# TANDEM-X Sayısal Yükseklik Modelinin Oluşturulması

(TanDEM-X Digital Elevation Model Generation)

Esra ERTEN, Mehmet Furkan ÇELİK, Zehra Meltem ŞAHİN İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği, TR-34469, İstanbul, Türkiye eerten@itu.edu.tr, celikmeh@itu.edu.tr, sahinzeh@itu.edu.tr

### ÖΖ

Son zamanlarda yapılan çalışmalar, Sayısal Yükseklik Modellerinin (SYM), taşkın analizlerinden 3B sehir modellemeye kadar geniş bir yelpazede kullanım alanı olduğunu ve global bir SYM'ne ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur. 2010 yılında Alman Radar Uydusu TDX, TerraSAR-X (TSX) uydusunun yörüngesine çok yakın olacak şekilde konumlandırılarak uzaya fırlatıldı ve ilk defa uzaydan bi-statik interferometri ölçmeleri ile sayısal yükseklik modeli için uygun geometrik konfigürasyon sağlandı. Bu çalışmanın amacı, TANDEM-X sayısal yükseklik modelinin doğruluk analizinin gerçekleştirilmesi ve sayısal yükseklik modeli oluşturmada klasik mono-statik interferometrik Synthetic Aperture Radar (InSAR) olarak adlandırılan yapay açıklıklı interferometri tekniğine eklenen işlem adımlarının paylaşılmasıdır. Bunlara ek olarak, üretilen sayısal yükseklik modelinin doğruluk analizinin değerlendirilmesi de yapılacaktır. Anlatılan teori, Edirne ili Gala Gölü mevkide İpsala İlçesi'ne bağlı olan çeltik tarlalarını ve çevresini kapsamaktadır. Çalışma alanı, tarım alanlarına ek olarak orman, yerleşim alanı ve dağlık bölge gibi farklı topoğrafik özelliğe sahip alanları da içermektedir. Bahar aylarında bölgede görülen aşırı yağışlar Meriç Nehri havzasında su baskınlarına neden olmaktadır ve topoğrafyada değişimler gözlenmektedir.

Anahtar Sözcükler: Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), TanDEM-X, TerraSAR-X, Bi-statik İnterferometri, Radargrametri

#### ABSTRACT

Recent researches illustrated well the diversity of application areas for which global Digital Elevation Model (DEM) is needed. To supply this need, TanDEM-X mission supported by German Aerospace Center is accomplished. The twin satellite of TerraSAR-X (TSX) entitled TDX is a Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite flying in close to TSX satellite orbit whose primary objective is the generation of a consistent global DEM using bi-static interferometry. The purpose of this study is to introduce the TanDEM-X mission DEM including its processing steps and the accuracy assessment. Explained theory will be utilized to derive DEM of the area surrounding the Gala Lake. The area, which includes agricultural fields, forests, lake, settled area and mountains, is located in Edirne /Turkey. In this region, heavy rainfalls lead to flooding and topographic change as well.

