

FOTOGRAMETRİK NİRENGİ ÖLÇÜM VE DENGELEME YÖNTEMLERİ

Mahmut ÖZBALMUMCU

ÖZET

Harita üretiminde arazi çalışmalarında karşılaşılan zorluklar, fotogrametri ile aşılmış durumdadır. Fotogrametrik yöntemle harita üretiminde kontrol noktalarına olan gereksinim nedeniyle, fotogrametrik nirengi yöntemleri büyük önem kazanmıştır. Fotogrametrik nirengi yöntemi ile az sayıda kontrol noktasına dayanarak elde edilen noktaların doğrulukları, kullanılan dengeleme yöntemine bağlı kalmaktadır. Bu nedenle fotogrametrik alet ve yöntemlerde olduğu gibi fotogrametrik nirengi ölçüm ve dengeleme yöntemlerinde de çok önemli gelişmeler olmuştur.

Hava fotogrametrisinde her bir modelin kıymetlendirilebilmesi için, en az üç adet yer kontrol noktasına (nirengi) gerek vardır. Fotogrametrik nirengi yöntemi ile stereo modellerin veya resimlerin yöneltme bilgileri ve bütün kolon, model bağlama noktalarının (yeni nokta) arazi koordinat sistemindeki koordinatları elde edilmektedir.

Fotogrametrik nirengi yöntemi, arazide tesisi gerekli olan kontrol noktası sayısını azaltan bir tekniktir.

Önceleri grafik yöntemlerle ve analog aletlerle uygulanan fotogrametrik nirengi ölçümleri, günümüzde yaygın olarak analitik aletlerle yapılmakta, dengeleme için oldukça gelişmiş yazılımlar kullanılmaktadır.

ABSTRACT

In the map production, most difficulties faced during the ground surveying have been eliminated. Aerial triangulation method has played an important role because of the necessity of the control points in the photogrammetric map production process. The accuracy of the obtained points by means of photogrammetric aerotriangulation mainly depends on the adjustment method which is used. That is why photogrammetric aerotriangulation measurements and adjustment methods have been improved in the same way as photogrammetric instruments and methods.

As it well known, it is necessary to use at least 3 ground control points (GCPs) for orienting each stereo model in the aerial triangulation. The orientation parameters of the stereomodels or photographs and the ground coordinates of the tie points (new points) are obtained by means of photogrammetric aerotriangulation method.

Photogrammetric aerotriangulation is a method that reduces control point number which is necessary to establish on the ground.

Photogrammetric aerotriangulation measurements which were carried out by using graphic methods and analog instruments are now being executed by means of analytic instruments and developed adjustment programmes.

1. GİRİŞ

Fotogrametrik nirengi ölçüm ve dengelemesi için geliştirilmiş pek çok yöntem vardır. Bu gelişmeler, kullanılan alet ve bilgisayarların yeteneklerine, günün teknolojik koşullarına bağımlı kalmıştır.

Başlangıçta fotogrametrik nirengi ölçümleri basit grafik ölçüm araçları (stereo template gibi) ve analog aletlerle yapılmış, ölçümlerin dengelenmesinde kolonun temel birim alındığı grafik yöntemler kullanılarak çözümler sağlanmıştır. Ardından yine analog aletlerle yapılan ölçümler, geliştirilen basit matematiksel modellerle (polinomlarla) ve blok oluşturmak suretiyle dengelenmeye başlanmıştır.

Fotogrametrik aletlerin ve bilgisayar olanaklarının hızlı gelişmesi sonucu, fotogrametrik nirengi ölçümleri komparatorlarda ve analitik aletlerde yapılmaya, dengelemenin matematik modeli geliştirilerek bağımsız modellerle ve ışın demetleriyle blok dengeleme yazılımları kullanılmaya başlanmış, ölçülerde yapılan sistematik hataları gidermek üzere geliştirilen ilave parametrelerin de dengelemede kullanılması sağlanmış, ölçülerdeki kaba hataları gidermek için bazı yöntemler geliştirilmiştir.

Bunun yanında, APR ve Statoskop ölçüleri ile deniz veya göl kıyısında bulunan ve yükseklikleri bilinen noktaların model ölçümleri de dengelemeye ilave ölçüler olarak sokulmuş, iç yöneltme elemanları yeteri incelikte bilinmeyen kameraların tam bir kalibrasyonuna olanak sağlayan yazılımlar geliştirilmiştir.

Jeodezik olarak yapılan ölçümlerin (doğrultu, zenit açısı, geometrik nivelman, uzaklık ölçümleri gibi) fotogrametrik ölçülerle birlikte dengelenmesi gerçekleştirilmiş, ancak jeodezik ve fotogrametrik ölçülerin ayrı ayrı dengelenmesinin daha uygun olduğu, birlikte bir çözümün oldukça zor olduğu anlaşılmıştır.

Gelişen GPS yöntemleriyle, hareket halinde uçakta bulunan ve resim çekimi yapan kameranın konum verileri hassas olarak belirlenmeye başlamış, GPS ile elde edilen bu koordinatların dengelemede kullanılması ile arazide tesis edilecek kontrol noktası sayısında büyük bir azalma sağlanmıştır. Kinematik GPS yönteminin fotogrametride kullanımı konusundaki araştırmalar halen devam etmekte, kullanıcı sayısı her geçen gün hızla artmaktadır.

Günümüzde, gelişmekte olan sayısal (Digital) fotogrametri aletlerinde fotogrametrik nirengi uygulaması (otomatik fotogrametrik nirengi) konusunda yoğun araştırmalar devam etmektedir.

Bu yazının amacı; Harita Genel Komutanlığı'nda kullanılan fotogrametrik nirengi ölçüm ve dengeleme yazılımlarından (STRIM-43-P, PATMR ve BINGO) elde edilen sonuçların doğruluklarını inceleyerek karşılaştırmak, blok dengeleme

yazılımlarına sahip analitik aletlerin arızalı olduğu hallerde kullanılan çeşitli kolon dengeleme yöntemlerinin (STRIM-43-P programı ile) doğruluğunu araştırmak, yoğun olarak kullanılan PATMR bağımsız modellerle blok dengeleme programının kullanılmadığı özel durumlarda BINGO self kalibrasyonlu ve ilave parametrelili ışın demetleri blok dengeleme programında karşılaşılan zorlukları ve BINGO ile elde edilen sonuçları ortaya koymaktır.

Yazının diğer bir amacı da, daha önce çeşitli dergi ve makalelerde genellikle her biri ayrı ayrı incelenen fotogrametrik nirengi ölçüm ve dengeleme yöntemlerini birlikte, bir bütünlük içerisinde ele almaktır.

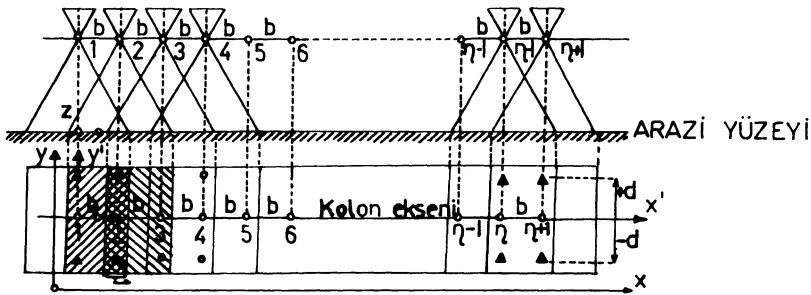
2. FOTOGRAMETRİK NİRENGİ

a. Fotogrametrik Nirengi'nin Tanımı ve Amacı

Fotogrametrik nirengi, havadan ve yerden alınan resimlerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen fotogrametrik nokta belirlemesidir.

Fotogrametrik nirenginin temel amacı, bilinen yer kontrol noktaları yardımıyla, en az iki resimde tanımlanabilen noktaların arazi koordinatlarını, resimler veya modeller üzerinde yapılan koordinat ölçümlerinden hesaplamaktır /17/. Kısacası fotogrametrik nirengi, resimler veya modeller üzerinde yapılan çeşitli ölçümlerle, genelde fotogrametrik çalışmalar için yetersiz sayıda olan kontrol noktalarını sıklaştırmada kullanılan bir tekniktir /9/ (Şekil-1).

Fotogrametrik nirengide kullanılan noktalar: uçuş öncesi işaretlenen kireçli noktalar (yer kontrol noktası), resimlerde seçilen doğal noktalar (belirgin detay köşeleri) ve resimlerde özel aletlerle işaretlenen yapay noktalar (delgi noktaları)'dır /11/.



▲ : Kontrol (Nirengi) Noktaları

o : Bağlama (Fotogrametrik Nirengi) noktaları

Şekil-1: Fotogrametrik nirengi uygulamasının grafik gösterimi

b. Fotogrametrik Nirengi Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Çok çeşitli fotogrametrik nirengi ölçüm yöntemleri mevcut olup (kullanılan alet, hesaplama şekli ve birimine göre), temelde bütün yöntemleri iki bölüme ayırmak mümkündür.

Analog (Grafik, Mekanik) Yöntemler: Analog aletler ve basit grafik aletlerle uygulanan yöntemlerdir.

Analitik (Sayısal, Hesapsal) Yöntemler: Sayısal çıkışlı aletlerle (Analitik aletler ve komparatorlarla) uygulanan yöntemlerdir /9/.

Bu yöntemlere, son zamanlarda gelişmekte olan ve sayısal aletlerde uygulanması tasarlanan otomatik fotogrametrik nirengi yöntemini sayısal yöntem olarak eklemek mümkündür.

