

MADEN SAHALARINDA KURULAN DEFORMASYON AĞLARININ OPTİMİZASYONU

Haluk KONAK
Veysel ATASOY
Ergün ÖZTÜRK

ÖZET

Yeraltında cevher çıkarılması sonucunda; yeryüzünde oluşacak çökme, kayma gibi yüzey hareketlerinin jeodezik yöntemlerle izlenebilmesi amacıyla kurulan deformasyon ağlarının, kendilerinden beklenen işlevleri eksiksiz olarak karşılamaları gerekir. Bu amaçla ele alınan ağ, tasarım aşamasında duyarlık ve güvenilirlik yönünden en uygun duruma getirilir.

Bu bildiride; topoğrafik yapısı gereği sınırlı sayıda deformasyon izleme noktası ve gözlem olanağı sağlayan gerçek bir maden sahası için tasarlanan bir deformasyon ağı, sayısal uygulama modeli olarak seçilmiştir. Söz konusu bu ağın yapısına uygun bir optimizasyon algoritması geliştirilmiş ve son adımda da ulaşılan en uygun ölçme planı ile ağırlık dağılımı, deformasyon izleme ağlarında beklenen istekler yönünden irdelenmiştir.

1. GİRİŞ

Gerek alt yapı hizmetlerine yönelik ülke ağları, gerekse barajlar, tüneller ve maden ocakları gibi mühendislik yatırımlarına yönelik deformasyon izleme ağları, kendilerinden beklenen işlevleri karşılayacak şekilde kurulmalı ve bu amaçla da geliştirilip iyileştirilmelidir.

Yeraltından cevher çıkarılması amacıyla kurulan maden ocaklarının çevresinde; özellikle çalışma sahasının topoğrafik yapısı, bitki örtüsü ve yerleşim koşulları deformasyon izleme noktalarının en uygun konumlarının belirlenmesi konusunda önemli kısıtlayıcılarıdır. Buna bağlı olarak, söz konusu noktalar arasında görüş olanakları da oldukça sınırlıdır. Öte yandan kontrol noktaları da hareket beklenen bölgeyi olabildiğince kuşatabilmelidir.

Bu durumda, ele alınan ağın datumunun ve deformasyon izleme noktalarının yaklaşık yerlerinin belli olduğu varsayılır. Başka bir anlatımla; ağ noktalarının koordinatları, kontrol noktalarının datumunda olmak üzere zorlamasız bir yöntemle önceden yaklaşık olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında, ağda gerçekleştirilebilecek ölçü türleri ve olası tüm gözlemlerden oluşan bir ölçme planı

tasarlanır. Ağın tümüne ilişkin duyarlık isteklerini öngören bir amaç fonksiyonu seçilir, gerçekleştirilecek ikinci derece optimizasyon işlemiyle ağ duyarlık ve güvenilirlik yönünden en uygun duruma getirilir.

Bu bildiride; maden sahası ve çevresinde beklenen yüzey hareketlerinin jeodezik yöntemle izlenebilmesi amacıyla kurulan bir deformasyon ağı, sayısal uygulama modeli olarak seçilmiştir. Çalışma sahasının yapısı gereği, sınırlı sayıda deformasyon izleme noktası ve maksimum ölçme planı ile ele alınan ağ için uygun bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Son adımda; ulaşılan ölçme planı ve ölçü duyarlıkları, deformasyon izleme ağlarından beklenen duyarlık ve güvenilirlik istekleri yönünden gözden geçirilmektedir.

2. DEFORMASYON İZLEME AĞLARINDA DUYARLIK VE GÜVEN OPTİMİZASYONU

Bölgesel yer kabuğu hareketlerinin ya da barajlar, tüneller ve maden ocakları gibi mühendislik yatırımlarının çevrelerinde beklenen yüzey hareketlerinin izlenebilmesi amacıyla kurulan deformasyon ağlarının, kendilerinden beklenen işlevleri eksiksiz olarak karşılamaları istenir. Bu amaçla ele alınan ağ, uygun bir amaç fonksiyonu seçilerek tasarım aşamasında doğruluk, duyarlık ve güvenilirlik yönünden en uygun duruma getirilir.

Optimizasyon işlemi denilince, genel anlamda; ölçme planı ve ölçü ağırlıklarının optimizasyonu ile ağın geliştirilip iyileştirilmesi işlemleri birlikte düşünülmektedir. Bu amaçla ele alınan bir optimizasyon probleminde;

. Olası tüm gözlemlerden oluşan bir ölçme planı tasarlanır. Korelasyonsuz ve ayrı ayrı ele alınan ölçü ağırlıkları, ikinci derece optimizasyon işlemi ile belirlenir.

. İndirgenen ölçme planı duyarlık, güvenilirlik ve maliyet yönünden gözden geçirilerek, gerekirse ek gözlemlerle iyileştirilir.

. Gözlemlerin türüne göre koordinat bilinmeyenleri dışındaki ek bilinmeyenler, A katsayılar matrisinden indirgenir. Uygun görülen gözlem türleri için grup ağırlıklar belirlenir. İndirgenmiş ölçme planından yararlanarak son kez bir kez daha ağırlık optimizasyonu yapılır /4,8,9/.

