

ITRF HIZ ALANI VE GÖRELİ HIZ REFERANS SİSTEMLERİNE BAKIŞ

(ITRF VELOCITY FIELD AND A LOOK AT RELATIVE VELOCITY REFERENCE FRAMES)

Bahadır AKTUĞ

ÖZET

Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA-99A) tanımı ve yaşatılması, nokta koordinatları ile birlikte bu koordinatların belirli bir zaman aralığına (inter-sismik) ve belirli bir epoga (ko-sismik) bağlı bileşenler olarak ayrılan zamana bağlı değişimlerinin de belirlenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu etkilerin belirlenmesinde kuşkusuz en önemli role sahip nokta hızları aynı zamanda koordinat yayın epoğundan itibaren nokta koordinatlarını da değiştirmektedir.

Bu anlamda görelî hız referans sistemlerinin anlaşılması ve uygulanması bir çok açıdan önemlidir. Bunlar; 1) TUTGA'nın dayandığı ITRF96 (International Terrestrial Reference Frame-1996) global nokta hızlarının aslında görelî bir hız referans sisteminde (sıfır-net-dönüklüklü, no-net rotation) tanımlı olması, 2) komşu noktaların hızları arasında, global bir referans sisteminde tespit edilmesi nispeten zor uyumsuzlukların görelî hız referans sistemlerinde açık olarak görülmesi, 3) komşu noktalar arasındaki olası hız uyumsuzluklarının ölçü ve değerlendirme hatalarından kaynaklanmadığının ancak görelî hız referans sistemlerindeki katı blok ve plaka dönmeleri ile anlaşılabilmesi, 4) inter-sismik ve ko-sismik etkilerin, tektonik yapıyı dikkate alan görelî bir hız referans sisteminde değerlendirilmesinin daha anlamlı olması ve 5) görelî hız referans sistemlerindeki çözümlerin özellikle TUTGA nokta hızlarının interpolasyon ve gridlenmesinde çok önemli olan fay hatları hakkında bilgi veren plaka ve katı blok dönüklüklerini ortaya çıkarmasıdır.

Bu çalışmada Türkiye gibi birden fazla ana plaka üzerinde bulunan ve birçok iç katı blok dönmelerine sahip bir coğrafyada, plaka ve blok dönmelerinin hesaplanması, görelî hız referans sistemlerinin oluşturulması ve bu tür bir yaklaşımın kampanya bazlı çalışmalarda kullanılacak global noktaların seçimi ve değerlendirme stratejisi üzerindeki etkisi ele alınmıştır.

ABSTRACT

Definition of Turkish National Fundamental GPS Network (TFGN-99A) requires supplying site coordinates along with the time-dependent variations of sites coordinates, which might be decomposed into interval-dependent (interseismic) and epoch-dependent (coseismic) components. Having the biggest part in determining these changes, velocities also change the site coordinates in a cumulative manner down from the epoch of published coordinates.

In this sense, the concept and application of relative velocity reference frames gain importance in many aspects : 1) ITRF96 which TFGN-99A is based on, itself is defined in a relative velocity reference frame (with respect to no-net-rotation), 2) relative velocity reference frame solutions reveals the possible inconsistencies of velocities between neighboring sites which is hardly detectable, 3) local rigid body rotations determined in a relative velocity reference frame can explain velocity inconsistencies of neighboring sites which might otherwise be regarded as outliers, 4) evaluation of inter-seismic and co-seismic effects in an appropriate relative velocity reference frame of tectonic setting is more

significant and 5) rigid plate and block rotations determined in a relative velocity reference frames expose the fault lines which are very important in the interpolation and gridding schema of TFGN site velocities.

In this study the effects of rigid block/plate rotations for a region like Turkey, spreading over a few tectonic plates and having several block rotations, the need for modification of site selection schema and campaign data processing are put under discussion together with computation procedure of Euler parameters and forming relative reference frames.

1. GİRİŞ

Uzay Tekniklerinin gelişmesi ile birlikte, matematiksel ve ideal referans sistemi tanımlamalarının, yüksek doğrulukla, koordinat sistemi olarak yeryüzüne uygulanması olanağı doğmuştur /2/. Terminoloji ve kavramların Türkçe karşılıklarında birlik sağlamak amacıyla, bu ideal, matematiksel ve kavramsal koordinat sistemlerine “referans sistemi”, mevcut ölçme teknik, yöntem ve doğrulukla yeryüzüne uygulanmış biçimlerine de “koordinat sistemi” denecektir. Uygulamada hiçbir zaman kusursuz olarak gerçekleştirilemeyecek bu ideal referans sistemlerinin farklı veri kümesi ve yöntemlerle yeryüzüne uygulanması, farklı koordinat sistemleri oluşturacaktır. Koordinat sistemi oluşturma çalışmalarında kullanılan veri kümesi ;

- Koordinatları çeşitli klasik/uzaysal yöntemlerle belirlenmiş ve iyileştirilmiş noktalar kümesi (SSC, Set of Station Coordinates)
- Bu noktaların söz konusu ölçü sistemleriyle belirlenmiş hızları
- Aynı nokta (site) kabul edilen fakat farklı uzaysal tekniklerle ölçülen istasyonlar (station) arasındaki bağlantı ölçüleridir.

Kuşkusuz günümüzde kullanılan referans sistemlerin en yaygınları, Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (IERS) tarafından oluşturulan, Uluslararası Gök Referans Sistemi (ICRS) ile Uluslararası Yersel Referans Sistemi (ITRS)’ dir. ITRS’in en güncel uygulaması, detayları /2,3/’de verilen ITRF2000 (Uluslararası Yersel Koordinat Sistemi)’dir.

Kampanya bazlı GPS (Global Konumlama Sistemi) çalışmalarında kullanılan IGS (International GPS Service) ürünleri (yörünge ve yer dönme parametreleri), IGS analiz merkezleri çözümlerinin Uluslararası Yersel Koordinat Sistemi (ITRF)’ne dayalı olması nedeniyle, ITRF çözümlerinden elde edilen hassas nokta (fiducial site) koordinatları ile birlikte uyumlu ve hassas bir veri kümesi oluşturmaktadır. Sıklaştırma niteliği taşıyan bölgesel çalışmalar için bu veri kümesi yeterli olurken, uzun dönemli ölçülerin birleştirilmesi, katı blok dönmeleri, plaka içi ve plakalar arası diferansiyel hareketleri araştıran çalışmalarda, görel referans sistemlerinin oluşturulmasına, dolayısıyla yukarıda ifade edilen ürünlere ek olarak görel koordinat sistemlerdeki genel kinematiği temsil eden parametrelere (Euler Parametreleri) ihtiyaç duyulmaktadır.

Görel hız referans sistemlerinin oluşturulması, plaka veya blok sınırları ile ayrılmış belirli bir bölgedeki nokta hızlarının, bu plaka veya bloğa komşu veya çevreleyen bir sisteme göre ifade edilmesini kapsamaktadır. Bu şekilde elde edilmiş görel sistemler aynı zamanda söz konusu plaka ve bloğu çevreleyen fay sınırlarını göstermesi bakımından önemlidir. Öyle ki bu plaka ve blok hareketleri ile belirlenen sınır ve genel harekete uymayan bölgelerde sıkışma veya açılmadan söz edilebilir. Plaka ve katı blok dönmelerinin belirlenebilmesi için nokta

hızlarının belirli bir görelî referans sisteminde hesaplanması zorunludur. Buradaki görelî sistemlere örnek olarak Avrasya Plakasının ITRF'e göre hareketi (transform faylar), Anadolu Plakasının Avrasya Plakasına göre Hareketi (Kuzey Anadolu Fayı), Anadolu Plakasının Arabistan Plakasına göre hareketi (Doğu Anadolu Fayı), Ege Bloğunun Anadolu'ya göre hareketi (Ege'deki birbirine paralel normal faylar) verilebilir. Genel olarak görelî hız referans sistemlerinin oluşturulması için iki yöntemden söz edilebilir :

- a. Çalışma bölgesine giren noktaların hız bileşenleriyle, araştırılan plaka ve katı blok dönme hareketi dışında kaldığı kabul edilen bir noktanın hız bileşenlerinin veya birden fazla noktanın hız bileşenlerinin ağırlıklı ortalamalarının aritmetik farklarını almak. Anadolu'nun Avrasya'ya göre hareketi için Anadolu'daki noktaların hızlarından, Avrasya Plakasında olduğu kabul edilen bir noktanın (Örn. Yığılca) hızını çıkarmak örnek olarak verilebilir. Bu yöntemde, seçilen noktanın bulunduğu plaka veya bloğu ne kadar temsil ettiği kadar noktalara ait hesaplanan hız bileşenlerinin doğruluğunun büyük önem kazanacağı açıktır.
- b. Plaka ve katı blok dönme hareketinin görelî olarak belirleneceği referans plaka veya bloğun kinematığını temsil eden Euler Parametrelerini nokta hızlarından elde etmek ve araştırılan plaka/blok içerisindeki noktaların hızlarını bu Euler parametreleri ile hesaplayarak noktaların gerçek hızlarından çıkarmak.

