

**Makale  
(Article)**

## **Dijital Fotogrametride Alana Dayalı Görüntü Eşleme Yöntemleri**

**Abdullah VARLIK<sup>1</sup>, Murat UYSAL<sup>2</sup>, Fikret KARALAR<sup>3</sup>, Z Cevdet CAN<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü, İstanbul

<sup>2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Müh. Fak. Har. Müh. Böl, Afyon

<sup>3</sup>Afyon Bayındırlık Müdürlüğü, Afyon

<sup>4</sup>Hacettepe Üniversitesi, Ankara

### **Özet**

Dijital Fotogrametri, en yeni ve en hızlı gelişen fotogrametri alanıdır ve Bilgisayarla Görme (Computer Vision) ile pek çok prensibi paylaşır. Görüntü Eşleme, özellikle Dijital Fotogrametri ve Bilgisayarla Görmenin ana araştırma konusu olmuştur. Son yıllarda dijital fotogrametrinin gelişmesiyle, dijital formdaki görüntüler üzerinde çerçeve işaretleri, yer kontrol noktaları ve bağlantı noktaları gibi hedeflerin otomatik görüntü eşleme teknikleriyle ölçümü, iyi bilinen ve çok kullanılan bir işlem haline almaya başlamıştır. Bunda başlıca sebep sağladıkları yüksek hız ve doğruluğun yanı sıra getirdikleri minimum operatör emeğidir. Görüntü Eşleme yöntemleri sayesinde, ana ve zor aşama olan ortak alanların belirlenip stereo modelin oluşturulması için gereken ve operatörün görsel aktivitelerine dayanan elle yapılan işlemler yarı otomatik veya otomatik hale getirilmektedir. Geçmiş yıllarda, Görüntü Eşleme için çok çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Uygun olanlardan bazıları Elemana ve Alana Dayalı Görüntü Eşleme yöntemleridir. Bu yöntemlerden fotoğrafların yönettirmesi ve DTM oluşturmada kullanılan hassas ve uygun olanları Alana Dayalı Görüntü Eşleme yöntemleridir. Alana Dayalı Görüntü Eşleme yöntemlerinden Çapraz İlişki ve En Küçük Kareler Görüntü Eşleme teknikleri sağladıkları kolaylık ve hassasiyet yönünden en çok kullanılan ve kabul edilen tekniklerdir

**Anahtar Kelimeler:** Dijital görüntü eşleme, alana dayalı görüntü eşleme, karşılıklı ilişki, en küçük kareler

## **Area Based Matching Techniques For Digital Photogrammetry**

### **Abstract**

Digital photogrammetry is the newest and developing area which shares a lot of principles with the computer vision . Image matching is the basic research subject in digital photogrammetry and computer vision. In recent years of development in Digital photogrammetry, measurements of the frame symbols, ground control and tie points with automatic image matching techniques are began to be well known and used processes. The main purpose of this is the maximum speed accuracy and minimum operator work. By the help of Image Matching methods all of the processes, creating the stereo models and the processes which are based on visual activities are replaced by semi automatic and automatic procedures. In the previous years for matching the image a lot of approaches are developed. Some of the suitable ones are Future Based and Area Based Image Matching techniques. The techniques of orientation of photographs and forming DTM are on Area Based Image Matching techniques. In the techniques of Area Based Image Matching the Cross Correlation and Least Squares techniques are the most usefull and acceptable techniques

**Keywords :** Digital image matching, area based image matching, cross corelation, least square matching

*Bu makaleye atf yapmak için*

*Varlık A., Uysal M., Karalar F., Can ZC. " Dijital Fotogrametride Alana Dayalı Görüntü Eşleme Yöntemleri" Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi 2009, 1(3) 21-33*

*How to cite this article*

*Varlık A., Uysal M., Karalar F., Can ZC. " Area Based Matching Techniques For Digital Photogrammetry" Electronic Journal of Map Technologies, 2009, 1(3) 21-33*

## 1. GİRİŞ

Görüntü eşleme dijital fotogrametri ve bilgisayarla görme alanlarındaki önemli araştırma konularındandır. Bu yüzden çok çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımları Şekle Dayalı Görüntü Eşleme (Feature Based Image Matching), Alana Dayalı Görüntü Eşleme (Area Based Image Matching) ve İlişkisel Görüntü Eşleme (Relational Image Matching) yöntemleri olarak üç şekilde sınıflandırabiliriz.

Dijital fotogrametri, otomatik fotogrametrik işlemeyle ilgilidir, verinin ölçümü, analizi ve yorumunu kapsar. Bu fotogrametrik işlem zincirinin birçok adımı eşlemeye bağlıdır. Otomatik stereo yöneltmenin yapılabilmesi ve sayısal arazi modeli oluşturma işlemlerinde görüntü eşlemeye ihtiyaç duyulur. Otomatik stereo yöneltmenin ana problemi bindirmeli iki görüntüdeki eşlenik noktaları bulmaktır. Problem genelde iki adımda çözülmektedir. Birinci adımda, görüntülerde örtüşen alanlar bir kaba eşleme yapılarak belirtilir. İkinci adımda bu işlemi çok hassas bir nokta eşleme işlemi takip eder. Genelde birinci adımda şekle dayalı görüntü eşleme yöntemleri, ikinci adımda ise çok hassas olan alana dayalı görüntü eşleme yöntemleri kullanılmaktadır.

## 2. GÖRÜNTÜ EŞLEMENİN TANIMI VE KULLANIM ALANLARI

Dijital görüntü eşleme, en azından aynı manzarayı tanımlayan iki veya daha çok dijital görüntü arasındaki ilişkiyi otomatik olarak kurar. Bu ilişkiyi oluşturmak için birçok görüntü eşleme yöntemi geliştirilmiş ve kullanılmaktadır [11].

Dijital fotogrametri de amaç, dijital görüntülerden en az insan katılımıyla 2 veya 3 boyutlu topoğrafik ve tematik veri çıkarmaktır. Dijital fotogrametride, dijital görüntülerin karşılıklı ve mutlak yöneltmesi analitik fotogrametrinin prensipleriyle yapılır. Bu işlemin otomatik yapılabilmesi için her iki bindirmeli görüntüdeki aynı noktalar otomatik veya yarı otomatik olarak bulunmalıdır. Bir stereo modelin oluşturulup, bu modeli yer kontrol noktalarına göre yerleştirmek ve böylece istenilen harita projeksiyon sistemini ortaya koymak için gerekli yöneltme işlemlerinin yapılması şüphesiz analog ve analitik stereo çizim aletlerinde olduğu kadar dijital fotogrametrik sistemlerde de zorunludur. Stereo modelin oluşturulması için bir görüntüdeki bir alanın, bir şeklin veya bir noktanın diğer dijital görüntülerde yerinin araştırılması gerekir. Bu araştırma işlemine görüntü eşleme denir. Görüntü eşleme herhangi bir görüntü analiz işleminin hemen hemen tamamında anahtar elemandır.

