



**Makale  
(Article)**

## **Periyodik Toplanmış TUSAGA-Aktif Ölçülerinin Deformasyon İzlemede Kullanılabilirliğinin Araştırılması**

**Seda Nur TURAN\***, **E. Etim EYO\*\***, **Mustafa ACAR\*\*\***, **Temel BAYRAK\***

\*Gümüşhane Üniversitesi Müh. Fak. Harita Müh. Böl., 29000 Gümüşhane/TÜRKİYE

\*\*Photogrammetry and Laser Scanning Research Group, Department of Geomatic Engineering, Faculty of Geoinformation and Real Estate, Universiti Teknologi Malaysia

\*\*\*Aksaray Üniversitesi Müh. Fak. Harita Müh. Böl. Aksaray/TÜRKİYE

[sedanurturan@gumushane.edu.tr](mailto:sedanurturan@gumushane.edu.tr)

### **Özet**

TUSAGA-Aktif ülkemizde 2006 yılında tesis edilmiş bir Ağ RTK sistemidir. Sistem ülkenin her yerindeki kullanıcılara anlık hassas koordinat verileri sağlamaktadır. TUSAGA-Aktif yönteminde tek bir alıcı ve tek bir eleman ile arazide çok sayıda noktaya çok kısa ölçü süresi içinde gözlem yapılabilme imkânı mevcuttur. İstenilen sıklıkta ve çok kısa bir ölçü zamanında deforme olan obje üzerinde ve civarında çok fazla sayıda ölçü yapmak mümkündür. Bu yöntem diğer jeodezik yöntemlere göre maliyeti çok daha fazla düşüktür ve fonksiyondur. Yavaş akan heyelanların ve toprak dolgu barajların izlenmesi için oldukça kullanışlıdır. Yöntemde veri toplama doğruluğu cm seviyesindedir.

Bu çalışmada, deformasyon izleme çalışmalarında çok kullanışlı olabileceği düşünülen ve güncel TUSAGA-Aktif teknolojisi kullanılarak desteklenmiş yeni bir deformasyon izleme yöntemine odaklanılmış ve periyodik toplanmış TUSAGA-Aktif verisi kullanılarak alternatif bir deformasyon izleme yönteminin metodolojisi sunulmuştur. Bu amaçla, bir noktada bir GNSS alıcısı ile 3 ayda bir periyodik olarak 10 epokluk TUSAGA-Aktif ölçüleri gerçekleştirilmiş, ölçüler dengelenmiş, statik ve kinematik deformasyon analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları karşılaştırılmış ve uyumlu oldukları gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** TUSAGA-Aktif, Deformasyon, Statik ve Kinematik Analiz

## **Investigation of usability of periodically collected CORS-TR Measurements in Deformation Monitoring**

### **Abstract**

Continuously Operating Reference Stations-Turkey (CORS-TR) is a Net-RTK system which was established in our country in 2006. The system provides the users all over the country with instant precise coordinate datum. CORS-TR has the capability of doing observation on a vast number of points of a land in a very short time of measurement and with a single receiver and staff. It is possible to carry out a measurement on and around the deformed object in the desired frequency and in a very short time of measurement. This method is much more cost-efficient and functional than other geodetic methods. It is quite useful for the monitoring of slow-moving landslides and earth-fill dams. The method's accuracy of data collection is at the level of cm.

This study focuses on a new deformation monitoring method, which is considered to be useful for deformation monitoring studies and supported by the up to date CORS-TR technology, and presents the methodology of an alternative deformation monitoring by using the periodically collected CORS-TR data. For this purpose, 10 epoch CORS-TR measurements were performed on a point periodically once in 3 months with one GNSS receiver, the measurements were balanced, and their static and kinematic deformation analyses were done. Results of the analysis were compared and observed that they were compatible.

*Bu makaleye atf yapmak için*

*Turan S.N., Eyo E., Acar M., Bayrak T. " Periyodik Toplanmış TUSAGA-Aktif Ölçülerinin Deformasyon İzlemede Kullanılabilirliğinin Araştırılması " Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi 2012, 4(2) 19-29*

*How to cite this article*

*Turan S.N., Eyo E., Acar M., Bayrak T. " Investigating the Practicability of Periodically Collected TUSAGA-Active Measurement in Deformation Monitoring " Electronic Journal of Map Technologies, 2012, 4 (2) 19-29*

**Key words:** Continuously Operating Reference Stations-Turkey, Static and Kinematic analysis

## 1. GİRİŞ

Deformasyon izleme çalışmalarını konum-zaman ilişkisi, sosyo-ekonomik kayıplar, çevresel etkiler ve zararların azaltılmasıyla ilgili çalışmalarını gerektiren karmaşık bir konudur. Bu gereksinimlerin karşılanabilmesi için sonuca hızlı ulaşan deformasyon izleme yöntemlerinin geliştirilmesi bir ihtiyaçtır. Deformasyon izleme çalışmaları, tabiatı gereği fazla sayıda personel ve donanım gerektiren, maliyeti yüksek ve karmaşık bir çalışmadır. Bununla birlikte doğal afetlerin zararlarının azaltılması için de gerekli bir çalışmadır. Ülkemizde deformasyon izleme çalışmaları yeterli değeri bulamamıştır. Deformasyon izleme çalışmalarında gerekli personelin azaltılması, daha iyi doğruluk sağlayan az sayıda donanımla çalışma yapılabilmesi, maliyetin düşük olması bu disipline olan talebi arttıracakı kuşku götürmez.

