

# ORTA VE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ DİJİTAL KAMERALARIN METRİK PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ

F. Karşlı<sup>1</sup>, E. Ayhan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Bölümü, Fotogrametri Anabilim Dalı, Trabzon, {fkararli, eayhan}@ktu.edu.tr

## ÖZET

Dijital kameralar, dijital görüntü teknolojisi içinde önemli bir yer tutmaktadırlar. Bunun yanında bu kameralar, fotogrametrik ölçü amacıyla Fotogrametri ve Uzaktan Algılama bilim dallarında veri elde etme aracı olarak yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu kameraların, teknik performansları ve diğer teknolojilerle ilgili özelliklerinin belirlenmesi için, metrik performanslarının test edilmesi gerekmektedir. Genellikle kamera sistemini en iyi şekilde ifade eden parametrelerin bulunması olarak tanımlanan kalibrasyon işlemi, kamera sistemlerinin metrik potansiyellerini belirlemek ve bu sistemlerdeki sistematik hataları denetlemek, düzeltmek için gerçekleştirilir. Bu çalışmada, orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kamera sistemlerinin geometrik ya da metrik potansiyelleri belirlenmiştir. Çalışma için orta ve yüksek geometrik çözünürlüğe sahip, Kodak DCS460, Nikon Coolpix 990, Olympus E-10 ve Rollei D7 Metric olmak üzere dört farklı kamera sistemi kullanılmıştır. Bu kamera sistemleri ile hem laboratuvar ortamında tesis edilmiş test alanı, hem de gerçek uygulama alanı olarak seçilen bina modeline dayalı olarak geometrik testler yapılmıştır. Bu işlemler sırasında, test alanlarında belirli sayıda kontrol noktası tesis edilerek bu noktalara jeodezik metotlarla koordinat verilmiştir. Aynı noktaların resim koordinatları, fotogrametrik amaçlı olarak resim koordinat ölçüsü yapan programlarla ölçülmüştür. Kameraların geometrik performanslarının belirlenmesi için üç farklı matematik temele dayalı modeller ile çalışılmıştır. Kullanılan metotların tümü kollinearite eşitliklerini baz almakta, fakat içerdikleri sistematik hata kaynaklarını belirleme potansiyelleri bakımından farklı özelliktedirler. Bu modeller ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak kameraların geometrik potansiyellerinin hangi metotla en iyi şekilde belirlenebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca farklı geometrik çözünürlüğe sahip kameralar, sağladıkları geometrik doğruluk yönünden karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Dijital fotogrametri, dijital kamera, kalibrasyon, geometrik doğruluk.

## ABSTRACT

### INVESTIGATIONS INTO METRIC POTENTIALS OF MEDIUM AND HIGH RESOLUTION DIGITAL CAMERAS

Digital cameras have an important place in Digital Imaging Technology. In addition, these cameras are extensively used both in Remote Sensing and Photogrammetry science as a tool of data acquisition. So as to define the technical performance and compare with the other technologies, digital cameras must be tested. Calibration that can be defined as introducing calibration parameters of any camera system is used to designate metric potential, investigate and correct the systematic errors of camera systems. In this contribution, medium and high resolution camera systems' geometric or metric potentials were considered. Four digital camera systems having medium and high resolution, Kodak DCS460, Nikon Coolpix 990, Olympus-E10 and Rollei D7 Metric have been taken into consideration for this study. Geometric tests of these camera systems were carried out both for selected building model in real areas and for the control area set up in laboratory. In the course of the study, adequate number of control points are situated and coordinated in the control areas by geodetic methods. The image coordinates of the same control points were measured by using photogrammetric software's. To evaluate geometric performance of the digital camera systems, three different mathematical models were considered. All used models are based on colinearity equations, but differ from determining parameters in containing systematic error sources. By comparing the results gotten from these models the best model from the point of view geometric performance have been tried to be found out. Besides, the cameras, which have different geometric resolution, were compared with each other from the standpoint of geometric accuracy.

**Keywords:** Digital photogrammetry, digital camera, calibration, geometric accuracy.

## 1. GİRİŞ

Fotogrametrik amaçlar için üretilmemelerine rağmen, film kameralarına oranla çok yoğun bir uygulama avantajına sahip olan dijital kameralar fotogrametride güçlü ve etkin dijital veri elde etme aracı olarak kullanılmaktadırlar (Ahmad ve Chandler, 1999). Dijital kameralar yakın resim fotogrametrisi ve bilgisayarda görüntüleme (machine vision) uygulamalarında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Veri depolama kolaylığı, taşınabilirlikleri ve hızlı veri işleme avantajlarına sahip olmalarından ötürü, bu kameralar endüstri teknolojisi ve yapısal hareketlerin izlenmesinde orta ölçekli film kameralarının yerini almışlardır. Bir çok fotogrametrik uygulamada olduğu gibi, elde edilecek verinin doğruluğu bir çok faktörden biri olan kamera kalibrasyon doğruluğuna bağlıdır. Doğruluğun fazla önemli olmadığı veya obje büyüklüğünün metrelerle ifade edildiği fotogrametrik uygulamalarda doğrusallık eşitliğini basit mercekle distorsiyonu ile kullanmak yeterli olmaktadır. Buna karşın, dijital kamera ile söz konusu ölçü doğruluğunun tespiti için

geniş anlamda distorsiyon ve diğer parametrelerin dikkate alınması gerekir (Shortis vd., 1999). Yakın resim fotogrametrisi dijital kamera teknolojisini kullanarak hızlı bir gelişme göstermektedir. Çünkü dijital kameralar taşınabilir (portable) ve güvenli olmakla birlikte, otomatik görüntü ölçme ve hızlı veri işleme avantajına sahiptirler (Fraser ve Shortis, 1995). Bu kameralar, mimari objelerin ölçümü, yakın mesafeden haritalama, mühendislik uygulamaları ve uzay endüstrisi gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler. Bu tür alanlarda kullanılmaları, kameraların yaygınlaşmasını, çözünürlüklerinin artırılmasını ve uygun fiyatta olmaları sonucunu ortaya çıkarmaktadır (Beyer, 1995). Bir dijital kamera sistemi, bilgisayar donanım ve yazılımı, bir veya birden çok dijital kamera ve kart okuyucu gibi aletlerden oluşmaktadır. Bir dijital kamera ise, CCD ve genel amaçlı kamera gövdesinin oluşturduğu dijital görüntü sinyallerini bilgisayar ortamında rahatlıkla kullanılacak şekilde dönüştürebilen sabit bir dijital görüntüleme cihazını içermektedir. Gün geçtikçe performansları artırılan ve bir takım özellikleri geliştirilen dijital kameralar, gelecekte azalan fiyatları ve artan öznelikleri ile daha da cazip bir konuma gelecekleri açıktır (Li, 1999; Ahmad ve Chandler, 1999). Metrik olmayan 35-mm film kameraların çeşitli uygulamalar için metrik performanslarının bulunması gibi, orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kameraların da metrik açıdan hangi düzeyde olduklarının bilinmesi gereklidir. Optik elemanlı elektronik bir görüntüleme sistemi olan dijital kamera, sadece düşük veya yüksek çözünürlüklü olması nedeniyle değil mercek distorsiyonu, alıcı (sensör) düzlemi deformasyonu ve elektronik transfer hataları gibi görüntülerin metrik kalitesini etkileyen bir takım sistematik bozulmalardan etkilenmektedir. Sonuçta görüntüleri metrik anlamda kullanılabilir hale getirmek için, söz konusu sistematik hataların belirlenmesi, modellenmesi ve düzeltilmesi gerekmektedir. Yukarıda sözü geçen dijital kameralar ile elde edilen dijital görüntülerdeki bozulmalar, film kameraları için geliştirilen mevcut algoritma ve yazılımlarla düzeltilebilmektedir (Fraser ve Shortis, 1995; Peipe, 1995).

