

GPS VE NİVELMAN VERİLERİNİN KOMBİNASYONU VE DEFORMASYON ANALİZİ

S. Erol¹, T. Ayan²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Jeodezi Anabilim Dalı, İstanbul, erol@itu.edu.tr

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Jeodezi Anabilim Dalı, İstanbul, ayan@itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, deformasyonların belirlenmesinde, GPS ölçüleri ile nivelman ölçülerinin kombinasyonunun düşey konumlama doğruluğuna olan katkısı araştırılmaktadır. Bu amaçla düşey konum bileşenlerinin kombinasyonu ele alınmıştır ve analiz edilmiştir. Her iki ölçme grubundan elde edilen yükseklik farklarının kombinasyonunda öncül varyansların belirlenmesi Helmert ve MINQUE (Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation) yöntemleri yardımıyla yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmada her iki ölçme tekniğinden elde edilen yükseklik farklarının kombinasyonu sırasında, kullanılan presizyonlu nivelman ölçmelerinin sayısının öncül varyans bileşenlerinin tahminine olan etkisi de incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: GPS, Presizyonlu Nivelman, Deformasyon Analizi, Varyans Bileşeninin Tahmini, MINQUE.

ABSTRACT

COMBINATION OF GPS AND LEVELLING DATA AND DEFORMATION ANALYSIS

This paper discusses the augmentation of GPS with terrestrial levelling to assess the accuracy improvement possible in vertical component when applied to deformation monitoring. To combine the GPS and levelling measurements, estimation of the apriori variances were calculated by the help of Helmert and Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation (MINQUE) methods. This paper reports on initial findings in a study on the combination of varying densities of levelling data with GPS results.

Keywords: GPS, Precise Levelling, Deformation Analysis, Variance Component Estimation, MINQUE.

1. GİRİŞ

GPS, santimetre ve hatta bazı koşullar sağlandığında milimetre mertebesindeki deformasyonların belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir (Beutler ve diğ., 2001; Hartinger ve Brunner, 1998). GPS ölçmelerinden milimetre mertebesinde doğruluk elde etmek için bazı hata kaynaklarını giderecek özel önlemler almak gerekmektedir. Bu önlemlerin bazıları; zorunlu merkezleştirme sistemi kullanmak, özel hazırlanmış anten yüksekliği ölçme donanımları kullanmak, özel ölçme yöntemleri kullanmak (örnek olarak Hızlı-Statik) (Erol ve Ayan, 2003) olarak sayılabilir. Bazı durumlarda her ne kadar gerekli bütün önlemler alınsa da beklenen doğruluğa ulaşılamamaya bilinir. Geçmişte jeodezik veya jeodezik olmayan farklı ölçme tekniklerinin kombinasyonu bir tekniğin yetersiz olduğu durumların üstesinden gelmek için kullanılmıştır (Chrzanowski ve Chrzanowski, 1995). GPS yöntemiyle belirlenen yükseklik farklarının varyansı yatay konum bileşenlerinin varyanslarına göre daha büyük değerlerdir. Bu durumun sebebi uydu-alıcı geometrisi ve giderilemeyen atmosferik hatalardır. Bu çalışmada GPS ve Presizyonlu nivelman verilerinin kombinasyonunun deformasyon analizindeki önemi ve presizyonlu nivelmanın GPS den elde edilen yükseklik farklarının kontrolü için gerekliliğini ortaya konulmuştur.