Bu çalışmanın amacı TUSAGA-Aktif (Türkiye Ulusal Sabit GNSS İstasyonları Aktif Ağı) verilerinin deformasyon izleme çalışmalarında kullanılabilirliğinin ortaya konulmasıdır. İlgili yöntem ile veri toplamanın kolaylığı, veri toplama zamanının kısalığı, yöntemlerin ulaşabildikleri doğrulukların deformasyon izleme çalışmaları için yeterli olması, deformasyon karakteristiğini ortaya koyacak kadar nokta sayısının artırılabilmesi ve esnekliği gibi özellikler bu teknolojiye olan talebi artırmaktadır.

Jeodezik bakış açısıyla üç boyutlu, zamana ve konuma bağlı karmaşık bir problem olan deformasyon izleme çalışmaları için önerilen yöntem deformasyon izlemede kullanılacak yeni ve hızlı bir yöntemdir. Veri toplama sıklığı günlük olabilmektedir. Kullanılacak verilerin doğruluğu deformasyon izleme için yeterlidir. Çalışmada deformasyon izleme için 1 GPS alıcısı yeterli olmaktadır.

Bu çalışmada, arazide TUSAGA-Aktif ile üç periyotta (Kasım 2011 - Şubat 2012 - Mayıs 2012) ölçüler toplanmış ve her bir periyot ayrı ayrı serbest olarak dengelenmiş, statik ve kinematik deformasyon modelleri ile analizleri yapılmış ve analiz sonuçları incelenmiştir. Elde edilen bu veriler, statik deformasyon modeli ve kinematik tek nokta modelinin kalman-filtreleme yöntemi ile çözümünde kullanılmıştır. Çözüm sonucunda noktaların yer değiştirmeleri, yer değiştirme hızları ve noktalarda anlamlı değişimler olup olmadığı hakkında bilgi veren ivmeleri belirlenmiştir.

### 1.1. TUSAGA-Aktif Ölçüleri ile Deformasyon İzlemede Trend

Günümüze kadar GNSS sistemi teknik, yöntem ve gözlemlerin modellenmesindeki algoritmalar olarak sürekli geliştirilmiş ve hassaslaştırılmıştır. Örneğin santimetre doğruluğa ulaşabilmek için gerekli olan gözlem zamanı bazı uygulamalarda saatlerden birkaç dakikaya kadar indirilmiştir. Uygun ölçme ve değerlendirme yöntemlerini kullanarak milimetreler mertebesinde hassas konum belirlemek sıradan uygulamalara dönüşmüştür. Diğer taraftan iletişim tekniklerindeki gelişmeler ve veri iletişiminin ucuzlaması gerçek zamanlı konum belirleme çalışmalarının önünü açmıştır. Referans istasyonu ile gezici alıcı arasında mesafe kısıtlamasının olduğu RTK uygulamaları, bu gelişmelerin ışığı altında yerini istasyonlar arasındaki mesafelerin yaklaşık 100 km'ye dayandığı Ağ-RTK uygulamalarına bırakmıştır [1-2].

RTK ile deformasyon izleme çalışmalarında, deformasyon araştırmaları için ihtiyaç, çevresel koruma, mülk zararı ve kamu güvenliği ile ilişkili kaygılardan dolayı sık sık doğmaktadır. Ayrıca; yapıların değişmez davranışlar altında olduğundan emin olmak, yapılarındaki dinamik davranışları daha iyi anlamada yararlanılabilir bilgiyi sunabilmek için yapıların olduğu yerdeki davranışları izlemek çok önemli bir işlemdir [3]. Deformasyon izleme uygulamalarına ilk olarak T3 teodolit ile başlanmış ve daha sonraları 1989 yılında bir izleme istasyonu olan Ankara Sabit GPS İstasyonu (ANKR) kurulmuştur [4-5-6]. 1900'

lü yılların sonlarına doğru deformasyon izleme, deprem ve heyelan gibi doğal olayları anlamak ve bina, köprü, nükleer binalar, barajlar, vb insan yapımı binaların stabilitesini izlemek için GNSS teknolojisi artan bir şekilde kullanılmıştır [7-8].

