

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 045501 (598-612)

AKU J. Sci. Eng. 20 (2020) 045501 (598-612)

DOI: 10.35414/akufemubid.746252

Araştırma Makalesi / Research Article

## Global ve Bölgesel (Yüksek Çözünürlüklü) Sayısal Yükseklik Modellerinin Doğruluk Analizi Üzerine Bir İnceleme

Bihter EROL<sup>1\*</sup>, Mustafa Serkan IŞIK<sup>1</sup>, Serdar EROL<sup>1</sup><sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.Sorumlu yazar e-posta: \*bihter@itu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0854-788X>e-posta: isikm@itu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1769-4451>e-posta: erol@itu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7100-8267>

Geliş Tarihi: 01.06.2020

Kabul Tarihi: 25.08.2020

### Öz

Topografik yükseklikler birçok mühendislik uygulamasında ve yerbilimlerine ilişkin araştırmalarda kullanılmaktadır. Yüksek çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM), günümüzde yükseklik verilerini elde etmenin en pratik ve ekonomik yoludur. SYM'lerinin üretiminde farklı yöntemler uygulanır. Bu modeller çeşitli hata kaynaklarından etkilenirler. Bu nedenle, SYM verilerini kullanmadan önce çalışma alanlarındaki performanslarını test etmek çalışmada gereksinim duyulan yükseklik doğruluğunun sağlanması için önemlidir. Genel bir yaklaşım olarak, Sayısal Yükseklik Modellerinin doğruluk analizinde topografyaya uygun dağılmış kontrol noktalarında Global Navigation Satellite System (GNSS) ve/veya nivelman yükseklikleri ile modelden elde edilen yükseklik farklarının karesel ortalama hata (k.o.h.) değerleri dikkate alınır. Bu çalışmada, yüksek çözünürlüklü global SYM'leri: ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Gelişmiş Uzay Kaynaklı Termal Emisyon ve Yansıma Radyometresi), SRTM (Shuttle Radar Topography Mission-Mekik Radar Topografya Misyonu) ile bölgesel HGM DTED2 modellerinin doğrulukları GNSS/nivelman verileri kullanılarak analiz edilmiştir. Bu amaçla farklı topografik özellikteki alanları temsil eden üç ayrı GNSS/nivelman veri seti kullanılarak kontrol noktalarının dağılımının yanı sıra test alanı topografyasının SYM doğruluğuna etkisi incelenmiştir. Sonuçlar Türkiye'nin kuzeybatısındaki test edilen global ve bölgesel SYM'lerinin doğruluğunu topografyanın değişen özelliklerine bağlı olarak karşılaştırmakta ve değerlendirmektedir. Testler sonucu global SYM'lerinin doğruluğu ~8.0 m iken bölgesel DTED2 SYM doğruluğu ~6.0 m olarak bulunmuştur.

### Anahtar kelimeler

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM); ASTER; SRTM; GNSS/Nivelman; EGM96; Doğruluk analizi

## An Investigation on Accuracy Analysis of Global and Regional (High Resolution) Digital Elevation Models

### Abstract

The topographical heights are required in practice for a number of engineering applications as well as their specific use in many Earth science disciplines. Using a high-resolution Digital Elevation Model (DEM) is the most practical and economical way for obtaining the height data nowadays. These models include errors. So, it is important to clarify the quality as well as the accuracy of the DEM in the study areas before using its data. In general, validating DEMs using independent point-wise data such as GNSS and leveling heights provide an overall accuracy measure in terms of root means square error (r.m.s.e.) of the DEM derived heights. In this study three high-resolution digital elevation models ASTER, SRTM and Turkey Digital Topographic Data (DTED2) in 1" and 3" resolutions are assessed using GNSS/leveling data. Using three different sets of GNSS/leveling data invalidations it is aimed to clarify the role of the distribution of the ground-control points as well as the region's characteristics, such as roughness of topography, land-cover, etc., in the validation results. The conclusions report the accuracy of the validated DEMs in northwest Turkey and hence include a categorization of DEM performances, generated from remotely sensed data and terrestrial techniques, depending on the topographical characteristics. In the test results the accuracies for global DTMs is ~8.0 m, and for regional DTED2 DEM is ~6.0 m.

### Keywords

Digital Elevation Model (DEM); ASTER; SRTM; GNSS/Leveling; EGM96; Accuracy analysis

## 1. Giriş

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verilerinden elde edilen topografik yükseklikler birçok mühendislik ve yer bilimleri disiplinlerine ilişkin araştırma ve uygulamalarda kullanılmaktadır. Sayısal Yükseklik Modeli bir arazi yüzeyinin üç boyutlu modelini ifade eder ve araziye ait yükseklik verilerinden elde edilir (Hirt 2016, Maune and Nayegandhi 2019). Noktalara ilişkin elde edilen yükseklik verileri ile farklı amaçlara yönelik tasarım, analiz, modelleme ve planlama faaliyetleri gerçekleştirilir. Literatürde SYM terimi: yeryüzünün fiziksel yüzeyinin (çıplak topografyanın) yükseklik bilgilerini ifade eden Sayısal Arazi Modeli ve bitki örtüsü, topografya üzerine inşa edilmiş yapay objelere ilişkin yükseklik bilgisini de içeren Sayısal Yüzey Modeli kavramlarını birlikte tarif eder (Varga and Bašić 2013, Hirt 2016). Sayısal Yüzey Modelleri daha çok şehir bölge planlama, peyzaj çalışmaları, görünürlük analizi gibi çalışmalara altlık oluşturur. Sayısal Arazi Modelleri ise çoğunlukla salt topografyanın fiziksel yükseklik bilgisini gerektiren taşkın ve drenaj modelleme, jeolojik araştırmalar, gravite indirgemesi gibi alanlara katkı sağlar. Bu çalışmada değerlendirilen modeller Sayısal Arazi Modeli terimi ile tarif edilseler de çalışma içeriğinde genel terim olarak SYM ifadesi tercih edilmektedir. Bir Sayısal Yükseklik Modeline ilişkin topografik yükseklik verileri raster (grid formda yükseklik haritaları) veya vektör (düzensiz üçgenler ağı (triangulated irregular network-TIN) ile eş yükseklik eğrileri) formatta kullanıcılara servis edilebilir. Verinin pratik kullanımı ve bilgisayar ortamında gerçekleştirilen çoğu uygulama ve hesaplamalarda verimlilik sağlaması sebebiyle grid format SYM verilerinin servis edilmesinde genellikle tercih edilmektedir (Maune and Nayegandhi 2019). Sayısal Yükseklik Modellerinin üretilmesinde kullanılan yükseklik verileri farklı ölçme teknikleri kullanılarak elde edilir. Yersel ve uydulara dayalı ölçme teknikleri (total station, takeometre, GNSS, yersel lazer tarayıcılar vb.), hava fotogrametrisi, LiDAR, radar altimetresi ve interferometrik yapay açıklıklı radar (InSAR) ölçmeleri SYM üretiminde kullanılan tekniklerdir. Günümüzde özellikle uzaktan algılama yöntemleri ile elde edilen yüksek

çözünürlüklü (~1") yaklaşık global kapsamda SYM verileri kullanıcılar tarafından çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu modellerin yersel ve havadan ölçme yöntemleri ile elde edilen modellere tercih edilmelerinin başlıca nedenleri arasında son yıllarda anlamlı şekilde iyileşen veri doğrulukları, birçok çalışma için yeterli çözünürlükte ve geniş alanlarda geçerli olmaları ve ücretsiz servis edilmeleri gelmektedir. Yeryüzünde erişimi zor bölgelere (örn. çöller, kutup bölgeleri, sık ormanlık alanlar gibi) ilişkin de veri sağlamaları tercih edilmelerinin diğer bir sebebi olarak belirtilebilir. Yüksek çözünürlüklü global SYM'lerin yanı sıra ülke bazında yersel ve hava ölçmelerinden üretilmiş 1:25K ölçekli topografik haritaların sayısallaştırılması ile elde edilen SYM'ler de çok çeşitli uygulamalarda sıklıkla kullanılırlar (Mukherjee *et al.* 2013, Bildirici ve Abbak 2020).

Sayısal Yükseklik Modellerinden elde edilen yükseklikler ve bu yükseklikler kullanılarak belirlenen jeomorfolojik parametreler çevre ve yer bilimleri alanlarında ve birçok mühendislik uygulamasında kullanılır (Hirt *et al.* 2010, Mouratidis *et al.* 2017). Bu çalışmalardan bazıları; hidroloji ve arazi hareketleri için su akış modellemesi, drenaj ağları, taşkın simülasyonu ve modellemesi, arazi kullanımı planlaması, üç boyutlu uçuş planlaması, uydu görüntülerinin ve hava fotoğraflarının ortorektifikasyonu, görüş ve bakı analizleri, gravite ölçülerinin redüksiyonu, mühendislik ve altyapı çalışmaları, akıllı taşıma sistemleri, arkeoloji, iklim çalışmalarıdır (Mukherjee *et al.* 2013, Maune and Nayegandhi 2019).

Kullanım alanına göre gereksinim duyulan yükseklik doğruluğu farklılık gösterir. Bu kapsamda amaca uygun SYM'nin seçilmesi, kullanılacak modelin çalışma alanındaki doğruluğunun önceden test edilmesi ve belirlenmesi önemlidir (Wechsler 2003, Işık *et al.* 2017). Uzaktan algılama verilerinden elde edilen global SYM verilerinin doğruluklarının test edilmesinde farklı istatistiksel yaklaşımlar kullanılabilir (Yap *et al.* 2019). Bunlar arasında en sık kullanılan yöntem sayısal modelden kontrol noktalarına enterpole edilen yükseklik bilgisinin yersel ve uydu bazlı konumlama tekniklerinden elde

edilen yükseklikler ile karşılaştırılmasıdır (Varga and Bašić 2015).