Fotogrametrik nirengiyi en ayrıntılı biçimde şöyle sınıflandırmak uygundur:

- (1) Ölçüm yöntemine göre:
 - (a) Analog yöntem,
 - (b) Yarı analitik yöntem,
 - (c) Analitik yöntem.
- (2) Üzerinde ölçmelerin yapıldığı fotogrametri birimi (kolon,model ve resimler) esas alınarak:
 - (a) Kolon dengelemesi,
 - (b) Bağımsız modellerle blok dengeleme (Model),
 - (c) Işın demetleriyle blok dengeleme (Resim).
- (3) Hesaplama düzenleri için kullanılan formüllere göre:
 - (a) Polinom yöntemi,
 - (b) Kolon dengelemesi,
 - (c) Bağımsız modeller yöntemi,
 - (d) Işın demetleri (bundle) yöntemi,
 - (e) GPS destekli blok dengeleme yöntemi,
 - (f) Otomatik fotogrametrik nirengi ve blok dengelemesi.

3. FOTOGRA METRİK NİRENGİ ÖLÇÜM VE DENG ELEME YÖNTEMLERİ

Bu bölümde dört adet dengeleme yöntemi üzerinde durulacaktır:

- a. Kolon dengelemesi (Bağımsız Modellerle),
- b. Polinom dengelemesi (Kolonlarla Blok Dengeleme),
- c. Bağımsız modellerle blok dengeleme (Modellerle),
- d. Işın demetleriyle blok dengeleme (Resimlerle).

a. Kolon Dengelemesi (Bağımsız Modellerle)

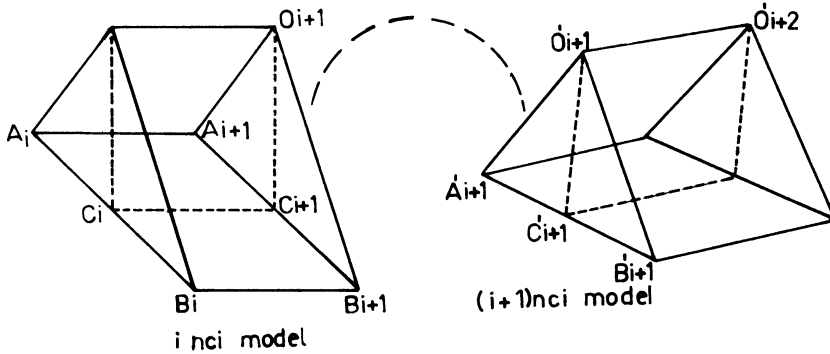
- (1) Genel Bilgiler

Çok çeşitli kolon dengeleme yöntemleri (grafik, polinomlarla ve bağımsız modellerle) olmakla beraber, uygulamada en fazla kullanılanı, bağımsız

modellerle kolon dengelemesidir. Yöntemin temel esası, üç boyutlu uzaysal benzerlik dönüşümü ile, birbirine ardışık olarak bağlanmış modellerin yaklaşık mutlak yöneltilmelerinden ve bilinen kontrol noktası koordinatlarından yararlanarak fotogrametrik yeni noktaların koordinatlarını hesaplamaktır /27/.

Kolon dengelemesi tek aşamalı olarak çözülebileceği gibi (X,Y,Z koordinatlarının aynı anda elde edilmesi), konum (X,Y) ve yükseklikler (Z) ayrı ayrı iki aşamalı olarak da çözülebilir /27/.

Bu yöntemde her bir kolon ayrı ayrı bağımsız olarak dengelenmekte, blok oluşumu söz konusu olmamaktadır. Bağımsız modellerle blok dengelemeden en önemli farkı budur /11/ Şekil-2).



Şekil-2: Kolon Dengelemesinde Ardışık Modellerin Birbirine Bağlanması

(2) Dengelemenin Matematik Modeli

Dengelemenin matematik modeli, uzaysal benzerlik dönüşümünün her modele ayrı ayrı uygulanması esasına dayanır. Bağımsız modellerle kolon dengelemesinde, konum ve yükseklik dengelemelerinin ayrı ayrı yapıldığı iki aşamalı çözüm tercih edilmektedir. Bağımsız modellerle kolon dengelemesi, bağımsız modellerle blok dengelemesinin kolona uygulanmış özel bir halidir /27/. Bu nedenle dengelemenin matematik modeli üzerinde çok fazla durulmayacaktır. Diğer kolon dengeleme yöntemleri (grafik ve polinomlarla) ise günümüzde artık kullanılmamaktadır.

Her iki aşamada yazılan düzeltme denklemlerinden normal denklemler kurulur. Bilinen kontrol noktaları ve model ölçümleri yardımıyla, önce dönüşüm parametreleri çözülür, sonra bilinmeyen yeni nokta koordinatları hesaplanır. Her bir yatay kontrol noktası ve yeni nokta için konum dengelemesinde iki adet, yükseklik kontrol noktası ve yeni nokta

yükseklikleri için yükseklik dengelemesinde birer adet düzeltme denklemi yazılır. İzdüşüm merkezleri için üç adet denklem kurulur. Noktaların birden fazla modele girmesi halinde, bu düzeltme denklemlerinin sayısı model sayısına bağlı olarak artar /27/.

(3) Dengeleme Sonuçları, Hatalar ve Doğruluk Dereceleri

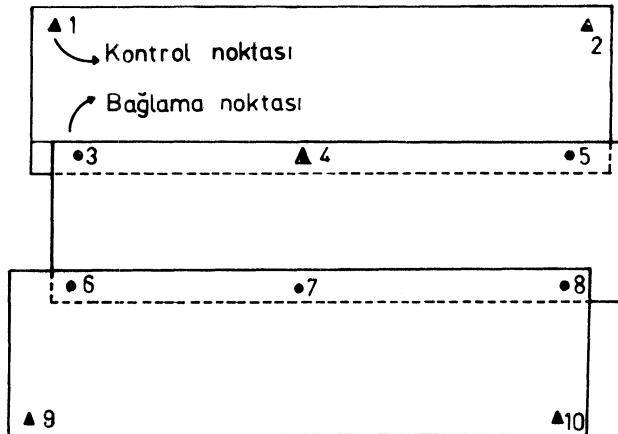
Kolon dengelemesinin doğruluğu, kontrol noktaları arasındaki uzaklığa bağlıdır. Kolonların başında ve sonunda mutlaka ikişer nokta, orta bölümünde ise yeteri sayıda kontrol noktası seçilmesi halinde, kolon dengelemesi ile uygun sonuçlar elde edilebilir. Ancak çok uzun kolonlarda kolon dengelemesinin doğruluğu azalmakta ve kolon boyunca çeşitli deformasyonlar oluşmaktadır (ölçek, kayıklık, açısal dönüklük gibi). Bunun dışında, kolon dengelemesinin doğruluğunu etkileyen çeşitli sistematik hata etkileri de mevcuttur. Bu hatalardan atmosferik kırılma ve yer küreselliği etkileri mutlaka giderilmelidir /5/, /11/.

b. Polinom Dengelemesi (Kolonlarla Blok Dengeleme)

(1) Genel Bilgiler

Kontrol noktaları yardımıyla dengelenen bir kolon veya model verilerinden yararlanarak blok oluşumunun sağlanması, konum ve yükseklik için geliştirilmiş polinomlarla yeni noktaların üç boyutlu (X,Y,Z) koordinatlarının elde edilmesi yöntemidir. Polinom yöntemi kolonların dengelenmesine olanak sağlamakla birlikte, genellikle blok dengeleme yapmak amacıyla kullanılmıştır /5/.

Polinom yöntemi genelde analog aletlerde uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemde ardışık yöntem denmesinin nedeni, öncelikle ardışık modellerin geçici bir koordinat sisteminde ölçümlerinin yapılarak kolonların oluşturulması ve kolon koordinatlarının temel dengeleme birimi alınarak arazi koordinat sistemine dönüşümün yapılmasıdır /6/ (Şekil-3).



Şekil-3: Polinom Yöntemi (Kolonlarla Blok Dengeleme)

(2) Dengelemenin Matematik Modeli

Konum ve yükseklikler için ayrı ayrı geliştirilmiş uygun polinomlar kullanılarak dengeleme yapılmakta, konum ve yükseklik verileri ayrı ayrı çözülmektedir. En çok kullanılanlar 2'nci ve 3'üncü dereceden polinomlardır. Ancak, polinomlar kullanılarak yapılan kolon ve blok dengeleme yöntemleri, bugün artık pek kullanılmayan eski yöntemler olduğundan yöntemin matematik modeli üzerinde ayrıntılı olarak durulmayacaktır.

(3) Dengeleme Sonuçları, Hatalar ve Doğruluk Dereceleri

Bilinmeyen sayısı az olduğundan ve her kolon için sadece bir grup parametre çözüldüğünden, orta kapasiteli bilgisayarlarla çözüm olanaklıdır. Fazla bellek ve bilgisayar hızı gereksinimi göstermez. Ancak, oldukça basit matematik modeller kullandığından, doğruluğu diğer yöntemlere oranla daha azdır. Büyük bloklarda ve yüksek incelik isteyen çalışmalarda iyi sonuçlar alınması zordur. Analog olarak uygulanan bir yöntem olup, bugün pek kullanılmamaktadır /17/, /18/.

c. Bağımsız Modellerle Blok Dengeleme

(1) Genel Bilgiler

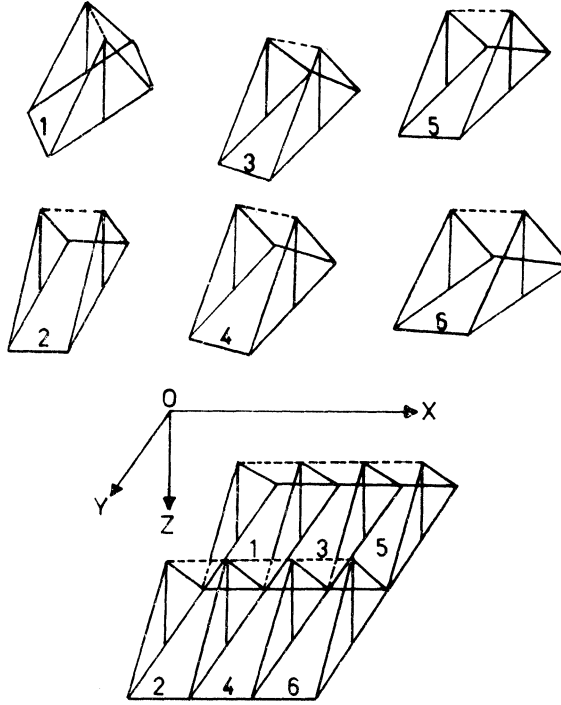
Bindirmeli iki resmin sayısal karşılıklı yöneltmesiyle stereomodel oluşturulması ve sayısal mutlak yöneltme ile, oluşan modelde bilinen kontrol noktaları yardımıyla model koordinatlarının arazi koordinat sistemine dönüştürülmesi esasına dayanan bir yöntemdir /11/.

