

# Harita Dergisi



Temmuz 2024  
Sayı:172

ISSN 1300-5790  
E-ISSN 2667-4084

Bezircioğlu, M., Bahadır, B., Bozdoğan, E., Dindar, A.A., Akpınar, B., Nohutcu, M., Yigit, C.Ö. : **Düşük Maliyetli ve Tek Frekanslı Çoklu GNSS Gözlemlerine Dayalı Varyometrik Yaklaşımın Düşey Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi** (An Investigation of the Ability of the Variometric Approach Based on Low-Cost and Single-Frequency Multi-GNSS Observations to Detect Vertical Dynamic Movements)

Özel, Ö., Ural, Y., Kellevazir, A., Gündoğan, T., Yalçın, F., Peker, S., Kılınç, H., Demirel, İ.C., Akpınar, İ. : **Antarktika Kıtasındaki Tektonik Hareketleri İzlemek İçin Türkiye'nin Sabit GNSS İstasyonu: Dismal (DISM) İstasyonu** (Türkiye's Permanent GNSS Station to Monitor Tectonic Movements on the Antarctica: Dismal (DISM) Station)

Odacı, M., Aktuğ, B., Tavukçu, B. : **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)

Albayrak, M., Cansever, F., Özlüdemir, M.T., Halicioğlu, K., Guillaume, S. : **Türkiye'deki Astrojeodezik Çalışmaların Dünü, Bugünü ve Yarını** (Astrogeodetic Studies in Türkiye: Past, Present and Future)





## HARİTA DERGİSİ

Temmuz 2024

Yıl: 90 Sayı: 172

ALTI AYDA BİR YAYIMLANIR.  
HAKEMLİ VE BİLİMSEL  
BİR DERGİDİR.  
YEREL SÜRELİ YAYINDIR.  
YAZI DİLİ TÜRKÇE, İNGİLİZCE'DİR.

### Sahibi

Harita Genel Müdürlüğü Adına  
Tümgeneral Dr. Osman ALP

### Sorumlu Müdür

Harita Yük.Tek.Ok.K.İği Adına  
Müh.Alb.Doç.Dr. Hasan YILDIZ

### Editör

Müh.Alb. Selçuk CEYLAN

### Yönetim Kurulu

Müh.Alb.Doç.Dr. Hasan YILDIZ (Bşk.)  
Müh.Alb.Dr. İbrahim NALCI  
Müh.Alb.Dr. Osman Atila AKABALI  
Müh.Alb.Dr. Yavuz Selim ŞENGÜN  
Müh.Alb. Selçuk CEYLAN

### Yönetim Yeri Adresi

Harita Genel Müdürlüğü  
Harita Dergisi Yönetim Kurulu  
Başkanlığı  
06590 Cebeci / ANKARA

Tel: (312) 595 21 21-20

Faks: (312) 320 14 95

web: www.harita.gov.tr/harita-dergisi

e-posta: haritadergisi@harita.gov.tr

### Basım Yeri

Harita Genel Müdürlüğü Matbaası  
ANKARA

ISSN 1300 – 5790

E-ISSN 2667 – 4084

Bu dergide yayımlanan makaleler,  
yazarlarının özel fikirlerini yansıtır.



**TRİZİN**  
Mühendislik ve Temel  
Bilimler Veri Tabanı

## İ Ç İ N D E K İ L E R

### ARAŞTIRMA MAKALELERİ

**Düşük Maliyetli ve Tek Frekanslı Çoklu GNSS Gözlemlerine Dayalı Varyometrik Yaklaşımın Düşey Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi** (An Investigation of the Ability of the Variometric Approach Based on Low-Cost and Single-Frequency Multi-GNSS Observations to Detect Vertical Dynamic Movements)

Mert BEZCİOĞLU, Berkay BAHADUR, Emre BOZDOĞAN,  
Ahmet Anıl DİNDAR, Burak AKPINAR, Metin NOHUTCU,  
Cemal Özer YİĞİT 1 – 16

**Antarktika Kıtasındaki Tektonik Hareketleri İzlemek İçin Türkiye'nin Sabit GNSS İstasyonu: Dismal (DISM) İstasyonu** (Türkiye's Permanent GNSS Station to Monitor Tectonic Movements on the Antarctica: Dismal (DISM) Station)

Özgür ÖZEL, Yusuf URAL, Abdullah KELLEVEZİR, Tunahan GÜNDOĞAN, Faruk YALÇIN, Selçuk PEKER, Hakan KILIÇ,  
İbrahim Cihan DEMİREL, İlyas AKPINAR 17 – 29

**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 ODACI, Bahadır AKTUÇ, Burak TAVUKÇU 30 – 43

### DERLEME MAKALESİ

**Türkiye'deki Astrojeodezik Çalışmaların Dünü, Bugünü ve Yarını** (Astrogeodetic Studies in Türkiye: Past, Present and Future)

Müge ALBAYRAK, Fuat CANSEVER, M.Tevfik ÖZLÜDEMİR,  
Kerem HALICIOĞLU, Sébastien GUILLAUME 44 – 55

**Bilim Kurulu**

Tümg.Dr. Osman ALP (HGM)  
Prof.Dr. Bahadır AKTUĞ (AÜ)  
Prof.Dr. Ali Melih BAŞARANER (YTÜ)  
Prof.Dr. İbrahim Öztuğ BİLDİRİCİ (KTÜN)  
Prof.Dr. Çetin CÖMERT (KTÜ)  
Prof.Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK (İTÜ)  
Prof.Dr. Hande DEMİREL (İTÜ)  
Prof.Dr. Uğur DOĞAN (YTÜ)  
Prof.Dr. Semih ERGİNTAV (BÜ)  
Prof.Dr. Oğuz GÜNGÖR (AÜ)  
Prof.Dr. Cevat İNAL (KTÜN)  
Prof.Dr. Hakan KARABÖRK (KTÜN)  
Prof.Dr. Fevzi KARSLI (KTÜ)  
Prof.Dr. Taşkın KAVZOĞLU (GTÜ)  
Prof.Dr. Şenol Hakan KUTOĞLU (BEÜ)  
Prof.Dr. Hakan MARAŞ (ÇÜ)  
Prof.Dr. Nebiye MUSAĞLU (İTÜ)  
Prof.Dr. Haluk ÖZENER (BÜ)  
Prof.Dr. Ayşe Filiz SUNAR (İTÜ)  
Prof.Dr. Doğan Uğur ŞANLI (YTÜ)  
Prof.Dr. Dursun Zafer ŞEKER (İTÜ)  
Prof.Dr. Mustafa TÜRKER (HÜ)  
Prof.Dr. Nesibe Necla ULUĞTEKİN (İTÜ)  
Prof.Dr. Aydın ÜSTÜN (KOÜ)  
Prof.Dr. Naci YASTIKLI (YTÜ)  
Prof.Dr. Ferruh YILDIZ (KTÜN)  
Prof.Dr. Cemal Özer YİĞİT (GTÜ)  
Prof.Dr. Orhan ALTAN  
Prof.Dr. Ahmet Tuğrul BAŞOKUR  
Prof.Dr. Fatmagül KILIÇ GÜL  
Prof.Dr. Şerif HEKİMOĞLU  
Prof.Dr. Mahmut Onur KARSLIOĞLU  
Prof.Dr. Ahmet KAYA  
Prof.Dr. Ali KOÇYİĞİT  
Prof.Dr. Sıtkı KÜLÜR  
Prof.Dr. Cankut ÖRMECİ  
Prof.Dr. Fatma Gönül TOZ  
Doç.Dr. Hakan AKÇIN (BEÜ)  
Doç.Dr. Onur LENK (İÜ)  
Doç.Dr. Mustafa Tefik ÖZLÜDEMİR (İTÜ)  
Müh.Alb.Doç.Dr. Mehmet SİMAV (MSÜ)  
Müh.Alb.Doç.Dr. Hasan YILDIZ (HGM)  
Doç.Dr. Ali KILIÇOĞLU  
Dr. Mustafa KURT (OÜ)  
Müh.Alb.Dr. Yavuz Selim ŞENGÜN (HGM)  
Müh.Alb.Dr. Altan YILMAZ (HGM)  
Dr. Mustafa ATA  
Dr. Coşkun DEMİR  
Dr. Oktay EKER  
Dr. Mustafa ERDOĞAN

**Harita Dergisi'nin Cilt:90, Sayı:171-172, 2024  
Sayılarındaki Makalelerin Değerlendirilmesinde  
Hakemlik Yapan Akademisyenler**

Prof.Dr. Bahadır AKTUĞ (AÜ)  
Prof.Dr. İ. Öztuğ BİLDİRİCİ (KTÜN)  
Prof.Dr. Zaide DURAN (İTÜ)  
Prof.Dr. Hediye ERDOĞAN (ASÜ)  
Prof.Dr. Cevat İNAL (KTÜN)  
Prof.Dr. Fevzi KARSLI (KTÜ)  
Prof.Dr. İbrahim TIRYAKIOĞLU (AKÜ)  
Prof.Dr. Mustafa TÜRKER (HÜ)  
Prof.Dr. Nesibe Necla ULUĞTEKİN (İTÜ)  
Prof.Dr. Aydın ÜSTÜN (KOÜ)  
Prof.Dr. Hasan Hakan YAVAŞOĞLU (İTÜ)  
Prof.Dr. Cemal Özer YİĞİT (GTÜ)  
Doç.Dr. Gonca Okay AHI (HÜ)  
Doç.Dr. Mahmut Oğuz SELBESOĞLU (İTÜ)  
Doç.Dr. Mehmet Ali YÜCEL (ÇOMÜ)  
Müh.Alb.Doç.Dr. Mehmet SİMAV (MSÜ)  
Müh.Alb.Dr. Altan YILMAZ (HGM)  
Müh.Alb.Dr. Erdinç SEZEN (HGM)  
Müh.Yb.Dr. Turgay ÇAP (HGM)  
Dr. Mustafa ERDOĞAN

# Düşük Maliyetli ve Tek Frekanslı Çoklu GNSS Gözlemlerine Dayalı Varyometrik Yaklaşımın Düşey Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi (An Investigation of the Ability of the Variometric Approach Based on Low-Cost and Single-Frequency Multi-GNSS Observations to Detect Vertical Dynamic Movements)

Mert BEZCİOĞLU<sup>1</sup>, Berkay BAHADUR<sup>2</sup>, Emre BOZDOĞAN<sup>1</sup>, Ahmet Anıl DİNDAR<sup>3</sup>,  
Burak AKPINAR<sup>4</sup>, Metin NOHUTCU<sup>2</sup>, Cemal Özer YİĞİT<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli

<sup>2</sup>Hacettepe Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Çankaya, Ankara

<sup>3</sup>Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli

<sup>4</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul  
cyigit@gtu.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 15.05.2024

Kabul Tarihi (Accepted): 15.07.2024

## ÖZ

Bu çalışma düşük maliyetli GNSS (Global Navigation Satellite System) alıcı ve anteninden elde edilen SF (tek frekanslı) çoklu GNSS gözlemlerine dayalı VA (varyometrik yaklaşım) tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğini değerlendirmektedir. Bu amaçla, düşey yönlü dinamik davranışları simüle edebilen bir sarsma tablası ile 0.3-3.0 Hz arasında frekans ve 5-30 mm aralığında değişen genliklere sahip düşey yönlü dinamik hareketler üretilmiştir. SF-VA tekniğinin kısa süreli ve düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği yüksek maliyetli VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) ve bağıl konum belirleme yöntemlerinden elde edilen yer değiştirme ve epoklar arası yer değiştirme sonuçları ile zaman ve frekans alanında karşılaştırmalı bir yaklaşımla incelenmiştir. Düşük maliyetli GNSS gözlemlerinin VA tekniği ile değerlendirmesi ise PPPH-VA isimli açık kaynak kodlu yazılım ile gerçekleştirilmiştir. GNSS tabanlı yöntemlerin değerlendirilmesinde çoklu GNSS gözlemleri kullanılmıştır. GNSS tabanlı yöntemlerin zaman ve frekans alanındaki doğrulaması ise GNSS bağımsız bir sensör olan LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensörü verileri referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı SF-VA tekniği kısa süreli dinamik davranışların baskın frekans değerini başarılı bir şekilde tespit ederken karşılık gelen genliklerde cm altı bir seviyede farklılıklar vardır. Ayrıca, elde edilen bulgular, düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı SF-VA tekniğinin epoklar arası yer değiştirme alanında kısa süreli dinamik davranışları mm mertebesinde tespit ederken, yer değiştirme alanında ise cm mertebesinde tespit edebildiğini açıkça ifade etmektedir. Genel olarak, çalışmada elde edilen bulgular YSI (Yapı Sağlığı İzleme) sistemlerinde düşük maliyetli GNSS alıcılarının ve buradan elde edilen gözlemlere dayalı VA tekniğinin çeşitli geoteknik sensörleri destekleyici harici bir sensör olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Düşük maliyetli GNSS, U-blox, PPPH-VA, Varyometrik Yaklaşım, VADASE

## ABSTRACT

This study evaluates the ability of the VA (variometric approach) technique to detect vertical dynamic behaviors based on SF (single-frequency) multi-GNSS (Global Navigation Satellite System) observations obtained from a low-cost GNSS receiver and antenna. For this purpose, vertical dynamic motions with frequencies between 0.3 and 3.0 Hz and amplitudes varying between 5 and 30 mm were produced employing a shake table that can simulate vertical dynamic behaviors. The ability of the SF-VA technique to determine short-term and vertical dynamic behaviors was examined with a comparative approach in the time and frequency domain with the results obtained from both the high-cost VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) and Relative Positioning methods. The evaluation of low-cost GNSS observations with the VA technique was realized with the open-source PPPH-VA software. Multi-GNSS observations were employed to evaluate GNSS-based methods. Validation of GNSS-based methods was realized using data from the LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensor. While the SF-VA technique based on low-cost GNSS observations successfully detects the dominant frequency value of short-term dynamic behaviors, there are differences in the corresponding amplitudes at a sub-cm level. Moreover, the findings clearly indicate that the SF-VA technique, based on low-cost GNSS observations, can detect short-term dynamic behaviors in the time difference displacement at the mm-level, while it can detect behaviors at the order of cm in the displacement. Overall, the outcomes obtained in the study clearly show that the VA technique, based on the observations obtained therefrom, can be used as an external sensor supporting various geotechnical sensors in SHM (Structural Health Monitoring) systems.

**Keywords:** Low-cost GNSS, U-blox, PPPH-VA, Variometric Approach, VADASE



## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu tarih boyunca barınma ve ulaşım gibi temel ihtiyaçlarını karşılamak ve yaşamlarını sürdürebilmek için çeşitli yapılar inşa etmiştir. Modern toplumlar ise bu ihtiyaçlarını karşılamak ve yaşamlarını kolaylaştırmak için uzun, orta ve kısa açıklıklı köprüler, viyadükler ve yüksek katlı binalar gibi farklı mega mühendislik yapıları geliştirmiş ve zamanla bu yapılara bağımlı hale gelmiştir (Farrar ve diğerleri, 2012). Ancak, mühendislik yapılarının deprem, rüzgâr yükü gibi doğal veya trafik yükü gibi insan kaynaklı dinamik yüklere devamlı olarak maruz kaldığının ve bu dinamik yüklerin de yapılarda kalıcı hasarlar meydana getirdiğinin altı çizilmelidir. Mega mühendislik yapıları olarak nitelendirilen yüksek binalar, tünel, boru hatları, rüzgâr tribünleri ya da uzun, orta ve kısa açıklıklı köprüler gibi kritik yapılar için hasar tespit ve karakterizasyon tekniklerinin uygulanması süreci YSİ (Yapı Sağlığı İzleme) olarak adlandırılır. Mühendislik yapılarında meydana gelen insan veya doğal afet kaynaklı hasarların düzenli olarak takip edilmesi ve yapıda meydana gelen herhangi bir kritik hasar durumunda ilgili yapının faaliyetinin sona erdirilerek olası bir can ve mal kaybının önüne geçilmesi için YSİ sistemlerinin kurulması son derece önemlidir (Xi ve diğerleri, 2020).

YSİ sistemlerinde yüksek örneklem aralığına sahip ivmeölçer, eğimölçer gibi çeşitli geoteknik sensörler kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda GNSS (Global Navigation Satellite System) teknolojisinde meydana gelen gelişmeler sayesinde yapılarda oluşan dinamik yük kaynaklı yer değiştirmeleri belirlemek için 10, 20, 50 ve hatta 100 Hz örneklem aralığındaki jeodezik alıcıların YSİ sistemlerinde yer alan geoteknik sensörleri destekleyici sensörler olarak kullanılması yaygın hale gelmiş durumdadır (Gikas, 2012; Kaloop ve Li, 2014; Moschas ve Stiros, 2011). Mühendislik yapılarındaki dinamik yer değiştirmelerin izlenmesinde yüksek hassasiyete sahip ve en az iki GNSS alıcısı gerektiren bağıl konumlama yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang ve diğerleri, 2021; Qu ve diğerleri, 2022). Fakat bağıl konum belirleme yönteminin sabit nokta gereksinimi, metropolitan alanlarda sinyal yansıma etkisinden arındırılmış ve uygun uydu görüşüne sahip sabit GNSS istasyonu tesisinin zorluğu göz önüne alındığında bu yöntemi dezavantajlı hale getirmektedir (Bahadur ve diğerleri, 2024a). Son yıllarda, herhangi bir referans GNSS istasyonuna ihtiyaç duymadan tek bir GNSS alıcısı kullanarak konum belirleyebilen PPP (Precise Point Positioning, PPP) yöntemi, YSİ sistemlerinde

bağıl konum belirleme tekniklerine göre oldukça güçlü bir alternatif haline gelmiştir (Yigit, 2016; Zumberge ve diğerleri, 1997). Mevcut çalışmalar, PPP tekniğinin kısa süreli ve yatay yönlü dinamik davranışları yüksek hassasiyetle belirleyebileceğini ortaya koymuş durumdadır (Ju ve diğerleri, 2022; Xu ve diğerleri, 2013). Yigit ve Gurlek (2017) ise yüksek örneklem aralıklı PPP tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğini esnek çubuk modellerini kullanarak araştırmış ve PPP tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları başarılı bir şekilde tespit edebildiğini ve yatay yönde gerçekleştirilen çalışmalara benzer bir şekilde PPP yönteminin bağıl konum belirleme tekniğine güçlü bir alternatif olduğunu ileri sürmüştür. Benzer şekilde, Kaloop ve diğerleri, (2020) PPP yönteminin düşey yönlü dinamik hareketleri tespit edebilme kabiliyetini esnek çubuk modelleri kullanarak incelemiştir. Çalışma, ilgili çubukların sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen frekans değerlerinin PPP tekniğinden elde edilenler ile güçlü bir uyum içinde olduğunu öne sürmüştür ve PPP yönteminin düşey yönlü dinamik davranışların baskı frekans değerini başarılı bir şekilde tespit edebildiğini göstermiştir.

PPP yönteminin tek bir GNSS alıcısından elde edilen gözlemleri kullanarak yatay ve düşey yönlü kısa süreli dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğine rağmen hassas yörünge ve saat ürünleri gibi ek parametrelere ihtiyaç duyması ve gerçek zamanlı uygulamalarda bu ürünlerin temini için kesintisiz internet gerekliliği yeni bir teknik ihtiyacını doğurmuştur. Bu doğrultuda, ham GNSS gözlemlerinden anlık olarak elde edilen yayın efemerisi bilgilerini kullanarak tek bir GNSS alıcısı ile ardışık epoklar arasındaki yer değiştirme farklarının elde edilmesine olanak sağlayan ve herhangi bir internet bağlantısı gerektirmeyen VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) yaklaşımı ortaya atılmıştır (Colosimo ve diğerleri, 2011). Mevcut literatürde VADASE yaklaşımının deprem kaynaklı oluşan ko-sismik yer değiştirmeleri yakalayabilme kabiliyeti ve yöntemle çoklu GNSS gözlemlerinin katkısı irdelenmiştir (Fortunato ve diğerleri, 2019; Geng ve diğerleri, 2016; Tesolin ve diğerleri, 2019). Bezicioğlu ve diğerleri, (2022b) ise VADASE yaklaşımının kısa süreli ve yatay yönlü dinamik hareketleri belirleyebilme kabiliyetini ve çoklu GNSS gözlemlerinin yöntemle olan katkısını yatay yönlü sarsma tablasını kullanarak gerçek zamanlı olarak incelemiş ve yöntemin PPP ve özellikle bağıl konum belirleme teknikleri ile oldukça güçlü bir uyum sergilediğini belirtmiştir. Öte yandan, Karadeniz ve diğerleri, (2022) VADASE tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğini çelik yassı

çubuk kullanarak araştırmış ve VADASE tekniğini düşey yönlü dinamik davranışların baskın frekans ve karşılık gelen genlik değerlerini başarılı bir şekilde tespit edebildiğini ve genel olarak düşey yönlü dinamik davranışları cm-altı mertebede belirleyebildiğini ifade etmiştir.

Bağıl konum belirleme, PPP veya VADASE tekniklerini kullanarak hassas yer değiştirme bilgisi elde etmek ve GNSS gözlemlerindeki en önemli hata kaynaklarından biri olan iyonosfer etkisini ortadan kaldırmak için genellikle çift veya çok frekanslı GNSS gözlemleri toplayabilen yüksek maliyetli GNSS alıcıları kullanılmaktadır. Ancak, bu jeodezik alıcıların yüksek maliyeti, geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından benimsenmesinin önündeki en büyük engeldir. Her ne kadar tek frekanslı GNSS alıcıları bugüne kadar pazara hâkim olsa da tek frekanslı GNSS gözlemlerinin faz sıçraması, iyonosferik etki gibi GNSS hata kaynaklarından etkilenme ihtimali daha yüksektir. Ancak son yıllarda GNSS teknolojilerindeki gelişmeler düşük maliyetli GNSS alıcı ve antenleri ortaya çıkmış ve böylece düşük maliyetli GNSS alıcıları ile çok frekanslı ve çoklu GNSS gözlemlerini kullanarak 20 Hz'e kadar GNSS gözlemlerinin toplanmasına olanak sağlanmıştır Düşük maliyetli alıcı ve antenlerin yüksek maliyetli alıcı ve antenlere kıyasla diğer avantajları ise daha küçük, hafif ve kompakt olmasıdır (Bahadur ve diğerleri, 2024b). Bu durum söz konusu alıcı ve antenleri zorlu ölçüm koşullarında kullanılması için ideal hale getirmektedir. Düşük maliyetli GNSS teknolojisindeki gelişmelerin sonucunda düşük maliyetli alıcılar ve antenlerin çeşitli GNSS uygulamalarında kullanılabilirliği araştırılmaya başlanmıştır (Bezcioglu, 2023; Oku Topal ve diğerleri, 2023). Son zamanlarda ise düşük maliyetli GNSS alıcı ve anteninden elde edilen gözlemler gerçek zamanlı olarak VA (Varyometrik Yaklaşım) tekniği ile değerlendirilmiştir. Bahadur ve diğerleri, (2024b) gerçekleştirdikleri bir çalışmada düşük maliyetli GNSS alıcı ve anteninden elde edilen gözlemlere dayalı VA tekniğinin kısa süreli ve yatay yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğini ve yönteme çoklu GNSS gözlemlerinin katkısını araştırmış ve düşük maliyetli GNSS alıcılarına dayalı VA tekniğinin YSI ve deprem erken uyarı sistemlerinde destekleyici bir sensör ve algoritma olarak kullanılması için büyük bir potansiyel taşıdığını ifade etmiştir.

Mevcut literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında VA tekniğinin deprem erken uyarı sistemleri için ko-sismik davranışları ve YSI sistemleri için yatay yönlü ve kısa süreli harmonik

davranışları belirleyebilme yeteneğinin değerlendirildiği görülmektedir. Ayrıca, sadece bir çalışmada da çift frekanslı GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğinin değerlendirildiği de görülmektedir. Ancak, bu çalışmada esnek çubuk modelinden yararlanılarak kısıtlı bir frekans ve genlik aralığı incelenmiş, GNSS dışı harici bir referans sensör verisi kullanılmamış ve çift frekanslı jeodezik alıcıdan elde edilen gözlemler değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği de henüz değerlendirilmemiştir. Son olarak, güncel çalışmalarda düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniği sadece geleneksel PPP ve bağıl konum belirleme yöntemleri ile karşılaştırılmış ve yüksek maliyetli jeodezik GNSS alıcısından elde edilen gözlemlere dayalı VADASE tekniği ile karşılaştırmalı bir analiz henüz gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmada, mevcut benzer çalışmalardan farklı olarak ilk defa düşük maliyetli ve SF (tek frekanslı) GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği düşey yönde ve tek ekseninde hareket edebilme yeteneğine sahip bir sarsma tablası kullanılarak incelenmiş ve yöntemin gerçek zamanlı olarak düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği bağıl konum belirleme ve yüksek maliyetli jeodezik GNSS alıcısından elde edilen gözlemlere dayalı VADASE tekniği ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, söz konusu sarsma tablası ile 0.3 ile 3.0 Hz arasında frekans ve 5 ile 30 mm arasında değişen genlik değerlerine sahip 20 adet düşey yönlü harmonik salınımlar üretilmiş ve düşük maliyetli GNSS alıcısı ve anteninden elde edilen tek frekanslı gözlemlere dayalı VA tekniğinin düşey yönlü dinamik hareketleri belirleyebilme yeteneği bağıl konum belirleme ve yüksek maliyetli VADASE sonuçları ile zaman ve frekans alanlarında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmayı mevcut benzerlerinden ayıran bir diğer özellik ise GNSS tabanlı yöntemlerin doğrulanması için GNSS bağımsız bir sensör olan LVDT (Linear Variable Differential Transformer) kullanılmasıdır.

## 2. YÖNTEM

### a. Tek Frekanslı Varyometrik Yaklaşım Modeli

SF-VA tekniği, GNSS alıcısından elde edilen taşıyıcı dalga faz gözlemine ( $L$ ) dayanmaktadır ve  $i$  frekansından uzunluk biriminde elde edilen



taşıyıcı faz gözlemi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$L_{i,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + c(dt_r^s - dT^{s,j}) + T_r^{s,j} - I_{i,r}^{s,j} + \lambda_i^s N_{i,r}^{s,j} + p_{i,r}^{s,j} + \varepsilon(L_{i,r}^{s,j}) \quad (1)$$

Denklem 1'de  $r$  ve  $s$  sırasıyla alıcı ve uydu sistemini ifade ederken,  $j$  uydu numarasını göstermektedir. Ayrıca,  $\rho_r^{s,j}$  alıcı ve uydu arasındaki geometrik uzunluğu,  $dt_r^s$  alıcı saat hatasını,  $dT^{s,j}$  uydu saat hatasını,  $c$  ışık hızını,  $T_r^{s,j}$  troposferik gecikmeyi,  $I_{i,r}^{s,j}$   $i$  frekansı üzerindeki iyonosferik gecikmeyi,  $\lambda_i^s$  ilgili sinyalin dalga boyunu,  $N_{i,r}^{s,j}$  tam sayı belirsizlik parametresini ve  $\varepsilon$  ise gözlemlerdeki gürültü ve çok yollu yansıma etkisini göstermektedir. Bunlara ek  $p_{i,r}^{s,j}$  donanımsal hatalar, rölativistik etkiler, faz merkezi kayıklıkları ve faz dönmesi gibi hata kaynaklarının toplamını ifade etmektedir.

Denklem 1'de ifade edilen tek frekanslı faz gözleminin ardışık iki epok arasındaki tekli farkı alınarak tek frekanslı VA denklemi elde edilmektedir;

$$\Delta L_{i,r}^{s,j} = \Delta \rho_r^{s,j} + c(\Delta dt_r^s - \Delta dT^{s,j}) + \Delta T_r^{s,j} - \Delta I_{i,r}^{s,j} + \Delta \lambda_i^s N_{i,r}^{s,j} + \Delta p_{i,r}^{s,j} + \varepsilon(\Delta L_{i,r}^{s,j}) \quad (2)$$

Denklem 2'de  $\Delta$  ifadesi tekli fark operatörünü belirtmektedir. İlaveten  $\Delta \rho_r^{s,j}$  iki ardışık epok arasındaki geometrik mesafenin değişimini gösterir. Bu terim Dünya dönüşü ve uydu yörünge hareketi kaynaklı yer değiştirmelerinin ( $[\Delta \rho_r^{s,j}]_{OR}$ ) yanı sıra okyanus yüklemesi ve katı Yer gelgiti kaynaklı yer değiştirmeleri ( $[\Delta \rho_r^{s,j}]_{EtOl}$ ) de içermektedir. Ardışık epoklar arasındaki alıcı, üç boyutlu (3B) bir yer değiştirme yaptığı için ilgili terim okyanus yüklemesi ve katı yer gelgiti kaynaklı yer değiştirmelere ilaveten görüş hattı vektörü boyunca ifade edilen 3B yer değiştirmeleri de içerecektir ( $e_r \Delta \xi_r$ ). Burada  $e_r$  ilgili epokta alıcı ile uydu arasındaki birim vektörünü,  $\Delta \xi_r$  ise Yer merkezli Yer sabit koordinat sistemindeki 3B yer değiştirmeleri ifade etmektedir. Faz gözlemleri, döngü kaymasından bağımsız düşünüldüğünde ardışık epoklar arasında faz belirsizlik parametresi sabit olarak düşünülebilir. Bu durum sonucunda ardışık epoklar arasında fark alınması faz belirsizlik parametresinin etkisinin göz ardı edilmesini sağlamaktadır. Kısa periyotlardaki düşük iyonosferik aktivite göz önünde bulundurularak fark alındığında faz gözlemi içerisindeki iyonosferik etki de benzer şekilde göz ardı edilebilmektedir. Bu bilgiler dikkate

alındığında Denklem 2 aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$\Delta L_{i,r}^{s,j} = (e_r \Delta \xi_r + c \Delta dt_r^s) + ([\Delta \rho_r^{s,j}]_{OR} - c \Delta dT^{s,j} + \Delta T_r^{s,j}) + ([\Delta \rho_r^{s,j}]_{EtOl} + \Delta p_{i,r}^{s,j}) + \varepsilon(\Delta L_{i,r}^{s,j}) \quad (3)$$

Yukarıdaki denklem tek frekanslı varyometrik yaklaşım yönteminin gözlem modelini temsil etmekte ve üç boyutlu yer değiştirme bileşenleri ile alıcı saat hatasındaki değişimi içeren toplam dört bilinmeyen parametreyi kapsar.  $[\Delta \rho_r^{s,j}]_{OR} - c \Delta dT^{s,j} + \Delta T_r^{s,j}$  bölümü, saat ve uydu yörünge bilgilerinin yanı sıra troposferik gecikme modeli vasıtasıyla elde edilebileceği için bilinmeyen parametrelere dahil edilmez. Ayrıca  $[\Delta \rho_r^{s,j}]_{EtOl} + \Delta p_{i,r}^{s,j}$  kısmı da standart model ve düzeltmeler kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem 3'te tahmin edilen parametreler en küçük kareler yöntemiyle elde edilmektedir. En küçük kareler yöntemini uygulamak ve dört bilinmeyen parametreyi tahmin edebilmek için en az dört uydudan gözlemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

## b. PPPH-VA

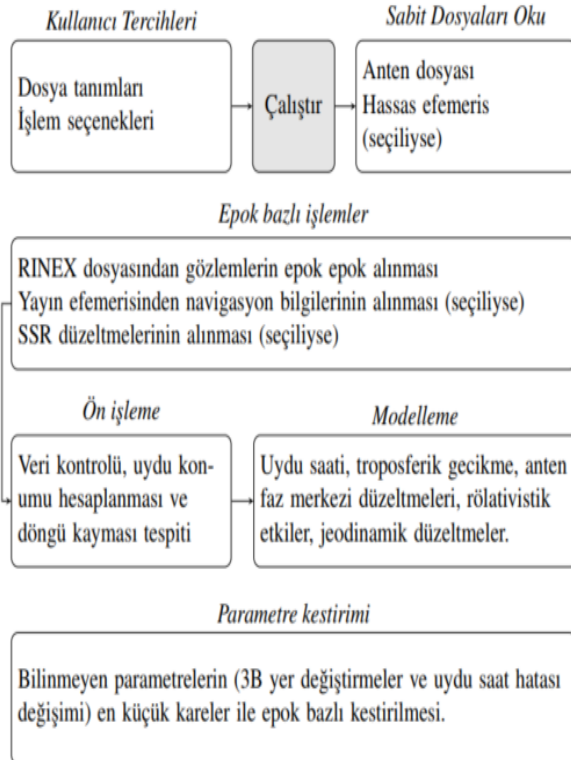
Düşük maliyetli GNSS alıcısından alınan gözlemleri gerçek zamanlı olarak değerlendirmek için MATLAB tabanlı açık kaynak kodlu PPPH-VA yazılım paketi kullanılmıştır. Bahadır ve diğerleri, (2024a) tarafından geliştirilen PPPH-VA yazılımı çift frekanslı gözlemlerin yanı sıra tek frekanslı çoklu GNSS gözlemlerini hem gerçek zamanlı hem de sonradan değerlendirme modunda çözebilmektedir. PPPH-VA yazılım paketi Veri Aktarma, Ön İşleme ve Modelleme, Atmosfer ve Analiz olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır. İlk üç bölüm gerçek zamanlı varyometrik yaklaşım çözümlerini gerçekleştirmek için gereken modelleri ve ilişkili parametreleri içerirken, son bölüm çözümler sonrası elde edilen sonuçları değerlendirmek ve görselleştirmek içindir.

