

Ormanlık Alanlarda Filtreleme Yöntemleri Kullanılarak TREx Sayısal Yüzey Modeli Verilerinden Sayısal Arazi Modeli Üretimi

(Generation of Digital Terrain Models From TREx Digital Surface Model Data Using Filtering Methods in Forest Areas)

Mikail ODACI¹, Bahadır AKTUĞ², Burak TAVUKÇU¹

¹Harita Genel Müdürlüğü, Fotogrametri Dairesi, Cebeci, Ankara

²Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı, Ankara

mikail.odaci@harita.gov.tr, aktug@ankara.edu.tr, burak.tavukcu@harita.gov.tr

Received (Geliş Tarihi): 20.03.2024

Accepted (Kabul Tarihi): 15.07.2024

ÖZ

Bu araştırma çalışmasında Türkiye'nin de tam erişim hakkına sahip olduğu TanDEM-X Yüksek Çözünürlüklü Yükseklik Verisi Değişim Programı (TanDEM-X high Resolution Elevation Exchange Program) -TREx programı kapsamında üretilen 12m x 12m grid aralıklı yatay çözünürlüklü Sayısal Yüzey Modeli (SYM12), bu modelden yarı otomatik yöntemlerle üretilmiş Sayısal Arazi Modelinin (SAM12) ve 1:25.000 ölçekli haritalar üzerindeki 10 metre aralıklı eş yükseklik eğrilerinden üretilmiş DTED2 (Sayısal Arazi Yükseklik Verisi 2'nci Düzey) verilerinin araştırma bölgelerinde doğruluk analizi yapılmış ve hataları minimize edecek yeni bir filtreleme algoritması geliştirilmiştir. Araştırma bölgesi için ormanlık alanların yoğun olduğu ve eğimin ani yükseldiği Giresun bölgesini içeren G41-d1 1:25.000 ölçekli paftadan bir alan, yerleşim yeri içeren Aksaray L32-a4 1:25.000 ölçekli paftadan bir alan ve bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen Kırşehir I31-d3 1:25.000 paftasından bir alan seçilmiştir. Testler bölgedeki stereo modelden okunmuş ormanlık bölgede 622 adet, yerleşim yerinde 302 adet, bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen alanda ise 271 adet arazi yüzeyini temsil eden kontrol noktaları ile yükseklik değerleri içeren pikseller arasındaki yükseklik farkı hesaplanarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde TREx projesi ve DTED2 verilerinden elde edilen SAM üretimlerinde özellikle ormanlık alanı içeren araştırma bölgelerinde SYM'den daha yüksek ve alçak noktalar ortaya çıkmıştır. Yükseklik farklarının üzerinde yapılan analizler sonucunda SAM'nin karesel ortalama hatasının SYM'den daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar arazinin karakteristik özelliği ve sayısal arazi üretiminde kullanılan filtreleme algoritmalarında meydana gelen hatalardan kaynaklanmaktadır. Özellikle yoğun ormanlık alanlarda SAM üretiminde meydana gelen bu hataları minimize etmek amacıyla yeni bir filtreleme algoritması geliştirilmiştir. Bu filtreleme yöntemi çalışma bölgelerinde denenmiş ve kontrol noktaları ile analizi gerçekleştirilmiştir. Yeni filtreleme yöntemi çalışma bölgelerinde farklı eşik değerleri, farklı filtreleme pencerelerinde ve iterasyon sayısında uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda ormanlık alanda TREx kapsamında üretilen SAM12 ve DTED2 verisinden elde edilen SAM'den daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: TREx, DTED2 (Sayısal Arazi Yükseklik Verisi 2'nci Düzey), Sayısal Yüzey Modeli

(SYM), Sayısal Arazi Modeli (SAM), Çapraz Korelasyon, Ters Ağırlıklı Ortalamalar ile Enterpolasyon

ABSTRACT

In this research study, accuracy analysis was conducted for the TanDEM-X High Resolution Elevation Exchange Program (TREx program), which Türkiye also has full access to. The study focused on comparing the 12m x 12m grid resolution Digital Surface Model (DSM12) produced under the TREx program, the Semi-Automatic Generated Digital Terrain Model (DTM12) derived from it, and the DTED2 (Digital Terrain Elevation Data Level 2) data derived from 1:25,000 scale maps, using 10-meter contour intervals. Accuracy analysis was performed in selected research areas, specifically an area from the G41-d1 1:25,000 scale map sheet in Giresun, known for its dense forest areas and steep slopes, an area from the L32-a4 1:25,000 scale map sheet in Aksaray containing settlements, and an area from the I31-d3 1:25,000 scale map sheet in Kırşehir, devoid of significant vegetation or settlements. The analysis involved comparing elevation differences between ground truth points representing 622 points in forested areas, 302 points in settlement areas, and 271 points in areas without significant vegetation or settlements. It was found that the SAM (Semi-Automatic Generated DTM) produced from the TREx project and DTED2 data showed higher and lower points compared to the SYM (Digital Surface Model), particularly in forested areas. Furthermore, the SAM exhibited a higher root mean square error compared to SYM based on the analyzed height differences. These discrepancies were attributed to the terrain characteristics and errors in the filtering algorithms used in digital terrain production. To minimize these errors, a new filtering algorithm was developed specifically aimed at reducing inaccuracies in SAM production, especially in dense forested areas. This filtering method was tested in the study areas using different threshold values, filtering windows, and iteration counts. The results indicated that the SAM12 produced under the TREx program and DTED2 data in forested areas yielded better results compared to the SAM derived from SYM.

Keywords: TREx, DTED2 (Digital Terrain Elevation Data Level 2), Digital Surface Model (DSM), Digital Terrain Model (DTM), Cross-Correlation, Interpolation with Inverse Distance Weighting

1. GİRİŞ

Küresel anlamda sayısal yüzey modeli üretilmesi amacıyla TanDEM-X Yüksek Çözünürlüklü Arazi Modeli Değişim Programı (TReX) ABD Ulusal Konumsal İstihbarat Ajansı (National Geospatial Intelligence Agency - NGA) ve Almanya Askerî Haritacılık Kurumu (Bundeswehr Geo-Information Centre - BGIC) öncülüğünde, uluslararası işbirliği ile TerraSAR-X ve TanDEM-X radar uydularından, yüksek çözünürlük ve doğruluklu Sayısal Yüzey Modeli (SYM12) verisi elde etmek amacıyla, WorldDem diye adlandırılan Sayısal Yüzey Modelinin; yaklaşık 12 m konumsal çözünürlüğe, 10 metreden daha iyi mutlak düşey doğruluğa, eğimin %20'den az olduğu yerlerde 2 metreden daha iyi, diğer yerlerde ise 4 metre göreceli doğruluğa sahip modeller üretilmeye başlanmıştır (Erdoğan, Fırat ve Durgut, 2017). TReX programı kapsamında üretilen SYM12 verisi ile yarı otomatik yöntemlerle Sayısal Arazi Modeli 12 m (SAM12) elde edilmektedir. TReX SYM12 üretimlerinde özellikle kuzey ve güney kutbundaki değişimlerin izlenmesi için çok büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu iki avantajın yanı sıra TanDEM-X SYM'leri ile, interferometri teknikleri kullanılarak uzaydan görüntüleme ile elde edilmiş en yüksek çözünürlüklü SYM'leri de kullanıcılara sunulmaktadır. Üretilen SYM'nin doğruluğu ve kalitesi de farklı uygulamalar için büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle üretilen TReX SYM'lerinin doğruluklarının ve kalitelerinin değerlendirilmesi için kullanılan yöntemlerin çok iyi bilinmesi gerekmektedir (Erdoğan ve diğerleri, 2017).

