

TerraSAR-X ve TanDEM-X UYDULARINDAN ELDE EDİLEN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ YÜKSEKLİK VERİSİNİN FARKLI ARAZİ TİPLERİNDE DOĞRULUK ANALİZİ

Orhan FIRAT*, Mustafa ERDOĞAN*

*MSB Harita Genel Komutanlığı, Fotogrametri Dairesi Başkanlığı, 06100, Dikimevi, Ankara (orhan.firat, mustafa.erdogan)@hgk.msb.gov.tr

ANAHTAR KELİMELEER: Enterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR), DTED2, SRTM2, Sayısal Yüzey Modeli, Doğruluk

ÖZET:

TerraSAR-X ve TanDEM-X (TerraSAR-X Add On for Digital Elevation Measurements) uyduları, tüm dünyanın Sayısal Yükseklik Modelinin oluşturulması projesi kapsamında Alman Uzay Merkezi (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, DLR) tarafından tasarlanan, sırasıyla 2007 ve 2010 yıllarında uzaya gönderilen ve Enterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) gözlemi yapan uydulardır. DLR tarafından, TanDEM-X uydu grubunun elde ettiği Sayısal Yüzey Modelinin; yaklaşık 12 m (0,4 yay saniyesi) konumsal çözünürlüğe, ± 10 m.den daha iyi mutlak düşey doğruluğa (LE90), eğimin %20'den az olduğu yerlerde ± 2 m.den daha iyi, diğer yerlerde ise ± 4 m göreceli doğruluğa (LE90) sahip olduğu ve bu niteliği ile TanDEM-X verisinin, DTED Seviye 3 düzeyinde çözünürlük ve doğruluğa sahip olduğu ifade edilmektedir. Bu özellikleri ile hâlihazırda tüm dünyayı kapsayan en yüksek çözünürlük ve doğruluklu veri olma özelliğini taşıyan TanDEM-X uydu grubu verisi, bu çalışmada farklı karakteristik, eğim ve arazi örtüsüne sahip topoğrafyalarda; konum bilgileri yüksek doğrulukla bilinen noktalar, Mekik Radar Topoğrafyası Görevi (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) seviye 2 verisi, Sayısal Arazi Yükseklik Verisi (Digital Terrain Elevation Data, DTED) seviye 2 verisi ve Harita Genel Komutanlığı tarafından 2013 yılından itibaren, stereo hava fotoğraflarından otomatik görüntü eşleme tekniği ile üretilen 5 m çözünürlüklü SYM (HGK SYM) verisi kullanılarak test edilmiştir. Arazi örtüsünün ve eğimin doğruluk üzerinde etkili olduğu; bununla birlikte, eğimin az olduğu açık arazi yapılarında TanDEM-X uydu grubundan elde edilen Sayısal Yüzey Modeli (SYM) verisinin %90 güven aralığında ± 2.50 metreden daha iyi doğrusal hata değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

KEY WORDS: Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), DTED2, SRTM2, Digital Surface Model, Accuracy

ABSTRACT:

TerraSAR-X and TanDEM-X (TerraSAR-X Add On for Digital Elevation Measurements) are the satellites which is making Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) observations and were designed and sent to space on 2007 and 2010 respectively by German Space Center (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, DLR) within the project of producing a global Digital Elevation Model. It is announced by DLR that the Digital Surface Model acquired by TanDEM-X satellite group has 12 m (0,4 arc second) resolution, ± 10 m or better absolute vertical accuracy (LE90), ± 2 m or better relative vertical accuracy (LE90) at regions having 20% or less slope and ± 4 m relative vertical accuracy (LE90) at other regions and TanDEM-X data is assessed as having resolution and accuracy at DTED Level 3. With its aforementioned specifications, being the most accurate and dense data covering the whole world for now, TanDEM-X data is tested at topographies having different characteristic, slope and land cover by using highly accurate points, Digital Terrain Elevation Data (DTED) and Digital Surface Model which is produced with automatic image matching technique from stereo aerial photographs by General Command of Mapping with 5 m resolution. It is determined in the study that land cover and slope have effect on accuracy, on the other hand, the Digital Surface Model acquired by TanDEM-X satellite group has better linear error than ± 2.50 meters at 90% confidence level at open fields having low slope.

