

1:16.000 ölçekli hava fotoğraflarından SYM üretimi ve doğruluk modellemesi

Mustafa ERDOĞAN*, Gönül TOZ

İTÜ İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Hava fotoğrafı ve uydu görüntülerindeki veriler, çok uzun zamandır klasik yollarla ve operatörler tarafından elle çizilmekteydi. Bilgisayar teknolojisi ve dijital görüntü işleme alanlarındaki gelişmeler, günümüzde bu işlemlerin otomatikleşmesine olanak sağlamaktadır. Otomatikleşmenin hedefi hızı arttırmak ve değerlendirme masraflarını azaltmaktır. Bu kapsamda fotogrametri alanında otomatikleşmenin büyük oranda sağlandığı işlemlerden birisi de 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 modeli, otomatik görüntü eşleme, hava fotoğrafları.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Mustafa ERDOĞAN. mustafa.erdogan@hgk.mil.tr; Tel: (312) 595 22 86.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Veri türü, kalitesi ve üretim yöntemine göre Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) standartlarının belirlenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 17.12.2007 tarihinde dergiye ulaşılmış, 30.01.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir

DEM (Digital Elevation Model) production from 1:16.000 scale aerial photographs and accuracy modeling

Extended abstract

Aerial photographs and satellite imagery have been evaluated manually by the operators for a long time for the extraction of the vector data. Computer technology and digital image processing technologies have been developed and this development provides to perform these extraction processes automatically or semi-automatically. The aim of making the processes automatic is to increase the speed of collecting the data and to reduce the cost. Digital elevation model production has been one of the most automated process of photogrammetry.

Although, formats and accuracy for some formats of digital elevation models are standardized, data sources, quality of data sources and production methods of digital elevation models to provide or improve the standards are not determined clearly. Nonexistence of standards and production criteria causes loss of time and money and production of digital elevation models without known standards and accuracies. Also these nonstandard productions cause data loss of digital elevation models which are needed dense work and source. Many researches are made about 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 data sources are produced and the accuracies of digital elevation models are investigated. The results of these studies vary according to the source data, resolution, ground control point distribution, production method, topography and reference data for the accuracy assessment. On the other hand, the accuracies are investigated in these studies, but the duration of digital elevation model productions are neglected generally. This situation prevents the optimization of production.

Photogrammetry provides the most frequently used data sources and techniques for generating digital elevation models (Stocks & Heywood, 1994), either by direct generation of digital elevation models or indirectly via its use in topographic mapping for production of contour lines. Photogrammetry either involves stereoscopic techniques for interpretation of aerial photography or digital image correlation applied to aerial photographs.

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 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. Some solutions are suggested for the areas having high errors. Two different test regions are used for the study. First region is Gölbaşı near Ankara. Gölbaşı is a test region used for different purposes for aerial photography. 40 1:16.000 scale aerial photographs of the region were taken in 2002. Second region is an area at the proximity of Bursa. 1:16.000 scale aerial photographs of the region were taken right after the 1999 Gölcük Earthquake.

Five meter interval contour lines were compiled from stereo models for Gölbaşı region. First digital elevation model was produced from these contour lines. At the second stage, a digital elevation model was produced from the same area by automatic image matching. These digital elevation models are compared with 27 check points which are measured at the field by GPS. Root Mean Square Error (RMSE) of the digital elevation model produced from contour lines is found to be 0.61 meter. RMSE of digital elevation model produced by automatic image matching is found to be 2.98 meters.

Five meter interval contour lines were compiled from stereo models for Bursa region also. Nine digital elevation models with the resolutions changing from 1 meter to 256 meters were produced from the contour lines. Digital elevation models are compared with 25 meter interval main contour lines which were compiled more precisely. RMSE of the digital elevation model is found to be 0.61 meter. Also the accuracies of digital elevation models changing with the resolution of digital elevation model and slope of topography are tried to be modeled with a polynomial equation. The results showed that the accuracy is correlated highly with digital elevation model resolution.

Keywords: Digital elevation model, automatic image matching, aerial photographs.

Giriş

1980'li yılların sonlarında bilgisayar teknolojisi 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 otomatikleşmiş 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 topografik haritaların üzerindeki eş yükselti eğrilerinin yerini, vektör eş yükselti eğrileri ve arazi kırıklık hatları ile daha kaliteli ve yüksek çözünürlüklerde "Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM)" almıştır.

Digital fotogrametrik sistemler stereo modeller üzerinden digital topografik 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. SYM'nin ilk kullanımları 1950'li yıllara dayanır. SYM'lerin kullanıldığı genel olarak beş ana uygulama alanı vardır: İnşaat Mühendisliği, Yer Bilimleri, Planlama ve Kaynak Yönetimi, Jeodezi ve Fotogrametri, Askeri uygulamalar.

