



Düşey Yönlü Deformasyon Araştırması

Vertical Deformation Research

Nazan YILMAZ^{1*}, Nilüfer DEMİRSOY²

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, n_berber@ktu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0615-8218>

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, demirsoynil@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4128-6466>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Şubat 2022
Revizyon 9 Haziran 2022
Kabul 9 Haziran 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

*Mareograf,
Hassas Nivelman,
Deformasyon,
Dengeleme,
Statik Analiz*

ÖZ

Doğal veya yapay yapıların dış etkenler sonucunda şekil ve konum değişikliğini ölçme işlemlerine deformasyon ölçmeleri denir. Deformasyonların belirlenmesi amacıyla jeodezik kontrol ağları kurulmakta ve bu ağlarda farklı periyotlarda yapılan ölçülerin değerlendirilmesiyle deformasyon analizi gerçekleştirilmektedir. Jeodezik kontrol ağlarında deformasyon belirlenmesinde yatay ve düşey doğrultu için genellikle GNSS, yalnızca düşey doğrultu için genellikle hassas nivelman yöntemiyle yapılan ölçüler kullanılır. Kıyılarıdaki uzun dönemli deniz seviyesi değişimleri mareograf istasyonları yardımı ile izlenir. Bu ölçüler jeodezik açıdan yükseklik sistemleri için düşey datum belirleme çalışmalarında ve düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi gibi birçok önemli alanda kullanılır. Bu alanlarda doğru ve güvenilir sonuçlara ulaşılabilmesi için mareograf istasyonunun herhangi bir yer kabuğu hareketinden etkilenmemesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Trabzon liman sahası içerisinde bulunan mareograf istasyonu çevresinde düşey yönlü yer kabuğu hareketlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışma alanında kurulan bir nivelman ağında Haziran 2020 (I. Periyot), Ekim 2020 (II. Periyot) olmak üzere iki periyotta hassas nivelman ölçüsü yapılmıştır. Her iki periyotta da ölçülen yükseklik farkları serbest ağ yöntemine göre dengelenerek t-dağılımlı uyumsuz ölçüler testi uygulanmıştır. Periyotlar arasında ağda hareket oluşup oluşmadığı statik deformasyon modeli yöntemlerinden Θ^2 -ölçütü yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında uygulanan yöntemlerle ilgili hesaplamalar MATLAB program kodları kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca mareograf istasyonu çevresinde, yumuşak zeminli bölgelerde zamanla oluşabilecek yer kabuğu hareketlerinin belirli periyotlar arasında tekrarlı olarak hassas nivelman ve GNSS ölçüleri ile kontrol edilmesi gereklidir. Bu şekilde hem deformasyonlar önceden belirlenerek kontrol altına alınabilir hem de yapılan ölçüler gelecekte yapılacak olan bilimsel çalışmalara katkı sağlayacak önemli veri kaynakları olacaktır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 Şubat 2022
Received in revised form 9 Haziran 2022
Accepted 9 Haziran 2022
Available online 28 Haziran 2022

Keywords:

*Mareograph,
Precision Leveling,
Deformation,
Adjustment,
Static Analysis*

Doi: 10.24012/dumf.1069472

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Measuring the shape and position change of natural or artificial structures as a result of external factors are called deformation measurements. Geodetic control networks are established to determine deformations and deformation analysis is performed by evaluating the measurements made in different periods in these networks. In determining deformation in geodetic control networks, generally GNSS is used for the horizontal and vertical direction, and the measurements made by precision leveling method are used only for the vertical direction. Long-term sea level changes on the coasts are monitored with the help of mareograph stations. These measurements are geodesically used in many important areas such as determination of vertical datum for height systems and determination of vertical earth's crust movements. In order to achieve accurate and reliable results in these areas, it is very important that the mareograph station is not affected by any earth crust movement. In this study, it is aimed to examine vertical crust movements around the mareograph station in Trabzon harbor area. For this purpose, in a leveling network established in the study area, precision leveling measurements were made in two periods, June 2020 (1st Period) and October 2020 (2nd Period). The height differences measured in both periods were balanced according to the free web method and the t-distributed mismatch test was applied. Whether movement occurs in the network between the periods was investigated by using the Θ^2 -criterion method, one of the static deformation model methods. The calculations regarding the methods applied within the scope of the study were made using MATLAB program codes. In addition, it is necessary to control the earth crust movements that may occur over time in soft ground areas around the mareograph station with precise leveling and GNSS measurements repeatedly between certain periods. In this way, deformations can be determined and controlled in advance, and the measurements made will be important data sources that will contribute to future scientific studies.

Giriş

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte deformasyon ölçmelerine duyulan önem artmaktadır. Doğal ya da yapay yapılarının dış etkenler sonucunda şekil ve konum değişikliğini ölçme işlemlerine deformasyon ölçmeleri denir. Mühendislik yapıları, teknik koşullarının izlenmesini ve tahmin edilmesini gerektirir. Bu amaçla, özel sensörler ve detektörler kullanılarak inşa edilenler gibi çeşitli sistemler ve ölçüm teknikleri kullanılır [1]. İzlenen yapı seçilen noktaların konumlarının doğru belirlenmesi için kullanılan jeodezik yöntemler, diğerleri arasında binaların, köprülerin ve barajların stabilite izlenmesinde önemli bir role sahiptir. Jeodezik izleme, çeşitli teknikler ve ölçüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. En yaygın olanları küresel navigasyon uydu sistemleri, fotogrametri ve uzaktan algılamanın yanı sıra lazer taramadır. Bununla birlikte, klasik jeodezik kontrol ağları [2],[3] jeodezik yöntemlerin kullanımıyla mühendislik yapılarının deformasyon analizinde hala temel bir rol oynamaktadır. Yapısal deformasyon daha sonra bu ağ içindeki noktaların konumlandırılmalarının (yer değiştirmelerinin) zaman içindeki değişiklikleri temelinde belirlenir. Bu tür değişiklikler, periyodik ölçümler (ölçüm dönemleri) temelinde belirlenir [4]. Deformasyonu belirlemek için yaygın olarak kullanılan yöntem jeodezik izleme ağı yöntemi denir. İzleme ağı, hareketli alan üzerinde oluşturulan deformasyon kontrol noktalarından (obje noktaları) ve sabit alan dışında oluşturulan kontrol noktalarından oluşur. Ölçümler, izleme ağında periyodik aralıklarla gerçekleştirilir [5].

