

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 035502 (615-625)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 035502 (615-625)

DOI: 10.35414/akufemubid.1066483

Araştırma Makalesi / Research Article

GNSS Tekniği ile Düşey Yöndeki Deformasyonların Araştırılması

Burhaneddin BİLGEN^{1*}, Cevat İNAL¹¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya.Sorumlu yazar*, e-posta: bbilgen@ktun.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1955-7568>cinal@ktun.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8980-2074>

Geliş Tarihi: 01.02.2022

Kabul Tarihi: 17.05.2022

Öz

Yerkabuğunda ve mühendislik yapılarında deformasyonların izlenmesi ve analizi jeodezinin önemli konuları arasında yer almaktadır. Deformasyonların izlenmesi amacıyla genel olarak referans ve obje noktalarından oluşan bir jeodezik ağ oluşturulur. Ağ noktalarındaki hareketler analiz edilerek deformasyon araştırması yapılır. Bu hareketlerin belirlenmesine yönelik ölçmeler klasik teknikler ile yapılabileceği gibi GNSS teknikleriyle de yapılabilmektedir. Statik konum belirleme yöntemi, bu tür hassas jeodezik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada; GNSS tekniğinin düşey yönlü deformasyonları belirleyebilme kapasitesi araştırılmıştır. Bu amaçla, Selçuk Üniversitesi Kampüs alanında bir mikro jeodezik ağ tasarlanmıştır. Tasarlanan ağda obje noktası üzerine sanal deformasyonlar oluşturmaya yarayan bir düzenek yerleştirilmiş ve düşey yönde sanal deformasyonlar meydana getirilerek periyot ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Periyot ölçüleri Bernese v5.2 bilimsel GNSS yazılımı ile değerlendirilmiş, GNSS ağlarında deformasyon analizi gerçekleştirmek amacıyla geliştirilen yazılım kullanılarak İteratif Ağırlıklı Benzerlik Dönüşümü Yöntemiyle analiz edilmiş ve belirlenen deformasyonlar ölçü günlerindeki iyonosferik aktiviteler de dikkate alınarak sanal deformasyon değeriyle kıyaslanmıştır. Analizler sonucunda sanal deformasyon değeriyle uyumlu vektörel deformasyon büyüklükleri elde edilmiş ve koordinat bileşenleri yönündeki hareket büyüklüklerinin de düzenek üzerinde verilen sanal deformasyon miktarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler

Bernese v5.2;
Deformasyon Analizi;
GNSS; IWST

Investigation of Vertical Deformations with GNSS Technique

Abstract

Monitoring and analysis of deformations in the earth's crust and engineering structures are among the important issues of geodesy. In order to monitor the deformations, a geodetic network consisting of reference and object points is created in general. Deformation research is carried out by analyzing the movements at the network points. Measurements for the determination of these movements can be made with classical techniques as well as with GNSS techniques. The static relative positioning is a widely used method in such precise geodetic applications. In this study; the capacity of the GNSS technique to detect vertical deformations was investigated. For this purpose, a micro geodetic network was designed in the Selçuk University Campus area. A mechanism to create virtual deformations was placed on the object point in the designed network and periodic measurements were carried out by creating virtual deformations in the vertical direction. Measurements were processed with the Bernese v5.2 scientific GNSS software, analyzed by Iterative Weighted Similarity Transformation Method using the software developed to perform deformation analysis in GNSS networks, and the determined deformations were compared with the real deformation value, considering the ionospheric activities on the measurement days. As a result of the analyses, vectorial deformation amounts compatible with the real deformation value were obtained and it was seen that the motion amounts in the direction of the coordinate components were also compatible with the virtual deformation amount given on the mechanism.

Keywords

Bernese v5.2;
Deformation Analysis;
GNSS; IWST

1. Giriş

Yerkabuğunda ve mühendislik yapılarında deformasyonların izlenmesi ve analizi jeodezinin önemli konuları arasında yer almaktadır. Deformasyonların izlenmesi amacıyla genel olarak referans ve obje noktalarından oluşan bir jeodezik ağ oluşturulur. Ağ noktalarındaki hareketler analiz edilerek deformasyon araştırması yapılır. Bu hareketlerin belirlenmesine yönelik ölçmeler klasik teknikler ile yapılabileceği gibi GNSS teknikleriyle de yapılabilmektedir. GNSS ile konum belirlemede bağıl ve mutlak konum belirleme olmak üzere iki farklı yöntem kullanılabilir. Mutlak konumlandırma, konum bilgisi uydu yörüngelerine göre belirlenmektedir. Bu yöntem, hassas ölçmeler için gereken doğruluğu sağlayamamaktadır (Hofmann Wellenhof *et al.* 2008, Dawidowicz and Krzan 2014). Hassas ölçmeler için gerekli doğruluğu, bağıl konum belirleme yöntemi kullanılarak ulaşılabilmektedir. Bu yöntemde birden fazla GNSS alıcısının aynı anda veri toplaması gerekmektedir. Hem statik hem de kinematik ölçüler için bağıl konum belirleme amacıyla gerçek zamanlı ve ölçü sonrası değerlendirme şeklinde birçok teknik geliştirilmiştir (Hofmann-Wellenhof *et al.* 2008, Dawidowicz and Krzan 2014). Statik konum belirleme yöntemi, bu tür hassas jeodezik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle yüksek doğruluğu sahip jeodezik deformasyon ağları oluşturulabilmektedir. GNSS ağlarında jeodezik noktalar arasında görünürlük gereksinimi olmaması, klasik jeodezik ağlara kıyasla nokta konumlarının seçiminde esneklik sağlamaktadır. GNSS teknikleri, klasik tekniklerle karşılaştırıldığında ölçüm doğruluğunu, üretkenliği ve deformasyon izleme kapasitesini iyileştirmektedir (Wang *et al.* 2015). GNSS teknikleri veya klasik yersel tekniklerle yapılan deformasyon ölçmelerinin analizinde farklı modeller kullanılmakta ve sonuçlar yorumlanmaktadır. Deformasyon analizinde çoğunlukla statik model ile gerçekleştirilen yöntemler tercih edilmektedir. Son yıllarda GNSS tekniklerinin yerkabuğu ve mühendislik yapılarındaki deformasyonların belirlenmesindeki başarısını araştırmak amacıyla pek çok bilimsel çalışma yapılmıştır. Konakoğlu ve