1. GİRİŞ

TerraSAR-X ve TanDEM-X uyduları, Enterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) uydularıdır. InSAR uyduları ile gerçekleştirilen Sayısal Yüzey Modeli (SYM) üretiminde, uçuş yönüne dik (enine) uygun uzunlukta bir baz mesafesinde iki SAR görüntüsü alınır. Topoğrafik yükseklik bilgisi, yöneltmiş bu iki SAR görüntüsü arasındaki faz farkından elde edilir (Soergel, 2010; Soergel vd., 2013).

Uydular ile elde edilen SAR verisi genellikle tekrarlı geçiş tekniği ile toplanır. Bu teknikte uydu aynı yörüngeden iki farklı tarihte geçmek suretiyle veri toplar. İki veri toplama tarihi arasındaki zamansal fark, uydunun aynı yerden tekrar geçiş

periyodu ya da onun katlarından biridir. Bu şekilde veri toplanmasının iki dezavantajı vardır. Birincisi, iki görüntü alımı zamanı arasında geçen süre içerisinde, görüntüler arasında özellikle mevsimsel nedenlerden kaynaklanan farklılıklar meydana gelebilir ve bunun sonucu olarak da iki görüntü arasında uyum elde edilemeyebilir. Ayrıca bitkilerin büyüme dönemlerinde, yüzeyde meydana gelen gerçek değişiklikler SYM kalitesini bozabilmektedir. İkincisi ise troposferdeki su buharının ışığın hızını etkilemesinden kaynaklanan dezavantajdır. Troposferdeki su buharı etkisi, kilometre mertebesinde konumsal olarak modellendirilmiş olmakla birlikte tekrarlı geçişlerdeki su buharı etkisi birbirlerinden farklı olabilmektedir. Bunun sonucu olarak ışığın her iki durumdaki atmosferik gecikmesi farklı olduğundan, veri kalitesi üzerinde

olumsuz bir etki ortaya çıkabilmektedir. Her iki SAR görüntüsü aynı anda elde edildiğinde ise yukarıda açıklanan iki dezavantaj da ortadan kalkmaktadır. Çünkü iki görüntü arasında zamansal fark olmayacağından, zaman farkından kaynaklanan değişiklikler de olmayacaktır. Benzer şekilde atmosferik şartlar ne olursa olsun, aynı atmosferik şartlardan etkilenen iki görüntünün farkı alınacağından, sonuç üzerinde atmosferik gecikme etkisi olmayacaktır. Bu şekilde tek geçiş ile toplanan veri, genellikle enine bir baz mesafesinde iki anten monte edilen uçaklar ile gerçekleştirilmektedir (Soergel vd., 2013).

Uçaklar ile SAR verisi toplanmasına ilk istisna ise 2000 yılında 11 gün süreyle görev yapan Mekik Radar Topoğrafyası Görevi (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)'dir. Bu görevde 60 m uzunluğunda bir baz mesafesine yerleştirilen iki anten kullanılmış ve SAR verisi toplanmıştır. Toplanan SAR verisinden, dünyanın 56° Güney ve 60° Kuzey enlemleri arasında kalan bölgesi için yaklaşık 30 m grid aralığında SYM türetilmiştir. 30 m aralıklı olarak üretilen SYM verisi, dünyanın pek çok bölgesi için 90 metre aralıklı olacak biçimde dünyadaki kullanıcıların kullanımına sunulmuştur. 2014 yılında, dünyanın belirli bölgelerinin 30 m aralıklı SYM verisinin kullanıma açıldığı, diğer bölgelerin ise kademeli olarak kullanıma açılacağı duyurulmuştur (Rabus vd., 2003, Soergel vd., 2013).

2000 yılında gerçekleştirilen SRTM projesinden sonra DLR tarafından 2007 ve 2010 yıllarında, InSAR gözlemi yapan, TerraSAR-X ve TanDEM-X adlı iki uydu uzaya gönderilmiştir. SRTM projesinin aksine bu projede tek bir sensör taşıyıcı yerine iki uyduya iki algılayıcı sensör yerleştirilmiştir.

TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularının yörüngeleri, uyduların uçuş güvenliği bakımından, hiçbir zaman kesişmeyecek şekilde ayarlanmıştır. Bunu sağlamak adına uydular için heliks şeklinde yörüngeler belirlenmiştir. Elde edilecek SYM'nin doğruluk kriterlerinin sağlanabilmesi için, iki uydu arasındaki mesafe milimetre doğruluğunda ölçülmektedir. Birinci yılın sonunda uydular arasındaki baz, ölçü duyarlılığının artırılması amacıyla 1.3 kat büyütülmüştür. Böylece birinci geçişte daha az kesinlikle belirlenen nokta yükseklikleri ikinci geçişte daha yüksek kesinlikle belirlenebilmektedir.

Heliks şeklinde hareket, uçuş güvenliği sağlamanın yanında, uçuş yönünde uydular arasında önemli miktarda baz oluşmasına da neden olmaktadır. Söz konusu bazın büyüklüğü kutuplarda 0 m iken ekvator'da 1000 metreye ulaşmaktadır. Bu şekildeki bir yapı, hareket eden nesnelerin hızlarının belirlenmesinde kullanışlı olmakla birlikte projenin amacı olan SYM üretiminde, yaklaşık 50 milisaniyelik bir gecikmeye neden olduğundan, dezavantaj yaratmaktadır. Örneğin su yüzeylerinde, sadece birkaç milisaniyelik gecikme korelasyonun tümüyle kaybolmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte donmuş su yüzeyleri bu durumun istisnasıdır çünkü buzul yüzeylerde su yüzeylerine göre daha güçlü korelasyon elde edilmektedir. Sonuç olarak bu yapıda, sıvı su ihtiva eden okyanus, göl ve nehirlerden faydalı sinyal elde edilemez ve bu durum sayılan alanların gürültülü veri oluşturmaya neden olur. Sözü edilen olumsuzluk SRTM verisinde yoktur, çünkü SRTM projesinde boyuna (uçuş yönündeki) baz uzunluğu 7 m olarak sabit tutulmuştur ki bu da sadece 0,5 milisaniyelik bir gecikmeye neden olur. Bu değer ise su yüzeylerinden yansıyan sinyalin korelasyonun korunması için yeterli bir gecikmedir (Wendleder vd., 2013, Soergel vd., 2013).

DLR tarafından, TanDEM-X uydu grubunun elde ettiği SYM'nin; yaklaşık 12 m (0,4 yay saniyesi) konumsal çözünürlüğe, 10 m.den daha iyi mutlak düşey doğruluğa

(LE90), eğimin %20'den az olduğu yerlerde 2 m.den daha iyi, diğer yerlerde ise 4 m göreceli doğruluğa (LE90) sahip olduğu ve bu niteliği ile TanDEM-X verisinin, DTED Seviye 3 düzeyinde çözünürlük ve doğruluğa sahip olduğu duyurulmuştur.

2. DOĞRULUK ARAŞTIRMASI

2.1 Test Bölgesi

TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından elde edilen yüksek çözünürlüklü yükseklik verisinin test edilmesi amacıyla, bu uydulardan elde edilen ve 38°-39° enlemleri ile 26°-27° boylamları arasında kalan ve Şekil 1'de gösterilen bölgeye ait düzenlenmiş SYM verisi kullanılmıştır.



Şekil 1. Test bölgesi.

2.2 Test Çalışmasında Kullanılan Veri

TerraSAR-X ve TanDEM-X örnek verisinin test edilmesinde iki farklı yol izlenmiştir.

Birinci yöntemde, yüksekliği bilinen ve dağılımları Şekil-1'de gösterilen üç değişik nokta seti kullanılarak Sayısal Yükseklik Modelinin doğruluğu araştırılmıştır. Testte kullanılan her üç verinin de yatay doğrulukları 10 m altında, düşey doğrulukları ise birkaç dm altındadır. Test çalışmasında kullanılan bu verilerin belirtilen doğruluk değerleri, referans veri için genel kabul gören "5 kat daha iyi doğruluk" kriterini sağlamaktadır. Bu veri setleri:

Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğünce fotogrametrik nirengi işlemlerinde kullanılmak üzere 2010 yılında tesis edilen ve konum bilgileri GNSS ile ölçülen 265 adet kireçleme noktası,

Harita Genel Komutanlığınca fotogrametrik nirengi işlemlerinde kullanılmak üzere 2012 yılında tesis edilen ve konum bilgileri GNSS ile ölçülen 24 adet kireçleme noktası,

Harita Genel Komutanlığınca tesis edilen 19 adet Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) noktasıdır.

