

YÜKSEKLİK AĞLARINDA θ^2 ÖLÇÜTÜ VE KALMAN FİLTRELEME YÖNTEMİ İLE DEFORMASYON ANALİZİ

Serkan DOĞANALP, Bayram TURGUT, Cevat İNAL

Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri
Mühendisliği Bölümü, Konya

Özet

Deformasyon analizi seçilen modele göre farklılık göstermektedir. Deformasyon araştırmasında sadece geometrik değişimler belirlenmek istendiğinde Ortalama Aykırılıklar Yöntemi, geometrik değişimlerle birlikte hareketin hızı ve ivmesinin belirlenmesi istendiğinde ise Kalman Filtreleme Yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada 5 noktalı bir yükseklik ağında yapılan üç periyot ölçü; statik modelde Ortalama Aykırılıklar Yöntemi, kinematik modelde ise Kalman Filtreleme Yöntemi ile değerlendirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Statik; Kinematik; Kalman Filtreleme

DEFORMATION ANALYSIS BY KALMAN FILTER METHOD AND θ^2 - CRITERIATION IN LEVELLING NETWORK

Abstract

Deformation Analysis show to difference according to choosen model. In finding of deformation, if you want to determination only geometric changing, you can use θ^2 - criteria, however, if you want to determination both geometric changing and velocity and accerelation, you can use Kalman Filter Method. In this study, deformation measurements were performed three period in levelling network with five points. We have compared θ^2 - criteria in static model and Kalman Filter Method in kinematic model.

Keywords: Static; Kinematic; Kalman Filter

1. Giriş

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 ölçmelerinin temel konuları arasında yer almıştır. Objelerin şekil, boyut ve yer değişimleri bu analizler yardımıyla belirlenmekte ve yorumlanmaktadır.

Bu çalışmada objelerdeki geometrik değişimlerin araştırılmasında Ortalama Aykırılıklar Yöntemi, geometrik değişimlerle birlikte hız ve ivmenin de belirlenmesinde ise Kalman Filtreleme Yöntemi kullanılmıştır.

2. Ortalama Aykırılıklar Yöntemiyle deformasyon analizi

Bu yöntemle deformasyon analizinde, her bir periyot ölçüsü ayrı ayrı serbest dengelenir, uyuşumsuz ölçüler ayklanır ve her periyot için birim ağırlıklı ölçünün karesel ortalama hataları m_1 ve m_2 hesaplanır. Periyot ölçülerinin uyuşumlu olduğu test edildikten sonra,

periyot ölçülerinin birim ağırlıklı varyanslarının birleştirilmesiyle daha uygun bir varyans değeri;

$$m^2 = \frac{f_1 m_1^2 + f_2 m_2^2}{f_1 + f_2} \quad (1)$$

eşitliği ile hesaplanır ve bundan sonra hesaplamalarda bu varyans değeri kullanılır. (1) eşitliğindeki f_1 ve f_2 1. ve 2. periyot dengelemelerindeki fazla ölçü sayılarıdır. 1. ve 2.

periyot dengelemeleri sonucu hesaplanan \hat{X}_1, \hat{X}_2 bilinmeyenler vektörü ve Q_1, Q_2 ağırlık katsayıları matrisinden yararlanarak d fark vektörü ile Q_d ağırlık katsayıları matrisi hesaplanır.

$$d = \hat{X}_1 - \hat{X}_2 \quad (2)$$

$$P_d = Q_d^+ = (Q_1 + Q_2)^+ \quad (3)$$

t_1 ve t_2 dönemleri arasında ölçü noktalarındaki değişimleri anlamak için sıfır hipotezi;

$$H_0 : E(d) = 0 \quad (4)$$

ileri sürülür. Sıfır hipotezi geçerli ise d farkı ölçü hatalarından ileri gelmektedir. Sıfır hipotezinin geçerliliğinde Fischer dağılımına uyan

$$F_{n,f} = \frac{d^T Q_d^+ d}{h m^2} = \frac{\theta^2}{m^2} \quad (5)$$

test büyüklüğü hesaplanır. Burada ;

h : d vektöründeki bağımsız bileşken sayısıdır.