Tüm dünyada ve ülkemizde TUSAGA-Aktif, İSKİ-UKBS gibi referans istasyon ağları kurulmaktadır. Uluslararası GNSS Servisi (IGS) global GNSS ağı global referans sisteminin tanımlanmasına katkıda bulunmakta ve hassas istasyon koordinatlarını ve uydu yörünge bilgilerini hesaplamaktadır. Kıtalararası ve ulusal seviyede kurulan GNSS referans istasyonları ağları IGS ağının sıklaştırılması olarak da işlev kazanmakta ve global ve bölgesel jeodinamik araştırmalarda yerini almaktadır [1-2].

Bugünlerde ise; deformasyon izleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan birçok yöntem vardır. Bu deformasyon izleme yöntemlerinin tümü farklı hassasiyet ve uyuma sahiptir. Tablo 1' de günümüzde kabul görmüş birkaç yaygın izleme yöntemi, uygulamada kullanılan aletler ve hassasiyet durumları, yöntem analizleri ve karşılaştırılmaları verilmiştir.

**Tablo 1.** Yaygın İzleme Metotları ve Aletlerin Karşılaştırılması [9].

Metot	Alet	Hassasiyet	Uygulama Değerlendirme
Genel Jeodezik Yöntemler	Total Station, Teodolit, Uzaklıkölçer	Farklı hassasiyetler	Fazla esneklik, farklı yapıdaki binalar için uygun, arazi görüşü ve iklimsel durum etkisi dezavantaj, otomatik izleme zordur
	Mekanik yer değiştirme metresi	- Takometre hassasiyeti 0.01 mm, -Komparatör hassasiyeti 0.01 mm	Yüksek hassasiyet, ölçü süreci kolay, uygulama için sürekli izleme ve otomatik gözlem kolay, yerel gözlem bilgisi sağlayabilir fakat esneklik rutin ölçümlere bağlıdır
Özel Ölçme Yöntemleri	Yer değiştirme sensörü	0.01 mm	
	Açıölçer	Hassasiyeti uzaklıkla ilişkilidir, Maksimum 1mm	Bina defleksiyonunu, yüksek bina eğilimini, temel oturmasını ölçebilir
	Aliyman Ölçümü	Genel hassasiyeti $10^{-5}$ mm, $10^{-6}$ mm	Yapıların yatay yer değiştirmesini ölçebilir, yüksek hassasiyetli, otomasyon kolaydır fakat esneklik rutin ölçüme bağlıdır
	Fotoğrafik teodolit		Gözlem hassasiyeti düşüktür ve bazı zamanlar ihtiyaç karşılanamaz
Fotogrametrik Yöntemler	Dijital Kamera	mm seviyesinde	Her izleme noktası senkronize olmamıştır, hassas yapıların hacim ve şekliyle ilişkilidir, doğal afetleri ve coğrafik durumları sınırlandırır
	TCA Ölçme Robotu	$1 \text{ mm} + 10^{-6}$	Yerleşimi, yer değiştirmeyi, bina eğilimini ölçebilir, otomasyon kolaydır fakat izleme noktası senkronize olmamıştır ve iklimden etkilenir, tüm gün izleme yapamaz, araç maliyeti yüksektir
3D Tarama		1-5 mm	Yüksek hassasiyet, ölçüm süreci hızlı, kapsamlı, fazla izleme noktasına ihtiyaç duymaz, uygulama için dinamik otomasyon izleme kolaydır, gizli noktaların içyapı bilgisini vermesi dezavantajdır, araç maliyeti yüksektir
GNSS Statik (1-2 saat)		- Yatay hassasiyet 1mm, - Düşey hassasiyet 1,5 mm	Tüm gün izleme yapabilir, basit işleyiş, yüksek otomasyon, yüksek hassasiyet, dezavantajı konum hızının yavaşlığı
RTK-GNSS		- Yatay hassasiyet $10+1^* 10^{-6}$ mm - Düşey hassasiyet $20+1^* 10^{-6}$ mm	Tüm gün izleme yapabilir, basit işleyiş, yüksek otomasyon, konum hızı hızlıdır, yatay hassasiyeti yüksektir, düşey hassasiyetinin düşük olması dezavantajdır

## 1.2 TUSAGA-Aktif Ölçülerinin Deformasyon İzlemede Kullanılabilirliği

Deformasyon çalışmaları için GNSS kullanımı hızlı bir şekilde gelişme göstermiştir. Bu teknik doğruluk ve gerçeklik bakımından yüksek üretkenlik elde etmek ve tüm mühendislik yapılarının performansı ve güvenliğini izlemek için uygun maliyetli bir araç olarak nitelendirilmektedir.

