

# YAPISAL DEFORMASYON VE HAREKETLERİN ARAŞTIRILMASINDA FOTOGRAFETRİK YÖNTEMLER

Doç. Dr. Hüseyin Gazi Baş  
İ.T.Ü.

## 1. GİRİŞ

Büyük mühendislik projelerinin çoğunun önemli bir özelliği, yapının tamamlanmasından sonra ortaya çıkacak yapısal davranışların kontrol ve gözlenmesi için gerekli alet sistemlerini de içermeleridir. Geçmişte değişik ülkelerde yaşayan ve hem insan hem de ekonomik olarak çok büyük kayıplara sebep olan üzücü olaylar, büyük mühendislik yapılarıyla birlikte heyelan bölgeleri ve büyük kazı alanları gibi yerlerde de belirli aralıklarla kontrol ölçmelerinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Yerdeğiştirmeler, deformasyonlar ve diğer yapısal hareketlere kuvvet, yük, basınç, iklim şartları vb. etkin faktörler sebep olur. Bu hareketler zaman ve uzay bazındaki koordinat ölçmeleri ile ortaya çıkarılırlar. Bunlardan elde edilen sonuçlara göre:

- Yapı sağlamdır, sonuç olarak emniyetlidir.
- Yapıda ileri-geri veya değişik istikametlerde hareket veya zemine doğru çökme vardır.
- Yapı iklim şartlarının sebep olduğu lokal deformasyona maruzdur.
- Hareketler zamanın bir fonksiyonu olarak artmaktadır, dolayısıyla istenmeyen sonuçlar doğmadan yapı denetim altına alınmalıdır. /1/.

Kısaca birtakım tedbirler alınmalıdır veya tedbir alınmasına gerek yoktur sonucuna varılır.

Bu çalışmada, yapısal deformasyon ve hareketlerin araştırılmasında kullanılan fotogrametrik yöntemler tanıtılmakta, ayrıca bugüne kadar yapılan uygulamaların ışığı altında diğer yöntemlerle hız, doğruluk ve ekonomi noktasından kısa karşılaştırmalar yapılmaktadır.

## 2. DEFORMASYON ÖLÇME TEKNİKLERİ

Yapısal hareket ve deformasyonların araştırılmasında kullanılan mevcut yöntemler fiziksel yöntemler ve harici (external) yöntemler olarak iki temel gruba ayrılabilir /2/.

### *Fiziksel Yöntemler:*

Extensometre, inklinometre ve strengyeç gibi fiziksel ölçme aletlerinin ortak özellikleri genelde bir, bazı durumlarda da ancak iki boyutlu bilgileri sağlayabilmeleri ve ilgili yapıya inşa safhasında yerleştirilmelerinin gerekli oluşudur. Bununla beraber bu tür aletler, dikkatli bir düzenleme ile, yapının üç boyutlu hareketlerinin gözlenmesi için de nadiren kullanılabilir /3/. Ancak bu cihazların korunmaları oldukça pahalı ve sağladıkları verilerin yorumlanması da oldukça

zordur.

### *Harici (External) Yöntemler:*

Yukarıda sözkonusu edilen dezavantajları nedeniyle, fiziksel ölçme sistemlerinin harici yöntemlerle desteklenmesi gerekir veya yerini tamamen harici yöntemlere bırakmalıdır. Harici yöntemler fiziksel ölçmelerle birleştiğinde, yapı içindeki elastik ve plastik deformasyonlar dahil yapının tüm davranışları hakkında bilgi sağlanabilir / 2/. Bunun sonucu muhtemel zaafiyetler zamanında tesbit edilerek gerekli tedbirlerin alınmasına da imkan doğacaktır.

Bir yapısal hareketin harici ölçmelerle belirlenmesi için temel iki yöntem sözkonusudur.

1. Jeodezik yöntemler,
2. Fotoğrametrik yöntemler.

Jeodezik yöntemler bu çalışmanın kapsamı dışında olduğundan burada doğrudan fotoğrametrik yöntemler tanıtılacaktır.

## **3. FOTOGRAMETRİK YÖNTEMLER**

Fotoğrametrik amaçla elde edilen bir resim veya resim çiftinin değerlendirilmesinde çizgisel değerlendirmeyi esas alan "Analog" yöntem ve nokta nokta değerlendirmeyi esas alan "Analitik" yöntem olmak üzere iki temel yöntem sözkonusudur.

