

AVRUPADA DÜŞEY YÖNDE OLUŞAN KABUK HAREKETLERİNİN VLBI İLE BELİRLENMESİ

E.TANIR¹, K. TEKE^{2,3}, H.SCHUH³

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü,
Jeodezi Anabilim Dalı, Trabzon, etanir@ktu.edu.tr

² Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Ankara,
kteke@mars.hg.tuwien.ac.at

³ Technische Universität Wien, Institut für Geodäsia und Geophysik, Forschungsgruppe Höhere
Geodäsia, Viyana, Avusturya, harald.schuh@tuwien.ac.at

Özet

Uluslararası Çok Uzun Baz Enterferometrisi Jeodezi ve Astrometri Servisi (International Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astrometry, IVS) bünyesinde Avrupa'daki kabuk hareketlerini belirlemek ve Avrupa için sürdürülen duyarlılığı yüksek ve stabil yer sabit referans çatisına (European Terrestrial Reference Frame, ETRF) katkı sağlamak amacıyla 1989 yılının sonundan bu yana düzenli bir şekilde yılda 6-8 sayıda 24 saatlik "IVS-Avrupa" oturumları gerçekleştirilmektedir. Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTU), Harita Mühendisliği Bölümünde kurulan 'KTU GEOD' VLBI Analiz Merkezi, IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) tarafından öngörülen bilimsel faaliyetlerini, öncelikli olarak Avrupa VLBI Ağı (European VLBI Network, EVN) ve Avrupa Yersel Referans Sistemi (European Terrestrial Reference System, ETRS) 'nin gelişimine katkı sağlayacak şekilde şekillendirmiştir. KTU-GEOD IVS Analiz Merkezi araştırmaları kapsamında yürütülen bu çalışmada, Avrupa'daki düşey yöndeki kabuk hareketlerinin belirlenmesi amacıyla İtalya'da Matera, Medicina ve Noto; Almanya'da Wettzell; Rusya'da Svetleo ve Zelenchuskaya; İsveç'de Onsala ve Norveç'de Ny-Alesund olmak üzere toplam 8 VLBI istasyonunda 1990-2010 yılları arasındaki 20 yılda gerçekleştirilen toplam 95 IVS-Avrupa oturumu VieVS (Vienna VLBI Software) yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve her bir istasyon için ilgili epoktaki kartezyen koordinatlar kestirilmiştir. Radyo teleskoplarının TRF koordinat zaman serisinden, noktalarındaki hız vektörlerinin belirlenmesi, EKK yöntemi ile birinci derece bir polinomun katsayıları kestirilerek gerçekleştirilmiştir. Çalışmada IVS-Avrupa oturumlarının analizi sonucunda elde edilen düşey hız vektörleri GNSS, EUREF (Global Navigation and Satellite Systems, European Reference Frame) çözümü sonuçları ile karşılaştırılmış ve birçok noktada hızın yönü ve büyüklüğü cinsinden uyumlu olduğu sonucu elde edilmiştir. Onsala ve Ny-Alesund VLBI yerleşkeleri sırasıyla 4mm/yıl ve 8mm/yıl büyüklüklerinde yükselmektedir. Diğer tüm Avrupa noktalarında yükselme yönündeki hareketlere rağmen İtalya, Medicina'da görülen alçalma miktarı (2 mm/yıl) o yerleşkedeki IVS-Avrupa ve GNSS-EUREF oturumları çözümleri ile uyumludur. Bu durum Medicina'da plakadan bağımsız bölgesel bir çökme olduğu yönünde bir kanı uyandırmaktadır. Avrupadaki 1mm/yıl içerisinde kalan büyüklüklerdeki radyal hızlar (yükselen) istatistiksel olarak anlamlı çıkmaktadır. Kestirilen parametre sayısının fazla olması istatistik testte (parametre anlamlılık testi) serbestlik derecesinin büyük olmasına bu durumda parametrenin istatistiksel

testten geçmesine neden olmaktadır. Fakat, radyal bileşendeki hata kaynakları ve gün içi spektraya sahip gel-git büyüklüklerinin yatay bileşene göre çok daha fazla olduğu dikkate alındığında bu değer (1 mm/yıl) ve altındaki radyal hızların anlamlı olamayabileceği sonucuna varılmıştır. IVS-Avrupa çözümünden 2000.0 referans epogu için elde edilen yer sabit referans çatısı (TRF) ile ITRF 2005 ve VTRF 2008 gibi farklı yer sabit referans çatıları arasındaki 3 boyutlu Helmert dönüşümü parametreleri hesaplanmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar kelimeler: *IVS-Avrupa oturumu, VLB istasyonu, düşey yönde kabuk hareketi, VieVS (Vienna VLBI Software), ITRF, radyal hız.*

DETERMINATION OF VERTICAL CRUSTAL MOTIONS IN EUROPE BY VLBI

Abstract

Geodetic Very Long Baseline Interferometry (VLBI) observations of European VLBI network (EVN), have been scheduled as IVS-Europe VLBI sessions and carried out regularly as 6-8 sessions per year by International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) since latest 1989 in order to establish a stable and accurate geodetic reference frame covering Europe (e.g., ETRF). 'KTU GEOD' IVS (International VLBI Service) Associate Analysis Center (AC) which is established at the Department of Geomatics, Karadeniz Technical University (KTU) are formed its foreseen studies by IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) to contribute development of European VLBI Network (EVN) and European Terrestrial Reference System, ETRS (European Terrestrial Reference Frame). This study conducted within the context of KTU-GEOD IVS AC researches, 95 IVS-Europe VLBI sessions of eight stations -Matera, Medicina and Noto in Italy; Wettzell in Germany; Svetlevo and Zelenchuskava in Russia; Onsala in Sweden; Ny-Alesund in Norway- over along period of 20 years were analysed with VieVS (Vienna VLBI Software) and cartesian coordinates for corresponding time epoch were calculated to determine the vertical crustal motion in Europe. Then, offset and trend were estimated by applying Least Square Estimation to coordinate time series for each individual station and horizontal and vertical crustal motion velocities were calculated. Estimated vertical position time series of VLBI reference points in Europe were compared with those of the corresponding co-located Global Navigation Satellite Systems (GNSS) sites. IVS-Europe sessions radial position time series estimated by VieVS software are compatible with the EUREF solution at co-located sites in direction and more or less in magnitude. The VLBI sites of Onsala and Ny-Alesund are rising at rates 4mm/year and 8mm/year, respectively. Although the other European VLBI sites are rising, the subsidence rate of 2mm/year at site Medicina of Italy is compatible with the solutions of IVS-Europe and GNSS-EUREF solutions. This situation comes through that Medicina has local subsidence independent from plate. The radial velocities at Europe up to 1mm/year (rising) are found statistically significant. The great number of estimated parameters causes to high degree of freedom at statistics test (parameter significance test) and so has parameters being significant after parameter significance test. However, it is come to conclusion that this rate of radial component (1mm/year) and smaller of it might not be significant when taking into account that error sources and tide magnitudes having tidal spectra in radial component are very high compared to those of horizontal component. 3D Helmert transformation parameters were calculated between new Terrestrial Reference Frame (TRF) calculated from IVS-Europe solution with VieVS and ITRF 2005 and VTRF 2008 and the results were interpreted.

Keywords: *IVS-Europe sessions, VLB station, vertical crustal motion, VieVS (Vienna VLBI Software), ITRF, radial velocity.*

