

**HAVA FOTOĞRAFLARINDAN SYM ÜRETİMİ VE  
SYM DOĞRULUĞU MODELLEMESİ**  
(DEM PRODUCTION FROM AERIAL PHOTOGRAPHS AND  
ACCURACY MODELING OF DEM)

**Mustafa ERDOĞAN<sup>1</sup>, Gönül TOZ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Harita Genel Komutanlığı, 06100 Dikimevi, Ankara

<sup>2</sup>İTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul  
mustafa.erdogan@hgk.mil.tr

## ÖZET

Fotogrametri alanında otomatikleşmenin büyük oranda sağlandığı işlemlerden birisi Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) üretimi olmuştur. Bununla birlikte, otomatik yöntemlerin doğruluklarını artırmak amacıyla birçok çalışma yapılmasına rağmen, birçok alanda klasik yöntemlerin doğruluklarına ulaşamamıştır. SYM üretiminde klasik yöntem olan fotogrametrik değerlendirme ile eş yükseklik eğrilerinin çizimi ve otomatik yöntem olan görüntü eşleme ile SYM üretimi ve doğruluklarının araştırılması konusunda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar kullanılan kaynak veriye, üretim yöntemine, topoğrafik özelliklere, üretilen SYM'nin çözünürlüğüne ve karşılaştırmada kullanılan referans veriye göre farklılık göstermektedir. Bu çalışmada iki farklı bölgede (Bursa ve Ankara) 1:16.000 ölçekli hava fotoğrafları kullanılarak fotogrametrik değerlendirme ile üretilen eş yükseklik eğrilerinden ve otomatik görüntü eşleme ile SYM üretimi yapılmış ve her iki yöntem doğrulukları bakımından karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, Bursa bölgesinde üretilen SYM kullanılarak SYM doğruluğu eğim ve çözünürlüğe göre modellenmiştir. Model olarak birinci ve ikinci dereceden bir polinom seçilerek, polinom katsayıları dengeleme ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, SYM doğruluğu ve çözünürlüğün büyük oranda korelasyonlu olduğunu, SYM çözünürlüğündeki düşüşle beraber SYM doğruluğunda da düşüş gerçekleştiğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sayısal yükseklik modelleri, otomatik görüntü eşleme, hava fotoğrafları.

## ABSTRACT

Digital Elevation Model (DEM) production has been one of the most automated process of photogrammetry. Many researches are performed in the production of digital elevation models from different data sources and with different methods. In all of the studies, digital elevation models having different resolutions and different data sources are produced and the accuracies of digital elevation models are investigated. The results of these studies vary according to the source of data, resolution, ground control point distribution, production method, topography and reference data for the accuracy assessment. In this study, digital elevation models are produced by automatic image matching from 1:16.000 scale aerial photographs and the accuracies of digital elevation models are assessed. Also digital elevation models are

produced from contour lines which are compiled from the same sources. Optimum data collection interval and accuracy of digital elevation models are investigated. Automatic image matching and photogrammetric compilation methods for digital elevation model production are compared. Accuracies are also investigated according to the resolution of digital elevation model and slope of topography. The results showed that the accuracy is strongly correlated with digital elevation model resolution.

**Key Words:** Digital elevation model, automatic image matching, aerial photographs.

## 1. GİRİŞ

1980'li yılların sonlarında bilgisayar teknolojisinde meydana gelen hızlı gelişmeler etkisini fotogrametri alanında da göstermiş ve 'Digital Fotogrametri' kavramının doğmasına ve gelişmesine neden olmuştur. Digital fotogrametri, çok büyük boyutlardaki sayısal görüntüleri kullanma, bu görüntülerden otomatik yöntemlerle çeşitli verilerin üretimi ve vektör verileri işleme olanakları sağlamış ve beraberinde 'Digital Harita' kavramını getirmiştir. Bunun bir sonucu olarak fotogrametrik harita üretiminin digital olarak gerçekleştirilmesini sağlayan digital fotogrametrik sistemler, görüntü işleme sistemleri, hassas fotoğraf tarayıcılar ve digital hava kameraları geliştirilmiştir. Bu süreç içinde, basılı topoğrafik haritaların üzerindeki eş yükseklik eğrilerinin yerini, vektör eş yükseklik eğrileri ve arazi kırıklık hatları ile daha kaliteli ve yüksek çözünürlüklerde "Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM)" almıştır. Digital fotogrametrik sistemler stereo modeller üzerinden digital topoğrafik harita üretiminin yanısıra, otomatik olarak SYM verileri toplama ve digital ortofoto harita üretimine de olanak sağlamaktadır. Önceleri bazı zorluklarla gerçekleştirilen sayısal yükseklik modeli üretimi, digital fotogrametrik sistemler ve görüntü işleme sistemleri yardımıyla daha kolay bir hale gelmiştir.

Sayısal yükseklik modelleri yer, çevre ve mühendislik bilimlerindeki bir çok uygulamada kullanılmaktadır. Geniş bir uygulama alanı olan SYM'lerin sunum formatları ve bazı formatlar için doğruluklarda standartlık sağlanmış olmasına rağmen, bu standartları sağlamak yada daha da iyileştirmek için kullanılacak veri türleri, bu verilerin kalitesi, üretim yöntemlerine ilişkin standartlar açıkça belirlenmemiştir. Bu şekilde standartların ve açık üretim ölçütlerinin bulunmaması, SYM üretimlerinde zaman kaybına ve maliyetlerin artmasına, doğrulukları belli olmayan bir çok farklı SYM'lerin oluşmasına neden olmaktadır. Yine bu standart olmayan üretimler nedeniyle, üretimi yoğun kaynak ve emek gerektiren SYM'lerde veri kaybı oluşmaktadır. Bu konudaki eksiklikleri giderebilmek için farklı veri türleri veya farklı yöntemlerle SYM üretimi ve bunların doğruluklarının belirlenmesi konusunda çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