Bir SYM'nin doğruluğunu ve kalitesini etkileyen çeşitli faktörler vardır. Bunların başında modelin oluşturulmasında kullanılan ölçme yöntemi ve ölçü kalitesi gelmektedir. Uzaktan algılama tekniği ile üretilen SYM verilerinde ölçme tekniğinin etkilendiği fiziksel faktörlerden dolayı yer yer veri boşlukları oluşmaktadır. Ülkemizde böylesi modellerin onarılmasına ve boşlukların giderilmesine yönelik bir proje çalışması Bildirici ve Abbak (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. SYM'nin doğruluğunu etkileyen diğer faktörler modelin mekânsal çözünürlüğü, grid veri formatının hazırlanmasında kullanılan interpolasyon yöntemi, çalışma alanının topografik karakteridir. Modellerin doğrulukları yatay ve düşeyde ifade edilse de bu iki bileşeni birbirinden ayrı düşünmek sağlıklı olmaz (Mukherjee *et al.* 2013).

Bu çalışmada uzaktan algılama verilerinden elde edilen 1" (~30 m) ve 3" (~90 m) çözünürlüklerde servis edilmiş global ASTER (Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer) ve SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) modelleri ile Harita Genel Müdürlüğünden satın alınan 1:25K ölçekli topografik haritaların sayısallaştırılması ile üretilmiş 1" çözünürlüklü DTED2 verilerinin doğrulukları Türkiye'nin kuzey batısında yaklaşık 3°x4° büyüklüğündeki çalışma bölgesinde test edilmektedir. Gerçekleştirilen testler üç ayrı GNSS/nivelman veri setine ait noktaların ortometrik ve GNSS-elipsoidal yükseklikleri (EGM96 geoid modeli ile dönüştürüldükten sonra) kullanılarak tekrarlanmıştır. Aynı çalışma alanında üç farklı veri seti ile testlerin yinelenmesinin nedeni bölge topografik karakterinin ve kontrol nokta dağılımının test sonuçlarındaki rolünü saptamak amacından kaynaklanmaktadır.

İlerleyen bölümlerde kullanılan sayısal yükseklik modelleri ve GNSS/nivelman veri grupları tanıtarak, testlerin gerçekleştirilmesinde uygulanan yöntem anlatılmaktadır. Elde edilen sayısal sonuçlar üçüncü bölümde verilmekte, sonuçlara ilişkin yorumlar ve çıkarımlar dördüncü bölümde açıklanmaktadır.

## 2. Veri ve Yöntemler

Yersel yöntemlerin kısıtlarına bağlı olarak geçmişte yalnızca sınırlı bir alanda ya da ülke ölçeğinde üretilen sayısal yükseklik modelleri son yıllarda uzaktan algılama tekniklerindeki gelişmelere paralel olarak tüm yeryuvarı için global ölçekte üretilmektedir. Bir çok veri sağlayıcı merkezden ücretsiz olarak kullanıcılara sunulan global sayısal yükseklik modelleri oldukça fazla sayıda ve güncellenen versiyonları ile karşımıza çıkmaktadır (Int Kyn. 1, Int Kyn. 2). Bu çalışma kapsamında 1" ve 3" çözünürlükleri ile sunulan Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) (Int Kyn. 3) ve Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Int Kyn. 4) SYM'leri ile Türkiye için bölgesel 1" çözünürlüklü HGM-DTED2 (Int Kyn. 5) modelleri değerlendirilmektedir. Önceki yıllarda Bildirici ve Abbak (2017) Türkiye genelinde her üç modeli birbirleri ile kıyaslayan bir çalışma gerçekleştirmiş, sonucunda SRTM verilerinin Türkiye bölgesel SYM verileri ile daha uyumlu olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, Bildirici ve Abbak (2020) SRTM 1" verilerini Türkiye'nin kuzey doğu ve güneyinde iki bölgede, bölgesel SYM verilerinden yararlanarak datum farklarını giderdikten sonra diferansiyel GNSS ölçmelerinden elde edilen veriler bir geoid modeli (EGM96) kullanarak test etmiş, SRTM modelinin ülkemizde, rapor edilen global doğruluğundan daha yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuştur. Burada verilen çalışmanın yukarıda saymış olduğumuz yayınlanmış araştırmalardan farkı modellerin Türkiye'nin kuzey batısında farklı topografik karaktere sahip bölgelerdeki test verileri ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarını sunmasıdır.

### 2.1 ASTER GDEM

ASTER global SYM (ASTER Global Digital Elevation Map – GDEM) Japonya Ekonomi, Ticaret ve Endüstri Bakanlığı (METI) ile Birleşik Devletler Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından gerçekleştirilen ortak bir projenin ürünü olarak yayınlanmıştır. ASTER GDEM modelinin ilk sürümü Haziran 2009 tarihinde kullanıcılara sunulmuştur. Modelin hesaplanmasında NASA Yer İzleme Sisteminin (Eath

Observing System-EOS) Terra uydusu üzerinde bulunan ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emmission and Reflection Radiometer) algılayıcısından elde edilen stereo-çift uydu görüntülerinin değerlendirilmesi ile elde edilmiştir (Sümer vd. 2006, Int Kyn. 3). ASTER GDEM 83°K-83°G enlemleri arasında kalan bölgeyi kapsar. Söz konusu bölgede yeryuvarı kara kütesinin %99'luk bir kısmını modellemiş olur. Son olarak 5 Ağustos 2019 tarihi itibarıyla modelin üçüncü sürümü (GDEM V3) kullanıcılara sunulmuştur. Üçüncü sürüm ile yayınlanan okyanus, nehir ve gölleri de içeren ASTER su kütesi veri seti de (ASTER Water Body Dataset-ASTWBD) hidrografik çalışmalarda kullanılmak üzere sunulan ürünler arasında yer almaktadır.

ASTER GDEM V3'de değerlendirmeye dâhil edilen ilave stereo (çift) görüntüler ile modelin kapsama alanı genişletilerek veriden kaynaklı bozukluklar ve yapay etkiler daha gelişmiş bir işleme algoritması ile giderilmiştir. Yine uygulanan gelişmiş üretim algoritması ile üçüncü sürümde modelin mekânsal çözünürlüğü, yatay ve yükseklik doğrulukları iyileştirilmiştir. ASTER GDEM GeoTIFF formatında 1°x1°'lik paftalar halinde 30 m grid aralıklı olarak kullanıcılara bedelsiz servis edilir (Int Kyn. 3). Servis edilen modellerin yatay ve düşey datum bilgileri, mekânsal çözünürlükleri Çizelge.1'de verilmektedir. ASTER GDEM global SYM sürümlerinin kalite ve doğrulukları Birleşik Devletler ve Japonya liderliğinde kurulmuş 20 üyenin katkı verdiği ASTER değerlendirme çalışma grubu tarafından değerlendirilerek rapor edilir (Tachikawa *et al.* 2011). Çalışma grubunun yayınlamış olduğu 31 Ağustos 2011 tarihli raporda modelin birinci ve ikinci sürümleri çeşitli veri grupları kullanılarak test edilmiş, gerçekleştirilen testler neticesinde GDEM V1'in mutlak düşey doğruluğu yaklaşık 20 m (%95 güven aralığında), GDEM V2 sürümünün mutlak düşey doğruluğu 17 m (%95 güven aralığında) olarak bildirilmiştir (Tachikawa *et al.* 2011). İlgili güven aralığında lineer hata biriminde (L95) belirtilen mutlak doğruluklara karşılık gelen karesel ortalama hatalar (k.o.h.) ise V1 ve V2 için sırasıyla 10.20 m ve 8.67 m'ye karşılık gelmektedir (L95=k.o.h.x1.960) (Mukul *et al.* 2017). Aynı raporda veri değerlendirme ve model üretme algoritmalarındaki

gelişmeler neticesinde yüksek enlemlerde stereo görüntü eksiliği, bulut kirliliği, sulak alanların uygun maskelenememesi ve benzer sebeplerden GDEM V1 sürümündeki çoğu veri boşluklarının ve suni etkilerin GDEM V2 sürümünde anlamlı şekilde giderilmiş olduğu bildirilmiştir. GDEM V3 için hâlihazırda yayınlanmış bir değerlendirme raporu mevcut değildir.

ASTER GDEM SYM'li için atıf edilen raporda verilen değerlendirmeler dışında literatürde modelin yükseklik doğruluğunu bölgesel olarak analiz eden çok sayıda yayın mevcuttur. Bunlar arasında Gesch *et al.* (2016) ASTER SYM'ni Birleşik Devletler ulusal jeodezi dairesi (U.S. National Geodetic Survey) temel jeodezik ağına ait 23 000 kontrol noktasında test etmiş, GDEM V2 ve GDEM V3 sürümlerinin çalışma bölgesindeki düşey doğruluklarını sırasıyla 8.68 m ve 8.52 m olarak yayınlamıştır.