Bu araştırma çalışması kapsamında TReX programında üretilen SYM12'lerden SAM12 üretimlerinde özellikle eğimi %20'den fazla olan ve ormanlık alanların sık olduğu bölgelerde hatalar ile karşılaşıldığı tespit edilmiştir. Bu hataların kaynaklarının irdelenmesi, hataları minimize edecek yeni bir filtre algoritması geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında Giresun bölgesini içeren G41-d1 1:25.000 ölçekli paftadan bir alan, yerleşim yeri içeren Aksaray L32-a4 1:25.000 ölçekli paftadan bir alan ve bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen Kırşehir I31-d3 1:25.000 paftasından bir alan seçilmiştir. Testler ormanlık bölgede 622 adet, yerleşim yerinde 302 adet, bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen arazide ise 271 adet arazi yüzeyini temsil eden kontrol noktaları ile yükseklik değerleri içeren pikseller arasındaki yükseklik farkı hesaplanarak gerçekleştirilmiştir. SYM12'lerden yarı otomatik yöntemlerle üretilen SAM12 üzerinde yapılan analizlerde SAM12'de bazı noktalarda

SYM12'den daha yüksek ve alçak noktalar tespit edilmiştir. Yükseklik farklarının karesel ortalama hataları hesaplandığında ormanlık bölgede sonuçların SYM12'den daha tutarsız sonuçlar tespit edilmiştir. Aynı analiz diğer çalışma bölgelerinde denenmiş ve SAM12 'deki yüksekliklerin arazi yüzeyini daha iyi temsil ettiği tespit edilmiştir.

Ormanlık bölgede meydana gelen hataları belirlemek maksadıyla seçilen kontrol noktalarının, yükseklik modellerinin tam piksel orta noktasına düşmemesinden kaynaklı oluşan farkı elimine etmek için ters ağırlıklı enterpolasyon tekniği uygulanarak yeni yükseklik değerleri hesaplanmıştır. Sonraki işlemlerde yükseklik modelleri ile kontrol noktası arasındaki kayıklığı tespit etmek amacıyla çapraz korelasyon tekniği kullanılmıştır. Elde edilen yatay kayıklık değerleri piksel koordinatlarına eklenerek analiz gerçekleştirilmiştir. Sayısal arazi modelinin araziye en doğru şekilde temsil etmesini sağlamak amacıyla arazideki engelleri (ormanlık alanlar, bina, vb.) filtrelemek amacıyla yeni bir filtreleme algoritması geliştirilmiştir. Bu filtre araştırma bölgesinde ve farklı arazi tiplerinde uygulanarak analizi yapılmıştır.

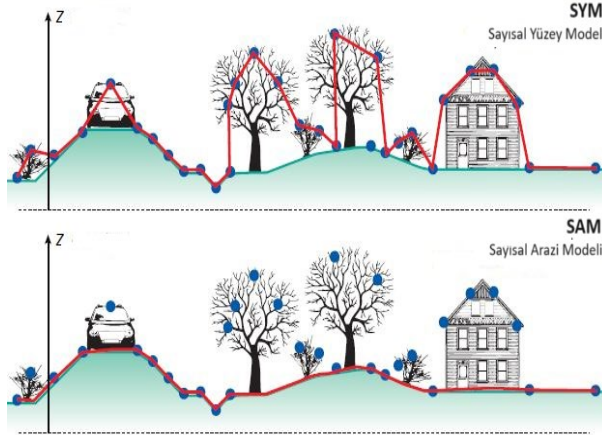
2. MATERYAL ve YÖNTEM

a. Sayısal Yükseklik Modeli

Sayısal Yükseklik Modeli (SaYM) yeryüzünün ve üzerinde yer alan doğal ve yapay unsurların konum ve yükseklik bilgilerini kullanarak Yeryüzünün modellenmesidir. Topoğrafyanın sayısal gösterimi olarak adlandırılmaktadır (Moore, Grayson ve Ladson, 1991). SaYM, bir arazi yüzeyini en iyi temsil eden düzenli/düzensiz aralıklarla yapılmış çok sayıda yükseklik ölçümünden oluşmaktadır. SaYM uygulamaları ile arazinin eğimi, eğim yönü, yansıma açısı, drenaj ağları, havza sınırları, akış yolları ve görüş alanı içindeki noktaların belirlenmesi, stereo görüntü çiftlerinin üretilmesi ve Yeryüzünün 3 boyutlu ağ yapısının oluşturulması gerçekleştirilebilmektedir. (Yıldırım, Alpaslan, Aydoğan ve Ernst, 1996).

Sayısal yükseklik modeli iki farklı türde olabilir: Sayısal Yüzey Modeli (SYM) ve Sayısal Arazi Modeli (SAM). SYM, topoğrafyanın yanı sıra doğal ve yapay unsurları da (örneğin bitki örtüsü, yollar, binalar vb.) modellemek için kullanılır. Bu model, yüzeyde bulunan her türlü detayı içerir. Öte yandan, SAM sadece topoğrafyayı modellemek için kullanılır ve ağaçlar, binalar, elektrik direkleri vb. gibi unsurları içermez (Şekil 1). SAM prensipleri ve metodolojisi hakkında detaylı bilgi

Li, Zhu, ve Gold (2004)'de detaylı olarak anlatılmaktadır.



Şekil 1. Sayısal arazi modeli-sayısal yüzey modeli farkı (Blakemore, 2018).

b. İnterferometrik Yapay Açıklı RADAR

RADAR (RADio Detection and Ranging) sistemleri, Yeryüzüne mikrodalga sinyalleri göndererek, bu sinyallerin nesneden geri yansımaları ile gönderim arasındaki zaman farkını ölçerek çalışır. (Hanssen, 2001). Elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde algılama yapan radar sistemleri, gece-gündüz ve her türlü hava koşulunda çalışabildiğinden, diğer algılayıcı platformlara göre avantajlara sahiptir. RADAR sistemleri, anten açıklıklarına göre Gerçek Açıklıklı Radar-Real Aperture Radar (RAR) ve Yapay Açıklıklı Radar – Synthetic Aperture Radar (SAR) olmak üzere ikiye ayrılmıştır. (Torun, 2022) SAR sistemleri RAR sistemlerindeki anten boyundan kaynaklanan dezavantajları ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiştir.

Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR), Radar interferometrisi tekniği kullanılarak geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu teknik, yaklaşık olarak aynı noktadan farklı zamanlarda elde edilen iki SAR görüntüsündeki pikseller arasındaki faz farklarını belirlemeye dayanır. Bu faz farkları, yeryüzündeki değişiklikleri ve hareketleri hassas bir şekilde ölçmeye olanak tanır (Bildirici, Ustun, Ulugtekin, Selvi, Abbak, Bugdayci ve Dogru, 2010). InSAR tekniği, SAR görüntü çiftlerindeki resim noktalarının faz farklarının hesaplanmasına dayanır. (Torun, 2021) Faz farkı, yeryüzündeki aynı noktaya gönderilen aynı frekanstaki iki sinyal arasındaki zaman farkının açı değerine dönüştürülmüş halidir. (Yılmaztürk, 2015). Bu iki görüntü arasında oluşan farka "interferogram" adı verilmektedir (Gabriel, Goldstein ve Zebker,

1989). Bu teknik, tek geçişli veya tekrar geçişli olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilir.