Hızların vektörel büyüklükler olduğu ve yapılan fark işlemlerinin vektör bileşenleri üzerinde olduğu dikkate alındığında, (a)'da söz edilen yöntemle hesap edilecek görelî hızlarda sabit kabul edilecek noktaya ait hızın referans alınan bölgeyi temsil etmemesinde yada ölçülerine bağılı olarak oluşacak hatalar, görelî sistemde sadece hızların büyüklüğünü değil aynı zamanda yönlerini de değiştirecektir. Bu anlamda uygulama türü olarak değerlendirilebilecek iki ayrı yöntemden daha söz edilebilir. Bunlar:

- c. Görelî hız referans sistemi oluşturmak için nokta hızlarını ayrı ayrı hesaplamak yerine, hız çözümünün dayandığı veya sıkı-kısıt (tight-constraint) verilen noktaların hızlarını görelî referans sistemine göre tanımlamak ve çözümdeki hızları bu görelî hız referans sisteminde elde etmek. Bu durumda, hesaplama sırasında, sabit alınan ve/veya sıkı-kısıt verilen noktaların nitelik ve niceliği, kullanılan yöntemin özelliği, nokta koordinatlarını doğruluğu ile nokta koordinatlarını ölçü epoğuna getirmekte kullanılacak nokta hızlarının doğruluğuna bağılı olarak, elde edilecek çözüm artık sabit veya kısıt verilen nokta koordinat ve hızlarının alındığı koordinat sisteminde değil, ayrı bir görelî koordinat ve hız sisteminde olacaktır. Uygulamada bu yöntemin diğerlerine göre çok önemli bir üstünlüğü mevcuttur. Bu şekilde elde edilen görelî hızların hatalarına ait varyans-kovaryans ilişkileri doğrudan elde edilebilir.
- d. (b)'de verilen görelî hız alanını iki görelî hız alanına ait Euler vektörlerinin farkından elde etmek. Örneğin Avrasya'ya göre Anadolu'nun görelî hareketini temsil eden Euler vektörünü, Anadolu'nun ITRF'e göre hareketini ifade eden Euler Vektörü ile Avrasya'nın ITRF'e göre hareketini ifade eden Euler Vektörü farkından elde etmek.

Türkiye ve çevresini kapsayan çalışmalarda, bu sınırlar içerisinde giren Avrasya ve Arabistan Plakalarının genel kinematığını gösteren Euler parametrelerinin, farklı ölçü teknik ve yöntemleri ile elde edildiği kaynaklar mevcuttur /2,4,5,12,13,21,27,28,30/. Ancak global

plakalar arasında gösterilmeyen Anadolu Plakası ile yerel katı blok dönmelerinin hesabı için bu parametrelerin mevcut verilerle hesaplanması zorunluluğu bulunmaktadır. Ayrıca Anadolu'daki temel kinematiğin nedeni olan ve Doğu Anadolu Bindirme Zonu'nu çevreleyen Arap Plakasının genel hareketini temsil eden çeşitli jeolojik ve jeodezik yöntemlerle elde edilmiş global modellerin, bu plaka üzerinde fazla ölçü bulunmaması nedeniyle yetersiz kaldığı değerlendirilmektedir /6/.

Hız referans sistemlerinin tümü görelidir. GPS ile yapılan çalışmalarda kullanılacak en yaygın hız alanı olan ITRF hız alanı da Sıfır-Net-Dönüklük (SND, No-net-rotation) koşulunu sağlayan bir sisteme göre tanımlanmıştır. Diğer bir ifade ile ITRF'i oluşturan noktalar için verilen hız alanı, noktaların ölçüleri ile elde edilen mutlak hızları değil, tüm hız alanına sıfır-net-dönüklük (no-net-rotation) koşulunun uygulanarak elde edildiği hızlardır /2/. Görelî hız alanlarının elde edilmesinde kullanılan hız alanları aynı türden olmalıdır. Buna göre, örneğin (d) maddesinde verilen örnekte Anadolu'nun ITRF'e göre, Avrasya'nın ITRF'e göre hızları SND'e göre tanımlı olacağından, Anadolu'nun Avrasya göre elde edilen görelî hız referans sistemi de SND'e göre olacaktır. ITRF hızlarının SND'ye göre tanımlı olması, ITRF'in, nokta hızlarına bağlı olarak oluşacak "net açısal moment" in sıfır olmasıyla da ifade edilebilir. ITRF hız alanında bu koşulun bulunmasının gerekliliği aşağıdaki şekilde özetlenebilir :

- Yer in dönmesi ile ilgili olarak geliştirilmiş birçok temel kuram, net açısal momentin sıfır olduğu bir sisteme dayanmaktadır /20,21,26/
- IERS tarafından üretilen yer dönme parametreleri sıfır-net-dönüklüğe sahip bir sistemde verilmektedir. Açısal momentin sıfır olmaması, dönme parametrelerinde uzun periyotlu küçük değişimler meydana getirecektir /19,29/
- Jeomanyetik dönüş zaman ölçeği (geomagnetic reversal time scale) veya sıcak noktalar (hot spots) vasıtasıyla elde edilen çeşitli sıfır-net-dönüklüğe sahip global plaka modellerinin ITRF hızlarıyla karşılaştırılabilmesini sağlayacaktır /5,12/
- ITRF, IERS tarafından üretilen diğer iki temel ürün ICRF (Uluslararası Gök Koordinat Sistemi) ve yer dönme parametreleri ile uyumlu bir küme oluşturma zorundadır /2,3/
- Oluşturulacak hız referans sisteminin jeofiziksel bir anlamı olmalıdır /2,3/
- Yukarıdaki hususlar da dikkate alınarak, sıfır-net-dönüklük kavramı, IUGG (Uluslararası Jeodezi ve Jeofizik Birliği) tarafından ITRF tanımına koşul olarak konmuştur /9/.

Yapılan çeşitli çalışmalar /14,28,29/, ITRF çözümlerinin bu koşulu sağlamadığı yönündedir. Bu kuşku konunun daha ayrıntılı incelenmesi ihtiyacını doğurmuştur.

İkinci bölümde ITRF ve sıfır-net-dönüklük ilişkisi, üçüncü bölümde ise katı blok/plaka hareketlerini temsil eden Euler parametreleri ve hesap yöntemleri açıklanmakta, dördüncü bölümde ise farklı kaynaklarda verilen Avrasya Plakası hız modelleri karşılaştırılarak Anadolu Plakası Hız Modelinin elde edilmesinde kullanılacak IGS noktaları ile ilgili bir uygulamaya yer verilmektedir.

2. ITRF VE SIFIR-NET-DÖNÜKLÜK (NO-NET-ROTATION) KAVRAMI

Uzay tabanlı ölçü sistemlerin (uydu sistemleri ve VLBI) gelişmesi ve buna bağlı olarak jeodezik ölçüm hassasiyetinin artması, global ölçekteki yersel koordinat sistemlerinin dört

boyutlu olarak tanımlanmasını sağlamıştır. Klasik jeodezik ağ tasarımlarının aksine, koordinatları uzaysal teknikler ile belirlenmiş bir dizi istasyonla gerçekleştirilen yersel referans sistemlerinin, söz konusu noktaların hareket halinde olmaları nedeniyle, aşağıdaki noktaları dikkate almaları zorunludur.

- Yer merkezindeki hareketler (geocenter motion, öteleme parametrelerinin zamana göre değişimi),
- Yerin dönmesindeki düzensizlikleri (SND’te tanımlı yer dönme parametreleri, yersel bir referans sistemi söz konusu olduğundan yer dönme parametresi sayısı üçtür)
- Noktaların üzerinde bulunduğu yer kabuğunun zamana bağlı hareketlerini (SND’ye göre tanımlı hız alanı, oryantasyonun zamana bağlı değişimi)

ITRF’in belirlenmesinde, temel olarak 5 tür sisteme ait çözümler kullanılmaktadır. Bunlar, VLBI (Çok Uzun Baz Interferometrisi), SLR (Uydu Laser Mesafe Ölçümü), DORIS (Doppler Uydu Yörünge Belirleme ve Radyo Konumlaması), LLR (Ay Lazer Mesafe Ölçümü) ve GPS (Global Konumlama Sistemi)’dir. Her ölçü sisteminin, sistemin çalışma prensiplerine bağlı olarak aynı zamanda kendi datumu olduğu değerlendirildiğinde, farklı sistemlerin birleştirilmesi jeodezik anlamda 14 parametrelilik benzerlik dönüşümü ile gerçekleştirilmektedir. Bu parametreler; 3 öteleme, 3 dönüklük, 1 ölçek ve bu parametrelerin zamana göre türevleridir. ITRF nihai çözümünde, farklı sistemlere ait çözümlerin birleştirilmesinde izlenen yöntemlere ilişkin bilgiler /2,3,4,9/’da bulunabilir. Ancak her yeni çözümde farklılıklar olsa da, 14 parametreden, eksenlerin yönlerini ifade eden (oryantasyon) dönüklük parametrelerinin bir önceki ITRF sistemine göre (genellikle çakışık olacak şekilde), sistemin merkezinin dünyanın ağırlık merkezine göre konumunu ifade eden öteleme parametrelerinin alçak yörüngeleri nedeniyle SLR ölçülerine göre, ölçek parametresinin ise SLR ve VLBI ölçülerine göre tanımlandığı söylenebilir.

ITRF ile ICRF arasındaki ilişkiyi tanımlayan yer dönme parametreleri (Earth Rotation/Orientation Parameters), koordinat eksenlerindeki oluşacak toplam açısal momentin sıfır olduğu bir sisteme dayanmaktadır. Bunun fiziksel anlamı, referans sistemini tanımlayan eksenlerin yer kabuğuna göre zaman içerisinde değişmemesidir. Global yersel sistemlerinin tek başına mutlak sistemler değil de, diğer bir yersel sisteme olan Helmert (3 öteleme, 3 dönüklük, 1 ölçek) parametreleri ile tanımlandığı düşünüldüğünde, eksenlerin zaman içerisindeki değişimi üç dönüklük parametresinin (oryantasyon) zamana göre türevini ifade eder. İlk ITRF oryantasyonunun BTS (Bureau International de l’Heure Terrestrial System)’e göre gerçekleştirilmesinden /30/ bu yana, ITRF oryantasyonu ardışık çözümlere dayalı olarak gerçekleştirilmektedir; ITRF96, ITRF94’e göre, ITRF2000, ITRF97’ye göre gibi /2,3,4,7,28/. ITRF gibi global bir yersel referans sisteminin eksenleri hassas noktalar tarafından tanımlandığından, eksenlerde oluşacak açısal moment de, söz konusu noktaların hızlarından kaynaklanacaktır.