Fotogrametrik işlem zincirinin birçok adımı eşlemeye bağlıdır. Örneğin yöneltmenin yapılabilmesi için bir görüntüdeki yer kontrol noktaları ve bağlantı noktalarının görüntü eşleme ile diğer görüntüdeki yerleri bulunur. Ayrıca Sayısal Yükseklik Modelleri oluşturmak için yeniden görüntü eşlemeye başvurulur [5].

## 3. DİJİTAL FOTOGRAMETRİDE GÖRÜNTÜ EŞLEME YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Görüntü eşleme, son yıllarda dijital fotogrametri ve bilgisayarla görmede ana araştırma konusu olmuştur. Bu yüzden çok çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunlar üç temel başlık altında toplanabilir.

- Şekle Dayalı Görüntü Eşleme Yöntemleri
- Alana Dayalı Görüntü Eşleme Yöntemleri
- İlişkisel Görüntü Eşleme Yöntemleri

### 3.1 Şekle Dayalı Görüntü Eşleme

Bu yöntemde her iki görüntüde belli şekillerin çıkartılması gerekir. Eşlemede ikinci adım bu şekiller arasında yapılan eşlemedir. Birinci adımda genellikle noktalar veya kenarlar çıkartılır. Bunun için operatörler veya kenar belirleyicileri kullanılır. İkinci adımda referans görüntü (model görüntü) seçilir ve muhtemel eşleme noktalarının geçici listesi meydana getirilir. Bu işte eleman niteliklerinin benzerliğini anlayabilmek için Çapraz İlişki katsayısı kriter olarak kullanılmıştır. Çoklu çözümler olduğunda, bunların tutarlılığı kontrol edilir ve en iyi çözüm seçilir. Değişik ölçü tutarlılıkları mevcuttur. En önemlilerinden biri paralaks büyüklüğüdür.

Yükseklikler ve paralaksların yerel olarak çok az değiştiği varsayımı altında belirli bir çözüm civardaki yerel çözümlerden biri ile çakışacaktır. Bu yöntemin dezavantajları, şekil çıkartılması esnasında kaybolan bilginin tekrar elde edilememesi, zayıf sınırlama yapmaları ve çok karışık algoritma gerektirmeleridir. Bazı yöntemler piksel altı hassasiyeti sağlarlar, fakat Alana Dayalı yöntemlerin hassasiyet düzeyine erişemezler [1].

### 3.2 Alana Dayalı Görüntü Eşleme

Bu yöntemde temel fikir sol görüntüdeki bir parçanın (ilişki penceresi) sağ görüntüdeki karşılığının bulunmasıdır. Bunun için her iki parçanın  $f_1[u,v]$  ve  $f_2[u,v]$  gri değerleri karşılaştırılır. En önemli alana dayalı eşleme yöntemleri Çapraz İlişki ve En Küçük Kareler Görüntü Eşlemesidir. Birincide her iki görüntüde aynı büyüklükte olan iki parçanın  $f_1$  ve  $f_2$  gri değerleri arasındaki korelasyonun en yüksek olduğu yer araştırılır, En Küçük Kareler Görüntü Eşlemede ise gri değer farkları minimum olacak şekilde sağdaki resim deforme edilir. Bu eşleme yöntemleri hassastır, Çapraz İlişki ile 1-2 piksel hassasiyetle eşleme yapılırken En Küçük Kareler Görüntü Eşleme ile piksel altı hassasiyete inilebilir. En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yönteminin esas dezavantajı çok iyi yaklaşık değerler gerektirmesidir [2].

### 3.3 İlişkisel Eşleme

İlişkisel eşleme görüntülerin sembolik tanımlarını karşılaştırır ve bir maliyet fonksiyonuyla benzerlikleri ölçer. Sembolik tanımlar gri değerlere veya türetilmiş detaylara başvurur. Bu tanımlar grafik, ağaç veya anlamsal ağlar olarak gösterilirler. Diğerlerinin tersine, ilişkisel eşleme geometrik benzerlik özelliklerine katı bir şekilde bağlı değildir. Bir benzerlik kriteri olarak şekil veya konumu kullanma yerine, topolojik özellikleri karşılaştırır.

**Tablo 1.** Eşleme yöntemleri ve eşleme varlıkları arasındaki ilişki

Eşleme Yöntemi	Benzerlik Ölçümü	Eşleme Varlıkları
Alana Dayalı Eşleme	Korelasyon, E K Y	Gri Değerler
Şekle Dayalı Eşleme	Maliyet Fonksiyonu	Noktalar, Kenarlar, Bölgeler
İlişkisel Eşleme	Maliyet Fonksiyonu	Görüntünün Sembolik Tanımı

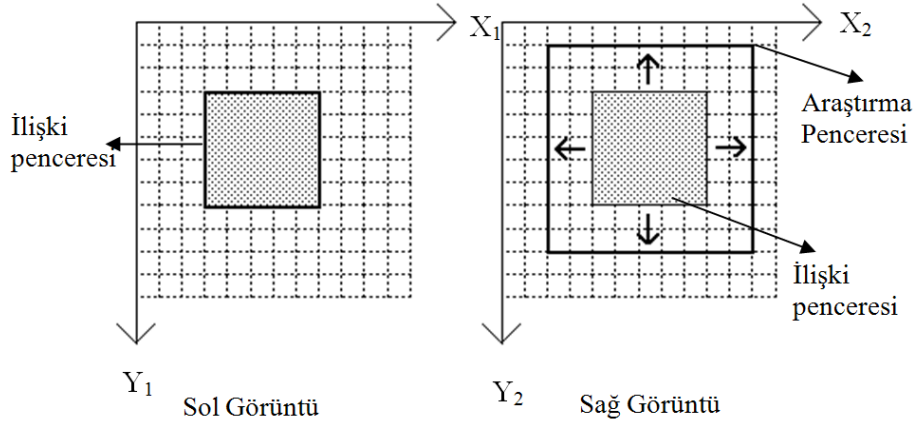
## 4. ALANA DAYALI GÖRÜNTÜ EŞLEME YÖNTEMLERİ

Alana Dayalı Görüntü Eşleme teknikleri görüntülerdeki piksellerin gri değerleri ile doğrudan ilgilidir. Temel fikir iki görüntü parçasının (ilişki penceresinin) karşılaştırılmasıdır. Bunun için her iki parçanın gri değerleri karşılaştırılır. En önemli Alana Dayalı Görüntü Eşleme yöntemleri Karşılıklı İlişki ve En Küçük Kareler Görüntü eşlemesidir [4].

