

# **YAKIN RESİM FOTOGRAMETRİSİNDE METRİK OLMAYAN DİJİTAL KAMERA KULLANILARAK İNSAN YÜZÜNÜN SAYISAL YÜZEY VE KABARTMA MODELİNİN ELDE EDİLMESİ**

(CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRIC DETERMINATION OF DIGITAL TERRAIN  
AND RELIEF MODEL OF THE HUMAN FACE WITH USING NON-METRIC DIGITAL  
CAMERA)

**Bahadır ERGÜN**

## **ÖZET**

Fotogrametride dijital amatör CCD (Charge Couple Devices) kameralar, artık güncel olarak pek çok yersel fotogrametrik uygulamada kullanılmaktadır. Bu çalışmada, fotogrametrinin temelinde yatan amaç olan üç boyutlu sayısal arazi modelinin resimler yardımı ile elde edilmesi çalışmasını oluşturan klasik fotogrametrinin iş akışını oluşturan amaç, çalışma, sonuç imgelerinden farklı olarak gerçek bir insan yüzüne ait sayısal arazi modelinin yersel fotogrametri yöntemleri kullanılarak modellenmesi ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan dijital amatör kamera ile tamamen Harita Genel Komutanlığında üretilmiş olan yüze yönelik yersel kalibrasyon alanı ve Harita Genel Komutanlığı Kartoğrafya Dairesi Başkanlığı Kabartma Harita Şubesinde bulunan Kabartma Harita Üretim Sistemi (CNC ya da Dik İşleme Merkezi) bu çalışmanın içindeki önemli detayları oluşturmaktadır. Bu çalışma, Harita Genel Komutanlığı bünyesinde kuruluşundan bu gününe kadar yersel fotogrametri ile yapılan önemli uygulamalardan birisini oluşturmaktadır.

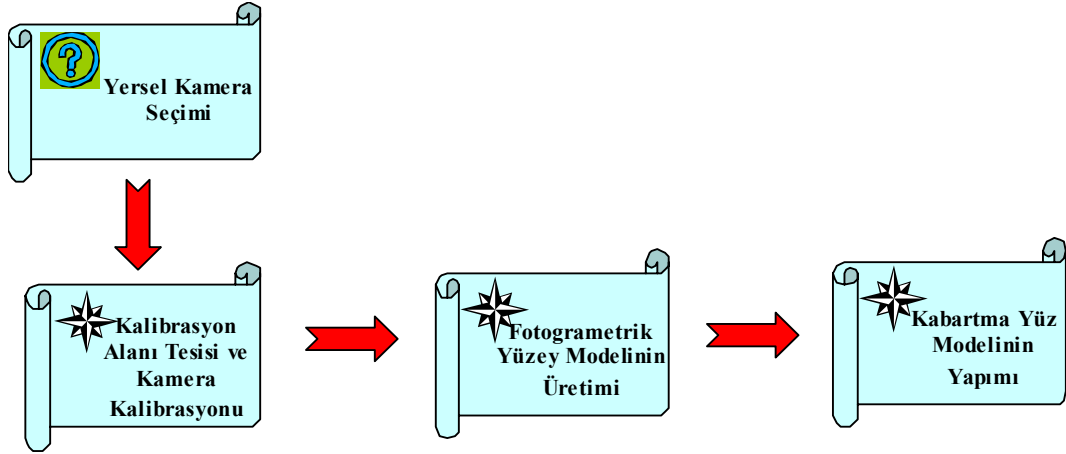
## **ABSTRACT**

Digital amateur cameras which have CCD (Charge Couple Devices) sensors have been used for close range applications in photogrammetry. In this study, three dimensional digital terrain real model of a human face has been determined from nontopographic images with conventional method of photogrammetric process which is denoted aim, study and result. For this study, amateur digital camera and three dimensional calibration field which is generated by General Command of Mapping has been measured with CNC (Computer Numerically Controlled or Vertical Machining Center) machine in the Relief Map Department of General Command of Mapping. This study is one of the spectacular close range application ever been in the General Command of Mapping since it was established.

## **1.GİRİŞ**

Bilindiği üzere, Harita Genel Komutanlığı bünyesinde yapılan fotogrametrik çalışmalarda sayısal fotogrametrik işlem akışı; ülkemiz için gerekli olan 1/25000 ölçekli haritaların üretilmesi ve belli zaman aralıkları ile güncelleştirilmesinin yapılması temel görevlerini kapsamaktadır. Bu kapsam içerisinde kullanılan sayısal fotogrametrik işlem akışından farklı olarak, komutanlıkta gerçekleştirilen bu çalışma fotogrametri ve kartoğrafya dairelerinin iş birliği ile fotogrametri yöntemlerinin kullanıldığı ve kartografik bir ürünün elde edildiği çalışmadır. Bu çalışmanın esas amacı ise teknik imkânlar açısından gayet üst düzeyde olan HGK'lığının günümüze kadar yapmış olduğu çalışmalar içerisinde önemli bir yere sahip olacağı düşünülen bir yakın resim çalışmasının baştan sona tüm evreleri ile tamamlanmasıdır.

İşlem akışı; Yersel Fotogrametri (Close Range Photogrammetry) içindeki bir çalışma olarak düşünüldüğünde insan yüzü modellemesi, yakın resim fotogrametrisi çalışma adımlarının tümünü içermektedir. Bu çalışmanın işlem adımları Şekil-1 de belirtilmiştir.



Şekil-1: Yersel Fotogrametri Uygulaması İşlem Adımları

İşlem adımlarından da anlaşılacağı üzere esasen iki farklı Teknik Dairenin (Fotogrametri ve Kartografya) çalışmalarını içermektedir. Bu işlem adımları birer birer incelenek olursa çalışma daha iyi anlaşılabilir /1/.

## 2. YERSEL KAMERANIN BELİRLENMESİ

Dijital CCD algılayıcıların gelişimi, beraberinde amatör dijital fotoğraf makinalarının yersel fotogrametrik ölçmeler için kullanılabilmesi imkânını sağlamaktadır. CCD algılayıcılardaki teknolojik gelişmenin fotogrametri için önemli olan kısmı, çözünürlüğün yükselmesi ile böylece dijital görüntü kalitesinin artmasıdır /1,2/.