(Li, 1994) tarafından, farklı veri modellerinden üretilen SYM'lerin doğrulukları araştırılmıştır. SYM'lerden birincisi fotogrametrik yöntemle üretilen eş yükseklik eğrilerinden elde edilmiştir. Diğer SYM ise hava fotoğraflarından grid ağı şeklinde örneklenerek elde edilmiştir. Sonuç olarak daha yüksek bir doğruluk için sayısal eş yükseklik eğrilerinin kullanılması tavsiye edilmiştir. (Bolstad ve Stowe, 1994)

tarafından gerçekleştirilen diğ er bir ç alışmada 1:40.000 ölçekli hava fotoğrafları ve stereo SPOT uydu görüntüleri kullanılarak otomatik yöntemlerle üretilen SYM'ler ve bunların türevsel yüzeyleri (eğim, bakı) test edilmiştir. Üretilen SYM'ler karşılaştırılmış ve 82 metreye kadar farklılıklar gözlenmiştir. Farklılıkların yaklaşık olarak %63'ü 10 metre ve daha altında, %90'ı 22 metre ve daha altındadır. SYM üretimindeki yeni yöntemler ve teknolojiler sonucu "SYM ne kadar doğru?" sorusu (Kraus vd., 2004) tarafından cevaplanmaya çalışılmıştır. Çeşitli modeller lazer tarayıcı ve fotogrametrik veride test edilmiş, SYM'lerde nokta sıklığının, arazi eğim ve değişkenliğinin etkisi araştırılmış, rölatif SYM doğruluğu için çeşitli gelişmiş kalite ölçütleri getirilmeye çalışılmıştır.

Ancak yapılmış olan bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar kullanılan kaynak veriye, üretim yöntemine, topoğrafik özelliklere, üretilen SYM'nin çözünürlüğüne ve karşılaştırmada kullanılan referans veriye göre farklılık göstermektedir. Bu çalışmada iki farklı bölgede (Bursa ve Ankara) 1:16.000 ölçekli hava fotoğrafları kullanılarak fotogrametrik değerlendirme ile üretilen eş yükseklik eğrilerinden ve otomatik görüntü eşleme ile SYM üretimi yapılmış ve her iki yöntem doğruluk ve üretim süresi bakımından karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında Bursa bölgesinde üretilen SYM kullanılarak SYM doğruluğu eğim ve çözünürlüğe göre modellenmiştir. Model olarak birinci ve ikinci dereceden bir polinom seçilerek, polinom katsayıları dengeleme ile hesaplanmıştır.

SYM'lerde doğrulukların araştırılmasından önce, SYM hatalarının ve özelliklerinin bilinmesi faydalıdır. SYM hataları üç türdür: (1) Kaba hata, (2) Sistemik hata ve (3) Rastlantısal (Tasadüfi) hata. Kaba hatalar temel kısımlarda görülen hatalar olup, etkileşimli editleme sırasında kolayca ortadan kaldırılabilir. Sistemik hatalar sabit bir değer içeren ve modellenebilir hatalar olup, veri toplama yöntemleri ve sistemlerinden kaynaklanabilmektedir. Sistemik hatalar matematiksel bağıntılar kullanılarak büyük oranda giderilebilir. Rastlantısal hatalar, bilinmeyen veya tesadüfi olaylardan kaynaklanırlar. Bu hataların büyüklüğü editleme ile azaltılır. Fakat tamamen ortadan kaldırılamaz. Karesel ortalama hata (KOH); veri toplama sırasında ortaya çıkan rastlantısal ve giderilemeyen sistemik hataları ifade ederek SYM'nin düşey doğruluğunu tanımlamada kullanılır. Doğruluk; konumları bilinen nokta yükseklikleri, bunlara karşılık gelen doğrusal enterpole edilmiş SYM'deki yükseklikler ile karşılaştırılarak hesaplanır. Test noktaları iyi dağılmış olmalı, arazi yüzeyini iyi temsil etmeli ve doğruluk derecesi ölçütleri bilinen gerçek yüksekliklere sahip olmalıdır (Erdoğan, 2000).

## **2. UYGULAMA**

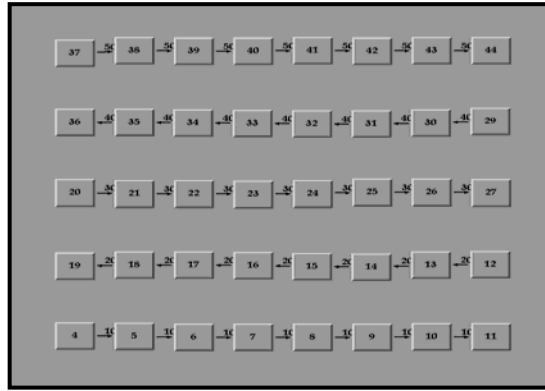
### **a. Çalışma Bölgesi ve Veriler**

1:16.000 ölçekli hava fotoğrafları ile SYM üretimi çalışması Ankara ve Bursa olmak üzere iki farklı bölgede yapılmıştır. Birinci bölge Ankara İ-29-c1 paftası içine giren Gölbaşı bölgesidir. Söz konusu bölge yaklaşık olarak 10 km x 10 km boyutlarındadır. Bölgede yerleşim alanları, küçük sanayi tesisleri ve tarımsal araziler bulunmaktadır. Uçuşta 153 mm odak uzaklığına sahip olan Zeiss RMK TOP 15 kamerası kullanılmıştır.