Öte yandan, tek bir oturumda bir çok gözlem türünün aynı anda elde edilmesine olanak veren ölçme tekniklerinin kullanılması durumunda; zaman ve emek kaybı yaratmayan, ancak ağın kalitesini artırıcı görülen ölçü türleri ölçme planına dahil edilir.

. Son adımda, kesinleştirilen en uygun ölçme planı, deformasyon izleme ağlarından beklenen istekler yönünden bir kez daha gözden geçirilirler.

2.1. Ölçme Planının Tasarlanması

Bir deformasyon ağı; problemin yapısına göre hareket beklenen bölgede tesis edilen deformasyon izleme (obje) noktaları ile hareket beklenen bölge dışındaki kontrol noktaları kümesinden oluşur. Böyle bir ağda; kontrol noktaları arasında kontrol ölçmeleri, kontrol noktaları ile deformasyon izleme noktaları arasında bağlantı ölçmeleri ve deformasyon izleme noktaları arasında kestirme ölçmeleri olmak üzere, olası tüm gözlemlerden oluşan bir ölçme planı tasarlanır. Söz konusu ölçme planı, gerçek gözlem koşulları da dikkate alınarak; öncelikle doğrudan komşu olan noktalara olmak üzere, ağın tümü için tasarlanır.

Ölçü türleri olarak; yatay doğrultular, düşey açılar, eğik uzunluklar ve yükseklik farklarından oluşan yersel gözlemler ve koordinat farkları takımından oluşan yapay uydu gözlemleri birlikte düşünülebilir.

Deformasyon izleme noktalarının kenar uzunlukları, işletme sahasının yapısı gereği beklenen yüzey hareketlerinin özelliğine uygun olarak belirlenir. Noktalar yerel hareketlerden etkilenmeyecek sağlam zeminlerde, pilyeler olarak kalıcı biçimde tesis edilirler. Kontrol noktalarının yerleri, ağın yapısına uygun olarak, deformasyon izleme noktalarına ilişkin ortalama kenar uzunluklarının en az 3-5 katı kadar uzakta seçilirler.

Deformasyon izleme ağı ölçüleri, Gauss-Markoff modelinde dolaylı ölçüler dengelemesi yöntemiyle değerlendirilirler. Küçük ve orta büyüklükteki deformasyon ağlarında, ölçülerle koordinat bilinmeyenleri arasındaki fonksiyonel ilişkiler, üç boyutlu yerel dik koordinat sistemlerinde kurulur /1/.

2.2 Amaç Fonksiyonunun Belirlenmesi

Deformasyon izleme ağlarında gerçekleştirilecek bir optimizasyon işleminde, amaç fonksiyonu olarak konuma ya da doğrultuya bağlı duyarlık istekleri ele alınır. Bu amaçla, ağa ilişkin global duyarlık ölçütlerinden birisi kullanılabilir /5,6/.

$$\det(\Sigma_{xx}) \Rightarrow \min. \quad \text{Güven hiper elipsodinin hacmi, Hacim Ölçütü} \quad (1) \\ (D - \text{optimum})$$

$$\text{iz}(\Sigma_{xx}) \Rightarrow \min. \quad \text{Varyans-kovaryans matrisinin izi, Varyans Ölçütü} \quad (2) \\ (A - \text{optimum})$$

Homojen ve izotrop bir ağ için, özdeğerler ölçütlerinden türetilen amaç fonksiyonları;

$$\lambda_{\max} \equiv \lambda_{\min} \quad S - \text{optimum} \quad (3)$$

$$1 - (\lambda_{\max} / \lambda_{\min}) \Rightarrow \min. \quad I - \text{optimum} \quad (4)$$

$$\lambda_{\max} \Rightarrow \min. \quad E - \text{optimum} \quad (5)$$

Skaler amaçla duyarlık istekleri yerine; ağın tümü için geçerli olan, duyarlık yönünden homojen ve izotrop bir ağı temsil eden Taylor-Karman yapısındaki ölçüt matrisleri amaç fonksiyonu olarak seçilir. Ağırlık optimizasyonu işlemlerinde oldukça kullanışlı olan böyle bir ölçüt matrisinde;

- a) Hata elipsoidleri küre görünümündedir (izotropluk).
- b) Hata elipsoidleri eşit büyüklüktedir (homojenlik).
- c) Bağlı hata elipsoidlerinin yarıçapları, noktalar arasındaki uzaklığa bağlı olarak değişen kürelerdir /2,4,7/.

2.3. Ölçme Planı ve Ölçü Ağırlıklarının Optimizasyonu

. Ağın datumuna dönüştürülmüş ölçüt matrisi C_{xx} , amaç fonksiyonu olarak ele alınırsa; tutarsız yapıdaki

$$A^T P A \doteq Q_x^+ \quad \text{İkinci derece optimizasyonunun temel eşitliği} \quad (6)$$

şeklinde kurulur.

$$\begin{aligned} Q_x &= C_{xx} / \sigma_0^2 \\ q &= \text{vektör } Q_x^+ \\ p &= \text{vektör } P \\ U &= (A^T \otimes A^T) \end{aligned} \quad (7)$$

olmak üzere ($\otimes$: Kronecker çarpımı);

$$p \doteq U^+ q \quad U, m \text{ Yaklaşımın fonksiyonel modeli} \quad (8)$$

oluşturulur. Fonksiyonel modele ilişkin tutarsızlıkların minimum yapıldığı en küçük kareler kestirimi kullanılarak; korelasyonsuz olarak ele alınan ölçü ağırlıkları p_i

$$p = (U^T U)^+ U^T q \quad U, m \text{ çözümü} \quad (9)$$

eşitliği ile hesaplanır /3,10/.