1. Giriş

Jeodezik VLBI ölçülerini gerçekleştiren çeşitli enstitü üyelerinin oluşturmuş olduğu topluluk olan Avrupa Jeodezik Çok Uzun Baz Enterferometrisi (VLBI) grubu Avrupa Jeodezik VLBI programını 1989 yılının sonundan itibaren düzenli olarak yürütmektedir. 1989'un sonundan 1999'un sonuna kadar toplam 52 oturumda VLBI ölçüleri yapılmıştır. 2010 yılı itibarıyla yılda ortalama 6-8 oturum planlanmakta ve gerçekleştirilmektedir. IVS Yönetim Kurulunun 23 Mart 2009 tarihinde Fransa'nın Bordo şehrindeki toplantısında KTÜ Harita Mühendisliği Bölümünde KTU-GEOD adıyla Türkiye'de ilk olmak üzere bir VLBI Analiz Merkezinin kurulmasına oy birliği ile karar verilmiştir. Uluslararası düzeydeki uzay jeodezik çalışmalara katkı sağlayabilmek açısından oldukça öneme sahip olan bu analiz merkezi, IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) tarafından öngörülen faaliyetlerini öncelikli olarak Avrupa VLBI Ağı (European VLBI Network, EVN) ve Avrupa Yersel Referans Sistemi (European Terrestrial Reference System, ETRS)'nin gelişimine katkı sağlayacak şekilde şekillendirmiştir (Tanır vd. 2009b, Tanır 2009). 'KTU GEOD' VLBI Analiz Merkezinin yürütmekte olduğu araştırma faaliyetleri kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmanın amacı, Uluslararası Çok Uzun Baz Enterferometrisi Jeodezi ve Astrometri Servisi (IVS) tarafından 1990-2010 yılları arasında yapılan IVS-Avrupa oturumlarının analiz sonuçlarıyla Avrupa'daki düşey yöndeki kabuk hareketlerini belirlemektir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, GNSS, EUREF (Global Navigation and Satellite Systems, European Reference Frame) çözümünden (farklı IGS analiz merkezlerinden elde edilen normal denklem sistemlerinin kombinasyonunun çözümü) elde edilen düşey yöndeki yer değiştirmelerle karşılaştırılmıştır. IVS-Avrupa çözümünden 2000.0 referans epogu için elde edilen yer sabit referans çatısı (TRF) ile ITRF 2005 (International Terrestrial Reference Frame 2005) ve VTRF 2008 (VLBI Terrestrial Reference Frame) gibi farklı yer sabit referans çatıları arasındaki 3 boyutlu Helmert dönüşümü parametreleri hesaplanmıştır.

2. Avrupa Jeodezik VLBI Ağı

Günümüzde Avrupa jeodezik VLBI ağı 13 sabit istasyonu içermektedir: Onsala (İsveç), Wettzell (Almanya), Madrid (İspanya), Medicina (İtalya), Matera (İtalya), Noto (İtalya), Effelsberg (Almanya), Simeiz (Ukrayna), Ny Alesund (Norveç), Yebes (İspanya), Svetloe (Rusya), Badary (Rusya) ve Zelenchukskay (Rusya). 1989 yılının sonunda başlayan ilk ölçüler Onsala, Wettzell, Madrid, Medicina, Matera ve Noto istasyonlarını içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 1991 yılında Effelsberg, 1994 yılında doğu ve kuzey yönünde ağı genişletecek şekilde Simeiz ve Ny Alesund, 1995 yılında Yebes ve son olarak da Svetloe, Badary ve Zelenchukskay istasyonları Avrupa Jeodezik VLBI ağ ölçülerine katkı sağlamaya başlamıştır. İlk yıllarda, yıllık üç oturum ölçülürken, günümüzde yıllık ortalama 6-8 oturum ölçüsü yapılabilmektedir. Bu çalışmada hız kestiriminde kullanılan koordinat zaman serisi (4 yıldan az) süresi yeterli görülmeyen VLBI istasyonları kullanılmamıştır.



Şekil 1. IVS-Avropa oturumlarındaki VLBI radyo teleskopları (antenleri)

3. Bölge Hakkında Bazı Jeodinamik Bilgiler

Avrupa Jeodezik VLBI ağıнын çevrelediği alan jeodinamik anlamda kuzey, merkez ve güney olmak üzere üç ana bölüme ayrılabilir. Ağın kuzey bölümü olan İskandinavya yarımadası yaklaşık 10,000 yıl önce buzul tabakasının kaybolmasından sonra izostatik esneklik etkisi altındadır. Onsala ve Ny-Alesund istasyonlarının her ikisi de buzul sonrası yükselme (post-glacial uplift) etkisi altında olan alan üzerinde konumlandırılmıştır. Ağın merkez bölümü temelde Avrupa'nın sağlam bölümü olarak kabul edilmektedir. Wettzell ve Effelsberg istasyonları buzul sonrası ileri esneklik (post-glacial fore-bulge) alanının güneyi olan bu merkez alanda bulunmaktadır. Ağın güney bölümünde, batı Akdeniz bölgesi, Alps-Appenines sistemi etkisi hakimdir (Campbell ve Nothnagel 2000; Campbell vd. 2002; Campbell 2004; Haas vd. 2000; Haas vd. 2000).

4. Veri Analizi

1990-2010 yılları arasındaki 95 Avrupa jeodezik VLBI oturumu VieVS (Viyana VLBI Yazılımı) kullanılarak analiz edilmiştir (Böhm et vd., 2010). VieVS, IERS 2003 konvansiyonlarını temel alan ve MATLAB dilinde yazılmış güncel bir VLBI jeodezik ve jeofizik parametre kestirim yazılımıdır. Yazılım, VLBI parametrelerini Gauss-Markof modeline uygun En Küçük Kareler (EKK) kestirim yöntemi ile elde etmektedir (Teke vd., 2009).

VieVS yazılımı, farklı parametre kestirimi seçeneklerini sunmaktadır. Uygulayıcı, analiz sonuçlarını kullanım amacına göre, hangi parametrelerin kestirileceği, kestirim aralıklarını, parametreler için zorlamalı veya gevşek kısıtlayıcı çözümlerini, farklı radyo teleskopları için, farklı atomik saatler için ve farklı kuazarlar (quasi-stellar radio source, quasar: galaksi dışındaki radyo kaynakları, örn. diğer galaksiler) için NNT/NNR koşullarını seçebilir. Parametre kestirimi öncesi farklı troposferik izdüşüm fonksiyonları (Vienna mapping function, VMF1 (Böhm vd., 2006a); Global mapping function, GMF (Böhm vd., 2006b); Niel mapping function, NMF (Niell, 1996)) farklı kesme açıları için uygulanabilir. Farklı CRF katalogları (örn. ICRF2) veya farklı TRF katalogları (örn. ITRF08, VTRF08) datum seçiminde öncül değerler olarak kullanılabilir. İstasyon konumlarına uygulanan jeofizik modellerden katı Yer gel-gitleri (solid Earth tides, e.g. Matthews vd., 1997) etkisi, okyanus gel-git yüklemeleri (tidal ocean loading, FES2004, Lyard vd., 2006), atmosferik basınç yüklemeleri (atmosphere pressure loading, Petrov and Boy 2004) apriori modele dahil edilir veya çıkarılır. Yer dönme parametreleri yüksek frekanslı gel-gitler ki bunlar: okyanus gel-gitlerinin kutup gezinmelerine etkisi (Eanes modeli), Güneş ve Ay bozucu gravite potansiyelindeki değişimlerin (lunisolar gravitative attraction) kutup gezinmelerine etkisi, UT1 uzun periyotlu gel-git salınımları (UT1 long period tidal variations) (McCarthy ve Petit 2004) öncül (a priori) modele dahil edilebilir veya çıkarılabilir (Boehm vd., 2009; Schuh vd., 2009; Tanır vd., 2009).

Bu çalışmada, toplam 95 Avrupa VLBI oturumu ayrı ayrı analiz edilmiştir. VLBI ağı datumunun belirlenmesinde, 'No Net Translation (NNT)' ve 'No Net Rotation (NNR)' koşul denklemleri normal denklemlerin katsayıları matrisine eklenerek tüm iz minimum koşulunu sağlayacak şekilde a priori TRF'e (VTRF 2008) Helmert dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Diğer bir ifade ile 'NNT' ve 'NNR' koşul denklemleri ile her bir oturum analizi sonucu kestirilen nokta koordinatlarının belirlediği koordinat sistemi ile a priori TRF arasındaki eksen dönüklükleri ve orijin ötelemelerinin sıfır olması koşulunu sağlanmaktadır. Avrupa ağı tüm Yer'i tamamen kaplamadığı için (global polyhedron oluşmadığından ve ağ kuzey yarım kürenin yaklaşık beşte birini kaplamaktadır) Yer dönüklük parametreleri kestirilmemiş ve IERS C04 05 kombinasyon (Bizouard and Gambis 2009) serisine (öncül değerlerine) sabitlenmiştir.