Tek geçişli teknikte, iki SAR anteni aynı platforma monte edilerek aynı anda veri toplar. Tekrar geçişli sistemde ise aynı tek anten kullanılarak, farklı zaman dilimlerinde aynı bölgenin farklı anten konumlarından geri saçılımı kaydedilir (Rosen, Hensley, Joughin, Li, Madsen, Rodriguez ve Goldstein, 2000).

Radar interferometri yöntemi ile SYM üretilmesi işlemi temel olarak, aynı bölgeye ait farklı zamanlarda çekilmiş iki görüntünün birinin ana görüntü (master) diğerinin ise yardımcı veya yedek görüntü (slave) olarak kabul edilip, bu iki görüntünün üst üste konulması ve değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır (Kyaruza, 2005).

Radar görüntülerinden SYM üretim işlemi sırasıyla; görüntü kaydı, interferogram oluşturma, filtreleme, faz belirsizliğinin giderilmesi, faz bilgilerinin yükseklik bilgilerine dönüştürülmesi ve geometrik düzeltme aşamalarından oluşmaktadır. (Torun, 2021).

c. Yoğun Görüntü Eşleme

LiDAR sistemleri son zamanlarda kullanılan yüksek doğrulukta 3B bilgi edinme imkânı sağlayan araçlardır. Belli frekanstaki lazer ışınlarının sensör ile obje arasındaki mesafenin ölçülmesiyle elde edilen yöntemde yüksek hassasiyette nokta bulutu elde edilmesine olanak sağlamaktadır LiDAR, koordinat verisi ile birlikte yoğunluk verisi gibi ek bilgiler de kaydetmektedir (Yastıklı ve Bayraktar, 2014).

LiDAR'a alternatif olarak geliştirilen yeni görüntü eşleme yöntemleriyle birlikte hava fotoğrafları ile daha düşük maliyetli, kısa surede geniş alanların verilerinin toplanabilmesi ve yüksek çözünürlükte görüntü alınabilmesi yükseklik verisi oluşturmada yaygın olarak kullanılan yöntem haline gelmiştir.

Görüntü eşleme algoritmaları, örtüşen 2 görüntüdeki özellikleri veya gri değerlerine göre karşılık gelen alanların bulunması işlemidir. Noktanın 3 boyutlu koordinatının hesaplanması için aynı noktanın farklı konumlardan alınan üst üste binen 2 sayısal görüntüsünün benzer ancak aynı olmayan alanlarının konumunu içerir. Bu yöntem hava fotoğraflarıyla yüksek çözünürlüklü nokta bulutu üretimine olanak sağlamıştır. Görüntü eşleme algoritmaları Alan Tabanlı Eşleme (Area Based Matching), Öznitelik Tabanlı Eşleme (Feature Based Matching), En Küçük

Kareler Eşleştirme (Least Square Matching) ya da Yarı Küresel Eşleştirme (Semi Global Matching) olarak ayrılmaktadır (Trinder, 2014).

Yoğun görüntü eşleme yöntemlerinden Hirschmüller (2008) tarafından geliştirilen Yarı Küresel Eşleştirme (Semi Global Matching (SGM)) yaklaşımı hava fotoğraflarının eşlemesinden çok farklı uygulamalar için de yaygın kullanılan piksel tabanlı algoritmadır (Bethmann ve Luhmann 2017). SGM yöntemi her pikselin eşleme işleminde radyometrik farklılıkları modellemek için Ortak Bilgi temelli bir maliyet fonksiyonu kullanmaktadır ve tanımlanmış maliyet fonksiyonunu minimize edilmesi amaçlanmaktadır (Hirschmüller, 2008). SGM yöntemini kullanarak doğru bir nokta bulutu üretmek için yüksek geometrik çözünürlüğe sahip ve bu görüntülerde yüksek bindirme oranına ihtiyaç vardır (Yastıklı ve Bayraktar, 2014).

ç. Nokta Bulutu Sınıflandırma

LiDAR tabanlı SAM üretiminde kullanılan nokta sınıflandırma yöntemleri 6 ana kategoride Segmentasyon ve Kümeleme, Morfolojik, Yönlü Tarama, Kontur, Üçgenler Düzensiz Ağı ve İnterpolasyon olarak toplanmıştır. Bu yöntemler detaylı olarak Meng, Currit ve Zhao (2010)'da işlenmiştir.

Hava fotoğraflarından yoğun görüntü eşleme yöntemleriyle elde edilen nokta bulutlarının zemine ait olup olmadığını belirlemek SAM üretimi için önemli işlemidir. Zemine ait veya zemine ait olmayan noktaların tespiti için sınıflandırma yöntemleri uygulanır. Hava fotoğraflarında sınıflandırma yöntemleri genel olarak Piksel Tabanlı, Nesne Tabanlı ve Nokta Tabanlı olarak üç ana başlıkta toplanmıştır (Dinlemek, 2012).

Piksel tabanlı sınıflandırma yöntemi piksellerin istatistiksel analizine dayanırken, nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi piksellerin istatistiksel analizine ek olarak piksellerin renk, sıklık, komşuluk, şekil ve boyut gibi birçok özelliğine bakarak kümeleyerek sınıflandırma yapma işlemidir (Kalkan ve Maktav, 2010). İki yöntem arasındaki karşılaştırma Kalkan ve Maktav (2010)'da detaylı işlenmiştir. Nokta tabanlı sınıflandırmada noktanın komşu noktalar ile ilişkilerine dayanan özelliklerine veya kendi özelliklerine göre bir sınıfa yerleştirilir. (Kim ve Sohn 2013; Yang, Tan, Hei ve Jiang 2018; Niemeyer, Rotternsteiner ve Soergel 2014).

d. Enterpolasyon

Hava kameralarından elde edilen bindirmeli görüntülerden SGM yöntemi ile nokta bulutu oluşturulur. Bu noktalar sınıflandırma yöntemleri kullanılarak zemine ait nokta veya zemine ait olmayan nokta olarak sınıflandırılabilir. Sayısal arazi modeli üretiminde topoğrafyayı temsil etmek için topoğrafya üzerindeki zemine ait olmayan noktaların filtrelenmesi ve bu filtreleme sonucunda eksik olan yükseklik verisinin enterpolasyon yöntemleri ile doldurulması gerekmektedir. SAM'ın doğruluğunu etkileyen en önemli faktörlerin birisi de enterpolasyon yönteminin uygun olarak seçilmesidir. Polinom enterpolasyonu, ters ağırlıklı ortalama ile enterpolasyon, çoklu ikinci dereceden enterpolasyon, üçgenler ağında lineer enterpolasyon, en küçük eğrilikli yüzey enterpolasyon, en yakın komşu enterpolasyon en çok kullanılan enterpolasyon yöntemleridir (Yanalak 2002; Amidror 2002; Li, Zhu ve Gold 2004). Sayısal arazi modellerinde kullanılan enterpolasyon yöntemleri Yanalak (2002)'de detaylı olarak anlatılmıştır.

Enterpolasyon yöntemlerinin birbirine benzer tarafları da vardır. Ters ağırlıklı ortalama yönteminde çevresinde bulunan noktaların mesafeleri göz önüne alınarak yükseklik değerlerinin ağırlıklı ortalaması alınırken benzer şekilde en küçük eğrilikli yüzey enterpolasyon yönteminde de üçgen köşe noktalarının yükseklik değerlerinin ortalaması alınarak değer atanır. (Arıkan, Yıldız ve Makineci, 2021).

