

FAY PARAMETRELERİ VE KONTROL AĞLARININ TASARIMI

K. Halıcıoğlu¹, H. Özener^{2,1}, A. Ünlütepe³

¹Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Jeodezi Anabilim Dalı, 34680, Çengelköy, İstanbul, kerem.halicioğlu@boun.edu.tr

²İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü Ölçme Tekniği Anabilim Dalı, 34469, Maslak, İstanbul, haluk.ozener@itu.edu.tr

³Strabag Inc. 2520 Stanley Avenue Niagara Falls, ON L2E 6S4, Canada, ahmet.unlutepe@strabag.ca

ÖZET

Kabuk deformasyonlarının belirlenmesinde mikro-jeodezik ağlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Yer kabuğu hareketlerinin izlenmesi amacıyla kullanılan jeodezik yöntemlerin yüksek presizyonlu sonuçlar üretmesi, jeoloji ve jeofizik gibi disiplinlerin çalışmalarına değerli girdiler sağlamaktadır. Jeodezik çalışmalarla üretilen bilgileri modelleri için kullanan disiplinlerin, bu bilgilerin üretim sürecinde, jeodezi ile arakesitleri doğrultusunda işbirliği yapmaları gerekmektedir. Jeodezinin jeodinamik çalışmalarda farklı bilim dalları ile gerçekleştireceği çalışmalar, kabuk deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla oluşturulan kontrol ağlarının tasarımı sürecini de kapsamaktadır. İzlenen faya ait jeofizik parametreleri göz önüne alarak oluşturulan kontrol ağlarında nokta sayısı ve bu noktaların fay düzlemine göre konumlarını inceleyen çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bildiride bu çalışmalardan örnekler sunulmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Kabuk Deformasyonları, Fay Parametreleri, Optimizasyon

ABSTRACT

FAULT PARAMETERS AND DESIGN OF CONTROL NETWORKS

Micro-geodetic networks are widely used in determination of crustal movements. High-precision geodetic techniques that are used to determine the crustal movements produce important inputs to geological and geophysical studies. Geophysics and geology have to contribute during the design process of geodetic studies including the network design for deformation monitoring. There are some approaches published for network design considering fault parameters in terms of the number of stations included to network and the locations of control points. This paper discusses optimization strategies of geodetic networks in terms of fault parameters towards these studies.

Keywords: Crustal Deformation, Fault Parameters, Optimization

1. GİRİŞ

Günümüzde kabuk deformasyonları ve barajlarda deformasyon izleme çalışmaları, endüstriyel ölçmeler, büyük inşaat projelerindeki mühendislik çalışmaları, arkeolojik ve mimari projeler gibi hemen hemen her mühendislik ilintili disiplin yüksek doğruluklu çalışmalara gereksinim duymaktadır. Uydu tekniklerinin gelişmesi ve yaygınlaşması ile birlikte özellikle GPS tekniği mühendislik hizmetlerinde klasik jeodezik yöntemlerin yerini almaktadır. Uydu teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak sürekli gözlem yapan sabit GPS istasyonlarının ülke genelinde yaygınlaşması ile jeodezik çalışmalar daha hızlı ve güvenilir şekilde gerçekleşmeye başlayacaktır. Ancak sürekli gözlem yapan sabit GPS istasyonları ağının da kabuk deformasyonları gibi yüksek doğruluklu gözlemler gerektiren çalışmaların beklentilerini karşılayacağı söylenemez. Büyük ölçekli bölgelerde özel fayların deformasyonlarının izlenmesi deforme olan alan ile ilgili ek çalışmaların yapılmasını gerektirir.

Ölçme yöntemi, seçilen ölçme donanımı ve gözlem aralığı deformasyon belirleme çalışmalarında optimizasyon çalışmalarına dahil edilmesi gereken önemli başlıklardır. Optimizasyon, genel olarak çalışma başlangıcında elde edilmek istenen doğruluğu işlem sürecinde dikkate alır. Bunun yanında güvenilirlik de presizyon kadar önemli bir parametredir. Deformasyon belirleme amaçlı çalışmalarda tasarlanacak ağa ait presizyon, güvenilirlik ve ekonomi jeodezik ağ tasarımında dikkate alınan temel parametrelerdir. Deformasyonların belirlenmesi için genellikle lokal ağlar tasarlanmaktadır. Deforme olan alan topografik ve jeolojik veriler yardımıyla belirli sayıda nokta ile izlenir. Ağa ait noktaların sayısı deforme olan alan ve deformasyon miktarının büyüklüğü ile orantılıdır.

