

Mühendislik yapılarının izlenmesinde jeodezik yöntemlerin kombinasyonu

Serdar EROL*, Tevfik AYAN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmanın amacı, İstanbul'un güneybatısında, Büyükçekmece Gölü üzerinde yer alan ve TEM (Transit Avrupa Otoyolu – Transit European Motorway) otoyolunun bir bölümünü oluşturan Karasu viyadüğünün deformasyonlarının GPS ve nivelman ölçmeleri ile araştırılmasıdır. Bu amaçla altı aylık periyotlarla iki yılda gerçekleştirilen ölçme kampanyalarından elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Deformasyonların bir boyutlu (1B) (düşey) analizlerinde, öncelikli olarak GPS ve nivelman ölçülerinden türetilen yükseklik farkları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Yükseklik farklarının birlikte değerlendirildiği 1B deformasyon analizinin sonraki bölümünde, GPS ve nivelman yükseklik farklarının birleştirilmesinde Helmert'in HELMERT ve Rao'nun MINQUE Varyans Bileşen Tahmini (VBT) yaklaşımları kullanılmıştır. Üç adımda gerçekleştirilen 1B deformasyon analizi sırasında, yalnızca GPS ölçmeleri kullanılarak S-transformatasyonu uygulanmış ve viyadüğün olası deformasyonları bir kez de üç boyutlu (3B) olarak irdelenmiştir. Makalede, bu çalışmada uygulanan her bir deformasyon analizi yaklaşımının teorik yapısı da özet olarak verilmektedir. Çalışmanın sonuçlarında: Transit Avrupa Otoyolunun önemli bir bağlantı noktasında yer alan ve 2160 metre uzunluğundaki viyadüğün deformasyonlarının değerlendirilmesinin ve ortaya konmasının yanı sıra, büyük mühendislik yapılarındaki deformasyonlarının araştırılmasında uygulanacak ölçme ve analiz yöntemleri konusunda gelecek çalışmalara katkı sağlanması da amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: GPS, nivelman, deformasyon analizi, Varyans Bileşen Tahmini, S-Transformatasyonu.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Serdar EROL. erol@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 60 09.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "GPS ve nivelman ölçmeleriyle deformasyonların belirlenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 28.02.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 21.03.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.09.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Combination of geodetic techniques in monitoring of engineering structures

Extended abstract

It has a considerable importance to have the movements of an engineering structure within certain limits for the safety of the community depending on it. To determine whether an engineering structure is safe to use or not, their movements are monitored and possible deformations are detected from the analysis of observations. An appropriate observation technique, which can be geodetic or non-geodetic (geotechnical-structural) according to classification in Chrzanowski and Chrzanowski (1995), is chosen with considering the physical conditions of the observed structure (its shape, size, location and so on), environmental conditions (the geologic properties of the based ground, tectonic activities of the region, common atmospheric phenomena around the structure and so on), the type of monitoring (continuous or static) and the required measuring accuracy for being able to recognize the significant movements.

Until the beginning of the 1980's, conventional measurement techniques have been used for detecting the deformations in large engineering structures. After that the advances in space technologies and their geodetic applications provided impetus for their use in deformation measurements. GPS positioning technique has the biggest benefit of high accuracy 3D positioning; however, the vertical position is the least accurately determined component due to inherent geometric weakness of the system and atmospheric errors. Therefore, using GPS measurement technique in deformation measurements at millimeter level accuracy requires some special precautions, such as using forced centering equipment, applying special measuring techniques like the rapid static method for short baselines and designing special equipment for precise antenna height readings. In some cases, even these special precautions remain insufficient and hence, the GPS measurements need to be combined with another measurement technique to improve its accuracy in height component. In geodetic evaluation of deformations, static observations obtained by terrestrial and/or GPS technique are subject to a two-epoch analysis. The two-epoch analysis basically consists of independent Least Squares Estimation (LSE) of the single epochs and geometrical detection of deformations between epochs.

Here, the aim is analysing 1D and 3D deformations of an engineering structure using GPS and levelling measurements data. During the 1D deformation analysis, three different approaches were performed separately. In the first and second approaches, height differences from precise levelling measurements and GPS measurements respectively were input in the analysing algorithm. In the third approach the combination of height differences from both techniques were evaluated for vertical deformation. While combining the two measurement sets, Helmert Variance Component Estimation (HVCE) and Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation (MINQUE) techniques were used. 3D deformation analysis only with GPS measurements was accomplished using S-transformation technique. The theories behind the used deformation analysis and variance component estimation methods are summarized in the chapters. Thereafter the optimal solution for combining the GPS and precise levelling data to improve the GPS derived heights and hence to provide reliable inputs via the optimal solution for the deformation investigations are discussed.

The highway viaduct of which deformations were inspected in this study is 2160 meter long and crosses over a lake on 110 piers. It is located in active tectonic region very close to the North Anatolian Fault (NAF). With the aim of monitoring its deformations, four measurement campaigns including GPS sessions and precise levelling measurements were carried out with six-month intervals. The session plans were prepared appropriately for each campaign on a pre-positioned deformation network. The results of this study, experienced with measurements of the viaduct, are thought to be important remarks for deformation analysis studies using GPS measurements. As the first remark, GPS measurement technique can be used for determining deformations with some special precautions like using forced centering mechanisms to avoid centering errors, using special equipments for precision antenna height readings, using special antenna types to avoid multipath effects etc. However, even though these precautions are taken to provide better results in 1D and 3D deformation analysis, GPS measurements have to be supported with Precise Levelling measurements.

Keywords: GPS, levelling, deformation analysis, Variance Component Estimation, S-Transformation.

Giriş

Bir mühendislik yapısının öz hareketlerinin belirli sınırlar içerisinde olması, insan sağlığı ve güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Yapının güvenli olup olmadığı kararının verilmesinde, hareketlerinin uygun bir teknik ile izlenmesi ve olası deformasyonlarının analiz edilmesi gerekmektedir. En uygun izleme tekniğinin seçilmesi ve kullanılmasında temel olarak göz önünde bulundurulacak kriterler şunlardır: *i-*) hareketleri izlenecek yapının fiziksel özellikleri (boyutları, konumu gibi), *ii-*) çevresel koşulları (üzerine inşa edildiği zeminin jeolojik özellikleri, bölgedeki tektonik aktivite, yapının bulunduğu bölgede hakim atmosfer olayları gibi), *iii-*) yapı hareketlerinin öngörülen karakteri ve büyüklüğü (bu bağlamda, yapı kesintisiz-sürekli ya da belirli periyotlar ile izlenebilir ve anlamlı (signifikant) hareketlerin analiz edilebileceği doğrulukta ölçme sistemleri kullanılır). Belirtilen kriterler göz önünde bulundurularak, jeodezik ya da jeodezik olmayan (jeoteknik-yapısal) izleme teknikleri uygulanabilir (Chrzanowski ve Chrzanowski, 1995).