Yöntem, tek bir modelden çok sayıdaki modele (blok) aynı şekilde uygulanır. Bunun için her bir modelin ayrı ayrı bağımsız olarak yöneltmesi gerekir. Dengelemede kullanılan en küçük birim, modeldir /11/.

Bu yöntemde konum ve yükseklikleri ayrı ayrı (iki aşamalı çözüm) veya birlikte (aynı anda) üç boyutlu olarak çözmek (tek aşamalı çözüm) olanaklıdır /5/.

Modellerin karşılıklı yöneltme sonrası mutlak yöneltmesi (baz ve yükseklik ayarı) yaklaşık olarak yapılır. Her modelin yaklaşık mutlak yöneltmesini yapmak için gerekli olan noktaların (X,Y,Z) koordinatları, ya bölgenin topografik haritalarından alınabilir veya kontrol amacıyla yapılan kolon dengelemesi sonuçlarından yararlanılabilir (ardışık kolonlar için). Yapılan işlem, model içindeki noktaların rölatif olarak konumlarını belirlemektir. Yapılan mutlak yöneltme yaklaşık bir yöneltme olup, uzaysal üç boyutlu benzerlik dönüşümü ile bilinen nirengi noktası koordinatlarıyla arazi koordinat sistemine dönüşüm sağlanır. Model koordinat sistemi arazi koordinat sistemine yakın bir sistem olup, geçici ve yaklaşık bir ölçeğe sahiptir, yöneltmeler sonucu arazi sistemine kaydırılıp döndürülür. Her bir modelin blok içinde birleştirilmesinde ise, model ve kolon bağlama noktaları, projeksiyon merkezleri ve kontrol noktalarından yararlanılır /11/.

Her kolonda elde edilen modeller analitik tekniklerle ve sayısal dönüşümlerle birbirine bağlanabilir. Böylece kolonların tüm modelleri, ilk modellerin koordinat sistemine bağlanmış, ayrıca ortak bağlama noktaları arasındaki koordinat uyumu da sağlanmış olur /5/, (Şekil-4).



Şekil-4: Bağımsız Modellerle Blok Dengelemede Uzaysal Benzerlik Dönüşümü

Ölçüme, içinde yer kontrol noktası bulunan herhangi bir modelden başlanabilir. Hatalı bir modelin ortaya çıkarılıp yeniden ölçü yapılarak aynı kolon veya blok içine sokulması olanaklıdır /17/.

(2) Dengelemenin Matematik Modeli

Dengelemenin matematik modeli, her bir modelin yaklaşık mutlak yöneltmesinin yapılması ve üç boyutlu uzaysal benzerlik dönüşümü ile arazi koordinat sistemine dönüştürülmesi esasına dayanır /28/.

Burada, konum ve yüksekliklerin birlikte dengelendiği model üzerinde durulacaktır.

$$\text{Dönüşüm Formülü} : \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i = \lambda_j R_j \begin{bmatrix} X^m \\ Y^m \\ Z^m \end{bmatrix}_j + \begin{bmatrix} X^o \\ Y^o \\ Z^o \end{bmatrix}_j \quad (1)$$

$$\text{Düzeltilme Denklemleri:} \begin{bmatrix} V \\ V^x \\ V^y \\ V^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i - \lambda_j R_j \begin{bmatrix} X^m \\ Y^m \\ Z^m \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} X^o \\ Y^o \\ Z^o \end{bmatrix}_j \quad (2)$$

λ_j : Model koordinat sistemi (j modeline ait) ile arazi koordinat sistemi arasındaki ölçek faktörü,

R_j : Model ve arazi koordinat sistemleri arasındaki uzaysal dönüklüklere ait üç dönüklük elemanından (κ, ϕ, Ω) oluşan dönme matrisi,

$\begin{bmatrix} X^m \\ Y^m \\ Z^m \end{bmatrix}_j$: j Modelindeki bir noktanın model koordinatları,

$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i$: Model koordinatları ölçülen noktanın blok koordinatları,

$\begin{bmatrix} X^o \\ Y^o \\ Z^o \end{bmatrix}$: j Modelinin merkezinin arazi koordinat sistemindeki koordinatları /28/.

Burada kullanılan dönüklük matrisi için çok çeşitli seçenekler mevcut olup, en çok kullanılanları Rodriques ortogonal matrisi ve Cayley invers matrisleridir /6/.

Bağımsız modellerle blok dengelemede yazılan düzeltme denklemleri lineer olmayıp, lineer hale getirilmesi gereklidir /5/.

Matrislerle, düzeltme denklemleri şöyle ifade edilir:

$$V = AX + BY - l \quad ; \quad P \text{ (ağırlık matrisi)} \quad (3)$$

l : Ölçülere ait matris,

V : Artık hatalar vektörü,

X : Bilinmeyen arazi koordinatları matrisi,

Y : Bilinmeyen dönüşüm parametreleri matrisi,

A,B: Bilinmeyenlere ilişkin katsayı matrisleri (iki grup bilinmeyen mevcuttur).

$(V^T P V) = \text{Min.}$ olacak şekilde en küçük kareler yöntemine göre dengeleme yapılır. Düzeltme denklemlerinden normal denklemler kurulur.

$$\begin{bmatrix} A^T P A & A^T P B \\ B^T P A & B^T P B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P l \\ B^T P l \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bu denklemlerde önce Y bilinmeyişi (dönüşüm parametreleri) çözülür, sonra bilinmeyen arazi koordinatları (X) hesaplanır.

$$(B^T P B - B^T P A (A^T P A)^{-1} A^T P B) X (B^T P l - B^T P A (A^T P A)^{-1} A^T P l) \quad (5)$$

$(V_{x_{ij}}, V_{y_{ij}}, V_{z_{ij}})$ artık hataları, arazi koordinatları ile arazi koordinatlarına dönüştürülmüş model koordinatları arasındaki farklılıklardan doğan hatalar olup, bu hatalarla dengelemenin standart sapması hesaplanır /6/.

$$\sigma_o^2 = \frac{V_i^T P V_i}{r} = \frac{V^T P V}{n-u} \quad (6)$$

n : Bilinmeyen Sayısı

u : Ölçü Sayısı

r : Fazla Ölçü Sayısı.

Çözümde ilk yaklaşık değerler için; $\lambda = 1$ ve açısal büyüklükler (κ, ϕ, Ω) sıfır alınır. İzdüşüm merkezleri bağlama noktaları gibi işlem görürler. Bu dengeleme yöntemi iterasyonla uygulanır. İterasyonda bir önceki dengeleme sonuçları yaklaşık değerler olarak kullanılır. Sonuçta, iterasyona yaklaşım sağlandığında iterasyon kesilir /5/.

Konum ve yüksekliklerin ayrı ayrı dengelenmesinde, ilk adımda 4 bilinmeyen ($X_o, Y_o, \lambda, \kappa$), ikinci adımda 3 bilinmeyen (Z_o, Ω, ϕ) çözülür /5/.

Blok kenarlarında ve içinde n-adet full kontrol noktasından (X,Y,Z) ve m-adet model noktasından oluşan bir blok dengelemede (tek aşamalı çözümde), 7 m adet bilinmeyen dönüşüm parametresi ve 3n adet bilinmeyen arazi noktası koordinatları mevcuttur. Dengelemede, kontrol noktalarının tamamen hatasız alınmayıp, birer ölçü gibi (bir miktar hatalı) alınması oldukça uygundur /6/.

Uygulamada, tek aşamalı blok dengeleme yerine, konum ve yüksekliklerin ayrı ayrı dengelendiği iki aşamalı çözüm tercih edilmektedir.

(3) Dengeleme Sonuçları, Hatalar ve Doğruluk Dereceleri

Blok dengeleme ile bağlama noktaları mümkün olduğunca birbirine uyumlandırılır, kontrol noktalarındaki artık hatalar küçük yapılmaya çalışılır /11/. Uzaysal blok dengelemede planimetrik doğruluk, model ve kontrol noktalarının yüksekliklerinden etkilenmez. Bu nedenle konum ve yüksekliklerin ayrı ayrı dengelenmesi, özellikle bilgisayar kapasitesinin uygun şekilde kullanımı açısından çok uygundur. Genellikle tek ve iki aşamalı çözüm yöntemlerinin yaklaşık aynı doğrulukları verdiği görülmüştür /28/.

Yöntem, diğer ilk iki yönteme oranla hata teorisi modeline daha uygundur. Ancak programın girdi verilerinin hazırlanması biraz zor ve zaman alıcıdır. İlk iki yönteme oranla daha duyarlı sonuçlar elde edilmektedir/6/.

Tek modelde ölçülen bağlama noktalarının (single point) dengelemeye hiç bir katkısı yoktur, iki veya üç modelde ölçülmesi uygundur /11/.

Ayrıca model köşelerinde seçilen bağlama noktaları, model ve blokun doğruluğunun artmasına katkıda bulunur /28/.

(4) İlave Ölçülerin (APR, Statoskop gibi) Bağımsız Modellerle Blok Dengelemeye Katılması

Yükseklik dengelemesinde kullanılmak üzere, deniz ve göl kıyısında ölçülen noktaların dengelemeye ilave ölçüler olarak katılması, dengeleme modelinin daha zenginleşmesine, blok doğruluğunun ve yükseklik sonuçlarının hassasiyetinin artmasına yol açar /6/.

