

1:35.000 ÖLÇEKLİ HAVA FOTOĞRAFLARINDAN OTOMATİK EŞLEME İLE FARKLI ÇÖZÜNÜRLÜKLERDE SAYISAL YÜKSEKLİK MODELİ (SYM) ÜRETİMİ

M. Erdoğan^a, G. Toz^b

^a Harita Genel Komutanlığı, Fotogrametri Dairesi, Dikimevi Ankara, Türkiye – mustafa.erdogan@hgk.mil.tr

^b İTÜ, İnşaat Fakültesi, 80626 Maslak İstanbul, Türkiye – tozg@itu.edu.tr

ANAHTAR KELİMELER: Hava Fotoğrafları, SYM, Otomatik Eşleme, Doğruluk, Çözünürlük

ÖZET:

Bilgisayar teknolojisinde meydana gelen hızlı gelişmeler bir çok uygulama alanında kullanılmaya başlamış, bilgisayar teknolojisini kullanan diğer teknoloji ve yöntemlerin doğmasına katkıda bulunmuştur. Bu gelişim etkisini fotogrametri alanında da göstermiş, analog ve analitik fotogrametrinin devamı olarak 1990'ların başında '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 foto-tarayıcılar, uzaktan algılama uydusu sistemleri ve sayısal hava kameraları geliştirilmiştir. Bu süreç içinde, basılı topoğrafik 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. Jeodezi ve fotogrametrinin ana amaçlarından birisi güvenilir SYM üretimidir. Üretilen SYM'ler ayrıca jeodezik ve fotogrametrik veri toplama, düzenleme ve düzeltme, ortofoto üretiminde, topoğrafik harita üretiminde de kullanılırlar. SYM üretimi, manuel olarak eş yükseklik eğrisi kıymetlendirme ile veya otomatik yöntemlerle yapılabilir. Otomatik yöntemler SYM üretim süresini oldukça kısaltmakla birlikte hataları da manuel yöntemlerle üretilenlere göre daha yüksektir. Bu nedenle, üretim sonrası daha fazla kontrol ve editlemeye ihtiyaç bulunmaktadır. Yine bu üretimlerde topoğrafyanın eğim özelliklerine göre üretilen SYM'nin çözünürlüğü de önem kazanmaktadır. Düz topoğrafyada yüksek çözünürlüklü SYM üretiminin veri yükünü artırmaktan başka hiçbir faydası olmayacağı gibi, çok eğimli topoğrafyada da düşük çözünürlüklü SYM üretimi yüksekliğin temsilinde düşük çözünürlükten kaynaklanan hata artışlarına sebep olacaktır. Bu nedenlerle hata artışına sebep olmayacak uygun çözünürlükte bir SYM'nin üretimi önemlidir. Bu çalışmada 1:35.000 ölçekli stereo hava fotoğrafları kullanılarak 2 metre ile 256 metre arasında farklı çözünürlüklerde SYM'ler üretilmiştir. Bu SYM'ler stereo model üzerinde daha yüksek hassasiyetle çizilen ve topoğrafyayı iyi şekilde temsil eden 3D vektör verileri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada 6773 nokta kullanılmıştır. Her nokta için noktanın eğimi ve SYM'lerdeki yükseklik hatası hesaplanmıştır. Daha sonra aynı eğime sahip noktaların ortalaması alınarak elde edilen tablodan eğim ve çözünürlüğe göre değişen doğruluk modellenmeye çalışılmıştır. Modelleme amacıyla ikinci dereceden bir polinom kullanılmıştır. Yine aynı 6773 nokta kullanılarak eğim ve çözünürlüğün doğruluk ile korelasyonu hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğruluğun eğimden çok çözünürlük ile korelasyonlu olduğunu göstermiştir. Diğer elde edilen sonuç, 1:35.000 ölçekli hava fotoğraflarından otomatik korelasyon ile 16 metreden daha yüksek çözünürlükte SYM üretiminin SYM doğruluğuna hiçbir katkıda bulunmadığını ve sadece veri yükünü artırdığını göstermiştir. Yapılan testler, üretilen SYM'lerin en yüksek doğruluğunun kaba hatalar editlenmeden 7 metre, kaba hatalar editlendiğinde 5 metre civarında olacağını göstermiştir.