1980'li yılların başlarına kadar, büyük mühendislik yapılarındaki deformasyonların izlenmesi ve araştırılmasında, konvansiyonel ölçme teknikleri kullanılmaktaydı. Uydu teknolojilerindeki gelişmeler ve bu tekniklerin jeodezik uygulamalarda kullanılmaya başlanması, deformasyon ölçmeleri ve analizi çalışmalarında da etkisini göstermiştir (Erol ve Ayan, 2003). Bunlar arasında özellikle GPS tekniği, jeodezik uygulamalarda yoğun olarak kullanılmakta ve yüksek doğruluğa sahip 3B konum bilgisi hızlı ve ekonomik olarak elde edilmektedir. GPS tekniğinin kullanıcılara sağlamış olduğu bir çok avantajın yanı sıra, uydu sisteminin geometrik zayıflığı ve uydu sinyallerinin atmosferik koşullardan etkilenmesi sonucu oluşan hatalardan dolayı, elde edilen 3B konum bilgisinin düşey bileşeni daha düşük doğruluğa sahip olmaktadır (Featherstone vd., 1998). Bundan dolayı, milimetre mertebesinde konum doğruluğu gerektiren deformasyon araştırmalarında, GPS tekniğinin uygulanabilmesi için, ölçmeler sırasında: *i-*) GPS antenlerinin merkezleştirilmesinde zorunlu merkezleştirme tertibatı kullanılması, *ii-*) bazların olabilişince kısa tasarlanması, *iii-*) özel oturum planlarının uygulanması (hızlı statik yöntem gibi), *iv-*) GPS anten yüksekliklerinin ölçülmesi sırasında meydana gelebilecek hataların azaltılması için özel ölçme donanımlarının kullanılması, *v-*) ölçmeler sırasında aynı tip GPS antenlerinin tercih edilmesi, *vi-*) ölçmeler sırasında antenin bulunduğu ortamdaki yansıtıcı yüzeylerin neden olduğu "multipath" hata kaynağına karşı özel anten aksesuarlarının kullanılması gibi, özel önlemler alınması önerilmektedir. Belirtilen önlemlerin pratikte uygulanması ve GPS'den elde edilen nokta konum doğruluklarına yaptıkları katkılar Erol ve Ayan (2003) tarafından ele alınmıştır. Bazı durumlarda, GPS tekniğinden elde edilen nokta konum doğruluklarının (özellikle düşey bileşenin) iyileştirilmesi için yukarıda belirtilen önlemlerin alınması da yeterli olmaz. Bu durumda konum doğruluğunun iyileştirilmesi için GPS tekniğinin bir başka ölçme tekniği ile birlikte kullanılması gerekir.

Deformasyonların konvansiyonel ölçme teknikleri ya da GPS tekniği kullanılarak, statik ölçüler ile araştırılmasında, iki-kampanyalı analiz yaklaşımı kullanılır. Bu yaklaşım temelde her bir ölçme kampanyasındaki ölçülerin, bağımsız olarak, En Küçük Kareler (EKK) yöntemi ile dengelenmesi ve iki kampanya arasındaki deformasyonların geometrik olarak irdelenmesine dayanır. Bu temel düşünce üzerine kurulmuş deformasyon analizi yöntemlerine ilişkin detaylı bilgilere Niemeier ve diğerleri (1982), Chen (1983), Gründig ve diğerleri (1985), Fraser ve Gründig (1985), Chrzanowski ve Chen (1986), Caspary (1987), Cooper (1987), Biacs (1989), Teskey ve Biacs (1990), Chrzanowski ve diğerleri (1991) de yer verilmektedir.

Bu çalışmada amaç, GPS ve nivelman verileri kullanılarak bir mühendislik yapısının 1B ve 3B deformasyonlarının analizi ve irdelenmesidir. Deformasyonların 1B analizinde, üç farklı yaklaşım uygulanmıştır. İlk iki yaklaşımda, sırasıyla, presizyonlu nivelman ve GPS ölçmelerinden türetilen yükseklik farkları, ayrı ayrı, deformasyon analizinde kullanılmıştır. Üçüncü yaklaşımda ise, her iki ölçme tekniğinden elde edilen yükseklik farklarının kombinasyonu 1B defor-

masyonların analizi için kullanılmıştır. Her iki ölçü gurubunun birleştirilmesinde, Helmert Varyans Bileşeni Tahmini (HVBT) ve Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation (MINQUE) yaklaşımları uygulanmıştır.

Dördüncü bir işlem adımını ise yalnızca GPS ölçüleri kullanılarak gerçekleştirilmiş olan 3B deformasyon analizi oluşturur. Bu adımda S-transformasyonu uygulanmıştır. Uygulanan deformasyon analizi teknikleri ile Varyans Bileşen Tahmini yaklaşımlarına ilişkin teorik bilgiler ve matematiksel ifadeler ileride yer verilen başlıklarda özetlenmektedir. Ayrıca GPS tekniğinden elde edilen yüksekliklerin iyileştirilmesi için, GPS ve presizyonlu nivelman verilerinin optimal kombinasyonunun araştırılması ve elde edilen bulgulara dayanılarak, deformasyon araştırmalarına güvenilir katkılar sağlanması da bu çalışmanın hedefleri arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada deformasyon araştırmasına konu olan Karasu Viyadüğü 2160 metre uzunluğundadır ve İstanbul'un güney batısında, Avrupa Transit Otobanının önemli bir bağlantı noktasında bulunmaktadır. Viyadük bölgede yer alan Büyükçekmece Gölü üzerinde inşa edilmiştir ve 110 adet taşıyıcı ayağın bir bölümü gölün içerisinde yer almaktadır. Deformasyon analizi sonuçlarının yorumlanmasında önem taşıyan diğer bir bilgede, yapının Kuzey Anadolu Fay'ına (KAF) yakın olmasıdır. Viyadüğün deformasyonları altı ay ara ile düzenlenen dört ölçme kampanyasından elde edilen GPS ve presizyonlu nivelman verileri ile analiz edilmektedir. Ölçmeler önceden tasarlanmış ve tesis edilmiş deformasyon ağı noktalarında, özel oturum planlarına göre gerçekleştirilmiştir.

Yükseklik farkları ile deformasyon analizi

Genel olarak, bir jeodezik ağda klasik (geometrik) deformasyon analizi üç adımda gerçekleştirilir. Birinci adımda t_1 ve t_2 epoklarında gerçekleştirilmiş olan ölçmelerden elde edilen ölçüler, serbest ağ dengelemesi yaklaşımı ile ayrı ayrı dengelenir. Hesaplamalar sırasında, tüm ağ noktalarında deformasyon olabileceği varsayılır (genel iz minimum çözümü) ve her iki epoktaki verilerin denge-

lemesinde, bilinmeyenlerin yaklaşık büyüklükleri olarak, aynı değerler kullanılır. Hesaplamalar, ağdaki tüm kaba ölçüler ayıklanıncaya kadar tekrarlanır.

İkinci adımda, $\Delta t = t_1 - t_2$ zaman aralığında sabit (deformasyonsuz, hareketsiz) kabul edilen ağ noktalarının durumunu kesinleştirmek amacıyla, global test uygulanır. Global test de t_1 ve t_2 epoklarında elde edilen ölçüler, birleşik serbest ağ dengelemesi yaklaşımı ile dengelenir. Bu dengelemede, "sabit" ağ noktalarında kısmi iz minimum çözümü uygulanır (Erol ve Ayan, 2003).

$$\Omega_1 = \underline{v}_1^T \underline{P}_1 \underline{v}_1 ; \quad S_{01}^2 = \frac{\Omega_1}{f_1} \quad (1)$$

$$\Omega_2 = \underline{v}_2^T \underline{P}_2 \underline{v}_2 ; \quad S_{02}^2 = \frac{\Omega_2}{f_2} \quad (2)$$

$$\Omega_G = \underline{v}_G^T \underline{P}_G \underline{v}_G ; \quad S_{0G}^2 = \frac{\Omega_G}{f_G} \quad (3)$$

Eşitlik 1, 2 ve 3'de f_1 , f_2 ve f_G , sırasıyla, birinci, ikinci ve üçüncü dengeleme hesabı sonrasında serbestlik derecelerini ifade eder. Eşitlik 1 ve 2, sırasıyla, birinci ve ikinci epoklara ilişkin serbest ağ dengeleme hesabını ifade eder. Eşitlik 3 ise birleşik serbest ağ dengelemesini ifade etmektedir. Bu eşitliklerin sonucunda, T_G test büyüklüğü, aşağıdaki gibi, hesaplanır:

$$\Omega_0 = \Omega_1 + \Omega_2 ; \quad f_0 = f_1 + f_2 ; \quad r = f_G - f_0 \quad (4)$$

$$T_G = \frac{(\Omega_G - \Omega_0) / r}{(\Omega_0 / f_0)} \quad (5)$$

Hesaplanan test büyüklüğü datumdan bağımsızdır ve F-dağılımındadır. Daha sonra, T_G , Fisher dağılım tablosundan, r (rank) ve f_0 (serbestlik derecesi) değerleri ve $S = 1 - \alpha$ (0.95) güvenilirlik düzeyine göre seçilen $F_{r, f_0, 1 - \alpha}$ kritik değeri ile karşılaştırılır. Test değeri T_G 'nin seçilen kritik değerden küçük olması halinde ($T_G < F_{r, f_0, 1 - \alpha}$) yüksekliği $\Delta t = t_1 - t_2$ zaman aralığında değişmez kabul edilen ağ noktaları için H_0 hipotezi ($H_0 : d = \underline{H}_2 - \underline{H}_1 = 0$) geçerlidir denir. Bunun yanı sıra, eğer test büyüklüğü, kritik değerden

büyük ise ($T_G > F_{r, f_0, 1-\alpha}$), global testte hareketsiz varsayılan noktalar gurubunun içerisinde, gerçekte sabit olmayan nokta veya noktalar bulunduğu anlamına gelir ve H_0 hipotezi reddedilir. Bunun sonucunda deformasyonların lokalizasyonuna gereksinim duyulur ve birleşik serbest ağ dengelemesi ile global test yinelenir. Hesap adımları, noktalar kümesinde yalnızca hareketsiz noktalar kalıncaya değin tekrarlanır.