Gökalp (2018), o dönemde Türkiye'nin en yüksek çift eğrilikli beton kemer barajı olan Deriner barajının deformasyonlarını GPS ölçmeleri ile belirlemiş, Barzaghi *et al.* (2018) İtalya'nın Sardinya kentindeki Eleonora D'Arborea (Cantoniera) barajında zaman serileri ile GNSS verilerinden elde edilen hareketleri analiz etmiş ve sarkaç verileriyle karşılaştırmışlar, Doğru *et al.* (2018), Kuzey Anadolu Fay Zonu boyunca yer alan kabuk deformasyonlarını GPS ölçmeleri ile incelemiş ve analiz sonuçlarını faylanma ve deprem üzerindeki etkileri açısından araştırmışlar, Xi *et al.* (2018) ise barajlarda deplasman tahmini ve rezervuar seviyesi değişimi verilerini aynı anda elde etmek için yeni bir yöntem önermişlerdir. Xiao *et al.* (2019) Çin'de bir baraja GNSS deformasyon izleme sistemi kurarak zaman serileriyle baraj deformasyonlarını araştırmışlar, Yang *et al.* (2019), GNSS reflektometri yöntemi ile deformasyonların izlenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişler, Du *et al.* (2020), farklı zaman dilimlerinde senkron ve asenkron Gerçek Zamanlı Kinematik-GNSS (RTK-GNSS) yöntemleri ile daha güvenilir yer değiştirme bilgilerinin elde edilebileceğini belirtmişler, Xi *et al.* (2021) ve Wang *et al.* (2021), köprü deformasyonlarının izlenmesinde GNSS ölçmelerinin kullanılabilirliğini araştırmışlardır.

Bahsedilen çalışmalarda baraj, yerkabuğu ve köprü deformasyonları başarılı bir şekilde belirlenmiş ve okuyucuya sunulmuş olsa da GNSS tekniği ile düşey yönlü deformasyonların araştırılması sınırlı ilgi görmüştür. Bu nedenle bu çalışmada, GNSS tekniğinin düşey yönlü deformasyonları belirleyebilme kapasitesi araştırılmıştır. Bu amaçla, Selçuk Üniversitesi Kampüs alanında bir mikro jeodezik ağ tasarlanmıştır. Tasarlanan ağda sanal deformasyonlar oluşturmaya yarayan bir düzenek obje noktası üzerine yerleştirilmiş ve düşey yönde sanal deformasyonlar meydana getirilerek periyot ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Periyot ölçüleri Bernese v5.2 bilimsel GNSS yazılımı ile değerlendirilmiş, GNSS ağlarında deformasyon analizi gerçekleştirmek amacıyla geliştirilen yazılım kullanılarak İteratif Ağırlıklı Benzerlik Dönüşümü Yöntemiyle analiz edilmiş ve belirlenen deformasyonlar ölçü günlerindeki iyonosferik

aktiviteler de dikkate alınarak sanal deformasyon değeriyle kıyaslanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Statik Konum Belirleme Yöntemi

Statik konum belirleme yöntemi hassas jeodezik uygulamalarda sıklıkla tercih edilen konum belirleme yöntemlerinden biridir. Statik yöntemde gerekli ölçü süreleri görünür uydu sayısına, uydu geometrisine, baz uzunluğuna ve taşıyıcı frekans sayısına bağlıdır. Doğruluk, jeodezik ağdaki baz uzunluklarıyla korelasyonludur ve 100 km'ye kadar olan bazlarda 0.1 parts per million (ppm) ile 1 ppm arasındadır.

Statik yöntem jeodezik ağ noktalarında eş zamanlı ölçüm yapan birden fazla GNSS alıcısı sayesinde bu noktalar arasındaki baz vektörlerinin elde edilmesini sağlayan ölçü sonrası değerlendirme ve dengeleme işlemi olarak tanımlanabilir. Bu yöntemde genellikle tüm frekanslarda taşıyıcı faz ve kod ölçülerinin kombinasyonu kullanılmaktadır. Bu yöntemde 20 kilometreyi geçmeyen baz uzunlukları tercih edildiğinde santimetre altı seviyede doğruluklara ulaşılabilmektedir (Hofman-Wellenhof *et al.* 2008). Statik ölçüler için 20 kilometreye kadar olan bazlarda standart ölçü süreleri Çizelge 1'de verilmiştir (Hofman-Wellenhof *et al.* 2008). Bu değerler uydu geometrisinin iyi olmasına, normal atmosferik koşullara ve eş zamanlı olarak en az dört uydudan sinyal alınabilmesine bağlıdır. Dört uyduya

ilaveten bir uydudan daha sinyal alınırsa ölçü süreleri %20 oranında kısalabilmektedir.

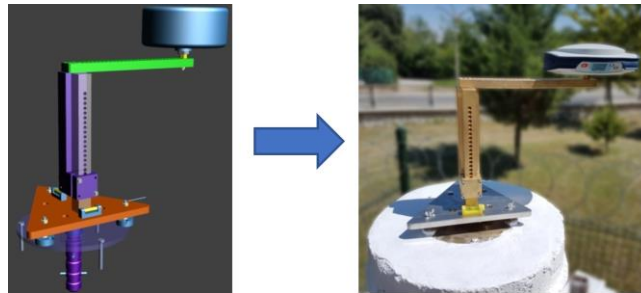
Statik yöntemin en önemli uygulama alanları çok uzun bazların çözümlendiği plaka hareketlerinin araştırılması gibi bilimsel çalışmalar, deformasyon ölçmeleri, fotogrametrik amaçlı yer kontrol noktalarının ölçülmesi, yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi, ülke, bölge ve lokal kontrol ölçmeleri ve sınır ölçmeleri gibi yüksek doğruluğa ihtiyaç duyulan alanlardır.

