 3) Analiz 2 ve Analiz 3 ile anlamlı bir iyileşme sağlanmadığı (<1 mikrosaniye) görülmüştür.

Analiz 2 ve Analiz 3 sonuçlarında Analiz 1 sonuçlarına göre anlamlı bir doğruluk iyileşmesinin

görülmeme nedeni, referans serisi olmasına karar verilen IVS-R1, -R4 saatlik UT1 doğruluklarının karşılaştırmalarda referans kabul edilebilirlikte doğruluk yeterliliğinde olmamasıdır. Şöyleki, UT1 standart hatalarının medyanları karşılaştırıldığında (Çizelge 3, köşeli parantez içerisindeki değerler); IVS-R1, -R4 oturumlarından elde edilen saatlik UT1 kestirimlerinin standart hatalarının medyanı ( $12.8 \mu s$ ), StandartUT1(A1)'dan (Analiz 1) kestirilenlere, ( $10.9 \mu s$ ) ve YeniUT1(A2)'den (Analiz 2) kestirilenlere ( $11.0 \mu s$ ) kıyasla daha yüksektir (Çizelge 3). IVS-R1, -R4 saatlik UT1 kestirimlerinin standart hatalarının, Intensive oturumlarından kestirilen UT1 standart hataları dolaylarında olması bizi doğruluğu yüksek bir referans serisi üretilmediği sonucuna götürmüştür.



**Şekil 3.** IVS-R1, -R4 oturumları ile IVS-INT1 (Intensive) oturumlarının UT1 kestirimleri farkları.

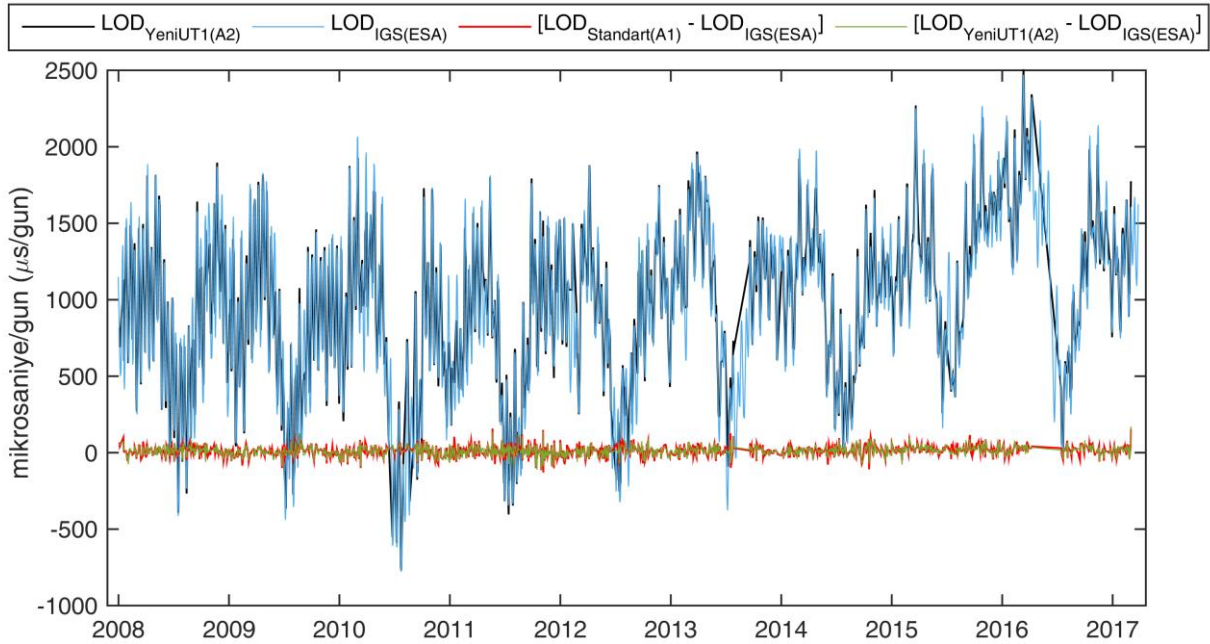
IVS tarafından IVS-R1, -R4 oturumlarının Yer yönelim parametreleri (EOP) belirleme amaçlı planlandığı düşünüldüğünde, IVS-R1, -R4 UT1 parçalı lineer ofset kestirim aralıklarının 1 saatten daha fazla olması gerektiği, böylece daha fazla ölçü ve daha iyi bir geometri sağlanarak doğruluğu daha yüksek UT1 referans serisi elde edilebileceği düşünülmektedir. IVS-R1, -R4 saatlik kestirimlerden doğruluğu yüksek bir UT1 referans serisi üretmediğimiz için VLBI tekniğinden bağımsız olarak doğruluğu VLBI tekniğine göre çok daha yüksek olduğu kanıtlanan (Rothacher vd. 1999; Steigenberger vd. 2006; Dow vd. 2009) UT1'in zamana göre türevi olan GNSS (IGS) gün-uzunluğu serileri elde edilmiştir. Bu kapsamda IGS analiz merkezlerinin: European Space Agency, European Space Operations Centre (ESA/ESOC), Almanya; National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory (NASA/JPL), Amerika Birleşik Devletleri; National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geodetic Survey (NOAA/NGS), Amerika Birleşik Devletleri veri arşivlerinde sunulan, günlük zamansal çözünürlükte ve 12 UT kestirim epoklarındaki GNSS gün-uzunluğu kestirimlerinin 2008 yılı başından 2017 yılı Ocak ayı sonuna kadar olanları elde edilmiştir. Tüm Intensive oturumlarının (IVS-INT1, -INT2, -INT3) UT1 kestirimlerinden VLBI