5. Kabuk Hareketlerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Analizler

Her bir oturum için gerçekleştirilen EKK kestirimiyle, Avrupa VLBI oturumlarındaki toplam 6 VLBI istasyonunun ilgili epokları için dengelenmiş koordinatları elde edilmiş ve her bir istasyon için koordinat zaman serisi oluşturulmuştur. İstasyon koordinatlarından trendlerin (hız) belirlenmesi aşağıda verilen şekilde birinci dereceden polinoma EKK uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

$$d_i = X_t - X_{t_0} = a_0 + a_1(t - t_0) + \varepsilon_t \quad (1)$$

Burada, a_0 2000.0 referans epogu için global kartezyen koordinat sisteminde hesaplanan yeni TRF koordinatları ile VTRF 2008 koordinatları arasındaki farkı ifade eden ofseti göstermektedir. a_1 , ise global kartezyen koordinat sisteminde hızı ifade eden trendi gösterir. t_0 referans epogu (2000.0, mjd: 51544) ve t_1 ise parametre kestirim epogudur. X_t , kestirilmesi yapılan nokta TRF koordinatlarını gösterirken, X_{t_0} , t_0 referans epogu VTRF 2008 nokta koordinatlarını gösterir. ε_t , ise EKK kestirimi sonundaki ölçü düzeltmelerini (post-fit observational residuals) göstermektedir. Tablo 1'de, (1) denkleminde göre yeni oluşturulan TRF için elde edilen hız vektörlerini, ITRF 2005 ve VTRF 2008 katalog hızlarını göstermektedir. Tablo 1'deki hız vektörleri karşılaştırıldığında sonuçların yaklaşık 0.1mm seviyesinde uyumlu olduğu görülmektedir.

Avrupadaki Düşey Yöndeki Kabuk Hareketlerinin VLBI İle Belirlenmesi

Tablo 1. IERS'in inter-teknik kombinasyonla elde edilmiş TRF çözümlerinden (ITRF 2005 ve VTRF 2008) ve IVS-Avrupa oturumlarının VieVS çözümünden elde edilen hız vektörleri (tüm çözümler 2000.0 epokludur).

| İstasyonlar | IVS-Avrupa Hızları (cm/yıl) | | | ITRF 2005 Hızları (cm/yıl) | | | VTRF 2008 Hızları (cm/yıl) | | |
|-----------------|--------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------------|----------------|
| | V _x | V _y | V _z | V _x | V _y | V _z | V _x | V _y | V _z |
| MATERA | -1.83 | 1.90 | 1.49 | -1.80 | 1.89 | 1.55 | -1.86 | 1.89 | 1.47 |
| MEDICINA | -1.83 | 1.87 | 1.11 | -1.82 | 1.88 | 1.10 | -1.79 | 1.88 | 1.13 |
| WETTZELL | -1.56 | 1.70 | 1.03 | -1.56 | 1.68 | 1.04 | -1.57 | 1.70 | 1.03 |
| ONSALA60 | -1.38 | 1.46 | 1.08 | -1.37 | 1.44 | 1.09 | -1.40 | 1.44 | 1.06 |
| SVETLOE | -1.94 | 1.17 | 0.74 | -1.68 | 1.43 | 0.88 | -1.83 | 1.22 | 0.83 |
| NYALES20 | -1.40 | 0.73 | 1.05 | -1.42 | 0.71 | 1.02 | -1.42 | 0.73 | 1.08 |

Yatay ve düşey yöndeki lokal toposentrik istasyon hızları, istasyon koordinatları zaman serilerinden hesaplanabilir. Bunun için, global kartezyen koordinat sistemindeki koordinatlar lokal toposentrik koordinat sistemine aşağıdaki şekilde dönüştürür.

$$\begin{bmatrix} d_{Kuzey} \\ d_{Dogu} \\ d_{Radyal} \end{bmatrix} = T^* \begin{bmatrix} d_X \\ d_Y \\ d_Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$d_{\text{lokal}} = (d_{Kuzey}, d_{Dogu}, d_{Radyal})$, koordinat seti, lokal toposentrik koordinat sisteminde IVS-Avrupa analizinden oluşturulan TRF çözümü ve VTRF 2008 çözümü koordinat farklarını; $d = (d_X, d_Y, d_Z)$ ise bu koordinat farklarının global kartezyen koordinat sistemindeki karşılıklarını vermektedir. Burada φ ve λ , enlem ve boylamı göstermektedir. Lokal toposentrik koordinat sisteminde elde edilen istasyon koordinatlarından trendlerin (hız) belirlenmesi için (1) denklemine benzer şekilde aşağıdaki gibi birinci dereceden polinoma EKK uygulanarak gerçekleştirilmiştir:

$$d_{\text{lokal}} = b_0 + b_1(t - t_0) + \varepsilon_{(t)} \quad (4)$$

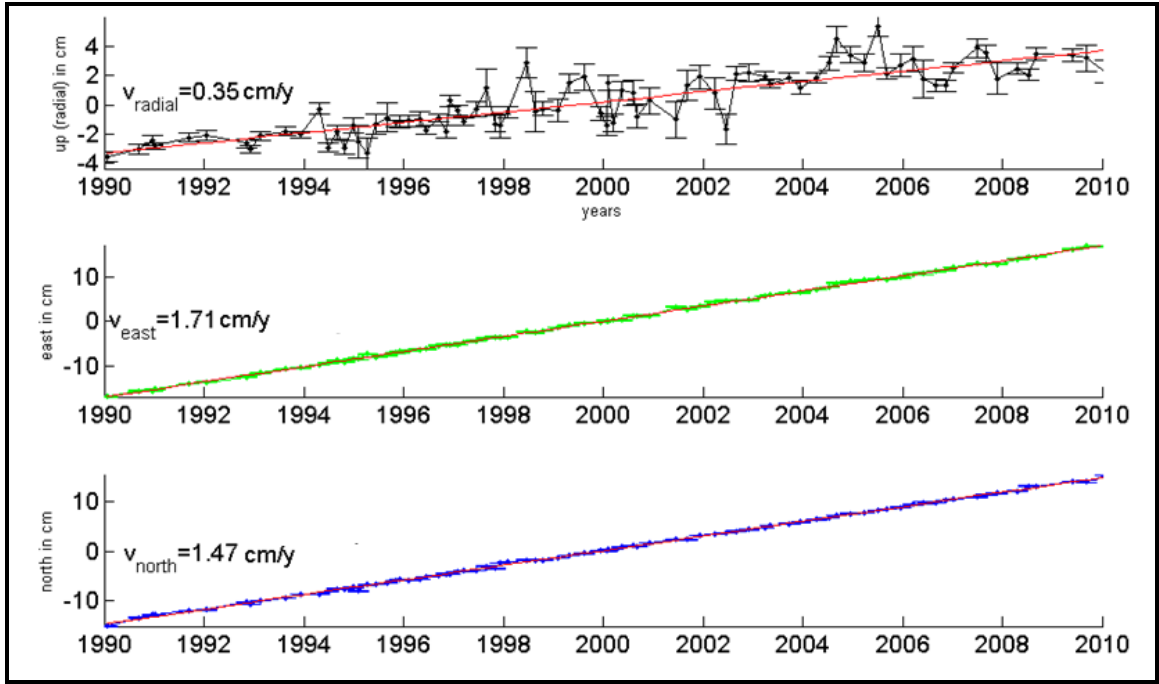
Avrupadaki Düşey Yöndeki Kabuk Hareketlerinin VLBI İle Belirlenmesi

Burada, b_0 , 2000.0 referans epöğü için lokal toposentrik koordinat sistemine dönüştürülen kestirim koordinatları ile VTRF 2008 a priori koordinatları arasındaki farkı ifade eden ofseti göstermektedir. b_1 , ise lokal toposentrik koordinat sistemindeki hızı ifade eden trendi gösterir. t_0 referans epöğü (2000.0, mjd : 51544) ve t_1 ise parametre kestirim epöğüdür. ε_t , EKK kestirimi sonunda kalan ölçü düzeltmelerini göstermektedir. Elipsoidal koordinatları kullanarak global kartezyen koordinatlardan, lokal toposentrik koordinatlara dönüşüm sonrasında elde edilen zaman serilerinden Doğu, Kuzey ve Radyal yönlerdeki hızlar elde edilmiştir. Tablo 2’de lokal toposentrik koordinat sisteminde elde edilmiş IVS-Avrupa, ITRF 2005 ve VTRF 2008 hızları gösterilmektedir (Boucher vd. 2004; Nothnagel 2005; URL 2 ; URL 3). Tablo 2’deki hız vektörleri karşılaştırıldığında yaklaşık 0.1mm seviyesinde sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.