Bu çalışmada enterpolasyon yöntemi olarak ters ağırlıklı ortalama enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır.

e. Kaynak Veri

Alman Uzay Merkezi (DLR) tarafından tasarlanan TREx, TerraSAR-X ve TanDEM-X uyduları, 2007 ve 2010 yıllarında uzaya fırlatılan yapay açıklıklı radar (İnterferometrik SAR) gözlem yapabilen uydulardır (Şekil 2). Bu uydular, yörüngede birbirlerine yaklaşık 250-500 metre mesafede hareket ederek eşzamanlı interferometri sağlar ve yüksek çözünürlükte SYM üretir. Bu uydular, tüm dünyayı kapsayan yüksek çözünürlükte (12 metreye kadar) ve yüksek doğrulukta (<5 metre) SYM oluşturma yeteneğine sahiptir. Gece gündüz fark etmeksizin veri toplanır (Erdoğan ve diğerleri, 2017).

TanDEM-X Yüksek Çözünürlüklü Yükseklik Verisi Değişim Programı (TanDEM-X high

Tablo 1. Veri kaynakları (Harita Genel Müdürlüğü)

| | TREx(SYM12) | SAM12 | DTED2 |
|-------------------------|---|---|-------------------------------|
| Yatay Çözünürlük | $\frac{1}{3}$ " x $\frac{1}{3}$ " Yaklaşık 12m x 12m grid aralıklı | $\frac{1}{3}$ " x $\frac{1}{3}$ " Yaklaşık 12m x 12m grid aralıklı | 1" x 1" Yaklaşık 30m x 30m |
| Yatay Doğruluk | ± 5m- 10m | ± 5m- 10m | - |
| Düşey Doğruluk | ± 4m | ± 4m | ± 10m |
| Üretim Yılları | 2018- Devam Ediyor | 2020- Devam Ediyor | İlk Baskılar dahil- 2001 |

Resolution Elevation Exchange Program) -TREx projesine Almanya Askeri Haritacılık Kurumu (BGC) ve Amerika Birleşik Devletleri Coğrafi İstihbarat Kurumu (NGA) öncülük etmektedir. Projeye öncülük eden BGC ve NGA tarafından TREx projesinde kullanılacak verinin lisans ve telif hakları verinin ticari haklarını elinde bulunduran firmadan satın alınmıştır. Üretimi 2017 yılında başlanmış ilk 5 yılda dünyanın yarısı ikinci 5 yılda dünyanın diğer yarısı olmak üzere tüm dünyanın 10 yılda üretilmesi planlanmaktadır. Türkiye tam erişim hakkına sahip 14 ülkeden biridir.

Bir diğer veri kaynağı olan DTED2 (Sayısal Arazi Yükseklik Verisi 2'nci Düzey) 1:25.000 ölçekli haritalar üzerindeki eş yükseklik eğrilerinden üretilmiştir. 10 metre düşey doğruluğa sahip veri yaklaşık 30 m x 30 m aralıklıdır ve tüm Türkiye'yi kapsamaktadır. Kullanılan veri kaynakları Tablo 1'de detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. TerraSAR-X ve TanDEM-X uydular (Harita Genel Müdürlüğü)

3. UYGULAMA VE ANALİZ

a. Çalışma Alanı

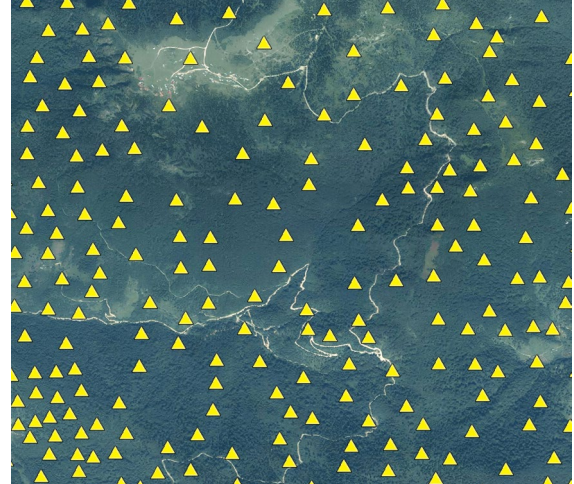
Araştırma çalışması kapsamında özellikle ormanlık alanlarda meydana gelen hataların minimum seviyeye indirilmesi amaçlanmış bu kapsamda G41-d1 1:25.000 ölçekli paftadan 40 km² bir alan (Şekil 3), ve farklı arazi tiplerindeki sonuçları görmek amacıyla yerleşim yeri içeren L32-a4 1:25.000 ölçekli paftadan 150 km² bir alan (Şekil 4) ve bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen İ31-d3 1:25.000 paftasından 150 km² bir alan (Şekil 5) çalışma alanı olarak seçilmiştir. Ormanlık bölge seçiminde ağaçların yoğun olduğu ve eğimin ani arttığı bir bölge olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 3. Giresun bölgesi ormanlık arazi



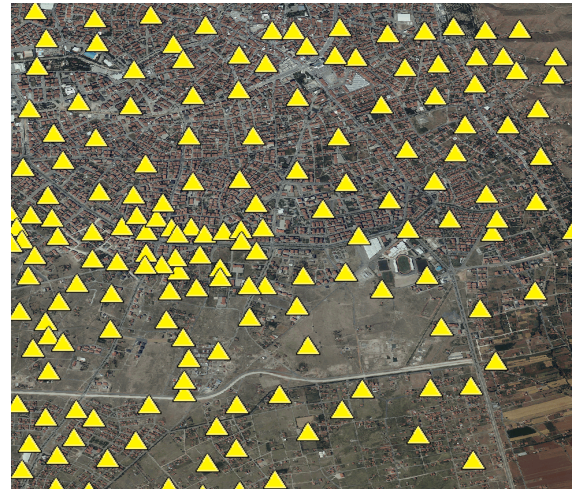
Şekil 4. Aksaray bölgesi yerleşim yeri



Şekil 6. Ormanlık bölgeye ait 622 kontrol noktası



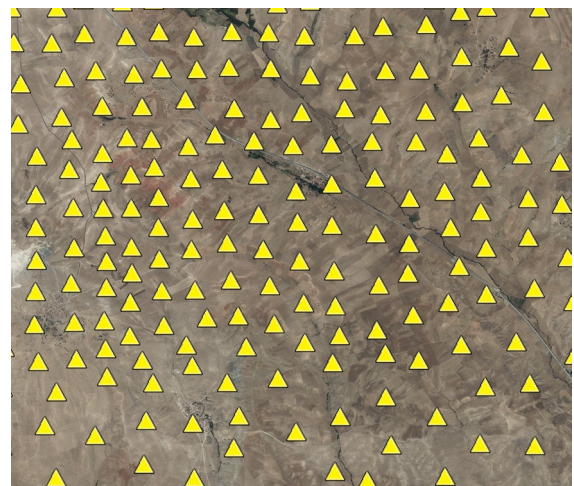
Şekil 5. Kırşehir bölgesi bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen arazi



Şekil 7. Yerleşim yerine ait 302 kontrol noktası

b. Kontrol Noktaları

SAM12 ve DTED2 arazi modeli verilerinin analizi hava fotoğraflarından elde edilen stereo modellerden okunan kontrol noktaları ile gerçekleştirilmiştir. Ormanlık alanda 622 adet (Şekil 6), yerleşim yerinde 302 adet (Şekil 7), bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen arazide ise 271 adet (Şekil 8) nokta stereo modellerden zemin noktaları okunarak coğrafi koordinatları ve yükseklik verisi elde edilmiştir. Noktaların mümkün olduğunca arazi yüzeyini temsil etmesine dikkat edilmiştir.