## 2.2 SRTM

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission-Mekik Radar Topografya Görevi) yeryüzünün yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelinin oluşturulması amacı ile Birleşik Devletler Ulusal Görüntüleme ve Haritalama Dairesi (US National Geospatial Intelligence Agency - NIMA), Ulusal Havacılık ve Uzay Ajansı (NASA), Alman Havacılık Uzay Merkezi (DLR) ve İtalyan Uzay Ajansı (ASI) ortaklığında gerçekleştirilmiş uluslararası bir projedir (Int Kyn. 6, Int Kyn. 7, Int Kyn. 8). SRTM SYM verileri 60°N-56°S enlemleri arasında kalan bölgeyi kapsar ve haritalanan bölge yeryuvarının kara kütesinin yaklaşık %80'ine karşılık gelmektedir. SRTM sayısal yükseklik modeli, Endeavour uzay mekiğinin taşıdığı geliştirilmiş radar sistemi ile Şubat 2000'de gerçekleştirilen 11 günlük uçuşundan elde edilen interferometrik yapay açıklıklı radar (interferometric synthetic aperture radar-InSAR) verilerinin değerlendirilmesi ile üretilmiştir. Verilerin elde edilmesinde uzay aracı C- ve X-bantlarda algılama yapan iki algılayıcı ile donatılmıştır ve tek geçişli InSAR tekniği uygulanmıştır (Farr *et al.* 2007).

ASTER verilerinin aksine bulutluluk oranı ve benzeri meteorolojik koşullar SRTM verilerini etkilememektedir. Ancak bunun dışında radar

sinyalinden kaynaklı saçılma, yansıma, gölgeleme gibi etkiler SRTM ölçmelerinden üretilen SYM verilerinde boşluklara sebebiyet vermektedir. Bu etkiler ağırlıklı olarak yoğun bitki örtüsü ile kaplı ormanlık alanlarda, sakin su kütlesine rastlayan körfez, göl vb. bölgelerde daha yoğun olarak görülmektedir. SRTM verilerinden üretilen SYM'nin ilk sürümünde oldukça büyük oranda mevcut olan bu boşluklar interpolasyon algoritmaları ya da diğer kaynaklardan gelen veriler ile doldurularak üst sürümler üretilmiştir (Luedeling *et al.* 2007, Yue *et al.* 2017). Türkiye'de de bölgesel olarak SRTM SYM verilerindeki boşlukların onarılması ve 1:25K topografik haritalardan üretilen DTED2 verileri ile uygun şekilde doldurulmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır (Bildirici vd. 2009, Bildirici ve Abbak 2020). SRTM SYM'lerinin güncel sürümlerinde veri boşluklarının global olarak giderilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve büyük oranda da başarı sağlanmıştır.

SRTM SYM'leri C-bant verileri ile hesaplanan 3" (~90 m) çözünürlükte ve X-bant verileri ile hesaplanan 1" (~30 m) çözünürlükte servis edilmektedir. SRTM3 (~90 m) C-bant modelleri V1, V2, V3 ve V4 olmak üzere dört temel (Mouratidis *et al.* 2010) ve Uluslararası Tarım Danışma Grubu Mekânsal Bilgi Araştırma Konsorsiyumu (Consultative Group for International Agriculture Research Consortium for Spatial Information-CGIAR-CSI) Int Kyn. (9) tarafından yayınlanan V4.1 olmak üzere beş farklı sürüm ile kullanıcılara sunulmuştur (Mukul *et al.* 2015). SRTM1 (~30 m) X-bant modeli de yeryuvarının büyük bir bölümünü kapsayacak şekilde 2015 yılından bu yana farklı veri merkezleri tarafından kullanıcılara bedelsiz olarak sağlanmaktadır (Int Kayn. 1, Int Kayn. 6). Bu çalışma kapsamında SRTM SYM C-bant dördüncü sürüm ile X-bant modelleri test edilmiştir. Test edilen modellere ilişkin temel tanımlar Çizelge.1 de özetlenmektedir.

SRTM verilerinden hesaplanan SYM'ine ilişkin öngörülen ve bildirilen mutlak düşey doğruluk yaklaşık 16 m dir (%90 güven aralığında) (Mukul *et al.* 2015). İlgili güven aralığında lineer hata biriminde (L90) belirtilen bu mutlak doğruluğa karşılık gelen karesel ortalama hata ise 9.72 m dir (L90 = k.o.h. x 1.6449).

SRTM SYM'lerinin doğruluğunu global ve bölgesel olarak analiz eden bir çok çalışma yayınlanmıştır. Bunlar arasında Uluslararası GNSS Ağı (International GNSS Service - IGS) noktaları kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada C- ve X-bant modellerinin kıtalar özelinde doğrulukları değerlendirilmiştir. Buna göre; Afrika, Avusturalya ve Kuzey Amerika'da elde edilen test sonuçlarında SRTM modellerin global olarak hedeflenen doğruluğu (~10 m k.o.h.) teyit ettikleri görülmüştür. Ancak Asya, Avrupa ve Güney Amerika kıtalarında elde edilen analiz sonuçlarında C- ve X- bant modelleri için yakın doğruluk değerleri bulunmuş olup (~11.5 m k.o.h.) söz konusu doğrulukların vaat edilen SRTM SYM (~9.72 m k.o.h.) doğruluğundan daha düşük olduğu gözlenmiştir (Mukul *et al.* 2015). Kolecka ve Kozak (2014) ve Agrawal *et al.* (2006) SRTM modellerinin doğruluğunu topografyanın artan yüksekliğine, eğimine ve orman bitki örtüsü yoğunluğuna bağlı olarak analiz etmişlerdir. Kolecka and Kozak (2014) tarafından Polonya'da gerçekleştirilen çalışmada elde edilen sonuçlar SRTM SYM'nin yükseklik doğruluğunu etkileyen en önemli faktörlerin, C-bant modellerde veri boşluklarının ve yüksek eğim açılarının dağılımı, X-bant modellerde ise lokal geliş açısı, eğim, yön ve radar ışını geometrisi olduğunu bildirmektedir. Bunun yanı sıra her iki modelde orman bitki örtüsünün modelden elde edilen yüksekliklerin ortalama hatalarını ~10 metreye kadar arttırabildiği değerlendirilmiştir.

Hindistan'da gerçekleştirilen bir araştırmada SRTM SYM'nin yükseklik doğruluğunu topografyanın karakteristik özellikler ve engebeli yapısı ile ilişkilendirmiştir (Agrawal *et al.* 2006, Mukul *et al.* 2017). Buna göre SRTM C-bant SYM yükseklik doğrulukları topografyanın düzlüklerinde (maksimum yükseklik değişimi ~40 m) 3.55 m, orta engebeli bölgelerde (yükseklik değişimi ~300 m) 11.44 m ve çok engebeli bölgelerde (yükseklik değişimi ~4000 m) 19.64 m olarak rapor edilmiştir. Buradan ulaşılan sonuç SRTM SYM'nin öngörülen doğruluğunun yalnızca düz arazilerde sağlanabildiği şeklindedir. Ancak atıf edilen çalışmanın ortaya koyduğu sonuç değerlendirilirken modelin engebeli arazi testlerinin gerçekleştirildiği Himalaya dağlık bölgesinin başlangıç veri boşluklarının en yoğun

olduğu bölgelerden biri olduğu, ve test edilen dördüncü sürüm C-bant modelde söz konusu boşlukların interpolasyon yaklaşımı ile doldurulmuş olduğu da göz önünde tutulması gereken bir husus olduğu belirtilmiştir.

### 2.3 HGM DTED2

Harita Genel Müdürlüğü tarafından 1:25K ölçekli ülke topografik haritalarının otomatik vektörizasyonu ile pafta bazında sayısal ortama aktarılan verilerden DTED2 formatında 1" çözünürlüklü SYM'li üretilmiştir (Yılmaz vd. 2015, Int Kyn. 5). Yükseklik verileri ülke düşey datumundadır (TUDKA99) (bkz. Çizelge.1) (Int Kayn. 5). Veriler hizmete özeldir, Harita Genel Müdürlüğü tarafından kamu kurum ve kuruluşlarına bedeli karşılığı sağlanmaktadır.

**Çizelge 1.** Sayısal Yükseklik Modellerinin özellikleri.

SYM Verisi	ASTER	SRTM	DTED2
Kapsamı	Global	Global	Türkiye
Çözünürlük	1" ve 3"	1", 3", 30"	1"
Veri Türü	Stereo-(çift) görüntü	RADAR	Sayısallaştırma
2B Datum	WGS84	WGS84	WGS84
Düşey Datum	EGM96	EGM96	TUDKA99
Kaynak	Int Kyn. 3	Int Kyn. 4	Int Kyn. 5

### 2.4 GNSS/Nivelman Verileri

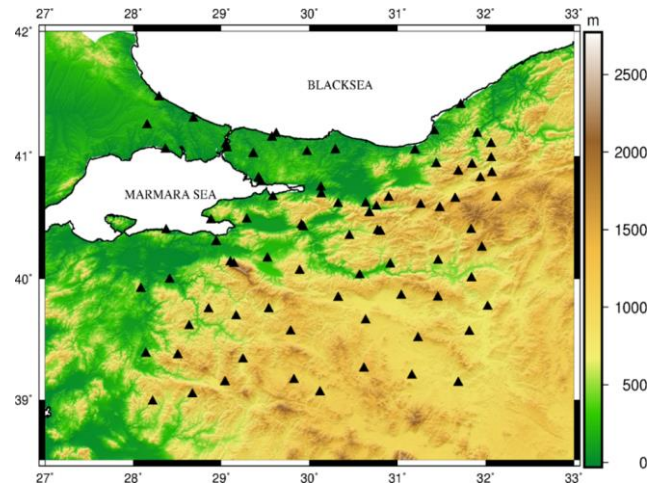
Sayısal Yükseklik Modellerinin doğruluklarının test edilmesinde aynı çalışma alanında ölçülmüş üç farklı jeodezik veri seti ile çalışılmıştır (bkz. Çizelge.2). Modellerin test edildiği çalışma alanı Türkiye'nin kuzey batısında 39°N-42°N enlemleri ile 28°E-32°E boylamları arasında kalan bölgeyi kapsar (Şekil.1). Çalışma alanı topografyası heterojen özellikte ve deniz seviyesinden itibaren 2500 metreye yükselmektedir. Bu yapıyı itibariyle SYM verilerinin doğruluğunun objektif olarak test edilmesi için laboratuvar koşullarına sahiptir.