d vektöründeki bileşenlerin sayısı u ve Q_1, Q_2 ağırlık katsayıları matrislerinden her ikisinin rang defekti d ise;

$$h = u - d \quad (6)$$

dir. θ^2 büyüklüğüne koordinat farklarından dönüştürülen ölçü duyarlılığı olduğundan “ortalama aykırılık” da denmektedir. (5) eşitliği ile hesaplanan test büyüklüğü, $F_{h, f_1 + f_2, 1 - \alpha}$ tablo değeri ile karşılaştırılır. Test büyüklüğü tablo değerinden büyükse H_0 hipotezi red edilir. Bu durumda elde edilen koordinat farkları d rastlantı niteliğinde değildir. Başka bir deyişle ağda anlamlı deformasyon meydana gelmiştir. Bu test sonucunda ağın tümünde ya da bir bölümünde deformasyon olup olmadığına karar verilebildiği için bu teste “Global Test” denilmektedir [1].

Global test sonucu ağda deformasyon olduğuna karar verilmişse deformasyonların yerelleştirilmesi işlemine geçilir. Bu çalışmada sabit obje ayırımı yapılmadan yerelleştirme yapılmıştır. Bu durumda, her ele alınan ağ noktası hareketli, diğer noktalar sabit varsayılarak d fark vektörü d_B ve d_F olmak üzere iki alt vektöre ayrılır. Burada d_B hareketli kabul edilen noktadaki yükseklik farkları, d_F sabit kabul edilen öteki noktalardaki yükseklik farklarını göstermektedir. Benzer şekilde P_d matrisi uygun bölümlere ayrılır.

$$\underline{d} = \begin{bmatrix} \underline{d}_F \\ \dots \\ \underline{d}_B \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \underline{P}_d = \begin{bmatrix} \underline{P}_{FF} & \vdots & \underline{P}_{FB} \\ \dots & \dots & \dots \\ \underline{P}_{BF} & \vdots & \underline{P}_{BB} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Hareketli kabul edilen her noktanın toplam aykırılıktaki hissesi;

$$\bar{d}_B = \underline{d}_B + \underline{P}_{BB}^{-1} \underline{P}_{BF} \underline{d}_F \quad (8)$$

$$\theta_j^2 = \frac{\bar{d}_B^T \underline{P}_{BB} \bar{d}_B}{h_B} \quad (9)$$

hesaplanır. Paydada bulunan h_B , \underline{d}_B vektörünün içerdiği bileşen sayısıdır. Yükseklik ağlarında $h_B = 1$ dir. θ_j^2 değerleri arasında ortalama aykırılığı en büyük olan noktada “s = 1- α ” istatistik güvenle deformasyon olduğuna karar verilir. Diğer noktalarda önemli deformasyonların olup olmadığını araştırmak için;

$$\bar{\underline{P}}_{FF} = \underline{P}_{FF} - \underline{P}_{FB} \underline{P}_{BB}^{-1} \underline{P}_{BF} \quad (10)$$

$$\theta_{j \text{ kalan}}^2 = \frac{\underline{d}_F^T \bar{\underline{P}}_{FF} \underline{d}_F}{h_B} \quad (11)$$

hesaplanır. k-1 sayıda nokta için global test yapılır. Bu genel test sonucu başka noktalarda da deformasyon olduğuna karar verilirse, deformasyona uğrayan nokta \underline{d}_F vektöründen atılır. Bu işlem θ_{kalan}^2 / m^2 oranı, F dağılım tablosundan alınan sınırlardan küçük oluncaya kadar sürdürülür. Böylece yer değiştiren noktaların belirlenmesi işlemi sona erer.

3. Kalman Filtreleme Yöntemi

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 [2,3,4]. 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 [5,6].