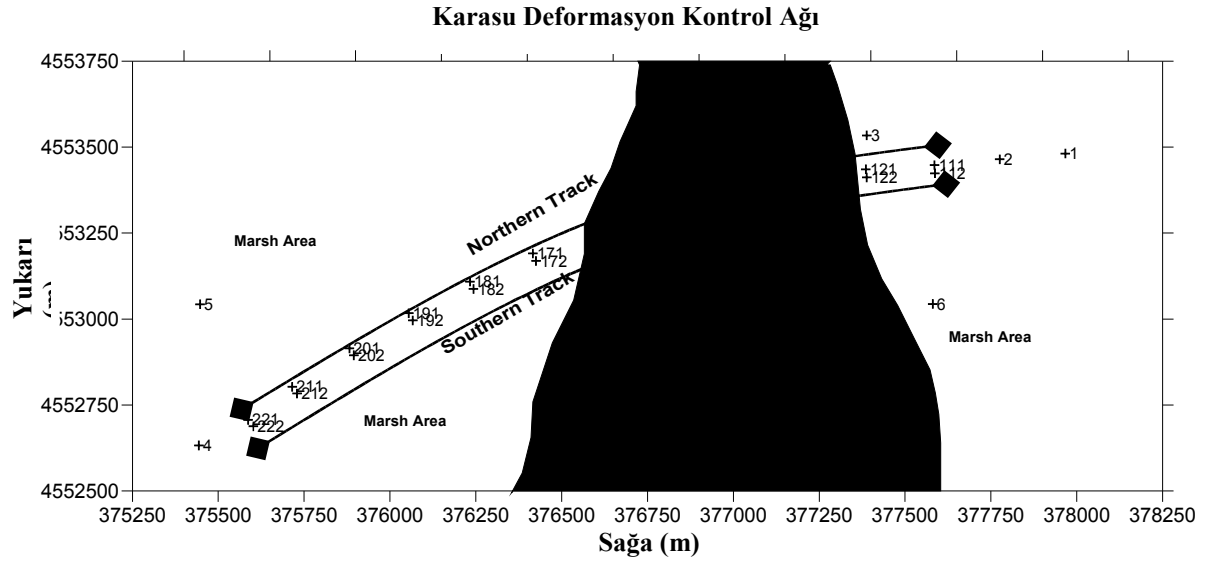
2. KONTROL AĞI VE ÖLÇMELER

Bu çalışmada, Karasu viyadüğündeki düşey deformasyonlar, GPS ve Presizyonlu nivelman ölçüleri kullanılarak incelenmiştir. Söz konusu bu viyadük, İstanbul'un yaklaşık 60 km batısında, TEM'in (Transit Avrupa Otoyolu) Kınalı-Mahmutbey bölümü üzerinde yer alan ve ilk 1000 metrelik kısmı Büyük Çekmece Baraj Gölü üzerinden geçen, Türkiye'nin en uzun viyadüğüdür (2160 m). Şekil 1'de Karasu viyadüğünün yapımı sırasındaki bir fotoğrafı ve bitmiş haldeki bir hava fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 1: Karasu Viyadüğü

Viyadük kuzey ve güney olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır ve her iki kısımda 55 adet olmak üzere toplam 110 taşıyıcı ayağın üzerindedir. Taşıyıcı ayaklar arası 40 metre olup her beş ayaktan birinde deformasyon noktası tesis edilmiştir. Viyadük üzerinde toplam 24 deformasyon noktası ve etrafında 6 izleme noktasıyla birlikte 30 noktalık bir kontrol ağı oluşturulmuştur. Bu kontrol ağı altı ay aralıklarla iki yılda dört kampanya olarak belirlenen uygun ölçme planlarına göre GPS tekniği ile ölçülmüş ve her kampanyada noktalar arası presizyonlu nivelman ölçmesi yapılmıştır. Şekil 2’de Karasu viyadüğünde tesis edilen kontrol ağı görülmektedir.



Şekil 2: Karasu viyadüğü deformasyon kontrol ağı

3. YÜKSEKLİK DEĞİŞİMLERİNİN ANALİZİ

Genellikle, geleneksel deformasyon analizi üç adımda yapılır. Birinci adımda kampanya ölçmeleri ayrı ayrı serbest dengelenir ve uyuşumsuz ölçüler ayıklanır. İkinci adımda global test işlemi yapılır, global test yardımıyla kontrol ağına hangi noktaların iki kampanya arasında gerçekten sabit kalıp kalmadıkları test edilir. Bu test sırasında iki kampanya ölçüleri birlikte dengelenir. Bütün dengelemeler sonucu aşağıdaki değerler elde edilir.

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

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

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

$$\Omega_0 = \Omega_1 + \Omega_2 \quad , \quad f_0 = f_1 + f_2 \quad , \quad r = f_G - f_0 \quad , \quad T_G = \frac{(\Omega_G - \Omega_0) / r}{(\Omega_0 / f_0)} \quad (4)$$

T_G test büyüklüğü Fischer dağılımından alınan kritik değerle karşılaştırılır ve global test amacına ulaşıncaya kadar bu adım tekrar edilir.