Yer merkezindeki hareketler, ITRF’i oluşturan uzaysal jeodezik ölçülerin değerlendirilmesinde dikkate alınmamaktadır /2/. Bu nedenle, referans sisteminin merkezini oluşturan ve matematik modelde ötelemeye karşılık gelen değerler, öteleme parametrelerinin alındığı uzaysal tekniğin çözümlerde sahip olduğu ölçü aralığının ortalaması olmaktadır. Örneğin ITRF için genel olarak referans sisteminin merkezi (öteleme parametreleri) SLR sistemi ile sağlandığından yer merkezi hareketi SLR ölçü aralığında yer merkezinin ortalama konumuna karşılık gelmektedir. Yerin dönmesindeki düzensizlikler, yer dönme

parametrelerinin SND bir sistemde verilmesi ile çözülebilir. Aynı şekilde, nokta hızlarının SND bir sistemde tanımlanması, noktaların üzerinde bulunduğu yer kabuğunun hareketlerinin de yersel referans sistemine dahil edilmesini sağlayacaktır. Yersel bir referans sistemine SND koşulunun uygulanması, referans sisteminin oryantasyon hızı (dönüklük parametrelerinin) nedeniyle oluşacak toplam (net) açısal momentin sıfır olması anlamını taşır. Bunun en önemli uygulama yöntemi yer fiziği ile ilgili birçok eserde /20,21,26/ belirtilen referans sistemi eksenlerinin Tisserand Ortalama Eksenleri olmasıdır. Tisserand Ortalama Eksenlerinin gerçekleştirilmesi, eksenlerin hareketi nedeniyle oluşacak kinetik enerjinin minimize edilmesi esasına dayanır. Dönüş hareketli bir cismin kinetik enerjisinin çizgisel ve açısal kinetik enerjilerinin toplamı olduğu hatırlanarak,

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (1)$$

ile verilen eşitlik, tüm dünya yüzeyine uygulanırsa,

$$E_k = \frac{1}{2} \int_y v^2 dm_p + \frac{1}{2} \int_y \omega^2 dI_p \quad (2)$$

elde edilir. (1) ve (2) eşitliklerinde, m kütleyi, I eylemsizlik momentini, ω açısal hızı, v çizgisel hızı, E_k ise toplam kinetik enerjiyi ifade etmektedir. Kitlelerin hareketi nedeniyle oluşacak kinetik enerjiyi veren (2) eşitliğini minimize edecek çizgisel ve açısal hızların bulunması için (2) eşitliğinin hızlara göre türevinin sıfıra eşitlenmesi gerekir. (2) eşitliğinin içerisindeki parametrelerin negatif olamayacağı açıktır. Buna göre, (2) eşitliğini oluşturan her iki terimin de türevleri ayrı ayrı sıfıra eşit olmalıdır. (2) eşitliğindeki terimlerin çizgisel ve açısal hızlara göre türevlerinin sırasıyla çizgisel ve açısal momentleri vereceği hatırlanarak, hızlara göre türevi alınır,

$$m_\zeta = \int_y v dm_p = 0 \quad (3)$$

$$m_a = \int_y \omega dI_p = 0 \quad (4)$$

eşitlikleri elde edilir. (3) eşitliğinde, açısal momentin çizgisel hız (v) ve konum vektörü (r) cinsinden ifadesi,

$$m_a = I\omega = r \times (mv) \quad (5)$$

(4) eşitliğinde yerine konursa,

$$m_a = \int_y r \times v dm_p = 0 \quad (6)$$

elde edilir. Sonuç olarak Tisserand Ortalama Eksenlerinin oluşturulması, sırasıyla referans sisteminin öteleme hızı ve oryantasyon hızlarını ifade eden (3) ve (6) eşitliklerinin sağlanmasına bağlıdır. Kullanılan uzaysal tekniklerin yer merkezinin hareketine duyarlı olması nedeniyle, (3) eşitliği doğal olarak sağlanmaktadır. (6) eşitliğinin sağlanması için,

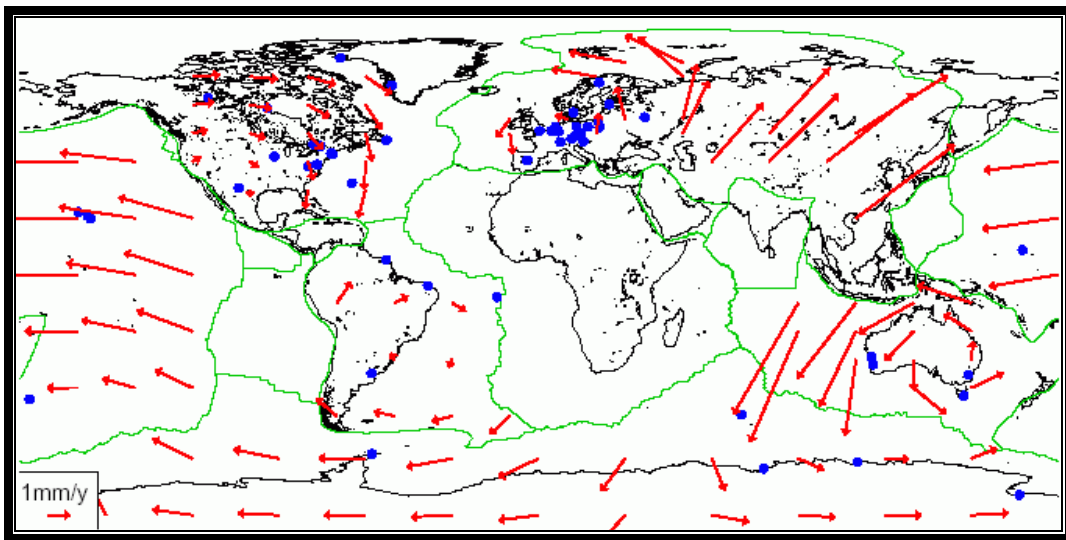
yaygın olarak, integral alan aralığı plaka sınırları ile ayrılmış yerkaşu seçilmekte ve her ne kadar yerkaşu yoğunluk ve kalınlık olarak homojen olmasa da, ortalama değerler kullanılmaktadır /5/. Sonuç olarak (6) integrali, plakalara göre ayrılmış alanlar için tensör gösterimle /16/ toplam olarak sadeleştirilirse,

$$m_a = \sum_{i=1}^n Q_i \Omega_i = 0 \quad (7)$$

eşitliği elde edilir /29/. Burada Q_i ve Ω_i sırasıyla i plakası için eylemsizlik tensörü ve Euler vektörünü, n ise plaka sayısını ifade etmektedir.

ITRF zmlerinde Ω_i değerleri için zaman içerisinde çeşitli global plaka modelleri kullanılsa da, ITRF94'ten ITRF2000'e kadar, NNR-Nuvel1A global plaka Euler vektörleri kullanılmaktadır /3/. ITRF2000 zmlerinde bu koşulun sağlanması için, NNR-Nuvel1A hızlarına 1 mm/yıl kısıt uygulanmıştır /2,3/. Yıllık 1 mm.lik kısıt küçük ağlarda az sayıda noktaya uygulandığında yeterince sıkı olmamakla birlikte, bu kısıtın tüm dünyada uygun dağılımlı çok sayıda noktanın hızına uygulandığı düşünüldüğünde oldukça sıkı olduğu değerlendirilebilir. Sonuç olarak ITRF hızlarının noktaların uzaysal ölçü yöntemleri ile belirlenmiş mutlak hızları değil, daha önce sözü edilen zorunluluklar nedeniyle SND uygulanmış zmler olduğu görülmektedir. Buradaki asıl sorun SND'nin uygulamada, seçilen noktalara, plaka sınırlarına hatta eşit yoğunlukta ve homojen olduğu kabul edilen plaka ktlerine son derece duyarlı olması olması ve bu nedenle de SND uygulamasının farklı stratejilerle farklı sonuçlar verebilmesidir. Nitekim ITRF zmlerinin SND'yi tam olarak sağlamadığı yönünde görüşler bulunmaktadır /27,29/.

Kuşkusuz, ITRF zmlerinin karşılaştırılabileceği en önemli hız referans alanları, jeomanyetik dönüş zamanına dayalı global plaka hız modelleridir. Yapılan çeşitli alışmalar ITRF hızları ile NNR-Nuvel1A arasında özellikle bazı bölgelerde yoğunlaşan önemli farklılıkları ortaya koymaktadır /3,28,29/. En fazla veri içermesi nedeniyle en iyi ITRF zm sayılan ITRF2000 ile NNR-Nuvel1A hızları arasındaki farklar Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. ITRF2000-NNR-Nuvel1A Hızları arasındaki farklar /3/

3. EULER PARAMETRELERİ VE PLAKA/KATI-BLOK DÖNMELERİ

Katı blok dönüklükleri nedeniyle meydana gelen koordinat değişimleri Euler vektörü ile ifade edilebilir. Tektonik plaka dönmelerinin, sabit hızlı (0 ivmeli) hareketler olduğu kabulüyle, bu koordinat değişimleri yıllık hızlar olarak değerlendirilebilir. Buna göre nokta hızları ile Euler vektörü arasındaki bağıntı

Vektörel gösterimle

$$v_{xyz} = \Omega \times r \quad (8)$$

yada tensör gösterimle

$$v_k = \Omega_i r_j \varepsilon_{ijk} \quad (9)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada ε_{ijk} permütasyon tensörü /16/, Ω , Euler vektörü, v kartezyen sistemdeki hız vektörü, r ise konum vektörüdür.

Euler Kutup parametreleri ($\omega_\Omega, \varphi_\Omega, \lambda_\Omega$) arasındaki yüksek korelasyondan dolayı, bu parametreleri doğrudan EKK ile bulmak mümkün değildir /1/. Bu nedenle, nokta hızlarından En Küçük Kareler (EKK) ile önce Euler vektörü hesaplanmalı, daha sonra elde edilen Euler Vektöründen, Euler Kutup parametrelerine dönüşüm yapılmalıdır.