Deformasyonları izlemek üzere, jeodezik ve jeodezik olmayan birçok yöntem kullanılmaktadır. Jeodezik yöntemlerde, yatay ve düşey yöndeki deformasyonların izlenmesi, bu amaç için oluşturulmuş kontrol noktalarında (ağlarında), periyodik olarak yapılan klasik nivelman veya GPS ölçülerinin değerlendirilmesine ve analizine dayanır. Jeodezik olmayan yöntemlerde ise yapıda ve çevresinde oluşan deformasyonlar, deformasyona neden olan yük değişimleri, yer altı su seviyesi değişimi, gerilme, sıcaklık gibi değişik faktörlerin büyüklükleri ve değişimleri bazı özel donanım ve yöntemlerle ölçülür [6]. Türkiye'nin deprem kuşağında olması ve dış etkenlere de bağlı sebeplerle yer değiştirmelerin sürekli olarak izlenmesi gereksinimini ortaya çıkarmaktadır. Mareograf istasyonları, Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) kapsamında bulunan deniz seviyesi ve seviye değişimlerine etki eden meteorolojik parametreleri sayısal ve otomatik olarak periyodik sürelerde ölçerek kaydeden istasyonlardır. TUDES istasyonları ile kıyılarıdaki uzun dönemli deniz seviyesi değişimleri takip edilerek, Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı (TUDKA) için referans yüzey belirleme çalışmaları ile Türkiye için oluşturulacak jeoid modelleri çalışmalarına ve yükseklik belirleme çalışmalarına katkı sağlamaktadır. Bilimsel çalışmalar açısından son derece büyük öneme sahip mareograf istasyonları ve çevresinde meydana gelebilecek yer kabuğu hareketlerinin önceden belirlenebilmesi bu çalışmaların doğruluğu ve güvenilirliği açısından yapılması gerekli çalışmalardır.

Dünya' da oluşan yıkıcı ve ölümcül depremlerin ana nedenleri faylarla ilişkilidir. Fay, yer kabuğundaki kırığın her

iki tarafındaki kayalar birbirlerine göre ölçülebilecek miktarda hareket etmişlerse bu kırığa verilen addır. Fayların uzunlukları birkaç km' den birkaç bin km'ye ulaşabilmektedir. Fayların boyu depremlerin büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Sığ ve büyük depremlerde gözlenen fayın boyu yüzlerce kilometreye ulaşmaktadır. Faylar, fay düzlemi ile bloklar arasındaki hareket yönüne göre; ters fay, normal fay ve doğrultu atımlı faylar olarak sınıflanırlar. Bu sınıflar gerilmeler, makaslanmalar ve sıkışmalar sonucunda oluşur ve kendine etki eden kuvvete bağlı olarak farklı şekiller alır ve adlandırılırlar [7].

Karadeniz, Alp-Himalaya orojenik sisteminin Anadolu bölgesinde, kuzeyde Avrasya levhası ile güneyde Afrika-Arap levhaları arasında yer alır [8]. Günümüzde Alp-Himalaya sistemi tarafından kontrol edilen karmaşık bir sıkışma tektoniği etkisi altında olmasına karşın, oluşumunda açılma tektoniği rol oynamıştır. Bu sıkışma tektoniği yapıları, batıda Balkanidler, güneyde Pontidler, kuzeyde Kırım yayla dağları ve doğuda ise Kafkaslar ile ifade edilir [9].

Jeodezik kontrol ağlarında deformasyon belirlenmesinde yatay ve düşey doğrultu için genellikle GNSS, yalnızca düşey doğrultu için genellikle hassas nivelman yöntemiyle yapılan ölçüler kullanılır.

GNSS yöntemi ile düşey yönlü konum bileşeni belirleme duyarlılığının, yataya göre yaklaşık 2-3 kat daha düşük olduğu bilinmektedir [10].

Düşey deformasyonların araştırılması kapsamında Bolvadin ilçe merkezinde çalışmalar yapılmış ve bölgede meydana gelen düşey yönlü yüzey deformasyonları hassas nivelman tekniği ile incelenmiştir. Bu amaçla bölgeye 8 profil 81 noktadan oluşan nivelman ağı kurulmuştur. 3 kampanya şeklinde nivelman ölçüsü yapılmıştır. Değerlendirmeler sonucu toplam 360 mm'ye yakın deformasyonlar hesaplanmıştır. Bu deformasyonun nedeninin yeraltı su seviyelerindeki düşüşle beraber tektonik kökenli olabileceği düşünülmüştür [11].

Yöntem

Türkiye' nin aktif tektonik levhalara sahip olması ve deprem kuşağında olması sebebiyle yer kabuğunda hareketlenmeler söz konusudur. Kuzey Anadolu Fay'ının kuzeyinde kalan Doğu Karadeniz Bölgesinin de aktif olan faylara paralel olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada Doğu Karadeniz Bölgesi, Trabzon ilinde bulunan mareograf istasyonu çevresinde düşey yönlü yer kabuğu hareketleri araştırılmıştır.

Mareograf istasyonları deniz seviyesini ölçerken yüksek hassasiyetle ve doğrulukla çalışmalarını yapması jeodezi alanı için büyük öneme sahiptir. Yeryüzünde bir noktanın ortometrik yüksekliğini mm hassasiyetinde belirlerken sıfır yükseltili deniz seviyesi baz alınır. Tüm bu alanlarda doğru ve güvenilir sonuçlara ulaşılabilmesi için mareograf istasyonunun herhangi bir yer kabuğu hareketinden etkilenmemesi oldukça önemlidir. Ayrıca mareograf istasyonu çevresinde, yumuşak zeminli bölgelerde zamanla oluşabilecek yer kabuğu hareketlerinin belirli periyotlar arasında düzenli ve tekrarlı hassas nivelman ve GNSS

ölçüleri ile kontrol edilmesi gelecekte yapılacak olan bilimsel çalışmalara da katkı sağlayacaktır.

Bunun için bir nivelman ağı kurulmuş ve farklı periyotlarda ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler ile deformasyon analizi araştırılmıştır. Yapılacak olan deformasyon analiziyle mareograf istasyonuna ait düşey yönde hareket olup olmadığı incelenmiştir.