Testlerde kullanılan ilk veri seti çalışma alanının tamamını kapsayan ve ortometrik yükseklikleri nivelman ölçmeleri ile belirlenmiş Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) noktalarıdır (Ayhan vd. 2002). 75 adet noktanın topografya üzerinde dağılımı Şekil.1'de görülmektedir. Nokta

koordinatları ITRF96 datumunda, ortometrik yükseklikleri ülke düşey datumundadır (TUDKA99).

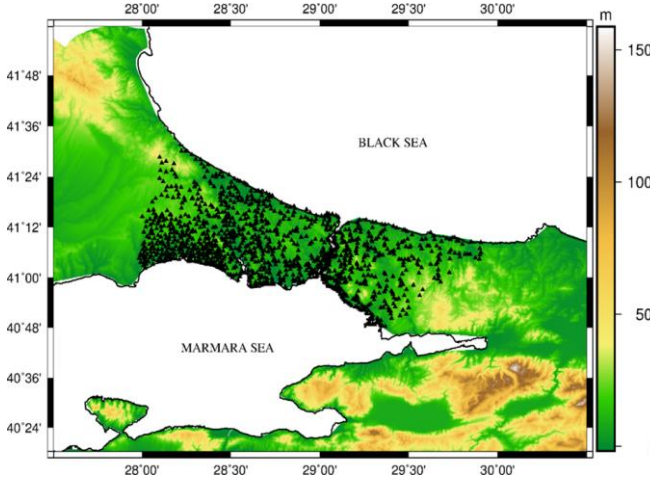
**Çizelge 2.** GNSS/nivelman verilerinin özellikleri.

Veri Seti	TUTGA	IGNA	Sakarya
Kapsamı	3°x4°	1°x2°	1°x1.5°
Nokta sayısı	75	1204	109
Nokta yoğunluğu	1nokta/45km	1 nokta/5km	1 nokta/13km
Nokta dağılımı	homojen ve seyrek	homojen ve sık	homojen ve karma
3B Datum	ITRF96	ITRF96	ITRF96
Düşey Datum	TUDKA99	TUDKA99	TUDKA99
Topografya	0-2500 m	0-500 m	0-1800 m
Kaynak	Ayhan vd. (2002)	Ayan vd. (2006)	Çelik vd. (2002)



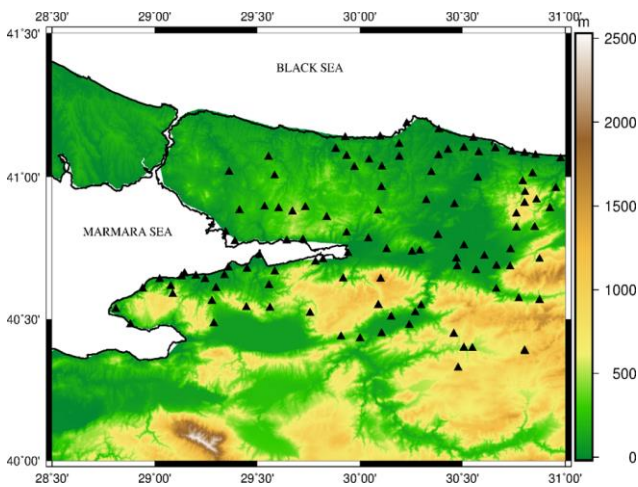
**Şekil 1.** TUTGA GNSS/nivelman noktalarının topografya üzerindeki dağılımı.

ikinci veri seti, 2006 yılında tesis edilen İstanbul GPS Nirengi Ağı noktalarından teşkil etmektedir. Noktaların üç boyutlu koordinatları ITRF96 datumunda, GNSS ölçmeleri ile belirlenmiştir. Ortometrik yükseklikleri nivelman ölçmelerinin dengelenmesi ile ülke yükseklik datumunda hesaplanmıştır (Ayan vd. 2006). Noktaların elipsoidal koordinatlarının doğruluğu ( $\sigma_{\phi, \lambda}$ ,  $\sigma_h$ ) sırasıyla  $\pm 1.5$  cm,  $\pm 2.5$  cm, ve ortometrik yükseklik doğruluğu ( $\sigma_H$ )  $\pm 1.0$  cm olarak verilmektedir (Ayan vd. 2006). 1204 adet IGNA noktasının çalışma alanında sıklığı 5 km de 1 noktadır.



Şekil 2. IGNA GPS/nivelman noktalarının topografya üzerindeki dağılımı.

Sayısal yükseklik modellerinin doğruluk analizinde kullanılan üçüncü veri seti ikinci veri setine kıyasla çalışma alanının daha engebeli topografik özelliklere sahip olan doğu kesiminde tesis edilmiş Sakarya GNSS/nivelman ağı noktalarından oluşmaktadır. Noktaların topografya üzerindeki dağılımı Şekil.3 de gösterilmektedir. C2 ve C3 derece ağ hiyerarşisinde tanımlı 109 adet noktanın ITRF96 datumunda elipsoidal koordinatları GNSS ölçmeleri ile ülke yükseklik datumunda ortometrik yükseklikleri presizyonlu nivelman ölçmeleri ile belirlenmiştir. Elipsoidal koordinatların doğruluğu ( $\sigma_{\phi,\lambda}$ ,  $\sigma_h$ ) sırasıyla  $\pm 1.5$  cm,  $\pm 2.5$  cm ve ortometrik yüksekliklerin rölatif doğruluğu  $\pm 0.2$  ppm dir (Çelik vd. 2002). Noktaların dağılım sıklığı 13 km'de 1 noktadır.



Şekil 3. Sakarya GPS/nivelman noktalarının topografya üzerindeki dağılımı.

## 2.5 SYM Verilerinin Doğruluk Analizi

Verilen üç jeodezik ağı ilişkin GNSS/nivelman verileri kullanılarak çalışmada değerlendirilen global ve bölgesel SYM'lerinin doğrulukları analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde ASTER ve SRTM global SYM'lerinin iki farklı çözünürlükte (1"ve 3") kullanıcılara sunulan güncel ürünlerinin her ikisi de değerlendirilmiştir. Böylesi bir değerlendirmede amaç aynı modele ilişkin farklı çözünürlükte servis edilen iki ürün arasında da olası kalite ve performans farklarının araştırılması ve netleştirilmesidir. Yüksek çözünürlüklü SYM verileri ile çalışmak, hesaplama, modelleme ve analizler gerçekleştirmek, özellikle geniş alanları kapsayan çalışmalarda yüksek işlemcili güçlü donanımlar ile çalışmayı gerektirir. Böylesi uygulamalarda çalışmanın ekonomisini optimize etmek amacıyla seçilen modelin düşük çözünürlüklü sürümü ile çalışılması veya yüksek çözünürlüklü modelin mekânsal çözünürlüğünün seyrelterek kullanılması yoluna gidilebilir.

Çalışmada değerlendirilen SYM'lerinin yersel veri setleri ile bağımsız olarak test edilmesinde iki farklı strateji takip edilmiştir. Birinci değerlendirme (I. test) stratejisinde SYM verilerine ait grid noktalarından bilineer interpolasyon yöntemi yardımıyla GNSS/nivelman kontrol noktalarında türetilen yükseklik değerleri ( $H_{SYM}$ ) ile bu noktaların TUDKA99 datumundaki ortometrik yükseklikleri ( $H_{TUDKA}$ ) ile olan farkları ( $\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{SYM}$ ) değerlendirilmiştir. İkinci değerlendirme (II. test) stratejisinde ise GNSS/nivelman noktalarında interpolasyon ile SYM'inden türetilmiş olan  $H_{SYM}$  yükseklik değerleri bu kez de noktaların GNSS elipsoidal yükseklikleri ( $h_{GNSS}$ ) ile karşılaştırılmıştır. Ancak bu karşılaştırma  $h_{GNSS}$  elipsoidal yüksekliklerin global geoid modelinden (EGM96) hesaplanan geoid yüksekliklerin ( $N_{EGM96}$ ) kullanılması ile EGM96 datumuna dönüştürülmüş yükseklikleri ( $H_{GNSS/EGM96} = h_{GNSS} - N_{EGM96}$ ) dikkate alınarak başarılmıştır. Dolayısıyla II. test stratejisi GNSS/nivelman noktalarında  $\Delta H_{II} = H_{GNSS/EGM96} - H_{SYM}$  yükseklik farklarının istatistiklerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir.

İkinci değerlendirme stratejisinde GNSS elipsoidal yüksekliklerinin SYM'lerin yükseklik datumunda fiziksel yüksekliklere dönüştürülmesinde açınım

derecesi  $\ell_{maks.}=360$  olan Earth Gravitational Model 1996 (EGM96) kullanılmıştır, çünkü test edilen SYM'lerinin düşey datumu bu jeopotansiyel model ile tarif edilmiştir (bkz. Çizelge.1).