#### 4.1. Karşılıklı İlişki Yöntemi (Cross Correlation)

Karşılıklı İlişki yönteminde, sol ve sağ görüntüdeki iki parça arasındaki korelasyon (ilişki) değeri hesaplanır. Sol görüntüde referans olarak alınan küçük bir parça (5x5 pikselden daha küçük olmayan İlişki penceresi olarak adlandırılan dörtgen) seçilir ve kendisinin Sağ görüntüdeki yeri, dörtgen parçaya yaklaşık olarak karşılık gelen bir araştırma bölgesi ( araştırma penceresi olarak adlandırılır) üzerinde piksel piksel araştırılarak bulunur [6].

Genel olarak pencerenin her bir piksel pozisyonunda merkezleştirilmiş veya normalize edilmiş Karşılıklı İlişki katsayısı ( $\rho$ ) hesaplanır. Hesaplanan  $\rho$  korelasyon katsayısının maksimum olduğu piksel model ve parça arasındaki en iyi eşlemenin konumunu verir.



**Şekil 1.** Karşılıklı İlişki prensibi: Sol görüntüde seçilen ilişki penceresinin sağ görüntüdeki karşılığının, bir araştırma penceresi içerisinde piksel piksel kaydırılarak bulunması

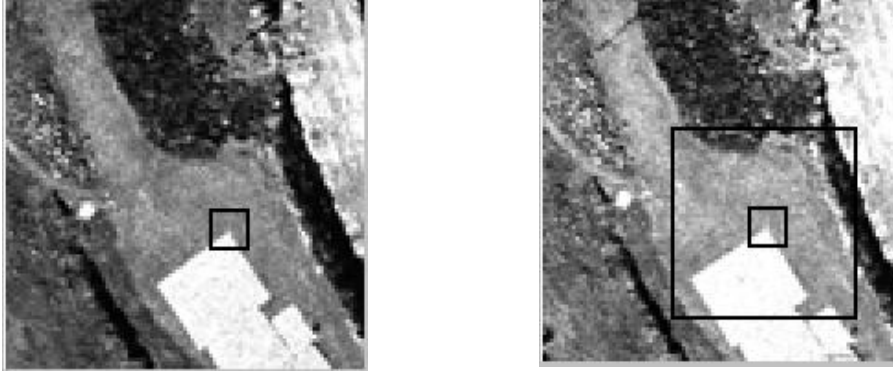
İki parça arasındaki ilişkiyi yüksek bir yaklaşımla bulan, her bir piksel konumunda merkezleştirilmiş veya normalize edilmiş korelasyon katsayısının ( $\rho$ ) hesaplanması şöyledir.

$$\rho[u, v] = \frac{\sum_{u=-n}^n \sum_{v=-n}^n (f_1 [X_1 + u, Y_1 + v] - \bar{f}_1) \cdot (f_2 [X_2 + u, Y_2 + v] - \bar{f}_2)}{\sqrt{\sum_{u=-n}^n \sum_{v=-n}^n (f_1 [X_1 + u, Y_1 + v] - \bar{f}_1)^2 \cdot \sum_{u=-n}^n \sum_{v=-n}^n (f_2 [X_2 + u, Y_2 + v] - \bar{f}_2)^2}} \quad (1)$$

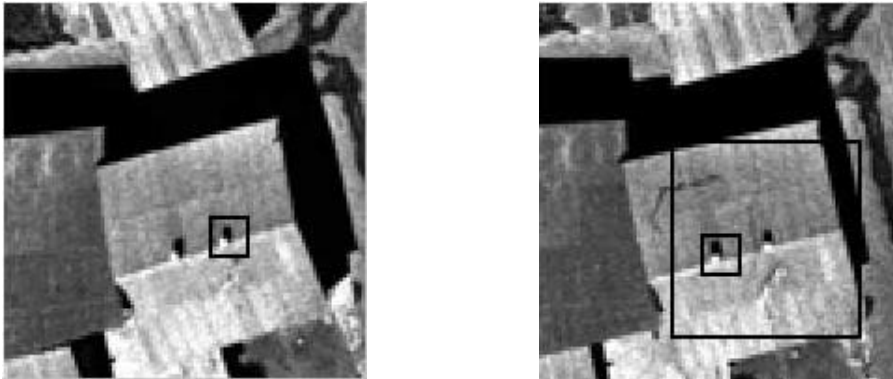
- $2n+1$  : İlişki penceresi boyutu
- $X_1, Y_1, X_2, Y_2$  : sol ve sağ görüntüdeki ilişki pencerelerinin merkezlerinin görüntü koordinatları
- $u, v$  : sol ve sağ resimde ilişki pencerelerinin koordinatları
- $f_1, f_2$  : sol ve sağ görüntüdeki ilişki pencerelerinin piksellerinin gri değerleri
- $\bar{f}_1, \bar{f}_2$  : sol ve sağ görüntüdeki ilişki pencerelerinin piksellerinin gri değerlerinin ortalaması

Korelasyon katsayısı  $\rho[-1, 1]$  aralığındadır. En iyi eşleme maksimum  $\rho(x,y)$ 'yi veren pikseli merkez alan dörtgendir. Hatalı ve zayıf eşlemeler küçük  $\rho$  ile ortaya çıkar (örneğin  $\rho < 0,5$ ). Hesaplanan katsayı  $\rho = -1$  ise iki ilişki penceresi arasında hiçbir ilişki olmadığı anlaşılır. Eğer  $\rho=1$  ise dörtgenler arasında tam bir ilişki vardır. Buna rağmen büyük  $\rho$  her zaman iyi ve doğru eşlemeleri göstermez. (Örneğin çoklu çözüm durumlarında veya parça ve modelde zayıf işaret durumları)