TUSAGA-Aktif ölçülerinin yüksek doğruluğu, 24 saat kullanılabilirlik, tüm hava koşulları altında işletilebilirlik, noktaların birbirini görme zorunluluğunun olmaması, düzgün tanımlanmış referans sisteminde (WGS-84) 3D koordinatları elde etme imkanı, verimli data toplama için kinematik yöntemlerin uygulanabilirliği ve otomasyondan ötürü, GNSS tekniği toprak hareketinde, deformasyonda ve çökmelerde büyük ölçüde kullanılmaktadır. Yüksek hassasiyette gözlenmiş dataları ile TUSAGA-Aktif teknik avantajlar ve deformasyon izleme analizi için uygun maliyetli yerbilimi altyapısı sağlar [10-11]. Bununla birlikte; TUSAGA-Aktif tekniği günümüzde yüksek frekansta kayıt alabilme özelliğine sahip olup, yatayda 1 cm ve düşeyde 2 cm' ye varan hassasiyete sahiptir. Bu imkân, deformasyonların güvenilir biçimde izlenmesini sağlamıştır [12].

Bu sistemin tercih edilmesindeki diğer nedenler ise, izleme sistemi, yapı ile ilgili değerlendirmeyi hızlı yapabilecek özellikte olması, yapının hasar durumunun belirlenebilmesi için, izleme sisteminde elde edilen verilerden, özel mühendislik parametrelerine (kayma oranı, vb) ulaşmak kolay ve güvenilir olması gibi özellikler etkili olmuştur [13].

Bugünlerde GNSS teknolojisindeki en son gelişmelerden dolayı konumlandırma hassasiyeti, navigasyonun yanında tatmin edicidir. RTK-GNSS gözlemleri kullanarak yüksek doğrulukla yapısal yer değiştirmeleri ölçmek ve hatta izlenen objenin salınımlarının doğal frekanslarını belirlemek mümkündür. TUSAGA-Aktif yönteminin RTK-GNSS yöntemine göre uygulamadaki kolaylığı (tek kişi ve tek alet, istenilen zamanda ölçüm, kısa zamanda sınırsız nokta ölçümü, vb) Devlet Su İşleri, Afet İşleri Genel Müdürlüğu, vb kamu kurumlarının baraj, heyelan izleme, vb çalışmalarında üstün kolaylıklar sağlamaktadır. Bu nedenle GNSS teknolojisi mühendislik yapıların dinamik değerlendirmesi, toprak hareketlerinin izlenmesi ve deformasyonların belirlenmesi için gelecek vadeden yeni bir teknoloji olarak gözükmektedir [3].

## 2. TUSAGA-AKTİF ÖLÇÜLERİNİN YAPILMASI VE DENGELENMESİ

Günümüzde pek çok alanda kabul görmüş yöntemlerden biri olan TUSAGA-Aktif ile bir noktada periyodik olarak toplanmış TUSAGA-Aktif ölçülerinin deformasyon izlemede kullanılabilirliğini inceleyip daha gerçekçi yorumlama yapabilmek bu çalışmanın temel amacıdır. TUSAGA-Aktif ile Gümüşhane Üniversitesi yerleşkesinde seçilen bir noktada GNSS alıcıları ile 3 ayda bir periyodik olarak 10 epokluk TUSAGA-Aktif ölçüleri gerçekleştirilmiş ve veri toplanmıştır.

### 2.1. Periyodik Toplanmış TUSAGA-Aktif Ölçüleri ile Statik Deformasyon Analizi

Statik model bir objede hareket oluşup oluşmadığını, o obje ve çevresini kapsayan deformasyon ağının çeşitli periyotlarda belirlenen nokta koordinat farklarını istatistik olarak eşdeğerlik testi ile saptayan en temel yöntemdir [14].

Statik model, zamandan ve etkiyen dış yüklerden bağımsız olarak, bir objenin geometrik reaksiyonları ve yükler arasındaki fonksiyonel ilişkiyi tanımlar. Ölçme periyotları ile farklı zamanda elde edilen koordinatlar arasındaki farklar hem araştırılan objedeki deformasyonu hem de gözlemlerdeki hataları yansıtır. Deformasyon incelemesine konu bölge veya yapının karakteristik noktalarının, deformasyon vektörlerinin zamandan ve etkiyen kuvvetlerden bağımsız olarak belirlenmesi statik modelin konusu içine

girmektedir. Statik bir deformasyon analizinde bulunduğumuz değerler kısıtlıdır. Bu değerler, objedeki sadece noktalara ait değişim miktarlarından ibarettir. Statik model deformasyon belirleme amaçlı mühendislik uygulamalarında en çok uygulanan bir deformasyon analizi yoludur [15-16-17]. Aşağıda verilen formüllerle dengelenmiş koordinatlardan yararlanarak yapılan statik analiz matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$X_k, Y_k, Z_k$  : dengelenmiş koordinatlar  
 $m_{X_k}, m_{Y_k}, m_{Z_k}$  : dengelenmiş koordinatların karesel ortalama hataları  
 $k = 1, 2, \dots, pp$ : gözlenen periyot numaraları

olmak üzere fonksiyonlar aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned}\Delta X_{k+1,k} &= X_{k+1,k} - X_k \\ \Delta Y_{k+1,k} &= Y_{k+1,k} - Y_k \\ \Delta Z_{k+1,k} &= Z_{k+1,k} - Z_k\end{aligned}\quad (1.a)$$