EGM96 Birleşik Devletlerin National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) kurumunun Geomatik Dairesi tarafından hesaplanarak yayınlanmıştır (Lemoine *et al.* 1998). Model kullanıcılara  $\ell=360$  açınım derecesinde küresel harmonik katsayılar ile servis edilir. Modelin katsayılarına Int Kyn. 10' dan erişilmektedir. Çalışma bölgesine EGM96 modeli katsayıları ile geoit yüksekliği hesabı:

$$N_{EGM96} = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{\ell=2}^{\ell_{max}} \left(\frac{a}{r}\right)^{\ell} \sum_{m=0}^{\ell} (\Delta\bar{C}_{\ell m} \cos m\lambda + \bar{S}_{\ell m} \sin m\lambda) \bar{P}_{\ell m}(\cos\theta) \quad (1)$$

eşitliğine göre hesaplanmıştır (Hofmann-Wellenhof and Moritz 2006). Denklemden  $(\ell, m)$  modelin derece ve mertebesi,  $(\theta, \lambda, r)$  sırasıyla tamamlanmış enlem, jeodezik boylam ve hesap noktasının merkezi yarıçapıdır.  $a$  referans elipsoidinin büyük eksen yarıçapı,  $GM$   $m^3/s^2$  biriminde Newton'un çekim sabiti ile yeryuvarı kütesinin çarpımı,  $\gamma$   $m/s^2$  biriminde referans elipsoidinin ortalama gravite değeri,  $\Delta\bar{C}_{\ell m}$  ve  $\bar{S}_{\ell m}$  birimsiz normalleştirilmiş küresel harmonik katsayıları göstermektedir (Hofmann-Wellenhof and Moritz 2006). Geoit yüksekliği  $N_{EGM96}$  metre biriminde, verilen eşitlikten hesaplanır. Eşitlikte verilen genel gösterimde açınım derecesinin  $\ell=2$ 'den başladığı görülmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen hesaplamalarda sıfır-dereceden katsayı değeri hesaba dâhil edilerek hesaplanan geoit yükseklikleri GRS80 referans elipsoidine göre gerçekleştirilmiştir (Erol *et al.* 2020). Hesaplamalar gelgitten bağımsız (tide-free) sistemde gerçekleştirilmiştir. (Int Kyn. 10) EGM96 modelinin Avrupa'daki doğruluğunu, 1047 adet GNSS/nivelman noktasında hesaplanan geoit yükseklik farklarının istatistiklerine dayanarak 49.3 cm olarak bildirmiştir. Erol (2007) tarafından GNSS/nivelman verileri ile gerçekleştirilen testler neticesinde Türkiye'nin batısında ve çalışma alanında EGM96 modelinin doğruluğu  $\sim 27.0$  cm dir. Hata yayılma teorisine göre ikinci değerlendirme stratejisinde GNSS elipsoidal yüksekliklerden ( $\sigma_{h_{GNSS}} \approx 2.5$  cm) EGM96 geoit modelinden elde

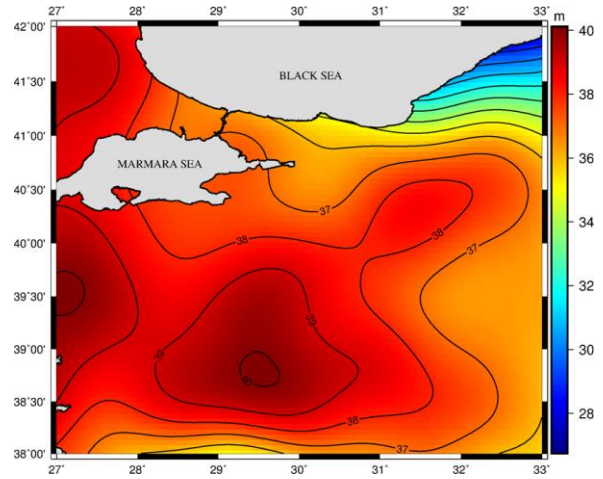
edilen geoit yüksekliklerinin ( $\sigma_{N_{EGM96}} \approx 27.0$  cm) çıkartılması ile elde edilen fiziksel yüksekliklerin doğruluğu

$$\sigma_{H_{GNSS/EGM96}} = \sqrt{\sigma_{h_{GNSS}}^2 + \sigma_{N_{EGM96}}^2}$$

yaklaşık 27.11 cm dir. Elde edilen doğruluk SYM'lerinin test edilmesi ve doğruluklarının analizi için yeterlidir.

Çizelge.1 de görüldüğü üzere test edilen SYM'lerinin grid noktalarının elipsoidal enlem ve boylamları WGS84 datumunda verilmektedir. WGS84 ve ITRF datumu çakışık kabul edilebilir olması dolayısıyla (Int Kyn. 11), SYM'ler ve test edilecek üç jeodezik ağı kontrol noktaları aynı koordinat datumunda kabul edilmiştir.

Çalışma bölgesinde EGM96 global geoit modeli Şekil.4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Çalışma bölgesinde EGM96 geoit modeli yüzeyi.

### 3. Sayısal Test Sonuçları

Çalışmada test edilen Sayısal Yükseklik Modellerinin değerlendirilmesinde takip edilen birinci stratejiden elde edilen istatistiksel sonuçlar Çizelge.3, 4 ve 5 de verilmektedir. Modellerin doğruluk analizine ilişkin istatistikler, jeodezik ağların farklı zamanlarda ölçülerek ayrı ayrı dengelenmiş olmaları ve ağ hiyerarşik seviyelerinin farklı olması dolayısıyla; üç veri seti için (TUTGA, IGNA ve Sakarya GNSS/nivelman ağları noktalarında) bağımsız olarak hesaplanmış ve tablolarda ayrı ayrı sunulmuştur.

Çizelgelerde verilen istatistikler karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Tüm modeller ile hesaplanan yükseklik farklarının ortalama değerleri IGNA verilerinde  $\sim 2$  m ila 4 m, Sakarya verilerinde  $\sim 4$  m ila 9 m ve



TUTGA verilerinde ~5 m ila 10 m aralığında değişim göstermektedir.

- TUDKA99 datumunda ortometrik yükseklikler ile SYM verileri arasındaki farkların standart sapmaları ve ortalama değerleri birlikte dikkate alındığında her üç veri seti için hesaplanan istatistiklerde en yüksek doğruluğu (farkların k.o.h. ile) HGM DTED2 (1") modelinin sağladığı gözlenmiştir.
- Birinci test yaklaşımında HGM DTED2 modelinin sağladığı doğruluk, yükseklik farklarının karesel ortalama hataları (k.o.h.) cinsinden: ( $k.o.h. = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2}$ ;  $\mu$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma (std. sapma)), her üç veri setinde ağırlık kapsama alanından ve alanın topografik özelliklerinden bağımsız olarak tutarlılık göstermektedir. Modelin doğruluğu (hesaplanan k.o.h. değerleri cinsinden): TUTGA veri seti için 6.831 m, IGNA veri seti için 5.267 m, Sakarya veri seti için 6.397 m olarak hesaplanmıştır.
- HGM DTED2 modelinin homojen doğruluğuna karşın ASTER GDEM ve SRTM (3" ve 1") SYM'lerin doğrulukları çalışma alanının topografik yüksekliklerinin değişimine bağlı olarak: düz topografyada IGNA veri seti için (yükseklik değişimi 0 ile 500 m) ortalama 5.5 m (DTED2 ~5.2 m), engebeli topografyada Sakarya veri seti için (yükseklik değişimi 0 ile 1800 m) ortalama 8.5 m (DTED2 ~6.3 m), heterojen özellikteki topografyada TUTGA veri seti için (yükseklik değişimi 0 ile 2500 m) ortalama 11.0 m (DTED2 ~6.8 m) olarak hesaplanmıştır.
- Bir önceki sonuç maddesinde verilen, yükseklik farklarına ilişkin ortalama k.o.h. değerlerinde 3" çözünürlüklü SRTM C-bant modelinin istatistikleri karşılaştırmaya dâhil edilmemiştir. SRTM C-bant modelinin doğruluğu test bölgesinin topografik özelliklerine bağlı olarak anlamlı değişim göstermektedir. Engebeli topografyayı temsil eden Sakarya ve TUTGA veri setlerinde oldukça büyük k.o.h. değerleri ortaya koymuştur. Modelin IGNA veri setinde sahip olduğu doğruluk ~6.9 cm dir. Bu değer diğer modellerden desimetre seviyesinde farklıdır. Ancak Sakarya veri seti için doğruluğu ~11.9 m

dir ve bu doğruluk diğer modellerin ortaya koyduğu doğruluktan ~3.5 m daha kabardır. Modelin heterojen özellikte topografya yapısını temsil eden TUTGA veri seti ile sağladığı doğruluk ~14.1 m dir. Söz konusu k.o.h. değeri diğer global modeller için hesaplanan ortalama k.o.h. büyüklüğünden (~10.9 cm) yaklaşık 3.2 m daha kabardır.

**Çizelge 3.** 75 adet TUTGA GNSS/nivelman noktalarında ( $\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{SYM}$ ) yükseklik farklarının istatistikleri.

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std.sapma (m)
ASTER 3"	-4.413	36.328	9.758	7.494
ASTER 1"	-8.225	37.255	7.794	7.830
SRTM 3"	-19.602	37.140	10.145	9.752
SRTM 1"	-8.355	23.634	6.711	6.555
DTED2 1"	-5.446	22.462	5.162	4.475

**Çizelge 4.** 1204 adet IGNA GNSS/nivelman noktalarında ( $\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{SYM}$ ) yükseklik farklarının istatistikleri.

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std. sapma (m)
ASTER 3"	-19.158	26.189	2.632	5.404
ASTER 1"	-24.021	24.633	1.826	5.215
SRTM 3"	-26.619	32.230	4.101	5.617
SRTM 1"	-14.923	30.948	2.891	3.934
DTED2 1"	-58.077	33.058	3.491	3.944

**Çizelge 5.** 109 adet Sakarya GNSS/nivelman noktalarında ( $\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{SYM}$ ) yükseklik farklarının istatistikleri.