Bu çalışmanın amacı, fotogrametrik metotları kullanarak, birçok alanda uygulama imkânı bulan dijital kameraların metrik performanslarını belirlemektir. Çalışmada orta ve yüksek çözünürlüklü sınıfta olan dört tip kamera ile doğruluk araştırması yapılmıştır. Kodak DCS460, Olympus E-10, Nikon Coolpix 990 ve Rollei D7 Metric kameralarıyla sırası ile 20, 9, 8.85 ve 7.3 mm'lik mercekler kullanılmıştır. Dijital kamera performanslarının incelenmesi geometrik anlamda gerçekleştirilmiştir. Geometrik performans belirlenmesinde özellikle kamera mercek sistemini etkileyen ve mercek distorsiyonu olarak adlandırılan bozucu etkiler üzerinde durulmuştur. Bu etkiler farklı matematiksel yaklaşımlarla test edilmiş, hangi metodun kullanılması durumunda daha iyi sonuçların elde edileceği incelenmiştir. Farklı kameralarla alınan görüntüler yardımıyla, kullanılan matematik modellerin karşılaştırılmasının yanında, kameraların birbirlerine göre üstünlükleri de tespit edilmiştir.

## **2. DİJİTAL KAMERA SİSTEMLERİ**

Fotoğrafla ilgilenen birçok disiplin artık dijital kameraları kullanmakta ve kullanıcılarına daha etkin ve hızlı hizmet sunabilmektedirler. Fotogrametrik amaçlı tasarlanmalarına rağmen, özellikle yakın resim fotogrametrisi uygulamalarında dijital kameralar veri elde etme aracı olarak kullanılmaktadırlar. Bunun yanında, son 1-2 yıldır deneme aşamasında olan, havadan dijital kamera ile fotoğraf alımı artık kullanıma sunulmaya başlanmıştır. Böylece hava fotogrametrisi de görüntü alımı aşamasında tamamen dijital teknolojiyi kullanmaya başlamıştır. Dijital kameralar, alıcı piksel sayısı ve görüntüde ürettikleri piksel sayısına göre düşük, orta ve yüksek çözünürlüklü olmak üzere üç ana gruba ayrılırlar. Aslında bu gruplandırmanın, kameraların metrik performansları ve piksel boyutu açısından yapılması daha doğru olacaktır.

Analog görüntü üreten film kameraların aksine, bir dijital kamera bilgisayar ortamında işlenebilecek görüntü sinyallerini sayısal forma dönüştüren elektronik bir ölçme cihazıdır. Dijital kameralar, genel amaçlı kullanılan kamera gövdesi ve merceklerini kullanmalarına karşın görüntü kayıt düzlemi olarak CCD dedektör kullanırlar. CCD dedektörler, görüntünün uygun bir biçimde dijital formda alınmasını sağlar ve alınan görüntü üzerinde görüntü işleme operasyonlarının yapılmasını da kolaylaştırır. Dijital veri çıkışı sağlamak için kamera üzerinde analogdan dijital dönüşürücüsü (A/D) olması gerekir. Kısmen veya tamamen iç yönlendirme elemanlarının bilinmemesi ve görüntü üzerinde çerçeve işaretlerinin olmaması nedeniyle, fotogrametrik açıdan dijital kameralar metrik olmayan kamera olarak adlandırılırlar. Bu kameralarla alınan görüntüler, analog-dijital (frame grabber) dönüştürücü aracılığıyla dijital hale getirilip bilgisayar ortamına aktarılırlar. Dijital kameralar ise direkt olarak dijital sinyaller üretebilecek kapasiteye sahiptirler. Bu kameralarda %90 oranında CCD alıcı kullanılmaktayken, az bir miktarda ise CMOS alıcısı görüntü kaydetme ünitesi olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni CCD alıcıların diğer alıcılarla karşılaştırıldıklarında, düşük maliyetli olmaları, az gürültülü görüntü kaydetmeleri, yüksek dinamik aralıklı olmaları ve güvenli olmaları şeklinde ifade edilebilir (Shortis ve Beyer, 1996).

## **3. MATEMATİK MODELLER**

Matematik model, bir takım fiziksel olaylar serisini açıklayan teorik bir sistem veya soyut bir kavram, bir başka ifade ile de gerçek fiziksel bir olayı matematik yolla tanımlayan bütün yöntemler olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada, DLT (Direkt Lineer Transformasyon), İlave Parametrelili Işın Demetleri Yöntemi (10 parametre), BLUH (Bundle Block Adjustment) Yazılımı olmak üzere 3 farklı matematik model, sözkonusu dijital kameraların geometrik kalibrasyonu ve doğruluklarının tespiti için kullanılmışlardır. Bütün matematik modeller temelde doğrusallık eşitliklerine dayanırken, bünyelerinde farklı sayıda ilave parametre barındırırlar. Burada söz konusu iki metot ilave parametre olarak polinom yaklaşımı kullanırken, sadece Bluh yazılımında kullanılan ilave parametreler kutupsal yapıdadır. Bu matematik modeller

ile fotogrametrik performansın ya da doğruluğun araştırılmasında farklı yapı ve sayıda parametrelerin sonuca etkileri değerlendirilmiştir.

### 3.1. DLT (Direkt Lineer Transformasyon) Matematik Modeli

Direkt lineer transformasyon metodu Abdel Aziz ve Karara tarafından önerilen doğrudan lineer dönüşüm yöntemidir (Abdel Aziz ve Karara, 1971). Bu yöntemin en büyük avantajı, çözümün lineer olması ve yaklaşık değer probleminin olmamasıdır. DLT eşitlikleri ile direkt olarak resim koordinatlarından uzay koordinatlarına ulaşmak mümkündür. 11 parametreye ilave edilmiş parametrelerle birlikte DLT eşitlikleri,

$$x + \Delta x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}, \quad y + \Delta y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (1)$$