Nivelman ağı oluşturulurken noktaların yerlerinin seçimine önem gösterilmiş olup dayanak ve test noktalarının homojen dağılmasına dikkat edilmiştir. Çalışmada hassas nivelman yöntemi kullanılarak güzergahlarda gidiş-dönüş nivelman ölçüsü yapılmıştır.

Kurulan nivelman ağına yapılan hassas ölçümler ile noktalar arasındaki yükseklik farkları belirlenmiştir. Ardından Matlab R2016b programlama dilinde yazılan algoritmalar ile nivelman ağına serbest ağ dengelemesi yapılmıştır. Dengeleme sonucunda bilinmeyenlerin ters ağırlık matrisi Q_{xx} ve dengelenmiş yükseklik değerleri elde edilmiştir. Bu hesaplamalar Haziran 2020 ve Ekim 2020 tarihlerinde olmak üzere iki periyot için yapılmıştır. İki periyotta dengeleme sonucundan elde edilen büyüklükler, statik deformasyon modeli olan Θ^2 -ölçütü deformasyon analizi yönteminde kullanılmıştır.

Hassas nivelman yöntemi

Hassas nivelman yöntemi, çok hassas ölçüler gereken köprü, baraj, liman, tünel vd. gibi büyük mühendislik yapılarında zamanla oluşabilecek deformasyonları belirleme çalışmalarında, ülke nivelman ağının oluşturulmasında ve yüksek hassasiyet gerektiren işlerde kullanılır.

Hassas nivelmanın ortalama hatası $0.5mm/\sqrt{km}$ 'dir. Yüksek hassasiyet gerektiği için kullanılan aletler, noktaların işaretleneceği yerler, ölçü ve hesaplama metotları bu hassasiyeti sağlayacak şekilde seçilmelidir [12].

Presizyonlu nivelman ölçmelerinde bunlara ek olarak, nivonun her kuruluşunda geri ve ileri noktalarda tutulan miralarda I. (ana) ve II. (yardımcı) bölümlendirmeler geri-I, ileri-I, ileri-II, geri-II şeklinde okunmakta (GIIG), böylelikle yükseklik farkları ikişer kez ölçülmektedir. Ayrıca nivelman noktaları arasındaki ölçmeler, doğruluğu artırmak ve kaba hataları ortaya çıkarmak için gidiş-dönüş olarak yapılır. Sonuçta noktalar arasındaki yükseklik farkları için dörder değer elde edilir [13]. Hassas nivelman çalışmalarında, birbirini izleyen iki nivelman noktası arasında gidiş-dönüş yükseklik farkı $\pm 4\sqrt{5}$ (mm) lik hatayı geçmemelidir [14].

Jeodezik ağların serbest dengelemesi ve uyuşumsuz ölçülerin belirlenmesi

Nivelman ağlarının serbest dengelenmesinde fonksiyonel ve stokastik model sırasıyla,

$$v = Ax - l \quad (1)$$

$$P_i = \frac{1}{s_i(km)} \quad (2)$$

biçiminde elde edilir. Burada v , ölçülere getirilecek düzeltmeler vektörünü; A , katsayılar matrisini; l , ölçüler vektörünü; x , bilinmeyenler vektörünü; P_i , ağırlık matrisini; s_i , noktalar arası mesafeyi belirtmektedir.

Gauss'un En Küçük Kareler (EKK) ilkesi ($v^T P v = \text{minimum}$) uyarınca normal denklemler,

$$A^T P A x = A^T P l \quad (3)$$

biçiminde elde edilir. Normal denklemlerin çözümü sonucunda ($\det(A^T P A) \neq 0$ kabulü ile) bilinmeyenler vektörü,

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (4)$$

şeklinde bulunur. Burada $(A^T P A) = N$, normal denklem katsayılar matrisini; $(A^T P A)^+ = N^+ = Q_{xx}$, bilinmeyenlerin ters ağırlıklarını ifade etmektedir. Hesaplanan dengeleme bilinmeyenleri (x) ile bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri X_0 eklenerek yüksekliklerin kesin değerlerine ulaşılır.

$$X = X_0 + x \quad (5)$$

Dengeleme sonucunda düzeltmelerin ters ağırlık matrisi ve birim ölçünün varyansı sırasıyla,

$$Q_{vv} = Q_{ll} - A Q_{xx} A^T \quad (6)$$

$$m_0^2 = \frac{v^T P v}{n - u + d} \quad (7)$$

şeklinde elde edilir. Burada n , ölçü sayısını; u , bilinmeyen sayısını, d datum parametre sayısını ifade etmektedir. Duyarlılık hesapları şu şekilde yapılır:

Ölçülerin ortalama hatası,

$$m_i = \mp \frac{m_0}{\sqrt{P_i}} \quad (8)$$

Bilinmeyenlerin ortalama hatası,

$$m_{hi} = \mp m_0 * \sqrt{q_{xixi}} \quad (9)$$

Burada q_{xixi} : Q_{xx} matrisinin i. köşegen elemanıdır.

Uyuşumsuz ölçülerin belirlenmesi

Çeşitli amaçlarla yapılan jeodezik ölçüler, kaba ve uyuşumsuz ölçüleri de içinde barındırması çok sık karşılaşılan bir durumdur. Ölçü grubundaki kaba hatalar dengeleme modelinin düzeltme denklemleri kurulurken belirlenip ayıklanabilirken çeşitli nedenlerle oluşan uyuşumsuz ölçülerin bu şekilde belirlenmesi mümkün değildir. Ölçüler arasında, ölçü kümesinin dağılımına uymayan ölçüler olarak tanımlanabilen uyuşumsuz ölçüler, diğer ölçülerden ayrı özellik gösterirler ve kurulan matematik modele uymazlar. Rasgele ölçü hatalarına çok yakın büyüklükteki hataları içeren bu ölçüler, ancak dengeleme hesabı sonucunda uygulanan uyuşumsuz ölçü testi ile belirlenebilirler [15]. Uyuşumsuz ölçülerin tespit edilmesi için literatürde çeşitli analiz yöntemleri bulunmaktadır.

