

**ITRF-2005 VE ÖNCEKİ REFERANS KOORDİNAT SİSTEMLERİ  
İLE OLAN İLİŞKİSİ**  
(ITRF-2005 AND RELATIONS BETWEEN PREVIOUS REFERENCE FRAMES)

**Bahadır AKTUĞ**  
Harita Genel Komutanlığı, Ankara  
bahadir.aktug@hgk.mil.tr

**ÖZET**

Ulusal ağların yer merkezli, yer sabit ortak bir global datumda ifade edilebilmesi ancak uydu ölçüleri ile olanaklı olmuştur. Diğer yandan, global referans sistemlerinin farklı gerçekleştirmeleri, ortak datum kavramını genişletmiş ve tüm ulusal ağların aynı datumda ifade edilmesi yerine, birbirlerine yüksek duyarlıklı dönüştürülebilen global datuamlar ortaya çıkmıştır. Bu anlamda, ulusal ağların karşılaştığı önemli bir sorun, güncel gerçekleştirmeleri devam eden global yersel datuamlara dayalı ancak ulusal anlamda değişmeyen ulusal datuamları tanımlamaktır. Uluslararası Yersel Referans Koordinat Sistemi (ITRF)'in en güncel gerçekleştirmesi ITRF-2005 olup, söz konusu referans koordinat sisteminin önceki datuamlarla ilişkisinin sağlanması için önceki datuamlarla olan dönüşüm parametrelerinin bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. ITRF-2005'in sadece ITRF-2000 ile olan dönüşüm parametreleri mevcut olup, daha önceki referans koordinat sistemleri ile olan ilişkilerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışmada, iki farklı datum dönüşüm parametreleri kümesinden birleşik datum parametrelerinin elde edilmesi gösterilmekte, ITRF-2005 ile önceki referans koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametreleri hesaplanmakta ve ITRF-2005'in halen ülkemizde kullanılan ITRF-96 ile olan koordinat farklılıkları incelenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** ITRF, datum dönüşümü, referans koordinat sistemleri, datum dönüşüm parametreleri.

**ABSTRACT**

Defining national networks in a conventional Earth-Centered, Earth-Fixed (ECEF) datum has been made possible only through space-based geodetic measurements. On the other hand, different realizations of the conventional reference system has expanded the global datum and global datums emerged, which can be transformed into one another with high precision, instead of defining national networks in a common global datum. In this respect, an important issue in the national datums is the definition of national datums based on a global datum which does not change nationwide. The newest realization of the International Terrestrial Reference System (ITRF) is ITRF-2005, and datum transformation parameters are needed to establish the relation between older frames. Only the transformation parameters between ITRF-2005 and ITRF-2000 are available, and it is required to compute the transformation parameters between ITRF-2005 and older frames. In this study, obtaining the transformation parameters of a compound transformation from two separate sets of transformation parameters are shown. Transformation parameters from ITRF-2005 to older frames are computed, and coordinate differences between ITRF-2005 and ITRF-1996 which is still used in Turkey are examined.

**Key Words:** ITRF, datum transformation, reference frames, datum transformation parameters.

## 1. GİRİŞ

Her ne kadar, uzay tabanlı jeodezik yöntemler ulusal/bölgesel ağların ortak bir datumda tanımlanmasını sağlasa da, datum dönüşümü gerek önceki datumlarla olan ilişkilerin sağlanması (Featherstone, 1996; Snay, 1999; Soler ve Snay, 2004), gerek yer merkezli yer sabit sistemlerin farklı gerçekleştirmelerinin dönüştürülmesi (Boucher ve Altamimi, 1996; Soler ve Marshall, 2003; Altamimi vd., 2002) açısından daha da önem kazanmıştır.

Münferit datumlardan ortak bir datuma (örn.. WGS-84) olan dönüşüm parametreleri genellikle mevcut olmakla birlikte, muhtemelen hesaplama yükü ve ardışık datum dönüşümü ile koordinatların dönüştürülebilmesi nedeniyle, yerel datumlar arasındaki dönüşüm parametreleri çoğunlukla bulunmamaktadır. Benzer şekilde ITRS (Uluslararası Yersel Referans Sistemi) gerçekleştirmeleri en yeni sürüm ile önceki sürümler arasında yayınlanmaktadır.

Her bir datum çifti arasındaki datum dönüşüm parametrelerinin dengeleme ile tahmin edilmesi hesap yükü açısından zor olabileceği gibi fiziksel olarak olanaklı da olmayabilir (farklı kıta veya asırlardaki yersel datumlar gibi). Bu anlamda, koordinatların ardışık dönüşümle dönüştürülmesi en direkt yöntemdir. Diğer bir yöntem ise, dönüşüm parametrelerinin ardışık dönüşümlerden elde edilmesidir. Koordinatların dönüştürülmesi yerine dönüşüm parametrelerinin elde edilmesi birkaç açıdan önemlidir: (1) farklı ağların göreceli dönüklüklerinin karşılaştırılması, (2) farklı jeodezik ve CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) yazılımlarına girdi olabilecek parametre kümesinin elde edilmesi (Snay, 1999; Kouba, 2002), (3) mevcut dönüşüm parametrelerine ait hataların yeni kümeye yayılması, (4) uydu yörüngelerinin uzun dönemli referans koordinat sistemi idamesi için dönüştürülmesi, (5) yeni datumda sadece dönüşüm parametrelerine bağlı olarak oluşan hataların belirlenmesi (Aktuğ, 2008). Bu şekilde, coğrafi ya da kronolojik nedenlerle fiziksel olarak bağlantısız datumlar arasındaki dönüşüm parametrelerinin hesaplanması olanaklıdır. Farklı datumlar arasındaki farkların değerlendirilmesi koordinatların karşılaştırılmasıyla yapılabilir. Ancak, bu farklılıklar konuma bağlı olup, göreceli yöneltme parametreleri yerine koordinat birimine bağlı olarak değişecektir.

Uzay tabanlı jeodezik teknikler, datumdan koordinatlara olan sırayı, koordinatlardan datuma şeklinde değiştirmiş olup, ortak yer merkezli yer sabit (ECEF) koordinat sistemlerinin farklı gerçekleştirmeleri, teorik ve ideal referans sistemleri ile somutlaştırılmış hallerini birbirlerinden ayırmak amacıyla, datum yerine genel olarak referans koordinat sistemi isimlendirmesi yapılmaktadır. Bununla beraber, "datum dönüşümü" ifadesi ile tutarlı olmak amacıyla, farklı ECEF gerçekleştirmelerinden bahsederken dahi "datum" sözcüğü kullanılacaktır.