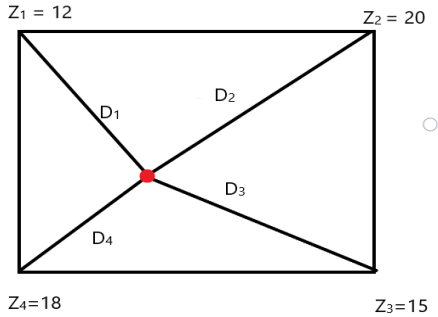


Şekil 8. Bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen araziye ait 271 kontrol noktası

c. Ters Ağırlıklı Ortalama ile Enterpolasyon Yönteminin Uygulanması

Bölgedeki arazi yüzeyini temsil eden SAM12 ve DTED2 verilerinin hata miktarlarını tespit etmek amacıyla daha önce topladığımız kontrol noktalarının SYM12, SAM12 ve DTED2 verileri ile ayrı ayrı farkları alınarak hesaplanan yükseklik farklarının tutarlılığı standart sapma (STD) ve karesel ortalama hata (KOH) gibi istatistiksel değerlerle analiz edilmiştir.

Bu aşamada iki sorun ile karşılaşmaktadır. Bunlardan biri SYM12, SAM12 ve DTED2 yükseklik değerleri piksel orta noktasının değerlerine karşılık gelmektedir ancak stereo modelden KN noktaları tam olarak piksel ortasına denk gelmediğinden yükseklik farkı almadan önce SYM12 SAM12 ve DTED2 yükseklik değerlerinin bu KN'na karşılık gelen konumda yeni yükseklik değeri gerekmektedir. Bu hatayı önlemek için yeni yükseklik değeri ataması ters ağırlıklı ortalama enterpolasyon yöntemi ile yapılmıştır. Ters ağırlıklı ortalama ile enterpolasyon yönteminde, bütün kontrol noktaları kullanılması yerine bir araştırma yarıçapında Şekil 9'da gösterildiği gibi en yakın dört piksel orta noktasının yükseklik değerleri ve bu noktalara olan mesafeler kullanılarak istenilen noktanın yükseklik değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 9. Ters Ağırlıklı Ortalama ile Enterpolasyon

Matematiksel ifadesi (Arıkan ve diğerleri, 2021);

$$AOE = \frac{\sum_{k=1}^4 \frac{z_k}{D_k^2}}{\sum_{k=1}^4 \frac{1}{D_k^2}} \quad (1)$$

z: Yükseklik değerleri

d: Mesafe

ç. Çapraz Korelasyonun Uygulanması

SAM12 ve DTED2 ile stereo modelden okunan kontrol noktaları arasındaki olası yatay kayıklıkların hesaplanması maksadıyla farklı

kayıklık (ofset) değerleri ile çapraz korelasyon (cross correlation) yöntemi kullanılmıştır.

Çapraz korelasyon, iki veya daha fazla yükseklik veri setinin birbirine göre hareketlerini izleyen bir ölçümdür. Birden çok yükseklik verisini karşılaştırmak ve birbirleriyle ne kadar iyi eşleştiğini ve özellikle en iyi eşleşmenin hangi noktada gerçekleştiğini nesnel olarak belirlemek için kullanılır.

Çapraz korelasyon ile stereo modelden elde edilen nokta koordinatları x ve y yönünde yaklaşık 1 metre aralıklarla ötelenmiştir. Öteleme anında aşağıdaki mutlak fark formülü her piksele uygulanmıştır.

$$\min|(ok - \dot{o}t) - (ok - kv)| \quad (2)$$

ok: ortalama kot

öt: ötelenen yükseklikler

kv: kaynak verideki yükseklik değerleri

Mutlak farklar toplamının minimum olduğu değer iki yüzey arasındaki uyumun en yüksek olduğu bölgeleri göstermektedir. Minimum mutlak farka ulaştığımız kayıklık değerleri öteleme miktarı olarak alınmıştır.

Çapraz korelasyon sonucunda SAM12 ve DTED2 verilerinin kayıklık değerleri Tablo 2'de görünmektedir.

Tablo 2. Kayıklık değerleri

| SAM12 | DTED2 |
|-----------------|-------------------|
| $x \approx 5$ m | $x \approx 2.5$ m |
| $y \approx 8$ m | $y \approx 7$ m |

d. Hataların Tespiti

Enterpolasyon işleminden ve kayıklık giderildikten sonra yoğun ormanlık bölgede (G31-d1) kontrol noktaları ile SYM12-SAM12 ve DTED2 verileri üzerinde yükseklik farkı alınarak Tablo 3'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3. Ormanlık bölgede (G31-d1) stereo ile okunan yükseklik değerleri ile SYM12-SAM12-DTED2 verilerindeki yüksekliklerin farklarının KOH-STD ve mutlak ortalamaları.

| | KOH(m) | STD(m) | Mutlak Ort.(m) |
|-------|--------|--------|----------------|
| SYM12 | 10,51 | 7,02 | 8,0875 |
| SAM12 | 11,54 | 8,42 | 8,9804 |
| DTED2 | 11,65 | 9,97 | 9,0824 |

Sonuçlara bakıldığında yoğun orman bölgesinde topoğrafyayı göstermesi gereken SAM12 ve DTED2 sayısal arazi modellerinin SYM12 yüzey modelinden daha yüksek değerler elde edildiği açıkça görülmektedir. SYM12'nin KOH 'sının da diğer verileri göre daha düşük olması kontrol noktalarına daha yakın değerlere sahip olduğu yani araziye yakın noktalar olduğu anlamına gelmektedir.

Ormanlık alanlarda bu tür hataların meydana gelmesi mevcut kullanılan filtreleme yöntemlerinin hatalara neden olduğu görülmektedir. Aynı zamanda filtrelenen yüzeyler doldurulurken enterpolasyon yöntemleri ile doldurulmak zorunda ve enterpolasyon sonucu bazı bölgeler daha yüksek değerler alabilmektedir.

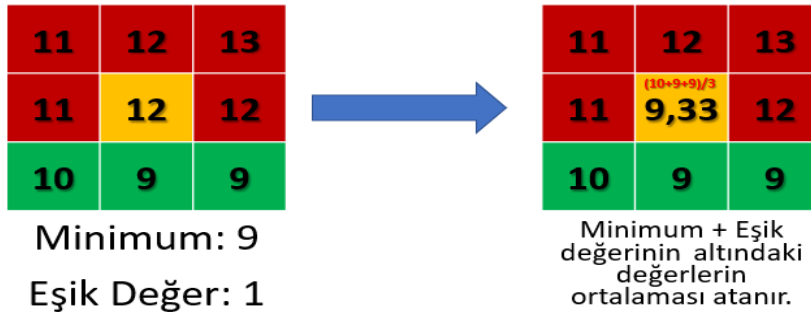
Ormanlık alanlardaki bu hataların giderilmesi amacıyla yüzeylerin filtrelenmesinde alternatif deneysel olarak yeni bir filtreleme yöntemi denenmiş ve özellikle orman alanlarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