$\Omega = \sum \omega_i$, $i = 1,2,3$ olmak üzere, (8)'de verilen doğrusal Euler hız denklem sisteminin, Euler vektörüne göre kısmi türevi

$$J_{ij}^\omega = \frac{\partial v_i}{\partial \omega_j} \quad i, j = 1..3 \quad (10)$$

ile normal denklemlerin dizayn matrisi elde edilmiş olur. Buna göre herhangi bir n noktası için kartezyen koordinat sistemindeki Euler denklem sistemi,

$$v_{xyz} = J^\omega \Omega \quad (11)$$

yada daha açık bir ifade ile;

$$\begin{bmatrix} v_n^i \\ v_n^j \\ v_n^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r_n^k & -r_n^j \\ -r_n^k & 0 & r_n^i \\ r_n^j & -r_n^i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_i \\ \omega_j \\ \omega_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

biçiminde elde edilebilir. Burada, v hız vektörü, r konum vektörü, ω Euler vektörü bileşenlerini ifade etmektedir. Dizayn matrisinin anti-simetrik olduğuna dikkat edilmelidir.

Euler vektörü, temel olarak katı(rigid) plaka/blok dönüklüklerini kapsadığından, doğal olarak yükseklik ile ilgili bir bilgi içermemektedir. Başka bir ifade ile noktaların lokal

sistemde, yükseklik bileşeni yönündeki hızları, katı plaka dönüklüğü dışındaki etkenlerdendir. Bu nedenle, mevcut hızlar kartezyen sistemde olsa dahi, hesaplamalar yerel jeodezik sistemde, sadece doğu ve kuzey bileşenleri kullanılarak yapılmalıdır. Bu şekilde, kartezyen sistemdeki hızlarda bulunan ve katı plaka dönüklüğü kapsamı dışında kalan yükseklik yönündeki hız bileşenleri de filtrelenmiş olacaktır. Bundan başka, hızların lokal bir sistemde verilmesi yorumlama kolaylığı sağlar. Yerel sisteme dönüşüm matrisinin de eklenmesiyle Euler denklem sistemi aşağıdaki gibi olur :

$$v_{dk}^i = R_i J_i^{\omega} \Omega \quad i=1 \dots \text{nokta sayısı} \quad (13)$$

R matrisi kartezyen koordinat sistemindeki hızların, yerel jeodezik koordinat sisteminde yükseklik bileşeni dışındaki hız bileşenlerine dönüşüm matrisi olup aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$R_{dk}^i = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\sin(\varphi) \cdot \cos(\lambda) & -\sin(\varphi) \cdot \sin(\lambda) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak normal denklemler oluşturulmadan önce, hızlar kartezyen koordinat sisteminde ise bunlara ait varyans-kovaryans matrisi lokal sistemdeki varyans-kovaryans matrisine dönüştürülmelidir. Bu amaçla direkt model ve hata yayılma yasası kullanılarak, lokal sistemdeki varyans-kovaryans matrisi,

$$C_{dk}^v = R_{dk} C_{xyz}^v R_{dk}^T \quad (15)$$

biçiminde elde edilebilir. (13) eşitliğinde verilen parametrik (dolaylı) modelin doğrusal olduğu dikkate alındığında, yaklaşık değerler olarak 0 kabul alınarak, iterasyona gerek duymadan çözüm yapılabilir. Bu şekilde normal (gözlem) denklemler oluşturulduktan sonra, birçok kaynaktaki /8,15,23,27,32/ verilen parametrik model temel eşitlikleri ile,

$$\hat{\Omega} = \left(J_{\omega}^T R_{dk}^T C_{dk}^{-1} R_{dk} J_{\omega} \right)^{-1} J_{\omega}^T R_{dk}^T C_{dk}^{-1} v_{dk} \quad (16)$$

$$C_{\hat{\Omega}} = \left(J_{\omega}^T R_{dk}^T C_{dk}^{-1} R_{dk} J_{\omega} \right)^{-1} \quad (17)$$

Euler vektörü ve varyans-kovaryans matrisi elde edilebilir. Euler vektörü ile Euler Kutup parametreleri arasındaki ilişki /11/'de verilen şekliyle,

$$\begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{\Omega} \cos(\varphi_{\Omega}) \cos(\lambda_{\Omega}) \\ \omega_{\Omega} \cos(\varphi_{\Omega}) \sin(\lambda_{\Omega}) \\ \omega_{\Omega} \sin(\varphi_{\Omega}) \end{bmatrix} \quad (18)$$

olduğundan, Euler Kutup Parametreleri,

$$\omega_{\Omega} = \|\Omega\| = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \Omega_i^2}, \varphi_{\Omega} = \tan^{-1}\left(\frac{\Omega_z}{\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}}\right), \lambda_{\Omega} = \tan^{-1}\left(\frac{\Omega_y}{\Omega_x}\right) \quad (19)$$

ω_{Ω} : Dönme hızı büyüklüğü (magnitüde) ve hatası,

şeklinde hesaplanabilir. Kutup parametrelerinin hatalarının hesabı için, (19) eşitlikleri ile oluşturulan denklem sisteminin, Euler Vektör bileşenlerine göre kısmi türevleri alınır, aşağıda verilen Jakobian matrisi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} \omega \\ \varphi \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_x \|\Omega\| & \Omega_y \|\Omega\| & \Omega_z \|\Omega\| \\ \frac{-\Omega_x \Omega_z}{\|\Omega\| \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}} & \frac{-\Omega_y \Omega_z}{\|\Omega\| \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}} & \frac{\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}}{\|\Omega\|} \\ \frac{-\Omega_y}{\Omega_x^2 + \Omega_y^2} & \frac{\Omega_x}{\Omega_x^2 + \Omega_y^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} \quad (20)$$

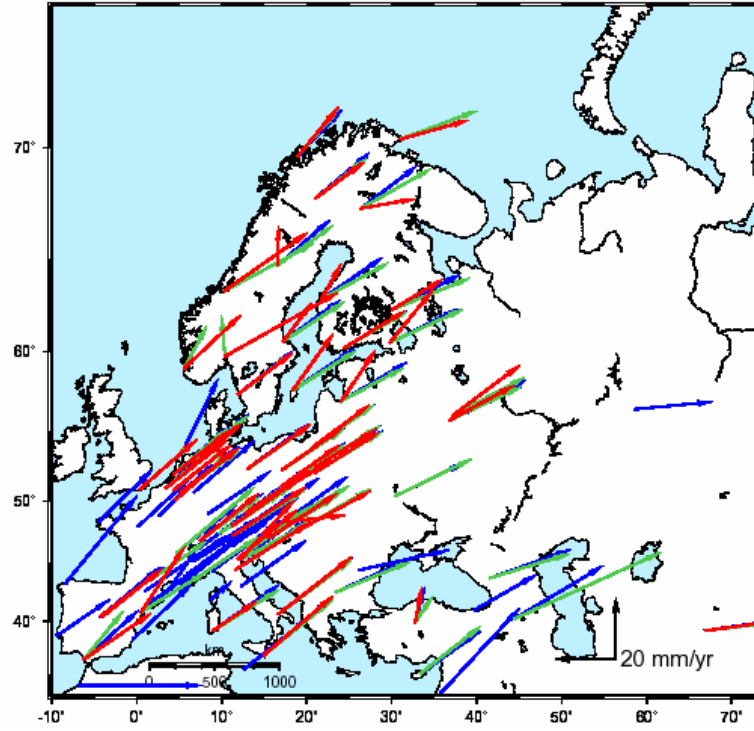
Direkt model olan (20) eşitliği kullanılarak, Euler Kutup Parametrelerine ait varyans-kovaryans matrisi aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilir.

$$C_{\omega \varphi \lambda} = J_{\Omega} C_{\Omega} J_{\Omega}^T \quad (21)$$

4. AVRASYA PLAKASI İÇİN MEVCUT PLAKA HIZI MODELLERİ

Avrasya plakasının kinematığı ile ilgili birçok kaynak mevcuttur /2,5,10,12,13,14,17,22,28,29,31/. Euler parametreleri ile temsil edilen bu hareketin elde edildiği kaynaklar genel olarak, jeomanyetik dönüş zaman ölçeği, sıcak nokta yerdeğiştirme ve yaşlandırma ölçümleri ve uzaysal ölçüm teknikleridir /24/. Özellikle, /5/'de verilen Nuvel1 global plaka modelinin, 0.9562 sabitiyle ölçeklendirilmesi ile elde edilen ve /12/'de verilen Nuvel1A modelinin en yaygın model olduğu söylenebilir. Uzaysal tekniklerle elde edilen hızlar da her yeni çözümde iyileşmektedir. Şekil-2'de Avrasya plakası noktalarının ITRF96, ITRF97 ve ITRF2000 çözümlerinden elde edilen hızları verilmektedir. Uzaysal ölçü teknikleri ile elde edilen modeller /2,13,14/ ile global modeller arasındaki farklara ilişkin çeşitli yorumlar bulunmaktadır /2,28,29,31/. Bu farklara ilişkin aşağıdaki olasılıklardan sözü edilebilir:

- Farklı kaynaklarla elde edilen plaka hızları aynı hız referans sisteminde olması gerekir (sıfır-net-dönüklük). Sıfır-net-dönüklük koşulunun uygulaması ile ilgili bir takım farklı yöntemler ve kabuller bulunabilir (plaka sınırları, plaka hızlarını temsil edecek noktaların seçimi, plaka kalınlığı, plakanın yoğunluğu vs.). Bu durumda karşılaştırılan hızlar teorik olarak aynı referans sisteminde olmayacaktır.
- Her ne kadar uzaysal tekniklerle elde edilen hızlar daha yüksek prezisyonlu gibi gözükse de gerçekte, jeomanyetik dönüş zamanı ölçeği ile elde edilen hızlar yaklaşık 3 milyon yılın ortalamasıdır. Bu yöntemdeki prezisyon uzaysal teknikler kadar olmasa