1. GİRİŞ

1.1 Sayısal Yükseklik Modelleri

SYM, istenen amaç ve doğruluğa uygun olarak, yüzey üzerinde uygun sayı ve sıklıkta, koordinatları bilinen noktalar yardımıyla yüzeyin matematiksel ve sayısal olarak tanımlanmasıdır (Toz, 1989).

Sayısal yükseklik modelleri yer, çevre ve mühendislik bilimlerindeki birçok 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.

SYM verilerinden eşyükseklik eğrileri, ortofotolar, stereo perspektifler, eğim haritaları ve toprak işleri uygulamaları yapılmaktadır. SYM verileri mühendislikte rota belirlenmesinde, otoyol ve demiryolu planlamasında, mühendislik projelerinin planlanması ve inşası sırasında alan,

hacim ve eğim hesaplarında kullanılabilir. SYM verileri ayrıca iki nokta arasındaki görünürlük analizinde ve profil çiziminde de kullanılabilir. SYM verileri yakın resim fotogrametrisinde karmaşık yüzeye sahip cisimlerde biçim ve boyut belirlenmesinde de kullanılmaktadır.

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 belirlenmemiştir. Standartların ve üretim kriterlerinin bulunmaması, SYM üretimlerinde zaman kaybına ve maliyetlerin artmasına, doğrulukları belli olmayan bir çok farklı SYM'lerin oluşmasına neden olmakta, 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.

SYM üretimindeki yeni yöntemler ve teknolojiler sonucu "SYM ne kadar doğru?" sorusu Kraus (2004) ve diğ. tarafından cevaplanmaya çalışılmıştır. Çeşitli modeller lazer tarayıcı ve fotogrametrik veride test edildi. SYM'lerde nokta sıklığının, arazi eğim ve değişkenliğini etkisi araştırılmış, rölatif SYM doğruluğu için çeşitli gelişmiş kalite ölçüleri getirilmeye çalışılmıştır.

Yapılan çalışmalarda, farklı veri türleri kullanılarak farklı çözünürlüklerde SYM'ler üretilmiş, bu SYM'lerin doğrulukları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar da verinin türü, çözünürlük, nirengi dağılımı, üretim yöntemi ve karşılaştırılan referans veriye göre farklılık göstermektedir. Diğer taraftan yapılan çalışmalarda, elde edilen SYM'nin doğruluğu belirlenmekle beraber, bu SYM'nin üretim süresi ve maliyeti genelde gözardı edilmiştir. Bu durum ihtiyaçlar ve kaynakları değerlendirmede optimizasyonun gerçekleştirilmesinde bir engel teşkil etmektedir.

Mutlak doğru bir harita olmadığı gibi, mutlak doğru bir SYM de bulunmamaktadır. Bütün SYM'ler bir takım ilişkili faktörlere bağlı olarak büyük küçük hatalar içerirler. Tüm haritacılık işlemleri gibi, arazi modelinin doğruluğu da seçilen veya istenilen uygulamaya uygun olmalıdır. Örneğin, hiçbir mühendis, detaylı bir inşaat projesinin planlama ve kontrolü için 1/50.000 ölçekli haritadan büyütülen eş yükseklik eğrilerini kullanmayacaktır. Böyle amaçlar için, bu eş yükseklik eğrileri verisinden elde edilen SYM'yi kullanmak tavsiye edilmeyecektir. Sayısal yükseklik modelinin doğruluğu ve bu doğruluğu etkileyen faktörler, bu modellerin oluşturulması ve uygulaması için dikkate alınması gereken faktörlerdir (Shearer, 1994).

Bu çalışmanın amacı, SYM üretiminde yoğun olarak kullanılan 1:35.000 ölçekli hava fotoğraflarından otomatik eşleme ile farklı çözünürlüklerde SYM'ler üreterek en düşük veri hacmiyle elde edilebilecek en yüksek doğruluklu SYM'nin belirlenmesi ve çözünürlük ve eğime göre değişen doğruluğun modellenmesidir.