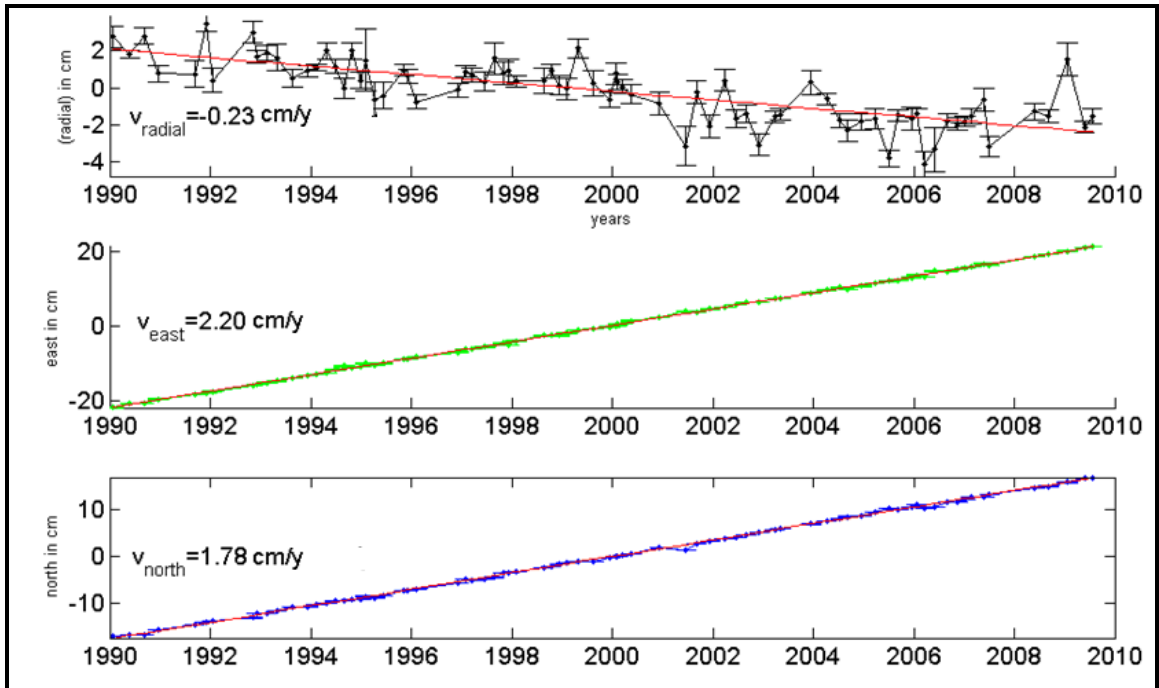
Tablo 2. IVS-Avrupa Oturumlarının VieVS yazılımı ile analizinden elde edilen N, E ve U yönündeki hızları (Tanir vd. 2010).

| İstasyonlar | IVS-Avrupa Hızları (cm/yıl) | | | ITRF 2005 Hızları (cm/yıl) | | | VTRF 2008 Hızları (cm/yıl) | | |
|-----------------|--------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------------|----------------|
| | V _K | V _D | V _R | V _K | V _D | V _R | V _K | V _D | V _R |
| MATERA | 1.92 | 2.35 | 0.03 | 1.95 | 2.33 | 0.11 | 1.92 | 2.35 | 0.02 |
| MEDICINA | 1.77 | 2.20 | -0.23 | 1.77 | 2.21 | -0.23 | 1.77 | 2.20 | -0.19 |
| WETTZELL | 1.54 | 2.00 | 0.03 | 1.55 | 1.99 | 0.04 | 1.55 | 2.01 | 0.03 |
| ONSALA60 | 1.47 | 1.71 | 0.35 | 1.47 | 1.69 | 0.36 | 1.47 | 1.70 | 0.32 |
| SVETLOE | 1.31 | 2.07 | 0.04 | 1.08 | 2.08 | 0.40 | 1.26 | 1.97 | 0.24 |
| NYALES20 | 1.40 | 1.00 | 0.81 | 1.42 | 0.99 | 0.76 | 1.42 | 1.01 | 0.82 |

Avrupadaki Düşey Yöndeki Kabuk Hareketlerinin VLBI İle Belirlenmesi



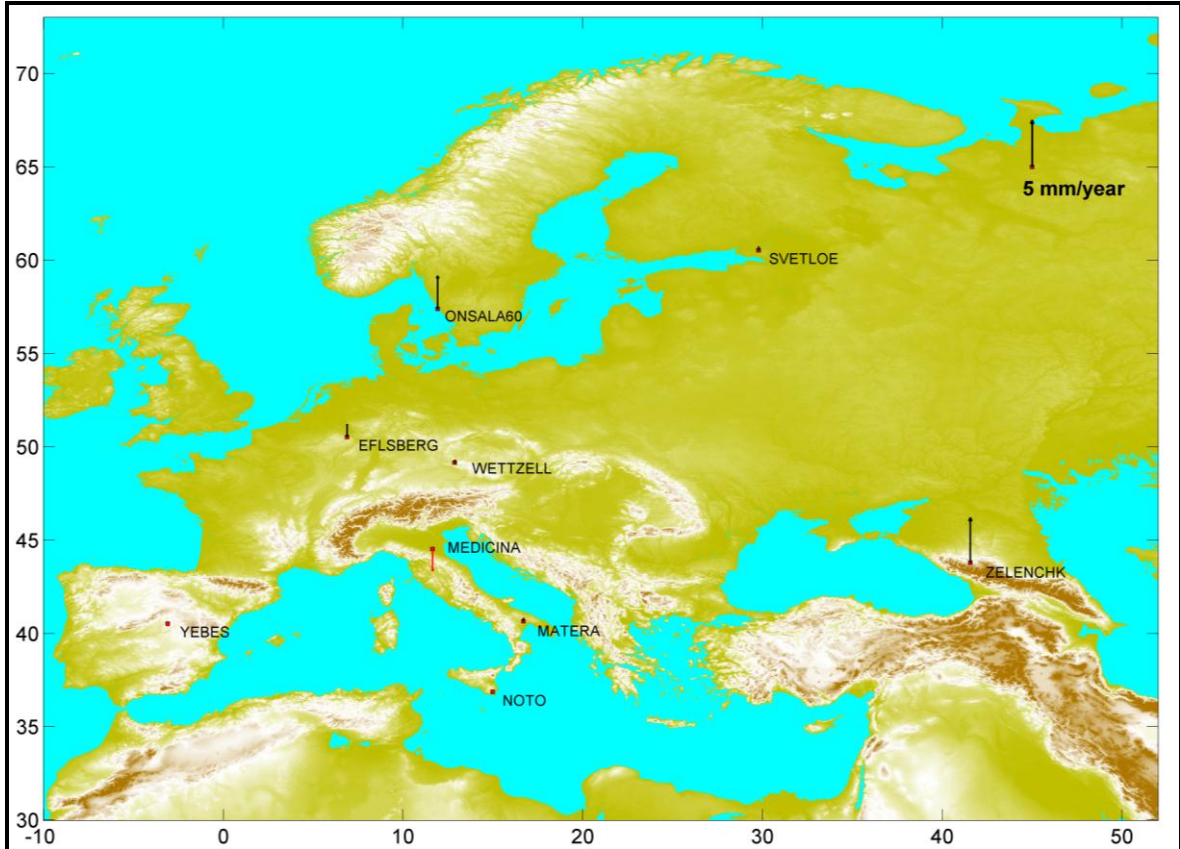
Şekil 2. IVS-Avrupa oturumlarının VieVS, TRF çözümleri, VLBI istasyonu: Onsala, referans epöğü 2000.0, a priori TRF: VTRF 2008



Şekil 3. IVS-Avrupa oturumlarının VieVS, TRF çözümleri, VLBI istasyonu: Medicina, referans epöğü 2000.0, a priori TRF: VTRF 2008