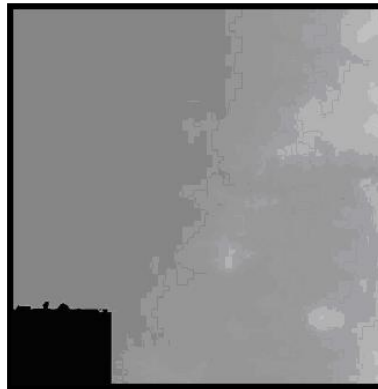
Boyuna bindirme oranı % 60, enine bindirme oranı ise % 30 olarak tespit edilen uçuşta kinematik GPS tekniği uygulanarak 40 adet fotoğraf alımı gerçekleştirilmiştir. İkinci bölge Bursa-G23-c-14-d paftasına giren alandır. Bölgede yükseklik 305 ile 1073 metre, eğim ise 0 ile 60° arasında değişmektedir. Bölgenin 17 Ağustos 1999 depremi sonrası 1:16.000 ölçekli stereo hava fotoğrafları alınmıştır. Uçuşta 153 mm odak uzaklığına sahip olan Zeiss RMK TOP 15 kamerası kullanılmıştır. Bölge orman kaplı sarp bir arazidir.

### **b. Gölbaşı Bölgesine ait 1:16.000 Ölçekli Hava Fotoğraflarından Otomatik Görüntü Eşleme ile SYM Üretimi**

Otomatik görüntü eşleme aynı manzarayı içeren iki veya daha fazla sayısal görüntüden elde edilen temel elemanlar arasındaki ilişkinin otomatik olarak kurulmasıdır. Temel elemanlar, görüntülerden çıkarılan detaylar veya gri düzey ton pencereleri olabilir (Heipke, 1996). Otomatik görüntü eşleme ile SYM üretimi, Gölbaşı bölgesine ait 29 Ağustos 2002 tarihli 1:16.000 ölçekli hava fotoğrafları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Blok 5 kolondan oluşmaktadır ve Şekil 1’de gösterilmiştir. Blok için standart kinematik GPS destekli fotogrametrik nirengi işlemi uygulanmıştır. Dengelenmiş blok bilgileri ve taranmış hava fotoğrafları kullanılarak Autometrik Softplotter yazılımı ile stereo modeller oluşturulmuştur. Modeller vasıtasıyla otomatik görüntü eşleme ile SYM’ler üretilmiş, üretilen SYM’ler stereo modeller kullanılarak düzeltilmiştir. Model bazında oluşturulan SYM’ler bütün bölgeyi kaplayacak şekilde mozaiklenerek tek bir SYM elde edilmiştir. Üretilen SYM Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Gölbaşı bölgesine ait 1:16.000 ölçekli hava fotoğrafı bloğu.



Şekil 2. Otomatik görüntü eşleme ile üretilen SYM (Gölbaşı).

### c. Bursa Bölgesine ait 1:16.000 Ölçekli Hava Fotoğraflarından Eş Yükseklik Eğrisi Değerlendirme ile SYM Üretimi

Eş yükseklik eğrisi değerlendirme ile SYM üretimi Gölbaşı ve Bursa bölgelerinde gerçekleştirilmiştir. SYM üretimi için kullanılan yöntemlerden biri basılı topoğrafik haritalardan eş yükseklik eğrilerinin sayısallaştırılması ve diğeri stereo modellerden doğrudan eş yükseklik eğrisi çizimidir. Eş yükseklik eğrisi üretimi zaman alıcıdır, bununla birlikte topoğrafik haritalar için vazgeçilmez bir detaydır. Otomatik görüntü eşleme ile üretilen SYM'lerden de eş yükseklik eğrileri üretilebilir. Ancak bu üretimler dere yatakları, tepe noktaları gibi kritik arazi yapılarında başarılı olamamaktadır. Bu nedenle otomatik görüntü eşleme ile üretilmiş SYM'lerden eş yükseklik eğrisi üretimi çok kullanılmayan ve tercih edilmeyen bir yöntemdir. Ancak tersi şekilde eş yükseklik eğrilerinden SYM üretimi ise çok yaygındır. Eş yükseklik eğrilerinden üretilen SYM'nin doğruluğunun eş yükseklik eğrisi aralığının 1/3'ü ile 1/5'i arasında olması beklenir (Li, 1994). Bu çalışmada, eş yükseklik eğrisi değerlendirmenin çok zaman alıcı bir süreç olması nedeniyle, Gölbaşı bölgesinde 1:5.000 ölçekli pafta boyutlarında küçük bir bölgenin 5 metre aralıklı eş yükseklik eğrileri değerlendirilmiştir. Bu eş yükseklik eğrilerinden PCI Geomatica yazılımının OrthoEngine modülü kullanılarak 8 metre çözünürlükte SYM üretilmiştir. Üretilen SYM Şekil 3'de gösterilmiştir.



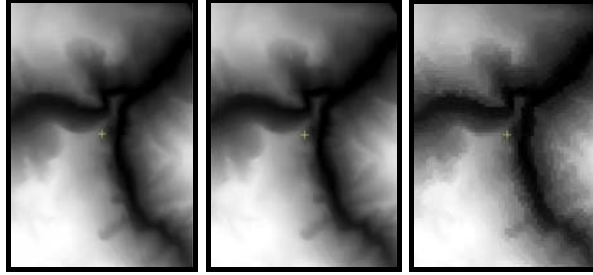
Şekil 3. Eş yükseklik eğrileri kullanılarak üretilen 8 metre çözünürlükte SYM (Gölbaşı).

İkinci olarak Bursa-G23-c-14-d paftasına ait sayısal eş yükseklik eğrileri dosyası kullanılmıştır. Bölgenin 17 Ağustos 1999 depremi sonrası 1:16.000 ölçekli stereo hava fotoğrafları alınmıştır. Bu fotoğraflardan faydalanılarak 5 metre aralıklı eş yükseklik eğrileri fotogrametrik değerlendirme ile çizilmiş ve gerekli düzeltme işlemleri de yapılmıştır. Elde edilen eş yükseklik eğrileri Şekil 4'de gösterilmektedir.