Ağ tasarımında en anlamlı yaklaşım kontrol ağını oluşturan noktaların ve bu noktaların konumlarının disiplinler arası çalışmalarla belirlenmesidir. Kontrol ağını oluşturacak noktaların sayısı ve bu noktaların konumlarının belirlenmesinde deformasyonu izlenecek faya ait yapısal unsurların da biliniyor olması gerekir. Deformasyonların fay düzlemine paralel olduğu doğrultu atımlı faylar için faya ait parametrelerin de kontrol ağlarının tasarımında dikkate alındığı yöntemler geliştirilmiştir. Fay derinliği, fayın atım miktarı ve fay geometrisi kontrol ağlarının noktalarının konumları ve sayısı

belirlenirken parametre olarak tasarıma dahil edilmektedir. Kontrol ağına ait noktaların faya olan uzaklıkları da fayın atım miktarı ya da kilitlenme derinliği belirlenmek isteniyorsa önem kazanmaktadır. Gerçekleştirilen ampirik çalışmalar göstermektedir ki faya yakın olarak konumlandırılan kontrol ağı noktaları ile kilitlenme derinliği prezisyonlu olarak kestirilebilirken fay düzleminden uzaklaştıkça atım miktarı kestiriminin prezisyonu artmaktadır. Birinci derece ağ tasarımı, ağ geometrisi, optimum sayıda ağ noktası ve kontrol noktası konumlarına yaklaşım olarak değerlendirilirse, ağ parametrelerinin prezisyonu için jeofizik ve jeolojik parametrelerin de dahil edildiği bir değerlendirme ile bir optimizasyon gerçekleştirmek gerekecektir. Deneysel çalışmalar sonucunda ideal bir transform fayın D derinliğinde kilitli bulunduğu varsayılırsa, fay düzlemine olan optimum nokta uzaklıkları bu derinliğin $1/\sqrt{3}$ katı olmaktadır. İki fayın birden değerlendirilmesi söz konusu ise faylara eşit uzaklıkta ve faylar arasında noktaların seçimi anlamlı sonuçlar vermektedir. Böylece fay parametreleri tasarıma dahil edildikçe belirlenen deformasyon deforme olan alanı doğru bir şekilde yansıtabilmektedir.

Bu çalışma kabuk deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla tasarlanan kontrol ağlarında çalışma sonucunda ulaşılmak istenen doğruluk, ağın güvenilirliği ve maliyet kriterlerinin yanında faya ait yapısal ve geometrik parametrelerin de dikkate alınması gerekliliği farklı deneysel çalışmaların sonucu irdelenerek ortaya koyulmuştur. Fayın kilitlenme derinliği ve yıllık atım miktarı ağ tasarımı ve optimizasyonu süreçlerinde noktaların fay düzlemine göre konumları üzerinde etkili olduğu gibi nokta sayısının da belirlenmesinde dikkate alınmalıdır. Faya ait parametrelerin belirlenmesi gerektiğinde ise noktaların fay düzlemine uzak ya da yakın olarak konumlanması, bu parametrelerin belirlenme duyarlılığını arttırmaktadır. Çalışma bu yaklaşımları jeodezik ağların tasarım aşamasında değerlendirmeye almıştır.

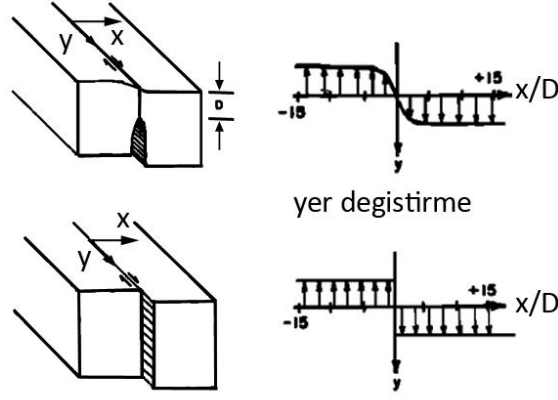
2. JEODEZİK AĞLARIN OPTİMİZASYONU

Gerek jeodezik çalışmalarda gerekse diğer mühendislik çalışmalarında çalışma bünyesinde donanım, maliyet ve imkanların optimize edilerek kullanılması gerekmektedir. Bunun için de bazı kısıtlamalar kabul edilmekte, bu kısıtlamalar belli parametrelerle ifade edilerek, amaç, bu parametrelerin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir. Bu süreç matematiksel optimizasyon olarak tanımlanmaktadır. Jeodezik ağların prezisyon maliyet ve güvenilirlik ve maliyetinin tasarlanan amaç çerçevesinde gerçekleştirilebilmesi için gerekli ağ yapısının ve ölçü prezisyonlarının belirlenmesi jeodezik ağların optimizasyonu olarak adlandırılmaktadır (Ayan, 1981).