Son adım olan üçüncü adıma gelindiğinde iki kampanya arası sabit kalmış olan ağ noktaları belirlenmiş olur ve bu noktalar yardımıyla, deformasyon noktalarının yükseklerinin değişimi aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanan T_H test büyüklüğünün Fischer dağılımından alınan kritik değerle karşılaştırılmasıyla test edilir (Ayan, 1982; Ayan ve diğ., 1991).

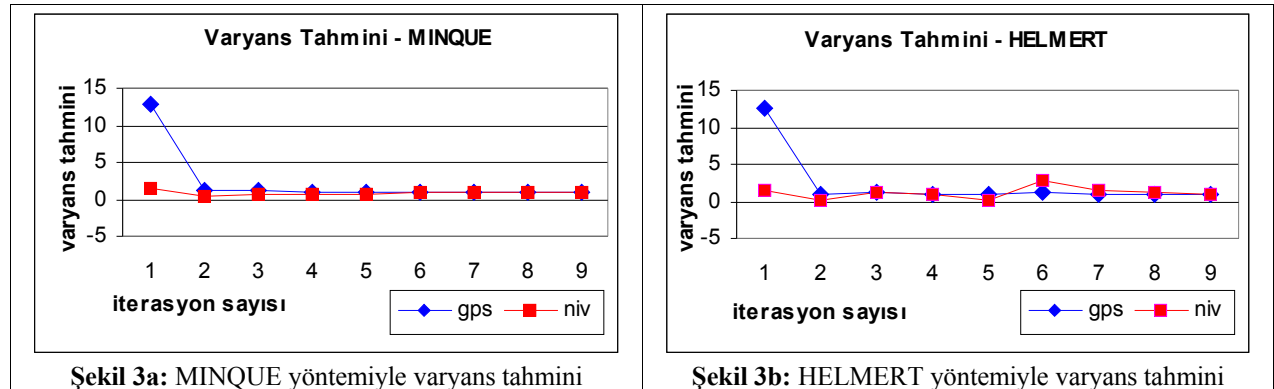
$$d = H_2 - H_1 \quad S_0^2 = \frac{\Omega_0}{f_0} \quad T_H = \frac{d^T Q_{dd}^{-1} d}{r S_0^2} \quad Q_{dd} = Q_{H_1 H_1} + Q_{H_2 H_2} \quad (5)$$

4. GPS VE NİVELMAN ÖLÇMELERİNİN KOMBİNASYONU

4.1. Varyans Bileşeninin Tahmini

En küçük kareler dengelemesinde, dengelemeye girecek ölçülerin ağırlıklarının bilinmesi bilinmeyenlerin gerçekçi bir şekilde belirlenmesi için gerekli bir koşuldur. Varyans bileşeninin belirlenmesinin amacı, dengelemeye girecek ölçüler için güvenilir ve gerçekçi bir varyans-kovaryans matrisini oluşturmaktır. Eğer dengeleme öncesi ölçülerin stokastik bilgileri anlamlı değil ise dengeleme sonrası bulunan bilinmeyenlerin güvenilirliğinden şüphe edilir ve belirlenen bu bilinmeyenlerle deformasyon analizi yapmak gerçekçi olmayan sonuçlara neden olur.

Varyans bileşeninin belirlenmesi problemi 1924 yılında Helmert ile başlamaktadır. Uzunca bir aradan sonra 1970 yılında Rao, Helmert yönteminden habersiz olarak Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation (MINQUE) yöntemini geliştirir. Aslında, ölçülerin normal dağılımda olduğu kabul edilirse bu her iki yöntemden elde edilen sonuçların eşit olduğu görülmektedir. Aşağıdaki şekillerde bir kampanya için GPS ve nivelman ölçülerinin kombinasyonu sırasında her iki varyans tahmini yönteminin iterasyon başarısı görülmektedir (Şekil. 3a, 3b).



Varyans Analizi 20. yüzyılların başında F.R. Helmert tarafından geliştirilmiş ve ilk kez farklı ölçü gruplarının kombinasyonunda uygulanmıştır (Grafarend, 1984). Helmert varyans analizinin matematiksel modeli özet olarak şu şekildedir.

$$H\sigma^2 = c \quad (6)$$

$$c_i = v_i^T P_i v_i \quad (7)$$

$$h_{ii} = n_i - 2\text{Tr}(N^{-1}N_i) + \text{Tr}(N^{-1}N_i N^{-1}N_i) \quad (8)$$

$$h_{ij} = \text{Tr}(N^{-1}N_j N^{-1}N_i), \quad (i \neq j) \quad (9)$$

Bu eşitliklere göre her ölçü grubu için σ^2 varyans değerleri 1 değerine ulaşıncaya kadar iterasyon devam eder.