ITRF-2005 ile ITRF-2000 dışındaki referans koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametreleri mevcut değildir (Altamimi vd., 2007; Aktuğ, 2008). Bu

çalışmada, Uluslararası Yersel Referans Koordinat Sistemi (ITRF)'in en güncel gerçekleşimi olan ITRF-2005 ile önceki referans koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametreleri hesaplanacak ve ITRF-2005'in halen ülkemizde kullanılan ITRF-96 ile olan koordinat farklılıkları incelenecektir. ITRF-2005 ile ITRF-1996 arasındaki koordinatların hesaplanması bileşik datum parametrelerinin hesaplanmasını gerektirmektedir. Bu amaçla önce datum dönüşüm modelleri kısaca verilecek ve (Aktuğ, 2008)'de verilen bileşik datum parametrelerinin hesaplanması eşitlikleri açıklanarak ITRF-2005 ile önceki referans koordinat sistemleri arasındaki farklar incelenecektir.

## 2. ÜÇ BOYUTLU (3B) DATUM DÖNÜŞÜM MODELLERİ

İki üç boyutlu datum arasındaki ilişki genel olarak, Helmert Dönüşümü olarak bilinen üç ortogonal dönüklük, üç öteleme ve bir ölçek faktöründen oluşan yedi-parametrelili dönüşüm ile sağlanır.  $i$  ve  $c$  datumları arasındaki Helmert Dönüşümü aşağıdaki şekilde yazılabilir (Bursa, 1966; Soler, 1976):

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{T}_{i,c} + (1 + s_{i,c}) \mathbf{R}_{i,c} \mathbf{X}_i \quad (1)$$

Burada; alt indisler " $i,c$ " dönüşüm parametrelerinin yönünü  $i$ 'den  $c$ 'ye şeklinde ifade etmekte olup,  $s$  ölçek faktörü,  $\mathbf{T}$  öteleme faktörü ve  $\mathbf{R}$  de üç ortogonal dönüklükten oluşan birleştirilmiş dönüklük matrisidir. Genel olarak birleştirilmiş dönüklük matrisi, küçük açılara bağlı olarak trigonometrik fonksiyonlar yardımıyla sadeleştirilir. Ancak, yeni dönüklük matrisi ortogonal olmadığı gibi antisimetrik de değildir. Bu model genel olarak yersel datumlar için kullanılan modeldir. (1) numaralı eşitlik genel bir form oluştursa da, isimlendirme ve formülasyonda bazı farklılıklar olabilmektedir: örn. ölçek faktörü (mutlak veya diferansiyel,  $s$  yerine  $(1+s)$  kullanımı) ve dönüklüklerin temsili (konum vektörü veya koordinat sistemi dönüklüğü). Formülasyon ile ilgili çok yararlı bir açıklama (Soler, 1998)'de bulunabilir. Konum vektörü dönüklükleri yerine neden koordinat sistemi dönüklüklerinin kullanılması gerektiği ile ilgili diğer bir açıklama ise (Soler ve Marshall, 2002)'de verilmektedir. Üç boyutlu bir uzayda saatin tersi yöndeki dönüklüklerin pozitif olması tanımıyla uyumlu olarak, buradan itibaren sağ el kuralına bağlı kalınacaktır (Kaula, 1966; Mueller, 1969; Vaníček ve Krakiwsky, 1982; Soler, 1998). Yerel datumlardan global bir datuma olan dönüşüm parametreleri, ölçek ve dönüklük parametrelerinin çarpımlarının ihmal edilemeyeceği kadar büyük olabilir. Bununla beraber, uzay-tabanlı jeodezik teknikler (1) eşitliğinin daha da sadeleştirilmesine olanak tanıyacak şekilde birbirine çok yakın koordinat sistemleri sağlamaktadır. Ölçek ve dönüklüğün çarpımındaki ikinci derece terimler ihmal edilerek (1) eşitliğinin doğrusallaştırılmış hali aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{X}_i + \mathbf{T}_{i,c} + \mathbf{R}_{i,c} \mathbf{X}_{i,c} + \mathbf{D}_{i,c} \mathbf{X}_i \quad (2)$$

Burada  $\mathbf{D}$  ölçek faktörü,  $\mathbf{T}$  öteleme vektörü ve  $\mathbf{R}$  de (1) eşitliğinden farklı olan birleştirilmiş dönüklük matrisidir (Altamimi ve Boucher, 1996; Soler, 1998). (2) eşitliğindeki dönüklük matrisi ortogonal olmamakla beraber anti-simetriktir. Referans koordinat sistemi dönüşümündeki bu form hemen hemen tüm ITRS ve ETRS

gerçekleşimleri için kullanılan temel matematik modeli oluşturmaktadır (Altamimi ve Boucher, 1996; Altamimi vd., 2002; Altamimi vd., 2007). (2) eşitliğinin zamana göre türevi alınıp, hızların ölçek ve dönüklük ile olan çarpımları ihmal edilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\dot{\mathbf{X}}_c = \dot{\mathbf{X}}_i + \dot{\mathbf{T}}_{i,c} + \dot{\mathbf{R}}_{i,c} \mathbf{X}_{i,c} + \dot{\mathbf{D}}_{i,c} \mathbf{X}_i \quad (3)$$

(Altamimi vd., 2002). 14 parametrelili dönüşüm eşitliklerinin tam hali (Soler ve Marshall, 2002)'de bulunabilir. Bunların ikinci ve üçüncü derece eşitlikleri de kapsayan genişletilmiş hali ise (Soler ve Marshall, 2003)'de verilmektedir. Uygulamada, Soler ve Marshall (2003) tarafından da belirtildiği şekilde, birçok terim ihmal edilebilir. (2) ve (3) eşitlikleri (Soler ve Marshall, 2003)'de verilen eşitliklerin doğrusallaştırılmış halleridir.

Bununla beraber, parametre tahmin modeli ve dönüşüm modeli tutarlı olmalıdır. Teorik olarak, (2) ve (3) eşitlikleriyle elde edilen dönüşüm parametreleri, koordinat ve hızların dönüştürülmesinde (Soler ve Marshall, 2002; Soler ve Marshall, 2003)'de verilen eşitliklerle kullanılmamalıdır. Aksi takdirde, bilinmeyen dönüşüm parametreleri için farklı kısmi türevlerin kullanılması, parametre tahmininde farklı değerlerin elde edilmesine yol açabilir. Birbirine çok yakın global referans koordinat sistemlerinde, kısmi türevler arasındaki farklar ihmal edilebilir. Her ne kadar, (2) ve (3) eşitlikleri (Soler ve Marshall, 2002; Soler ve Marshall, 2003) tarafından verilen eşitlikler kadar tam değilse de, farklı ITRS gerçekleştirmeleri için yayınlanan dönüşüm parametreleri ve hızları (2) ve (3) eşitliklerine göre elde edilmiştir (Altamimi ve Boucher, 1996; Altamimi vd., 2002; Altamimi vd., 2007). Bu nedenle, IERS (Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi) tarafından yayınlanan ITRS referans koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm (2) ve (3) eşitlikleriyle yapılmalıdır.