şeklinde yazılır. Burada  $x, y$  resim koordinatlarını,  $X, Y, Z$  uzay koordinatlarını ve  $L_1-L_{11}$  DLT katsayılarını göstermektedir. İlave parametrelere ilişkin formüller daha açık yazılırsa,

$$\Delta x = x' (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1 (r^2 + 2x'^2) + 2P_2 x' y' \quad (2)$$

$$\Delta y = y' (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + 2P_1 x' y' + 2P_2 (r^2 + 2y'^2) + A_1 x' + A_2 y' \quad (3)$$

elde edilir. Burada  $x' = x - x_0$ ,  $y' = y - y_0$ ,  $r^2 = x'^2 + y'^2$  'dir.  $x_0, y_0$  ve  $c$  iç yönelme elemanlarını temsil etmektedir. DLT katsayıları ve diğer bilinmeyen parametrelerin çözümü için (asal nokta, distorsiyon vs.) (1) ve (2) formülleri lineerleştirilerek en küçük kareler ilkesine göre yapılır. Burada bilinmeyenler  $L_1 - L_{11}$  ve  $x_0, y_0, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, B_1, B_2$  'dir. Yeni noktaların koordinatlarının bulunması ve DLT metodunun konum doğruluğunun araştırılması için uzay önden kestirme işlemi yapılması gerekir. Her bir resmin DLT parametrelerinin ve ilave parametrelerinin hesaplanmasından sonra (1) eşitlikleri kullanılarak yeni noktaların koordinatları hesaplanabilir. Uzayda bir noktanın konumunun hesaplanabilmesi için en az iki resimde görüntülenmesi gerektiğinden (1) eşitlikleri ikiden fazla resim sayısı ( $m > 2$ ) için düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} L_1^{(1)} - \bar{x}^{(1)} L_9^{(1)} & L_2^{(1)} - \bar{x}^{(1)} L_{10}^{(1)} & L_3^{(1)} - \bar{x}^{(1)} L_{11}^{(1)} \\ L_5^{(1)} - \bar{y}^{(1)} L_9^{(1)} & L_6^{(1)} - \bar{y}^{(1)} L_{10}^{(1)} & L_7^{(1)} - \bar{y}^{(1)} L_{11}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_1^{(m)} - \bar{x}^{(m)} L_9^{(m)} & L_2^{(m)} - \bar{x}^{(m)} L_{10}^{(m)} & L_3^{(m)} - \bar{x}^{(m)} L_{11}^{(m)} \\ L_5^{(m)} - \bar{y}^{(m)} L_9^{(m)} & L_6^{(m)} - \bar{y}^{(m)} L_{10}^{(m)} & L_7^{(m)} - \bar{y}^{(m)} L_{11}^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4^{(1)} - \bar{x}^{(1)} \\ L_8^{(1)} - \bar{y}^{(1)} \\ \vdots \\ L_4^{(m)} - \bar{x}^{(m)} \\ L_8^{(m)} - \bar{y}^{(m)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

eşitliği elde edilir. Böylece çoklu geometrik yapı altında noktaların üç boyutlu koordinatları elde edilmiş olur (Kraus, 1997; Külür, 2002).

### 3.2. İlave Parametrelili Işın Demetleri Matematik Modeli

Fotogrametrik olarak konum belirleme ve kalibrasyon metodlarında en yaygın olarak kullanılan metod ilave parametrelili ışın demetleri yöntemidir (Grün ve Beyler, 2001; Remondino, 2002). Bu yöntemle, belirlenen parametreler obje noktalarının 3 boyutlu koordinatları ve kamera parametreleridir (iç ve dış yönelmeler). Işın demetleri yönteminin matematik temeli kolinarite şartına dayanır. İlave parametrelerin de dikkate alındığı bu yöntemin matematik modeli (5) eşitlikleri ile ifade edilmektedir.

$$x - x_0 = -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{21}(Y - Y_0) + m_{31}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x = -c \frac{U}{W} + \Delta x \quad (5)$$

$$y - y_0 = -c \frac{m_{12}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{32}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y = -c \frac{V}{W} + \Delta y$$

Burada;

- $x, y$ : P noktasının görüntü koordinatları,
- $x_0, y_0$ : asal noktanın (PP) görüntü koordinatları,
- $c$ : kamera sabiti,
- $X, Y, Z$ : P noktasının obje koordinatları,
- $X_0, Y_0, Z_0$ : izdüşüm merkezinin obje uzayı koordinatları,

•  $m_{ij}$ : resim koordinat sistemi ile obje uzayı arasındaki dönüklük matrisinin (M) elemanlarıdır. Kolarite modeli, fiziksel olarak gerçeği yansıtmaması açısından bazı sistematik hataları içerecek şekilde genişletilir. Bu sistematik hataların tümüne birden ilave parametre denir ve görüntü koordinatlarına düzeltme olarak getirilirler. Fotogrametride yaygın olarak kullanılan ilave parametre seti üç iç yönelme parametresi ( $\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta c$ ), ölçek faktörü ( $B_1$ ), resim koordinat eksenlerinin dik olmaması ( $B_2$ ), çapsal distorsiyon parametreleri ( $K_1, K_2, K_3$ ) ve teğetsel distorsiyon parametrelerinden ( $P_1, P_2$ ) oluşur. (5) eşitliklerindeki  $\Delta x$  ve  $\Delta y$ ,

$$\begin{aligned}\Delta x &= -x_0 - \frac{\bar{x}}{c} \Delta c - \bar{x}A + \bar{y}B + \bar{x}r^2 K_1 + \bar{x}r^4 K_2 + \bar{x}r^6 K_3 + \left(2\bar{x}^{-2} + r^2\right)P_1 + 2P_2 \bar{xy} \\ \Delta y &= -y_0 - \frac{\bar{y}}{c} \Delta c - \bar{x}B + \bar{y}r^2 K_1 + \bar{y}r^4 K_2 + \bar{y}r^6 K_3 + 2P_1 \bar{xy} + \left(2\bar{y}^{-2} + r^2\right)P_2 \\ \bar{x} &= x - x_0; \quad \bar{y} = y - y_0, \quad r = \sqrt{\bar{x}^{-2} + \bar{y}^{-2}}\end{aligned}\quad (6)$$

şeklinde gösterilebilir (Remondino, 2002).

Işın demetleri eşitliğinin çözümü ile ilave parametreler, kamera konum ve dönüklükleri ve obje koordinatları belirlenir. Her bir resim noktası için iki adet kolarite eşitliği yazılır. Bütün noktadaki eşitlikler bir bütün olarak ele alınır ve bilinmeyenler çözülür. (5) eşitlikleri bilinmeyenlere göre doğrusal değildir. Bu yüzden bilinmeyenlerin çözümü için doğrusallaştırma yapmak gerekir. Doğrusallaştırma için 1. derece Taylor serisi kullanılır. Sistemin çözümü en küçük kareler ilkesine (Gauss-Markov modeli) göre yapılır. En küçük kareler çözümünde bilinmeyenlerin yaklaşık değerlerine ihtiyaç vardır. Bunun için çözüm öncesinde yaklaşık değerler belirlenmelidir (Remondino, 2002; Karşlı, 2004).