MINQUE yönteminin genel teorisi ve algoritması 1970 yılında Rao tarafından geliştirilmiştir (Rao, 1971). MINQUE yöntemi en fazla tercih edilen varyans tahmin yöntemi olup 1985 yılında nivelman ağlarının kombinasyonu için Chen ve Chrzanowski ve 1998 yılında GPS baz bileşenlerinin kombinasyonu için Wang tarafından kullanılmıştır.

4.2. Ölçü Gruplarının Kombinasyonunda Varyans Bileşeni Tahmini (VBT) nin Önemi

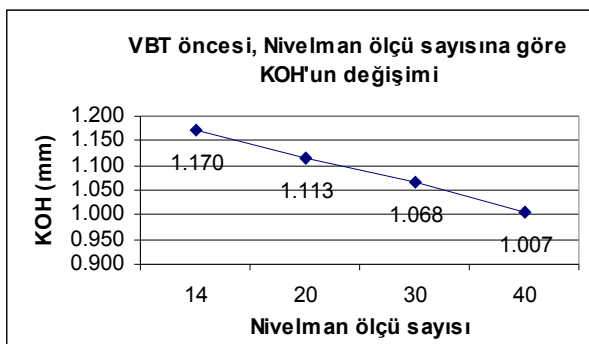
Presizyonlu nivelman tekniğinden elde edilen yükseklik farklarının GPS tekniğinden elde edilen yükseklik farklarına oranla daha güvenilir olduğu ve daha gerçekçi sonuçlar verdiği kabul edilen bir gerçektir. Bu durum Tablo 1 incelendiğinde görülebilir. Tablo 1 de her kampanya için ayrı ayrı olarak presizyonlu nivelman verilerinin, GPS verilerinin ve bu iki tekniğin kombinasyonunun dengeleme sonrası karesel ortalama hataları (KOH) verilmiştir. Presizyonlu nivelman ölçmelerinden elde edilen KOH değerlerinin GPS ölçmelerinden elde edilen KOH değerlerine oranla daha iyi değerler olmasının sebepleri GPS tekniğinin yükseklik belirlemedeki; geometrik zayıflığı, değerlendirme sırasında kullanılan atmosferik modellerdeki yetersizlikler ve elemine edilemeyen hata kaynakları olarak sayılabilir. Bu iki ölçme tekniğinin kombinasyonu söz konusu olduğu zaman VBT tekniklerinin önemi ortaya çıkmaktadır. İki ölçme tekniğinin kombinasyonu sırasında her iki ölçme tekniği için öncül varyans değerlerinin tahmin edilmesi özellikle deformasyon amaçlı çalışmalarda çok önemlidir. Öncül varyans değerleri tahmin edilmeden yapılan kombinasyon işlemlerinde sonuçlar çok şaşırtıcı ve yanıltıcı olabilir. Eğer kombinasyon işlemi sırasında her iki ölçü grubu için direkt olarak kendi değerlendirmelerinden gelen stokastik bilgiler kullanılırsa bazı durumlarda yalnızca GPS değerlendirmesinden bile daha kötü KOH değerleri elde edilebileceği gözden kaçırılmamalıdır. Tablo 1 de görüleceği gibi iki ölçme tekniğinin kombinasyonunda VBT tekniklerinin kullanılması bir gerekliliktir.

KAMPANYALAR :	a-posteriori KOH (Mo mm)			
	1	2	3	4
Nivelman	0.191	0.312	0.364	0.840
GPS	1.251	1.113	1.628	1.115
VBT öncesi Kombinasyon	1.007	1.761	1.601	1.654
VBT sonrası Kombinasyon	1.000	1.000	1.000	1.000

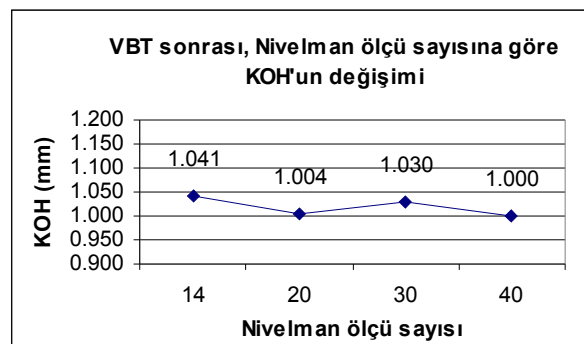
Tablo 1: Dengeleme sonrası karesel ortalama hatalar (KOH)

