

# **TÜRKİYE ULUSAL TEMEL GPS AĞI NOKTALARINDAKİ UZUN PERİYOTLU KOORDİNAT DEĞİŞİMLERİNİN (SEKÜLER HIZLARIN) KESTİRİLMESİ**

**Coşkun DEMİR  
Mehmet AÇIKGÖZ**

## **ÖZET**

Türkiye Ulusal Temel GPS Ağrı (TUTGA)'nın oluşturulması amacıyla çalışmalar, 1997 yılında başlatılmış ve 2000 yılı içinde tamamlanması planlanmıştır. Türkiye'de aktif tektonik plaka hareketleri nedeniyle oluşan deformasyonlar gözönüne alındığında, TUTGA noktalarında zamana bağlı koordinat değişimlerinin belirlenmesi ağın yaşatılması ve iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Nokta koordinatlarındaki zamana bağlı değişimler, genel olarak tektonik plaka hareketlerinden kaynaklanan deprem öncesi (inter-sismik), deprem anı (ko-sismik) ve deprem sonrası (post-sismik) etkiler nedeniyle oluşur. Bu çalışmada TUTGA noktalarındaki inter-sismik (seküler) hızların kestirilmesi amacıyla ağırlıklı ortalama, yüzey polinomu ve en küçük karelerle kolokasyon yöntemleri uygulanmış ve bu yöntemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ağırlıklı ortalama ve en küçük karelerle kolokasyon yöntemleri birbirleriyle uyumlu sonuçlar vermesine karşılık, bu iki yöntemden farklı sonuçlar veren yüzey polinomu yönteminin hız kestirimi amacıyla uygun olmadığı belirlenmiştir. En küçük karelerle kolokasyon yöntemi ile tahmin edilen hızların standart sapmalarının daha büyük olması nedeniyle, ağırlıklı ortalama yöntemiyle elde edilen sonuçların uygulamada kullanılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

## **ABSTRACT**

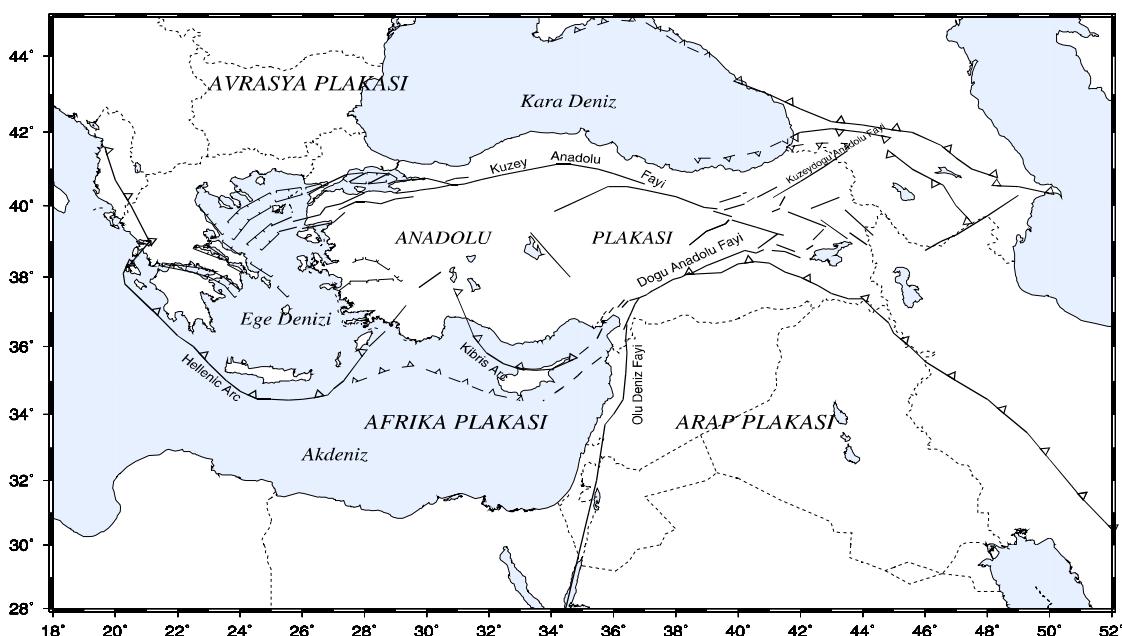
Establishment of Turkish National Fundamental GPS Network (TNFGN) was initiated in 1997 and planned to be completed by the end of 2000. Taking into account the deformation caused by tectonic plate movements in Turkey, it is of great importance to determine coordinate changes for the maintenance and improvement of the network. Coordinate changes are due to inter-seismic, co-seismic and post-seismic activities arised from tectonic plate movements. In this study, weighted average, surface polynomial and least squares collocation methods are applied to calculate inter-seismic velocities at TNFGN points and results obtained from those are compared. Although, weighted average and least squares collocation yield similar results, it is determined that surface polynomial model which differs fairly from the others is not suitable for velocity prediction. It is considered appropriate to use the results of weighted average for practical purposes, since least squares collocation resulted in larger standart deviations for the predicted values.

## 1. GİRİŞ

Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA), ülke yüzeyini 25-70 km sıklıkta kaplayan Uluslararası Yerel Jeodezik Referans Sisteminde (ITRFyy) 3 boyutlu koordinatları birkaç cm doğrulukta belirlenen yaklaşık 700 noktadan oluşan ve nokta sayısı önumüzdeki yıllarda ihtiyaca göre arttırılabilen bir ağdır. Bu ağın noktalarında 3 boyutlu kordinatların yanı sıra, koordinatların zamana bağlı değişimi, diğer bir deyişle koordinatların seküler hızları, ortometrik yükseklik ve jeoid yüksekliği olmak üzere toplam 8 elemanın ( $X, Y, Z, V_x, V_y, V_z, H^*, N$ ) belirlenmesi amaçlanmıştır. TUTGA'nın oluşturulması amacıyla gerçekleştirilen planlama, ölçme ve değerlendirme çalışmaları ile ilgili ayrıntılı bilgiler HGK (1996) ve HGK (1997)'de verilmektedir.

TUTGA'nın oluşturulması amacıyla; 1997, 1998 ve 1999 yıllarında ölçü çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 1997 ve 1998 yılı GPS ölçüleri BERNSE V4.0 yazılımı (Rothacher ve Mervart, 1996) ile EUREF teknik çalışma grubunca belirlenen stratejilere uygun olarak değerlendirilmiştir (Kahveci, 1999). 1999 yılı ölçüleri ile birlikte ağın toptan değerlendirilmesinin 2000 yılı içinde tamamlanması planlanmıştır.

Türkiye Alp-Himalaya deprem kuşağının içinde Afrika, Arap ve Avrasya gibi büyük tektonik plakaların birbirleriyle çarpıştığı ve bu plakaların sınırlarını da içeren bir bölgede yer almaktadır. Türkiye ve çevresinin basitleştirilmiş tektonik haritası Şekil-1'de verilmektedir (McClusky vd, 2000). Bu haritada bölgedeki tektonik plaka sınırları ile plaka içinde ve sınırlarında oluşan yanal atılımlı ve normal faylar ile bindirme bölgeleri genel hatlarıyla gösterilmiştir. Türkiye ve çevresinin tektonik oluşumunda en önemli etken Afrika ve Arap plakalarının Avrasya plakası ile çarşımı olarak ifade edilebilir. (McKenzie, 1972; Jackson ve McKenzie, 1988).



Şekil-1 : Türkiye ve çevresinin basitleştirilmiş tektonik haritası. Düz çizgi - yanal atılımlı fay, taraklı çizgi- normal fay, üçgenli çizgi – bindirme bölgesi (üçgeni içermeyen alta dalan plaka), KTJ- Karlova üçlü kesişimi (McClusky vd., 2000).

Bölgelerdeki tektonik aktivite genel hatlarıyla, Arap plakasının Avrasya plakasına göre kuzey-kuzeybatı doğrultusunda 20mm/yıl hızla hareketi sonucu Bitlis-Zağros bindirme kuşağının boyunca oluşan çarpışma nedeniyle, Doğu Anadolu bölgesinde bir sıkışmanın meydana gelmesi ve bunun sonucunda da Anadolu plakasının 20-25 mm/yıl hızla batıya hareketi ve saat yelkovanı tersinde dönmesi, Afrika plakasının 5-10 mm/yıl hızla kuzey doğrultusunda hareketi ve Avrasya plakasının altına dalması sonucunda da Ege bloğunda güneybatı yönünde 30-35 mm/yıl hızla bir açılmanın ve normal faylanmanın meydana gelmesi şeklinde özetlenebilir (Ayhan vd., 1999a; McClusky vd., 2000).