Analog yöntemde, kullanılan aletlerin birtakım optik ve mekanik sınırlamaları içermeleri yöntemin fleksibilitisini azaltmaktadır. Buna rağmen yöntem birçok mühendislik ölçmesi uygulamasında /4/, /5/ başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak bu tür uygulamaların çok presizyonlu sonuçları gerektirmesi dolayısıyla bugün yerini analitik yönetime bırakmıştır.

Yapısal deformasyon ve hareketlerin analitik yöntemle çözümü problemlerin tabiatına bağlı olarak ve ulaşılmaması istenen incelik de dikkate alınarak durumdan duruma değişir.

### **3.1. Zaman Bazı veya False Paralaks Yöntemi**

Bu yöntemde temel veri, aynı durak noktadan aynı şartlar altında (aynı iç ve dış yöntem ile) incelenecek yapının farklı zaman aralıklarında çekilen tek resimlerinden elde edilen ve "yalancı paralaks" olarak adlandırılan paralakslardır.

Cisim uzayındaki yerdeğişirmelerin belirlenmesi için resim çiftleri karşılaştırılır. Birinci periyotta çekilen tek resim, karşılaştırma için yapının referans resmini oluştururken ikinci ve daha sonraki belirli aralıklarla çekilen resimler yapının uzaysal konumunda meydana gelen değişimleri gösterir. Yapının tama mındaki veya seçilen bir parçasındaki deformasyon, sonlu sayıda cisim noktasının uzay koordinat farklarından elde edilir. Resimler, ilgili yapının deformasyon düzlemine tam paralel bir düzlem içinde çekilirler. İncelenecek resim düzlemleri, herbir resmin iç ve dış yöneltme elemanlarının aynı kaldığı durumlarda, aynı ortak ölçükle indirgenmiş



veya

$$\Delta X = m_s \cdot p \quad (3.3a)$$

$$\Delta Y = m_s \cdot q \quad (3.3b)$$

ile ilgili noktalara ait deformasyon miktarları belirlenir. Burada

$\Delta X$ =deformasyonun yatay bileşeni

$\Delta Y$ =deformasyonun düşey bileşeni

$m_s$ =resim ölçek sayısı

$p$ =yatay paralaks

$q$ =düşey paralaks

$f$ =ayarlanmış odak uzunluğu

$$Z = D_3 \cdot (X - X_0 \quad Y - Y_0 \quad Z - Z_0)^T$$

$D_3 = (c_1 \quad c_2 \quad c_3)$  ortogonal dönme matrisi elemanlarıdır. Ortogonal dönme

matrisi elemanları daha önce belirlenmiş veya sabit olan dış yönelmenin açısız elemanları yardımıyla;  $X, Y, Z$  ile gösterilen ilgili deformasyon noktasının koordinatları da yaklaşık olarak stereofotogrametrinin normal durumuna ait eşitlikler kullanılarak belirlenir.

*Yöntemin Pratik Uygulamaları:* Yöntem, Galetto /13/ tarafından yapısal modellerin incelenmesinde kullanıldı. Dauphin ve Torlegard /14/ bir yeraltı maden ocağının tavan ve duvarlarında zamana bağlı olarak meydana gelen yerdeğiştirmelerin araştırılmasında aynı yöntemi kullanmış, ulaşılan doğruluk karesel ortalama hata ifadesiyle  $DX$  için 0.5 mm. ve  $DY$  için 1.3 mm. olarak bulunmuştur. Florek /15/ de, rüzgarın etkisi altındaki çelik aydınlatma direklerinin (uzunluğu 58.0 m.) titi resimlerinin incelenmesinde "zaman bazı" yöntemini kullanmış olup, elde edilen doğruluk resim ölçeğinde 9 mikron veya resim çekme uzaklığının 1/28 000 dir. Smidrkal de çalışmasında /16/ çelik konstrüksiyon gövdeli bir köprünün statik yük testlerini gerçekleştirmek amacıyla foto-teodolit kullanarak çekilen resimleri "zaman bazı" yöntemi yardımıyla değerlendirmiş ve  $X$ - ve  $Y$ - eksenleri doğrultusundaki paralaksları sırasıyla  $\pm 10$  mm ve  $\pm 17$  mm. lik ortalama hata ile elde etmiştir. Benzer bir araştırma Porter ve Burns /3/ tarafından dört ayrı köprünün dinamik yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla yapılmış olup ulaşılan doğruluk resim ölçeğinde ve karesel ortalama değer olarak  $X$ - eksenini doğrultusunda 4 mikron ile 18 mikron,  $Y$ - eksenini doğrultusunda ise 4 mikron ile 9 mikron arasında değişmektedir.