Bileşik datum dönüşümü parametreleri, yerel datumdan ortak datuma olacak şekilde iki ayrı datum dönüşüm parametre kümesinden elde edilir. Birçok yerel datumda dönüşüm eşitlikleri, yerel datumdan ortak datuma olacak şekilde verilmektedir. Bununla beraber, söz konusu parametreler, sadece ortak datumdan yerel datuma olacak şekilde de verilebilir. Bu durumda, ters dönüşüm parametrelerinin hesaplanması zorunludur. Yaygın, ancak tam olarak doğru olmayan bir yaklaşım, dönüşüm parametrelerinin ayrı ayrı ters işaretlisini almaktır (Aktuğ, 2007).

Bu çalışmada ITRF-2005 ile önceki referans koordinat sistemlerinin ilişkisinin incelenmesi için önceki referans koordinat sistemleri ile ITRF-2005 arasındaki dönüşüm parametrelerinin bilinmesi gerekir. ITRF-2005 ile sadece ITRF-2000 arasındaki dönüşüm parametreleri yayınlanmıştır (Altamimi vd., 2007). Bu nedenle, ITRF-2005 ile önceki referans koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametrelerinin hesaplanmasında (Aktuğ, 2007)'de verilen ters ve bileşik dönüşüm eşitlikleri kullanılmıştır. Söz konusu eşitlikler ve elde edilişleri aşağıda kısaca açıklanacaktır. Eşitliklerin türetilmesinde IERS (2008a) ve IERS (2008b) tarafından (2) ve (3)'de verilen dönüşüm eşitlikleri kullanılmaktadır.

Buna göre (2) eşitliği, aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir;

$$(\mathbf{X}_c - \mathbf{T}_{i,c}) = (\mathbf{I} + \mathbf{R}_{i,c} + \mathbf{D}_{i,c} \mathbf{I}) \mathbf{X}_i \quad (4)$$

Ölçek faktörünün önündeki birim matris  $\mathbf{I}$  sadece skalar ölçek faktörünün matris cebri ile uyumlu olması amacıyla konulmuştur. Ölçek ve dönüklük birleştirilerek;

$$(\mathbf{I} + \mathbf{A}) \mathbf{X}_i = (\mathbf{X}_c - \mathbf{T}_{i,c}) \quad (5)$$

elde edilir. Burada,  $\mathbf{A} = (\mathbf{R}_{i,c} + \mathbf{D}_{i,c} \mathbf{I})$ 'dir. (4) eşitliğindeki dönüklük matrisinin antisimetrik ve ölçek faktörünün küçük olduğuna ve  $\mathbf{A}$  matrisinin  $\forall \mathbf{A} \quad |\mathbf{A}| < 1$  koşulunu sağladığına dikkat edilmelidir. Eşitliğin sol tarafındaki matrisin tersi;

$$(\mathbf{I} + \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 - \mathbf{A}^3 + \mathbf{A}^4 + \dots \quad (6)$$

şeklinde Taylor serisine açılabilir. (4) eşitliğindeki dönüklük matrisinin ne ortogonal ne de antisimetrik olmadığına ve Taylor serisine açılmadığına dikkat edilmelidir. Dönüklük matrisinden birim matrisin çıkarılmasıyla Taylor serisinin yakınsaması  $\forall \mathbf{A} \quad |\mathbf{A}| < 1$  koşuluyla kesin olan antisimetrik bir dönüklük matrisi  $\mathbf{A}$  elde edilmektedir. Bu koşul, küçük açıların radyan cinsinden yazıldığı tüm antisimetrik matrisler için geçerlidir. (6) eşitliğinin (5) eşitliği içinde yerine konulması ve  $\mathbf{A}$  yerine  $\mathbf{A} = (\mathbf{R}_{i,c} + \mathbf{D}_{i,c} \mathbf{I})$  yazılmasıyla;

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{X}_c + \mathbf{T}_{c,i} \mathbf{R}_{c,i} \mathbf{X}_c + \mathbf{D}_{c,i} \mathbf{X}_{c,i} \quad (7)$$

elde edilir. Dönüklüklerin milisaniye biriminde, ölçek faktörünün ise 1 ppm ila 1 ppb arasında olduğu değerlendirildiğinde, doğrusal kısmın birçok amaç için yeterli olduğu görülür. (7) eşitliğindeki öteleme vektörü, dönüklük matrisi ve ölçek faktörü aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$\mathbf{T}_{c,i} = -(\mathbf{I} - \mathbf{R}_{i,c} - \mathbf{D}_{i,c} \mathbf{I}) \mathbf{T}_{i,c} \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{c,i} = -\mathbf{R}_{i,c} \quad (9)$$

$$\mathbf{D}_{2,1} = -\mathbf{D}_{1,2} \quad (10)$$

Münferit dönüşüm parametreleri, (8-10) eşitliklerinden elde edilebilir. (6) eşitliğinde, ikinci ve daha yüksek dereceli terimler ihmal edilmiştir.

(3) eşitliğinde verilen hızlara ait dönüşüm parametrelerinin tersinin elde edilmesi, hem koordinat hem de hızların kullanılmasını ve bu nedenle hızlardan önce koordinatların dönüştürülmesini gerektirir.  $\Delta x = \mathbf{X}_i - \mathbf{X}_c$ , şeklinde tanımlandığında, (3) eşitliği aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\dot{\mathbf{X}}_i = \dot{\mathbf{X}}_c - \dot{\mathbf{T}}_{i,c} - \dot{\mathbf{R}}_{i,c} \mathbf{X}_c - \dot{\mathbf{D}}_{i,c} \mathbf{X}_c - (\dot{\mathbf{R}}_{i,c} + \dot{\mathbf{D}}_{i,c} \mathbf{I}) \Delta x_{i,j} \quad (11)$$

burada  $\Delta x$  (8-10) eşitlikleriyle hesaplanabilir. Bununla beraber, ITRS'deki konum vektörleri ters dönüşüm parametrelerinin yaklaşık olarak belirlenmesini sağlayacak kadar yakındır. Bu anlamda, (11) eşitliğindeki son terim ihmal edilerek, ters dönüşüm parametreleri aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\dot{\mathbf{T}}_{j,i} = -\dot{\mathbf{T}}_{i,j} \quad (12)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_{j,i} = -\dot{\mathbf{R}}_{i,j} \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{D}}_{j,i} = -\dot{\mathbf{D}}_{i,j} \quad (14)$$