Bu eş yükseklik eğrilerinden 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 ve 256 metre çözünürlüklerde SYM'ler üretilmiştir. Üretim için PCI Geomatica yazılımının Orthoengine modülü kullanılmıştır. Üretim esnasında nokta yükseklik verileri de kullanılmıştır. 1, 8 ve 32 metre çözünürlüklerde üretilen SYM'ler Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Bursa-G23-c-14-d paftasına ait eş yükseklik eğrileri.



Şekil 5. Eş yükseklik eğrilerinden üretilen 1, 8 ve 32 metre çözünürlüklerde SYM'ler (Bursa).

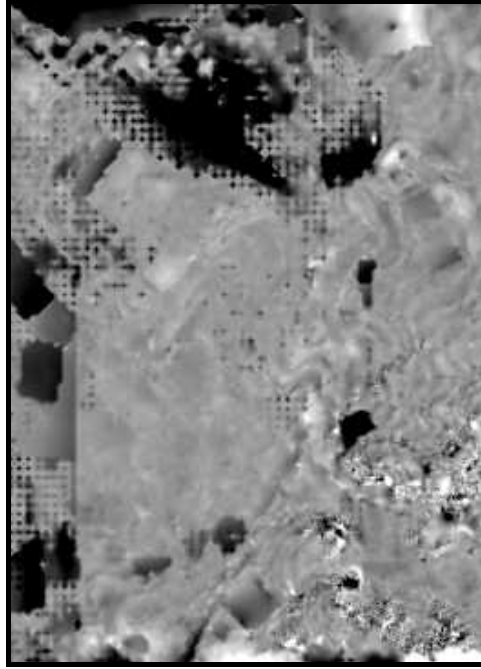
#### ç. Doğruluk Araştırması

##### (1) Gölbaşı Bölgesindeki Uygulama

Gölbaşı bölgesinde üretilen sayısal yükseklik modellerinin doğruluğu arazide GPS ile ölçülen 27 adet nokta ile kontrol edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde eş yükseklik eğrilerinden üretilen SYM'nin otomatik görüntü eşleme ile üretilene göre belirgin şekilde daha iyi olduğu görülmektedir (Tablo 1). Eş yükseklik eğrilerinden elde edilen SYM'nin daha doğru olduğu düşünüldüğünde diğer SYM eş yükseklik eğrilerinden elde edilen SYM ile karşılaştırılabilir. Bu amaçla, 1:16.000 ölçekli hava fotoğraflarından otomatik görüntü eşleme ile elde edilen SYM ile eş yükseklik eğrilerinden elde edilen SYM'nin farkı alınmıştır. Elde edilen fark görüntüsü aslında hataları göstermektedir. Bu görüntü Şekil 6'da gösterilmiştir. Elde edilen hata görüntüleri değerleri hesaplanmış ve doğruluklar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Hava fotoğraflarından üretilen SYM'lerin doğrulukları (Gölbaşı).

<b>SYM Kaynağı</b>	<b>Hata Aralığı (metre)</b>	<b>Hataların Ort. (metre)</b>	<b>Mutlak Hataların Ort. (metre)</b>	<b>KOH (metre)</b>
Eş Yükseklik Eğrileri	0.11, 0.80	0.53	0.53	± 0.61
Otomatik Eşleme	-5.69, 3.09	-0.34	1.18	± 1.73



Şekil 6. Fark (hata) görüntüsü (Gölbaşı)

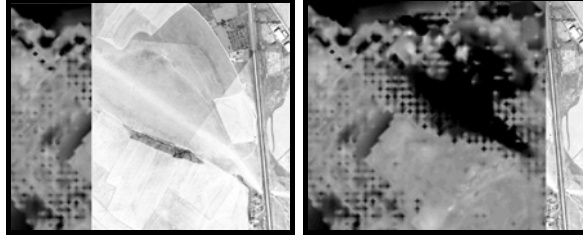
Tablo 2. Otomatik görüntü eşleme ile üretilen 1 metre çözünürlüklü SYM'nin hataları (Gölbaşı).

	<b>Hata Aralığı (metre)</b>	<b>Hataların Ort. (metre)</b>	<b>Mutlak Hataların Ort. (metre)</b>	<b>KOH (metre)</b>
<b>Oto. Eşl. SYM</b>	-68.25, 28.91	-1.32	2.15	± 2.98

Şekil 6'daki hata görüntüsü incelendiğinde görüntünün üst ortasında hataların toplandığı belirgin bir bölge görülmektedir. Bu bölge Şekil 7'de gösterilmiştir. Bölge incelendiğinde arazide elips şeklinde bir toprak yapısının bulunduğu görülmektedir. Bu yapıda belirgin detaylar bulunmamaktadır. Renkler de homojen bir yapıdadır. Bu tür alanlarda, genelde bütün yazılımlarda kullanılan çapraz korelasyon veya en küçük kareler yöntemiyle otomatik görüntü eşleme başarılı sonuçlar vermemektedir. Bu tür bölgelerde, alan bazlı otomatik görüntü eşleme yöntemleri daha başarılı sonuçlar

vermektedir. Ancak alan bazlı görüntü eşleme algoritmaları daha karmaşık olmaları nedeniyle görüntü işleme yazılımlarında kullanılmamaktadır (Li, 1994).

Şekil 6 incelendiğinde diğer bir hata olarak da SYM farkının solunda yukarıya doğru hat şeklinde bir yapının oluştuğu görülmektedir. Burası stereo modelin dış hattıdır. Modellerin dışına doğru eğim açılarının yükselmesi nedeniyle görüntüler farklılaşmakta ve otomatik görüntü eşlemenin doğruluğu düşmektedir. Bu nedenle modelin dış sınırlarındaki ortalama % 10'luk verinin kullanımından kaçınılmalıdır.