Deformasyon analizinin son adımında, yükseklik değişimleri test edilir. Bunun için, (önceki adımlarda olduğu gibi) sabit noktalar dışındaki tüm ağ noktalarında T_H test değeri hesaplanır ve bu değer Fisher dağılım tablosundan alınan F-kritik değeri ile karşılaştırılır,

$$d = H_2 - H_1 ; S_0^2 = \frac{\Omega_0}{f_0} ; Q_{dd} = Q_{H_1, H_1} + Q_{H_2, H_2} \quad (6)$$

$$T_H = \frac{d^T Q_{dd}^{-1} d}{r S_0^2} \quad (7)$$

Eğer T_H test değeri, F-kritik değerinden büyük ise ($T_H > F_{r, f_0, 1-\alpha}$), ilgili noktanın yüksekliğindeki değişim anlamlıdır (signifikanttır) sonucuna varılır. Aksi halde yükseklik değişimlerinin signifikant olmayıp yalnızca rastlantısal ölçü hatalarından kaynaklandığı anlaşılır.

Varyans Bileşen Tahmini (VBT)

En küçük kareler yöntemine göre bilinmeyen parametrelerin kestiriminde, ölçülerin ağırlıkları stokastik model için çok temel bir bilgidir. Varyans Bileşen Tahmininin amacı, öncül varyans-kovaryans matrislerinin oluşturulmasında, ölçülere ilişkin gerçekçi ve güvenilir varyans değerlerinin türetilmesidir. Uygun olmayan stokastik modellerin kullanılması, dengeleme hesabı sonuçlarında sistematik sapmalara neden olabilir ve bu sapmalar deformasyon analizinde, noktalardaki signifikant deformasyonlar olarak algılanabilir. En küçük kareler dengelemesi mantığı içerisinde, varyans-kovaryans bileşenlerinin tahmini için kullanılan yaklaşımlar, istatistiksel ve jeodezik literatürde geniş bir biçimde yer almaktadır. Bugüne kadar uygulanan yön-

temler: *i-*) fonksiyonel modeller, *ii-*) stokastik modeller, *iii-*) varyans tahmin yaklaşımlarına göre sınıflandırılır (Crocetto vd., 2000).

Varyans bileşen tahmini problemine ilk çözüm, 1924 yılında Helmert tarafından önerilmiştir ve biassız varyans tahmini yöntemidir (Helmert, 1924). Daha sonra, 1970 yılında Rao, Helmert'in geliştirdiği yöntemden haberdar olmaksızın, "Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation" (MINQUE) yöntemini önermiştir (Rao, 1971). Jeodezik ölçülerin normal dağılımında oldukları varsayıldığında, Helmert ve Rao tarafından önerilen her iki VBT yaklaşımı birbirlerine özdeştir.

Helmert yaklaşımı ile VBT (HVBT)

Helmert yönteminin teorik altyapısı ve matematiksel ilişkileri Grafarend (1984) tarafından verilmektedir. Yönteme ilişkin matematiksel model, aşağıda özetlenmektedir (Kızılsu, 1998). Helmert eşitliği,

$$H\sigma^2 = c \quad (8)$$

olarak verilmektedir. Eşitlik 8'in matris formu eşitlik 9'da verildiği gibidir.

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1u} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2u} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{u1} & h_{u2} & \dots & h_{uu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 \\ \sigma_2^2 \\ \dots \\ \sigma_u^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_u \end{bmatrix} \quad (9)$$

eşitlikte, u ölçü grubu sayısıdır.

$$c_i = v_i^T P_i v_i \quad (10)$$

$$h_{ii} = n_i - 2iz(N^{-1}N_i) + iz(N^{-1}N_iN^{-1}N_i) \quad (11)$$

$$h_{ij} = iz(N^{-1}N_jN^{-1}N_i) \quad (12)$$

Eşitliklerde $iz(\cdot)$ ilgili matrisin köşegen elemanlarının toplamı, N tüm ölçüleri içeren genel normal denklem katsayıları matrisidir. n_i , P_i , N_i , v_i , sırasıyla, ölçü sayısı, atanan ağırlık matrisi, normal denklem katsayıları matrisi ve i . grup ölçülere ilişkin düzeltmeler matrisidir. σ_i^2 ise tahmin edilen varyans değeridir.

Verilen eşitliklerde c_i 'nin P_i 'yi içeren bir fonksiyon olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, P_i , σ_i^2 'nin bir fonksiyonudur. Bu hiyerarşik yapı dolayısıyla Helmert VBT yöntemi iteratif bir çözüm algoritmasına sahiptir ve işlem adımları aşağıda özetlenmiştir.

Helmert VBT yönteminin işlem adımları:

1. Dengelemeden önce, her bir ölçü grubu için ağırlıkların seçilmesi: iteratif hesap döngüsünün başlangıcında, her bir ölçü grubu için ağırlıklar birbirlerine eşit ve 1 olarak seçilebilir ($P_1 = P_2 = \dots = P_u = 1$).

2. Öncül ağırlıklar kullanılarak, her bir ölçü grubu için normal denklemlerin (N_1, N_2, \dots, N_u) ve tüm ölçüleri içeren genel normal denklemlerin (N) oluşturulması: burada, genel normal denklemler, tüm ölçü grupları için oluşturulan normal denklemlerin toplamı şeklinde ($N = N_1 + N_2 + \dots + N_u$ olarak) ifade edilir.

3. Bilinmeyen parametreler ve düzeltmelerin, En Küçük Kareler yöntemine göre hesaplanması:

$$x = N^{-1}d, \quad (d = A^T P b) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} v_1 &= A_1 x - b_1 \\ \dots & \\ v_u &= A_u x - b_u \end{aligned} \quad (14)$$

4. Eşitlik 8'de olduğu gibi Helmert denkleminin oluşturulması,

5. Helmert denkleminde yer alan Varyans bileşenlerinin ($\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_u^2$) ve yeni ağırlık değerlerinin hesaplanması:

$$P_{i+1} = P_i / \sigma_i^2 \quad (15)$$

6. Tüm ölçü grupları için varyans bileşenleri (σ_i^2), ($i = 1, 2, \dots, u$) eşit olduğunda ($\sigma_i^2 = 1$) iterasyonlara son verilir. Eğer varyans bileşenleri 1'e eşit değil ise iterasyonlar yukarıda belirtilen ikinci işlem adımından itibaren tekrarlanır.

MINQUE yaklaşımı ile VBT

Yöntemin genel teorisi ve hesaplama algoritması Rao (1971)'de ve Rao ve Kleffe (1988)'de

ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Bu istatistiksel tahmin yönteminin birçok uygulama ile yalnızca ölçülerin varyans-kovaryans matrislerinin hesaplanmasında değil aynı zamanda ölçü hatalarının yapısına ilişkin analizlerde de yarar sağladığı kanıtlanmıştır (Fotopoulos, 2003).

MINQUE yöntemi, literatürde, en iyi tahminci olarak belirtilir. Bu yöntemin nivelman ağlarına uygulanması Chen ve Chrzanowski (1985) ve GPS ağlarında uygulanması Wang ve diğerleri (1998)'de konu edilmektedir.