Türkiye'nin sözü edilen karmaşık tektonik yapısı ve deformasyonların büyüklüğü gözönüne alındığında TUTGA noktalarında hızların yüksek doğrulukla belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Noktalardaki hızların uygun şekilde belirlenmemesi durumunda ağır başlangıçtaki doğruluğunu çok kısa sürede kaybetmesi kaçınılmazdır. TUTGA noktalarının yalnızca yaklaşık % 10'unda tekrarlı GPS ölçüsü mevcut olduğundan bu noktalardaki seküler hızlar bilinmektektir. Diğer noktaların tamamında hızların doğrudan belirlenmesi, ancak bu noktalarda iki veya en uygunu ikiden fazla periyot GPS ölçüsünün yapılması ile mümkündür. Türkiye'deki nokta sayısı dikkate alındığında kısa sürede bunu gerçekleştirmek pratik olarak mümkün gözükmemektedir. Bu nedenle Türkiye'de 1992 yılından itibaren çeşitli yurtiçi ve yurtdışı kuruluşlarla ortaklaşa veya Harita Genel Komutanlığı (HGK)'nın sağladığı olanaklarla değişik zamanlarda gerçekleştirilen GPS kampanya ölçülerinin birleştirilmesiyle elde edilen Türkiye'nin hız alanından (Demir ve Kılıçoğlu, 1999; Ayhan v.d., 1999b) yararla TUTGA noktalarındaki seküler hızların kestirilmesinin uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Kestirim, yüzey değeri (jeoid yüksekliği, gravite anomalisi, topografik yükseklik, hız, strain (gerinim) vb.) bilinen rastgele dağılmış ölçü noktalarından yararla ölçü olmayan noktalardaki yüzey değerinin hesaplanması olarak tanımlanır. Kestirim amacıyla jeodezide deterministik ve stokastik yaklaşımı dayanan çok sayıda yöntem uygulanmaktadır. Kullanılacak kestirim yönteminin belirlenmesinde; yüzey değerlerinin karakteri, dağılımı ve yoğunluğu ile kestirimden beklenen doğruluk önemli rol oynar. Hangi kestirim yönteminin kullanılacağına doğrudan karar vermek hemen pek mümkün değildir. Bunun yerine farklı yöntemler uygulanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp, en uygun yöntemin belirlenmesi daha çok tercih edilmektedir.

Bu çalışmada; TUTGA noktalarındaki hızların kestirilmesinde ağırlıklı ortalaması, yüzey polinomu ve en küçük karelerle kolokasyon yöntemleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gauss-Markoff (Dolaylı) dengeleme modeli ikinci bölümde, sözü edilen üç yöntem üçüncü bölümde açıklanmış olup, bu yöntemler ile yapılan uygulamalar ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması dördüncü bölümde verilmiştir.

## 2. DENGELİME MODELİ

Jeodezide, ölçülen büyüklükler ile bilinmeyen parametreler arasındaki geometrik ve fiziksel ilişkilerin tanımlandığı dolaylı fonksiyonel model;

$$\mathbf{I}_{\mu} = \mathbf{I} + \mathbf{r} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$$

(2.1)

şeklindedir. Burada  $u$  bilinmeyen sayısı,  $n$  ölçü sayısı olmak üzere;  $\mathbf{x}$ ,  $ux1$  boyutlu bilinmeyenler vektörünü,  $\mathbf{r}$   $nx1$  boyutlu düzeltmelerin gerçek değer vektörünü,  $\mathbf{I}$  ve  $\mathbf{I}_{\mu}$  ise  $nx1$  boyutlu gözlemler ve gözlemlerin beklenen değerler vektörünü göstermektedir. Genellikle, doğrusal olmayan fonksiyonel modeller bilinmeyenler için seçilecek yaklaşık değerler ( $\mathbf{x}^0$ ) ve ölçü değerleri ile Taylor dizisine açılarak doğrusallaştırılır. Buna göre doğrusal gözlem denklemleri;

$$\mathbf{r}_{n,1} = \mathbf{A}_{n,u} \boldsymbol{\delta}_{u,1} + \mathbf{w}_{n,1}$$

(2.2)

olur. Bu eşitlikte geçen  $\mathbf{A}$  katsayılar matrisi ve  $\mathbf{w}=\mathbf{f}(\mathbf{x}^0)-\mathbf{I}$  kapanma vektörü bilinen büyülükler olup bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri ve ölçüler yardımıyla hesaplanır. Ayrıca  $\boldsymbol{\delta}$  ise küçütlümüş bilinmeyen vektördür. Öte yandan normal dağılımlı olduğu kabul edilen  $\mathbf{l} \sim N(\mathbf{I}_{\mu}, \mathbf{C}_l)$  ölçülerinin doğrulukları ve aralarındaki korelasyonları yansitan  $\mathbf{C}_l$ , ölçülerin kovaryans matrisi, stokastik modeli oluşturur:

$$\mathbf{C}_l = E\{ [\mathbf{I} - E(\mathbf{l})] [\mathbf{I} - E(\mathbf{l})]^T \} \quad (2.3)$$

Burada  $E(\cdot)$  beklenen değer anlamındadır.  $\mathbf{C}_l$   $n \times n$  boyutlu artı (pozitif) tanımlı bir matristir; köşegen elemanları ölçülerin varyansları ve köşegen dışındaki kovaryanslarıdır. Ayrıca  $\sigma_o^2$  önsel (apriori) varyans olmak üzere ölçülerin kovaryans matrisi ile ölçülerin ağırlık matrisi ( $\mathbf{P}$ ) arasında;

$$\mathbf{C}_l = \sigma_o^2 \mathbf{P}^{-1} \quad (2.4)$$

ilişkisi vardır.  $\mathbf{r} = \mathbf{I}_{\mu} - \mathbf{I}$  bağıntısından kovaryans yayılma kuralı ile  $\mathbf{C}_r = \mathbf{C}_l$  olduğu kolayca anlaşılır ve ölçülerin gerçek hataları da normal dağılımda olduğundan  $E(\mathbf{r}) = \mathbf{0}$  eşitliği geçerlidir. (2.2) ve (2.4) eşitlikleriyle verilen fonksiyonel ve stokastik modeller yardımıyla bilinmeyen büyülüklerin ( $\boldsymbol{\delta}, \mathbf{r}$ ) en küçük kareler yöntemiyle kestirimini;

$$F = \mathbf{r}^T \mathbf{C}_r^{-1} \mathbf{r} \Rightarrow \text{minimum} \quad (2.5)$$

karesel formunun minimum olması öngörülerek gerçekleştirilir. (2.4) eşitliğinde geçen  $\sigma_o^2$  önsel varyansın bilindiği kabul edilmektedir. (2.5) eşitliği ile verilen fonksiyonun değişkenlere ( $\mathbf{r}, \boldsymbol{\delta}$ ) göre kısmi türevleri sıfıra eşitlenip elde edilen denklemlerinin yerine koyma yöntemiyle çözülmesiyle normal denklemler,

$$\mathbf{A}^T \mathbf{C}_r^{-1} \mathbf{A} \boldsymbol{\delta} + \mathbf{A}^T \mathbf{C}_r^{-1} \mathbf{w} = \mathbf{0}$$

(2.6)

şeklinde elde edilir. Eğer  $\text{rg}(\mathbf{A})=u$  ise  $\mathbf{A}^T \mathbf{C}_r^{-1} \mathbf{A}$ 'nın Cayley inversi alınabilir ve çözüm eşitlikleri;

$$\hat{\boldsymbol{\delta}} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{C}_r^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{C}_r^{-1} \mathbf{w} \quad , \quad \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^0 + \hat{\boldsymbol{\delta}}$$

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{A}\hat{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{w} \quad , \quad \hat{\mathbf{I}} = \mathbf{I} + \hat{\mathbf{r}} \quad (2.7)$$

olur. Burada (^) değişkenlerin en küçük kareler yöntemi ile tahmin edildiğini işaret eder. Ayrıca hesaplanan büyüklüklerle ilişkin kovaryans matrisleri;

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\hat{x}} &= \mathbf{C}_{\hat{\delta}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{C}_r^{-1} \mathbf{A})^{-1} \\ \mathbf{C}_{\hat{r}} &= \mathbf{C}_r - \mathbf{A} \mathbf{C}_{\hat{x}} \mathbf{A}^T \\ \mathbf{C}_{\hat{I}} &= \mathbf{C}_r - \mathbf{C}_{\hat{r}} \end{aligned} \quad (2.8)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. (2.7) eşitlikleri ile hesaplanan  $\hat{\boldsymbol{\delta}}$  ve  $\hat{\mathbf{r}}$  büyüklükleri önsel varyans ( $\sigma_o^2$ )' den bağımsız ancak (2.8) eşitliklerinde verilen  $\mathbf{C}_{\hat{x}}$ ,  $\mathbf{C}_{\hat{r}}$  ve  $\mathbf{C}_{\hat{I}}$  kovaryans matrisleri önsel varyansa bağlıdır.  $\sigma_o^2$  önsel varyansı bilinmiyor ise başka bir deyişle, ölçülerin kovaryans matrisindeki elemanların yalnızca birbirlerine göre bağlı büyüklükleri biliniyor ise (2.4) eşitliğinde  $\sigma_o^2$  için seçilecek istege bağlı bir değer ile ölçülerin ağırlık matrisi  $\mathbf{P} = \sigma_o^2 \mathbf{C}_I^{-1}$  hesaplanır. Bu durumda, bilinmeyenler için (2.7) çözüm eşitliği,

$$\hat{\boldsymbol{\delta}} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{w} \quad (2.9)$$

olur. Ayrıca  $\sigma_o^2$  için dengeleme sonunda, n-u dengelemenin serbestlik derecesi olmak üzere

