

## STATİK VE KİNEMATİK MODELDE DEFORMASYON ANALİZİ

Serkan DOĞANALP, Bayram TURGUT

S. Ü. Müh. - Mim. Fak. Harita Müh. Böl., KONYA.

[sdoganalp@selcuk.edu.tr](mailto:sdoganalp@selcuk.edu.tr), [bturgut@selcuk.edu.tr](mailto:bturgut@selcuk.edu.tr)

**ÖZET:** Günümüzde mühendislik yapılarının kontrolü, yatay ve düşey yöndeki yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Yapıların kontrolü ve yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesine ilişkin deformasyon analizleri her zaman mühendislik jeodezisinin temel konuları arasında yer almıştır. Objelerin şekil, boyut ve yer değişimleri bu analizler yardımıyla belirlenmekte ve yorumlanmaktadır.

Günümüze kadar genelde deformasyon analizleri statik olarak yapılmakta idi. Ancak ölçümlerde zaman parametresinin işin içine girmesiyle deformasyon analizlerinde kinematik modellerin oluşması zorunlu duruma gelmiştir. Ölçümlerin uzun zaman periyoduna yayılmış olması deformasyon analizlerine doğrudan etki etmektedir. Bu nedenle uzun zamanlı ölçümlerde kinematik modelin kullanılması kaçınılmaz bir hal almıştır.

Bu çalışmada, üç periyot (Şubat 1998 – Nisan 1999 – Ocak 2000) ölçü ile periyotlar ayrı ayrı serbest dengelenmiş, statik ve kinematik olarak deformasyon analizi yapılmış ve analiz sonuçları incelenmiştir. Bu test alanında yükseklik ağı, trigonometrik ağ ve iki boyutlu ağda deformasyon analizleri, statik ve kinematik olarak iki modelde incelenmiştir. Statik deformasyon analizleri için S transformasyon yöntemi, kinematik deformasyon analizleri için de Kalman Filtreleme Yöntemi kullanılmıştır. Yükseklik ağı, trigonometrik ağ ve iki boyutlu ağda yapılan statik analiz ve kinematik analiz sonuçları karşılaştırılmış ve uyumlu oldukları gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Deformasyon, Dengeleme, S Transformasyonu, Statik Analiz, Kinematik Analiz, Kalman Filtreleme Yöntemi.

### Deformation Analysis on Static and Kinematic Models

**ABSTRACT:** Today, controlling of engineering structure and determining of crust motion which is horizontal and vertical direction is important. In this context, analysis of deformation related to it usually is fundamental subject of engineering geodesy. Shape, size and displacement of object is determined and interpreted via analysis of deformation.

Analysis of deformation until today have been carried out as static. One of the most important parameter of deformation is time. If measurement process take long time, using of kinematic models is been to be inevitable.

In this study, deformation measurement of test area consisted of 3 period (February 1998 – April 1999 – January 2000) was dealt with. Firstly, measurement have been adjusted as unconstrained. Secondly, it have been carried out deformation analysis by static and kinematic. And finally, results of analysis have been investigated and interpreted. It was used S transformation and Kalman Filter method for static and kinematic deformation models respectively. It have been compared results of static and kinematic analysis in levelling network, trigonometric network and horizontal network. It have been observed the same results.

**Key words:** Deformation, Adjustment, S transformation, Static analysis, Kinematic analysis, Kalman filter method.

## GİRİŞ

Mühendislik yapılarının, yapım aşamasındaki dikkat ve tedbirler kadar önemli olan bir başka konuda mühendislik yapılarının yapımından sonraki kontrollerdir. Mühendislik yapılarından olan baraj, köprü, bina gibi yapıların kontrolünün bir bölümünü deformasyon ölçümleri ve analizleri oluşturmaktadır.

Deformasyon ölçmeleri objedeki değişimler ile birebir orantılıdır. Ayrıca deformasyon ölçmelerinin sağlıklı bir şekilde yapılması yada yapılmaması deformasyon analizini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yapılan ölçümlerin son derece dikkatli yapılması gereklidir.

Deformasyon ölçümleri obje üzerindeki deformasyonun hızına bağlı olarak belirli periyot aralıklarında yapılmaktadır. Yapılan ilk ölçümlere sıfır ölçmeleri ( $t_0$ ) denilmektedir. Deformasyon analizleri için en az iki periyot ölçüye gereksinim vardır. Yapılan ölçümler sayesinde deformasyon analizleri yapılabilmekte ve obje üzerinde karar verilebilmektedir.

Önemli olan bir başka konuda, deformasyon ölçmelerinin analizinin doğru ve güvenilir bir şekilde yapılmasıdır. Statik deformasyon modelinde, deformasyon vektörlerinin zamandan ve etkiyen kuvvetlerden bağımsız olarak belirlenmesi sağlanır. Statik bir deformasyon analizinde bulduğumuz değerler kısıtlıdır. Bu değerler, objedeki sadece noktalara ait değişim miktarlarından ibarettir.

Son yıllarda, Rudolf Emil Kalman tarafından 1960 yılında ortaya konan teori mühendisler ve istatistikçiler tarafından geliştirilmiş ve mühendislik uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Kalman tarafından ortaya konan teori; deformasyon, navigasyon, deprem tahminleri ve objelerdeki dinamik ve kinematik hareketlerin belirlenmesi gibi birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır. Yerkabuğu hareketlerinin yatay ve düşey yöndeki hareketlerinin belirlenmesinde genellikle zamanın bir fonksiyonu olan kinematik modeller kullanılmaktadır.

Kinematik deformasyon analizinde, deformasyona neden olan dış güçleri dikkate almaksızın dayanak ve obje noktalarının

koordinatları zamanın fonksiyonları biçiminde tanımlanır. Kinematik deformasyon modelinde hesaplanan parametreler statik deformasyon modeline göre fazladır. Bu değerler, noktalara ait değişim miktarları, noktaların hızları ve ivmeleri olarak kısaca sıralanabilir.

Bu çalışmada kinematik modellerden olan Kalman Filtreleme Yöntemi ile 11 noktalı bir ağda deformasyon analizi yapılmıştır. Uygulanan deformasyon analizi hem statik olarak S transformasyon yöntemi ile hem de kinematik olarak Kalman Filtreleme Yöntemi ile yapılmıştır. Sonuçlar istatistikî olarak karşılaştırılmıştır.

## S TRANSFORMASYONU YÖNTEMİ İLE DEFORMASYON ANALİZİ

1950 li yıllarda S transformasyonu ile deformasyon analizi Baarda tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde yeni bir dengelemeye gerek kalmadan bir datumdan diğer bir datuma geçiş sağlanır. Başka bir ifadeyle tüm iz, kısmi iz minimum ve zorlamasız klasik dengeleme arasında geçişler olanaklıdır.

$t_1$  ve  $t_2$  zamanında gözlenen ağ geometrileri farklı ise global test yalnızca eşlenik noktalardan oluşan ağ bölümlerini kapsar. Başka bir deyişle  $t_1$  ve  $t_2$  zamanında ölçülen ağlar eşlenik noktalara göre konumlandırılır (İnal, 2000).