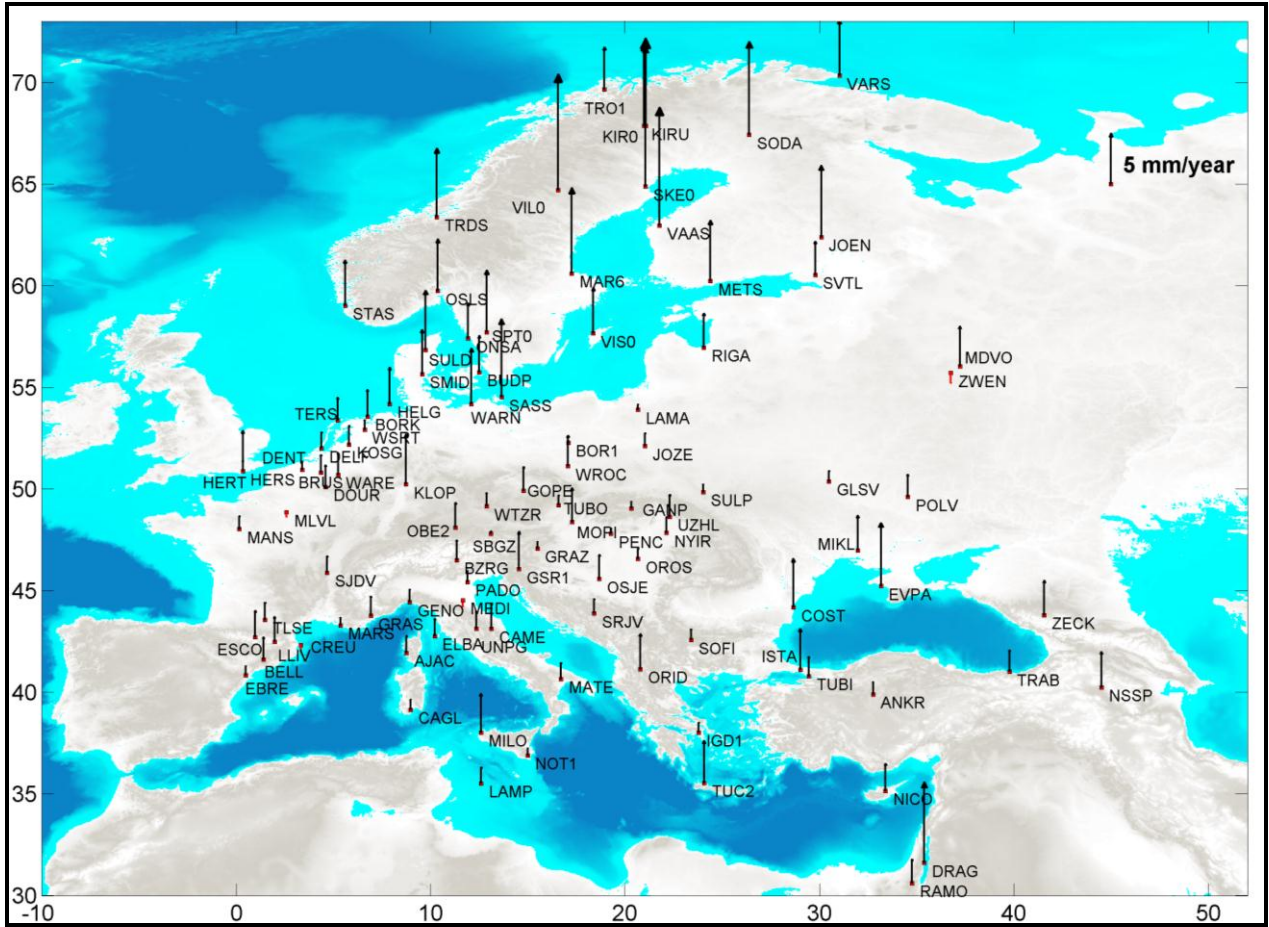
Avrupadaki Düşey Yöndeki Kabuk Hareketlerinin VLBI İle Belirlenmesi

Yapılan analizler sonucunda aynı plaka üzerinde bulunan Onsala ve Ny-Alesund noktalarında sırasıyla yaklaşık 8 mm/yıl ve 3 mm/yıl büyüklüklerinde yükselme olduğu görülmüştür. Bu yükselmenin sebebi, IVS-Avrupa ağıının kuzey bölümündeki iki VLBI istasyonunun buzul sonrası yükselme etkisi (post-glacial rebound) altında olmasıyla açıklanabilir (Plag 2004). İtalya, Medicina istasyonunda yaklaşık 2 mm/yıl büyüklüğünde alçalma olduğu görülmüştür. Buna karşılık Matera radyal yönde hareketsizdir. Almanya'daki Wettzell istasyonunda da Matera istasyonuna benzer şekilde radyal yönde bir hareket tesbit edilmemiştir. (bknz. Şekil 2 ve Şekil 3).



Şekil 4. IVS Avrupa VLBI çözümleri zaman serilerinden elde edilen radyal hız kestirimleri (Tanir vd. 2010)

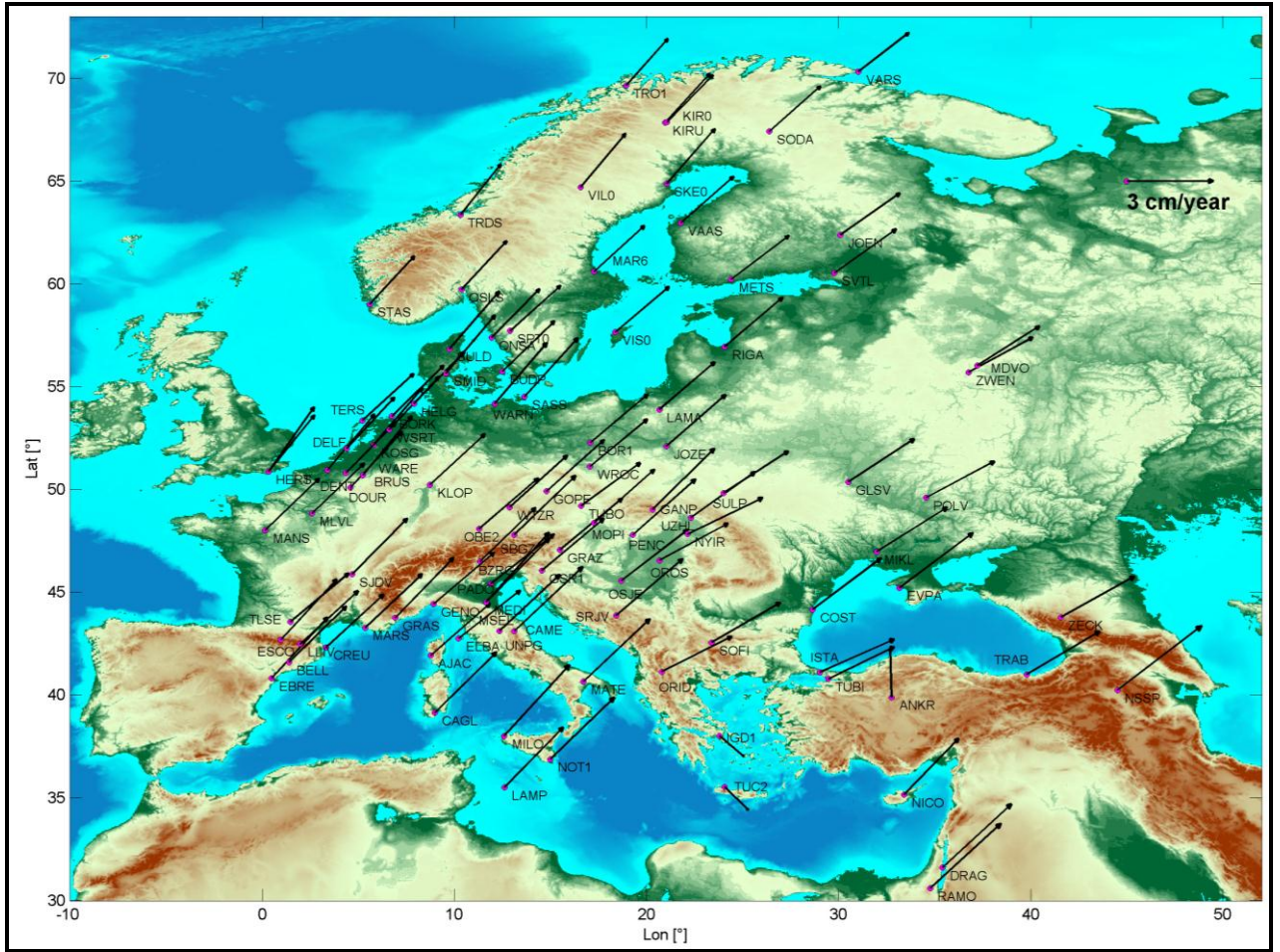
Avrupadaki Düşey Yöndeki Kabuk Hareketlerinin VLBI İle Belirlenmesi



Şekil 5. GNSS EUREF çözümü koordinat zaman serilerinden elde edilen radyal hız kestirimleri (Tanir vd. 2010)