İkinci yöntemde ise TerraSAR-X ve TanDEM-X uydu gözlemleri ile elde edilen Sayısal Yüzey Modelinin farklı karakteristik ve eğime sahip bölgelerdeki doğruluğunun belirlenmesi amacıyla, Harita Genel Komutanlığı tarafından üretilen yüksek doğruluklu Sayısal Yüzey Modeli ile yüzeysel olarak karşılaştırılmıştır.

TerraSAR-X ve TanDEM-X örnek verisinin doğruluğunun belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen birinci test yöntemi, aynı test noktaları ve aynı test kriterleri kullanılarak DTED2 (Digital Terrain Elevation Data Level 2), SRTM2 (Shuttle Radar Topography Mission Level 2) ve Harita Genel Komutanlığı tarafından 2013 yılından itibaren, stereo hava fotoğraflarından otomatik görüntü eşleme tekniği ile üretilen 5 m çözünürlüklü SYM (HGK SYM) için de gerçekleştirilmiştir.

2.3 Testin Gerçekleştirilmesi

2.3.1 Nokta Setleri ile Karşılaştırma

Karşılaştırmaya tabi tutulan Sayısal Yükseklik Modelleri ile testte kullanılan veri setleri ile ilgili bilgiler Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur.

Doğruluk araştırması kapsamında ilk olarak her üç veri seti ayrı ayrı değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Karşılaştırma, veri setlerindeki her bir noktanın yüksekliği ile ilgili sayısal yükseklik modelinde (TerraSAR-X ve TanDEM-X, SRTM2, DTED2, HGK SYM) o noktanın yatay konumuna karşılık gelen pikselin yüksekliği arasındaki farkın hesaplanması suretiyle gerçekleştirilmiştir.

“Düzeltme” değeri olarak adlandırılan bu farklar istatistiksel olarak analiz edilmiş ve uyumsuz nokta var ise veri setinden çıkarılmış ve test yinelenmiştir. Bu şekilde uyumsuz nokta kalmayana kadar aynı test tekrar edilmiştir.

Karşılaştırmada kullanılan TerraSAR-X ve TanDEM-X örnek verisinin doğruluğunun belirlenmesi amacıyla yapılan test işlemi, aynı test noktaları ve aynı test kriterleri kullanılarak DTED2 (Digital Terrain Elevation Data Level 2), SRTM2 (Shuttle Radar Topography Mission Level 2) ve Harita Genel Komutanlığı tarafından 2013 yılından itibaren, stereo hava fotoğraflarından otomatik görüntü eşleme tekniği ile üretilen 5 m çözünürlüklü SYM (HGK SYM) için de gerçekleştirilmiştir. Test işlemi, referans değer olarak kullanılan her üç veri seti (Tapu ve Kadastro Gn. Md.lüğünün sıklaştırma noktaları, Hrt.Gn.K.lığının hava fotoğrafı alımında tesis ettiği yer kontrol (kireçleme) noktaları ve Hrt.Gn.K.lığının TUTGA noktaları) ile ayrı ayrı tekrarlanmıştır. TerraSAR-X ve TanDEM-X, SRTM2, DTED2 ve HGK SYM verilerinin test edilmesi ile elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'te sunulmuştur.