Yersel Fotogrametride resim çekim geometrisi kadar önemli yer tutan resim çözünürlüğünün tesbiti için sadece yüksek çözünürlüğün yeterli olduğu düşüncesi yerine uygun çözünürlüğün uygun resim çekim geometrisi ile kullanılması daha doğru bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımın sonucu olarak çalışma için; 3.2 Mega piksel çözünürlüğe sahip 2048x1536 piksel resim elde edebilen bir dijital amatör kamera (Sony DSC P-72 Serial No: 423480) kullanılmıştır. Burada resim kalitesini arttırdığı düşünülen piksel sayısından çok piksel büyüklüğü önemlidir (Şekil-2). Piksel büyüklüğüne bağlı olarak resim ölçeği ve dolayısı ile objenin kameradan olan uzaklığının belirlenmesi yakın resim fotogrametrisinde önem kazanır. Seçilen kamera 4.3 mikron piksel büyüklüğü ile çalışma için yeterli görülmüştür. Yakın resim fotogrametrisinde önemli olan objenin ölçülebilecek en küçük biriminin hangi karesel ortalama hata ile ölçülebileceğinin belirlenmesi için 1/1 ölçeğinde pikselin obje üzerinde kapladığı alan olarak düşünülür. Yapılacak fotogrametrik yöneltme ve değerlendirmenin doğruluğunu doğrudan etkileyecek bir faktördür /1,2/.



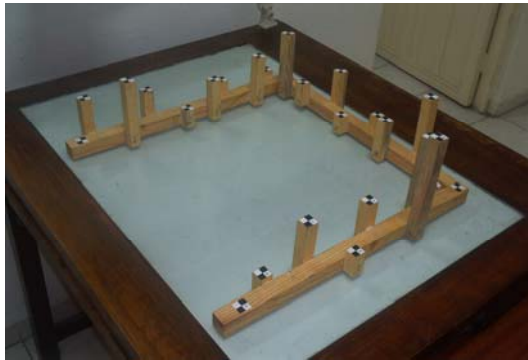
Şekil-2: Çalışmada Kullanılan Dijital Kamera

Yersel fotogrametride doğruluk faktörünü arttırmak için hava fotogrametrisinde kullanılmayan bir yöntemde resim çekimi sırasında %100 resim bindirmesi kullanılmaktadır. Hava fotogrametrisinde ekonomi ve ölçek düşünüldüğünde bunu yapmak anlamsızdır.

Bu çalışmada, kullanılan dijital kamera için öncelikle fotogrametrik olarak belirlenecek en küçük obje boyutuna bağlı olarak bir resim ölçeği ve bu resim ölçeğine uygun B/H oranı ve resim çekim planı belirlenmiştir. Çalışma tekniği açısından bakıldığında yersel fotogrametri uygulama tekniği burada kullanılan çalışma kriterine uygun olmalıdır /2/.

### 3.KALİBRASYON ALANI TESİSİ VE KAMERA KALİBRASYONU

Üç boyutlu yüz modelinin fotogrametrik olarak elde edilebilmesi için hem kontrol noktaları tesis etmek hem de kamera kalibrasyonunu gerçekleştirmek için çalışma sırasında kalibrasyon (on the job calibration) yöntemi ile yüz çalışmasında kullanılacak, 27 noktadan oluşan, üç boyutlu bir kalibrasyon alanı tesis edilmiştir. Kalibrasyon alanı üzerindeki 27 adet kontrol noktası üç boyutlu olarak Harita Genel Komutanlığı Kabartma Harita Şubesinde bulunan CNC dik işleme merkezi (Vertical Machining Center) kullanılarak koordinatlandırıldı. Kontrol noktalarının koordinatlarının ölçülmesi için kullanılan (CNC) dik işleme merkezi koordinatlandırma presizyonu 0.001 mm olarak belirlenmiştir (Şekil-3,4) /1,2/.

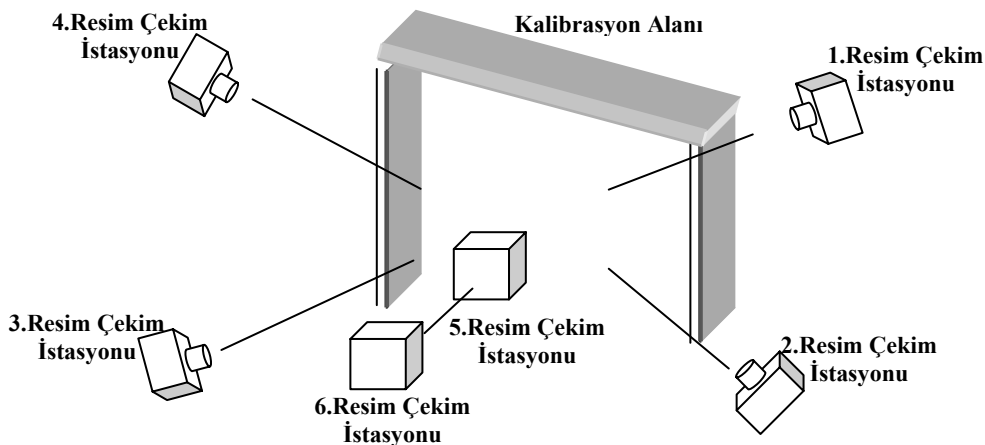


Şekil-3: Tesis Edilen Üç Boyutlu Kalibrasyon Alanı



Şekil-4: Çalışmada Kullanılan CNC Tezgahı

Kamera kalibrasyonu için, üç boyutlu test alanı farklı açılardan altı adet resim ile görüntülenmiştir (Şekil-5). Üç boyutlu Doğrudan Doğrusal Dönüşüm (DLT: Direct Linear Transformation Method) metodu kullanılarak geliştirilmiş olan PMM (Photogrammetric Measurement Machine) yakın resim fotogrametrisi yazılımı kullanılmıştır. Yakın Resim Fotogrametrisinde kamera kalibrasyonu, kamera sistemini en iyi şekilde ifade eden parametrelerin bulunması olarak ifade edilir. Bu parametreler bilindiği üzere resim çekme merkezinin resim düzlemine uzaklığı (c:odak uzaklığı), resim koordinat sistemi eksenlerinin yönleri ve dönüklükleri ile distorsiyon parametreleridir. Aynı zamanda bir resim çekme makinesinin kalibrasyonu fotogrametrik nokta belirleme işleminin tersi olarak da ifade edilebilir. Fotogrametrik nokta belirlemede iç yöneltme elemanları bilinir ve cisim noktalarının koordinatları istenir. Kalibrasyonda ise cisim noktalarının koordinatları bilinir ve iç yöneltme elemanları aranır /1,2,3/.



Şekil-5: Kamera Kalibrasyonu İçin Resim Çekim Algoritması

Fotogrametride resim çekimi sırasında resim çekim makinesinin mercekleri fiziksel bazı özelliklere sahiptir. Optik izdüşüm merceklerin fiziksel yapısı ile ilgili olarak resim düzleminin (merkezi izdüşüm düzlemi) değişik yerlerinde değişik etkilere sebep olur.