PPPH-VA yazılım paketinde ilk bölüm olan Veri Aktarma kısmında, yazılım gerekli navigasyon dosyalarını belirlemektedir. Varyometrik yaklaşım için yörünge ve saat kaynağı olarak yayın efemerisine ilaveten, IGS (International GNSS Service) gerçek zamanlı ürünleri ve ultra hızlı ürünler de kaynak seçenekleri arasında yer almaktadır. Yazılım paketinde ikinci bölüm olan Ön İşleme ve Modelleme bölümü, navigasyon dosyalarından elde edilen ham verilerin aykırı değer, faz sıçraması ve saat tutarsızlıkları gibi tespitlerin yanı sıra hata kaynaklarının GNSS gözlemleri üzerindeki etkilerinin azaltılmasından sorumludur. Atmosfer sekmesinde troposferik

gecikmenin düzeltilmesi için Saastamoinen (1972) modelinin yanı sıra VMF1 (Vienna Mapping Function 1) ve VMF3 (Vienna Mapping Function 3)'ün ızgara (grid) ürünleri de kullanılabilmektedir (Boehm ve diğerleri, 2004; Landskron ve Böhm, 2018). Bu troposfer modellerinin uygulanmasında gerekli olan atmosferik parametreler için GPT2 (Global Pressure and Temperature 2) ve GPT3 (Global Pressure and Temperature 3) modelleri kullanılabilmektedir (Lagler ve diğerleri, 2013; Landskron ve Böhm, 2018). Ayrıca, troposferik ızdüşüm fonksiyonu için VMF1, VMF3 ve GMF (Global Mapping Function) olmak üzere üç farklı seçenek bulunmaktadır. Burada, varyometrik süreçler için kullanılan çok kısa periyotlarda (1 Hz veya daha yüksek) iyonosferik değişim oldukça kısıtlı olduğundan söz etmek gerekmektedir. Bu yüzden tek frekanslı varyometrik yaklaşım için iyonosfer düzeltilmesine ihtiyaç yoktur. Analiz sekmesinde ise varyometrik işlem sona erdikten sonra değerlendirme ve görselleştirme amacıyla çeşitli analizler yapılabilmektedir. Şekil 1 varyometrik çözüm için uygulanan genel akış şemasını, Tablo 1 ise PPPH-VA yazılımında varyometrik işlem aşamasında uygulanan düzeltme modellerini göstermektedir.

Tablo 1. PPPH-VA yazılımında varyometrik çözüm için uygulanan düzeltme yaklaşımları.

| Hata kaynağı                           | Düzeltilme yaklaşımı                                                                                                    |                         |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Uydu yörünge ve saat bilgisi           | Yayın efemerisi ya da IGS-RTS düzeltmeleri                                                                              | Ultra hızlı ürünler     |
| Uydu anten faz merkezi                 | -                                                                                                                       | IGS mutlak anten modeli |
| Faz dönmesi                            | Düzeltilme uygulanır (Wu ve diğerleri, 1993)                                                                            |                         |
| Troposfer                              | Kullanıcı tercihine göre düzeltilir, standart olarak GPT3/VMF3 (Landskron ve Böhm, 2018) ile Saastamoinen (1972) modeli |                         |
| Alıcı anten faz merkezi                | IGS mutlak anten modeli                                                                                                 |                         |
| Rölativistik etkiler                   | Düzeltilme uygulanır (Kouba, 2015)                                                                                      |                         |
| Katı Yer gelgiti ve atmosfer yüklemesi | Düzeltilme uygulanır (Petit ve Luzum, 2010)                                                                             |                         |



Şekil 1. PPPH-VA yazılımında varyometrik çözüm için genel akış şeması.

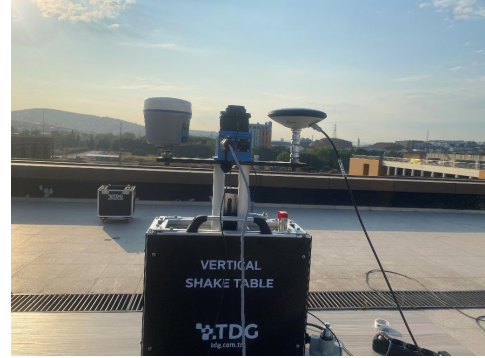
### 3. DENEY TASARIMI

Çalışmanın bu bölümü düşey yönlü dinamik hareketleri izlemek için GNSS gözlemlerinin gerçek zamanlı olarak elde edilmesini ve gerçekleştirilen harmonik salınım deneylerinin tasarımını içermektedir. Çalışma kapsamında tasarlanan harmonik salınım deneyleri, 11 Temmuz 2023 tarihinde Gebze Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği bölümünün çatısında gerçekleştirilmiştir. Harmonik salınım deneylerinde, toplam yer değiştirmesi 70 mm ve maksimum hızı 400 mm/sn olan düşey yönlü sarsma tablası kullanılmıştır. Tablanın yer değiştirme hareketi bilgileri, hareketli platformun altında gömülü şekilde bulunan 100 Hz frekansa ve mm altı hassasiyete sahip LVDT sensörü ile elde edilmiştir. Sarsma tablası üzerine 3 adet GNSS anteni monte edilmiştir. Bu antenlerden ilki yüksek maliyetli gerçek zamanlı VADASE çözümleri için kullanılmak üzere Leica GR30 alıcısı için gözlem toplayan Leica AS 11 antenidir. İkinci anten, bağıl konum belirleme çözümleri için anten ile bütünleşik durumda olan CHC I80 jeodezik GNSS alıcısıdır. Son anten ise, düşük maliyetli varyometrik yaklaşım çözümlerinde kullanılan düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcısı için gözlem toplayan u-blox ANN-MB-00-00 antenidir. Bu üç alıcı ve antenlere ilaveten, yine bir CHC I80 jeodezik GNSS alıcısı bağıl konum belirleme çözümleri için sarsma tablasından

yaklaşık 20 m mesafedeki daha önceden konumu belirlenmiş bir noktaya kurulmuştur. Şekil 2, çalışma için kullanılan sarsma tablasını ve GNSS antenlerini göstermektedir.

Tek frekanslı düşük maliyetli varyometrik yaklaşımın düşey yönlü dinamik hareketleri gerçek zamanlı olarak yakalayabilme yeteneğinin değerlendirilmesi amacıyla, yapıların olası genlik ve frekans değerlerini temsil eden 20 adet harmonik salınım deneyi tasarlanmıştır. Üretilen harmonik salınımların frekansları 0.3 ile 3 Hz arasında, frekanslara karşılık gelen genlik değerleri ise 5 ile 30 mm arasında değişmektedir. Tablo 2, üretilen harmonik salınımların genlik ve frekans bilgilerini göstermektedir. Çalışmada kullanılan sarsma tablası 0 ile 5 Hz frekans değerleri aralığında ve maksimum 35 mm'ye kadar genlik değerinde harmonik salınımlar üretilebilmektedir. Sarsma tablası ile 5 Hz frekans ve 35 mm genlik değerine sahip salınım da üretilebilir fakat yüksek frekans ve yüksek genlik

durumunda sarsma tablasının mekanik olarak zarar görme ihtimali bulunmaktadır. Bu yüzden, çalışmada düşük frekanslarda yüksek genlik değerlerine sahip salınımlar üretilmişken yüksek frekanslarda düşük genlikli salınımlar üretilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan sarsma tablası ve GNSS antenleri.

Tablo 2. Harmonik salınım deneylerinin genlik ve frekans bilgileri.

| Deney No     | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Frekans (Hz) | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 3.0 | 3.0 |
| Genlik (mm)  | 5   | 10  | 20  | 30  | 5   | 10  | 20  | 30  | 5   | 10  | 20  | 30  | 5   | 10  | 15  | 5   | 10  | 15  | 5   | 10  |

#### 4. HARMONİK SALINIM DENEYİ SONUÇLARI

##### a. Yer Değiştirme Farkı Sonuçları

Yüksek maliyetli Leica GR30 alıcı ve AS11 anteninden elde edilen gözlemlere dayalı VADASE ve düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcı ve ANN-MB-00 antenine dayalı Varyometrik Yaklaşım yöntemlerinden türetilen epoklar arası yer değiştirme sonuçları çalışmanın bu bölümünde tartışılacaktır. VADASE ve VA algoritmaları yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği üzere ardışık epoklar arası farkları alarak gerçek zamanlı dinamik deformasyonları tespit imkânı sağlamaktadır. Ardışık epoklar arası farklar GNSS gözlemlerinde meydana gelen iyonosfer, troposfer, uydu ve alıcı saati, sinyal yansıma, anten faz merkezi hatası ve değişimi gibi bazı sistematik hataları elimine etmektedir, ancak bu hataların artık kısımları uzun dönemde dalgalanmalara sebep olmaktadır (Bezcioglu ve diğerleri, 2022b). Bu uzun süreli dalgalanmalar her ne kadar kısa süreli harmonik hareketlerin frekansını tespit etme uygulamalarında bir problem olmasa da zaman alanında yer değiştirme zaman serilerini incelerken bir yapının sinyali olmayan uzun periyotlu dalgalanmaların varlığına sebep olmaktadır. Bu etkilerin giderilmesi için yüksek geçirgenli filtreleme

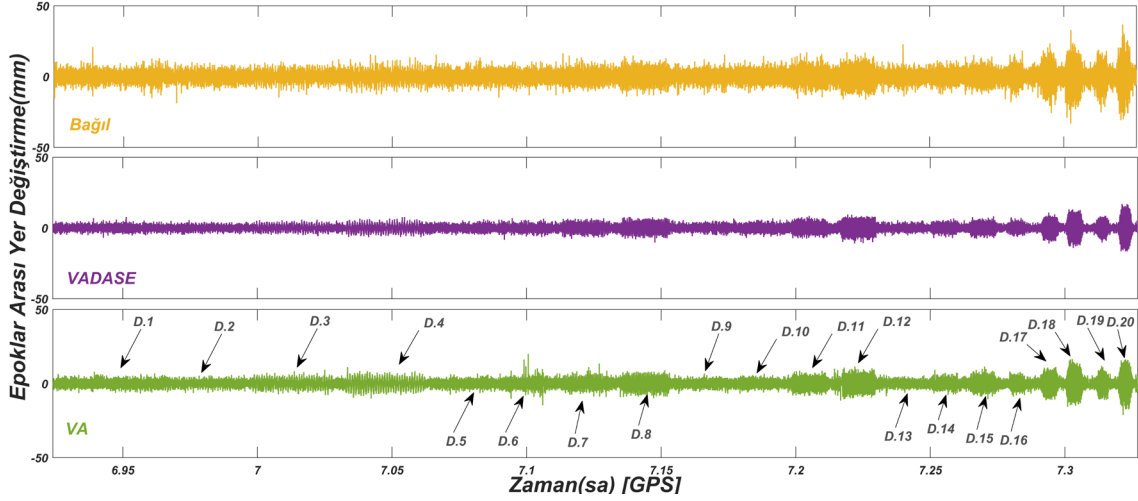
genellikle uygulanan bir yöntemdir (Yigit ve diğerleri, 2021). Buna ek olarak, gerçek zamanlı uygulamalarda filtreleme işlemi yerine VADASE ve VA tekniklerinden elde edilen epoklar arası yer değiştirme bilgileri de kısa süreli dinamik davranışları elde etmek için kullanılabilir (Bezcioglu ve diğerleri, 2022a). Bu nedenle, çalışma kapsamında incelenen GNSS tabanlı tekniklerin performansını daha detaylı incelemek için filtreleme gerektirmeyen epoklar arası yer değiştirme farkı değerleri de analiz edilmiştir. Burada epoklar arası yer değiştirme değerlerinin VADASE veya VA tekniğinin GNSS kullanıcılarına sağladığı ham değerler olduğu ve ilgili yöntemler ile doğrudan gerçek zamanlı olarak elde edildiğinin altı bir kez daha çizilmelidir. İlgili değerler yukarıda da bahsedildiği gibi uzun süreli dalgalanmaların etkisini içermediği için GNSS kullanıcılarına gerçek zamanlı uygulamalarda herhangi bir filtreleme kullanmadan hem frekans hem de zaman alanında incelemeler ve değerlendirme imkânı sağlamaktadır.

Şekil 3 deneyler sırasında bağlı, VADASE ve VA tekniklerinden elde edilen epoklar arası yer değiştirme zaman serilerini görselleştirmektedir. Görüldüğü üzere epoklar arası yer değiştirme zaman serileri uzun periyotlu dalgalanma etkisi içermemekte ve sadece sıfır eksenini etrafında



salınımlar gösteren bir yapıya sahiptir. Kısacası, yer değiştirme farkı zaman serileri sadece dinamik hareketleri ve GNSS öz gürültüsünü içermektedir. Şekil 3 incelendiğinde VADASE ve VA sonuçlarının birbirine yakın olduğu fakat bağıl sonuçların daha gürültülü olduğu görülebilir.

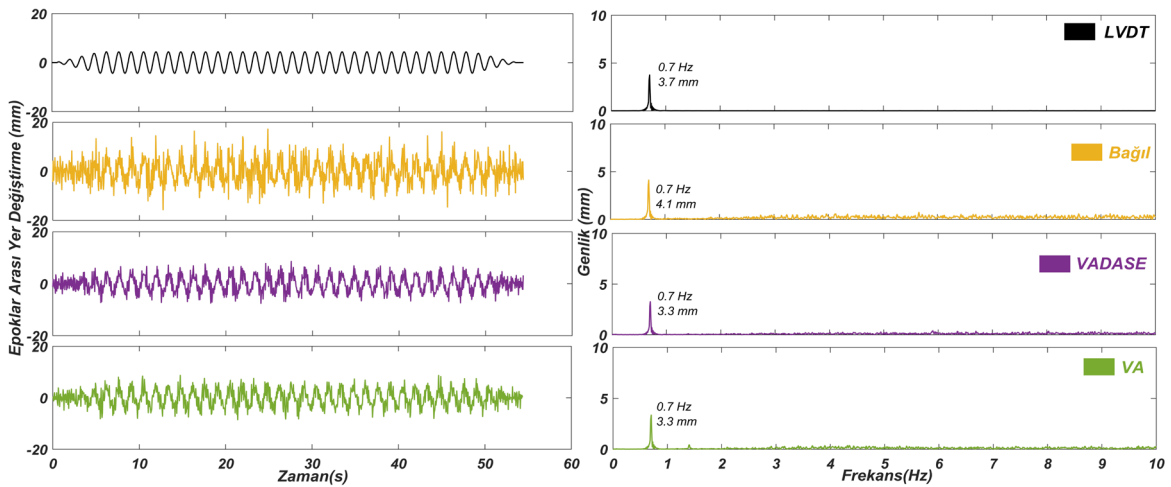
Bunun sebebi VADASE ve VA yöntemlerinde tek GNSS alıcısı/anteni kullanılırken, bağıl yöntemde 2 GNSS alıcısı ve anteni kullanılmasıdır. Bu nedenle bağıl yöntemin gürültüsü diğer iki yöntemden daha fazladır (Bezciolu ve diğerleri, 2022b).



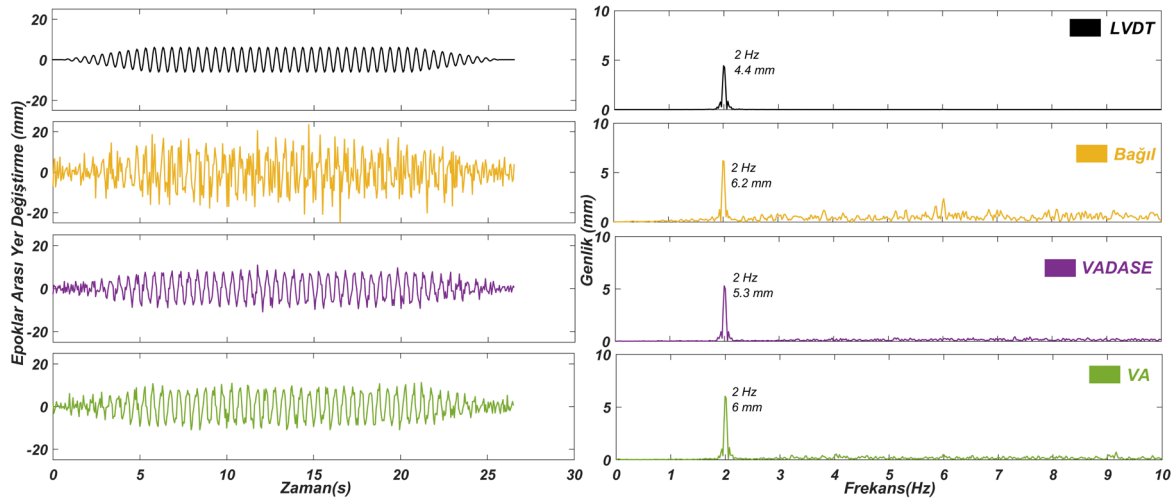
Şekil 3. Yer değiştirme farkı zaman serisi.

Yöntemlerin zaman ve frekans alanında görsel olarak karşılaştırması için deney 11 ve 17 temsili durumlar olarak seçilmiş ve ilgili deneylerde GNSS tabanlı teknikler ve referans LVDT sensöründen elde edilen zaman serileri ve karşılık gelen FFT (Fast Fourier Transform) spektrumları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te ifade edilmiştir. Her iki şekilden düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı olarak elde edilen VA epoklar arası yer değiştirme zaman serilerinin referans LVDT sensörü ve bağıl zaman serileri ile güçlü bir uyum sergilediği görülebilir. Ayrıca, VA zaman serileri yüksek maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı olarak

elde edilen VADASE zaman serileri ile de son derece tutarlıdır. Frekans alanında ise tüm GNSS tabanlı yöntemlerin söz konusu iki deneyde de baskın frekans değerlerini başarılı bir şekilde tespit edebildiği açıkça görülmektedir. Ancak, baskın frekans değerine karşılık gelen genlik değerlerinde küçük farklılıklar olduğu belirtilmelidir. Ancak bu farklılıkların VA tekniği için 1.6 mm değerinden yüksek olmadığı göz önüne alındığında düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin kısa süreli harmonik salınımları tespit edebilme başarısı açıktır.



Şekil 4. Deney 11 için yer değiştirme farkı zaman serisi ve FFT sonuçları.



Şekil 5. Deney 17 için yer değiştirme farkı zaman serisi ve FFT sonuçları.

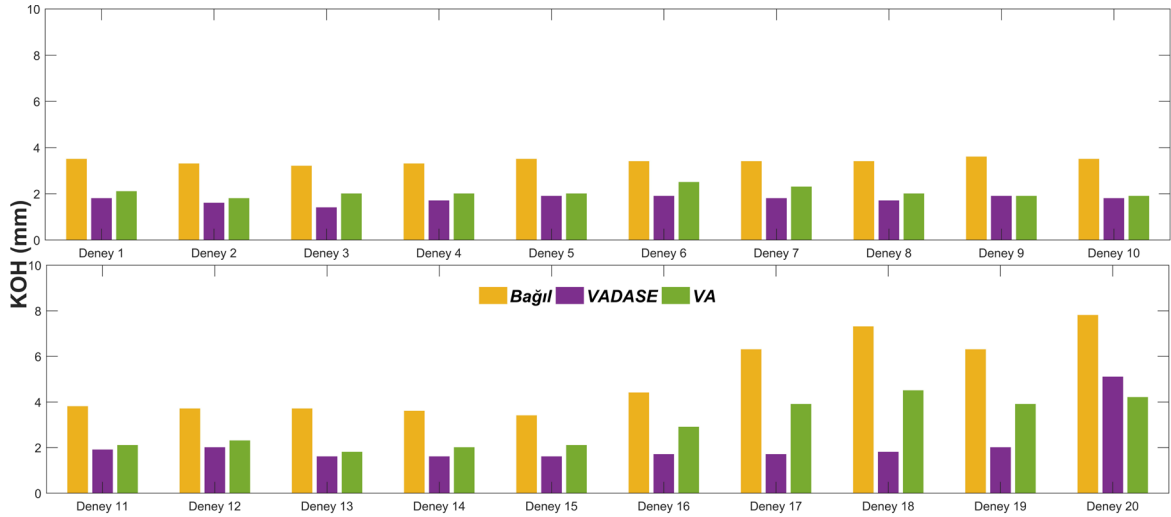
GNSS tabanlı yöntemlerin kısa süreli dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğini daha detaylı incelemek ve frekans alanına ek olarak zaman alanında da karşılaştırılabilmesi için, referans LVDT sensöründen elde edilen epoklar arası yer değiştirme değerleri ile GNSS tabanlı tekniklerden elde edilen değerler arasındaki farkların maksimum değeri ve KOH (Karesel Ortalama Hataları) hesaplanmıştır (Tablo 3). Ayrıca, ilgili yöntemlerin zaman alanındaki performansını daha detaylı vurgulamak için KOH değerlerinin bar grafiği olarak Şekil 6'da görselleştirilmiştir. Tablo 3 ve Şekil 6'dan da görüldüğü üzere VADASE ve VA yöntemleri bağıl tekniğinden beklenildiği üzere daha düşük KOH değerlerine sahiptir. Bağıl konum belirleme tekniğinden elde edilen KOH değerleri 3.2 ile 7.8 mm arasında değişirken VADASE yönteminde 1.4 mm ile 5.1 mm arasında, VA yönteminde 1.8 mm ile 4.5 mm arasında değişmektedir. VADASE ve VA değerleri karşılaştırıldığında VADASE yöntemiyle elde edilen KOH değerleri VA yöntemine göre aralarında çok büyük fark olmamakla birlikte kısmen daha düşüktür. Bu farkın sebebi VADASE sonuçları yüksek maliyetli jeodezik alıcı ve anteninden elde edilirken, VA sonuçlarının düşük maliyetli GNSS alıcı ve anteninden elde edilmesidir.

Epoklar arası yer değiştirme alanında çalışma kapsamında değerlendirilen tüm GNSS tabanlı yöntemlerden FFT analizi ile elde edilen baskın frekans ve karşılık gelen genlik değerleri Tablo 4'te verilmiştir. GNSS yöntemlerinin frekans alanındaki performansı incelendiğinde tüm GNSS yöntemlerinin harmonik hareketlerin frekansını başarılı bir şekilde yakaladığı görülmektedir. Baskın frekans değerine karşılık gelen genlikleri

incelendiğinde ve LVDT ile karşılaştırıldığında GNSS yöntemlerinin düşük frekanslarda benzer fakat frekans yükseldikçe VADASE ve VA yöntemlerinin bağıl yöntemine göre kısmen LVDT sonuçlarına daha yakın olduğu görülmektedir. Tüm deneyler göz önüne alındığında VADASE tekniği karşılık gelen genlik değerlerini 0.1 ile 3.7 mm arasında farkla tespit ederken, VA tekniği 0.0 ile 3.4 mm arasında tespit etmiştir. VADASE ve VA tekniklerinin elde ettiği genlik farklılıkları her iki teknik için de 0.6 mm'dir. Bu sonuçlar, düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin frekans alanındaki başarısını açıkça göstermektedir.

Tablo 3. Yer değiştirme farkı alanı için deneylerin numaraları (DN), KOH (mm) ve maksimum (mm) değerleri.

| DN | BAĞIL |     | VADASE |     | VA    |     |
|----|-------|-----|--------|-----|-------|-----|
|    | Maks. | KOH | Maks.  | KOH | Maks. | KOH |
| 1  | 20.4  | 3.5 | 7.4    | 1.8 | 7.5   | 2.1 |
| 2  | 18.1  | 3.3 | 5.4    | 1.6 | 6.0   | 1.8 |
| 3  | 12.8  | 3.2 | 5.8    | 1.4 | 8.4   | 2.0 |
| 4  | 13.6  | 3.3 | 6.0    | 1.7 | 9.0   | 2.0 |
| 5  | 14.2  | 3.5 | 5.9    | 1.9 | 7.3   | 2.0 |
| 6  | 14.9  | 3.4 | 9.1    | 1.9 | 20.3  | 2.5 |
| 7  | 16.1  | 3.4 | 7.1    | 1.8 | 10.5  | 2.3 |
| 8  | 13.9  | 3.4 | 6.0    | 1.7 | 8.6   | 2.0 |
| 9  | 14.9  | 3.6 | 6.3    | 1.9 | 6.7   | 1.9 |
| 10 | 13.9  | 3.5 | 5.8    | 1.8 | 5.8   | 1.9 |
| 11 | 13.3  | 3.8 | 6.8    | 1.9 | 8.0   | 2.1 |
| 12 | 12.1  | 3.7 | 7.2    | 2.0 | 8.7   | 2.3 |
| 13 | 21.3  | 3.7 | 5.4    | 1.6 | 5.3   | 1.8 |
| 14 | 11.4  | 3.6 | 4.7    | 1.6 | 8.2   | 2.0 |
| 15 | 12.9  | 3.4 | 5.4    | 1.6 | 9.5   | 2.1 |
| 16 | 18.0  | 4.4 | 5.3    | 1.7 | 8.7   | 2.9 |
| 17 | 22.4  | 6.3 | 6.5    | 1.7 | 10.6  | 3.9 |
| 18 | 26.0  | 7.3 | 5.1    | 1.8 | 11.6  | 4.5 |
| 19 | 21.5  | 6.3 | 5.7    | 2.0 | 10.6  | 3.9 |
| 20 | 28.4  | 7.8 | 11.4   | 5.1 | 12.1  | 4.2 |



Şekil 6. Epoklar arası yer değiştirme alanı için deneylerden elde edilen KOH değerleri.