Tablo 1' de yer alan üç farklı test büyüklüğü, dengeleme sonucu elde edilen düzeltme değerlerinin farklı varyans değerleri ile normlandırılması anlamına gelmektedir. Baarda, teorik varyansı (σ_0^2), Pope, dengeleme sonucunda bulunan kestirilmiş varyansı (s_0^2) kullanırken, t testinde, uyuşumsuz ölçü ile hesaplanmış (s_0^2) yerine, bu uyuşumsuz ölçünün etkisi kaldırıldıktan sonraki varyans değeri (s_{0i}^2) kullanılmaktadır [16].

Tablo 1. Uyuşumsuz ölçü testleri özet çizelgesi.

| Yöntem | Test büyüklüğü | Dağılımı | Eşik değeri |
|---------|---|----------------------------|-----------------------|
| Baarda | $T_{vi} = v_i / (\sigma_0 \sqrt{q_{vi}})$ | N(0,1) Normal Dağılımlı | $N_{1-\alpha/2}$ |
| Pope | $T_{vi} = v_i / (s_0 \sqrt{q_{vi}})$ | τ_f Tau Dağılımlı | $\tau_{f,1-\alpha/2}$ |
| t testi | $T_{vi} = v_i / (s_{0i} \sqrt{q_{vi}})$ | t_{f-1} t-dağılımlı | $t_{f-1,1-\alpha/2}$ |

t-dağılımlı uyuşumsuz ölçüler testi korelasyonlu ve korelasyonsuz ölçüler için iki farklı şekilde hesaplanır. Korelasyonsuz ölçüler için test büyüklüğü hesabı,

$$T_{vi} = \frac{|v_i|}{s_{0i} \sqrt{q_{vivi}}} \quad (10)$$

$$s_{0i} = \pm \sqrt{\frac{1}{f-1} ([pvv] - \frac{v_i^2}{q_{vivi}})} \quad (11)$$

eşitlikleri ile bulunur. Ardından T_{vi} test büyüklüğünün maksimum değeri bulunarak t tablo değeri ile karşılaştırılır. $T_{vi_max} < t_{f-1,1-\frac{\alpha}{2}}$ olduğu durumlarda uyuşumsuz ölçü yoktur. $T_{vi} = T_{vi_max} \geq t_{f-1,1-\frac{\alpha}{2}}$ olduğu durumlarda ise i. ölçü uyuşumsuzdur. Bu ölçü uyuşumsuz ölçülerden çıkarılır veya yeniden ölçülür. Uyuşumsuz ölçü kalmayınca kadar aynı işleme devam edilir.

Θ^2 – Ölçütü yöntemi ile deformasyon analizi

Bu yöntemle deformasyon analizinde, her bir periyot ölçüsü ayrı ayrı serbest dengelenir, uyuşumsuz ölçüler ayıklanır ve her periyot için birim ağırlıklı ölçünün karesel ortalama hataları m_1 ve m_2 hesaplanır. Periyot ölçülerinin uyumlu olduğu test edildikten sonra, periyot ölçülerinin birim ağırlıklı varyanslarının birleştirilmesiyle daha uygun bir varyans değeri elde edilir [17].

Tüm periyotlardaki ölçüler ayrı ayrı dengelenerek, dengeli koordinatlar vektörü x , düzeltmelerin kareleri toplamı $v^T P v$, bilinmeyenlerin ters ağırlık matrisi Q_{xx} hesaplanır. İki periyot arasında anlamlı nokta hareketi olup olmadığı belirlemek için, periyotlardan elde edilen dengeli koordinatların farkları (d) hesaplanır. d fark vektörünün geometrik anlamı da vardır. İki ölçüden bulunan dengelenmiş koordinatlar Helmert dönüşümü ile birbiri üzerine çakıştırıldığında ortak noktadaki fark doğrudan doğruya d vektörünün elemanı verir. İki periyot için fark vektörü,

$$d = x_2 - x_1 \quad (12)$$

olarak hesaplanır. İki periyot için d fark vektörüne ait kovaryans matrisi Q_{dd} ,

$$Q_{dd} = Q_{x1x1} + Q_{x2x2} = (A_1^T P_1 A_1)^+ + (A_2^T P_2 A_2)^+ \quad (13)$$

olarak elde edilir. Doğrusal hipotezin düzeltmelerin ağırlıklı kareleri toplamına etkisi olan Θ^2 -Ölçütü,

$$\theta^2 = d^T Q_{dd}^+ d \quad (14)$$

şeklinde elde edilir. Ağın geometrik şeklinin ve datum parametrelerinin her iki ölçüm periyodunda da aynı olduğu durumlarda Q_{dd} 'nin rangı;

$$h = rang(Q_{dd}) \quad (15)$$

eşitliği ile hesaplanır. Her iki ölçüm kümesinin standart sapması,

$$s_0^2 = \frac{v_1^T P_1 v_1 + v_2^T P_2 v_2}{f_1 + f_2} = \frac{f_1 s_{01}^2 + f_2 s_{02}^2}{f_1 + f_2} \quad (16)$$

şeklinde elde edilir. Burada f_1 ve f_2 sırasıyla 1. ve 2. periyotlardaki ölçümlerin dengelemesi sırasında kullanılan serbestlik dereceleri; s_{01}^2 ve s_{02}^2 ise sırasıyla 1. ve 2. periyotlardaki ölçümlerin dengelemesi sonucunda elde edilen varyans değerleridir. Eşdeğerlik testinin test büyüklüğü (T),

$$T = \frac{\theta^2}{m_0^2 h} = \frac{d^T Q_{dd}^+ d}{m_0^2 h} \quad (17)$$

eşitliği ile hesaplanır. Test büyüklüğü T , F-tablo değeri ile karşılaştırılır. H_0 hipotezi $T < F_{n,f,1-\alpha}$ olduğu durumda geçerli, $T > F_{n,f,1-\alpha}$ olduğu durumlarda ise H_0 hipotezi geçerli değildir. Bu durumda iki ölçü periyodu arası geçen sürede ağ noktalarının bir ya da birden fazlasında deformasyon olduğuna $s=1-\alpha$ istatistik güven ile karar verilir. Ağda deformasyon olduğu belirlendikten sonra, ağda hareket eden noktalar tek tek belirlenir. Bunun için ağda bulunan bir nokta her seferinde hareketli, diğer noktalar ise sabit olduğu varsayımı ile nokta sayısı kadar θ^2 ölçütü değeri hesaplanır. Fark vektörü d ve kovaryans matrisi Q_{dd} ,