**Keywords:** Digital Elevation Model (DEM), TanDEM-X, TerraSAR-X, Bi-static Interferometry, Radargrametry

# 1. GİRİŞ

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), doğal kaynaklar ve şehirlerin yönetiminden, mühendislik ölçmelerine kadar birçok uygulamanın olmazsa konumundadır. İlk uygulamalarda olmazı kullanılan yersel ölçmeler ile SYM üretimi, her ne kadar yüksek doğrulukla ürünler sağlasa da yükseklik bilgisinin kullanıldığı uygulamalar geliştikçe çok zaman alan bir yöntem haline gelmiş, büyük ve erişilmesi zor olan alanlar için yetersiz kalmıştır. Bu yüzden de uydu ve hava bazlı görüntüler, yeryüzü topoğrafyasının belirlenmesinde etkili bir veri kaynağı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yersel yöntemler ile karşılaştırıldığında da hızlı, ekonomik ve güvenilir SYM'lerinin üretildiği görülmüştür. Bu bağlamda, National Aeronautics and Space Administration (NASA) tarafından yürütülen uluslararası bir calisma olan SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) projesiyle yeryüzünün topoğrafik haritası, 60° kuzey ve güney enlemleri arasındaki kara parçaları için yapay/Synthetic açıklıklı/Aperture Radar (SAR) görüntüleri kullanılarak elde edilmiştir. Böylelikle tek geçişli İnterferometrik SAR (InSAR) tekniği kullanılarak yeryüzünün toplam kara parçasının %80'ninin sayısal yükseklik modeli 30 ve 90 metre çözünürlük ile üretilmiş, ücretsiz olarak internet üzerinden kullanıcılara ulaştırılmıştır (URL-1). Buzulların izlenmesinden (Erten, 2013), uzaktan algılama görüntülerinin belli bir koordinat sistemine gerçekleştirilen oturtulması için geometrik düzeltme işlem adımına (Rossi ve Gernhardt, 2013) kadar birçok çalışmada kullanılmasına rağmen, SRTM SYM'lerinin global olmaması en büvük kısıtlaması olarak görülmektir. İkinci bir kısıtlama da SYM üretiminde kullanılan radar görüntü ciftleri arasındaki zaman farkıdır (Rossi ve Erten, 2015). 11 gün zaman farkıyla elde edilen SAR görüntüleriyle gözlemlenen yeryüzünde meydana gelen değişiklik, iki SAR görüntü sistemi arasında uyumlu (coherent) sinyal elde edilememesine yani yükseklik ile ilgili güvenilir faz edilmesine verisi elde engel olmaktadır. Dolayısıyla, SAR görüntüleri arasındaki zaman farkı üretilen SYM'inde hatanın ana kaynağı durumundadır ve özellikle zamansal değişimin topoğrafya üzerinde hızlı olduğu tarım arazileri bölgelerde doğrulukla gibi düşük SYM üretilmesine neden olmuştur.

Bu kısıtlamaları ortadan kaldırmak için Alman Uzay Ajansı (DLR: Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt) tarafından TANDEM-X projesi geçirilmiştir. Global TanDEM-X hayata SYM'lerinin satışı dünyanın etrafının üç defa taranması bittikten sonra başlamıştır. Şekil 1. de gösterilen. TerraSAR-X (TSX) uvdusunun ikizi olan TDX uvdusu, birbiri ardına mikro-saniveden az zaman aralığı ile görüntüleri elde ederek yeryüzünün sayısal yükseklik modelini üretmekte ve böylelikle de SRTM SYM'inde olduğu gibi, görüntü çiftleri arasındaki zamansal değişikliklerden kaynaklanan hataların önüne geçmektedir. SRTM SYM'lerine göre yeryüzünün %90'nı için görüntü alımı gerçekleşebilecek ve SRTM verisi olmayan bölgelerin de topoğrafyasını SYM'leri karakterize eden üretilebilecektir. Özellikle kuzey ve güney kutbundaki değişimlerin izlenmesi için çok büyük bir avantaj sağlayacaktır. Bu iki avantajının yanı sıra TanDEM-X SYM'leri ile, interferometri teknikleri kullanılarak uzaydan yüksek görüntüleme ile elde edilmiş en çözünürlüklü SYM'leri de kullanıcılara sunulmaktadır. Üretilen SYM'nin doğruluğu ve kalitesi de farklı uygulamalar için büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle üretilen TANDEM-X SYM'lerinin doğruluklarının ve kalitelerinin değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin çok iyi bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 1. TDX-TSX görüntülerinden sayısal yükseklik modeli oluşturulmasında görüntü alım geometrisi [Rossi, vd., (2012) çalışmasından esinlenerek üretilmiştir].

Bu çalışma, interferometrik algoritmalar kullanılarak TSX-TDX görüntü çiftinden nasıl SYM oluşturulacağını Rossi, vd., (2012) çalışmasını referans alınarak göstermektedir. Bu bağlamda makalenin ikinci bölümünde ham sayısal yükseklik verisinin oluşturulması ve DLR tarafından SYM oluşturmak için geliştirilen algoritmalar anlatılacak, üçüncü bölümde ise TDX ve TSX'den elde edilen, kalibre edilmiş ve coğrafi referanslandırılması yapılmış SYM oluşturulacaktır. Araştırma sonuçlarının özetlendiği dördüncü bölüm ile çalışma sonuçlandırılacaktır.