Dönüşüm parametrelerinin, her iki datumdaki ortak noktaların koordinatlarıyla hesaplanması yaygın bir uygulamadır (Vaníček ve Krakiwsky, 1982; Wolf ve Ghilani, 1997; Kouba, 2002). Bununla beraber, her iki datumda ortak noktalar mevcut olmayabilir ya da fiziksel veya tarihsel nedenlerle ortak nokta sayısı yetersiz kalabilir. Özellikle, dönüşüm parametreleri, yerel datumlar arasında değil, daha çok yerel bir datumdan uzay tabanlı global bir datuma şeklinde yayınlanır. Bu nedenle, yerel bir datum ile bir uzay tabanlı bir datum arasındaki ortak nokta sayısı, iki yerel datum arasındaki ortak nokta sayısından genellikle daha fazladır. Bu anlamda, dönüşüm parametrelerinin iki ayrı dönüşüm kümesinden doğrudan elde edilmesi, dönüşüm parametrelerinin sınırlı sayıda nokta ile hesaplanmasından daha güvenilir olabilmektedir. Ayrıca, ortak noktaların geometrik dağılımı, 3B dönüşümün hesaplanmasında, öteleme ve dönüklük parametreleri arasındaki korelasyondan dolayı geometri çok önemli bir role sahiptir.

İki yerel datumdan ortak datuma olan dönüşüm parametrelerinin (2)'de verilen şekilde verildiği durum;

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{X}_i + \mathbf{T}_{i,c} + \mathbf{R}_{i,c} \mathbf{X}_i + \mathbf{D}_{i,c} \mathbf{X}_i \quad (15)$$

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{X}_j + \mathbf{T}_{j,c} + \mathbf{R}_{j,c} \mathbf{X}_j + \mathbf{D}_{j,c} \mathbf{X}_j \quad (16)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitliklerde,  $\mathbf{R}$  sıfır köşegenden oluşan üç dönüklük matrisinin birleştirilmiş hali,  $\mathbf{D}$  birden olan farklılık şeklinde tanımlanmış ölçek faktörüdür. Bu model aynı zamanda, dönüşüm parametrelerinin aynı epokta olduğunu varsaymaktadır. Farklı epokta olmaları durumunda, dönüşüm parametrelerinin hızları kullanılarak ortak bir epoka getirilmeleri gerekir. (15) ve (16) eşitlikleri birleştirilip, eşitliğin sol tarafı yeniden düzenlenirse;

$$(\mathbf{I} + \mathbf{A}) \mathbf{X}_j = \mathbf{X}_i + (\mathbf{T}_{i,c} - \mathbf{T}_{j,c}) + \mathbf{R}_{i,c} \mathbf{X}_i + \mathbf{D}_{i,c} \mathbf{X}_i \quad (17)$$

elde edilir. Burada  $\mathbf{A} = (\mathbf{R}_{j,c} + \mathbf{D}_{j,c})$ 'dir. (17) eşitliğinin sol tarafındaki terimin tersi seriye açılıp doğrusal kısmı alındığında,

$$\mathbf{X}_j = (\mathbf{I} - \mathbf{A}) \left[ \mathbf{X}_i + (\mathbf{T}_{i,c} - \mathbf{T}_{j,c}) + \mathbf{R}_{i,c} \mathbf{X}_i + \mathbf{D}_{i,c} \mathbf{X}_i \right] \quad (18)$$

elde edilir.  $\mathbf{A}$  teriminin ölçek ve dönüklük olarak ayrıştırılarak tekrar düzenlenmesiyle

$$\mathbf{X}_j = \mathbf{X}_i + \mathbf{T}_{i,j} + \mathbf{R}_{i,j} \mathbf{X}_i + \mathbf{D}_{i,j} \mathbf{X}_i \quad (19)$$

bulunur. Burada;

$$\mathbf{T}_{i,j} = (\mathbf{I} - \mathbf{R}_{j,c} - \mathbf{D}_{j,c})(\mathbf{T}_{i,c} - \mathbf{T}_{j,c}) \quad (20)$$

$$\mathbf{R}_{i,j} = \mathbf{R}_{i,c} - \mathbf{R}_{j,c} - \mathbf{R}_{j,c} \mathbf{R}_{i,c} - \mathbf{D}_{j,c} \mathbf{R}_{i,c} - \mathbf{D}_{i,c} \mathbf{R}_{j,c} \quad (21)$$

$$\mathbf{D}_{i,j} = \mathbf{D}_{i,c} - \mathbf{D}_{j,c} - \mathbf{D}_{i,c} \mathbf{D}_{j,c} \quad (22)$$

(6) eşitliğinde ikinci ve daha yüksek terimler (20-22) eşitliklerinde ihmal edilmiştir.

Hızlar için bileşik dönüşüm parametrelerinin hesaplanmasında koordinatlara da ihtiyaç duyulmaktadır.  $i$  ve  $j$  yerel datumları arasındaki hızların ortak  $c$  datumuna olan dönüşüm parametreleri aşağıdaki şekilde verilmiş olsun:

$$\dot{\mathbf{X}}_c = \dot{\mathbf{X}}_i + \dot{\mathbf{T}}_{i,c} + \dot{\mathbf{R}}_{i,c} \mathbf{X}_{i,c} + \dot{\mathbf{D}}_{i,c} \mathbf{X}_i \quad (23)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_c = \dot{\mathbf{X}}_j + \dot{\mathbf{T}}_{j,c} + \dot{\mathbf{R}}_{j,c} \mathbf{X}_{j,c} + \dot{\mathbf{D}}_{j,c} \mathbf{X}_j \quad (24)$$

(52-53) eşitlikleri aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir:

$$\dot{\mathbf{X}}_j = \dot{\mathbf{X}}_i + (\dot{\mathbf{T}}_{i,c} - \dot{\mathbf{T}}_{j,c}) + (\dot{\mathbf{R}}_{i,c} - \dot{\mathbf{R}}_{j,c}) \mathbf{X}_i + (\dot{\mathbf{D}}_{i,c} - \dot{\mathbf{D}}_{j,c}) \mathbf{X}_i - (\dot{\mathbf{R}}_{j,c} + \dot{\mathbf{D}}_{j,c} \mathbf{I}) \Delta x_{i,j} \quad (25)$$

burada  $\Delta x = \mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j$  dir. ITRS'deki konum vektörlerinin birbirlerine yakınlığı göz önüne alındığında, (25) eşitliğindeki son terim ihmal edilebilir ve bileşik dönüşüm parametreleri aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$\dot{\mathbf{T}}_{i,j} = \dot{\mathbf{T}}_{i,c} - \dot{\mathbf{T}}_{j,c} \quad (26)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_{i,j} = \dot{\mathbf{R}}_{i,c} - \dot{\mathbf{R}}_{j,c} \quad (27)$$

$$\dot{\mathbf{D}}_{i,j} = \dot{\mathbf{D}}_{i,c} - \dot{\mathbf{D}}_{j,c} \quad (28)$$