Genel olarak, epoklar arası yer değiştirme alanında elde edilen bulgular düşük maliyetli GNSS alıcı ve antenlerinin gerçek zamanlı dinamik deformasyonların tespiti uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılabileceğini açıkça

göstermekte ve düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin YSİ sistemlerine başarılı bir şekilde entegre edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 4. Yer değiştirme farkı alanı için deneylerin frekans (Hz) ve genlik (mm) değerleri.

| Deney No | LVDT    |        | BAĞIL   |        | VADASE  |        | VA      |        |
|----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|          | Frekans | Genlik | Frekans | Genlik | Frekans | Genlik | Frekans | Genlik |
| 1        | 0.3     | 0.4    | 0.3     | 0.4    | 0.3     | 0.3    | 0.3     | 0.2    |
| 2        | 0.3     | 0.8    | 0.3     | 0.9    | 0.3     | 0.6    | 0.3     | 0.8    |
| 3        | 0.3     | 1.6    | 0.3     | 1.7    | 0.3     | 1.5    | 0.3     | 1.9    |
| 4        | 0.3     | 2.4    | 0.3     | 2.3    | 0.3     | 2.1    | 0.3     | 3.2    |
| 5        | 0.5     | 0.7    | 0.5     | 0.7    | 0.5     | 0.6    | 0.5     | 0.9    |
| 6        | 0.5     | 1.4    | 0.5     | 1.3    | 0.5     | 1.2    | 0.5     | 1.4    |
| 7        | 0.5     | 2.8    | 0.5     | 2.8    | 0.5     | 2.5    | 0.5     | 2.3    |
| 8        | 0.5     | 4.1    | 0.5     | 4.6    | 0.5     | 4.0    | 0.5     | 4.0    |
| 9        | 0.7     | 0.9    | 0.7     | 1.0    | 0.7     | 0.8    | 0.7     | 0.7    |
| 10       | 0.7     | 1.9    | 0.7     | 2.1    | 0.7     | 1.6    | 0.7     | 1.5    |
| 11       | 0.7     | 3.7    | 0.7     | 4.1    | 0.7     | 3.3    | 0.7     | 3.3    |
| 12       | 0.7     | 5.6    | 0.7     | 6.2    | 0.7     | 5.1    | 0.7     | 4.7    |
| 13       | 1.0     | 1.3    | 1.0     | 1.5    | 1.0     | 1.1    | 1.0     | 0.9    |
| 14       | 1.0     | 2.6    | 1.0     | 3.0    | 1.0     | 2.3    | 1.0     | 2.3    |
| 15       | 1.0     | 3.8    | 1.0     | 4.6    | 1.0     | 3.4    | 1.0     | 3.6    |
| 16       | 2.0     | 2.2    | 2.0     | 4.1    | 2.0     | 2.5    | 2.0     | 3.0    |
| 17       | 2.0     | 4.4    | 2.0     | 6.2    | 2.0     | 5.3    | 2.0     | 6.0    |
| 18       | 2.0     | 6.7    | 2.0     | 8.2    | 2.0     | 7.8    | 2.0     | 8.7    |
| 19       | 3.0     | 3.1    | 3.0     | 5.7    | 3.0     | 4.7    | 3.0     | 5.2    |
| 20       | 3.0     | 6.2    | 3.0     | 11.3   | 3.0     | 9.9    | 3.0     | 9.6    |

## b. Yer değiştirme Sonuçları

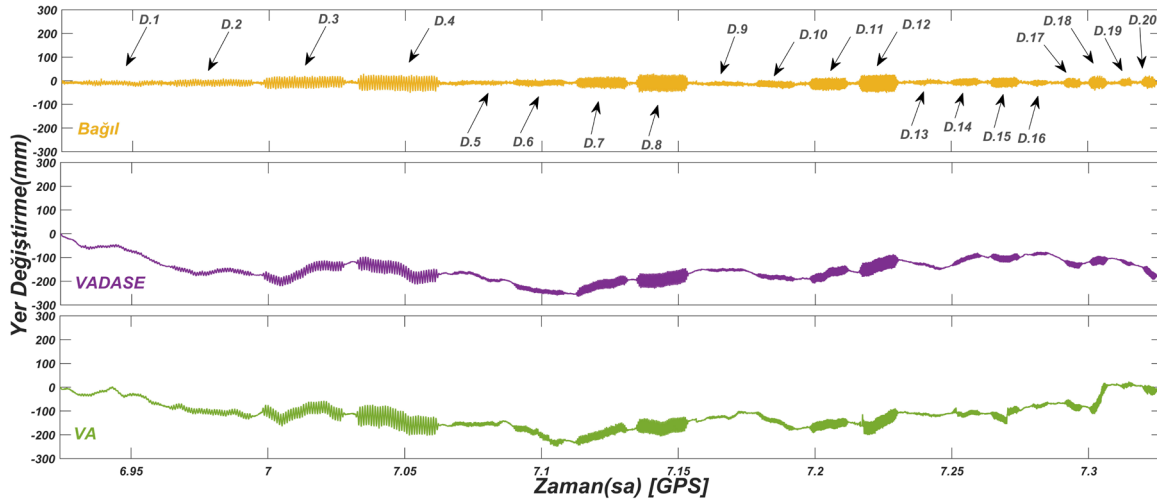
Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları tespit edebilme yeteneği bu bölümde tartışılmaktadır. Burada, bir önceki alt başlığa benzer bir şekilde VA tekniğinin yeteneğinin, yüksek maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VADASE ve bağıl konum

belirleme teknikleri ile karşılaştırmalı bir yaklaşım ile değerlendirildiğini ifade etmek gerekmektedir. Ayrıca referans LVDT sensörünün örneklem aralığı 100 Hz olduğu için adil bir karşılaştırma gerçekleştirmek amacıyla ilgili sensör verileri 20 Hz örneklem aralığına yeniden örneklenmiştir. Şekil 7, çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde GNSS tabanlı yaklaşımlardan elde

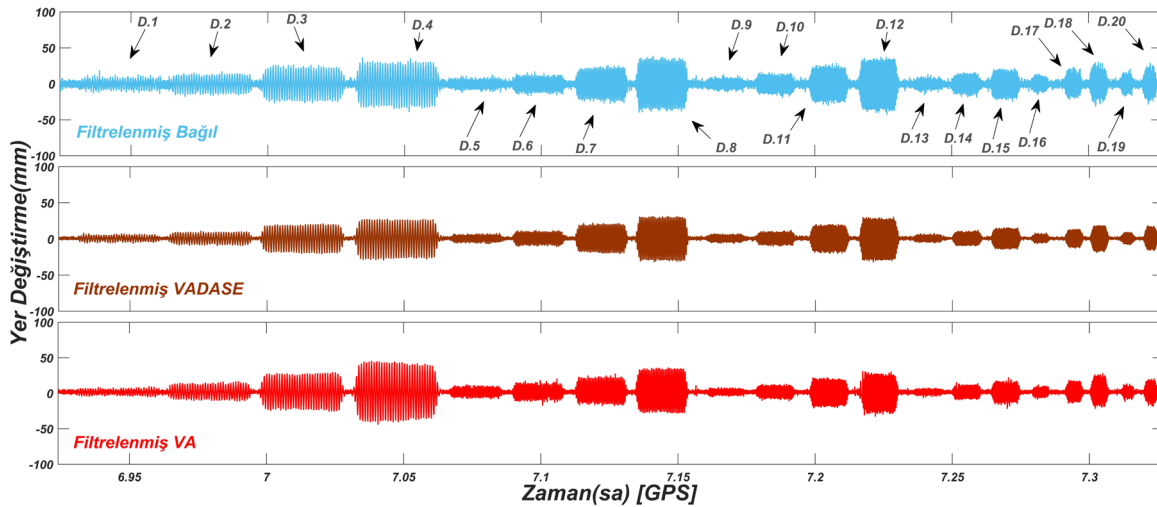


edilen yer değiştirme zaman serilerini göstermektedir. Burada bağıl yöntemin zaman serilerinin doğrudan elde edildiğini, VADASE ve VA zaman serilerinin ise ilgili tekniklerden elde edilen epoklar arası yer değiştirme değerlerinin entegrasyonu ile türetildiğini ayrıca belirtmek gerekmektedir. Şekilden, bağıl yöntemin uzun periyotlu dalgalanma içermediği ancak VA ve VADASE yöntemlerinde uzun süreli ve düşük frekanslı dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmalar bir önceki alt başlıkta da bahsedildiği gibi ilgili yöntemlerin doğası gereğidir. Ek olarak, 60-30 sn gibi kısa bir zaman dilimi için dinamik yer değiştirme inceleniyorsa bu dalgalanmalar önemsizdir, ancak uzun süreli davranışların önemli olması durumunda ve ayrıca bir doğal afet ya da yük sonucu bir yapıda meydana gelen hasarın detaylı incelenmesi durumunda bu dalgalanmaların ortadan

kaldırılması gerekebilir. Bu nedenle, söz konusu düşük frekanslı dalgalanmaları ortadan kaldırmak amacıyla VA ve VADASE'den türetilen yer değiştirme zaman serileri 5. dereceden yüksek geçirgenli Butterworth filtre kullanılarak filtrelenmiştir. İlgili filtrenin kesme açısı ise 0.25 Hz olarak belirlenmiştir. GNSS tabanlı yaklaşımlar arasında adil bir karşılaştırma gerçekleştirmek amacıyla aynı filtreleme işlemi bağıl yönteme de uygulanmıştır. Filtrelenmiş zaman serileri ise Şekil 8'de görselleştirilmiştir. Filtrelenmiş zaman serileri incelendiğinde, VA ve VADASE zaman serilerindeki dalgalanmaların ortadan kalktığı ve üç zaman serisinin de birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, VA zaman serisinde hala kısa süreli dalgalanmaların olduğu da görülmektedir. Bu davranışların sebebi düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcı ve ANN-MB-00 antenin sahip olduğu gürültü ile doğrudan ilişkilidir.



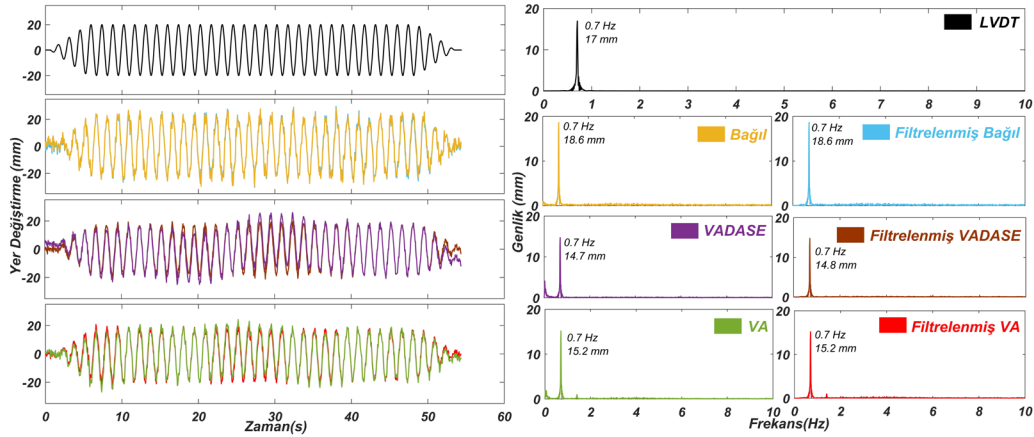
Şekil 7. Yer değiştirme zaman serisi.



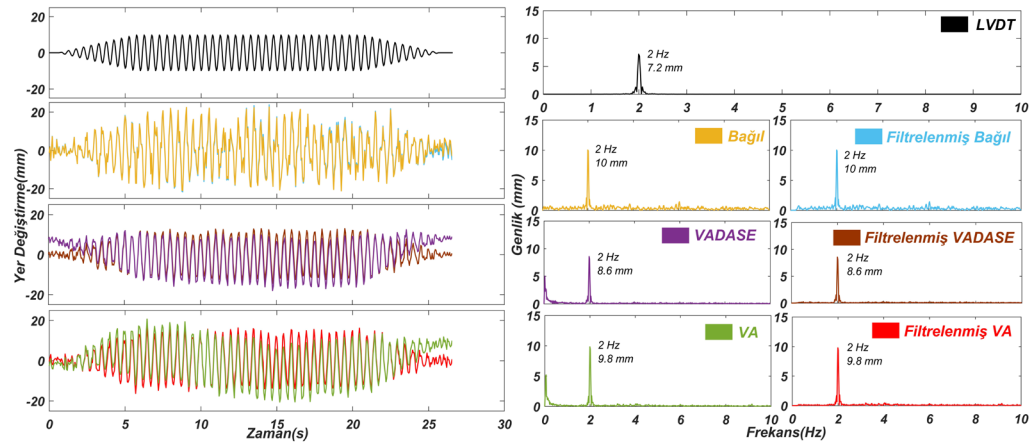
Şekil 8. Filtrelenmiş yer değiştirme zaman serisi.

Yöntemlerin zaman ve frekans alanlarındaki karşılaştırmalarını görsel olarak da değerlendirmek amacıyla çalışma kapsamında planlanan deneylerden iki tanesi örnek olarak seçilmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10 sırasıyla 11 ve 17 numaralı deneyler için bağıl yöntem, VADASE ve VA tekniklerinden elde edilen filtrelenmemiş ve filtrelenmiş zaman serileri ve karşılık gelen FFT spektrumlarını göstermektedir. İlgili şekiller incelendiğinde, zaman serilerinin birbirleri ile tutarlı oldukları ve yöntemlerden tespit edilen salınım frekanslarının eşit olduğu görülmektedir. Baskın frekans değerine karşılık gelen genlik değerlerinde ise küçük farklar vardır. Bağıl ve LVDT arasındaki genlik farkları deney 11 için 1.7 mm iken, deney 17 için 2.8 mm'dir. VADASE ve LVDT arasındaki genlik farkları ise deney 11 için 2.3 mm iken, deney 17 için 1.4 mm'dir. Ayrıca, VA ve LVDT arasındaki farklar ise deney 11 için 1.8 mm iken, deney 17 için 2.6 mm'dir. İlgili örnekler incelendiğinde, filtreleme işlemi sonucunda GNSS tabanlı yaklaşımlardan elde edilen baskın frekans değerinin değişmediği açıkça görülmektedir.

Tablo 5, çalışmada tasarlanan tüm deneyler için referans LVDT sensörü ve GNSS tabanlı yöntemlerden FFT analizi ile elde edilen baskın frekans ve karşılık gelen genlik değerlerinin filtrelenmemiş ve filtrelenmiş sonuçlarını göstermektedir. Tüm deneyler göz önünde bulundurulduğunda, GNSS tabanlı yöntemlerin tüm deneylerin baskın frekans değerini başarılı bir şekilde tespit edebildiği açıktır. Buna ek olarak, karşılık gelen genlik değerlerinde küçük farklılıklar olduğu belirtilmelidir. Bağıl yöntemden elde edilen genlik değerleri ile LVDT'den elde edilenler arasında 0.2 ile 5.6 mm arasında farklar bulunurken, VADASE için bu değerler 0.2 ile 4.1 mm arasında değişmektedir. VA tekniğinin tespit ettiği genlik değerlerinin referans LVDT sensöründen olan farkları ise 0.2 ile 8.2 mm arasında değişmektedir. Bağıl, VADASE ve VA tekniklerinden elde edilen genlik farklarının ortalaması ise sırasıyla 1.7, 1.5 ve 2.2 mm'dir. Filtrelenmiş sonuçlar incelendiğinde ise yöntemlerden elde edilen tepe frekansının tüm deneyler için değişmediği görülmektedir.



Şekil 9. Deney 11 yer değiştirme zaman serisi ve FFT sonuçları.



Şekil 10. Deney 17 yer değiştirme zaman serisi ve FFT sonuçları.

Bu duruma ilaveten, tepe frekansına karşılık gelen genlik değerlerinde de dramatik bir değişim olmadığı ancak bazı deneylerde GNSS tabanlı yöntemlerden elde edilen genlik değerinin kısmen LVDT'ye yaklaştığı göze çarpmaktadır. Bu bulgular frekans alanında tepe frekansa karşılık gelen genlik değerlerinin yakalanması filtreleme işleminin sonuçlara az da olsa olumlu şekilde etki ettiğini göstermektedir. Frekans alanında elde edilen bu sonuçlar ise genel olarak düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin yüksek maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğine oldukça güçlü bir alternatif olduğuna ve düşük maliyetli GNSS alıcı ve antenleri ile bir yapının doğal frekans değerinin başarılı bir şekilde tespit edilebileceğine açıkça işaret etmektedir.

GNSS tabanlı yöntemlerin kısa süreli dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğini daha da derinlemesine incelemek ve tartışmak için, referans LVDT sensöründen elde edilen yer değiştirme değerleri ile GNSS tabanlı tekniklerden

elde edilen değerler arasındaki farkların istatistikleri de elde edilmiştir. Tablo 6, çalışma kapsamında tartışılan yöntemler ile LVDT arasındaki farkların maksimum hata ve KOH değerlerini özetlerken, Şekil 11 filtrelenmiş ve filtrelenmemiş bağıl, VADASE ve VA tekniklerinden elde edilen KOH değerlerini görselleştirmektedir. Tablo ve şekilden, bağıl yöntem için KOH değerlerinin 2.7 ile 6.8 mm arasında değiştiği açıkça görülmektedir. Ayrıca, VADASE yönteminden elde edilen KOH değerleri 1.8 ile 12.5 mm arasında değişirken bu değerler VA yaklaşımı için 2.4 ile 14.5 mm arasında değişmektedir. VADASE ve VA arasındaki KOH değerleri karşılaştırıldığında VADASE yaklaşımının VA yöntemine kıyasla kısa süreli dinamik davranışları kısmen daha hassas bir şekilde tespit edebildiği görülmektedir. Bu durum, deneylerde kullanılan Leica GR30 alıcı ve AS11 anteni ile u-blox ZED-F9P alıcı ve ANN-MN-00 antenlerinin sahip olduğu gürültü seviyesi ile doğrudan ilişkilidir.

Tablo 5. Yer değiştirme alanı için deneylerin numaraları (DN), frekans ve genlik değerleri.

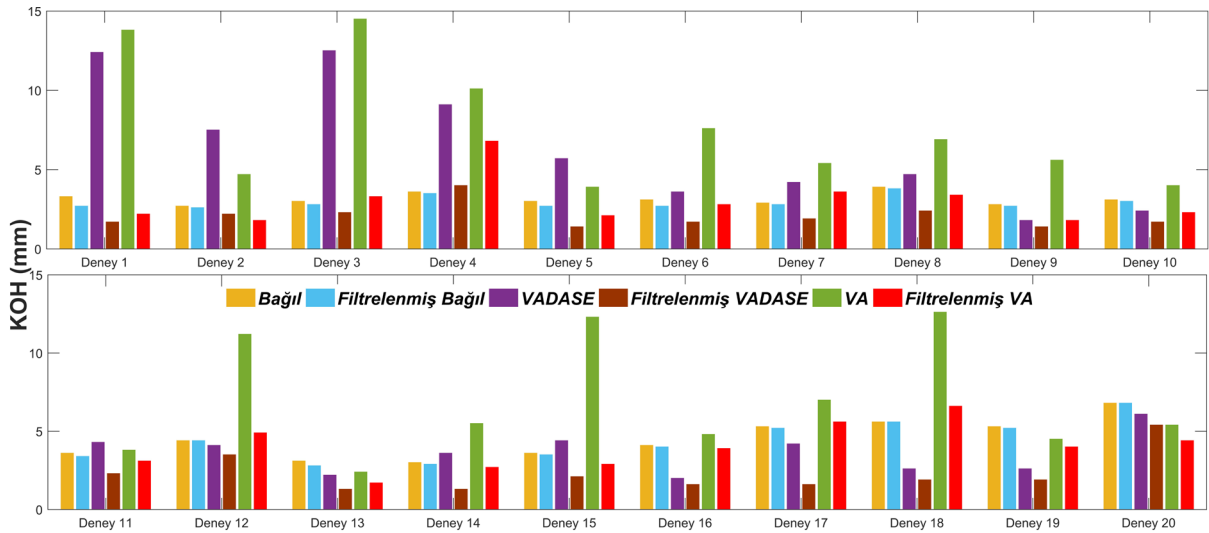
| DN | LVDT         |      |             |      | BAĞIL        |      |             |      | VADASE       |      |             |      | VA           |      |             |      |
|----|--------------|------|-------------|------|--------------|------|-------------|------|--------------|------|-------------|------|--------------|------|-------------|------|
|    | Frekans (Hz) |      | Genlik (mm) |      | Frekans (Hz) |      | Genlik (mm) |      | Frekans (Hz) |      | Genlik (mm) |      | Frekans (Hz) |      | Genlik (mm) |      |
|    | Ham          | Fil. | Ham         | Fil. | Ham          | Fil. | Ham         | Fil. | Ham          | Fil. | Ham         | Fil. | Ham          | Fil. | Ham         | Fil. |
| 1  | 0.3          | 0.3  | 4.3         | 4.3  | 0.3          | 0.3  | 4.8         | 4.6  | 0.3          | 0.3  | 3.2         | 3.1  | 0.3          | 0.3  | 2.6         | 2.5  |
| 2  | 0.3          | 0.3  | 8.6         | 8.6  | 0.3          | 0.3  | 9.1         | 8.8  | 0.3          | 0.3  | 6.7         | 6.4  | 0.3          | 0.3  | 8.8         | 8.6  |
| 3  | 0.3          | 0.3  | 17.3        | 17.3 | 0.3          | 0.3  | 18.3        | 17.7 | 0.3          | 0.3  | 16.3        | 15.5 | 0.3          | 0.3  | 20.8        | 20.0 |
| 4  | 0.3          | 0.3  | 25.9        | 25.9 | 0.3          | 0.3  | 24.9        | 24.1 | 0.3          | 0.3  | 22.4        | 21.8 | 0.3          | 0.3  | 34.1        | 33.1 |
| 5  | 0.5          | 0.5  | 4.4         | 4.4  | 0.5          | 0.5  | 4.2         | 4.2  | 0.5          | 0.5  | 3.8         | 3.8  | 0.5          | 0.5  | 5.7         | 5.7  |
| 6  | 0.5          | 0.5  | 8.8         | 8.8  | 0.5          | 0.5  | 8.3         | 8.3  | 0.5          | 0.5  | 7.5         | 7.5  | 0.5          | 0.5  | 9.2         | 9.1  |
| 7  | 0.5          | 0.5  | 17.7        | 17.7 | 0.5          | 0.5  | 18.1        | 18.1 | 0.5          | 0.5  | 16.3        | 16.3 | 0.5          | 0.5  | 14.8        | 14.9 |
| 8  | 0.5          | 0.5  | 26.5        | 26.5 | 0.5          | 0.5  | 29.1        | 29.1 | 0.5          | 0.5  | 25.4        | 25.3 | 0.5          | 0.5  | 25.7        | 25.6 |
| 9  | 0.7          | 0.7  | 4.2         | 4.2  | 0.7          | 0.7  | 4.7         | 4.7  | 0.7          | 0.7  | 4.0         | 3.7  | 0.7          | 0.7  | 3.1         | 3.1  |
| 10 | 0.7          | 0.7  | 8.5         | 8.5  | 0.7          | 0.7  | 9.6         | 9.6  | 0.7          | 0.7  | 7.1         | 7.1  | 0.7          | 0.7  | 7.0         | 7.0  |
| 11 | 0.7          | 0.7  | 16.9        | 16.9 | 0.7          | 0.7  | 18.6        | 18.6 | 0.7          | 0.7  | 14.7        | 14.8 | 0.7          | 0.7  | 15.2        | 15.2 |
| 12 | 0.7          | 0.7  | 25.4        | 25.4 | 0.7          | 0.7  | 28.3        | 28.3 | 0.7          | 0.7  | 22.9        | 22.9 | 0.7          | 0.7  | 21.2        | 21.4 |
| 13 | 1.0          | 1.0  | 4.1         | 4.1  | 1.0          | 1.0  | 4.8         | 4.8  | 1.0          | 1.0  | 3.6         | 3.6  | 1.0          | 1.0  | 2.9         | 2.9  |
| 14 | 1.0          | 1.0  | 8.2         | 8.2  | 1.0          | 1.0  | 9.5         | 9.5  | 1.0          | 1.0  | 7.3         | 7.4  | 1.0          | 1.0  | 7.2         | 7.3  |
| 15 | 1.0          | 1.0  | 12.2        | 12.2 | 1.0          | 1.0  | 14.8        | 14.7 | 1.0          | 1.0  | 11.0        | 10.9 | 1.0          | 1.0  | 11.5        | 11.4 |
| 16 | 2.0          | 2.0  | 3.6         | 3.6  | 2.0          | 2.0  | 6.6         | 6.6  | 2.0          | 2.0  | 4.0         | 4.0  | 2.0          | 2.0  | 4.9         | 4.8  |
| 17 | 2.0          | 2.0  | 7.2         | 7.2  | 2.0          | 2.0  | 10.0        | 10.0 | 2.0          | 2.0  | 8.6         | 8.6  | 2.0          | 2.0  | 9.8         | 9.8  |
| 18 | 2.0          | 2.0  | 10.8        | 10.8 | 2.0          | 2.0  | 13.3        | 13.3 | 2.0          | 2.0  | 12.6        | 11.9 | 2.0          | 2.0  | 13.8        | 14.0 |
| 19 | 3.0          | 3.0  | 3.4         | 3.4  | 3.0          | 3.0  | 6.3         | 6.3  | 3.0          | 3.0  | 5.1         | 5.1  | 3.0          | 3.0  | 5.6         | 5.7  |
| 20 | 3.0          | 3.0  | 6.8         | 6.8  | 3.0          | 3.0  | 12.4        | 12.3 | 3.0          | 3.0  | 10.9        | 10.9 | 3.0          | 3.0  | 10.5        | 10.5 |

Tablodan yine, GNSS tabanlı yöntemlerin filtrelenmiş sonuçları için LVDT sensörü arasındaki farklardan elde edilen maksimum hata ve KOH değerleri de görülmektedir. Filtreleme sonucunda elde edilen KOH değerleri incelendiğinde ise GNSS tabanlı yöntemlerin tümünde iyileşme olduğu açıktır. Filtreleme işlemi sonrasında VADASE tekniğinden elde edilen KOH değerleri ortalama olarak %55.9 oranında

iyileşirken, VA tekniğinden elde edilen KOH değerleri ortalama %52.0 oranında iyileşmiştir. Bu bulgular filtreleme işleminin başarısını açıkça gösterirken, gerçek zamanlı YSI ve doğal afet erken uyarı sistemlerinde düşük maliyetli GNSS anten/alıcılarının ve VA tekniğinin destekleyici bir sensör ve algoritma olarak kullanılabileceğine ve ayrıca gerçek zamanlı uygun bir filtreleme işleminin önemine işaret etmektedir.

Tablo 6. Yer değiştirme alanı için deneylerin KOH ve maksimum değerleri.

| Deney No | BAĞIL      |      |          |      | VADASE     |      |          |      | VA         |      |          |      |
|----------|------------|------|----------|------|------------|------|----------|------|------------|------|----------|------|
|          | Maks. (mm) |      | KOH (mm) |      | Maks. (mm) |      | KOH (mm) |      | Maks. (mm) |      | KOH (mm) |      |
|          | Ham        | Fil. | Ham      | Fil. | Ham        | Fil. | Ham      | Fil. | Ham        | Fil. | Ham      | Fil. |
| 1        | 17.0       | 17.3 | 3.3      | 2.7  | 23.6       | 5.9  | 12.4     | 1.7  | 33.3       | 6.6  | 13.8     | 2.2  |
| 2        | 11.4       | 10.7 | 2.7      | 2.6  | 18.5       | 7.0  | 7.5      | 2.2  | 13.1       | 8.3  | 4.7      | 1.8  |
| 3        | 11.3       | 12.9 | 3.0      | 2.8  | 32.6       | 9.9  | 12.5     | 2.3  | 34.3       | 11.7 | 14.5     | 3.3  |
| 4        | 15.4       | 14.2 | 3.6      | 3.5  | 25.8       | 14.0 | 9.1      | 4.0  | 33.2       | 17.8 | 10.1     | 6.8  |
| 5        | 10.6       | 8.8  | 3.0      | 2.7  | 14.7       | 4.5  | 5.7      | 1.4  | 11.4       | 6.9  | 3.9      | 2.1  |
| 6        | 12.1       | 10.2 | 3.1      | 2.7  | 14.1       | 6.9  | 3.6      | 1.7  | 25.6       | 17.7 | 7.6      | 2.8  |
| 7        | 10.9       | 11.1 | 2.9      | 2.8  | 14.3       | 7.1  | 4.2      | 1.9  | 18.9       | 10.9 | 5.4      | 3.6  |
| 8        | 14.5       | 14.4 | 3.9      | 3.8  | 16.4       | 8.6  | 4.7      | 2.4  | 20.8       | 11.4 | 6.9      | 3.4  |
| 9        | 12.6       | 12.4 | 2.8      | 2.7  | 7.3        | 4.6  | 1.8      | 1.4  | 14.7       | 5.3  | 5.6      | 1.8  |
| 10       | 10.5       | 9.7  | 3.1      | 3.0  | 7.5        | 5.4  | 2.4      | 1.7  | 11.6       | 6.5  | 4.0      | 2.3  |
| 11       | 12.5       | 11.4 | 3.6      | 3.4  | 12.8       | 7.7  | 4.3      | 2.3  | 11.9       | 9.2  | 3.8      | 3.1  |
| 12       | 14.1       | 13.7 | 4.4      | 4.4  | 12.4       | 11.0 | 4.1      | 3.5  | 37.4       | 25.7 | 11.2     | 4.9  |
| 13       | 14.6       | 13.9 | 3.1      | 2.8  | 7.2        | 4.2  | 2.2      | 1.3  | 8.9        | 5.6  | 2.4      | 1.7  |
| 14       | 9.6        | 9.1  | 3.0      | 2.9  | 10.1       | 4.4  | 3.6      | 1.3  | 16.7       | 13.9 | 5.5      | 2.7  |
| 15       | 10.9       | 10.6 | 3.6      | 3.5  | 9.8        | 5.3  | 4.4      | 2.1  | 33.7       | 15.8 | 12.3     | 2.9  |
| 16       | 11.9       | 12.1 | 4.1      | 4.0  | 6.9        | 4.7  | 2.0      | 1.6  | 12.5       | 8.7  | 4.8      | 3.9  |
| 17       | 14.9       | 15.6 | 5.3      | 5.2  | 9.7        | 4.7  | 4.2      | 1.6  | 17.3       | 12.7 | 7.0      | 5.6  |
| 18       | 18.8       | 17.9 | 5.6      | 5.6  | 7.4        | 5.5  | 2.6      | 1.9  | 30.2       | 14.7 | 12.7     | 6.6  |
| 19       | 17.5       | 17.2 | 5.3      | 5.2  | 7.7        | 4.8  | 2.6      | 1.9  | 13.1       | 11.4 | 4.5      | 4.0  |
| 20       | 20.5       | 20.7 | 6.8      | 6.8  | 15.4       | 12.0 | 6.1      | 5.4  | 16.4       | 13.9 | 5.4      | 4.4  |



Şekil 11. Yer değiştirme alanı için deneylerden elde edilen KOH değerleri.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada düşük maliyetli tek frekanslı GNSS alıcısı ve anteninden elde edilen çoklu GNSS gözlemlerine dayalı VA tekniğinin düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği, yüksek maliyetli GNSS alıcı ve anteninden elde edilen VADASE ve bağıl konum belirleme yöntemleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. GNSS yöntemlerinin dinamik davranışları yakalayabilme performanslarını incelemek için farklı frekans ve genliklere sahip düşey yönlü dinamik hareketler simüle edilmiş ve yöntemlerden elde edilen epoklar arası yer

değiştirme ve yer değiştirme sonuçları LVDT sensörü verileri referans alınarak zaman ve frekans alanında detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Epoklar arası yer değiştirme ve yer değiştirme alanında elde edilen bulgular dikkate alındığında, kullanılan alıcı/anten tipinden ve değerlendirme yöntemlerinden bağımsız olarak, çalışma kapsamında değerlendirilen tüm GNSS tabanlı yöntemlerin simüle edilen dinamik davranışların baskın frekans değerlerini başarılı bir şekilde tespit edebildiği son derece açıktır. Buna ek olarak, alıcı/anten ve değerlendirme tekniklerinden kaynaklı olarak, tepe frekansına



karşılık gelen genlik değerlerinde mm mertebesinde farklılıklar meydana gelmiştir.

Zaman alanında yapılan incelemeler sonucunda, yer değiştirme zaman serileri göz önüne alındığında yüksek maliyetli VADASE ve düşük maliyetli VA yöntemlerinin dinamik davranışları bağıl yöntem gibi başarılı bir şekilde yakaladığı fakat uzun dönemli zaman serilerinde ilgili tekniklerin yapısı gereği uzun periyotlu dalgalanmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu dalgalanmalar ise yüksek geçirgenli filtre uygulanarak ortadan kaldırılmıştır. Filtreleme uygulamadan önce bağıl yöntem, VADASE ve VA yöntemlerinden daha düşük KOH değerlerine sahipken, filtreleme sonrası VADASE yöntemi bağıl yöntemden mm seviyelerinde bir farkla daha düşük KOH değerlerine sahip olmuştur. Filtreleme sonrası VA yöntemi VADASE ve bağıl yöntemle yaklaşmıştır, hatta VA tekniği 1.0 Hz, 2.0 Hz ve 3.0 Hz gibi yüksek frekanslı hareketlerinin bir kısmında mm seviyesinde farklarla bağıl yöntemle göre daha düşük KOH değerlerine sahip olmuştur. Epoklar arası yer değiştirme alanında elde edilen KOH değerleri dikkate alındığında ise, VADASE yaklaşımı VA tekniğinden, VA yöntemi ise bağıl yöntemden mm seviyelerinde daha küçük KOH değerlerine sahiptir. Bu, VADASE ve VA yöntemlerinde tek GNSS alıcısı verileri kullandığı için daha düşük gürültüye sahip olması ile doğrudan ilişkilidir.

Son olarak, çalışmadan elde edilen bulgular YSİ sistemlerinde düşük maliyetli GNSS alıcılarının ve buradan elde edilen gözlemlere dayalı VA tekniğinin çeşitli geoteknik sensörleri destekleyici harici bir sensör olarak kullanılabileceğini açıkça göstermektedir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ARDEB 1001 [Proje No: 122Y100] programına teşekkür eder. PPPH-VA açık kaynak kodlu yazılıma "<https://geodesy.noaa.gov/gps-toolbox/ppph-va.shtml>" bağlantısından ulaşılabilir.