U, m çözümü, ölçüt matrisleri ile ağırlık optimizasyonu işlemine uygun kararlı ve sağlam bir yöntem olup, her durumda çözüm olanağı vermektedir. Ayrıca ağırlık optimizasyonu işleminde ölçme planından kaynaklanan şekil bozuklukları için uygun çözüm algoritmaları geliştirme olanakları da vermektedir.

Bu durumda; gerek şekil bozukluklarının giderilmesi, gerekse optimizasyon sonucunda ağırlıklar arasında önceden belli olan koşulların gerçekleşmesi amacıyla;

$$U_p = q \quad U, m \text{ yaklaşımın fonksiyonel modeli} \quad (10)$$

$$B_p = 0 \quad \text{Ek koşul denklemleri}$$

şeklinde genişletilerek; "*Bilinmeyenleri Arasında Koşul Denklemi Bulunan Dolaylı Ölçüler Dengelemesi*" yöntemi ile çözüme gidilir [4].

$$P = (U^T U + B^T B)^{-1} U^T q \quad \text{Genişletilmiş } U, m \text{ çözümü} \quad (11)$$

Çözüm sonucunda, ölçüt matrislerine daha iyi bir yaklaşım elde edebilmek için, kalıntıların kareleri toplamının minimum olmasını öngören amaç fonksiyonundan hesaplanan λ ölçek katsayısı

$$\lambda = \frac{\text{iz} [(A^T P A)^+ (A^T P A)^+]}{\text{iz} [(A^T P A)^+ Q_x]} \quad (12)$$

bağıntısından elde edilir¹ ve p ağırlık vektörü $p = \text{köşegen } (\lambda p)$ şeklinde doğrusal olarak dönüştürülürler.

. Hesaplanan ağırlıklardan sıfıra çok yakın, dağılıma uymayan çok büyük ya da eksi işaretli ağırlıklara karşılık gelen ölçüler ölçme planından çıkarılarak ölçme planı indirgenir.

. Gerçekleştirilen ağırlık optimizasyonu sonucunda; ulaşılan ağın varyans - kovaryans matrisi K_{xx} ile ölçüt matrisi C_{xx} in eşdeğer olup olmadığı $B_{xx} = C_{xx}^{-1} K_{xx}$ çarpımından elde edilen B_{xx} matrisinin en büyük özdeğeri $\lambda_{\max}$ için

$$\lambda_{\max} \leq 1 \quad (13)$$

eşitsizliği irdelenerek test edilir.

. Öte yandan, ağa ilişkin varyans – kovaryans matrisinden elde edilen özdeğerlere ilişkin büyüklükler ve dağılımları da gözden geçirilir.

2.4. Ölçme Planının Güvenirlik ve Maliyet Yönünden İyileştirilmesi

Ağa ilişkin indirgenmiş ölçü planı:

- Bir ölçünün fazla ölçü sayısındaki payı;

$$r_i = (Q_{vv} P)_{ii} \quad \text{Serbestlik Ölçütü,} \quad (14)$$

- Herhangi bir ölçüde ortaya çıkan olası hatanın belirlenebilme gücü;

$$\begin{aligned} \Delta_{oi} &= m_o \sqrt{w_o / p_i r_i} & \text{İç Güven Ölçütü} \\ w_o &= (\alpha_o, \beta_o, n-u, \infty) : & \text{Dış Merkezlik Parametresinin Sınır Değeri} \end{aligned} \quad (15)$$

- Söz konusu ölçü hatasının koordinat bilinmeyenleri üzerindeki etkisi;

$$\delta_{oi} = \sqrt{(1-r_i) w_o / r_i} \quad \text{Dış Güven Ölçütü} \quad (16)$$

yönünden gözden geçirilir /6/.

. Ölçülerin fazla ölçü sayısındaki payları r_i ile ortalama fazla ölçü sayısı ($r_o = 1 - u/n$) hesaplanır. $r \ll r_o$ ya da $r < 0.30$ olan ölçülerin diğer ölçüler tarafından yeterince denetlenmediklerine karar verilir. Söz konusu ölçülere dik yönde yeni gözlemler planlanır.

. İç güven ölçütü $\Delta_{oi} \geq 8$ mi olan ölçüler ile aynı zamanda $\delta_{oi} \geq 10$ olan ölçülerin yayıf denetlenildiklerine karar verilir. Bu ölçülere de dik yönde yeni gözlemler planlanır.

. Ağın masraf, zaman ve emek yönünden en uygun durumda belirlenebilmesi amacıyla $r_i \gg r_o$ ve $\delta_{oi} < 6$ olan ölçülerden uygun olanlar ölçme planından çıkarılırlar.