### 3.3. BLUH Yazılımı Matematik Modeli

BLUH, kolinearite eşitlikleri temeline dayanan blok dengeleme yazılımıdır. Programda resim koordinat ölçmeleri ve varsa kontrol noktası ölçümleri veri olarak kullanılır. Resimlerin iç yönelmesi yaklaşık olarak bilinmelidir. Kalibrasyon işlemi ile bu yönelmeler kesinleştirilir. Bilinmeyenler resim yönelmeleri, obje koordinatları ve ilave parametrelerdir. Dengeleme aşamasında en küçük kareler ilkesi ile düzeltmelerin kareleri minimize edilir. Kolinearite eşitlikleri lineer olmadığından, Newton metodu iteratif çözüm için kullanılır. Bu durumda bilinmeyenlerin yaklaşık değerlerinin bilinmesi gerekir. Görüntü yönelmeleri ile ilgili yaklaşık değerler programın RESEC modülü ile her bir resim için belirlenir. İlk iterasyonla yaklaşık görüntü yönelmeleri ve görüntü koordinatlarından yaklaşık obje koordinatları hesaplanır. Kalibrasyon ile blok geometri kullanılarak ilave parametreler belirlenir. Kalibrasyon aşamasında ilave parametrelerinden sadece 15 adet kullanılır. BLUH yazılımında kullanılan ilave parametreler DLT ve ışın demetleri algoritmalarında kullanılan parametreler gibi polinomyal değildir.  $x$  ve  $y$  koordinat yönündeki ilave parametre seti eşitlikleri, orijinalde Ebner tarafından geliştirilen eşitliklere dayanmaktadır (Ebner, 1976). Buna göre bu yazılımda kullanılan ilave parametre eşitlikleri,

$$\begin{aligned}x' &= x - yP_1, \quad y' = y - xP_1; \quad x' = x - xP_2, \quad y' = y + yP_2 \\ x' &= x - x \cos 2b P_3, \quad y' = y - y \cos 2b P_3; \quad x' = x - x \sin 2b P_4, \quad y' = y - y \sin 2b P_4 \\ x' &= x - x \cos b P_5, \quad y' = y - y \cos b P_5; \quad x' = x - x \sin b P_6, \quad y' = y - y \cos b P_6; \\ x' &= x + y \cos b P_7, \quad y' = y - x \cos b P_7; \quad x' = x + y \sin b P_8, \quad y' = y - x \sin b P_8 \\ x' &= x - x(r^2 - 16384)P_9, \quad y' = y - y(r^2 - 16384)P_9 \\ x' &= x - x \sin(r \cdot 0.049087)P_{10}, \quad y' = y - y \sin(r \cdot 0.049087)P_{10} \\ x' &= x - x \sin(r \cdot 0.098174)P_{11}, \quad y' = y - y \sin(r \cdot 0.098174)P_{11}; \\ x' &= x - x \sin 4b P_{12}, \quad y' = y - y \sin 4b P_{12}; \quad x' = x + x P_{13}, \quad y' = y + y P_{13} \\ x' &= x + x P_{14}, \quad y' = y; \quad x' = x, \quad y' = y + y P_{15}\end{aligned}\quad (7)$$

şeklinde yazılabilir (Jacobsen, 2002). Burada,

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad b = \arctan \frac{y}{x}\quad (8)$$

şeklinde ifade edilir.  $P_7$  ve  $P_8$  teğetsel distorsiyonu,  $P_9, P_{10}$  ve  $P_{11}$  çapsal distorsiyonu,  $P_{13}$  odak uzaklığını,  $P_{14}$  ve  $P_{15}$  asal noktanın sırasıyla  $x$  ve  $y$  koordinatının temsil etmektedir (Kraus, 1997; Jacobsen, 2002).

## 4. KULLANILAN KAMERALAR VE TEST ALANLARI

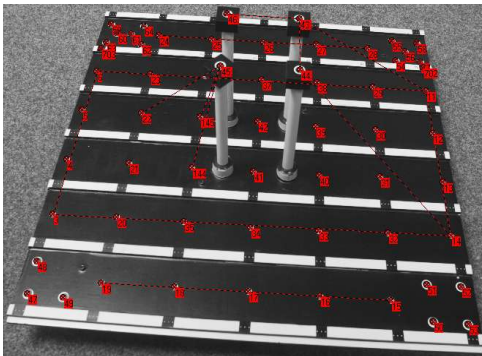
Bu çalışmada, orta ve yüksek sınıfta geometrik çözünürlüğe sahip dört farklı dijital kamera kullanılmıştır. Çalışma sırasında bu kameralarda sabit mercek sistemi kullanılmaktadır. Kullanılan kameraların genel olarak teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

	Adı	Geometrik Çözünürlük (piksel)	Piksel Sayısı	Piksel Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	CCD Boyutu (mm)	Mercek (mm)
Kameralar	Kodak DCS460	3060×2036	6230160	9.0	27.6×18.4	20
	Olympus E-10	2240×1680	3763200	3.9	8.8×6.6	8.9
	Nikon Coolpix 990	2048×1536	3145728	3.7	7.6×5.7	8.8
	Rollei D7 Metric	1280×1024	1310720	6.7	8.6×6.9	7.3

**Tablo 1. Çalışmada kullanılan kameraların teknik özellikleri**

Fotogrametride dijital kameraların özellikle mimari alanda kullanılmaları nedeniyle, bu kameraların söz konusu alanda hangi doğrulukla ölçü yaptıklarının test edilmesi gerekir. Bu sebeple, her bir matematiksel yaklaşım ile laboratuvar test ağı ve seçilen bir uygulama alanında farklı kameralarla alınan görüntülerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Laboratuvar ve seçilen uygulama alanında her bir kamera için iki farklı test alanı belirlenmiştir. Bu alanlarda tesis edilen noktaların jeodezik koordinatları hesaplandıktan sonra, farklı çekim noktalarından görüntü alımı yapılarak elde edilen veriler, çeşitli nokta kombinasyonları ile sözü edilen üç metotla değerlendirilmiştir. Bütün noktaların resim koordinatları DPLX yazılımı ile otomatik olarak ölçülmüştür. Bu yazılım ile resim koordinatları piksel koordinat sisteminde ölçülmekte ve BLUH yazılımına ait BLPRE modülü kullanılarak metrik sisteme (mm) dönüştürülmektedir. DPLX yazılımında piksel koordinatları manuel veya otomatik olarak ölçülebilmektedir.

Çalışmada test ağı olarak, laboratuvar ortamında tesis edilmiş 36 noktalı bir ağ (Test Alanı 1) kullanılmıştır (Şekil 1). Uygulama alanı için her bir kamera ile değerlendirme yapmak üzere 45 (Test Alanı 2) tespit edilmiştir (Şekil 2). Bütün test alanlarındaki noktaların obje uzayı koordinatları jeodezik önden kestirme metodu ile belirlenmiş ve bu noktalar matematiksel metotlar ile dengeleme aşamasında hatasız olarak kabul edilmiştir.