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. Bir boyutlu ağlara göre konum, hız ve ivmeden oluşan hareket modeli;

$$H_j^{(i)} = H_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1})v_j^{(i-1)} + \frac{1}{2}(t_i - t_{i-1})^2 a_j^{(i-1)} \quad (12)$$

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 (12) eşitliği, konumun zamana göre birinci türevi olan hız ve ikinci türevi olan ivme bağıntılarıyla genişletilerek;

$$\begin{aligned} H_j^{(i)} &= H_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1})v_j^{(i-1)} + \frac{1}{2}(t_i - t_{i-1})^2 a_j^{(i-1)} \\ v_j^{(i)} &= v_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1})a_j^{(i-1)} \\ a_j^{(i)} &= a_j^{(i-1)} \end{aligned} \quad (13)$$

eşitliği oluşturulur. (13) eşitliği matris biçiminde ve kısa gösterimle;

$$\bar{Y}_i = \begin{bmatrix} H_j \\ v_j \\ a_j \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} I & I(t_i - t_{i-1}) & I \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{2} \\ 0 & I & I(t_i - t_{i-1}) \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_j \\ v_j \\ a_j \end{bmatrix}_{i-1} \quad (14)$$

$$\bar{Y}_i = T_{i,i-1} \hat{Y}_{i-1} \quad (15)$$

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.

(15) eşitliği Kalman Filtrelemenin temel denklemi olan prediksyon (ön kestirim) denklemdir. t_i ve t_{i-1} periyotları arasındaki sabit bozucu ivme w olmak üzere, prediksyon denkleminde bulunan sistem gürültüleri (modelin rasgele hataları), (15) denkleminde T matrisinin son sütunundaki terimlerden oluşan S gürültü vektörü (18) olarak düşünülür. Böylece prediksyon denklemi ve kovaryans matrisi aşağıdaki gibi olur [7,8,9].

$$\bar{Y}_i = T_{i,i-1} \hat{Y}_{i-1} + S_{i,i-1} w_{i-1} \quad (16)$$

$$Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} = T_{i,i-1} Q_{\hat{Y}\hat{Y},i-1} T_{i,i-1}^T + S_{i,i-1} Q_{ww,i-1} S_{i,i-1}^T \quad (17)$$

$$S_{i,i-1}^T = \begin{bmatrix} I \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{2} & I(t_i - t_{i-1}) & I \end{bmatrix} \quad (18)$$

Bozucu etkilerin ivme vektörü w belirsizdir ve kural olarak ölçülemez. Bu nedenle 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 [10].

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 [11] ve Heunecke [12] 'e göre buna karşın hız ve ivmedeki etkiler zor tahmin edilir. Bozucu etki ivmesinin kovaryansı bozucu matris S yardımıyla aşağıdaki bağıntıdan türetilebilir [13].

$$Q_{ww,i-1} = 4(t_i - t_{i-1})^{-4} Q_{SS,i-1} \quad (19)$$

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

$$l_i + v_{l,i} = A_i \hat{Y}_i = \begin{bmatrix} A_{konum,i} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \cdot \\ Y \\ \cdot \\ Y \end{bmatrix}_i \quad (20)$$

ile i periyodunun prediksyon denklemi (16) birleştirilerek filtre aşamasının fonksiyonel ve stokastik modeli aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_i \\ l_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \\ A_i \end{bmatrix} \hat{Y}_i - \begin{bmatrix} v_{\bar{Y},i} \\ v_{l,i} \end{bmatrix} \text{ ve } Q_i = \begin{bmatrix} Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} & 0 \\ 0 & Q_{ll,i} \end{bmatrix} \quad (21)$$

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

$$K_i = Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} A_i^T (Q_{ll,i} + A_i Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} A_i^T)^{-1} = Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} A_i^T D_i^{-1} \quad (22)$$

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.

$$\begin{bmatrix} d_i \\ \hat{Y}_i \\ v_{\bar{Y},i} \\ v_{l,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_i & I \\ I - K_i A_i & K_i \\ -K_i A_i & K_i \\ Q_{ll,i} D_i^{-1} A_i & -Q_{ll,i} D_i^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_i \\ l_i \end{bmatrix} \quad (23)$$

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 [7,13]. Pelzer [14]'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 [15].