Söz konusu yöntemde stereofotogrametrinin normal durumuna göre çekilmiş resimler ve basitleştirilmiş hesap teknikleri kullanılmaktadır. Buna rağmen geçmişte tatminkar sonuçlar vermiştir. Ancak yapısal hareketi iki boyutlu olarak vermesi, genel uygulamalar için yöntemin bir dezavantajıdır.

### 3.2. Uzay Bazı Yöntemi

Deformasyon ve hareketlerin üçboyutlu olarak ölçülüp incelenebilmesi için herbir periyotta birden fazla resim çekme durağından yani bir bazın iki ucundan çekilen ve birbirini belirli oranlarda örten resimler kullanılır. Deformasyonlar ya farklı tarihlerde hesaplanan uzaysal konumlar arasındaki farklar olarak veya doğrudan resim çekme zamanları arasında konumda oluşan izafi değişimler olarak, iki şekilde belirlenir. Resim çekme için kullanılacak makineler stereo resim çekme makineleri de olabilir. Değerlendirme için kullanılacak yaklaşımlar ise stereofotogrametrinin normal durumu ile ilgili basit denklemlerden /6/, /7/ demet dengelemesi vb. gelişmiş hesap tekniklerine /8/ kadar uzanmaktadır.

Bu yöntemin, resim çekme aşamasından ölçmelerin değerlendirilmesine kadar tüm safhaları ve farklı uygulama alanlarındaki kullanım tarzı aşağıda adı geçen çalışmalarda ayrıntılı olarak bulunabilir.

#### *Yöntemin Pratik Uygulamaları:*

Brandenberger /2/, /19/, /20/ esas itibariyle barajların deformasyonlarını araştırdığı çalışmalarında, her defasında yapı üzerindeki deformasyon noktalarının mutlak konumlarını belirlemiş, son çalışmasında ise hava fotogrametrisi yöntemiyle elde ettiği resimlerden çıkardığı sayısal veriler kullanılmıştır. İlk iki çalışmada elde edilen doğruluk resim çekme uzaklığının 1/15 000 iken, son çalışmada, iki ayrı resim çekme periyodu için, resim ölçeğinde 1/3 000 lik bir doğruluğa karşılık gelen + 7 mikron ve + 4 mikron elde etmiştir. Erlandson ve Veress /2/, /21/ de herbir periyotta deformasyon noktalarının mutlak konumlarını tesbit etmişler ve oransal olarak 1/100 000 doğruluğuna ulaşmışlardır. Değerlendirme aşamasında ise Vektör yöntemi ile klasik ardışık çözüm, fotogrametrik geriden ve ileriden kestirme, yöntemini kullanmışlardır. Veress başka bir araştırma projesi çalışmasında /22/ benzer şekilde Vektör yöntemini kullanmış sonuç olarak 1/50 000 - 1/140 000 lik bir oransal prezisyona ulaşmıştır. Bu projelerde ulaşılan doğrulukta modifiye Wild BC-4 Balistik makinesi ile Wild P30 fototeodoliti kullanılmasının ayrı bir rolü sözkonusudur. Veress başka bir deformasyon araştırma projesinde /23/ yersel ve hava fotogrametrisinin kombinasyonuna dayanan bir yöntemi kullanmış ve doğrulukta, sadece yersel fotogrametrisinin kullanılması durumuna göre % 30'luk bir artış sağlanmıştır. Buna göre ulaşılan doğruluk resim çekme uzaklığının 1/120 000 i olarak bulunmuştur. Bir tünel açma çalışmasının çevre binalar üzerindeki etkisi West, Heath ve McCaul /24/ tarafından gene uzay bazı yöntemi esasına göre gözlenmiş, ayrıca jeodezik ölçme yöntemiyle de sonuçlar irdelenmiştir. Altan /25/ tarafından yapılan ve deformasyon ölçmelerinde fotogrametrik yöntemlerin prezisyonunun araştırılmasını konu alan bir çalışmada da cisim noktalarının üç koordinat eksenine doğrultusundaki ötelenmeleri uzay bazı esasına göre ve demet dengeleme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada bir cisim üzerinde 0.10 mm. prezisyonla deformasyon ölçme işleminin yapılabilirdiği, ayrıca resim çekme doğrultusunda da resim çekme uzaklığının % 00.4 üne varan prezisyona erişilebileceği ortaya konmuştur.