Karşılıklı İlişki yöntemi anlaşılması basit, gerçekleştirilmesi kolay, hesabı hızlıdır. Karşılıklı İlişki yönteminde ana problem, ( parça ve model ) ilişki pencereleri arasında yalnızca iki değişim parametresine izin vermesidir. Parça ve model arasındaki dönüklükler, ölçek ve diğer deformasyonlar hesaba katılamaz. Bir görüntüde verilen bir nokta için diğer görüntüde uygun bir nokta dönüklük, ölçek veya deformasyonlar nedeniyle bulunamayabilir [12]. Örneğin; Sol Resimdeki bir objenin uzunluğunun Sağ resimde daha kısa veya uzun görünmesi, Sağ Resimdeki araştırma penceresi içerisinde benzer obje (tekrarlamalı modeller ) olması, gri değerlerdeki düzensizlikler (noise ), veya yarı şeffaf obje yüzeylerinden dolayı eşlemenin birçok durumu olabilir ve çözüm doğru olmayabilir. Bu nedenle Karşılıklı İlişki yöntemi yumuşatılmış görüntülerde ve düşeye yakın görüntülerde kullanılmalıdır. Aşağıda Karşılıklı İlişki yöntemiyle yapılan uygulamalardan bazı görüntüler verilmiştir.



Şekil 2. Karşılıklı ilişki yöntemi kullanılarak yapılmış, doğru sonuç elde edilmiş görüntü eşleme işlemi



Şekil 3. Karşılıklı ilişki yöntemi kullanılarak yapılmış, hatalı sonuç elde edilmiş görüntü eşleme işlemi (yanlış eşleme 'mismatch')

Şekil 2 de görüldüğü gibi, sol görüntüde işaretlenmiş bir bina köşesinin sağ görüntüdeki yeri Karşılıklı İlişki yöntemi kullanılarak eşlenmiş ve sağ görüntüdeki eşleniği doğru olarak bulunmuştur. Buna karşılık Şekil 3 de ise sol görüntüde seçilen obje ( bina bacası ), sağ görüntüdeki araştırma penceresi içerisinde aranırken seçilen objeye benzer başka bir obje (tekrarlı doku) olduğu için yanlış eşleme yaparak hatalı bir sonuç vermiştir.

#### 4.2. En Küçük Kareler Görüntü Eşleme Yöntemi

Seksenli yılların başında geliştirilen En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yöntemi esneklik ve hassasiyet yönünden oldukça etkili bir yöntemdir ve halen pek çok dijital fotogrametrik eşleme görevinde kullanılmaktadır.

En Küçük Kareler Görüntü Eşlemede, Karşılıklı İlişki yönteminde olduğu gibi Sol ve Sağ Resimdeki aynı büyüklükte olan iki görüntü parçasının (ilişki penceresinin)  $f_1[u,v]$  ve  $f_2[u,v]$  gri renk değerleri kullanılır.

Karşılıklı İlişki yönteminden temel farkı Sol ve Sağ Resimdeki ilişki pencereleri arasındaki ilişki katsayısını bulmak yerine  $f_1[u,v]$  ve  $f_2[u,v]$  gri değerler farkları minimum olacak şekilde sağdaki resim deforme edilmesidir. Bu deformasyon bir Affin dönüşümü ile modellenir. Böylece sağ görüntüdeki parça sol görüntüdeki parçaya en iyi eşlenecek şekilde motive edilmiş olur [7].

En Küçük Kareler yaklaşımına dayanan görüntü eşleme, en küçük kareler dengelemesini kullanarak eşleme pencereleri arasındaki gri değerlerin farklılıklarını minimize eder. Bunun için sol görüntüdeki seçilen dörtgen şeklindeki ilişki penceresinin sağ görüntüdeki yaklaşık yeri bilinmelidir. İlk dengelemeden elde edilen kesin değerler bir sonraki dengelemede yaklaşık değerler olarak kabul edilirler ve dengeleme bu şekilde belli bir inceliğe erişinceye kadar devam eder [8].

En Küçük Kareler Eşleme yönteminin matematiksel formülleri aşağıdaki şekilde oluşturulur:

Sol görüntüdeki  $f_1 [u,v]$  gri değerli bir ilişki penceresi ve sağ görüntüde buna karşılık gelen  $f_2 [u,v]$  gri değerli parçanın gerçek görüntü parçası olduğu varsayılırsa teorik olarak;

$$f_1 [u,v] = f_2 [u,v] \quad (2)$$

her zaman birbirine eşit olur.

Bununla beraber her iki görüntü içindeki radyometrik ve geometrik değişimlerin etkileri göz önüne alınırsa (2) deki denklem tutarlı değildir. Bundan dolayı bir hata (düzensizlik) vektörü  $e(x,y)$  eklenir ve (2) numaralı eşitlik

$$f_1 [u,v] - f_2 [u,v] = e [u,v] \quad (3)$$

şeklini alır.

$e[u,v]$  bir hata vektörüdür.  $f_2 [u,v]$  fonksiyonun yeri bir başka eşleme yöntemiyle (Affin dönüşümü veya Karşılıklı İlişki yöntemi ile) tespit edilmelidir. Sağ görüntüde tespit edilen bölgedeki dörtgen yaklaşık bir bölge olacağı için  $f_2^0 [u,v]$  ile gösterilir. Klasik en küçük kareler yaklaşımıyla (8) deki uygun gözlem eşitlikleri lineer hale getirilirse ;

$$f_1 [u, v] - e[u, v] = f_2^0 [u, v] + \frac{\partial f_2^0 [u, v]}{\partial x} dx + \frac{\partial f_2^0 [u, v]}{\partial y} dy \quad (4)$$

denklemini elde edilir.

$e [u,v]$  : gri değerler arasındaki hata vektörü.