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std. Sapma (m)
ASTER 3"	-6.731	25.194	5.853	6.807
ASTER 1"	-11.808	34.199	4.415	6.658
SRTM 3"	-15.011	35.503	8.628	8.166
SRTM 1"	-8.974	32.840	5.583	6.106
DTED2 1"	-10.118	21.138	4.737	4.299

- SRTM C-bant (3" çözünürlüklü) SYM verilerinin her üç test ağındaki doğruluk analizlerine bakılarak modelin düz topografyada (IGNA veri seti 6.9 m k.o.h.) SRTM'in öngörülen global doğruluk değerinden (~9.7 m k.o.h.) daha yüksek doğruluk sağladığı ancak engebeli topografyada (Sakarya veri seti 11.9 m k.o.h.) öngörülenden daha kaba doğruluğa sahip olduğu değerlendirilmiştir.
- SRTM X-bant (1") SYM'nin C-bant (3") modelinden tüm veri setlerinde daha yüksek doğruluk sağladığı görülmüştür. Sırasıyla X-bant

ve C-bant modellerinin k.o.h. değerleri: IGNA veri setinde 4.9 m ve 7.0 m (fark 2.1 m), Sakarya veri setinde 8.3 m ve 11.9 m (fark 3.6 m), TUTGA veri setinde 9.4 m ve 14.1 m (fark 4.7 m). Bu sonuçlar değerlendirildiğinde SRTM X-bant modelinin topografyanın engebeli olduğu bölgelerde sağladığı avantajın düzlüklerdeki üstünlüğünün iki katından fazla olduğu görülmektedir.

- SRTM C- ve X-bant modelleri arasında gözlenen anlamlı performans farkı ASTER GDEM modellerinin 1"ve 3" çözünürlüklü sürümleri arasında gözlenmez. Bunun nedeni 3" çözünürlüklü ASTER GDEM modelinin orijinal 1"çözünürlüklü modelin seyrekleştirilmesi ile elde edilmiş olmasından dolayıdır. Test edilen iki farklı mekânsal çözünürlükteki ASTER GDEM modeli SRTM C- ve X- bant modeller gibi farklı frekanslı ölçü büyüklüklerine dayanmamaktadır. Ancak iki farklı çözünürlükteki modelin (sırasıyla 1" ve 3") k.o.h. değerleri arasındaki farklar: IGNA veri seti için: 5.5 m ve 6.0 m (fark 0.5 m), Sakarya veri seti için: 8.0 m ve 9.0 m (fark 1 m), TUTGA veri seti için: 11.0 m ve 12.3 m (fark 1.3 m) olarak hesaplanmıştır. İki modelin k.o.h. değerlerindeki farklılık SYM grid noktalarındaki yükseklik değerlerinin GNSS/nivelman noktalarına türetilmesinde uygulanan interpolasyon hatasından kaynaklanmaktadır. Mekânsal çözünürlüğü yüksek grid veriden kontrol noktaları için değer türetilmesinde interpolasyon hatası daha küçüktür. İnterpolasyon işleminden kaynaklanan hata miktarı topografya yükseklik değişimi arttıkça büyümektedir. Söz konusu interpolasyon hatası engebeli alanlarda interpolasyona katkı verecek yakın komşuluktaki noktasal değerlerin ağırlığının artırılması ile azaltılabilir.
- 1"mekânsal çözünürlüğe sahip ASTER GDEM ve SRTM X-bant modelleri karşılaştırıldığında genel olarak SRTM X-bant SYM'nin test bölgelerinde ASTER GDEM den daha yüksek doğruluk sağladığı görülmektedir. GNSS/nivelman noktalarında yükseklik farklarının k.o.h. ile değerlendirildiğinde, sırasıyla SRTM X-bant ve ASTER GDEM (1") doğrulukları, IGNA veri seti için: 4.9 m ve 5.5 m (fark 0.6 m), Sakarya veri seti

inçin: 8.3 m ve 8.0 m (fark -0.3 m), TUTGA veri seti için: 9.4 m ve 11.0 m (fark 1.7 m).

- Global ve bölgesel SYM'leri karşılaştırması için; sırasıyla SRTM X-bant ve HGM DTED2 modelleri için k.o.h. değerleri, IGNA veri seti için: 4.9 m ve 5.3 m (fark -0.4 m), Sakarya veri seti için: 8.3 m ve 6.4 m (fark 1.9 m), TUTGA veri seti için: 9.4 m ve 6.8 m (fark 2.5 m) dir.
- Birinci değerlendirme yaklaşımında her bir veri setinde kullanılan ortometrik yüksekliklerin doğruluğunun SYM doğruluk analizlerini gerçekleştirmek için yeterli olduğu görülmüştür. SYM'lerinin doğruluk analizlerinde elde edilen sonuçların testlerde kullanılan GNSS/nivelman verilerinin topografya üzerinde dağılımı (topografik yükseklik değişimini temsil edecek şekilde homojen) ile ilişkili ancak nokta sıklığından bağımsız olduğu görülmüştür. İkinci değerlendirme yaklaşımından elde edilen istatistiksel sonuçlar Çizelge.6, 7 ve 8 de verilmektedir.

**Çizelge 6.** 75 adet TUTGA GNSS/nivelman noktalarında ( $\Delta H_{II} = H_{GNSS/EGM96} - H_{SYM}$ ) yükseklik farklarının istatistikleri.

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std. sapma (m)
ASTER 3"	-3.911	36.583	9.974	7.504
ASTER 1"	-7.724	37.510	8.002	7.806
SRTM 3"	-18.532	38.361	10.364	9.847
SRTM 1"	-7.286	24.194	6.919	6.609
DTED2 1"	-6.438	23.638	5.340	4.769

**Çizelge 7.** 1204 adet IGNA GNSS/nivelman noktalarında ( $\Delta H_{II} = H_{GNSS/EGM96} - H_{SYM}$ ) yükseklik farklarının istatistikleri (m).

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std. sapma (m)
ASTER 3"	-19.378	25.900	2.660	5.409
ASTER 1"	-24.240	24.344	1.816	5.239
SRTM 3"	-26.570	32.016	4.119	5.642
SRTM 1"	-14.874	30.658	2.881	3.962
DTED2 1"	-57.970	33.376	3.482	3.945

**Çizelge 8.** 109 adet Sakarya GNSS/nivelman noktalarında ( $\Delta H_{II} = H_{GNSS/EGM96} - H_{SYM}$ ) yükseklik farklarının istatistikleri.

SYM	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	std. sapma (m)
ASTER 3"	-7.124	25.328	5.914	6.863
ASTER 1"	-11.370	34.333	4.461	6.696
SRTM 3"	-14.900	35.724	8.707	8.193
SRTM 1"	-8.161	33.061	5.629	6.099
DTED2 1"	-9.305	21.331	4.783	4.336

SYM'lerinin doğruluklarının analiz edilmesinde takip edilen ikinci yaklaşımda her bir model için jeodezik ağ noktalarında hesaplanan yükseklik farklarının k.o.h. değerlerinin birinci yaklaşımda (ortometrik yükseklikler kullanılarak) gerçekleştirilen testlerde elde edilen k.o.h. değerlerine oldukça yakın değerler oldukları görülmüştür. Birinci ve ikinci test yaklaşımında elde edilen yükseklik farklarının k.o.h. değerleri ve k.o.h. değerleri arasındaki farklar Çizelge.9 da verilmektedir. K.o.h. büyüklükleri arasındaki ( $\Delta = m_{\Delta H_I} - m_{\Delta H_{II}}$ ) farkların yalnızca en geniş alanı kapsayan ve heterojen karakterde bir topografya yapısını temsil eden TUTGA ağında gerçekleştirilen testlerde desimetre mertebesine ulaştığı (HGM DTED2 modelinin TUTGA veri setinde gerçekleştirilen testlerinde en fazla  $\Delta \approx 33$  cm) görülmektedir. IGNA ve Sakarya veri setlerinde elde edilen  $\Delta$  farkları ise en fazla (ASTER 3" modelinin Sakarya veri seti ile testinde) 8 cm olarak bulunmuştur.

**Çizelge 9.** SYM'nin iki farklı yaklaşım ile gerçekleştirilen doğruluk analiz sonuçlarının karşılaştırması: k.o.h. değerleri sırasıyla  $m_{\Delta H_I}$  ve  $m_{\Delta H_{II}}$ .