Anlamli nokta hareketlerinin araştırılmasında sürekli datum değişikliği zorunlu olduğundan karşılaştırılacak ağları önce herhangi bir datumda (defekt sayısı kadar parametreyi sabit alarak) dengelemek ve sonuçları istenen datuma dönüştürmek kolaylık sağlar. Bu durumda düzeltmeler ve birim ağırlıklı ölçünün ortalama hatası sabit kalır. Noktaların yükseklikleri ve ortalama hataları değişir.  $t_n$  zamanında ölçülen bir ağda "e" ile tanımlanan eşlenik noktaların koordinat bilinmeyenleri ilk sırada, "b" ile tanımlanan diğer noktaların koordinatları ve başka bilinmeyenler ikinci sırada olmak üzere herhangi bir i datumunda serbest dengelemeyle belirlenmiş olsun. Buna göre i datumuna ilişkin  $X_i$  parametreler vektörü;

$$X_i = \begin{bmatrix} X_e^i \\ X_b^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

biçiminde iki alt vektöre ayrılır. Burada;

$X_e^i$ :Eşlenik noktaların koordinat bilinmeyenleri

$X_b^i$ :Diğer noktaların koordinat bilinmeyenleri ve başka bilinmeyenleri göstermektedir. Bu ayrıma karşılık ağırlık katsayıları matrisi i datumunda;

$$Q_{xx}^i = \begin{bmatrix} Q_{ee}^i & Q_{eb}^i \\ Q_{be}^i & Q_{bb}^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

olarak belirlenir. Datum seçici E matrisi köşegenin üzerinde datumu belirleyen nokta koordinatlarına karşılık "1", ötekiler için "0" içeren bir köşegen matris olmak üzere düzenlenir.

$$G = \begin{bmatrix} G_e \\ G_b \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad B_j = E_j G = \begin{bmatrix} G_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S_j = I - G(B_j^T G)^{-1} B_j^T \quad (4)$$

$S_j$  transformasyon matrisi ile i datumundan ağırlık eşlenik noktalara göre konumlandırılmasını sağlayan j datumuna;

$$X_j = S_j X_i \quad (5)$$

$$Q_{xx}^j = S_j Q_{xx}^i S_j^T \quad (6)$$

matrisleriyle geçilir. Dönüşüm işlemleri 1. ve 2. periyot için ayrı ayrı yapılarak aynı bir j datumunda eşlenik noktaların  $(X_e^j)_1$ ,  $(X_e^j)_2$  koordinat bilinmeyenleriyle bunların  $(Q_{ee}^j)_1$  ve  $(Q_{ee}^j)_2$  ağırlık katsayıları matrisleri bulunur. Eşlenik noktaların global testi için;

$$H_0 : E(X_e^j)_1 = E(X_e^j)_2 \quad (7)$$

$$d_e = (X_e^j)_2 - (X_e^j)_1 \quad (8)$$

$$(Q_{dd})_e = (Q_{ee})_1 + (Q_{ee})_2 \quad (9)$$

$$R_e = d_e^T (Q_{dd})_e^+ d_e \quad (10)$$

ve  $R_e$ ' nin serbestlik derecesi  $h_e = u_e - d$  ile gösterilirse;

$$F = \frac{R_e}{m_0^2 h_e} \quad (11)$$

$F > F_{h_e, f, 1-\alpha}$  ise ağırlık eşlenik noktalarından oluşan bölümünde deformasyon vardır denilir (Demirel, 1987).

### S transformasyonu yardımıyla anlamlı nokta hareketlerinin araştırılması

Global test sonucu ağırlık bütününde ya da eşlenik noktalar bölümünün herhangi bir yerinde deformasyon olduğuna karar verilmiş ise hareketli noktaların araştırılmasına geçilir. Eşlenik noktalarda her birinin yer değiştirmiş olabileceği düşünülerek i datumunda serbest dengeleme ile belirlenmiş bir periyoda ilişkin (1) parametreler vektörü ve (2) ağırlık katsayıları matrisi uygun biçimde bölümlere ayrılır.

$$X_i = \begin{bmatrix} X_s^i \\ X_h^i \\ X_b^i \end{bmatrix} \quad (12)$$

Burada;

$X_s^i$  : Sabit kabul edilen eşlenik nokta koordinatları

$X_h^i$  : Hareket ettiği varsayılan nokta koordinatları

$X_b^i$  : Eşlenik olmayan noktalara ilişkin parametreler ve diğer bilinmeyenleri göstermektedir.

$$Q_{xx}^i = \begin{bmatrix} Q_{ss}^i & Q_{sh}^i & Q_{sb}^i \\ Q_{hs}^i & Q_{hh}^i & Q_{hb}^i \\ Q_{bs}^i & Q_{bh}^i & Q_{bb}^i \end{bmatrix} \quad (13)$$

$t_n$  zamanında ölçülen ağ şimdi koordinatları  $X_s$  içinde toplanan ve sabit kabul edilen noktalara göre konumlandırılmaktadır. Bu datum  $k$  ile gösterilirse (12) ve (13) ayırımına uygun olarak (3) yerine

$$G = \begin{bmatrix} G_s \\ G_h \\ G_b \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad B_k = E_k G = \begin{bmatrix} G_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

matrisleri ile (4) den  $S_k$  transformasyon matrisi bulunmalı ve her bir periyot için

$$\begin{bmatrix} X_s^k \\ X_h^k \\ X_b^k \end{bmatrix} = S_k \begin{bmatrix} X_s^i \\ X_h^i \\ X_b^i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{ss}^k & Q_{sh}^k & Q_{sb}^k \\ Q_{hs}^k & Q_{hh}^k & Q_{hb}^k \\ Q_{bs}^k & Q_{bh}^k & Q_{bb}^k \end{bmatrix} = S_k \begin{bmatrix} Q_{ss}^i & Q_{sh}^i & Q_{sb}^i \\ Q_{hs}^i & Q_{hh}^i & Q_{hb}^i \\ Q_{bs}^i & Q_{bh}^i & Q_{bb}^i \end{bmatrix} S_k^T \quad (15)$$

transformasyonu yapılmalıdır. Sabit kabul edilen noktaların,

$$H_0: E \left( X_s^k \right)_1 = E \left( X_s^k \right)_2 \quad (16)$$

sıfır hipotezinin testi için (8), (9), (10) eşitliklerine uygun olarak iki periyoda ilişkin  $X_s$  alt vektörlerini  $d_s$  koordinat farkları;

$$d_s = \left( X_s^k \right)_2 - \left( X_s^k \right)_1 \quad (17)$$

ve bunların ağırlık katsayıları;

$$\left( Q_{dd} \right)_s = \left( Q_{ss}^k \right)_1 + \left( Q_{ss}^k \right)_2 \quad (18)$$

hesaplanır. Düzeltmelerin kareleri toplamı için artım miktarı,

$$R_s = d_s^T \left( Q_{dd} \right)_s^{-1} d_s \quad (19)$$

formülü ile elde edilir. (12)–(19) işlemleri  $X_e$  alt vektöründeki noktalardan her biri için tekrarlanarak her defasında  $X_s$  ve  $X_h$  ayırımına karşılık bir  $R_s$  değeri bulunur. Global test sonucunda ağın herhangi bir yerinde deformasyon olduğuna karar verilmiş ise;

$$(R_s)_{\min} = \min (R_{s,i} \quad i : 1,2,\dots,p) \quad (20)$$

( $p$  : eşlenik nokta sayısı)

$(R_s)_{\min}$  olan noktadaki hareketin anlamlı olduğu görülür. (11)' e göre

$$F = \frac{R_s}{m_0^2 h_s} \quad (21)$$

test büyüklüğü hesaplanır. Tablo değeri de  $F_{tablo} = F_{h_s, f, 1-\alpha}$  olarak hesap edilir.  $F > F_{tablo}$  ise  $(R_s)_{\min}$  olan noktada % 95 ihtimal ile deformasyon vardır. Sonraki adımlarda bu nokta  $X_b$  vektörü içine alınarak test tekrarlanır (İnal ve Ceylan 2002; Demirel, 1987).