	TKGM Kireçleme Noktaları	HGK Kireçleme Noktaları	HGK TUTGA Noktaları
Çözünürlük	-	-	-
Yatay Datum	WGS84	WGS84	WGS84
Düşey Datum	Türkiye Ulusal Düşey Datumu	Türkiye Ulusal Düşey Datumu	Türkiye Ulusal Düşey Datumu

Tablo 1. Doğruluk araştırmasında kullanılan kontrol noktaları

	TSX TDX	SRTM2 Modeli	DTED2 Modeli	HGK SYM Modeli
Çözünürlük	0.4"x0.4" (≈12 m)	1"x1" (≈30 m)	1"x1" (≈30 m)	5 m
Yatay Datum	WGS84	WGS84	WGS84	WGS84
Düşey Datum	EGM08	EGM96	Türkiye Ulusal Düşey Datumu	Türkiye Ulusal Düşey Datumu
Model Türü	SYM	SYM	SAM	SYM

Tablo 2. Doğruluk araştırmasında kullanılan sayısal yükseklik modelleri

		TSX TDX	SRTM2	DTED2	HGK SYM (5m)
TKGM KİREÇLEME NOKTALARI	Toplam Nokta Sayısı	265	265	265	265
	Uyumsuz Nokta Sayısı	8	3	3	8
	Test Nokta Sayısı	257	262	262	257
	Minimum	-2.64	-13.12	-10.46	-1.95
	Maksimum	3.87	14.77	9.72	2.08
	Ortalama	0.69	1.11	0.85	0.54
	Standart Sapma	± 1.25	± 4.49	± 3.70	± 0.64
	Karesel Ortalama Hata	± 1.43	± 4.61	± 3.79	± 0.83
	Ortalama Mutlak Hata	1.12	3.37	2.94	0.64
	LE90	± 2.35	± 7.59	± 6.23	± 1.37

Tablo 3. TerraSAR-X ve TanDEM-X, SRTM2, DTED2 ve HGK SYM Verilerinin TKGM Kontrol Noktaları ile Doğrulukları Tablosu

Tablo 4'de gösterilen ve teste tabi tutulan noktalar aynı zamanda HGK SYM (5m) verisinin üretildiği hava fotoğraflarının YKN'dir.

		TSX TDX	SRTM2	DTED2	HGK SYM (5m)
HGK KİREÇLEME NOKTALARI	Toplam Nokta Sayısı	24	24	24	24
	Uyumsuz Nokta Sayısı	1	-	1	3
	Test Nokta Sayısı	23	24	23	21
	Minimum	-2.17	-6.19	-7.28	-0.41
	Maksimum	4.40	8.19	6.94	0.87
	Ortalama	0.88	1.04	1.15	0.16

	Standart Sapma	± 1.72	± 3.78	± 3.47	± 0.34
	Karesel Ortalama Hata	± 1.90	± 3.85	± 3.58	± 0.37
	Ortalama Mutlak Hata	1.37	3.12	2.93	0.29
	LE90	± 3.13	± 6.33	± 5.89	± 0.61

Tablo 4. TerraSAR-X ve TanDEM-X, SRTM2, DTED2 ve HGK SYM Verilerinin HGK Yer Kontrol Noktaları ile Doğrulukları Tablosu

		TSX TDX	SRTM2	DTED2	HGK SYM (5m)
HGK KİREÇLEME NOKTALARI	Toplam Nokta Sayısı	19	19	19	19
	Uyuşumsuz Nokta Sayısı	1	2	1	-
	Test Nokta Sayısı	18	17	18	19
	Minimum	-3.35	-3.57	-3.58	-1.72
	Maksimum	4.01	6.49	9.05	1.71
	Ortalama	-0.66	1.06	1.10	-0.37
	Standart Sapma	± 1.59	± 3.01	± 3.52	± 0.91
	Karesel Ortalama Hata	± 1.68	± 3.11	± 3.60	± 0.96
	Ortalama Mutlak Hata	1.24	2.58	2.66	0.81
	LE90	± 2.76	± 5.12	± 5.92	± 1.58

Tablo 5. TerraSAR-X ve TanDEM-X, SRTM2, DTED2 ve HGK SYM Verilerinin HGK TUTGA Noktaları ile Doğrulukları Tablosu

Son olarak başlangıçta ayrı ayrı teste tabi tutulan farklı kaynaklara ait üç veri seti birleştirilerek tek bir veri seti hâline getirilmiş ve aynı kriterler izlenerek test tekrar edilmiştir. Bu durumda elde edilen sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