SYM	Veri Seti	* $m_{\Delta H_I}$ (m)	* $m_{\Delta H_{II}}$ (m)	*fark (m)
ASTER 3"	TUTGA	12.3036	12.4816	0.178
	IGNA	6.0109	6.0277	0.017
	Sakarya	8.9774	9.0596	0.082
ASTER 1"	TUTGA	11.0479	11.1788	0.131
	IGNA	5.5254	5.5448	0.019
	Sakarya	7.9888	8.0459	0.057
SRTM 3"	TUTGA	14.0720	14.2960	0.224
	IGNA	6.9548	6.9856	0.031
	Sakarya	11.8796	11.9556	0.076
SRTM 1"	TUTGA	9.3811	9.5683	0.187
	IGNA	4.8820	4.8987	0.017
	Sakarya	8.2736	8.2996	0.026
DTED2 1"	TUTGA	6.8317	7.1595	0.328
	IGNA	5.2671	5.2619	-0.005
	Sakarya	6.3969	6.4558	0.059

$$* \Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{SYM}, \Delta H_{II} = H_{GNSS/EGM96} - H_{SYM}$$

$$H_{GNSS/EGM96} = h_{GNSS} - N_{EGM96}$$

$$m_{\Delta H_I} = \sqrt{\mu_{\Delta H_I}^2 + \sigma_{\Delta H_I}^2}, m_{\Delta H_{II}} = \sqrt{\mu_{\Delta H_{II}}^2 + \sigma_{\Delta H_{II}}^2}$$

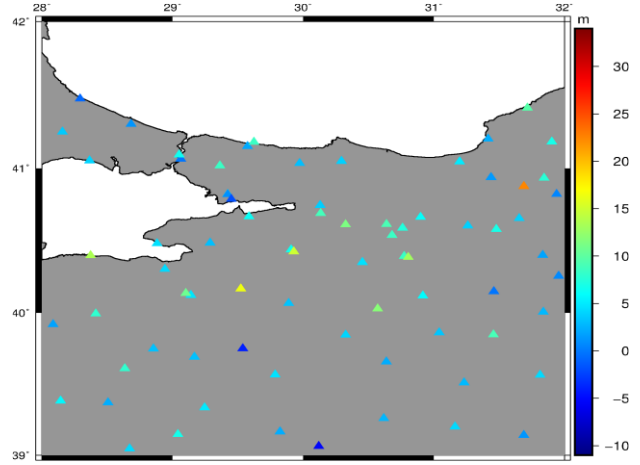
$$\mu : \text{ortalama değer}, \sigma : \text{standart sapma}, \Delta : \text{fark}$$

$$\Delta = m_{\Delta H_{II}} - m_{\Delta H_I}$$

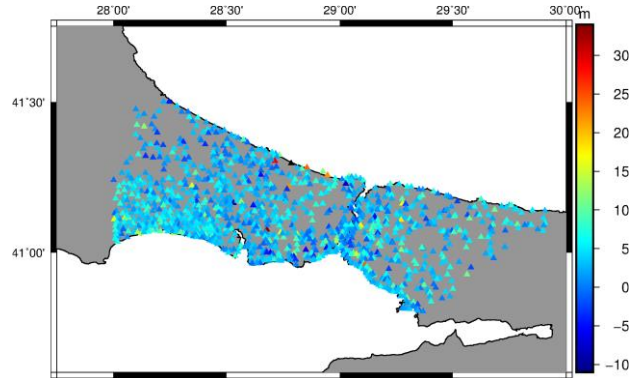
HGM DTED2 modelinin IGNA veri seti ile gerçekleştirilen doğruluk analizinde ortometrik ve elipsoidal yüksekliklerin kullanıldığı her iki test yaklaşımında da model için özdeş doğruluk verdiği

görülmüştür (Çizelge.9,  $\Delta \approx 0.5$  cm). Bu durum test alanının görece küçük, topografyanın alçak ve düz, bölgede geoit değişiminin diğer iki test alanına kıyasla az olması ile açıklanabilir.

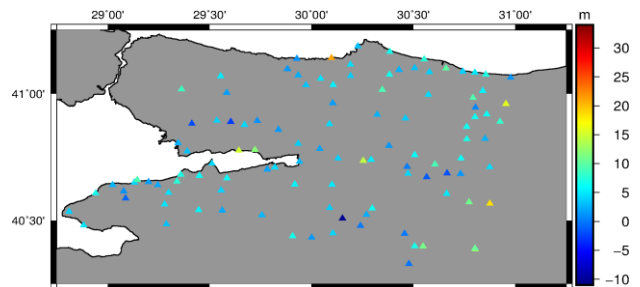
HGM DTED2 (1") modeli ile TUDKA99 ortometrik yükseklik farklarının TUTGA, IGNA ve Sakarya GNSS/nivelman noktalarındaki dağılımı sırasıyla Şekil.5, Şekil.6 ve Şekil.7'de görülmektedir.



**Şekil 5.** DTED2 SYM'linden elde edilen yüksekliklerin TUTGA GNSS/nivelman noktalarındaki yükseklikler ile farkları ( $\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{DTED2}$ ).



**Şekil 6.** DTED2 SYM'linden elde edilen yüksekliklerin IGNA GNSS/nivelman noktalarındaki yükseklikler ile farkları ( $\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{DTED2}$ ).



**Şekil 7.** DTED2 SYM'linden elde edilen yüksekliklerin Sakarya GNSS/nivelman noktalarındaki yükseklikler ile farkları ( $\Delta H_I = H_{TUDKA} - H_{DTED2}$ ).

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada global ASTER (1"ve 3"), SRTM X- ve C-bant (1"ve 3") ve bölgesel HGM DTED2 (1") SYM'leri Türkiye'nin kuzey batısında üç farklı GNSS/nivelman veri seti kullanılarak test edilmiştir. Değerlendirilen SYM'lerinin çalışma alanındaki doğruluklarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen testler bölgesel düşey datumda (TUDKA99) nivelman ölçmelerinden elde edilen ortometrik yükseklikler ile GNSS ölçmelerinden elde edilen elipsoidal yüksekliklerin kullanıldığı iki farklı değerlendirme yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Çalışma bölgesinde ASTER GDEM SYM'nin doğruluğu düz (IGNA veri seti ile elde edilen sonuçlar) ve engebeli (Sakarya veri seti ile elde edilen sonuçlar) özellikteki topografik bölgelerde modelin yayınlanmış global doğruluğundan daha yüksektir. ASTER modeline ilişkin öngörülen doğruluk 8.67 m olarak yayınlanmıştır, ancak çalışma bölgesinde modelin doğruluğu düzlüklerde ~5.52 m, engebeli topografyada ~7.98 m olarak hesaplanmıştır.
- SRTM X-bant modelinin doğruluğu düz ve engebeli topografyada C-bant modelin doğruluğundan daha iyidir. Topografyanın engebeli olduğu bölgede X-bant modelin üstünlüğü daha dikkate değer büyüklüktedir.
- SRTM X-bant (1") SYM'nin düz topografik bölgeyi temsil eden IGNA veri seti ile sağladığı doğruluk 4.88 m, engebeli topografyayı temsil eden Sakarya veri seti ile sağladığı doğruluk ise 8.27 m dir. SRTM SYM için rapor edilen global doğruluk değerinin ~9.72 m olduğu göz önüne alınırsa, SRTM X-bant SYM'nin çalışma bölgesinde engebeli alanda dahi öngörülenden daha üstün performans sağladığı görülmektedir.
- 1" çözünürlüklü iki global SYM arasındaki karşılaştırmada: SRTM X-bant modeli tüm karşılaştırmalarda ASTER GDEM'den daha yüksek doğruluk sağlarken, iki model arasındaki en büyük doğruluk farkı heterojen topografya yapısını temsil eden TUTGA veri seti ile gerçekleştirilen test sonuçlarında bulunmuştur. Elde edilen test sonuçlarında SRTM X-bant

modeli için 9.38 m k.o.h. değeri yanı sıra ASTER GDEM için 11.05 m k.o.h. değeri hesaplanmıştır. Çalışma bölgesinde gerçekleştirilecek çalışmalarda SRTM X-bant SYM kullanılması doğruluk açısından avantaj sağlayacaktır.

- Test edilen global SYM'nin doğruluğunun topografya ile ilişkili olduğu ve yükseklik arttıkça model doğruluğunun düştüğü tüm test sonuçlarında görülmektedir. Buna karşın 1:25K ölçekli topografik haritaların sayısallaştırılması ile elde edilen DTED2 SYM'nin doğruluğunun homojen olduğu ve global SYM'lerinden daha yüksek doğruluk sağladığı görülmüştür. Engebeli topografik yapıyı temsil eden Sakarya verileri ile gerçekleştirilen testlerde SRTM X-bant modelinin doğruluğu 8.27 m iken HGM DTED2 modeli 6.40 m doğruluk sağlamıştır. Bölgesel DTED2 modelinin bedeli karşılığında ilgili kurumdan temin edilebiliyor olması yanı sıra global SYM'lerinin bedelsiz olarak kullanıcılara sunulması kullanıcıların tercihinde rol oynayacaktır.
- SYM'lerinin doğruluk analizinde GNSS/nivelman noktalarında nivelman ölçmelerinden elde edilen ortometrik yükseklikler ile geoit modeli ile dönüştürülmüş elipsoidal yükseklikler ayrı ayrı kullanılmış, her iki yaklaşımdan da elde edilen test sonuçları yakın istatistikler değerler ile SYM'lerinin doğruluklarına ilişkin aynı sonuçları ortaya koymuştur. Dolayısıyla her iki yersel veri seti de yeterli doğrulukta olmak koşulu ile SYM doğruluk analizinde kullanılabilir. Ancak elipsoidal yükseklikler ile gerçekleştirilen testlerde, kullanılacak geoit modelinin test edilen SYM'nin düşey datumu göz önünde bulundurularak seçilmesi, test sonuçlarında olası datum farklılıklarının etkisini azaltmak bakımından tavsiye edilmektedir.
- SYM'lerinin test edilmesinde kullanılan kontrol noktalarının çalışma bölgesindeki dağılımı ve topografyanın değişimlerini gerçekçi biçimde temsil etmesi önem arz etmektedir. Ancak testlerde kullanılan kontrol noktalarının sıklığının test sonuçlarına bir etkisi görülmemiştir.