gün-uzunluğu değerleri, UT1'in zamana göre türevi olan gün-uzunluğu tanımına uygun olarak lineer bir yaklaşım ile,

$$LOD(t) = \frac{UT1(t_1) - UT1(t_2)}{t_2 - t_1} \times 1 \text{ gün} \quad (7)$$

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (t_2 - t_1 < 1.2 \text{ gün})$$

eşitliğinden hesaplanmıştır. Eşitlik (7)'de  $t_1$  ve  $t_2$ , ardışık günlerde gerçekleştirilen Intensive oturumlarının UT1 kestirim epokları; LOD, gün-uzunluğu;  $t$  ise ardışık UT1 kestirim epoklarının ortası şeklinde hesaplanan gün-uzunluğu değerlerinin epoklarıdır. Intensive oturumlarının analizinden elde edilen UT1 kestirimlerinden gün-uzunluğu hesaplarında; UT1 kestirim değerlerinden standart hatası  $50 \mu\text{s}$ 'den küçük olanları ve UT1 kestirim epokları arasındaki zaman aralıkları 1.2 günden az olanları kullanılmıştır. Zamana göre türeve lineer bir yaklaşım olarak Eşitlik (7) esas alındığında UT1 epokları arasında bir günden çok daha fazla zaman aralığı olan UT1 değerlerinden hesaplanan gün-uzunluğu değerleri gerçekçi olmazlar. Bu nedenle gün-uzunluğu hesaplamada kullanılan ardışık UT1 epokları arasında en fazla 1.2 günlük zaman aralığı olması koşulu uygulanmıştır.



Şekil 4. 2008 yılı başından 2017 yılı Ocak ayı sonuna kadar gerçekleştirilen Intensive oturumlarının analizlerinden elde edilen ve IGS, ESA/ESOC analiz merkezinden sağlanan gün-uzunluğu (LOD, 1353 adet) kestirimleri ve farkları.