## KALMAN FİLTRELEME YÖNTEMİ

Kalman Filtreleme Yöntemi, Rudolf Emil Kalman tarafından 1960 yılında ortaya konmuştur. Sonraki yıllarda yöntem geliştirilerek mühendislik uygulamalarında ve birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Yöntem doğrusal dinamik sistemlerin tahmini için tasarlanmıştır (İnce ve Şahin, 2000; Kalman, 1960; Kalman ve Bucy, 1961). Kalman Filtreleme Yöntemi, prediksyon (prediction, ekstrapolasyon), süzme (filtering) ve yumuşatma (smoothing) olmak üzere üç temel aşamadan oluşmakta ve zamana bağlı bilinmeyen parametrelerin en küçük kareler ilkesine göre kestirildiği uygulamalarda kullanılmaktadır (Cross, 1990; Doğan, 2002).

Kalman Filtreleme Yöntemi,  $t_{i-1}$  periyodunda bilinen hareket parametrelerinden oluşan durum vektörü bilgileri ve  $t_i$  periyodunda yapılmış ölçüler yardımıyla güncel durum vektörünün tahmininde kullanılır. Yani önceki periyodun

hareket parametreleri biliniyorsa diğer periyodun hareket parametreleri bu yöntemle kolayca hesaplanır. Kalman Filtreleme Yöntemi ile doğrusal modelin çözümü için iki zamandaki nokta koordinatları, karesel model de çözüm için ise üç zamandaki nokta koordinatları yeterlidir. Hareket parametrelerinden oluşan durum vektörü; konum ve konumun zamana göre birinci türevi hız, ikinci türevi ivmeden oluşan değişkenlerdir. Tek boyutlu ağlarda yükseklik, hız ve ivmeden oluşan hareket modeli;

$$H_j^{(i)} = H_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1})v_j^{(i-1)} + \frac{1}{2}(t_i - t_{i-1})^2 a_j^{(i-1)} \quad (22)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,  $H_j^{(i)}$  ve  $H_j^{(i-1)}$  sırasıyla (i) ve (i-1) zamanlarındaki j noktasının yükseklikleridir.  $v_j$  ve  $a_j$ ; j noktasının yüksekliklerinin; hızları ve ivmeleridir. Bir noktanın konumunu veren (22) eşitliği, konumun birinci türevi olan hız ve ikinci türevi olan ivme bağıntılarıyla genişletilerek;

$$\begin{aligned} H_j^{(i)} &= H_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1})v_j^{(i-1)} + \frac{1}{2}(t_i - t_{i-1})^2 a_j^{(i-1)} \\ v_j^{(i)} &= v_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1})a_j^{(i-1)} \\ a_j^{(i)} &= a_j^{(i-1)} \end{aligned} \quad (23)$$

eşitliği oluşturulur. (23) eşitliği matris biçiminde ve kısa gösterimle;

$$\bar{Y}_i = \begin{bmatrix} H_j \\ v_j \\ a_j \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} I & I(t_i - t_{i-1}) & I \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{2} \\ 0 & I & I(t_i - t_{i-1}) \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_j \\ v_j \\ a_j \end{bmatrix}_{i-1} \quad (24)$$

$$\bar{Y}_i = T_{i,i-1} \hat{Y}_{i-1} \quad (25)$$

yazılabilir. Burada,  $\bar{Y}_i$ ;  $t_i$  anı için prediksyon (öncül kestirim) durum (yükseklik, hız, ivme) vektörü,  $\hat{Y}_{i-1}$ ;  $t_{i-1}$  anındaki durum (yükseklik, hız, ivme) vektörü,  $T_{i,i-1}$ ; prediksyon (yeni durumu elde etme) matrisi ve I; birim matristir. (25) eşitliği Kalman Filtrelemenin temel denklemi olan Prediksyon (ön kestirim) denklemidir.  $t_i$  ve  $t_{i-1}$  periyotları arasındaki sabit bozucu ivme  $w$  olmak üzere, prediksyon denkleminde bulunan sistem gürültüleri

(modelin rasgele hataları), (25) denkleminde T matrisinin son sütunundaki terimlerden oluşan S gürültü vektörü (28) olarak düşünülür. Böylece prediksyon denklemi ve kovaryans matrisi aşağıdaki gibi olur (Gülal, 1999; Yalçınkaya ve Bayrak, 2003; Welch ve Bishop, 1997).

$$\bar{Y}_i = T_{i,i-1} \hat{Y}_{i-1} + S_{i,i-1} w_{i-1} \quad (26)$$

$$Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} = T_{i,i-1} Q_{\hat{Y}\hat{Y},i-1} T_{i,i-1}^T + S_{i,i-1} Q_{ww,i-1} S_{i,i-1}^T \quad (27)$$

$$S_{i,i-1}^T = \begin{bmatrix} I \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{2} & I(t_i - t_{i-1}) & I \end{bmatrix} \quad (28)$$

Bozucu etkilerin ivme vektörü  $w$  belirsizdir ve kural olarak ölçülemez. Bu nedenle  $w$  için pseudo gözlem vektörü  $w = 0$  alınabilir. Bozucu etkilerin konuma etkisi daha önceki deneylerden yararlanarak belirlenebilir. Ayrıca sistem bozukluğu için örnek olarak tipik değerler aşağıda verilmektedir (Gülal, 2003).

Zorunlu merkezlendirmeli pilye :

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0.2\text{mm}$$

Binalara gömülü nivelman bronzu:

$$\sigma_z = 0.5\text{mm}$$

Optik merkezlendirmeli zemin tesisi:

$$\sigma_x = \sigma_y = 1\text{mm}$$

Pelzer (1987) ve Heunecke (1998) 'a göre buna karşın hız ve ivmedeki etkiler zor tahmin edilir. Bozucu etki ivmesinin kovaryansı bozucu matris S yardımıyla aşağıdaki bağıntıdan türetilebilir (Bayrak ve Yalçınkaya, 2002).

$$Q_{ww,i-1} = 4(t_i - t_{i-1})^{-4} Q_{SS,i-1} \quad (29)$$

Burada  $Q_{SS}$ , noktaların (i-1) periyodundaki konumlarının bozucu bileşenleri için kovaryans matrisidir. i periyodunda yapılmış olan ölçülerin düzeltme denklemi,

$$l_i + v_{l,i} = A_i \hat{Y}_i = \begin{bmatrix} A_{konum,i} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \dot{Y} \\ \ddot{Y} \end{bmatrix}_i \quad (30)$$

ile  $i$  periyodunun prediksyon denklemi (26) birleştirilerek Filtre aşamasının Fonksiyonel ve Stokastik Modeli aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_i \\ l_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ A_i \end{bmatrix} \hat{Y}_i - \begin{bmatrix} v_{\bar{Y},i} \\ v_{l,i} \end{bmatrix} \text{ ve } Q_i = \begin{bmatrix} Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} & 0 \\ 0 & Q_{ll,i} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Kalman kazanç (gain) matrisi olarak adlandırılan matris  $K_i$  aşağıdaki gibi olmak üzere,

$$K_i = Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} A_i^T (Q_{ll,i} + A_i Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} A_i^T)^{-1} = Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} A_i^T D_i^{-1} \quad (32)$$

yeğnime (yenilik) vektörü  $d_i$ ,  $t_i$  anında filtre edilmiş (dengelenmiş) durum vektörü  $\hat{Y}_i$ , prediksyon edilmiş durum vektörünün düzeltilmesi  $v_{\bar{Y},i}$  ve  $t_i$  anındaki ölçülerin düzeltilmesi  $v_{l,i}$  aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} d_i \\ \hat{Y}_i \\ v_{\bar{Y},i} \\ v_{l,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_i & I \\ I - K_i A_i & K_i \\ -K_i A_i & K_i \\ Q_{ll,i} D_i^{-1} A_i & -Q_{ll,i} D_i^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_i \\ l_i \end{bmatrix} \quad (33)$$