Çizelge 1. Statik ölçmelerde minimum ölçü süreleri

Alıcı	Statik	Hızlı Statik
Tek-frekanslı	30 dk + 3 dk/km	20 dk + 2 dk/km
Çift-frekanslı	20 dk + 2 dk/km	10 dk + 1 dk/km

2.2 Çalışma alanı ve yöntem

GNSS ağlarındaki düşey deformasyon miktarının doğru bir şekilde belirlenip belirlenemediğini araştırmak amacıyla sanal deformasyon oluşturmaya izin veren bir düzenek kullanılarak yapılan ölçmelerle deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Kullanılan düzenek üzerinde yatay ve düşey olarak 1 cm aralıklarla GNSS alıcısının kurulabileceği noktalar bulunmaktadır ve bunlar sayesinde GNSS alıcısı yatay ve düşey olarak 1 cm aralıklarla kaydırılabilmektedir. Düzeneğin alt kısmındaki üçgen tablada birbirine dik şekilde yerleştirilmiş iki adet silindirik düzeç vardır. Bu düzeçler tablanın köşelerinde bulunan kelebek vidalarla ayarlanarak GNSS alıcısının tamamen düşey olması sağlanmaktadır.



Şekil 1. Üzerinde ölçülerin yapıldığı düzenek

Ölçmelerin yapılabilmesi için Selçuk Üniversitesi kampüs alanında pilyelerden oluşan bir mikro jeodezik ağ tasarlanmıştır (Şekil 2). Bunlardan biri obje noktası olarak seçilmiş ve üzerine Şekil 1'de

gösterilen düzenek yerleştirilmiştir. Ölçmelere başladıktan bir saat sonra GNSS alıcısı obje noktasında yukarı yönde 1 cm kaydırılarak sanal deformasyon verilmiş ve bir saat boyunca bu şekilde

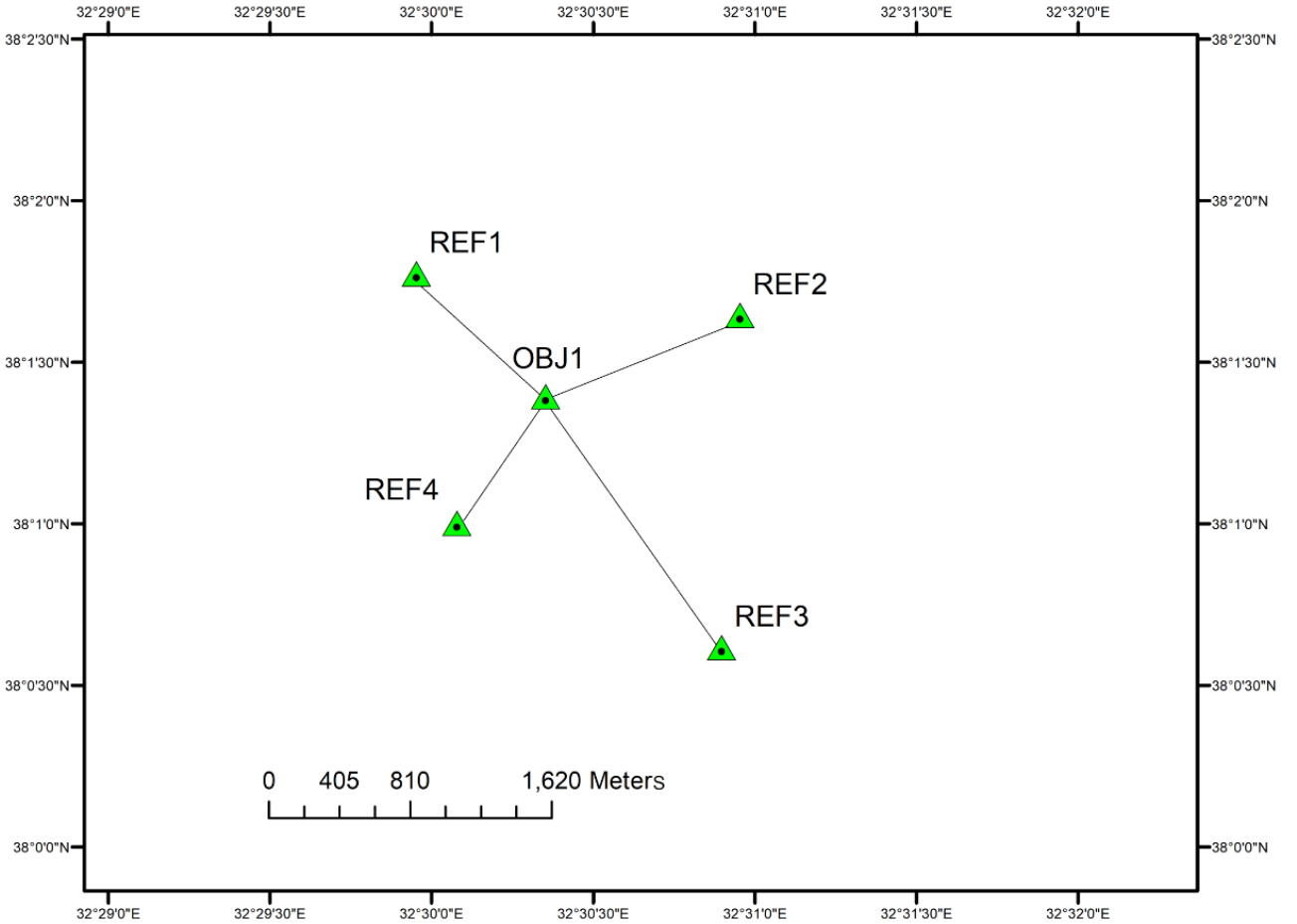
ikinci periyot ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde toplam dokuz periyot ölçü gerçekleştirilmiş ve elde edilen GNSS verileri kullanılarak Bernese v5.2 bilimsel GNSS yazılımında RNX2SNX.PCF alt programında ikili fark çözümleri yapılmıştır. GNSS verilerinin işlenmesinde kullanılan parametreler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. GNSS verilerinin işlenmesinde kullanılan parametreler

Parametre	Strateji
Ağ tasarımı	Kullanıcı tanımlı
Uydu yükseklik açısı	10°
Kayıt aralığı	5 saniye
Uydu sistemi	GPS+GLONASS
Yörünge bilgileri	Final
Fark seviyesi	İkili farklar

GNSS verilerinin işlenmesinde jeodezik ağdaki mevcut baz vektörleri kullanıcı tanımlı olarak verilmiş, böylece tüm periyot ölçüleri aynı esaslar ile çözümlenmiş, uydu yükseklik açısı 10 derece alınmış ve veri kayıt aralığı 5 saniye olarak belirlenmiştir. IGS final son duyarlı efemeris bilgileri ve yer dönüklük parametreleri kullanılmıştır.