Uluslararası GNSS Servisi (IGS) analiz merkezlerince kestirilen günlük sıklıkta 12 UT epoklu gün-uzunluğu değerleri Intensive oturumlarından elde edilen gün-uzunluğu epoklarına ( $t$ ) lineer enterpole edilmiş ve sonrasında serilerin farkları alınmıştır (örneğin;  $LOD_{Standart(A1)} - LOD_{IGS(ESA)}$  veya  $LOD_{YeniUT1(A2)} - LOD_{IGS(ESA)}$ ) (Şekil 4). GNSS ve VLBI ölçülerinden kestirilen gün-uzunlukları serilerinin uyuşumlarına ilişkin basit fakat güvenilir kestirimler sunabilen; farkların WRMS değerleri Çizelge 4’de verilmiştir.

**Çizelge 4.** IVS-INT1, -INT2 ve -INT3 (Intensive) oturumları ile ESA(ESOC), NASA(JPL) ve CODE, IGS analiz merkezleri gün-uzunlukları farklarının WRMS değerleri mikrosaniye/gün ( $\mu s / gün$ ) biriminde yazılmıştır. Farkların alınmasında toplam 1353 adet gün-uzunluğu çifti kullanılmış olup, Analiz 1, Analiz 2 ve Analiz 3 için gün-uzunlukları çifti aynı sayıda ve aynı epoklardadır.

	StandartUT1(A1)	YeniUT1(A2)	YeniUT1(A3)
ESA/ESOC	$\pm 34.1$	$\pm 31.7$	$\pm 33.7$
NASA/JPL	$\pm 39.1$	$\pm 36.7$	$\pm 38.6$
NOAA/NGS	$\pm 35.7$	$\pm 33.9$	$\pm 35.5$

YeniUT1(A2) kestirim değerlerinden hesaplanan gün-uzunluklarının, çalışmaya konu IGS analiz merkezlerince (ESA/ESOC, NASA/JPL ve NOAA/NGS) sağlanan gün-uzunlukları değerlerinden farklarının WRMS’leri, StandartUT1(A1) ile elde edilenlere kıyasla yaklaşık 2 ila 3  $\mu s / gün$  daha yakındır. Analiz 3 ile elde edilenlerde ise farkların WRMS’leri yaklaşık 1  $\mu s / gün$  küçülmüştür (Çizelge 4).

IVS-R1 ve -R4 oturumlarının 24 saatlik tüm ölçülerinden günlük (tek ofset) kestirilen VLBI gün-uzunluğu standart hatalarının 15  $\mu s / gün$  dolaylarında, Yerküreyi saran, homojen dağılımlı, çok sayıda (400 dolaylarında) IGS istasyonu ölçülerinden kestirilen GNSS gün-uzunluğu standart hatalarının ise 10  $\mu s / gün$  dolaylarında olduğu Rothacher vd. (1999), Steigenberger vd. (2006) ve Nilsson vd. (2011) ile ortaya konulduğu dikkate alındığında Analiz 2 sonucu kestirilen YeniUT1(A2) serisinden hesaplanan gün-uzunluğu serisinin IVS standart analizine kıyasla doğruluğunun 2 ila 3  $\mu s / gün$  daha yüksek olduğu görülmüştür.