**Şekil 1. Test Alanı 1**



**Şekil 2. Test Alanı 2**

Test Alanı 1 için Kodak DCS460 dijital kamerası ile 10 farklı istasyondan resim çekimi yapılmıştır. Burada 5 ve 10’lu istasyon sayısı kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Aynı test alanına Nikon Coolpix 990 kamerası ile 4 ve 8 farklı istasyondan, Rollei D7 Metric kamerası ile ise 6 ve 12 farklı istasyondan çekim yapılmıştır. Burada hedeflenen amaç, istasyon sayısındaki artışın geometrik doğruluk üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Ayrıca aynı test alanlarında farklı tip kameraların geometrik doğruluklarının irdelenmesi amaçlanmıştır. Çekilen resimler için 20 mm (Kodak), 8.85 mm (Nikon Coolpix) ve 7.3 mm (Rollei) boyunda mercekler kullanılmıştır. Test Alanı 2 bina modeli üzerinde işaretli test alanının görüntüleri 3’lü konvergent şeklinde çekilmiştir. Resim koordinat ölçüsünün otomatik olarak yapılabilmesi için, noktalar dairesel bir biçimde işaretlenmiştir. Resimler Kodak DCS460 kamerasıyla 20 mm, Olympus E-10 kamerasıyla 8.9 mm mercek kullanılarak çekilmiştir.

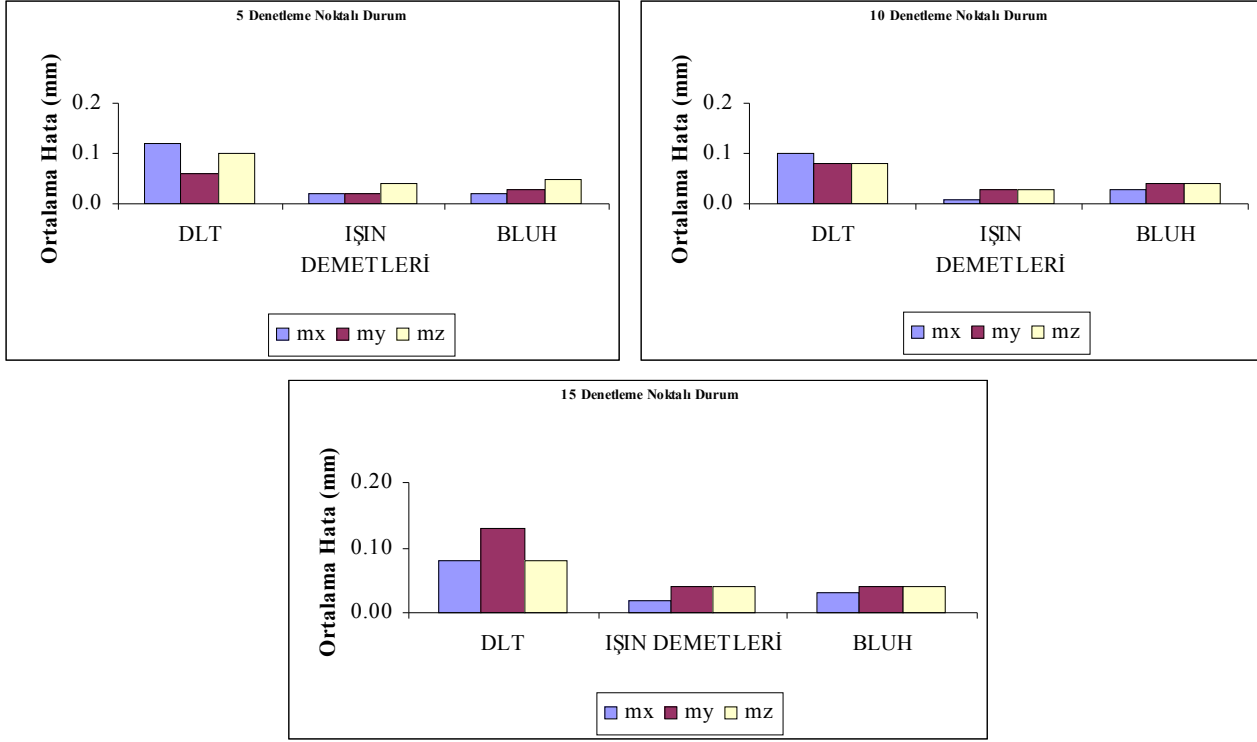
## 5. UYGULAMA

Dijital kameraların fotogrametrik potansiyellerinin araştırılması amacıyla yapılan bu çalışmada, seçilen dijital kameraların geometrik testleri için üç farklı metot ve iki test alanı kullanılmıştır. Söz konusu metotlarla, Kodak DCS 460 dijital kamerası için 20 mm’lik mercek kullanılmıştır. Bu kameranın dışında farklı geometrik çözünürlükteki kameraları karşılaştırmak amacıyla Olympus E-10, Nikon Coolpix 990 ve Rollei D7 Metric olmak üzere üç ayrı kamera da ilaveten kullanılmıştır. Bu üç kamera ile sadece tek bir test alanında ve Işın Demetleri metodu kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Test alanları laboratuvar ve uygulama ortamı olmak üzere iki ayrı gruba ayrılmıştır.

### 5.1. Kodak DCS 460 Kamerası Test Alanı 1 Bulguları

Bu kameranın testi için laboratuvar ortamında tesis edilmiş test alanı kullanılmıştır. Söz konusu test alanı için DLT, Işın Demetleri ve Bluh matematik modeli ile çözümler yapılmıştır. Farklı metotlar ile bütün kontrol noktalarının kullanılması

ya da farklı denetleme nokta sayısı (5, 10 ve 15) grupları kullanılarak doğruluk araştırması yapılmıştır. Farklı çekim istasyon sayıları dikkate alınarak (5 ve 10 istasyon), 20 mm'lik mercek için bütün noktaların kontrol noktası ve 5, 10 ve 15 denetleme noktası olması durumunda hesaplanan x, y ve z yönündeki ortalama nokta konum hataları her bir metot için ayrı ayrı elde edilmiştir. Hesaplanan en iyi doğruluklarla ilgili grafikler sırasıyla Şekil 3'de gösterilmiştir.