#### 4. KARŞILAŞTIRMA

Bugüne kadar yapılan araştırmaların ışığı altında, yapısal deformasyon ve hareketlerin gözlenmesinde, fotogrametrik yöntemlerle diğer yöntemler arasında karşılaştırma yaparken şunlar söylenebilir.

1. Fotogrametrik yöntem, uzak bir mesafeden, çok sayıda noktanın aynı anda tesbitine imkan sağlar. Dolayısıyla jeodezik yöntemden farklı olarak, ilgili yapı hem inşai anında hem de inşайдan sonra gözlenebilir.

2. Bu yöntemle bir noktanın konumu üçboyutlu uzayda, belirli bir anda presizyonlu olarak belirlenebilir. Böylece yapısal analizler için gerekli veriler homojen bir sistemde ve kolayca elde edilebilir.

3. Fotogrametrik yöntem, klasik yöntemle karşılaştırıldığında, gözlenen yapıdan bağımsızdır.

4. Jeodezik ölçme yönteminde harcanan zaman ve maliyet, gözlenen nokta sayısı ile oldukça bağımlıdır. Yapı üzerinde ölçülecek nokta sayısı arttıkça maliyet de artmaktadır. Çok kesin karşılaştırma yapılamamakla birlikte, yapı üzerinde gözlenen nokta sayısı 10-20 arasında değiştiğinde fotogrametrik yöntemin maliyeti jeodezik yöntemin yaklaşık olarak yarısı kadar olmakta; nokta sayısı arttıkça da klasik yöntemin tersine, fotogrametrik yöntem daha avantajlı duruma geçmektedir. Nokta sayısı 5 civarında olduğunda ise her iki yöntem maliyet açısından eşitlenmektedir /21/. Karşılaştırmaya zaman noktasından bakıldığında da durumun yapı üzerindeki deformasyon noktası sayısı ile bağımlı olduğu görülmektedir. Örneğin, dört veya beş resim çekme durağından elde edilecek resimlerle tamamıyla görüntülenebilecek ve üzerinde 50 adet deformasyon noktası bulunan bir yapı gözönüne alınsın. Bu yapının jeodezik yöntemle arazi ölçmeleri 8-14 gün arasında tamamlanabilirken, aynı yapının fotogrametrik yöntemle ölçümü dört gün içinde belirtilebilmektedir. Ayrıca verilerin değerlendirilmesi aşamasında her iki yöntem arasında fark olmadığı belirtilmektedir /2/ /26/.

5. Yukarıda belirtilen, jeodezik yöntemdeki, iki haftalık ölçme süresi içinde belirli bir deformasyon vaki olabileceği halde, fotogrametrik yöntemde resimlerin çekimi sadece bir günde yapılabilmektedir. Yani arazi ölçmeleri esnasında deformasyon oluşması ihtimali hemen hemen sıfırdır.

#### 5. SONUÇ

İnsan unsuru, ekonomi ve tabii kaynakların zarar görmemesi için, büyük mühendislik yapılarının zaman içindeki davranışlarının periyodik olarak kontrolü gerekir. Değişik ölçme ve değerlendirme yöntemleri arasında analitik fotogrametri yöntemi presizyonlu yapısal ölçmeler için oldukça elverişli bir yöntemdir. Ancak yöntemler arasında tercih yapacak mühendisin özellikle fotogrametrik ve jeodezik ölçme yöntemlerinin her ikisinde iyi tanınması ve zaman, ekonomi ve doğruluk faktörlerini dikkate alarak probleminin hangi yöntemle çözülebileceğine karar vermesi gerekir.