Merceklerin izdüşümdeki bu fiziksel etkilerine genel olarak distorsiyon adı verilir. Kamera kalibrasyonu ile distorsiyonun resim koordinat sistemi olan resim düzlemine etkisi belirlenerek (Kolinearite) Doğrusallık Koşulu için doğrusal dönüşüm parametrelerinin kullanılması sağlanır. Distorsiyon iki çeşit olabilir /2/.

Bunlar;

- a. Işınsal Distorsiyon,
- b. Teğetsel Distorsiyon

dır.

#### a. Işınsal Distorsiyon:

Merceklerdeki açısal büyütme ile orantılı olarak merceğe aynı uzaklıktan ancak farklı açılara sahip hedeflerden gelen ışık ışınlarının izdüşüm düzleminin önünde ya da arkasında odaklanması sonucu oluşan görüntü ötelemesi şeklindeki distorsiyondur. İzdüşen ışık ışının izdüşüm merkezinin (resim düzleminin) önünde ya da arkasında odaklanmasına göre distorsiyon pozitif veya negatif olarak adlandırılır. Işınsal mercek distorsiyonu matematiksel olarak bir polinom fonksiyonu ile şu şekilde ifade edilir /2/.

$$\delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \quad (1)$$

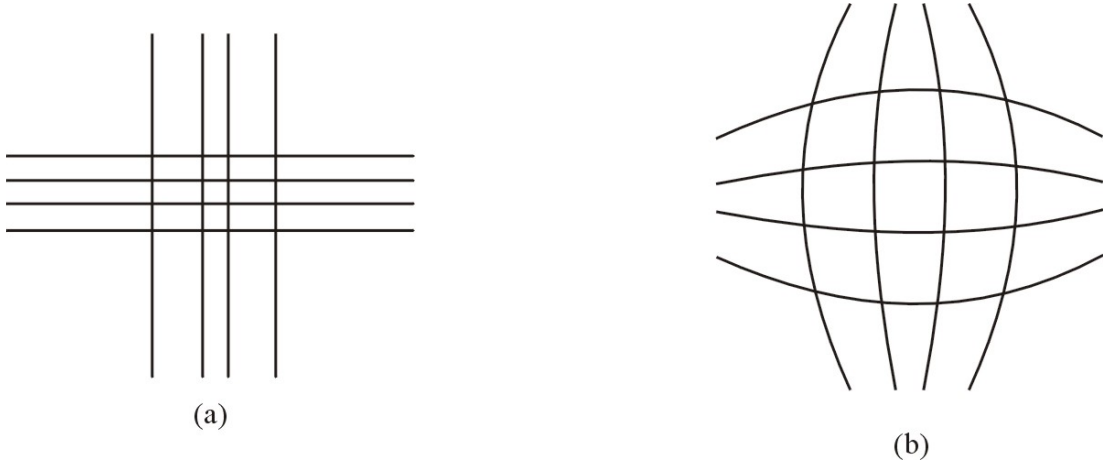
Bu açısal değişimin etkisinin resim koordinat sistemi içerisinde x ve y yönlerindeki bileşenleri ise;

$$\delta r_x = \delta r(x-x_0)/r \quad \delta r_y = \delta r(y-y_0)/r \quad (2)$$

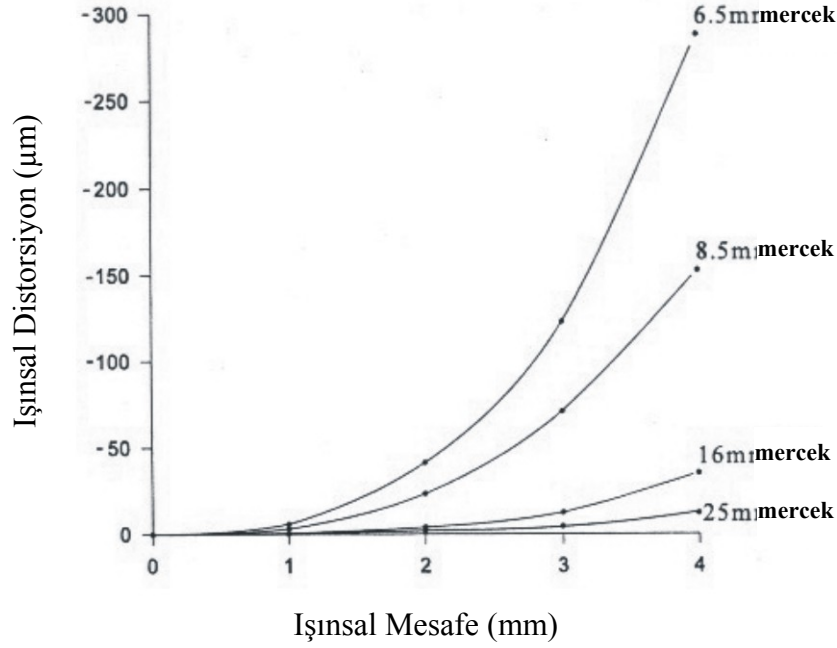
Genelde distorsiyon fonksiyonu ışınsal elemanların özellikle de ışınsal fonksiyonun ilk teriminin etkisi altındadır. Bir resmin gerçek koordinatları (u,v), distorsiyona uğramış koordinatları (u',v') ve gerçek normleştirilmiş resim koordinatları (x,y) olmak üzere bu koordinatlar arasında şu bağıntılar yazılabilir /2/.

$$u' = u + k(u-u_0)((x^2+y^2))^{3/2} \quad v' = v + k(v-v_0)((x^2+y^2))^{3/2} \quad (3)$$

Distorsiyon merkezi ana noktayla aynıdır. Yukarıdaki değerler kalibrasyonla bulunarak distorsiyon düzeltilebilir. Gerçekte düz çizgiler distorsiyon sonucunda resim üzerine parabolik olarak izdüşer (Şekil-6) /2/.



Şekil-6: (a)'da Gösterilen Düz Çizgilerin Distorsiyon Etkisiyle (b) de Aldıkları Durum



Şekil-7: Çeşitli Kamera Merceklerinde Işınsal Distorsiyon Etkisini Göstermektedir

Geniş formatlı uzak mesafe kameraları (odak uzaklığı 150 mm olan kameralar için) mercek gücüne bağlı distorsiyon değeri 10-20 mikron arasında değişir (Şekil 7) /2/.

#### b. Teğetsel Distorsiyon:

Radyal distorsiyonun formüle edilebilmesi için uygun büyütme ve filtreleme mekanizmalarına sahip resim çekme makinelerinde genelde değişik mercek yapılarının bir arada kullanılması düşünülmüştür ve özellikle bu yöntem tercih edilir. Bu çeşit resim çekme makinelerinde kullanılan çoklu mercek yapısını oluşturan objektiflerin optik eksenlerinin tam olarak aynı doğru üzerinde oluşmaması sebebi ile mercek merkezleri aynı doğru üzerinde bulunmazlar.