3.1. 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 [16].

$$T_{h_i} = \frac{|h_i|}{m_{h_i}}, \quad T_{\cdot h_i} = \frac{|\dot{h}_i|}{m_{\cdot h_i}}, \quad T_{\cdot\cdot h_i} = \frac{|\ddot{h}_i|}{m_{\cdot\cdot h_i}} \quad (24)$$

$$T_{h_i} \geq t-Tablo, \quad T_{\cdot h_i} \geq t-Tablo, \quad T_{\cdot\cdot h_i} \geq t-Tablo$$

Burada

$T_{h_i}, T_{\cdot h_i}, T_{\cdot\cdot h_i}$: Sırasıyla noktaların konum, hız ve ivmelerine ait test büyüklüklerini,

$\dot{h}_i, \ddot{h}_i, h_i$: Yeni durum vektöründe sırasıyla noktaların konum, hız ve ivmelerine ait değişim büyüklüklerini,

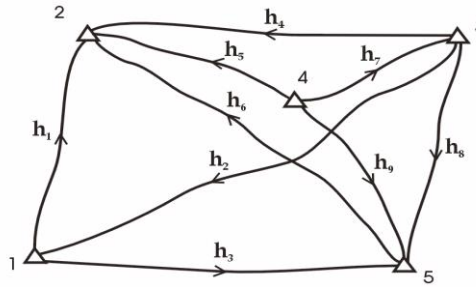
$m_{h_i}, m_{\cdot h_i}, m_{\cdot\cdot h_i}$: Sırasıyla noktaların konum, hız ve ivmelerine ait $m_0\sqrt{(Q_{xx})_{ii}}$ değerlerini,

$t-Tablo$: $t_{(f,1-\alpha/2)}$ değerini ve f ise serbestlik derecesini

göstermektedir. (24) eşitliği ile hesaplanan test büyüklükleri tablo değerinden büyükse parametrelerin anlamlı olduğu sonucuna varılır.

4. Sayısal uygulama

Deformasyon ağı, Şekil 1. den de görüldüğü üzere beş noktadan oluşan bir nivelman ağıdır. Ağdaki ölçümler Şubat 1998 – Temmuz 1998 – Nisan 1999 olmak üzere 3 periyot olarak trigonometrik nivelman yöntemiyle yapılmıştır.



Şekil 1. Deformasyon ağı

Öncelikle periyot ölçüleri ayrı ayrı serbest dengelenmiş, uyumsuz ölçüler Pope yöntemiyle ayıklanmış ve nokta yükseklikleri ile ortalama hataları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Tablo 1. de verilmektedir.

Tablo 1. Serbest ağ dengeleme sonuçları

Periyotlar	t ₀ (Şubat 1998)	t ₁ (Temmuz 1998)	t ₂ (Nisan 1999)
------------	-----------------------------	------------------------------	-----------------------------

Birim ölçünün ortalama hatası (mm)		$m_0 = \mp 3.92$	$m_0 = \mp 4.72$	$m_0 = \mp 4.54$
Dengelenmiş yükseklikler (m)	H ₁	700.0005	699.9942	699.9969
	H ₂	725.2063	725.2065	725.2073
	H ₃	687.9643	687.9701	687.9711
	H ₄	660.1981	660.1956	660.1885
	H ₅	718.8182	718.8210	718.8236

Deformasyon araştırması statik modelde ortalama aykırılıklar yöntemine (θ^2 ölçütü), kinematik modelde ise Kalman Filtreleme yöntemine göre yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tablo 2. Test ağında ortalama aykırılıklar yöntemiyle yapılan deformasyon analizi