MINQUE karesel formda bir yaklaşımdır ve optimal minimum norm kriterini sağlayan tahmini araştırır. Verilen Gauss-Markov fonksiyonel modelinde ($v = Ax - b$), b ve v , sırasıyla, ölçüleri ve düzeltmeleri içerir. Veriler için seçilen stokastik model ve varyans-kovaryans matrisi, 16 ve 17 numaralı eşitliklerde verilmektedir.

$$C_b = \sum_{i=1}^k \sigma_i^2 Q_i = \sigma_1^2 Q_1 + \sigma_2^2 Q_2 + \dots + \sigma_k^2 Q_k \quad (16)$$

$$C_b = \text{diag}[\sigma_i^2 Q_i] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 Q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 Q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_k^2 Q_k \end{bmatrix} \quad (17)$$

Eşitliklerde, σ_i^2 tahmin edilecek varyans bileşenleridir. Bu model Sjöberg (1984), Caspary (1987), Fotopoulos ve Sideris (2003) de verildiği gibi daha birçok çalışmada uygulanmıştır.

MINQUE problemi, Helmert problemine benzer olarak aşağıdaki sistemin çözümüne indirgenbilir.

$$S \sigma_i^2 = q \quad (18)$$

Bu eşitlikte, S , $k \times k$ boyutunda simetrik bir matristir ve bu matrisin s_{ij} elemanları aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$s_{ij} = iz(RQ_i RQ_j); \quad i, j = 1, 2, \dots, k \quad (19)$$

Eşitlikte, $Q(\cdot)$ her grup ölçü için pozitif tanımlı kofaktör matrisidir. R aşağıdaki gibi tanımlı simetrik Rao matrisidir.

$$R = C_b^{-1} [I - A(A^T C_b^{-1} A)^{-1} A^T C_b^{-1}] \quad (20)$$

Eşitlik 20’de, I, birim matris, A, katsayılar matrisi ve C_b , ölçülerin varyans-kovaryans matrisidir. q vektörü karesel formları içerir ve eşitlik 21’de verildiği gibi ifade edilir.

$$q = \{q_i\} ; q_i = v_i^T Q_i^{-1} v_i = b^T R Q_i R b \quad (21)$$

Eşitlikte v_i , her bir ölçme grubundaki b_i ölçüleri için, hesaplanan düzeltmelerdir. Sonuç olarak eşitlik 18 aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{bmatrix} iz(RQ_1RQ_1) & iz(RQ_1RQ_2) & \dots & iz(RQ_1RQ_k) \\ iz(RQ_2RQ_1) & iz(RQ_2RQ_2) & \dots & iz(RQ_2RQ_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ iz(RQ_kRQ_1) & iz(RQ_kRQ_2) & \dots & iz(RQ_kRQ_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 \\ \sigma_2^2 \\ \dots \\ \sigma_k^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b^T R Q_1 R b \\ b^T R Q_2 R b \\ \dots \\ b^T R Q_k R b \end{bmatrix} \quad (22)$$

İlk EKK dengelemesi sırasında, ölçü gruplarına ait $(\sigma_i^2)^0$ öncül varyans değerleri birbirlerine eşit olarak 1 seçilebilir. İlk MINQUE-VBT iterasyonundan hesaplanan $(\sigma_i^2)^1$ varyans değerleri, bir sonraki EKK dengelemesinde “yeni” öncül varyans değerleri olarak kabul edilir ve iterasyonlara böylelikle devam edilir. MINQUE algoritması iteratif olmasından dolayı iteratif MINQUE (iMINQUE) olarak adlandırılır. Her ölçü grubu için tahmin edilen öncül varyans değerleri birbirine eşit ve 1 olduğunda, iterasyona son verilir. Sonuç olarak her ölçü grubunun öncül varyans bileşeninin son değeri iterasyonlar sonucu bulunan değerlerin çarpımına eşit olur ve aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$\sigma_i^2 = \prod_{a=0}^n (\sigma_i^2)_a \quad (23)$$

GPS tekniği ile deformasyon analizi

S-transformasyonu

Farklı ölçme epokları arasındaki datum uyuşumu, S-transformasyonu ile sağlanır. Ayrıca, hareketli noktalar da bu yöntem ile belirlenebilir (Baarda, 1973; Strang van Hees, 1982). S-transformasyonu yeni bir dengeleme hesabına gereksinim olmaksızın bir datumdan diğer datuma dönüşümü sağlayan bir hesaplama yöntemidir. Diğer bir tanımla, S-transformasyonu, bilinmeyen parametrelerin,

ko-faktörler matrisleri ile birlikte, buldukları datumdan diğer bir datuma dönüştürülmeleri işlemidir. Bu işlem serbest ağ dengelemesi ile benzerdir. Herhangi bir i datumundan k datumuna dönüşüm, aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilir (Demirel, 1987; Welsch, 1993):

$$\underline{x}^k = \underline{S}_k \underline{x}^i \quad (24)$$

$$\underline{Q}_{xx}^k = \underline{S}_k \underline{Q}_{xx}^i \underline{S}_k^T \quad (25)$$

$$\underline{S}_k = I - \underline{G} (\underline{G}^T \underline{E}_k \underline{G})^{-1} \underline{G}^T \underline{E}_k \quad (26)$$

bu eşitliklerde, I birim matris, \underline{E}_k köşegen üzerindeki elemanları datum noktaları için 1 ve diğer noktalar için 0 olan datum belirleyici matristir.

$$\underline{E}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$G^T = \begin{array}{cc} & \begin{array}{ccc} 1.Nokta & & 2.Nokta \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \bar{z}_{10} \\ -\bar{y}_{10} \\ \bar{x}_{10} \end{array} & \begin{array}{ccccccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & \dots \\ 0 & -\bar{z}_{10} & \bar{y}_{10} & 0 & -\bar{z}_{20} & \bar{y}_{20} & \dots \\ \bar{z}_{10} & 0 & -\bar{x}_{10} & \bar{z}_{20} & 0 & -\bar{x}_{20} & \dots \\ -\bar{y}_{10} & \bar{x}_{10} & 0 & -\bar{y}_{20} & \bar{x}_{20} & 0 & \dots \\ \bar{x}_{10} & \bar{y}_{10} & \bar{z}_{10} & \bar{x}_{20} & \bar{y}_{20} & \bar{z}_{20} & \dots \end{array} \end{array} \begin{array}{l} \\ \\ \\ 3 \text{ Öteleme} \\ \\ 3 \text{ Dönme} \\ \\ 1 \text{ Ölçek} \end{array} \quad (28)$$

28 numaralı eşitlikte, \bar{x}_{i0} , \bar{y}_{i0} , \bar{z}_{i0} kontrol ağının ağırlık merkezine kaydırılmış yaklaşık koordinatlarıdır ve $i = 1, 2 \dots$ nokta sayısıdır.

Konvensiyonel 3B ağlarda datum defekti, dış parametre sayısına göre 7’dir. Bunun yanı sıra, GPS ağlarında ise her üç eksen yönündeki ötelemelerin sayısına eşit ve 3’tür (Welsch, 1993). Diğer taraftan, konvensiyonel ağlarda, ağda gerçekleştirilen ölçüler ile ilişkili olarak, datum defekt sayısı kesin olarak bilinirken, GPS ağlarında atmosferik etkiler, farklı anten türlerinin kullanılması, uzun bazların çözümünde farklı uydu efemeris bilgilerinin kullanılması, alıcı antenlerinin lokal kuzey istikametine yönlendirilmemesi gibi etkenlerden dolayı her zaman kesin olarak bilinemeyebilir (Blewitt, 1990).

S-transformasyonu ile global test

Deformasyon araştırmalarında kullanılan kontrol ağı, datum noktaları ve deformasyon noktalarından oluşur. Kontrol ağında, t_1 ve t_2 epoklarında gerçekleştirilen ölçmeler datum noktaları yardımıyla ortak bir datuma dönüştürülür.

Ağ noktalarındaki signifikant hareketlerin araştırılmasında, sürekli datum dönüşümü uygulanır. Ancak, bunun öncesinde, birbirleri ile karşılaştırılacak olan ölçüler herhangi bir datumda serbest ağ dengelemesi ile dengelenirler.