e. Yeni Filtreleme Yönteminin Kullanılması

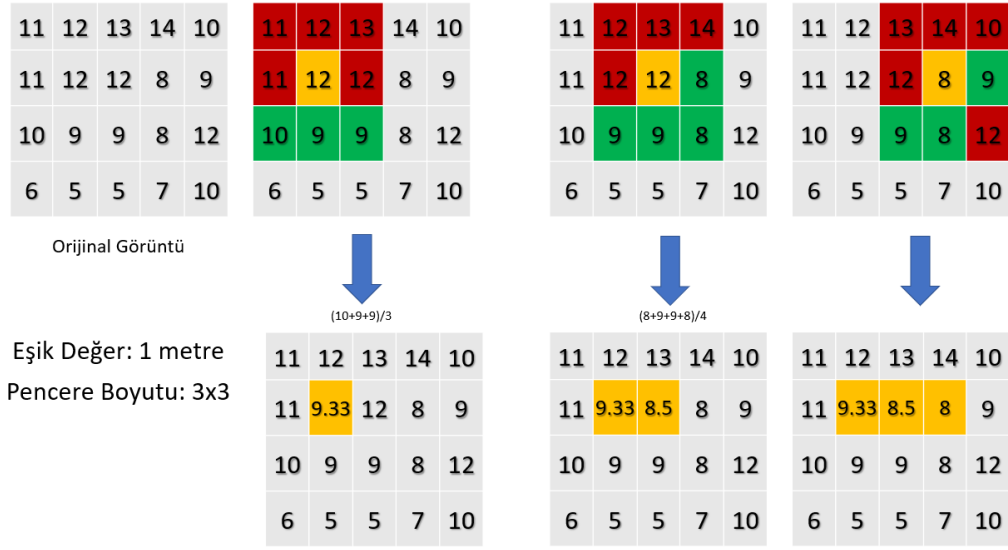
Filtreleme işlemlerinde komşu piksellerin yükseklik değerleri göz önünde bulundurularak merkez noktaya yeni bir yükseklik değeri atanması yapılmıştır. Bunun için bir eşik değeri belirlenmiştir. Arazi yüzeyi minimum yükseklik değerine sahip olan noktalar olacakları için bu minimum değere sahip noktalardan eşik değerinin üstündeki noktalar engel olarak sayılmıştır. Bu

engeller arazi yüzeyine ait olmayan noktalar olarak kabul edilmiştir. Tespit edilen engelleri arazi yüzeyine indirmek için filtreleme penceresi içindeki komşu noktaların yükseklik değerlerine bakılmıştır. Pencere içerisindeki minimum yükseklik değerine sahip ve minimum + eşik değeri toplamını geçmeyen noktalar arazi yüzeyini temsil etmektedir. Minimum yükseklik değerine sahip piksel ve minimum + eşik değeri toplam değerini geçmeyen noktalar arazi noktası olduğundan engelin yeni yükseklik değeri bu noktaların ortalaması alınarak atanmıştır. Bu işlem bütün görüntüyü tamamlayana kadar devam etmektedir. Görüntüdeki kenar piksellere bu işlem uygulanmaz. Bütün alan filtrelendikten sonra sadece değişimin olduğu piksellerde iteratif olarak filtreleme işlemi devam eder. Böylece büyük alana sahip engellerin kenarlarından başlayarak bütün engel alanı belirli iterasyon sayısı kadar bu işlem tekrar eder. Minimum + eşik değerinin toplamı üzerinde nokta kalmadığı anda filtreleme işlemi sona erer iterasyonlar devam etmez. Görüntü engellerden arındırılmış ve arazi yüzeyi mümkün olduğunca hatasız temsil edilmeye çalışılmıştır.

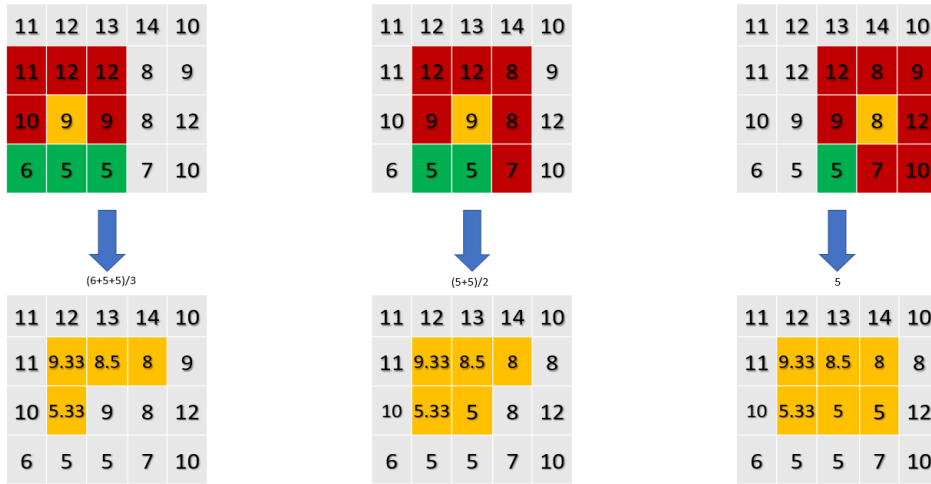
Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13'te filtreleme adımları gösterilmektedir.



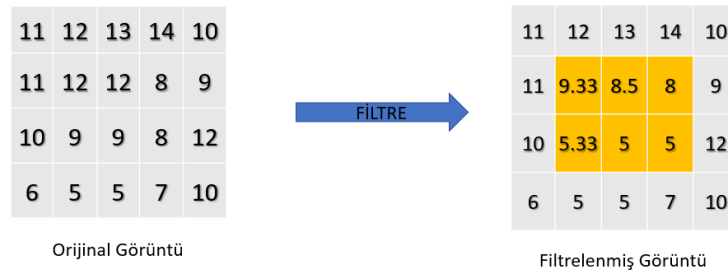
Şekil 10. Filtrenin uygulama adımları (I)



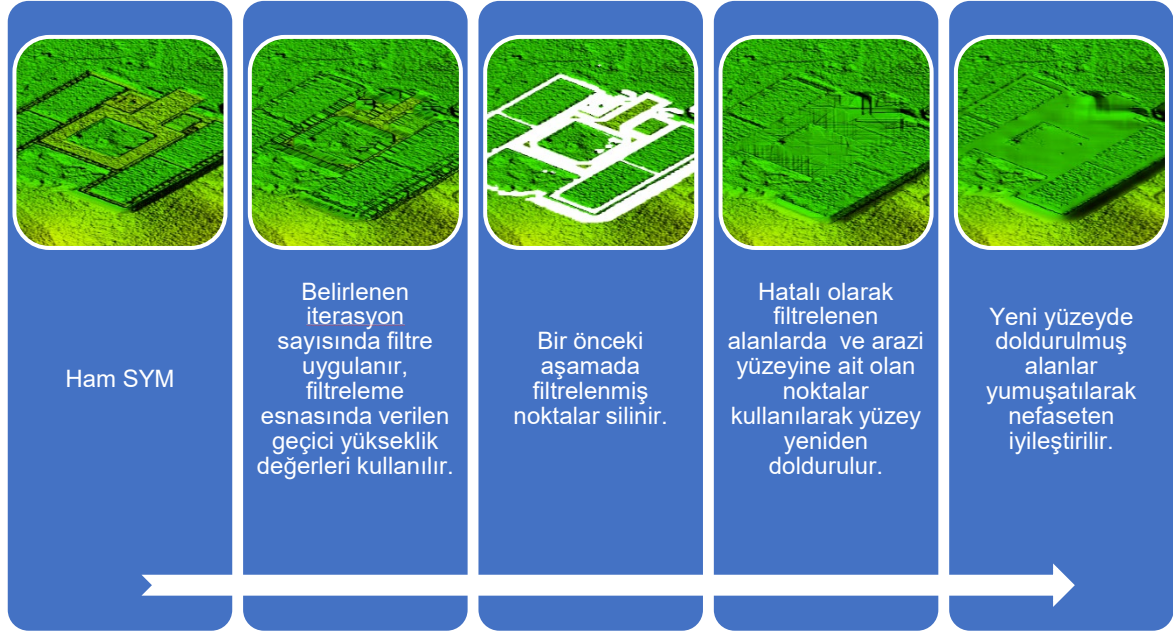
Şekil 11. Filtrenin uygulama adımları (II)