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{\hat{\mathbf{r}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{r}}}{n - u} \quad (2.10)$$

kestirim değeri sonsal (aposteriori) varyans elde edilir. Bu durumda (2.8) ile verilen kovaryans matrisler yerine bunların kestirim değerleri;

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{C}}_{\hat{x}} &= \hat{\mathbf{C}}_{\hat{\delta}} = \hat{\sigma}_o^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \\ \hat{\mathbf{C}}_{\hat{r}} &= \hat{\sigma}_o^2 (\mathbf{P}^{-1} - \mathbf{A} \hat{\mathbf{C}}_{\hat{x}} \mathbf{A}^T) \\ \hat{\mathbf{C}}_{\hat{I}} &= \hat{\sigma}_o^2 \mathbf{P}^{-1} - \hat{\mathbf{C}}_{\hat{r}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

eşitlikleriyle hesaplanır (Krakiwsky,1980; Vanicek ve Krakiwsky,1986; Nakiboğlu,1996). İstatistiksel açıdan önemli bir büyüklük olan  $\hat{\mathbf{r}}^T \mathbf{C}_r^{-1} \hat{\mathbf{r}}$  karesel formu, ölçülerin normal dağılımlı ve (2.1) modelinin geçerli olması durumunda n-u serbeslik dereceli Ki-kare ( $\chi^2$ ) dağılımlıdır (Koch, 1980; Aksøy,1987).

$$\Omega = \hat{\mathbf{r}}^T \mathbf{C}_r^{-1} \hat{\mathbf{r}} = \frac{\hat{\mathbf{r}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{r}}}{\sigma_o^2} = \frac{\hat{\sigma}_o^2 (n - u)}{\sigma_o^2} \sim \chi^2_{n-u} \quad (2.12)$$

Dengelemeden sonra sonsal varyans ile önsel varyansın istatistiksel olarak eşit olup olmadığını tespit etmek için sıfır ve seçenek hipotezleri,

$$H_0 : E(\hat{\sigma}^2) = \sigma_o^2 \quad , \quad H_1 : E(\hat{\sigma}^2) \neq \sigma_o^2 \quad (2.13)$$

biçiminde kurulur. Bu hipotezlerin hangisinin geçerli olduğu,

$$\frac{\sigma_0^2}{n-u} \chi^2_{n-u,\alpha/2} \leq \hat{\sigma}_o^2 \leq \frac{\sigma_0^2}{n-u} \chi^2_{n-u,1-\alpha/2} \quad (2.14)$$

eşitsizliği yardımıyla belirlenir. Eğer  $\hat{\sigma}_o^2$  bu eşitsizliği sağlarsa,  $(1-\alpha)$  ihtimalle  $\hat{\sigma}_o^2 = \sigma_0^2 = 1$  olduğuna karar verilir. Eşitsizliği sağlanmaması diğer bir deyişle, (2.12) karesel formunun Ki-kare dağılımından sapması; ölçülerin normal dağılımdan sapması ya da matematik veya stokastik modelin eksik ya da hatalı olmasından kaynaklanabileceği düşünülen model hatası olarak algılanır.  $\hat{\sigma}_o^2$ 'nin aralığın solunda ( $\hat{\sigma}_o^2 < \sigma_0^2$ ) olması,  $C_r$  matrisinin kötümser, diğer bir ifadeyle çok büyük kurulduğu, aralığın sağında ( $\hat{\sigma}_o^2 > \sigma_0^2$ ) olması ise  $C_r$  matrisinin iyimser olduğu ve/veya ölçü kümesinde kaba hatalı (uyuşumsuz) ölçü bulunduğu şeklinde yorumlanır. (Vanicek ve Krakiwsky, 1982; Aksoy, 1987; Nakiboglu, 1996).

Dengeleme sonrasında ölçü kümesinde uyuşumsuz ölçü olup olmadığı; ayrıntıları Kavouras (1982) ve Aksoy (1987)'de verilen uyuşumsuz ölçü test yöntemleriyle araştırılır ve varsa uyuşumsuz ölçüler ölçü kümesinden ayıklanır. Ayrıca parametrelerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadıklarını belirlemek için,

$$H_0 : E\{d\} = 0 \quad , \quad H_a : E\{d\} \neq 0 \quad (2.15)$$

şeklindeki sıfır ve alternatif hipotezler kurularak,

$$T = \frac{\hat{d}^2}{\hat{\sigma}_d^2} \approx F_{1,n-u,1-\alpha} \quad (2.16)$$

ile tanımlanan T test büyülüğünün F dağılımında olup olmadığı irdelenir. Burada  $F_{1-\alpha,1,n-u}$ , 1 ve n-u serbeslik dereceli ve  $1-\alpha$  istatistik güvenle F dağılımı tablo değeridir. Eğer  $T < F_{1-\alpha,1,n-u}$  ise sıfır hipotezi kabul edilir. Diğer bir deyişle d bilinmeyeni istatistiksel olarak anlamsızdır sonucuna varılır (Koch, 1980; Aksoy, 1987).

### 3. KESTİRİM YÖNTEMLERİ

#### a. Ağırlıklı ortalama yöntemi

Ağırlıklı ortalama yöntemi, çok basit bir algoritmaya sahip olmakla birlikte birçok uygulamada etkin sonuç vermektedir. Bu yöntem uygulanarak Gravite anomalisi, jeoid yüksekliği vb. büyüklüklerin kestirilmesi ile ilgili birçok jeodezik uygulamada etkin sonuçlar elde edilmiştir (Kassim, 1980; Ayhan ve Alp, 1988; Alp, 1998). Bu yöntemde, p kestirim noktasındaki  $\hat{h}_p$  yüzey değeri, dayanak noktalarındaki  $h_i$  yüzey değerlerinden yararla,

$$\hat{h}_p = \sum_{i=1}^n w_i h_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (3.1)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada  $w_i$  ağırlık fonksiyonu olup, kestirim noktası ile dayanak noktası arasındaki uzaklığa bağlı bir fonksiyonla tanımlanır. Bu çalışmada;

$$w_i = 1/d_i^k \quad (3.2)$$

ağırlık fonksiyonu kullanılmış olup burada  $d_i$ , kestirim noktası ile dayanak noktası arasındaki uzaklıktır. Kestirimde genel prensip, yakın olan dayanak noktalarının etkisinin, uzak olanlara nazaran fazla olmasıdır. Değişik ağırlık fonksiyon tanımlamaları Echstein (1989)'da verilmektedir. En uygun ağırlık fonksiyonu, yüzey değeri bilinen noktalarda kestirim yapılarak, kestirim değerleri ile yüzey değerlerinin karşılaştırılması ile belirlenir. Dayanak noktalarının bilinen ( $h_i$ ) ve kestirilen ( $\hat{h}_i$ ) değerleri yardımıyla hesaplanan,

$$rms = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - \hat{h}_i)^2} \quad (3.3)$$

değerini minimum yapan ağırlık fonksiyonu en uygun fonksiyon olarak seçilir. Bu yöntemle kestirimde, tüm dayanak noktalarının kullanılmasına gerek olmadan, (3.3) ifadesini minimum yapacak şekilde kestirim noktasının etrafında seçilen daha az sayıda nokta kestirimde kullanılır. (3.1) eşitliğinde orijinal ölçüler yerine trend ayıklandıktan sonra kalan artık ölçüler de alınarak kestirim yapılabilir.

### b. Yüzey polinomu yöntemi

Yüzey polinomu yönteminde, n sayıdaki noktada belirli olan  $h_i$  yüzey değerlerine, polinom ile temsil edilen bir yüzey uydurulur (Petrie ve Kennie, 1972).

$$h_i = c_{00} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=0}^k c_{kl} x_i^{k-l} y_i^l \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte N polinomun derecesidir.  $h_i$ 'ler ölçü,  $c$ 'ler bilinmeyen alınarak 2 nci bölümde açıklanan modelle deneleme yapılır ve bilinmeyen katsayılar hesaplanır. Seçilen yüzeyin uygunluğu 2 nci bölümde açıklanan varyans faktörü testi ve bilinmeyenlerin anlamlılık testi ile irdelenerek, en uygun dereceden yüzey belirlenir. Yüzey parametreleri belirlendikten sonra, kestirim yapılacak p sayıdaki noktaya ilişkin katsayılar matrisi  $A_p$  olmak üzere;

$$\hat{I}_p = A_p \hat{x} \quad , \quad C_{\hat{I}_p} = A_p C_{\hat{x}} A_p^T \quad (3.5)$$

eşitlikleri ile kestirim noktalarında yüzey değerleri ve ilgili kovaryans matrisi elde edilir. Bu yöntemle kestirimde yüzeyin derecesinin uygun seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Yüzey derecesinin artması ile osülasyon (iniş-çıkış) oluştugundan bu bölgelerde yapılan kestirimler olumsuz yönde etkilenecektir. Bu nedenle mühendislik uygulamalarında genellikle 3 üncü dereceye kadar olan yüzeyler kullanılmaktadır. Bu yöntemin olumsuz yanı, yüzey modellendirmede oluşan düzgünleştirme nedeniyle yüzeydeki lokal davranışların elemine edilmesi olarak ifade edilebilir (Demir, 1999).