4.3. Varyans Bileşeni Tahmininde Presizyonlu Nivelman Ölçülerinin Önemi

Presizyonlu nivelman ve GPS ölçmelerinin kombinasyonu sırasında, kullanılan presizyonlu nivelman ölçü sayısı kombinasyonun doğruluğunu ne kadar etkiler sorusunun cevabını verebilmek için farklı nivelman ölçü grupları için KOH değerleri elde edilmiştir. Presizyonlu nivelman ölçü sayısı değiştirilerek VBT den önce ve sonra kombinasyon işlemleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 4a ve 4b de verilmiştir. Presizyonlu nivelman ölçmeleri GPS ölçmelerine göre daha çok zaman alıcı, zahmetli ve daha çok kullanıcı bağımlı olduğu için bu iki ölçme tekniğinin ölçülerinin kombinasyonunda presizyonlu nivelman ölçü sayısı önem kazanmaktadır. Gerekli olan minimum Presizyonlu nivelman ölçü sayısını bulmak projenin parasal zamansal ve elemansal açıdan en iyi şekilde sonuçlandırılması için gereklidir. Aşağıdaki şekillerden görülebileceği gibi, presizyonlu nivelman ölçü sayısına göre VBT den önce yapılan kombinasyon işlemlerinde ölçü sayısı arttıkça KOH değeri düşmektedir. Fakat VBT işleminden sonra yapılan kombinasyon işlemlerinde ölçü sayısı arttıkça KOH değerinde VBT siz kombinasyona göre fazla bir değişim olmamaktadır. Dengeleme öncesi her iki grup ölçü için güvenilir apriori varyans değerlerinin olması durumunda Presizyonlu nivelman ölçü sayısının önemi ortadan kalkmaktadır. Bu durumda problem gerçekçi, güvenilir apriori varyans değerlerinin elde edilmesidir. Güvenilir ve gerçekçi apriori varyans değerlerinin elde edilmesi için ise her iki grup ölçüden mümkün olduğu kadar fazla ölçü sayısına ihtiyaç olmaktadır. Presizyonlu nivelman ölçü sayısını kademeli olarak değiştirip VBT yaptığımızda, bütün ölçülerle kullanıldığında bulunan apriori varyans değerlerinden farklı sonuçlar bulunmaktadır.