Bu kadar geniş bir uygulama alanı olan SYM'lerin sunum formatları ve bazı formatlar için doğruluklarda standartlık sağlanmış olmasına rağmen, bu standartları sağlamak ya da daha da iyileştirmek için kullanılacak veri türleri, bu verilerin kalitesi, üretim yöntemlerine ilişkin standartlar açıkça belirlenmemiştir. Bu şekilde standartların ve açık üretim kriterlerinin

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 olmaktadır. 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 yükselti 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 diğer bir çalışmada 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. Yaklaşık olarak farklılıkların %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 ve diğerleri (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 ölçüleri getirilmeye çalışılmıştır.

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 yükselti 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 ve (3) Rasgele hata. Kaba hatalar temel kısımlarda görülen hatalar olup, interaktif editleme sırasında kolayca ortadan kaldırılabılır. Sistemik hatalar sabit bir konum içeren hatalar olup, veri toplama yöntemleri ve sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu hata çeşitleri şunları içerir: Düşey yükseklik kayıklıkları, ağaçlara, binalara ve gölgelere bağlı arazi yüzeyinin yanlış yorumlanması, hayali kayalıklar, zirveler ve hendekler. Rasgele hatalar, bilinmeyen veya tesadüfî olaylardan kaynaklanırlar. Bu hataların büyüklüğü editleme ile azaltılır. Fakat tamamen ortadan kaldırılamaz.

Karesel ortalama hata (KOH); veri toplama sırasında ortaya çıkan rastgele ve 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 SYM doğruluk kriterleri içinde iyi bilinen doğruluklarda gerçek yüksekliklere sahip olmalıdır (Erdoğan, 2000).

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.

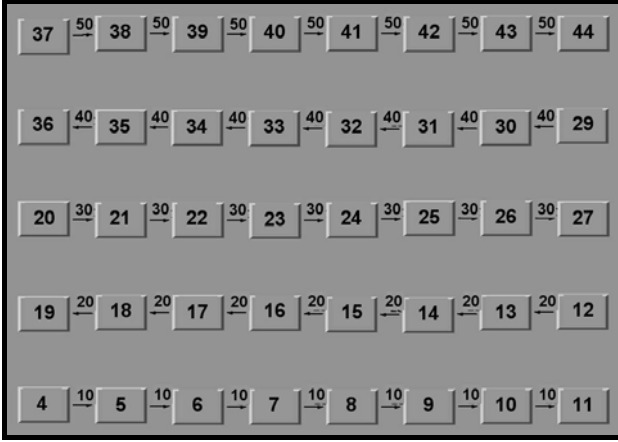
1:16.000 ölçekli hava fotoğraflarından SYM üretimi

Otomatik görüntü eşleme ile SYM üretimi
Otomatik görüntü eşleme veya diğer adıyla digital görüntü eşleme, en azından kısmen 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 1:16.000 ölçekli hava fotoğrafları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gölbaşı'nı kapsayan hava fotoğrafları 29 Ağustos 2002 tarihlidir. Blok 5 koldan 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.

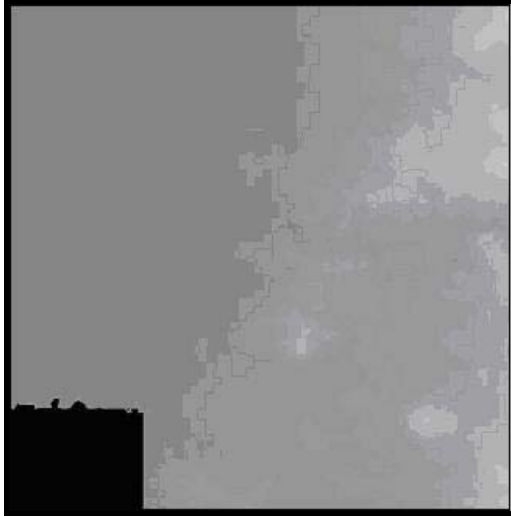
Eş yükseklik eğrisi değerlendirme ile SYM üretimi

Eş yükselti eğrisi değerlendirme ile SYM üretimi Gölbaşı ve Bursa bölgelerinde gerçekleştirilmiştir. SYM üretimi için kullanılan yöntemlerden biri

ba-sılı topoğrafik haritalardan eş yükselti eğrilerinin sayısallaştırılması ve diğeri stereo modellerden