### 3. ITRF-2005 VE ÖNCEKİ REFERANS KOORDİNAT SİSTEMLERİYLE DÖNÜŞÜM İLİŞKİLERİ

ITRF-2000 ile önceki referans koordinat sistemlerinin ilişkisi (IERS, 2008a)'da verilmiştir. ITRF-2005'in ise önceki referans koordinat sistemlerinin ilişkisi mevcut olmayıp, sadece ITRF-2000'e olan dönüşüm parametreleri yayınlanmıştır (IERS, 2008b). ITRF-2005'ten önceki referans koordinat sistemlerine olan dönüşüm parametrelerinin bulunması için öncelikle ITRF-2005'ten ITRF-2000'e olan ters dönüşüm parametreleri (8-10) ve (12-14) eşitlikleri kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen dönüşüm parametreleri (ITRF-2000'den ITRF-2005'e) ve (IERS, 2008b)'de verilen dönüşüm parametreleri kullanılarak bileşik dönüşüm uygulanmıştır. Buna göre (20-22) ve (26-28) eşitlikleriyle hesaplanan, ITRF-2005 ile önceki referans koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametreleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. ITRF-2005'den, önceki referans koordinat sistemlerine olan dönüşüm parametreleri (Epok: 2008.0).

	$T_x$ cm	$T_y$ cm	$T_z$ cm	$D$ ppb	$R_x$ .001"	$R_y$ .001"	$R_z$ .001"
ITRF00	-0.15	0.00	-2.02	0.72	0.00	0.00	0.00
ITRF97*	0.52	-0.05	-5.41	2.38	0.00	0.00	-0.22
ITRF96*	0.52	-0.05	-5.41	2.38	0.00	0.00	-0.22
ITRF94*	0.52	-0.05	-5.41	2.38	0.00	0.00	-0.22
ITRF93	-4.68	0.25	-5.31	2.87	2.59	3.00	-0.26
ITRF92	1.32	0.15	-6.21	1.67	0.00	0.00	-0.22
ITRF91	2.52	1.55	-6.81	3.07	0.00	0.00	-0.22
ITRF90	2.32	1.15	-8.41	3.37	0.00	0.00	-0.22
ITRF89	2.82	3.55	-12.21	6.77	0.00	0.00	-0.22
ITRF88	2.32	-0.05	-14.61	9.87	-0.10	0.00	-0.22

\* ITRF94, ITRF96 ve ITRF97 çakışık olup, aralarındaki dönüşüm parametreleri sıfırdır.

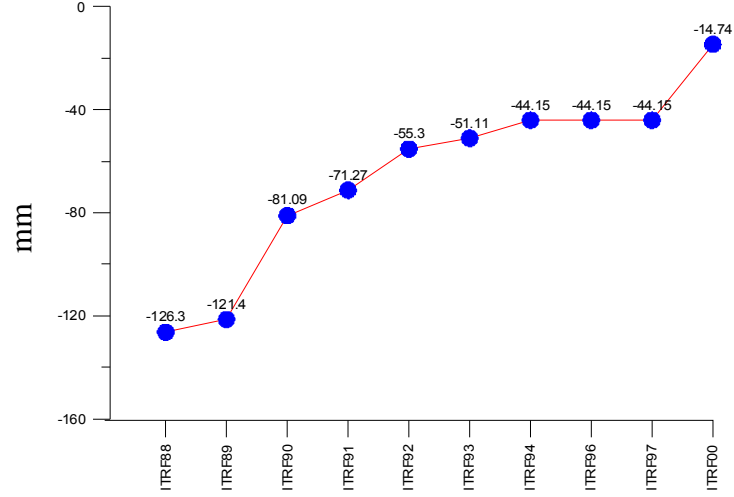
Tablo 2. ITRF-2005'den, önceki referans koordinat sistemlerine olan dönüşüm parametrelerinin değişim hızı.

	$\dot{T}_x$ cm/y	$\dot{T}_y$ cm/y	$\dot{T}_z$ cm/y	$\dot{D}$ ppb/y	$\dot{R}_x$ .001"/y	$\dot{R}_y$ .001"/y	$\dot{R}_z$ .001"/y
ITRF00	0.02	-0.01	0.18	-0.08	0.00	0.00	0.00
ITRF97*	0.02	0.05	0.32	-0.09	0.00	0.00	0.02
ITRF96*	0.02	0.05	0.32	-0.09	0.00	0.00	0.02
ITRF94*	0.02	0.05	0.32	-0.09	0.00	0.00	0.02
ITRF93	0.31	0.01	0.24	-0.09	-0.11	-0.19	0.07
ITRF92	0.02	0.05	0.32	-0.09	0.00	0.00	0.02
ITRF91	0.02	0.05	0.32	-0.09	0.00	0.00	0.02
ITRF90	0.02	0.05	0.32	-0.09	0.00	0.00	0.02
ITRF89	0.02	0.05	0.32	-0.09	0.00	0.00	0.02
ITRF88	0.02	0.05	0.32	-0.09	0.00	0.00	0.02

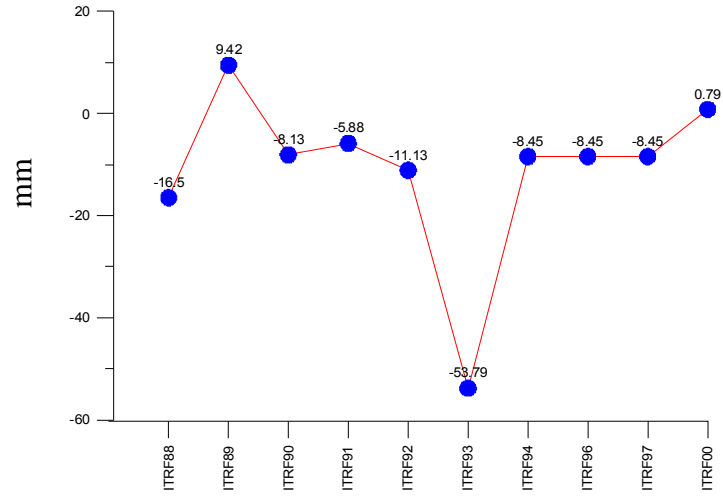
\* ITRF94, ITRF96 ve ITRF97 çakışık olup, aralarındaki dönüşüm parametreleri sıfırdır.