## ORCID

Mert BEZCİOĞLU   
<https://orcid.org/0000-0001-7179-8361>

Berkay BAHADUR   
<https://orcid.org/0000-0003-3169-8862>

Emre BOZDOĞAN   
<https://orcid.org/0009-0006-9862-3039>

Ahmet Anıl DİNDAR   
<https://orcid.org/0000-0003-3168-8322>

Burak AKPINAR   
<https://orcid.org/0000-0002-3076-1578>

Metin NOHUTCU   
<https://orcid.org/0000-0001-9582-582X>

Cemal Özer YİĞİT   
<https://orcid.org/0000-0002-1942-7667>

## KAYNAKLAR

Bahadur, B., Bezcioglu, M., ve Yigit, C. O. (2024a). PPPH-VA: an open-source software for real-time multi-GNSS variometric approach using single-and dual-frequency observations. *GPS Solutions*, 28(1), 31. doi: 10.1007/s10291-023-01560-z

Bahadur, B., Bezcioglu, M., ve Yigit, C. O. (2024b). Evaluation of the single-frequency variometric approach based on low-cost GNSS observations and different satellite combinations for detecting short-term dynamic behaviors. *Measurement Science and Technology*, 35(8), 086317. doi: 10.1088/1361-6501/ad48a1

Bezcioglu, M., Yigit, C. O., Mazzoni, A., Fortunato, M., Dindar, A. A., ve Karadeniz, B. (2022a). High-rate (20 Hz) single-frequency GPS/GALILEO variometric approach for real-time structural health monitoring and rapid risk assessment. *Advances in Space Research*, 70(5), 1388-1405. doi: 10.1016/j.asr.2022.05.074

Bezcioglu, M. (2023). Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı gerçek-zamanlı hassas nokta konum belirleme (RT-PPP) tekniğinin performansının değerlendirilmesi ve çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1341-1350. doi: 10.28948/ngumuh.1310577

- Bezcioglu, M., Karadeniz, B., Yiğit, C. Ö., Dindar, A. A., Bezir, F., ve Avcı, Ö. (2022b). Gerçek Zamanlı GNSS VADASE yaklaşımının dinamik deplasmanları yakalayabilme kabiliyetinin incelenmesi. *Harita Dergisi*, 167, 1-11. <https://www.harita.gov.tr/uploads/files/articles/gercek-zamanli-gnss-vadase-yaklasiminin-dinamik-deplasmanlari-yakalayabilme-kabiliyetinin-in-1587.pdf>
- Boehm, J., ve Schuh, H. (2004). Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letters*, 31(1). doi: 10.1029/2003GL018984
- Colosimo, G., Crespi, M. ve Mazzoni, A. (2011). Real-time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 116, B11302. doi: 10.1029/2010JB007941
- Farrar, C.R. ve Worden K. (2012). Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective, John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781118443118
- Fortunato, M., Ravanelli, M. ve Mazzoni, A. (2019). Real-Time Geophysical Applications with Android GNSS Raw Measurements. *Remote Sensing*, 11, 2113. doi: 10.3390/rs11182113
- Geng, T., Xie, X., Fang, R., Su, X., Zhao, Q., Liu, G., Li, H., Shi, C. ve Liu, J. (2016). Real-time capture of seismic waves using high-rate multi-GNSS observations: Application to the 2015 Mw7.8 Nepal earthquake. *Geophysical Research Letters*, 43,161–167. doi: 10.1002/2015GL067044
- Gikas, V. (2012). Ambient vibration monitoring of slender structures by microwave interferometer remote sensing. *Journal of Applied Geodesy*, 6, 167–176. doi: 10.1515/jag-2012-0029
- Ju, B., Jiang, W., Tao, J., Hu, J., Xi, R., Ma, J., ve Liu, J. (2022). Performance evaluation of GNSS kinematic PPP and PPP-IAR in structural health monitoring of bridge: Case studies. *Measurement*, 203, 112011. doi: 10.1016/j.measurement.2022.112011
- Kaloop, M. R. ve Li, H. (2014). Multi input-single output models identification of tower bridge movements using GPS monitoring system. *Measurement*, 47 (1), 531–539. doi: 10.1016/j.measurement.2013.09.046
- Kaloop, M.R., Yigit, C.O., Dindar, A.A., Elshawary, M. ve Hu, J.W. (2020). Evaluation of the high-rate GNSS-PPP method for vertical structural motion. *Survey Review*, 52(371),159-171. doi: 10.1080/00396265.2018.1534362
- Karadeniz, B., Bezcioglu, M., Yiğit, C. Ö., Dindar, A. A., ve Avcı, Ö. (2022). Gerçek-Zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Düşey Yönlü Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(3), 626-636. doi: 10.35414/akufemubid.1066489
- Kouba, J. (2015). A guide to using International GNSS Service (IGS) products. [https://files.igs.org/pub/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21\\_cor.pdf](https://files.igs.org/pub/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf)
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H., ve Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical Research Letters*, 40(6), 1069-1073. doi: 10.1002/grl.50288
- Landskron, D., Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), 349-360. doi: 10.1007/s00190-017-1066-2
- Moschas, F. ve Stiros, S.C. (2011). Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer, *Eng. Struct.*, 33 (1), 10-17. doi: 10.1016/j.engstruct.2010.09.013
- Oku Topal, G., Karabulut, M. F., Aykut, N. O., ve Akpinar, B. (2023). Performance of low-cost GNSS equipment in monitoring of horizontal displacements. *Survey Review*, 55(393), 536-545. doi: 10.1080/00396265.2023.2179910
- Petit, G. ve Luzum, B. (2010). IERS Conventions 2010 IERS Technical Note 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie,179 pp., ISBN 3-89888-989-6. <https://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf>
- Qu, X., Shu, B., Ding, X., Lu, Y., Li, G., ve Wang, L. (2022). Experimental study of accuracy of high-rate GNSS in context of structural health monitoring. *Remote Sensing*, 14(19), 4989. doi: 10.3390/rs14194989

- Saastamoinen, J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, *The use of Artificial Satellites for Geodesy* (Geophysical Monograph Series), 15(1972), 247-251. doi: 10.1029/GM015p0247
- Tesolin, F., Vitti, A., Mazzoni, A. ve Crespi, M. (2019). Impact of Galileo data on the solutions of the variometric approach for displacement analysis. *Advances in Space Research*, 63(9), 3053-3061. doi: 10.1016/j.asr.2019.01.048
- Wang, X., Zhao, Q., Xi, R., Li, C., ve Li, G. (2021). Review of bridge structural health monitoring based on GNSS: From displacement monitoring to dynamic characteristic identification. *IEEE Access*, 9, 80043-80065. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083749
- Wu, J., Wu, S., Hajj, G., Bertiger, W. ve Liehten, S. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, 18(2) 91–98.
- Xi, R., He, Q. ve Meng, X. (2020). Bridge monitoring multi-GNSS observations with high cutoff elevations: A case study. *Measurement*, 168, 108303. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108303
- Xu, P., Shi, C., Fang, R., Liu, J., Niu, X., Zhang, Q., ve Yanagidani, T. (2013). High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units. *Journal of geodesy*, 87, 361-372. doi: 10.1007/s00190-012-0606-z
- Yigit, C. O., El-Mowafy, A., Anil Dindar, A., Bezcioglu, M., ve Tiryakioglu, I. (2021). Investigating performance of high-rate GNSS-PPP and PPP-AR for structural health monitoring: Dynamic tests on shake table. *Journal Of Surveying Engineering*, 147(1), 05020011. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000343
- Yigit, C.O. (2016). Experimental assessment of post processed kinematic precise point positioning method for structural health monitoring. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7, 363-380. doi: 10.1080/19475705.2014.917724
- Yigit, C.O. ve Gurlek, E. (2017). Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 893-904. doi: 10.1080/19475705.2017.1284160
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., ve Webb F.H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 102(B3), 5005–5017. doi: 10.1029/96JB03860

# Antarktika Kıtasındaki Tektonik Hareketleri İzlemek İçin Türkiye'nin Sabit GNSS İstasyonu: Dismal (DISM) İstasyonu

(Türkiye's Permanent GNSS Station to Monitor Tectonic Movements on the Antarctica: Dismal (DISM) Station)

Özgür ÖZEL<sup>\*</sup>, Yusuf URAL, Abdullah KELLEVEZİR, Tunahan GÜNDOĞAN, Faruk YALÇIN, Selçuk PEKER, Hakan KILINÇ, İbrahim Cihan DEMİREL, İlyas AKPINAR

Harita Genel Müdürlüğü, Jeodezi Dairesi Başkanlığı, Ankara

\*Sorumlu yazar: ozgur.ozel@harita.gov.tr

Geliş Tarihi (Received): 07.12.2023

Kabul Tarihi (Accepted): 15.07.2024

## ÖZ

Bu çalışmanın temel amacı, Antarktika kıtasındaki tektonik hareketleri izlemek için Türkiye'nin sabit Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) istasyonu olan Dismal (DISM) istasyonunun kurulum aşamaları hakkında bilgi vermek, koordinat zaman serisini incelemek ve analiz etmektir. Verilerin analizi GAMIT/GLOBK v10.71 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DISM istasyonunun günlük çözümleri, koordinat ve hızları ITRF2014 datumunda belirlenmiştir. DISM istasyonunun yer değiştirme vektörü istasyonun kuzeydoğu yönüne hareket ettiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar neticesinde noktanın bölgesindeki diğer sabit istasyonlarla aynı hareketi yaptığı değerlendirilmektedir. DISM istasyonunun zaman serisi incelendiğinde yılın aynı dönemlerinde harmonik salınımlar yaptığı görülmektedir. Bunun sebebinin eriyen buzullar olduğu değerlendirilmektedir. Analizler sonucunda DISM istasyonunun NEU (Kuzey, Doğu ve Yükseklik) bileşenlerinin hızı  $V_N=9.56$  mm/yıl,  $V_E=13.15$  mm/yıl ve  $V_U=-0.25$  mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Analize dahil edilen noktaların dengeleme sonucunda elde edilen hızlarının karesel ortalama hatası kuzey-güney bileşeninde 0.39 mm/yıl, doğu-batı bileşeninde 0.45 mm/yıl ve yükseklik bileşeninde 1.72 mm/yıl olarak, koordinatların karesel ortalama hataları ise kuzey-güney bileşeninde 1.30 mm, doğu-batı bileşeninde 0.92 mm ve yükseklik bileşeninde 3.56 mm olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** GNSS, Antarktika, Tektonik hareket

## ABSTRACT

The main purpose of this study is to provide information about the installation stages of the Dismal (DISM) station which is Türkiye's permanent Global Navigation Satellite System (GNSS) station to monitor tectonic movements on the Antarctic continent, and to examine and analyze the coordinate time series. Data analysis was carried out using GAMIT/GLOBK v10.71 software. Daily solutions, coordinates and velocities of the DISM station were determined in the ITRF2014 datum. It has been determined that the displacement vector of the DISM station shown that the station moves towards the northeast. As a result of the results obtained, it is evaluated that the station moves in the

same way as other permanent stations in its region. When the time series of the DISM station is examined, it is seen that it makes harmonic oscillations in the same periods of the year. It is thought that the reason for this is melting glaciers. As a result of the analysis, the velocity of the NEU (North, East and Up) components of the DISM station was calculated as  $V_N=9.56$  mm/year,  $V_E=13.15$  mm/year and  $V_U=-0.25$  mm/year. The root mean square error of the velocities obtained as a result of adjustment of the points included in the analysis is 0.39 mm/year in the north-south component, 0.45 mm/year in the east-west component and 1.72 mm/year in the up component, while the root mean square errors of the coordinates are obtained as 1.30 mm in the north-south component, 0.92 mm in the east-west component and 3.56 mm in the up component.

**Keywords:** GNSS, Antarctica, Tectonic movement

## 1. GİRİŞ

Türkiye'de kutup araştırmaları kapsamında çalışmalar 20. Yüzyılın başına dayanmakla birlikte Antarktika kıtasına ayak basan ve ilk modern bilimsel çalışmaları yapan bilim insanımız Prof. Dr. Atok Karaali'dir. 2000'li yıllarda birçok bilim insanımız kıtaya ayak basmış ve bilimsel çalışmalarda bulunmuştur. Ulusal seferlerimiz ise T.C. Cumhurbaşkanlığı himayelerinde, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı uhdesinde, İTÜ PolReC (Kutup Araştırmaları Uyg-Ar Merkezi) öncülüğünde 2017 yılında başlamış ve sonrasında TÜBİTAK MAM KARE (Kutup Araştırmaları Enstitüsü) koordinasyonunda günümüze kadar kesintisiz devam etmiştir (BTGM, 2017). Horseshoe isimli yarımada 2019'da ilk Türk Bilim Kampı kurularak farklı disiplinlere sahip bilim insanları; iklim, çevre, buzul ve kıyı erozyonları, deniz, jeofizik, sismoloji, tektonik, jeodezi, jeodinamik, biyoloji, tıp ve uzay bilimleri başta olmak üzere diğer birçok bilim dalında çalışmalar ve araştırmalar yapmaktadır. Ayrıca bölge ve çevresinde birçok ülke tarafından gerçekleştirilen jeodezi tabanlı bilimsel çalışmalarda, uzay ve yersel olmak üzere farklı gözlem teknikleri kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar, Antarktika bölgesi için GNSS'den (Global

Atıf/To cite this article: Özel, Ö., Ural, Y., Kellevezir, A., Gündoğan, T., Yalçın, F., Peker, S., Kılınç, H., Demirel, İ.C. ve Akpınar, İ. (2024). Antarktika Kıtasındaki Tektonik Hareketleri İzlemek İçin Türkiye'nin Sabit GNSS İstasyonu: Dismal (DISM) İstasyonu. Harita Dergisi, 172, 17-29.



Navigation Satellite System-Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) türetilen verilerin toplanmasına veya işlenmesine odaklanmıştır. Bu kapsamda, uydu sinyallerine dayalı olmak üzere mekânsal verinin üretilmesi, deniz seviyesinin izlenmesi, yer kabuğu deformasyonlarının ve kar/buz kalınlıklarının takibi gibi çalışmalar yapılmaktadır (Selbesoğlu ve diğerleri, 2018).

Antarktika levhası, yaklaşık 60.916.000 km'lik bir alana sahip dünyanın beşinci en büyük levhasıdır. Arazi yüzey deformasyonları (küresel, bölgesel ve yerel), zaman içindeki değişimlerine (seküler, periyodik ve epizodik) ve yer değiştirmenin dağılımına (yatay, dikey ve mekânsal) göre sınıflandırılabilen, öteleme-dönme gezegensel hareketi sırasında meydana gelen, Dünya'nın derin dinamiklerinin karmaşık süreçlerini yansıtır (Savchyn, Brusak ve Tretyak, 2023). GNSS ve gravimetrik ölçümler deformasyon modellerinin geliştirilmesi için temel destek sağlayabilen jeodinamik ve jeofizik olayları vurgulamak için temel yöntemlerdir (Zanutta ve diğerleri, 2018). Dünya üzerinde ölçülen jeodezik noktaların bulundukları plakalardaki hareketler nokta koordinatlarında yıllık ortalama cm mertebesinde değişim meydana getirmektedir. Bununla birlikte jeodezik noktaların yıllık olarak değişimleri nokta hızları olarak isimlendirilmektedir. Tektonik hareketlerin doğru yorumlanabilmesi için hızların hesaplanacağı nokta konumlarının doğruluğu ve zaman periyodu önemlidir. Avustralya 1960 yılından bu yana bölgede 400'den fazla yer noktası belirlemiş ve Uluslararası Yersel Referans Çerçevesi (ITRF) için bir ağ oluşturarak Antarktika bölgesinin levha hareketliliğinin incelenmesini sağlamıştır. Bu ağ zamanla uzay tabanlı ölçülerle güncellenerek doğruluğu artırılmıştır (Johnston, Brown ve Moore, 2008). 1987 yılında İspanya, Güney Shetland Adaları, Bransfield Denizi ve Antarktika Yarımadası'nın oluşturduğu bölgede birkaç istasyondan oluşan RGAE (The Spanish Antarctic Geodetic Network) jeodezik ağını kurmuştur. Başlangıçta bölgesel referans çerçevesi tanımlamak için kurulan ağa jeodinamik çerçevenin oluşturulması amacı da eklenerek 2007 yılına kadar yapılan kampanyalarla kıtanın yatay ve düşey deformasyon modelleri de çıkarılmıştır (Berrocso ve diğerleri, 2008). Antarktika kıtasında ortak bir jeodezik ve coğrafi koordinat sistemi sağlamak amacıyla IGS (International GNSS Service) ve IGS'e dahil olmayan 20'dan fazla sabit istasyon kurularak bölgesel konum ve hız bilgisi sağlayan SCAR (Scientific Commission Antarctic Researches) oluşturuldu (Capra ve diğerleri, 2008). SCAR tarafından analiz edilen GPS kampanyaları

sonucunda noktaların hız vektörleri elde edilmiştir. Bu hız vektörleri dikkate alınarak Antarktika kıtasının tektonik hareketi belirlenmiştir. Yapılan çözümler sonucunda Antarktika Yarımadası ve Doğu Antarktika arasındaki göreceli hareket yatayda 1-2 mm/yıl'dan büyük olmadığı fakat Kuzey Antarktika Yarımadasında düşey hareketin yaklaşık 10 mm/yıl'lık bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Faaliyetler POLENET (Polar Earth Observing Network) projesi kapsamında sürdürülerek geliştirilmektedir (Dietrich ve diğerleri, 2004). Ukrayna, kıtada ilk GNSS ağını Antarktika Akademik Vernadsky İstasyonunu (ASAV) kurarak, koordinat zaman serileri üreterek incelemiş ve gözlem verilerinden elde edilen çözümler yardımıyla istasyonlara ait hız vektörlerini belirlemiştir (Savchyn, Otruba ve Tretyak, 2021). Ayrıca Arjantin Adaları'nın (Penola Boğazı) jeodinamiği ve tektonik deformasyon stilini belirlemek için bu ağı GPS gözlemlerinden yararlanılmıştır (Tretyak, Golubinka, Kulchytskyy ve Babiy, 2008). Antarktika Kıtasında UNAVCO (University NAVSTAR Consortium)'ya ait sürekli gözlem yapan HUGO ve HOWE sabit GPS istasyonlarının farklı mevsimlerdeki 30 saniye aralıklı günlük gözlem verileri statik ve kinematik PPP (Precise Point Positioning-PPP) yöntemiyle değerlendirilmiş ve statik çözümlerde milimetre, kinematik çözümlerde ise santimetre mertebesinde farklara sahip olduğu görülmüştür (Erol ve diğerleri, 2020). Levha kinematığını incelemek amacıyla 1994-2021 yılları arasında bölgede bulunan 60 adet sabit GNSS istasyonu verileri kullanılarak yatay deformasyon süreci incelenmesi ve levha modellemesi yapılmıştır (Savchyn, Brusak ve Tretyak, 2023). Yine bölgede bulunan sabit GNSS istasyon verileri kullanılarak düşey yer kabuğu ve buzul hareketi yorumu yapılarak PGR (postglacial rebound) modeliyle tutarlılığı incelenmiştir. Ayrıca dünyanın yer çekimi alanındaki değişimlerini ölçen GRACE uydu gözlemlerinin bölgedeki etkinliği yorumlanmıştır (Bevis ve diğerleri, 2009). 2005 - 2015 yılları arası GPS ve GRACE uydu gözlem verileri kullanılarak yatay ve düşey plaka hareketi, Antarktika Buz Levhası (AIS) değişimlerinden kaynaklanan elastik ve viskoelastik deformasyonların kıta üzerindeki etkisi eş zamanlı olarak incelenmiştir (Sunil ve diğerleri, 2022).

Harita Genel Müdürlüğü 2019 yılından itibaren düzenlenen bilimsel seferlere katılım sağlayarak bölgede jeodezik çalışmalar için nokta tesisi gerçekleştirmiştir. HorseShoe, Livingston, Galindes ve Dismal Adalarına kampanya tipi 8 adet jeodezik nokta (TR01, TR02, TR03, TR04, TR05, LIVI, GALI, DIS1) tesis edilmiş ve 2020 yılında düzenlenen seferde Dismal Adasına DISM

isimli sabit GNSS istasyon kurulumu yapılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Antarktika'da 2019 - 2023 yılları arasında gerçekleştirilen DISM sabit istasyonunun günlük verileri ve bölgede aktif olarak gözlem yapan IGS ve bölgesel sabit GNSS istasyon verileri GAMIT/GLOBK yazılımıyla değerlendirilerek, sonuç çözümler ITRF2014 (Altamimi, Rebischung, Métivier ve Collilieux, 2016) datumunda üretilmiştir. Ayrıca noktalara ait zaman serileri ve hız bileşenleri üretilerek bölgenin yatay-düşey yöndeki deformasyonu ve hız alanı elde edilmiştir.

## 2. ANTARKTİKA'DA SABİT GNSS İSTASYONU

### a. Neden Dismal Adası

Antarktika dünya tektoniği açısından kritik bir bölgedir. Jeodinamik modellerle bölgenin anlaşılmasına katkıda bulunmak, tektonik plaka hareketlerinin daha iyi anlaşılup yorumlanabilmesini sağlayacaktır. Antarktika kıtasında 20 yılı aşkın süredir farklı ülkeler tarafından tektonik izleme amaçlı kurulmuş birçok sabit GNSS istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyonların verileriyle gerçekleştirilmiş birçok bilimsel çalışma mevcuttur. Türkiye tarafından kurulacak bir sabit GNSS istasyonunun bölgedeki diğer istasyonlardan en az 50 km uzakta ve eriyen buzullardan nispeten daha az etkilenebilecek kıyıdan uzak adalarda konuşlanmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Diğer ülkeler tarafından tesis edilen istasyonların dağılımına bakıldığında İngiltere tarafından işletilen POLENET ağının güneyinde istasyon dağılımının zayıf olduğu görülmüştür. Bu eksikliğin giderilmesi için 2019 yılında gerçekleştirilen TAE-3 (3.Ulusal Antarktik Bilim Seferi) seferinde keşfi yapılan

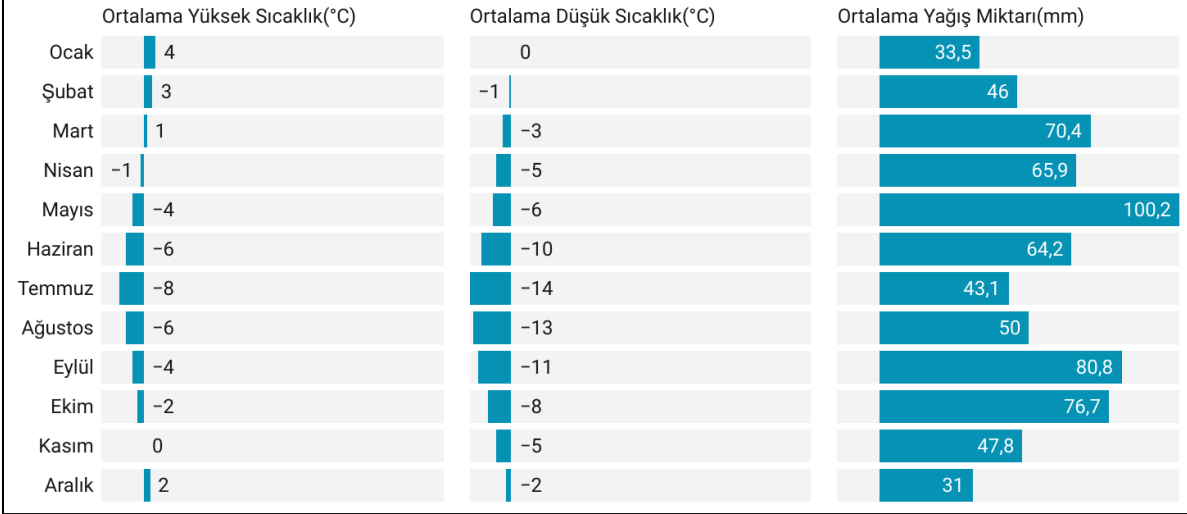
Faure Adalarının bulunduğu bölge istasyonun kurulumu için uygun görülmüştür. Faure Adaları'nın konumu (~ 68.089° Güney, 68.837° Batı) ve görünümü Şekil 1'de gösterilmiştir. Faure Adalar topluluğu içerisinde bulunan ve jeolojik olarak sağlam kayalık yapıya sahip, kuzey-güney hattında 1500m, doğu-batı hattında 500m ölçülerine sahip Dismal Adasına GNSS istasyonunun tesis edilmesine karar verilmiştir.

### b. GNSS İstasyonu Tasarım Çalışmaları

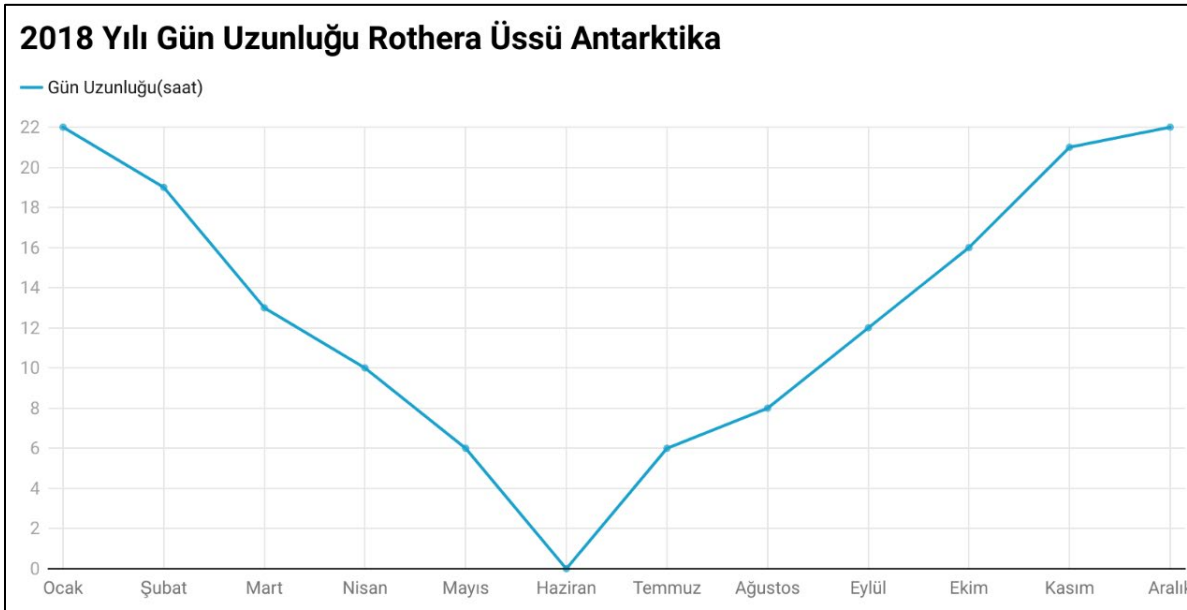
Antarktika koşullarına en uygun platform tasarımının ve enerji planlamasının yapılabilmesi maksadıyla Faure Adalarının bulunduğu bölgenin, iklim koşulları ve gece-gündüz döngüleri yakın meteoroloji istasyonlarından faydalanılarak ortaya konulmuştur. Bu çerçevede en yakın konumdaki yaklaşık 65 km kuzeyindeki İngiltere tarafından işletilmekte olan Rothera Meteoroloji istasyonundan elde edilen veriler dikkate alınmıştır. Bölgenin en düşük sıcaklığı rüzgâr etkisiyle birlikte -25 °C olarak baz alınmıştır. Her yılın mayıs, haziran ve temmuz aylarında en kısa günler yaşanmaktadır. Söz konusu aylarda gün ışığından faydalanma en aza düşmektedir. Bu nedenle güneş paneli sisteminden enerji üretimine ek olarak rüzgâr türbini planlaması yapılmıştır. Ayrıca yağış ortalamalarının 2005 - 2015 yılları arasındaki kar kalınlıkları göz önünde bulundurularak, 50 cm ortalama kar kalınlığı temel alınmıştır. İncelemelerde, Rothera Meteoroloji İstasyonunun 2005 – 2015 yılları arasındaki aylık bazda ortalama yüksek ve düşük sıcaklıkları, ortalama yağış miktarları (Şekil 2), Rothera Meteoroloji İstasyonunun 2018 yılına ait gün uzunluğu değişim grafikleri (Şekil 3) dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Faure Adaları'nın konumu ve görünümü (~ 68.089° Güney, 68.837° Batı).

**Toplanan Hava Durumu Raporlarına Göre 2005-2015**

Şekil 2. Rothera meteoroloji istasyonunun 2005 – 2015 yılları arasındaki aylık bazda ortalama yüksek ve düşük sıcaklık ve ortalama yağış miktarı değerleri.



Şekil 3. Rothera meteoroloji istasyonunun 2018 yılına ait gün uzunluğu değişim grafiği.

Antarktika kıtasında GNSS ve sismik istasyonu işletme tecrübesi olan UNAVCO ve POLENET araştırma kurumlarının internet sitelerinde bulunan kıtada kurulmuş istasyonlara ilişkin bilgilendirme dokümanları (fotoğraf, tasarım vb.) dikkate alınmıştır. Ayrıca, aynı dönem içerisinde kıtada istasyon kurmayı planlayan Doç.Dr. M. Oğuz Selbesoğlu ile yüz yüze görüşme sağlanarak bilgi alışverişinde bulunulmuştur.

Faure Adaları ana karadan 70 km açıktaki olması nedeniyle güçlü rüzgârlara ve sert mevsim etkilerine maruz kalacağı grafiklerle ortaya konmuştur ve platform tasarımında bu konu dikkate alınmıştır. İstasyon tasarımında asıl sorun enerji üretiminde kullanılacak panellerin ve rüzgâr türbinlerinin platformdaki konuşlandırılma durumları ve bu tasarımın hava şartlarının oluşturacağı ani yük bindirmelerini karşılayabilecek dinamikte ve sağlamlıkta olması gerekliliğinden yola çıkarak;





### c. Erciyes Dağı (Kayseri) Test Çalışmaları

İstasyonun tüm parçaları bir araya getirildikten sonra Antarktika kıtası şartlarının test edilebilmesi için uygun iklim koşullarına sahip olan Erciyes Dağında kurulum yapılmıştır. Denemenin amacı, istasyonun platform tasarımının test edilmesi için rüzgârlı ve eksi sıcaklıklardaki davranışını, rüzgâr türbinlerinin rüzgârlı kar yağıışı (tipi) altındaki üretim kapasitesini (grafiğini), saklama (koruma) kutusunun performansını, saklama kutusu içerisindeki sıcaklığın ve basıncın dışarıdaki olumsuz koşullara rağmen değişimini gözlemlemektir. Gözlem, kutu içerisindeki GNSS alıcısının RAM sıcaklığını görebildiğimiz uzaktan bağlantı sağlayarak 4 gün boyunca takibi yapılmıştır. 24 saatin en soğuk zamanlarında dahi iç sıcaklığın 34 °C civarında olduğu görülmüş ve yalıtımın uygun olduğu test edilmiştir. Enerji üretimi konusunda, gece rüzgâr türbinlerinin, gündüz ise güneş panellerinin beklenin üzerinde enerji üretimi sağladığı görülmüştür. Platformun 3 kişi ile toplam 4 saat içerisinde kurulumu gerçekleştirebildiği test edilmiştir. Rüzgâr türbinlerinin platform üzerinde titreşim yaratmadığı izlenmiştir. Ayrıca platformun doğru tasarım olduğu 25 km/s hızındaki rüzgârlara karşı dayanıklı ve sağlamlık konusunda kararlı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak; tüm deneme süreci planlandığı gibi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır ve Erciyes Dağının bu deney için uygun olduğu görülmüştür.

### 3. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

2019 yılında düzenlenen 3.Ulusal Antarktik Bilim Seferinde kıtaya tektonik hareketleri izlemek için GNSS istasyonunun kurulabilmesi için keşif çalışmaları yapılmıştır. 2020 yılında düzenlenen 4.Ulusal Antarktik Bilim Seferinde tektonik hareket izlemek için Dismal adasına DISM isimli Türkiye'nin sabit GNSS istasyonu kurulmuştur. GNSS istasyonu Trimble NetR9 marka alıcı ve Trimble Zephyr Jeodezik 3 marka anten ile donatılmıştır (Şekil 5).