Filtre aşaması gerçekte klasik en küçük kareler yöntemiyle dengelemedir. Klasik dengelemeden en önemli farkı; klasik dengelemede ölçü sayısı  $n$  bilinmeyen sayısı  $u'$  dan daha büyük olmak zorundadır. Kalman Filtresinde ise ölçme sayısı bilinmeyenlerin sayısından az olabilir. Filtre, ölçme verileri ve öncül kestirim bilgilerinin ağırlıklı kombinasyonu ile durum bilinmeyenlerinin filtre edilmiş (dengelenmiş) değerlerini hesaplar (Gülal, 1999; Bayrak ve Yalçınkaya, 2002). Pelzer (1986) 'e göre Kalman Filtresi her yeni periyotta tekrar başa dönerek çalışmasına devam eder. Bu tekrarlı yapı Kalman Filtresinin en önemli özelliklerinden biridir. Bunun yanı sıra filtre tekrarlı yapısı içerisinde her öncül kestirimini, o ana kadar yapılmış tüm ölçüleri kullanarak hesaplar (Chui ve Chen, 1998).

### Hareket parametrelerinin anlamlılık testi

Kalman Filtreleme Yöntemi ile hesaplanan konum, hız ve ivme parametrelerinin anlamlı olup olmadıkları test edilmelidir. Her noktanın yüksekliklerinin, konum, hız ve ivme bilinmeyenlerinin testi için test büyüklükleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Yalçınkaya, 2001).

$$T_{h_i} = \frac{|h_i|}{m_{h_i}}, \quad T_{\dot{h}_i} = \frac{|h_i|}{m_{\dot{h}_i}}, \quad T_{\ddot{h}_i} = \frac{|h_i|}{m_{\ddot{h}_i}} \quad (34)$$

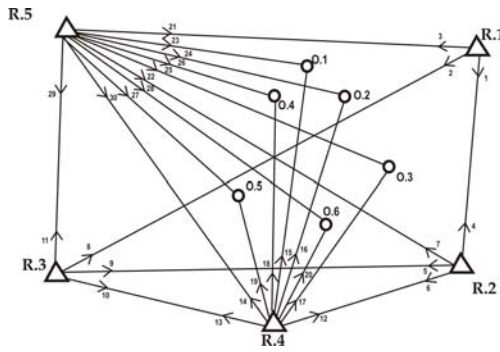
$$T_{h_i} \geq t - Tablo, \quad T_{\dot{h}_i} \geq t - Tablo, \quad T_{\ddot{h}_i} \geq t - Tablo$$

Test büyüklüğü tablo değerinden büyüğe parametrelerin anlamlı olduğu sonucuna varılır.

### SAYISAL UYGULAMA

Bu bölümde, yükseklik, trigonometrik ve iki boyutlu ağların statik modelde deformasyon analizleri S transformasyonu ile kinematik modelde deformasyon analizleri ise Kalman Filtreleme Yöntemi ile yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sayısal uygulamada kullanılan deformasyon ağı, 5 referans 6 obje noktası olmak üzere toplam 11 noktadan oluşan bir ağıdır (Şekil 1). Ağda ki ölçümler Şubat 1998 – Nisan 1999 – Ocak 2000 olmak üzere 3 periyot olarak trigonometrik nivelman yöntemiyle yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan aletler Leica TC-1700 uzunluk ölçeri ve Wild-T2 teodolittir. Leica TC-1700 aletinin uzunluk ölçme hassasiyeti  $m_p = \pm(2+2ppm)$  dir.

Öncelikle her periyot ölçüsü ayrı ayrı serbest dengelenerek her ölçme periyodu için noktaların dengelenmiş yükseklikleri, ters ağırlık matrisleri ve birim ölçünün varyansı hesaplanmıştır. Ağın serbest dengelenmesi Mittermayer Yöntemi ile yapılmıştır. Serbest ağ dengelemesi işleminden sonra uyuşumsuz ölçü testi Pope yöntemine göre yapılmış, değerlendirmenin ardından ölçülerde uyuşumsuz ölçü olmadığı anlaşılmış ve deformasyon analizine geçilmiştir. Statik olarak deformasyonlar, S transformasyon yöntemine göre yapılmış ve analiz sonucunda hareketli noktalar belirlenmiş ve bu adımdan sonra kinematik analize yani Kalman Filtreleme Yöntemine geçilmiştir.



Şekil 1. Deformasyon ağı  
Figure 1. Deformation network

### Deformasyonların belirlenmesi

Ölçülen düşey açı ve eğik uzunluklardan yararlanarak noktalar arasındaki yükseklik farkları hesaplanmıştır. Tek taraflı gözlemler için ölçü ağırlığı  $1/S^2$  karşılıklı gözlemler için  $2/S^2$  alınarak dengeleme yapılmıştır. Yükseklik farklarıyla yapılan dengeleme sonuçları ile düşey açı ve eğik uzunluktan yararlanarak yapılan dengeleme sonuçları Tablo 1. de, iki boyutlu ağ için yapılan dengeleme sonuçları Tablo 2. de verilmiştir.

$t_0 - t_1$  (Şubat1998 – Nisan1999) ve  $t_0 - t_2$  (Şubat1998 – Ocak2000) periyotları arasında S transformasyonu ile yapılan statik deformasyon analiz sonuçları Tablo 3. de verilmiştir.

Tablo 4.'de  $s_0$ ; öncül ortalama hatayı,  $m_0$ ; soncul ortalama hatayı, T; test büyüklüğünü ve q ise F-tablo sınır değerini göstermektedir. Global test yapılarak kurulan modelin geçerli olup olmadığına karar verilmiştir.  $T > q$  ise kurulan hareket modelinin anlamlı olduğuna, tersi durumunda anlamlı olmadığına karar verilmiştir. Hemen ardından ise genişletilmiş parametrelerden hesaplanan soncul ortalama hata  $m_g$  yardımıyla  $T_g$  test büyüklüğü hesaplanarak f-testi tablo değeri ile karşılaştırılmış ve kullanılacak en uygun model seçilmiştir. Bu karşılaştırma sonucunda,  $T_g > q$  ise model bir adım daha genişletilebilmiştir. Tablo 4. incelenirse kurulan model uyumlu ve hareket modelini genişletmek olumludur. Karar verilen uygun model ile hareket parametreleri

hesaplanmış ve sonuçlar istatistiki olarak irdelenmiştir.