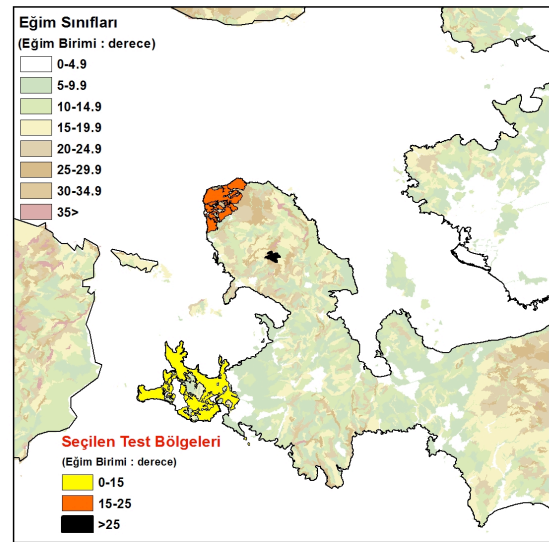
		TSX TDX	SRTM2	DTED2	HGK SYM (5m)
TÜM NOKTALAR	Nokta Sayısı	308	308	308	308
	Uyuşumsuz Nokta Sayısı	6	5	4	4
	TestNokta Sayısı	302	303	304	304
	Minimum	-3.67	-13.12	-10.46	-1.95
	Maksimum	4.01	14.27	12.00	2.39
	Ortalama	-0.40	1.15	0.99	0.50

	Standart Sapma	± 1.36	± 4.30	± 3.73	± 0.72
	Karesel Ortalama Hata	± 1.41	± 4.45	± 3.85	± 0.88
	Ortalama Mutlak Hata	1.15	3.31	2.96	0.67
	LE90	± 2.32	± 7.32	± 6.33	± 1.44

Tablo 6. TerraSAR-X ve TanDEM-X, SRTM2, DTED2 ve HGK SYM Verilerinin Tek Veri Seti ile Testi

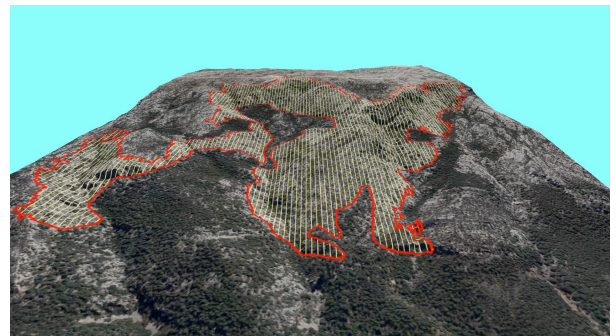
2.3.2 Farklı Arazi Eğim ve Arazi Karakteristiğine Sahip Bölgelerde Yüzeysel Karşılaştırma

TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından elde edilen SYM verisinin nokta setleri ile test edilmesinin ardından, aynı verinin farklı arazi karakteristiklerindeki doğruluklarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu maksatla test bölgesi eğim durumuna göre sınıflara ayrılmıştır. Test bölgesinin eğim sınıfları Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Test bölgesinin eğim sınıfları.

Eğim durumuna göre sınıflara ayrılan test bölgesi içerisinde; 0°-15°, 15°-25° ve 25°'nin üzerinde eğime sahip alanlar olmak üzere üç farklı eğim grubuna göre test bölgesi seçilmiştir. Belirlenen test bölgeleri içerisinde geniş bitki örtüsü ve orman alanı olmamasına dikkat edilmiştir. 25°'nin üzerinde eğime sahip test bölgesi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 25°'nin üzerinde eğime sahip test bölgesi

Yapılan yüzeysel karşılaştırmada, nokta setleri ile yapılan doğruluk araştırmasında TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından elde edilen SYM verisine göre yaklaşık 1.6 kat daha doğru olduğu tespit edilen ancak bunun yanı sıra eğimin fazla olduğu bölgelerde radar verisinden daha az etkileneceğinden bu bölgelerde radar verisinden daha da fazla doğru olacağı değerlendirilen, yoğun görüntü eşleme tekniği ile üretilmiş olan HGK SYM (5m) verisi referans yüzey olarak kabul edilmiştir. Eğim gruplarına göre elde edilen doğruluklar Tablo 7’de gösterilmiştir.