2019 – 2023 yılları arasında toplanan veriler GAMIT/GLOBK v10.71 (Herring, King, Floyd ve McClusky, 2018) yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Analizde, IGS analiz merkezleri tarafından üretilen “repro2” son uydu yörünge verileri CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) veri arşivinden indirilerek kullanılmıştır. Anten faz merkezi düzeltmeleri için, ölçüm yapılan noktalardaki azimut ve yükseklik açısına bağlı olan en güncel mutlak faz merkezi değişimi (IGS14 modeli) dosyası kullanılmıştır. Kutup gezinmesi koordinatları ve Yer Dönme Parametreleri için IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) tarafından yayınlanan USNO “bulletin b” final dosyalarından yararlanılmıştır.



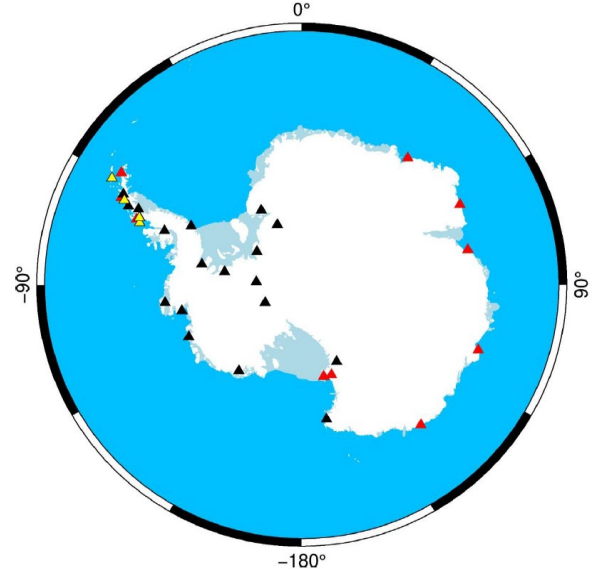
Şekil 5. Dismal sabit GNSS istasyonu.

Troposferik gecikme hesaplanırken Viyana İzdüşüm Fonksiyonu (VMF1) (Boehm, Werl ve Schuh, 2006) kullanılmıştır. Öncül troposferik parametreler için 5 x 5 derece çözünürlüğünde ve grid yapısındaki gpt2\_5.grd (Global Pressure and Temperature Model) dosyası kullanılmıştır (Lagler, Schindelegger, Böhm, Krásná ve Nilsson, 2013). Troposferik parametre kestirim aralığı 1 saat alınırken, ikinci ve üçüncü derece iyonosferik düzeltmelerin çözüme katkısı çok küçük olduğu için analize dahil edilmemiştir. Gelgit (Günlük (S1) ve yarım günlük (S2) periyotlu) Atmosferik Yükleme Etkisi MIT tarafından yayınlanmadığı için dikkate alınmamıştır. FES2004 grid dosyası kullanılarak Okyanus Gelgit Yüklemesi hesaplanmıştır (Lyard, Lefèvre, Letellier ve Francis, 2006). Ölçü modeli olarak çiftli fark gözlemleri kullanılmıştır. 3 derecenin altındaki gözlemler analize dahil edilmemiştir. Manyetik model olarak IGRF13 modeli kullanılmıştır. Datum tanımlaması için gerekli olan öncül koordinatlar Herring ve diğerleri, (2018) tarafından oluşturulan "igb14\_comb.apr" isimli dosyadan elde edilmiştir (Kurt ve diğerleri, 2020).

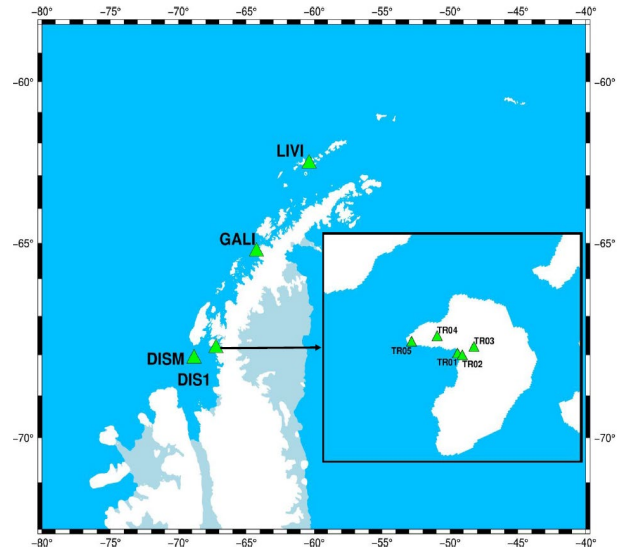
Referans çerçevesini tanımlamak ve datum dönüşümünde kullanılmak üzere, Antarktika kıtasında bulunan 13 adet IGS istasyonu analizlere dahil edilmiştir (Şekil 6). Ayrıca baz uzunluklarını kısaltabilmek için kıtada bulunan 20 adet bölgesel istasyonun verileri de kullanılmıştır (Şekil 6). Kampanya tipi noktalar ve DISM sabit GNSS istasyonunun konumları Şekil 7'de gösterilmektedir. Analizde kullanılan noktaların listesi Tablo 1'de sunulmuştur.

DISM sabit GNSS istasyonunun 4 yıllık verisinin analizi sonucunda ITRF2014 referans çerçevesinde günlük çözümleri elde edilmiştir. Günlük çözümler sonucunda elde edilen zaman serisi Şekil 8'de sunulmuştur. Zaman serisindeki (Şekil 8) boşlukların sebebi ilgili tarihte Antarktika kıtası karanlık döneme girdiği için istasyon kendini kapatmıştır. Rüzgâr türbinleri, güneş panellerinin yeterli seviyede enerji sağlayamadığı kış dönemi için destekleyici bir enerji sağlayıcı olarak sisteme dahil edilmiştir.

Ancak istasyonda bulunan alıcının karanlık dönemde rüzgâr türbinlerinden gelen enerjiyi doğru şekilde aktaramadığı için cihaz kendini başlatamamıştır. 2024 yılında yapılan seferde sorunun çözülmesi için gerekli adımlar atılmış olup 2025 yılındaki seferde sonuçları elde edilecektir.



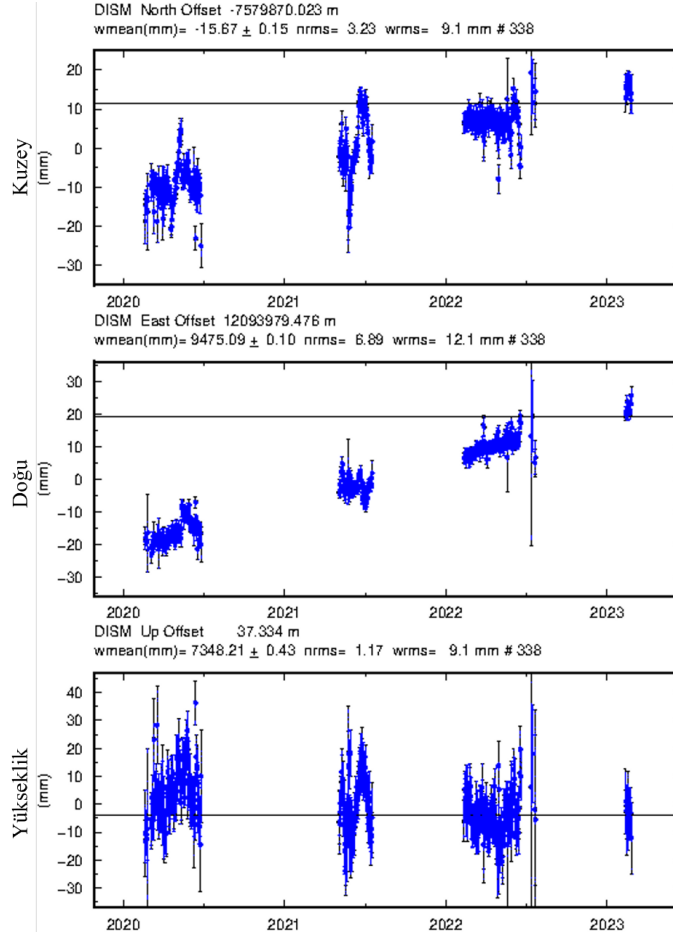
Şekil 6. Analizde kullanılan IGS (kırmızı), bölgesel sabit GNSS (siyah) istasyonlarının ve kampanya tipi (sarı) noktaların dağılımı.



Şekil 7. Kampanya tipi noktaların ve DISM istasyonunun konumu.

Tablo 1. Analizde kullanılan noktaların bilgileri (POLENET: Polar Earth Observing Network, BAS: British Antarctic Survey).

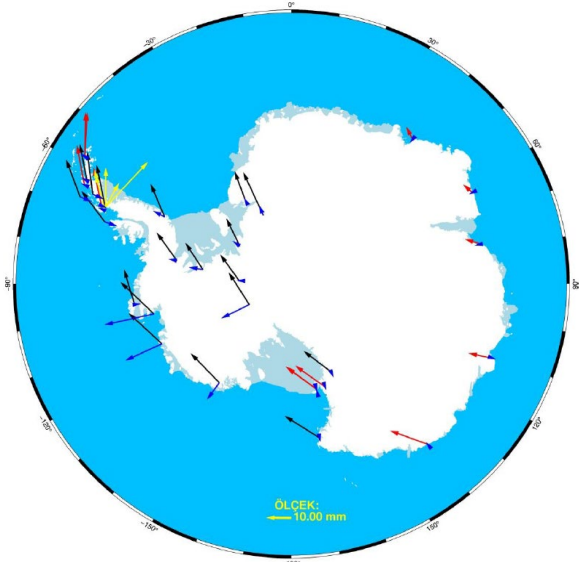
| Nokta İsmi | Enlem (derece) | Boylam (derece) | Elipsoit Yüksekliği (metre) | Açıklama             |
|------------|----------------|-----------------|-----------------------------|----------------------|
| ARHT       | -77.82944      | 166.66365       | 135.328                     | IGS                  |
| BACK       | -74.43045      | -102.47821      | 37.700                      | POLENET              |
| BENN       | -84.78646      | -116.45978      | 1417.000                    | POLENET              |
| BSA1       | -67.81604      | -67.29071       | 127.600                     | BAS GPS Network      |
| BURI       | -79.14744      | 155.89417       | 2007.000                    | POLENET              |
| CAS1       | -66.28340      | 110.51970       | 22.600                      | IGS                  |
| COTE       | -77.80590      | 161.99780       | 1878.100                    | IGS                  |
| CRDI       | -82.86150      | -53.19910       | 943.300                     | POLENET              |
| DAV1       | -68.57730      | 77.97260        | 44.500                      | IGS                  |
| DIS1       | -68.09114      | -68.84433       | 35.104                      | Kampanya Tipi Nokta  |
| DISM       | -68.09113      | -68.84475       | 37.340                      | Sabit GNSS İstasyonu |
| DUMG       | -66.66517      | 140.00220       | -3.380                      | IGS                  |
| DUPT       | -64.80494      | -62.81691       | 40.000                      | POLENET              |
| FOS1       | -71.31334      | -68.32084       | 158.800                     | POLENET              |
| GALI       | -65.24615      | -64.25341       | 18.232                      | Kampanya Tipi Nokta  |
| HAAG       | -77.03800      | -78.28710       | 1172.600                    | POLENET              |
| HTON       | -74.08001      | -61.73059       | 950.500                     | POLENET              |
| LIVI       | -62.64242      | -60.37088       | 32.199                      | Kampanya Tipi Nokta  |
| MAJK       | -81.66098      | -21.87375       | 1452.000                    | POLENET              |
| MAW1       | -67.60480      | 62.87070        | 59.200                      | IGS                  |
| MCAR       | -76.32220      | -144.30350      | 965.000                     | POLENET              |
| MCM4       | -77.83835      | 166.66933       | 98.022                      | IGS                  |
| M RTP      | -74.18046      | -115.10202      | 64.000                      | POLENET              |
| OHI2       | -63.32110      | -57.90130       | 33.100                      | IGS                  |
| OHI3       | -63.32109      | -57.90139       | 32.150                      | IGS                  |
| PALM       | -64.77509      | -64.05112       | 31.239                      | IGS                  |
| PRPT       | -66.00670      | -65.33930       | 15.000                      | POLENET              |
| ROTH       | -67.57140      | -68.12575       | 39.793                      | IGS                  |
| SCTB       | -77.84899      | 166.75801       | -18.900                     | IGS                  |
| SGP5       | -67.28197      | -64.89056       | 273.169                     | POLENET              |
| STEW       | -84.18700      | -86.24730       | 1582.500                    | POLENET              |
| SYOG       | -69.00700      | 39.58370        | 50.090                      | IGS                  |
| THRO       | -79.12613      | -28.31825       | 1070.000                    | POLENET              |
| THUR       | -72.53007      | -97.55960       | 212.000                     | POLENET              |
| TR01       | -67.82986      | -67.23914       | 9.904                       | Kampanya Tipi Nokta  |
| TR02       | -67.83099      | -67.22987       | 93.681                      | Kampanya Tipi Nokta  |
| TR03       | -67.82554      | -67.20722       | 21.047                      | Kampanya Tipi Nokta  |
| TR04       | -67.81842      | -67.27861       | 115.311                     | Kampanya Tipi Nokta  |
| TR05       | -67.82215      | -67.32823       | 13.068                      | Kampanya Tipi Nokta  |
| VL01       | -72.45014      | 169.72507       | 596.872                     | POLENET              |
| WAI2       | -79.46762      | -112.05360      | 1769.341                    | POLENET              |
| WILN       | -80.03980      | -80.55790       | 668.700                     | POLENET              |



Şekil 8. DISM sabit GNSS istasyonuna ait zaman serisi (wmean: Bileşenin offset değerinden farklarının ağırlıklı ortalaması, nrms: Normalleştirilmiş karesel ortalama hata, wrms: Ağırlıklandırılmış karesel ortalama hata).

DISM noktasının yer değiştirme vektörünün kuzeydoğu yönünde olduğu Şekil 9'da görülmektedir. DISM istasyonu bölgesindeki diğer noktalarla tektonik olarak aynı hareketi yapmaktadır (Dietrich ve diğerleri, 2004; Sunil ve diğerleri, 2022).

2019 – 2023 yılları arasında 8 adet kampanya tipi GNSS noktasının ve 34 adet sabit GNSS istasyonunun (IGS, bölgesel istasyonlar ve DISM istasyonu) aylık çözümleri birlikte dengelenerek sonuç çözümler elde edilmiştir. Kampanya çözümlerinin birlikte dengelenmesinde GAMIT/GLOBK yazılımının GLOBK (Global Kalman Filtreleme) modülü kullanılmıştır. GLOBK, farklı yazılımlarla oluşturulmuş çözümleri Kalman Filtreleme tekniği ile istenilen bir referans koordinat sisteminde birleştirilmesini sağlayan, nokta koordinat zaman serilerini oluşturan ve sonuç hızları hesaplayan bir modüldür (Kurt ve diğerleri, 2020).



Şekil 9. Analize dahil edilen noktaların yatay (kırmızı: IGS, siyah: bölgesel noktalar, sarı: kampanya tipi) ve düşey (mavi) hız vektörleri.

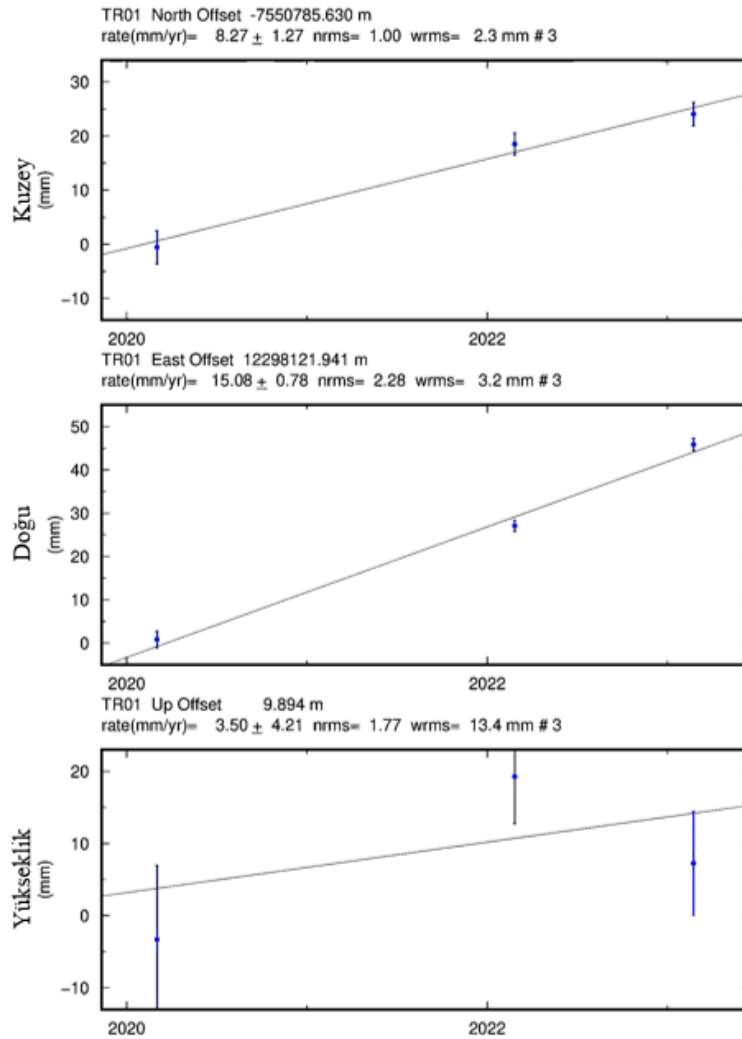


GLOBK çözümünün ilk aşamasında noktalara yüksek öncül varyans tanımlanarak Kalman Filtreleme tekniği kullanılarak gevşek-kısıtlı çözüm elde edilmiştir (Herring ve diğerleri, 2018). İkinci aşamada elde edilen çözüm ile referans koordinat sistemi tanımlaması için 13 IGS istasyonunun koordinat ve hız bilgileri kullanılmıştır.

ITRF2014 datumunda tanımlı olan koordinat ve hız bilgileri 12 parametrelili (3 öteleme ve hızı, 3 dönüklük ve hızı) Helmert dönüşümü kullanılarak koordinat sistemi tanımlaması yapılmıştır. IGS istasyonlarının öncül koordinat ve hız bilgileri "igb14\_comb.apr" dosyasından alınmıştır. Ayrıca yazılım, donanım, deprem, yer değişikliği, lokal etkiler vb. nedenlere bağlı olarak istasyon koordinatlarında meydana gelen değişikliklerin olduğu "igb14\_comb.eq" dosyası da kullanılmıştır (Kurt ve diğerleri, 2020).

Kampanya tipi noktaların da zaman serileri oluşturulmuştur. Şekil 10'da TR01 noktasının zaman serisi görülmektedir. Kampanya tipi noktalarından GALI, LIVI, TR04 ve TR05 noktaları için epok sayısı yeterli olmadığından noktaların hızları elde edilememiştir.

Analizler sonucunda Antarktika kıtasına yayılmış GNSS noktalarının zaman serileri dikkate alınarak noktaların ITRF2014 datumundaki koordinat ve hız değerleri elde edilmiştir. Elde edilen hızlar Şekil 9 ve Tablo 2'de gösterilmektedir. Elde edilen hız değerleri Dietrich ve diğerleri (2004) ile Sunil ve diğerleri (2022)'ndeki ortak noktalarla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 10. TR01 kampanya tipi noktasına ait zaman serisi (rate: Bileşenin hızı, nrms: Normalleştirilmiş karesel ortalama hata, wrms: Ağırlıklandırılmış karesel ortalama hata).

Tablo 2. Analize dahil edilen noktaların NEU bileşenlerinin ITRF2014 hız değerleri (mm/yıl) ve standart sapmaları (mm/yıl).

| Nokta | $V_n$  | $V_e$ | $V_u$ | $\sigma_n$ | $\sigma_e$ | $\sigma_u$ |
|-------|--------|-------|-------|------------|------------|------------|
| ARHT  | -11.18 | 9.40  | 1.05  | 0.04       | 0.03       | 0.15       |
| BACK  | 10.39  | 15.61 | 20.59 | 0.08       | 0.06       | 0.28       |
| BENN  | 1.71   | 15.35 | 11.96 | 0.05       | 0.04       | 0.26       |
| BSA1  | 9.95   | 14.46 | 0.24  | 0.06       | 0.03       | 0.16       |
| BURI  | -12.00 | 6.51  | 2.25  | 0.06       | 0.05       | 0.28       |
| CAS1  | -9.85  | 1.36  | 1.80  | 0.05       | 0.03       | 0.15       |
| COTE  | -11.69 | 8.66  | 1.30  | 0.05       | 0.04       | 0.20       |
| CRDI  | 11.05  | 5.86  | 3.36  | 0.06       | 0.05       | 0.27       |
| DAV1  | -5.82  | -3.27 | -2.11 | 0.05       | 0.03       | 0.15       |
| DIS1  | 10.55  | 14.66 | 18.70 | 1.36       | 0.91       | 5.05       |
| DISM  | 9.56   | 13.15 | -0.25 | 0.12       | 0.09       | 0.38       |
| DUMG  | -13.48 | 8.20  | -1.12 | 0.06       | 0.03       | 0.18       |
| DUPT  | 9.56   | 11.85 | 3.12  | 0.08       | 0.05       | 0.24       |
| FOS1  | 12.89  | 8.96  | -4.46 | 0.08       | 0.06       | 0.28       |
| HAAG  | 10.38  | 9.60  | 3.55  | 0.07       | 0.05       | 0.27       |
| HTON  | 11.44  | 9.16  | 5.37  | 0.07       | 0.05       | 0.23       |
| MAJK  | 19.18  | -1.52 | 3.86  | 0.06       | 0.05       | 0.28       |
| MAW1  | -1.82  | -4.37 | -0.97 | 0.05       | 0.03       | 0.15       |
| MCAR  | -2.86  | 16.15 | 8.29  | 0.06       | 0.04       | 0.22       |
| MCM4  | -11.52 | 9.81  | -0.08 | 0.04       | 0.02       | 0.14       |
| M RTP | 6.79   | 16.80 | 16.24 | 0.09       | 0.07       | 0.31       |
| OHI2  | 9.02   | 15.50 | 1.65  | 0.06       | 0.03       | 0.17       |
| OHI3  | 9.43   | 15.31 | 1.98  | 0.06       | 0.03       | 0.17       |
| PALM  | 10.00  | 13.08 | 2.26  | 0.05       | 0.03       | 0.15       |
| PRPT  | 9.33   | 14.49 | -3.66 | 0.12       | 0.09       | 0.39       |
| ROTH  | 9.71   | 14.31 | 2.53  | 0.06       | 0.03       | 0.16       |
| SCTB  | -10.92 | 9.43  | 1.72  | 0.04       | 0.03       | 0.17       |
| SGP5  | 11.15  | 11.69 | -4.43 | 0.08       | 0.06       | 0.25       |
| STEW  | 8.22   | 10.09 | 0.55  | 0.07       | 0.07       | 0.42       |
| SYOG  | 2.65   | -5.07 | 0.10  | 0.08       | 0.06       | 0.27       |
| THRO  | 11.80  | 2.01  | 0.65  | 0.05       | 0.04       | 0.18       |
| THUR  | 2.61   | 14.72 | -1.73 | 0.06       | 0.04       | 0.20       |
| TR01  | 6.17   | 14.73 | 2.64  | 1.10       | 0.73       | 3.98       |
| TR02  | -1.08  | 11.17 | 6.46  | 1.11       | 0.81       | 4.11       |
| TR03  | -8.22  | 23.20 | 5.13  | 1.79       | 1.30       | 6.78       |
| VL01  | -11.02 | 12.07 | 1.73  | 0.07       | 0.05       | 0.24       |
| WILN  | 8.72   | 9.63  | 5.60  | 0.07       | 0.06       | 0.31       |

Sonuç olarak, gevşek kısıtlı çözüm 13 IGS istasyonu kullanılarak ITRF2014 datumunda dengelenmesi sonucu elde edilen koordinat ve

hızlar için karesel ortalama hatalar (KOH) Tablo 3'te listelenmiştir.

Tablo 3. Analiz sonucu elde edilen istatistik sonuçları (N: kuzey-güney, E: doğu-batı, U: yükseklik bileşenleri).

|                                                                              |                         |                                           |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|
| Konum İstatistikleri (WRMS)                                                  | N<br>E<br>U             | 1.30 mm<br>0.92 mm<br>3.56 mm             |
| Hız İstatistikleri (WRMS)                                                    | $V_n$<br>$V_e$<br>$V_u$ | 0.39 mm/yıl<br>0.45 mm/yıl<br>1.72 mm/yıl |
| Referans İstasyon Koordinatlarının Dengeleme Sonrası Karesel Ortalama Hatası |                         | 2.29 mm                                   |
| Referans İstasyon Hızlarının Dengeleme Sonrası Karesel Ortalama Hatası       |                         | 0.59 mm/yıl                               |

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında 13 adet IGS istasyonu, 20 adet bölgesel GNSS istasyonu ve 1 adet Türkiye'ye ait sabit GNSS istasyonu ile 8 adet kampanya tipi GNSS noktasının verileri analiz edilerek ITRF2014 datumunda koordinat ve hız bilgileri elde edilmiştir. Yeterli epok ölçüsü olmayan noktalar için müteakip yıllarda ölçü sayısı arttıkça noktaların hızları belirlenebilecektir.

DISM istasyonunun zaman serisinden de anlaşıldığı üzere kıtada karanlık döneme girildiği zaman istasyon verisi bulunmamaktadır. Bu problemi çözmek için daha önceki seferlerde çözümler üretildiyse de halen istasyon istenildiği şekilde çalışmamaktadır. Bu makalede belirtildiği üzere 2024 yılında yapılan seferde sorunun çözülmesi için gerekli adımlar atılmış olup bu adımların sonuçları 2025 yılındaki seferde elde edilecektir.

DISM istasyonunun yer değiştirme vektörünün kuzeydoğu yönüne hareket ettiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde noktanın bölgesindeki diğer sabit istasyonlarla aynı hareketi yaptığı değerlendirilmektedir. DISM noktasının zaman serisi incelendiğinde yılın aynı dönemlerinde harmonik salınımlar yaptığı görülmektedir. Bunun sebebinin eriyen buzullar olduğu değerlendirilmektedir (Savchyn, Otruba ve Tretiyak, 2021).

Analizler sonucunda DISM noktasının NEU bileşenlerinin hızı  $V_n=9.56$  mm/yıl,  $V_e=13.15$  mm/yıl ve  $V_u=-0.25$  mm/yıl olarak hesaplanmıştır.

Analize dahil edilen noktaların dengeleme sonucunda elde edilen hızlarının karesel ortalama hatası kuzey-güney bileşeninde 0.39 mm/yıl, doğu-batı bileşeninde 0.45 mm/yıl ve yükseklik bileşeninde 1.72 mm/yıl olarak, koordinatların karesel ortalama hataları ise kuzey-güney bileşeninde 1.30 mm, doğu-batı bileşeninde 0.92 mm ve yükseklik bileşeninde 3.56 mm olarak elde edilmiştir.

### TEŞEKKÜR

Yazarlar, T.C. Cumhurbaşkanlığı himayelerinde, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı uhdesinde, TÜBİTAK MAM KARE koordinasyonunda düzenlenen Ulusal Antarktika Bilim Seferine teşekkürlerini sunar. Makalenin hazırlanmasında katkı sağlayan Müh.Alb.Dr. Ali İhsan KURT'a ve makaleyi değerlendiren hakemlere teşekkürlerimizi sunarız. Şekiller GMT yazılımı (Wessel ve diğerleri, 2019) kullanılarak çizilmiştir.

### ORCID

Özgür ÖZEL  <https://orcid.org/0000-0001-5192-9985>

Yusuf URAL  <https://orcid.org/0009-0004-4788-770X>

Abdullah KELLEVEZİR  <https://orcid.org/0009-0009-7085-5024>

Tunahan GÜNDOĞAN  <https://orcid.org/0000-0003-4939-3207>

Faruk YALÇIN  <https://orcid.org/0009-0001-6198-6024>

Selçuk PEKER  <https://orcid.org/0000-0001-7763-8844>

Hakan KILINÇ  <https://orcid.org/0009-0002-0589-1001>

İbrahim Cihan DEMİREL  <https://orcid.org/0009-0002-4818-4286>

İlyas AKPINAR  <https://orcid.org/0000-0001-8606-140X>

### KAYNAKLAR

Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier L. ve Collillieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 121, 6109–6131. doi:10.1002/2016JB013098

Berrocso, M., Fernàndez-Ros, A., Ramirez, M.E., Salamanca, J.M., Torrecillas, C., Pèrez-Peña, A., Pàez, R., Garcia-Garcia, A., Jimenez-Teja, Y., Garcia-Garcia, F., Soto, R., Garate, J., Martin-Davila, J., Sanchez-Alzola, A., de Gil, A., Fernandez-Prada, J.A., ve Jigena, B. (2008). Geodetic research on deception island and its environment (South Shetland Islands, Bransfield Sea and Antarctic Peninsula) during Spanish Antarctic campaigns (1987–2007). A. Capra, R. Dietrich (Ed.), *Geodetic and geophysical observations in Antarctica*. 98-124, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin. ISBN: 978-3-540-74881-6

Bevis, M., Kendrick, E., Smalley, R.J., Dalziel, D., Caccamise, D., Sasgen, I., Helsen, M., Taylor, F.W., Zhou, H., Brown, A., Raleigh, D., Willis, M., Wilson, T. ve Konfal, S. (2009). Geodetic measurements of vertical crustal velocity in West Antarctica and the implications for ice mass balance. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10 (10). doi:10.1029/2009GC002642

Boehm J., Werl, B. ve Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*, 111. doi: 10.1029/2005JB003629

BTGM (Bilim ve Teknoloji Genel Müdürlüğü) (2017). *Ulusal Kutup Bilim Programı (2018-2022)*. Erişim Adresi: [https://kare.mam.tubitak.gov.tr/sites/images/kare\\_mam/ulusal\\_kutup\\_bilim\\_programi.pdf](https://kare.mam.tubitak.gov.tr/sites/images/kare_mam/ulusal_kutup_bilim_programi.pdf)

Capra, A., Dubbini, M., Galeandro, A., Gusella, L., Zanutta, A., Casula, G., Negusini, M., Vittuari, L., Sarti, P., Mancini, F., Gandolfi, S., Montaguti, M., ve Bitelli, G. (2008). VLNDEF project for geodetic infrastructure definition of northern Victoria Land, Antarctica. A. Capra, R. Dietrich (Ed.), *Geodetic and geophysical observations in Antarctica*. 98-124, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin. ISBN: 978-3-540-74881-6

- Dietrich, R., Rülke, A., Ihde, J., Lindner, K., Miller, H., Niemeier, W., Schenke, H.-W. ve Seeber, G. (2004). Plate kinematics and deformation status of the Antarctic Peninsula based on GPS. *Global and Planetary Change*, 42(1-4), 313-321. doi: 10.1016/j.gloplacha.2003.12.003
- Erol, S., Mutlu, B., Erol, B., Katıgöz, S. ve Alkan, R.M. (2020). Antarktika kıtasında Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) tekniğinin performansının incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(5), 844-856. doi: 10.35414/akufemubid.761692
- Herring, T.A., King, R.W., Floyd, M.A. ve McClusky, S.C. (2018). *GAMIT reference manual*, GPS Analysis at MIT, Release 10.7. Erişim Adresi: [http://geoweb.mit.edu/gg/GAMIT\\_Ref.pdf](http://geoweb.mit.edu/gg/GAMIT_Ref.pdf)
- Johnston, G., Brown, N. ve Moore, M. (2008). Current status and future prospects for the Australian Antarctic Geodetic Network. A. Capra, R. Dietrich (Ed.), *Geodetic and geophysical observations in Antarctica*. 85-97, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin. ISBN: 978-3-540-74881-6
- Kurt, A.İ., Cingöz, A., Özdemir, S., Peker, S., Özel, Ö. ve Simav, M. (2020). Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA) güncel koordinat ve hızlarının GNSS verilerinin yeniden değerlendirilmesi kapsamında hesaplanması. *Harita Dergisi*, 164, 1-17.
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H. ve Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical Research Letters*, 40, 1069-1073. doi: 10.1002/grl.50288
- Lyard, F., Lefèvre, F., Letellier, T. ve Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56, 394-415. doi: 10.1007/s10236-006-0086-x
- Savchyn, I., Brusak, I. ve Tretyak, K. (2023). Analysis of recent Antarctic plate kinematics based on GNSS data. *Geodesy and Geodynamics*, 14(2), 99-110. doi: 10.1016/j.geog.2022.08.004
- Savchyn, I., Otruba, Y. ve Tretyak, K. (2021). The first Ukrainian permanent GNSS station in Antarctica: processing and analysis of observation data. *Ukrainian Antarctic journal*, 2(3-11). doi: 10.33275/1727-7485.2.2021.674
- Selbesoğlu, M.O., Yavaşoğlu, H.H., Karabulut, M.F., Güllal, V.E., Karaman, H. ve Kamaşak, M.E. (2018). *GNSS meteorolojisi ve reflektometresi teknikleri ile Antarktika bölgesinin troposfer ve kar kalınlığının izlenmesi, deformasyonların belirlenmesi*. II. Kutup Bilimleri Çalıştayı, 12 - 13 Eylül, İstanbul.
- Sunil, P.S., Saji, A.P., Kumar, K.V., Ponraj, M., Amirtharaj, S. ve Dhar, A. (2022). Revealing the contemporary kinematics of Antarctic plate using GPS and GRACE data. *Assessing the Antarctic environment from a climate change perspective: An integrated approach*, 343-359. doi: 10.1007/978-3-030-87078-2\_18
- Tretyak, K.R., Golubinka, Y.I., Kulchitsky, A.J. ve Babi, L.V. (2008). Geodynamics of the tectonic detachment in the Penola Strait (Antarctic Peninsula, Archipelago of Argentina Islands). A. Capra, R. Dietrich (Ed.), *Geodetic and geophysical observations in Antarctica*. 98-124, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin. ISBN: 978-3-540-74881-6
- Wessel, P., Luis, J.F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W.H.F. ve Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20 (11), 5556-5564. doi: 10.1029/2019GC008515
- Zanutta, A., Negusini, M., Vittuari, L., Martelli, L., Cianfarra, P., Salvini, F. ve Capra, A. (2018). New geodetic and gravimetric maps to infer geodynamics of Antarctica with insights on Victoria Land. *Remote Sensing*, 10(10), 1608. doi: 10.3390/rs10101608



## 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 ODACI<sup>1</sup> , Bahadır AKTUĞ<sup>2</sup> , Burak TAVUKÇU<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Harita Genel Müdürlüğü, Fotogrametri Dairesi, Cebeci, Ankara

<sup>2</sup>Ankara 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 avantajının 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.