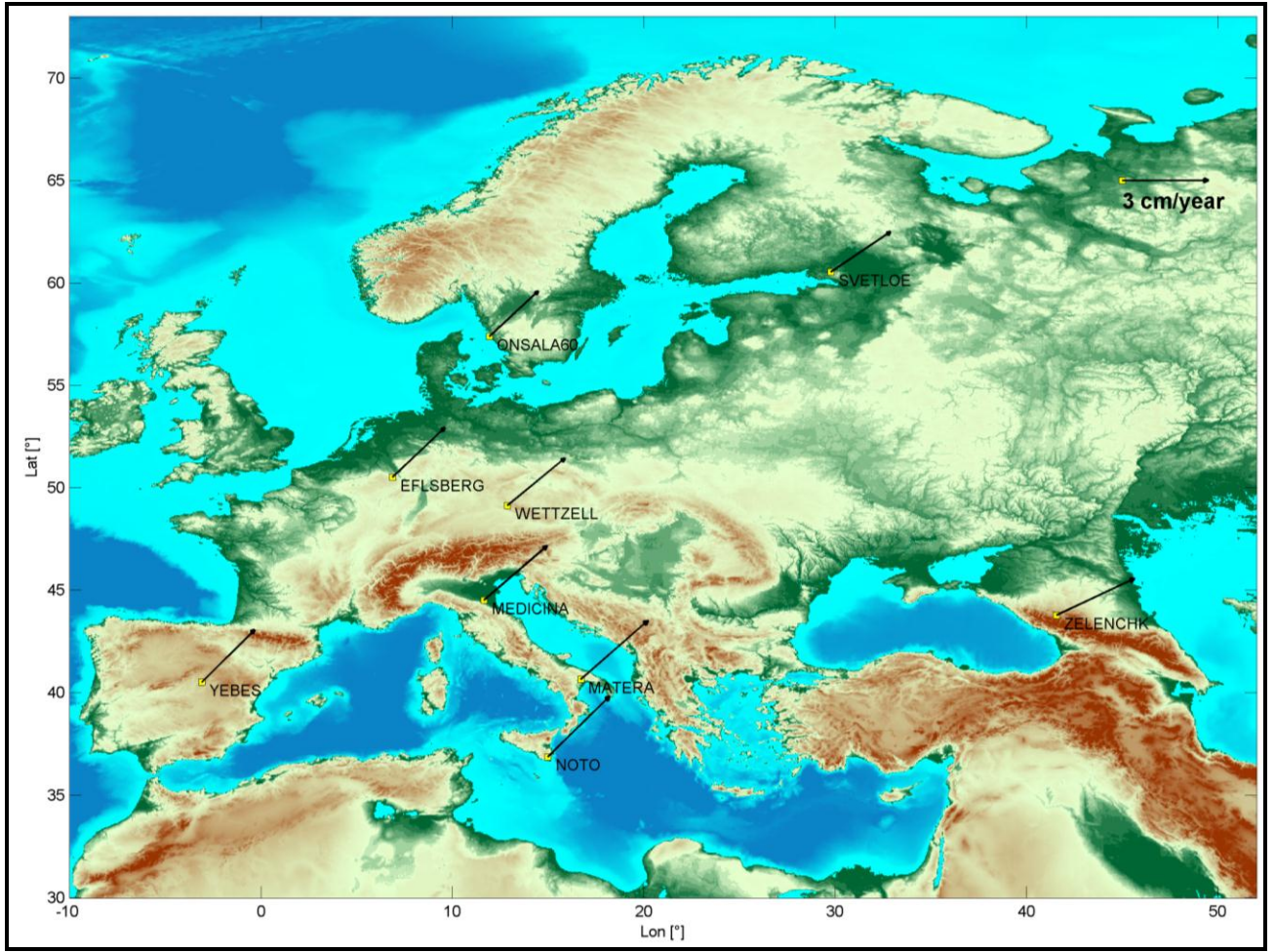
IVS-Avrupa çözümü sonucunda elde edilmiş radyal hız kestirimleri ve GNSS, EUREF (Avrupa Referans Çatısı) çözümü zaman serilerinden elde edilen radyal hız kestirimlerine bakıldığında (Şekil 4 ve Şekil 5), İskandinavya yarımadası üzerindeki noktadaki radyal hız bileşenlerinde ortalama 5 - 8 mm/yıl büyüklüğünde bir yükselme olduğu sonucuna varılır. İskandinavya yarımadasındaki GNSS, EUREF noktaları için elde edilen bu sonuçların IVS-Avrupa çözümünde aynı yarımada üzerinde bulunan Onsala ve Ny-Alesund istasyonlarındaki sonuçlarla uyumlu olduğu kolaylıkla görülmektedir. Benzer şekilde IVS-Avrupa çözümünde İtalya'daki Medicina istasyonunda 2 mm/yıl büyüklüğünde bir alçalma olduğu sonucu elde edilmiştir. Şekil 8'den de anlaşıldığı üzere benzer sonuç GNSS, EUREF sonuçlarından da elde edilmiştir.

Avrupadaki Düşey Yöndeki Kabuk Hareketlerinin VLBI İle Belirlenmesi

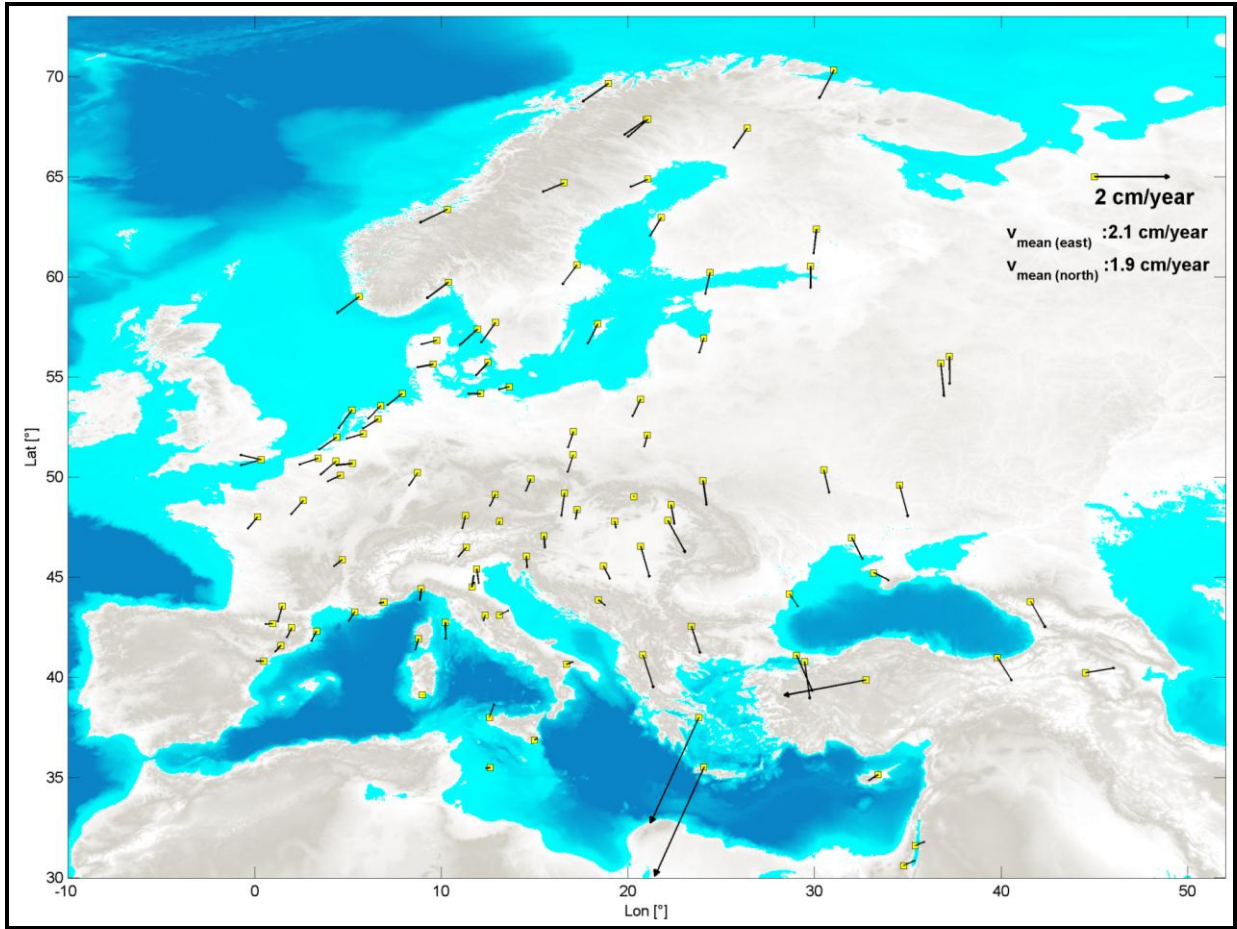


Şekil 6. EUREF çözümlerinden elde edilen global yatay hız vektörleri (Teke vd. 2010)

Avrupadaki Düşey Yöndeki Kabuk Hareketlerinin VLBI İle Belirlenmesi



Şekil 7. IVS-Avrupa oturumlarının VieVS analizinden elde edilen global yatay hız vektörleri (Teke vd. 2010)



Şekil 8. Avrupa plakası sabitlendiğinde(bağıl) yatay hız vektörleri (intra-plate motions) (Teke vd. 2010)

Avrupa plakasının sabitlenmesiyle hesaplanan bağıl yatay hız bileşenlerine bakıldığında, Anadolu ve Ege plakaları üzerindeki noktalarda bağıl yatay hız bileşenlerinin GNSS EUREF ağındaki diğer noktalara göre büyüklüklerinin ve yönlerinin farklı olduğu görülür. Bunun sebebi, Anadolu ve Ege plakalarının Avrupa plakasından bağımsız hareket etmesindedir. Avrupa üzerindeki noktaların bağıl yatay hız vektörlerinin (kıta sabitlendiğinde birbirlerine göre yıllık hareketlerinin) gruplandığı görülmüştür (Şekil 8). Doğu Avrupanın, orta Avrupanın ve Akdeniz kıyı bölgelerinin güney yönünde fakat batı avrupa ve İskandinavya yarımadasının Atlantik okyanusu yönünde (güney-batı) anlamlı yıllık hızlara sahip oldukları görülmüştür. Avrupa kıtasına göre Anadolu ve Ege plakalarının yapmış olduğu radyal hareketler de Şekil 8'de açık bir şekilde görülebilir.