Veriler değerlendirildikten sonra iteratif ağırlıklı benzerlik dönüşümü (IWST) yöntemiyle R programlama dilinde geliştirilen açık kaynak kodlu yazılım kullanılarak ardışık deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yazılım Unix ve Windows işletim sistemlerinde çalışabilmekte, deformasyon analizinde robust bir yöntem olan IWST yöntemini kullanmakta, final S transformasyonu ile mutlak deformasyonları belirleyebilmekte, girdi verilerini ve çıktı sonuçlarını görselleştirerek sonuçları HTML ve PDF olmak üzere iki farklı formatta rapor şeklinde sunmaktadır.



Şekil 2. Uygulamada kullanılan jeodezik ağ

2.3 İteratif Ağırlıklı Benzerlik Dönüşümü (IWST)

İteratif Ağırlıklı Benzerlik Dönüşümü (IWST) yöntemi geçmişten günümüze pek çok deformasyon izleme ağına başarıyla uygulanmış robust bir yöntemdir. Bu yöntemin genel hatları ilk olarak Chrzanowski and Chen (1986) tarafından verilmiştir. Tek, iki, üç boyutlu ağlarda uygulanabilmesi ve ağda hareketli noktalar hakkında ön bilgiye ihtiyaç duymaması yöntemin üstün yanlarıdır. Ayrıca, bu yöntemle elde edilen sonuçlar gerçek deformasyon modelini yansıtmaktadır. Chen'e (1983) göre bu yöntem yer değiştirme vektörü üzerinde en az bozulma etkisine sahip olması anlamında, en iyi datum belirlenmesini sağlamaktadır. İşlem adımlarının açık olması nedeniyle programlanması kolay ve GNSS ağlarında deformasyon analizi gerçekleştirmek için uygun bir yöntemdir. Yeni geliştirilen robust analiz yöntemlerinin güvenilir ve doğru sonuçlar verip vermediğinin test edildiği bilimsel çalışmalarda (Nowel and Kaminski 2014, Nowel 2016, Amiri-Simkooei 2017), sonuçların karşılaştırmasında kullanılan en yaygın analiz yöntemi IWST'dir. Sıralanan tüm bu yönleriyle üstün özelliklere sahip bir yöntem olduğundan bu çalışmada kullanılan yazılımın geliştirilmesinde de tercih edilmiştir.

Bir jeodezik deformasyon ağında analiz gerçekleştirilene kadar hiçbir referans noktası sabit kabul edilemediği için, ağ serbest bir ağ olarak düşünölmektedir (Chen *et al.* 1990). Bu nedenle, iteratif ağırlıklı benzerlik dönüşümü yönteminin uygulanmasında periyot ölçüleri serbest dengelenir ve iki ayrı dengeleme sonucunda birim ağırlıklı ölçünün karesel ortalama hataları σ_1^2 , σ_2^2 , ağdaki noktaların dengelenmiş koordinatları \hat{x}_1 , \hat{x}_2 ve kofaktör matrisleri $Q_{\hat{x}_1}$, $Q_{\hat{x}_2}$ hesaplanır. Periyot ölçülerinin aynı hassasiyette olup olmadığını belirlemek için $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ hipotezine dayalı varyansların uyuşum testi gerçekleştirilir;

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} < F_{df_1, df_2, 1-\alpha} \quad (1)$$

eşitliği sağlanırsa varyanslar uyuşumludur. Testin geçersiz olması durumunda iki dengeleme arasında ölçülerin uyumsuz ağırlıklandırıldığı veya hatalı bir şekilde ağırlıklandırıldığı düşünölmür (Chen *et al.* 1990).

IWST yönteminin uygulanması aşğıdaki gibi verilmiştir (Chen *et al.* 1990, Setan and Othman 2006, Gokalp and Taşci 2009, Lim *et al.* 2012). İki ayrı dengeleme sonucundan fark vektörü (d) ve onun kofaktör matrisi (Q_d);

$$d = \hat{x}_2 - \hat{x}_1, \quad Q_d = Q_{\hat{x}_1} + Q_{\hat{x}_2} \quad (2)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Deformasyon analizinin başlangıcında hesaplanması gereken ilk matris, P ağırlık matrisidir. İlk iterasyon için ($k=1$), P matrisi I birim matrise eşittir. Bu datum belirlenirken ağdaki tüm noktaların aynı öneme sahip olduğunu belirtmektedir. Bu durumda çözüm Helmert Dönüşümünün benzeridir (Chen, 1983). İteratif ağırlıklı benzerlik dönüşümü yönteminde ağırlık matrisi P iteratif olarak elde edilir. Bu durumda ikinci ($k+1$) ve devam eden ardışık iterasyonlarda, ağırlık matrisinin köşegen elemanları;

$$p^{(k+1)}(i, i) = \text{köşegen}\{1/|d^{(k)}|\} \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanır. Üç boyutlu bir ağ için ağırlık matrisi P nin elemanları;

$$p^{(k+1)}(1,1) = \left[1/|dx_1^{(k)}|\right]$$

$$p^{(k+1)}(2,2) = \left[1/|dy_1^{(k)}|\right]$$

$$p^{(k+1)}(3,3) = \left[1/|dz_1^{(k)}|\right]$$

$$p^{(k+1)}(4,4) = \left[1/|dx_2^{(k)}|\right]$$

$$p^{(k+1)}(5,5) = \left[1/|dy_2^{(k)}|\right] \quad (4)$$

$$p^{(k+1)}(6,6) = \left[1/|dz_2^{(k)}|\right]$$

$$p^{(k+1)}(3m-2, 3m-2) = \left[1/|dx_m^{(k)}|\right]$$

$$p^{(k+1)}(3m-1, 3m-1) = \left[1/|dy_m^{(k)}|\right]$$

$$p^{(k+1)}(3m, 3m) = \left[1/|dz_m^{(k)}|\right]$$

iterasyonlar süresince bazı $d^{(k)}$ değerleri sıfıra yaklaşabilir. Bu da $p^{(k)}$ değerlerinin çok büyük çıkması nedeniyle sayısal tutarsızlıklara sebep olur. Bu problemi çözmek için de iki yol vardır:

i) Bir alt sınır koyulabilir (örneğin 0.0001 m). Eğer $d^{(k)}$ değeri bu alt sınırdan küçükse onun ağırlığı sıfır alınır.

ii) Ağırlık matrisi formülü $p^{(k)} = 1/[|d^{(k)}| + \delta]$ olarak değiştirilebilir. Burada δ tolerans değeridir.