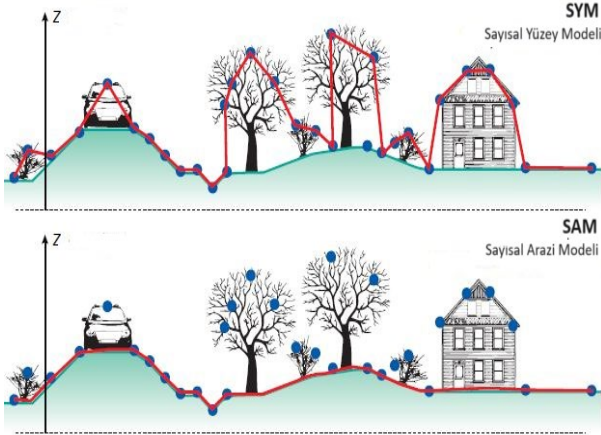
## 2. MATERYAL ve YÖNTEM

### 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 yansması 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 (Kyaruzi, 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 tanımların 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 işlemdir. 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                                  |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Yatay Çözünürlük</b> | $\frac{1}{3}'' \times \frac{1}{3}''$<br>Yaklaşık 12m x 12m grid aralıklı | $\frac{1}{3}'' \times \frac{1}{3}''$<br>Yaklaşık 12m x 12m grid aralıklı | $1'' \times 1''$<br>Yaklaşık 30m x 30m |
| <b>Yatay Doğruluk</b>   | $\pm 5m - 10m$                                                           | $\pm 5m - 10m$                                                           | -                                      |
| <b>Düşey Doğruluk</b>   | $\pm 4m$                                                                 | $\pm 4m$                                                                 | $\pm 10m$                              |
| <b>Üretim Yılları</b>   | 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.

### 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 km<sup>2</sup> bir alan (Şekil 3), ve farklı arazi tiplerindeki sonuçları görmek amacıyla yerleşim yeri içeren L32-a4 1:25.000 ölçekli paftadan 150 km<sup>2</sup> bir alan (Şekil 4) ve bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen I31-d3 1:25.000 paftasından 150 km<sup>2</sup> bir alan (Şekil 5) çalışma alanı olarak seçilmiştir. Ormanlık bölge seçiminde ağaçların yoğun olduğu ve eğimin ani arttığı bir bölge olmasına dikkat edilmiştir.



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

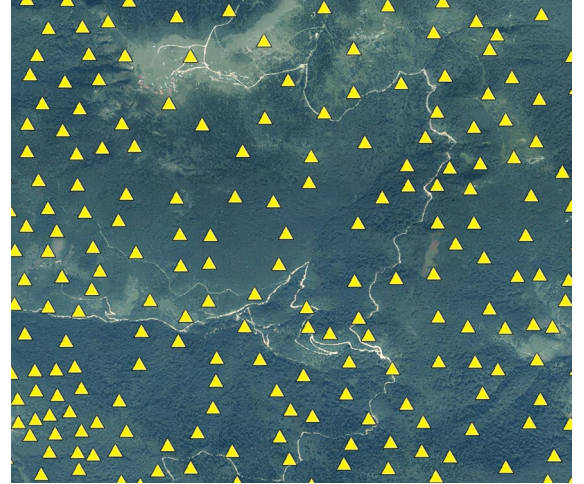


Şekil 3. Giresun bölgesi ormanlık arazi





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.

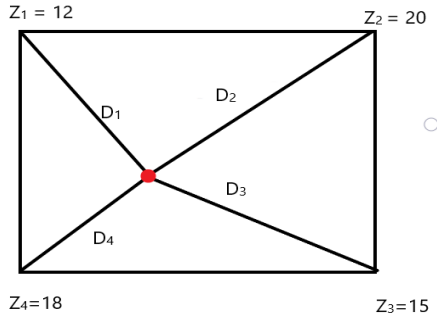


Şekil 8. Bitki örtüsü ve yerleşim yeri içermeyen araziye ait 271 kontrol noktası

### c. Ters Ağırlıklı Ortalama ile Entropolasyon 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 karşılaşılmaktadır. 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 entropolasyon yöntemi ile yapılmıştır. Ters ağırlıklı ortalama ile entropolasyon 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 Entropolasyon

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 görülmektedir.

Tablo 2. Kayıklık değerleri

| SAM12   | DTED2     |
|---------|-----------|
| x ≈ 5 m | x ≈ 2.5 m |
| y ≈ 8 m | y ≈ 7 m   |

### d. Hataların Tespiti

Entropolasyon 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.

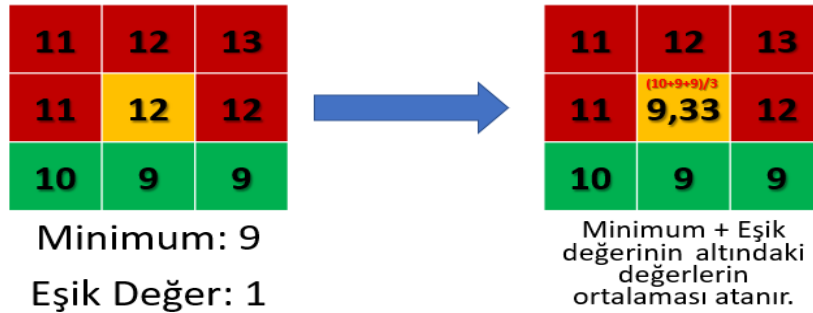
Ormanlık alanlardaki bu hataların giderilmesi amacıyla yüzeylerin filtrelenmesinde alternatif deneysel olarak yeni bir filtreleme yöntemi denenmiş ve özellikle orman alanlarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

#### e. Yeni Filtreleme Yönteminin Kullanılması

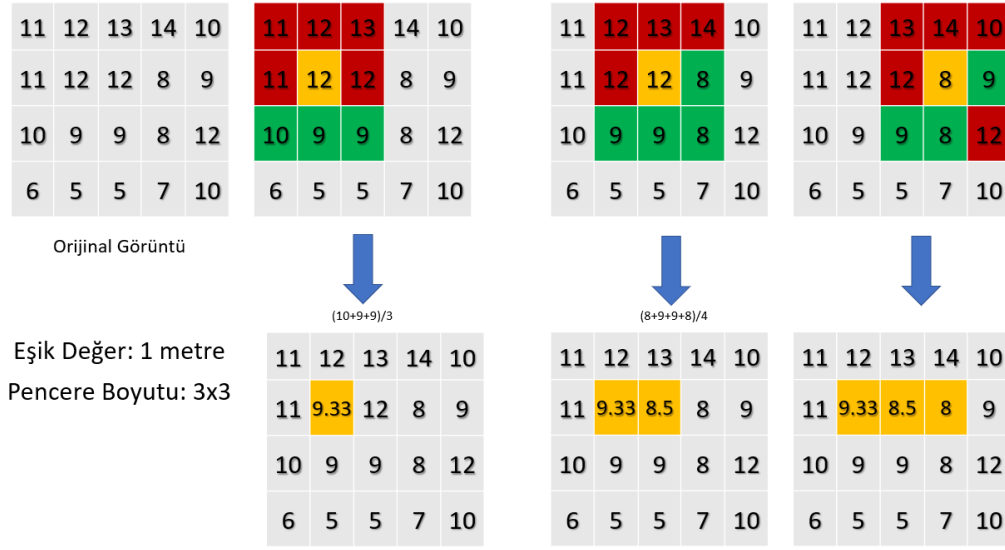
Filtreleme işlemlerinde komşu piksellerin yükseklik değerleri göz önünde bulundurularak merkez noktaya yeni bir yükseklik değeri ataması yapılmıştır. Bunun için bir eşik değeri belirlenmiştir. Arazi yüzeyi minimum yükseklik değerine sahip olan noktalar olacakları için bu minimum değere sahip noktalardan 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.

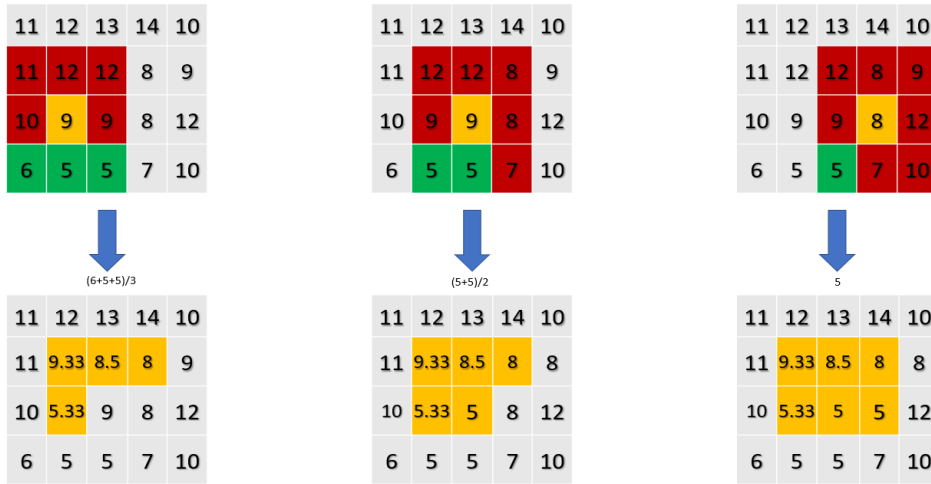
Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13'te filtreleme adımları gösterilmektedir.



Şekil 10. Filtrenin uygulama adımları (I)



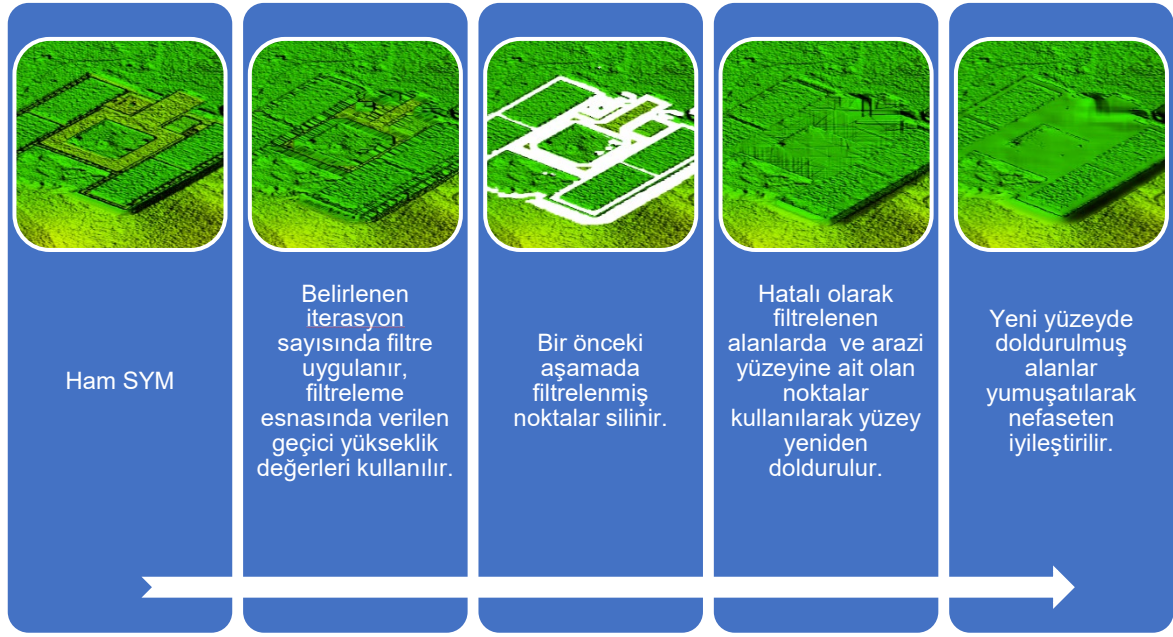
Şekil 11. Filtrenin uygulama adımları (II)



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 noktalardaki 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 Yeri 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<br>5 metre | 302          | <b>1.799</b> | <b>1.705</b> | <b>-0.564</b> | <b>2.553</b> | <b>-9.460</b> | <b>1.218</b>    | <b>9.460</b>   | <b>0.003</b>   |
|               | 2 iterasyon<br>5 metre | 302          | 1.810        | 1.715        | -0.569        | 2.553        | -9.471        | 1.221           | 9.471          | 0.003          |
|               | 3 iterasyon<br>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<br>5 metre | 271          | 1.374        | 0.955        | 0.983        | 7.326        | -2.568        | 1.065           | 7.326          | 0.008          |
|                                               | 2 iterasyon<br>5 metre | 271          | 1.332        | 0.946        | 0.935        | 7.669        | -2.568        | 1.028           | 7.669          | 0.008          |
|                                               | 3 iterasyon<br>5 metre | 271          | <b>1.322</b> | <b>0.933</b> | <b>0.932</b> | <b>7.669</b> | <b>-2.568</b> | <b>1.025</b>    | <b>7.669</b>   | <b>0.008</b>   |

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<br>5 metre | 622          | 6,617   | 6,600   | -0,378   | 18,677  | -26,845 | 5,110           | 26,845         | 0.008          |
|               | 2 iterasyon<br>5 metre | 622          | 9.908   | 7.398   | 6.580    | 42.251  | -21.420 | 8.017           | 42.251         | 0.005          |
|               | 3 iterasyon<br>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. TReX 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). TReX 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

- Amidror, 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 LiDARı 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 Geçiş 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 Aassessment of DEM From Radargrammetry Data* (Yüksek Lisans Tezi), International Institute for Geo-information 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.



## Türkiye'deki Astrojeodezik Çalışmaların Dünü, Bugünü ve Yarını (Astrogeodetic Studies in Türkiye: Past, Present and Future)

Müge ALBAYRAK<sup>1,2,\*</sup>, Fuat CANSEVER<sup>2,3</sup>, M. Tefik ÖZLÜDEMİR<sup>4</sup>,  
Kerem HALICIOĞLU<sup>5</sup>, Sébastien GUILLAUME<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Oregon State University, Civil & Construction Engineering, Corvallis, OR, ABD

<sup>2</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

<sup>3</sup>Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Bingöl Kadastro Müdürlüğü, Bingöl, Türkiye

<sup>4</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>5</sup>Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover, Almanya

<sup>6</sup>Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yersel Mühendislik Enstitüsü,  
Geomatik Mühendisliği, Yverdon-les-Bains, İsviçre

\*muge.albayrak@oregonstate.edu

Geliş Tarihi (Received): 12.03.2024

Kabul Tarihi (Accepted): 15.07.2024

### ÖZ

Türkiye'de astrojeodezik çekül sapması bileşenlerinin elde edilmesi için gerçekleştirilen gözlemler, 1942 yılında klasik optik-mekanik astrojeodezik aletlerle başlamıştır. Teknolojinin ilerlemesine paralel olarak geliştirilen sayısal astrojeodezik sistemler, astrojeodezik gözlem süresini kısaltmış, gözlemlenen çekül sapması bileşenlerinin hassasiyetini arttırmış ve optik-mekanik aletlerdeki gözlemcinin deneyimine bağlı olma gereksinimini azaltmıştır. Bu iyileştirmeler sayesinde çekül sapması bileşenlerinin kullanım alanları çağın gereksinimlerine daha iyi yanıt verebilecek şekilde genişlemiştir. Geçmişte çekül sapması bileşenleri ağırlıklı olarak ülke nirengi ağlarının yönlendirilmesi, koordinat dönüşümü, açı ve doğrultuların indirgenmesi, jeoit modelleme gibi amaçlarla kullanılmaktayken, günümüzde resmi jeoit modellerinin veya yükseklik sistemlerinin olası noksanlıklarını göstermek, Global Geopotansiyel Modellerin (GGM) doğrulanmasını sağlamak gibi birçok farklı görev de üstlenmiştir. Bu çalışmanın amacı, Türkiye'deki astrojeodezik çalışmaların kronolojik gelişimini incelemek ve en son teknolojiler ile gözlemlenen astrojeodezik çekül sapması verileri ile gelecekte ne tür çalışmalar gerçekleştirilebileceğine ışık tutmaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Astrojeodezik Çekül Sapması, Astrojeodezik Gözlemler, QDaedalus, TG-20

### ABSTRACT

Observations carried out to obtain astrogeodetic deflections of the vertical components in Türkiye began in 1942 with classical optical-mechanical astrogeodetic instruments. Thanks to digital astrogeodetic systems developed in parallel with the advancement of technology, astrogeodetic observation times have been shortened, the precision of observed deflections of the vertical components has improved, and the dependence on the observer's skill with optical-mechanical instruments has decreased. With these improvements to the systems, the usage of deflections of the vertical components has expanded considerably in line with the requirements of the times. In the past,

deflections of the vertical components were mainly used for purposes such as orientating country triangulation networks, coordinate transformation, reduction of angles and directions, and geoid modelling. However, today, they are used in many different tasks, such as showing possible deficiencies of official geoid models or height systems and ensuring the verification of Global Geopotential Models (GGMs). The aim of this study is to examine the chronological development of astrogeodetic studies in Türkiye and to shed light on potential future studies using astrogeodetic deflections of the vertical data observed with the latest technologies.

**Keywords:** Astrogeodetic Deflections of the Vertical, Astrogeodetic Observations, QDaedalus, TG-20

### 1. GİRİŞ

Astrojeodezik çekül sapması ( $\epsilon$ ), elipsoidal geometriyi temsil eden bir referans elipsoit normal ile bir yer noktasındaki gravite vektörünün doğrultusu arasındaki açısal farktır (Jekeli, 1999; Featherstone ve Rüeger, 2000). Çekül sapması verisi; nivelman, gravite vb. jeodezik ve jeofizik verilerden bağımsızdır. Dolayısıyla, çekül sapması verisinin herhangi bir sapma olmadan diğer verilerle karşılaştırılması gibi bir üstünlüğü bulunmaktadır. Bu sayede, günümüzde jeodezik, gravimetrik, hibrit vb. farklı veri setleri kullanılarak tanımlanan jeoit modellerinin ve yükseklik sistemlerinin doğruluklarının belirlenmesinde (kontrol edilmesinde) çekül sapması verisi öncelikli olarak tercih edilmektedir. Astrojeodezik çekül sapması verilerinin doğrudan kullanılmasıyla elde edilen yüksek doğrulukla tanımlanan İsviçre (İsviçre Jeoit Modeli 2004 CHGeo2004) ve Avusturya ulusal jeoit modelleri de mevcuttur (Marti, 2007; Kühtreiber, 2002).

Türkiye'de astrojeodezik gözlemlerle elde edilen veriler, Ulusal Nirengi Ağı'nın oluşturulmasından astrojeodezik yöntemlerle jeoit

belirlemeye kadar birçok farklı uygulamada başarıyla kullanılmıştır (Alp, 1993; Ayan, 1976; Gürkan, 1978; Alp, 1993). Ayrıca, çekül sapması verileri, Global Geopotansiyel Modellerin (GGM) doğruluğunun kontrolü veya doğrulanmasında da başvurulan bir veri setidir. Örneğin, Albayrak ve diğerleri (2020) tarafından İstanbul'da gözlemlenen çekül sapması verisi, Earth Gravitational Model *EGM2008* ve Global Gravity Model *GGMplus*'ın İstanbul'daki doğruluğunun belirlenmesinde kullanılmıştır (Pavlis, Holmes, Kenyon ve Factor, 2012; Hirt ve diğerleri, 2013). Bahsedilen bu astrojeodezik çalışmalar incelendiğinde, Türkiye'nin astrojeodezi alanında köklü bir geçmişe sahip olduğu ve günümüzde de bu geleneğin devam ettiği görülmektedir.

Türkiye'de astrojeodezik çalışmalar, 1942 yılında klasik optik-mekanik aletlerle başlamış ve teknolojinin gelişimine paralel olarak sürekli güncellenmiştir. Ülkemizde 1942–2023 yılları arasında Wild T3 astronomik teodolit, Wild T4 universal teodolit, DKM 3-A gibi optik-mekanik aletler; Astrojeodezik Kamera Sistemi AKS ve robotik elektronik takeometre temelli QDaedalus astrojeodezik sistemi gibi sayısal astrojeodezik ölçme aletleri kullanılmıştır. Bu sistemlerden AKS, bir Sayısal Zenit Kamera (SZK) olmakla beraber, ülkemizde geliştirilen ilk astrojeodezik sistemdir (Halicioğlu, Deniz ve Özener, 2016). QDaedalus sistemi ise İsviçre'den temin edilerek İstanbul'da kullanılmıştır (Guillaume, Bürki, Griffet ve Durand, 2012). SZK ve robotik elektronik takeometre temelli astrojeodezik sistemler, günümüzde en yaygın ve en güncel olarak kullanılan sistemlerdir (bkz Bölüm 4). Her iki sistemin de Türkiye'de kullanılması, astrojeodezik çalışmalar konusunda ülkemiz jeodezisinin günceli yakaladığının da bir göstergesidir.

Ülkemizde 80 yılı aşkın bir süredir gerçekleştirilen astrojeodezik çalışmaların devam ettirilmesi ve özellikle de jeoit modelleme çalışmalarına yeni bir ivme kazandırılması oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle, 2020 yılında geliştirilen Türkiye Jeoit Modeli-2020'nin TG-20 doğruluğunun belirli bölgelerde test veya kontrol edilmesi için QDaedalus sistemi vasıtasıyla astrojeodezik gözlem kampanyası gerçekleştirilmesi faydalı olacaktır (Yıldız ve diğerleri, 2021). Bu makalede, geçmişten günümüze Türkiye'de gerçekleştirilen tüm astrojeodezik çalışmalar ele alınarak, ilerde QDaedalus sistemi ile ülkemizde öncelikli olarak ne tür çalışmalar yapılabileceği tartışılmaktadır.

## 2. ASTROJEODEZİK ÇEKÜL SAPMASI BİLEŞENLERİNİN HESAPLANMASI

Astrojeodezik çekül sapması geleneksel olarak, astrojeodezik cihazlarla yıldızlara gözlem yapılarak, astronomik enlem ve boylamın hesaplanması ile belirlenmektedir. Gözlemlenen çekül sapması mutlak ve bağıl çekül sapması olarak iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Mutlak çekül sapması, yer merkezli bir referans sistemini (örneğin, WGS84, ITRF2020) ifade ederken, bağıl çekül sapması, yerel bir yatay jeodezik referans sistemini ve buna karşılık gelen Yer merkezli olmayan referans elipsoidini ifade etmektedir (Featherstone ve Olliver, 2013; Featherstone ve Goyal, 2022). Bu sınıflandırma, kullanılan astrojeodezik aletlerden bağımsızdır. Örneğin, Türkiye'de geçmişte kullanılan, Wild T4 universal teodoliti veya DKM 3-A gibi astrojeodezik aletler ile günümüzde mutlak çekül sapması bileşeni gözlemlenebilir. Bununla birlikte, ülkemizdeki GPS temelli sayısal astrojeodezik uygulamaların yaygınlaşmasından önce, optik-mekanik aletlerle yapılan gözlemlerde bağıl çekül sapması bileşenleri elde edilmiştir.

Mutlak veya bağıl çekül sapması bileşenlerinin elde edilmesi için jeodezik ve astronomik koordinat bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde, mutlak çekül sapması elde etmek için gerekli jeodezik enlem ( $\phi$ ) ve boylam ( $\lambda$ ) Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System GNSS) ile elde edilirken; astronomik enlem ( $\Phi$ ) ve boylam ( $\Lambda$ ), GNSS ve yük bağlaşımlı aygıt (Charged Coupled Device-CCD) teknolojilerinin entegre edildiği sayısal astrojeodezik sistemler (SZK, QDaedalus vb.) ile gözlemlenmektedir. Jeodezik ve astrojeodezik gözlemler sonucunda, Kuzey-Güney ( $\xi$ ) ve Doğu-Batı ( $\eta$ ) astrojeodezik çekül sapması bileşenleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır (Robbins, 1951; Pick, Picha ve Vyskočil, 1973; Heiskanen ve Moritz, 1984):

$$\xi = \Phi - \phi \quad (1)$$

$$\eta = (\Lambda - \lambda) \cos \phi \quad (2)$$

Astrojeodezik çekül sapması bileşenlerinin gözlemlenmesi için gerekli donanım ve yazılımlar sürekli güncellenerek iyileştirilirken, (1) ve (2) eşitliğinde görüldüğü gibi temel prensip korunmuştur. Çekül sapması bileşenlerinin belirlenmesi için gerekli işlem adımları ve teorik bilgiler, Türkçe olarak, Halicioğlu (2015) tarafından detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

### 3. TÜRKİYE'DE OPTİK-MEKANİK ALETLER İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

Türkiye'de astrojeodezik çalışmalar, 1942 yılında optik-mekanik aletler ile başlamıştır. 1942 ile 1990 yılları arasında tüm ülkeyi kapsayacak ölçekte planlanan ulusal astrojeodezik gözlemler Harita Genel Müdürlüğü tarafından Wild T3 astronomik teodoliti veya Wild T4 universal teodoliti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık yarım asır boyunca Türkiye genelinde aktif olarak kullanılan optik-mekanik aletler, daha sonraki yıllarda küçük ölçekli yerel çalışmalarda kullanılmıştır.

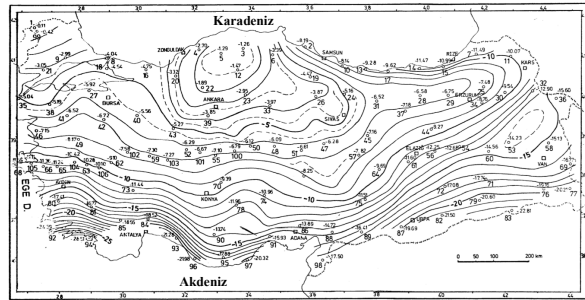
Türkiye'de astrojeodezik çalışmalar ilk olarak Ulusal Nirengi Ağı'nın yönlendirilmesi amacı ile başlatılmıştır. Bu amaçla, 1942 yılından 1953 yılına kadar ülke genelinde 98 adet I'inci derece noktada Wild T4 universal teodoliti kullanılarak astronomik enlem, boylam ve azimut gözlemleri yapılmıştır (Şerbetçi, 1999). Bu gözlem döneminde Türkiye'de bilgisayar teknolojisinin yetersiz olması nedeniyle, bu gözlemler ABD'de Askeri Harita Servisi'ndeki (Army Map Services) bir UNIVAC bilgisayar tarafından dengelenmiştir. Gözlem verileriyle yapılan bu dengeleme sonucunda Türkiye Ulusal Datumu 1954 (TUD-54) hesaplanmıştır (Alp, 1993).

1953–1961 yılları arasında, Wild T4 universal teodoliti kullanılmaya devam edilerek, Türkiye'nin Doğu-Batı doğrultusundaki astrojeodezik jeoit kesitini belirlemek amacıyla I, II, III ve IV'üncü derece nirengi noktalarından oluşan 21 noktada astronomik enlem ve boylam gözlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu noktalardan sadece iki tanesinde enlem ve boylam gözlemleri ile birlikte azimut gözlemi de yapılmıştır (Alp, 1993).

1970'li yıllarda astronomik ölçülere dayalı astrojeodezik jeoit belirleme çalışmaları başlamıştır. Bir yandan astrojeodezik gözlemlere devam edilirken, öte yandan geçmiş ve yeni verilerle astrojeodezik jeoit hesaplamaları sürdürülmüştür. 1977–1990 yılları arasında Wild T3 astronomik teodoliti ile uyumlu usturlap cihazı kullanılarak gözlemler gerçekleştirilmiştir (Ata, 2007). 1977–1979 yılları arasındaki gözlemlerde 30 farklı noktada sadece astronomik enlem ve boylam gözlemleri; 1979–1990 yılları arasında ise 39'unda azimut gözlemi de yapılmış olmak üzere toplam 170 farklı noktada astronomik enlem ve boylam gözlemleri tamamlanmıştır. 1978–1990 yılları arasındaki gözlemler; Akdeniz bölgesinden başlayarak saat ibresi istikametinde yatay kontrol ağındaki poligonların sıklaştırılması ile oluşturulan—astronomik enlem, boylam ve

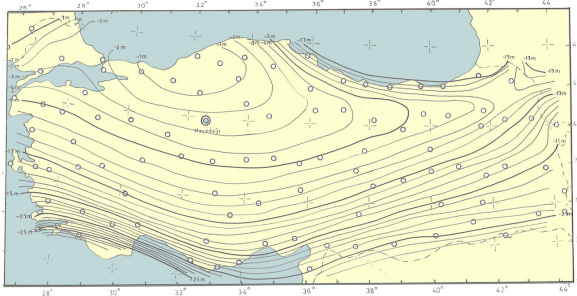
azimutu bilinen yeni Laplace noktalarında yapılmıştır. Astrojeodezik jeoit hesabında ise enterpolasyon yöntemlerinden faydalanılarak gözlem yapılmayan noktalarda çekül sapması bileşenlerinin kestirimleri yapılmıştır (Alp, 1993).

