

Harita Dergisi



Ocak 2021
Sayı:165

ISSN 1300-5790
E-ISSN 2667-4084

Simav, M.: **Analitik Ataletsel Navigasyon ve Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri Entegrasyonuna Dayalı Hava Gravimetrisi: Türkiye’de İlk Uygulamalar** (Airborne Gravimetry Based on the Integration of Strapdown Inertial Navigation and Global Navigation Satellite Systems: The First Implimentations in Turkey)

Olgun, S., Üstün, A.: **Gravimetrik Topoğrafik Düzeltmelerin Hesaplanmasında Yakın Bölge Katkısı** (Near Zone Contribution in the Gravimetric Terrain Correction Computations)

Mete, M. O., Yomralıoğlu, T.: **Açık Kaynaklı Bulut CBS Yardımıyla Kitlesel Taşınmaz Değerleme Uygulaması** (An Application of Mass Real Estate Valuation with Open Source Cloud GIS)

Yıldırım, V., Kalkan, K.: **Türkiye için Gece Işıkları ve İnsani Gelişme Endeksinin Mekansal İstatistiksel Analizi** (A Spatial Statistical Evaluation of Night Lights and Human Development Index for Turkey)

Kaya, Y., Yiğit, A. Y., Ulvi, A., Yakar, M.: **Arkeolojik Alanların Dokümantasyonunda Fotogrametrik Tekniklerinin Doğruluklarının Karşılaştırmalı Analizi: Konya Yunuslar Örneği** (Comparative Analysis of the Accuracy of Photogrammetric Techniques in the Documentation of Archaeological Sites: A Case Study of Konya Yunuslar)

Albayrak, M., Guillaume, S.: **Astrojeodezide Qdaedalus Sistemi Uygulamaları: Bir İnceleme** (Applications of the QDaedalus System in Astrogeodesy: A Review)

HARİTA GENEL MÜDÜRLÜĞÜ, ANKARA

www.harita.gov.tr/harita-dergisi



HARİTA DERGİSİ

Ocak 2021

Yıl: 87 Sayı: 165

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

Sahibi

Harita Genel Müdürlüğü Adına
Tuğgeneral Hurşit AĞIRCAN

Sorumlu Müdür

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

Editör

Yük.Müh.Alb. Selçuk CEYLAN

Yönetim Kurulu

Doç.Dr.Müh.Alb. Hasan YILDIZ (Bşk.)
Dr.Müh.Alb. İbrahim NALCI
Dr.Müh.Alb. Atıla AKABALI
Yük.Müh.Alb. Selçuk CEYLAN
Dr.Müh.Yb. Mehmet SİMAV

Yönetim Yeri Adresi

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

Tel: (312) 595 21 22

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.

TÜBİTAK-ULAKBİM Mühendislik ve
Temel Bilimler Veri Tabanında
(TÜBİTAK MTBVT) taranmaktadır.

İ Ç İ N D E K İ L E R

ARAŞTIRMA MAKALELERİ

**Analitik Ataletsel Navigasyon ve Küresel Navigasyon
Uydu Sistemleri Entegrasyonuna Dayalı Hava
Gravimetrisi: Türkiye’de İlk Uygulamalar** (Airborne
Gravimetry Based on the Integration of Strapdown Inertial
Navigation and Global Navigation Satellite Systems: The
First Implimentations in Turkey)

Mehmet SİMAV

1 - 16

**Gravimetrik Topoğrafik Düzeltmelerin
Hesaplanmasında Yakın Bölge Katkısı** (Near Zone
Contribution in the Gravimetric Terrain Correction
Computations)

Sevda OLGUN, Aydın ÜSTÜN

17 – 27

**Açık Kaynaklı Bulut CBS Yardımıyla Kitlesel Taşınmaz
Değerleme Uygulaması** (An Application of Mass Real
Estate Valuation with Open Source Cloud GIS)

Muhammed Oğuzhan METE
Tahsin YOMRALIOĞLU

28 – 42

**Türkiye için Gece Işıkları ve İnsani Gelişme Endeksinin
Mekansal İstatistiksel Analizi** (A Spatial Statistical
Evaluation of Night Lights and Human Development Index
for Turkey)

Vural YILDIRIM, Kaan KALKAN

43 – 56

**Arkeolojik Alanların Dokümantasyonunda
Fotogrametrik Tekniklerinin Doğruluklarının
Karşılaştırmalı Analizi: Konya Yunuslar Örneği**
(Comparative Analysis of the Accuracy of Photogrammetric
Techniques in the Documentation of Archaeological Sites:
A Case Study of Konya Yunuslar)