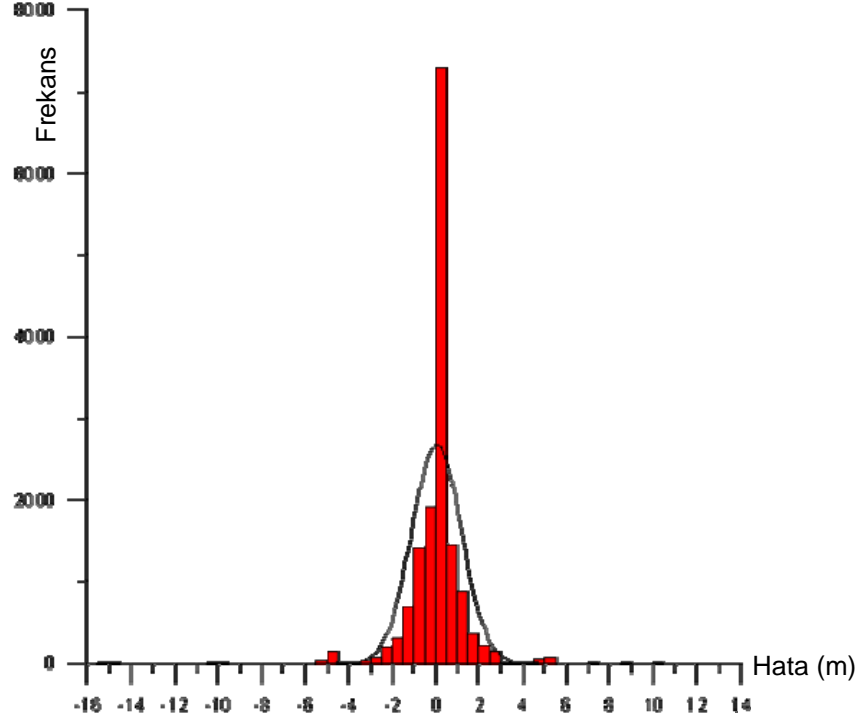
Şekil 7. Hatalı bölge.

SYM farkları alınarak yapılan bu çalışmanın, GPS ile ölçülen nokta yükseklikleri ile karşılaştırma şeklindeki teste göre daha anlamlı olduğu düşünülebilir. GPS ile ölçülen noktalar yol kavşağı, duvar köşesi gibi detaylardır. Bu detaylar görüntülerde rahatlıkla görülebilen, çevresiyle kontrast oluşturan noktalardır. Bu tür noktalarda doğal olarak otomatik görüntü eşleme algoritmaları daha iyi çalışacaktır. Bu nedenle daha iyi eşleme yapılacak ve bu noktalarda doğruluklar daha yüksek olacaktır. Böylece elde edilen sonuçlar homojen yapı gösteren bölgeleri temsil etmeyecektir. Eş yükseklik eğrileri üretiminde ise elde edilen ürün bütün bölgede benzer doğruluktadır. Eş yükseklik eğrilerinden elde edilen SYM ile otomatik görüntü eşleme ile elde edilen SYM'nin karşılaştırılması SYM'nin geneli hakkında daha doğru bilgi verecektir.

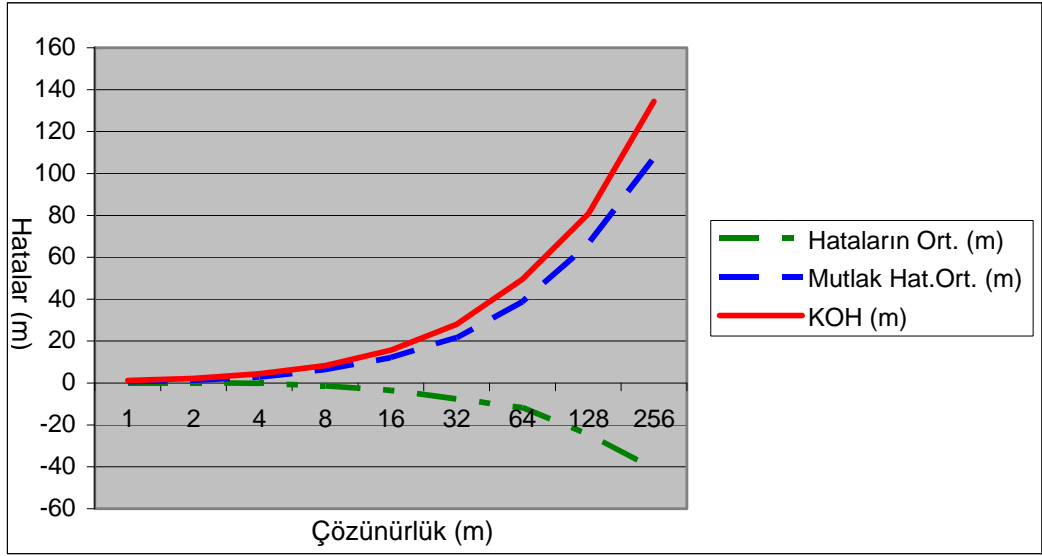
## (2) Bursa Bölgesindeki Uygulama

İkinci bölge olarak seçilen Bursa'da üretilen SYM'ler, ana eş yükseklik eğrileri olan ve daha hassas değerlendirilen 25 metre aralıklı eş yükseklik eğrileri ile PCI Geomatica yazılımının ELEVRMS modülü kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu modül kullanılarak yapılan karşılaştırmada, referans vektör verideki her kırıklık noktasının yükseklik değeri SYM ile karşılaştırılarak, kırıklık noktalarındaki yükseklik hataları hesaplanmaktadır. Bu amaçla referans olarak kullanılan 25 metre aralıklı eş yükseklik eğrilerindeki 15372 kırıklık noktasındaki yükseklik hataları hesaplanmıştır. Bu hatalar SYM çözünürlüklerine ve eğim gruplarına göre gruplandırılarak ortalama, standart ve mutlak hatalar hesaplanmıştır. 1 metre çözünürlüklü SYM'nin hata dağılımı Şekil 8'de, çözünürlüğe göre değişen hatalar Şekil 9'da ve eğime göre değişen hatalar Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu hatalara ilişkin değerler Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir.