Bu işlemlerden sonra $d^{(k+1)}$ aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır;

$$d^{(k+1)} = [S^{(k+1)}][d^{(k)}] \quad (5)$$

$$d^{(k+1)} = \{I - G[G^T P^{(k+1)} G]^{-1} G^T P^{(k+1)}\} [d^{(k)}] \quad (6)$$

Burada, G matrisinin boyutları 1D, 2D ve 3D ağırlar için farklıdır ve datum defekte bağılı olarak değişmektedir. Deformasyon analizinde kullanılacak 3D bir GPS ağı için datum elemanları sadece eksenler yönündeki ötelemelerdir (t_x, t_y, t_z). Bu nedenle G matrisi, m nokta sayısını göstermek üzere;

$$G_{3,3m}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

şekindedir. İteratif süreç ardışık dönüştürülmüş yer değiştirmeler (d) arasındaki mutlak farklar δ tolerans değerinden (0.0001 m) küçük oluncaya kadar devam eder.

$$|d^{(k+1)} - d^{(k)}| < \delta \quad (8)$$

Son iterasyon ($k+1$)'inci iterasyon ise, kofaktör matrisi:

$$Q_d^{(k+1)} = S^{(k+1)} Q_d [S^{(k+1)}]^T \quad (9)$$

eşitliği ile hesaplanır. Son ağırlıklı dönüşümden sonra, ağırdaki hareketli noktalar belirlenir. Bu amaçla;

$$c_i = \frac{d_i^2}{q_{d_i} \hat{\sigma}_0^2} \quad (10)$$

eşitliği ile her bir yer değiştirme bileşeni için bir c_i değeri bulunur. Burada d_i i. yer değiştirme bileşeni, q_{d_i} i. yer değiştirmenin kofaktör değeri, $\hat{\sigma}_0^2$ ise eşitlik (12)'den hesaplanan ortak varyans değeridir;

$$c_i \leq F_{1,df,1-\alpha} \quad (11)$$

ise nokta hareketsiz, aksi takdirde hareketli olduğu söylenebilir. Bu eşitlikte α yanılma olasılığı, df ise 1. ve 2. periyotlara ilişkin serbestlik derecelerinin toplamıdır. Ortak varyans;

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{df_1 \sigma_1^2 + df_2 \sigma_2^2}{df_1 + df_2} \quad (12)$$

eşitliği ile hesaplanır. burada, σ_1^2 ve σ_2^2 1. ve 2. periyotlara ilişkin varyanslar, df_1 ve df_2 1. ve 2. periyotlara ilişkin serbestlik dereceleridir.

Son iterasyonda, fark vektörünün gerçek değerlerini elde etmek için stabil referans noktaları datum alınarak bir final S-transformasyonu gerçekleştirilir. Bu aşamada final S transformasyonunda P ağırlık matrisinin elemanları stabil referans noktaları için 1, diğerleri için 0 alınır. Bu nedenle, gerçek deformasyon yer değiştirme vektörünü hesaplamak için uyumu testi ilkesi kullanılır (Setan and Singh, 2001). Final iterasyonunda, fark vektörü ve son kofaktör matrisi;

$$d^{(F)} = [S^{(F)}][d^{(k+1)}] \quad (13)$$

$$Q_d^{(F)} = S^{(F)} Q_d [S^{(F)}]^T \quad (14)$$

eşitlikleri ile elde edilir. Burada eşitlik (14)'teki istatistik testin uygulanmasına dayalı olarak $S^{(F)} = I - G[G^T P^{(F)} G]^{-1} G^T P^{(F)}$ ve stabil noktalar için $P^{(F)} = 1$, diğer noktalar için 0'dır.

Her bir noktanın kofaktör matrisi ve fark vektörü hesaplandığında, her nokta için stabilite bilgisi tek nokta testiyle belirlenebilir. Yer değiştirme değerleri ve kofaktör matrisi bir kritik değer ile karşılaştırılır. i noktasının test edildiği varsayılırsa, algoritmalar aşağıdaki gibidir:

$$T_i = \frac{d_i^T Q_{d_i}^{-1} d_i}{m \hat{\sigma}_0^2} \sim F_{m,df,1-\alpha} \quad (15)$$

burada d_i i noktasının fark vektörü, Q_{d_i} i noktasının kofaktör matrisi, m güven bölgesinin boyutu (GNSS ağırları için 3), df i ve j periyotlarına ilişkin serbestlik derecelerinin toplamı, α yanılma ihtimali (genelde 0.05 alınır), $\hat{\sigma}_0^2$ ise ortak varyans değeridir. (15) eşitliğindeki test başarılı olursa (yani $T_i \leq F_{m,df,1-\alpha}$), i noktası $1-\alpha$ istatistik güven seviyesinde deformasyona uğramamıştır. Öte yandan, test başarısız olursa (yani $T_i > F_{m,df,\alpha}$), i noktası deformasyona uğramıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Verilerin değerlendirilmesi sonucunda, Bernese v5.2 çıktı dosyaları bu amaç için geliştirilen yazılımda işlenerek ardışık deformasyon analiz sonuçları elde edilmiştir. Yazılım ilk olarak varyansların homojen olup olmadığını test etmiş ve tüm test sonuçları Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3'te, m_0 değerleri, deformasyon analizinde kullanılan ölçü periyotlarının dengelenmesine ait birim ağırlıklı ölçünün karesel ortalama hatalarını göstermektedir. Bernese v5.2 yazılımı tarafından gerçekleştirilen dengelemelerin karesel ortalama hataları 1.8 mm ile 2.2 mm arasında değişmektedir. Varyans homojenlik testi sonuçları, sekiz jeodezik deformasyon analizinin tamamında varyansların uyumlu olduğunu göstermektedir. Yazılım tarafından üretilen raporlardaki jeodezik

deformasyon analizi sonuçları Çizelge 4 ile 11'de sunulmaktadır.

Yazılım, kararsız noktaları belirlerken uygulanan tek nokta anlamlılık testinde α yanılma ihtimalini 0,05 olarak almaktadır. Yapılan dengelemelerin serbestlik derecelerine göre bu uygulama için kritik değer 2.6049 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4 ile 11, OBJ1 noktasındaki test büyüklüğünün tablo değerinden daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu nedenle yapılan tüm deformasyon analizlerinde yazılımın ürettiği sonuçlarda obje noktasının hareketli olduğu görülmektedir. Tespit edilen deformasyon miktarları 6.67 mm ile 13.55 mm arasında değişmektedir. Diğer noktalardaki yer değiştirme değerleri anlamlı olmadığı için çizelgelerde noktaların hareketsiz olduğu görülmektedir. Tablo 4 ile 11, yazılımın tüm analizlerde deformasyona uğraması beklenen noktayı tespit edebildiğini göstermektedir.