Yunus KAYA, Abdurrahman Yasin YİĞİT,
Ali ULVİ, Murat YAKAR

57 – 72

DERLEME MAKALESİ

**Astrojeodezide Qdaedalus Sistemi Uygulamaları: Bir
İnceleme** (Applications of the QDaedalus System in
Astrogeodesy: A Review)

Müge ALBAYRAK, Sébastien GUILLAUME

73 – 89

Bilim Kurulu

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

**Harita Dergisi'nin 165. Sayısında Makalelerin
Değerlendirilmesinde Hakemlik Yapan
Akademisyenler**

Prof.Dr. Mehmet ALKAN (YTÜ)
Prof.Dr. Cüneyt AYDIN (YTÜ)
Prof.Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU (GTÜ)
Prof.Dr.Tayfun ÇAY (KTÜN)
Prof.Dr. Özşen ÇORUMLUOĞLU (İKÇÜ)
Prof.Dr. S.Savaş DURDURAN (NEÜ)
Prof.Dr. Fatih İŞCAN (KTÜN)
Prof.Dr. Aydın ÜSTÜN (KÜ)
Prof.Dr. Volkan YILDIRIM (KTÜ)
Prof.Dr. Ferruh YILDIZ (KTÜN)
Doç.Dr. Bahadır ERGÜN (GTÜ)
Doç.Dr. Sultan Kocaman GÖKÇEOĞLU (HÜ)
Doç.Dr. Uğur Murat LELOĞLU (ODTÜ)
Doç.Dr. Ali KILIÇOĞLU
Dr.Öğr.Üyesi Gonca OKAY AHI (HÜ)
Dr.Öğr.Üyesi Murat DURMAZ (HÜ)
Dr.Öğr.Üyesi Kamil TEKE (HÜ)
Dr.Müh.Alb. Altan YILMAZ (HGM)
Dr.Müh.Alb. Erdinç SEZEN (HGM)
Dr.Müh.Yb. Mehmet SİMAV (HGM)
Dr.Müh.Yzb. Hakan ŞAHİN (HGM)



Piri Reis, Kitab-ı Bahriye, Kızıl Adalar ve İstanbul

Piri Reis, Kitab-ı Bahriye, Kızıl Adalar ve İstanbul¹

Piri Reis eşsiz bir kartograf ve deniz bilimleri üstadı olmasının yanı sıra Osmanlı deniz tarihinde izler bırakmış bir amiral ve Mısır kaptanıdır. Dünya haritaları ve denizcilik kitabıyla tanınmıştır. Doğum tarihi kesin olarak bilinmiyor. 1465-1470 arasında Gelibolu'da doğdu. 1554'de Kahire'de öldü. Asıl adı Muhiddin Piri'dir. Piri Reis'in babası Karamanlı Hacı Mehmet, amcası ünlü Osmanlı denizcisi Kemal Reis'tir.

Venedik üzerine sefer hazırlığına girişen II. Beyazıt Akdeniz'de bulunan denizcileri Osmanlı Donanmasına katılmaya çağırması üzerine 1494'te amcası ile birlikte donanmanın resmi hizmetine girdiler. Piri reis, Osmanlı donanmasında, gemi komutanı olarak, 1495-1510 yıllarında, Akdeniz'de yapılan birçok deniz seferlerinde görev almıştır. Piri Reis, 1511'de amcasının bir deniz kazasında ölümünden sonra Gelibolu'ya yerleşti. Barbaros Kardeşlerin idaresi altındaki donanmada halaoğlu Muhittin Reis ile Akdeniz'de bazı seferlere çıktıysa da daha çok Gelibolu'da kalıp haritaları ve kitabı üzerinde çalıştı. Bu haritalardan ve kendi gözlemlerinden yararlanarak 1513 tarihli ilk dünya haritasını çizdi. 1516-1517 yıllarında tekrar donanmada görev aldı. 1533'de Tümamiral olmuş, 1546'dan sonra Umman Denizi, Kızıldeniz ve Basra Körfezi'nde Osmanlı Donanmasının Mısır Kaptanı olarak görev yapmıştır.

Kitab-ı Bahriye, Osmanlı amirali Piri Reis'in hazırladığı Akdeniz kıyılarına ait ayrıntılı bir harita-kılavuzdur. Kitap, denizcilere Akdeniz kıyıları, adaları, geçitleri, boğazları, körfezleri fırtına halinde nereye sığınılacağı, limanlara nasıl yaklaşılabileceği hakkında bilgiler, ayrıca limanlar arasında gitmek için kesin rotalar verir.