# 2. HAM YÜKSEKLİK VERİSİ

Bu bölümde ilk olarak farklı zamanlı iki sinyalden odaklanmış görüntü elde edilmesi için gereken temel islem adımları hatırlatılacak ve klasik algoritmalardan farklı olarak bi-statik interferometrik geometri için uygulanan özel yaklaşımlar belirtilecektir. SRTM gibi tekrar geçişli interferometri tekniklerinde genel olarak, gönderici ve alıcının tek anten kullandığı mono-statik radarlar kullanılır. Bi-statik radar ise, her biri kendi antenine sahip aralarında belirli bir uzaklık bulunan, bir gönderici ve iki alıcıdan meydana gelir. Şekil 2, TDX-TSX görüntülerinden sayısal modeli oluşturulmasında iş yükseklik akış semasını göstermektedir. Radargrametrik görüntülerin ölçmeler birbirine kayıt ve edilmesinde kullanılan görüntülerin yörünge (header file) dosyası, uydunun konum-hız yüksekliği ve anten kazancı bilgilerini içerir. Şekil 2'de ver alan akış diyagramı, faz ve zaman düzeltme, odaklama, birbirine kayıt gibi temel algoritmaları içerdiği gibi, radargrametrinin mutlak hesaplanmasında kullanılması gibi. faz TanDEM-X SYM üretimi için yeni olan diğer işlem adımlarını da içermektedir. TanDEM-X SYM üretiminde kullanılan teknikler, adım adım bu bölümün alt başlıklarında anlatılacaktır.

### a. Spektral filtreleme

Şekil 1'de gösterildiği gibi yeryüzü, iki farklı açıyla ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ) elde edilen görüntüler ile izlendiği için, görüntülerin azimut (uçuş doğrultusu) ve yatık menzil (uçuş doğrultusuna dik) yönlerindeki ortak spektral bölgelerinin bulunması gerekmektedir. Bunun için azimut ve menzil yönünde ayrı ayrı uygulanan spektral filtreleme, diğer tüm interferometrik uygulamalarda olduğu gibi, bistatik interferometrik görüntülemede de ilk işlem adımıdır. İnterferometride spektral filtreleme için detaylı bilgiye, Bamler ve Hartl (1998) den ulaşılabilir. Bu işlem adımı görüntülerin birbirine kavıt edilmesinde büyük öneme sahiptir. Kritik baz, interferometrik görüntü analizinde ilk test edilmesi gereken parametredir. Aynı bölgeyi kaplayan iki Single Look Complex (SLC) SAR görüntüsü var olsa da, görüntülerin alındığı uyduların arasındaki mesafe kritik bazdan daha büyük ise herhangi bir interferometrik işlem yapılamaz.



Şekil 2. TDX-TSX görüntülerinden sayısal yükseklik modeli oluşturulmasında iş akış şeması. Radargrametrik ölçmeler ve görüntülerin birbirine kayıt edilmesinde kullanılan görüntülerin yörünge dosyası, uydunun konum-hız yüksekliği ve anten kazancı bilgilerini içerir.

Kritik baz ile bakış doğrultuları arasındaki ilişki:

$$\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2 \approx \frac{B_{\perp,kritik}}{r_0} \tag{1}$$

denklemi ile yaklaşık olarak tanımlanmıştır (Bamler ve Hartl, 1998). Burada,  $r_0$  menzil yönündeki mesafe,  $B_d$  eşitlik (2) ile hesaplanan kritik bazdır. Kullanılan dalga boyunun  $\lambda$ , geliş açısının  $\theta$  ve topoğrafik eğimin *e* fonksiyonu olan kritik baz:

$$B_{\perp,kritik} = \lambda(W_P/c)R_P \tan(\theta - e).$$
(2)

Eşitlik (2) de  $W_p$ 'nin menzil yönündeki bant genişliğini gösterdiği durumda, kritik baz ve sebep olduğu geometrik deformasyon  $g_{defo}$ :

$$\left|g_{defo}\right| = \begin{cases} \frac{B_{\perp,kritik} - B_{\perp}}{B_{\perp,kritik}} & |B_{\perp}| \le B_{\perp,kritik} \\ 0 & |B_{\perp}| > B_{\perp,kritik} \end{cases}$$
(3)

ile ifade edilebilir. Bu geometrik deformasyon basitçe spektral filtreleme ile elimine edilebilir. Filtrelemede SYM kullanımı yapılan işin hassaslığını arttırır. Bu çalışmada SRTM 30 metre çözünürlüklü SYM kullanılarak topoğrafik eğim hesaplanmış ve spektral filtreleme yapılmıştır.