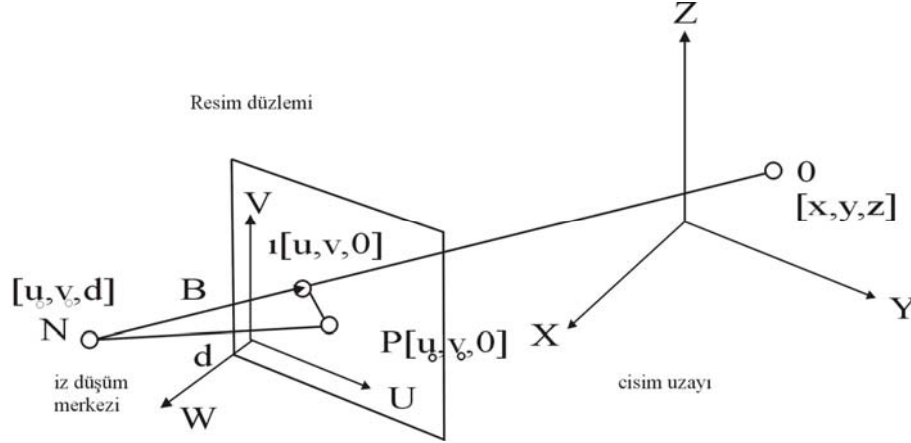
Bu sebepten oluşan görüntü kayması yine resim düzleminin koordinat eksenlerine göre bileşenleri ile ifade edilecek olursa;

$$\delta x = P_1(r^2 + 2(x-x_0)^2) + 2P_2(x-x_0)(y-y_0) \quad (4)$$

$$\delta y = P_2(r^2 + 2(y-y_0)^2) + 2P_1(x-x_0)(y-y_0) \quad (5)$$

elde edilir.

#### 4. RESİM KOORDİNAT SİSTEMİ İLE CİSİM KOORDİNAT SİSTEMİ ARASINDAKİ BAĞINTILAR



Şekil-8: Resim Koordinat Sistemi ile Cisim Koordinat Sistemi Arasındaki Geometrik İlişki

Şekil-8’de gösterilen resim koordinat sistemi ile cisim koordinat sistemi arasındaki ilişki matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir /2/.

$$\begin{aligned} (u - u_0) &= -\frac{d}{\lambda_u} \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \\ (v - v_0) &= -\frac{d}{\lambda_v} \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \end{aligned} \quad (6)$$

(6) bağıntısı ve Şekil-8 için,

$(u_0, v_0)$ : Noktanın resim koordinatları,

$(u, v)$ : Asal noktanın resim koordinatları,

$(r_{ij})$ : Dönme matrisi elemanları,

$(x, y)$ : Noktanın cisim koordinatları,

$(\lambda_u, \lambda_v)$ : Yatay ve düşey eksen boyunca ölçek faktörleri

$(d)$ : Ölçek faktörü olmak üzere;

(6) ’nın yeniden düzenlenmesiyle,

$$\begin{aligned} u &= \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \\ v &= \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \end{aligned} \quad \text{bulunur.} \quad (7)$$

Burada;

$$L_1 = \frac{u_0 r_{31} - d_u r_{11}}{D} \quad L_2 = \frac{u_0 r_{32} - d_u r_{12}}{D} \quad L_3 = \frac{u_0 r_{33} - d_u r_{13}}{D}$$

$$\begin{aligned}
L_4 &= \frac{(d_u r_{11} - u_o r_{31})x_0 + (d_u r_{12} - u_o r_{32})y_0 + (d_u r_{13} - u_o r_{33})z_0}{D} \\
L_5 &= \frac{v_o r_{31} - d_v r_{21}}{D} \quad L_6 = \frac{v_o r_{32} - d_v r_{22}}{D} \quad L_7 = \frac{v_o r_{33} - d_v r_{23}}{D} \\
L_8 &= \frac{(d_v r_{21} - v_o r_{31})x_0 + (d_v r_{22} - v_o r_{32})y_0 + (d_v r_{23} - v_o r_{33})z_0}{D} \\
L_9 &= \frac{r_{31}}{D} \quad L_{10} = \frac{r_{32}}{D} \quad L_{11} = \frac{r_{33}}{D} \\
D &= -(x_0 r_{31} + y_0 r_{32} + z_0 r_{33}) \\
d_u &= \frac{d}{\lambda_u} \quad d_v = \frac{d}{\lambda_v}
\end{aligned} \tag{8}$$

(7) ve (8) eşitliklerindeki  $L_1, L_2, L_3, \dots, L_{11}$  katsayıları Doğrudan Doğrusal Dönüşüm (DDD) parametreleri olarak adlandırılır. Bunlar, cisim uzayı referans düzlemi ile resim düzlemi arasındaki ilişkiyi yansıtır /1,2/.

Yukarıdaki (7) eşitliği üç boyutlu dönüşüm eşitliğidir. Fakat bu eşitlik kamera objektiflerinin distorsiyonlarından (Bölüm 3) dolayı hatalar içermektedir. Bu hatalar dikkate alınırsa eşitlik aşağıdaki gibi düzenlenir /1,2/.

$$u - \Delta u = \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \quad v - \Delta v = \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \tag{9}$$

Burada  $\Delta u$  ve  $\Delta v$  optik distorsiyon nedeniyle oluşan hatalardır.

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{15} \\ L_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \tag{10}$$

Burada;

$$\begin{aligned}
\Delta u &= \xi(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\xi^2) \\
\Delta v &= \eta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\eta^2) \\
\xi &= u - u_0 \\
\eta &= v - v_0 \\
r^2 &= \xi^2 + \eta^2 \\
R &= L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1
\end{aligned} \tag{11}$$

(10) ve (11)'de gösterilen ek parametreler arasındaki ( $L_{12}, L_{13}, L_{14}$ ) elemanları ışınsal distorsiyonla ilgili, ( $L_{15}, L_{16}$ ) elemanları ise teğetsel distorsiyonla ilgili parametrelerdir. Bu parametrelerin kamera kalibrasyonuna dahil edilmesi isteğe bağlıdır /2/.



Kalibrasyonda 16 parametreden daha az parametre kullanılması durumunda, (10)'daki parametreler matrisinden satırlar ve katsayılar matrisinden de kullanılmayan sütunlar çıkarılır.