. Günümüzde $1''$ doğruluklu elektronik teodolitlerle, yatay doğrultular, düşey açılar, eğik uzunluklar ve yükseklik farkları, bir ölçme oturumu sırasında topluca ölçülebilmektedir. Öte yandan, sürüklenme ve indeks hatası olmayan teodolitlerle, yatay doğrultular da birbirinden bağımsız olarak ölçülebilmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak; ağırlık optimizasyonunda, her bir durulan noktada sözü edilen yersel ölçülerden bazılarını gerek duyulmasa bile, bu ölçülerin topluca elde edilmesinde herhangi bir emek ve zaman kaybı söz konusu olmaz.

Optimizasyon sonucunda, bu tip gözlemlerin ağırlıkları da, aynı gözlem türleri içinde en düşük ağırlığa sahip olanınki kadar alınarak en uygun ölçme planı kesinleştirilir. Böyle durumlarda duyarlık ve güvenilirlik yönünden oldukça yüksek düzeye ulaşan ağırlar elde edilebilmektedir.

. Ulaşılan ölçü duyarlıkları ile güvenilirliklerin deformasyon ölçülerinden beklenen isteklerini karşıladığına karar verildiğinde tesis ve ölçüm işlerine başlanır.

3. SAYISAL UYGULAMA

Yeraltından cevher çıkarılması sonucunda ortaya çıkması beklenen çökme ve kayma gibi yüzey hareketlerinin, jeodezik yöntemlerle izlenebilmesi amacıyla; Çayeli Bakır İşletmeleri A.Ş tarafından Çayeli – Madenli bölgesinde oluşturulan bir deformasyon ağı, sayısal uygulama modeli olarak seçilmiştir.

İşletmesi sürmekte olan maden ocağında cevher çıkarılması amacıyla açılan galeriler, cevher çıkarma işlemi tamamlandıktan sonra, özel dolgu malzemesi kullanılarak uygun tekniklerle doldurulmaktadır. Bu durumun doğal bir sonucu olarak; maden sahası çevresinde yerleşim güvenliğini tehlikeye sokmayacak derecede de olsa, bir miktar çökme ve kayma beklenmektedir. Bu amaçla gerçekleştirilen jeofizik ve jeolojik incelemeler sonucunda, özellikle cevher damarları boyunca olmak üzere, düşey yönde on yılda 12 cm lik bir çökme beklenmektedir. Bu anlamda, merkezden dışarıya doğru olmak üzere maden sahası ve çevresi, dört ana hareket kuşağına bölünmüştür. Çalışma sahasının dış kuşağında hemen hemen hiç hareket beklenmemektedir.

Maden ocağı, iki küçük akarsuyun oluşturduğu vadiler ve giriş yönünde de Madenli çayı ile çevrelenmiş olarak, yaklaşık doğu batı yönünde uzanan dağlık bir arazi parçasının altında açılmıştır. Maden sahasının engebeli olan yüzeyi, ağırlıklı olarak ağaçlık ve çay bahçelerinden oluşmaktadır. En alçak noktası ile en yüksek noktası arasındaki yükseklik farkı da yaklaşık 150 m dir.

Ağın Geometrik Yapısı ve Ölçme Planı: Maden sahası ve çevresinde beklenen olası çökme ve kaymaların belirlenebilmesi amacıyla tasarlanan deformasyon ağı, 150 – 400 m kenar uzunluklu 17 deformasyon izleme noktasından oluşmaktadır. Kontrol noktaları kümesi de maden sahasını karşı tepe ve yamaçlardan görebilen altı noktadan oluşmaktadır. Sözü edilen noktalardan 21 tanesi pilyeler ve diğer ikisi de ülke temel nirengi ağı noktası olan beton bloklar olarak, zeminde kalıcı biçimde işaretlenmişlerdir. Kontrol noktalarından, deformasyon izleme noktaları kümesine en uzak olanının kenar uzunluğu da yaklaşık bir km dir.

Deformasyon izleme noktaları arazide çok sınırlı olan görüş olanaklarının elverdiği oranda, olabildiğince düşey hareketlerin etkili olması beklenen yerlerde seçilmiştir. Arazinin engebeli ve çok yoğun bitki örtüsünden kaynaklanan yapısı gereği, deformasyon izleme ağı noktaları düzgün bir dağılım göstermese de, kontrol noktaları ile birlikte olanaklı tüm gözlemlerden oluşan bir ölçme planı tasarlanmıştır. Çalışma sahasının sırt yüzeyi, diğer bir tanımla su ayırım çizgisi boyunca seçilen noktalar, deformasyon izleme ağındaki bağlantı geçiş noktalarıdır.

Oluşturulan bu ağ için 160 yatay doğrultu, 18 düşey açı, 78 eğik uzunluk ve 78 yükseklik farkından oluşan bir ölçme planı taslağı düzenlenmiştir. Ağa ilişkin ölçülerin ise, açı ölçme doğruluğu $1''$ ve uzunluk ölçme doğruluğu $3 \text{ mm} + 2 \text{ mm} \cdot s_{\text{km}}$ olan elektronik teodolitler kullanılarak gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

Ölçme Planı ve Ölçü Ağırlıklarının Optimizasyonu: Deformasyon izleme noktalarının yaklaşık koordinatları, kontrol noktaları datumunda olmak üzere zorlamasız bir yöntemle hesaplanmıştır. Duyarlık yönünden homojen ve izotrop bir ağı temsil eden ve noktalar arasındaki uzaklığın bir fonksiyonundan türetilen Taylor – Karman yapısında bir varyans – kovaryans matrisi, amaç fonksiyon olarak seçilmiştir.