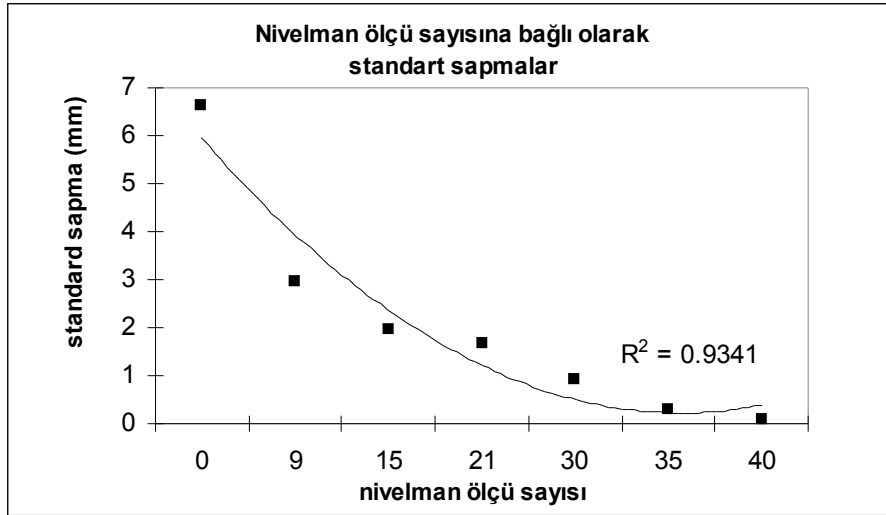


Şekil 4a: Niv. ölçü sayısına göre VBT öncesi KOH değişimi



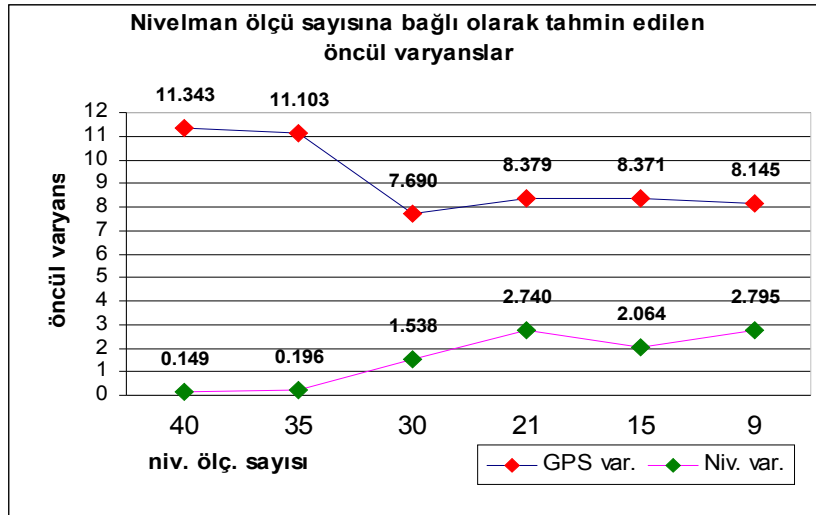
Şekil 4b: Niv. ölçü sayısına göre VBT sonrası KOH değişimi

Nivelman ölçü sayısına bağlı olarak her iki tekniğin kombinasyonu sonunda bulunan dengelenmiş ölçülerin, sadece nivelman ağı dengelemesinden bulunan dengelenmiş ölçülerden elde edilen standart sapmalar Şekil 5. de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi minimum nivelman ölçüsünün kombinasyona katılmasıyla bile dengelenmiş ölçülerden elde edilen standart sapma 3.5 mm daha doğru olarak belirlenmiştir.



Şekil 5: Nivelman ölçü sayısına bağlı olarak standart sapmalar

Aşağıdaki şekilde kombinasyon işlemi sırasında nivelman ölçü sayısının tahmin edilen öncül varyans değişimine olan etkisi açıkça görülmektedir. Nivelman ölçüleri maksimum durumda iken her iki ölçü grubunun varyansları oranı oldukça yüksekken, nivelman ölçü sayısının azalmasıyla bu oran düşmüş ve nivelman ölçülerinin öncül varyans değeri artmıştır. Nivelman ölçü sayısının minimum olduğu durumda GPS ölçülerinin ağırlıkları her ne kadar artmışsa da hiçbir zaman nivelman ölçü ağırlıklarının üstüne çıkmamıştır.

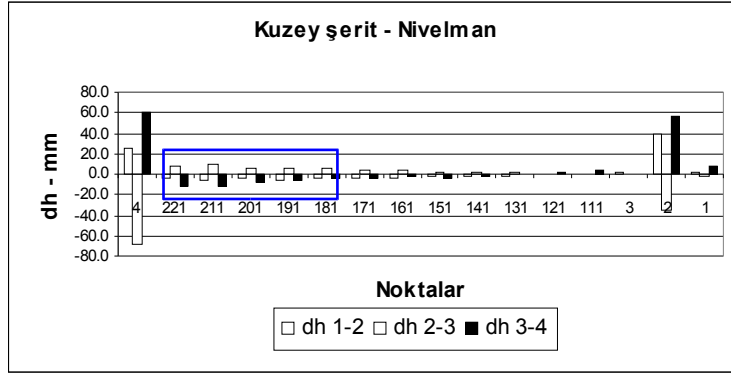


Niv. Ölç. Say.	40	35	30	21	15	9
GPS için Var.	11.343	11.103	7.690	8.379	8.371	8.145
Niv için Var.	0.149	0.196	1.538	2.740	2.064	2.795
Var. Oranı	76.128	56.516	4.999	3.058	4.056	2.914