6. IVS-Avrupa, ITRF 2005 ve VTRF 2008 Çözümlerinin Arasındaki Dönüşüm Parametrelerinin Karşılaştırılması

IVS-Avrupa oturumlarının VieVS yazılımı ile analizi sonucu VLBI istasyonlarının global TRF koordinat zaman serileri elde edilmiştir. Bu zaman serilerine EKK parametre kestirimi yöntemi ile (1) eşitliği ile verilen birinci derece polinomun regresyonu gerçekleştirilmiştir. Bu regresyon sonucunda bulunan ofset değeri 2000.0 (t_0) anında VTRF2008 (a priori TRF) koordinatlarından IVS-Avrupa koordinatlarının farkını verir. Trend ise IVS-Avrupa çözümü hız vektörünü vermektedir. Böylece IVS-Avrupa oturumları VLBI noktalarının 2000.0 epoğu koordinatlarını ve hızlarını elde etmiş oluruz. Bu çözüme IVS-Avrupa TRF çözümü denilebilir. IVS-Avrupa, VTRF2008 (farklı VLBI analiz merkezleri çözümlerinin normal

Avrupadaki Düşey Yöndeki Kabuk Hareketlerinin VLBI İle Belirlenmesi

denklem sistemleri düzeyinde kombinasyonundan elde edilen TRF) ve ITRF2005 (farklı uzay jeodezik tekniklerin normal denklem sistemleri düzeyinde kombinasyonundan elde edilen TRF) 2000.0 epogu global kartezyen koordinatları arasındaki Helmert dönüşüm modeli,.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{01} \\ Y_{01} \\ Z_{01} \\ X_{02} \\ Y_{02} \\ Z_{02} \\ \dots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{01} & 0 & -Z_{01} & Y_{01} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{01} & Z_{01} & 0 & -X_{01} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{01} & -Y_{01} & X_{01} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & X_{02} & 0 & -Z_{02} & Y_{02} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{02} & Z_{02} & 0 & -X_{02} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{02} & -Y_{02} & X_{02} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ \mu \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

şeklinde oluşturulup, 7 dönüşüm parametresi EKK parametre kestirimi yöntemi ile elde edilmiştir. Eşitlik (5) te verilen T_x , T_y , ve T_z iki koordinat sistemi arasındaki orijinlerin kayıklıklarını, α , β , ve γ , sırası ile birinci, ikinci ve üçüncü eksen dönüklüklerini, μ ise ölçek faktörünü göstermektedir. X_i , Y_i , Z_i , i noktasının IVS-Avrupa oturumlarının analizi sonucu (a priori TRF: VTRF 2008, datum koşulu: NNT/NNR (6 adet) ölçek koşulu olmadan) elde edilen 2000.0 epogu koordinatlarını, X_{01} , Y_{01} , ve Z_{01} ise VTRF2008 ve ITRF2005 katalog koordinatlarını (her ikisi de 2000.0 epoklu) göstermektedir. Tablo 3 ve Tablo 4’de IVS-Avrupa, VTRF2008 ve ITRF2005 çözümleri arasındaki 2000.0 epogu global dönüşüm parametreleri görülmektedir.

Tablo 3. ITRF 2005 ve IVS-Avrupa arasındaki global dönüşüm parametreleri

| Tx cm | Ty cm | Tz cm | ölçek ppb | alpha (mas) | beta (mas) | gama (mas) |
|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| -2.9 | 11.6 | 0.0 | 0.4 | 0.9 | 3.1 | 0.8 |

Tablo 4. VTRF 2008 ve IVS-Avrupa arasındaki global dönüşüm parametreleri

| Tx cm | Ty cm | Tz cm | ölçek ppb | alpha (mas) | beta (mas) | gama (mas) |
|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0.0 | 0.8 | 0.5 | -0.8 | 0.1 | 0.1 | -0.3 |

Tablo 3 ve Tablo 4’deki dönüşüm parametrelerinin, farklı ITRF çözümleri arasındaki dönüşüm parametreleri ile kıyaslandığında daha büyük değerler aldıkları görülmüştür (URL 1). Bunun sebebi ITRF çözümlerinin elde edildiği ağ, IVS- Avrupa ağına göre daha geniş bir alanı kapsayan ve tüm küreyi temsil eden bir ağ olmasıdır. Diğer bir neden ise IVS-Avrupa ağı çözümünde bölgesel bir ağ olması nedeni ile Yer dönüklük parametrelerinin kestiriminin yapılmamış olması ve model ile hesaplanmış a priori değerlerine sabitlenmesidir. Model ile hesaplanan Yer dönüklük değerleri, ölçülerden kestirilen parametreler kadar hassas olamayacaktır. Yer dönüklük parametreleri ile istasyon TRF koordinatlarının ölçü denkleminde direkt yer alması böylece yüksek matematiksel korelasyona sahip olur. Yer dönme

parametrelerinin kestirilmemesi her ne kadar TRF nokta duyarlıklarına anlamlı etki yapsada, hız vektörleri (non-tidal part of station motion) bu durumdan etkilenmediği net bir şekilde görülmüştür.

7. Sonuç ve Öneriler

Avrupa'daki düşey yöndeki kabuk hareketlerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, IVS-Avrupa oturumlarının VieVS yazılımıyla analizinden elde edilen sonuçlardan her bir istasyon için koordinat zaman serisi üretilmiştir. Bu zaman serilerine EKK parametre kestirimi yöntemi ile birinci derece polinomun regresyonu gerçekleştirilmiştir. Bu regresyon sonucunda bulunan ofset değeri 2000.0 (t_0) anında VTRF2008 (a priori TRF) koordinatlarından IVS-Avrupa koordinatlarının farkını verir. Trend ise IVS-Avrupa çözümü hız vektörünü vermektedir. Böylece IVS-Avrupa oturumları VLBI noktalarının 2000.0 epöü koordinatlarını ve hızlarını elde etmiş oluruz. Daha sonra global kartezyen koordinat sistemindeki koordinatlardan lokal toposentrik koordinatlara dönüşüm yapılmış ve lokal toposentrik sistemdeki koordinatlara EKK kestiriminin uygulanmasıyla yatay ve düşey yönde olmak üzere hız bileşenleri tekrar hesaplanmıştır. IVS-Avrupa için gerçekleştirilen bu bir dizi analiz sonucunda yeni elde edilen Avrupayı kapsayan TRF'e IVS-Avrupa çözümü denilmiştir. Bu çözümün referans epöü 2000.0 dir. IVS-Avrupa TRF çözümü (gerçekleştirilmesi) farklı global ITRF çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Dönüşüm parametrelerinin global TRF çözümlerinin kendi aralarındaki dönüşüm parametreleri ile kıyaslandığında daha büyük değerler aldıkları görülmüştür (URL 1). Bunun sebebi ITRF çözümlerinin elde edildiği ağ, IVS- Avrupa ağına göre çok daha geniş bir alanı kapsamaması ve tüm küreyi temsil etmesidir. Diğer bir neden ise IVS-Avrupa ağı çözümünde bölgesel bir ağ olması nedeni ile Yer dönüklük parametrelerinin kestiriminin yapılmayıp model ile hesaplanmış a priori değerlerine sabitlenmesidir. Model ile hesaplanan Yer dönüklük değerlerinin asla ölçülerden kestirilen parametreler kadar hassas olamayacaktır. Yer dönüklük parametreleri ile istasyon TRF koordinatlarının ölçü denkleminde direk yer alması böylece yüksek matematiksel korelasyon sahip olacaktır. Yer dönme parametrelerinin kestirilmemesi her ne kadar TRF nokta duyarlıklarına anlamlı etki yapsa da, hız vektörleri (non-tidal part of station motions) bu durumdan etkilenmediği net bir şekilde görülmüştür.