Periyotlar	$t_0 - t_1$	$t_0 - t_2$
Homojenlik testi ve ortak varyans hesabı ($F_h < F_t$ ise % 95 ihtimal ile varyanslar homojendir.)	$F_h = 1.4503$ $F_t = 5.05$ $m_{ort} = \mp 4.34$ mm	$F_h = 1.3454$ $F_t = 5.05$ $m_{ort} = \mp 4.24$ mm
Global test ($F > F_t$ ise % 95 istatistik ile ağda deformasyon vardır.)	$F = 4.5631$ $F_t = 3.48$	$F = 13.5637$ $F_t = 3.48$
θ_i^2 (θ_{max}^2 olan noktada deformasyon vardır.)	$\theta_1^2 = 161.0790$ (θ_{max}^2) $\theta_2^2 = 3.7321$ $\theta_3^2 = 149.1340$ $\theta_4^2 = 120.8641$ $\theta_5^2 = 60.1384$	$\theta_1^2 = 116.9655$ $\theta_2^2 = 16.7712$ $\theta_3^2 = 290.7718$ $\theta_4^2 = 787.0556$ (θ_{max}^2) $\theta_5^2 = 279.3653$
Geriye kalan noktaların testi ($F < F_t$ ise geriye kalan noktalarda deformasyon yoktur.)	$F = 2.4223$ $F_t = 3.48$	$F = 2.6351$ $F_t = 3.48$

Statik deformasyon analiz sonuçlarından görüldüğü üzere sadece noktalara ait yükseklik değişimlerinin anlamlı olup olmadıkları saptanabilmiştir. Statik deformasyon analizinin ardından hareketli noktalar belirlenmiş olup Kalman Filtreleme Yöntemi ile deformasyon analizine geçilmiştir. Öncelikle statik model kurulup En Küçük Kareler Yöntemi ile çözülerek birim ölçünün ortalama hatası hesaplanmıştır. Sonra, statik model hız parametresi ile genişletilerek doğrusal model Kalman Filtreleme Yöntemiyle çözülmüş ve sonuçlar istatistiki olarak irdelenmiştir.

İrdelemenin birinci adımında global test yapılmıştır. Öncül ortalama hata (s_0), soncul ortalama hata (m_0) olmak üzere bir test büyüklüğü T hesaplanmış ve F- dağılımı tablo değeri q ile karşılaştırılmıştır. $T > q$ ise kurulan hareket modelinin anlamlı olduğuna, tersi durumunda anlamlı olmadığına karar verilmiştir.

İkinci irdeleme adımında ise; fonksiyonel modelin genişletilmesinin testi yapılmıştır. Doğrusal model, statik modelin hız parametresiyle genişletilmiş bir hali olduğundan hesaplanan hızlar ve hızların ters ağırlık matrisi yardımıyla genişletilmiş kısmın ortalama hatası (m_g) hesaplanmıştır. Bu hesaplanan değer ve öncül ortalama hata ile bir test büyüklüğü hesaplanmış (T_g) ve bu test büyüklüğü F – dağılımı tablo değeri q ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda; $T_g > q$ ise model bir adım daha genişletilmiştir. Yapılan hesaplamalar Tablo 3. de verilmiştir.

Tablo 3. Kinematik modelin istatistik test sonuçları

Global test		Genişletilmiş modelin testi	
s_0 (mm)	∓ 3.92	s_0 (mm)	∓ 3.95
m_0 (mm)	∓ 3.95	m_g (mm)	∓ 18.82
T (test büyüklüğü)	1.0175	T_g (test büyüklüğü)	22.6675
q (F-test)	4.7725	q (F-test)	3.3258

Not : $Karar = Konum + Hız + İvme$

Tablo 3. den de görüldüğü üzere model uyumludur ve hareket modelini genişletmek olumludur. Karar verilen uygun model ile hareket parametreleri hesaplanmış, sonuçlar istatistiki olarak irdelenmiştir. İrdeleme sonuçları Tablo 4. de, statik ve kinematik model ile hesaplanan yükseklik, hız ve ivme değişikliklerine ait bilgiler de Tablo 5. de verilmiştir [17].