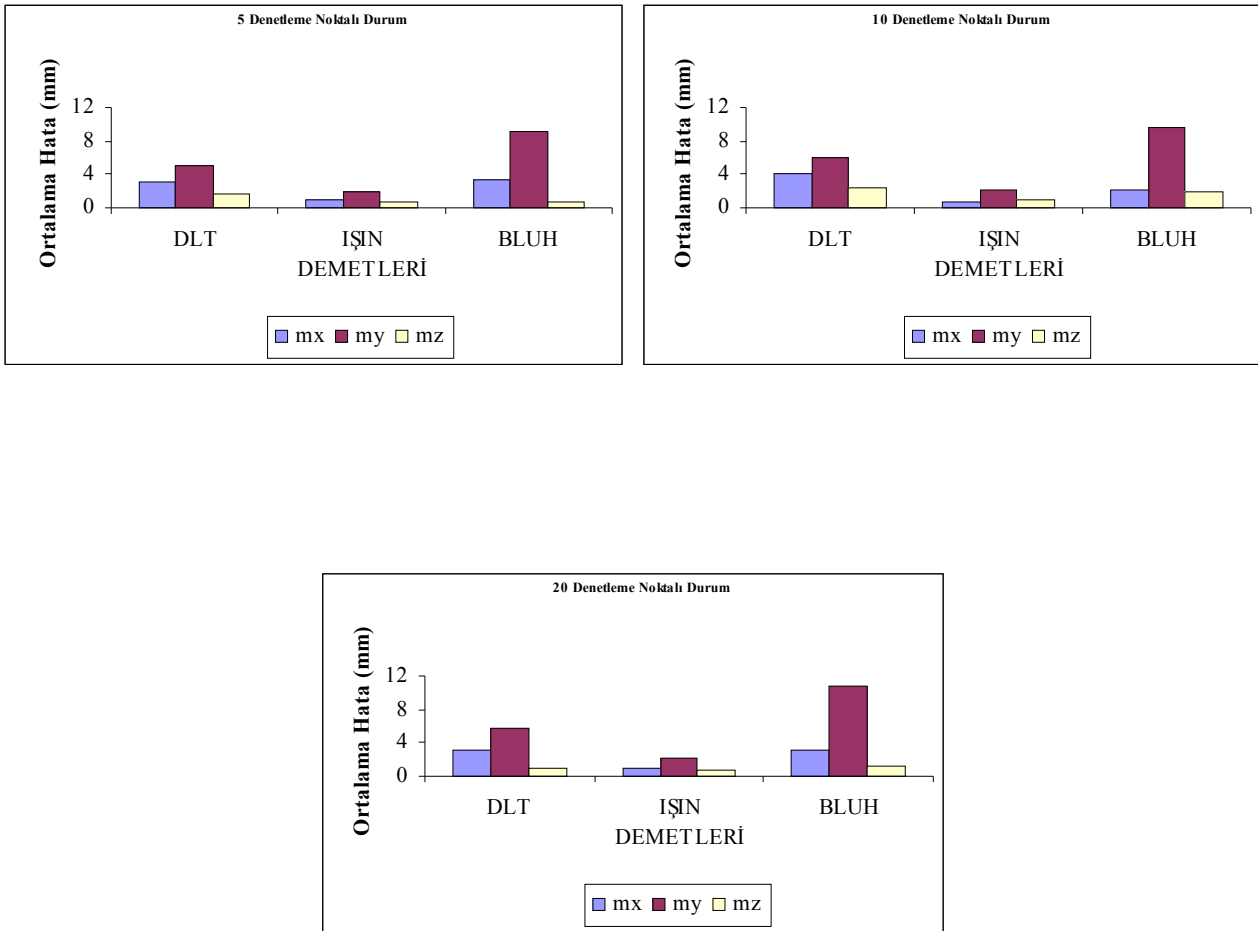


Şekil 3. 5, 10 ve 15 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar

Şekil 3 incelendiğinde, bütün denetleme nokta gruplarında ortaya çıkan sonuçlara göre Işın Demetleri ve Bluh matematik modellerinin daha duyarlıklı sonuçlar ortaya koydukları görülmektedir. Ancak üç eksen yönünde elde edilen sonuçlardan Işın Demetleri yönteminin daha hassas olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak kullanılan bütün metotlarla ortaya çıkarılan sonuçlar arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Tüm denetleme nokta gruplarında DLT metodu diğer iki metoda göre daha duyarlı sonuçlar vermiştir. Bu, seçilen test alanındaki noktaların bir düzlem oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

## 5.2. Kodak DCS 460 Kamerası Test Alanı 2 Bulguları

Bu kameranın uygulama alanındaki testi için model bir bina test alanı olarak kullanılmıştır. Söz konusu test alanı için DLT, Işın Demetleri ve Bluh matematik modeli ile çözümler yapılmıştır. Farklı metotlar ile bütün kontrol noktalarının kullanılması ya da farklı denetleme nokta sayısı (5, 10 ve 20) grupları kullanılarak doğruluk araştırması yapılmıştır. Hesaplanan en iyi doğruluklarla ilgili grafikler sırasıyla Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 5, 10 ve 20 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar

Şekil 4 incelendiğinde, bütün denetleme nokta gruplarında ortaya çıkan sonuçlara göre Işın Demetleri matematik modelinin daha duyarlıklı ve üstün sonuçlar verdiği görülmektedir. Üç eksen yönünde de edilen sonuçlardan Işın Demetleri yönteminin çok daha hassas olduğu tespit edilmiştir. Tüm denetleme nokta gruplarında Bluh metodu diğer iki metoda göre duyarsız sonuçlar vermiştir.

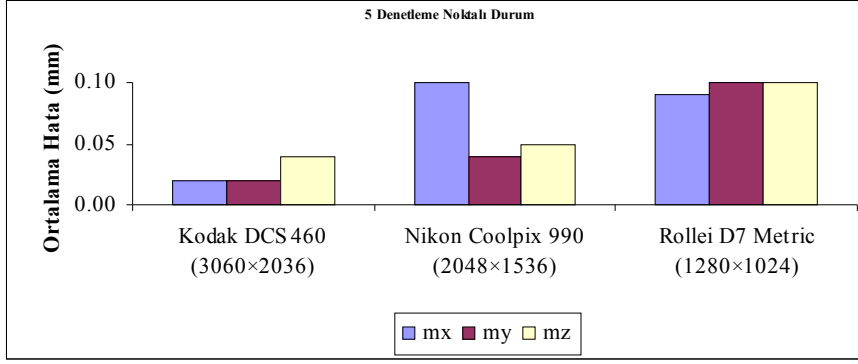
Her iki test alanında seçilen kamera ve değerlendirme yöntemleri ile her üç eksen (x, y ve z) yönünde elde edilen en iyi ortalama hata değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Burada sadece Kodak kamerası için her üç yöneme göre doğruluklar hesaplanmış, diğer kameralar için doğruluklar, en ideal yöntem olarak belirlenmesinden dolayı sadece Işın Demetleri yöntemine göre değerlendirilmiştir.

Birim: mm	Test Alanı 1									Test Alanı 2					
	Kodak DCS460			Nikon Coolpix 990			Rollei D7 Metric			Kodak DCS460			Olympus E-10		
Yöntem	$m_x$	$m_y$	$m_z$	$m_x$	$m_y$	$m_z$	$m_x$	$m_y$	$m_z$	$m_x$	$m_y$	$m_z$	$m_x$	$m_y$	$m_z$
DLT	0.1 1	0.08	0.11	-	-	-	-	-	-	3.14	4.96	0.95	-	-	-
Işın Demt.	0.0 1	0.02	0.03	0.03	0.02	0.04	0.06	0.09	0.09	0.74	1.82	0.71	0.29	1.45	0.37
BLUH	0.0 2	0.03	0.04	-	-	-	-	-	-	2.14	9.06	0.80	-	-	-