1.2 SYM Doğruluğuna Çözünürlük ve Eğimin Etkisi

SYM hataları üç türdür: (1) Kaba hata, (2) Sistemik ve (3) Rastgele hata. Kaba hatalar temel kısımlarda görülen hatalar olup, interaktif editleme sırasında kolayca ortadan kaldırılabilir. 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.

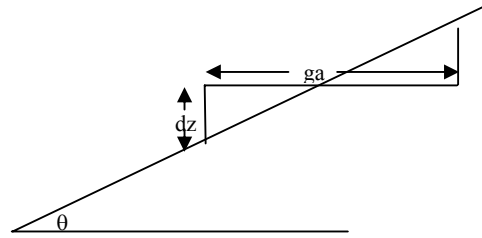
Karesel ortalama hata (KOH); veri toplama sırasında ortaya çıkan rastgele ve sistemik hataları ifade ederek SYM'nin düşey doğruluğunu tanımlamada kullanılır. Doğruluk; konumları bilinen nokta yükseklikleri, bunlara karşılık gelen

doğrusal enterpole edilmiş SYM'deki yükseklikler 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).

Kabul edilebilir test noktaları tercih sırasına göre: Arazi kontrol noktaları, havai nirengisi yapılmış test noktaları, nokta yükseklikleri veya kaynak haritalarda uygun aralıktaki eş yükseklik eğrileri üzerindeki noktalardır (Erdoğan, 2000).

Sayısal eşyükseklik eğrilerinden elde edilen SYM'lerin doğrulukları konusunda Li (1994) tarafından yapılan çalışmada, topoğrafik yapının özelliğine göre eşyükseklik eğrilerinin aralığının 1/3'ü ile 1/5'i civarında doğruluklar elde edilebileceği belirtilmiştir. Bu çalışma genel bir fikir vermekle birlikte değişen SYM grid aralığı ve kullanılacak enterpolasyon yöntemi ile bu doğruluğunda değişeceği aşikardır. Ayrıca otomatik eşleme ile elde edilecek doğruluklarında bir miktar daha düşük olması beklenmelidir.

Şekil 1'deki gibi θ eğimli bir arazi düşünüldüğünde, SYM'nin sürekli bir fonksiyon olmaması ve arazinin belli bir grid aralığında (ga) temsil edilmesi nedeniyle mutlaka bir hata oluşacak ve arazi tam olarak temsil edilemeyecektir.



Şekil 1. θ eğimli bir arazi

Böyle bir arazi kesiti için oluşacak hata bu yükseklik değerinin alt ve üstünde oluşan üçgenlerin alanlarının toplamıdır. Burada tam orta noktada arazi yüksekliği ile SYM yüksekliğinin aynı olduğu kabul edilirse oluşacak hata şu şekilde hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} \text{tg}\theta &= dz / (ga / 2) & dz &= \text{tg}\theta * (ga / 2) \\ \text{Hata} &= 2 * ((dz * ga / 2) / 2) = dz * (ga / 2) & (1) \\ &= \text{tg}\theta * (ga / 2) * (ga / 2) = \text{tg}\theta * ga^2/4 \end{aligned}$$

$$\text{Hata} = \text{tg}\theta * ga^2/4$$

Bu fonksiyon incelendiğinde SYM yükseklik hatasının arazi eğim açısının tanjantı ve grid aralığının karesi ile orantılı olduğu görülmektedir. Arazi eğim açısı 0 ila 90° arasında değişebilmektedir. Bu değerlere göre fonksiyonun limiti alındığında;

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} (\text{tg}\theta * ga^2/4) = 0 * ga^2/4 = 0 \quad (2)$$

$$\lim_{\theta \rightarrow 90} (\text{tg}\theta * ga^2/4) = \infty * ga^2/4 = \infty$$

değerleri elde edilir. Arazi tam düz bir arazi olduğunda grid aralığı nedeniyle gelecek hata 0 olacaktır. Eğimin 90 derece civarında olduğu uçurum türü bir arazide ise hatalar maksimum olacaktır. Burada hata sonsuza gidiyor gibi görünmesine rağmen gerçek durumda bu tür bir arazide belli bir yerde

uçurum sona ereceğinden hata sonsuza gitmeyecek, belli bir değer alacaktır.

