SRTM VERİLERİNE DAYALI ÜLKE BAZINDA 3"×3" ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ SAYISAL YÜKSEKLİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI:PROJE SONUÇLARI

İ. Öztuğ BİLDİRİCİ[1], Aydın ÜSTÜN[1], Necla ULUĞTEKİN[2], H.Zahit SELVİ[1], İlkay BUĞDAYCI[1], A. Özgür DOĞRU[2]

[1]Selçuk Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, iobildirici@yahoo.com, (austun, hzselvi, iatasoy)@selcuk.edu.tr
[b]İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, ulugtek@itu.edu.tr, dogruahm@itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye'nin eksiksiz ve yüksek doğrulukta bir SYM'nin elde edilmesini amaçlayan ve bugünlerde tamamlanma aşamasına gelmiş "SRTM Verilerine Dayalı Ülke Bazında 3"×3" Çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modelinin Oluşturulması" isimli proje sonuçlarından bahsedilmiştir. Projenin sonuçlanmasıyla oluşacak SYM, büyük ölçüde 2000 yılının şubat ayında uzaya fırlatılan SRTM (Shutle Radar Topography Mission) uzay mekiğinden radar interferometri tekniği ile elde edilen sayısal yükseklik verilerine dayanmaktadır.

SRTM verilerinde sinyal saçılması, yansıması ve gölgelenmesi gibi etkenler nedeniyle önemli veri boşlukları bulunmaktadır. Projenin başlangıcında, SRTM verilerinin ülkemizi kapsayan kısmında, geliştirilen yazılım ile her bir 25 000'lik paftaya düşen boşluklar görselleştirilmiş ve belirlenen boşlukların doldurulması için yaklaşık 350 pafta Harita Genel Komutanlığı'ndan temin edilmiştir. Veri boşluklarının doldurulmasında hataların en aza indirgenebilmesi için iki yaklaşım benimsenmiştir. Homojen olarak dağılmamış olan, başka bir deyişle büyük alanlar oluşturmayan boşluklar çevre noktalardan enterpolasyon ile, büyük alanlar oluşturan boşluklar ise 25000 ölçekli paftalardan sayısallaştırılarak doldurulmuştur. Enterpolasyon işleminde, yüksekliği boş olan noktaların oluşturduğu bölgenin çevresindeki geçerli noktalar kullanılarak yüzey geçirilmiş ve boş noktaların yükseklikleri hesap yoluyla bulunmuştur. Enterpolasyon işlemi, 25000 ölçekli haritalardan gereken yerlerin boşlukları doldurulduktan sonra uygulanmıştır. Bu şekilde enterpolasyon yönteminin yeterince küçük bölgelere uygulanması sağlanmıştır.

Sonuç olarak tüm veri boşlukları doldurulup, Türkiye'ye ait eksiksiz ve yüksek doğrulukta bir SYM elde edilmiştir. Sonuç ürünün doğruluk analizi, değişik bölgelerdeki 25000'lik paftalardan ve uzun geçkiler boyunca DGPS'le elde edilen izlerden yapılmıştır. Test işlemi hem doldurulan hem de SRTM verilerinin bulunduğu alanlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Türkiye'nin tamamı için 3"×3" çözünürlüğünde oluşturulan boşluksuz SYM, konuyla ilgilenen araştırmacı ve uygulamacılara internet üzerinden sunulacaktır.

1.

Anahtar Sözcükler: sayısal yükseklik modeli, sentetik açıklıklı radar, SRTM, enterpolasyon

ABSTRACT

THE COMPILATION OF THE DIGITAL ELEVATION MODEL FOR TURKEY BASED ON SRTM: THE RESULTS OF THE PROJECT

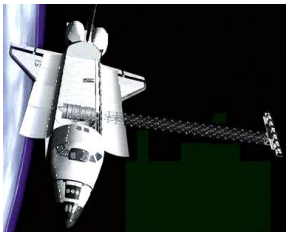
In this study, the results of the project "Obtaining of Digital Elevation Model For Turkey in 3"x3" Resolution Using SRTM Dataset Supported with Local Elevation Data", which aims to create a complete and precise Digital Elevation Model (DEM) of Turkey, are presented. The project supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey has been completed in September 2008. The DEM created in this project is mostly based on the DEM of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), which is obtained by using interferometry method after a shuttle 11-day shuttle mission. The shuttle was launched in February 2000 by NASA.

In the SRTM DEM, there are considerable data voids caused by geometric artifacts, reflection, phase unwrapping and complex dielectric constant. At the beginning of the project, the void data are examined and visualized in terms of 1: 25 000 scaled map sheets. After the inspections, it was decided that the clusters of void data are filled by using 1:25000 scaled maps. Other voids of scattered character are filled by means of interpolation. Thereafter, each map sheets including voids over 100 is visually inspected, 340 sheets are selected for void filling. These maps are obtained from General Command of Mapping (GCM). The void data (points without heights) are overlaid on the map sheets. The contour lines of the maps that covers the clusters of void data are digitized, and partial TINs are created. By using these TINs the void data are filled. After this process the remaining voids are filled with interpolation. The interpolation is performed by using surface fitting. The surface is the Multiquadric surface of Hardy. Since the clustered voids are filled by using 1:25000 scaled maps, the remaining voids are of scattered character. So the interpolation is applied on relatively small areas. Finally a complete DEM of 3" resolution of Turkey is completed. The accuracy analysis of the DEM is performed against the digitized contours of 1:25000 scaled maps, which is a digital product of GCM called YUKPAF, and GPS tracks captured by using a DGPS device mounted on a car. The DEM of 3"×3" resolution for the whole Turkish territory will be shared with researchers and practicing people via Internet. The web site will be announced later.

Keywords: sayısal yükseklik modeli, sentetik açıklıklı radar, SRTM, enterpolasyon

GİRİŞ

Space Radar Topography Mission (SRTM) Amerikan NASA kurumu tarafından yaklaşık 60° kuzey ve güney enlemleri arasında kalan tüm kara parçalarının sürekli ve yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelini elde etmek amacıyla gerçekleştirilmiş bir projedir (Faar ve Kobrick, 2000). Bu amaçla geliştirilen uzay mekiği 2000 yılı Şubat ayında fırlatılmış yapay açıklıklı radar (SAR) yöntemi ile 11 gün boyunca veri toplamıştır. Bu yöntemde yeryüzüne mikrodalga sinyaller gönderilerek güneşin konumundan, hava koşullarından ve yüzey kontrastından etkilenmeden veri toplamak mümkün olmaktadır. SRTM uzay mekiğinde 60 m açıklıkta monte edilmiş olan ikinci alıcı ile stereo görüş sağlanmakta ve yükseklikler elde edilmektedir (Şekil 1).



2.Şekil 1: SRTM uzay mekiği

3.

STRM projesinde yeryüzü kara parçalarının %80'inin taranması hedeflenmiş, bu alanın %99'u bir defa, %95'i iki defa, %50'si ise üç ya da daha çok defa görüntülenmiştir (JPL, 2000). Birden fazla görüntülemenin amacı belli nedenlerden kaynaklanan veri boşluklarını en aza indirmektir.

Toplanan verilerin işlenmesinden sonra ABD sınırları içinde kalan bölge için 1" aralıklı, geriye kalan tüm kara parçaları için 3" aralıklı sayısal yükseklik modeli (SYM) elde edilmiştir. Grid formatında hazırlanan verilere ilişkin coğrafi koordinatlar WGS84 datumundadır. Düşey datum ise EGM96 jeoidi ile tanımlı ortalama deniz düzeyidir. SRTM verilerinin doğruluğu, %90 güven düzeyinde yatayda 15 m'nin ve düşeyde 10 m'nin altındadır (Salamonowicz, 2005; Rodriguez vd., 2006). Veriler, iki versiyon halinde İnternet ortamında sunulmaktadır (ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/). İkinci ve düzeltilmiş versiyon 2005 yılı sonunda yayınlanmıştır. Birinci versiyondaki kadar olmasa da ikinci düzeltilmiş versiyon da radar yönteminden kaynaklanan veri boşluklarını içermektedir.