Çizelge 3. Varyans homojenlik testi sonuçları

Periyotlar	t_0-t_1	t_1-t_2	t_2-t_3	t_3-t_4
m_0 (mm)	1.8 – 1.8	1.8 – 1.8	1.8 – 1.8	1.8 – 1.8
Ortak varyans	3.35 mm ²	3.35 mm ²	3.35 mm ²	3.35 mm ²
Varyans	Varyanslar	Varyanslar	Varyanslar	Varyanslar
homojenlik testi	homojendir.	homojendir.	homojendir.	homojendir.

Periyotlar	t_4-t_5	t_5-t_6	t_6-t_7	t_7-t_8
m_0 (mm)	1.8 – 2.2	2.2 – 2.2	2.2 – 2.2	2.2 – 2.2
Ortak varyans	4.15 mm ²	4.84 mm ²	4.84 mm ²	4.84 mm ²
Varyans	Varyanslar	Varyanslar	Varyanslar	Varyanslar
homojenlik testi	homojendir.	homojendir.	homojendir.	homojendir.

Çizelge 4. t_0-t_1 periyodu deformasyon analiz sonuçları

NN	Def. Vektörü (mm)	Test büyüklüğü	Karar
OBJ1	6.67	10.55	Hareketli
REF1	0.40	0.12	Sabit
REF2	0.36	0.12	Sabit
REF3	0.43	0.15	Sabit
REF4	0.26	0.12	Sabit

Çizelge 5. t_1-t_2 periyodu deformasyon analiz sonuçları

NN	Def. Vektörü (mm)	Test büyüklüğü	Karar
OBJ1	13.55	34.62	Hareketli
REF1	0.36	0.14	Sabit
REF2	0.23	0.06	Sabit
REF3	0.39	0.15	Sabit
REF4	0.18	0.09	Sabit

Çizelge 6. t₂-t₃ periyodu deformasyon analiz sonuçları

NN	Def. Vektörü (mm)	Test büyüklüğü	Karar
OBJ1	9.52	38.35	Hareketli
REF1	2.26	2.27	Sabit
REF2	0.00	0.00	Sabit
REF3	2.72	2.20	Sabit
REF4	2.80	2.56	Sabit

Çizelge 7. t₃-t₄ periyodu deformasyon analiz sonuçları

NN	Def. Vektörü (mm)	Test büyüklüğü	Karar
OBJ1	7.79	11.47	Hareketli
REF1	0.68	0.31	Sabit
REF2	0.55	0.30	Sabit
REF3	0.75	0.31	Sabit
REF4	0.43	0.29	Sabit

Çizelge 8. t₄-t₅ periyodu deformasyon analiz sonuçları

NN	Def. Vektörü (mm)	Test büyüklüğü	Karar
OBJ1	13.20	22.65	Hareketli
REF1	0.39	0.12	Sabit
REF2	0.34	0.12	Sabit
REF3	0.39	0.09	Sabit
REF4	0.22	0.06	Sabit

Çizelge 9. t₅-t₆ periyodu deformasyon analiz sonuçları

NN	Def. Vektörü (mm)	Test büyüklüğü	Karar
OBJ1	10.12	38.37	Hareketli
REF1	1.13	0.91	Sabit
REF2	0.92	0.86	Sabit
REF3	1.24	0.92	Sabit
REF4	0.70	0.86	Sabit

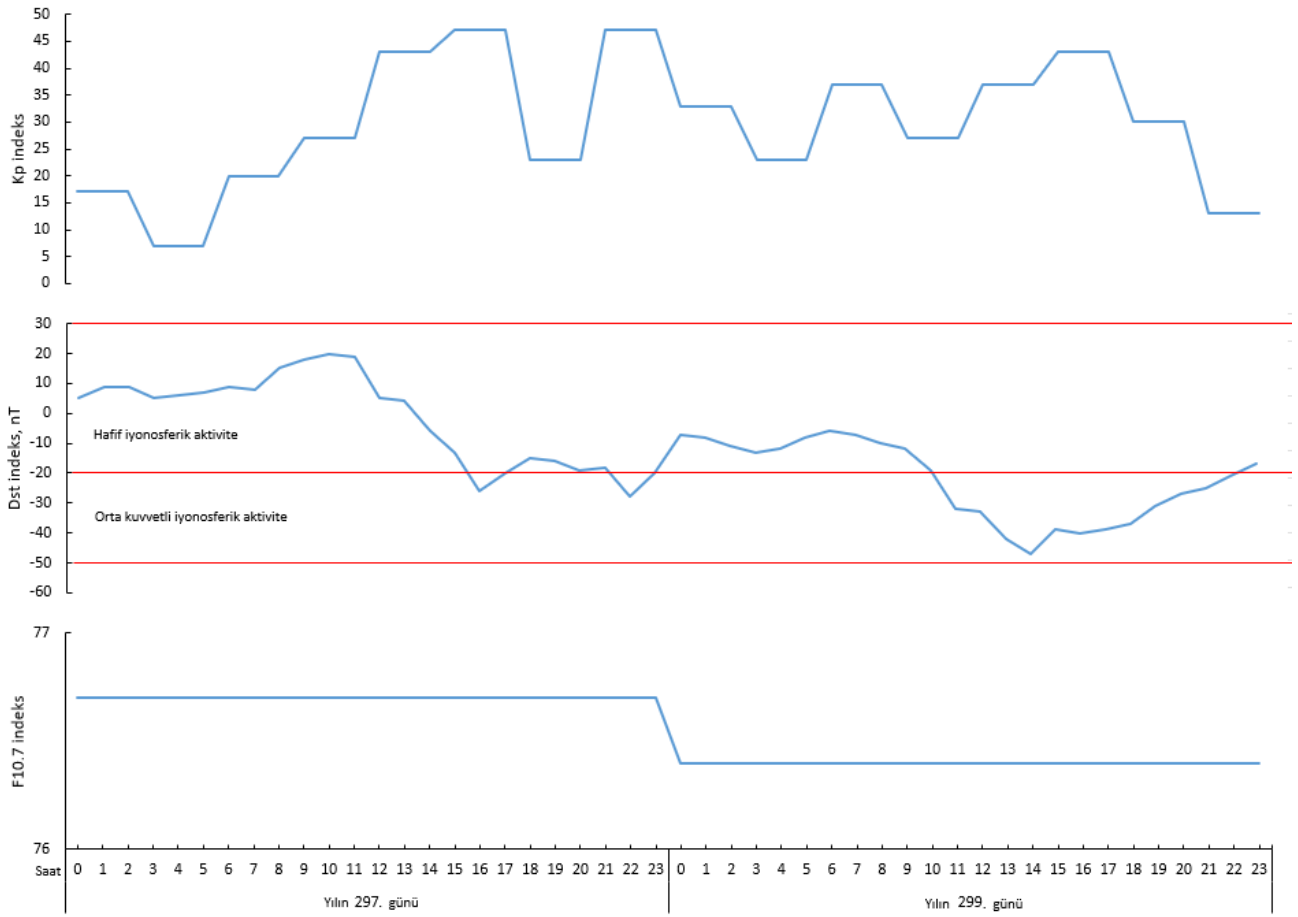
Çizelge 10. t₆-t₇ periyodu deformasyon analiz sonuçları