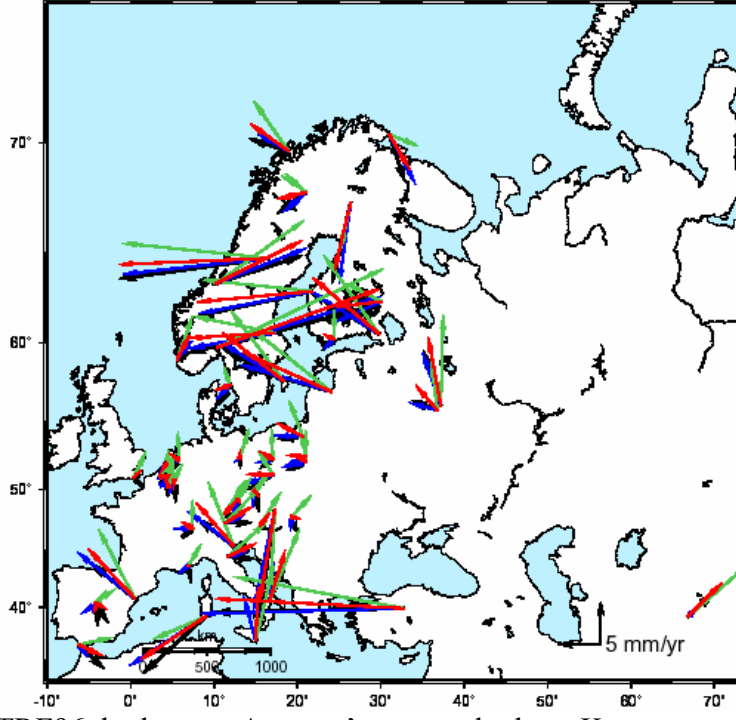


Şekil-2. Avrasya noktalarının farklı ITRF çözümlerindeki hızları. Kırmızı, yeşil ve mavi renkler sırasıyla ITRF96, ITRF97 ve ITRF2000 referans sistemlerindeki hızları göstermektedir.

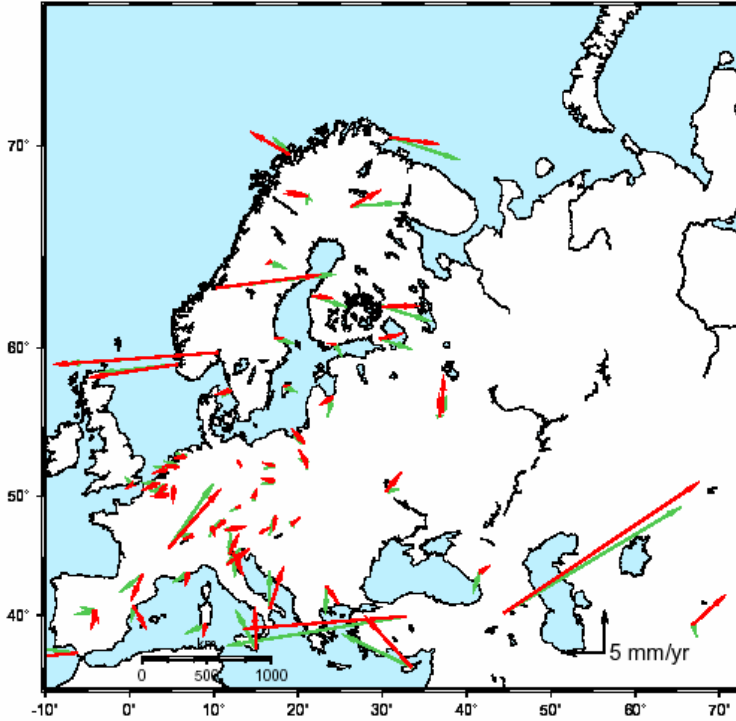
da 20 yıllık geçmişi olan VLBI, SLR ile 10 yıllık geçmişi olan (ITRF çözümlerinde) GPS ve DORIS ölçülerine göre çok daha hassas olması beklenebilir.

- Plakalara ait hızların son 3 milyon yıllık ortalama hızı, bugünkü durumu temsil etmeyebilir. Diğer bir ifade ile sabit hız kabulü, çok küçük, yüz yıllık, bin yıllık vs. seküler değişimler nedeniyle geçerli olmayabilir.
- Gerek jeomanyetik gerekse de uzaysal ölçüm teknikleri hız alanlarının, referans sistemi olarak uygulanan sıfır-net-dönüklük koşulu yeterince sıkı değildir yada yöntemin gerektiği şekilde uygulanmasında sorunlar mevcuttur.

Avrasya'nın genel kinematiğine ilişkin olarak yayınlanan jeomanyetik dönüş zamanı ölçeği kaynaklı Euler parametreleri /5,12/ ile herhangi bir ITRF çözümünü bire bir eşleştirmek gerekmemesine rağmen, ITRF hızlarından elde edilen Euler parametrelerinin, söz konusu ITRF hızları ile birlikte değerlendirilmesi gereklidir. Bu çalışma kapsamında sırasıyla, ITRF96, ITRF97 ve ITRF2000 çözüm hızları ile bu hızlardan elde edilmiş çeşitli Avrasya plakası Euler vektörlerinden hesaplanmış hızlar arasındaki farklar grafik olarak Şekil-3, Şekil-4 ve Şekil-5'te, sayısal değerler ise Tablo-1'de verilmiştir. Gerek şekillerden gerekse de Tablo-1'den görüleceği üzere, tüm Avrasya plaka hızı modellerinde, ITRF hızlarından olan farklar sistematik değildir. ITRF hızlarının 1 mm. altında bir prezisyona sahip olduğu değerlendirildiğinde, yeni hız referans sistemi oluşturmak için elde edilecek a priori hızların, ITRF çözüm hızlarına göre daha tutarsız olduğu açıktır. Bunun sebebi, daha önce bahsedilen nedenlerden ötürü, karşılaştırılan ITRF hızları ile farklı Euler vektörlerinden elde edilen hızların aynı hızların gerçekte aynı hız referans sisteminde bulunmayışlarıdır.



Şekil-3. ITRF96 hızlarının Avrasya'ya göre hızları. Kırmızı, yeşil, mavi ve siyah vektörler sırasıyla, Avrasya plakası hızlarının elde edildiği Nuvel1A /12/, Silliard-98 /31/, Larson /31/ ve Qiang-99 /29/ kaynaklara göredir.



Şekil-4. ITRF97 hızlarının Avrasya'ya göre hızları. Kırmızı ve yeşil vektörler sırasıyla, Avrasya plakası hızlarının elde edildiği Nuvel1A-NNR /12/ ve Nocquet-2001 /28/ kaynaklara göredir.

Tablo-1. Farklı ITRF çözümlerinin Avrasya'ya göre farklı plaka modelleri için hesaplanan hızları (farklı Euler Vektörleri kullanılarak yazar tarafından hesaplanmıştır)