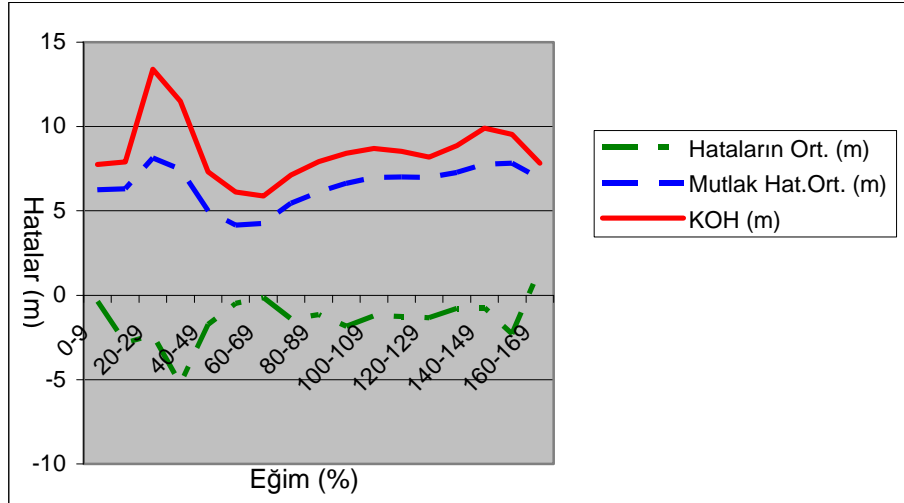




Şekil 8. Hata dağılımı.



Şekil 9. Farklı çözünürlüklerdeki SYM'lerin doğrulukları.



Şekil 10. Farklı eğim gruplarındaki SYM'lerin doğrulukları.

Tablo 3. Farklı çözünürlüklerdeki SYM'lerin doğrulukları.

Çözünürlük (metre)	Hataların Ort. (metre)	Mutlak Hat. Ort. (metre)	KOH (metre)
1	0.04	0.61	± 1.1
2	0.01	1.29	± 2.2
4	-0.23	2.92	± 4.4
8	-1.25	6.35	± 8.3
16	-3.51	12.08	± 15.6
32	-7.57	21.63	± 28.0
64	-11.80	38.83	± 49.5
128	-24.48	66.42	± 80.8
256	-41.01	107.57	± 134.4

Tablo 4. Farklı eğim gruplarındaki SYM'lerin doğrulukları.

Eğim (%)	Hataların Ort. (metre)	Mutlak Hat. Ort. (metre)	KOH (metre)
20-29	-2,35	8,13	± 13,40
30-39	-5,25	7,45	± 11,50
40-49	-1,73	4,99	± 7,31
50-59	-0,48	4,16	± 6,12
60-69	-0,14	4,25	± 5,87
70-79	-1,38	5,45	± 7,13
80-89	-1,14	6,10	± 7,92
90-99	-1,84	6,64	± 8,41
100-109	-1,21	6,99	± 8,69
110-119	-1,26	7,02	± 8,53
120-129	-1,34	6,99	± 8,18
130-139	-0,79	7,28	± 8,86
140-149	-0,75	7,76	± 9,91

150-159	-2,30	7,82	± 9,53
---------	-------	------	--------

### (3) Genel Sonuçlar

1:16.000 ölçekli hava fotoğraflarından üretilen 1 metre çözünürlüklü bütün SYM'lerin doğrulukları Tablo 5'de verilmiştir. Gölbaşı ve Bursa bölgesinde eş yükseklik eğrilerinden üretilen SYM'lerin doğrulukları birbirine oldukça yakın ve otomatik görüntü eşleme ile üretilene göre belirgin şekilde daha iyidir.

Tablo 5. 1 metre çözünürlüklü SYM'lerin doğrulukları.

SYM Kaynağı	Hataların Ort. (metre)	Mutlak Hataların Ort. (metre)	KOH (metre)
Eş Yükseklik Eğrileri (Gölbaşı)	0.53	0.53	± 0.61
Otomatik Korelasyon (Gölbaşı)	-1.32	2.15	± 2.98
Eş Yükseklik Eğrileri (Bursa)	0.04	0.61	± 1.10

#### d. Doğruluğun Çözünürlük ve Eğime Göre Modellenmesi

Çalışmanın son aşamasında Bursa bölgesinde üretilen SYM'ler kullanılarak çözünürlük ve eğime göre hatalar modellenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada MathLab yazılımı kullanılmıştır. Bu amaçla eğim ve çözünürlüğe göre hazırlanan veriler, "çözünürlük-eğim-hata" şeklinde sıralı bir ASCII dosyaya çevrilmiştir. Bu dosya Matlab yazılımında hazırlanan bir program kullanılarak dengelemeye sokulmuş, model katsayıları ve kovaryans matrisinden hesaplanan standart sapmaları dengeleme ile elde edilmiştir. Burada eğim X, çözünürlük Y ve hatalar Z olarak kabul edilmiştir ve  $Z=a+bX+cY+dXY+eX^2+fY^2$  şeklinde ikinci dereceden bir polinom hesaplanmıştır. Katsayılar incelendiğinde  $Y^2$ ,  $X^2$  ve XY katsayılarının oldukça küçük olduğu görülmüştür. Bu nedenle,  $Y^2$ ,  $X^2$  ve XY değerleri ihmal edilerek  $Z=a+bX+cY$  şeklinde katsayılar tekrar hesaplanmıştır. Hesaplanan polinom katsayıları Tablo 6'da verilmiştir.