#### b. Birbirine kayıt

Aynı bölgeyi kaplayan birden fazla görüntünün olduğu durumlarda, görüntülerin birbirine kayıt edilmesi en kritik görüntü ön-işleme adımıdır. SAR görüntülerinde birbirine kayıt işleminin hassaslığı uydu yörüngesinin konumunun ve sinyal gönderme zamanının kesin olarak bilinmesine bağlıdır. Şekil 3'de sabit bir azimut zamanında TDX uydusu P noktasını  $t_{TDX}^{P}$  zamanında, TSX uydusu ise  $t_{TSX}^{P}$  zamanında gözlemlemektedir. Bu zaman farkı da yatık menzilde aynı noktanın, Şekil 1'deki gibi A ve B noktalarında algılanmasına sebep olur. Menzil yönündeki öteleme (Şekil 3):

$$\Delta = \frac{\left( (t_{TDX}^{P} - t_{TDX}^{0}) - (t_{TSX}^{P} - t_{TSX}^{0}) \right)}{\delta_{m}} \tag{4}$$

eşitliği ile bulunabilir. Burada  $\delta_m$  menzil yönündeki çözünürlük,  $t_{TDX}^0$  ve  $t_{TSX}^0$  ise TDX ve TSX görüntüleri için referans zamandır (ilk sinyalin gönderildiği zaman). Back-Geocoding olarak adlandırılan ters-jeoreferanslama yöntemi olarak bilinen bu yöntem ile ilgili detay (Sansosti vd., 2006) çalışmasında bulunabilir. Görüntülerin birbirine kayıt edilmesindeki doğruluk, yörünge bilgisinin hassaslığına bağlıdır. TDX ve TSX uydularının vörünge bilgileri kullanılarak milimetrenin altında hassasiyet ile görüntüler birbirine kayıt edilebilir. Bu da uzay bazlı RADARSAT, ALOS ve uçak bazlı ESAR, RAMSES gibi SAR görüntüleme sistemlerine göre TanDEM-X projesinin büyük bir avantajıdır. Böylelikle genlik görüntülerine hiç dokunmadan, görüntü çiftleri birbirlerine milimetre doğrulukla kayıt edilebilir. Yer kontrol noktalarının seçimi gibi bireylerin deneyimine bağlı olan yöntemlere göre ters-jeoreferanslama ile birbirine kayıt işlemi, optik görüntüler ile karşılaştırıldığında çok büyük avantaj sağlamaktadır (Lopez-Sanchez, vd., 2017).



Şekil 3. TDX-TSX görüntülerin arasındaki öteleme.

#### c. Mutlak faz verisinin elde edilmesi

Fotogrametrik bir yöntem olan radargrametri tekniği ile elde edilen SYM'nden farklı olarak, SAR interferometri teknikleri kompleks interferogramdan elde edilen faz bilgisinin, yükseklik verisine dönüştürülmesi prensibine dayanır. SAR sistemlerinde mikrodalga enerjinin hem genlik hem de faz bilgisi ölçülür. Genlik bilgisi yeryüzünün elektriksel (nem, kimyasal madde içeriği vb.) ve geometrik (yüzey pürüzlülüğü, doku, vb.) özelliklerine bağlıyken, faz bilgisi ise aynı LiDAR ve GPS sistemlerin de olduğu gibi uydu platformu ile yeryüzü arasındaki mesafeye bağlıdır. Kısaca, iki SAR görüntüsünün fazlarının farkı alındığında elde edilen işaret, yeryüzünün referans yüzeye göre yüksekliği ile direkt bağlantılıdır. İki SAR görüntüsünün faz farkından elde edilen görüntüye Şekil 5(b)'de gösterildiği gibi interferometrik SAR (InSAR) görüntüsü denir. Fakat topoğrafik yükseklikle ile ilgili mutlak fazı bulmak için interferometrik fazın katlılığının giderilmesi gerekir, yani interferometrik fazdaki belirsizliğin giderilmesi gerekir. Son ürün olarak satışı yapılan TanDEM-X SYM'nde daha önceden kullanılmayan Lachaise, vd., (2017) tarafından önerilen faz katılığı giderilme yöntemi kullanılmaktadır. Kısaca, bu yöntem çift-baz tekniğini kullanmaktadır. Bu yönteme göre, ilk yıl tüm yeryüzü 40-55 metre, ikinci yıl ise 35 metre yükseklik belirsizliği ile taranacak ve bu iki yıl boyunca elde edilen interferometrik fazların birlikte değerlendirilmesiyle daha hassas faz katlılığı giderilmesi yapıla bilinecektir. Bu çalışmada ise Lachaise, vd., (2012) de anlatılan yöntem kullanılmıştır.