Fonksiyonun ikinci değişkeni olan grid aralığı ise kullanıcı isteği ve amacına göre farklı değerler olabilir. Bu değerler çok küçük veya çok büyük değerler olabilir. Grid aralığı sıfır ve sonsuza giderken (gerçekte bu değerleri alamaz, sadece fonksiyonun özelliğini görmek için bu değerler alınmıştır) bu fonksiyonun limiti alındığında;

$$\lim_{ga \rightarrow 0} (tg\theta * ga^2/4) = tg\theta * 0^2/4 = 0 \quad (3)$$

$$\lim_{ga \rightarrow \infty} (tg\theta * ga^2/4) = tg\theta * \infty^2/4 = \infty$$

değerleri elde edilir. Grid aralığı düştükçe arazi daha iyi temsil edilecek ve hata azalacaktır. Grid aralığı büyüdükçe grid aralığının karesiyle orantılı olarak hata artacaktır. Bununla birlikte grid aralığını çok küçük almak bir çözüm değildir. Grid aralığından kaynaklanan hata belli bir dereceden sonra kaynak verinin yükseklik doğruluğuna göre çok küçük kalacak ve bu seviyeden sonra grid aralığını küçültmek SYM doğruluğunu anlamlı şekilde değiştirmeyecek ve veri yükünün oldukça artmasına sebep olacaktır. Çalışmada bu özellik ayrıntılı olarak matematiksel ve deneysel olarak incelenmiş, optimum grid aralığı için öneriler getirilmiştir.

2. 1:35.000 ÖLÇEKLİ HAVA FOTOĞRAFLARINDAN OTOMATİK EŞLEME İLE SYM ÜRETİMİ

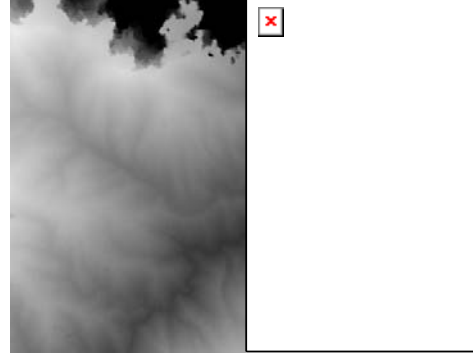
2.1 Çalışma Bölgesi

Çalışma bölgesi olarak Tortum seçilmiştir. Seçilen bölge oldukça dağlık, eğimin 0 ile 63° ve yüksekliğin 1348.6 ile 2946.5 metre arasında değiştiği bir alandır. Bölge, ormanlık alanlar ve çıplak arazi ile kaplıdır. Bölgenin 2005 tarihli Zeiss RMK TOP15 kamerasıyla (odak uzaklığı: 153 mm) alınmış 1:35.000 ölçekli hava fotoğrafları mevcuttur. Hava fotoğrafları siyah-beyazdır ve 21 mikron çözünürlüğünde taranmışlardır.