Şekil 12. Filtrenin uygulama adımları (III)



Şekil 13. Filtrenin uygulama adımları (IV)



Şekil 14. Araziye adım adım filtrenin uygulanması ve yumuşatma işlemleri

Filtre uygulama adımları (Şekil 14) aşağıdaki gibidir,

1. Ham görüntüye filtreleme işlemi iteratif olarak ve geçici yükseklik değerleri atanır.
2. Filtrelenmiş noktalar işaretlenerek silinir.
3. Silinen noktadaki değerler silinmeyen (arazi yüzeyine ait) değerlerle enterpolasyon yöntemleriyle yeniden doldurulur.
4. Yeni yüzeyde doldurulmuş alanlar yumuşatılarak nefaseten iyileştirilir.

Yukarıdaki adımlar görüntüye uygulanarak arazi yüzeyi dışındaki engeller görüntüden filtrelenmiştir. Sonuç ürün olarak filtrelenmiş ve yumuşatılmıştır.

f. Analiz

Filtreleme işlemi çalışma bölgeleri üzerinde uygulanmıştır. En iyi sonuca ulaşmak için farklı eşik değerlerinde, farklı pencere boyutlarında ve iterasyon sayısında denenmiştir Kontrol noktaları bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen arazi yüzeyini temsil eden yükseklikler kabul edilerek kayıklığı giderilmiş ve enterpole edilmiş, görüntüdeki yükseklik değerleri ile kontrol

noktaları arasındaki farklara bakılmıştır. Ölçümün duyarlılığı için yükseklik farklarının ortalama değerlerine, standart sapmasına, maksimum-minimum değerlerine, mutlak ortalama, mutlak maksimum-minimum değerlerine ve karesel ortalama hataları hesaplanmıştır.

Elde edilen değerlerde en iyi sonucu veren eşik değer, pencere boyutu ve iterasyon verileri paylaşılmıştır.

Testler stereo model üzerinden okunan noktalar kullanılarak 3 farklı arazi tipinde (Yerleşim Yeri, Bitki Örtüsü Ve Yerleşim Yeri İçermeyen Arazi ve Orman Alan) gerçekleştirilmiştir.

- Yerleşim Yerinde 302 adet stereo model noktası,
- Bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen arazide 271 adet stereo model noktası,
- Ormanlık Arazide 622 adet stereo model noktası olmak üzere

testler gerçekleştirilmiştir. En iyi sonuçlar veren eşik değer 5 metre, pencere boyutu ise 3 piksel X 3 piksel pencere olduğu görülmüştür. Tablo 4-5-6'da yapılan analiz sonuçları 3 piksel X 3piksellik filtre pencere boyutunda alınan değerlerdir.

Tablo 4. Yerleşim Yeri Yükseklik Farkı Analizi

| Yerleşim Yeri | Yöntem | Nokta Sayısı | KOH (m) | STD (m) | Ort. (m) | Max (m) | Min (m) | Mutlak Ort. (m) | Mutlak Max (m) | Mutlak Min (m) |
|---------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|----------------|
| | SYM12 | 302 | 1.986 | 1.880 | -0.630 | 2.536 | -11.124 | 1.274 | 11.124 | 0.024 |
| | SAM12 | 302 | 1.027 | 1.023 | 0.071 | 3.904 | -5.618 | 0.760 | 5,754 | 0,003 |
| | DTED2 | 302 | 2,099 | 1,874 | 0,944 | 8,282 | -5,357 | 1,616 | 8,282 | 0,000 |
| | 1 iterasyon 5 metre | 302 | 1.799 | 1.705 | -0.564 | 2.553 | -9.460 | 1.218 | 9.460 | 0.003 |
| | 2 iterasyon 5 metre | 302 | 1.810 | 1.715 | -0.569 | 2.553 | -9.471 | 1.221 | 9.471 | 0.003 |
| | 3 iterasyon 5 metre | 302 | 1.809 | 1.715 | -0.566 | 2.553 | -9.471 | 1.218 | 9.471 | 0.003 |

Tablo 5. Bitki Örtüsü Ve Yerleşim Yeri İçermeyen Arazi Yükseklik Farkı Analiz

| Bitki Örtüsü Ve Yerleşim Yeri İçermeyen Arazi | Yöntem | Nokta Sayısı | KOH (m) | STD (m) | Ort. (m) | Max (m) | Min (m) | Mutlak Ort. (m) | Mutlak Max (m) | Mutlak Min (m) |
|---|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|----------------|
| | SYM12 | 271 | 1.097 | 0.726 | 0.820 | 4.098 | -2.460 | 0.920 | 4.098 | 0.005 |
| | SAM12 | 271 | 1.336 | 1.037 | 0,848 | 4.366 | -3.814 | 1.062 | 4.366 | 0.002 |
| | DTED2 | 271 | 4,267 | 4,261 | -0,227 | 18,144 | -11,220 | 3,265 | 18,144 | 0,003 |
| | 1 iterasyon 5 metre | 271 | 1.374 | 0.955 | 0.983 | 7.326 | -2.568 | 1.065 | 7.326 | 0.008 |
| | 2 iterasyon 5 metre | 271 | 1.332 | 0.946 | 0.935 | 7.669 | -2.568 | 1.028 | 7.669 | 0.008 |
| | 3 iterasyon 5 metre | 271 | 1.322 | 0.933 | 0.932 | 7.669 | -2.568 | 1.025 | 7.669 | 0.008 |

Tablo 6. Ormanlık Alan Yükseklik Farkı Analizi

| Ormanlık Alan | Yöntem | Nokta Sayısı | KOH (m) | STD (m) | Ort. (m) | Max (m) | Min (m) | Mutlak Ort. (m) | Mutlak Max (m) | Mutlak Min (m) |
|---------------|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| | SYM12 | 622 | 10,513 | 7,029 | -7,807 | 7,514 | -35,082 | 8,0875 | 35,082 | 0,030 |
| | SAM12 | 622 | 11,548 | 8,428 | -7,881 | 10,824 | -34.294 | 8,9804 | 34,294 | 0,009 |
| | DTED2 | 622 | 11,650 | 9,971 | -6,007 | 38,157 | -46,490 | 9,0824 | 46,4905 | 0,019 |
| | 1 iterasyon 5 metre | 622 | 6,617 | 6,600 | -0,378 | 18,677 | -26,845 | 5,110 | 26,845 | 0.008 |
| | 2 iterasyon 5 metre | 622 | 9.908 | 7.398 | 6.580 | 42.251 | -21.420 | 8.017 | 42.251 | 0.005 |
| | 3 iterasyon 5 metre | 622 | 16.152 | 8.628 | 13.639 | 53.524 | -15.292 | 13.938 | 53.525 | 0.040 |

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Filtreleme yöntemi çalışma bölgelerinde test edilerek denenmiştir. Elde edilen sonuçlarda yerleşim yeri içeren ve bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen arazide SAM-12'ye yakın değerler elde edilirken (Tablo 4 ve Tablo 5) ormanlık ve eğimi yüksek arazide mevcut SAM-12'den daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen arazide elde edilen değerlere bakıldığında (Tablo 5) SYM12'nin SAM12'den daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bunun nedeninin SAM12 üretiminde kullanılan yarı otomatik yöntemlerin arazi yüzeyinde deformasyona yol açmasından kaynaklı olabileceği değerlendirilmektedir.