Tablo 5. ve Tablo 6. incelendiğinde kinematik modelde Kalman Filtreleme Yöntemi ile yapılan uygulamalar sonucunda bu zaman aralığı içerisinde noktalardan R1, R2, R3 ve R5 hariç diğerlerinde yani R4, O1, O2, O3, O4, O5 ve O6 noktalarında konum değişimi gözlenmiştir. S transformasyonu ile yapılan analiz sonucunda da aynı noktaların sabit kaldığı diğer noktaların hareketli olduğu görülmektedir. Bu yönüyle statik ve kinematik analiz sonuçları uyumludur diyebiliriz. Ayrıca noktaların hızlarındaki ve ivmelerindeki değişimlere bakılırsa hızlarda referans noktaları hariç obje noktalarında yani O1, O2, O3, O4, O5 ve O6 noktalarında anlamlı değişimler söz konusu ivmelerde ise R4, O1, O2, O3, O4, O5 ve O6 noktalarında anlamlı değişimler söz konusudur. Ayrıca yükseklik ağında yapılan uygulama sonuçları ile trigonometrik ağda yapılan uygulama sonuçlarında uyumlu olduğu görülmektedir. Yani her iki uygulamada da kinematik model ile elde edilen yükseklik bilinmeyenlerine bakılırsa, statik model ile ve birbirleriyle uyumları söz konusudur. Kalman Filtreleme Yöntemi sonucunda noktaların hızlarındaki ve ivmelerindeki değişimlere bakılırsa yine aynı sonuçla karşılaşılmaktadır.

Tablo 7. incelendiğinde bu zaman aralığı içerisinde noktalardan R4, O1, O2, O3, O4, O5 ve O6 noktalarının X ve Y yönünde anlamlı değişimler çizdiği görülmektedir. Statik analizde de bu noktalar anlamlı değişim göstermiştir. Ayrıca R1 ve R5 noktalarının X yönünde, R2 ve R3 noktalarının da Y yönünde anlamlı konum değişimlerine rastlanmıştır. Aynı zamanda hız ve ivme değişimlerine baktığımızda R4, O1, O2, O3, O4, O5 ve O6 noktalarında anlamlı değişimler görülmüştür.

Tablo 8., Tablo 9. ve Tablo 10. da  $t_0 - t_1 - t_2$  periyotları arasında yapılan statik ve kinematik model sonucu belirlenen konum, hız ve ivme değerleri ve Şekil 2 de statik ve kinematik analiz sonucu hesaplanan konum değişimlerinin grafik gösterimleri verilmiştir (Doğanalp, 2005).

**Tablo 1.** Serbest ađ dengeleme sonuçları*Table 1. Results of free-network adjustment*

Periyotlar		t <sub>0</sub> = Şubat 1998		t <sub>1</sub> = Nisan 1999		t <sub>2</sub> = Ocak 2000	
		Yükseklik	Trigonometrik	Yükseklik	Trigonometrik	Yükseklik	Trigonometrik
Birim ölçünün ortalama hatası		7.754745 mm	4.654845 cc	8.630812 mm	6.203046 cc	7.202483 mm	5.540896 cc
Dengelenmiş yükseklikler (m)	R1	729.8090	729.8077	729.8733	729.8735	729.8824	729.8828
	R2	755.0146	755.0137	755.0821	755.0832	755.0927	755.0924
	R3	717.7727	717.7733	717.8473	717.8480	717.8546	717.8551
	R4	690.0062	690.0064	690.0686	690.0684	690.0770	690.0774
	R5	748.6272	748.6273	748.6966	748.6967	748.7079	748.7081
	O1	668.6003	668.6004	668.6326	668.6325	668.6361	668.6360
	O2	686.9773	686.9776	686.9845	686.9842	686.9812	686.9812
	O3	690.0777	690.0779	690.1081	690.1075	690.1097	690.1094
	O4	717.4097	717.4099	717.2184	717.2186	717.2050	717.2049
	O5	717.8134	717.8136	717.6524	717.6522	717.6287	717.6285
O6	717.9999	718.0001	717.9441	717.9430	717.9326	717.9322	

**Tablo 2.** İki boyutlu ađ için serbest ađ dengeleme sonuçları*Table 2. Results of free-network adjustment for 2D network*

Periyotlar		t <sub>0</sub> = Şubat 1998		t <sub>1</sub> = Nisan 1999		t <sub>2</sub> = Ocak 2000		
Birim ölçünün ortalama hatası (cc)		m <sub>0</sub> = 3.205658 cc		m <sub>0</sub> = 4.075178 cc		m <sub>0</sub> = 3.286099 cc		
		NN	X	Y	X	Y	X	Y
Dengelenmiş koordinatlar (m)	R1		234398.9168	603149.3419	234398.9058	603149.3342	234398.9072	603149.3347
	R2		233954.6907	603281.3124	233954.6909	603281.3050	233954.6907	603281.3077
	R3		233251.5295	602757.6506	233251.5244	602757.6589	233251.5248	602757.6612
	R4		233609.7107	602898.3165	233609.7257	602898.2897	233609.7370	602898.2763
	R5		233891.0155	602753.2354	233891.0054	602753.2334	233891.0065	602753.2361
	O1		233858.0947	603021.9151	233858.0379	603021.8978	233858.0229	603021.8972
	O2		233918.9594	602975.8715	233918.8764	602975.8413	233918.8313	602975.8249
	O3		233872.6761	603097.3464	233872.6330	603097.3171	233872.6185	603097.3027
	O4		233992.8824	602935.9995	233992.9216	602936.1508	233992.9250	602936.1966
	O5		233946.9054	603056.6016	233946.9803	603056.5970	233946.9921	603056.5837
O6		233898.6868	603177.5020	233898.7667	603177.4678	233898.8120	603177.4718	

**Tablo 3.** Statik deformasyon analiz sonuçları (S transformasyonu)*Table 3. Results of static deformation analysis (S transformation)*

Periyotlar		t <sub>0</sub> - t <sub>1</sub>			t <sub>0</sub> - t <sub>2</sub>		
Uygulama türü	Yükseklik	Trigonometrik	2D	Yükseklik	Trigonometrik	2D	
* Homojenlik testi ve ortak varyans hesabı	F <sub>h</sub> = 1.239 F <sub>t</sub> = 2.818 m <sub>ort</sub> = 8.204mm	F <sub>h</sub> = 1.776 F <sub>t</sub> = 2.124 m <sub>ort</sub> = 5.484cc	F <sub>h</sub> = 1.051 F <sub>t</sub> = 1.905 m <sub>ort</sub> = 3.246cc	F <sub>h</sub> = 1.159 F <sub>t</sub> = 2.818 m <sub>ort</sub> = 7.484mm	F <sub>h</sub> = 1.417 F <sub>t</sub> = 2.124 m <sub>ort</sub> = 5.117cc	F <sub>h</sub> = 1.616 F <sub>t</sub> = 1.905 m <sub>ort</sub> = 3.666cc	
** Global test	F = 2406.084 F <sub>t</sub> = 2.297	F = 1162.879 F <sub>t</sub> = 2.077	F = 1203.715 F <sub>t</sub> = 1.782	F = 3628.155 F <sub>t</sub> = 2.297	F = 1804.191 F <sub>t</sub> = 2.077	F = 539.354 F <sub>t</sub> = 1.782	
Sırasıyla deformasyona uğrayan noktalar	O4,O5,O6, O2,O1,O3,R4	O4,O5,O6, O2,O1,O3,R4	O4,O2,O6, O5,R4,O1,O3	O4,O5,O6, O2,O1,O3,R4	O4,O5,O6, O2,O1, O3, R4	O4,O2,O1,R4, O6,O5,O3,R1	
* F <sub>h</sub> < F <sub>t</sub> ise % 95 ihtimal ile varyanslar homojendir.							
** F > F <sub>t</sub> ise % 95 istatistik ile ağda deformasyon vardır.							