Türkiye'nin ilk geoidi, 1976 Türkiye Astrojeodezik Geoidi, 1942–1976 yılları arasındaki astrojeodezik gözlem verileri içinden seçilen 106 Laplace noktası kullanılarak Ayan (1976) tarafından hesaplanmıştır (Şekil 1). Bu jeoit sadece astrojeodezik çekül sapması ölçüleri ile hesaplanmıştır. Geoidin datum başlangıç noktası Ankara-Meşedağ kabul edilmiş, datum olarak 1950 Avrupa Datumu (European Datum ED50) ve dolayısıyla referans elipsoidi olarak 1924 Uluslararası Hayford elipsoidi kullanılmıştır. 1976 Türkiye Astrojeodezik Geoidi hesabında, eşdeğer ondülasyon eğrileri belirlenirken kübik parabol ile enterpolasyon yöntemi kullanılmış ve çekül sapması noktalarındaki jeoit yükseklikleri, üç ayrı model ağına dengeleme sonuçlarının ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Bu jeoit, Avrupa geoidine bağlanmak üzere 106 Laplace noktasının jeoit yükseklikleri -3.85 metre kaydırılarak, Meşedağ noktası jeoit ondülasyonuna uygun hale getirilmiştir. 1976 Türkiye Astrojeodezik Geoidi, diğer jeoitlerle karşılaştırıldığında en iyi uyuşmanın Levallois-Monge geoidi (1975 Avrupa Geoidi) ile olduğu ve aralarındaki farkın genellikle 1 metrenin altında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca jeoit belirleme doğruluğu  $\pm 1.5$  metre olarak hesaplanmıştır (Ayan, 1976).



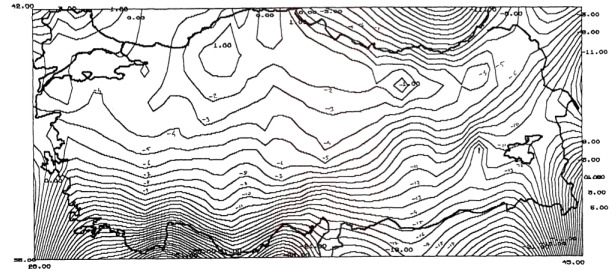
Şekil 1. 1976 Türkiye Astrojeodezik Geoidi (Ayan, 1976).

Astrojeodezik jeoit belirleme alanında gerçekleştirilen ikinci çalışma ise Gürkan (1978) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, 98 adet Laplace noktasında astrojeodezik çekül sapması verisi kullanılarak, iki değişkenli polinom yardımıyla 1978 Türkiye Astrojeodezik Geoidi hesaplanmıştır (Şekil 2), ancak bu jeoit için bir doğruluk değeri (standart sapma, karesel ortalama vb.) verilmemiştir (Gürkan, 1978).



Şekil 2. 1978 Türkiye Astrojeodezik Geoidi (Harita, Halicioğlu (2015, s. 8) tarafından Gürkan (1978) verileriyle oluşturulmuştur).

Türkiye'de gerçekleştirilen üçüncü astrojeodezik jeoit modelleme çalışması, Alp (1993) tarafından ilk kez astrogravimetrik nivelman yöntemi ile hesaplanan Türkiye Astrojeodezik Geoidi 1994 (TAG-94) çalışmasıdır (Şekil 3). Astrogravimetrik nivelman yöntemi, özellikle dağlık alanlarda ve uzak noktalar arasındaki yatay mesafelerin fazla olması nedeniyle verilerin yatay doğrultuda doğrusal olmayan değişimler göstermesi sorunu çözmek amacıyla tercih edilmiştir. TAG-94 çalışmasında, Türkiye genelinde 1942–1990 yılları arasında gözlemlenen 319 astronomik enlem ve boylam verisi kullanılmıştır. 1977–1979 yılları arasında astronomik noktaların sıklaştırılmasına katkı sağlayan ancak diğer ölçülere göre duyarlılığı düşük olan astrolap ölçüleri (23 astrolap ölçüsü) bu veri setine dahil edilmediğinden 297 astronomik enlem ve boylam verisi kullanılmıştır. TAG-94 için 98, 255, 274, 278 ve 297 Laplace noktasından oluşan beş farklı nokta kümesi oluşturulmuştur. Her nokta kümesinden oluşturulan farklı jeoit modelleri karşılaştırılmıştır. 98 Laplace noktası kullanılarak oluşturulan astrojeodezik jeoit modeli diğer çözümlerle uyumlu çıkmamış, bu uyumsuzluğun nokta sayısının az olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Astrolap ölçülerinin dahil edilmediği 255 noktalı astrogravimetrik jeoit modeli en uygun sonuçları vermiştir. Ayrıca Avrupa geoidine bağlanmak amacıyla Laplace noktalarının jeoit yükseklikleri Meşedağ noktası jeoit ondülasyonuna, 1976 Türkiye Astrojeodezik Geoidi'ndeki gibi, -3.85 metre kaydırılmıştır. Meşedağ noktasından uzaklaştıkça, standart sapma değerlerinin arttığı gözlemlenmiş ve özellikle Güneydoğu ve Akdeniz bölgelerindeki nokta sayısının azlığı, bu bölgelerdeki standart sapmanın  $\pm 1.5$  metrenin üzerine çıkmasına neden olmuştur (Alp, 1993).



Şekil 3. 1994 Türkiye astrojeodezik geoidi (Alp 1993, s. 86).

Türkiye'yi kapsayan ulusal ölçekteki bahsedilen çalışmalar dışında, 1998 ve 2010 yıllarında Kern DKM 3-A universal teodoliti ve OTR-6 kronografı kullanılarak astrojeodezik ağ oluşturmak amacıyla Konya'da iki farklı astrojeodezik gözlem kampanyası gerçekleştirilmiştir. 1998 yılındaki çalışmada, Acar (1999) tarafından Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat Kampüsü'nde, Kampüs GPS Test Ağı'ndaki 6 noktada astronomik enlem, boylam ve azimut gözlemleri gerçekleştirilmiştir. Test ağındaki gözlemler sonucunda, Kuzey-Güney çekül sapması bileşenlerinin ( $\xi$ ) -12.49" ile 3.93" arasında, Doğu-Batı çekül sapması bileşenlerinin ( $\eta$ ) ise -13.93" ile -2.83" arasında değiştiği belirlenmiştir. 2010 yılındaki çalışmada ise, 6 pilyeden oluşan bir GPS deformasyon ağında gözlemler yapılmıştır. Türen ve Üstün (2016) tarafından gerçekleştirilen gözlemlerde astronomik enlem ve boylam hassasiyeti, sırasıyla 0.3" ve 1" olarak belirlenmiştir. Astronomik boylamın astronomik enlem kadar hassas olmamasının sebebinin, zaman senkronizasyonunda yaşanan zorluklar olduğu yazarlar tarafından açıklanmıştır. Ayrıca, sonuç ürün olan çekül sapmalarının karesel ortalama hatasını 0.59" ve bu altı noktada astronomik nivelman ile hesaplanan jeoit ondülasyonunun km'deki karesel ortalama hata değerini  $\pm 18$  ppm olarak belirlemişlerdir.

#### 4. TÜRKİYE'DE DİJİTAL ASTROJEODEZİK SİSTEMLER İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, İstanbul'da kullanılan iki farklı sayısal astrojeodezik sistem (Türkiye'de geliştirilen zenit kamera temelli Astrojeodezik Kamera Sistemi (AKS) ve İsviçre'den temin edilen robotik elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemi) ile gerçekleştirilen çalışmalardan bahsedilmektedir.

### a. Astrojeodezik Kamera Sistemi (AKS)

Astrojeodezide optik sistemlerdeki ölçme ve veri değerlendirme sürecindeki zorluklar, bu alanda çalışan araştırmacıları fotoğrafik zenit kameraların geliştirilmesine yönlendirmiştir. Daha sonrasında ise, CCD algılayıcıların icadı ile milenyum başlangıcında ilk sayısal sistemler SZK'lar geliştirilmiştir. Standart bir SZK'nın ana bileşenleri; teleskop, CCD kamera, eğimölçer, GPS alıcısı ve anteni, odaklayıcı, sistemi taşıyan bir altyapı ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Almanya ve İsviçre'de başarıyla geliştirilen ilk SZK'lar, sırasıyla Taşınabilir Zenit Kamera 2-Dijital (Transportable Zenith Camera 2-Digital TZK2-D (Hirt, 2004; Hirt, Bürki, Somieski ve Seeber, 2010) ve Dijital Astronomik Sapma Ölçme Sistemi (Digital Astronomical Deflection Measuring *DIADDEM* (Bürki, Müller ve Kahle, 2004; Somieski, 2008) olarak isimlendirilmiştir. Bu iki sistemin başarısı, diğer ülkelerde de benzer SZK'ların geliştirilmesi için teşvik edici olmuştur, ancak dünya genelinde geliştirilen SZK sayısı hala oldukça sınırlıdır. Almanya'da ve İsviçre'de geliştirilen SZK'lar dışında, Letonya, Çin, Türkiye, ABD ve Rusya SZK geliştirmiştir (Abele ve diğerleri, 2012; Tian ve diğerleri, 2014; Halicioğlu, 2015; Hughes ve diğerleri, 2019; Murzabekov, Fateev, Pruglo ve Ravdin, 2022). Son on yılda arazi çalışmalarında en aktif kullanılan SZK'lar ise İsviçre ve Letonya'da geliştirilen sistemlerdir. Geliştirilen her bir SZK, eşsiz olmakla beraber; İsviçre'de geliştirilen *DIADDEM* daha sonra Kompakt Dijital Astrometrik Kamera (COmpact DIgital Astrometric Camera *CODIAC*) olarak güncellenmiştir ve iki adet (Mavi ve Kırmızı *CODIAC*) üretilmiştir (Guillaume, 2015). Letonya'da geliştirilen *VERTIVAL* by STARS *VESTA* ise dört adet üretilmiştir (Varna ve diğerleri, 2023). Bahsedilen diğer SZK'lar sadece bir adet üretilmiştir.

Halicioğlu (2015) tarafından, Türkiye'de geliştirilen ilk SZK, Astrojeodezik Kamera Sistemi 1 *AKS1* olarak isimlendirilmiştir (Şekil 4a). *AKS1*, TÜBİTAK 111Y125 numaralı "CCD kameralar ile astrojeodezik çekül sapmalarının belirlenmesi" projesi desteğiyle geliştirilmiştir (Deniz, 2014). Hassasiyetini (presizyon) belirlemek için gerekli test çalışmaları, Boğaziçi Üniversitesi (BÜ) Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KOERI) kampüsünde bulunan, geçmişte Danjon astrolabı kullanılan, Kandilli test istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Danjon-astrolabı (veya -usturlabı), astronomik enlem ve boylamı aynı anda belirlemeye yarayan yüksek presizyonlu bir astrojeodezik alettir. Kandilli test istasyonunun seçilmesinin temel nedeni, İstanbul

Teknik Üniversitesi (İTÜ) ve BÜ işbirliği ile gerçekleştirilen iki TÜBİTAK projesinin uygulama alanının BÜ Kandilli yerleşkesi olarak belirlenmiş olmasıdır. Projeler kapsamında zenit kamera gözlemlerine uygun olarak modernize edilmiş olan test istasyonu, mimari olarak yıldız gözlemleri için tasarlanmış olduğundan ve proje ekibinin gözlemlere sürekli erişimini mümkün kılması nedeniyle yer seçiminde belirleyici olmuştur. Türkiye'nin ilk zenit kamera gözlem istasyonu olarak 2012–2017 yılları arasında akademik araştırmalara hizmet veren bu laboratuvar, BÜ Kandilli kampüsünün yapılaşma ve çevre düzenleme planları kapsamında yıkılarak, yeşil alan olarak kullanıma açılmıştır. Kandilli istasyonundaki gözlemler sonucunda, astronomik enlem ( $\Phi$ ) ve boylam ( $\Lambda$ ) belirleme presizyonu sırasıyla  $\pm 0.19''$  ve  $\pm 0.28''$  olarak belirlenmiştir (Halicioğlu, 2015).

*AKS1*'in doğruluğu ise, İstanbul'un Anadolu yakasında dört noktadan oluşan (Kandilli test noktasıda dahil) bir test ağında belirlenmiştir (Şekil 4b). İstanbul'daki test ağında, GPS ve Nivelman ölçülerinden elde edilerek dengelenen jeoit yükseklik farkları ile astronomik nivelman yöntemi ile hesaplanan jeoit yükseklik farkları karşılaştırılmıştır ve bu karşılaştırmanın neticesinde *AKS1*'in doğruluğu tanımlanmıştır. *AKS1*'in astronomik enlem ve boylam belirleme presizyonu yaklaşık  $\pm 0.3''$  olarak hesaplanmıştır. Test ağında, çekül sapmalarından hesaplanan jeoit yükseklik farklarının ( $\Delta N$ ) dengelenmesinden, birim ölçünün ( $S = 1$  km için) karesel ortalama hatası ( $m_0$ ):

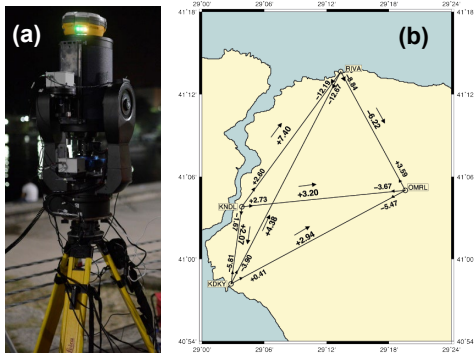
$$P_{\Delta N} = 1/S_{km^2} \text{ için } m_0 = \pm 2.9 \text{ mm/km} \quad (3)$$

olarak hesaplanmıştır. Kandilli istasyonunun jeoit yüksekliğine bağlı olarak, çekül sapmalarından hesaplanan jeoit yükseklik farklarının ( $\Delta N$ ) en küçük kareler yöntemiyle dengelenmesinden ise birim ölçünün karesel ortalama hatası ( $m_0$ ):

$$P_{\Delta N} = 1/S_{km^2} \text{ için } m_0 = \pm 3.6 \text{ mm/km} \quad (4)$$

olarak hesaplanmıştır. Bu değerler sistemin yaklaşık doğruluğu olarak kabul edilmiştir (Halicioğlu, 2015).





Şekil 4. (a) Astrojeodezik Kamera Sistemi 1 (AKS1) (Halicioğlu, 2015, s. 69), (b) AKS1'in doğruluğunu belirlemek için oluşturulan test ağı (Halicioğlu, 2015, s. 99).

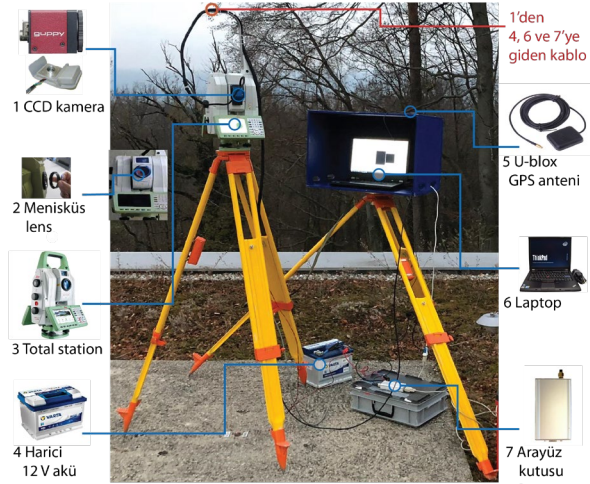
İsviçre'de geliştirilen SZK sistemleri (DIADEM, CODIAC) gibi, Türkiye'de geliştirilen AKS de güncellenerek, modernize edilmiştir. AKS1'in güncellenmesi gerektiğinin en önemli göstergesi, hassasiyeti ve doğruluğu belirlenirken karşılaşılan sorunlar (gözlem süresinin uzun olması, daha taşınabilir bir sistem geliştirme gereksinimi, düzeçleme sisteminin iyileştirilmesi vb.) olmuştur. TÜBİTAK 115Y237 numaralı "Astro-jeodezik ve GNSS/Nivelman verilerinin entegrasyonu ile yerel jeoit modellemesi" projesi desteği ile gerekli donanım ve yazılım güncellemeleri yapılmıştır (Özlüdemir, 2018). Bu güncellemelerin ardından, kullanımı daha kolay ve ölçüm süresi yaklaşık olarak yarı yarıya azalan sistem (gözlem süresinin 3-4 saatten, 1-2 saate inmesi), AKS2 olarak yeniden isimlendirilmiştir (Şekil 5). AKS2'nin hassasiyetini belirlemek için İTÜ kampüsünde tesis edilen İTÜ test noktasında beş farklı gece boyunca gözlem gerçekleştirilerek, AKS2'nin hassasiyeti 0.3" olarak hesaplanmıştır (Özlüdemir, 2018; Albayrak ve diğerleri, 2019). AKS2'nin doğruluğu ise QDaedalus sistemi ile karşılaştırılarak belirlenmiştir (QDaedalus sistemi için bkz bir sonraki bölüm: Bölüm 4.b).



Şekil 5. Astrojeodezik Kamera Sistemi 2 (AKS2) (Albayrak ve diğerleri, 2019, s. 7).

## b. QDaedalus Sistemi

SZK'ların geliştirilmesindeki zorluklar ve sistemin ağırlığı, özellikle dağlık bölgelerde kullanılamaması gibi nedenler, SZK'ya alternatif olarak robotik elektronik takeometre temelli astrojeodezik sistemlerin geliştirilmesine yol açmıştır. İlk geliştirilen robotik elektronik takeometre temelli sistem, İsviçre'de geliştirilen ve Şekil 6'da gösterilen QDaedalus sistemidir (Guillaume ve diğerleri, 2012). İkinci sistem ise ABD'de geliştirilen elektronik takeometre astrojeodezik kontrol sistemidir (Total Station Astrogeodetic Control System TSACS (Hardy ve diğerleri, 2021)). Bu sistemlerden QDaedalus sistemi, Türkiye'de 2018 yılında 6 ay boyunca kullanılmıştır (Özlüdemir, 2018; Albayrak, 2020).



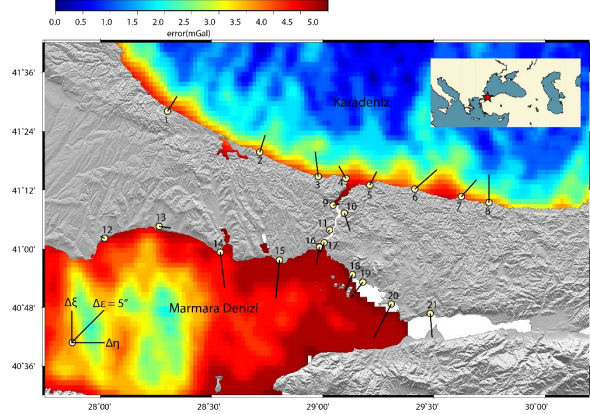
Şekil 6. QDaedalus sistemi (Albayrak, Willi ve Guillaume, 2023, s. 250).

QDaedalus sistemi, İsviçre'den temin edilerek, AKS2'nin doğruluğunun QDaedalus sistemi ile karşılaştırılarak belirlenmesi için kullanılmıştır. AKS2 için tesis edilen İTÜ test noktasında, QDaedalus sistemi ile altı farklı gece astrojeodezik gözlem gerçekleştirilmiştir. QDaedalus gözlemleri sonucu, D-B ve K-G çekül sapması bileşenlerine ait standart sapma değerleri ~0.2" olarak saptanmıştır. AKS2'nin hassasiyetinin aynı noktada 0.3" olarak tespit edilmesi (bkz Bölüm 4.1) ve iki sistem arasındaki farkın, K-G ve D-B bileşenlerinde ~0.2" olması, AKS2 ile gözlemlenen çekül sapması bileşenlerinin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir (Albayrak ve diğerleri, 2019; Albayrak, 2020). AKS2'nin doğruluğunun belirlenmesi için gerçekleştirilen gözlemler aynı zamanda, QDaedalus sisteminin İsviçre'den temin edilmesinden sonra gerçekleştirilmesi gereken

test gözlemlerinin de tamamlanmasını sağlamıştır. Ayrıca bu çalışma, QDaedalus sisteminin yeni geliştirilen bir astrojeodezik sistemin (AKS2) doğruluğunu belirlemek için kullanıldığı ilk çalışma olması bakımından da önemlidir.

AKS2'nin QDaedalus sistemi gibi kolay taşınabilir bir sistem olmaması ve İstanbul'da gerçekleştirilmesi planlanan gözlemlerin dağlık veya kıyı bölgelerde olması sebebiyle, 30 nirengi noktası ile oluşturulan İstanbul Astrojeodezik Ağı'ndaki (İAA) gözlemlerde QDaedalus sisteminin kullanılması tercih edilmiştir (Özlüdemir, 2018). İAA, İstanbul GPS Nirengi Ağı İGNA verileriyle oluşturulmuştur (Ayan ve diğerleri, 2006). İGNA'dan temin edilen veriler; ITRF96 datumunda jeodezik enlem, jeodezik boylam ve elipsoidal yükseklik verileri, Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı TUDKA ile ilişkilendirilerek nivelman ölçüleri ile elde edilen ortometrik yükseklik bilgileridir. 30 nirengi noktasındaki gözlemler üç farklı astrojeodezik gözlem kampanyasıyla tamamlanmıştır (ikinci ve üçüncü gözlem kampanyalarında ek ölçülerin yanı sıra kontrol ölçüleri de gerçekleştirilmiştir). İAA, Türkiye'nin ilk yoğun astrojeodezik ağıdır ve Türkiye, QDaedalus sistemi'nin Almanya, İsviçre, Macaristan ve Avustralya'dan sonra kullanıldığı beşinci ülkedir. QDaedalus sistemiyle 2014–2019 yılları arasında dünya genelinde gerçekleştirilen tüm astrojeodezik çalışmalar, Albayrak ve Guillaume (2021) tarafından incelenmiştir.

İstanbul astrojeodezik ağını oluşturan 30 nirengi noktasının, 13'ü Asya kıtasında, geri kalan 17'si ise Avrupa kıtasındadır. İAA'nın oluşturulmasında 9 nokta İstanbul'un iç ve dağlık bölgelerinden seçilmişken, 21 nokta kıyı bölgelerinden seçilmiştir. Bu seçim, GGM doğruluğunun özellikle kıyı ve dağlık bölgelerde kontrol edilmesi amacıyla yapılmıştır. QDaedalus sistemi ile İAA'daki gözlemler, Hauk, Hirt ve Ackermann (2017) tarafından önerildiği üzere, her bir seri 15 dakika olmak üzere, bir oturumda üç ya da dört seri gözlem gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, İAA'da elde edilen astrojeodezik çekül sapması bileşenlerinin hassasiyetleri  $\sim 0.2''$  olarak hesaplanmıştır. İAA'da QDaedalus ile elde edilen çekül sapması verileri, GGMplus ve EGM2008 ile karşılaştırıldığında, bazı noktalarda  $6''$  büyüklüğe ulaşan farklar tespit edilmiştir (Şekil 7). Bu farkların kaynağının, uydu-altimetre verilerinden elde edilen deniz gravite verilerinin hassasiyetinden kaynaklandığı Albayrak ve diğerleri (2020) tarafından belirtilmiştir.



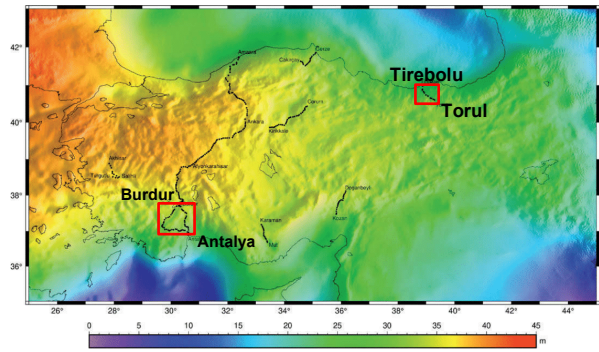
Şekil 7. İstanbul Astrojeodezik Ağı'nda QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen gözlemler ile EGM2008 modeli arasındaki farklar (Harita, Albayrak ve diğerleri (2023, s. 8) tarafından Albayrak ve diğerleri (2020) verileriyle oluşturulmuştur).

## 5. TARTIŞMA

Astrojeodezik çekül sapması verisi, navigasyon, konumlama ve gravite alanı tanımlama gibi amaçlarla geliştirilen uydu sistemleri olmadan önce yerel veya ulusal ölçekte jeoit modeli tanımlamak için ilk başvurulacak veri seti konumundaydı. Dolayısıyla, Türkiye'de 1942–1990 yılları arasında, kuruluşundan bu yana jeodezik ölçme faaliyetlerinin aktif yürütüldüğü Harita Genel Müdürlüğü tarafından, optik-mekanik astrojeodezik aletlerle oldukça yoğun astrojeodezik gözlem kampanyaları gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık elli yıllık bir zaman diliminde optik-mekanik aletler kullanılarak zor şartlarda gerçekleştirilen gözlemler neticesinde elde edilen bu bağıl astrojeodezik çekül sapması verisinin, günümüzde kullanıcıların beklenti ve ihtiyaçlarına cevap verebilmesi için Hirt ve Wildermann (2018) tarafından Venezuela'da gerçekleştirilen çalışmadaki gibi mutlak çekül sapmasına dönüştürülmesi gerekmektedir. Ayrıca ülkemizde geçmişten günümüze gözlemlenen tüm astrojeodezik verilerin, çevrimiçi bir veri deposu aracılığıyla erişime açılması, verilerin yeniden kullanılmasını mümkün kılacak ve dolayısıyla astrojeodezi alanında daha fazla çalışma yapılmasına ön ayak olacaktır. Ülkemizde sadece sayısal astrojeodezik sistemlerle gözlemlenen çekül sapması verileri erişilebilir durumdadır. Bu verilere, doktora tezleri ve kamuoyuyla paylaşılan bilimsel makaleler vasıtasıyla ulaşılabilirlik sağlanmaktadır (Halicioğlu 2015; Halicioğlu ve diğerleri, 2016; Albayrak 2020; Albayrak ve diğerleri, 2020). Dolayısıyla, ülkemizde 80 yılı aşkın bir geçmişe sahip astrojeodezik verilerin,

jeodezik koordinatları ile birlikte çevrimiçi bir veri deposu oluşturularak paylaşılması, gelecekte bu alanda yapılacak çalışmalar açısından önem arz etmektedir.

Sayısal astrojeodezik sistemlerle İstanbul'da gerçekleştirilen çalışmalar, sistemlerin hassas ve güvenilir sonuçlar sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, son on yılda jeodezi alanında yaşanan gelişmeler (ABD'de iki farklı astrojeodezik sistem geliştirilmesi gibi), astrojeodezik sistemlerin güncel jeodezi çalışmalarındaki uygulama alanının artacağını göstermektedir (Hughes ve diğerleri, 2019; Hardy ve diğerleri, 2021). Bu nedenle, ülkemizde halihazırda sayısal astrojeodezik sistemlerle mevcut potansiyeli ortaya konulan çalışmalar hız kesmeden devam ettirilmelidir. Bu kapsamda, ulusal ölçekte Yıldız ve diğerleri (2021) tarafından geliştirilen TG-20'nin doğruluğunun belirli bölgelerde kontrol edilmesi için astrojeodezik çekül sapması verisinden yararlanılması uygun olacaktır. TG-20'nin jeodezik görelî kontrolü için ölçüm çalışmaları, Şekil 8'de görüldüğü üzere, GNSS ve nivelmanın eş zamanlı olarak ölçüldüğü yedi adet GPS ve nivelman hattında (profilinde) yürütülmüştür. Bu nedenle, bu yedi GPS ve nivelman profilinden TG-20'nin astrojeodezik kontrolü için öncelik arz eden iki tanesi tespit edilmiştir. İlk bölge, Amasya'dan Antalya'ya kadar uzanan Kuzey-Güney jeodezik profilindeki Burdur-Antalya hattıdır. İkinci bölge ise, Tirebolu-Torul arasında tesis edilen jeodezik profildir. Özellikle, Tirebolu-Torul profili, vadi içerisinde derin bir hattı içerdiğinden, bu hattın birçok noktasında görülebilecek uydu sayısı oldukça azdır (Simav ve diğerleri, 2023), yani uydu geometrisi oldukça düşüktür. Dolayısıyla, bu tür bölgelerde multi-GNSS vb. uydu tekniklerini temel veri seti olarak içeren bir çözüm yöntemi, elipsoidal yükseklik hatalarını azaltamayacağı ve gerçek anlamda bir kontrol veri seti oluşturamayacağı için tek frekanslı GPS alıcısı kullanılan ve uydu geometrisi probleminde daha az etkilenen QDaedalus sisteminin kullanımı en uygun çözüm yöntemi olarak görülmektedir.



Şekil 8. Türkiye Geoidi 2020'nin (TG-20) geliştirilmesi için gerçekleştirilen GNSS ve nivelmanın eş zamanlı olarak ölçüldüğü yedi GPS ve nivelman profili (Yildiz ve diğerleri, 2021, s. 499).

Burdur-Antalya ve Tirebolu-Torul jeodezik profilleri incelendiğinde, sırasıyla 32 ve 13 noktadan oluşturulduğu görülmektedir. Astrojeodezik bir profile dağlık alanlarda topoğrafyanın çok fazla değişim göstermesi sebebiyle, noktalar arası mesafenin kısa tutulması (yaklaşık 1 km) gerekmektedir. Ayrıca, Hirt ve Flury (2008) tarafından astrojeodezik çekül sapması bileşenlerinin minimum 50 m ve maksimum 1 km aralıklı gözlemlenmesinin, topoğrafya sapmasını yeterli düzeyde göstereceği önerilmiştir. Bu nedenle, mevcut bu iki profile sıklaştırma yapılmalıdır. Arazi çalışması öncesi gerçekleştirilecek istikşaf çalışması ile belirlenecek bu profillerde gözlemlerin yapılacağı zamanın yaz mevsimi olması tercih edilirse, yaz aylarında gecelerin kısa olması sebebiyle, bir gecede QDaedalus ile 5 veya 6 noktada gözlem tamamlanabilir. Kış aylarında ise, gecelerin uzun olması dolayısıyla, bir gecede 7 veya 8 noktada gözlem yapılabilir. Belirtilen gözlem sayısı noktalar arasındaki mesafenin kısa olması (1-2 km gibi) ve astronomik gözleme uygun tam gece gözlem yapılması durumunda geçerlidir. Burdur-Antalya profili hem yaz hem de kış mevsiminde açık gökyüzüne sahip olduğundan, gözlem kampanyasının daha rahat gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Burdur-Antalya profilinde 80 noktada gözlem yapılması planlanırsa, açık gökyüzü olan ortalama 15 astronomik gözleme uygun tam geceye ihtiyaç duyulacaktır. Tam gece bulmanın her zaman kolay olmadığı ve gözlem sırasında gökyüzünün bulutlarla kaplanabilmesi olasılığının yüksek olduğu göz önüne alındığında gözlem kampanyası için ortalama 6 haftalık bir süreye ihtiyaç duyulduğu öngörülmektedir. Tirebolu-Torul profili görece daha kısa olmasına rağmen, geceleri açık gökyüzü bulmanın daha zor olması sebebiyle, gözlemlerin yaz aylarında yapılabileceği ve bunun için ortalama 5 haftalık bir süre gerektiği öngörülmektedir.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Astrojeodezik sistemler, teknolojik ilerlemelerle doğru orantılı olarak geçmişten günümüze kadar iyileştirilerek geliştirilmiştir. Klasik optik-mekanik aletlerden, sayısal astrojeodezik sistemlere geçiş, çekül sapması bileşenlerinin hızlı ve hassas bir şekilde ölçülmesini sağlamış ve gözlemci kaynaklı hata olasılığını azaltmıştır. Dolayısıyla, sayısal astrojeodezik sistemlerin sağlamış oldukları kullanım kolaylığı günümüzde daha geniş kitlelere bu sistemlerin ulaşmasını sağlamaktadır.