Bunun yanında, ardışık izdüşüm merkezleri (O_i) arasında yükseklik farkını belirlemeye yarayan STATOSKOP ve arazide noktaların yüksekliklerini, profil bilgilerini elde etmeye yarayan APR ölçüleri, dengelemeye ilave ölçüler olarak alınabilir. Bu ölçüler dengelemede gözlem denklemlerine ilave edilerek birlikte dengelenirler /6/.

İzdüşüm merkezleri kolon boyunca yükseklikleri kontrol altında tutmaya çalışırlar.

APR ve STATOSKOP ölçülerinin dengelemeye katılması ile çok hassas sonuçlar elde edilememiş ve fazla uygulama alanı bulamamıştır. Bunun yerine son yıllarda geliştirilen GPS yöntemleriyle kamera izdüşüm merkezi koordinatlarının (X_o, Y_o, Z_o) belirlenerek fotogrametrik blok dengelemelere hassas ek ölçüler olarak sokulması yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır /8/.

(5) İlave Parametrelili Bağımsız Modeller Yöntemi

Bağımsız modellerle blok dengeleme, model koordinatlarının rastgele hatalara sahip olduğu varsayımına dayanır. Ancak gerçek anlamda, model ölçümleri (koordinatları) çeşitli sistematik hatalarla yüklüdür.

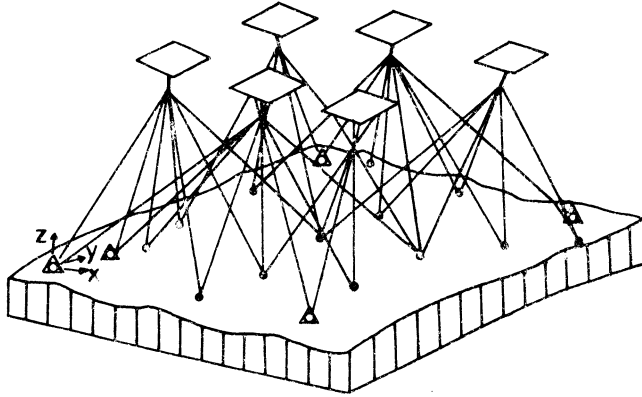
İlave parametrelili dengeleme, sistematik hataların birlikte dengelenmesini sağlar. Böylece model koordinatlarında sadece rastgele hatalar kalır. Gözlem denklemlerinde model koordinatlarına ait düzeltme denklemleri, bu amaçla geliştirilmiş ilave parametrelerle genişletilir, ilave parametreler dengelemede ilave bilinmeyen olarak alınırlar. İlave parametrelere ilişkin düzeltme fonksiyonları genellikle polinomlarla ifade edilirler /6/.

Blok içinde farklı kamera, film ve ölçüm aletleri kullanılırsa, her grup ölçü için ayrı ilave parametreler kullanılabilir. Böylece, ilave parametrelili dengeleme, özellikle konum doğruluğunun, az da olsa yükseklik doğruluğunun artmasına yol açar /6/.

d. Işın Demetleriyle Blok Dengeleme

(1) Genel Bilgiler

Tam analitik bir yöntem olup, ışın demetlerinin ilgili noktalarda kesiştirilmesi esasına dayanır /5/, (Şekil-5).

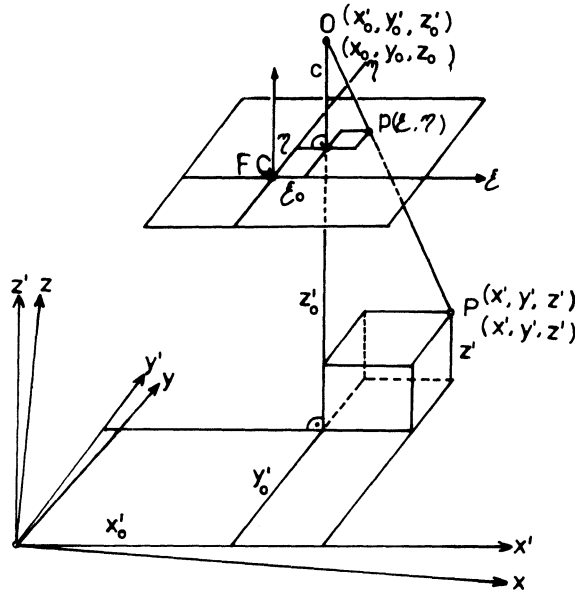


Şekil-5: Işın Demetleriyle Blok Dengelemenin Temel Prensibi

Stereo resim çiftindeki iki ayrı resme ait ışın demetlerinin sayısal olarak yöneltilmesi yöntemidir. Bu yöntemde, iki resme ait 12 dış yöneltme elemanı ve yeni noktaların (kolon ve model bağlama noktaları) koordinatları,

bilinen kontrol noktası koordinatları yardımıyla hesaplanır. Yöntem, çok sayıdaki resme (blok oluşturmak suretiyle) aynı anda uygulanabilir /11/.

Bu yönteme Analitik Fotogrametrik Nirengi de denir. Tek bir resimde ölçülen resim koordinatlarının birim elemanı olarak alındığı, hata teorisi yönünden oldukça duyarlı, fakat çok fazla hesap işlemine gerek duyan bir yöntemdir. Yöntem, bir arazi noktası (P), alım kamerasının izdüşüm merkezi (O) ve arazi noktasının resimdeki izdüşümünün (P') bir doğru üzerinde bulunduğu modeli, yani merkezi izdüşümün matematik tanımı olan doğrusallık (Colinearity) koşulunu esas alan matematik modele sahiptir. Doğrusallık koşulu ile resimlerin birbirine göre rölatif konumları belirlenmektedir /17/, /18/ (Şekil-6).



Şekil-6: Doğrusallık (Colinearity) koşulu (POP'nün bir doğru olma koşulu)

Bu dengelemenin en büyük özelliği, matematik modelin genişletilebilir olmasıdır. Bu olanak sayesinde, dengeleme modeli içine bazı ilave parametreler ve yardımcı ölçüler katılabilir /17/.

Işın demetleri yaklaşımı ile, fotogrametrik nirengi işlemleri bir safhada bitirilir. Teorik açıdan, oldukça sıhhatli sonuçlar verebilen, fonksiyonel modelin en iyi geliştirildiği bir yöntemdir. Parametre ve

koordinat bilinmeyenlerinin yaklaşık değerlerine gerek duyulduğundan, bazı programlar yaklaşık değerleri de hesaplayacak bölümleri içermektedir /17/, /18/.

Her bir resimde en az 9 adet bağlama noktası olması arzu edilir. 15-25 adet bağlama noktası, iyi bir blok geometrisi sağlar. Bu durumda hatalı gözlemler kolayca saptanıp elemine edilebilirler. Minimum 15 adet nokta ölçülmesi ile uygun çözüm sağlanabilir. Ancak, bunun için blok kenarlarında yeteri kadar kontrol noktası bulunması gereklidir /12/.

Işın demetleriyle blok dengeleme sonucu, resimler bir miktar kaydırılır (X_o, Y_o, Z_o ile) ve bir miktar döndürülür (Ω, ϕ, κ ile) /16/.

(2) Dengelemenin Matematik Modeli

Dengelemenin matematik modeli (3.d.(1))'de belirtildiği gibi, merkezsel izdüşümün doğrusallık koşuluna dayanmaktadır. Arazi ve resim koordinatları arasındaki ilişki şöyledir:

$$(X-X_o) = \lambda R(x-x_{h'}) \quad (7)$$

X : Arazi koordinatları vektörü (X,Y,Z),

X_o : İzdüşüm merkezi koordinatları (X_o, Y_o, Z_o),

λ : Resim ve arazi koordinat sistemleri arasındaki ölçek faktörü,

R : Resim ve arazi koordinat sistemleri arasındaki ortogonal dönüklük matrisi,

x : Noktaların ölçülen resim koordinatları (x,y),

$x_{h'}$: Asal nokta konumu ($x_{h'}, y_{h'}$),

c : Kamera sabitesi (sabit değer).

$$\text{Buradan: } x = x_{h'} + R^T (X - X_o) / \lambda \quad (8)$$

bulunur /4/, /18/.

Dengelemenin matematik modelini oluşturan doğrusallık eşitlikleri şöyledir:

$$x = x_{h'} - c \cdot \frac{r_{11}(X-X_o) + r_{21}(Y-Y_o) + r_{31}(Z-Z_o)}{r_{13}(X-X_o) + r_{23}(Y-Y_o) + r_{33}(Z-Z_o)} \quad (9)$$

$$y = y_{h'} - c \cdot \frac{r_{12}(X-X_o) + r_{22}(Y-Y_o) + r_{32}(Z-Z_o)}{r_{13}(X-X_o) + r_{23}(Y-Y_o) + r_{33}(Z-Z_o)}$$

Her bir nokta için doğrusallık koşuluna dayalı olarak kurulan düzeltme denklemlerinin lineer hale getirilmesi gerekir. Bu amaçla, ölçülen (x,y) resim koordinatları (x,y) ve bilinen arazi koordinatları (X,Y,Z) yanında,

resimlerin dış yöneltme bilinmeyenlerine ait yaklaşık değerlere de gerek vardır. Dengelemenin çözümü için iki grup yaklaşık değere gereksinim vardır. Bunlar dış yöneltme parametrelerinin yaklaşık değerleri ($X_0^o, Y_0^o, Z_0^o, \Omega^o, \phi^o, \kappa^o$) ile noktaların (X^o, Y^o, Z^o) arazi koordinat değerleridir /16/.

Uygulamada yaklaşık değerlerin elde edilmesi için geliştirilmiş pek çok yöntem mevcuttur. İlk yaklaşık değerler olarak açısız elemanlar için $\kappa=\phi=\Omega=0$ alınarak çözüm yapılabilir /11/.