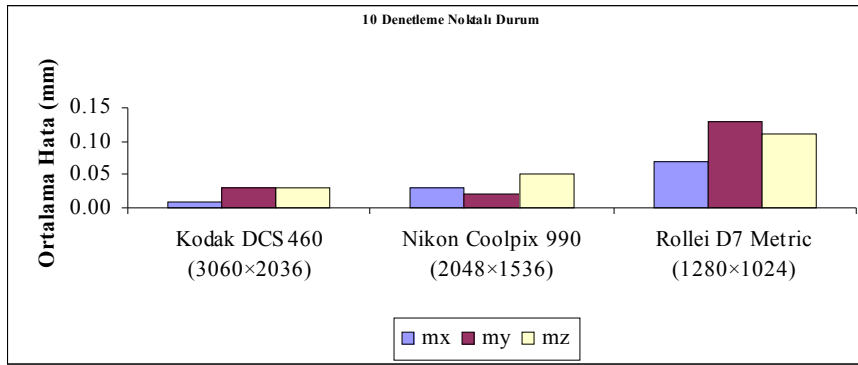
Tablo 2. Farklı kameralarla elde edilen en iyi doğruluklar

### 5.3. Test Alanı 2 Farklı Kameralarla Elde Edilen Bulgular

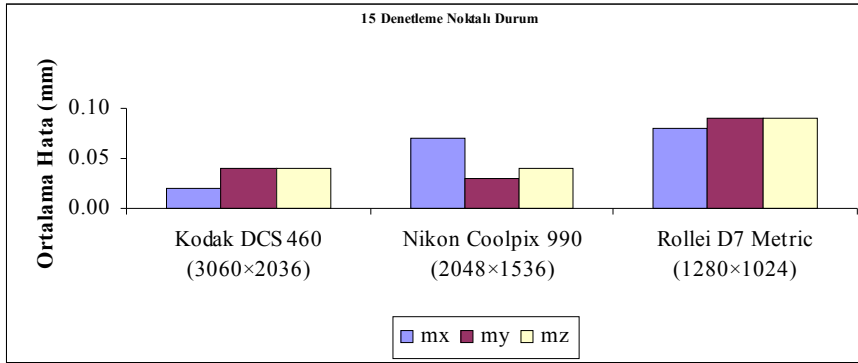
Geometrik çözünürlük ve piksel büyüklükleri farklı kameraların, bu özellikleri ve doğruluk yönünden karşılaştırılması için, laboratuvar ve uygulamada seçilen alanlarda geometrik açıdan değerlendirmeler yapılmıştır. Bunun için Test Alanı 1 ve 2 kullanılarak dört ayrı kamera (Kodak DCS460, Olympus E-10, Nikon Coolpix 990 ve Rolleil D7 Metric) ile çözümler yapılmıştır. Bu değerlendirmelerde İlave Parametrelil Işın Demetleri metodu kullanılmıştır. Test Alanı 1'de farklı kameralarla değerlendirme yapılarak bu kameraların doğruluk yönünden karşılaştırması yapılmıştır. Farklı denetleme nokta gruplarına göre, bu kameralarla üç eksen yönünde elde edilen en iyi doğruluklar Şekil 5-7 grafiklerinde gösterilmiştir. Bu grafiklerde kameraların doğrulukları seçilen denetleme nokta grupları dikkate alınarak irdelenmiştir.



Şekil 5. 5 denetleme noktalı durumda üç farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar



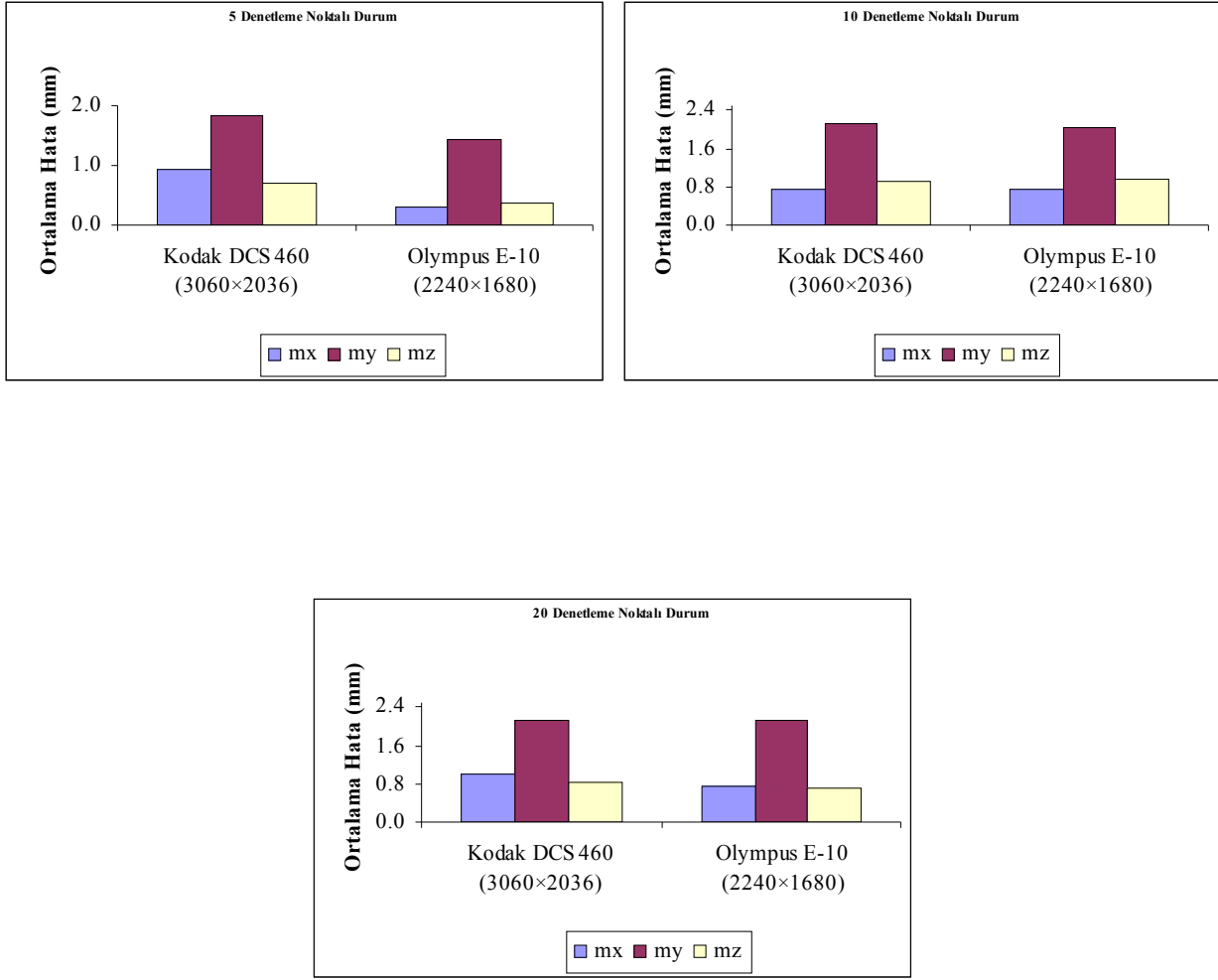
Şekil 6. 10 denetleme noktalı durumda üç farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar



Şekil 7. 15 denetleme noktalı durumda üç farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar

Şekil 5-7 incelendiğinde, bütün denetleme gruplarında her üç eksen yönünde geometrik çözünürlüğü en büyük olan Kodak kamerasının daha duyarlıklı sonuçlar verdiği görülmektedir.