Dengeleme sonrasında, t_1 epokunda ölçülen kontrol ağı noktaları, f (datum) noktaları ve n (deformasyon) noktaları olmak üzere iki gruba ayrılır.

$$\underline{x}^i = \begin{bmatrix} x_f^i \\ x_n^i \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\underline{Q}_{xx}^i = \begin{bmatrix} Q_{ff}^i & Q_{fn}^i \\ Q_{nf}^i & Q_{nn}^i \end{bmatrix} \quad (30)$$

Eşitliklerde, \underline{x}^i i datumundaki parametreler vektörü, \underline{Q}_{xx}^i kofaktörler matrisidir. i datumundan k datumuna dönüşüm, \underline{E}_k datum belirleyici matris yardımıyla, 31 ve 32 numaralı eşitlikler kullanılarak gerekleştirilir:

$$\begin{bmatrix} x_f^k \\ x_n^k \end{bmatrix} = \underline{S}_k \begin{bmatrix} x_f^i \\ x_n^i \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\underline{Q}_{xx}^k = \begin{bmatrix} Q_{ff}^k & Q_{fn}^k \\ Q_{nf}^k & Q_{nn}^k \end{bmatrix} = \underline{S}_k \underline{Q}_{xx}^i \underline{S}_k^T \quad (32)$$

Ayrıca, 29-32 eşitliklerinde belirtilen işlemler yinelenerek, j datumundan k datumuna dönüşüm sağlanır. Bu sayede, datum i ve datum j , verilen datum noktaları yardımıyla, aynı bir k datumuna dönüştürülür. Böylece, koordinat bilinmeyenlerini içeren vektörler, $(x_f^k)_i$ ve $(x_f^k)_j$, ve onların kofaktör matrisleri, $(Q_{ff}^k)_i$ ve $(Q_{ff}^k)_j$, datum noktaları için aynı bir k datumunda türetilir.

Global test ile datum noktalarında olası bir signifikant hareket varsa, belirlenir. Datum nokta-

larının global testi için kurulan H_0 hipotezi ve T-test değeri aşağıdaki şekilde verilir (Pelzer, 1971; Caspary, 1987; Fraser ve Gründig, 1985):

$$H_0 : E(\underline{x}_f^k)_i = E(\underline{x}_f^k)_j \quad (H_0 \text{ sıfır hipotezi}) \quad (33)$$

$$\underline{d}_f = (\underline{x}_f^k)_j - (\underline{x}_f^k)_i \quad (\text{yerdeğiştirme vektörü}) \quad (34)$$

$$(\underline{Q}_{dd})_f = (\underline{Q}_{ff}^k)_i + (\underline{Q}_{ff}^k)_j \quad (\underline{d}_f \text{ nin kofaktör matrisi}) \quad (35)$$

$$\underline{R}_f = \underline{d}_f^T (\underline{Q}_{dd})_f^{-1} \underline{d}_f \quad (\text{karesel form}) \quad (36)$$

$$s_0^2 = \frac{f_i s_{0i}^2 + f_j s_{0j}^2}{f_i + f_j} \quad (\text{bütünleşik varyans değeri}) \quad (37)$$

$$T = \frac{\underline{R}_f}{s_0^2 h_f} \quad (\text{test değeri}) \quad (38)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde, R_f 'nin serbestlik derecesi, $h_f = \text{rank} \left\{ (\underline{Q}_{dd})_f \right\} = u_f - df$, u_f datum noktaları için bilinmeyen sayısı, df datum defekti, $(\underline{Q}_{dd})_f^+$ ise $(\underline{Q}_{dd})_f$ 'nin pseudo inversidir ve $(\underline{Q}_{dd})_f^+ = \left((\underline{Q}_{dd})_f + GG^T \right)^{-1} - G(G^T GG^T G)^{-1} G^T$ 'dir (Caspary, 1987).

Eğer $T > F_{h_f, l-\alpha}$ ($f = f_i + f_j$) ise, kontrol ağının datum noktalarının bir bölümünde signifikant hareketlilik olduğu kararlaır. Global testin sonucunda, datum noktalarının bir bölümünde, signifikant hareketlilik saptanması halinde, hareketli olan noktaların belirlenmesi (deformasyonların lokalize edilmeleri) amacıyla S-transformasyonu işlemine devam edilir (Chrzanowski ve Chen, 1986; Fraser ve Gründig, 1985). Bu adımda, ilk olarak, datum noktalarının her birinin hareketli olabileceği (konum değişimi muhtemel) varsayılır. Her bir nokta için datum noktaları iki alt guruba ayrılır: birinci gurup stabil varsayılan datum noktalarını içerirken ikinci alt grupta hareketli varsayılan (test edilecek olan) datum noktası tek başına yer alır ve yukarıda özetlenen işlem adımları her bir datum noktası için tekrarlanır. Böylelikle, tüm noktaların stabil olup olmadıkları sınanmış olur. Hesaplamaların sonucunda, kesin datum noktaları belirlenmiş olur (Caspary, 1987; Demirel, 1987).

Deformasyon miktarlarının belirlenmesi

Signifikant harekete sahip noktalar, önceki bölümde anlatıldığı gibi belirlendikten sonra, deformasyonsuz noktalar (datum noktaları) bloğu

elde edilmiş olur. Bu datum noktalarının yardımıyla, her iki ölçme epoku aynı datuma getirilir ve deformasyon miktarları aşağıda açıklandığı şekilde hesaplanır (Cooper, 1987).

Bir P noktası için deformasyon vektörü:

$$\underline{d} = \begin{bmatrix} x_k^i - x_k^j \\ y_k^i - y_k^j \\ z_k^i - z_k^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (39)$$

ve deformasyon vektörünün şiddeti:

$$d = \sqrt{\underline{d}^T \underline{d}} \quad (40)$$

Yukarıda verilen eşitliklere göre hesaplanan deformasyon vektörlerinin anlamlılığının (anlamlılığının) testi için, H_0 hipotezi:

$$H_0 : d = 0 \quad (41)$$

ve test değeri:

$$T = \frac{\underline{d}^T \underline{Q}^{-1} \underline{d}}{3s_0^2} \quad (42)$$

Eşitlik 42 ile hesaplanan test değeri, $F_{3, f, 1-\alpha}$ kritik değeri ile karşılaştırılır. Eğer test değeri, kritik değerden büyükse ($T > F_{3, f, 1-\alpha}$), P noktasında $3B$ deformasyonun anlamlı olduğuna karar verilir.

Sayısal test

Bu çalışmada, Avrupa transit otopanı üzerinde, yer alan 2160 m uzunluğundaki Karasu viyadüğünün deformasyonları, GPS ve presizyonlu nivelman verileri ile araştırılmıştır. Viyadük, İstanbul'un güney-batısında, Kuzey Anadolu Fay hattına yakın bir bölgede inşa edilmiştir ve viyadüğün 1000 m'lik bölümünün taşıyıcı ayakları Büyükçekmece Gölü içerisinde yer almaktadır (Şekil 1).

Karasu viyadüğü kuzey ve güney olmak üzere iki bağımsız köprüden oluşur. Her bir köprü 55 adet betonarme ayak üzerinde taşınmaktadır ve taşıyıcı ayakların toplam sayısı 110'dur. Köprü boyunca, ardışık iki taşıyıcı ayak arasındaki me-

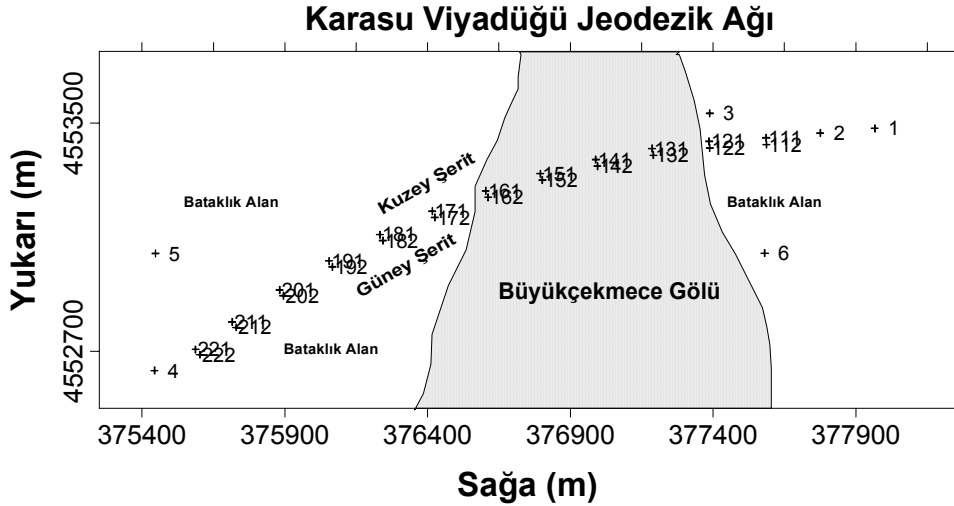
safesi 40 metredir ve her beş ayakta bir deformasyon noktası tesis edilmiştir.