$f_1 [u,v]$  : sol görüntüdeki ilişki penceresinin gri değerleri

$f_2^0 [u,v]$  : sağ görüntüdeki ilişki penceresinin gri değerleri

$(f_2^x [u,v])$  : sağ görüntüdeki ilişki penceresinin gri değerlerinin x e göre 1. türevi

$(f_2^y [u,v])$  : sağ görüntüdeki ilişki penceresinin gri değerlerinin y e göre 1. türevi

Model ve görüntü parçasını ilişkilendiren affin dönüşüm denklemi ;

$$X_1 = a_{11} + a_{12} X_2 + a_{13} Y_2$$

$$Y_1 = b_{11} + b_{12} X_2 + b_{13} Y_2 \quad (5)$$

olup, bu denklemin türevi alınırsa dx ve dy bulunur.

$$\begin{aligned} dx &= da_{11} + da_{12} X_2^0 + da_{13} Y_2^0 \\ dy &= db_{12} + db_{12} X_2^0 + db_{13} Y_2^0 \end{aligned} \quad (6)$$

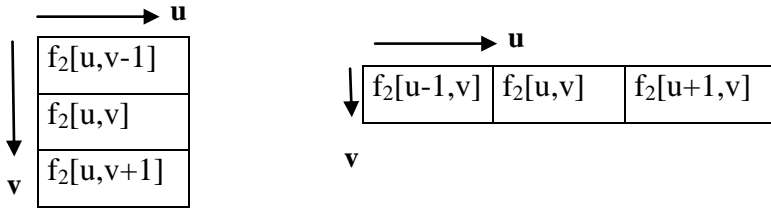
Burada

$$f_2^x = \frac{\partial f_2^0[u, v]}{\partial x} \quad f_2^y = \frac{\partial f_2^0[u, v]}{\partial y} \quad (7)$$

olarak kısaltılmıştır. (2) eşitliğinde (3), (4) eşitlikleri yerine konursa ve bir radyometrik bilinmeyeni ilave edilirse(8) eşitliği elde edilir.

$$f_1[u, v] - e[u, v] = f_2^0[u, v] + f_2^x da_{11} + f_2^x X_2^0[u, v] da_{12} + f_2^x Y_2^0[u, v] da_{13} + f_2^y db_{11} + f_2^y X_2^0[u, v] db_{12} + f_2^y Y_2^0[u, v] db_{13} + r \quad (8)$$

Burada sağ görüntüdeki ilişki penceresinin gri değerlerinin x e ve y ye göre türevleri aşağıdaki gibi alınır.



$$f_2^y = (f_2[u, v+1] - f_2[u, v-1]) * 0.5 \quad (9)$$

$$f_2^x = (f_2[u+1, v] - f_2[u-1, v]) * 0.5 \quad (10)$$

(5) eşitliğindeki  $x$  bilinmeyen vektörü;

$\mathbf{x}^T = [da_{11}, da_{12}, da_{13}, db_{11}, db_{12}, db_{13}, r]$  olarak temsil edilir.

(5) eşitliğin katsayıları  $\mathbf{A}$  matrisinin satırlarını oluşturur. Buradan (8) eşitliği göz önünde bulundurulduğunda,

$$\mathbf{A} = [f_2^x[u, v], f_2^x[u, v].X_2^0[u, v], f_2^x[u, v].Y_2^0[u, v], f_2^y[u, v], f_2^y[u, v].X_2^0[u, v], f_2^y[u, v].Y_2^0[u, v]]$$

$$l = f_1[u, v] - f_2^0[u, v] \quad (11)$$

$\mathbf{A}$  ve  $l$  (11) eşitliği ile bulunur.

Gözlem denklemleri matris gösterimiyle aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$l - e = \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (12)$$

Beklenen değer (E) ve dengeleme modeli Gauss-Markow modelidir.

$$E(e) = 0, E(ee^T) = \sigma_o^2 . P^{-1} \quad (13)$$

Bilinmeyenler

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad \mathbf{P} = \mathbf{I} \quad (14)$$

denklemleriyle çözülür. Dengelemenin hassasiyeti  $m_0$  birim ölçünün karesel ortalama hatası ile ifade edilir.

$$m_0^2 = [\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}] / r \quad (15)$$

$$r = n - u \quad (16)$$

Burada

r: fazla ölçü sayısı

n: gözlem sayısı (dörtgendeki piksel sayısı)

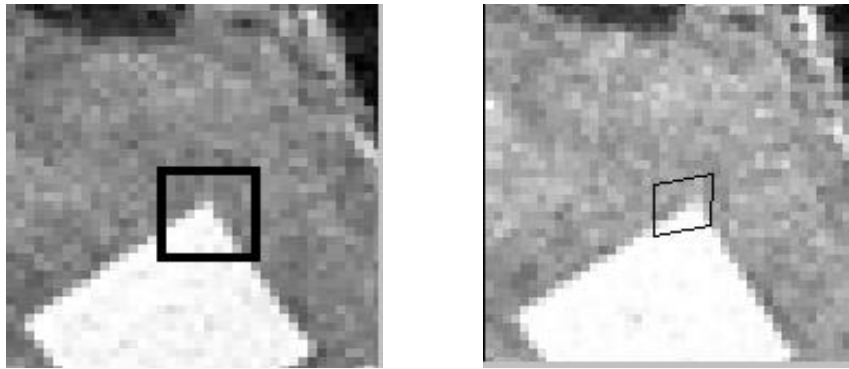
u: dönüşüm parametrelerinin sayısıdır.

Dengeleme sonucu elde edilen  $m_0$  değeri radyometrik değerlere bağlı olduğu için eşlemenin geometrik hassasiyeti hakkında bilgi vermez.  $\mathbf{x}$  vektörüyle elde edilen bilinmeyenler (11) denklemleriyle ifade edilen dx ve dy değerlerinden elde edilir ve sol görüntüdeki noktanın sağ görüntüdeki karşılığı

$$X_2 = X_2^0 + dx \quad Y_2 = Y_2^0 + dy \quad (17)$$

ile bulunur.

En küçük Kareler Görüntü Eşlemesi, veri eşleme problemlerinin tüm çeşidi için çok güçlü bir tekniktir ve radyometrik düzeltmeler ile lokal geometrik görüntü düzeltmelerine izin verir. En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yöntemi uyumlu olarak bilinir, çünkü dengelemenin parametreleri kendi kendine ayarlanır [10]. Örneğin; parametre seti eşlenebilen parçaların karışık sinyal içeriğine göre kurulan çok yaklaşık bir hesap modeline uygun olarak hesaplanabilir ve otomatik düzeltilebilir. Hesaplama sonucunda parametrelere getirilen düzeltmelerden sonra aynı işlem bu düzeltilmiş parametreler kullanılarak tekrar yapılır. Bu tekrarlama bir önceki ve bir sonraki hesap sonucu bulunan düzeltmeler arasındaki fark kalmayınca veya bu fark istenilen bir aralıkta kalıncaya kadar devam eder.