SRTM SYM yer bilimlerinde bir çok çalışmada kullanılabilecek, global ve yüksek çözünürlüğe sahip bir veri setidir. Verilerin boşluklar içermesi, önemli bir sorun olarak görülmektedir. Bunun yanında, global olarak verilen doğruluk değerlerinin yerel ölçekte toplanmış yersel verilerle karşılaştırmalar yapılarak doğrulanması da verilerin kullanım alanlarının belirlenmesi açısından önemlidir. Bu bildiri ile SRTM verilerinin ülkemizi kapsayan kısmında veri boşluklarının doldurulması ve verilerin doğruluğunun analizi amacıyla yazarlar

tarafından tamamlanan bir proje çalışmasının tanıtılması amaçlanmaktadır. Proje "Yerel Yükseklik Bilgileriyle Desteklenmiş SRTM Verileri Kullanılarak Türkiye için 3″×3″ Çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modelinin Oluşturulması" başlığı altında Tübitak desteğiyle kısa bir süre önce tamamlanmıştır. Proje kapsamında, önceden yapılan çalışmaya da dayanarak (Üstün vd 2006), Türkiye'yi kapsayan veriler analiz edilmiş, her bir 1:100 000 ve 1:25 000 ölçekli pafta bazında boşluklar belirlenmiştir. Boşluk analizinin yanı sıra ülke sınırlarını kapsayan SRTM verilerinin doğruluk analizi yapılmıştır. Bu amaçla yersel veriler, DGPS güzergahları ve 1:25 000 ölçekli topografik haritalardan üretilen YUKPAF verileri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ülke bazında SRTM doğruluğunun kıtalar ve büyük bölgeler bazında yapılan çalışmalarda elde edilen doğruluklara yakın olduğunu göstermektedir. Boşlukların doldurulması için iki yaklaşım benimsenmiştir. Boşlukların oluşturduğu alanlar yeterince küçük ise, boşluklar çevredeki noktalar kullanılarak enterpolasyon yoluyla, alanlar küçük değilse 1:25 000 ölçekli topografik haritalardan sayısallaştırma yapılarak doldurulmuştur.

Çalışmalarda SRTM verilerinin okunması ve değerlendirilmesi amacıyla Linux ortamında C dili ile yazılımlar geliştirilmiştir. 1:25 000 ölçekli haritalardan sayısallaştırma yoluyla SYM elde edilmesi aşamalarında ise ulusal bir ürün olan NETCAD yazılımından yararlanılmıştır. Bazı CBS analizlerinde ise MapInfo yazılımından yararlanılmıştır.

İki yıllık proje süreci sununda Türkiye sınırları içinde kalan SRTM SYM boşlukları tamamen doldurularak, kesintisiz bir SYM elde edilmiştir. Elde edilen veriler yakında duyurulacak bir web sitesi üzerinden kullanıma açılacaktır.

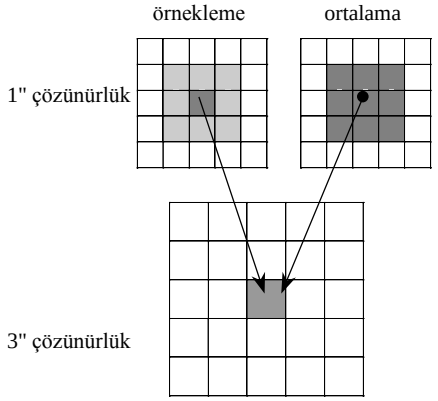
SRTM VERİ YAPISI VE TÜRKİYE VERİSİ

SRTM Veri Yapısı

SRTM verileri üç farklı çözünürlükte hazırlanmıştır. Orijinal veriler coğrafi koordinatlarda 1", 3" ve 30" çözünürlükte grid biçiminde sunulmaktadır. Coğrafi koordinatlar derece biriminde WGS84, yükseklikler metre biriminde EGM96 jeoidine göre tanımlanmıştır. 1" çözünürlükte toplanan verilerden 3" çözünürlüğe iki şekilde geçilmiştir. Örnekleme yönteminde (subsampling) 3" lik piksel içinde yer alan 9 adet 1" lik pikselden ortada yer alanın yüksekliği 3" lik pikselin yüksekliği olarak alınmıştır. Ortalama (averaging) yönteminde ise 9 adet 1" lik pikselin yükseklik ortalaması 3" lik pikselin yüksekliği olarak alınmaktadır (Şekil 2).

Veri setleri 1x1°lik paftalar (hücreler) halinde sunulmaktadır. Tablo 1 ve Tablo 2'de NASA ve NGS tarafından verilen isimler ve veri formatları görülmektedir. (Kobrick, 2005).

Proje kapsamında Tablo 2'de belirtilen LP DAAC sunucusunda yer alan SRTM formatında versiyon 2 verileri kullanılmaktadır. Geliştirilen yazılımlar da SRTM formatını temel almaktadır. Bu formatta veri yapısı grid şeklindedir. SRTM formatında başlangıç noktasının enlem ve boylamı dosya isminde (örneğin N34E032.hgt) belirtilerek, dosyada satırlar halinde 2 byte uzunluğunda tamsayı olarak yükseklikler yer almaktadır. Tamsayı değerlerin byte sıralaması Motorola sistemine göredir. Dosya adında verilen enlem ve boylam 1×1° paftanın (tile) sol-alt (güney-batı) köşesine aittir. Ancak dosyadaki ilk noktanın yüksekliği sol-üst köşeye aittir. Her satırda 1201 değer bulunmaktadır. Dosyada toplam 1442401 değer (yükseklik) yer almaktadır. Yüksekliği olmayan noktaların yükseklikleri dosyada –32768 olarak girilmiştir (geçersiz ya da boş noktalar).



4.Şekil 2: 1" den 3" çözünürlüğüne geçiş
5.

Çözünürlük	SRTM adı	DTED eşdeğeri	Diğer veriler
1" yay	SRTM1	DTED2	
3" yay	SRTM3	DTED1	
30" yay	SRTM30	DTED0	GTOPO30

6.Tablo 1: Veri adlandırma farklılıkları

Versiyon	SDDS[1]	Posta ile talep	LP DAAC[2]
1			1" ABD 3" Dünya-o 30" Dünya-o Format: SRTM
2	1" ABD 3" Dünya-ö Format: ArcGrid, Bil, TIFF, GridFloat	1" ABD 3" Dünya-ö Format: DTED, SRTM	1" ABD-o 3" Dünya-o 30" Dünya-o Format: SRTM

1: http://seamless.usgs.gov ö: Örnekleme
2:ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/ o: Ortalama

7.Tablo 2: Veri formatları

SRTM Veri Boşlukları

SRTM verilerinde boşlukların (yüksekliği belirlenemeyen pikseller/noktalar) nedenleri aşağıdaki gibidir.

Geometrik Yapaylıklar: SAR sisteminin yana bakan davranışı ve yer noktaları ile etkileşimi yapaylıklara neden olmaktadır (örneğin görüntü büzülmesi, görüntü dönmesi ve radar gölgesi). Görüntü büzülmesi (foreshortening), dağlık bölgelerde SAR görüntülerindeki baskın (dominant) nesnenin olduğundan daha kısa görünmesi durumudur. Görüntü dönmesi (layover), bir çeşit görüntü büzülmesi olup, radar görüntüsünde nesnenin altı ile üstünün karıştırılmasıdır. Çok dik eğimli bir yüzeyde, dağların etek noktalarındaki mesafe, zirvesindekinden daha büyüktür, dolayısıyla algılayıcıya dönük olan yüzey, eğik mesafeli görüntü üzerinde tersine döner. Algılayıcının alım açısından daha büyük açılı bir arazi, radar gölgelerine neden olur. Aynı yüksekliğe ait iki nesneden uzak olanının radar gölgesi, yakın olandan daha uzun olur. Gölge, tarama alanı radar sinyali tarafından aydınlatılmadığı zaman meydana gelir.