Polinom katsayılarının anlamlılığını test etmek amacıyla istatistiksel "t" testi uygulanmıştır. "t" testinde tablo değerlerinin hesaplanmasında kullanılan parametreler, dengelemenin serbestlik derecesi ve güven düzeyidir. "t" testi için tablo değerleri %90, %95 ve %99 güven aralığında hesaplanmıştır. %90 güven aralığı için t değeri 1.28, %95 için 1.65 ve %99 için 2.33'dür. Katsayıları ilişkin test değeri (1) ile hesaplanmış ve Tablo 6'da verilmiştir. Formüldeki  $\delta(i)$  değeri dengeleme sonucu hesaplanan bilinmeyenler (bu çalışmada polinom katsayıları),  $\hat{\sigma}_0 \times \sqrt{c_x} = \hat{\sigma}$  değeri ise eğer bütün katsayılar dengelemeye eşit ağırlıklı olarak girilmişse bilinmeyenlerin (bu çalışmada polinom katsayılarının) standart sapmasıdır. değeri ise in standart sapmalarıdır. Test değeri tablo değerinden büyükse katsayı anlamlı olarak kabul edilir. Tablo 6 incelendiğinde bütün test değerlerinin 2.33'den büyük olduğu görülmektedir. Bu da %99 güven aralığında bütün katsayıların anlamlı olduğunu göstermektedir. Test değerinin büyüklüğü aynı zamanda o

katsayı ve ilgili değişkenin hesaplamadaki ağırlığını da göstermektedir. Tablo 6'daki test değerleri incelendiğinde, hem birinci hem de ikinci derece polinomlardaki Y, yani çözünürlüğe ait test değerlerinin oldukça büyük değerler olduğu görülmektedir. Tablo 6 incelendiğinde en güçlü değer Y, yani çözünürlüğün katsayısıdır. X, yani eğimin katsayısı ise daha küçük bir değerdir. Bu katsayılardan anlaşılacağı üzere hatalar sabit bir değer içermekte ve daha çok çözünürlük oranında artmaktadır. Bu değerlerin korelasyon matrisi de hesaplanmış ve Tablo 7'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi doğruluk ve çözünürlük birbirleriyle oldukça ilişkilidir.

$$\hat{\sigma} = \hat{\sigma}_0 \times \sqrt{C_x} \quad t = \frac{|\delta(i)|}{\hat{\sigma}} \quad (1)$$

Tablo 6. Model katsayıları.

	<b>z=a+bx+cy+dxy+ex<sup>2</sup>+fy<sup>2</sup></b>	<b>Test Değeri</b>	<b>z=a+bx+cy</b>	<b>Test Değeri</b>
<b>a</b>	2.887 ± 0.086	33.7	8.231±0.054	152.8
<b>b</b>	0.156 ± 0.002	74.5	0.020±0.001	39.7
<b>c</b>	0.809 ± 0.001	625.4	0.498±0.000	1573.1
<b>d</b>	-5.070e-004 ± 6.412e-006	79.7		
<b>e</b>	-8.659e-004 ± 1.170e-005	74.0		
<b>f</b>	-1.099e-003 ± 4.636e-006	237.1		

Tablo 7. Korelasyon katsayıları.

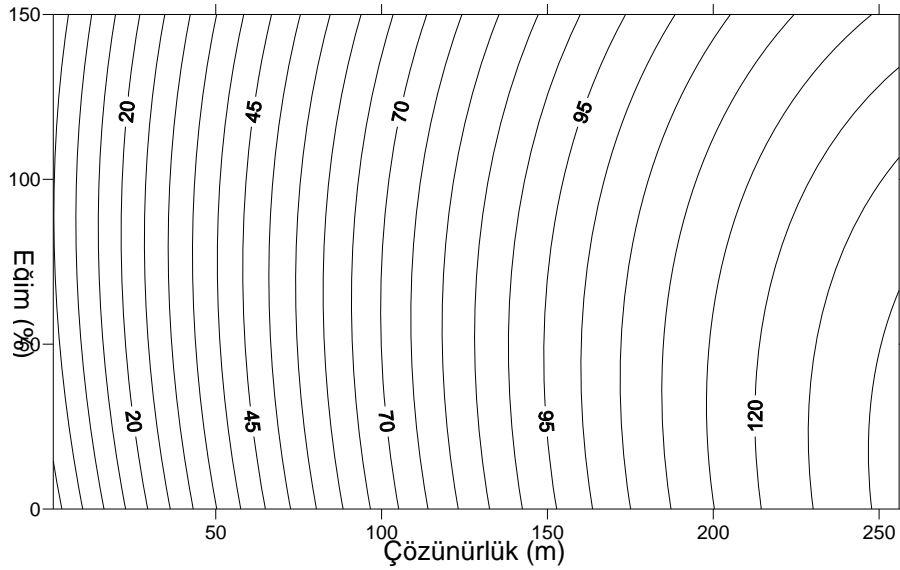
	<b>X (Eğim)</b>	<b>Y (Çözünürlük)</b>	<b>Z (Doğruluk)</b>
<b>X</b>	1.000	0.000	0.024
<b>Y</b>		1.000	0.953
<b>Z</b>			1.000

SYM'lerin sadece çözünürlük veya sadece eğime göre değişimini modellemek amacıyla da benzer bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla eğim ve çözünürlüğe göre hazırlanan "çözünürlük-eğim-hata" verileri dosyası kullanılarak, eğime bağlı  $Z=a+bX+cX^2$  ve çözünürlüğe bağlı  $Z=a+bY+cY^2$  polinomlarının katsayıları MathLab yazılımı ile dengelenerek hesaplanmıştır. Hesaplanan katsayılar Tablo 8'de verilmiştir. Polinom katsayılarının anlamlılığını test etmek amacıyla istatistiksel "t" testi uygulanmıştır. Tablo 8 incelendiğinde bütün test değerlerinin 2.33'den büyük olduğu görülmektedir. Bu da %99 güven aralığında bütün katsayıların anlamlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 8. Model katsayıları.