Tablo 4. Konum, Hız ve İvme büyüklükleri için test büyüklükleri

KONUM			
NN	T konum	T tablo	Karar
1	1.0992	2.1314	Nokta konumlarında değişme anlamlı değildir [-]
2	0.5144	2.1314	Nokta konumlarında değişme anlamlı değildir [-]
3	2.9920	2.1314	Nokta konumlarında değişme anlamlıdır [+]
4	4.3424	2.1314	Nokta konumlarında değişme anlamlıdır [+]
5	1.8402	2.1314	Nokta konumlarında değişme anlamlı değildir [-]
HIZ			
NN	T hız	T tablo	Karar
1	0.8302	2.1314	Nokta hızlarında değişme anlamlı değildir [-]

2	0.3542	2.1314	Nokta hızlarında değişme anlamlı değildir [-]
3	0.6064	2.1314	Nokta hızlarında değişme anlamlı değildir [-]
4	2.2387	2.1314	Nokta hızlarında değişme anlamlıdır [+]
5	0.8022	2.1314	Nokta hızlarında değişme anlamlı değildir [-]
İVME			
NN	T ivme	T tablo	Karar
1	0.0137	2.1314	Nokta ivmelerinde değişme anlamlı değildir [-]
2	0.0013	2.1314	Nokta ivmelerinde değişme anlamlı değildir [-]
3	0.0101	2.1314	Nokta ivmelerinde değişme anlamlı değildir [-]
4	1.1861	2.1314	Nokta ivmelerinde değişme anlamlı değildir [-]
5	0.0318	2.1314	Nokta ivmelerinde değişme anlamlı değildir [-]

Tablo 5. $t_0 - t_1 - t_2$ periyotlarında statik ve kinematik modeller ile hesaplanan değerler

Şubat 1998 – Temmuz 1998 – Nisan 1999				
Statik Model		Kinematik Model		
NN	Yük.Bil. (mm)	Yük.Bil. (mm)	Hız (mm/ay)	İvme (mm/ay ²)
1	-3.6282	-3.3779	0.1558	0.0001
2	0.9851	1.4074	0.0551	0.0000
3	6.7716	8.2030	0.0950	0.0000
4	-9.5432	-12.188	-0.8291	-0.0396
5	5.4147	4.9757	0.1226	0.0001

Tablo 4. ve Tablo 5. incelendiğinde statik ve kinematik modelin uyumu söz konusudur. Özellikle Tablo 5. e bakıldığında statik model ile bulunan yükseklik bilinmeyenleri ile kinematik model ile bulunan yükseklik bilinmeyenlerinin değerleri birbiri ile örtüşmekte ve işaretlerinin aynı yönlü olduğu görülmektedir. Statik model ile $t_0 - t_1$ periyotları arasında yapılan deformasyon analiz sonucu 1 nolu nokta ve $t_0 - t_2$ periyotları arasında yapılan deformasyon analiz sonucunda ise 4 nolu noktada anlamlı değişimler görülmüştür. Buna karşılık Kalman Filtreleme Yöntemi ile $t_0 - t_1 - t_2$ periyotları arasında yapılan deformasyon analizi sonucu 3 ve 4 nolu noktadaki değişimler anlamlıdır. Ayrıca 4 numaralı noktanın hem konumunda hem de hızında anlamlı bir değişim söz konusudur.

5. Sonuçlar

Jeodezik yöntemlerle güncel yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesinde statik, kinematik veya dinamik modeller kullanılabilir. Düşey yöndeki yer kabuğu hareketleri genel olarak yavaştır. Deformasyon ölçümüne başlanmadan önce deformasyon ağı kurulacak bölgenin karakteristik özellikleri iyi bilinmeli ve ona göre sağlam bir deformasyon ağı kurulmalıdır. Kurulan ağ üzerinde ölçümler yüksek duyarlılıkta yapılmalı ve ağ iyi korunmalıdır. Genel kinematik modelde hareket parametrelerinin (koordinat bilinmeyenleri, hız, ivme) aynı anda belirlenebilmesi için fazla periyotla

yapılmış ölçülere gereksinim vardır. Buna karşılık Kalman Filtreleme Yönteminde ise az sayıda ölçme periyodu kullanılarak hareket parametreleri belirlenebilmektedir.