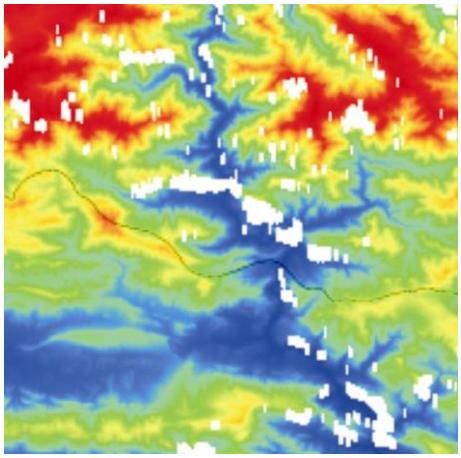
Yansıma: Ayna gibi davranışından dolayı su, radar dalgasında yansımaya neden olur. Bu nedenle, birçok sinyal algılayıcıdan kaçar ve su alanlarında düzenli boşluklar meydana getirir.

Faz Çözümlemesi: Uzay mekiğindeki alıcı sistemi sinyalin tüm faz ve genliğini algılar. Faz bilgisi interferometrik proses boyunca SYM üretmek için kullanılır. Faz bilgisini yüksekliğe dönüştürmek için faz çözümlemesi gerekmektedir. Fazın doğru olarak çözümlenmediği alanlarda boşluklar oluşmaktadır.

Kompleks Dielektrik Sabiti (CDC): SRTM verisi çöl alanlarında kompleks dielektrik sabitine bağlı olarak boşluklar içermektedir. CDC yüzeyin soğurma, yansıma ve mikrodalga enerjinin geçirme özelliğini etkilemektedir.

Türkiye'yi içine alan bölgede boşlukların nedeni daha çok dağlık bölgelerde ortaya çıkan geometrik yapaylıklar ve yansımadır.

Şekil 3 Türkiye'nin yüksek dağlık alanlarının bulunduğu bir bölgedeki (Hakkari) 1×1° lik bir paftada var olan boşlukları göstermektedir.



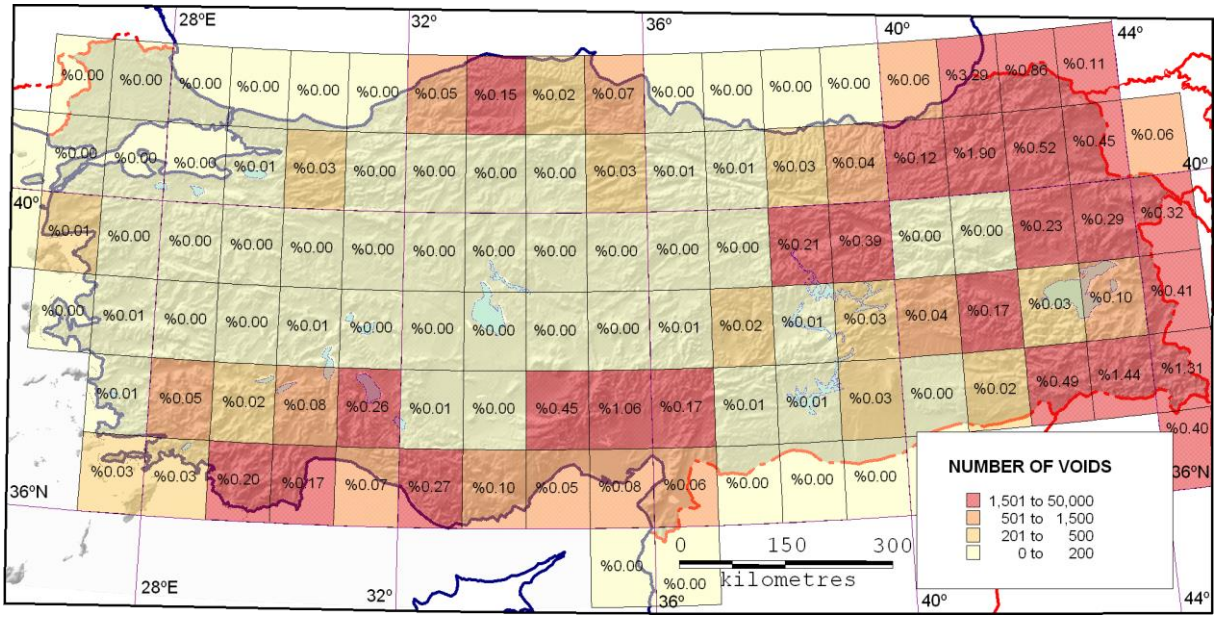
8.Şekil 3: SRTM'de veri boşlukları (beyaz pikseller)

Türkiye SRTM Verileri

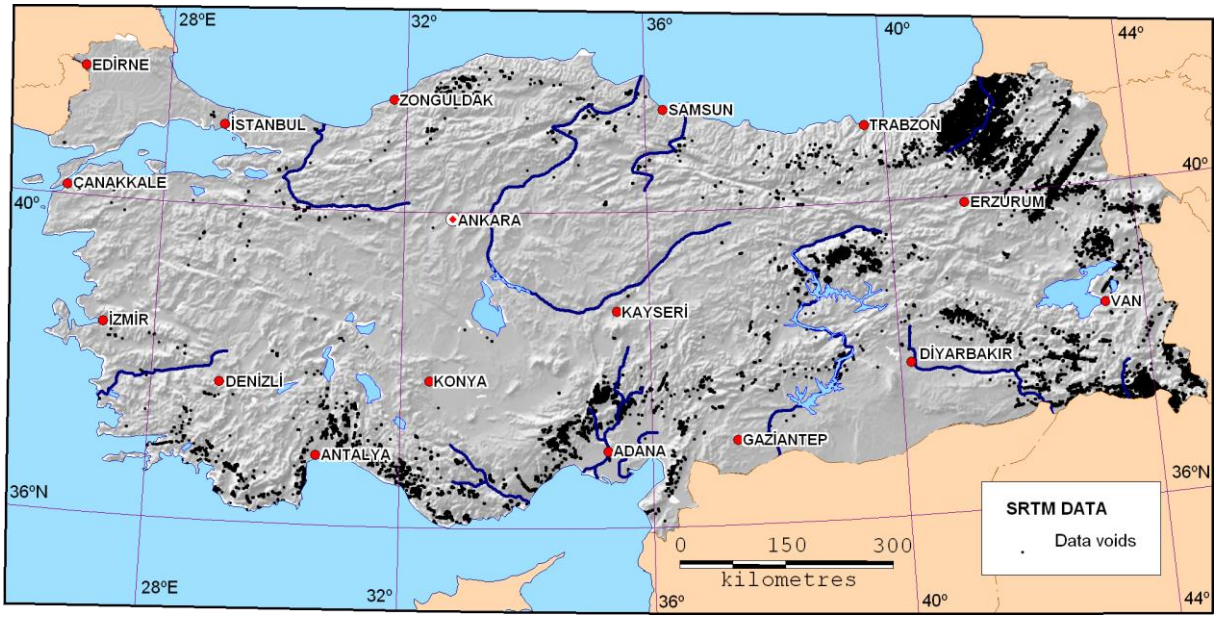
Yaklaşık 800 000 km^2 büyüklüğünde bir yarım ada olan Türkiye, SRTM SYM'de 117 adet 1×1°lik paftaya tamamen ya da kısmen girmektedir. SRTM veri boşlukları Türkiye sınırlarında çoğunlukla geometrik yapaylıklar ve yansımadan kaynaklanmaktadır. 1×1° lik SRTM paftaları, 1:100 000 ve 1:25 000 ölçekli topografik harita bazında yapılan analiz sonucu ülke bazında boşluk oranının %0.15–0.17 arasında değiştiği görülmektedir (Tablo 3). Bu, Türkiye'deki boşluk oranının NASA JPL tarafından verilen %0.15'lik global boşluk oranı ile aynı düzeyde olduğunu göstermektedir (Hall vd., 2005; URL1). Proje ekibinin önceki çalışmasında (Üstün vd., 2006) SRTM versiyon 1 ile yapılan değerlendirmede ülke bazındaki boşluk oranı global ortalamanın oldukça üstünde çıkmıştır. Bu çalışmada bulunan boşluk oranı 2. versiyonda Türkiye sınırları içinde önemli derecede bir iyileşme sağlandığını göstermektedir. Ancak bu iyileşme verilerdeki boşlukların tamamlanma gereğini ortadan kaldırmamaktadır. Örneğin en fazla boşluk içeren 25 000'lik paftadaki boşluk sayısı 4859'dur. 100'den fazla boşluk içeren pafta sayısı ise 333 adettir. Bu örneklerden boşlukların homojen dağılmadığı belli bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir. Şekil 4, 1×1° lik SRTM paftaları bazında boşluk oranlarının ülke bazında dağılımını, Şekil 5 ise nokta (ya da piksel) bazında yığılmaları göstermektedir. Her iki şekilden de yığılmaların dağlık bölgelerde olduğu dikkat çekmektedir.