### c. En küçük karelerle kolokasyon (EKKK) yöntemi

#### (1) Matematik model

En küçük karelerle kolokasyon (EKKK) yönteminde; (2.1)'de verilen dengeleme modelinde gözlem hatalarına ek olarak bir sinyalin varlığı söz konusudur. Genel olarak sinyal, çok sayıda sinyal değişkeninin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmekle birlikte, çoğunlukla kullanılan ve tek bir sinyal değişkeninin mevcut olduğu basit kolokasyonda matematik model;

$$\mathbf{I} + \mathbf{n} + \mathbf{s} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (3.6)$$

şeklindedir (Moritz, 1972). Burada  $\mathbf{n}$  rastgele ölçü hataları (noise) olup  $E\{\mathbf{n}\}=\mathbf{0}$  dir.  $\mathbf{s}$  ise sinyal olarak adlandırılmasında ve fonksiyonel modele getirilen bir model düzeltmesi olarak tanımlanmaktadır. Sinyalin deterministik yapısı bilinmemekte, rastgele karakterli bir değişken olduğu ve  $E\{\mathbf{s}\}=\mathbf{0}$  özelliğini taşıdığı kabul edilmektedir. EKKK yöntemi üç farklı işlemi içermekte olup bunlar; ölçü hataları ile sinyallerin birbirinden ayrılması (filtreleme), fonksiyon bilinmeyenlerinin hesaplanması (dengeleme) ve ölçü olmayan noktalarda sinyal ve yüzey değerleri ile bunların hatalarının hesaplanması (kestirim) olarak ifade edilebilir. Çözüm eşitlikleri;

$$F = \mathbf{n}^T \mathbf{C}_n^{-1} \mathbf{n} + \mathbf{s}^T \mathbf{C}_s^{-1} \mathbf{s} \Rightarrow \text{minimum} \quad (3.7)$$

fonksiyonunun değişkenlere  $(\mathbf{n}, \mathbf{s}, \mathbf{x})$  göre kısmi türevleri sıfıra eşitlenip, gerekli matris işlemleri yapıldıktan sonra,

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= (\mathbf{C}_s + \mathbf{C}_v)^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}} &= \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{M} \mathbf{I} \quad , \quad \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}^{-1} = (\mathbf{A}^T \mathbf{M} \mathbf{A})^{-1} \\ \mathbf{L} &= \mathbf{M} - \mathbf{M} \mathbf{A} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{M} \\ \hat{\mathbf{s}} &= \mathbf{C}_s \mathbf{L} \mathbf{I} \quad , \quad \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{s}}} = \mathbf{C}_s \mathbf{L} \mathbf{C}_s \\ \hat{\mathbf{n}} &= \mathbf{C}_n \mathbf{L} \mathbf{I} \quad , \quad \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{n}}} = \mathbf{C}_n \mathbf{L} \mathbf{C}_n \\ \hat{\sigma}_o^2 &= \frac{\hat{\mathbf{n}}^T \mathbf{C}_n^{-1} \hat{\mathbf{n}} + \hat{\mathbf{s}}^T \mathbf{C}_s^{-1} \hat{\mathbf{s}}}{n - u} \end{aligned} \quad (3.8)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $\mathbf{C}_n$  ölçülerin kovaryans matrisi,  $\mathbf{C}_s$  sinyal kovaryans matrisi olup bunlarla ilgili ayrıntılı bilgiler aşağıda verilmektedir. Ayrıca (3.7) fonksiyonel modeli doğrusal olduğundan, bilinmeyenler için yaklaşık değerler sıfır alınmış ve dolayısıyla kapanma vektörü  $\mathbf{w} = -\mathbf{I}$  olarak tanımlanmıştır. Prediksiyon için ölçü bulunmayan noktalardaki  $\hat{\mathbf{s}}_p$  sinyal değerleri ve ilgili kovaryans matrisi  $\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{s}}_p}$ 'nin hesabı için,

$$\hat{\mathbf{s}}_p = \mathbf{C}_{sps} \mathbf{L} \mathbf{I} \quad , \quad \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{s}}_p} = \mathbf{C}_{sps} \mathbf{L} \mathbf{C}_{sps}^T \quad (3.9)$$

eşitlikleri kullanılır. Burada  $\mathbf{C}_{\text{sps}}$ , prediksiyon yapılacak noktalar ile ölçü noktaları arasındaki kovaryans matrisidir. Kestirim yapılacak p sayıdaki noktaya ilişkin dizayn matrisi  $\mathbf{A}_p$  olmak üzere, bu noktalardaki  $\hat{\mathbf{l}}_p$  yüzey değerleri vektörü ve  $\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{l}}_p}$  kovaryans matrisi ise;

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{l}}_p &= \mathbf{A}_p \hat{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{s}}_p \\ \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{l}}_p} &= (\mathbf{C}_{\mathbf{s}_p} - \mathbf{C}_{\text{sps}} \mathbf{M} \mathbf{C}_{\text{sps}}^T) + (\mathbf{A}_p - \mathbf{C}_{\text{sps}} \mathbf{M} \mathbf{A}) \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}} (\mathbf{A}_p - \mathbf{C}_{\text{sps}} \mathbf{M} \mathbf{A})^T\end{aligned}\quad (3.10)$$

eşitlikleriyle hesaplanır (Mikhail, 1976; Vanicek ve Krakiwsky, 1986).

## (2) Kovaryans fonksiyonu

En Küçük Karelerle Kolokasyonda sinyal ve noise rastgele stokastik büyüklükler olarak tanımlanır. Noise klasik denelemedeki rastgele ölçü hatalarına karşılık gelir ve istatistiksel olarak

$$\begin{aligned}E\{\mathbf{n}\} &= \mathbf{0} \quad \text{ve } E\{\mathbf{n}\mathbf{n}^T\} = \mathbf{C}_n \\ (3.11)\end{aligned}$$

$$\mathbf{C}_n = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\mathbf{n}) (\mathbf{n}\mathbf{n}^T) d\mathbf{n}^T$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $\varphi(\mathbf{n})$   $\mathbf{n}$ 'nin olasılık yoğunluk fonksiyonudur. Diğer taraftan sinyalin rastgele davranışları ise,

$$E\{\mathbf{s}\} = \mathbf{0} \quad \text{ve } M\{\mathbf{s}\mathbf{s}^T\} = \mathbf{C}_s \quad (3.12)$$

dir. Burada sinyal için olasılık yoğunluk fonksiyonu mevcut olmayıp,  $M\{\cdot\}$  global ortalama anlamındadır. Burada ifade edilen sinyal kovaryans matrisi ( $\mathbf{C}_s$ ) kovaryans fonksiyonu yardımıyla oluşturulur. Sinyal kovaryans fonksiyonunun homojen ve izotrop olduğu kabul edilir. Sinyal kovaryansının noktaların konumlarından bağımsız olması diğer bir deyişle noktaların arasındaki uzaklığa bağlı olması homojenlik, doğrultu değişmesine bağlı olmaması da izotropi özelliğini yansıtır. Kovaryans fonksiyonunun tanımı tek boyut için,

$$C_s(\tau) = \frac{1}{t_{\max} - t_{\min}} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} s(t) s(t + \tau) dt \quad (3.13)$$

veya iki boyut için kutupsal koordinatlarla düzlem yaklaşımında;

$$C_s(\tau) = \frac{1}{4\pi^2 R} \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{r=0}^R \int_{\alpha'=0}^{2\pi} s(r, \alpha) s(r + \tau, \alpha') r dr d\alpha' d\alpha \quad (3.14)$$