2.2 SYM Üretimi

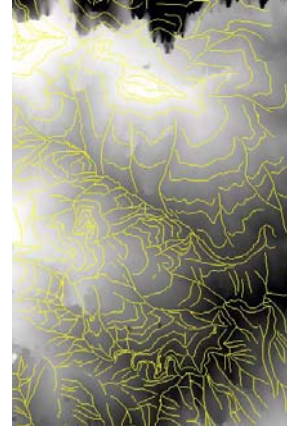
Uygulamada Autometric Softplotter 3.0 fotogrametri yazılımı kullanılmıştır. Yazılımın Block Tool modülü kullanılarak fotogrametrik blok oluşturulmuştur. Burada kullanılan kamera, fotoğraf ve yöneltme parametreleri girilmektedir. Kullanılan görüntüler 153 mm. odak uzaklıklı Zeiss RMK Top15 kamerasıyla alınan 7909 ve 7910 numaralı 1:35.000 ölçekli hava fotoğraflarıdır. Öncelikle projede datum ve projeksiyon bilgileri tanımlanmıştır. Projeksiyon olarak UTM 37nci dilim ve datum WGS84 seçilmiştir. İkinci aşamada kamera kalibrasyon bilgileri sistemde tanımlanmış ve 7909 ve 7910 nolu görüntüler sisteme import edilmiştir. Üçüncü aşamada fotogrametrik nirengi dengeleme programı PATB-GPS ile elde edilen dosyadan (ORI dosyası) dış yöneltme parametreleri import edilmiştir. Görüntülerin iç yönlmeleri yapılarak blok oluşumu tamamlanmıştır. Oluşturulan bloktan faydalanılarak Stereo Tool modülü ile 79097910 isimli stereo model oluşturulmuştur. Bu stereo modelden de DEM Tool modülü kullanılarak otomatik görüntü eşleme ile 2, 4, 8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 160, 192, 224, 256 çözünürlüklerinde 18 SYM üretilmiştir. 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). Her SYM için yazılım ayrıca eşleme başarısını gösteren bir dosyada oluşturmaktadır. Üretilen 16 metre çözünürlüklü SYM ve ilgili istatistik görüntüsü Şekil 2'de gösterilmiştir. İstatistik görüntüsünde gri değerleri 0 ile 6 arasında değişmektedir. 0 eşleme yapılamayan ve 6 en iyi eşleme yapılan bölgelerdir. Görüntüde koyu bölgeler eşlemenin zayıf ve açık renk bölgeler eşlemenin başarılı olduğu yerleri göstermektedir.



Şekil 2. 16 metre çözünürlüklü SYM ve ilgili istatistik görüntüsü

Oluşturulan SYM'nin çözünürlük ve eğime göre değişen doğruluklarını test edebilmek amacıyla topoğrafyayı iyi şekilde temsil edebilen, bütün bölgeyi kapatan 3 boyutlu vektör veriler stereo model üzerinde kıymetlendirilmiştir. Burada 395 adet çizgi detay kıymetlendirilmiş olup bu çizgiler 7000'e yakın nokta içermektedir. Kıymetlendirilen detaylar SYM üzerine bindirilmiş olarak Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Kıymetlendirilen detaylar

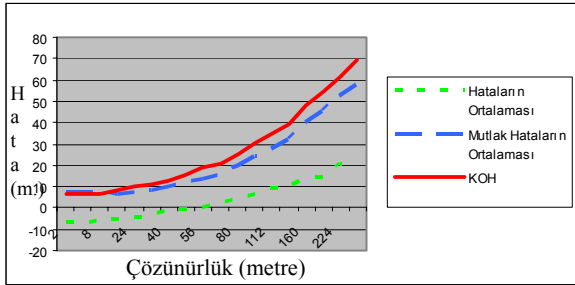
2.3 Doğruluk Araştırması

Oluşturulan SYM'lerin eğim ve çözünürlüğe göre doğruluklarının belirlenmesi ve modellenmesi amacıyla öncelikle 3 boyutlu kıymetlendirmesi yapılan vektör verideki her nokta için eğim ve yükseklik doğruluğunun belirlenmesi gerekmektedir.