	Top. pafta	Boşluk içeren pafta	Toplam nokta	Boş nokta	Boş nokta oranı
1×1°	112	98	168480000	244569	0.15
100K	397	253	142920000	228452	0.16
25K	5562	1244	125145000	211158	0.17

9. Tablo 3: Türkiye'de boşluk oranları



10.Şekil 4: 1×1° lik SRTM paftaları bazında Türkiye için boşluk oranları



11.Şekil 5: Türkiye ulusal sınırları içerisinde SRTM boşluklarının dağılımı

SRTM VERİLERİNİN DOĞRULUĞU

SRTM verilerinin beklenen doğruluğu mutlak doğruluk olarak 16 m nin altında, göreceli olarak ise 10 m nin altındadır. Sonuç olarak üretilen SYM grid noktalarında ise 20 m nin altında yatay doğruluk beklenmektedir. Verilen tüm değerler %90 güven seviyesindedir. Yapılan araştırmalarda bulunan doğruluk değerleri ise beklenen doğruluk değerlerinin altındadır. SRTM verilerinin doğruluk açısından üç tür veri ile karşılaştırıldığı görülmektedir:

- Fotogrametri, uzaktan algılama, lazer tarama gibi yöntemlerle elde edilmiş SYM'ler
- Sayısallaştırılmış haritalar
- Kinematik GPS ya da DGPS alıcılarıyla bir kesit boyunca toplanmış veriler

Çok uzun (>225 km) GPS güzergahları SRTM doğruluk analizi için en uygun verilerdir. Tablo 4'de Rodriguez vd. (2005) tarafından kıtalar bazında yapılmış bu tür bir doğruluk/performans analizinin sonuçları görülmektedir. Verilen hata değerlerinin hemen hemen tamamı 10 m altındadır.

| Hata Tipi | Afrika | Avustralya | Avrasya | Adalar | K. Amerika | G. Amerika |

Mutlak konum hatası	11.9	7.2	8.8	9.0	12.6	9.0
Mutlak yükseklik hatası	5.6	6.0	6.2	8.0	9.0	6.2
Göreceli yükseklik hatası	9.8	4.7	8.7	6.2	7.0	5.5
Uzun dalga boylu yükseklik hatası	3.1	6.0	2.6	3.7	4.0	4.9

Tablo 4: SRTM performans analizi (Rodriguez vd, 2005)

Bu çalışma kapsamında, SRTM verilerinin doğruluk/performans analizleri DGPS ile elde edilen konum bilgilerine göre yapılmıştır. Ayrıca, 1:25 000 ölçekli topografik haritalardan üretilmiş YUKPAF verileri de karşılaştırma için referans olarak kullanılmıştır. Bunlar dışında, büyük ölçekli harita yapım amaçlı yersel yöntemlerle toplanmış verilere dayalı analizlerin yapılması da hedeflenmiştir.

Karşılaştırma Metodolojisi

Karşılaştırma için doğru olarak kabul edilen DGPS konum bilgilerine göre her nokta için SRTM SYM'den enterpolasyon ile SRTM yüksekliği bulunur ve DGPS'den türetilen ile karşılaştırılır. İlk olarak, yükseklik farkları hesaplanır:

$$d = H_{SRTM} - H_{DGPS} \tag{1}$$

Daha sonra karesel ortalama hata,

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum d^2}{N}} \tag{2}$$

ve standart sapma,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d - \bar{d})^2}{N}} \tag{3}$$

hesaplanır. Burada $\bar{d}$

$$\bar{d} = \frac{\sum d}{N} \tag{4}$$

eşitliği ile bulunan ortalama olup, SRTM ile orijinal yüzey arasındaki sapmayı gösterir. Ortalama sapma, verilerdeki kaba hatalı değerlerden etkilendiğinden bir başka kestirici, ortanca (medyan) değerinin hesaplanmasında da yarar vardır. Buna rağmen, farkların 6σ değerini aşmaması gerektiği değerlendirilmiş ve buna göre kabul edilebilir maksimum değer belirlenip, bu değeri aşan farkların karşılaştırmada kullanılmamasına karar verilmiştir. Öte yandan, araçlarla toplanan DGPS verilerinde ise anten yüksekliği göz önüne alınması gerekmektedir.

Karşılaştırmalar

DGPS verisi toplamak için CSI Wireless MiniMAX alıcısı kullanılmıştır. Alıcı, uydu bazlı iyileştirme sistemlerinden ve DGPS yayın istasyonlarından gelen düzeltmeleri alarak yüksek doğrulukta mutlak konum bilgisi vermektedir. DGPS sinyalleri, araç üzerine mıknatıslı bir düzen ile bağlanan harici anten yardımıyla alınmıştır (Şekil 6). Bir saniye aralıklarla alınan ve nokta konum bilgilerini içeren NMEA mesajı, COM port aracılığıyla doğrudan bilgisayara veya bluetoth üzerinden cep telefonuna kaydedilmiştir.

Şekil 6: DGPS ile veri toplamak için kullanılan araç, anten ve alıcı

NMEA mesajındaki WGS84 elipsoidine ait coğrafi ve EGM96 jeoidiyle tanımlı deniz seviyesi yükseklikleri proje ekibince geliştirilen yazılımla çıkarılmıştır. Proje süresince DGPS verileri, otomobil yardımıyla kinematik modda toplanmıştır. Konya merkez olmak üzere değişik yönlerde, 3670 km yol yapılmış; örtüşen yollardaki veri tekrarları karşılaştırma için yapılan analizden çıkarılmıştır. Gidilen yolların topografik yüksekliği deniz seviyesi ile 2200 m arasında değişmektedir. Tablo 5'den de anlaşılacağı üzere, yol uzunlukları 220 ile 680 km arasındadır.

SRTM verilerinin doğruluğunu ölçmek için, öncelikle coğrafi koordinatları DGPS ile belirlenen noktanın etrafındaki 4 grid noktası dayanak olmak üzere H_{SRTM} yüksekliği hesaplanmış ve daha sonra her noktada, *d* yükseklik farkları bulunmuştur. Yükseklik farkı 35 m'yi aşan noktalar kaba hatalı kabul edilmiş, değerlendirmeye alınmamıştır. Buna göre, DGPS ile karşılaştırmada kullanılan toplam veri sayısı 87017'dir.