Dönüklük matrisinin (R) oluşturulmasında, açısız dönüklüklerin sırası büyük önem taşır /11/.

Çözümde, önce bilinen nokta koordinatları (X,Y,Z), kamera sabitesi (c) ve resim koordinat ölçümleriyle (x,y), her bir resmin dış yöneltme elemanları hesaplanır, daha sonra bu değerlerle yeni nokta koordinatları bulunur /11/.

Bu yöntemde kamera iç yöneltme elemanları (x_h, y_h, c) da ilave bilinmeyenler olarak alınabilir. Ölçülen arazi nokta koordinatları ve dış yöneltme parametreleri için de denklemler kurulabilir. Ancak, hem ilave parametre bilinmeyenleri, hem de iç yöneltme bilinmeyenlerinin birlikte çözümü için daha fazla sayıda kontrol noktasına gerek duyulur /9/.

İlave parametrelerin dengelemeye katıldığı, iç yöneltme elemanlarının yeteri incelikte bilindiği, yer kontrol noktalarındaki ölçümlerin gözlemler olarak ele alındığı genişletilmiş matematik model şöyle tanımlanır/17/,/18/:

$$\begin{aligned} V_B &= A dX + B dX_p + CdT + D dz - l_B ; P_B \\ V_Z &= I dz - l_Z ; P_Z \\ V_P &= I dX_p - 0 ; P_P \end{aligned} \quad (10)$$

V_B : Resim koordinatları için düzeltme vektörü,

V_Z : İlave parametreler için düzeltme vektörü,

V_P : Yer kontrol noktaları için düzeltme vektörü,

A,B,C,D : Bilinmeyenlere ilişkin katsayı matrisleri (ilgili bilinmeyenlere ait),

P_B, P_Z, P_P : Sırasıyla resim koordinatları, ilave parametreler ve yer kontrol noktalarına ilişkin ağırlık matrisleri,

dX : Yeni noktalara (bağlama noktaları) ilişkin çözüm vektörü (bilinmeyenler),

dX_p : Yer kontrol noktaları için çözüm vektörü,

dT : Dış yöneltme parametreleri için çözüm vektörü (bilinmeyenler),

- dz : İlave parametrelere ait çözüm vektörü,
l_B : Resim koordinat ölçülerine ait matris,
l_Z : İlave parametrelere ait sabit terimler vektörü.

Yazılan bu denklemlerle normal denklemler kurulumu $(V^T P V) = \min.$ olacak şekilde en küçük kareler yöntemine göre çözüm yapılır. Blok kenarlarında ve içinde n-adet full kontroi noktasından (X,Y,Z) ve m-adet model noktasından oluşan bloktaki toplam bilinmeyen sayısı = $6m + 3n$ formülü ile bulunur. Bilinmeyenlerin çözümünden sonra, blok'a ilişkin hata hesapları yapılır /17/, /18/.

(3) Dengeleme Sonuçları, Hatalar ve Doğruluk Dereceleri

Dengelemenin doğruluğu, kontrol noktalarının doğruluğu, dağılım ve sayısı ile yakından ilgilidir. Ölçülen resim koordinatlarında çeşitli sistematik ve rastgele hatalar mevcuttur. Bu hatalar, resim ve merkezi izdüşümün geometrik özelliğini bozmaktadır. Bu nedenle bu hataların giderilmesi gerekir. Bu hatalar, çeşitli alet ve ilave donanımlarla veya dengelemede sayısal olarak çözümlenmektedir /5/, /17/, /18/.

Teorik olarak ilave parametresiz ışın demetleri yönteminin diğer 3 yöneme göre daha iyi sonuçlar vermesi gerekir. Ancak, çoğu zaman bu durum sağlanamamaktadır. Pratikte bunun çeşitli nedenleri olabilir /16/.

İlave parametrelili demet dengelemesinin ilave parametresiz olana göre, 2-3 misli doğruluk artışı sağladığı görülmüştür. En fazla doğruluk artışı seyrek noktali bloklarda olmuştur. Yüksek doğruluk isteyen işlerde, ilave parametrelili çözüm yapmak uygundur. Ölçülen resim koordinatlarının inceliği resim ölçeği ve bindirme oranları, yöntemin doğruluğunu etkilemektedir /19/.

Resim koordinatları birim ağırlığa sahip korelasyonsuz ölçüler olarak alınır. Geniş açılı (küçük odak uzaklıklı) kameralar, noktalarda daha iyi kesişme sağladığından, dar açılı olanlara göre daha iyi sonuçlar verir /6/.

Demet dengelemesinde doğruluğu arttırmak için diğer bir yöntem de, bir istasyondan birden fazla resim çekimi yapmaktır. Ancak bu yöntemin pratikte uygulaması pek ekonomik değildir /12/.

Yöntemde paralaks gidererek ölçüm yapıldığından, arazi noktalarının kireçli veya resimlerde kolayca tanınabilen keskin detay köşeleri şeklinde olması gerekir. Ayrıca bağlama noktası olarak yapay nokta tesisi yerine doğal detay noktalarının kullanılması, ölçüm ve dengeleme doğruluğunu arttırır /11/.

Her bir arazi noktasının en az iki, mümkünse üç resimde ölçülmesi ve aynı noktaya ait izdüşüm ışınlarının çok dar açı ile kesişmemesi gerekir. Işın demetleri yönteminin diğer dengeleme yöntemlerine göre çeşitli avantaj ve dezavantajları vardır /12/.

Önemli avantajları: hassas ve doğru sonuçlar vermesi, pek çok ilave jeodezik ölçünün de dengelemeye katılabilmesi, kamera kalibrasyon bilgilerinin elde edilebilmesi, dış yöneltme elemanlarının ortaya çıkarılabilmesidir /11/.

Dezavantajları ise: analog aletlerde uygulanamayışı (sadece analitik aletlerle uygulanabilmesi), yoğun bilgisayar işlemi ve bellek gereksinimi duyması, yaklaşık değerlerin bulunmasının zor ve zaman alıcı olması, planimetrik ve yükseklik dengelemelerini ayrı ayrı yapma olanağının olmamasıdır /11/.

(4) İlave Jeodezik Ölçülerin Dengelemeye Katılması

Işın demetleri ile blok dengeleme, self kalibrasyonlu (kamera kalibrasyonu yapılarak), ilave parametrelili yapılabilirdi gibi, ölçülen dış yöneltme bilgileri de dengelemeye sokulabilir. Bunun yanında pek çok jeodezik ölçüler (eğik ve yatay uzunluklar, yatay doğrultular, zenit açıları, geometrik nivelman ölçüleri, astronomik enlem, boylam ve azimut değerleri, yapay uydu gözlem verileri gibi,...)'de dengelemeye katılarak birlikte dengeleme yapılabilir. Ancak, günümüzde jeodezik ve fotogrametrik dengelemeler ayrı ayrı yapılmaktadır /17/, /20/.

(5) İlave Parametrelili Işın Demetleri Yöntemi

Sistematik model ve resim hatalarını gidermek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan birisi de ilave parametrelerin modele eklenerek matematik modelin yeterli hale getirilmesidir. Böylece, fotogrametrik olarak belirlenen noktalarda yüksek inceliğe ulaşılmış olur /18/. Işın demetleri yöntemi ilave parametreleri içeriyor ve kamera da aynı anda kalibre edilmişse, bu yöntemin diğer tüm yöntemlerden daha iyi sonuçlar vermesi gerekmektedir /12/, /18/.

Sistematik hataların giderilmesinde kullanılan ilave parametrelerin seçiminde, blokun yapısına en uygun olanların seçimi ile en uygun dengeleme programlarının kullanımı büyük önem taşır. Çok büyük korelasyona sahip, anlamsız ilave parametrelerin kullanılması, blokun yapısını ve dengelemenin doğruluğunu bozmaktadır. /7/.

4. FOTOGRAMETRİK NİRENGİ SONUÇLARI

a. Fotogrametrik Nirengideki Temel Hata Kaynakları

Fotogrametrik nirengideki temel hata kaynakları: alet hataları, operatörün ölçme, yorumlama ve noktaya yaklaşma hataları, atmosferik kırılma, yer küreselliği, film distorsiyonu, esas nokta kayıklığı, kamera distorsiyon hataları, filmin düz olmaması, film deformasyonları, atmosferik etkiler ve emülsiyon yüzeyindeki deformasyonlardır /5/, /6/, /17/, /19/.

Bu hatalardan alet hataları, aletlerin periyodik kalibrasyonu ile, operatör hataları dikkatli ölçüm ve hatalı ölçülerin tekrarı ile giderilir. Analog fotogrametrik nirengide bu hatalara ek olarak, harita projeksiyon hataları da mevcuttur /6/.

Atmosferik kırılma ve yer küreselliği hataları, pek çok analitik alet sistemlerinde ve gelişmiş blok dengeleme yazılımlarında otomatik olarak giderilmektedir. Analitik yöntemlerde hataların tesbiti hassas, hızlı ve güvenilir olarak yapılır. Ancak giderilmesi zor ve zaman alıcıdır /12/, /28/.

Fotogrametrik dengelemelerde, sistematik hataların oluşumunda ve giderilmesinde, kontrol noktalarının dağılımı da çok önemlidir /5/.

b. Dengelemelere İlişkin Genel Sonuçlar, Doğruluk Ölçütleri

Bir fotogrametrik nirengi yönteminin doğruluğu, jeodezik yöntemlerle bulunan ve hatasız kabul edilen değerlerle, fotogrametrik yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak belirlenir /6/.

Blok dengelemede konum doğruluğu blokun boyutundan ve model sayısından bağımsız olup, blok kenarındaki kontrol noktası sıklığına bağlıdır. Yükseklik doğruluğu ise, blok içinde bulunan yükseklik kontrol noktaları arasındaki uzaklığa (i) bağlıdır. i'nin artması ile doğruluk hızla azalmaktadır /6/, /16/.