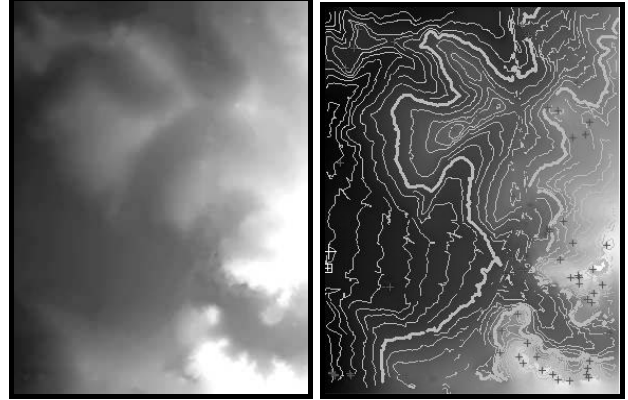
Şekil 1. Gölbaşı bölgesine ait 1:16.000 ölçekli hava fotoğrafı bloğu



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

doğrudan eş yükselti eğrisi çizimidir. Eş yükselti eğrisi üretimi zaman alıcıdır, bununla birlikte topoğrafik haritalar için vazgeçilmez bir detaydır. Otomatik görüntü eşleme ile üretilen SYM'lerden de eş yükselti 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 yükselti eğrisi üretimi çok kullanılmayan ve tercih edilmeyen bir yöntemdir. Ancak tersi şekilde eş yükselti eğrilerinden SYM üretimi ise çok yaygındır. Eş yükselti eğrilerinden SYM üreti-

minde üretilen SYM'nin doğruluğunun eş yükselti eğrisi aralığının 1/3'ü ile 1/5'i arasında olması beklenir. Eş yükselti eğrisi değerlendirmenin çok zaman alıcı bir süreç olması nedeniyle Gölbaşı bölgesinde 1:5.000 ölçekli pafta boyutlarında küçük bir bölgenin eş yükselti eğrileri değerlendirilmiştir. Bu eş yükselti eğrileri kullanılarak PCI Geomatica yazılımının OrthoEngine modülünde SYM üretilmiştir. Üretilen SYM Şekil 3'de gösterilmiştir.



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

İkinci olarak Bursa-G23-c-14-d paftasına ait sayısal eş yükselti eğrileri dosyası kullanılmıştır. Bölgede yükseklik 305 ile 1073 metre, eğim ise %0 ile %175 arasında değişmektedir. Bölgenin 17 Ağustos 1999 depremi sonrası 1:16.000 ölçekli stereo hava fotoğrafları alınmıştır. Bu fotoğraflardan faydalanılarak 5 metre aralıklı eş yükselti eğrileri fotogrametrik değerlendirme ile toplanmış ve düzeltme işlemleri yapılmıştır. Eş yükselti eğrileri Şekil 4'de gösterilmektedir.

Bu eş yükselti eğrilerinden faydalanılarak 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.

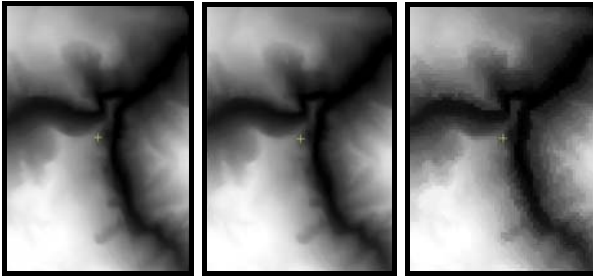
Doğruluk araştırması

Gölbaşı bölgesinde üretilen sayısal yükseklik modellerinin doğruluğu arazide GPS ile ölçülen 27

adet nokta ile kontrol edilmiştir. Sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde eş yükselti eğrilerinden üretilen SYM’nin otomatik görüntü eşleme ile üretilene göre belirgin şekilde daha iyi olduğu görülmektedir.



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



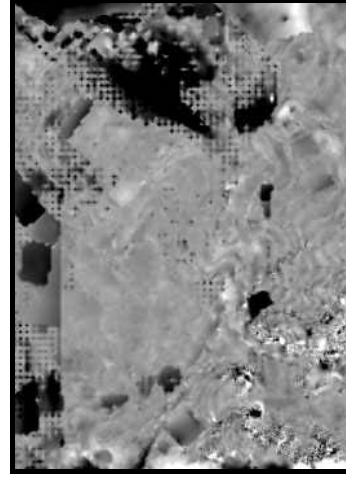
Şekil 5. Eş yükselti eğrilerinden üretilen 1, 8 ve 32 metre çözünürlüklerde SYM’ler (Bursa)

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

SYM Kaynağı	Maks. Hata (metre)	Hataların Ort. (metre)	KOH (metre)
Eş Yükselti Eğrileri	0.11, 0.80	0.53	± 0.61
Otomatik Eşleme	-5.69, 3.09	-0.34	± 1.73

Eş yükselti eğrilerinden elde edilen SYM’nin daha doğru olduğu düşünüldüğünde diğer SYM eş yükselti eğrilerinden elde edilen SYM ile karşılaştırılabilir. Bu amaçla 1:16.000 ölçekli

hava fotoğraflarından otomatik görüntü eşleme ile elde edilen SYM ile eş yükselti 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.