şeklinde tanımlanır (Heiskanen ve Moritz, 1967; Moritz, 1973). Uygulamada kullanılan farklı türdeki kovaryans fonksiyonları Heiskanen ve Moritz(1967)'de verilmiş olup, bu çalışmada Gauss tarafından önerilen

$$C(s) = C(o) * e^{-a^2 s^2} \quad (3.15)$$

kovaryans fonksiyonu kullanılmıştır. Bu eşitlikte  $C(o)$ , varyans ve  $a$  bir katsayı olup ölçülerden yararla belirlenir.  $s$  ise noktalar arasındaki uzaklıktır. Bu amaçla öncelikle ölçülerden deterministik kısmı ayıplanır ve rastgele ölçü hataları ihmali edilerek ölçü noktalarındaki yaklaşık sinyal değerleri ( $s_i$ ) hesaplanır. Daha sonra varyans,

$$C(o) = \frac{1}{n} \sum_i^n s_i^2 \quad (3.16)$$

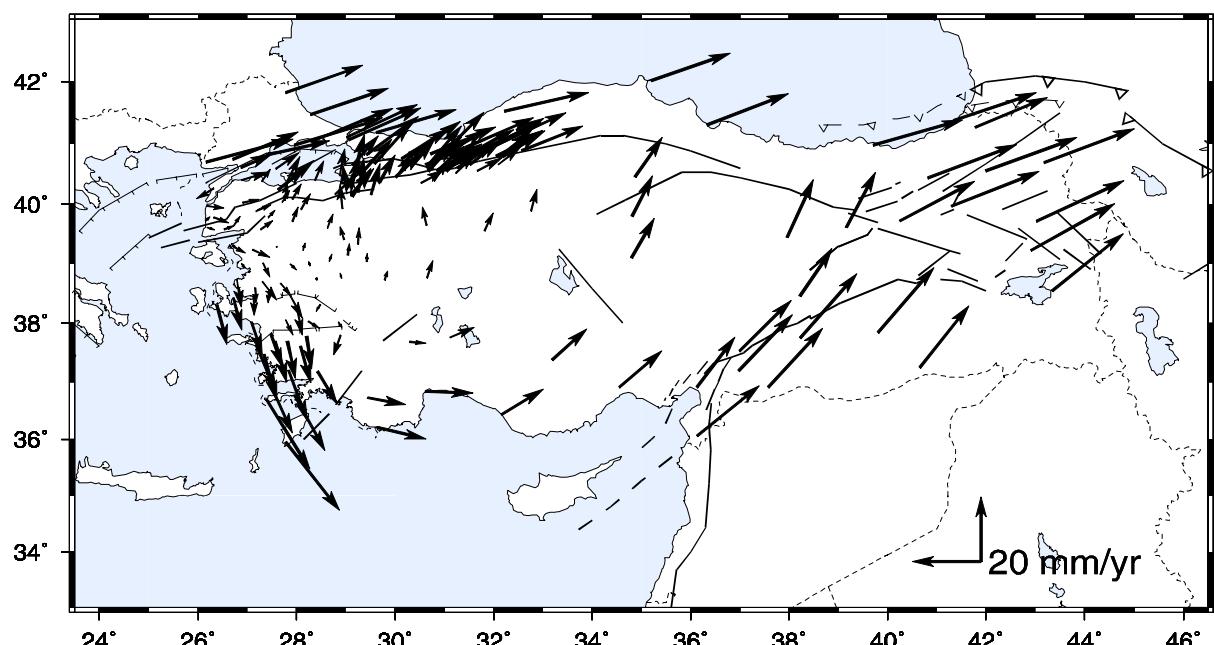
formülü ile hesaplanır.  $a$ 'nın bulunması için ise sinyal değerleri belirli uzaklıklara göre gruplandırılarak her grup için kovaryans değeri hesaplanır:

$$C(S_k - d < S_{ij} < S_k + d) = \frac{1}{K} \sum \sum s_i s_j \quad (3.17)$$

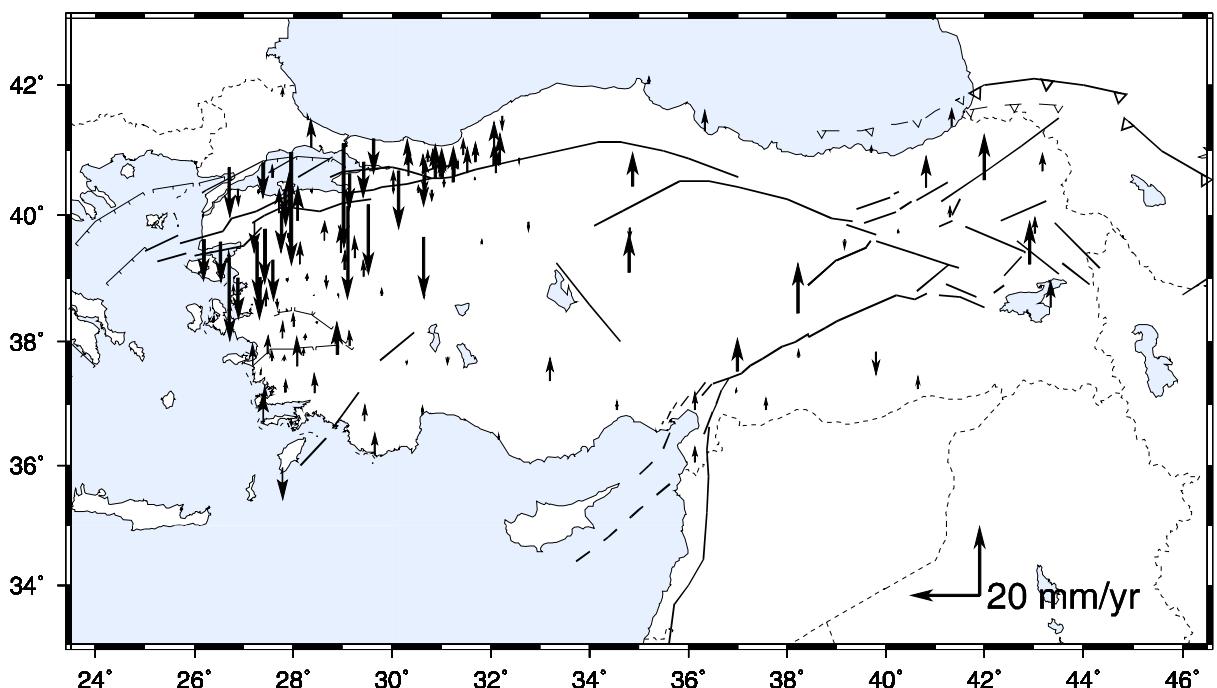
Burada  $S_k$   $k$ 'inci grubun ortalama yarıçapı,  $d$  grup aralığının yarısı ve  $K$  ise gruptaki çarpım sayısıdır. Bu eşitlikte her grup için kovaryans değeri hesaplandıktan sonra kovaryansın negatif (-) olduğu uzunluğa kadar her grup için bir a değeri hesaplanır. Daha sonra grup sayısı kadar a değerinden yararla uygun bir yöntemle (ortalama, en küçük karelerle dengeleme) bir ortalama a katsayısı belirlenerek kovaryans fonksiyonu tanımlanır.

#### 4. TUTGA NOKTALARINDA HIZLARIN KESTIRIMI

TUTGA noktalarındaki hızların kestirilmesi amacıyla 3 üncü bölümde matematik modelleri açıklanan ağırlıklı ortalama, yüzey polinomu ve en küçük karelerle kolokasyon yöntemleri uygulanmıştır. Türkiye'de 1992-1998 yılları arasında gerçekleştirilen periyodik GPS ölçü kampanyalarının birleştirilmesi ile Türkiye boyutunda 179 noktada yer merkezli dik koordinat sistemindeki hız bileşenleri ( $v_x, v_y, v_z$ ) ve yerel jeodezik dik koordinat sistemindeki hız bileşenleri ( $v_N, v_E, v_U$ ) belirlenmiştir (Demir ve Kılıçoğlu, 1999; Ayhan vd., 1999b). Hız kestirimi amacıyla bu iki koordinat sisteminde herhangi birindeki ölçü grubu kullanılıp, daha sonra Leick (1990)'da verilen eşitlikler yardımıyla diğer sistemdeki hızlara dönüşüm kolayca gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada yerel jeodezik sistemindeki  $v_N, v_E, v_U$  hızları ölçü olarak alınmış olup, ölçü noktalarının dağılımı ve bu noktalardaki yatay hız alanı (N-kuzey, E-doğu) Şekil-2'de ve düşey hız alanı (U-yukarı) Şekil-3'te gösterilmektedir.



Şekil-2 : ITRF96 sisteminde ölçü noktalarındaki yatay (N,E) hız alanı (Demir ve Kılıçoğlu, 1999 ; Ayhan vd. 1999b).



Şekil-3 : ITRF96 sisteminde ölçü noktalarındaki düşey (U) hız alanı (Demir ve Kılıçoğlu, 1999 ; Ayhan vd. 1999b).

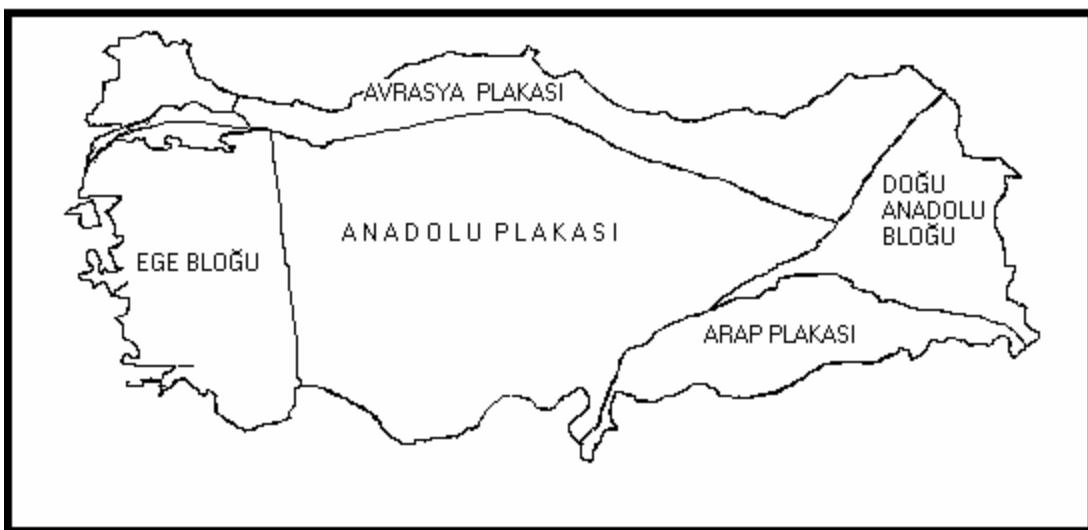
Tüm uygulamalarda nokta konumları için Lambert konform konik projeksiyondaki düzlem koordinatları kullanılmış olup, aşağıda uygulanan üç farklı yöntemle elde edilen sonuçlar verilmiştir.