Blok köşelerinde ve kenarlarında yeteri sıklıkta kontrol noktası olmalı, ekstrapolasyondan kaçınılmalıdır. Kolonun ilk modellerinin mutlak yöneltmesinin yeteri kadar hassas ve yeterinden fazla nokta ile (4-5 adet) yapılması uygundur /6/.

Blok kenarlarındaki full kontrol noktaları arasında $i=2B$ alınması ve bu mesafelerin yaklaşık eşit olması uygundur. Blok içinde ise yine homojen dağılımda ve $i=3B$ veya $i=4B$ olacak şekilde yükseklik (kot) kontrol noktaları alınması yeterlidir (B = iki resim çekim noktası arasındaki uzaklık) /5/, /6/.

Blok dengeleme ile sistematik hatalar giderilir, rastgele hatalar belirli bir düzeye indirilir. Blok dengelemeler, ayrı ayrı yapılan kolon dengelemelerinin her birinden daha iyi sonuçlar verir. Daha fazla kontrol noktası daha iyi doğruluk demektir. Ancak ekonomi faktörü dikkate alınmalı, yeteri sayıda nokta tesis edilmelidir /6/.

İteratif çözüm yapılan dengelemelerde karşılaşılan en önemli sorun, iterasyonun yaklaşma kriterinin bulunmasının çok zor oluşudur /19/.

Blok dengelemelerde kaba hata tesbiti de çok önemli olup, geliştirilmiş pek çok yöntem vardır. En etkili yöntem, BAARDA Data Snooping yöntemidir. Kaba hataları tek tek ayıklamaya yarayan Robust kaba hata tesbiti yöntemi, fotogrametrik nirengide çok fazla uygulama alanı bulmuştur /12/.

Fotogrametrik nirengi işlemlerinin yapay noktalara (delgi noktası) dayandırılması zorunluluğu yoktur. Bu amaçla belirgin doğal detaylar da kullanılabilir /11/.

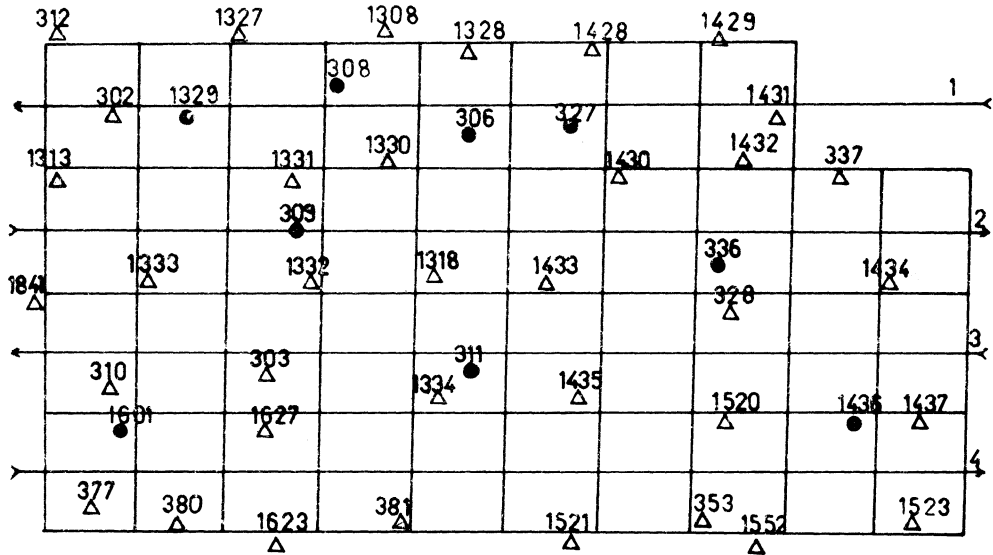
Son zamanlarda dengelemede ilave parametrelerin kullanımı, jeodezik ölçülerin de dengelemeye katılması ve kolokasyon yapılması üzerine çeşitli araştırmalar yapılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır /13/.

Uçuş boyunca doğrudan bulunan kamera konum verileri, fotogrametrik blok dengelemelerde kontrol noktası sayısını azaltmak için çok etkilidir. Bu amaçla geliştirilen en etkili ve hassas yöntem, GPS yöntemidir. Bu yöntemde uçuş boyunca kamera konum verisi elde edilmekte, böylece kontrol noktası sayısı minimum düzeye inmektedir /14/.

5. SAYISAL UYGULAMALAR

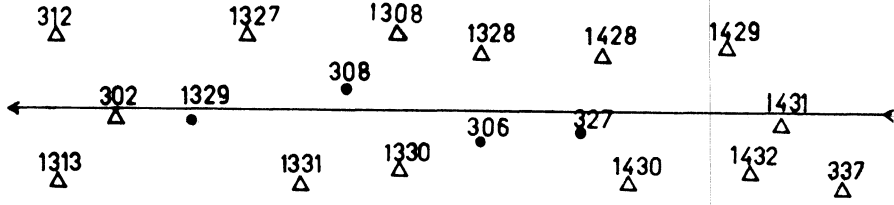
a. Uygulama Alanına Ait Bilgiler

Sayısal uygulamalarda, 1/5000 ölçekli harita kıymetlendirmesi yapmak amacıyla, 1990 yılında 1/18000 ölçeğinde, 153.25 mm. odak uzaklıklı hava kamerası ile çekilen resimler kullanılmıştır. Uygulama alanına ait tüm bilgiler Şekil-7'de, her bir kolondaki kontrol noktası dağılımı ise Şekil-8'de görülmektedir.

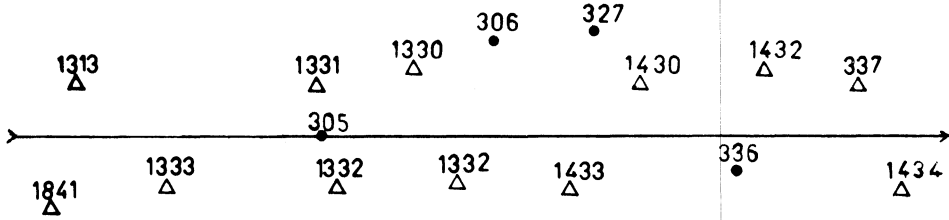


- Δ : Koordinatları bilinen full kontrol (X,Y,Z) noktaları
- : Dengelemede kontrol amacıyla yeniden hesaplanan jeodezik noktalar (denetleme noktaları, check points)

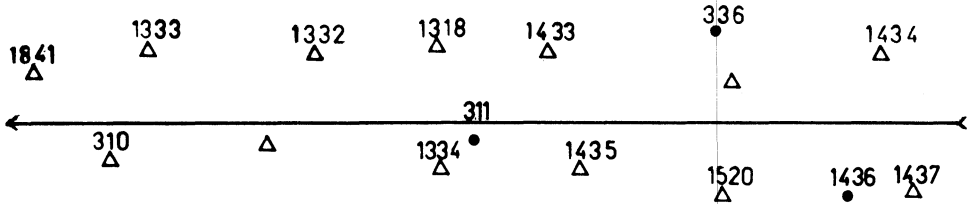
Şekil-7: Uygulamada kullanılan fotogrametrik blok'un yapısı



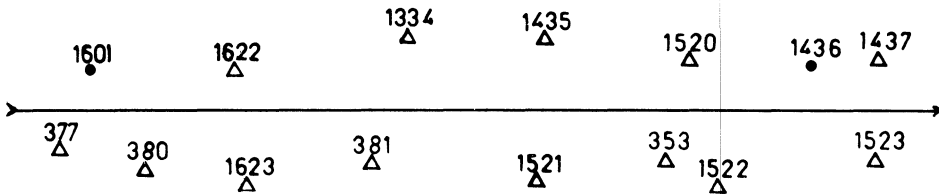
Şekil-8.a: 1'inci kolondaki kontrol noktası dağılımı



Şekil-8.b: 2'nci kolondaki kontrol noktası dağılımı



Şekil-8.c: 3'üncü kolondaki kontrol noktası dağılımı



Şekil-8.d: 4'üncü kolondaki kontrol noktası dağılımı

İş bölgesinde homojen dağılımlı 45 adet kontrol noktası (nirengi) vardır. Ancak bunlardan 9 tanesi, fotogrametrik dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılması ve hatasız varsayılan jeodezik değerlere yaklaşımının tesbiti amacıyla denetleme noktası (check point) olarak kullanılmış, koordinatları fotogrametrik yöntemlerle yeniden hesaplanmıştır. Bu noktalar, blokun geometrisi ve duyarlılığını bozmayacak şekilde seçilmiştir.

Kontrol noktalarının dağılımı, blok içinde $i=3B-4B$, blok kenarında ise $i=2B$ civarında olan full kontrol (X,Y,Z) noktalarıdır.

İş bölgesinde 4 kolon mevcut olup, bu kolonlarda sırasıyla 10,10,12,13 model olmak üzere toplam 45 model ölçülmüştür (Blokta).Bloktaki 45 modelde toplam 147 adet model, 71 adet kolon bağlama noktası mevcut olup, ZEISS-PM1 nokta transfer aletinde resimlere stereoskopik olarak işaretlenmiştir.

b. Dengeleme İşlemleri

Sayısal uygulamalarda dört ayrı dengeleme yöntemi kullanılmıştır:

Birinci Yöntem : Bağımsız modellerle kolon dengelemesi (STRIM-43-P),

İkinci Yöntem : Sağlam ve yeterli sayıda kontrol noktasına sahip kolonlardan zayıf nokta dağılımlı kolonlara nokta aktarımı ile yapılan kolon dengelemesi (STRIM-43-P kullanılarak),

Üçüncü Yöntem : Bağımsız modellerle blok dengeleme (PATMR),

Dördüncü Yöntem : İlave parametrelili ışın demetleri blok dengelemesi (BİNGO).

Burada sözü edilen ikinci yöntem aslında bir fotogrametrik dengeleme yöntemi olmayıp, diğer blok dengeleme olanaklarının olmadığı hallerde kullanılan, türetilmiş bir yöntemdir. Bir yöntem olarak değil, uygulamada kullanılan bir çözüm yolu olarak görülmesi yararlıdır.