Nokta	Boylam (derece)	Enlem (derece)	ITRF96								ITRF97				ITRF2000							
			Nuvel1A-NNR		Larson-98		Silliard-98		Qiang-99		Nuvel1A-NNR		Nocquet-2000		Nuvel1A-NNR		Altamimi-2000		APKIM-2000			
			D	K	D	K	D	K	D	K	D	K	D	K	D	K	D	K	D	K		
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
7604	-4.5	48.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2	0.9	0.0	1.3	0.6	1.3			
ANKR	32.8	39.9	-22.1	1.1	-23.8	-0.6	-20.0	3.8	-22.4	-0.5	-18.8	-1.5	-20.7	-3.4	-21.3	1.0	-22.6	-0.9	-22.2	-1.2		
ARTU	58.6	56.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	-0.2	-0.2	-3.4	0.1	-3.9			
BELL	1.4	41.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.2	-1.4	-1.0	-1.4	-0.5	-1.4			
BOGO	21.0	52.5	-1.9	0.1	-2.5	-1.2	-0.7	2.6	-2.1	-1.6	-0.7	1.2	-0.6	0.3	-0.2	1.3	-0.1	0.1	0.4	-0.2		
BOR1	17.1	52.3	-1.3	0.8	-1.8	-0.4	-0.2	3.2	-1.3	-1.0	-0.9	0.3	-0.8	-0.3	-0.2	1.0	0.0	0.0	0.5	-0.2		
BRST	-4.5	48.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.9	0.0	1.3	0.6	1.3			
BRUS	4.4	50.8	-0.2	-0.3	-0.6	-0.8	0.6	2.0	0.1	-1.9	-1.1	-1.2	-1.2	-0.5	-0.4	-0.5	-0.3	-0.6	0.3	-0.7		
BUCU	26.1	44.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.2	-4.5	5.5	-6.0	5.9	-6.3			
BZRG	11.3	46.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	2.0	0.2	1.4	0.7	1.2			
CAGL	9.0	39.1	-7.4	-4.9	-8.8	-5.7	-5.9	-2.6	-7.3	-6.6	-0.2	-1.1	-2.0	-0.9	0.2	0.6	-0.9	0.2	-0.4	0.0		
CASC	-9.4	38.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.2	-4.6	-2.4	-3.8	-1.9	-3.8			
CHTL	6.4	45.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.9	-1.0	1.5	-1.3	2.0	-1.4			
DELF	4.4	52.0	-0.7	-0.9	-1.0	-1.5	0.1	1.3	-0.4	-2.6	-1.3	-0.3	-1.2	0.3	-0.8	0.4	-0.5	0.2	0.1	0.1		
DENT	3.4	50.9	1.1	0.2	0.6	-0.3	1.8	2.5	1.3	-1.4	-1.6	-0.7	-1.6	0.1	-0.8	1.1	-0.6	1.1	-0.1	1.0		
DOUR	4.6	50.1	-0.4	0.9	-0.8	0.3	0.5	3.2	-0.1	-0.8	-1.7	-0.2	-1.8	0.4	-1.4	0.4	-1.3	0.2	-0.8	0.1		
EBRE	0.5	40.8	-5.3	5.7	-6.6	5.3	-4.1	7.9	-5.0	4.0	1.4	-2.4	-0.2	-1.4	-0.4	-0.2	-1.3	-0.1	-0.8	-0.2		
EUSK	6.8	50.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2	1.8	0.3	1.5	0.9	1.4			
FCLZ	6.0	45.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-0.2	-0.1	-0.5	0.5	-0.6			
GENO	8.9	44.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.3	1.8	0.8	1.4	1.3	1.2			
GINA	5.8	43.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.9	-0.6	0.7	-0.1	0.6			
GLSV	30.5	50.4	-	-	-	-	-	-	-	-	1.5	1.9	1.2	0.2	-1.1	0.6	-1.3	-1.2	-0.9	-1.5		
GOPE	14.8	49.9	0.5	-0.6	-0.1	-1.6	1.7	1.9	0.5	-2.3	0.2	0.6	0.0	0.3	0.0	1.0	0.0	0.2	0.5	0.0		
GRAS	6.9	43.8	0.1	-0.1	-1.0	-0.8	1.3	2.2	0.3	-1.8	-0.3	-1.3	-1.4	-0.9	0.2	0.3	-0.4	0.0	0.1	-0.1		
GRAZ	15.5	47.1	1.0	1.3	0.1	0.2	2.3	3.7	1.0	-0.5	0.8	0.5	0.2	0.1	1.0	1.5	0.7	0.6	1.2	0.4		
HERS	0.3	50.9	0.7	0.7	0.3	0.3	1.3	2.8	1.0	-1.0	-0.5	-0.3	-0.7	0.7	0.5	0.6	0.6	0.7	1.1	0.7		
HFLK	11.4	47.3	2.8	1.8	2.0	0.9	4.0	4.2	2.9	0.1	2.1	0.4	1.5	0.3	0.6	0.8	0.4	0.2	0.9	0.0		
JOEN	30.1	62.4	-5.1	-0.6	-5.0	-2.2	-4.0	2.0	-5.5	-2.2	3.9	0.0	5.3	-1.7	0.7	1.1	1.6	-0.6	2.1	-1.0		
JOZE	21.0	52.1	-1.3	0.7	-1.9	-0.6	0.0	3.2	-1.4	-1.0	-0.1	0.9	0.0	0.0	0.3	1.3	0.4	0.1	0.9	-0.2		
KARL	8.4	49.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-0.7	0.3	-1.1	0.8	-1.2			
KIRU	21.0	67.9	-2.7	-0.5	-1.9	-1.8	-2.1	2.0	-2.8	-2.2	-2.0	0.6	0.4	-0.3	-1.4	1.0	0.3	-0.2	0.8	-0.5		
KIT3	66.9	39.1	3.8	3.8	1.2	1.1	6.9	6.0	3.0	2.7	3.6	3.3	0.4	-1.1	2.0	3.9	-0.4	0.5	-0.2	-0.1		
KOSG	5.8	52.2	-0.9	0.7	-1.2	0.0	-0.1	3.0	-0.7	-1.0	-1.5	0.1	-1.4	0.5	-0.7	0.8	-0.4	0.5	0.1	0.4		
LAMA	20.7	53.9	-2.8	1.4	-3.1	0.1	-1.6	4.0	-2.9	-0.3	-1.3	1.4	-0.9	0.6	-1.1	1.6	-0.8	0.4	-0.2	0.2		
LAMP	12.6	35.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.7	3.4	-2.1	2.7	-1.7	2.5			
MADR	-4.3	40.4	1.1	-0.6	-0.2	-0.8	2.2	1.5	1.4	-2.2	0.5	-1.1	-1.3	0.3	0.4	0.0	-0.6	0.4	-0.1	0.4		
MARS	5.4	43.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.3	1.1	-1.0	0.9	-0.4	0.8			
MATE	16.7	40.6	1.8	5.7	0.4	4.5	3.4	8.2	1.7	4.0	1.5	4.6	-0.1	4.1	1.7	5.3	0.7	4.3	1.2	4.1		

Tablo-1 (devam). Farklı ITRF çözümlerinin Avrasya'ya göre farklı plaka modelleri için hesaplanan hızları.

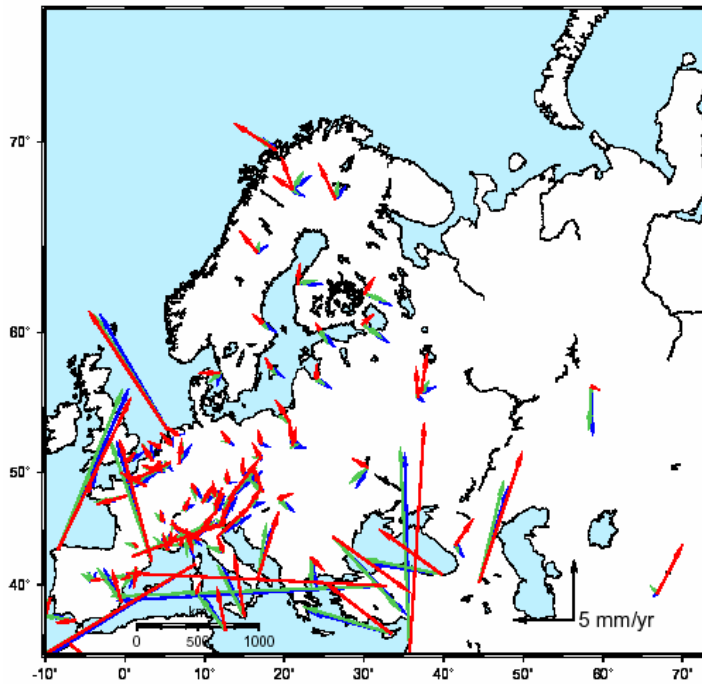
MDVO	37.2	56.0	-1.4	7.8	-2.1	5.9	0.3	10.4	-2.0	6.3	0.1	3.8	0.3	1.5	0.5	2.9	0.6	0.8	1.0	0.4
MEDI	11.6	44.5	3.0	1.4	2.0	0.5	4.3	3.8	3.1	-0.3	2.3	1.6	1.3	1.6	2.6	2.4	2.0	1.8	2.6	1.6
METS	24.4	60.2	-1.0	0.5	-1.0	-1.0	0.0	3.1	-1.3	-1.2	-0.5	0.1	0.7	-1.1	-0.2	0.4	0.6	-1.0	1.1	-1.3
MICH	5.7	43.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4	0.5	-0.2	0.3	0.4	0.2
MLVL	2.6	48.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.9	1.0	-2.0	1.0	-1.4	0.9
MODA	6.7	45.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.6	-0.8	1.2	-1.1	1.7	-1.2
MOPI	17.3	48.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.7	1.9	-1.0	0.9	-0.4	0.7
NICO	33.4	35.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-5.2	5.7	-7.8	3.7	-5.3	4.1	-7.1	2.1	-6.7	1.8
NOTO	15.0	36.9	0.3	6.0	-1.4	4.9	2.1	8.4	0.3	4.3	-0.1	4.6	-2.2	4.2	-0.8	4.9	-2.1	4.0	-1.7	3.8
OBER	11.3	48.1	1.2	1.3	0.4	0.4	2.3	3.7	1.2	-0.5	-0.8	-0.8	-1.2	-0.8	-0.2	1.0	-0.3	0.4	0.2	0.2
ONSA	11.9	57.4	-1.4	-0.5	-1.3	-1.5	-0.7	1.9	-1.3	-2.2	-1.5	-0.4	-0.6	-0.5	-1.5	0.0	-0.7	-0.7	-0.2	-0.8
PENC	19.3	47.8	0.8	-0.2	-0.1	-1.4	2.2	2.4	0.7	-1.8	0.7	0.6	0.1	-0.2	1.0	0.4	0.7	-0.8	1.2	-1.0
PFAN	9.8	47.5	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-0.9	-0.2	-0.8	0.7	1.2	0.5	0.7	1.0	0.6
POL2	74.7	42.7	3.5	6.4	0.8	3.7	6.8	8.4	2.5	5.6	3.4	5.0	0.2	0.3	1.9	4.8	-0.6	1.2	-0.4	0.6
POTS	13.1	52.4	0.0	0.7	-0.4	-0.3	1.1	3.1	0.1	-1.1	-0.2	0.3	0.0	0.1	-0.6	0.8	-0.3	0.0	0.2	-0.1
RIGA	24.1	56.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.2	-0.8	-0.5	-2.0	0.0	1.0	0.5	-0.4	1.1	-0.7
SFER	-6.2	36.5	2.5	-1.2	0.9	-1.2	3.8	0.8	2.9	-2.8	-6.4	-0.6	-8.7	1.0	-1.4	-0.2	-2.8	0.4	-2.3	0.4
SJDV	4.7	45.9	-	-	-	-	-	-	-	-	5.8	6.6	5.0	7.2	-0.1	0.7	-0.5	0.5	0.1	0.4
SODA	26.4	67.4	-1.9	-7.8	-1.3	-9.3	-1.1	-5.2	-2.2	-9.5	3.1	1.7	5.3	0.3	-1.3	2.7	0.2	1.2	0.7	0.9
SOFI	23.4	42.6	-	-	-	-	-	-	-	-	1.2	-1.7	-0.2	-2.9	0.9	-0.9	0.0	-2.3	0.5	-2.6
SVTL	29.8	60.5	-7.6	6.5	-7.7	4.8	-6.4	9.1	-8.0	4.8	2.3	0.6	3.4	-1.1	0.8	0.7	1.5	-1.1	2.0	-1.4
TORI	7.7	45.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	-1.6	0.1	-2.0	0.6	-2.1
TRAB	39.8	41.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-5.0	3.6	-6.3	1.3	-5.9	0.9
TROM	18.9	69.7	-4.3	3.1	-3.4	1.9	-3.9	5.6	-4.4	1.4	-4.3	2.5	-1.7	1.8	-3.3	2.1	-1.5	1.0	-0.9	0.8
UNPG	12.4	43.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.4	1.0	-1.1	0.4	-0.6	0.2
UPAD	11.9	45.4	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	2.0	0.1	2.0	1.3	3.0	0.8	2.4	1.3	2.3
VAAS	21.8	63.0	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0	-0.3	3.7	-1.2	0.1	1.5	1.3	0.2	1.8	-0.1
VENE	12.3	45.4	-4.2	4.8	-5.2	3.9	-2.9	7.2	-4.1	3.1	1.0	-2.3	0.1	-2.4	0.0	1.1	-0.5	0.5	0.0	0.3
VILL	-4.0	40.4	-0.4	-1.0	-1.7	-1.2	0.7	1.1	0.0	-2.6	-0.5	-1.9	-2.2	-0.5	0.6	0.0	-0.3	0.4	0.2	0.4
VISO	18.4	57.7	-7.0	5.5	-7.0	4.3	-6.0	8.0	-7.0	3.8	0.3	0.1	1.3	-0.6	-0.4	0.7	0.3	-0.4	0.9	-0.6
WARE	5.2	50.7	-0.1	-0.7	-0.5	-1.3	0.8	1.6	0.2	-2.4	-0.1	-1.6	-0.2	-1.1	-0.3	-0.2	-0.2	-0.4	0.4	-0.5
WROC	17.1	51.1	-2.8	0.0	-3.3	-1.1	-1.6	2.5	-2.8	-1.7	-1.1	0.2	-1.1	-0.3	-0.6	1.0	-0.5	0.1	0.0	-0.1
WSRT	6.6	52.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.0	-0.1	-0.8	0.3	-0.6	0.5	-0.3	0.2	0.3	0.1
WTZR	12.9	49.1	0.1	-0.1	-0.5	-1.1	1.3	2.3	0.2	-1.8	-0.2	-0.1	-0.5	-0.3	-0.1	0.9	-0.2	0.2	0.4	0.0
ZECK	41.6	43.8	-	-	-	-	-	-	-	-	0.9	0.6	-0.7	-2.1	1.3	1.9	0.2	-0.5	0.5	-0.9
ZIMM	7.5	46.9	-1.2	0.7	-1.9	0.0	-0.1	3.0	-1.0	-1.0	-0.8	-0.3	-1.4	0.0	0.4	0.8	0.1	0.4	0.6	0.3
ZWEN	36.8	55.7	-2.3	2.7	-3.0	0.8	-0.6	5.3	-2.9	1.1	0.0	2.3	0.2	0.0	-0.1	2.2	-0.1	0.1	0.4	-0.3