**Tablo 4.** Kinematik modelin istatistik test sonuçları*Table 4. Results of statistical test of kinematic model*

Global test				Geniştirilmiş modelin testi			
	Yükseklik	Trigonometrik	2D		Yükseklik	Trigonometrik	2D
s <sub>0</sub>	7.7547	4.6548	3.2057	s <sub>0</sub>	6.3833	5.1539	3.0760
m <sub>0</sub>	6.3833	5.1539	3.0760	m <sub>g</sub>	613.4384	274.5349	148.5997
T	1.4759	1.2259	1.0861	T <sub>g</sub>	9235.3170	2837.4560	2333.7503
q	2.2829	2.0391	1.7053	q	2.2585	2.2585	1.7889

*Not : Karar = Konum + Hız + İvme*

**Tablo 5.** Yükseklik ağında konum, hız ve ivme için test büyüklükleri*Table 5. The test values for position, velocity and acceleration in levelling network*

NN	Konum	Anlamlılık	Hız	Anlamlılık	İvme	Anlamlılık
R1	2.0299	[-]	0.1081	[-]	0.0131	[-]
R2	1.9250	[-]	0.0119	[-]	0.0027	[-]
R3	1.9427	[-]	0.1806	[-]	0.0062	[-]
R4	2.1016	[+]	1.7041	[-]	10.3865	[+]
R5	1.9849	[-]	0.0010	[-]	0.0041	[-]
O1	2.1895	[+]	5.8804	[+]	22.9491	[+]
O2	2.9406	[+]	12.3451	[+]	51.7744	[+]
O3	2.3790	[+]	6.9388	[+]	22.8784	[+]
O4	4.4836	[+]	39.8820	[+]	172.2072	[+]
O5	5.0747	[+]	39.7618	[+]	135.4618	[+]
O6	4.2965	[+]	23.7423	[+]	67.9591	[+]

*q = 2.0345, [-] = anlamlı değildir, [+] = anlamlıdır*

**Tablo 6.** Trigonometrik ağda konum, hız ve ivme için test büyüklükleri*Table 6. The test values for position, velocity and acceleration in trigonometric levelling network*

NN	Konum	Anlamlılık	Hız	Anlamlılık	İvme	Anlamlılık
R1	1.9815	[-]	0.0974	[-]	0.0129	[-]
R2	1.8534	[-]	0.0876	[-]	0.0038	[-]
R3	1.8978	[-]	0.1822	[-]	0.0042	[-]
R4	2.0471	[+]	1.3298	[-]	6.3024	[+]
R5	1.9280	[-]	0.0064	[-]	0.0048	[-]
O1	2.1170	[+]	4.6144	[+]	14.2591	[+]
O2	2.8491	[+]	9.6583	[+]	31.4764	[+]
O3	2.2970	[+]	5.4095	[+]	14.7904	[+]
O4	4.3491	[+]	30.8690	[+]	105.7075	[+]
O5	4.9225	[+]	30.6950	[+]	86.6387	[+]
O6	4.1587	[+]	18.1703	[+]	44.4591	[+]

*q = 2.0345, [-] = anlamlı değildir, [+] = anlamlıdır*

**Tablo 7.** İki boyutlu ağda konum, hız ve ivme için test büyüklükleri  
**Table 7.** The test values for position, velocity and acceleration in 2D network

NN	Konum	Anlamlılık	Hız	Anlamlılık	İvme	Anlamlılık
R1X	5.2613	[+]	1.1501	[-]	0.8687	[-]
R1Y	1.8435	[-]	0.1139	[-]	0.0790	[-]
R2X	0.9868	[-]	0.5315	[-]	0.0356	[-]
R2Y	3.7689	[+]	1.1141	[-]	0.0177	[-]
R3X	1.7662	[-]	1.4669	[-]	0.0860	[-]
R3Y	3.7224	[+]	0.4750	[-]	0.0467	[-]
R4X	4.3135	[+]	11.7818	[+]	15.1249	[+]
R4Y	7.5924	[+]	24.2137	[+]	31.1219	[+]
R5X	4.1271	[+]	0.7156	[-]	0.0305	[-]
R5Y	1.1639	[-]	0.4896	[-]	0.0034	[-]
O1X	2.8485	[+]	24.1038	[+]	29.4206	[+]
O1Y	2.7299	[+]	7.3623	[+]	8.7150	[+]
O2X	13.4445	[+]	46.4308	[+]	59.1046	[+]
O2Y	7.4536	[+]	13.8427	[+]	17.4742	[+]
O3X	3.0028	[+]	15.5941	[+]	19.1633	[+]
O3Y	5.7604	[+]	10.2231	[+]	12.8217	[+]
O4X	4.1118	[+]	17.5968	[+]	20.6241	[+]
O4Y	13.3343	[+]	56.6040	[+]	68.0938	[+]
O5X	6.1081	[+]	29.2257	[+]	34.6814	[+]
O5Y	4.6137	[+]	2.4784	[+]	3.9579	[+]
O6X	14.2152	[+]	30.5850	[+]	38.3416	[+]
O6Y	2.3272	[+]	5.9687	[+]	6.7301	[+]

q = 1.9966, [-] = anlamlı değildir, [+] = anlamlıdır

**Tablo 8.** Yükseklik ağında statik ve kinematik analiz sonucu hesaplanan yükseklik, hız ve ivme değerleri

**Table 8.** Position, velocity and acceleration of the network points determined with static and kinematic model in levelling network

Şubat 1998 – Nisan 1999 – Ocak 2000				
Statik Model		Kinematik Model		
NN	Yük.Bil. (cm)	Yük.Bil. (cm)	Hız (cm / ay)	İvme (cm / ay <sup>2</sup> )
R1	7.345	7.0718	0.0073	-0.0000
R2	7.809	6.7044	-0.0008	0.0000
R3	8.191	6.7675	-0.0122	0.0000
R4	7.078	7.3201	-0.1166	-0.0057
R5	8.072	6.9131	-0.0001	0.0000
O1	3.580	7.6309	-0.4141	-0.0207
O2	0.391	10.2468	-0.8638	-0.0434
O3	3.199	8.2938	-0.4986	-0.0249
O4	-20.466	-15.6249	-2.7911	-0.1435
O5	-18.475	-17.6914	-2.8509	-0.1452
O6	-6.722	-14.9869	-1.7536	-0.0891