$$d = \begin{bmatrix} d_F \\ d_B \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$Q_{dd} = \begin{bmatrix} Q_{FF} & Q_{FB} \\ Q_{BF} & Q_{BB} \end{bmatrix} \quad (19)$$

eşitlikleri ile elde edilir. Burada B indisi, hareketli noktaları; F indisi, sabit noktaları göstermektedir. P_{dd} ağırlık matrisi,

$$P_{dd} = Q_{dd}^+ = \begin{bmatrix} P_{FF} & P_{FB} \\ P_{BF} & P_{BB} \end{bmatrix} \quad (20)$$

eşitliği ile yani Q_{dd} matrisinin tersi alınarak elde edilir. B ile hareketli nokta olarak alınan nokta her adımda d_B alt vektör olarak yazılır ve ağ nokta sayısı kadar aykırılık etkisi hesaplanır. Alt matrisler Gauss yöntemi ile indirgenerek,

$$d_B = d_B - P_{BB}^{-1} P_{BF} d_F \quad (21)$$

$$P_{FF} = P_{FF} - P_{FB} P_{BB}^{-1} P_{BF} \quad (22)$$

hesaplanır. θ^2 ölçütü değeri,

$$\theta^2 = d^T Q_{dd}^+ d = d_F^T P_{FF} d_F + d_B^T P_{BB} d_B \quad (23)$$

$d_F^T P_{FF} d_F$ sabit olduğu varsayılan noktaya ait aykırılık, $d_B^T P_{BB} d_B$ hareketli olduğu varsayılan her noktaya ait aykırılık olarak bağımsız iki bileşene ayrılır.

$$(\theta^2)_i = (d_B^T P_{BB} d_B)_i \quad (24)$$

Burada n , nokta sayısıdır. Toplam aykırılık payı en büyük olan $(\theta^2)_{\max} = \max((\theta^2)_i)$ olan noktada, $s=1-\alpha$ istatistik güven ile deformasyon olduğuna karar verilir. Ağda hareketli başka nokta veya noktalar bulunup bulunmadığını belirlemek için d ve Q_{dd} 'ye bir S -dönüşümü yapılarak geriye kalan $(n-1)$ noktadan yararlanarak yeni bir datum verilir. d ve Q_{dd} 'de hareketli noktaya ait elemanlar en son satır ve sütunlara atılır. G matrisi ile S -transformasyon matrisi,

$$S_i = I - GG^T \quad (25)$$

eşitliği ile elde edilir. d ve Q_{dd} matrisi,

$$d_i = S_i d \quad (26)$$

$$Q_{ddi} = S_i Q_{dd} S_i^T \quad (27)$$

biçiminde dönüştürülür. i . dönüşümden sonra fark vektörü ve bunun ters ağırlık matrisi,

$$d_{i=} \begin{vmatrix} d_D \\ d_N \end{vmatrix} = S_i \begin{vmatrix} d_F \\ d_B \end{vmatrix} = S_i d \quad (28)$$

$$Q_{adi} = \begin{vmatrix} Q_{DD} & Q_{DN} \\ Q_{ND} & Q_{NN} \end{vmatrix} \quad (29)$$

şeklinde alt matrislere ayrılır. Burada D indisi, datum noktalarını; N indisi, datum dönüşümüne katılmayan noktaları; d_N , toplam aykırılıktaki payları en büyük olan (Θ^2)mak noktalarına ait d_B değerinin sonraki değerini göstermektedir. i. belirleme adımından sonra kalan aykırılık,

$$\theta_{kalan}^2 = d_D^T Q_{DD}^+ d_D \quad (30)$$

eşitliği ile hesaplanır. Test büyüklüğü,

$$T_D = \frac{(\theta)_{kalan}^2}{\sigma_0^2 h_D} > F_{h_D, f_D, 1-\alpha} \quad (31)$$

olduğu durumda ağda hareketli nokta vardır. Burada yeni hareketli nokta, yukarıdaki işlemler tekrar edilerek belirlenir. Son bir S-transförmasyonu ile ağda hareketsiz kalan noktalar P_D , hareketsiz olduğu tespit edilen noktalar P_N ve deformasyon büyüklükleri d_N elde edilir [18].

Uygulama

Çalışmada Doğu Karadeniz bölgesi, Trabzon ili, deniz limanı sahası içerisinde bulunan TRBZ adlı mareograf istasyonu çevresindeki hareketliliğin araştırılması amaçlanmıştır.

Çalışma alanı özellikleri

4.664 km² yüz ölçümüne sahip Trabzon ili, Doğu Karadeniz Dağlarının oluşturduğu yayın ortasındaki Kalkanlı dağlık kütesinin kuzeye bakan yamaçlarında 38° 30' – 40° 30' doğu meridyenleri ile 40° 30' – 41° 30' kuzey paralelleri arasında yer almaktadır. Kuzeyinde Karadeniz, güneyinde Gümüşhane ve Bayburt, doğusunda Rize, batısında Giresun ili bulunmaktadır. Trabzon Limanı; kuzeyde 40 57' 30" - 41 06' 36" enlemleri, doğu'da 40 02' 30" - 39 25' 00" boylamları arasında yer almaktadır. Şekil 1'de Trabzon limanı gösterilmektedir.



Şekil 1. Trabzon limanı [19].

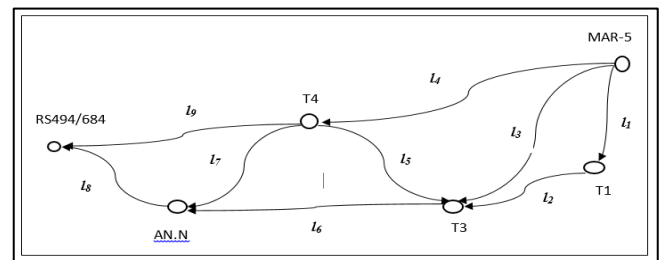
Çalışma alanı tektonik yapısı

Coğrafi konum açısından Trabzon ili, Doğu Karadeniz bölgesinde yer almaktadır. Karadeniz sahillerinin doğusu boyunca uzanan yaklaşık 500 km uzunluğunda, 200 km genişliğinde olan Doğu Pontidler'in Kuzey Zonu'nda yer almaktadır [20].