a

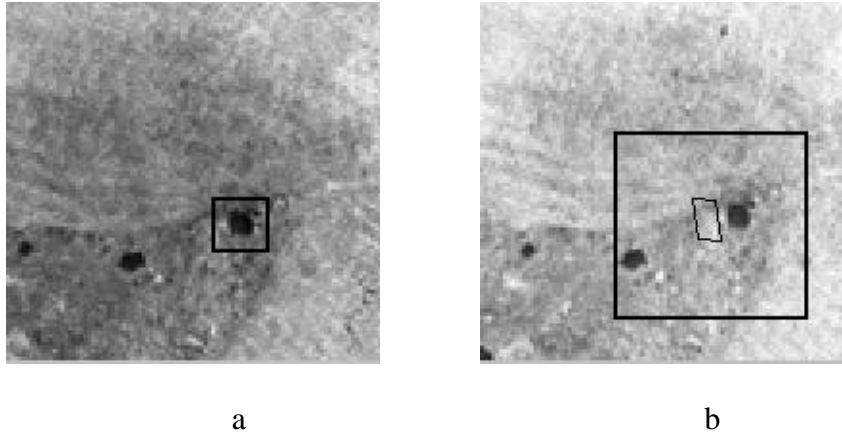
b

**Şekil 4.** En Küçük Kareler Görüntü Eşleme prensibi

a - ) sol görüntü ve bu görüntüde çizilmiş 15x15 piksellik ilişki penceresi

b- ) sağ görüntü ve en küçük karesel eşleme sonunda ilişki penceresinin aldığı son konum





**Şekil 5.** En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yöntemiyle yapılmış hatalı bir eşleme

Şekil 4 de En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yöntemi kullanılarak yapılmış bir görüntü eşleme işlemi görüntüsü görülmektedir. Sol Görüntü üzerinde seçilen bina köşesinin, Sağ Görüntüdeki yeri bulunmuş ve Sol görüntüde çizilen ilişki penceresinin eşlemeden sonra Sağ Görüntüdeki deforme olmuş şekli çizilmiştir. Şekil 5 de ise Sol Görüntüde seçilmiş olan noktanın Sağ görüntüdeki yeri için çok yaklaşık bir değer verilmediği ve Sol Görüntü ve Sağ Görüntüdeki gri değerler farkları çok fazla olduğu için yanlış eşleme yapılmıştır.

## 5. UYGULAMA

Uygulama için Tapu Kadastro Genel Müdürlüğünden alınan 4 fotoğraflık bir blok kullanılmıştır. Blok ile birlikte bu fotoğrafta bulunan 7 adet yer kontrol noktasının koordinatları da alınmıştır. Delphi programında, yazarlar tarafından geliştirilen Alaaddin Dijital Fotogrametri yazılımında uygulamalar gerçekleştirilmiştir [3].

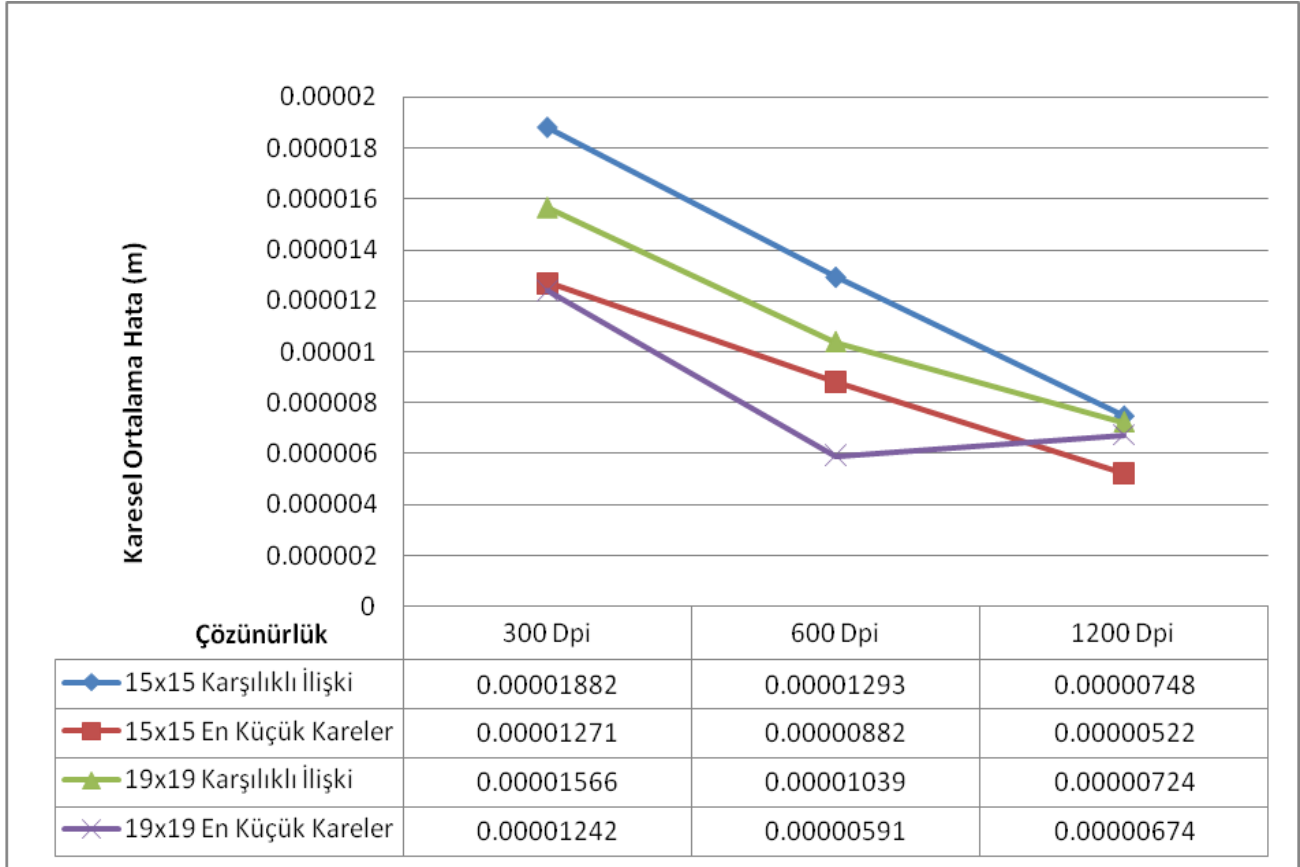
Uygulamanın amacı aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Karşılıklı İlişki ve En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yöntemlerinin hassasiyetlerini araştırmak
- Karşılıklı İlişki ve En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yöntemlerinin hassasiyetlerini karşılaştırmak
- Değişik çözünürlüklerde Karşılıklı İlişki ve En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yöntemlerinin hassasiyetlerini incelemek
- Değişik çözünürlüklerde değişik parça boyutlarıyla Karşılıklı İlişki ve En Küçük Kareler Görüntü eşlemelerinin hassasiyetlerini incelemek