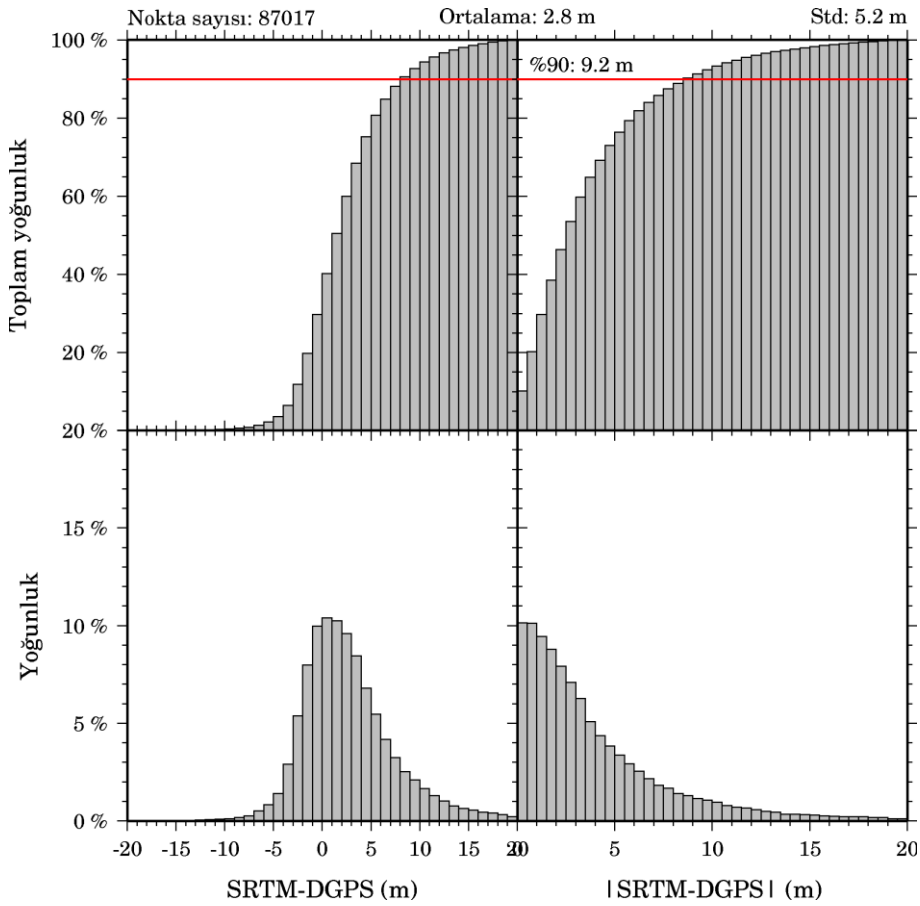
No	Geçki	Uzunluk (km)	Nokta sayısı	Arazi eğimi
1	Bartın-Kadınhanı	680	16390	2.6
2	Beyşehir-Ören	530	12357	3.0
3	Erzincan-Sivas	230	5447	2.2
4	Konya-Amasra	600	13130	2.2
5	Konya-Erdemli	320	7297	2.0
6	Konya-Manavgat	270	6400	3.0
7	Konya-Yozgat	580	14534	1.5
8	Manavgat-Konya	220	5028	3.2
9	Pozantı-Konya	240	6434	0.7
Toplam		**3670**	**87017**	**2.3**

Tablo 5: Toplanan DGPS verilerine ilişkin bazı bilgiler

Hesaplanan istatistiksel büyüklükler SRTM'nin DGPS yüksekliklerinden mutlak anlamda ne kadar uzaklaştığını açıklamaya yöneliktir. Değerler her geçki için ayrı ayrı hesaplanmış, ancak tüm verilerin birlikte değerlendirilmesiyle de genel bir sonuca varılmaya çalışılmıştır. Sonuçlar Tablo 6'da gösterilmektedir. İki değişik kaynaktan gelen veriler arasındaki ortalama aykırılık, ortanca (medyan) ve ortalama istatistikleriyle belirlenmiştir. Kaba hatalara karşı dirençli olduğu bilinen ortanca ile geleneksel ortalama değerleri arasında yaklaşık 1 m'ye yakın fark çıkmıştır. Her iki büyüklükten, SRTM yüksekliklerinin olması gerekenlerden 2-3 m daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. SRTM SYM'lerinde bir noktanın yüksekliğinin grid genişliği kadar bir alana karşılık gelen ortalama yüksekliği temsil etmesi, bunun nedeni olarak gösterilebilir. Temsil edilen topografya üzerindeki bitki örtüsünün yüksekliklerinin de SRTM'ye yansıması bunda etkendir.

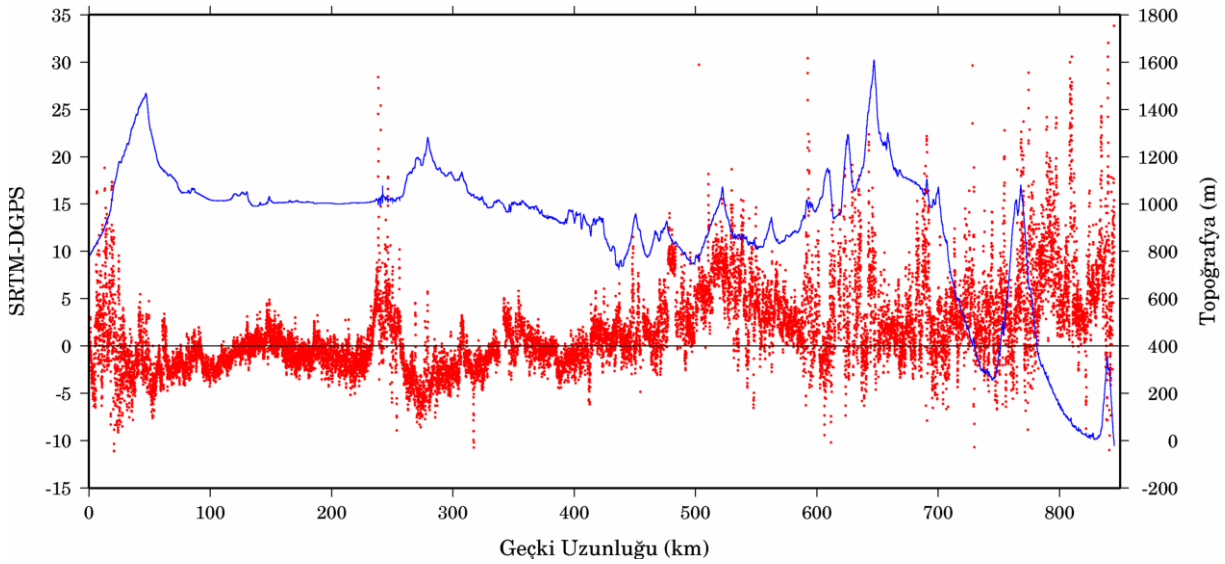
Geçki No	Ortanca	Ortalama	RMSE	Std. sapma	Hata (%90)
1	1.6	2.8	6.4	5.8	9.7
2	1.6	2.4	5.8	5.2	8.9
3	4.8	6.3	8.1	5.2	13.1
4	1.9	2.7	5.6	4.9	8.8
5	1.5	2.5	4.8	4.1	7.7
6	2.4	3.8	7.3	6.3	11.9
7	3.2	3.4	5.5	4.3	8.4
8	2.3	2.9	6.7	6.1	10.6
9	-0.9	-0.6	2.8	2.7	3.7
Toplam	**2.0**	**2.8**	**5.9**	**5.2**	**9.2**

Tablo6: SRTM-DGPS yükseklikleri arasındaki karşılaştırma istatistikleri (birim: m)