Güncel jeolojik, jeofizik ve GPS çalışmaları Gürcistan'daki aktif ters fay ve kıvrım sisteminin Karadeniz'e doğru devam ettiğini ve aktif basınç deformasyonunun Kafkaslar' dan Karadeniz'e doğru azaldığını göstermektedir. Karadeniz'in şelf bölgesini derin basen kısmından ayıran basınç deformasyonuna ait aktif ters faylar, Trabzon sahilinden yaklaşık 5-20 km uzaklıkta, sahile paralel uzanmaktadır. Karadeniz'in güneye doğru oblik yitiminden kaynaklanan aktif deformasyon, şelf bölgesindeki itki fayları ve karadaki doğrultu atımlı faylar tarafından farklı oranlarda paylaşılmıştır. Bu nedenle KAF'ın yıllık sağ yanal hareketi GPS verilerine göre 24 mm/yıl, Kafkaslar'da 3-5 mm/yıl ve DAF 'ta 9 mm/yıl iken, Doğu Pontidler'in kuzeye doğru itilmesi yılda birkaç mm'dir [21].

Nivelman ağının kuruluşu

Trabzon mareograf istasyonu çevresinde yer kabuğu hareketlerini belirlemek amacıyla bir jeodezik nivelman kontrol ağı kurulmuştur. Kurulan bu nivelman ağı, mareograf istasyonu yakınında bulunan MAR-5 noktası, 1 nolu çömllekçi sokakta bulunan RS494/684 noktası, Trabzon deniz limanı sahası içerisinde yeni tesis edilen T1, T3, T4 ve AN.N noktalarından oluşmaktadır. Mareograf istasyonuna ait RS noktasının (MAR-5) yükseklik değeri Harita Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir. Diğer RS494/684 noktasının yükseklik değeri ise Trabzon Belediyesinden temin edilmiştir. Şekil 2' de nivelman ağı gösterilmiştir.



Şekil 2. Nivelman ağı.

Nivelman ağında Haziran 2020 (I. Periyot), Ekim 2020 (II. Periyot) olmak üzere iki periyot hassas nivelman ölçüsü yapılmıştır. Tüm güzergahlarda, gidiş ve dönüş olmak üzere hassas nivelman yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemi uygularken arazinin topoğrafik yapısına, hava koşullarına, alet ile mira arasındaki mesafenin 30 m' yi geçmemesine ve okunan yükseklik değerlerinin 0.50 m' nin altına düşmemesine özen gösterilmiştir. Bu şekilde ağa ait tüm güzergahlarda hassasiyeti yüksek ölçüler elde edilmeye çalışılmıştır.

Nivelman ağı ölçülerinin dengelemesi

Her periyotta ölçülen yükseklik farkları serbest ağ yöntemine göre MATLAB R2016b adlı programda yazılan algoritmalarla dengelenmiştir.

Serbest ağ dengelemesi için tüm güzergâhlardan elde edilmiş olan noktalara ait yükseklik farkları ΔH_i , geçki uzunlukları kilometre cinsinden S_i (km) ve ağ noktalarının yaklaşık yükseklik değerleri programda girdi veri olarak kullanılmıştır. Her iki periyotta da t-dağılımlı uyuşumsuz ölçüler testi uygulanmış ve her periyotta tek bir güzergâh için uyuşumsuz ölçüye rastlanmıştır. Bulunan uyuşumsuz ölçüler çıkarılarak dengelemeye devam edilmiştir.

Böylece uyumlu ölçülerle yapılmış olan serbest ağ dengelemesi sonucu (5) eşitliğinden ağ noktalarının dengeli yükseklikleri (x_1, x_2), düzeltmelerin kareleri toplamı (v_1, v_2) ve bilinmeyenlerin ters ağırlık matrisleri (Q_{x1x1}, Q_{x2x2}) hesaplanmıştır. Ayrıca (9) eşitliğinden ağıdaki noktalara ait yüksekliklerin karesel ortalama hataları (m_{ni}) hesaplanmıştır.

Nivelman ağında deformasyon analizi

9 Haziran 2020 başlangıç periyodu (t_0) ve 9 Ekim 2020 (t_1) kabul edilmiştir. (t_0) ve (t_1) zamanları arasında oluşan deformasyonlar statik deformasyon modeli ile belirlenmiştir. Statik deformasyon yöntemlerinden Θ^2 - ölçütü yöntemi MATLAB R2016b programında yazılan algoritmalar ile (t_1)-(t_0) zamanları arasında ağda deformasyon olup olmadığına karar verilmiştir. (t_1)-(t_0) Periyotları için deformasyon analizinde;

Θ^2 - ölçütü yöntemiyle deformasyon analizinde girdi veriler olarak serbest ağ dengelemesi sonucunda elde edilen ağ noktalarının dengeli yükseklikleri (x_1, x_2), düzeltmelerin kareleri toplamı (v_1, v_2) ve ters ağırlık matrisleri (Q_{x1x1}, Q_{x2x2}) kullanılmıştır.

Θ^2 - ölçütü yöntemiyle deformasyon analizinde, (14) eşitliğinden Θ^2 -ölçütü, (16) eşitliğinden birim ölçünün öncül ortalama hatası(s_0^2), (17) eşitliğinden test büyüklüğü (T) hesaplanmıştır. Test büyüklüğü F-tablo değeri (q) ile karşılaştırılarak global test yapıp deformasyon olup olmadığına karar verilmiştir.

Bulgular

Nivelman ağı dengelemesi sonuçları

I. Periyot ve II. periyot nivelman ağı dengelemesinde t-dağılımlı uyuşumsuz ölçüler testi yapılmıştır. Bunun

sonucunda her periyot için tek bir güzergahta uyuşumsuz ölçüye rastlanmış olup bu ölçüler çıkarılarak dengelemeye devam edilmiştir.

Aşağıdaki Tablo 2' de I. ve II. periyot nivelman ağı için yapılan uyuşumsuz ölçüler test sonuçları gösterilmiştir. Korelasyonsuz ölçüler için s_{0i} hesabı (11) eşitliğinden, test büyüklüğü ise (10) eşitliğinden hesaplanır. Test büyüklüğü, t tablo değeri ile karşılaştırılarak uyuşumsuz ölçünün varlığına karar verilir.