Yoğun ağaçlık olan bölgede elde edilen sonuçlara bakıldığında uygulanan filtreleme yönteminin mevcut kullanılan yöntemlerden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Tablo 6'da da görüldüğü gibi filtreleme uygulanmadan önce SAM12'de 11,548 m karesel ortalama hata söz konusu iken SYM12'de 10,513 m karesel ortalama hata meydana gelmiştir. Zemine ait olmayan noktaları tespit etmek için kullanılan

enterpolasyon ve filtreleme yöntemi bu tip engebeli ve yoğun ağaç içeren alanlarda hatalı SAM üretimine neden olmaktadır. TRES projesinde üretilen yükseklik modellerinin çözünürlüğünün düşük olması bu hatalara yol açan en büyük etkenlerdendir. Bu hataları minimize etmek için uygulanan yeni filtre yönteminde 6,6166 m KOH ve 5,1096 m mutlak ortalama elde edilmiştir (Tablo 6). TRES SAM12 üretiminde hatalar azaltılarak zemine daha yakın yükseklik değerleri elde edilmiştir. Diğer arazi tiplerinde hesaplanan sonuçlara bakıldığında (Tablo 4 ve Tablo 5) mevcut SAM12 üretimlerinin daha tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Filtreleme esnasında etrafında bulunan ve eşik değerinin altında kalan noktalarının ortalamasının alınarak yeni yükseklik değeri olarak verilmesi, iterasyon sayısı arttıkça sarp arazilerde hatalara yol açmaktadır. Her ne kadar bu değerler sadece filtreleme için kullanılsa da sağlıklı bir değer atamasına ihtiyaç vardır. Bu değer üzerinde çalışılan bölgenin eğimi göz önünde bulundurularak seçilmelidir.

ORCID

Mikail ODACI 
<https://orcid.org/0009-0009-5263-1908>

Bahadır AKTUĞ 
<https://orcid.org/0000-0002-7995-4477>

Burak TAVUKÇU 
<https://orcid.org/0000-0002-5531-4803>

KAYNAKLAR

- Amidor, I. (2002). Scattered Data Interpolation Methods for Electronic Imaging Systems: a Survey. *Journal of Electronic Imaging*, 11(2), 157-176, doi:10.1117/1.1455013
- Arıkan, D., Yıldız, D. ve Makineci, H. B. (2021). Hava LiDAR Verilerine Uygulanan Farklı Enterpolasyon Yöntemlerinin Sam Doğruluğuna Etkisi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9, 377-394, doi:10.36306/konjes.850250
- Bildirici, I. O., Ustun, A., Ulugtekin, N., Selvi, H. Z., Abbak, R. A., Bugdayci, I., ve Dogru, A. O. (2010). Compilation of Digital Elevation Model for Türkiye in 3-arc-second Resolution by Using SRTM Data Supported With Local Elevation Data. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 63-76, doi:10.1007/978-3-642-03294-3_4
- Bethmann, F. ve Luhmann, T. (2017). Object-Based Semi-Global Multi-Image Matching. *PFG-Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85, 349-364. Erişim adresi: <https://springer.com/gp>.
- Blakemore, J. R. (2018). Non Flat Earth Recalibrated For Terrain and Topsoil. *Soil Systems*, 2(4), 64, doi:10.3390/soilsystems204064
- Dinlemek, U, M. (2012). *Otomatik Bina Çıkarımı Uygulamalarında Çoklu Algılama Sistemi Kullanım Olanaklarının Analizi* (Doktora Tezi). YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Erdoğan, M., Fırat O. ve Durgut T. (2017). TerraSAR-X ve TanDEM-X'DEN Üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinin Tek ve Çift Geçişe Göre Doğruluk Analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 17, Özel Sayı, 72-78.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. ve Zebker, H. A. (1989). Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7), 9183-9191. doi:10.1029/JB094iB07p09183
- Hanssen, R.F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Springer Science & Business Media.
- Hirschmüller, H. (2008). Stereo Processing By Semi-Global Matching And Mutual Information. *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 30(2), 28-341, doi:10.1109/TPAMI.2007.1166
- Kalkan, K. ve Maktav, D. (2010, Ekim). *Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması (İkonos Örneği)*. III. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilimler Sistemleri Sempozyumu, Gebze Kocaeli.
- Kyaruzi, J. (2005). *Quality Assessment of DEM From Radargrammetry Data* (Yüksek Lisans Tezi), International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation, Enschede, Hollanda.
- Kim, H. B. ve Sohn, G. (2013). Point-Based Classification of Power Line Corridor Scene Using Random Forests. *Photogrammetric Engineering And Remote Sensing*, 79, 821-33, doi:10.14358/PERS.79.9.821
- Li, Z., Zhu, C. ve Gold, C. (2004). Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. *CRC press*, doi:10.1201/9780203357132
- Meng, X., Currit, N. ve Zhao, K. (2010). Ground Filtering Algorithms For Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issue. *Remote Sensing*, 2(3), 833-860, doi:10.3390/rs2030833
- Moore, I. D., Grayson, R. B. ve Ladson, A. R. (1991). Digital Terrain Modelling: a Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3-30. doi:10.1002/HYP.3360050103
- Niemeyer, J., Rottensteiner, F. ve Soergel, U. (2014). Contextual Classification of Lidar Data and Building Object Detection in Urban Areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 152-165. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.11.001

- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E. ve Goldstein, R. M., (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88, 3, 333-382. doi:10.1109/5.838084
- Trinder, J. (2014). Lecture Notes GMAT9300: Aerial and Satellite Imaging Systems. The University of New South Wales. *School Of Surveying and Geospatial Engineering*, Chapter 4, 87-94.
- Torun, A. T. (2021). *Radar Görüntülerinden Kar Derinliği Ve Hacminin Hesaplanması; Erciyes Dağı Örneği* (Doktora Tezi). Aksaray Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Torun, A. T. (2022). Yükselen ve Alçalan Yörüngeye Ait TerraSAR-X Görüntülerinden Üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinin Doğruluk Karşılaştırması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(2), 367-375, doi:10.21605/cukurovaumfd.1146081
- Yanalak, M. (2002). Sayısal Arazi Modellerinde Yükseklik Enterpolasyonu. *Harita Dergisi*, 128, 1-14, Erişim adresi: <https://www.harita.gov.tr/makaleler>.
- Yang, Z., Tan, B., Pei, H. ve Jiang, W. (2018). Segmentation and Multi-Scale Convolutional Neural Network-Based Classification of Airborne Laser Scanner Data. *Sensors*, 18(10), 3347. doi:10.3390/s18103347
- Yastıklı, N. ve Bayraktar, H. (2014, Ekim). *Yoğun Görüntü Eşleme Algoritmaları ile Üretilen Yüksek Çözünürlüklü Sayısal Yüzey Modeli Üretimi*. V. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgiler Sempozyumu, İstanbul.
- Yıldırım, H., Alpaslan, E., Aydoğan, C. ve Ernst, F. (1996, Eylül). *Arc/Info ile Geniş Bir Alanlarda Sayısal Yükselti Modeli Oluşturulurken Karşılaşılan Sorunlar ve Çözümler*. Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu, 335-337, İstanbul.
- Yılmaztürk, S. (2015). *Sbas-insar yöntemiyle düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesi: Bursa-Orhaneli Linyit Madeni Örneği* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.