## 5. Sonuç

VLBI Intensive oturumları (IVS-INT1, -INT2 ve -INT3) IVS tarafından sadece UT1 belirlemek amaçlı günlük sıklıkta, bir veya iki saatlik sürelerde gerçekleştirilen oturumlardır. Bu çalışmada, Intensive oturumların IVS standart analizine alternatif olarak yeni bir analiz stratejisi önerilmektedir. IVS Intensive oturumları için önerilen analiz ile, küresel navigasyon uydu sistemleri (GNSS) ölçülerinden elde edilen troposfer gradyanları VLBI ölçülerinin analizine dâhil edilmiştir. Önerilen analiz yöntemi 2008 yılı başından 2017 yılı Ocak ayı sonuna kadar gerçekleştirilen IVS-INT1, -INT2 ve -INT3 (Intensive) oturumlarına uygulanmış ve böylece YeniUT1 serisi kestirilmiştir. YeniUT1 değerlerinin doğruluk analizinde, GNSS (IGS) analiz merkezleri tarafından üretilen gün-uzunluğu değerleri referans serisi olarak esas alınmıştır. Öncelikle, VLBI Intensive gün-uzunluğu (length-of-day, LOD) değerleri YeniUT1 kestirim değerlerinden hesaplanmıştır. Sonrasında, GNSS gün-uzunluğu değerlerinin, VLBI gün-uzunluğu epoklarına lineer enterpolasyonu gerçekleştirilmiştir. VLBI Intensive oturumlarından kestirilen gün-uzunluğu ve GNSS gün-uzunluğu değerlerinin farklarının ağırlıklı standart sapmaları (WRMS) istatistik karşılaştırma ölçütü olarak dikkate alınmıştır. YeniUT1 kestirim değerlerinden hesaplanan gün-uzunluklarının, IGS gün-uzunlukları değerlerinden farklarının WRMS’lerinin, IVS standart analizi ile elde edilenlere kıyasla yaklaşık 2 ila 3  $\mu s / gün$  daha yakın olduğu görülmüştür. Günümüzde, 24 saatlik IVS oturumlarının UT1 belirleme doğruluğunun 1-2  $\mu s$  mertebesine ulaştığı düşünüldüğünde, Intensive oturumlarının analizi sonucu elde ettiğimiz UT1’in zamana göre değişimi olan gün-uzunluğu değerlerinde gördüğümüz 2 ila 3  $\mu s / gün$  doğruluk iyileşmesi anlamlıdır. Böylece, IVS Intensive oturumları için önerilen analiz yöntemi ile IVS standart analizi sonuçlarına kıyasla doğruluğu daha yüksek UT1, YeniUT1 kestirimi gerçekleştirilebilmiştir.

## Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Y244 no’lu bilimsel araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, Uluslararası VLBI Jeodezi ve Astrometri Servisine (IVS, Schuh ve Behrend 2012) ve Uluslararası GNSS Servisine (IGS, Dow vd. 2009) sağladığı

verilerden ötürü, bilinmeyen hakemlere yapıcı ve değerli katkılarından ötürü teşekkür eder.