Deformasyon ölçmeleri, altı aylık periyotlar ile düzenlenen toplam dört adet kampanyadan oluşur ve her bir kampanya GPS ölçmeleri ile presizyonlu nivelman ölçmelerini içerir. Ölçme kampanyaları öncesinde, ilk olarak, viyadüğün yapısal deformasyonlarının izlenmesine uygun, lokal bir jeodezik ağ tesis edilmiştir (Şekil 1). Lokal jeodezik ağ, viyadük çevresine tesis edilen 6 adet referans noktası ile viyadük gövdesi üzerinde karşılıklı olarak her iki köprüde tesis edilen 24 adet deformasyon noktasından oluşmaktadır. Deformasyon noktaları, viyadük gövdesi üzerinde en stabil noktalar olan taşıyıcı ayakların üzerlerine tesis edilmişlerdir. Ağ noktaları, her bir ölçme kampanyasında, amaca yönelik olarak dikkatlice planlanmış oturum planlarına uygun olarak, GPS ölçme tekniği ile ölçülmüş ve ağ noktaları arasında, gidiş-dönüş presizyonlu nivelman ölçmeleri gerçekleştirilmiştir.

GPS oturumları sırasında, çift frekanslı GPS alıcıları kullanılarak statik ölçme yöntemi uygulanmıştır. Noktalarda olası merkezleştirme hatalarından kaçınmak amacıyla, zorunlu merkezleştirme tertibatı kullanılmıştır. Nivelman ölçmelerinde Koni 007 presizyonlu nivo ile bir çift invar mirası kullanılmıştır. Noktaların rölatif konum doğrulukları milimetre mertebesinde dir. Presizyonlu nivelman ölçmelerinden elde edilen nokta yüksekliklerinin doğrulukları 0.2 ile 1.0 milimetre arasındadır.

Yükseklik farklarını içeren her üç veri grubu (Δh , ΔH ve onların kombinasyonu) kullanılarak, klasik yaklaşım ile gerçekleştirilen deformasyon analizlerinin sonuçları, 3, 4 ve 5 numaralı şekillerdeki grafikler ile gösterilmektedir.

Üçüncü adımda, GPS tekniğinden ve presizyonlu nivelman ölçmelerinden elde edilen yükseklik farkları ile $1B$ bütünleşik deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki ölçme tekniğinden elde edilen yükseklik farklarının birlikte değerlendirilmesinde, iki tekniğin sağlamış olduğu ölçü doğruluklarının farklı olması ve bunun değerlendirilmelerinde dikkate alınması oldukça önemli ve gereklidir. Bu bağlamda, bu ölçü grupları arasındaki



Şekil 1. Karasu viyadüğü jeodezik ağına ait konfigürasyonu

stokastik ilişkilerin hesaplama algoritması içerisinde ifade edilmesi gerekmektedir. Her bir ölçü gurubundaki yükseklik farklarına ilişkin ağırlıkların türetilmesinde MINQUE ve Helmert VBT yaklaşımları denenmiştir. Her iki VBT yaklaşımından elde edilen sonuçlar, Şekil 2a ve 2b’de yer almaktadır.

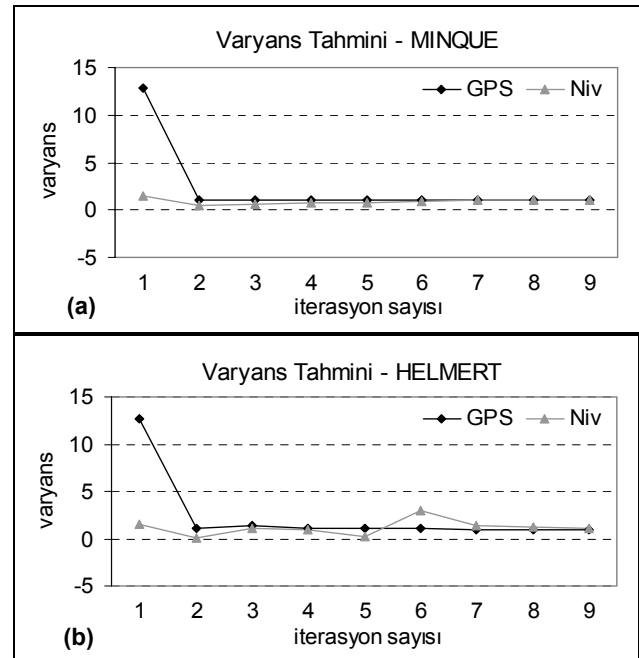
Bu çalışmada, uygulanan her iki VBT tekniği de belirli sayıdaki iterasyonlar sonrasında aynı sonucu sağlamış olsalar dahi, MINQUE yaklaşımı Helmert tekniğine kıyasla sonuca daha çabuk ve pürüzsüz (net) ulaştığı için (Şekil 2), çalışmanın sonraki adımı, MINQUE tekniğinden elde edilen stokastik bileşenler ile sürdürülmüştür.

Analizlerin sonuçlarında, viyadüğün köprülerinden her birindeki deformasyonların aynı karakterde oldukları gözlemlendiğinden, buradaki grafiklerde, yalnızca kuzey köprüye ilişkin yükseklik değişimleri gösterilmiştir. Viyadüğün güney şeridinde elde edilen analiz sonuçları, kuzey şeridindeki noktaların yükseklik değişimlerine ilişkin sergilenen bulguları desteklemektedir.

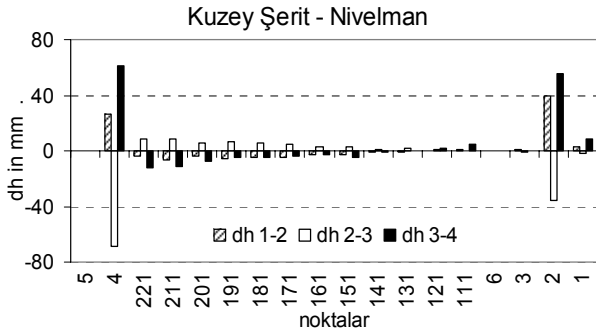
Çalışmanın sonucunda, yükseklik farkları ile gerçekleştirilen her üç analizden elde edilen bulgular, birbirlerini destekler niteliktedir. 3, 4 ve 5 numaralı şekiller irdelendiğinde, ardışık kampanyalar arasında tüm referans ve deformasyon noktalarının hareketlerinin benzer davranışlar gösterdikleri anlaşılmaktadır. En büyük hareketlilik saptanan noktalar 2 ve 4 numaralı

ağ noktalarıdır ve kaydedilen hareketler significant deformasyonlar olarak saptanmıştır.