Tablo 2. Nivelman ağı uyuşumsuz ölçüler testi

| | I. Periyot | II. Periyot |
|---------------|--|--|
| T_{vi_max} | 2.4841 | 1.0862 |
| t_tablo | 4.3027 | 4.3027 |
| Karar | $T_{vi_max} < t_tablo$ olduğundan uyuşumsuz ölçü yoktur. | $T_{vi_max} < t_tablo$ olduğundan uyuşumsuz ölçü yoktur. |

I. Periyot nivelman ağı dengelemesi sonuçları

I. Periyot nivelman ağındaki noktalara ait ölçülerinin dengelenmesi sonucu dengelenmiş kesin yükseklik değerleri Tablo 3' te gösterilmiştir.

Tablo 3. I. Periyot dengelenmiş kesin yükseklikler.

| Nokta adı | Kesin yükseklikler(m) |
|-----------|-----------------------|
| MAR-5 | 0.8885 |
| T1 | 1.9770 |
| T3 | 2.6164 |
| T4 | 2.3621 |
| AN.N | 2.6413 |
| RS494/684 | 5.1674 |

Nivelman ağındaki noktalara ait I. Periyot ölçülerinden elde edilen yüksekliklerin karesel ortalama hataları (m_h) Tablo 4' te gösterilmiştir.

Tablo 4. I. Periyot yüksekliklerin karesel ortalama hataları.

| Nokta adı | Yüksekliklerin karesel ortalama hataları(mm) |
|-----------|--|
| MAR-5 | 1.30 |
| T1 | 1.27 |
| T3 | 1.10 |
| T4 | 1.15 |
| AN.N | 1.82 |
| RS494/684 | 2.77 |

Tablo 4'den de görüldüğü üzere ağda bulunan noktalardan T3 nolu nokta 1.10 mm ile minimum karesel ortalama

hataya, RS494/684 nolu nokta ise 2.77 mm ile maksimum karesel ortalamaya sahiptir.

II. Periyot nivelman ağı dengelemesi sonuçları

II. Periyot nivelman ağındaki noktalara ait ölçülerinin dengelenmesi sonucu dengelenmiş kesin yükseklik değerleri Tablo 5' te gösterilmiştir.

Tablo 5. II. Periyot dengelenmiş kesin yükseklikler.

| Nokta adı | Kesin yükseklikler(m) |
|-----------|-----------------------|
| MAR-5 | 0.8628 |
| T1 | 1.9505 |
| T3 | 2.5899 |
| T4 | 2.3346 |
| AN.N | 2.608 |
| RS494/684 | 5.3034 |

Nivelman ağındaki noktalara ait II. Periyot ölçülerinden elde edilen yüksekliklerin karesel ortalama hataları (mh) Tablo 6' da gösterilmiştir.

Tablo 6. II. Periyot yüksekliklerin karesel ortalama hataları.

| Nokta adı | Yüksekliklerin karesel ortalama hataları(mm) |
|-----------|--|
| MAR-5 | 0.18 |
| T1 | 0.18 |
| T3 | 0.15 |
| T4 | 0.18 |
| AN.N | 0.20 |
| RS494/684 | 0.29 |

Tablo 6'dan da görüldüğü gibi ağda bulunan noktalardan T3 nolu nokta 0.15 mm ile minimum karesel ortalama hataya, RS494/684 nolu nokta 0.29 mm ile maksimum karesel ortalamaya sahiptir.

Haziran ve Ekim aylarında iki periyot ölçü olarak yapılan hassas nivelman ölçüleri sonucunda her iki periyotta da T3 nolu noktaya ait yükseklik karesel ortalama hata değeri minimum, RS494/684 nolu noktaya ait yükseklik karesel ortalama hata değeri maksimum olarak bulunmuştur.

Nivelman ağı deformasyon analizi sonuçları

Θ^2 - ölçütü yöntemiyle deformasyon analizi sonuçları Tablo 7' de sunulmuştur.

Tablo 7. Nivelman ağı Θ^2 -ölçütü yöntemiyle deformasyon analizi değerleri

| Testler | Sonuçlar |
|--------------------|------------------------|
| Θ^2 -Ölçütü | 0.0313 |
| s_0^2 | 8.7430 |
| Test | $7.1513 \cdot 10^{-4}$ |
| Büyükklüğü | |
| F-tablosu (q) | 4.3874 |

| Karar | T<F Deformasyon n yok |
|-------|-----------------------------|
|-------|-----------------------------|

Tablo 7' de; oluşturulan nivelman ağında Θ^2 - Ölçütü yöntemiyle deformasyon analizi sonucunda (t_1)- (t_0) periyotları arasında hesaplanan test büyüklüğü değerinin (T), F tablo değerinden küçük olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda Haziran 2020 ile Ekim 2020 periyotları arasında geçen sürede, kurulmuş olan nivelman ağında herhangi bir deformasyonun olmadığı görülmektedir.

Sonuçlar

Mareograf istasyonları jeodezik açıdan büyük öneme sahip olup deniz seviyesini ölçmelerini sağlayan istasyonlardır. Bu ölçüler jeodezi alanında yükseklik sistemleri için düşey datum belirleme çalışmalarında ve düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesinde kullanılır. Mareograf istasyonları deniz seviyesini ölçerken yüksek hassasiyetle ve doğrulukla çalışmalarını yapması jeodezi alanı için önemlidir.

Bu çalışmada Doğu Karadeniz bölgesi, Trabzon ili, deniz limanı sahası içerisinde bulunan TRBZ adlı mareograf istasyonu çevresindeki düşey yönlü hareketliliğin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışma alanında bir jeodezik nivelman kontrol ağı kurulmuştur. Kurulan nivelman ağında Haziran 2020 (I. Periyot), Ekim 2020 (II. Periyot) olmak üzere iki periyotta hassas nivelman ölçüsü yapılmıştır. Tüm güzergahlarda gidiş ve dönüş olmak üzere hassas nivelman yöntemi kullanılmıştır. Her periyotta ölçülen yükseklik farkları serbest ağı dengelemesi yöntemine göre MATLAB R2016b adlı programda yazılan algoritmalar ile dengelenmiştir. 9 Haziran 2020 başlangıç periyodu (t_0) ve 9 Ekim 2020 (t_1) kabul edilmiştir. (t_0) ve (t_1) zamanları arasında oluşan deformasyonlar statik deformasyon modeli ile belirlenmeye çalışılmıştır. Statik deformasyon yöntemlerinden Θ^2 - ölçütü yöntemi seçilmiş olup, yine MATLAB R2016b programında yazılan algoritmalar ile deformasyon analizi yapılmıştır. Yapılan deformasyon analizi sonucunda Tablo 7' de görüldüğü üzere:

Nivelman ağında Θ^2 -Ölçütü yöntemine göre, Test büyüklüğü değeri (T) $7.1513 \cdot 10^{-4}$, F tablo değeri ise 4.3874 olarak hesaplanmıştır. Yani T test büyüklüğü değeri F tablo değerinden küçük olduğu görülmektedir.