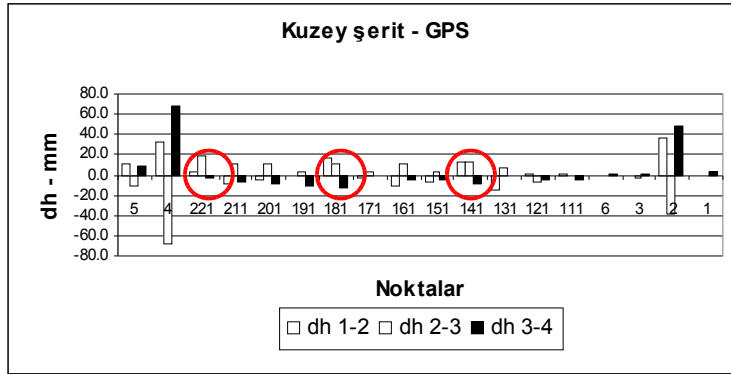
Şekil 6: Nivelman ölçü sayısına bağlı olarak tahmin edilen öncül varyanslar

5. UYGULAMA

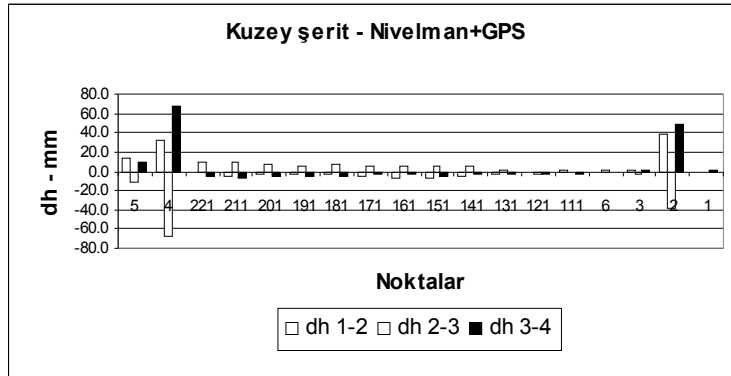
Düşey deformasyonların belirlenmesi üç farklı veri grubu kullanılarak tekrarlanmıştır. Bu veri grupları; GPS çözümlerinden elde edilen yükseklik farkları, Presizyonlu Nivelmandan elde edilen yükseklik farkları ve her iki ölçme tekniğinden elde edilen yükseklik farklarının kombinasyonudur. Burada Şekil 7,8 ve 9 da sadece kuzey şeritteki noktalara ait sonuçlara yer verilmiştir.



Şekil 7: Presizyonlu nivelman ölçmeleri yardımıyla elde edilmiş, kampanyalar arası yükseklik farkları



Şekil 8: GPS ölçmeleri yardımıyla elde edilmiş, kampanyalar arası yükseklik farkları



Şekil 9: Her iki ölçme tekniğinin kombinasyonu yardımıyla elde edilmiş, kampanyalar arası yükseklik farkları

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çok iyi bilindiği gibi GPS çözümlerinden elde edilen yükseklik bileşeninin doğruluğu diğer iki konum bileşenine göre, GPS sisteminin geometrisi ve atmosferik hatalara bağlı olarak daha kötüdür. Bu nedenle deformasyon belirleme çalışmalarında GPS tekniğinin başka bir yükseklik belirleme tekniği ile beraber kullanılmasında büyük yarar vardır. Presizyonlu nivelman tekniği yardımıyla GPS tekniğinden elde edilen yükseklikler kontrol edilebileceği gibi olası anten yüksekliği problemleri de fark edilebilir.

Değerlendirmenin ilk aşamasında her iki ölçme tekniğinden elde edilen veriler yöntem ve kampanya açısından ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu şekilde her iki ölçme tekniğinden elde edilen sonuçlara göre ölçmelerin kalitesi, olası ölçme hataları ve sabit olmayan noktalar hakkında ilk ipuçları elde edilmiş olur.

Yapılan deformasyon analizi sonuçlarına göre, genel anlamda her iki ölçme tekniğinin benzer sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir. Her iki tekniğin sonuçlarından, proje başlangıcında sabit oldukları düşünülen ve viyadük çevresinde bulunan 2 ve 4 numaralı noktalarda yükselme - çökme meydana geldiği sürpriz olarak ortaya çıkmaktadır. Presizyonlu nivelman sonuçlarına göre viyadük üzerindeki noktalarda herhangi bir hareket görülmez iken GPS analizi sonuçlarına göre viyadük üzerindeki bazı noktalarda hareket sayılabilecek değişimler göze çarpmaktadır.