Ağırlık optimizasyonu işleminde, ölçüt matrislerinin tersine doğrudan bir yaklaşım olan U,m yaklaşımı kullanılmış ve ağırlıklar en küçük kareler yöntemiyle hesaplanmıştır. Optimizasyon işlemi sürecinde, ölçü türleri arasında gerçekleşmesi beklenen koşullar da göz önüne alınarak; ilk adımda ölçü ağırlıkları korelasyonsuz ve ayrı ayrı olarak ele alınmıştır. İkinci adımda, bir kez indirgenmiş ölçü planı üzerinde, her bir durulan noktadaki yatay doğrultu ve düşey açı gözlemleri kümesi için tek bir grup ağırlık bilinmeyenini öngörülmüştür.

. İndirgenmiş ölçme planı ve ölçü duyarlıkları irdelendiğinde:

- Duyarlıklar irdelendiğinde; kısa kenarlı deformasyon izleme noktaları arasındaki yükseklik farkları ve eğik uzunluklara ilişkin duyarlıkların oldukça yüksek oldukları gözlenmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak; doğrultu ve düşey açı gözlemlerinin amaç fonksiyona katkılarının da çok az olabileceğini söyleyebiliriz.

- Öte yandan, özellikle dizi şeklinde birbirlerine bağlanmak zorunda kalınan deformasyon izleme noktalarındaki doğrultu gözlemleri ile çok kısa kenarlı bu noktalar arasındaki yükseklik farkı gözlemleri de oldukça zayıf denetlenebilir bir düzeydedir.

- Bu durumda söz konusu ölçüler için ek gözlemlerin planlanması zorunludur. Bu amaçla, optimizasyon işleminin birinci adımında ulaşılan ölçme planı ve ağırlık dağılımının kullanılması uygun görülmüştür. Söz konusu ölçme planı 87 yatay doğrultu, yedi düşey açı, 28 eğik uzunluk ve 38 yükseklik farkından oluşmaktadır (şekil-1).

Bu aşamada Ölçü duyarlıklarının dağılımı incelendiğinde:

- Yatay doğrultu ve düşey açı gözlemlerine ilişkin elde edilen ağırlıkların, diğer gözlemlere göre çok düşük düzeyde kaldıkları gözlenmektedir. Bu anlamda amaç fonksiyonuna katkıları da sınırlı olabilen söz konusu gözlemlerin duyarlıkları arasındaki farklar da önemsiz bir düzeyde kalmaktadır. Buradan hareketle, ulaşılan ölçü duyarlıklarının ortalama değerleri; birim ölçünün ortalama hatasının öncül değerinin $s_0 \cong m_r = \pm 5^{\circ}$ olarak ön görülmesi durumunda, düşey açılarda $m_z = \pm 3.5^{\circ}$, eğik uzunluklarda $m_d = 5 \text{ mm} + 5 \text{ mm} \cdot s_{km}$ ve yükseklik farklarında $m_{\Delta h} = \pm 1.6 \text{ mm} \sqrt{S} \text{ km}$ olarak elde edilmiştir

- Yatay doğrultu ve yükseklik farkları, amaç fonksiyonundan beklenen isteklere ulaşılma yönünden, birbirlerini tamamlayıcı niteliktedirler.

- Uzunluk ölçüleri, özellikle deformasyon izleme noktaları arasında geometrik şekli güçlendirme görevi üstlenmektedir. Öte yandan kontrol noktaları ile sınırlı bağlantılar olan yerlerde uzunluk ölçüleri yoğunluktadır.

- Ağın geometrik şeklinin uygun olmayışı, kendisini özellikle maden sahasının sırt yüzeyi boyunca seçilen dizi noktalarında planlanan ölçülerin güvenilirliklerinde

göstermektedir. 4, 5 ve 6 numaralı noktalar arasındaki yatay doğrultuların güvenilirlik ölçütleri, sınır değerlerini zorlamaktadır. Çok kısa kenarlı 2, 3 ve 4 numaralı noktalarda ise yükseklik farklarının denetimi çok zayıftır.

. Ağda ulaşılan konuma doğrultuya bağlı duyarlıklar incelendiğinde;

1. Özdeğerlerden en büyüğünün en küçüğüne oranı ($\lambda_{\max} / \lambda_{\min}$),
 - Birinci dereceden hareket beklenen bölgedeki 10, 11 ve 12 numaralı deformasyon izleme noktalarında 1.3 ve 1.8 arasında,
 - İkinci dereceden hareket beklenen bölgedeki 5, 6 ve 7 numaralı deformasyon izleme noktalarında 1.3 ve 2.3 arasında,
 - Hareket beklenmeyen dış kuşak noktalarında ise 7 ve 13 aralığında değerler almaktadır.

2. Özdeğerlerin dağılımı, hareket beklenmeyen bölgeye ve kontrol noktalarına gidildikçe, ağın geometrik yapısının bir sonucu olarak bozulmakta, en uzak noktadaki 83 numaralı kontrol noktasında $\lambda_{\max}^{83} = 0.42$ olarak elde edilmiştir.