Bu çalışmada test edilen global ve bölgesel SYM'lerinin doğruluklarına ilişkin bulgular

Türkiye'nin bütünü için kısmen genelleştirilebilecek niteliktedir. Çünkü global modellere ilişkin doğruluklar test bölgesinde topografik yüksekliklerin değişimi ve karakterinden büyük oranda etkilenmektedir. Çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan üç farklı veri seti farklı karakterdeki topografya yapısını temsil eder niteliktedir. Ancak özellikle global modeller için gerçekleştirilen testlerin, bu modellerin öncül sürümlerinin boşluklu yapı gösterdiği ve sonradan farklı teknikler ile onarıldığı bilinen bölgelerde (bu bölgeler Türkiye'nin kuzey doğusunda ve ülke topografyasının en fazla yükseldiği doğu bölgelerinde yer alır) yersel ve GNSS kontrol verileri ile tekrarlanması önerilir. Üç farklı topografik karakterdeki bölge için yinelenen testlerde bölgesel HGM DTED2 modelinin görece topografyanın özelliklerinden bağımsız olarak homojen doğruluk ortaya koyduğu gözlenmiştir. Bu gözleme dayanılarak HGM DTED2 verilerinin doğruluğunun ülke genelinde geçerli olabileceği değerlendirilmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından (Proje No.114Y581) ve İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) programı kapsamında (Proje No. MGA-2018-41585) desteklenmiştir. Çalışmada kullanılan bölgesel SYM DTED2 ve TUTGA verileri Harita Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan GNSS/nivelman verileri için İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi Anabilim Dalına teşekkür ederiz. Çalışmanın öncül sonuçları ISGGG2017 uluslararası sempozyumunda bildiri olarak sunulmuştur.

#### 5. Kaynaklar

Agrawal, R., Mahtab, A., Jayaprasad, P., Pathan, S. and Ajai, K., 2006. Validating SRTM DEM with Differential GPS Measurements - A Case Study With Different Terrains. *Proceedings of the ISPRS Symposium*, Goa, India, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

Ayan, T., Deniz, R., Arslan, E., Çelik, R. N., Denli, H.H., Akyılmaz, O., Özşamlı, C., Özlüdemir, M.T., Erol, S., Erol, B., Acar, M., Mercan, H. ve Tekdal, E., 2006. İstanbul GPS nirengi ağı (İGNA) 2005-2006 Yenileme

Ölçü ve Değerlendirmesi. Teknik Rapor, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Ayhan, M.E., Demir, C., Lenk, O., Kılıçoğlu, A., Aktug, B., Açıkgöz, M., Fırat, O., Şengün, Y.S., Cingöz, A., Gürdal, M.A., Kurt, A.İ., Ocak, M., Türkezer, A., Yıldız, H., Bayazit, N., At M., Çağlar, Y. ve Özerkan, A., 2002. Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999 (TUTGA-99A). *Harita Dergisi*, **16**, 1–80.

Bildirici, İ. Ö. and Abbak, R. A., 2017. Comparison of ASTER and SRTM Digital Elevation Models At One-Arc-Second Resolution Over Turkey. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **5(1)**, 16-25.

Bildirici, İ.Ö. ve Abbak, R. A., 2020. Türkiye ve Çevresinde SRTM Sayısal Yükseklik Modelinin Doğruluğu. *Geomatik*, **5(1)**, 1-11.

Bildirici, İ. Ö., Üstün, A., Selvi, Z.H., Abbak, R.A. and Bugdayci, İ., 2009. Assessment of Shuttle Radar Topography Mission Elevation Data Based On Topographic Maps in Turkey. *Cartography and Geographic Information Science*, **36(1)**, 95-104.

Çelik, R. N., Ayan, T. and Erol, B., 2002. Geodetic Infrastructure Project of Marmara Earthquake Region Land Information System (MERLIS). Teknik Rapor, İstanbul Teknik Üniversitesi, ITU 2002/06/20. **1**.

Erol, B., 2007. Investigations on Local Geoids for Geodetic Applications. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 234.

Erol, B., Işık, M.S. and Erol, S., 2020. An Assessment of the GOCE High-Level Processing Facility (HPF) Released Global Geopotential Models with Regional Test Results in Turkey. *Remote Sensing* **12(3)**, 586.

Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. and Alsdorf, D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of geophysics*, **45(2)**.

Gesch, D., Oimoen, M.J., Danielson, J.J. and Meyer, D., 2016. Validation of the ASTER Global Digital Elevation Model Version 3 Over the Conterminous United States. *The International Archives of*

- Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **41**, 143.
- Hirt, C., 2016. Digital Terrain Models. Encyclopedia of Geodesy. Springer.
- Hirt, C., Filmer, M.S. and Featherstone, W.E., 2010. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4. 1 and GEODATA DEM-9S ver3 Digital Elevation Models over Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, **57**(3), 337-347.
- Hofmann-Wellenhof, B. and Moritz, H., 2006. Physical Geodesy, Springer Verlag.
- Işık, M.S., Erol, B. and Erol, S., 2017. Analysis on the Quality of High-Resolution Global Digital Terrain Models (DTM) using GPS/leveling Data in Turkey. *Proceedings of the International Symposium on GIS Applications in Geography and Geosciences (ISGGG)*, 18-21 Ekim, Çanakkale, Türkiye. 192-201.
- Kolecka, N. and Kozak, J., 2014. Assessment of the accuracy of SRTM C-and X-Band high mountain elevation data: A case study of the Polish Tatra Mountains. *Pure and Applied Geophysics*, **171**(6), 897-912.
- Lemoine, F.G., Kenyon, S.C., Factor, J. K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, D. S., Cox, C. M., Klosko, S. M., Luthcke, S. B. and Torrence, M. H., 1998. The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96. Teknik Rapor, NASA/TP-1998-206861, Earth Resources And Remote Sensing, NASA Goddard Space Flight Center, 584.
- Luedeling, E., Siebert, S. and Buerkert, A., 2007. Filling the voids in the SRTM elevation model—A TIN-based delta surface approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **62**(4), 283-294.
- Maune, D. F. and Nayegandhi, A., 2019. Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual 3rd Edition, ASPRS Publications.
- Mouratidis, A., Briole, P. and Katsambalos, K., 2010. SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study from North Greece. *International Journal of Remote Sensing*, **31**(23), 6205-6222.
- Mouratidis, A., Karadimou, G. and Dimitrios, A., 2017. Extraction and Validation of Geomorphological Features from EU-DEM in the Vicinity of the Mygdonia Basin, Northern Greece. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, **95**, 032009, 2-9. doi :10.1088/1755-1315/95/3/032009
- Mukherjee, S., Joshi, P.K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Grag, R.D. and Mukhopadhyay, A., 2013. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **21**, 205-217.
- Mukul, M., Srivastava, V. and Mukul, M., 2015. Analysis of the accuracy of shuttle radar topography mission (SRTM) height models using international global navigation satellite system service (IGS) network. *Journal of Earth System Science*, **124**(6), 1343-1357.
- Mukul, M. S., Srivastava, V., Jade, S. and Mukul, M., 2017. Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Scientific Reports*, **7**, 41672.
- Sümer, E. Ö., Gürçay, B., Pekesin, B. F., Avcı, K., Koruyucu, M., Dağlıyar, A., Teoman, A., Topçu, T. and Özgüner, C., 2006. ASTER Uydu Verisi Uygulamaları: Türkiye'den Örnekler. Özel Yayın Serisi-5, Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 70, Ankara. ISBN: 975-8964-41-0.
- Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J., Abrams, M., Crippen, R. and Carabajal, C., 2011. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. U.S., NASA Land Processes Distributed Active Archive Center 25.
- Varga, M. and Bašić, T., 2013. Quality Assessment And Comparison Of Global Digital Elevation Models on the Territory of Republic of Croatia. *Kartografija i geoinformacije (Cartography and Geoinformation)*, **12**(20), 4-17.
- Varga, M. and Bašić, T., 2015. Accuracy Validation And Comparison of Global Digital Elevation Models over Croatia. *International Journal of Remote Sensing*, **36**(1), 170-189.

Wechsler, S. P., 2003. Perceptions of digital Elevation Model Uncertainty by DEM Users. *Urisa-Washington DC*, **15**(2), 57-64.

Yap, L., Kandé, L.H., Nouayou, R., Kamguia, J., Ngouh, N.A. and Makuate M.B., 2019. Vertical Accuracy Evaluation Of Freely Available Latest High-Resolution (30 m) Global Digital Elevation Models over Cameroon (Central Africa) with GPS/leveling Ground Control Points. *International Journal of Digital Earth*, **12**(5), 500-524.

Yılmaz A., Alp O., Okul A., Eker O. ve Erdoğan M., 2015. Türkiye için Hassas Yükseklik Modeli Üretimi. *TUFUAB III. Teknik Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 21-25 Mayıs, Konya, 294-301.

Yue, L., Shen, H., Zhang, L., Zheng, X., Zhang, F. and Yuan, Q., 2017. High-quality Seamless DEM Generation Blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS Observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **123**, 20-34.

#### **İnternet kaynakları**

1- <https://earthexplorer.usgs.gov/>, (27.05.2020).

2- <https://idems.maps.arcgis.com/home/index.html>, (28.05.2020).

3- <https://asterweb.jpl.nasa.gov/>, (29.05.2020)

4- <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, (29.05.2020)

5- <https://www.harita.gov.tr/anasayfa>, (29.05.2020)

6- [https://www.dlr.de/eoc/en/desktopdefault.aspx/tabid-5515/9214\\_read-17716/](https://www.dlr.de/eoc/en/desktopdefault.aspx/tabid-5515/9214_read-17716/), (29.05.2020)

7- <https://www.nga.mil/About/History/NGAinHistory/Pages/SRTM.aspx>, (29.05.2020)

8- <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, (29.05.2020)

9- <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>, (29.05.2020)

10- <http://icgem.gfz-potsdam.de/>, (29.05.2020)

11- [https://www.unoosa.org/pdf/icg/2012/template/WGS\\_84.pdf](https://www.unoosa.org/pdf/icg/2012/template/WGS_84.pdf), (29.05.2020)