#### a. Ağırlıklı Ortalama

Ağırlıklı ortalama yönteminde global ve bölgesel olmak üzere iki yaklaşım uygulanmıştır. Global yaklaşımda Türkiye bir bütün olarak ele alınmış, bölgesel yaklaşımda ise tektonik plaka hareketleri açısından genel olarak birbirinden farklılık gösteren beş alt bölgeye ayrılmıştır (Şekil-4). Bu yöntemde hızların kestiriminde (3.2) ağırlık fonksiyonu kullanılmış olup, bu fonksiyondaki katsayısı deneyel olara belirlenmiştir. Ayrıca, kestirimde tüm dayanak noktalarının kullanılması yerine, bölgedeki nokta dağılımına bağlı olarak en uygun sonuçları veren 4 ile 8 arasında değişen sayıda nokta kullanılmıştır. Bu parametreler; ölçü noktalarındaki hız değerleri ile bunların diğer ölçü noktalarından yararla kestirilen değerleri arasındaki farkların karelerini toplamını minimum yapan çözüm ile belirlenmiştir. Ağırlık fonksiyonunda k için 1 ile 4 arasında değerler alınarak yapılan uygulamalar birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiğiinden,  $k=1$  alınmıştır.

Global yaklaşım ile bölgesel yaklaşım genel olarak birbirine yakın sonuçlar vermekle birlikte, özellikle tektonik plaka sınırlarında bazı farklılıklar belirlenmiştir. Ayrıca ölçü noktalarının kestiriminde; bölgesel yaklaşımın, global yaklaşımı göre daha küçük rms

değerleri vermesi nedeniyle daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bölgesel yaklaşımıla her alt bölge için hesaplanan rms değerleri Tablo-1'de verilmektedir. Bu yöntemde kestirilen büyülüklerin hatalarını doğrudan belirlemek için bir eşitlik mevcut olmadığından, alt bölgelerdeki ölçü noktalarının kestiriminde bulunan rms değerlerinin her alt bölgedeki kestirimin hatası olarak alınabilecegi değerlendirilmiştir.



Şekil-4 : Tektonik alt bölgeler

Tablo-1 : Ağırlıklı ortalama ile alt bölgelerde kestirilen hızların rms değerleri (mm/y)

Hızlar	Arap	Avrasya	Doğu Anadolu	Orta Anadolu	Batı Anadolu
rms( $v_N$ )	1.6	2.6	3.1	1.7	2.1
rms( $v_E$ )	1.3	5.5	2.5	2.7	2.5
rms( $v_U$ )	4.8	11.3	4.4	6.5	7.9

### b. Yüzey polinomu

Türkiye'nin farklı tektonik plaka hareketlerini içermesine bağlı olarak deformasyonun homojen olmaması nedeniyle, global yaklaşımı uygun sonuç vermeyeceği bilinen yüzey polinomu yöntemi, bölgesel yaklaşımı uygulanmıştır. Her alt bölgedeki ölçü noktalarının sayılarına bağlı olarak öncelikle alt bölgelere 1 veya 2 nci dereceden yüzey polinomu geçirilerek uyuşumsuz ölçüler ayıklanmış ve yüzeyi temsil eden bilinmeyen polinom katsayıları belirlenerek bu katsayıların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı araştırılmıştır. Daha sonra istatistiksel olarak anlamsız bulunan katsayılar modelden çıkarılarak, dengleme işlemi, en uygun parametrelerin belirlenmesine kadar sürdürülmüştür. Her alt bölgede üç bileşen için yapılan ayrı ayrı uygulamalar sonucunda elde edilen artık değerlerin ( $\mathbf{r}$ ) en küçük ve en büyüğü ile sonsal standart sapmalar Tablo-2'de verilmektedir.

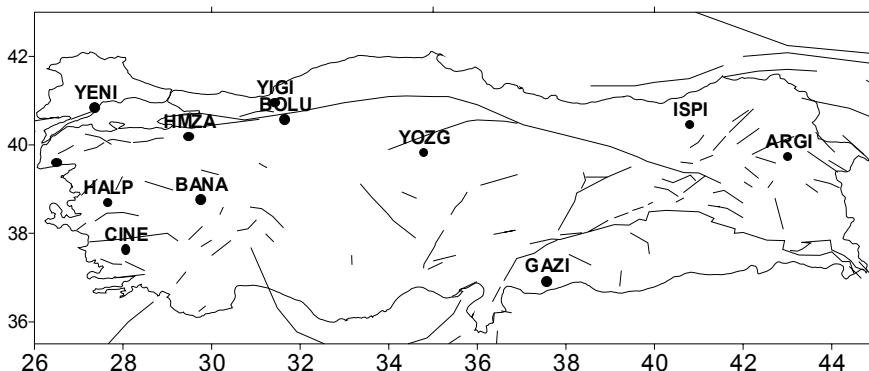
Tablo-2 : Yüzey polinomu ile elde edilen sonuçlar (mm/y)

BÖLGELER	v <sub>N</sub>			v <sub>E</sub>			v <sub>U</sub>		
	Min	Max	$\hat{\sigma}_o$	Min	Max	$\hat{\sigma}_o$	Min	Max	$\hat{\sigma}_o$
Arap Plakası (1)	-0.5	0.6	$\pm 0.98$	-0.7	1.7	$\pm 1.98$	-8.7	3.2	$\pm 1.06$
Avrasya Plakası (2)	-8.1	9.6	$\pm 3.03$	-9.9	7.5	$\pm 6.55$	-39.4	29.7	$\pm 2.49$
Doğu Anadolu Bloğu (1)	-0.3	0.5	$\pm 0.92$	-0.3	0.4	$\pm 0.91$	-2.4	3.5	$\pm 0.95$
Anadolu Plakası (2)	-3.9	2.8	$\pm 3.77$	-3.9	4.6	$\pm 5.12$	-14.7	15.1	$\pm 2.78$
Ege Bloğu (2)	-4.8	3.2	$\pm 3.77$	-4.4	4.2	$\pm 3.67$	-8.6	32.4	$\pm 2.44$

Not: Parantez içindeki değerler polinom derecesini göstermektedir.

### c. En küçük karelerle kolokasyon

EKKK yöntemi, alt bölgelerde yeterli sıklıkta ölçü noktası olmadığından, deformasyonun Türkiye boyutunda ve özellikle tektonik plaka sınırlarında sürekli olduğu kabul edilerek, global yaklaşımla uygulanmıştır. Bu yöntemde; dayanak noktalarından farklı alt bölgelerde bulunan 12 tanesi test noktası olarak belirlenmiştir (Şekil-5). Dolayısıyla bu yöntemde ölçü noktaları sayısı  $179 - 12 = 167$  dir.



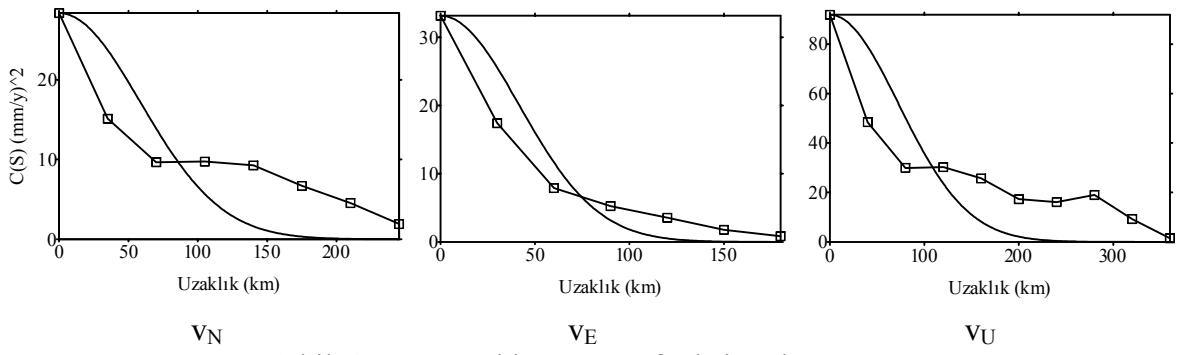
Şekil-5 : EKKK yönteminde kullanılan test ölçü noktaları

Kovaryans fonksiyonu parametrelerinin belirlenmesi için öncelikle, yüzey polinomu uygulamalarında belirlenen 1inci dereceden polinomsal yüzey ile ölçülerden trend ayırlenmiş ve elde edilen stokastik karakterli artıklar yardımıyla Bölüm 3'te açıklandığı şekilde kovaryans fonksiyonu parametreleri hesaplanmıştır. v<sub>N</sub>, v<sub>E</sub> ve v<sub>U</sub> hızları için sırasıyla 35, 30 ve 40 km uzaklıklarını esas alınarak gruplar oluşturulmuş ve a katsayısi her grup için belirlenen katsayıların aritmetik ortalaması alınarak, C(0) varyansları ise (3.16) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Sözü edilen bu işlemler her üç bileşen için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde bulunan varyans ve a değerleri Tablo-3'te verilmekte, ayrıca deneysel kovaryans fonksiyonları Şekil-6'da gösterilmektedir.