(10) eşitliğinde DLT parametreleri ( $L_1$ - $L_{11}$ ) ve ek parametreler ( $L_{12}$ - $L_{16}$ ) bilinmeyen olarak kabul edilir. Kontrol noktalarına ait ( $x, y, z$ ) cisim koordinatları bilinmektedir. Bunun için genelde kontrol noktaları önceden tanımlanır ve kontrol noktalarından oluşan bir test alanı oluşturulur. Bu alana kalibrasyon alanı veya kontrol objeleri denilmektedir. Bu kontrol noktalarının aynı düzlemde bulunmamalarına dikkat edilmelidir. Diğer bir deyişle, kontrol noktaları arasında bir hacim oluşmalıdır. Oluşan bu hacime kontrol hacmi adı verilir /2/.

(10) eşitliğini kontrol noktası için genişletilip tekrar düzenlenecek olursa;

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ & & & \vdots & & & & & & & \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 r_1^2 R_1 & \xi_1 r_1^4 R_1 & \xi_1 r_1^6 R_1 & \xi_1 \eta_1 R_1 & (r_1^2 + 2\xi_1^2) R_1 \\ \eta_1 r_1^2 R_1 & \eta_1 r_1^4 R_1 & \eta_1 r_1^6 R_1 & \eta_1 \xi_1 R_1 & (r_1^2 + 2\eta_1^2) R_1 \\ & & \vdots & & \vdots \\ \xi_n r_n^2 R_n & \xi_n r_n^4 R_n & \xi_n r_n^6 R_n & \xi_n \eta_n R_n & (r_n^2 + 2\xi_n^2) R_n \\ \eta_n r_n^2 R_n & \eta_n r_n^4 R_n & \eta_n r_n^6 R_n & \eta_n \xi_n R_n & (r_n^2 + 2\eta_n^2) R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{15} \\ L_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

En küçük kareler yöntemi kullanılarak Doğrudan Doğrusal Dönüşüm parametrelerini ve ek parametreleri elde etmek için, (12)'de denklem sayısının bilinmeyen sayısından büyük olması gerekmektedir. Her bir kontrol noktası 2 denklem sağlar ve (12)'yi çözmek için gerekli olan minimum kontrol noktası sayısı, parametre sayısına bağlı olarak aşağıdaki Tablo-1'de verilmiştir /2/.

Tablo-1: Parametre Sayısına Bağlı Olarak Gerekli Olan Minimum Kontrol Nokta Sayısı

| Parametre Sayısı | Minimum Kontrol Noktası Sayısı |
|------------------|--------------------------------|
| 11               | 6                              |
| 12               | 6                              |
| 14               | 7                              |
| 16               | 8                              |

(12)'deki katsayılar matrisinde 12. ve 16. sütunlar arasındaki tüm kolonlar ( $L_9, L_{10}, L_{11}$ )'in fonksiyonu olan  $R_i$ 'yi içerir. Sonuç olarak bu sistemi doğrudan çözmek mümkün değildir ve iteratif yaklaşım kullanılmalıdır. Bu katsayılar matrisindeki  $R_i$ 'yi hesaplamak için bir önceki iterasyondan ( $L_9$ - $L_{12}$ ) parametreleri kullanılır ve (12) tekrar elde edilir. İterasyon bu şekilde devam eder /2/.

(12) basit olarak ,

$$\underline{X} \cdot \underline{L} = \underline{Y} \quad (13)$$

şeklinde ifade edilir. (13) daha da genişletilecek olursa,

$$\begin{aligned}(\underline{X}^t \underline{X})\underline{L} &= \underline{X}^t \underline{Y} \\ (\underline{X}^t \underline{X})^{-1}(\underline{X}^t \underline{X})\underline{L} &= (\underline{X}^t \underline{X})^{-1}(\underline{X}^t \underline{Y}) \\ \underline{L} &= (\underline{X}^t \underline{X})^{-1}(\underline{X}^t \underline{Y})\end{aligned}\quad (14)$$

Burada  $()^t$  transpose,  $()^{-1}$  ise ters (invers) matrisdir.

$$\begin{bmatrix} L_1 - \alpha L_9 & L_2 - \alpha L_{10} & L_3 - \alpha L_{11} \\ L_5 - \beta L_9 & L_6 - \beta L_{10} & L_7 - \beta L_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4 - \alpha \\ L_8 - \beta \end{bmatrix}\quad (15)$$

Burada,

$$\begin{aligned}\alpha &= u - \Delta u \\ \beta &= v - \Delta v \\ \Delta u &= \xi(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\xi^2) \\ \Delta v &= \eta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\eta\xi + L_{16}(r^2 + 2\eta^2) \\ \xi &= u - u_0 \\ \eta &= v - v_0 \\ r^2 &= \xi^2 + \eta^2\end{aligned}\quad (16)$$

(15) 'in m (m>2) kamera sayısı için genişletilmesiyle,

$$\begin{bmatrix} L_1^{(1)} - \alpha^{(1)}L_9^{(1)} & L_2^{(1)} - \alpha^{(1)}L_{10}^{(1)} & L_3^{(1)} - \alpha^{(1)}L_{11}^{(1)} \\ L_5^{(1)} - \beta^{(1)}L_9^{(1)} & L_6^{(1)} - \beta^{(1)}L_{10}^{(1)} & L_7^{(1)} - \beta^{(1)}L_{11}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_1^{(m)} - \alpha^{(m)}L_9^{(m)} & L_2^{(m)} - \alpha^{(m)}L_{10}^{(m)} & L_3^{(m)} - \alpha^{(m)}L_{11}^{(m)} \\ L_5^{(m)} - \beta^{(m)}L_9^{(m)} & L_6^{(m)} - \beta^{(m)}L_{10}^{(m)} & L_7^{(m)} - \beta^{(m)}L_{11}^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4^{(1)} - \alpha^{(1)} \\ L_8^{(1)} - \beta^{(1)} \\ \vdots \\ L_4^{(m)} - \alpha^{(m)} \\ L_8^{(m)} - \beta^{(m)} \end{bmatrix}\quad (17)$$

elde edilir.

(12) ve (13) 'de açıklanan en küçük kareler yöntemi uygulanarak cisim yüzeyindeki işaretleyicilerin üç boyutlu koordinatları hesaplanabilir /2/.

(8) eşitliğinden;

$$\begin{aligned}L_1x_0 + L_2y_0 + L_3z_0 &= -L_4 \\ L_5x_0 + L_6y_0 + L_7z_0 &= -L_8 \\ L_9x_0 + L_{10}y_0 + L_{11}z_0 &= -1\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_4 \\ -L_8 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -L_4 \\ -L_8 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

eşitliği elde edilebilir /1,2/.