## Kaynaklar

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., Xavier, C., 2016. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**, 6109–6131, doi:10.1002/2016JB013098.
- Bizouard, C., Lambert, S., Becker, O., Richard, J.Y., 2017. Combined solution C04 for Earth Rotation Parameters consistent with International Terrestrial Reference Frame 2014. *C04 Guide (Preliminary draft)*, Observatoire de Paris, Syrte, Paris, France.
- Böhm, J., Niell, A.E., Tregoning, P., Schuh, H., 2006a. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on data from numerical weather model data, *Geophysical Research Letters*, **33**, L07304.
- Böhm, J., Werl, B., Schuh, H., 2006b. Troposphere mapping functions for GPS and Very Long Baseline Interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*, **111**, B02406.
- Böhm, J., Schuh, H., 2007. Troposphere gradients from the ECMWF in VLBI analysis, *Journal of Geodesy*, **81**, 403–408.
- Böhm, J., Hobiger, T., Ichikawa, R., Kondo, T., Koyama, Y., Pany, A., Schuh, H., 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*, **84** (5), 319-325. doi:10.1007/s00190-10-0370-x.
- Böhm, J., Böhm, S., Nilsson, T., Pany, A., Plank, L., Spicakova, H., Teke, K., Schuh, H., 2011. The new Vienna VLBI Software VieVS. Geodesy for Planet Earth, Proceedings of the 2009 IAG Symposium, Buenos Aires, Argentina, 31 August – 4 September 2009, *International Association of Geodesy Symposia Series*, Vol. **136**, edited by Steve Kenyon, Maria Christina Pacino, Urs Marti, ISBN 978-3-642-20337-4, 1007-1013.
- Byram, S., Hackman, C., Tracey, J., 2011. Computation of a High-Precision GPS-Based Troposphere Product by the USNO, *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, 572–578.
- Byun, S.H., Bar-Server, Y.E., 2009. A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service, *Journal of Geodesy*, **83**, 1-7.
- Chen, G., Herring, T., 1997. Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis from space geodetic data. *Journal of Geophysical Research*, **102** (B9), 20489–20502.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M., 2007. *Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute University of Bern.
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I.I., Rogers, A.E.E., Elgered, G., 1985. Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length, *Radio Science*, **20**, 1593-1607.
- Davis, J., Elgered, G., Niell, A.E., Kuehn, C.E., 1993. Ground-based measurements of gradients in the "wet" radio refractivity of air. *Radio Science*, **28** (6), 1003–1018.
- Dee, D., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A., Van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hersbach, H., Holm, E., Isaksen, I., Kallberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, T., Monge-Sanz, B., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., De Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137**, 553–597.
- Defraigne, P., Smits, I., 1999. Length of day variations due to zonal tides for an inelastic earth in non-hydrostatic equilibrium, *Geophysical Journal International*, **139**, 563-572.
- Dow, J.M., Neilan, R.E., Rizos, C., 2009. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *Journal of Geodesy*, **83**, 191–198.
- Fey, A., Gordon, D., Jacobs, C.S., 2009. The second realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry. *IERS Technical Note*, **35**, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, ISBN 3-89888-918-6.
- Gambis, D., Luzum, B., 2011. Earth rotation monitoring, UT1 determination and prediction, *Metrologia*, **48**, 165-170
- Gross, R.S., 2009. Ocean tidal effects on Earth rotation, *Journal of Geodynamics*, **48**, 219-225.
- Hefty, J., Gontier, A.M., 1997. Sensitivity of UT1 determined by single baseline VLBI to atmospheric delay model, terrestrial and celestial reference frames, *Journal of Geodesy*, **71**, 253-261.