Deformasyon izleme noktalarının kısa kenarlı olması ve amaç fonksiyonun da yapısının bir sonucu olarak, özdeğerler 0 ve 1 aralığında yığılma göstermektedir.

3. Bağlı hata elipsoidinin yarı eksenleri (A_H , B_H , C_H) ile kuramsal güven elipsoidlerinin yarı eksenlerinin (A_{KH} , B_{KH} , C_{KH}) en büyük değerleri:

- Birinci dereceden hareket beklenen bölgede; $A_H = 0.29$, $B_H = 0.17$, $C_H = 0.22$ [cm]
 $A_{KH} = 0.28$, $B_{KH} = 0.30$, $C_{KH} = 0.66$ [cm]
- İkinci dereceden hareket beklenen bölgede; $A_H = 0.28$, $B_H = 0.11$, $C_H = 0.29$ [cm]
 $A_{KH} = 0.24$, $B_{KH} = 0.27$, $C_{KH} = 0.50$ [cm]
- Hareket beklenmeyen bölgede; $A_H = 0.45$, $B_H = 0.26$, $C_H = 0.38$ [cm]
 $A_{KH} = 0.68$, $B_{KH} = 0.91$, $C_{KH} = 1.07$ [cm]
- 83 numaralı kontrol noktasında; $A_H = 0.93$, $B_H = 0.17$, $C_H = 0.25$ [cm]
 $A_{KH} = 2.12$, $B_{KH} = 0.20$, $C_{KH} = 0.17$ [cm]

değerlerine ulaşılmıştır.

4. Hata elipsoidleri arasındaki büyüklük ilişkisi, ağın tümü için; $B_H > C_H > A_H$ sırasındadır.

5. Birim ölçünün ortalama hatasının $S_o = 5^\infty$ olarak öngörüldüğü bu ağda, optimizasyon sonucunda varyans ölçütü iz $\{K_{xx}\} = 5.25$ cm olarak elde edilmiştir.

. Her ne kadar ağın geometrik yapısı sorunluysa da; ulaşılan sonuçlar kısa kenarlı izleme noktalarından oluşan bir deformasyon ağı için yeterli düzeydedir. Bunun yanında, kullanılması öngörülen ölçü araçlarına ilişkin doğruluklar da, bu istekleri daha iyi bir düzeyde karşılayacak niteliktedirler.

İndirgenmiş Ölçme Planının İyileştirilmesi: Tasarlanan ölçme planında, ölçülerin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılan elektronik teodolitler; her bir ölçme oturumunda aynı anda yatay doğrultu, düşey açı, eğik uzunluk ve yükseklik farkları gözlemlerini yapma olanağını sunmaktadır. Bu durumda, indirgenmiş ölçme planında söz konusu gözlemlerden bazılarının yapılmaması öngörülyorsa da, ölçme oturumu sırasında ölçü türlerinin tümünün gerçekleştirilmesinde herhangi bir emek ve zaman kaybı söz konusu değildir. Ayrıca, bu gözlemlerin yapılmasıyla, özellikle çok yetersiz denetlenebilen gözlem bağlantıları da iyileştirileceğinden, ağın kalitesi de artırılmış olacaktır.

Öte yandan, iyileştirilmiş ölçme planından yararlanarak gerçek ölçülerle gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda, birim ölçünün ortalama hatasının soncul değeri $m_0 = \pm 5''$ elde edilmiştir. Bu durumda eğik uzunlukların duyarlılığı $m_d = 5 \text{ mm} + 3 \text{ mm} \cdot s_{km}$ ve yükseklik farkların duyarlılığı da $m_{\Delta h} = \pm 1 \text{ mm} \sqrt{S} \text{ km}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, ağırlık optimizasyonu işlemi sonucunda önerilen duyarlıklardan daha iyidir. Ayrıca noktalara ilişkin mutlak ve bağıl hata elipsoidleri de ağırlık optimizasyonu ile ulaşılan ölçme planının elipsoidlerinden biraz daha küçük ve daha yüksek duyarlılıkta elde edilmiştir.

Sonuç olarak iyileştirilmiş ölçme planı, 115 yatay doğrultu, 7 düşey açı, 56 eğik uzunluk ve 61 yükseklik farkından oluşmaktadır. Gerçek ölçülerle ulaşılan duyarlıklar yardımıyla maden sahası ve çevresinde beklenen yüzey hareketleri, güvenilir bir biçimde izlenebilir (şekil-2).