Doğrudan doğrusal dönüşüm ile yapılan kalibrasyon sonucunda bu çalışmada kullanılan (Sony DSC P-72 Serial No: 423480) dijital kamera için;

Tablo-2: Kamera İç Yönelme Parametreleri

| Kamera               | X <sub>0</sub> (mm) | y <sub>0</sub> (mm) | c (mm)   |
|----------------------|---------------------|---------------------|----------|
| <b>Sony DSC P-72</b> | -0.086184           | -0.085055           | 7.617186 |
| <b>K.O.H. (mm)</b>   | 0.001               | 0.001               | 0.001    |

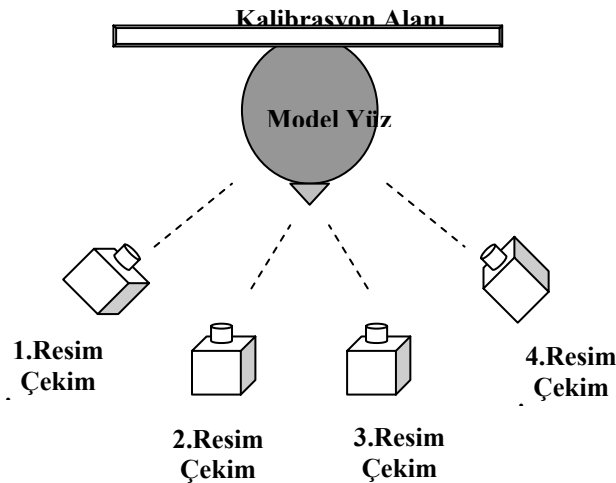
Tablo-3: Kamera İçin Elde Edilen Distorsiyon Parametreleri

| Distorsiyon Değerleri | L <sub>12</sub> (mm)    | L <sub>13</sub> (mm)    | L <sub>14</sub> (mm)     | L <sub>15</sub> (mm)    | L <sub>16</sub> (mm)    |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Sony DSC P-72</b>  | 8.4964x10 <sup>-4</sup> | 1.4326x10 <sup>-4</sup> | -5.0632x10 <sup>-6</sup> | 3.2722x10 <sup>-4</sup> | 5.5825x10 <sup>-4</sup> |
| <b>K.O.H. (mm)</b>    | 0.001                   | 0.001                   | 0.001                    | 0.001                   | 0.001                   |

değerleri hesaplanmıştır /1,2/.

## 5. FOTOGRAMETRİK YÜZEY MODELİNİN ÜRETİMİ

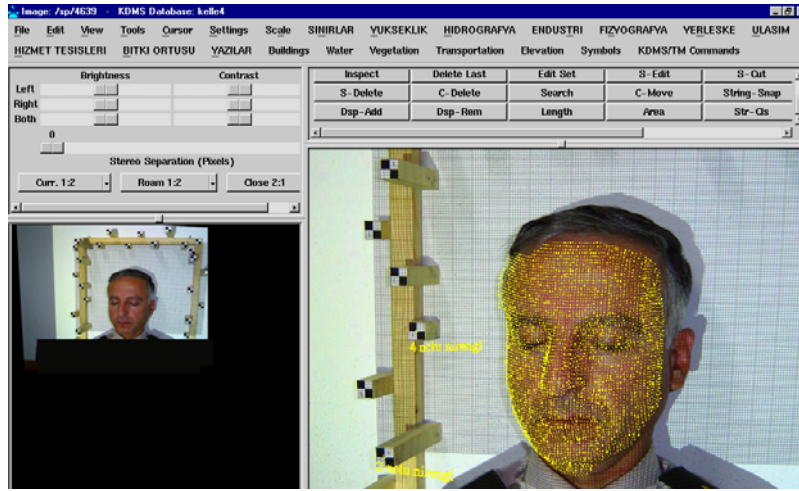
Çalışmada, kalibrasyon ve yüzey modeli oluşturulması için aynı zamanda çekilen farklı resimlerden de yararlanılmıştır. PMM yazılımı kullanılarak yapılan kamera kalibrasyon çalışması için kullanılan 6 farklı resimden başka 4 tane de ölçme için resim seçilerek yüz modelinin sol yarısı ve sağ yarısı için iki ayrı stereo model Softplotter 3.0 yazılımında oluşturulmuştur (Şekil-9) /2,3/.



Şekil-9: Fotogrametrik Değerlendirme İçin Resim Çekim Algoritması

Fotogrametrik değerlendirme yapabilmek için gerekli olan dış yöneltme parametreleri PMM yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. PMM yazılımında, kalibrasyon için kullanılan test alanına ait kontrol noktaları koordinatları kullanılarak kalibrasyondan hesaplanan iç yöneltme parametreleri ve dış yöneltme işlemi ile değerlendirme için kullanılan farklı 4 resim için de dış yöneltme parametreleri belirlenmiştir. Bu parametre dosyaları Softplotter 3.0 yazılımında mm birimine dönüştürülerek girilmiştir ve böylece hava fotogrametrisinde kullanılan resim büyüklüklerine göre çok küçük olan, dijital kamera resimleri ile uygun ölçekte iki stereo model elde edilmiştir. Elde edilen bu iki stereo model teknik olarak yüzün sol yarısını bir model ve sağ yarısını bir model oluşturacak şekilde teşkil edilmiştir. Bunun temel sebebi ise değerlendirmede kullanılan Softplotter 3.0 yazılımıdır. Tamamen stereo olarak değerlendirilecek olan üç boyutlu modellerde operatörün, yüzün önemli detaylarını oluşturan burun, göz çukuru, gerdan gibi detaylara daha iyi yaklaşarak daha keskin noktalar atabilmesini sağlamak amacı yüzün iki parçada çalışılması düşünüldü. Resim çekimi aşamasında hem üç boyutlu model için gerekli noktaların ölçülmesi hem de otomatik değerlendirme için yüz üzerinde bir mm aralıklı düzgün bir grid oluşturulması bir gösterim cihazı yardımı ile sağlanmıştır /3/.

Operatör, Softplotter 3.0 yazılımında bu iki stereo model üzerinde grid ağını oluşturan noktalara yaklaşarak üç boyutlu modeli oluşturan sayısal yükseklik modeli noktalarını ölçerek tüm yüze ait bir sayısal arazi modeli oluşturulmuştur (Şekil-10).