Yapılan ölçüm ve dengelemeler hakkındaki bilgiler şunlardır:

- İlk üç yöntem için tüm modeller ZEISS-C115 analitik aletinde, BİNGO dengelemesi için ZEISS-P3 analitik aletinde ölçülmüştür. BİNGO için gerekli olan resim koordinatları, paralaks ölçümleri yerine model ölçümlerinden elde edilmiştir.

- Resim ve model koordinat ölçümleri korelasyonsuz varsayılarak dengeleme yapılmış, yer küreselliği ve refraksiyon etkileri dikkate alınmıştır.

- STRIM-43-P kolon dengelemesi için 3, PATMR bağımsız modellerle blok dengeleme için 4, BİNGO ışın demetleri yöntemi için 5 iterasyonun yeterli olduğu, bu iterasyon sayılarında yakınsamanın sağlandığı yapılan ilk kontrol dengelemelerinden anlaşılmıştır.

- Ölçülerdeki kaba hatalar tespit edilerek ayıklanmış, ardışık modellerin yaklaşık mutlak yöneltmelerinin yapılarak nirengi noktalarının yerlerini kontrol edebilmek amacıyla, kolonların ilk modellerinde oldukça hassas mutlak yöneltmeler yapılmıştır.

- İkinci yöntemde göre yapılan dengeleme, blok dengeleme olanaklarının olmadığı, zayıf nokta dağılımı olan kolonların dengelemesine olanak sağlayan türetilmiş bir çözüm şeklindedir. Bu yöntemde göre, önce 1'inci ve 3'üncü kolonlar dengelenmiş, sonra 1'inci kolondan 2'nci kolona, 3'üncü kolondan 2'nci ve 4'üncü kolona nokta aktarımı yapılmış, 2'nci ve 4'üncü kolonlar bundan sonra dengelenmiştir. Bu şekilde dengeleme yapılmasındaki amaç, böyle bir çözüm yolunun kullanılması halinde, yapılabilecek hataları ortaya çıkarmaktır.

- İlk üç yöntemde kullanılan programlarda (STRIM-43-P ve PATMR) konum ve yükseklikler ayrı ayrı dengelenmekte (iki aşamalı çözüm) olup, ilk aşamada 4, ikinci aşamada 3 parametre çözülerek yeni nokta koordinatları hesaplanmaktadır. BİNGO'da ise tüm bilinmeyenler ve yeni nokta koordinatları aynı anda ve üç boyutlu (X,Y,Z) olarak çözülmektedir.

Jeodezik olarak tespit edilen kontrol noktalarının bir miktar hatalı olduğu düşünülerek, dengeleme öncesi konum için 15 cm, yükseklik için 20 cm'lik bir standart sapma değeri alınmıştır.

c. Dengeleme Sonuçlarının İncelenmesi, Hata Hesapları, İstatistik Testler

(1) Kontrol Noktalarının İncelenmesi

Dört ayrı dengelemeden elde edilen sonuçlar incelenerek karşılaştırılmıştır. Her bir yöntemde 9 adet kontrol noktası bilinmeyen gibi yeniden hesaplanmış, sonra bu dengeleme sonuçları noktaların hatasız varsayılan değerlerinden (gerçek değer) çıkarılarak gerçek hatalar (ϵ_i) hesaplanmış, daha sonra karesel ortalama hata (RMS_i) hesabı yapılmış, sonuçlar Tablo-1'de sunulmuştur.

Tablo-1: Kontrol Naktalarına İlişkin Sonuçlar

YÖNTEMLER	RMS (cm) x	RMS (cm) y	RMS (cm) z
1'İNCİ YÖNTEM	34.5	32.7	38.8
2'NCİ YÖNTEM	38.7	25.3	38.8
3'ÜNCÜ YÖNTEM	38.3	19.7	23.6
4'ÜNCÜ YÖNTEM	23.9	21.5	18.9

Gerçek hata = Gerçek (Jeodezik) değer - Dengeleme ile bulunan değer

$$\epsilon_x = X_G - X_i, \quad \epsilon_y = Y_G - Y_i, \quad \epsilon_z = Z_G - Z_i \quad (11)$$

i: Dengeleme Yöntemleri (1,2,3,4)

$$RMS_i = \frac{\epsilon_i \epsilon_i}{n}, \quad (i=X,Y,Z, n=9) \quad (12)$$

Tablo-1 incelendiğinde, en iyi doğrulukların sırasıyla, ilave parametrelili demet yöntemi, bağımsız modeller yöntemi, nokta aktarımı yapılmış kolon yöntemi ve bağımsız modellerle kolon dengeleme yöntemi ile elde edildikleri görülmektedir.

Kolon dengelemelerinde, blok dengeleme sonuçlarına yakın doğrulukta sonuçlar alınmıştır. Bunun nedeni, kolon dengelemesi için yeteri sıklıkta nokta olmasıdır. Büyük ve az kontrol noktalı bloklarda, ayrı ayrı yapılan kolon dengelemelerinden daha kaba sonuçlar alınabileceği söylenebilir (Blok dengeleme yöntemlerine oranla).

Gerçek hatalara (ϵ_i) ilişkin gerçek hatalar ortalamasının sıfıra yakın olması arzu edilir. Gerçek hatalar ortalaması için t-testi uygulanmış, sonuçta 4 ayrı yöntemin de teste olumlu yanıt verdikleri, yani gerçek hatalar ortalamasının ($\text{ort } \epsilon_i = \mu_0$) sıfıra yakın oldukları anlaşılmıştır.

Gerçek hataların normal dağılımda olup-olmadığını anlamak için, verilere normal dağılım testi (U-testi) uygulanmış, ancak ölçüm sayısının çok az olması nedeniyle olumlu sonuçlar elde edilememiştir.

$[\epsilon_i]$ gerçek hatalar toplamının sıfıra yakın olması koşulunun sağlanabildiği görülmüştür.

(2) Model ve Kolon Bağlama Noktalarının İncelenmesi

Bütün yöntemlerden elde edilen kolon ve model bağlama noktaları için rölatif doğruluk değerleri hesaplanmıştır. Bunun için 4 ayrı dengeleme ile bulunan kolon, model bağlama noktalarının koordinatlarının ortalaması alınmış, ortalamaadan alınan farklarla hatalar (V_i) hesaplanmıştır.

Sonra bu değerlerden ortalama hata hesapları (SS_i) yapılmış ve sonuçlar Tablo-2'de sunulmuştur.

$$\begin{aligned} X_{\text{ort}} &= (X_1 + X_2 + X_3 + X_4) / 4 \\ Y_{\text{ort}} &= (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) / 4 \\ Z_{\text{ort}} &= (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4) / 4 \\ V_x &= X_{\text{ort}} - X_i \\ V_y &= Y_{\text{ort}} - Y_i \\ V_z &= Z_{\text{ort}} - Z_i \end{aligned} \quad (13)$$

X_i, Y_i, Z_i : Noktaların çeşitli dengeleme yöntemleri ile bulunan koordinatları,

$X_{ort}, Y_{ort}, Z_{ort}$: Noktaların ortalama koordinatları (4 dengelemeden bulunan),

$i = 1,2,3,4$: Dengeleme yöntemi,

V_x, V_y, V_z : Hata miktarları (düzeltme değerleri),

SS_x, SS_y, SS_z : Ortalama hata miktarları.

$$SS_x = \sqrt{\frac{[V_x V_x]}{n-1}}, SS_y = \sqrt{\frac{[V_y V_y]}{n-1}}, SS_z = \sqrt{\frac{[V_z V_z]}{n-1}}, n = 9 \quad (14)$$

Tablo-2: Model ve Kolon Bağlama Noktalarına İlişkin Sonuçlar

YÖNTEMLER	SS_x (cm)	SS_y (cm)	SS_z (cm)
1'İNCİ YÖNTEM	16.2	18.9	25.5
2'NCİ YÖNTEM	14.6	18.7	26.9
3'ÜNCÜ YÖNTEM	9.4	12.8	22.1
4'ÜNCÜ YÖNTEM	21.1	24.9	35.8

Tablo-2'ye göre, ilk üç yöntemde teorik beklentiler doğrultusunda sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, BİNGO dengelemesinin (4'üncü yöntem) matematik modelinin çok hassas olması, yapay olarak işaretlenmiş bağlama noktalarına yanaşma zorluğu oluşu ve hassas üç boyutlu görüş sağlanamaması nedeniyle iyi sonuçlar elde edilememiştir. Yapay noktalardaki hatalar en fazla BİNGO dengeleme sonuçlarını etkilemiştir. Bu noktalar yerine, belirgin detay noktalarının kullanılması halinde, aynı kireçli noktalarda olduğu gibi hassas sonuçların elde edilebileceği söylenebilir. Bu konunun da araştırılması yararlıdır. Ayrıca bağlama noktalarının gerçek (jeodezik) değerleri bilinmediğinden, buradaki hatalar rölatif hatalardır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

a. Yapılan tüm sayısal uygulamalarda, elde bir test alanı olmadığı için, kontrol noktaları ve denetleme noktalarının (Check points) seçimi istenen duyarlılıkta yapılamamıştır. Kolon ve blok dengelemelerin karşılaştırılmasında aynı kontrol noktaları kullanılmıştır.

b. Polinom yönteminin genelde basit matematiksel ifadelerle gerçekleştirilen bir çözüm olduğu, bugün pek fazla kullanılmadığı söylenebilir.