Hannsen, (2001)'de belirtildiği gibi interferometrik fazın, topoğrafyadaki yükseklik değişimi ile arasındaki ilişki:

$$\frac{\partial \phi_{top}}{\partial h} = \frac{2\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin \theta}$$
(5)

şeklinde ifade edilir. Buradaki en büyük sorun interferogramdan elde edilen wrapped faz değerinden unwrapped yani referans noktası ile uydu arasındaki mesafenin kaç tane tam faz ile ifade edildiğinin aşağıdaki eşitlik ile bulunmasıdır:

$$\phi_{top}^{P} = \frac{\phi_{unw}^{P}}{\phi_{0}^{P} + 2\pi k^{P}} + \frac{\phi_{off}^{P}}{2\pi q^{P} + \phi_{N}^{P}}$$
(6)

Bu eşitlikte ilk terim  $\phi_0^P + 2\pi k^P$  unwrapped fazı, ikinci terim ise  $2\pi q^{P} + \phi_{N}^{P}$  mutlak faz ile unwrapped faz arasındaki bilinmeyendir yani mutlak faz ofsetidir. Eşitlik (6)'den net bir şekilde görüldüğü gibi faz unwrapping, k=0 olan bir referans noktasına göre yapılır. Burada k tam sayı ve  $\phi_0^P$ 'de interferogramdan elde edilen fazdır. (6) eşitliğinin ikinci terimindeki  $\phi_N^P$  sürekli tekdüze dağılıma sahip olan fazın gürültüsüdür. q ise sabit tam sayı olup, faz katlılığı hatasının olmadığı durumlarda sıfıra eşittir. Gürültünün ve  $\pi k$ 'nın bulunması mutlak fazın belirlenmesinde çok önemlidir. Bu evrede, SRTM gibi interferometrik yöntemlerle SYM üretiminde kullanılmayan, radargrametrik ölçmeler de mutlak fazın hesaplanmasında, doğruluğu arttırmak amacıyla kullanılmıştır. Bu noktada, çözünürlük artıkça, radargrametrik yani genlik bilgisini kullanan yöntemlerin doğruluğunun, faz bilgisi kullanarak SYM üreten yöntemlerin doğruluğuna daha da yaklaşacağının altı çizilmelidir.

Radargrametri tekniği, InSAR tekniğinden farklı olarak SAR görüntülerinin genlik bilgisinden vararlanır ve optik sistemlerdeki stereo görüntülerden SYM elde edilmesinde kullanılan paralaks temel prensibini kullanır. Yaygın olarak kullanılan radargrametrik SYM üretimi ile ilgili detay, Crosetto ve Aragues, (1999) çalışmasında bulunabilir. Bu çalışmada ise radargrametrik ötelemeler mutlak fazın güvenirliliğini arttırmak için Rossi, vd., (2012, 2013) çalışmalarında detaylandırıldığı şekilde interferometrik SYM'nin doğruluğunu artırmak için kullanılmaktadır. Menzil yönünde elde edilen radargrametrik ötelemeler aşağıdaki eşitlik ile faz değerine dönüştürülür:

$$\phi_{radargrametri}^{P} = 2\pi f_0 (t_{TDX}^{P} - t_{TSX}^{P}) . \tag{7}$$

Stereo radargrametri ve interferometri teknikleri aynı bilgiyi ölçerler ve aralarındaki

fark da fazdaki ötelemeyi, kısaca eşitlik (6)'deki faz ofsetini gösterir:

$$\Delta \phi = \phi_{radgr}^P - \phi_{unw}^P = -\phi_{off}^P \tag{8}$$

Şekil 5(d)'de örnek veri için gösterilen radargrametri ve interferometri ölçmelerinin farkı olan  $\phi_{off}^{P}$ , istatiksel analizlerin de yardımıyla mutlak fazın bulunmasında kullanılır. Bunun için tüm görüntüden hesaplanan iki ölçme farkının  $(\phi_{off}^{P})$  histogramından yararlanılır. Histogramın yoğunlaştığı ortalama değer olarak hesaplanan  $\phi_{off}^{P}$  değerinin etrafındaki değerlerden farkının anlamlı olması (yani su yüzeyi, dağlık alanlar gibi bölgelerdeki kaba ölçme hatalarından kaynaklı önemli bir fark olmaması) için histogramdaki tepe noktası hesaplanmadan önce ortanca filtresi uygulanır. Bamler and Eineder, (2005)'de geliştirilen, eşitlik (9)'de verilen ve Şekil 4'de gösterilen analitik denkleme göre, paralakstan kaynaklı öteleme doğruluğu coherence ( $\gamma$ ) olarak bilinen uyumluluk ile doğru orantılı, kestirimde kullanılan pencerenin büyüklüğü yani örnek sayısı N ile ters orantılıdır. Ortanca filtrelemesinden sonra oluşturulan histogramda %95 güven aralığında

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{3}{2N}} \sqrt{\frac{1 - \gamma_P^2}{\pi \gamma_P}} W^{3/2} \tag{9}$$

olmayan ölçmeler hesaplamaya katılmazlar. Böylelikle belirlenen faz ofseti doğru varyansı da oldukça küçük olur.  $\phi_{off}^{P}$  hesaplandıktan sonra faz belirsizliğinin giderilmesi kısaca faz katlılığı giderilme işlemi uygulanır. Böylelikle menzil ve ona dik doğrultuda olan azimut yönündeki her bir örnek için topoğrafik yükseklik bilgisi elde edilir.



Şekil 4. Radargrametrik ölçmelerin doğruluğunun, uyumluluk ve örnek sayısına bağlı olan eşitlik (8) de gösterilen fonksiyonu

En sonunda ürünün kalitesi, radargrametrik ve interferometrik ölçümlerin, eşitlik (10)'da belirtildiği şekilde karşılaştırılmasıyla elde edilir:

$$q = \frac{n_{tot} - n_{out}}{n_{tot}} \tag{10}$$

Bu eşitlikte,  $n_{tot}$  ve  $n_{out}$  sırasıyla toplam radargrametrik ölçüm sayısını ve iptal edilen radargrametrik ölçüm sayısını göstermektedir.

### 3. HAM YÜKSEKLİK VERİSİNDEN SYM ÜRETİLMESİ

Bölüm 2'de anlatılan teori Türkiye-Yunanistan sınırını içeren TSX-TDX SLC görüntü çiftine uygulanmıştır (Erten, vd., 2015). Şekil 5(a)'da gösterildiği gibi görüntünün kapsadığı bölge yerleşim yeri, orman, tarım, göl gibi değişik arazi örtüsünü içermekte ve 0 ile 2000 metre arasında değişen yüksekliklere sahip düz ve dağlık alanlardan oluşmaktadır (Erten, vd., 2016). Bu çalışma için kullanılan TDX ve TSX görüntü çiftlerinin özellikleri ve onlardan üretilen SYM'nin özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. SYM üretiminde kullanılan bi-statik görüntü çiftinin özellikleri

geranna şinanın ezenmaen	
Görüntü alım tarihi	27 Ekim 2014
Geliş açısı	36.12°
Dik baz	116.56 m
Ortalama uyumluluk	0.74 (su dahil)
Uyumluluk standart sapma	0.21 (su dahil)
Yükseklik belirsizliği	49.35 m
Polarizasyon	НН
Azimut çözünürlüğü	2.03 m
Yatık menzil cözünürlüğü	2.24 m