Şekil 8. 5, 10 ve 20 denetleme noktalı durumda iki farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar

Test Alanı 1’de olduğu gibi, Test Alanı 2’de de iki farklı kamerayla değerlendirme yapılarak bu kameraların doğruluk yönünden karşılaştırması yapılmıştır. Farklı denetleme nokta gruplarına göre, bu kameralarla üç eksen yönünde elde edilen en iyi doğruluklar Şekil 8 grafiklerinde gösterilmiştir. Bu grafiklerde kameraların doğrulukları seçilen denetleme nokta grupları dikkate alınarak irdelenmiştir. Şekil 8 incelendiğinde, bütün denetleme gruplarında her üç eksen yönünde, iki kameranın aynı düzeyde duyarlıklı sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR

Her iki test alanında, kullanılan matematik değerlendirme metotları arasında en iyi sonuçlar Işın Demetleri yöntemiyle elde edilmiştir. Bluh matematik modeli özellikle laboratuvar ortamında yapılan testlerde yüksek doğrulukta sonuçlar üretmiştir.

Kameraların metrik performanslarını etkileyen bir diğer önemli faktör resim çekim geometrisidir. İyi bir geometrik yapı ile hassas sonuçlar elde edilebilir. Bu amaçla değişik kombinasyonlarda resim çekimi yapılarak, çekim geometrisinin doğruluğa etkisi incelenmiştir. İncelemelerden, çekim istasyon sayısının fazla olmasının metrik doğrulukta önemli bir ilerleme sağlamadığı gözlenmiş, bunun yerine ölçülecek objeyi iyi bir şekilde kapsayacak çekim geometrisinin yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Nitekim, yapılan değerlendirmelerden, 3 ile 5, 5 ile 10, 4 ile 8 ve 6 ile 12 gibi farklı çekim istasyonu sayı gruplarından elde edilen sonuçlar arasında önemli bir fark ortaya çıkmamıştır. Bu sonuç maliyet, zaman ve doğruluk göz önüne alındığında yeterli sayıda çekim istasyonu kullanılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Fotogrametrik olarak hesaplanan noktaların konum doğruluğu, denetleme nokta sayısının artması ve kontrol nokta sayısının azalması ile ters orantılı olarak değişmektedir. Genel olarak yapılan testlerde doğruluk artışının, denetleme nokta sayının azaltılması ile sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Yapılan değerlendirmeler sonucu, piksel büyüklüğü ile piksel sayısının geometrik doğruluk üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmıştır. Aynı test alanlarında farklı kameraların kullanımı ile, piksel boyutu büyük olmasına rağmen piksel sayısının fazla olduğu Kodak kamerası, diğer kameralara göre daha iyi sonuç vermiştir. Buradan, piksel sayısının piksel boyutuna göre geometrik doğruluk üzerinde daha çok etkili olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Uygulamalardan, dijital kameraların mimari ve tarihi objelerin rölevesi, arkeoloji, endüstri, tıp, köprü ve baraj deformasyonu belirleme ve uzay sanayi gibi farklı doğruluk gereksinimi olan tüm alanlarda kullanılabileceği sonucu ortaya konulmuştur. Birçok alanda olduğu gibi, özellikle objelerin üç boyutlu modellerinin üretimi için temel veri kaynağı olarak kullanılan dijital kameralar, sağladıkları doğruluk ile üç boyutlu model üretimi alanında da kullanılabilmektedirler.

Dijital kameralar klasik metotlara oranla fotogrametri alanında, kullanım kolaylığı, ölçü zamanının azaltılması, insan gücünden tasarruf sağlanması, hız ve doğruluk açısından önemli katkılar ortaya koymaktadır. Çalışma sonucunda, metrik olmayan ve kamera bilgileri (iç yöneltilme elemanları) global anlamda verilen dijital kameraların, duyarlı ölçümlerde kullanılabilmeleri için mutlaka kalibre edilmeleri gerekliliği belirlenmiştir. Yapılan bu çalışma, test edilen orta ve yüksek çözünürlüğe sahip dijital kameraların fotogrametrik uygulamalar için son derece uygun olduğunu göstermiştir.

## KAYNAKLAR

**Abdel-Aziz, Y.I. ve Karara, H.M., 1971.** *Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry*, Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, Urbana, Illinois, 1-8.

**Ahmad, A. ve Chandler, J.H., 1999.** *Photogrammetric Capabilities of the Kodak DC40, DCS420 and DCS460 Digital Cameras*, Photogrammetric Record, 16(94), 601-615.

**Beyer, H.A., 1995.** *Digital Photogrammetry in Industrial Applications*, International Archives of Photogrammetry and RemoteSensing, 30, Part 5W1, 373-378.

**Ebner, H., 1976.** *Self-Calibrating Block Adjustment*, Congress of the International Society for Photogrammetry, Invited Paper of Commission III, Helsinki, Finland.

**Fraser, C.S. ve Shortis, M.R., 1995.** *Metric Exploitation of Still Video Imagery*, Photogrammetric Record, 15(85), 107-122.

**Grün, A. ve Beyer, H.A., 2001.** *System Calibration Through Self-Calibration*, Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision, Springer Series in Information Sciences 34, Grün, Huang (Eds.)

**Jacobsen, K., 2002.** *Bluh User Manuel*, Institute of Photogrammetry and GeoInformation, Hannover.

**Karışlı, F., 2004.** *Orta ve Yüksek Çözünürlüklü Dijital Kameraların Fotogrametrik Potansiyellerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

**Kraus, K., 1997.** *Photogrammetry, Advanced Methods and Applications*, Volume II, Dümmler Verlag, Bonn, Germany.

**Külür, S., 2002.** *Fotogrametrik Veri Elde Etme Sistemlerinin Kalibrasyon Yöntemleri*, Ders Notları, İTÜ, İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Böl., İstanbul.

**Li, X., 1999.** *Photogrammetric Investigation Into Low Resolution Digital Camera Systems*, PhD, the University of New Brunswick, Canada.

**Peipe, J., 1995.** *Photogrammetric Investigation of a 3000×2000 Pixel High Resolution Still Video Camera*, International Archives of Photogrammetry and RemoteSensing, 30, Part 5W1, 31-35.

**Remondino, F., 2002.** *3-D reconstruction of articulated objects from uncalibrated images*, Three-Dimensional Image Capture and Application V, SPIE Electronic Imaging, Proc. of SPIE 4661, San Jose, USA.

**Shortis, M.R. ve Beyer, H.A., 1996.** *Sensor Technology for Digital Photogrammetry and Machine Vision*, Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Atkinson K. B. (Ed.), Whittles Publishing, UK, 106-155.

**Shortis, R.M., Robson, S. ve Beyer, H.A., 1999.** *Extended Lens Model Calibration of Digital Still Cameras*, ISPRS Commission V WG V/1, Close Range Imaging and Metrology.