Kalman Filtreleme Yöntemi stokastik modelinin iyi kurulması halinde, her türlü doğrusal ve doğrusal olmayan değişimlerin araştırılmasında uygun bir yöntemdir. Elde edilen sonuçlar statik model sonuçları ile uyumludur. Ancak, prediksyonla çözüm yapıldığından ölçülerin belirli bir oranda ölçü hataları ile yüklü oluşu ve bir önceki zamandaki durum vektörünün hatasız olmaması nedeniyle kinematik davranışlar, sınırsız biçimde ekstrapolasyonla genişletilmemelidir. Bir başka ifadeyle çok sayıda prediksyon yapılırsa ölçü hatalarının birikerek bizi yanlış sonuca götürmesi muhtemeldir [13].

Bu çalışmada 5 noktalı yükseklik ağındaki üç periyot ölçü ile, ortalama aykırılıklar yöntemiyle deformasyon analizi yapılmış ($t_0 - t_1$) döneminde 1 numaralı noktada, ($t_0 - t_2$) döneminde ise 4 numaralı noktada anlamlı düşey harekete rastlanmıştır. Kinematik modelde deformasyon analizinde ise Kalman Filtreleme Yöntemi kullanılmış, yapılan analiz sonucunda; 3 ve 4 numaralı noktalarda anlamlı düşey harekete, 4 numaralı noktada ise anlamlı hız değişimine rastlanmıştır.

6. Kaynaklar

- [1] İnal C. Deformasyon Ölçülerinin Analizi Ders Notları. SÜ, Konya, 2000.
- [2] İnce CD, Şahin M. Real – Time Deformation Monitoring with GPS and Kalman Filter, Earth Planets Space 2000; 52: 837-840.
- [3] Kalman RE. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Journal of Basic Engineering 1960; Vol. 82D: 35-45.
- [4] Kalman RE, Bucy RS. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory, Journal of Basic Engineering 1961; 83D: 95-108.
- [5] Cross PA. Advanced Least Squares Applied to Position Fixing. Working Papers, North East London Polytechnic, Dept. of Surveying 1990, 205pp.
- [6] Doğan U. 17 Ağustos 1999 İzmit Depreminden Kaynaklanan Deformasyonların Kinematik Modellerle Araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
- [7] Gülal E. Kalman Filtreleme Tekniğinin Deformasyon Analizine Uygulanması, YTÜ İnşaat Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Bölümü Araştırma Makalesi 1999, Yıldız – İstanbul;11-19.
- [8] Yalçınkaya M, Bayrak T. Dynamic Model For Monitoring Landslides with Emphasis on Underground Water in Trabzon Province, Northeastern Turkey, Journal of Surveying Engineering 2003;115-124.
- [9] Welch G, Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter, University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science 1997; NC 27599 – 3175.
- [10] Gülal E. Yüksek Lisans Ders Notları, YTÜ, İstanbul, 2003.(Basılmadı)
- [11] Pelzer H. Deformationsuntersuchungen auf der Basis Kinematischer Bewegungungsmodelle, AVN 1987; 94, 2 (1987) 49-62.
- [12] Heunecke O, Pelzer H. A New Terminology for Deformation Analysis Models Based on System Theory, IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering in Eisenstadt 1998; 20-22.
- [13] Bayrak T, Yalçınkaya M. GPS ile izlenen jeodezik deformasyon ağlarında kinematik hareketlerin ve hareket yüzeylerinin belirlenmesi, Tujk tektonik ve jeodezik ağlar çalıştayı, 10-12 Ekim 2002; İznik.

- [14] Pelzer H. 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 1986; 539-555.
- [15] Chui CK, Chen G. Kalman Filtering With Real-Time Applications, Springer: Third Edition; 1998.
- [16] Yalçınkaya M. Üç Boyutlu Ağlarda Kalman Filtreleme Tekniğinin Uygulanması = MATLAB ve FORTRAN Programlama Dilleriyle Çözümü, KTÜ Araştırma Raporları 2001; Trabzon.
- [17] Doğanalp S. Kalman Filtreleme Yöntemi ile Deformasyon Analizi, Yüksek Lisans Semineri, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.