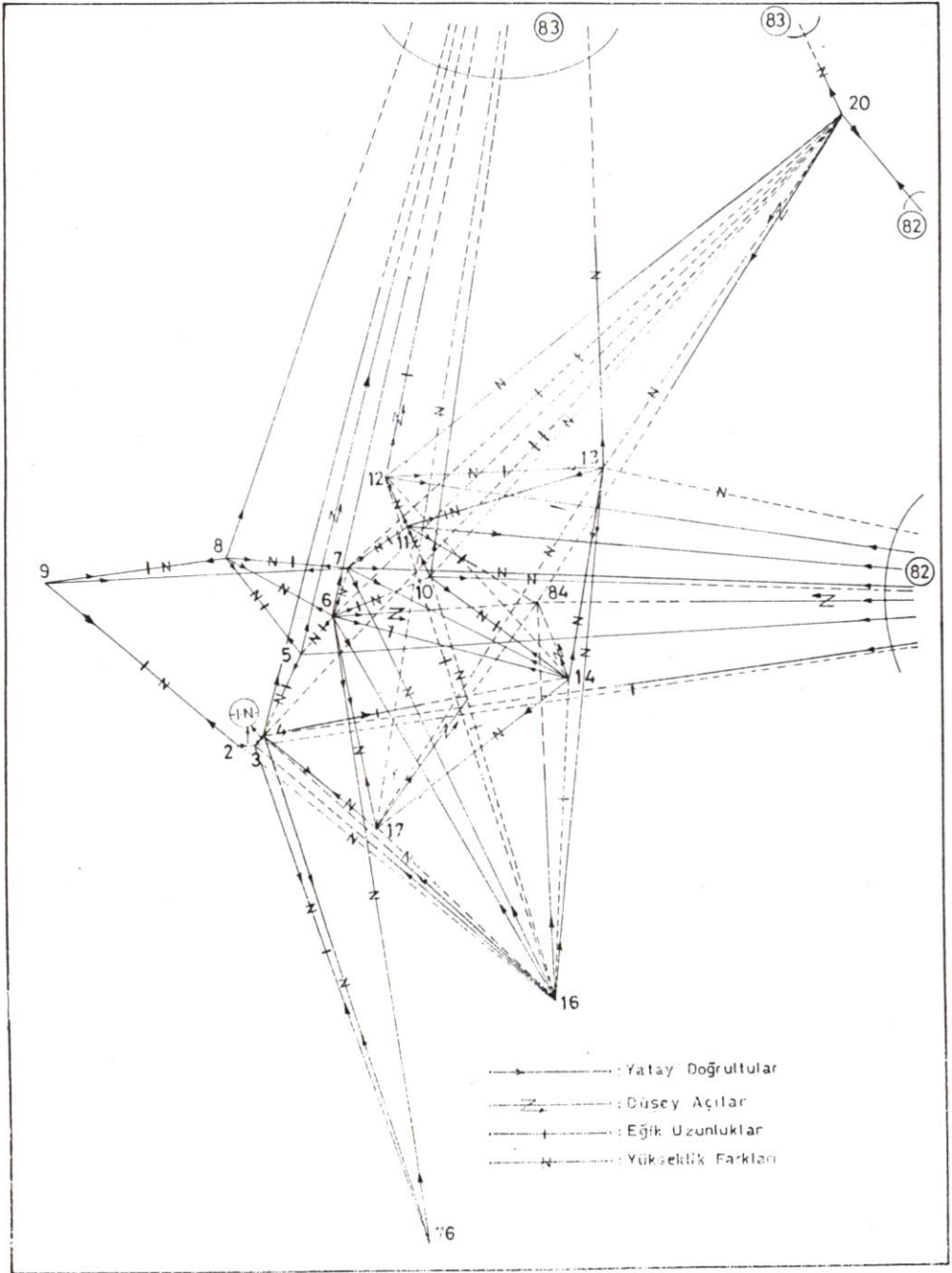
4. SONUÇ

Yer altıdan cevher çıkarılması sonucunda; maden sahası ve çevresinde beklenen olası yüzey hareketlerinin izlenebilmesi amacıyla kurulan deformasyon ağlarının, duyarlık ve güvenilirlik yönünden yeterli kalitede olmaları zorunludur.