Yukarıda verilen denklemlere hata yayılma kuralı uygulanarak aşağıdaki denklemler elde edilebilir.

$$\begin{aligned}d\Delta X_{k+1,k} &= \frac{\partial \Delta X_{k+1,k}}{\partial X_k} \cdot dX_k + \frac{\partial \Delta X_{k+1,k}}{\partial X_{k+1}} \cdot dX_{k+1} \\ d\Delta Y_{k+1,k} &= \frac{\partial \Delta Y_{k+1,k}}{\partial Y_k} \cdot dY_k + \frac{\partial \Delta Y_{k+1,k}}{\partial Y_{k+1}} \cdot dY_{k+1} \\ d\Delta Z_{k+1,k} &= \frac{\partial \Delta Z_{k+1,k}}{\partial Z_k} \cdot dZ_k + \frac{\partial \Delta Z_{k+1,k}}{\partial Z_{k+1}} \cdot dZ_{k+1}\end{aligned}\quad (1.b)$$

Denklemleri düzenleyerek aşağıdaki matris eşitliği şeklinde (2) yazabiliriz. Bu eşitlik statik deformasyon analizi için fonksiyonel modeldir.

$$\begin{bmatrix} d\Delta X_{k+1,k} \\ d\Delta Y_{k+1,k} \\ d\Delta Z_{k+1,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dX_k \\ dY_k \\ dZ_k \\ dX_{k+1} \\ dY_{k+1} \\ dZ_{k+1} \end{bmatrix}\quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\quad (3)$$

$$K_{XYZ} = \begin{bmatrix} m_{X_k}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{Y_k}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{Z_k}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{X_{k+1}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{Y_{k+1}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{Z_{k+1}}^2 \end{bmatrix}\quad (4)$$

Fonksiyonel modele karşılık gelen varyans-kovaryans matrisi yukarıdaki gibi yazılabilir. Buradan bilinmeyenlerin karesel ortalama hataları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$K_{FF} = A \cdot K_{XYZ} \cdot A^T \quad (5)$$

$$K_{FF} = \begin{bmatrix} m_{\Delta X_{k+1,k}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_{\Delta Y_{k+1,k}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_{\Delta Z_{k+1,k}}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} m_{\Delta X_{k+1,k}}^2 \\ m_{\Delta Y_{k+1,k}}^2 \\ m_{\Delta Z_{k+1,k}}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{X_k}^2 + m_{X_{k+1}}^2 \\ m_{Y_k}^2 + m_{Y_{k+1}}^2 \\ m_{Z_k}^2 + m_{Z_{k+1}}^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

n: Ölçü sayısı

u: Bilinmeyenlerin sayısı

f = n – u: Serbestlik derecesi

$$\alpha = 0.05$$

Deformasyon vektörünün anlamlı olup olmadığını belirlemek için test büyüklükleri,

$$\begin{aligned} T_X &= \frac{|\Delta X_{k+1,k}|}{m_{\Delta X_{k+1,k}}} \\ T_Y &= \frac{|\Delta Y_{k+1,k}|}{m_{\Delta Y_{k+1,k}}} \\ T_Z &= \frac{|\Delta Z_{k+1,k}|}{m_{\Delta Z_{k+1,k}}} \end{aligned} \quad (8)$$

biçiminde hesaplanıp, test büyüklüklerine karşılık gelen sınır değer t dağılım tablosundan alınır.

$$q = t_{f, 1 - \frac{\alpha}{2}}$$

$T_i > q$  ise noktanın geçen süre içerisinde anlamlı bir hareket olduğuna karar verilir [18-19-20-21].

1. ve 2. periyot arasında statik analizi yapılarak yer değiştirmeler (Ağdaki maksimum X, Y, Z hareketi) elde edilmiştir. Kasım 2011 - Şubat 2012 periyotları ve Kasım 2011 - Mayıs 2012 periyotları arasında statik deformasyon analizi sonucunda noktada deformasyon tespit edilmiştir. Yapılan bu hesaplamalardan sonra Kalman filtreleme yöntemi için gerekli olan bilgiler elde edilmiş olmaktadır.

**Tablo 2.** Statik Deformasyon Analiz Sonuçları

Periyot	$d_x$ (cm)	$d_y$ (cm)	$d_z$ (cm)
1-2	2,60	6,11	0,09
1-3	3,42	10,84	-10,62

## 2.1. Periyodik Toplanmış TUSAGA-Aktif Ölçüleri ile Kinematik Deformasyon Analizi

Kalman-filtreleme yöntemi ile önceki periyotta bilinen hareket parametrelerinden ekstrapolasyon yoluyla sonraki periyottaki hareket parametreleri hesaplanmıştır.