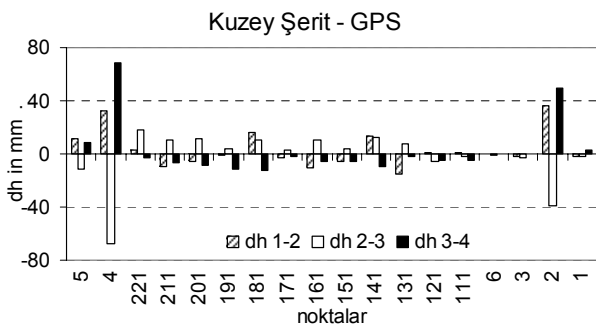
Şekil 6, ardışık kampanyalar arasında, ağ noktalarındaki geoid yükseklik değişimlerini ($\Delta N = \Delta h - \Delta H$) göstermektedir. Bununla birlikte, bu grafikte verilen sonuçlar 3 ve 4 numaralı grafiklerde sergilenen sonuçlar doğrultusunda irdelendiğinde, geoid yüksekliklerindeki değişimlerin, GPS ölçülerinin içerdiği hatalardan kaynaklandığı



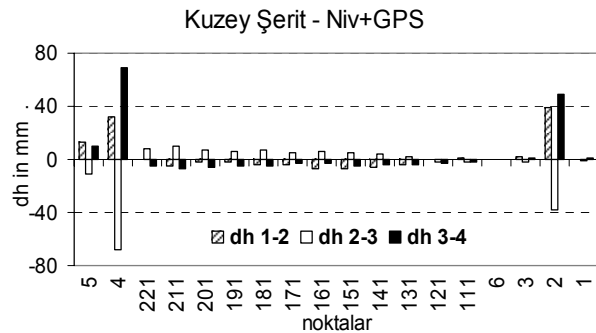
Şekil 2. Grafikler VBT tekniklerinin iterasyon sonuçlarını göstermektedir: a-MINQUE yaklaşımı, b-Helmert yaklaşımı



Şekil 3. Viyadüğün kuzey şeridinde, ardışık kampanyalar arasında nivelman tekniğinden elde edilen nokta yükseklik değişimleri



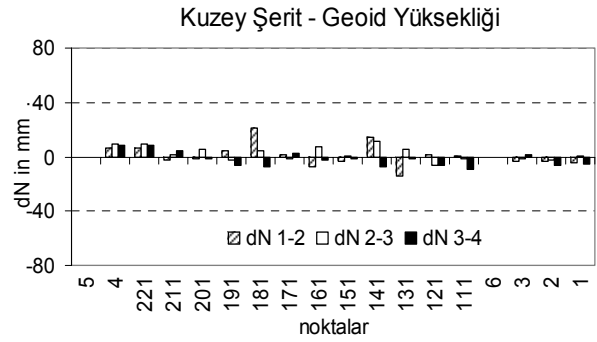
Şekil 4. Viyadüğün kuzey şeridinde, ardışık kampanyalar arasında GPS tekniğinden elde edilen nokta yükseklik değişimleri



Şekil 5. Viyadüğün kuzey şeridinde, ardışık kampanyalar arasında GPS ve nivelman ölçmelerinin kombinasyonundan elde edilen nokta yükseklik değişimleri

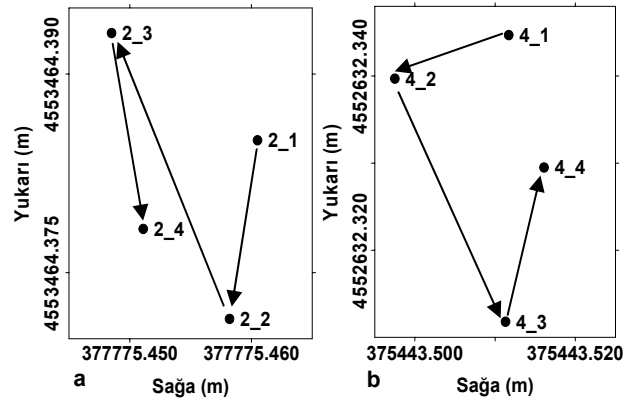
ve de noktalardaki deformasyonlara ilişkin bir gösterge olamayacağı anlaşılmıştır. Çünkü, ölçme kampanyaları arasında, nivelmandan türetilen yükseklik farkları bir hareket yansıtmadığı halde, aynı noktalarda GPS tekniğinden türetilen yükseklik farkları hareket yansıtmaktadır.

Bu çalışma ile nivelman tekniğinin, GPS' den elde edilen yükseklikler için ve özellikle GPS oturumları sırasında sıkça karşılaşılan anten yüksekliği ölçme hatalarına karşı, kontrol sağladığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuç, deformasyonların izlenmesi ve analizinde nivelman ölçmelerinin GPS tekniğine olan katkısının önemi ve gerekliliğine işaret etmektedir.



Şekil 6. Ardışık kampanyalar arasındaki geoid yükseklik değişimleri (kuzey şerit)

Viyadük deformasyonlarının olabildiğince çok yönlü ve detaylı irdelenmesi amacıyla gerçekleştirilen 1B deformasyon analizleri ve araştırmaları sonrasında, köprünün 3B deformasyonları da araştırılmıştır. 3B deformasyon analizi ile elde edilen yatay yer değiştirme vektörleri, büyüklükleri ile birlikte, Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Yatay yer değiştirme vektörleri:
a-) 2 numaralı noktada (maksimum 2 cm),
b-) 4 numaralı noktada (maksimum 3 cm)

Sonuçlar ve öneriler

Bu güne kadar gerçekleştirilen çok sayıdaki bilimsel araştırma ve yayında belirtildiği üzere, GPS

tekniklerinden elde edilen konum bilgisinin en düşük doğruluğa sahip bileşeni yüksekliktir. Yükseklik bileşeninin yatay konum bileşenlerinden daha düşük doğruluğa sahip olması, temelde GPS uydularının uzaydaki konfigürasyonundan kaynaklanır. Bu sebepten dolayı, düşey deformasyonların araştırılmasında, GPS tekniği, presizyonlu nivelman tekniği ile desteklenerek, düşey konum doğruluğu iyileştirilmelidir.

Bu çalışmada, büyük bir mühendislik yapısının 1B ve 3B deformasyonları, GPS ve nivelman verilerinin ayrı ayrı ve birlikte kullanılmaları ile analiz edilmiş, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca, GPS tekniğinden elde edilen konum bilgisinin, deformasyon araştırmalarında kullanılmak üzere, doğruluğunun iyileştirilmesine yönelik, GPS ve nivelman verilerinin optimal kombinasyonunun araştırılması da çalışmanın diğer bir amacını oluşturmuştur.

3, 4 ve 5 numaralı şekiller irdelendiğinde, nokta tesisleri pilye olmasına rağmen, başlangıçtaki varsayımın aksine, en büyük yükseklik değişimi 2 ve 4 numaralı ağ noktalarında saptanmıştır (2 ve 4 numaralı noktaların konumu için bkz. Şekil 1). GPS verilerinin analizlerinden elde edilen sonuçlara göre, viyadük üzerindeki bazı noktalarda da yükseklik değişimi tespit edilmiştir. Ancak, bu saptamanın yanı sıra, nivelman verilerinin ve bunların GPS verileri ile kombinasyonu ile gerçekleştirilen analiz sonuçları dikkate alındığında, viyadük üzerindeki noktalarda önceden saptanan değişimlerin signifikant olmadığı anlaşılmış ve GPS ölçülerinin içerdiği hatalardan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, ağ noktalarının stabil olup olmadıklarının araştırılmasında, 1B deformasyon analizi sonuçları, 3B deformasyon analizine girdi sağlamıştır. 3B analizin sonucunda, 2 ve 4 numaralı noktalarda yatay deformasyon saptanmış (Şekil 7), bunun yanı sıra 1, 3 ve 5 numaralı ağ noktalarının stabil oldukları anlaşılmıştır. İlk bakışta, 2 ve 4 numaralı ağ noktalarda saptanan yer değiştirmeler umulmadık ve şaşırtıcıdır. Ancak, bölgenin jeolojik ve jeofiziksel yapısının göz önünde tutulduğu daha detaylı bir irdelemenin sonucunda bu hareketlerin doğal olduğu anlaşılmıştır. Çünkü bölgede

zemin bataklık bir yapıdadır ve zeminin bu özelliği 2 ve 4 numaralı referans noktalarının tesislerinin altına doğru devam etmektedir. Bölgedeki üst toprak tabakası stabil bir yapıda değildir ve bu durum tesis temeli viyadüğün taşıyıcı ayakları kadar derinlerde olmayan pilye yapıları etkilemiştir. Bu nedenle 2 ve 4 numaralı noktaların pilye tesisleri çevresel güçlerin etkisinde zamanla hareket etmiştir. 1, 3 ve 5 numaralı noktaların nokta tesislerinin temelleri de, viyadüğün taşıyıcı ayakları kadar derinde değildir ancak bu noktaların tesisleri 2 ve 4 numaralı noktalardan farklı olarak, 3 x 3 x 3 metre boyutlarındaki beton platformlara tespit edilmiş çelik çivilerdir ve bu nedenle zemin hareketlerinden etkilenmemişlerdir. Ayrıca jeolojik bulgular bölgedeki toprak yapısının oldukça değişken olduğunu ve farklı özellikte katmanlardan oluştuğunu ortaya koymaktadır. Buna dayanılarak, nokta tesislerinin farklı olmasının yanı sıra, üzerine rastladıkları jeolojik yapının farklılığı da, ağ noktalarından 2 ve 4'ün hareketli olmasının yanında 1, 3 ve 5 numaralı noktaların stabil (sabit) kalmasını açıklayabilir.