Üretilen SYM'ler ile 3 boyutlu vektör verilerin karşılaştırmak amacıyla PCI yazılımının ELEVRMS modülü kullanılmıştır. Bu modül bir SYM ile referans olarak verilen bir vektör veri veya ASCII verideki yükseklikleri karşılaştırarak bir rapor hazırlamaktadır. Bu modülle oluşturulan 18 SYM içinde bir rapor hazırlanmış ve bir EXCEL tablosunda birleştirilmiştir. Aynı modül vasıtasıyla üretilen eğim haritasından da her nokta için eğim değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerde EXCEL tablosuna eklenmiştir. Tabloda eşlenik olmayan noktalar silinmiş ve geriye bütün SYM'lerde ortak olan 6773 nokta kalmıştır. Hazırlanan tablonun bir kısmı Tablo 1'de gösterilmiştir. Tablo incelendiğinde beklendiği şekilde çözünürlükteki artışla beraber hataların yükseldiği görülmektedir. Bu verilerden SYM doğrulukları hesaplanmış, 8 metre çözünürlüğe kadar SYM KOH'un 7 metre civarında sabit, bu çözünürlükten itibaren ise yükselmeye başladığı görülmüştür. Bu verilerden kaba hatalı noktalar silinerek değerler tekrar hesaplanmış ve Şekil 4 ile Tablo 2'de gösterilmiştir. Yine bu tabloda da çözünürlükteki artışla beraber hataların yükseldiği görülmektedir.

Nokta No	Konum		Refer. Z	Eğim %	2 m. SYM	... m. SYM	256 m. SYM
	X	Y					
0	628062	4500040	1926.3	61	-0.68	...	-0.3
1	628099	4500015	1897.2	60	2.32	...	28.77
45	629114	4500021	1559.2	7	9.82	...	98.29
46	629147	4500026	1557.4	27	13.08	...	100.1
...
6773	629705	4504353	2210.5	46	-14.4	...	102.2

Tablo 1. Eğim ve Çözünürlüğe göre yükseklik hataları



Şekil 4. Çözünürlüğe göre değişen SYM hataları

SYM Çözü.	Mutlak Hat.Ort	KOH	SYM Çözü.	Mutlak Hat.Ort	KOH
2	6.3	5.4	64	13.9	17.1
4	6.1	5.4	80	18.0	21.3
8	5.7	5.2	96	22.3	26.3
16	5.5	5.7	112	26.1	30.5
24	5.9	6.9	128	30.3	34.8
32	6.8	8.5	160	37.7	43.0
40	8.3	10.5	192	42.5	48.8
48	10.3	13.0	224	49.7	54.8
56	12.0	15.1	256	54.5	60.2

Tablo 2. Çözünürlüğe göre değişen SYM hataları

İkinci aşamada 2 metre çözünürlükteki SYM'den veriler eğim gruplarına ayrılarak doğruluklar hesaplanmış ve Tablo 3'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde eğimdeki artışa paralel genel olarak hataların da yükseldiği görülmektedir.

Eğim (%)	KOH	Eğim (%)	KOH
0-9	4,8	60-69	7,1
10-19	4,9	70-79	7,3
20-29	5,3	80-89	7,3
30-39	5,8	90-99	6,6
40-49	6,3	>100	8,4
50-59	7,1		

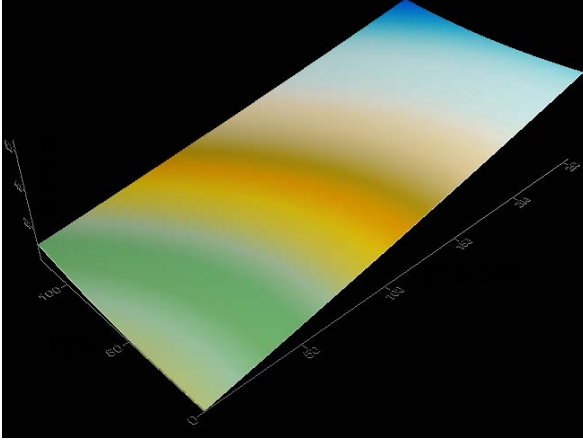
Tablo 3. Eğime göre değişen SYM hataları