Örneğin; ITRF2000 hızları ve Nuvel1A-NNR yada herhangi bir global plaka modeli, tam anlamıyla SND şartını sağlasalardı, sıkı-kısıtlı (tight-constraint) bir çözümde, deformasyon alanı içerisinde olan noktalar ile bile, oldukça iyi görel bir hız referans sistemi oluşturulabilirdi. Hatta, farklı tektonik yapı içerisinde bulunan noktaların görel hızları, diğer plakalara göre hız referans sistemi oluşturmakta kullanılabilirdi /19/. Diğer bir deyişle, sözgelimi Avrupa'daki bir noktanın Kuzey Amerika'ya göre hesaplanmış hızları, Kuzey Amerika'nın sabit olduğu bir hız referans sistemi oluşturmada kullanılabilirdi. Bunun nedeni, görel bir hız referans sistemi belirlemede kullanılacak nokta hızlarının, görel sistemin

belirleneceği plakaya göre olan uyumsuzluğunun sıkı-kısıt verilen a priori hızlar (ITRF-plaka modeli) sayesinde dengelemeye yansıyor olmasıdır.

Ancak, hız referans sistemi belirlemede minimal kısıtın (minimal-constraint) sadece bir noktanın hızı olduğu ve gerçekte ITRF ile global plaka modellerinin tam anlamıyla uyumlu olmadığı dolayısıyla sıkı-kısıt verilecek nokta hızlarının da uyumlu bir küme oluşturmayacağı görülmektedir. Diğer bir ifade ile, birden fazla noktanın görelî hızlarına sıkı-kısıt uygulamak sadece ağı uyumsuz bir küme üzerinde zorlamak anlamına gelecektir. Burada şöyle bir soru akla gelebilir: Sıkı-kısıt verilecek noktaların görelî hızlarının uyumlu olacak şekilde seçerek hız alanı belirlenemez mi ? Bu durumda, değişen sadece belirlenecek görelî hız alanının referans sistemini bu kümenin oluşturmasıdır. Örneğin, Avrasya'nın sabit olduğu bir sistem için görelî hızları uyumlu üç nokta kullanılacaksa, belirlenecek görelî hız alanı Avrasya yerine seçilen bu üç noktaya göre olacaktır. Çünkü bu yaklaşım, iki temel kabulü de birlikte getirmektedir : Görelî hızlarına sıkı-kısıt uygulanan noktaların hem ITRF hızları hem de bu noktalar için kullanılan plaka hız modeli kusursuz ve uyumludur. Ayrıca, bu yaklaşımda, noktaların ITRF ve global plaka hızlarındaki problem veya bunların uyumsuzluğunun, belirlenecek görelî hız alanını zorlayacağı ve nokta hızlarında sistematik veya dağınık görelî hız farkları (residual) meydana getireceği gözden kaçırılmamalıdır.

Büyük bir alana göre hız referans sistemi oluştururken, elde edilecek hız alanının tüm bu alanı temsil etmesi gerektiği düşünülerek, çözüm stratejisi mümkün olduğunca fazla noktanın görelî hızlarıyla, görelî hız alanı çözümünü sıkı-kısıt uygulamadan Helmert (Benzerlik) dönüşümü ile gerçekleştirilmelidir. Bu durumda elde edilecek sonuç, nokta sayısının artması, problemlî hızların çözümü çok daha az etkilemesi nedeniyle daha gerçekçi olacaktır. Ancak bu yöntemde, sıkı-kısıt ile çözüm için nokta seçim ölçütleri farklıdır.



Şekil-5. ITRF2000 hızlarının Avrasya'ya göre hızları. Kırmızı, yeşil ve mavi vektörler sırasıyla, Avrasya plakası hızlarının elde edildiği Nuvel1A-NNR /12/, Altamimi-2002 /2/ ve APKIM-2000 /13,14/ kaynaklarına göre dir.

Nihai çözüm için 3 boyutlu dönüklük ve öteleme değerleri hesaplanacağından, noktalar deformasyondan uzak ve buldukları plakayı temsil eder nitelikte olmalıdır. İkinci olarak, bu tip bir çözümün iyi sonuç vermesinin kullanılacak nokta sayısına bağlı olacağı değerlendirilebilir.

Sonuç olarak görelî hız referans sistemlerinin oluşturulmasında temel problem hız datumunun belirlenmesi olup, çalışma alanının genişliği, mevcut verilerin nitelik ve nicelikleri de dikkate alınarak minimal (zero-variance computational base) veya kısıt kullanan yöntemlerin, serbest dengeleme tekniklerinin (minimum norm-minimum iz, minimum kısmi norm-minimum kısmi iz) veya yukarıda bahsedilen 14-parametrelî benzerlik dönüşümünün uygulanabileceği değerlendirilebilir.

5. SONUÇ

Euler parametreleri genel olarak bir dönme hareketini ifade eden parametreler olarak algılansa da, gerçekte Euler vektörünün yer merkezli sistemde ifade edilmesi nedeniyle yer yüzeyindeki çizgisel plaka ve blok hareketlerini de kapsamaktadır. Bu durumda Euler kutup merkezi çalışma bölgesine göre sadece daha uzakta olacaktır. Örneğin, 90⁰ boylamında ve ekvator üzerinde bulunan bir Euler kutbu, ekvator üzerinde ve Greenwich boylamında bulunan bir nokta için sadece kuzey bileşeni olan bir hareket oluşturacaktır.

Ülkemizin sınırları içerisine giren Avrasya ile ilgili Euler vektörlerini global modellerden elde etmek mümkün iken, lokal blok hareketleri ile ölçü sayısının azlığı nedeniyle global modellerin yetersiz kaldığı Arabistan Plakası için bu plaka ve blokların kinematikini en iyi şekilde temsil eden Euler Vektörlerinin, mevcut verilerle elde edilmesi zorunludur.

TUTGA-99A'nın idamesi kapsamında sağlanması gereken inter-sismik ve ko-sismik etkileri, her bir nokta için ayrı ölçülerle hesaplanmasının yaratacağı zaman ve maliyet yükü nedeniyle, söz konusu etkilerin hesaplanmasında belirli ölçüde interpolasyon ve gridleme yöntemleri uygulanmaktadır. İnter-sismik ve ko-sismik etkilerin kestiriminde noktaların birbirlerine yakınlığını esas alan interpolasyon ve gridleme yöntemleri, fay sınırları dikkate alınmadığında kuşkusuz başarısız olacaktır. Görelî hız referans sistemleri ile katı blok dönüklükleri ile birlikte bu fay sınırları da ortaya çıkarılacaktır.

Görelî hız referans sistemi çözümleri sadece plaka ve blok hareketlerini araştırmak için değil, birbirine yakın ve global bir hız referans sisteminde (ITRF) uyumlu gözükse fakat gerçekte uyumsuz nokta hızlarını görsel olarak göstermesi bakımından da önemlidir. Bu durum özellikle, global hız referans sisteminde çevresindeki hız vektörleri ile aynı yönde olması nedeniyle açıkça görülemeyen fakat büyüklük (magnitude) olarak uyumsuz nokta hızlarında ortaya çıkmaktadır.