Referans koordinat sistemlerinin güncellenmesi ile meydana gelen koordinat farklılıklarını incelemek için Ankara (ANKR) sabit GPS istasyonu örnek olarak alınmıştır. Buna göre, ANKR istasyonunun ITRF-2005 koordinatları (EIRS 2008a, 2008b)'den temin edilerek 2008.0 epokunda tüm ITRS gerçekleştirmelerinde hesaplanmıştır. Hesaplanmalarda Tablo 1 ve 2'de verilen dönüşüm parametreleri kullanılmıştır. ANKR istasyonu için elde edilen kuzey, doğu ve yükseklik bileşenindeki farklar sırasıyla Şekil 1, 2 ve 3'de verilmektedir. ITRF-88 ile ITRF-2000'e kadar olan farkların kuzey bileşenindeki gittikçe ITRF-2005'e yaklaştığı görülmektedir. Ancak, yine en eski ITRF sürümü ITRF-88 ile ITRF-2005 arasında sadece kuzey bileşenindeki farkların 13 cm'ye yaklaştığı dikkati çekmektedir.



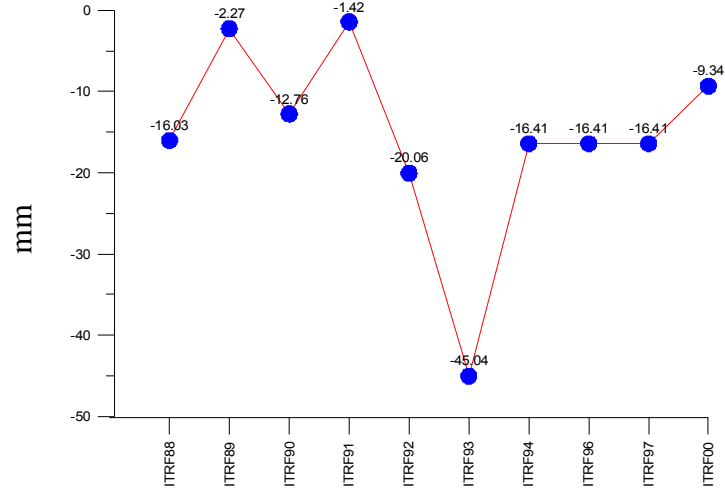


Şekil 1. ANKR istasyonunun ITRF-2005 koordinatları ile önceki ITRF koordinatları arasındaki farkların kuzey bileşeni (2008.0 epoğu).



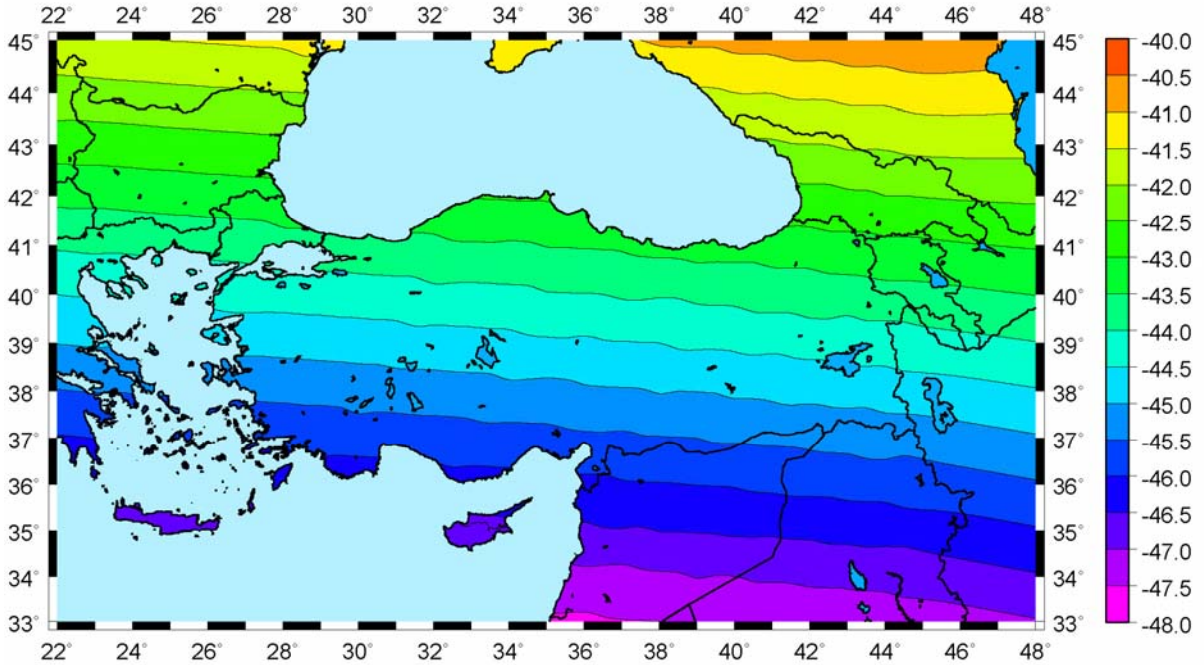
Şekil 2. ANKR istasyonunun ITRF-2005 koordinatları ile önceki ITRF koordinatları arasındaki farkların doğu bileşeni (2008.0 epoğu).

Doğu ve yükseklik bileşenindeki farklar daha küçük mertebe olmakla birlikte, sadece referans koordinat sistemi farklılığından meydana gelen farklar uydu tabanlı jeodezik ölçü duyarlılığının üstündedir. Bu durum, özellikle ulusal temel ağlarda referans koordinat sistemi dönüşümünün zorunluluğunu göstermektedir. Referans koordinat sistemi farklılığına ve epoğuna bağlı değişimlerin yarattığı koordinat farklılıkları daha önce (Aktuğ, 2005)'de incelenmiştir. Söz konusu çalışmada, ITRF-2000 ile ITRF-96 arasında meydana gelen koordinat ve hız farkları verilmektedir.