Kinematik deformasyon analizi için 1., 2. ve 3. periyotlardaki analiz sonucunda ağdaki maksimum X, Y, Z hızları ve ivmeleri elde edilmiştir.

$X_j^{(i)}, Y_j^{(i)}, Z_j^{(i)}$  : (i). periyottaki jeodezik ağ nokta koordinatları  
 $V_{Xj}, V_{Yj}, V_{Zj}$  : Ağ nokta koordinat hızları  
 $a_{Xj}, a_{Yj}, a_{Zj}$  :  $[t_{i-1} - t_i]$  periyotları için ağ nokta koordinat ivmeleri

olmak üzere konum, konumun birinci türevi hız ve ikinci türevi ivme parametrelerini içeren zamana bağımlı, bir boyutlu kinematik model aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\begin{aligned}
 X_j^{(i)} &= X_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1})V_{Xj} + \frac{1}{2}(t_i - t_{i-1})^2 a_{Xj} \\
 Y_j^{(i)} &= Y_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1})V_{Yj} + \frac{1}{2}(t_i - t_{i-1})^2 a_{Yj} \\
 Z_j^{(i)} &= Z_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1})V_{Zj} + \frac{1}{2}(t_i - t_{i-1})^2 a_{Zj}
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 V_{Xj}^{(i)} &= V_{Xj} + (t_i - t_{i-1})a_{Xj} \\
 V_{Yj}^{(i)} &= V_{Yj} + (t_i - t_{i-1})a_{Yj} \\
 V_{Zj}^{(i)} &= V_{Zj} + (t_i - t_{i-1})a_{Zj}
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 a_{Xj}^{(i)} &= a_{Xj} \\
 a_{Yj}^{(i)} &= a_{Yj} \\
 a_{Zj}^{(i)} &= a_{Zj}
 \end{aligned} \tag{11}$$

(9, 10 ve 11) eşitliklerindeki model parametrelerini hesaplamak için en az 5 ölçü periyodu gereklidir. Kalman filtreleme çözüm yöntemi kullanılarak çözüm üç periyotla gerçekleştirilebilir. Kalman Filtreleme tekniğinde, başlangıçta bulunan andaki hareket parametreleri  $t_{i-1}$  periyodu yardımıyla kestirilir. Sonuçta filtrelenmiş parametreler  $t_i$  periyodundaki ölçülerle kestirim bilgisi birleştirilerek hesaplanır. Eşitlik (9), (10) ve (11) matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\bar{Y}_i = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ v_x \\ v_y \\ v_z \\ a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & I(t_i - t_{i-1}) & \frac{1}{2}(t_i - t_{i-1})^2 \\ 0 & I & I(t_i - t_{i-1}) \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ V_x \\ V_y \\ V_z \\ a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_{i-1} \tag{12}$$

(12) eşitliği kısa gösterimle (13) eşitliği halini alır.

$$\bar{Y}_i = T_{i,i-1} \hat{Y}_{i-1} \tag{13}$$

$\bar{Y}_i$ :  $t_i$  periyodundaki yeni durum vektörü (konum, hız, ivme)  
 $\hat{Y}_{i-1}$ :  $t_{i-1}$  periyodundaki durum vektörü  
 $T_{i,i-1}$ : kestirim matrisi  
 $I$  : birim matris

Durum vektörü ve ters ağırlık matrisi

$$\bar{Y}_i = T_{i,i-1}\hat{Y}_{i-1} + N_{i,i-1}W_{i-1} \quad (14)$$

$$Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} = T_{i,i-1}Q_{\bar{Y}\bar{Y},i-1}T_{i,i-1}^T + N_{i,i-1}Q_{ww,i-1}N_{i,i-1}^T \quad (15)$$

biçiminde oluşturulur. Burada  $Q_{\bar{Y}\bar{Y},i}$  ve  $Q_{ww,i-1}$ , sırasıyla  $t_{i-1}$  periyodundaki durum vektörünün kofaktör matrisi ve sistem gürültülerinin kofaktör matrisidir. Ölçülerin düzeltme denklemleri

$$I_i + v_{l,i} = A_i\hat{Y}_i$$

ile (14) eşitliği birleştirilerek filtre aşamasının fonksiyonel ve stokastik modeli,

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_i \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ A_i \end{bmatrix} \hat{Y}_i - \begin{bmatrix} v_{\bar{Y},i} \\ v_{l,i} \end{bmatrix}; Q_i = \begin{bmatrix} Q_{\bar{Y}\bar{Y},i} & 0 \\ 0 & Q_{ll,i} \end{bmatrix}$$

olarak oluşturulur. Model çözülerek hareket parametreleri ve onlara ait kofaktör matrisleri hesaplanır [20-22-23].