**Tablo 9.** Trigonometrik ağda statik ve kinematik analiz sonucu hesaplanan yükseklik, hız ve ivme değerleri

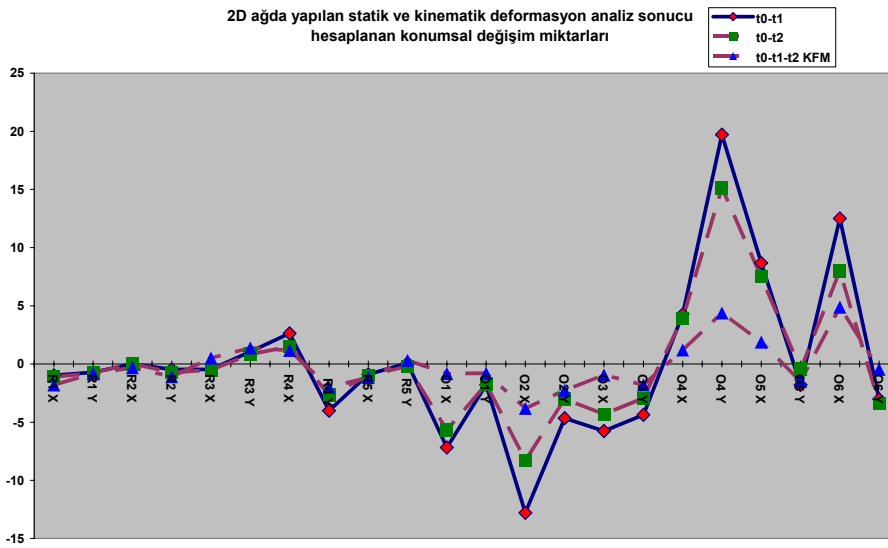
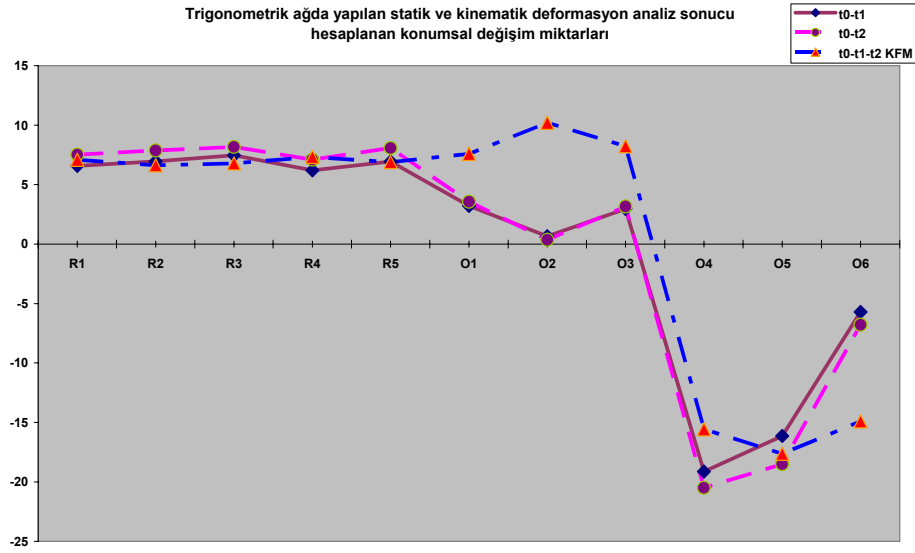
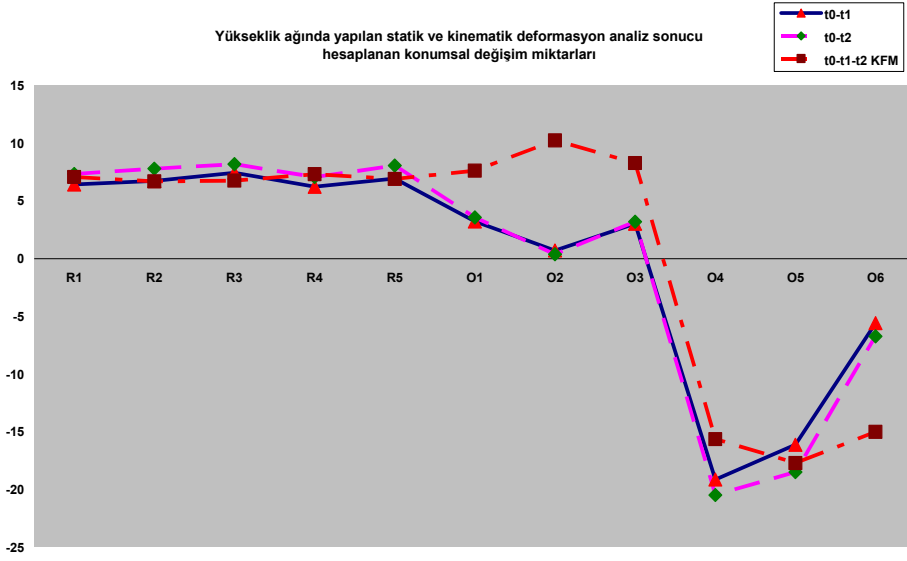
*Table 9. Position, velocity and acceleration of the network points determined with static and kinematic model in trigonometric levelling network*

Şubat 1998 – Nisan 1999 – Ocak 2000				
Statik Model		Kinematik Model		
NN	Yük.Bil. (cm)	Yük.Bil. (cm)	Hız (cm / ay)	İvme (cm / ay <sup>2</sup> )
R1	7.513	7.0911	0.0131	-0.0000
R2	7.869	6.6290	-0.0118	0.0000
R3	8.171	6.7907	-0.0246	0.0000
R4	7.095	7.3230	-0.1834	-0.0188
R5	8.081	6.8961	-0.0009	0.0000
O1	3.558	7.5801	-0.6668	-0.0691
O2	0.356	10.1999	-1.3864	-0.1450
O3	3.153	8.2282	-0.8006	-0.0830
O4	-20.499	-15.5695	-4.4183	-0.4753
O5	-18.511	-17.6325	-4.5377	-0.4824
O6	-6.787	-14.9082	-2.7879	-0.2960

**Tablo 10.** İki boyutlu ağda statik ve kinematik analiz sonucu hesaplanan konum, hız ve ivme değerleri

*Table 10. Position, velocity and acceleration of the network points determined with static and kinematic model in 2D network*

Şubat 1998 – Nisan 1999 – Ocak 2000				
Statik Model		Kinematik Model		
NN	Konum (cm)	Konum (cm)	Hız (cm / ay)	İvme (cm / ay <sup>2</sup> )
R1 X	-1.107	-1.8017	-0.0416	-0.0017
R1 Y	-0.769	-0.8452	0.0045	0.0002
R2 X	0.018	-0.3228	-0.0065	-0.0000
R2 Y	-0.741	-1.0892	-0.0121	-0.0000
R3 X	-0.508	0.5068	0.0167	0.0000
R3 Y	0.823	1.3773	0.0064	0.0000
R4 X	1.498	1.1569	0.4650	0.0445
R4 Y	-2.684	-2.0061	-0.7374	-0.0702
R5 X	-1.007	-1.1590	-0.0075	-0.0000
R5 Y	-0.195	0.3116	0.0049	-0.0000
O1 X	-5.683	-0.8286	-1.1842	-0.1085
O1 Y	-1.735	-0.7952	-0.4122	-0.0372
O2 X	-8.298	-3.8202	-2.0550	-0.1955
O2 Y	-3.014	-2.2736	-0.8151	-0.0783
O3 X	-4.307	-0.9412	-0.9322	-0.0864
O3 Y	-2.936	-1.8063	-0.7330	-0.0703
O4 X	3.914	1.2093	0.9672	0.0857
O4 Y	15.134	4.3769	3.6169	0.3305
O5 X	7.490	1.8864	1.7524	0.1571
O5 Y	-0.459	-1.5077	-0.1788	-0.0218
O6 X	7.991	4.8850	2.1738	0.2062
O6 Y	-3.421	-0.4532	-0.5311	-0.0459



Şekil 2. Statik ve kinematik deformasyon analiz sonucu hesaplanan konumsal değişim miktarları  
 Figure 2. Displacement values determined with static and kinematic model

## SONUÇLAR

Güncel yer kabuğu hareketlerinin jeodezik yöntemlerle belirlenmesinde statik, kinematik veya dinamik modeller kullanılabilir. Düşey yöndeki yer kabuğu hareketleri genel olarak yavaştır. Deformasyon ölçümüne başlamadan önce deformasyon ağının kurulacağı bölgenin karakteristik özellikleri iyi bilinmeli ve ona göre sağlam bir deformasyon ağı kurulmalıdır. Kurulan ağ üzerinde ölçümler hassas olarak yapılmalı ve bu yüzden ağ iyi korunmalıdır.