- Herring, T.A., 1996. The IERS 1996 theory of precession/nutation. Editör: McCarthy, D.D., IERS Conventions 1996, *IERS Technical Note* **21**, Observatoire de Paris, 25-32.
- Kantha, L.H., Stewart, J.S., Desai, S.D., 1998. Long-period lunar fort-nightly and monthly ocean tides, *Journal of Geophysical Research*, **103**, 12639-12647.
- Luzum, B., Nothnagel, A., 2010. Improved UT1 predictions through low latency VLBI observations, *Journal of Geodesy*, **84**, 399-402.
- Lyard, F., Lefevre, F., Lettelier, T., Francis, O., 2006. Modelling the global ocean tides, Modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, **56**, 394-415.
- Moritz, H., Mueller, I., 1987. Earth Rotation Theory and Observation, 370 Lexington Avenue, New York, NY 10017: The Ungar Publishing Company.
- Nafisi, V., Madzak, M., Böhm, J., Ardalan, A.A., Schuh, H., 2012. Ray-traced tropospheric delays in VLBI analysis, *Radio Science*, **47**, RS2020.
- Niell, A.E., 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 3227-3246.
- Nothnagel, A., Schnell, D., 2008. The impact of errors in polar motion and nutation on UT1 determinations from VLBI intensive observations, *Journal of Geodesy*, **82**, 863-869.
- Nilsson, T., Böhm, J., Schuh, H., 2011. Universal time from VLBI single-baseline observations during CONT08. *Journal of Geodesy*, **85** (7), 415-423. doi:10.1007/s00190-010-0436-9.
- Petit, G., Luzum, B., 2010. IERS Conventions 2010, *IERS Technical Note* **36**. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, ISBN 3-89888-989-6.
- Petrov, L., Boy, J.P., 2004. Study of the atmospheric pressure loading signal in Very Long Baseline Interferometry observations. *Journal of Geophysical Research*, **109**, B03405.
- Ray, R.D., Steinberg, D.J., Chao, B.F., Cartwright, D.E., 1994. Diurnal and semidiurnal variations in the Earth's rotation rate induced by oceanic tides, *Science*, **264**, 830-832.
- Ray, J.R., Carter, W.E., Robertson, D.S., 1995. Assessment of the accuracy of daily UT1 determinations by very long baseline interferometry, *Journal of Geophysical Research*, **100**, 8193-8200.
- Robertson, D.S., Carter, W.E., Campbell, J., Schuh, H., 1985. Daily Earth rotation determinations from IRIS Very Long Baseline Interferometry, *Nature*, **316**, 424-427.
- Rothacher, M., Beutler, G., Herring, T.A., Weber, R., 1999. Estimation of nutation using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, **104**, 4835-4859.
- Saastamoinen, J., 1972. The use of artificial satellites for geodesy. Chapter Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, pp. 247-251. *Geophys. Monogr. Ser.* **15**, American Geophysical Union.
- Schuh, H., Behrend, D., 2012. VLBI: a fascinating technique for geodesy and astrometry. *Journal of Geodynamics*, **61**, 68-80. doi:10.1016/j.jog.2012.07.007.
- Schuh, H., Böhm, J., 2013. Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astrometry, in G. Xu (ed.), *Sciences of Geodesy II, Innovations and Future Developments*, Springer Verlag, ISBN 978-3-642-27999-7, 339-376.
- Sovers, O.J., Fanelow, J.L., Jacobs, C.S., 1998. Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results, *Reviews of Modern Physics*, **70**, 1393-1454.
- Steigenberger, P., Rothacher, M., Dietrich, R., Fritsche, M., Rülke, A., Vey, S., 2006. Reprocessing of a global GPS network, *Journal of Geophysical Research*, **111**, B05402.
- Teke, K., Boehm, J., Tanır, E., Schuh, H., 2009. Piecewise Linear Offsets for VLBI Parameter Estimation, *Proceedings of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting*, edited by G. Bourda, P. Charlot, A. Collioud, Universite Bordeaux1-CNRS, Bordeaux, France, 63-67.
- Teke, K., Kayıkçı, E.T., Böhm, J., Schuh, H., 2012. Modeling Very Long Baseline Interferometry (VLBI) observations, *Journal of Geodesy and Geoinformation*, **1** (1), 17-26.
- Teke, K., Böhm, J., Madzak, M., Kwak, Y., Steigenberger, P., 2015. GNSS zenith delays and gradients in the analysis of VLBI Intensive sessions. *Advances in Space Research*, **56**(8):16671676.
- Thaller, D., Tesmer, V., Krügel, M., Steigenberger, P., Dach, R., Rothacher, M., 2008. Combining VLBI intensive with GPS rapid solutions for deriving a stable UT time series, Editör: Behrend, D., Baver, K.D. *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2008 General Meeting Proceedings*, 8-13.
- Titov, O., 2000. Influence of adopted nutation model on VLBI NEOS-intensives analysis, *Proceedings of the IAU colloquium 180, Towards models and constants for sub-microarcsecond astrometry*, 27-30 March 2000,

US Naval Observatory, Washington, DC.

Wahr, J.M., 1981. The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth, *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, **64**, 705-727.

Wahr, J., Bergen, Z., 1986. The effects of mantle anelasticity on nutations, Earth tides, and tidal variations in rotation rate, *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, **87**, 633-668.

Webb, F.H., Zumberge, J.F., 1993. *An introduction to GIPSY/OASIS-II, JPL Publication, D-11088*, Pasadena.

Yoder, C.F., Williams, J.G., Parke, M.E., 1981. Tidal variations of Earth rotation, *Journal of Geophysical Research*, **86**, 881-891.

Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., Webb, F.H., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **102**, 5005-5017.