Şekil 5'de TDX ve TSX görüntü çiftinden jeoreferanslandırılmış SYM oluşturulmadan önce elde edilen ara görüntüler gözükmektedir. Şekil 5(b)'de, çalışma alanı için TDX ve TSX görüntülerinden elde edilen interferometrik faz gözükmektedir. Bölüm 2.c'deki yöntem kullanılarak faz belirsizliği giderildikten sonra interferometrik mutlak fazdan SYM elde edilir. Şekil 5(c), bu interferometrik fazdan elde edilen yükseklik modelinin SAR görüntü alım dönüştürülmüş geometrisine SRTM 30m çözünürlüklü SYM'den farkı, Şekil 5(d) ise radargrametrik ölçmeler ile oluşturulan SYM'den farkını göstermektedir. Hatırlatılmalıdır ki, farklı zamanlarda alınan iki SAR uydu verisinin faz farkından SYM'nin çıkarılmasıyla diferansiyel interferogramlar elde edilir. Özellikle deformasyon izlenmede kullanılan bu yöntemle depremler, volkanik hareketler, buzul hareketleri, heyelanlar, madencilikten kaynaklanan yüzey hareketleri izlenebilmektedir. Burada eski tarihli SYM'den interferometrik fazın farkı alınmıştır ve suyla kaplı yüzeyler dışında topoğrafyada büyük bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5(d)'deki sonuçlar incelendiğinde, iki farklı (radargrametrik ve interferometrik) SYM üretim modeli arasındaki farkın, dağlık bölgelerin etrafında yoğunlaşmış olan, overlay olarak adlandırılan yana yatma ve gölge alanlarında olduğu gözlemlenmiştir. En son ürün olan jeoreferanlandırılmış SYM'nde, radargrametrik ölçmeler fazın güvenilir olmadığı bölgelerde boşlukların doldurulmasında kullanılmıştır. İnterferometrik ürünler, yukarıda bahsedilen düzeltmelerin uygulanmasından sonra jeoreferanslandırılmıştır.

Şekil 6(a)'da sonuç SYM'nin oluşturulduğu interferometrik çiftin, 0 ile 1 arasında değişen uyumluluk haritası gösterilmiştir. Tüm görüntüden elde edilen ortalama uyumluluk değeri 0.74 olup, görüntünün %10'nu kaplayan sulak alanlar çıkarıldığında ise bu değer 0.85 olmaktadır. Özellikle tarım alanlarının olduğu bölgelerde uyumluluk değeri 0.95'in üzerinde olup, oldukça yüksek doğrulukla SYM oluşturulabilmektedir. Uvumluluk deăerinin standart sapması 0.02'dir. Sekil 6(b)'de yüksekliğin, 0 ile 4 metre arasında değişen hata haritası gözükmektedir. Bu hata haritası, eşitlik (9) de belirtildiği gibi direkt olarak uyumluluğun, uyduların geometrik konumlarının, topoğrafyanın ve kestirim yapılan örnek sayısının fonksiyonudur.

Sonuç ürün olan 12 metre çözünürlüklü SYM Şekil 7 de, özellikleri de Tablo 2'de gösterilmiştir. -0.8 ile 2200 arasında değişen topoğrafya 5.55E-05° derecelik dilimler ile örneklenmiştir. Bu değerlerde WGS84 datumunda 4.67 m boylam ve 6.17 m enlem sıklıkla SYM üretilmiş demektir. Böylelikle uzaydan interferometri tekniğiyle elde edilmiş en yüksek çözünürlüklü SYM bu bölge için üretilmiş olmaktadır.

Enlem yönünde	5.55E-05° = 6.17 m
örnekleme	
Boylam yönünde	5.55E-05° = 4.67 m
örnekleme	
Maksimum yükseklik	2200 m
Minimum yükseklik	-0.8
Ortalama yükseklik	1.89 m
hatası	
Yükseklik hatasının	2.5 m
standart sapması	

Tablo 2. Üretilen TDX SYMnin özellikleri





Şekil 5. (a) TSX uydusunun HH polarizasyonda genlik görüntüsü. (b) TDX-TSX interferometrik faz. (c) Diferansiyel-interferometrik faz. (d) İnterferometrik faz ile radargrammetrik faz arasındaki fark.