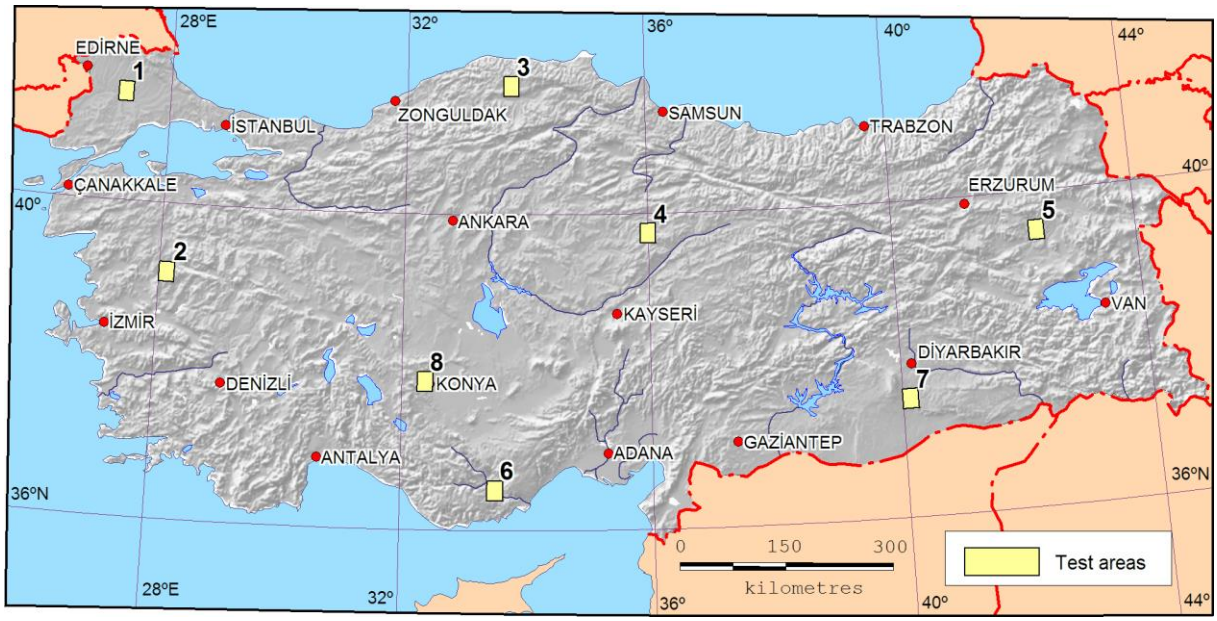
Şekil 7: SRTM ve DGPS yükseklik farklarının dağılımı

Öteki karşılaştırma büyüklükleri ise SRTM'den okunacak herhangi bir yükseklik değerindeki hata büyüklüğünü ortaya koymaktadır. Bir noktadaki *d* farkına ilişkin ortalama hata sıfırdan sapmayı; standart sapma ortalamadan sapmayı ifade etmektedir. RMSE ve standart sapma değerleri sırasıyla yaklaşık 6 m, 5 m düzeyinde bulunmuştur. Bu uygulamada olduğu gibi, çok sayıda veriye dayalı karşılaştırma istatistikleri açısından en anlamlısı, olasılık dağılımına ilişkin olanıdır. Geçkiler bazında, hataların %90'ı 3.7 ile 13 m arasında yığılmıştır. Tüm geçkiler birlikte ele alındığında, bu sayı yaklaşık 9 m'ye karşılık gelmektedir (*d* farklarının dağılım ve yığılma grafikleri Şekil 7'de verilmiştir).



Şekil 8: Pozantı-Amasra güzergahı boyunca SRTM-DGPS yükseklik farkları ve topografya ile ilişkisi

Karşılaştırma büyüklüklerinin en dikkat çeken özelliklerinden biri, sonuçların topografik yapı ile yakından ilişkili olmasıdır. Topografyanın düzensiz olduğu yerlerde, özellikle RMSE, standart sapma ve hata değerleri büyümekte; eğimin az olduğu arazilerde ise bu istatistiklerin hızla büyüdüğü gözlenmektedir. Bu durum Şekil 8 ile gösterilen grafikte belirgin olarak göze çarpmaktadır. Grafik, Pozanti (Adana) ile Amasra (Bartın) arasındaki geçki boyunca yükseklik farkları ve onların topografik yükseklikle olan ilişkisini ortaya koymaktadır. Güney'de Toroslar, kuzeyde Karadeniz Dağlarının geçildiği kesimlerde farklar hızla büyümekte, hem pozitif hem de negatif yönde düzensiz bir davranış sergilemektedir. Öte yandan, Anadolu'nun iç kesimlerinde (Konya ovasında) SRTM yükseklikleri gerçek arazi ile birkaç metre seviyesinde uyum göstermektedir.



Şekil 9: SRTM yükseklikleriyle karşılaştırılmak üzere sayısallaştırılan 25K yükseklik paftaları

DGPS dışında ikinci bir karşılaştırmada, Türkiye'nin 8 değişik yerinde 25 000 ölçekli haritalardan sayısallaştırılan yükseklikler referans alınmıştır (Şekil 9). Her bölge 1:50 000 ölçekli alana karşılık gelen birbirine komşu 4 yükseklik paftasından oluşmaktadır. Yükseklik bilgileri eşyükseklik eğrilerinin sayısallaştırılmasıyla üretildiğinden düzenli bir grid yapısında değildir. SRTM verileriyle karşılaştırılmak istendiğinde, sayısallaştırılan noktalarda SRTM yüksekliklerinin enterpole edilmesi ya da sayısallaştırılmış düzensiz verilerden SRTM'nin eşleniği düzenli bir grid oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada ikinci yöntem tercih edilmiş ve söz konusu 8 bölgede her biri yeryüzünde 15′x15′ lık alan kapsayan karşılaştırma alanları için 3″ çözünürlüğünde grid oluşturulmuştur. YÜKPAF verilerine dayalı grid noktalarındaki yükseklik değerleri, Smith ve Wessel (1990) tarafından ortaya konulan enterpolasyon yöntemiyle yüzey geçirerek kestirilmiştir.

Bölge	RMSE	σ	d			Geçerli nokta	Geçersiz nokta
			ortalama	max	min	sayısı	sayısı
1	2.53	2.44	-0.69	14.45	-17.53	90602	0
2	5.88	5.75	1.25	34.82	-34.07	90574	28
3	6.81	4.52	5.09	34.54	-29.89	90592	10
4	6.94	5.24	4.56	34.44	-22.61	90600	2
5	4.47	4.44	0.49	34.33	-34.94	90587	15
6	6.49	6.27	1.66	34.88	-34.77	90572	30
7	3.77	3.77	0.11	22.21	-22.38	90602	0
8	4.94	4.68	1.58	34.94	-34.19	90574	28

Tablo 7: SRTM ve 25K verileri arasında gerçekleştirilen karşılaştırma istatistikleri (birim: m)

Tablo 7, her bölgede 90 602 grid noktası üzerinden karşılaştırılan yüksekliklere ilişkin istatistiksel sonuçları göstermektedir. Yükseklik farklarında 35 m'yi aşan noktalar değerlendirme dışı bırakılmıştır. Her bölgede

dışarıda kalan nokta sayısı 30'dan azdır. SRTM-25K yükseklik farklarının ortalaması, DGPS ile yapılan karşılaştırmada olduğu gibi, yaklaşık 2 m'lik kayıklığın varlığını işaret etmektedir. Öte yandan, RMSE ve standart sapma değerleri DGPS'e göre 1-2 m daha küçüktür. Bunun nedeni olarak, 25K verilerinin gride indirgenmesi ve dolayısıyla yüzeyin yumuşaması gösterilebilir.

VERİ BOŞLUKLARININ DOLDURULMASI

Türkiye bazında yapılan değerlendirme sonucundan veri boşluklarının iki yaklaşımla doldurulması öngörülmüştür. Yüksekliği olmayan noktalar (boşluklar) dağınık karakterde ise boşluklar çevre noktalardan enterpolasyon ile, aksi halde 25 000 ölçekli topografik haritalardan sayısallaştırma yapılarak doldurulacaktır. Bu amaçla ülkeyi kapsayan tüm 25 000 ölçekli paftalar içlerine düşen boşluk sayılarına göre sınıflandırılmış, boşluk sayısı pafta başına 100'den fazla olan paftalarda boşluklar görselleştirilerek incelenmiştir. Bu işlemler sonucunda bir ve daha çok boşluk içeren 1:25000 ölçekli 1244 paftanın 340 tanesinde boşlukların sayısallaştırma ile doldurulmasına karar verilmiştir.

Enterpolasyona sayısallaştırma yoluyla kazanılan yüksekliklerinde katkıda bulunması amacıyla önce sayısallaştırma yapılması, daha sonra geriye kalan boşluklara enterpolasyon uygulanması öngörülmüştür.

1:25 000 Ölçekli Haritalardan Yükseklik Verisi Kazanımı

Sayısallaştırma yoluyla yükseklik verisi elde edilecek paftaların öncelikle tarama ve koordinat sistemiyle ilişkilendirme işlemleri yapılmak zorundadır. Projede gereken paftalar Harita Genel Komutanlığı'ndan basılı pafta olarak temin edilmiştir. Kağıt paftalar 300 dpi çözünürlükte renkli olarak büyük formatlı bir tarayıcıda taranmıştır. Elde edilen görüntüler NETCAD yazılımı ile ülke koordinat sistemine bağlanmıştır.