VLBI ve SLR gibi sistemlerin aksine, GPS ile görelî konumlama, daha ilk çözüm aşamasında (baz vektörlerinin belirlenmesi) dahi kullandığı interferometrik model (ikili farklar)'den dolayı hassas nokta koordinatlarına ihtiyaç duymaktadır (tam sayı bilinmeyenlerinin çözülmesi). Bu hassas nokta (fiducial site) stratejisinin başarısı önemli ölçüde baz uzunluğuna dayanmaktadır. Diğer yandan özellikle görelî plaka hız referans sistemleri, bölgesel çalışmalarda dahi bölgeyi çevreleyen veya komşu alanlardaki global

noktaların hızlarıyla daha yakından ilgilenmeyi gerekli kılmaktadır. Elde edilen sonuçlardan da görülebildiği gibi, jeolojik olarak deformasyondan uzak olduğu kabul edilen ve uzun bir ölçü geçmişi nedeniyle hızları çok iyi bilinen global noktaların SND hızları arasında dahi, buldukları tektonik alan itibarıyla tam bir uyum söz konusu değildir.

Yukarıda belirtilen iki durum dikkate alındığında, iki temel GPS ağı birleştirme/dengeleme stratejisi öngörülebilir;

- Bölgesel bir GPS Ağını, ağı oluşturan ve aynı zamanda coğrafi yakınlığı nedeniyle GPS Ağına ait kampanyaların bazı çözümlerinde de kullanılan, geometrik olarak uygun dağılımlı 4-5 adet global noktaya sıkı-kısıtlar (tight-constraint) ile dayandırmak.
- Bölgesel bir GPS Ağını global nokta çözümleri ile (SINEX dosyaları ile) sıklaştırmak, elde edilecek çok daha geniş küme üzerinde, Tablo-1'deki değerler de dikkate alınarak mümkün olan en fazla nokta ile ve Helmert dönüşümü ile çözümü gerçekleştirmek.

Bu iki yöntem arasında bir tercih yaparken, GPS tam sayı bilinmeyeninin çözümü için gerekli kısa baz kriterlerini de dikkate almak ve kampanya çözümlerine dahil edilecek global nokta seçim ölçütlerini yeniden düzenlemek gerekecektir. Buna bağlı olarak, GPS kampanya değerlendirme çalışmalarındaki iki yönlü global nokta seçim stratejisi şöyle özetlenebilir:

- Kampanya değerlendirmelerinde tam sayı bilinmeyenlerinin çözümünü sağlayabilecek ve kısa baz oluşturan yeteri kadar global noktanın çözümlerde kullanılması. Bu seçimde kullanılacak global noktaların çalışma bölgesine olan uzaklığı, koordinat hassasiyeti ve doğruluğu önemlidir. Ancak bu noktaların, buldukları blok veya plakanın hareketini temsil etmesi gerekmemektedir. Nitekim, hem global hem de bölgesel ölçekte, koordinat ve hızları çok iyi bilinen ancak içerisinde bulunduğu tektonik yapıya göre oldukça uyumsuz bir çok örnek mevcuttur. Bu anlamda Türkiye için yakın bazlı NICO, ZECK, GRAZ, PENC, JOZE, GOPE, BOR1, BAHR, MATE, NOTO, WTZR, KIT3, ZWEN, ONSA, ZIMM, BRUS noktaları önerilebilir.
- İkinci olarak kullanılacak hızları buldukları plakanın kinematığını temsil eden mümkün olduğunca fazla sayıda global noktanın çözümlere eklenmesi. Örneğin Kuzey Anadolu Fay Hattı nedeniyle, Avrasya-görelî hız referans sisteminin daha önem kazandığı Anadolu Plakası için, Tablo-1'de verilen artık hızlar dikkate alınarak yeni global noktaların kampanya değerlendirme çalışmalarında kullanılması. Bölgesel çözümlerin, global çözümlerle (SINEX) sıklaştırılması durumunda, kampanya değerlendirme aşamasında kullanılmamış global noktalar da, görelî hız referans sisteminin belirlenmesinde kullanılabilir. Ancak yine de bölgesel ve global çözüm arasındaki ilişkiyi kuracak olan global nokta sayısı artırılmalıdır.

Kuşkusuz yukarıda bahsedilen hususlar, kampanya değerlendirme aşaması ile ilgilidir. Daha önceki yıllara ait kampanyaların zaman ve maliyet yüküne rağmen yeniden değerlendirilmesi düşünülse bile, o dönemdeki global noktaların nitelik ve nicelik olarak yetersiz olması arzu edilen yöntemin uygulanmasına izin vermeyecektir. Daha önceki yıllara ait çözümlerin, çeşitli analiz merkezlerine ait çözümlerle (1996 sonrası) birleştirilmesi, global nokta sayısını önemli ölçüde artırarak çözüm yöntemi konusunda esneklik sağlaması açısından en uygun tercih olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- /1/ Aktuğ, B. : Anadolu Plakası Euler Parametrelerinin Jeolojik ve Jeodezik Verilerden Elde Edilmesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Jeodinamik Dersi Araştırma Çalışması, 1997, Ankara (yayınlanmadı).
- /2/ Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C. : ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications, Geophysical Research Letters, Vol.107, No.B10, pp.2214, 2002.
- /3/ Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C. : Review and Progress of the ITRF Datum Definition, AGU Fall Meeting 2001, 10-14 Aralık, San Francisco, 2001.
- /4/ Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C. : The Impact of A No-Net Rotation Condition on ITRF2000, Geophysical Research Letters, Vol. 30, No. 2, 1064, 2003.
- /5/ Argus, D.F., Gordon, R.G. : No-Net Rotation Model of Current Plate Velocities Incorporating Plate Motion Model Nuvel, Geophysical Research Letters, Vol.18, No.11, pp.2039-2042, Nov.,1991.
- /6/ Ayhan, M.E. : Kişisel Görüşmeler.
- /7/ Ayhan, M.E., C. Demir, O. Lenk, A. Kılıçoğlu, B.Aktuğ, M.Açıköz, O.Fırat, Y.S.Şengün, A.Cingöz, M.A. Gürdal, A.İ.Kurt, M.Ocak, A.Türkezer, H. Yıldız, N. Bayazıt, M. Ata, Y. Çağlar, A.Özerkan : Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA-99A), Harita Dergisi Özel Sayı, No.16, Ankara, Mayıs, 2002.
- /8/ Borre K., Strang G. : Linear Algebra, Geodesy and GPS, Wellesley-Cambridge Press, Wellesley, 1997.
- /9/ Boucher, C, Altamimi, Z. : ITRF and its relationship to GPS, GPS World, Volume 7, Number 9, September 1996.
- /10/ Calais, E., Amarjargal, S., : New Constraints on current deformation in Asia from continuous GPS measurements at Ulan Baatar, Mongolia, Geophysical Research Letters, Vol.27, No.10, pp.1527-1530, May,2000.

- /11/ Cox, A., Hart, R.B. : Plate Tectonics: How it works, Blackwell Scientific Publications, 1986.
- /12/ DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., Stein, S. : Effects of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions, Geophysical Research Letters, Vol.21, No.20, pp.2191-2194, Oct., 1994.
- /13/ Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut : <http://dgfi2.dgfi.badw-muenchen.de>, Şubat, 2003.
- /14/ Drewes, H., Angermann, D. : The Actual Kinematic and Crustal Deformation Model 2000 (APKIM2000) as a Geodetic Reference Frame, IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, 2001.
- /15/ El-Sheimy, N. : Adjustment of Observations, Lecture Notes, University of Calgary, Canada, 2001.
- /16/ Flügge, W. : Tensor Analysis and Continuum Mechanics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972.
- /17/ Haas, R., Gueguen, E., Scherneck, H.G., Nothnagel, A., Campbell, J. : Crustal Motion Results derived from observations in the European Geodetic VLBI Network, Earth Planets Space, 52, 759-764, 2000.
- /18/ Herring, T.A. : Geodetic Applications of GPS, Proceedings of IEEE, Vol.87, No.1, Ocak, 1999.
- /19/ Herring, T.A. : Kişisel Görüşmeler, Nisan, 2003.
- /20/ Jeffreys, H. : The Earth, Cambridge University Press, London, 1959.
- /21/ Kaula, W.M. : An introduction to Planetary Physics, Wiley Publications, New York, 1968.
- /22/ Kogan, M.G., Steblov, G.M., King, R.W., Herring et.al, T.A., Frolov, D.I. : Geodetic Constraints on the Rigidity and Relative Motion of Eurasia and North America, Geophysical Research Letters, Vol.27, No.14, pp.2041-2044, July, 2000.
- /23/ Krakiwsky, E.J. : Adjustment, Elementary Level, Lecture Notes, University of Calgary, Canada, 1995.
- /24/ Lambeck, K. : Geophysical Geodesy, Clarendon Press, Oxford, 1988.
- /25/ Leick, A. : GPS Satellite Surveying, Wiley & Sons Publication, New York, 1990.
- /26/ Munk, W.H., MacDonald, G., J., F. : The Rotation of the Earth, Cambridge University Press, London, 1960.

- /27/ Nakiboğlu,M.,Demir,C. : Dengeleme Hesabı, Cilt.I-II, Harita Yüksek Teknik Okulu Ders Notları, Ankara, 2003.
- /28/ Nocquet, J.M., Calais, E., Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C. : Intraplate Deformation in western Europe deduced from an analysis of the International Terrestrial Reference Frame 1997 (ITRF97) velocity field, Journal of Geophysical Research, Vol.106, No.B6, pp.11239-11257, Jun, 2001.
- /29/ Qiang, Z., Wenyao, Zhu, Yongqin, X. : Global Plate Motion Models Incorporating the Velocity Field of ITRF96, Geophysical Research Letters, Vol.26, No.18, pp.2813-2816,Sep.,1999.
- /30/ Seeber, G. : Satellite Geodesy, Walter de Gruyter, New York, 1993.
- /31/ Sillard, P.,Altamimi, Z., Boucher, C. : The ITRF Realization and its associated Velocity Field, Geophysical Research Letters, Vol.25, No.17, pp.3323-3226, Sep.,1998.
- /32/ Vanicek,P.,Krakiwsky,E. J., : Geodesy: The Concepts, North Holland Publishing Company, 1982.