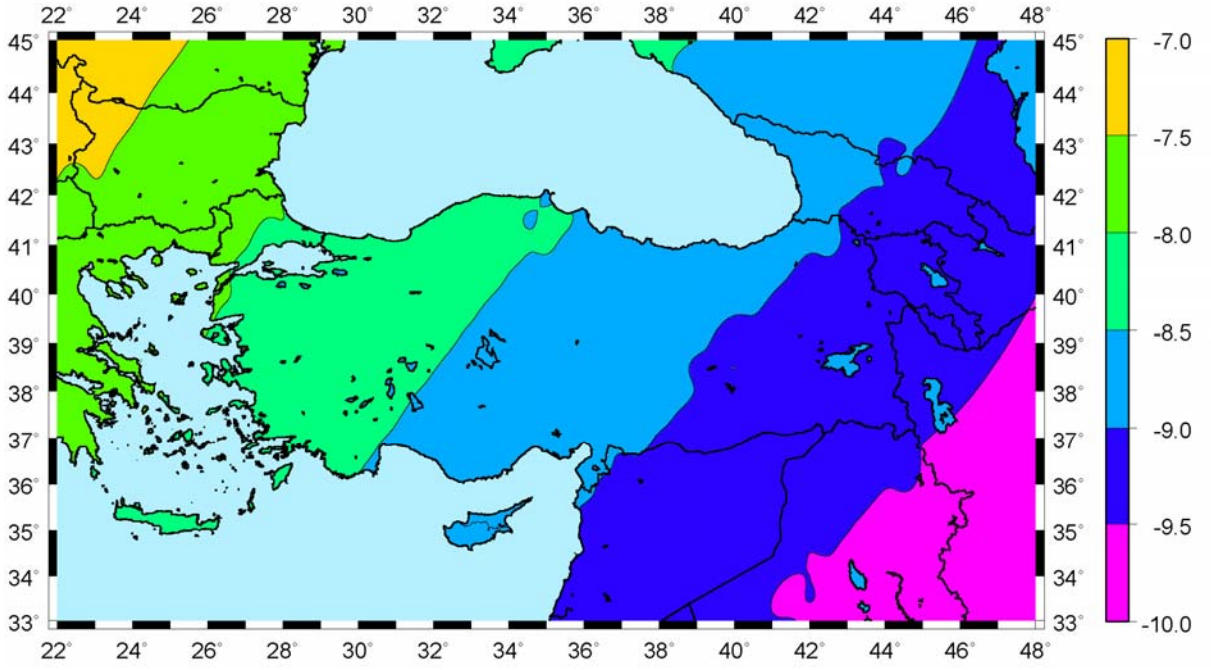


Şekil 3. ANKR istasyonunun ITRF-2005 koordinatları ile önceki ITRF koordinatları arasındaki farkların yükseklik bileşeni (2008.0 epöğü).

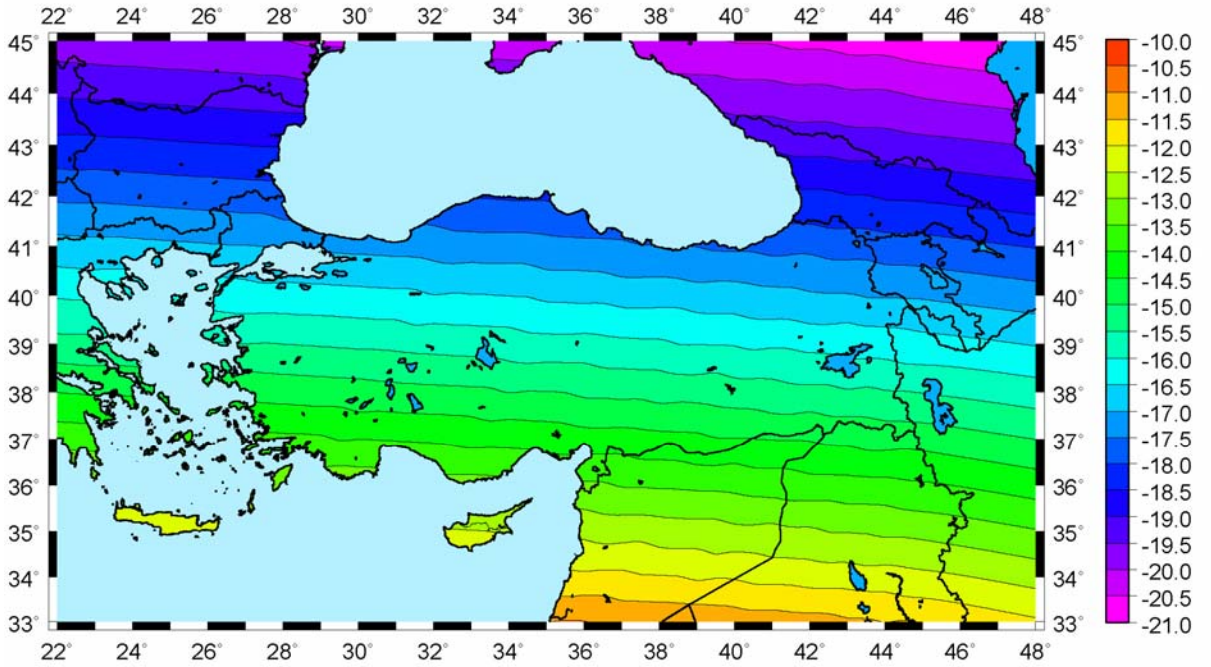
Bu çalışmada ise ITRF-2005 ve ITRF-96 arasındaki koordinat farklılıkları, yukarıda elde edilen dönüşüm parametreleriyle hesaplanmıştır. Referans koordinat sistemi farklılığına bağlı koordinat değişimlerinin mekansal dağılımını incelemek amacıyla Türkiye ve çevresi için 1' aralıklı grid oluşturulmuş ve elde edilen farklılıklar yerel jeodezik sisteme dönüştürülmüştür. Türkiye ve çevresi için elde edilen 2008.0 epöğünde ITRF-2005 ile ITRF-96 koordinat farkları yerel jeodezik sistemde kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için sırasıyla Şekil 4, 5 ve 6'da verilmiştir.



Şekil 4. ITRF-2005 ile ITRF96 arasındaki Kuzey bileşenindeki farklar (2008.0 epök). ITRF96 - ITRF-2005 farkları gösterilmekte olup birim mm'dir.



Şekil 5. ITRF-2005 ile ITRF96 arasında doğu bileşenindeki farklar (2008.0 epok).  
ITRF96 - ITRF-2005 farkları gösterilmekte olup birim mm dir.



Şekil 6. ITRF-2005 ile ITRF96 arasında yükseklik bileşenindeki farklar (2008.0 epok).  
ITRF96 - ITRF-2005 farkları gösterilmekte olup birim mm dir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Datum dönüşümü iki yönlü bir uygulama olarak düşünülebilir: (a) koordinatları başka bir datumda ifade etmek (Soler ve Marshall 2003; Soler ve Snay 2004), (b) referans koordinat sistemini başka bir datuma göre tanımlamak (Featherstone 1996; Snay 2003; Boucher ve Altamimi 2007). Ayrıca, bölgesel yer-merkezli, yer-sabit referans koordinat sistemleri dahi referans sistemlerinin zamansal evrimine bağlı olarak farklılık göstermektedirler.

Yüksek duyarlıklı ağlarda koordinat ve hızların dönüştürülmesi için karmaşık dönüşüm eşitliklerine ihtiyaç olup, çoğunlukla bilgisayar programları ile gerçekleştirilmektedirler (Snay 1999; Kouba 2002). Bu çalışmada (Aktuğ, 2008)'de verilen bileşik dönüşüm eşitlikleri yardımıyla ITRF-2005 ile önceki referans koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametreleri hesaplanmış, ITRF-2005 ile ITRF-96 arasındaki koordinat farkları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, daha önceki referans koordinat sistemlerine dayalı ağların, ITRS'in yeni sürümleriyle doğrudan ilişkilendirilemeyeceğini göstermektedir. ITRF-88 ile ITRF-2005 arasında sadece kuzey bileşeninde 15 cm'ye yaklaşan fark, müteakip ITRS sürümlerinin dönüştürülmesinin önemine işaret etmektedir.

Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) halen ITRF-96'ya çakışık şekilde tanımlanmış olup, ITRF-2000'e dayalı olarak hesaplanmış koordinatlar ITRF-96'ya dönüştürülerek kullanıcılara sunulmuştur. Diğer yandan, dönüşüm parametreleri yanında bu parametrelerinin değişim hızı da bulunmakta olup, referans koordinat sisteminin de koordinatlar gibi dört boyutlu olarak tanımlanması zorunluluğu bulunmaktadır. Bu çalışmada 2008.0 epoğundaki koordinat farkları incelenmiş olup, önümüzdeki 10-20 yılda farkların giderek artacağı açıktır.

#### KAYNAKLAR

**Aktuğ, B.** 2005, Referans Sistemlerinin Zamansal Evrimi ve Türkiye için Ulusal Bir Model: TURES-96, *Harita Dergisi*, **133**, s. 1-26.

**Aktuğ, B.** 2008, Inverse and compound datum transformations, *Journal of Surveying Engineering* (incelemede).

**Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C.,** 2002, ITRF-2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, *J. Geophys. Res.*, **107(B10)**, ETG-2, s.1-19.

**Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B. ve Boucher, C.,** 2007, ITRF-2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *J. Geophys. Res.*, **112**, B09401.

**Boucher, C. ve Altamimi, Z.,**1996, International Terrestrial Reference Frame, *GPS World*, **7(9)**, s.71–74.

**Boucher, C. ve Altamimi, Z.**, 2001, Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/memo.pdf>.

**Boucher, C. ve Altamimi, Z.**, 2007, Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/memo2007.pdf>.

**Boucher, C., Altamimi, Z. ve Sillard, P.**, 1999, The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF-97), *Int. Earth Rotation Serv. Tech. Note 27*, Observatoire de Paris, Paris.

**ESRI**, 2007, Geographic Transformations, [http://downloads.esri.com/support/whitepapers/ao\\_/Map\\_Projection\\_Tables.pdf](http://downloads.esri.com/support/whitepapers/ao_/Map_Projection_Tables.pdf) (2007.01.10); <http://support.esri.com/index.cfm?fa=knowledgebase.whitepapers.viewPaper&PID=19&MetalD=758>.

**IERS**, 2008a, Transformation Parameters And Their Rates From ITRF0 to Previous Frames, <http://itrf.ensg.ign.fr/pub/itrf/ITRF.TP>.

**IERS**, 2008b, Transformation Parameters between ITRF-2005 and ITRF-2000, [http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2005/tp\\_05-00.php](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/tp_05-00.php).

**Featherstone, W.E.**, 1996, An updated explanation of the Geocentric Datum of Australia (GDA) and its effects upon future mapping, *The Australian Surveyor*, **41(2)**, s.121-130.

**Kaula, W.M.**, 1966, Theory of satellite geodesy, Blaisdell Publishing Co., Waltham, MA.

**Kouba, J.**, 2002, The GPS Toolbox ITRF Transformations, *GPS Solutions*, **5**, s.88-90.

**Leick, A.**, 1990, GPS Satellite Surveying, Wiley ve Sons Publication, New York, 1990.

**Mueller, I.I.**, 1969, Spherical and practical astronomy as applied to geodesy, Ungar, New York.

**Seeber, G.**, 1993, Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications, Walter De Gruyter, New York.

**Sillard, P. ve Boucher, C.**, 2001, Review of Algebraic Constraints in Terrestrial Reference Frame Datum Definition, *J. Geod.*, **75(2-3)**, s.63-73.

**Snay R.A.**, 2003, Introducing two spatial reference frames for regions of the pacific ocean, *Surveying and Land Information Science*, **63(1)**, s.5-12.

**Snay R.A.**, 1999, Using the HTDP software to transform spatial coordinates across time and between reference frames, *Surveying and Land Information Systems*, **59(1)**, s.15-25.

**Snay, R.A. ve Soler, T.**, 2000, Modern terrestrial reference systems, Part 2: The evolution of NAD 83, *The Professional Surveyor Magazine*, **20(2)**, s.16-18.

**Soler, T.**, 1976, On differential transformations between Cartesian and curvilinear (geodetic) coordinates, Report Nu. 236, Dept. of Geodetic Science, Ohio State Univ., Columbus, Ohio.

**Soler, T.**, 1998, A compendium of transformation formulas useful in GPS work, *J. Geod.*, **72(7-8)**, s.482-490.

**Soler, T.**, 2001, Densifying 3D GPS networks by accurate transformation of vector components, *GPS Solutions*, **4(3)**, s.27-33.

**Soler, T.**, 1976, On differential transformations between cartesian and curvilinear geodetic coordinates, Report Nu. 236, Dept. of Geodetic Science, Ohio State Univ., Columbus, Ohio.

**Soler, T. ve Hothem, L.D.**, 1988, Coordinate systems used in geodesy: Basic definitions and concepts, *J. Surv.Eng.*, ASCE, **114(2)**, s.84-97.

**Soler, T. ve Marshall, J.**, 2003, A note on frame transformations with applications to geodetic datums, *GPS Solutions*, **7(1)**, s.23-32.

**Soler, T. ve Hothem, L. D.**, 1988, Coordinate systems used in geodesy: Basic definitions and concepts, *J. Surv. Eng.*, **114(2)**, s.84-97.

**Soler, T. ve Snay, R.A.**, 2004, Transforming positions and velocities between ITRF00 and NAD83, *J.Surv. Eng.*, **130 (2)**, s.49-55.

**Soler, T., van Gelder, B. H. W.**, 1987, On differential scale changes and the satellite Doppler system z-shift, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **91(3)**, s.639-656.

**Soler, T., Doyle, N.S. ve Hall, L.W.**, 1999, Rigorous transformation of GPS-determined vector components, *Proc. ION GPS-99*, Nashville, TN, September 14-17, s.27-32.

**Soler, T. ve Marshall, J.**, 2002, Rigorous transformation of variance-covariance matrices of GPS-derived coordinates and velocities, *GPS Solutions*, **6(1-2)**, s.76-90.

**Vaniček, P. ve Krakiwsky, E.J.**, 1982, *Geodesy: The Concepts*, North Holland Publishing Company, Amsterdam.

**Wolf, P.R. ve Ghilani, C.D.**, 1997, *Adjustment Computations: Statistics And Least Squares in surveying and GIS*, John Wiley & Sons, Inc., New York.