Kullanılan paftalardan bazılarının datumu ED50, bazılarınınki ise WGS84'tür. SRTM verilerinin datumu ise WGS84'tür. Paftalar uygun datumla ilişkilendirildikten sonra sayısallaştırma işlemine geçilmiştir.

SRTM orijinal dosya formatı olan "hgt" uzantılı dosyalar bir C dili algoritması ile okunmuş, yüksekliği olmayan noktalar, UTM dilimlerine göre ayrı dosyalar halinde kaydedilmişlerdir. Yeni oluşan dosyalarda koordinat sistemi WGS84 datumunda UTM olarak değiştirilmiştir. Bu şekilde 25 000 ölçekli paftalarla çakıştırılmak üzere 4 adet dosya hazırlanmıştır.

1.25 000 ölçekli paftalardan SYM elde edilmesi eşyükseklik eğrilerinin sayısallaştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Doğal olarak tüm paftanın eğrilerinin sayısallaştırılmasına ihtiyaç olmadığından, yüksekliği olmayan SRTM noktaları (boşluklar) paftalar ile çakıştırılmakta, paftalarda yalnızca SRTM boşluklarının olduğu bölgelerde SYM oluşturulmuştur. Bu şekilde hazırlanan SYM'lerden yüksekliği olmayan SRTM noktalarının kotları enterpole edilmiş, bu şekilde yüksekliği belirlenen noktalar NETCAD ortamından bir metin dosyasına aktarılmış daha sonra LINUX ortamında C dili ile hazırlanan bir program ile hgt dosyalarına aktarılmıştır. Bu işlemler sonucunda SRTM verileri enterpolasyon işlemine hazır hale getirilmiştir.

Enterpolasyon

Projenin başında enterpolasyon için 1x1° boyutlarındaki her bir SRTM hücresinin (pafta) kendi içinde enterpolasyona tabi tutulması öngörülmüştür (Üstün vd, 2006, Bildirici vd, 2007). İki nedenle bu yaklaşımdan vazgeçilmiştir:

- Dağınık karakterde olmayan, kümeler oluşturan boşluklar enterpolasyon öncesi 1:25 000 ölçekli paftalardan yararlanılarak doldurulmakta ve bu işlem ülke sınırları içinde yapılmaktadır. Ülke sınırının dışına taşan SRTM hücrelerinde olabilecek ve herhangi bir işleme tabi tutulmamış büyük boşlukların enterpolasyon işlemini olumsuz etkileyeceği görülmüş ve bu yaklaşımdan vazgeçilmiştir.
- Hücre kenarlarında yapılacak enterpolasyona komşu hücreler dahil edilmediğinden sağlıklı sonuçlar alınması güçleşmektedir.

Yeni geliştirilen yaklaşımda bir enterpolasyon penceresinin belirlenmesi ve bu pencerenin ülke sınırı içinde gezdirilerek pencere içinde kalan yüksekliği olmayan noktaların yüksekliklerinin enterpole edilmesi hedeflenmiştir. Bu şekilde büyük boşluklar önceden doldurulduğundan sadece dağınık karakterli boşluklara enterpolasyon uygulanması garanti altına alınmaktadır.

Enterpolasyonda Hardy (1971) tarafından ortaya atılmış olan radyal bazlı fonksiyonlardan Multikuadrik yüzeyin kullanılmasına karar verilmiştir. Buna göre her enterpolasyon penceresi için bir yüzey tanımlanmış olacaktır. Ancak, yüzeyin sınırlarında sağlıklı enterpolasyon olmayacağından bir iç bir de dış pencere tanımlanması

gerekmektedir. Dış pencere Multikuadrik (MQ) yüzeyi oluşturan yüksekliği bilinen noktaları (kontrol noktaları) kapsamakta, bunun içinde yer alan iç pencere içinde ise enterpolasyon yapılmaktadır.

SRTM için enterpolasyon yaklaşımlarında çeşitli araştırmalar mevcuttur. Örneğin Reuter vd (2007) arazi karakterine göre değişik enterpolasyon yöntemleri önermektedir. Bu çalışmada büyük boşluklar topografik haritalardan yararlanılarak doldurulmuştur. Geriye kalan ve dağınık karakterdeki boşluklar için kullanılan enterpolasyon penceresi oldukça küçük tutulduğundan (60x60") kullanılan enterpolasyon yönteminin arazi karakterine göre değişik sonuçlar verme olasılığı en aza indirilmektedir. Bu nedenlerle MQ yüzeyin kullanılmasının uygun sonuç vereceği değerlendirilmektedir.

Multikuadrik yüzey, yüzey üzerinde olduğu bilinen noktalar (kontrol noktaları) ile tanımlanır.

$$z = \sum_{i=1}^{n} c_i \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + \Delta^2} \tag{5}$$

Burada n kontrol noktalarının sayısını x_i ve y_i kontrol noktalarının (dış pencerede yer alan) koordinatlarını göstermektedir. Yüksekliği bilinmeyen herhangi bir nokta koordinatları (x,y) yukarıdaki ifadede yerine konarak yükseklik bulunabilir. Ancak öncelikle c_i katsayıları ve Δ^2 parametresinin belirlenmesi gerekmektedir. Yüzeyin yumuşaklığını belirleyen Δ^2 parametresi sıfır alındığı gibi değişik değerler de önerilmektedir. Hardy (1990) bu konuda kapsamlı bir tartışma vermektedir. Hardy (1990)'nin Shulmin ve Mittelman'ı referans göstererek verdiği aşağıdaki ifade, yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$\Delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{n(n-1)} \tag{6}$$

Katsayıları bulmak için ise kontrol noktaları ile oluşturulan

$$\begin{aligned} z_1 &= a_{11}c_1 + a_{12}c_2 + a_{13}c_3 + \ldots + a_{1n}c_n \\ z_2 &= a_{21}c_1 + c_2 a_{22} + c_3 a_{23} + \ldots + a_{2n}c_n \\ &\ldots \\ z_n &= a_{n1}c_1 + a_{n2}c_2 + a_{n3}c_3 \ldots + a_{nn}c_n \end{aligned} \tag{7}$$

lineer denklem sisteminin çözülmesi gerekmektedir. Bu sistem matris formunda,

$$\begin{aligned} a_{ij} &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + \Delta^2} \\ a_{ij} &\in \underline{A} \\ \underline{z} &= \underline{c}\,\underline{A} \Rightarrow \underline{c} = \underline{A}^{-1}\underline{z} \end{aligned} \tag{8}$$

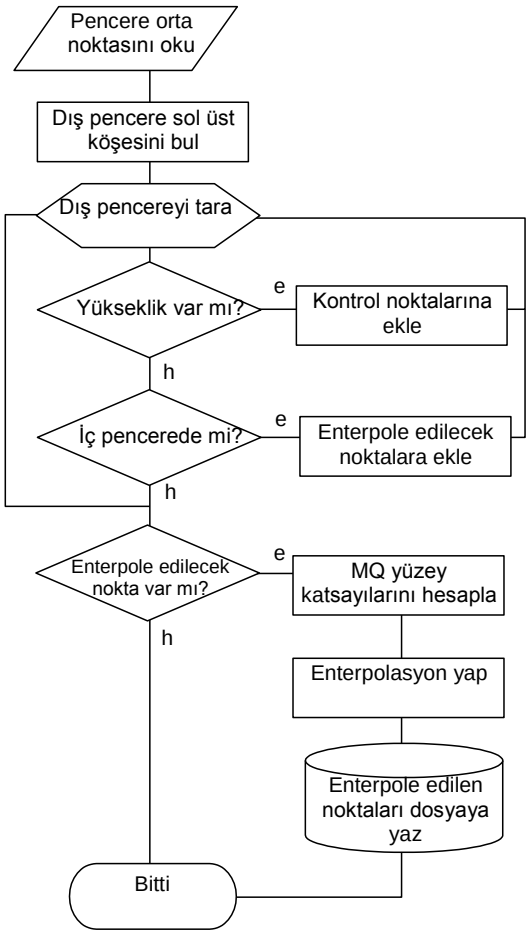
yazılabilir. Burada A matrisi simetrik regüler bir matris olup, inversi vardır.