Tablo-3 : Kovaryans fonksiyonu katsayıları

Hızlar	Varyans (C(0))	a

	$(\text{mm}/\text{y})^2$	
$v_N$	28.7	0.0123
$v_E$	33.7	0.0174
$v_U$	90.9	0.0101



Şekil-6 : Deneysel kovaryans fonksiyonları

EKKK yöntemi ile test noktalarındaki hız kestirim sonuçları Tablo-4'te verilmiştir. Bu tabloda görüleceği üzere HMZA noktasında U (Yukarı) bileşeni için bilinen hız ile kestirilen hız farkı büyük çıkmıştır. Bunun nedeni, HMZA noktasında ölçü değerinin bölgesel karakterden farklılık göstermesidir. Dolayısıyla U bileşeni rms hesabında HMZA noktası dikkate alınmamıştır. Diğer taraftan EKKK yöntemi ile kestirilen hızların standart sapmaları, trendin ilk bilinmeyeeninin ( $a_0$ ) varyansının çok büyük olması nedeniyle büyük çıkmıştır.

Tablo-4 : Test noktalardaki kestirim sonuçları

Nokta Adı	Vn			Ve			Vu		
	Verilen	Hesap	Fark	Verilen	Hesap	Fark	Verilen	Hesap	Fark
YENİ	4.4	6.6	-2.2	18.5	15.1	3.4	-10.2	-0.4	-9.8
YIGI	9.1	8.9	0.1	19.6	18.9	0.7	4.5	4.8	-0.3
ISPI	10.3	9.9	0.4	25.7	24.6	1.1	9.0	3.4	5.6
ARGI	12.5	13.5	-1.0	25.5	25.1	0.4	4.5	5.9	-1.5
GAZİ	18.1	17.9	0.2	15.8	16.4	-0.6	3.4	3.3	0.1
YOZG	12.5	11.5	0.9	6.0	7.1	-1.1	-3.0	2.6	-5.6
BOLU	4.1	6.8	-2.7	7.3	7.6	-0.3	0.6	4.4	-3.8
HMZA	9.4	7.5	1.9	2.6	3.1	-0.5	-20.1	1.8	-21.9
BANA	2.8	3.1	-0.3	0.9	0.4	0.5	2.1	1.9	0.2
CINE	-11.3	-10.9	-0.4	3.1	2.4	0.7	8.4	2.6	5.8
HALP	-3.9	-4.2	0.3	3.2	1.8	1.4	-2.7	1.0	-3.7
HOBA	1.3	-1.1	2.4	3.0	3.1	-0.1	-11.6	-0.3	-11.3
	rms = 1.4 mm/y			rms = 1.2 mm/y			rms = 8.3 mm/y		

#### d. Yöntemlerin Karşılaştırılması

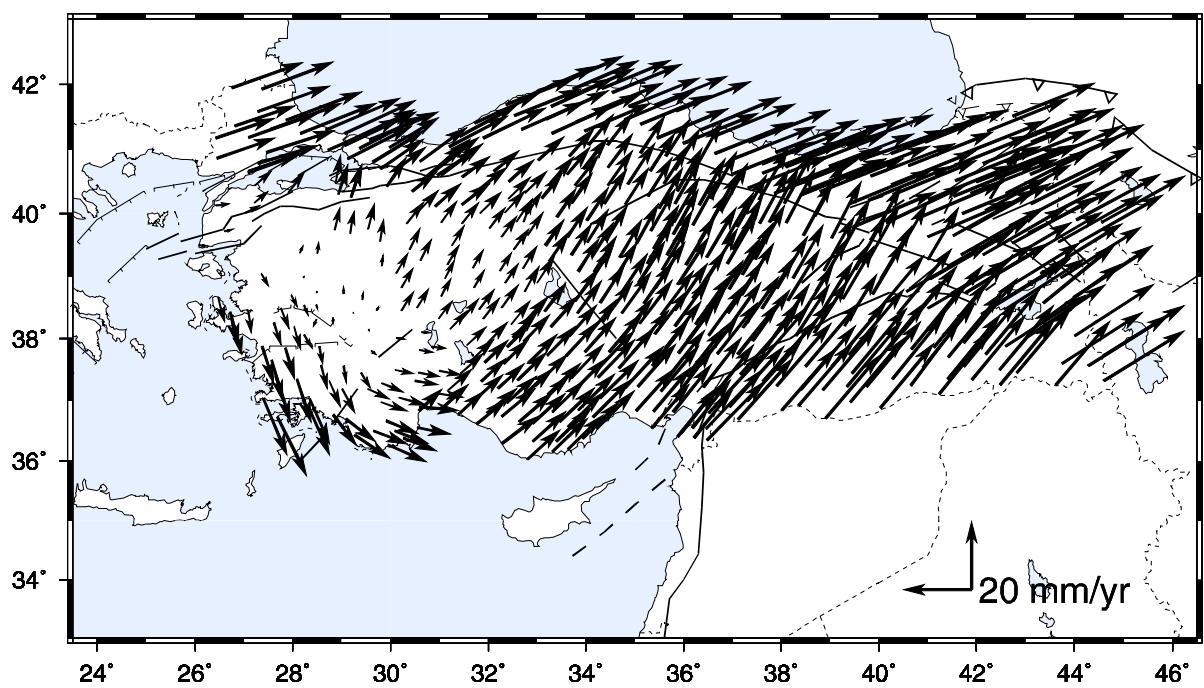
TUTGA noktalarında üç farklı yöntemle elde edilen sonuçları irdelemek için ağırlıklı ortalama bölgesel yaklaşım baz alınarak, diğer yöntemlerle karşılaştırılmış olup, karşılaştırma sonuçları Tablo-5'te verilmiştir. Ağırlıklı ortalama ve EKKK yöntemleri ile birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmesine karşılık, yüzey polinomu yönteminin bu iki yöntemden farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Yüzey polinomu yöntemindeki düzgünleştirme nedeniyle

hız alanının lokal davranışları modellenemediğinden, bu yöntemin hız kestirimi amacıyla uygun olmadığı değerlendirilmektedir.

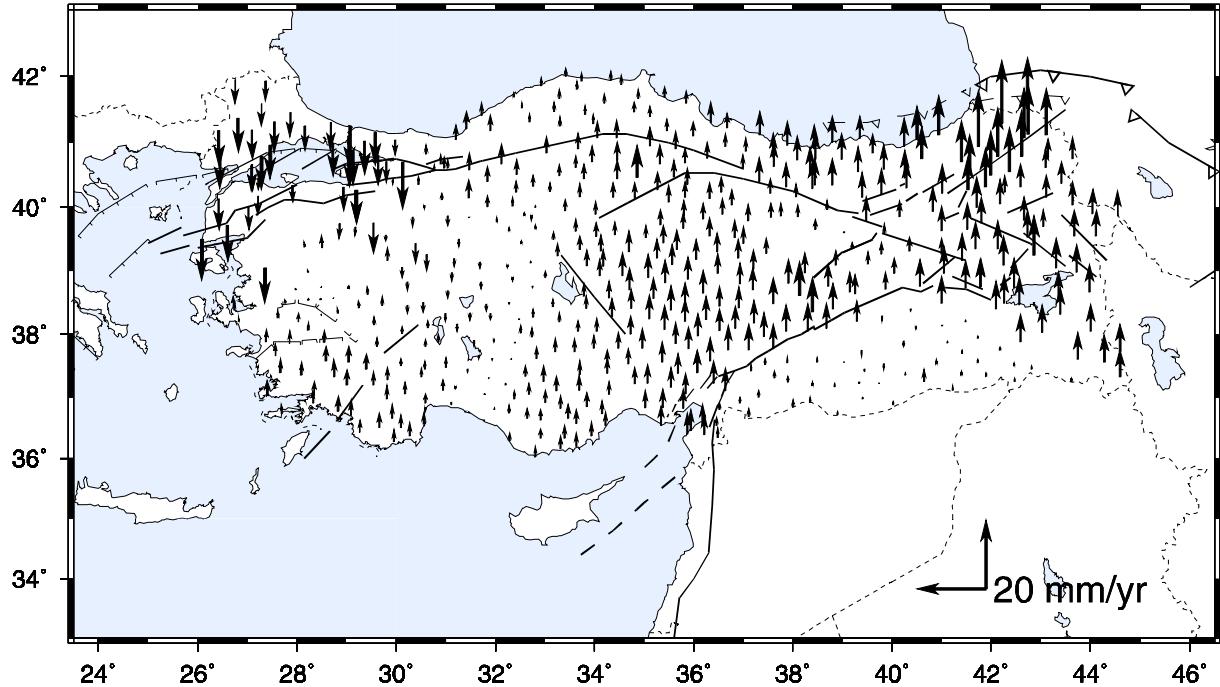
Tablo-5 : Yöntemlerin karşılaştırılması

		$v_N$	$v_E$	$v_U$
Ağırlıklı Ortalama Yöntemi ( Bölgesel – Global )	Min	-4.0	-9.1	-4.9
	Max	5.1	9.9	5.9
	Ort.	0.1	-0.3	0.08
	rms	1.3	2.7	1.7
Ağırlıklı Ortalama – Yüzey Polinomu ( Bölgesel – Bölgesel )	Min	-10.9	-11.4	-38.3
	Max	5.1	12.2	21.1
	Ort.	-0.4	-0.3	0.7
	rms	1.6	3.0	7.3
Ağırlıklı Ortalama – EKKK (Bölgesel – Global )	Min	-5.0	-9.7	-16.3
	Max	4.4	8.6	12.9
	Ort.	-0.2	-0.6	0.7
	rms	1.2	2.7	3.9