Düşey yöndeki hız bileşenlerine bakıldığında şu sonuçlar çıkmaktadır:

- Medicina'da yaklaşık yıllık 2 mm alçalma olduğu görülmüştür. Bu alçalmanın istasyon bölgesindeki lokal plaka hareketlerinden kaynaklandığı söylenebilir.
- İskandinavya yarımadası üzerindeki Onsala ve Ny-Alesund istasyonlarında ise sırasıyla yıllık 8 mm ve 3 mm büyüklüğünde yükselme olduğu görülmüştür. Bu tektonik plaka yükselmesi bölgede buzul sonrası çözülme etkisi (post-glacial rebound) ile açıklanmaktadır.
- Matera ve Wettzell istasyonlarında ise radyal yönde anlamlı bir hız tesbit edilmemiştir.
- Ortak yerleşke istasyonlarında, IVS-Avrupa oturumlarının VieVS yazılımı ile analizinden elde edilen yatay ve radyal tüm hız vektörleri (VLBI), EUREF çözümü ile (GNSS) yön ve büyüklük olarak uyumludur.
- Avrupadaki 1mm/yıl içerisinde kalan büyüklüklerdeki radyal hızlar istatistiksel olarak anlamlı çıksada radyal bileşendeki hata kaynakları ve gün içi spektraya sahip gel-git büyüklükleri dikkate alındığında bu değer ve altındaki radyal hızların anlamlı olamayabileceği sonucuna varılabilir.
- Avrupa plakasının sabitlenmesiyle hesaplanan bağıl yatay hız bileşenlerine bakıldığında, Anadolu ve Ege plakaları üzerindeki noktalarda bağıl yatay hız bileşenlerinin EUREF ağındaki diğer noktalara göre büyüklüklerinin ve yönlerinin farklı ve uyumsuz olduğu görülür. Bunun sebebi, Anadolu ve Ege plakalarının Avrupa plakasından bağımsız hareket etmesindedir.
- Avrupa üzerindeki noktaların bağıl yatay hız vektörlerinin (kıta sabitlendiğinde birbirlerine göre yıllık hareketlerinin) gruplandığı görülmüştür. Doğu Avrupanın, orta Avrupanın ve Akdeniz kıyı bölgelerinin güney yönünde fakat batı Avrupa ve İskandinavya yarımadasının Atlantik okyanusu yönünde (güney-batı) anlamlı yıllık hızlara sahip oldukları görülmüştür.

Kaynaklar

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu
5. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu
20-22 Ekim 2010, ZKÜ - Zonguldak

- C. Bizouard, D. Gambis (2009). The combined solution C04 for Earth orientation parameters consistent with International Terrestrial Reference Frame. In: Drewes H (ed) *Geodetic reference frames, IAG symp* 134:265-270, doi:10.1007/978-3-642-00860-3_41
- J. Böhm, S. Böhm, T. Nilsson, A. Pany, L. Plank, H. Spicakova, K. Teke, H. Schuh (2010). *The new Vienna VLBI Software VieVS*. IAG Symposia Series, Buenos Aires 2010, in press.
- J. Böhm, B. Werl, H. Schuh (2006a). 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. doi:10.129/2005JB003629.
- J. Böhm, A.E. Niell, P. Tregoning, H. Schuh (2006b). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on data from numerical weather model data. *Geophys Res Lett* 33:L07304. doi:10.1029/2005GL025546
- C. Boucher, Z. Altamimi, P. Sillard, M. Feissel-Vernier (2004). Current Methodology for TRF Combination, *IERS Technical Note, No.31*. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004. 289 pp., paperback, ISBN 3-89888-881-9 (print version)
- J. Campbell (2004). VLBI for Geodesy and Geodynamics, *The Role of VLBI in Astrophysics, Astrometry and Geodesy NATO Science Series*, 2004, Volume 135, 359-381, DOI: 10.1007/1-4020-2406-1_22
- J. Campbell, R. Haas, A. Nothnagel (2002). Measurement of Vertical Crustal Motion in Europe, *Research Networks Training and Mobility of Researchers*, Geodetic Institute, University of Bonn, (on behalf of European Commission).
- J. Campbell, A. Nothnagel (2000). European VLBI for crustal Dynamics, *Journal of Geodynamics* Volume 30, Issue 3, 24 February 2000, Pages 321-326.
- R. Haas, A. Nothnagel, J. Campbell, E. Gueguen (2003). Recent crustal movements observed with the European VLBI network: geodetic analysis and results, *Journal of Geodynamics*, Volume 35, Issues 4-5, May-July 2003, Pages 391-414.
- R. Haas, E. Gueguen, H.-G. Scherneck, A. Nothnagel, J. Campbell (2000). Crustal motion results derived from observations in the European geodetic VLBI network, *Earth Planets Space*, 52, 759-764, 2000.
- F. Lyard, F. Lefevre, T. Letellier, O. Francis (2006). Modelling the global ocean tides, Modern insightths from FES2004, *Ocean Dyn* 56(6):394-415
- P.M. Mathews, V. Dehant, J.M. Gipson (1997). Tidal station displacements, *J Geophys Res*, 102(B9): 20469-20478.
- D. McCarthy, G. Petit (2004). (Eds) IERS Conventions 2003, IERS Techn. Note 32, *Verlag des Bundesamts für Kartogr. und Geod.*, Frankfurt am Main, Germany
- A.E. Niell (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. Geophys. Res.*, 101, 3227-3246.
- A. Nothnagel (2005). *VTRF2005 - A combined VLBI Terrestrial Reference Frame*, <http://vlbi.geod.uni-bonn.de/IVS-AC/data/vtrf2005/nothnagel1.pdf>

Avrupadaki Düşey Yöndeki Kabuk Hareketlerinin VLBI İle Belirlenmesi

L. Petrov, J.P. Boy (2004). Study of the atmospheric pressure loading signal in Very Long Baseline Interferometry observations, *J Geophys Res* 109(B3):B03405, doi:10.1029/2003JB002500

H.-P. Plag (1999). Measurement of vertical crustal motion in Europe by VLBI Station report for Ny-Alesund Norwegian Mapping Authority, *Proceedings of the 13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, held at Viechtach, February 12-13, 1999, edited by W. Schlüter and H. Hase, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Fundamentalstation Wettzell, 1999.

http://geodesy.unr.edu/hanspeterplag/publications/pubs/plag_ivs1.pdf

E.Tanir, K. Teke, H. Schuh (2010). VLBI Estimates of Vertical Crustal Motion in Europe, *15th General Assembly of WEGENER*, Boğaziçi Üniversitesi, 14-17 Eylül 2010, İstanbul.

E. Tanir, V. Tornatore, K. Teke (2009a). Analysis on the time series of the radio telescope coordinates of the IVS-R1 & R4 Sessions, *19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting*, edited by G. Bourda, P. Charlot, A. Collioud, Universite Bordeaux1-CNRS, 23-28 March 2009, Bordeaux, France, pp. 122-126, 2009.

E. Tanir, K. Teke, J. Böhm, H. Schuh (2009b). Jeodezik VLBI Çalışmalarının IERS Ürünlerine Katkısı ve KTU GEOD IVS Analiz Merkezinin Öngörülen Faaliyetleri, *4. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, 14-16 Ekim 2009, Trabzon, Bildiriler Kitabı, 131-164.

E. Tanir (2009). *KTU-GEOD VLBI IVS Annual Report 2009*,

<http://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/annualreport.html>

K. Teke, J. Böhm (2010). VIE_LSM, *VieVS User Workshop*, Institute of Geodesy and Geophysics, IVS Special Analysis Center, Vienna University of Technology, 7-9 September 2010, Vienna, Austria.

K. Teke, J. Böhm, T. Nilsson, H. Spicakova, H. Schuh (2010). Intra-Eurasia plate motions based on EUREF, IVS-Europe, and IVS-combined solutions, *15th General Assembly of WEGENER*, Boğaziçi Üniversitesi, 14-17 Eylül 2010, İstanbul.

K. Teke, J. Boehm, E. Tanir, H. Schuh (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, 23-28 March 2009, Bordeaux, France, pp. 63-67, 2009

URL 1: *Transformation Parameters between different ITRF Solutions*,

http://itrf.ensg.ign.fr/trans_para.php

URL 2: *ITRF 2005*,

http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005.php

URL 3: *VTRF 2008*,

http://rorf.usno.navy.mil/ICRF2/IVS/files/VTRF2008a_IVS.SSC-1.txt