	$Z=a+bX+cX^2$ (Eğim değişkenli)	Test Değeri	$Z=a+bY+cY^2$ (Çözünürlük değişkenli)	Test Değeri
a	$32.357 \pm 0.076$	428.1	$1.965 \pm 0.037$	53.7
b	$0.127 \pm 0.002$	61.7	$0.766 \pm 0.001$	653.0
c	$-8.66E-04 \pm 1.17e-05$	74.0	$1.10E-03 \pm 4.64e-06$	237.1

“Çözünürlük – eğim - hata” verilerinden hesaplanan ikinci derece polinoma göre bir grid dosyası üretilmiştir. Bu dosyadan bir eş-hata eğrileri grafiği türetilmiş ve Şekil 11’de gösterilmiştir. Bu yüzeyde hataların çözünürlük ve eğim yönünde hemen hemen doğrusal olarak arttığı, ancak çözünürlük yönündeki artışın daha belirgin olduğu görülmektedir.



Şekil 11. Üretilen Z(X,Y) fonksiyonunun eş-hata eğrileri ile gösterimi.

### 3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında 1:16.000 ölçekli hava fotoğrafları kullanılarak eş yükseklik eğrisi değerlendirme ve otomatik görüntü eşleme ile SYM üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler eş yükseklik eğrisi değerlendirme ile üretilen SYM’lerin KOH’larının yaklaşık  $\pm 1$  metre ve otomatik görüntü eşleme ile üretilen SYM’lerin KOH’larının ise yaklaşık  $\pm 3$  metre civarında olduğunu göstermiştir.

1:16.000 ölçekli hava fotoğraflarından değerlendirilen eş yükseklik eğrilerinden farklı çözünürlüklerde SYM’ler üretilmiş ve SYM doğrulukları çözünürlük ve eğime göre

modellenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar SYM hatalarının çözünürlükteki düşüşle beraber arttığını göstermiştir. Eğimdeki değişime göre yapılan çalışmalarda ise farklı sonuçlar elde edilmiştir. Normal koşullarda SYM hatalarının eğimdeki artışa paralel olarak artması beklenmektedir. Ancak testler sonucunda, çok yüksek ve çok düşük eğimli bölgelerde SYM hatalarının daha fazla ve ortalama eğimli bölgelerde SYM hatalarının daha az olduğu görülmüştür. Bu durum fotogrametrik değerlendirmenin temelleri ile açıklanabilir. Fotogrametri operatörlerinin eş yükseklik eğrisi değerlendirme esnasında en çok zorlandıkları bölgeler, çok düz ve çok sarp alanlardır. Bu tür alanlarda yükseklik hataları artmaktadır. Operatörler ortalama eğimli bir topoğrafyada ise, çok daha rahat ve doğrulukla çizim yapabilmektedirler. Çözünürlük ve eğime göre doğruluğun modellenmesinde, doğruluk ve çözünürlüğün yüksek derecede, eğim ve doğruluğun ise daha düşük derecede korelasyonlu olduğu görülmüştür.

1:16.000 ölçekli hava fotoğraflarından hem fotogrametrik değerlendirme ile elde edilen eş yükseklik eğrilerinden SYM üretimi, hem de otomatik görüntü eşleme ile SYM üretimi gerçekleştirilmiştir. Eş yükseklik eğrilerinden üretilen SYM'lerin doğruluğunun otomatik görüntü eşleme ile üretilenlere göre yaklaşık iki kat daha yüksek olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, 1:16.000 ölçekli hava fotoğraflarından 5 metre aralıklı eş yükseklik eğrileri üretilmiştir. Bu verilerden üretilen SYM'lerin KOH'sı  $\pm 1$  metre civarındadır. Elde edilen sonuçlar eş yükseklik eğrilerinden üretilen SYM'lerin KOH'larının eş yükseklik eğrisi aralığının 1/3'ü ile 1/5'i arasında değişeceği tezini (Li, 1994) desteklemektedir.

SYM'lerin testinde nokta koordinatları ve daha yüksek doğrulukta bir SYM olmak üzere iki tür referans veri kullanılmıştır. Nokta yükseklikleri ile karşılaştırıldığında, otomatik görüntü eşleme ile üretilen SYM'nin KOH'sı  $\pm 1.73$  metre bulunmuştur. Aynı SYM daha yüksek doğrulukta bir SYM ile karşılaştırıldığında KOH'sı  $\pm 2.98$  metredir. Karşılaştırmalarda kullanılan noktalar, yol kavşağı, duvar köşesi gibi keskin detaylardan seçilmiştir. Bu tür noktalar otomatik görüntü eşlemenin en başarılı olduğu yerlerdir ve bu noktalar ile yapılacak karşılaştırma, SYM'nin tamamı hakkında bilgi vermemektedir. Bu nedenle, SYM'lerin doğruluklarının belirlenmesinde karşılaştırmanın daha yüksek doğruluklu bir SYM ile yapılması durumunda, SYM'nin tamamı hakkında bilgi sahibi olunacak ve doğruluğun temsili açısından daha uygun bir yöntem olacaktır.

## KAYNAKLAR

**Bolstad, P.V. ve Stowe T.**, 1994, An Evaluation of DEM Accuracy: Elevation, Slope and Aspect, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **60(11)**, s.1327-1332.

**Erdoğan, M.**, 2000, Investigating The Effect Of Digital Elevation Model Accuracy On The Planimetric Accuracy Of Orthorectified Spot Imagery, *ODTÜ Yüksek Lisans Bitirme Tezi*, Ankara.

**Heipke, C.**, 1996, Overview of Image Matching Techniques, *Official Publication, OEEPE*.

**Kraus K., Briese C., Attwenger M. ve Pfeifer N.**, 2004, Quality Measures for Digital Terrain Models, *ISPRS-2004 Congress*, İstanbul.

**Li Z.**, 1994, A Comparative Study of The Accuracy of Digital Terrain Models (DTMs) Based On Various Data Models, *ISPRS Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing*, **49(1)**, s.2-11.