Kabuk deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla levha sınırlarında ve fay düzlemleri boyunca gerçekleştirilen çalışmalar, özellikle GPS sisteminin yaygınlaşması ve yüksek prezisyonlu sonuçlar üretmesi ile birlikte artmış ve jeodezik ağların tasarım stratejilerinin önemli bir çalışma alanına dönüştürmüştür. Jeodezik ağların tasarımı dört ana adımda değerlendirilmektedir. Bunlardan ilki sıfıncı derece optimizasyon olarak adlandırılan datum problemidir. Ağ noktalarının koordinatları ya da koordinatların bir fonksiyonu ile tanımlanacak bir amaç fonksiyonunun gerçekleştirilebilmesi için gerekli datumun belirlenmesidir. Bir diğer adım ise amaç fonksiyonun ağın şeklinin değiştirilerek gerçekleştirilmesi problemi olarak tanımlanır ve birinci derece optimizasyon olarak adlandırılır. Ağın düzeltme denklemleri katsayılar matrisi, ağ noktalarının konumları ve ağına ait kontrol noktalarının sayısı olmak üzere iki parametreyle değişir. Bu nedenle birinci derece optimizasyon, ağ noktalarının konumlarının seçimi ve ölçü planının optimal oluşturulması şeklinde ele alınır. İkinci derece optimizasyon ise ölçü ağırlıklarının optimal dağılım problemidir. Amaç fonksiyonu ağın datumu ve şekli sabit tutularak ağırlıkların değişimi ile gerçekleştirilir. İkinci derece optimizasyon ölçmelerde elde edilecek prezisyon ile tanımlanmaktadır. Üçüncü derece optimizasyon ise belli amaçlara uymayan ağların belirlenen amaç fonksiyonunu sağlayacak şekilde iyileştirilmesi problemidir. Örneğin ülke ağlarının güncel ihtiyaca cevap verecek şekilde geliştirilmesi işlemi bir üçüncü derece optimizasyon problemidir.

3. FAY PARAMETRELERİ VE AĞ TASARIMI

Jeodezik optimizasyonun temel amacı belirlenen prezisyon, güvenilirlik ve ekonomik parametrelerin sağlanmasıdır. Ancak bazı yaklaşımlar olmasına karşın (Gerasimenko vd., 2000; Blewitt, 2000; Shestakov vd., 2003) fay parametrelerinin elde edilmesine dair, ağına dahil edilecek noktaların sayısına konusunda kesin bir belirleme yapılamamıştır. Özellikle aktif fayları konu eden çalışmalarda faya ilişkin parametrelerin belirlenmesinde jeodezik ağların optimizasyonu konusundaki çalışmalar sınırlıdır. Deformasyon belirleme amaçlı tesis edilen jeodezik ağları oluşturan kontrol noktalarının sayısının belirlenmesi problemi fay parametrelerinin tanımlanmasını gerektirmektedir (Şekil 1).



Şekil 1: Yüzeydeki doğrultu atımlı yer değiştirmeyi gösteren basit model

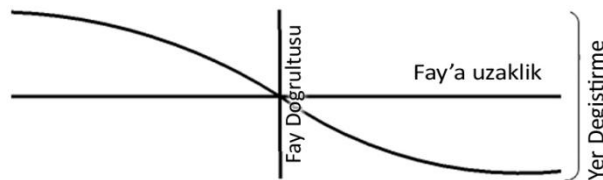
Fay parametrelerin tanımlanmasında faya etkiyen kuvvetlerin tanımları modellerin geliştirilmesinde temel yaklaşım olarak belirlenir. Depremler sırasında enerjinin nasıl yayıldığını modelleyen elastik rebound teorisi ve bu teorinin bir, iki ve üç boyutlu olarak incelenmesi ile deprem süreçleri çözülmeye çalışılmaktadır. Henry Fielding Reid tarafından 1996 büyük San Francisco depreminin ardından ilk çalışmaları oluşturulan elastik rebound teorisine göre depremler ile açığa çıkan enerji depremler arasındaki periyotta, gerinim birikimi şeklinde oluşturmaktadır. Depremler oluştuğunda ise bu döngü devam etmektedir. Jeodezik çalışmaların ürünleri, deprem döngülerinde önemli bir veri olan gerinim değeri ile ilgili bilgiler vermektedir. Faya ilişkin parametrelerin belirlenmesi amacıyla oluşturulan jeodezik altyapının da deprem döngüsü ile ilgili modellerden yararlanması bu modelleri tasarımında dikkate alması gerekir.