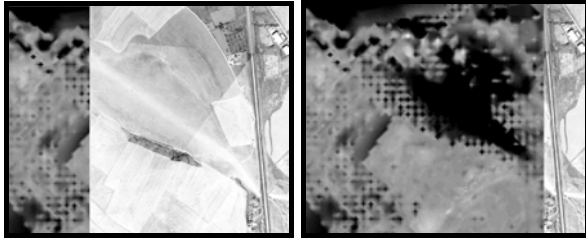
Şekil 6. Fark (hata) görüntüsü (Gölbaşı)

Tablo 2. Otomatik görüntü eşleme ile üretilen SYM’nin hataları (Gölbaşı)

	Maks. Hata (metre)	Hataların Ortalaması (metre)	KOH (metre)
Oto. Eşl. SYM	-68.25 28.91	-1.32	± 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 arazi de elips şeklinde bir toprak yapısının bulunduğu görülmektedir. Bu yapıda belirgin detaylar bulunmamaktadır. Renklerde 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.

Şekil 6 incelendiğinde diğer bir hata olarak da SYM farkının solunda yukarıya doğru hat şek



Şekil 7. Hatalı bölge

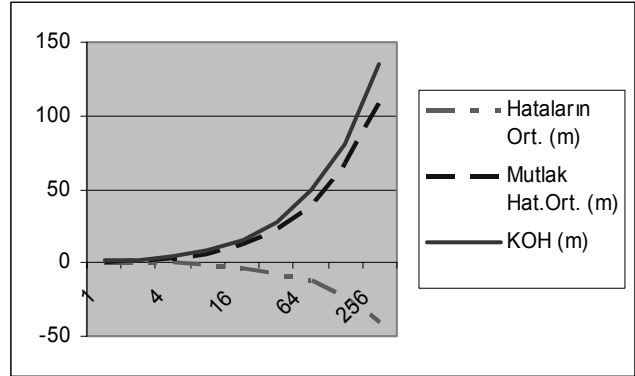
linde bir yapının oluştuğu görülmektedir. Burası stereo modelin dış hattıdır. Modellerin dışına doğru eğim açılarının yükselmesi nedeniyle görüntüler farklılaşmakta ve otomatik görüntü eşlemenin doğruluğu düşmektedir. Bu nedenle model kenarlarındaki verilerin kullanımından kaçınılmalıdır.

SYM farkları alınarak yapılan bu çalışmanın, daha önceki 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 yükselti eğrileri üretiminde ise elde edilen ürün bütün bölgede benzer doğruluktadır. Eş yükselti eğrilerinden elde edilen SYM ile otomatik görüntü eşleme ile elde edilen SYM'nin karşılaştırılması SYM'nin geneli hakkında daha doğru bilgi verecektir.

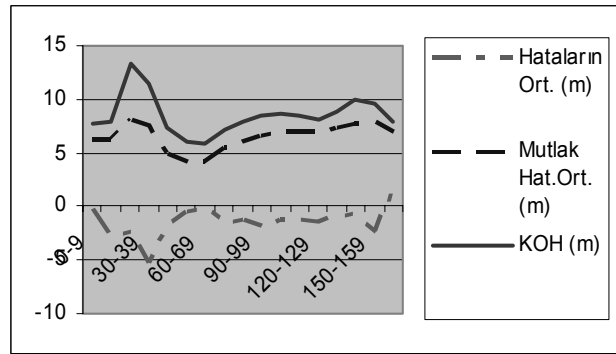
İkinci bölge olarak seçilen Bursa'da üretilen SYM'ler, ana eş yükselti eğrileri olan ve daha hassas değerlendirilen 25 metre aralıklı eş yükselti eğrileri ile PCI Geomatica yazılımının ELEVRMS modülü kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu amaçla 15372 nokta kullanılmıştır.

Yapılan karşılaştırma sonucu, her noktada yükseklik hataları hesaplanmış, bu hatalardan da çözünürlüklere ve eğim gruplarına göre ortalama,

standart ve mutlak hatalar hesaplanmıştır. Çözünürlüğe göre değişen hatalar Şekil 8'de ve eğime göre değişen hatalar Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu hatalara ilişkin değerler Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir.