Ancak nivelman sonuçları dikkate alınır ve viyadük üzerinde görülen bu değişimlerin anlamsız olduğu ve bu hareketlerin GPS ölçmelerinde giderilemeyen hatalardan kaynaklandığı veya yanlış anten yüksekliği ölçümlerinden kaynaklanabileceği sonucuna varılmıştır (Şekil 7, Şekil 8).

Her iki ölçme tekniğinin kombinasyonu öncesi bu ölçülerin öncül varyansları MINQUE yöntemiyle belirlenmiş ve kampanyalar arası deformasyon analizi yapılmıştır. Şekil 7 ve Şekil 9 karşılaştırıldığında, her iki ölçme tekniğinin kombinasyonuyla, sadece nivelman ölçülerinden elde edilen sonuçlardan daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

İlk bakışta 2 ve 4 numaralardaki batma-çıkma hareketinin sürpriz olduğu düşünülse, bu hareketin bölgenin jeolojik ve jeofiziksel durumundan kaynaklı olduğu yorumu yapılmıştır. Çalışma bölgesi bataklık bir arazidir ve sabit seçilen bu pilyeler viyadük ayakları kadar çok derine gitmeyip topağın üst tabakasında yer almaktadırlar. Kampanyaların 6 ay aralıklarla yaz ve kış aylarına denk gelmesi ve bölgedeki su miktarının ardışık kampanyalar arası farklılık göstermesi bu hareketin nedenini açıklamaktadır.

Bu çalışmanın devamında nivelman ölçülerinin GPS ölçülerinden elde edilen üç boyutlu koordinatlara olan etkisi araştırılacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu projenin gerçekleşmesine destek olan Volkswagen-Stiftung - Almanya vakfına, projeye GPS alıcısı desteğiyle İzmir Grup A.Ş. ye, kampanyalar sırasındaki yardımlarından dolayı TCK 17. Bölge Müdürlüğüne ve proje ortağı olan Darmstadt Teknoloji Üniversitesi, Fiziksel Jeodezi Enstitüsüne teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

Ayan, T., 1982, *Jeodezik Ağlarda Deformasyon Analizine Genel Bakış*, İTÜ Dergisi, Vol. 1, İstanbul, Türkiye

Ayan, T., Tekin, E., Deniz, R., Külür, S., Toz, G., Çelik, R. N., Özşamlı, C., 1991, *Büyükçekmece Gürpınar Köyü Zemin Hareketlerinin Jeodezik Yöntemlerle Saptanması Projesi*, Teknik Rapor, Şubat 1991, İTÜ, İstanbul.

Beutler, G., Bock, H., Brockman, E., Dach, R., Frieze, P., Gurtner, W., Hugentobler, U., Ineichen, D., Johnson, J., Meindl, M., Mervart, L., Rothacher, M., Schaer, S., Springer, T., ve Weber, R., 2001, *Bernese GPS Software Version 4.2*, Astronomical Institute, University of Berne

Chen, Y. G., Chrzanowski, A., 1985, *Assessment of Leveling Measurements Using the Theory of MINQUE*, Proceeding of 3rd International Symposium North American Vertical Datum, Rockville, pp 389-400

Chrzanowski, A., Chrzanowski, A. S., 1995, *Identification of Dam Deformation Mechanism*, Proceedings of the MWA International Conference on Dam Engineering, Kuala Lumpur, 548 pages: 179-187

Erol, S., Ayan, T., 2003, *An Investigation on Deformation Measurements of Engineering Structures with GPS and Levelling Data Case Study*, International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in the Globalizing World, 6-7 November 2003, Sofia, Bulgaria

Grafarend, E.W., 1984, *Variance-Covariance Components Estimation, Theoretical Results and Geodetic Applications*, 16th European Meeting of Statisticians, Marburg, 1984

Hartinger, H., ve Brunner, F.K., 1998, *Experimental Detection of Deformations Using GPS*, In: Kahmen, H., Brückl, E., Wunderlich, T., (Eds) *Geodesy For Geotechnical And Structural Engineering*. Proc. IAG Special Commission 4 Symposium Eisenstadt, pp. 145-152.

Rao, C. R., 1971, *Estimation of Variance Components - MINQUE Theory*, Journal of Multivariate Statistics, Vol. 1, pp.257-275.

Wang, J., Stewart, M., Tsakiri, M., 1998, *Stochastic Modelling for Static GPS Baseline Data Processing*, Journal of Surveying Engineering, 124 (4), 171-181