Diğer taraftan, 2 ve 4 numaralı noktaların düşey hareketlerinin yorumlanmasında ve karakterlerinin açıklanmasında; mevsimsel su seviyesi değişimleri etken olmuştur. Analizler neticesinde, noktalarda saptanan batma ve çıkma yönlerindeki hareketlilik, sırasıyla, yılın kuru ve ıslak dönemleri ile senkronize görülmektedir.

Bu çalışma, viyadük deformasyonlarının araştırılması ve açıklanması amacıyla gerçekleştirilen analizlere ve bunlardan edinilen bulgulara dayanılarak, GPS ölçmelerinin deformasyon araştırmalarında kullanılabilirliğine yönelik önemli sonuçlar ortaya konmuştur. Bu sonuçlar: i-) GPS tekniğinin deformasyon araştırmalarında kullanılmasında ölçü hatalarını önleyici ya da azaltıcı bazı önlemler gerekmektedir. GPS' den elde edilen nokta konum doğruluklarını iyileştirmeye katkı yapabilecek bu önlemler arasında: anten merkezleştirme hatalarından kaçınmak için zorunlu merkezleştirme tertibatı kullanılması, anten yüksekliklerinin operatör tarafından az hata ile ölçülebilmesi için özel ölçme donanımları kullanılması, çevredeki yansıtıcı yüzeylerden kaynaklı "multipath" hatalarının etkileri-

ni azaltmak amacıyla özel antenlerin kullanılması vb. ii-) 1B ve 3B deformasyon analizlerinde daha gerçekçi, güvenilir sonuçlar ve sağlıklı kararlar için GPS tekniği presizyonlu nivelman ölçüleri ile desteklenmelidir.

Kaynaklar

- Baarda, W., (1973). S-transformation and criterion matrices, *Netherlands Geodetic Commission Publications on Geodesy*, **5**, 1.
- Biacs, Z.F., (1989). Estimation and hypothesis testing for deformation analysis in special purpose networks, *Doktora Tezi*, Calgary Üniversitesi, Calgary.
- Blewitt, G., (1990). GPS techniques for monitoring geodynamics at regional scales, *Proceedings, Second International Symposium on GPS*, 495-507, Kanada.
- Caspary, W.F., (1987). Concept of network and deformation analysis, *Monograph 11*, School of Surveying, University of New South Wales, 1-183, New South Wales.
- Chen, Y.G. ve Chrzanowski, A., (1985). Assessment of levelling measurements using the theory of MINQUE, *Proceedings, 3rd International Symposium North American Vertical Datum*, 389-400, Rockville.
- Chen, Y.Q., ed. (1983). Analysis of deformation surveys – a generalized method, *Teknik Rapor 94*, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, 1-262, Kanada.
- Chrzanowski, A. ve Chen, Y.Q., (1986). Report of the ad hoc committee on the analysis of deformation surveys, *Proceedings, FIG XVIII International Congress*, 167-185, Toronto.
- Chrzanowski, A., Chen, Y.Q., Secord, J.M. ve Chrzanowski, A.S., (1991). Problems and solutions in the integrated monitoring and analysis of dam deformations, *CISM Journal*, **45**, 4, 547-560.
- Chrzanowski, A. ve Chrzanowski, A.S., (1995). Identification of dam deformation mechanism, *Proceedings, MWA International Conference on Dam Engineering*, 179-187, Kuala Lumpur.
- Cooper, M.A.R., (1987). *Control surveys in civil engineering*, Blackwell Scientific, Oxford, USA.
- Crocetto, N., Gatti, M. ve Russo, P., (2000). Simplified formulae for the BIQUE estimation of variance components in disjunctive observation groups, *Journal of Geodesy*, **74**, 447-457.
- Demirel, H., (1987). S-Transformation and deformation analysis, *Proceedings, Birinci Türkiye Harita Teknik ve Bilimsel Kurultayı*, 23-27, Ankara.
- Erol, S. ve Ayan, T., (2003). An investigation on deformation measurements of engineering structures with GPS and levelling data case study, *Proceedings, International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in the Globalizing World*, Sofia, Bulgaristan.
- Featherstone, W.E., Denith, M.C. ve Kirby, J.F., (1998). Strategies for the accurate determination of orthometric heights from GPS, *Survey Review*, **34**, 267, 278-296.
- Fotopoulos, G., (2003). An analysis on the optimal combination of geoid, orthometric and ellipsoidal height data, *Doktora Tezi*, Calgary Üniversitesi, Calgary.
- Fotopoulos, G. ve Sideris, M.G., (1997). On the estimation of variance components using GPS, geoid and levelling data, *Proceedings, Canadian Geophysical Union Annual meeting: Challenges and opportunities for geophysics in Canada*, Banff, Kanada.
- Fraser, C.S., ve Gründig, L., (1985). The analysis of photogrammetric deformation measurements on Turtle Mountain, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **51**, 4, 207-216.
- Grafarend, E.W., (1984). Variance-Covariance components estimation, theoretical results and geodetic applications, *Proceedings, 16th European Meeting of Statisticians*, Marburg.
- Gründig, L., Neureither, M. ve Bahndorf, J., (1985). Detection and localization of geometrical movements, *ASCE Journal of Surveying Engineering*, **111**, 2, 118-132.
- Helmert, F.R., (1924). Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadratic, 3. Auflage.
- Kızılsu, G., (1998). Precision analysis for Lageos I and Lageos II, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Niemeier, W., Teskey, W.F. ve Lyall, R.G., (1982). Precision, reliability and sensitivity aspects of an openpit monitoring network, *Australian Journal of Geodesy*, **37**, 2, 1-27.
- Pelzer, H., (1971). Zur Analyse geodatischer deformationsmessungen, *Deutsche Geodatische Kommission*, **164**, C, 1-86.
- Rao, C.R., (1970). Estimation of heterogeneous variances in linear models, *Journal of American Statistical Association*, **65**, 161-172.
- Rao, C.R., (1971). Estimation of variance components – MINQUE Theory, *Journal of Multivariate Statistics*, **1**, 257-275.
- Rao, C.R. ve Kleffe, J., (1988). Estimation of variance components and applications, *North-Holland Series in Statistics and Probability*, **3**.

- Sjöberg, L., (1984). Non-negative variance component estimation in the Gauss-Helmert Adjustment Model, *Manuscripta Geodaetica*, **9**, 247-280.
- Strang van Hees, G.L., (1982). Variance-covariance transformations of geodetic networks, *Manuscripta Geodaetica*, **7**, 1-20.
- Teskey, W.F. ve Biacs, Z.F., (1990). A PC-based program system for adjustment and deformation analysis of precise engineering and monitoring networks, *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying*, **52**, 37-55.
- Wang, J., Stewart, M. ve Tsakiri, M., (1998). Stochastic modelling for static GPS baseline data processing, *Journal of Surveying Engineering*, **124**, 4, 171-181.
- Welsch, W.M., (1993). A general 7-parameter transformation for the combination, comparison and accuracy control of terrestrial and satellite network observations, *Manuscripta Geodaetica*, **18**, 295-305.