Şekil-10: Softplotter 3.0 Yazılımında Fotogrametrik Değerlendirme

Oluşan üç boyutlu sayısal arazi modelinin doğruluğu için yapılan yöneltmenin doğruluğu ve operatörün uygulama doğruluğu düşünülerek bir hesaplama yapılabilir. Ancak resim ölçeği ve B/H oranı dikkate alındığında oluşan stereo modelin içerisinde operatör hatası konumsal olarak yükseklikte nokta yüksekliğinin karesel ortalama hatasının %25 lik bir miktarına sebep olacaktır. Bu sebeple stereo yöneltme yani dış yöneltme hassasiyeti doğrudan olarak burada sayısal arazi modelinin doğruluğu olarak ifade edilebilir. Keza yersel fotogrametride elde edilen doğruluğun kalibrasyon ile doğrudan bağlantılı olduğu ve kalibrasyon doğruluğunun model doğruluğu anlamına geldiği genel bir ifadedir. Tabi ki bu kestirim ile fotogrametrik değerlendirme için operatörün üç boyutlu görmeden ve fotogrametrik ölçmeden kaynaklanan vektörel hatalarının yukarıda belirtilen %25 lik sınırdaki kaldığı kabul edilmektedir. Dış yöneltme parametreleri hesabı demet dengelemesi algoritması ile PAT-B yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo-4'de bir resim için dış yöneltme parametrelerinin

değerleri ve karesel ortalama hataları verilmiştir. Softplotter 3.0 yazılımında yapılan üç boyutlu değerlendirme çalışmasında operatör tarafından yapılan değerlendirme hatasının en çok bir tam değer olabileceği düşünüldüğünde (resimlerin dış yöneltme parametreleri için bir tam değer 1 mm olarak belirlenmiştir) yöneltme parametrelerinden en az doğruluğa sahip  $Z_0$  için karesel ortalama hata  $\pm 0.213$  mm olarak hesaplanmıştır. Öngörülen %25 lik hata miktarı düşünüldüğünde 1 mm lik tam değer için hata 0.25 dir. Sonuç olarak doğruluğu en düşük operatör hatası için %25 lik hata payı içinde yöneltme yapıldığı görülmektedir. Gerçekte de bu hatalar sayısal yükseklik modelinin oluşumunda filitreleme ve yumuşatma işlemleri ile elimine edilebilir /1,2,3/.

Tablo-4: Bir Resim İçin Elde Edilen Dış Yöneltme Parametreleri ve Doğrulukları

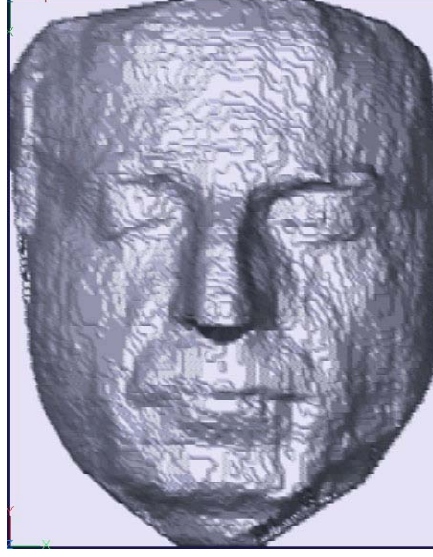
| Dış Yöneltme Parametreleri | $X_0(\text{mm})$ | $Y_0(\text{mm})$ | $Z_0(\text{mm})$ | $\omega$ (gon) | $\phi$ (gon) | $\gamma$ (gon) |
|----------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|--------------|----------------|
| Resim No:1244              | 708.7569         | 260.7872         | 739.0634         | -3.42          | 39.02        | -198.02        |
| K.O.H. (mm/gon)            | $\pm 0.168$      | $\pm 0.165$      | $\pm 0.213$      | $\pm 0.004$    | $\pm 0.004$  | $\pm 0.004$    |

## 6. KABARTMA YÜZ MODELİNİN YAPIMI

Fotogrametrik olarak oluşturulan yüze ait üç boyutlu sayısal arazi modeli, Harita Genel Komutanlığı Kabartma Harita Şubesi tarafından Work NC yazılımı kullanılarak nokta grid modeli formatında (.STL dosya formatı), tam otomatik CNC dik işleme merkezi kullanılarak çeşitli kalınlıkta uçlar yardımı ile Midform kalıp üzerine oluşturulmuştur. Burada yüz modeli bir arazi modeliymiş gibi kabul edilerek, kabartma harita üretimi için gerekli olan vakumlama modelinin elde edilmesinde kullanılan üretim yöntemi uygulanmıştır.

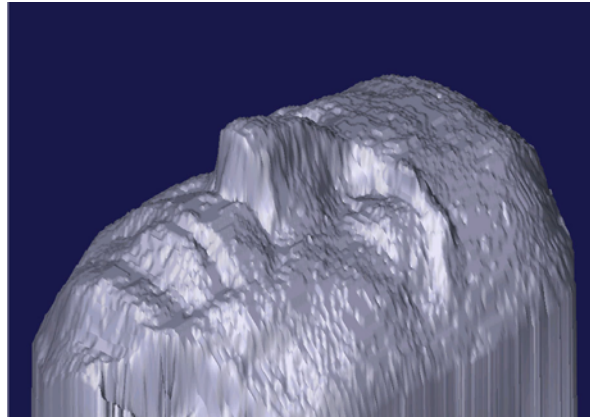
Değerlendirme sonucunda elde edilen üç boyutlu nokta verisini içeren dosya ARC/INFO ortamında önce TIN (Triangulation Irregular Network) veri yapısına sonra grid veri formatına dönüştürülmüştür. Bu formatta bulunan yüz modeline ait sayısal yükseklik verisi bir CAM (Computer Aided Manufacturing) yazılımı olan WorkNC yazılımına girdi olması için nokta grid formatına (.STL dosya formatı) dönüştürülür (Şekil-11). CNC dik işleme merkezinde bir modelin elde edilebilmesi için, kesici uçların ham bloğu nasıl keseceğini belirleyecek NC kodlarına ihtiyaç vardır. İşte bu kodları üretecek yazılım CAM bilgisayar destekli imalat yazılımıdır.

Yüz modelinin üç boyutlu üretilmesinde Kabartma Harita Şubesinde kabartma harita kalıbı üretiminde kullanılan WorkNC yazılımı ve CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. Öncelikle Şekil-11’de görüleceği gibi WorkNC yazılımında modelin düzensiz üçgen ağı (TIN) yapısını ve (shaded) gri ton ile kaplanmış yüzey modeli elde edilmiştir.