Şekil 8. Farklı çözünürlüklerdeki SYM'lerin doğrulukları



Şekil 9. 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

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

Tablo 5. SYM'lerin doğrulukları

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

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 Y2, X2 ve XY katsayılarının oldukça küçük olduğu görülmüştür. Bu nedenle, Y2, X2 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. Eğer bütün katsayılar dengelemeye eşit ağırlıklı olarak girilmişse formüldeki değeri katsayının standart sapmasıdır. 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.

$$\hat{\sigma} = \hat{\sigma}_0 \times \sqrt{C_x}$$

$$testdeğ. = \frac{|\delta(i)|}{\hat{\sigma}}$$

(1)

Tablo 6. Model katsayıları

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

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.

Tablo 7. Korelasyon katsayıları

	X (Eğim)	Y (Çözünürlük)	Z (Doğruluk)
X	1.000	0.000	0.024
Y		1.000	0.953
Z			1.000

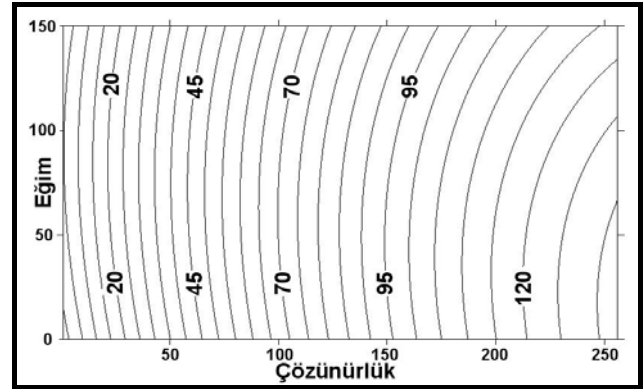
SYM’lerin sadece çözünürlük veya sadece eğime göre değişimini modellemek amacıyla da benzer bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla eğim ve çözünürlüğe göre hazırlanan “çözünürlük-eğim-hata” verileri dosyası kullanılarak, eğime bağlı $Z=a+bX+cX^2$ ve çözünürlüğe bağlı $Z=a+bY+cY^2$ polinomlarının 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 aralığın-

da 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 ± 0.076	428.1	1.965 ± 0.037	53.7
b	0.127 ± 0.002	61.7	0.766 ± 0.001	653.0
c	-8.66E-04 ± 1.17E-05	74.0	1.10E-03 ± 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 10’da gösterilmiştir. Bu yüzeyde hataların çözünürlük ve eğim yönünde hemen hemen doğrusal olarak arttığı, ancak çözünürlük yönündeki artışın daha belirgin olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Üretilen Z(X,Y) fonksiyonunun eş-hata eğrileri ile gösterimi

Sonuç ve öneriler

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

1:16.000 ölçekli hava fotoğraflarından değerlendirilen eş yükselti 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 yükselti 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 yükselti eğrilerinden SYM üretimi, hem de otomatik görüntü eşleme ile SYM üretimi gerçekleştirilmiştir. Eş yükselti eğrilerinden üretilen SYM'lerin otomatik görüntü eşleme ile üretilenlere göre yaklaşık iki kat daha doğru olduğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen çalışmalarda, 1:16.000 ölçekli hava fotoğraflarından 5 metre aralıklı eş yükselti eğrileri üretilmiştir. Bu verilerden üretilen SYM'lerin KOH'sı sırasıyla ± 1 metre civarındadır. Elde edilen sonuçlar eş yükselti eğrilerinden üretilen SYM'lerin KOH'larının eş yükselti 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 ± 1.73 bulunmuştur. Aynı SYM daha yüksek doğrulukta bir SYM ile karşılaştırıldığında KOH'sı ± 2.98 metredir. Genelde karşılaştırmalarda kullanılan noktalar, yol kavşağı, duvar köşesi gibi keskin detaylardan seçilmektedir. 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 daha yüksek doğruluklu bir SYM ile karşılaştırmanın, SYM'nin tamamı hakkında bilgi vereceği ve daha uygun bir yöntem olacağı değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- Bolstad P. V. ve Stowe T., (1994). An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope and aspect, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **60**, 11, 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. and 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, 2-11.
- Stocks, A.M. ve Heywood, D.I., (1994). Terrain Modeling for mountains. In: Price, M.F. & Heywood, D.I. (Ed.s), *Mountain Environments and GIS*, Taylor and Francis, London, 25-40.