Yöntemler arasındaki farkların genel olarak plaka sınırlarında, özellikle Arap, Anadolu ve Avrasya plakalarının birleştiği üçlü kesişim bölgesinde arttığı belirlenmiştir. Bu ise plaka sınırlarında hızları bilinen ölçü noktasının yeterli olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu bölgelerdeki deformasyonun uygun şekilde modellendirilebilmesi için ilave periyodik GPS ölçülerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ağırlıklı ortalama ve EKKK yöntemi ile elde edilen sonuçların birbirine yakın olması, iki yöntemin karakter olarak birbirine benzer özellikler taşıması şeklinde yorumlanabilir. EKKK yönteminde kestirilen hızların standart sapmalarının daha büyük değerler alması nedeniyle, ağırlıklı ortalama yöntem sonuçlarının uygulamada pratik amaçlar için kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Hızları bilinmeyen TUTGA noktalarında ağırlıklı ortalama yöntemi ile kestirilen yatay hız alanı Şekil-7'de düşey hız alanı ise Şekil-8'de gösterilmektedir.



Şekil-7 : ITRF96 sisteminde hesap noktalarında kestirilen yatay (N,E) hız alanı.



Şekil-8 : ITRF96 sisteminde hesap noktalarında kestirilen düşey (U) hız alanı.

## 7. SONUÇLAR

TUTGA noktalarındaki uzun periyotlu (inter-sismik) hızların kestirilmesi amacıyla ağırlıklı ortalama, yüzey polinomu ve en küçük karelerle kolokasyon yöntemleri uygulanmıştır. Ağırlıklı ortalama yönteminin bu çalışmada da etkin sonuçlar verdiği belirlenmiş ve bu yöntemle elde edilen sonuçların pratik amaçlar için yeterli olduğu değerlendirilmektedir.

Türkiye, oldukça aktif tektonik bir bölgede yeraldığından, nokta koordinatlarında önemli ve büyük değişiklikler doğuran depremlere sahne olmaktadır. Noktalardaki uzun periyotlu hızların yanısıra, depremler nedeniyle oluşan ani ve kısa periyotlu ve daha büyük değerlere ulaşabilen ko-sismik ve post-sismik yerdeğiştirmelerin ayrıca modellendirilmesi ve nokta koordinatlarında dikkate alınması gerekmektedir.

Hız kestiriminde uygulanan tüm yöntemlerde genel olarak ölçü noktalarının dağılımı temel rol oynamaktadır. Özellikle plaka sınırlarındaki ölçü nokta sayısı azlığı, mevcut hız alanının modellendirilmesindeki en önemli olumsuzluk olarak ifade edilebilir.

Bu çalışma ile elde edilen sonuçların yakın gelecekte TUTGA nokta koordinatlarının iyileştirilmesi amacıyla kullanılması önerilmekle birlikte, günümüzdeki 5-6 yıl içerisinde tüm noktalarda ikinci periyot ve daha uzun dönemde de üçüncü periyot ölçü yapılması, sadece ağır yaşatılması açısından değil, ülkemizdeki ayrıntılı tektonik yapının ortaya çıkarılması açısından da büyük önem taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

- /1/ Aksoy, A : Jeodezik Değerlerin Matematik İstatistik Testlerle İrdelenmesi, Türkiye 1 inci Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, 1987.
- /2/ Alp, O. : SAM Üzerine Bir İnceleme , Doktora Tezi, İTÜ, 1998.
- /3/ Ayhan, E., Alp,O. : Serbest Hava Anomali Kestirim Yöntemleri ve Yöntemlerin Karşılaştırılması, Harita Dergisi, Sayı:101, 1988.
- /4/ Ayhan,.M.E., Demirkol, Ö. Gündoğdu, O : Türkiye Ulusal Deprem Raporu. HGK, Aralık 1999a.
- /5/ Ayhan,.M.E., Demir, C., Kahveci, M., Kılıçoğlu, A., Kurt, M., Lenk, O., Ocak, M., Türkezer, A. : Plate Motions and Intra-Plate Deformations in Turkey From 1982-1988 From GPS Measurements, IUGG-99 General Assembly, Birmingham, 1999b (Poster).
- /6/ Demir, C., : 1992-1998 Yılları GPS Kampanyalarının Birleştirilmesi,

- Kılıçoğlu, A. Hrt.Gn.K.lığı İç Rapor No: JEOF-NİV-1-99, Nisan 1999 (Yayımlanmadı).
- /7/ Demir,C. : Kuzey Anadolu Fay Zonu Batı Kesiminde Yatay Yerkabuğu Hareketleri ve Gerinim Birikiminin Belirlenmesi. Doktora Tezi, YTÜ, Aralık, 1999.
- /8/ Echstein, B. : Evaluation of Spline and Weighted Average Interpolation Algorithms, Computer & Geosciences , Vol.15. No.1, pp.79-84, 1989.
- /9/ Heiskanen, W. : Physical Geodesy, Freeman, London, 1967.  
Moritz, H.
- /10/ HGK : Harita Genel Komutanlığı, Jeodezi Dairesi Başkanlığı Ülke Temel GPS Ağrı Teknik Talimatı, MST/125-19, Ankara.1996 (Yayımlanmadı).
- /11/ HGK : Türkiye Ulusal Temel GPS Ağrı (TUTGA) Teknik Esasları, Hrt.Gn.K.lığı İç Rapor, 1997 (Yayımlanmadı).
- /12/ Jackson J., McKenzie, D. : The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. Geophysical Journal, No.93, pp. 45-73, 1988.
- /13/ Kahveci, M. : Türkiye Ulusal GPS Temel Ağrı (TUTGA) 1997 ve 1988 yılları GPS Ölçülerini Değerlendirme Sonuçları, Hrt.Gn.K.lığı İç Rapor No: UZYTEK-4-99, Nisan, 1999 (Yayımlanmadı).
- /14/ Kassim, A.F. : An Evaluation of Three Techniques for the Prediction of Gravity Anomalies in Canada. University of New Brunswick. Technical Report No.73, September, 1980.
- /15/ Kavouras, M. : On the Detection of Outliers and the Determination of Reliability in Geodetic Network, Technical report, 87, University of New Brunswick, 1988.
- /16/ Koch, K.R. : Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, Springer-Verlag, New York, 1987.
- /17/ Krakiwsky, E.J. : A Synthesis of Recent Advances in the Method of Least Squares, Div. of Surv. Eng., The University of Calgary, Canada, 1982.
- /18/ Leick, A. : GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons, New York, 1990.
- /19/ McKenzie, D. P. : Active Tectonics of the Mediterranean Region, Geophys. J. R. Astr. Soc., 30, 109-185, 1972.

- /20/ McClusky S., v.d. : GPS Constraints on Crustal Movements and Deformations in the Eastern Mediterranean (1988-1997): Implications for Plate Dynamics. Journal of Geophysical Research, 2000 (in press)..
- /21/ Mikhail, E.M. : Observation and Least Squares, Harper & Row, Publishers, Inc., Newyork, N.Y., 497 pp. 1976.
- /22/ Moritz, H. : Advanced Least Squares Methods, OSU, Rept. No.1,Columbus, 1972.
- /23/ Moritz, H. : Least Squares Collocation, DGK Publ. Reihe A, Heft No: 75, München, 1973.
- /24/ Nakiboğlu, M. : Dengeleme Hesabı Ders Notları, Hrt. Yük.Tek. Okulu, 1996.
- /25/ Petri,G., Kennie, T.J.M. : Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering, Conference on State of the Art in Stereo and Terrain Modelling British Computers Society, May 1986.
- /26/ Rothacher, M. Mervart, L. : Bernese GPS Software Version 4.0. AIUB. Berne, 1996.
- /27/ Vanicek, P. Krakiwsky, E.J. : Geodesy : The Concepts, North Holland Publising Co. Amsterdam, 1986.