Jeodezik çalışmalar ile fay parametreleri arasındaki ilişki, işlem doğrultusu bakımından birbirinden ayrılan iki tür model şeklinde oluşur. Bunlardan ilki fay düzlemi ile ilgili geometri ve kayma değerlerinden deprem anı etkilerin elastik yarı-uzay modelleri ile belirlenmesi olarak tanımlanabilecek (direkt modelleme) forward modelling'tir. Diğer modelleme yöntemi ise (ters modelleme) inverse modelling olarak tanımlanan deprem öncesi ve sonrası nokta konumlarından elde edilen yer değiştirmeler yardımıyla fay parametrelerinin hesaplanmasıdır (Aktuğ ve Çelik, 2008). Doğrultu atımlı sistemler için iki boyutlu matematiksel modeller geliştirilmiştir (Savage ve Burford, 1973), bu modeller daha sonra yerkabuğunun tamamı yerine yüzeylerden birine etkiyen yüzey kuvvetlerin sıfır olduğu kabulüyle yarı uzay kavramı ile basitleştirilmiştir (Okada, 1985). Böylelikle yüzeydeki yanal ve düşey atımlar hesaplanabilir. Jeolojik ve jeofizik çalışmalar, jeodezik modellerin ihtiyaç duyacağı apriori değerleri yeterli doğrulukta üretmektedir. Fay düzlemine paralel yer değiştirmeler aşağıdaki basit doğrultu atımlı fay modeli ile tanımlanabilir (Lisowski vd., 1991)

$$d(x) = -\frac{V}{\pi} \arctan\left(\frac{x}{H}\right)$$

(1)

Burada x fay düzlemine paralel uzaklık olmak üzere fayın yarı-uzay yüzeyinde bir H derinliğinde kilitli bulunduğu ve bu derinlikte yılda V hızı ile kaydığı kabul edilmektedir. Uzaklığın bir fonksiyonu olarak fayda beklenen yüzey yer değiştirmeler şekildeki gibi beklenmektedir (Şekil 2).



Şekil 2: Fay doğrultusuna göre yer değiştirmeler

Bu model dislokasyon modelinin bir boyutlu iki parametreli doğrultu atımlı modeli olarak adlandırılmaktadır. Bu modelden çıkış olarak getirilen yaklaşımlar uydu tekniklerinin faya paralel yer değiştirmelerini belli bir standart sapmayla belirleyebileceği kabulü ile tasarlanacak ağa ait maliyetleri bu standart sapmanın fonksiyonu olarak ele alınarak amaç fonksiyonlarını tanımlar. Jeodezik ağı oluşturan kontrol noktalarına ait ekonomik parametreler ölçmeler sonucu elde edilecek standart sapmalar ile ilişkilendirilerek teorik sonuçlar elde edilebilir. Burada amaç kontrol noktalarına ilişkin ekonomik parametrelerin minimize edilerek optimizasyonunu sağlamaktır. Böylelikle jeodezik ağa ait nokta