Nokta kümelerine uygulanabilecek enterpolasyon yaklaşımları Amidror (2002) tarafından, MQ ve TPS yöntemlerinin uygulamaları Hardy (1990) tarafından kapsamlı olarak ele alınmaktadır.

Proje kapsamında 21x21 grid noktasından oluşan 60x60" boyutlu bir iç pencere uygulanmıştır. Bu pencere 15" genişletilerek 31x31 grid noktasından oluşan 90x90" boyutlu dış pencere oluşturulmuştur. İç pencereler bindirmesiz olarak, dış penceler ise bindirmeli olarak ülke sınırları içinde gezdirilmektedir.

Ülke sınırı içinde kalan pencerelerin orta noktaları MapInfo yazılımında hazırlanmış ve bir metin dosyasına aktarılmıştır. Pencere orta noktasının koordinatlarını girdi olarak alan ve tek bir pencereye enterpolasyon uygulayan bir program yazılmıştır. Bir betik dosyası çalıştırılarak bu programın önceden hazırlanan ve ülke sınırı içinde kalan tüm pencerelerin orta noktalarını içeren metin dosyasındaki her bir satır için bir kez çalıştırılması sağlanmıştır. Program sonuç olarak enterpole edilmiş noktaları bir metin dosyası olarak üretmektedir. Bu noktaların yükseklikleri daha sonra 1:25 000 ölçekli paftalardan enterpole edilen yükseklikleri hgt dosyalarına

işlemek için hazırlanan programla hgt dosyalarına aktarılmış ve Türkiye sınırları içinde boşluk içermeyen kesintisiz bir SYM oluşturulmuştur. Şekil 10'da enterpolasyon programı akış diyagramı görülmektedir.



12.Şekil 10: Enterpolasyon programı akış diyagramı

SONUÇ

Bu bildiri ile SRTM verilerinin ülkemizi kapsayan kısmında veri boşluklarının doldurulması ve verilerin doğruluğunun analizi amacıyla yazarlar tarafından yürütülen proje ve sonuçları tartışılmıştır. Türkiye sınırları içerisindeki SRTM3 verileri %0.15 oranında (yaklaşık 220 000 noktada) boşluk içermektedir. Veri boşluğu özellikle yüksek dağlık alanlarda yani Doğu Karadeniz ve Güney Doğu Anadolu ve yer yer Toroslar boyunca görülmektedir. Kümeler oluşturan büyük boşluklar 1:25 000 ölçekli topografik haritalardan yararlanarak doldurulmuştur. Bu amaçla, 340 paftada sayısallaştırma yapılmıştır. Sayısallaştırma işlemi ile elde edilen yükseklik bilgileri boş noktalarda yerlerine konulduktan sonra geriye kalan dağınık karakterli boşluklar ise enterpolasyon ile doldurulmuş, ülke bazında kesintisiz, boşluksuz bir SYM elde edilmiştir. SRTM boşluklarının 1:25000 ölçekli topografik haritalardan doldurulmasıyla oluşturulan eksiksiz 3x3 derece saniyesi çözünürlüklü Türkiye Sayısal Yükseklik Modeli-3 (TSYM3) yakında duyurulacak bir web sitesi yoluyla araştırmacılara ve uygulayıcılara sunulacaktır.

Oluşturulan sayısal yükseklik modelinin doğruluğunu ölçmek için değişik veri kaynaklarından gelen verilerle karşılaştırmalar yapılmıştır. DGPS verileriyle yapılan karşılaştırmada, SRTM yükseklik bilgilerinin sistematik bir kayıklığa sahip olduğu anlaşılmaktadır. Benzer bir kayıklık 1:25 000 ölçekli topografik haritalardan sayısallaştırılan yükseklik bilgileriyle yapılan karşılaştırmadan bulunmuştur. SRTM yükseklikleri gerçek araziye göre 2-3 m daha yukarıda görünmektedir. Buna rağmen, Türkiye için mutlak anlamda SRTM-DGPS yükseklik farklarının %90'ı 9 m'nin altındadır. Ülke bazında elde edilen bu sonuç, büyük alanlar ve kıtalar bazında yapılan

çalışmalarda elde edilen sonuçlarla uyumludur. Sistematik kayıklığın bu farklardan çıkarılması durumunda, SRTM yüksekliklerinin duyarlılığı (standart sapma) 6 m civarındadır. Söz konusu kayıklığın en önemli nedenlerinin başında bitki örtüsü yüksekliklerinin SRTM sayısal yükseklik modellerinde temsil edilmesi gelmektedir. Bu yüzden SRTM'ye dayalı SYM'lerde bu durumun göz önüne alınmasında yarar vardır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada tanıtılan "Yerel Yükseklik Bilgileriyle Desteklenmiş SRTM Verileri Kullanılarak Türkiye için 3"x3" Çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modelinin Oluşturulması" başlıklı proje (proje no: 106Y130) Tübitak ÇAYDAG grubu tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Amidror, I. (2002) Scattered Data Interpolation Methods for Electronic Imaging Systems: A Survey Journal of Electronic Imaging, 11(2): 157−176.

Bildirici, İ.Ö., Üstün, A., Ulugtekin, N., Selvi, H.Z., Abbak, A., Buğdaycı, İ., Dogru, A.Ö.(2007) SRTM Verilerine Dayalı Ülke Bazında 3"x 3" Çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modelinin Oluşturulması , Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği IV. Sempozyumu. 5-7 Haziran 2007, CD , İstanbul .

Farr, T.G. ve Kobrick, M. (2000) Shuttle radar topography mission produces a wealth of data, EOS Transactions AGU, 81, 583−585.

Hall, O., Falorni, G. ve Bras, R.L. (2005) Characterization and Quantification of Data Voids in the Shuttle Radar Topography Mission Data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2 (2): 177−181

Hardy, R.L. (1971) Multiquadric Equations of Topography and Other Irregular Surfaces. Journal of Geophysical Research 76 (8), 1905–1915.

Hardy, R.L. (1990) Theory and Applications of The Multiquadric-Biharmonic Method. Computers and Mathematical Applications 19 (8/9), 163–208.

JPL (2000) SRTM As-Flown Mission Timeline, URL: http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_TIM_AF.pdf Issued by: D. Seal / F. Rogez, JPL NASA.

URL 1: ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/Documenta-tion/SRTM_Topo.pdf (Durum: Ocak 2006)

Kobrick, M. (2005) Upgrade the SRTM Dataset, The Shuttle Radar Topography Mission Data Validation and Applications Workshop, June 14−16 2005, Reston, Virginia.

Rodríguez E., Morris, C.S. ve Belz, J.E. (2006) An Global Assessment of the SRTM Performance, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72 (3): 249−260.

Rodriguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., Chapin E.C., Martin, J.M., Daffer, W., Hensley, S., (2005) An Assessment of the SRTM Topographic Products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propolsion Laboratory, Pasadena, California, 143 pp.

Reuter, H.I, Nelson, A., Jarvis, A. (2007) An Evaluation of Void-Filling Interpolation Methods for SRTM Data, International Journal of Geographical Information Science, 21 (9): 983-1008

Salamonowicz, P. (2005) A Comprehensive Assessment of the Shuttle Radar Topography Mission Elevation Data Accuracy, The Shuttle Radar Topography Mission Data Validation and Applications Workshop, June 14−16 2005, Reston, Virginia.

Smith, W. H. F. ve Wessel, P. (1990) Gridding with continuous curvature splines in tension, Geophysics, 55(3): 293-305.

Üstün, A., Bildirici, İ.Ö.,Selvi, H.Z., Abbak, R.A.(2006) An evaluation of SRTM3 DTM data: Validity, problems and solutions , First international conference on cartography and GIS , Borovets, Bulgaria .