Uygulama işlemi, 3 farklı çözünürlükte taranmış görüntüler üzerinde 2 farklı parça boyutu ve iki farklı görüntü eşleme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Her resim üzerinde 6 bağlantı noktası, ayrıca kontrol noktaları da seçilmiştir. Bu şekilde yapılan ölçüm değerleri Demet dengelemesinde kullanılmıştır. Toplam 12 ayrı şekilde ölçüm yapılmış ve sonuçları aşağıda verilmiştir. Bulunan değerler, hassasiyetleri ve gerçek değerlerinden olan farkları hesaplanarak analiz edilmiştir. Uygulama sonuçlarının analizi için bloğun mutlak doğruluğunu veren aşağıda formülleri verilmiş olan kovaryans matrisi kullanılmıştır.

$$\sigma_i = \sigma_0 \cdot (Q_{ii})^{1/2} \quad (18)$$

Her bir yöntemle uygulama yapılırken aynı yer kontrol, kontrol ve bağlantı noktaları seçilmiştir. Demet dengelemesinde her farklı uygulama için aynı sayıda nokta seçimi yapıldığı için ölçü sayısı ( n=104 ), bilinmeyen sayısı ( u = 87 ) aynıdır. Her uygulama sonucu bulunan karesel ortalama hatalar verilmiştir.

**Tablo 2.**Eşleme yöntemleri, eşleme pencere boyutu ve çözünürlük arasındaki ilişki

### 5.1.Çapraz İlişki ve En Küçük Kareler Görüntü Eşleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Üç farklı çözünürlükte ve iki farklı parça boyutunda aynı noktalar kullanılarak, Çapraz İlişki ve En Küçük Kareler Görüntü Eşleme Yöntemleriyle görüntü eşleme yapılmış, bulunan değerler Demet dengelemesinde kullanılarak test noktalarının dengelenmiş koordinatlarının ortalama hataları ( $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$ ) bulunmuştur.

Karşılıklı İlişki ve En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yöntemleri karşılaştırıldığında Tablo 2 de görüldüğü gibi farklı çözünürlükte ve farklı pencere boyutu kullanılarak yapılan tüm uygulamalarda En Küçük Kareler Görüntü Eşlemesinin Çapraz İlişki yönteminden daha hassas sonuçlar verdiği görülmektedir. Çapraz ilişki yönteminde parça ve model arasındaki dönüklükler, ölçek farklılıkları ve deformasyonların hesaba katılamaz. Bu nedenle de Çapraz İlişki yöntemi ile en fazla 1 piksellik bir eşleme hassasiyetine ulaşılabilir. Buna karşılık En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yönteminde dönüklükler, ölçek farklılıkları ve deformasyonlar Affin dönüşümü ile modellenir ayrıca radyometrik etkilerde hesaba katıldığı için piksel altı hassasiyete ulaşılmaktadır [13].

### 5.2. Çözünürlüğün Sonuçlara Etkisi

Çözünürlüğün artması, görüntüdeki piksel sayısını artırır. Buna karşılık piksel boyutunda küçülme olur. Boyut küçüldükçe resim üzerinde daha fazla detay ve bilgi artışı olacaktır, buda daha iyi nokta seçimi ve ölçümü sağlayacaktır. Piksel boyutu küçük olduğu için yapılacak 1-2 piksellik bir hata sonuçlara fazla etki etmeyecektir.

Ayrıca pikselin arazide kapladığı alanda küçülecektir ve eşleme işleminde kullanılan pencerenin alanı küçülecektir. Küçük bir alanda dönüklükler, ölçek farklılıkları ve deformasyonlar daha az olacağından eşleme işlemi de daha hassas yapılacaktır.

### 5.3. Pencere Boyutunun Eşlemenin Hassasiyetine Etkisi

Yapılan uygulamalarda, hassasiyetin seçilen parça boyutundan etkilendiği görülmüştür. Özellikle Çapraz İlişki yönteminde parça boyutunun artırılması hassasiyeti artırmıştır. Aynı şekilde En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yönteminde de parça boyutunun büyütülmesi hassasiyeti artırmıştır.

Alana Dayalı Görüntü Eşleme yöntemlerinin temel özelliği resimde seçilen bir alan içindeki piksellerin gri değerlerini kullanmalarıdır. Her bir gri değer birer ölçü değeridir. Alan büyüdükçe kullanılan ölçü sayısı da artacaktır.

Çapraz İlişki yönteminde pencere boyutu artırıldığı zaman alan büyüyeceğinden, parça ve model arasındaki dönüklükler, ölçek farklılıkları ve deformasyonlar artacağından bulunan  $\rho$  ilişki katsayısı düşecektir. Bununla beraber kullanılan ölçü sayısı artacağından yanlış eşlemeler daha azalacaktır. En Küçük Kareler Görüntü Eşlemesinde, en küçük kareler yöntemiyle dengeleme yapıldığından ölçü sayısının artırılması, dengelemenin hassasiyetini artıracaktır. Böylece parça ve model arasındaki dönüklükler, ölçek farklılıkları ve deformasyonlar daha iyi modellenenmektedir. Fakat yüksek çözünürlükteki görüntülerde pencere boyutunun büyütülmesi, hassasiyete önemsiz bir değerde etki etmektedir.

### 5.4. Görüntü Eşleme Problemleri

Görüntü eşlemenin doğruluğu ve hassasiyetini aşağıda belirtilen faktörler olumsuz etkiler:

**Geometrik Karışıklık:** Bunlar mevcut eğimler, kırıklıkların sonucu oluşur ve görüntü üzerindeki uçurumlar, kırık hatlar, ağaçlar ve binalar tarafından üretilir. Bunun yanında kamera ekseninin düşeyden sapması ve değişik görüntü distorsiyonlarından dolayı Sol ve Sağ görüntüler üzerinde geometrik yer değiştirmeler ve uyuşmazlıklar meydana gelmektedir.