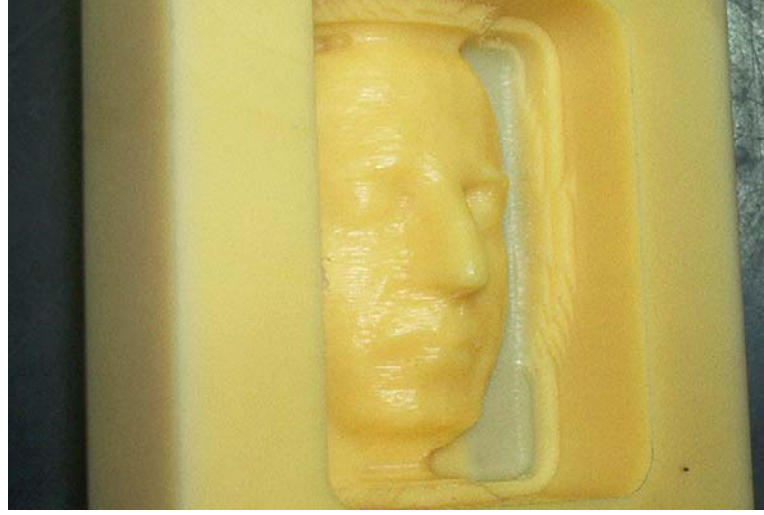
Şekil-11: Üç Boyutlu Yüzey Modelinin WorkNC Görüntüsü

Elde edilecek üç boyutlu modelin yüzeyinin mümkün olduğu kadar basamaklı bir yapıda olmaması için sayısal model (filtering) filitrelenmiş, (smoothing) yumuşatılmış, TIN modelinin ölçeği değiştirilerek, 8 mm çaplı (ball) yuvarlak kesici uç kullanılmıştır.



Şekil-12: WorkNC de İşlenecek Yüzey Modeli

WorkNC yazılımında 20 mm ve, 10 mm düz, 8 mm yuvarlak kesici uçları için farklı dosyalar elde edilmiş ve (CNC) dik işleme frezesinde ham bloğu işleyerek üç boyutlu yüz modeli elde edilmiştir (Şekil-12). Burada ham blok olarak kabartma harita üretiminde vakumlama kalıbı imalinde kullanılan Midform isimli bir malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme plastik türevli, son derece sert ancak CNC’de kesimi ve işlenmesi kolay bir malzeme olmasından dolayı tercih edilmiştir(Şekil-13).

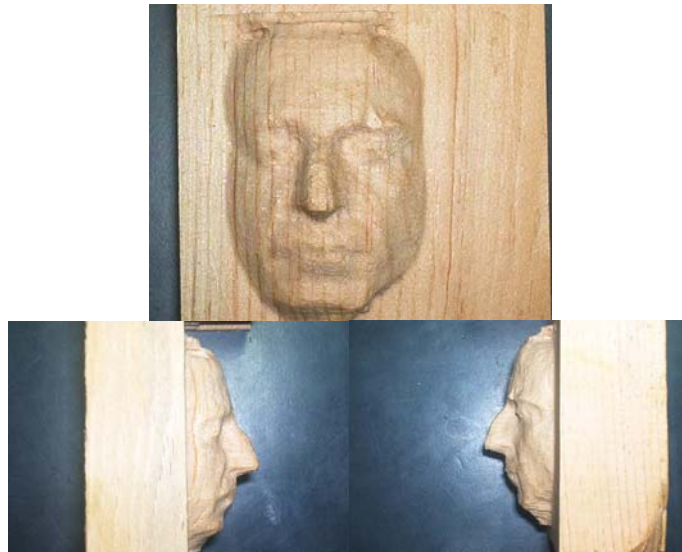


Şekil-13: Midform Üzerinde Elde Edilen Yüz Modeli

Kabartma Harita Üretiminde harita kalıbı, sayısal verinin doğruluğu ile bire bire aynı üretilebilmektedir. Kullanılan CNC frezenin kesim doğruluğu 0.01 mm'dir. Dolayısı ile elde edilen ürünün ölçek doğruluğu ile sayısal yüzey modeli doğruluğu arasında bir ilişki (korelasyon) mümkün olmamaktadır. Ürün hassasiyeti CNC frezeyi kullanan kullanıcı tarafından ölçek, uç kalınlığı gibi değerler ile değiştirilebilmektedir. Burada önemli olan insan gözünün modeli tanımlamasıdır.

## 7. SONUÇLAR

Yapılan çalışma esasen yurtdışında yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında teknik olarak stereo değerlendirme ile yapılan nadir çalışmalardan birisidir (Şekil-14). Bununla beraber Harita Genel Komutanlığı bünyesinde yapılmış olması itibari ile bu çalışma içerisinde hava fotogrametrisi alanında geliştirilmiş yazılımlarla birlikte yersel fotogrametri için geliştirilmiş akademik yazılımlar (PMM) bir arada kullanılmıştır.



Şekil-14: Aynı Şekilde Ahşap Üzerine Üretilen Yüz Modeli

Çalışmanın başında hedeflenen nihai amaç olan bir insan yüzü modeline ait kabartma haritanın yapılmasına ulaşılmış olunması ile beraber çalışmanın akademik sonuçları olarak da işlem adımlarının ve bu adımlarla ulaşılan fotogrametrik ürünlerin doğrulukları ve elde edilmiş yöntemlerinin mühendislik bakımından düşünüldüğünde çalışmanın önemi ve değeri anlaşılmaktadır. Çalışma uluslar arası benzerleri ile aynı değere ve öneme sahip ve bu konuda bu yöntemle Türkiye’de yapılan ve yapılmış çalışmalarda tek başına bir örnek teşkil etmektedir. Aynı zamanda bu kullanılan yöntem ile önemli tarihi eserlerin özellikle önemli heykel ve gravürlerin gerçeklerine uygun ölçekte kabartmalarının yapılması, önemli mimari eserlerin maketlerine ait kabartmaların yapılması mümkün olabilecektir.

### TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde Fotogrametri Dairesinin tüm teknik olanaklarını sunan başta Dr.Müh.Alb. Halil AKDENİZ, Dr.Müh.Alb. Oktay AKSU, Dr.Müh.Yb. H.Hakan MARAŞ ve Müh.Yb. Servet ÖZAĞAÇ ile bu çalışmaya desteklerini sağlayan Müh.Yzb. Ekrem UÇAR, Müh.Yzb. Oktay EKER ve özellikle Müh.Yzb. V. Okan ATAĞ’la birlikte Müh. Kemal AYGAN ve değerlendirme operatörü Burcu ÖZTÜRK’e teşekkürlerimi sunarım.

### KAYNAKLAR

- /1/ Ergün, B. : “Dijital Fotogrametrik Yöntemle Üç Boyutlu Otomobil Yüzeyinin Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 1999.
- /2/ Ergün, B. : “Yakın Resim Fotogrametrisinde Mikro-Fotogrametrik Uzman Sistem Tasarımı, Tesisi ve Kalibrasyonu” Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 2003.
- /3/ D’Apuzzo, N. : “Measurement and Modelling of Human Faces from Multi Images”, ASPRS, Volume 34(5), 241-246., 2004.