Lineer ve karesel iki kısımdan oluşan kinematik model Kalman-Filtre tekniğine göre adım adım hesaplanmıştır. Kinematik modelin sırasıyla hız ve ivme ile genişletilebilmesine karar vermek için istatistik testler yapılmıştır. Kinematik modelin istatistik test sonuçları Kasım 2011- Şubat 2012- Mayıs 2012 için Tablo 3' de verilmiştir.

**Tablo 3.** Kinematik Modelin (konum + hız + ivme) Kalman-Filtreleme Yöntemi ile Çözümünün İstatistik Test Sonuçları

Periyot	Lineer Model (Konum+ Hız)		Periyot	Karesel Model (Konum+ Hız+ İvme)		KARAR  (En Uygun Model)
	Global Test	Geniş. Mod. Testi		Global Test	Geniş. Mod. Testi	
	$s_0$	$s_0$		$s_0$	$s_0$	
	$m_0$	$m_0$		$m_0$	$m_0$	
	$T$	$T_g$		$T$	$T_g$	
	$q_f$	$q_g$		$q_f$	$q_g$	
Kasım 2011	0.428	0.522	Kasım 2011 Şubat 2012 Mayıs 2012	0.522	1.310	KONUM+ HIZ+ İVME
	0.522	8.273		1.310	3.880	
Şubat 2012	1.487	251.24		2.003	8.767	
	2.133	3.589		2.074	3.589	

F- tablo değeri  $q_g$  ile karşılaştırılarak modelin genişletilip genişletilmeyeceğine karar verilmiş ve Tablo 3.' ün karar sütununda da gösterilmiştir. Bu sütunda görüldüğü gibi her ölçü periyot grupları için en uygun deformasyon modelinin “konum+ hız+ ivme” modeli olduğuna karar verilmiştir. Bir noktaya ait deformasyon model sonuçları Tablo 4. de verilmiştir.

Tablodan görüldüğü gibi statik model sadece konum parametrelerini belirleyebilmektedir. Kinematik model ise; konum, hız ve ivme parametrelerini belirleyebilmektedir.



**Tablo 4.** Bir Noktanın Deformasyon Model Sonuçları

Nokta numarası: 1	Birim	Parametre	Statik		Kinematik	
			1.per-2.per	1.per-3.per	1. adım	2. adım
Konum	cm	$x$	2,60	3,42	2,90	3,73
		$y$	6,11	10,84	6,16	10,89
		$z$	0,09	-10,62	0,12	-9,86
Hız	$\frac{cm}{ay}$	$v_x$			0,94	1,22
		$v_y$			2,05	3,62
		$v_z$			0,03	-2,07
İvme	$\frac{cm}{ay^2}$	$a_x$				0,05
		$a_y$				0,26
		$a_z$				-0,23
En uygun model $\longrightarrow$			Konum		Konum + Hız + İvme	

### 3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Periyodik olarak toplanmış TUSAGA-Aktif verileri deformasyon izlemede kullanılabilen yeni ve hızlı bir yöntemdir. Veri toplama sıklığı istenirse günlük olabilmektedir. Kullanılacak verilerin doğruluğu deformasyon izleme için yeterlidir. Bu teknoloji gerektirdiği donanım ve personel sayısının düşüklüğü ile ayrı bir özgünlüğe sahiptir.

Bu çalışmada veriler TUSAGA-Aktif ile toplanmıştır. Veri toplama aralığı 3 aylık periyotlarda yapılmıştır. Toplanan veriler nokta koordinatlarıdır ( $X, Y, Z, m_x, m_y, m_z$ ). Bu veriler EKK ile serbest dengelenmiş ve deformasyon analizi için gerekli periyodik dengelenmiş koordinatlar ve onlara karşılık gelen varyans-kovaryans matrisleri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler, statik deformasyon modeli ve kinematik tek nokta modelinin kalman-filtreleme yöntemi ile çözümünde kullanılmıştır. Çözüm sonucunda noktaların yer değiştirmeleri, yer değiştirme hızları ve noktalarda anlamlı değişimler olup olmadığı hakkında bilgi veren ivmeleri belirlenmiştir.

Deformasyon izlemede TUSAGA-Aktif verileri yeterli doğruluğu sağlamaktadır. Yöntem ölçü zamanını çok fazla kısaltmaktadır ve ölçü toplama sıklığını arttırmayı teşvik etmektedir. Yöntemde veri toplama zamanının kısa olması arazide gerekli nokta sayısını kısıtlamamaktadır ve nokta sayısını arttırmayı teşvik etmektedir. Bu nedenle GNSS teknolojisi mühendislik yapıların dinamik değerlendirmesi, toprak hareketlerinin izlenmesi ve deformasyonların belirlenmesi için gelecek vadeden yeni bir teknoloji olarak gözükmektedir.