2.4 Eğim ve Çözünürlüğe Göre Hataların Modellenmesi

Çalışmanın son aşamasında çözünürlük ve eğime göre dengeleme ile hatalar modellenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla eğim ve çözünürlüğe göre hazırlanan doğruluk verileri "çözünürlük-eğim-hata" şeklinde sıralı bir ASCII dosyaya çevrilmiştir. Bu dosya MATLAB yazılımında dengelenmiştir. Burada çözünürlük x, eğim y ve hatalar z olarak kabul edilmiştir ve $z=a+bx+cy+dxy+ex^2+fy^2$ şeklinde ikinci dereceden bir polinom hesaplanmıştır. Ancak elde edilen sonuçlardan xy'nin katsayısı d'nin anlamsız olduğu değerlendirilerek model $z=a+bx+cy+dxy+ex^2+fy^2$ şeklinde tekrar dengelenmiştir. Son olarak modelin $z=a+bx+cy$ şeklinde birinci derece polinom ile dengelemesi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Tablo 2'de gösterilmiştir. Katsayılar incelendiğinde modelde sabit bir hata miktarının bulunduğu, doğruluğun büyük oranda çözünürlüğe bağlı olduğu, eğimin doğruluğu daha az etkilediği görülmektedir. Çözünürlük ve eğime göre değişen hata grafiği ise Şekil 5'de gösterilmiştir.

	$z=a+bx+cy+dxy+ex^2+fy^2$	$z=a+bx+cy+dx^2+ey^2$	$z=a+bx+cy$
a	0.206 ± 0.084	0.144 ± 0.073	0.699 ± 0.049
b	0.063 ± 0.002	0.062 ± 0.002	0.035 ± 0.001
c	0.224 ± 0.001	0.223 ± 0.001	0.213 ± 0.000
d	$-1.192e-005 \pm 8.035e-006$		
e	$-2.215e-004 \pm 1.886e-005$	$-2.215e-004 \pm 1.886e-005$	
f	$-4.202e-005 \pm 4.034e-006$	$-4.202e-005 \pm 4.034e-006$	

Tablo 4. Model katsayıları



Şekil 5. Çözünürlük ve eğime göre değişen hatalar

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında otomatik eşleme ile farklı çözünürlüklerde SYM'ler üretilmiş ve değişen çözünürlük ve eğime göre hatalar test edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan faydalanılarak eğim ve çözünürlüğe göre değişen hataların matematiksel modellenmesi yapılmaya çalışılmıştır.

Sonuçlar beklendiği şekilde çözünürlük ve eğimdeki artışla beraber hataların da yükseldiğini göstermiştir. Ancak bu artışta çözünürlük daha etkilidir.

16 metre çözünürlüğe kadar üretilen SYM'lerin ortalama ve karesel ortalama hatalarında belirgin bir farklılık görülmemektedir. Ancak 16 metre çözünürlükten sonra hatalarda artış görülmektedir. Bu sonuçlar 1:35.000 ölçekli hava fotoğraflarından otomatik eşleme ile SYM üretildiğinde, 16 metreden daha yüksek çözünürlük kullanmanın doğrulukta bir iyileşme yaratmayacağını göstermektedir.

Hataların çözünürlük ve eğime göre modellenmesi pratikte bir çok fayda sağlayacaktır. Bu şekilde bir modelle belli bir ortalama eğime sahip arazide istenen bir doğruluk seviyesine ulaşmak için gerekli SYM çözünürlüğü hesaplanabilir. SYM üretimi gerektiren projelerin başlangıcında bu şekilde hesaplanacak bir çözünürlük, düşük çözünürlük kullanılması nedeniyle oluşabilecek veri kayıplarını ve gereğinden yüksek çözünürlüğün neden olacağı uzun üretim süreleri ve büyük veri boyutlarını önleyecektir. Ancak burada elde edilen formül 1:35.000 ölçekli hava fotoğraflarından otomatik eşleme ile üretilen SYM'ler için geçerlidir. Daha sonraki çalışmalarda farklı ölçekli ve farklı tür veriler ile farklı üretim yöntemleri içinde benzer formüllerin hesaplanmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Kaynakça:

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*, Vol. 49(1), pp 2-11.

Shearer, J.W., 1994, The Accuracy of Digital Terrain Models, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 60, No. 24, pp 315-336.

Toz, F.G., 1989, Sayısal Arazi Modelleri, *İTÜ Dergisi*, Cilt:47, 2, İstanbul.