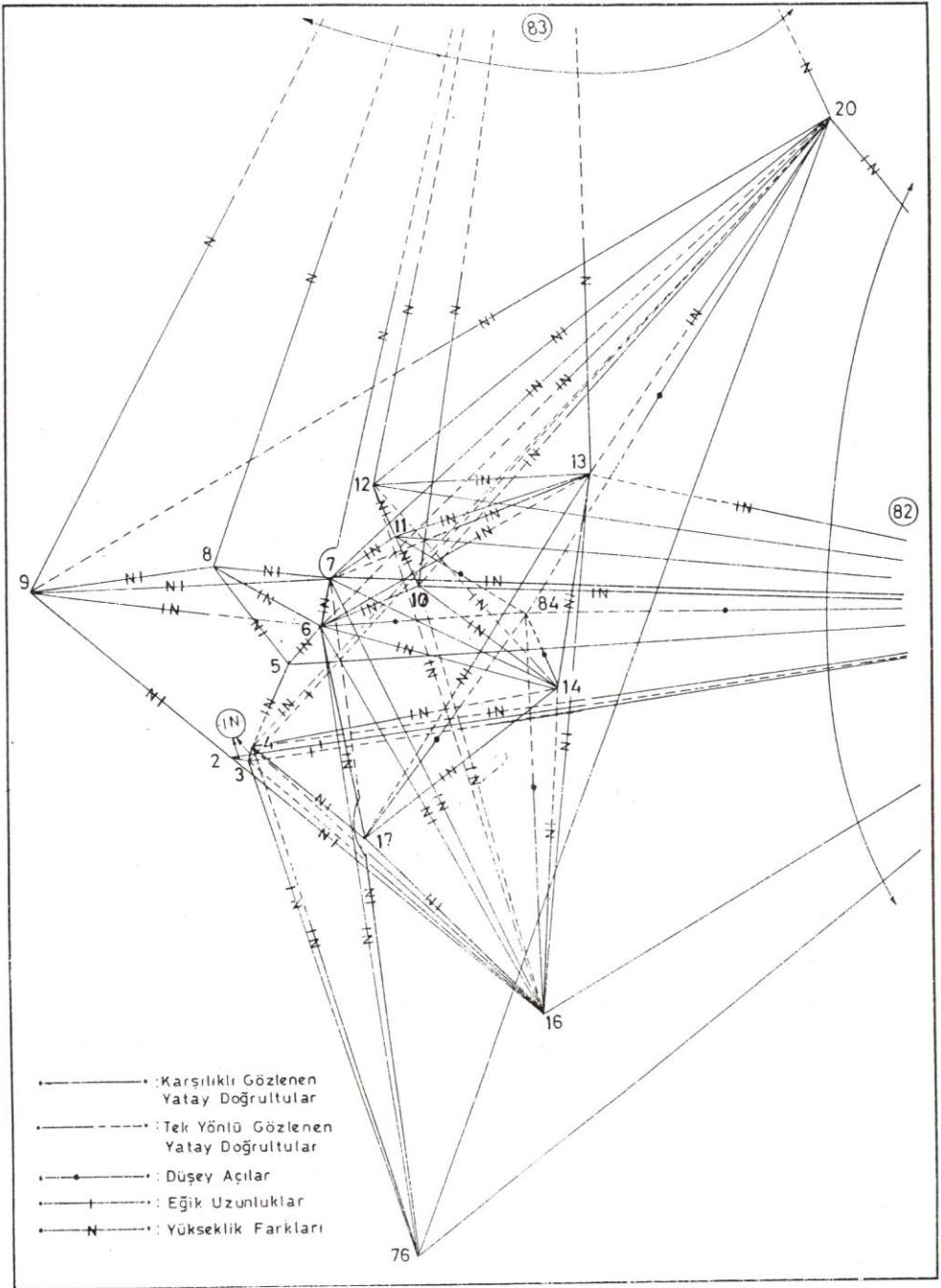
Maden sahalarının işletildiği bölgelerdeki arazi yapısı gereği, tasarlanan deformasyon ağının geometrik şekli ve ölçme planı çoğunlukla sorunlu bir yapıda oluşur. Bu durumun bir sonucu olarak; analitik yöntemle gerçekleştirilen bir ağırlık optimizasyonu işlemi sonucunda, ilk adımda bazı gözlemlerin güvenilirlikleri yetersiz kalabilir. Bu amaçla ağın sorunlu noktalarında ek gözlemler planlanır. Öte yandan, günümüzde bir çok jeodezik amaçlı ölçme araçları, her bir ölçme oturumunda aynı anda bir çok gözlem yapma olanağı sunmaktadır. Bu durumda, özellikle iyileştirilmesi planlanan gözlem bağlantılarında söz konusu gözlemler topluca gerçekleştirilerek, ağın kalitesi artırılır. Emek ve zaman kaybı söz konusu olmayan bu işlemler sonucunda, ele alınan deformasyon ağı, kendilerinden beklenen işlevleri karşılayacak şekilde geliştirilir ve iyileştirilir.

KAYNAKLAR

- /1/ Atasoy, V., 1989, Üç Boyutlu Ağlarla Yerkabuğu Hareketlerinin İrdelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, FBE, Trabzon.
- /2/ Grafarend, E., vd. 1979, Optimierung Geodätischer Messoperationen, Band II, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- /3/ Ilner, M. 1986, Analge und Optimierung von Verdichtungsnetzen, DGK Reihe C, 317, München.
- /4/ Konak, H., 1994, Yüzey Ağlarının Optimizasyonu, Doktora Tezi, KTÜ, FBE, Trabzon.
- /5/ Öztürk, E., 1987, Jeodezik Ağlarda Güven Ölçütleri ve Ölçme Planının Enuygunlaştırılması, Doçentlik Tezi, KTÜ, YBF Yayınları:39, Trabzon.
- /6/ Öztürk, E. – Şerbetçi, M., Dengeleme Hesabı, Cilt III, KTÜ yayınları 144, Trabzon.
- /7/ Ralf, B., 1984, Eine Strategie zur Ausleichung und Analyse von Verdichtungsnetzen, DGK Reihe C, 295, München.
- /8/ Schmitt, G., 1980, Zur Gewichtsoptimierung in Richtungsnetzen, Beitrage zum VIII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Ingenieurvermessung 80, s:1-11, Zürich.
- /9/ Schmitt, G., 1984, Third Order Design, 3rd Course of the International School of Advanced Geodesy, Optimisation and Design of Geodetic Networks, s:74-121.
- /10/ Wimmer, H., 1981, Ein Beitrag zur Gewichtsoptimierung geodätischer Netze, DGK Reihe C, 269, München.



Şekil 1. Ağırlık Optimizasyonu Sonucu İndirgenmiş Madenli Deformasyon Ağı



Şekil 2. Ölçme Planı İyileştirilmiş Madenli Deformasyon Ağı