Bu durum oluşturulan nivelman ağında geçen zaman içinde deformasyon olmadığı anlamına gelmektedir. Yapılan bu Global test, yaklaşık 4 aylık bir periyotta çalışma alanı olarak seçilen Trabzon mareograf istasyonu çevresinde düşey yönlü anlamlı bir hareketin olmadığını göstermektedir.

Çalışma bölgesinde deformasyon çıkmamış olmasının nedeni olarak; çalışma bölgemiz olan TRBZ isimli mareograf istasyonu çevresindeki zemin yapısının sert olması ve ölçü tekrarının 4 ay gibi kısa bir periyotta yapılması olarak düşünülmüştür.

Ancak yapılan bu çalışmalarda, periyot sayısı artırılıp uzun dönemli olarak ölçümler yapıldığı takdirde deformasyonun varlığına dair farklı sonuçlar elde edilebilir. Bu sebeple periyotlar arası sürenin daha uzun tutularak çalışmaların farklı periyotlarda düzenli aralıklarla tekrarlanması önerilmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”.

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”.

Kaynaklar

- [1] Meo, M. ve Zumpano, G. “On The Optimal Sensor Placement Techniques For A Bridge Structure”. Eng. Struct., 27, 1488–1497 2005.
- [2] Baselga, S., García-Asenjo, L. And Garrigues, P. “Deformation Monitoring And The Maximum Number Of Stable Points Method”. Measurement, 70, 27–35, 2015.
- [3] Pingue, F., Petrazzuoli, S.M. Obrizzo, F., Tammara, U., De Martino, P., Zuccaro, G. “Monitoring system of buildings with high vulnerability in presence of slow ground deformations (The Campi Flegrei, Italy, case)”. Measurement, 44, 1628–1644, 2011.
- [4] Wisniewski, Z. ve Kaminski, W. “Estimation and Prediction of Vertical Deformations of Random Surfaces, Applying the Total Least Squares Collocation Method”. Sensors, 20, 3913,2020.
- [5] Tanır Kayıkçı, E. ve Yalçınkaya, M. “Determination of Horizontal Movements by Static Deformation Models: A Case Study on the Mining Area”. Experimental Techniques, 39, 70-81, 2015.
- [6] Kalkan, Y. ve Alkan, R.M. “Mühendislik Yapılarında Deformasyon Ölçmeleri”. 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Kasım, İTÜ, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [7] Doğan, A. Yüzey Deformasyonlarının Hassas Nivelman Tekniği ile Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye, 2019.
- [8] Tari, E., Şahin, M., Barka, A., Reilinger, R., King, R.W., McClusky, S. ve Prilepin, M. “Active Tectonics Of The Black Sea With GPS”. Earth Planets Space, 52, 747-751, 2000.
- [9] Maden, N. ve Dondurur, D. “Orta Karadeniz Sirtının Tektonik ve Kabuk Yapısının Gravite Verileri Yardımıyla Belirlenmesi”, Jeofizik, 17, 25-37, 2012.
- [10] Yalvaç, S., Üstün, A., Tuşat, E. , Doğanalp, S. ve Abbak, R. A. “ Düşey Yönlü Deformasyon Belirleme Çalışmalarında Tekrarlanabilirliklerin İncelenmesi”. TUJK 2011 Sabit GNSS İstasyonları Ağı ve Analizi Çalıştayı, İstanbul, 23-25 Kasım 2011.
- [11] Çalışkan, K. Bolvadin/Afyonkarahisar Kent Merkezinde Meydana Gelen Düşey Deformasyon Hızlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye, 2021.
- [12] Ünver, M. Düşey Yöndeki Yerkabuğu Hareketlerinin Duyarlılık Nivelman Ölçüleri ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü, Trabzon, Türkiye, 1988.
- [13] Ekinci, S.K. Sayısal Presizyonlu Nivelar ve Sayısal Presizyonlu Nivelman Tekniğinin Doğruluğu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [14] Aydın, Ö. Hassas Yükseklik Ölçmeleri, Y.T.Ü Basım Yayın Merkezi, İstanbul, Türkiye, 1998.
- [15] Şişman, Y. “Uyuşumsuz Ölçü Gruplarının Belirlenmesi Yöntemleri”. Harita Dergisi, 133, 74- 89, 2005.
- [16] Erol, S. GPS ve Nivelman Ölçüleriyle Deformasyonların Belirlenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [17] Doğanalp, S., Turgut, B. ve İnal, C. “Yükseklik Ağlarında Q² Ölçütü ve Kalman Filtreleme Yöntemi ile Deformasyon Analizi”. Teknik- Online Dergi, 5, 2, 49-59, 2006.
- [18] Konakoğlu, B. Beton Barajlarda Deformasyonların Statik, Kinematik ve Dinamik Modeller ile Belirlenmesi: Artvin Deriner Barajı Örneği, Doktora Tezi, K.T.Ü, Trabzon, Türkiye, 2019.
- [19] <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/trabzon-limanina-gelen-yuksek-talep-turkiyeye-guvenin-isareti/1043231> 10 Ocak 2021.
- [20] Keskin, S. Güneydoğu (GD) Karadeniz Sahil Kesiminin (Trabzon Yöresi) Denizel Taraçaları ve Aktif Tektoniği, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü, Trabzon, Türkiye, 2007.
- [21] Keskin, S., Bektaş, O., Eyüboğlu, Y. ve Yücel, C. “GD Karadeniz Sahil Kesiminin (Trabzon Yöresi) Aktif Tektoniği”. Türkiye Kuvaterner Sempozyumu, Mayıs, İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, TURQUA-VI, 138- 150, 2007.