Sonuç olarak şunu da söylemek gerekir ki, bu tür kontrol ölçmelerinin sıhhatli

ve ekonomik yapılabilmesi için gerekli durak noktası, deformasyon ölçme noktaları vb. özel donanımların yapıya daha inşa safhasında ve kullanılacak ölçme yöntemlerinin istediği spesifikasyonlarla yerleştirilmeleri ve tesisi gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- /1/ **Brandenberger, A.J.**, Deformations of Power Dams, Photogrammetric Engineering V.40, n.9, pp.1051-1058, 1974.
- /2/ **Erlanson, J.P., Vress, S.A.**, Monitoring Deformations of Structures, Photogrammetric and Remote Sensing, V.41,n.11,pp. 1375-84, 1975
- /3/ **Porter, J.R. Burns, A.**, Applications of Terrestrial Photogrammetry For Road Design and Maintenance, Australian Transport, Act Project, 1978.
- /4/ **Chisholm, N.W.T.**, Photogrammetry For Cooling Tower Shape Surveys, Photogrammetric Record, 9(50), 173-191, 1977.
- /5/ **Chisholm, N.W.T.**, Close range Photogrammetry-two contrasting Industrial Applications, International Archives of Photogrammetry, 22(5), 80-6, 1978.
- /6/ **Altan, M.O.**, Fotogrametrik Deformasyon Ölçmelerinde Zaman Bazı ve Reel Uzay Bazı Yöntemleri, İTÜD, C.40, S.2, 1981.
- /7/ **Baş, H.G.**, İç ve Dış Yönelme Elemanlarının Bilinmesi Durumunda Uzay Kestirme Problemlerinin Çözümü ve Yersel Fotogrametride Uygulama Olanaklarının Araştırılması, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.SMF., 1985.
- /8/ **Gosh, S.K.**, Analytical Photogrammetry, Pergamon Press Inc., USA., 1979.
- /9/ **Baş, H.C.**, Yönelme Hataları Nedeniyle Resim Koordinatlarının Düzeltilmesi için bir Matematik Model, İTÜD, C.46, S.1-2, 1988.
- /10/ **Scott, P.C.**, Structural Deformation Measurement of A Model Box Girder Bridge, Photogrammetric Record, 9(51), 361-376, 1978.
- /11/ **Krauss, K.**, Film Deformation Correction with least Square Interpolation, Photogrammetric Engineering and Remote sensing, 1972.
- /12/ **Krauss, K., Mikhail, E.M.**, Linear Least-Square Interpolation, Photogrammetric Engineering, 1972.
- /13/ **Galetto, R.**, A Photogrammetric Method for Assessing the Displacement under Stress of Large Structure Models (theory), International Archives of Photogrammetry, 27(10), 1969.
- /14/ **Dauphin, E., Torlegard, K.**, Displacement and Deformation Measurement over Longer Periods of Time, Photogrammetria, 33(1977), 225-239.
- /15/ **Florek, R.**, Photogrammetric Investigations of High-speed Deformations, Proceedings I.S.P., Com.V, Helsinki Congress, 1976.
- /16/ **Smidrkal, J.**, Photogrammetric Deformation Measurements on the Vitava Bridge near Zdakov/CSSR, Jena Riew, 1968(13), 2, pp.121-125.
- /17/ **Tüdeş, T.**, Baraj Deformasyonlarının Jeodezik ve Fotogrametrik Metodlarla Ölçülmesi ve Keban Barajı Örneği, KTÜ Yer Bilimleri Fak., 1982.

/18/ Altan, M.O., Mühendislik Fotogrametrisi Kavramı ve Deformasyonların Fotogrametrik Yöntemlerle Ölçümlerinde Kullanılabilecek bir Matematik Model, İTÜD. C.37, n.4, 1980.

/19/ Brandenberger, A.J., Erez, M.T., Photogrammetric Determinations of Displacements and Deformations in Large Engineering Structures, Canadian Surveyor, June 1972.

/20/ Brandenberger, A.J., Gosh, S.K., Bougouss, M., Deformation Measurements of Power Dams with Aerial Photogrammetry, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, V.49, n.11, pp.1561-1567, 1983.

/21/ Erlandson, J.P., Veress, S.A., Contemporary Problems in Terrestrial Photogrammetry, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, V.40, n.9, pp. 1079-1085, 1974.

/22/ Veress, S.A., Sun, L.L., Photogrammetric Monitoring of a Gabion Wall, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, V.44, n.2, pp.205-211, 1978.

/23/ Veress, S.A., Hatzopoulos, J.N., Monitoring by Aerial and Terrestrial Photogrammetry, Final Technical Report, U.S. Department of Transportation, 1979.

/24/ West, G., Heath, W.G., McCaul, C., Measurements of the Effects of Tunneling at York Way, London, Ground Engineering, Jul 1981, pp.45-53.

/25/ Altan, M.O., Deformasyon Ölçmelerinde Fotogrametrik Yöntemlerin Presizyonununun Araştırılması, TUFUAB Komisyon Toplantıları, Ankara, 1985.

/26/ Erez, M.T., Analytical Terrestrial Photogrammetry Applied to the Measurement of Deformations IN Large Engineering Structure, Dissertation, University of Laval, 1971.