NN	Def. Vektörü (mm)	Test büyüklüğü	Karar
OBJ1	12.29	13.76	Hareketli
REF1	0.31	0.07	Sabit
REF2	0.33	0.10	Sabit
REF3	0.37	0.11	Sabit
REF4	0.17	0.05	Sabit

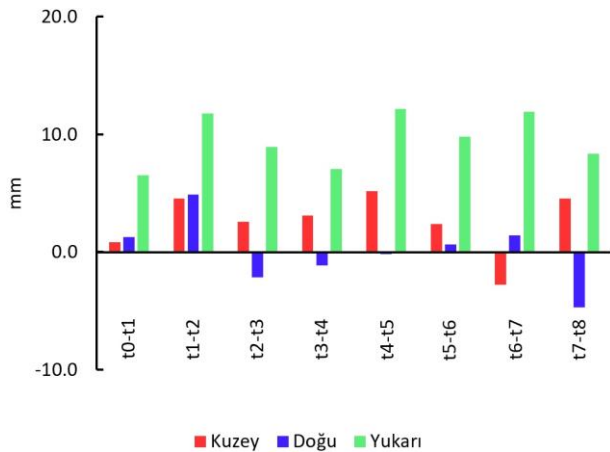
Çizelge 11. t₇-t₈ periyodu deformasyon analiz sonuçları

NN	Def. Vektörü (mm)	Test büyüklüğü	Karar
OBJ1	10.59	21.60	Hareketli
REF1	0.88	0.59	Sabit
REF2	0.65	0.46	Sabit
REF3	0.98	0.56	Sabit
REF4	0.54	0.49	Sabit

Çizelge 4-11'de yer alan deformasyon analiz sonuçları genel olarak verilen sanal deformasyon miktarı ile uyumludur. Ayrıca ölçü günlerindeki iyonosferik aktivitenin GNSS gözlemlerine etkisi olduğu bilindiğinden, ölçü günlerine ait iyonosferik aktiviteyi gösteren indeksler <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/web> adresinden elde edilmiş ve Şekil 3'te grafik olarak verilmiştir. Şekil 3, Kp indeksinin 50'nin altında, Dst indeksinin 20 ile -50 arasında değiştiğini ve F10.7 indeksinin çok fazla dalgalanma sergilemediğini göstermektedir. Bu değerler ölçü günlerinde çoğunlukla hafif iyonosferik aktivite olduğunu ve orta kuvvetli seviyelere de kısmen yükseldiğini ifade etmektedir. İyonosferik aktivite hafif ve kısmen orta seviyede olduğu için uygulamada kullanılan GNSS ölçülerinin bu bozucu etkilere maruz kalmadığı söylenebilir. OBJ1 noktasında elde edilen hareket büyüklükleri geliştirilen yazılım sayesinde toposentrik koordinat sistemine dönüştürülerek grafik üzerine aktarılmış ve Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Ölçü günlerine ait Kp, Dst ve F10.7 indeksleri



Şekil 4. OBJ1 noktasında hareket büyüklükleri

Şekil 4'te, düşey yönde sanal olarak 1 cm deformasyon verilen periyot ölçülerinin analizi sonucunda elde edilen hareket büyüklüklerinin de düşey eksen yönünde 6.5 mm ile 12.1 mm arasında değişen değerlerde elde edilebildiği görülmektedir. Diğer eksenler yönünde elde edilen hareket büyüklükleri anlamlı değildir ve %95 ihtimalle ölçü hatalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Jeodezik deformasyon ağları, yer kabuğu deformasyonlarını, mühendislik yapılarında meydana gelen yer değiştirmeleri, heyelanları, maden ocakları gibi kazı alanlarındaki deformasyonları izlemek için kullanılmaktadır. İşletme aksaklıklarını en aza indirmek için jeodezik deformasyon ağlarında ölçmeler kısa sürede gerçekleştirilmeli ve analiz sonuçlarına hızlı bir şekilde ulaşılmalıdır. Analiz sonuçlarına hızlı bir şekilde ulaşmak için deformasyon analiz yazılımlarına ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada, GNSS ağlarında deformasyon analizi için geliştirilmiş açık kaynak kodlu bir yazılım kullanılarak IWST yöntemiyle GNSS ağlarındaki düşey deformasyonların belirlenebilme kapasitesi araştırılmıştır. Bu amaçla mikro jeodezik bir GNSS ağı tasarlanmış ve geliştirilen ölçü düzeneği üzerinde düşey yönde sanal deformasyonlar oluşturularak periyotlar şeklinde bir saatlik GNSS ölçmeleri yapılmıştır. GNSS gözlemlerinin işlenmesinde Bernese v5.2 yazılımı kullanılmış ve geliştirilen açık