		0°-15°	15°-25°	>25°
YÜZEY KARŞILAŞTIRMA	Piksel Sayısı	2337570	674730	35397
	Minimum	-37	-33	-54
	Maksimum	37	57	50
	Ortalama	-0.46	0.07	0.65
	Standart Sapma	± 1.47	± 2.17	± 9.21
	Karesel Ortalama	± 1.47	± 2.17	± 9.24

Tablo 7. TerraSAR-X ve TanDEM-X SYM verisinin HGK SYM Verisi ile Farklı Arazi Karakteristiklerine Göre Karşılaştırılması

Farklı eğim gruplarına göre yapılan test sonucunda, referans olarak seçilen HGK SYM (5m) yüzeyi ile TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından elde edilen SYM yüzeyi arasındaki farkların karesel ortalama hatasının; eğimin 0°-15° arasında olduğu bölgelerde ± 1.47 m, eğimin 15°-25° arasında olduğu bölgelerde ± 2.17 m, eğimin 25°’nin üzerinde bölgelerde ise ± 9.24 m olduğu tespit edilmiştir.

Bu sonuçlara göre, eğim arttıkça referans yüzey ile test yüzeyi arasındaki farkın arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun eğimli ve dik arazi yapılarında radar gözlemlerinde beklenen bozulmalardan olan kısalma (foreshortening) ve örtünme (layover) etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Eğimin 0°-15° olduğu bölgelerde elde edilen ± 1.47 m karesel ortalama değerinin, TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından elde edilen SYM verisinin nokta setleri ile yapılan testi sonucunda elde edilen ve Tablo-6’da verilen ± 1.41 m karesel ortalama değeri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum, nokta setlerindeki noktaların tümünün GNSS gözlemi yapılan noktalar olması ve TUTGA noktaları hariç diğer noktaların aynı zamanda kireçleme noktaları olmaları nedeniyle; açık ve düz alanlarda tesis edilmesinin bir sonucudur.

3. SONUÇ

Yapılan test sonucunda elde edilen bilgiler ışığında; TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından elde edilen SYM verisinin ± 1.41 m, SRTM2 verisinin ± 4.45 m, DTED2 verisinin ± 3.85 ve HGK SYM verisinin ± 0.88 m karesel ortalama hata değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Aynı test sonucunda, %90 güven aralığında doğrusal hata değerleri bakımından; TerraSAR-X ve TanDEM-X’in ± 2.32 m, SRTM2’nin ± 7.32 m, DTED2’nin ± 6.33 ve hidrografik

iyileştirme yapılmamış HGK SYM’nin ± 1.44 m doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir.

Eğimli ve dik arazilerde TerraSAR-X ve TanDEM-X uydularından elde edilen SYM verisinin doğruluğunun azaldığı tespit edilmiştir.

Bununla birlikte bu çalışmada kullanılan TerraSAR-X ve TanDEM-X verisinin, anılan uyduların aynı bölgeden sadece bir defa geçişi sonucunda üretildiği; uyduların aynı bölgeden ikinci, üçüncü veya dördüncü geçişi sonrasında elde edilen nihai veri ile aynı testin tekrarlanması ile eğimin yüksek olduğu yerlerde iyileştirme olup olmadığının incelenmesinin yararlı olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

Rabus, B., Eineder, M., Roth, A. and Bamler, R. (2003): The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 57, no. 4, pp. 241-262.

Soergel, U. (2010): Review of radar remote sensing on urban areas. Radar Remote Sensing of Urban Areas. Springer, Berlin, Germany, pp. 1-47.

Soergel, U., Jacobsen, K., Schack, L., 2013. The TanDEM-X Mission: Data Collection and Deliverables, Photogrammetric Week 13 Proceedings, Stuttgart, pp.193-203.

Wendleder, A., Wessel, B., Roth, A., Breunig, M., Martin and K., Wagenbrenner, S. (2012): TanDEM-X Water Indication Mask: Generation and First Evaluation Results. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing”, vol. 6, no. 1, pp. 171-179.