konumları, kayma miktarı ve kilitlenme derinliği ile model aracılığıyla ilişkilendirilerek teorik çözümlere ulaşılmaktadır. Gerek mevcut noktalardan yararlanılarak gerekse olası noktaların tesisi göz önüne alınarak geliştirilen iteratif yazılımlar fay düzlemi referans alınarak hangi fay parametresine göre nasıl bir nokta dağılımı ve sayısı belirleneceğine yönelik yaklaşımlar geliştirmişlerdir (Gerasimenko vd., 2000; Blewitt, 2000; Taşkın vd., 2003). Bu deneylerin sonuçları 10 km kilitlenme derinliğine ve yılda 10mm kayma miktarına sahip faylar göz önüne alınarak, fayın izlenmesi belirli bir sayıda kontrol noktasının üzerindeki ağlarda prezisyon adına kazanımın sınırlı olmasıdır. MAGNET ağından yararlanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada (Taşkın vd., 2003), kilitlenme derinliği ve kayma miktarının belirlenmesinde kullanılan noktaların sayısının, yirmi gibi belirli bir nokta sayısı sınır değerine ulaşılmasının ardından, nokta sayısını arttırmanın, parametrelerin belirlenme doğruluğuna anlamlı bir etki yapmadığı hesaplanmıştır. Kabuk deformasyonlarını izlemeyi planlayan jeodezik çalışmaların, altyapı yaklaşımlarında faya ait parametrelerin etkili olduğunu ve dolayısıyla dikkate alınması gerektiğini vurgulayan çalışmalar olmuştur. Modellerin ürettiği konum ve nokta sayısı yaklaşımları elbette çok disiplinli çalışmalarla doğrulanmalı ve arazi gerçekliği ile bütünleştirilmelidir.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Atım miktarının küçük olduğu faylarda kontrol ağına daha fazla parametrenin fay düzlemine yakın konumda dahil edilmesi gerekmektedir. Fay kilitlenme derinliği H nin ve fayın konumunun birlikte elde edilmesi amaçlanan çalışmalarda jeodezik ağa ait noktaların yaklaşık fay düzleminde $\pm H/\sqrt{3}$ uzaklığında yerleştirilmesi önerilmektedir. Elbette bu yaklaşım izlenecek olan fayın çevresindeki tektonik yapının da bilinmesini gerektirir. Fay düzleminde belirli bir uzaklığa tesis edilecek noktaların farklı tektonik hareketlerden etkilenip etkilenmeyeceği de tasarım aşamasında analiz edilmelidir. İki faydan oluşan sistemlerin çözülmesi amaçlanmakta ise noktaların fay düzlemlerinin arasına konumlandırılmaları gerekmektedir. Ancak bu çözümün de fayların birbirinden kilitlenme derinliklerinin iki katından fazla uzaklıkta bulunmaları halinde modellerin yeterli çözünürlükte olmadıkları gözlenmektedir. Bu yaklaşımlar birinci derece ağ optimizasyonuna bir katkı olarak değerlendirilmeli ve tasarlanan ağın fay parametrelerinin belirlenmesi probleminde katkısını arttırmak amacıyla önerilmektedir. Parçalı fay yapılarına modellerin uydurulması oldukça zor bir süreçtir. Bu nedenle fayların yapılarına ilişkin bilgileri uydu gözlemleri ile elde etmek isteyen çalışmalar, mevcut nokta sayısını, faya ait belirlenmiş olan yaklaşık konumlar göz önüne alınarak tasarlanmalı ve gerektiğinde gözlemler sonrasında ağa ilişkin güncellemeler gerçekleştirilmelidir (Halıcıoğlu ve Özener, 2008).

KAYNAKLAR

- Aktuğ B. ve Çelik R. N., 2008. *Jeodezik ölçüler ile deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesi*, İTÜ Dergisi/d mühendislik Cilt:7, Sayı:1, 89-102.
- Ayan, T., 1981. *Nirengi Ağlarının Tasarımı ve Optimizasyonu*, Ülke Nirengi Ağları ve Türkiye Nirengi Ağı Dizi Konferansları, YTÜ.
- Blewitt, G., 2000. *Geodetic network optimization for geophysical parameters*, Geophysical Research Letters, VOL. 27, NO. 22, Pages 2615-3618, November 15.
- Gerasimenko, M. D., Shestakov, N. V., Kato T., 2000. *An optimal geodetic network design for fault-mechanics studies*, Earth Planets Space, 52, 985-987
- Halıcıoğlu K. ve Özener, H., 2008. *Geodetic Network Design and Optimization on the Active Tuzla Fault (Izmir Turkey) for Disaster Management*, Sensors, 8, 4741-4757 DOI: 10.3390/s8084741.
- Lisowski, M., Savage, J.C., Prescott, W.H., 1991. *The velocity field along the San Andreas fault in central and southern California*, J. Geophys. Res., 96, 8369-8389.
- Okada Y., 1985. *Surface Deformation Due To Shear And Tensile Faults In A Half-Space*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 75, No. 4, pp. 1135-1154.
- Savage, J. C. ve Burford, R. O., 1973. *Geodetic Determination of Relative Plate Motion in Central California*, Vol. 78, No. 5, Journal of Geophysical Research, February 10.
- Shestakov, N.V., Waithaka, H.E., Kasahara, M., Gerasimenko, M.D., 2003. *Two Examples Of Optimal Design Of Geodynamic GPS Network*, International Associations Of Geodesy Symposia, Vol. 128, Ed. F.Sanso, 30, June- 11, July, Sapporo, Japan.

Taşkın, G., Üsküplü, S., Saygın, H., Ergintav, S., 2003. *Optimization of GPS Observation Strategy for Improvement of Tectonic Measurements*, Proceedings of Applied Simulation and Modelling Conference, Marbella, Spain.