kaynak kodlu yazılımda IWST yöntemiyle jeodezik deformasyon analizleri yapılmıştır. Çalışmada düşey yönde deformasyona uğraması beklenen noktanın bir saatlik GNSS ölçüleri ile deformasyon analizleri sonucunda doğru bir şekilde tespit edilebildiği görülmüştür. Analizler sonucunda elde edilen vektörel deformasyon büyüklükleri de sanal deformasyon değeriyle uyumludur. Ayrıca, ölçü günlerinde iyonosferik aktivite incelenmiş ve aktivitenin hafif ve kısmen orta seviyede olduğu görülmüştür. Bu durum GNSS ölçüleri üzerinde bozucu etki yapabilecek iyonosferik aktivitenin kabul edilebilir seviyelerde olduğunu göstermektedir. Sanal olarak düşey yönde deformasyon verilen noktada elde edilen hareket büyüklükleri geliştirilen yazılım sayesinde topocentrik koordinat sistemine dönüştürülerek yukarı eksen yönünde de beklenen hareketin yakalanabildiği ortaya konulmuştur. Diğer eksenler yönünde elde edilen hareket büyüklükleri anlamlı değildir ve %95 ihtimalle ölçü hatalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bernese v5.2 bilimsel yazılımı ile işlenen GNSS ağlarında, geliştirilen yazılım ile deformasyonların geometrik boyutları ve istatistiksel olarak anlamlı nokta hareketleri çok hızlı ve pratik bir şekilde tespit edilebilmiştir. Deformasyon analizi sonucunda elde edilen anlamlı nokta hareketlerinin yorumlanması disiplinler arası bir yaklaşımla yapılmalıdır. Bir mühendislik yapısındaki veya yerkabuğundaki hareketlerin insan hayatını tehlikeye atıp atmayacağı konusunda nihai bir karar verilirken uzman görüşleri mutlaka dikkate alınmalıdır.

Teşekkür

Bu makale Burhaneddin Bilgen'in Doktora Tez çalışmasından üretilmiştir. Makaleyi gözden geçirip düzeltmeler sağladıkları için editör ekibine ve hakemlere teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

Amiri-Simkoei, A. R., Alaei-Tabatabaei, S. M., Zangeneh-Nejad, F. and Voosoghi, B., 2017, Stability Analysis of Deformation-Monitoring Network Points Using Simultaneous Observation Adjustment of Two Epochs, *Journal of Surveying Engineering*, **143**, 1-12.

Barzaghi, R., Cazzaniga, N. E., De Gaetani, C. I. and Pinto, L., Tornatore, V., 2018, Estimating and Comparing Dam Deformation Using Classical and GNSS Techniques, *Sensors*, **18**, 1-11.

Chen, Y. Q., 1983, Analysis of deformation surveys – a generalized method. Technical Report no. 94, Dept. of Surveying Engineering, University of New Brunswick, 122-160.

Chen, Y.Q., Chrzanowski, A. and Secord, J.M., 1990, A strategy for the Analysis of the Stability of Reference Points in Deformation Surveys, *Cism Journal ACSGS*, **44**, 141-149.

Chrzanowski, A., Chen, Y. Q. and Secord, J. M., 1986, Report of the adhoc committee on the Analysis of Deformation Surveys, *Proceedings of the FIG XVIII International Congress*, Toronto, **6**, 165-185.

Dawidowicz, K. and Krzan, G., 2014, Coordinate Estimation Accuracy of Static Precise Point Positioning Using on-line PPP Service, a Case Study, *Acta Geodetica Geophysica*, **49**, 37-55.

Dogru, A., Gorgun, E. Aktug, B. and Ozener, H., 2018, Seismic hazard assessment of the central North Anatolian Fault (Turkey) from GPS derived strain rates and b-values, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **9**, 356-367.

Du, Y., Huang, G., Zhang, Q., Gao, Y. and Gao., Y., 2020, Asynchronous RTK Method for Detecting the Stability of the Reference Station in GNSS Deformation Monitoring, *Sensors*, **20**, 1-12.

Gokalp, E. and Tasci, L., 2009, Deformation Monitoring by GPS At Embankment Dams and Deformation Analysis, *Survey Review*, **41**, 86-102.

Hofman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E., 2008, GNSS - Global Navigation Satellite Systems, Austria, Springer, 183-185.

Konakoglu, B. and Gokalp, E., 2018, Deformation Measurements and Analysis with Robust Methods: A Case Study, Deriner Dam. *Turkish Journal of Science & Technology*, **13**, 99-103.

Lim, M. C., Setan, H., Othman, R. and Chong A K., 2012, Deformation detection for ISKANDARnet, *Survey Review*, **44**, 198-207.

Nowel, K., 2016, Investigating efficacy of robust M-estimation of deformation from observation differences, *Survey Review*, **48**, 21-30.

- Nowel, K. and Kaminski, W., 2014, Robust Estimation of Deformation from Observation Differences for Free Control Networks, *Journal of Geodesy*, **88**, 749-764.
- Setan, H. and Othman, R., 2006, Monitoring of Offshore Platform Subsidence Using Permanent GPS Stations. *Journal of Global Positioning Systems*, **5**, 17-21.
- Setan, H. and Singh, R., 2001, Deformation Analysis of a Geodetic Monitoring Network, *Geomatica*, **55**, 333-346.
- Wang, G., Bao, Y., Cuddus, Y., Jia, X., Serna, Jr., C., and Jing Q., 2015, A methodology to derive precise landslide displacement time series from continuous GPS observations in tectonically active and cold regions: a case study in Alaska, *Natural Hazards*, **77**, 1939-1961.
- Wang, X., Zhao, Q., Xi, R., Li, C., Li, G. and Li, L., 2021, Review of Bridge Structural Health Monitoring Based on GNSS: From Displacement Monitoring to Dynamic Characteristic Identification, in *IEEE Access*, **9**, 80043-80065.
- Xi, R., He, Q. and Meng, X., 2021, Bridge monitoring using multi-GNSS observations with high cutoff elevations: A case study, *Measurement*, **168**, 108303.
- Xi, R., Zhou, X., Jiang, W. and Chen, Q., 2018, Simultaneous estimation of dam displacements and reservoir level variation from GPS measurements, *Measurement*, **122**, 247-256.
- Xiao, R., Shi, H., He, X., Li, Z. Jia, D. and Yang, Z., 2019, Deformation monitoring of reservoir dams using GNSS: An application to south-to-north water diversion project, China, in *IEEE Access*, **7**, 54981-54992.
- Yang, Y., Zheng, Y., Yu, W., Chen, W. and Weng, D., 2019, Deformation monitoring using GNSS-R technology, *Advances in Space Research*, **63**, 3303-3314.