Genel kinematik modelde hareket parametrelerinin (koordinat veya konum, hız, ivme bilinmeyenleri) aynı anda belirlenebilmesi için fazla periyotta yapılmış ölçülere gereksinim vardır. Daha öncede söz edildiği gibi her noktanın hareket parametrelerinin dengeli olarak hesaplanabilmesi için,  $t_0$  periyodundaki ölçülerin yanı sıra yüksekliğin belirlenmesi için  $t_1$ , hızın belirlenmesi için  $t_2$ , ivmenin belirlenmesi için  $t_3$  ve dengeleme yapılabilmesi için de  $t_4$  periyodunda yapılmış ölçülere gereksinim vardır. Görüldüğü gibi hareket parametrelerinin dengeli bir biçimde hesabı için en az beş periyot ölçüye gereksinim vardır. Kalman Filtreleme Yönteminde ise hareket parametreleri az sayıda ölçme periyodu kullanılarak belirlenebilmektedir. Kalman Filtreleme Yöntemi ile iki periyot ölçü ile noktaların konumsal bilgilerinin yanında hızları, üç periyot ölçü ile noktaların konum ve hızlarının yanında ivmeleri de hesaplanabilmektedir.

Stokastik modelinin iyi kurulması halinde, Kalman Filtreleme Yönteminde her türlü doğrusal ve doğrusal olmayan değişimler belirlenebilmekte ve deformasyon araştırmaları için uygun bir yöntem olduğu görülmektedir. Ayrıca statik model sonuçları ile uyumlu oluşu Kalman Filtreleme Yönteminin üstün yönüdür.

Kalman Filtreleme Yönteminin bu avantajları yanında bir de dezavantajı bulunmaktadır. Yöntemde, prediksyonla çözüm yapıldığından ölçülerin belirli bir oranda ölçü hataları ile yüklü oluşu ve bir önceki zamandaki durum vektörünün hatalı olması nedeniyle kinematik davranışlar, sınırsız biçimde ekstrapolasyonla genişletilmemelidir. Bir başka

ifadeyle çok sayıda prediksyon yapılırsa ölçü hatalarının birikerek bizi yanlış sonuca götürmesi muhtemeldir (Bayrak ve Yalçınkaya, 2002).

Statik deformasyon analiz sonuçlarına göre  $t_0-t_1$  (Şubat 1998- Nisan 1999) periyotları arasında yükseklik, trigonometrik ve iki boyutlu ağda **O1, O2, O3, O4, O5, O6** ve **R4** noktalarında anlamlı konum değişimleri kaydedilmiştir. Benzer şekilde  $t_0-t_2$  (Şubat 1998 - Ocak 2000) periyotları arasında yükseklik ve trigonometrik ağda **O1, O2, O3, O4, O5, O6** ve **R4**, iki boyutlu ağda ise bu noktalara ilave olarak **R1** noktasında anlamlı konum değişimleri kaydedilmiştir (Tablo 3).

Kinematik deformasyon analiz sonuçlarına göre  $t_0-t_1-t_2$  (Şubat 1998 - Nisan 1999 - Ocak 2000) periyotları arasında yükseklik ve trigonometrik ağda **O1, O2, O3, O4, O5, O6** ve **R4** noktalarında anlamlı konum değişimi, **O1, O2, O3, O4, O5** ve **O6** noktalarında anlamlı hız değişimi ve **O1, O2, O3, O4, O5, O6** ve **R4** noktalarında anlamlı ivme değişimlerine rastlanmıştır (Tablo 5, Tablo 6). Benzer şekilde iki boyutlu ağ sonuçlarına bakılırsa **O1, O2, O3, O4, O5, O6** ve **R4** noktalarında **X** ve **Y** yönünde, **R1** ve **R5** noktalarında **X** yönünde, **R2** ve **R3** noktalarında **Y** yönünde anlamlı konum değişimi, **O1, O2, O3, O4, O5, O6** ve **R4** noktalarında **X** ve **Y** yönünde anlamlı hız ve ivme değişimlerine rastlanmıştır (Tablo 7).

Sayısal uygulamalarda; genel olarak **O1, O2, O3, O4, O5, O6** ve **R4** noktalarının bütün uygulamalar sonucunda statik olarak deformasyona uğradıkları ayrıca bu noktaların kinematik olarak yapılan analiz sonucunda konum, hız ve ivmelerinin de anlamlı oldukları gözlemlenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından 2004/178 nolu proje ile desteklenmiştir. BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederiz. Bu yayın ilk yazarın Yüksek Lisans Tez çalışmasından olup Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- Bayrak, T., Yalçınkaya, M., 2002, GPS İle İzlenen Jeodezik Deformasyon Ağlarında Kinematik Hareketlerin ve Hareket Yüzeylerinin Belirlenmesi, *TUJK Tektonik ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı*, 10-12 Ekim 2002, İznik
- Chui, C.K., Chen, G., 1998, *Kalman Filtering With Real-Time Applications*, Third Edition, Springer
- Cross, P.A., 1990, *Advanced Least Squares Applied to Position Fixing Working Papers*, North East London Polytechnic, Dept. of Surveying, 205pp
- Demirel, H., 1987, S Transformasyonu ve Deformasyon Analizi, *Türkiye 1. Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 593-608, Ankara
- Doğan, U., 2002, 17 Ağustos 1999 İzmit Depreminden Kaynaklanan Deformasyonların Kinematik Modellerle Araştırılması, *Doktora Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Doğanalp, S., 2005, Kinematik Modelde Kalman Filtreleme Yöntemi ile Deformasyon Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, SÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- Gülal, E., 2003, Yüksek Lisans Ders Notları, YTÜ, İstanbul
- Gülal, E., 1999, Kalman Filtreleme Tekniğinin Deformasyon Analizine Uygulanması, YTÜ İnşaat Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Bölümü, *Araştırma Makalesi*, Yıldız – İstanbul
- Heunecke, O., Pelzer, H., April 1998, A New Terminology for Deformation Analysis Models Based on System Theory, *IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering in Eisenstadt*, 20-22
- İnal, C., 2000, Lisans ve Yüksek Lisans Ders Notları, SÜ, Konya
- İnal, C., Ceylan, A., 2002, S Transformasyonu Uygulama Alanları, *Selçuk Teknik Online Dergisi*, ISSN 1302-6178
- İnce, C.D., Şahin, M., 2000, Real – Time Deformation Monitoring with GPS and Kalman Filter, *Earth Planets Space*, 52, 837-840
- Kalman, R. E., 1960, A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Journal of Basic Engineering*, Vol. 82D, 35-45
- Kalman, R. E. and Bucy, R.S., 1961, New Results in Linear Filtering and Prediction Theory, *Journal of Basic Engineering*, 83D, 95-108
- Pelzer, H., 1986, Application of Kalman- and Wiener-Filtering on the Determination of Vertical Movements, *The Symposium on Height Determination on Recent Vertical Crustal Movements in Western Europa*, Hannover, Determination of Heights and Height Changes, 539-555
- Pelzer, H., 1987, *Deformationsuntersuchungen auf der Basis Kinematischer Bewegungsmodelle*, AVN, 94, 2 (1987) 49-62
- Welch, G., Bishop, G., 1997, An Introduction to the Kalman Filter, *University of North Carolina at Chapel Hill*, Department of Computer Science
- Yalçınkaya, M., Bayrak, T., 2003, Dynamic Model For Monitoring Landslides with Emphasis on Underground Water in Trabzon Province, Northeastern Turkey, *Journal of Surveying Engineering*
- Yalçınkaya, M., 2001, Üç Boyutlu Ağlarda Kalman Filtreleme Tekniğinin Uygulanması = MATLAB ve FORTRAN Programlama Dilleriyle Çözümü, *KTÜ Araştırma Raporları*, Trabzon