c. Kolonun başında, sonunda ve iç kısmında yeteri sayıda kontrol noktası olması halinde kolon dengelemesinin iyi sonuçlar verdiği, ancak nokta sayısının az olduğu büyük alanlarda kolon dengelemesi ile aynı hassas sonuçların bulunamadığı görülmüştür. Bu nedenle, kolon dengeleme yöntemlerinin; blok dengeleme öncesi ölçümleri kontrol etmek, kaba hataları tesbit etmek amacıyla bir kontrol dengelemesi olarak kullanılması yararlıdır. Ancak, bunun yanında blok dengeleme yöntemlerinin kullanılamadığı zorunlu hallerde, özellikle revizyon çalışmalarında, ayrıca blok oluşumu gerçekleşmeyen, bir hat boyunca yapılan kıymetlendirme çalışmalarında (yol, demiryolu, boru hatları gibi) kolon dengelemenin kullanılması uygundur (yeteri sayıda kontrol noktası ile).

d. Kontrol noktası yeterli olan kolonlardan yetersiz olan kolonlara nokta aktarmak suretiyle yapılan kolon dengelemesi, bu kolonların dengelenmesine olanak sağlamaktadır. Blok dengelemenin kullanılmadığı zorunlu hallerde (alet arızası gibi) ve zayıf nokta dağılımlı kolonlarda, revizyon çalışmalarında uygulanabilir. Ancak gerçekte böyle bir fotogrametrik dengeleme yönteminin olmadığı, sonuçların hatalı olabileceği unutulmamalıdır. Mümkün oldukça bu çözüm şekline başvurulmamalıdır.

e. PATMR-Bağımsız modellerle blok dengelemesinde, veri hazırlama, ölçüm, dengeleme, hata analizi işlemleri BİNGO-ışın demetleri yöntemine oranla daha kolaydır. Bu nedenle daha çok tercih edilmektedir. Ancak, PATMR programının kullanılmadığı hallerde, öncelikle BİNGO'nun kullanılması yararlıdır.

f. Fotogrametrik nirengi ölçüm ve dengelemelerinde kireçsiz nokta kullanımından kaçınılmalı, ancak kireçli nokta dağılımının yetersiz olduğu revizyon çalışmalarında, çok belirgin kireçsiz nirengi noktalarına (sivri tepe gibi), blok içinde çok fazla miktarda olmamak koşulu ile ölçüm yapılarak dengeleme sağlanmalıdır.

g. Işın demetleri yönteminde paralaks gidermek suretiyle ölçüm yapıldığından, özellikle bağlama noktalarında ölçüm güçleşmekte ve hatalar oluşmaktadır. Bu nedenle, paralaks giderme yerine model oluşturmak suretiyle noktaların resim koordinatlarının elde edilmesi ve dengeleme yapılması olanaklı görülmektedir.

h. İlave parametre kullanımı tüm blok dengelemelerde mümkün olabilmekte, ancak en iyi sonuçların ışın demetlerinde elde edildiği anlaşılmaktadır. İlave parametreler kullanılmaksızın yapılan ışın demetleri blok dengelemesinin ise, diğer tüm yöntemlere göre daha kötü sonuçlar verdiği, yapılan uygulamalardan görülmüştür.

1. BİNGO demet dengelemesi programı kullanılarak paralaks ölçümleriyle resim koordinatları ölçülmek istenirse, bağlama noktaları için yapay delgi noktası yerine arazide belirgin doğal detay noktalarının alınması sonucu, daha hassas sonuçlar elde edilebilecektir. Böylece yapay noktaların stereoskopik olarak işaretlenmesi ve ölçümü sırasında yapılacak hatalar ortadan kalkmış olacaktır. Ancak bu konunun da araştırılması son derece yararlıdır.

j. Tek modelde ölçülen bağlama noktalarının blok dengelemeye hiç bir katkısı olmadığı, en az iki veya üç modelde ölçülmesi gerektiği, bu nedenle bağlama noktası seçiminin özenli yapılması gerektiği, yapılan uygulamalardan anlaşılmıştır.

k. Blok köşelerinde mutlaka kontrol noktası olmalıdır. Kontrol noktaları arasının blok kenarında $i=2B$, blok içinde $i=4B$ olması uygundur. Kontrol noktalarının seçimi dikkatle yapılmalıdır.

l. Topografik harita üretiminde, büyük bloklarda, blok kenarında $i=2B$ yerine $i=4B$ sıklığında full kontrol noktası (X,Y,Z) alınması, blok içinde de $i=3B-4B$ yerine $i=6B$ veya $i=8B$ sıklığında yükseklik kontrol noktası (Z) alınmasının uygun olup olmadığının ayrıca araştırılması yararlı görülmektedir. Bu sonuçlar özellikle, yapılacak fotogrametrik nirengi plânlamalarında kontrol noktası sayısının azaltılmasında son derece önemlidir.

m. Blok dengelemede kullanılan kontrol noktalarının doğruluğu, fotogrametrik dengeleme doğruluğunu etkileyen en önemli faktörlerden birisi olup, jeodezik kontrol nokta doğruluklarının istenen düzeylerde olması, kabul edilebilir hata sınırlarını aşmaması gerekir.

n. Deniz ve göl kıyısındaki noktalarda yapılan ölçümlerin dengelemeye katılması, özellikle yükseklik doğruluğunun, blokun iç duyarlılığının artmasına yol açmaktadır.

o. Blok dengelemelerde karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi de, iterasyondaki yaklaşma kriterinin tespiti. Bulunacak sonuçların doğruluğu buna bağlı olduğundan, çok dikkatli seçilmesinde yarar vardır.

p. Dengelemede yaklaşık değerlerin tespiti de çok önemlidir. Dengelemenin iterasyon sayısı ve sonuçlanabilmesi, yaklaşık değerlerin uygun şekilde seçilmesine bağlıdır.

r. Bütün bu klasik dengelemeler yanında, özellikle kontrol noktası sayısını büyük oranda azaltan, alet, malzeme, personel ve zaman tasarrufu sağlayan GPS yöntemine doğru geçişin sağlanması, oldukça yararlıdır.

s. Fotogrametrinin son zamanlardaki en büyük gelişmelerinden birisi sayılan sayısal fotogrametrik aletlerde uygulanan ve sayısal görüntülerde fotogrametrik nirengi ölçümüne dayanan otomatik fotogrametrik nirengi yöntemlerinin de dikkatle incelenmesi ve araştırılması oldukça yararlıdır.

K A Y N A K L A R

- /1/ Ackerman, F. : Photogrammetric Engineering And Remote Sensing
USA, 1975.
- /2/ Ackerman, F. : 14 th. Congress of ISP, Comission: III, Hamburg,
1980.
- /3/ Ayeni, O.O. : 14 th. Congress of ISP, Comission: III Hamburg,
1980.
- /4/ Aytaç, M. : Fotogrametride Dengeleme (Fotogrametri II), İTÜ,
1987.
- /5/ Burnside, C.D. Frics : Mapping From Aerial Photographs, Granada
Publishing Limited, London (England), 1979.
- /6/ Salama, C.C., : Manual of Photogrammetry, Fourth. Edition,
Theurer, C., American Society of Photogrammetry, Virginia
Henriksen, S.W. (USA), 1980.
- /7/ Ebner, H. : XIII. Congress of ISP, Comission: III, Helsinki,
1976.
- /8/ Fritsch, D., : Photogrammetric Week'93, Wichmann Verlag GmbH,
Hobbie, D. Karlsruhe (Germany), 1993.
- /9/ Ghosh, S.K. : Analytical Photogrammetry, Pergamon Press, USA,
1979.
- /10/ Gruen, A., Runge, A. : 16 th. Congress of ISPRS, Comission: III, Tokyo,
1988.
- /11/ Kraus, K. : Photogrammetry, Volume 1, Fourth Edition,
Fundamentals and Standard Processes, Bonn,
1991.
- /12/ Kruck, E. : BİNGO Bundle Adjustment User's Manual, Hannover,
1985.
- /13/ Leupin, M.M., : 16 th. Congress of ISPRS, Comission III, Tokyo,
Hausammann, I.H. 1988.
- /14/ Lighterink, G.H. : 16 th. Congress of ISPRS, Comission III, Tokyo,
1988.
- /15/ Molenaar, M., : Aerial Triangulation With Emphasis On Equipment,
Stefanović, P. Methods and Application, ITC Publishes, No:1977-1,
Netherland, 1977.
- /16/ Ölçücüoğlu, N. : Işın Demetleriyle Blok Dengeleme, Harita Dergisi,
Sayı:92, Harita Genel Komutanlığı, 1984.

- /17/ Özbalmumcu,M. : Fotogrametrik ve Fotogrametrik Olmayan Ölçülerin Birlikte Dengelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Üniversitesi, 1990.
- /18/ Pektekin,A. : Işın Demetleri ile Blok Triyangülasyon Yönteminin İlave Parametrelerle Birlikte Dengelenmesi, Doçentlik Tezi, İDMMA 1980.
- /19/ Pektekin,A. : Işın Demetleri ile Fototriyangülasyonu ve İlave Parametrelerle Birlikte Dengelenmesi. Harita Dergisi, Sayı:96, Harita Genel Komutanlığı, 1986.
- /20/ Pektekin,A. : Fototriyangülasyon Ders Notları, Yıldız Üniversitesi, 1989.
- /21/ Salmanpera,H. : 14 th. Congress of ISP, Comission: III Hamburg, 1980.
- /22/ Sarjakoski,T. : The Photogrammetric Journal of Finland, Volume:7, No.:2, Finland, 1978.
- /23/ Sarjakoski,T. : The Photogrammetric Journal of Finland, Volume: 9, No.:2, Finland, 1984.
- /24/ Steidler,F. : 14 th.Congress of ISP, Comission III, Hamburg, 1980.
- /25/ Tansuğ,B. : Analitik Fotogrametri Ders Notları, Yıldız Üniversitesi, 1989.
- /26/ Yagi,S. : 16 th. Congress of ISPRS, Comission: III-1, Tokyo, 1988.
- /27/ : STRIM-43-P Program Instruction Manual for Strip Triangulation by the Method of Independent Models (From Carl Zeiss), Stuttgart, 1978.
- /28/ : PATMR Program Instruction Manual for Block Adjustment with Independent Models (from Carl Zeiss), Stuttgart, 1985.