### 4. SONUÇLAR

Bu çalışma, TanDEM-X sayısal yükseklik modelinin oluşturulmasını Meriç nehrinin etrafındaki celtik tarlalarını ve dağlık bölgeyi kapsayan SLC TDX ve TSX görüntü çiftine uygulayarak anlatmıştır. Üretilen SYM'nin kalitesi daha önceden interferometrik teknikler kullanılarak üretilen SRTM SYM'nin üstünde olduğu çok net gözükmektedir. Bu başarıda üç faktör bulunmaktadır: 1) bi-statik önemli interferometrik görüntü alımı ile interferometrik uyumsuzluğun ciftler arasındaki ortadan kaldırılması 2) TanDEM-X projesinde kullanılan ikiz TSX ve TDX uydularının çözünürlüğü ve 3) hassas orbit bilgisidir.









Şekil 6. (a) TDX ve TSX görüntülerinin uyumluluk (coherence) haritası, (b) Yükseklik hata haritası.

Özellikle topoğrafyanın dik eğimli olmayan bölgelerinde düşeyde santimetre doğrulukla yükseklik bilgisi elde edilmesi, TanDEM-X sayısal yükseklik modellerinin sadece orman, maden, afet (sel, volkanik patlama, vb.) gibi düşük çözünürlüklü SYM'lerinin kullanıldığı çalışmalarda değil, tarım, şehir ve bölge planlama gibi yüksek çözünürlüklü SYM gerektiren çalışmalarda da kullanılacağını göstermektedir. Şekil 7. (a) TDX ve TSX görüntülerinden elde edilen SYM, (b) Üretilen SYM ve TSX genlik görüntüsü

### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, proje no:113Y446 ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve proje no:XTILAND1476 ile Alman Uzay Ajansı tarafından desteklenmiştir. Alman Uzay Ajansın'dan Prof. Dr. Irena Hajnsek ve Dr. Cristian Rossi'ye TanDEM-X verisinin elde edilmesinde ve işlenmesinde gösterdikleri yardımlardan dolayı teşekkür ederiz.

# KAYNAKLAR

- Bamler, R., Hartl, P., (1998), *Synthetic aperture radar interferometry*, Inverse Problems, 14, 4, 1-54.
- Bamler, R., Eineder, M., (2005), Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2, 2, 151-155.
- Crosetto M., Aragues F. P., (1999), Radargrammetry and SAR interferometry for DEM generation: validation and data fusion, CEOS'99 SAR Workshop, ESA-CNES Toulouse, 26-29, October.
- Erten, E., (2013), *Glacier velocity estimation by means of a polarimetric similarity measure*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51, 6, 3319-3327.
- Erten, E., Lopez-Sanchez, J. M., Yuzugullu, O., Hajnsek, I. (2016), *Retrieval of agricultural crop height from space: a comparison of SAR techniques*, Remote Sensing of Environment, 187, 130-144.
- Erten, E., Rossi, C., Yuzugullu, O., (2015), Polarization impact in TanDEM-X data over vertical-oriented vegetation: the paddy-rice case study, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12, 7, 1501-1505.
- Hanssen, F. R., (2001), *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, Kluwer Academic Publishers.
- Lachaise, M., Balss, U., Fritz, T., Breit, H., (2012), *The dual-baseline interferometric processing chain fort he TanDEM-X mission,* Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012, IEEE International, Munich, Germany, 5562-5565.
- Lachaise, M., Fritz, T., Bamler, R., (2017), *The dual-baseline phase unwrapping correction framework for the TanDEM-X mission part 1: theoretical description and algorithms*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56, 2, 780-798.
- Lopez-Sanchez, J. M., Vicente-Guijalba, F., Erten, E., Campos-Taberner, M., Garcio-Haro, F. J. (2017). *Retrieval of vegetation height in rice fields using polarimetric SAR interferomentry with TanDEM-X data*, Remote Sensing of Environment, 192, 30-44.

- Rossi, C., Erten, E., (2015), *Paddy-rice monitoring using TanDEM-X*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53, 2, 900-910.
- Rossi, C., Gonzalez, F. R., Fritz, T., Yague-Martinez, N., Eineder M., (2012), *TanDEM-X calibrated raw DEM generation*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 73, 12-20.
- Rossi, C., Gernhardt, S., (2013), *Urban DEM generation, analysis and enhancements using TanDEM-X*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 85, 120-131.
- Sansosti, E., Berardino, P., Manunta, M., Serafino, F., Fornaro, G., Irea, N., (2006), *Geometrical SAR image registration,* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44, 2861–2870.
- URL-1: SRTM <u>http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/</u> Erişim tarihi: 24.02.2018.