### 4. KAYNAKLAR

1. Rizos, C., Cranenbroeck, J. ve Lui, V., (2010). Advances in GNSS-RTK for Structural Deformation Monitoring in Regions of High Ionospheric Activity, FIG Congress Sydney, Australia, 1-13.
2. Gülal, E., Aykut, N.O., Akpınar, B. ve Uygur, S.Ö., (2011). GNSS Antenlerinin Faz Merkezi ve Değişiminin Araştırılması, *Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*.
3. Lepadatu, A., (2011). GNSS Technology For Structural Health Monitoring, Aralık.

4. Rutledge, D., Gnipp, Jack. ve Kramer, J., (2001). Advances in REAL-TIME GPS Deformation Monitoring For Landslide, Volcanoes and Structures, *The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements*, California, USA, 110-120.
5. Özdemir, S., Cingöz, A., Aktuğ, B., Kurt, M., Erkan, Y. ve Peker, S., (2011). Türkiye’de Sabit GNSS İstasyonlarının CBS Uygulamaları için Anlamı ve Güncel Analizleri, TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Antalya.
6. Özdemir, S., Aktuğ, B., Kurt, M., Lenk, O., Erkan, Y. ve Peker, S., (2011). Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağı (TUSAGA) ve Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağı-Aktif (TUSAGA-Aktif), Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu 2011 Yılı Bilimsel Toplantısı, İstanbul.
7. İnce, C.D. ve Şahin, M., (2000). Real-time Deformation Monitoring with GPS and Kalman Filter, *Earth Planets Space*, İstanbul, Türkiye, 837-840.
8. Avcı, Ö., (2011). Sabit GNSS İstasyonları Ağlarının Deformasyon Analizinde Kullanımı Köprü Sağlığı İzlemede Sistemi Örnekleri, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu 2011 Yılı Bilimsel Toplantısı, İstanbul
9. Li, W. ve Wang, C., (2011). GPS in the Tailings Dam Deformation Monitoring, *Procedia Engineering*, 26, 1648-1657.
10. Zhang, K., Hu, Y., Liu, G., Wu, F. ve Deakin, R., (2005). Deformation Monitoring and Analysis Using Victorian Regional CORS Data, *Journal of Global Positioning Systems*, 129-138.
11. Kıranlıoğlu, Y., (2006). GPS Yöntemi ile Deformasyonların Tespitinde Gerinimlerin Belirlenmesi, Yüksek Mühendislik Tezi, Gebze İleri Teknoloji Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
12. Pehlivan, H., (2009). Gerçek Zamanlı Kinematik GPS Yöntemiyle Yapıların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 180.
13. Uluışık, P., (2006). Yüksek Bina Hareketlerinin GPS ile İzlenmesi, Yüksek Mühendislik Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
14. Bayrak, T., (2003). Heyelanlar İçin Bir Dinamik Deformasyon ve Bir Dinamik Hareket Yüzeyi Modelinin Oluşturulması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 195s.
15. Bayrak T. ve Yalçınkaya M., (2002). GPS ile izlenen jeodezik deformasyon ağlarında kinematik hareketlerin ve hareket yüzeylerinin belirlenmesi, Tuşk tektonik ve jeodezik ağlar çalıştay, İznik.
16. Bayrak, T., (2006). Yamula Barajında Deformasyon Analizi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 1-12.
17. Doğanalp, S. ve Turgut, B., (2009). Statik ve Kinematik Modelde Deformasyon Analizi, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Konya, 24, 31-44.
18. Koch, K.R., (1999). Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, Springer-Verlag, Berlin.

19. Satır, B., (2007). Tünel Deformasyonlarının Jeodezik, Geoteknik ve Sonlu Eleman Yöntemleri ile Belirlenmesi, Yüksek Mühendislik Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
20. Yalçınkaya, M. ve Bayrak, T., (2005). Comparison of Static, Kinematic and Dynamic Geodetic Deformation Models for Kutlugün Landslide in Northeastern Turkey, Springer, 34, 91-110.
21. Bayrak, T., Yılmaz, H.M. ve Yakar, M., (2007). Eğri Minare'nin Deformasyonunun Nedenlerinin Araştırılması ve Jeodezik ve Fotogrametrik Yöntemlerle İzlenmesi, 11. Türkiye harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
22. Bayrak, T., (2006). Yamula Barajındaki Düşey Deformasyonların Jeodezik Yöntemlerle İzlenmesi, *Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, 18-24
23. Yalçınkaya, M. ve Bayrak, T., 2003, Dynamic Model for Monitoring Landslides with Emphasis on Underground Water in Trabzon Province, Northeastern Turkey, *Journal of Surveying Engineering*, 115-124.
24. Meng, X., (2002). Real-Time Deformation Monitoring of Bridge Using GPS/Accelerometers, Doktora Tezi, The University of Nottingham, Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, Nottingham.