Türkiye'de 1942–1990 yılları arasında optik-mekanik astrojeodezik aletlerle (Wild T3 astronomik teodolit, Wild T4 üniversal teodolit) gerçekleştirilen astrojeodezik gözlemlerde öncelik ulusal bir jeoit belirleme olmuştur (bkz Bölüm 3). Son yirmi yılda ise, Türkiye'de özellikle Astrojeodezik Kamera Sistemi (AKS) ve robotik elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen astrojeodezik çalışmalar (bkz Bölüm 4), çekül sapması bileşenlerinin tek başına veya hibrit bir jeoit modelleme çalışmasında kullanılması yerine günümüz şartlarına daha uygun kullanım alanlarına yönelmesi üzerine yoğunlaşmıştır (bkz Bölüm 1). Bu amaçla, Albayrak ve diğerleri (2020) tarafından, çekül sapması verisi İstanbul Astrojeodezik Ağında Global Geopotansiyel Modellerin (GGM) doğruluğunun kontrolünde kullanılmıştır (bkz Bölüm 4). Çekül sapması bileşenlerine Türkiye'de gereksinim duyulan diğer bir alan ise, ulusal ölçekte geliştirilen Türkiye Jeoit Modeli-2020'nin (TG-20) ihtiyaç duyulan bölgelerde (özellikle GNSS sinyal kalitesinin düşük olduğu alanlar (Simav ve diğerleri, 2023) ile geometrik nivelman yapmanın zor olduğu dağlık bölgeler) doğrulanmasıdır. Bu amaçla, TG-20 için GPS ve nivelman verileri ile oluşturulan, Burdur-Antalya ve Tirebolu-Torul jeodezik profillerinin, yakın bir gelecekte QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilecek astrojeodezik gözlem kampanyaları ile test edilerek, TG-20'nin bu iki profiledeki doğruluğunun kontrol edilmesi faydalı olacaktır.

İlerleyen dönemlerde astrojeodezik verilerin Türkiye genelinde daha yaygın olarak toplanması büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, geçmişten günümüze kadar toplanan tüm astrojeodezik verilerin, çevrimiçi bir veri deposu oluşturularak kamuoyuyla paylaşılması gerekmektedir. Bu sayede, diğer jeodezik verilere göre daha zor elde edilen çekül sapması verisinin daha hızlı ve etkili bir şekilde bu alanda çalışan araştırmacıların hizmetine sunulması mümkün olacaktır.

## TEŞEKKÜR

Bu makalenin özünü oluşturan 1942-1977 yıllarına ait astrojeodezik gözlem verileri için Harita Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz. Ayrıca, makalenin literatür bölümünde referans kaynak olarak sıklıkla kullandığımız eser sahiplerine, Ayan (1976), Gürkan (1978) ve Alp (1993), geçmiş yıllara ait verilerin günümüze ulaşmasını sağladıkları ve astrojeodezi alanına yapmış oldukları katkılar için minnettarız. Son olarak, değerli yorum ve önerileri ile bu makalenin geliştirilmesine çok önemli katkı sağlayan Hakemlere, ayırmış oldukları zaman ve emekleri için teşekkür ederiz.

## ORCID

Müge ALBAYRAK  <http://orcid.org/0000-0001-6705-4044>

Fuat CANSEVER  <https://orcid.org/0009-0006-3096-7142>

M. Tevfik ÖZLÜDEMİR  <https://orcid.org/0000-0002-1413-9244>

Kerem HALICIOĞLU  <https://orcid.org/0000-0002-2500-8581>

Sébastien GUILLAUME  <https://orcid.org/0000-0002-0831-7833>

## KAYNAKLAR

- Abele, M., Balodis, J., Janpaule, I., Lasmane, I., Rubans, A. ve Zariņš, A. (2012). Digital zenith camera for vertical deflection determination. *Geodesy and Cartography*, 38(4), s. 123–129. doi:10.3846/20296991.2012.755324
- Acar, M. (1999). *Astronomik gözlem sonuçları ile jeodezik gözlem sonuçlarının karşılaştırılması* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Konya. Erişim adresi: <http://acikerisimarsiv.selcuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/3147>
- Albayrak, M., Halicioğlu, K., Özlüdemir, M. T., Basoğlu, B., Deniz, R., Tyler, A. R. B. ve Aref, M. M. (2019). The use of the automated digital zenith camera system in İstanbul for the determination of astrogeodetic vertical deflection. *Bulletin of Geodetic Sciences*, 25(4), 1–23. doi:10.1590/s1982-21702019000400025

- Albayrak, M. (2020). *Assessment of global gravity models in coastal zones: A case study using astrogeodetic vertical deflections in İstanbul* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. Erişim adresi: <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/632382>
- Albayrak, M., Hirt, C., Guillaume, S., Halicioglu, K., Özlüdemir, M. T. ve Shum, C. K. (2020). Quality assessment of global gravity models in coastal zones: A case study using astrogeodetic vertical deflections in İstanbul, Türkiye. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 64(3), 06–329. doi:10.1007/s11200-019-0591-2
- Albayrak, M. ve Guillaume, S. (2021). Astrojeodezide QDaedalus sistemi uygulamaları: Bir inceleme. *Harita Dergisi*, 165, 3-89. Erişim adresi: <https://www.harita.gov.tr/harita-dergisi>
- Albayrak, M., Willi, D. ve Guillaume, S. (2023). Field comparison of the total station-based QDaedalus and the zenith telescope-based CODIAC astrogeodetic systems for measurements of the deflection of the vertical. *Survey Review*, 55(390), 247–259. doi:10.1080/00396265.2022.2054108
- Albayrak, M., Guillaume, S., Willi, D., Hirt, C., Herrera Pinzón, I.D., Marti, U., ... Shum, C.K. (2023). Results from the third QDaedalus astrogeodetic system observation campaign in the mountainous terrain of the Surses region in Switzerland. *J. Surv. Eng.* 149(3), 05023002
- Alp, O. (1993). *Türkiye astrojeodezik ve astrogravimetrik jeoidinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr/items/1c21e47a-e556-46d3-be1d-d1911eba076e>
- Ata, M. (2007). *Türkiye’de ulusal haritacılığın kurumsallaşma süreci* (Yüksek lisans tezi). Ankara Üniversitesi, Ankara. Erişim adresi: <https://dspace.ankara.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12575/79355?>
- Ayan, T. (1976). *Astrogeodatische geoid berechnung für das gebiet der Türkiye* (Yayımlanmamış doktora tezi). Fridericianna Karlsruhe Üniversitesi, Almanya.
- Ayan, T., Deniz, R., Arslan, E., Celik, R. N., Denli, H. H., Akyılmaz, O., ... Tekdal, E. (2006). *İstanbul GPS nirengi ağı (İGNA) 2005-2006 yenileme ölçü ve değerlendirmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Rapor 2005/3123, Vol. 1, İstanbul, Türkiye, s.186.
- Bürki, B., Müller, A. ve Kahle, H. G. (2004, Eylül). *DIADEM: The New Digital Astronomical Deflection Measuring System For High-Precision Measurements of Deflections of The Vertical At ETH Zurich*. Portekiz: Electronic Proceedings of IAG GGSM2004 Meeting In Porto.
- Deniz, R. (2014). *CCD kameralar ile astrojeodezik çekül sapmalarının belirlenmesi*. TÜBİTAK 1001 Projesi Sonuç Raporu (No: 111Y125), Ankara, Türkiye.
- Featherstone, W. E. ve Rüeger, J. M. (2000). The importance of using deviations of the vertical for the reduction of survey data to a geocentric datum. *Australian Surveyor*, 45(2), 46–61. doi:10.1080/00050326.2000.10440341
- Featherstone, W. E. ve Olliver, J. G. (2013). Assessment of EGM2008 over Britain using vertical deflections, and problems with historical data. *Survey Review*, 45(332), 319–324. doi:10.1179/1752270613y.0000000004
- Featherstone, W. E. ve Goyal, R. (2022). Digitisation and analysis of historical vertical deflections in India. *Survey Review*, 55(390), 268-273. doi:10.1080/00396265.2022.2088016
- Guillaume, S., Bürki, B., Griffet, S. ve Durand, H. M. (2012, Mayıs). *QDaedalus: Augmentation of total stations by CCD sensor for automated contactless high-precision metrology*. In FIG Working Week, Roma, İtalya.
- Guillaume S. (2015). *Determination of a precise gravity field for the CLIC feasibility studies* (Doktora tezi). ETH Zurich Üniversitesi, Zürih. Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/20.500.11850/126895>
- Gürkan, O. (1978). *Astrojeodezik ağların deformasyonu ve Türkiye I. derece triyagülasyon ağı*. Trabzon: KTÜ Basımevi.
- Halıcıoğlu, K. (2015). *Sayısal zenit kamera sistemi ile astro-jeodezik çekül sapmalarının belirlenmesi* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/11527/16233>



- Halicioglu, K., Deniz, R. ve Özener, H. (2016). Digital astro-geodetic camera system for the measurement of the deflections of the vertical: Tests and results. *International Journal of Digital Earth*, 9(9), 914–923. doi:10.1080/17538947.2016.1189612
- Hardy, R., Fancher, K., Erickson, B., Breidenbach, S., Ahlgren, K., van Westrum, D., ... Jordan, K. (2021, Aralık). *Performance assessment of the total station astrogeodetic control system (TSACS)*. American Geophysical Union 2021 Fall Meeting, New Orleans, Amerika Birleşik Devletleri.
- Hauk, M., Hirt, C. ve Ackermann, C. (2017). Experiences with the QDaedalus system for astrogeodetic determination of deflections of the vertical. *Survey Review*, 49(355), 294–301. doi:10.1080/00396265.2016.1171960
- Heiskanen, W.A. ve Moritz, H. (1984). *Physical Geodesy*. Austria: Institute of Physical Geodesy, Technical University Graz.
- Hirt, C. (2004). *Entwicklung und erprobung eines digitalen zenitkamarasystems für die hochpräzise lotabweichungsbestimmung* (Doktora tezi). Leibniz Üniversitesi Hannover, Hannover. Erişim adresi: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/6419>
- Hirt, C. ve Flury, J. (2008). Astronomical–topographic levelling using high-precision astrogeodetic vertical deflections and digital terrain model data. *Journal of Geodesy*, 82(4–5), 231–48. doi:10.1007/s00190-007-0173-x
- Hirt, C., Bürki, B., Somieski, A. ve Seeber, G. (2010). Modern determination of vertical deflections using digital zenith cameras. *Journal of Surveying Engineering*, 136(1), 1–12. doi:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000009
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R. ve Rexer, M. (2013). New ultrahighresolution picture of Earth's gravity field. *Geophysical Research Letters*, 40(16), 4279–83. doi:10.1002/grl.50838
- Hirt, C. ve Wildermann, E. (2018). Reactivation of the Venezuelan vertical deflection data set from classical astrogeodetic observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 85, 97–107. doi:10.1016/j.jsames.2018.05.003
- Hughes, J. C., Dunlap, J., Johnson, S., Olson, C. G., Siegert, R., Song, J. H., ... Wangler, W. (2019, Aralık). *Development of a digital zenith camera for precision determination of gravitational deflection of the vertical*. American Geophysical Union 2019 Fall Meeting, San Francisco, Amerika Birleşik Devletleri.
- Jekeli, C. (1999). An analysis of vertical deflections derived from high-degree spherical harmonic models. *Journal of Geodesy*, 73(1), 10–22. doi:10.1007/s001900050213
- Kühtreiber, N. (2002, Ağustos). *High precision geoid determination of Austria using heterogeneous data*. In Gravity and Geoid 2002, Proceedings of 3rd meeting of the Int. Gravity and Geoid Commission, Selanik, Yunanistan.
- Marti, U. (2007). *Comparison of High Precision Geoid Models in Switzerland*. Tregoning, P. ve Rizos, C. (Ed.), Dynamic Planet. International Association of Geodesy Symposia (s. 377-382) içinde. doi: 10.1007/978-3-540-49350-1\_55
- Murzabekov, M., Fateev, V., Pruglo, A., Ravdin, S. (2022). *Results of Astro-Measurements of the Deflection of Vertical Using the New Observation Technique*. Freymueller, J.T. ve Sánchez, L. (Ed.), International Association of Geodesy Symposia (s. 59-65) içinde. doi: 10.1007/1345\_2021\_136
- Özlüdemir, M. T. (2018). *Astro-jeodezik ve GNSS/Nivelman verilerinin entegrasyonu ile yerel geoit modellemesi*. TÜBİTAK 1001 Projesi Sonuç Raporu (No: 115Y237), İstanbul, Türkiye.
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C. ve Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4). doi:10.1029/2011JB008916
- Pick, M., Picha, J. ve Vyskočil, V. (1973). *Theory of Earth's gravity field*. Amsterdam, London, New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Robbins, A.R. (1951). Deviation of the vertical. *Empire Survey Review*, 11(79), 28–36.
- Simav, M., Bahadur, B., Yıldız, H., Cingöz, A., Nohutcu, M. ve Sezen, E. (2023). Assessing the performance of multi-GNSS precise point positioning technique on the geoid model validation. *Survey Review*, 56(394), 51–64. doi:10.1080/00396265.2023.2167920

- Somieski, A. E. (2008). *Astrogeodetic geoid and isostatic considerations in the North Aegean Sea, Greece* (Doktora tezi). ETH Zurich Üniversitesi, Zürih. Erişim adresi: Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/20.500.11850/11522>
- Şerbetçi, M. (1999). *Türk haritacılığı tarihi (1895-1995): Türk haritacılığının 100. kuruluş yılı anısına*. İstanbul: Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası.
- Tian, L., Guo, J., Han, Y., Lu, X., Liu, W., Wang, Z., ... Wang, H. (2014). Digital zenith telescope prototype of China. *Chinese Science Bulletin*, 59(17), 1978–1983. doi:10.1007/s11434-014-0256-z
- Türen, Y. ve Üstün, A. (2016, Kasım). *Astrojeodezik nivelmanda astronomik koordinatların doğruluğunun yerel jeoit belirlemeye etkisi*. Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu Çalıştayı-2016, "Gravite ve Yükseklik Sistemleri, Prof. Dr. Rasim DENİZ'in Jeodeziye Katkıları", İstanbul.
- Varna, I., Willi, D., Guillaume, S., Albayrak, M., Zarins, A. ve Ozen, M. (2023). Comparative measurements of astrogeodetic deflection of the vertical by Latvian and Swiss digital zenith cameras. *Remote Sensing*, 15(8), 2166. doi:10.3390/rs15082166
- Yildiz, H., Simav, M., Sezen, E., Akpınar, I., Akdoğan, Y. A., Cingoz, A. ve Akabali, O. A. (2021). Determination and validation of the Turkish Geoid Model-2020 (TG-20). *Bulletin of Geophysics and Oceanography*, 62(3), 495–512. doi:10.4430/bgta0346

## YAZIM ESASLARI

### 1. Harita Dergisine Yazı Hazırlama Esasları

**a.** Sayfa büyüklüğü A4 (210x297 mm) standardında olmalı; her sayfanın sağ kenarından 2 cm diğer kenarlarından 3'er cm boşluk bırakılmalıdır. Yazı zorunlu olmadıkça toplam 15 sayfayı geçmemelidir. Yazı, bilgisayarda Microsoft Word formatında Arial Türkçe fontu bir satır aralığı ile yazılmalıdır. Paragraflar arasında bir satır boşluk bırakılmalıdır.

**b.** Makale adı, Türkçe ve İngilizce olarak kelimelerin ilk harfleri büyük olacak şekilde 12 punto büyüklüğünde sayfanın üst ortasına gelecek şekilde yazılmalı ve iki satırı geçmemelidir. Makale adı, makale içeriğini en fazla ölçüde yansıtmalı; makale içeriğinde anlatılan konuların büyük çoğunluğu, makale adı ile doğrudan ilgili olmalıdır. Makale adından sonra bir satır boşluk bırakıp ortalayarak yazar adı ve soyadı koyu (bold) ve 10 punto harf büyüklüğünde yazılmalıdır (Soyadı büyük harflerle). Yazar adının altına ortalayarak adres ve elektronik posta adresi 9 punto harf büyüklüğünde yazılır.

**c.** Yazı; makalenin başlangıç kısmına yazılmış, tek paragraf Türkçe ve İngilizce olarak 100-250 kelime arası Türkçe "Öz" ile İngilizce "Abstract", ortalama 5 adet Anahtar Kelime içeren Anahtar Kelimeler ile Key Words (İngilizce anahtar kelimeler), Giriş, Bölümler, Sonuç ve Kaynaklar şeklindeki ana bölümlerden oluşur. Bu bölümlerin tamamı sayfada iki sütun olacak şekilde yazılır. Sütunlar arasında 0,5 cm boşluk bırakılır. Her ana bölüm ve alt bölüm başlığı öncesi ve sonrası bir satır boşluk bırakılır.

Öz bölümünde, yapılan çalışma tanıtılarak kullanılan yöntemler ve sonuçlar kısaca belirtilmeli; abstract bölümü, özün doğru ve eksiksiz tercümesini içermelidir. Giriş bölümünde, çalışmanın amacı ve konuyla ilgili diğer çalışmalar anlatılmalıdır. Ara bölümlerde, kullanılan yöntemler ve veriler açıklanmalı; sonuç bölümünde, bulgular başka araştırmacıların bulguları ile karşılaştırılmalı, yazarın yorumu belirtilmeli ve ayrıca bulgulardan çıkan sonuçlar ve varsa öneriler yazılmalıdır. Öz, abstract, anahtar kelimeler ve key words, 9 punto büyüklüğünde italik harflerle yazılmalıdır. Diğer bölümler 10 punto harf büyüklüğünde normal yazılır.

Ana bölüm başlıkları büyük harflerle koyu (bold) olarak ve alt bölümlerin başlıkları kelimelerin ilk harfleri büyük diğerleri küçük ve sadece birinci düzey alt bölümlerin başlıkları koyu (bold) olarak yazılmalıdır. Yazının geri kalan kısmı normal baskıda yazılmalı, italik ya da altı çizgili karakterler kullanılmamalıdır. Öz, Anahtar Kelime, Abstract (İngilizce özet), Key Words (İngilizce anahtar kelimeler) ve kaynaklar ana bölümleri dışındaki ana bölüm başlıkları 1., 2., 3.; alt bölüm başlıkları a., b., c.; (1), (2), (3); (a), (b), (c); (i), (ii), (iii); (aa), (bb), (cc) şeklinde hiyerarşik düzeyde numaralandırılmalı; ardışık düzeylerin numaraları arasındaki dikey fark 0.5 cm olmalıdır. Numaralandırılan bölümlerin başlıkları, numaralarının başlangıç hizasından 0.5 cm içeriden; bir alt satıra devam eden bölüm başlıkları sayfa başından; tüm paragraflar sayfanın 0.5 cm içerisinden başlamalıdır.

Noktalama ve imlâ için Türk Dil Kurumu tarafından en son yayımlanan İmlâ Kılavuzu ve Türkçe sözlüğüne, Haritacılık ile ilgili Yönetmeliklerde kullanılan deyimlere uyulmalıdır. İfadelerde üçüncü şahıs kullanılmalı; her sembol ilk geçtiği yerde tanımlanmalı; her kısaltma ilk geçtiği yerde parantez içinde yazılmalı (örneğin, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS)); kelime ikiye bölünmemelidir. Noktalama işaretlerinden sonra bir karakter boşluk bırakılmalı; sayfa numaralama yapılmamalıdır.

**ç.** Tablo isimleri, tablonun üstüne sol üst köşesinden itibaren yazılmalı (örneğin, Tablo 1. Karesel ortalama hatalar.); şekil isimleri, şeklin altına ortalayarak yazılmalı (örneğin, Şekil 1. CBS tasarımı.); tablo isimlerinden ve şekillerden önce, şekil isimlerinden ve tablolardan sonra bir satır boşluk bırakılmalı; tablolar ve şekiller sayfaya ortalaymalıdır. Tablolar ve şekillerin boyutu tek sütundan büyük olduğu durumlarda, sayfanın tamamına ortalı olarak yazılabilir. Bu durumda tablo ve şekiller metni bölmemeli sayfanın en altında ya da en üstünde yer almalıdır.

**d.** Denklemlere verilen numaralar, kendi hizalarına ve sayfa sağ kenarına çıkışacak şekilde parantez içinde (1),(2),(3),... şeklinde yazılmalıdır. Metin içerisindeki denklemlerin kendi aralarında ve metin ile aralarında bir satır boşluk bırakılır.

**e.** Makaleler, "MAKALE ÖRNEĞİ"nde sunulan boşluk ve yapılandırılmalara uyularak; Şekil, Tablo ve Denklemler tek sütunda olacak ise metin

aralarına konularak; iki sütuna yayılan bir bütün halindeki metin bloğundan sonra veya önce sayfanın alt veya üstünde olacak ve okuma akıcılığını bozmayacak şekilde yazılır.

f. Yazarlar; unvanlarını, görev yaptıkları kurumları, iletişim adreslerini, telefon numaralarını, e-posta adreslerini ve ORCID (Open Researcher ve Contributor ID) numarasını bildirmelidir. <https://orcid.org>

g. Öz ve abstract bölümlerinde kaynak atfı yapılmamalıdır. Metin içinde kaynak gösterme şekilleri aşağıda verilmiştir:

Tek yazarlı çalışmada ilk gönderme ve diğer göndermeler aynı biçimde olacak; gönderme cümle içerisinde yapılıyorsa Ceylan (2018) **veya** gönderme cümlelerin sonunda yapılıyorsa (Ceylan, 2018)

İki yazarlı çalışmada ilk gönderme ve diğer göndermeler aynı biçimde olacak; gönderme cümle içerisinde yapılıyorsa Simav ve Türkezer (2019) **veya** gönderme cümlelerin sonunda yapılıyorsa (Simav ve Türkezer, 2019)

Üç, dört ve beş yazarlı çalışmalarda ilk göndermede tüm yazarların soyadları Şengün, Yılmaz ve Kurt (2013) ve diğer göndermelerde Şengün ve diğerleri (2013) **veya** ilk göndermede (Şengün, Yılmaz ve Kurt, 2013) ve diğer göndermelerde (Şengün ve diğerleri, 2013)

Altı ve daha fazla yazarlı çalışmalarda ilk ve diğer göndermelerde sadece ilk yazarın soyadı belirtilir. Yıldız ve diğerleri (2014) veya (Yıldız ve diğerleri, 2014)

Tüzel yazarlı çalışmalarda ilk göndermede Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA, 2017) ve diğer göndermelerde MTA (2017) **veya** ilk göndermede (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü [MTA], 2017) ve diğer göndermelerde (MTA, 2017)

ğ. Kaynakların hazırlanmasında Amerikan Psikoloji Birliği (American Psychology Association)'nin hazırladığı rehberin altıncı baskısı (Publication Manual of the American Psychological Association, Sixth Edition) kuralları uygulanacaktır. <https://www.apastyle.org>

Kaynaklar ana bölümü başlığı birer aralıklı büyük harflerle koyu (bold) ve sayfa ortalanarak yazılmalıdır

Kaynaklar ilk yazarlarının soyadına göre alfabetik sırada sıralanır.

Makale veya bölüm başlığındaki ilk kelimenin ilk harfi ve eğer varsa özel adların ilk harfleri büyük yazılır.

İnternet üzerinden ulaşılan ve zaman içerisinde değiştiği düşünülen kaynağın erişim tarihi internet adresi verilmeden önce (Erişim Adresi (19 Mayıs 2018): ...) belirtilmelidir.

Özellikle faydalanan elektronik kaynağın varsa doi numarası yoksa erişim adresi kaynağın sonuna eklenmelidir.

#### **Elektronik Kaynaklar: Talimat, Rehber vb.**

INSPIRE. (2014). *D2.8.1.1 Data Specification on Coordinate Reference Systems – Technical Guidelines* (D2.8.1.1\_v3.2). Erişim Adresi: <https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/rs>

ISO 19111. (2007). *Geographic information - Spatial referencing by coordinates*. Erişim Adresi: <https://www.iso.org/standard/41126.html>

Jekeli, C. (2016). *Geometric Reference Systems in Geodesy*. Erişim Adresi: [https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/77986/Geom\\_Ref\\_Sys\\_Geodesy\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/77986/Geom_Ref_Sys_Geodesy_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

EU Official Journal. (2007). *Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007: Establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE)*, (L 108/1). Erişim Adresi: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32007L0002>

#### **Teknik Rapor:**

Demir, C. (1999). *Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı* (JEOFNIV-02-1999). Ankara: Harita Genel Komutanlığı.

#### **Süreli yayın:**

Geymen, A., Yomralioglu, T. ve Baz, I. (2008). Developing an urban information system for local governments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer: Published for the Institution of Civil Engineers*, 161(3), 163-173. doi: 10.1680/muen.2008.161.3.163

Moritz, H. (1988). Geodetic Reference System 1980. *Bulletin Géodésique*, 62(3), 348-358. doi:10.1007/bf02520722

Zandbergen, P.A. (2008). A Comparison of address point, parcel and street geocoding techniques. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32, 214-232. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2007.11.006

#### Kitap:

Torge, W. ve Müller, J. (2012). *Geodesy* (4. baskı). Berlin: Walter de Gruyter.

Vaníček, P. ve Krakiwsky, E. (1986). *Geodesy: The Concepts* (2. baskı). Amsterdam: Elsevier.

Day, R.A. (2000). *Bilimsel bir makale nasıl yazılır ve yayımlanır?* (G. A. Altay, Çev.). Ankara: TÜBİTAK.

#### Sempozyum, Bildiri vb:

Kılıç B. ve Gülgen F. (2017, Kasım). *A Research on Standard Address Usage in Turkey*. UCTEA International Geographical Information Systems Congress 2017, Adana, Türkiye.

Bard, G.V. (2007, Ocak). *Spelling-error tolerant, order-independent pass-phrases via the Damerau-Levenshtein string-edit distance metric*. In Proceedings of the fifth Australasian symposium on ACSW frontiers, Ballarat, Avustralya.

Yakar, M. ve Doğan, Y. (2017, Nisan). Silifke Aşağı Dünya Obruğunun İHA Kullanılarak 3B Modellenmesi. *Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği Teknik Sempozyum*, Afyonkarahisar.

#### Tez:

Kellison, M.T. (2012). *Address points and A Master address file: Improving efficiency in the city of Chino* (Doktora Tezi). ProQuest Dissertations and Theses veri tabanından erişildi. (UMI No. 1532831)

Gençerk, E. Y. (2016). *İnsansız Hava Aracı Fotogrametrisi Uygulaması İle İnşaat Projesi İmalat Durumunun Araştırılması* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

## 2. Makalelerin Gönderilmesi

Makaleler, "haritadergisi@harita.gov.tr" adresine e-posta ile gönderilir.



(1 nci düzey alt bölüm 1 inci paragraf)

## (MAKALE ÖRNEĞİ)

(1) XXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXXXXXXXX.  
(2 nci düzey alt bölüm başlığı)  
(1 satır boşluk)  
XXXXXXXXXX XXXXX XXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXX XXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXX XXXXXX.  
(2 nci düzey alt bölüm 1 nci paragraf)  
(1 satır boşluk)  
(a) XXXXX XXXXXX XXXXXX XXXX  
(3 üncü düzey alt bölüm başlığı)  
(1 satır boşluk)  
XXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXX XXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXX XXXX XXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXX XXXX XXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX X  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX.  
(1 satır boşluk)  
(b) XXXXX XXXXXX XXXXXX XXXX  
(3 üncü düzey alt bölüm başlığı)  
(1 satır boşluk)  
XXXXXXXXXX XXXXX XXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX  
XXXX XXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXX XXXX XXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXX XXXXXXXXXXXX X  
XXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXX XXXXXX.  
(1 satır boşluk)  
(I) XXXXX XXXXXX XXXXXX XXXX  
(4 üncü düzey alt bölüm başlığı)  
(1 satır boşluk)  
XXXX XXXXX XXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXX  
XXXXXXXXXX XXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXX XXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXX XXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXX  
XXXXXX XXXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXX XXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX.  
(1 satır boşluk)

Tablo 1. XXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX  
(1 satır boşluk)  
XXXXXXXXXX XXXXX XXXX XXXXX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXXXX XXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX.  
(1 satır boşluk)

$$KOH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i - x_{i(RASAT)}}{n}} \quad (1)$$

(1 satır boşluk)  
XXXXXXXXXX XXXXX XXXX XXXXX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXXXX XXX XXXXXX XXXXXX .  
(1 satır boşluk)  
(1 satır boşluk)  
(1 satır boşluk)  
Şekil 1. XXXXXX XXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXX  
(1 satır boşluk)  
(1 satır boşluk)  
XXXXXXXXXX XXXXXX XXXXX XXXXXX XXXXX XXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXX XXXXXX XXXX XX XXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXX  
XXXX.  
(1 satır boşluk)  
**3. SONUÇ**  
(1 satır boşluk)  
XXXXX XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
XXXXXXXXXXXXXXXX XXXXX XXXXXX XXXXX XXXXXX.  
(1 satır boşluk)  
**KAYNAKLAR**  
(1 satır boşluk)  
**Sürelî Yayınlar:**  
Yazar, A. A., Yazar, B. B. ve Yazar, C. C. (Yıl).  
Yazının başlığı. *Sürelî Yayının Başlığı, Cilt*, s-  
s. doi:xx.xxxxxxxxxx (veya Erişim Adresi:)  
**Kitap:**  
Yazar, A. A. (Yıl). *Eserin başlığı*. Yer: Yayıncı.  
Yazar, A. A. (Yıl). *Eserin başlığı*. Erişim adresi:  
<http://www.xxxxxxxxxxx>  
Yazar, A. A. (Yıl). *Eserin başlığı*.  
doi:xxxxxxxxxxxxxx  
Editor, A. A. (Ed.). (Yıl). *Eserin başlığı*. Yer:  
Yayıncı.  
Yazar, A. A. ve Yazar, B. B. (Yıl). *Bölüm ya da  
giriş başlığı*. A. Editör, B. Editör ve C. Editör  
(Ed.), Kitap başlığı (s. xxx-xxx) içinde. Yer:  
Yayıncı.  
**Doktora ve yüksek lisans tezleri:**  
Yazar, A. A. (Yıl). *Doktora ya da yüksek lisans  
tezinin başlığı* (Yüksek lisans tezi/Doktora  
tezi). ... veri tabanından erişildi (Erişim ya da  
Sipariş No.).  
Yazar, A. A. (Yıl). *Doktora ya da yüksek lisans  
tezinin başlığı* (Yayımlanmamış doktora  
tezi/yüksek lisans tezi). Kurum adı, Yer bilgisi.  
**Teknik raporlar ve araştırma raporları:**  
Yazar, A. A. (Yıl). *Çalışmanın başlığı* (Rapor No.  
xxx). Yer bilgisi: Yayıncı.  
**Toplantı ve sempozyumlar:**  
Sunan, A. A. (Yıl, Ay). *Bildiri ya da poster başlığı*.  
Kuruluş Adının toplantısında sunulan bildiri ya  
da poster, Yer bilgisi.