**Radyometrik değişiklikler:** Bunlar kameranın bakış açısına göre yansımanın değişmesi, atmosferik refraksiyon, görüntünün değişik kısımlarında ki radyometrik farklılıklar, algılayıcı sistemi, analog-dijital dönüştürücülerce yapılan gürültü gibi etmenler nedeniyle oluşur ve görüntü üzerinde yanındaki piksellerin gri düzeyleri ile karşılaştırıldığında oldukça farklı değerlere sahip olan izole edilmiş pikseller topluluğu şeklinde görülürler.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çapraz İlişki yöntemiyle yapılan görüntü eşlemede, 0.5 piksellik eşleme hassasiyeti beklenmektedir [9]. Yapılan uygulamalarda, Çapraz İlişki yönteminden beklenen eşleme hassasiyetine ulaşılmıştır ve Demet dengelemesi sonucu 0.2-0.35 piksellik bir hassasiyete ulaşılmıştır. En Küçük Kareler Görüntü Eşlemesinden 0.3 piksellik eşleme hassasiyet limiti beklenir [9]. Yapılan uygulamalarda bu hassasiyete ulaşılmıştır ve Demet Dengelemesi sonucu 0.15-0.34 piksellik bir hassasiyet elde edilmiştir.

Çapraz İlişki yönteminin avantajları aşağıdaki gibidir.

#### Avantajlar:

- Anlaşılması basit ve uygulanması kolaydır.
- Hesaplama zamanı ve maliyeti düşüktür.

#### Dezavantajlar:

- İki boyutlu bir fonksiyon olup parça ve model arasındaki dönüklük, ölçek farklılıkları ve deformasyonlar hesaba katılamaz
- Araştırma penceresi içerisinde benzer objeler ( tekrarlı doku ) olduğunda, gri değerler farkı çok olursa, yarı şeffaf objelerde hatalı ve zayıf eşlemeler olabilmektedir.
- Sadece 1-2 piksel hassasiyette eşleme yapılabilmekte ve piksel altı hassasiyete ulaşılamamaktadır.

En Küçük Kareler Görüntü Eşlemesinin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibidir.

#### Avantajlar:

- En Küçük Kareler Görüntü Eşlemesi çok farklı şekiller ve varyasyonlarda kullanılabilir. Algoritmik çatı farklı görüntü içeriklerine, aę yapılarına, işlem gereksinimleri ve hassasiyet beklentilerine uyar.
- En Küçük Kareler hesaplama tekniği fotogrametriciler ve jeodezicilerce çok iyi bilinen bir teknik olduğuna için anlaşılır ve uygulaması kolaydır.
- Parça ve model arasındaki dönüklükler, ölçek farkları, deformasyonlar ve radyometrik farklılıklar hesaba katılır ve eşleme hassasiyeti yüksektir. Piksel altı hassasiyette eşleme yapabilmektedir.

#### Dezavantajlar:

- En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yönteminin matematiksel modelinin yüksek dereceli doğrusal olmayışı nedeniyle bu teknik oldukça düşük yakınsama çapına sahiptir. Eğer bilinmeyen hedef parametreleri için yaklaşık değerler mevcut değilse, işlem doğru değerlere ulaşamamaktadır.
- Yüksek hesaplama maliyeti ve çok iyi yaklaşık değerlere ihtiyaç gösterir.
- Düşük işaret veya hiçbir işaret olmaması durumunda sıçramalar yapmaktadır.

Yapılan uygulama sonucunda aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Çapraz İlişi yöntemi düşeye yakın resimlerde, epipolar görüntülerde kullanılmalı ve görüntülerde gri değer farkları (noise) azaltmak için yumuşatılmış görüntüler kullanılmalıdır.
- En Küçük Kareler Görüntü Eşleme yöntemi içinde, yumuşatılmış görüntülerle çalışmalıdır.
- Düşük veya hiçbir işaret olmaması durumunda sıçramalar olmaktadır, bunu önlemek için global (küresel) olarak uygulanan En Küçük Kareler Görüntü Eşleme tekniği kullanılabilir. Burada temel fikir güçlü parçaların zayıf parçalara destek vermek için komşu parçalar arasında geometrik komşuluk şartlarını tesis etmektir.
- Eşleme için ikiden fazla görüntü kullanılmalıdır.(multiphoto matching)
- Otomatik eşlemeyle yan bloklarla beraber alt bloklarla da ilişi sağlanmalıdır.

## 7. KAYNAKLAR

1. Ackerman, F., Ve Hahn, M.,1992, Image Pyramids For Digital Photogrammetry, Stuttgart.
2. Altan, M. O.,1998, Why Digital, Symposium On Digital Photogrammetry, İstanbul.
3. Can, Z. C., Karalar F., Uysal M., Ve Varlık A.,1999, “ The First Turkish Digital Photogrammetry Software , Third Turkish – German Joint Geodetic Days, İstanbul.
4. Toth, C.K., Ve Schenk, T.,1992, Future Based Matching for Automatic Image Record, Department of geodetic science and surveying, Ohio State University.
5. Ecker, R.,1992, “Digital Orthophoto Generation Based On a High Quality DTM , ITC Journal, 1992 – 1, pp. 59-64.
6. Gruen, A.,1998, DTM Generation and Visualization, Syposium on Digital Photogrammetry, 21 – 22 May, İstanbul.
7. Gruen, A., ve Baltsavias, E.,1988, Geometrically Constrained Multiphoto Matching, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 54, No : 5 pp – 633 – 641.
8. Gruen, A., ve Baltsavias, E.,1987, High Image Precision Image Matching For DTM Generation , Photogrammetria ( PRS ), 42, Elsevier Science Publishers, B. V., pp. 97 – 112, Amsterdam.
9. Gruen, A., ve Baltsavias, E.,1985, Adaptive Least Squares Correlation with Geometrical Constraints, Proc. SPIE, Vol. 595, pp. 72 – 82 Cannes, France.
10. Gruen, A., ve Agouris, P.,1994, Linear Feature Extraction by Least Squares Template Matching Constrained by Internal Shape Forces, Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30 Part 3/1 pp. 316 – 323.
11. Kraus, K., 1998, Digital Orthophotos In Connection With GIS , Symposium On Digital Photogrammetry, İstanbul.
12. Tao, Y., Tseng, H., ve Wu, F.,1995, Image Matching by Cross Correlation, GS 728 Digital Photogrammetry.
13. Varlık A.,1999, Digital Fotogrametride Alana Dayalı Görüntü Eşleme Yöntemleri.Yüksek Lisans Tezi, Afyon