Kitab-ı Bahriye'nin iki sürümü vardır. Birincisi 1521 tarihlidir ve denizcilerin kullanımı için yapılmıştır. İkincisi 1526'da Kanuni Sultan Süleyman için hazırlanmış daha ayrıntılı ve süslü bir eserdir. Birinci sürümde 135-140 ikinci sürümde 223 harita mevcuttur.

Kitab-ı Bahriye'nin kopyaları Avrupa'nın çeşitli kütüphanelerinde, İstanbul'da Topkapı Sarayı'nda, Nurosmaniye, Süleymaniye ve Köprülüzade Fazıl Ahmed Paşa Kütüphanelerinde bulunur.

Katip Çelebi "Tuhfetü'l Kibar fî Esfarül Bihar" adlı eserinde (1656) Kitab-ı Bahriye'yi "Bu Piri Reis Bahriye adlı kitap yazıp Akdeniz'i anlatmıştır. İslamların bu konuda başka kitapları olmadığından denizde gezenler ona başvururlar." ifadesiyle anlatmaktadır.

¹Kemal Özdemir, Osmanlı Haritaları, s.77

Analitik Ataletsel Navigasyon ve Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri Entegrasyonuna Dayalı Hava Gravimetrisi: Türkiye’de İlk Uygulamalar (Airborne Gravimetry Based on the Integration of Strapdown Inertial Navigation and Global Navigation Satellite Systems: The First Implimentations in Turkey)

Mehmet SİMAV 

Harita Genel Müdürlüğü, Jeodezi Dairesi Başkanlığı, Ankara
mehmet.simav@harita.gov.tr

Geliş Tarihi (Received): 13.07.2020

Kabul Tarihi (Accepted): 31.12.2020

ÖZ

Yer gravite alanının konum-destekli analitik ataletsel navigasyon sistemi kullanılarak hava araçlarıyla ölçülmesine Analitik Hava Gravimetrisi (Strapdown Airborne Gravimetry-SAG) adı verilmektedir. Bu yöntem, yirmi yıldan daha fazla bir süredir yerden ulaşılamayan alanlar üzerinde gravite verisi toplamak amacıyla jeodezi ve jeofizikte etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Türkiye yükseklik sisteminin modernizasyonu ve gravite altyapısının iyileştirilmesi projesi kapsamında, Harita Genel Müdürlüğü ve iMAR Navigation GmbH iş birliğiyle SAG sistemi geliştirilmiştir. 2017 ve 2018 yılları arasında başarıyla tamamlanan cihaz ve yazılım testlerinin ardından ilk üretim odaklı hava gravimetrisi kampanyası 2019 yılında Göller Bölgesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çapraz-geçiş noktalarında yapılan karşılaştırmalarda 0.8 mGal altında RMSE değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuç, ölçü duyarlılığının daha önemli olduğu jeofizik uygulamalar için dikkate değer ve kritik bir sonuçtur. Güncel yüksek-çözünürlüklü global jeopotansiyel model ile yapılan dış karşılaştırmada ise yaklaşık 1 mGal ortalama fark bulunmuştur. Bölgesel jeoit modelleme gibi jeodezik uygulamalarda gereksinim duyulan gravite alanı uzun dalga boyu kararlılığı açısından bu sonuç memnuniyet vericidir. Göller Bölgesi üzerinde nispeten geçiş bir alandaki veri boşluğu ilk defa doldurulmuştur. Hava gravimetrisi çalışmalarını veri boşluklarından kaynaklanan hataların azaltılmasına ve gravite alanı haritalarının (jeoit modeli, serbest-hava, Bouguer, isostatik gravite anomalisi vb.) doğruluğunun/çözünürlüğünün geliştirilmesine ve daha doğru yorumlar yapılabilmesine hizmet edecektir.

Anahtar Kelimeler: Analitik Hava Gravimetrisi, Analitik Ataletsel Ölçü Ünitesi, Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri, Genişletilmiş Kalman Filtresi, Gravite Bozukluğu.

ABSTRACT

Measuring the Earth's gravity field with position-aided strapdown inertial measurement unit using an aircraft as a mobile platform is regarded as Strapdown Airborne Gravimetry (SAG). It has been a very efficient technique in geodesy and geophysics for more than two decades that allows to acquire gravity data over areas not accessible by land. A SAG system has been developed by the cooperation of General Directorate of Mapping and iMAR Navigation GmbH within the Turkish

height system modernization and gravity recovery project. After successful completion of the instrumentation and the software test procedure between 2017 and 2018, the first production-oriented airborne campaign was carried out during the fall 2019 over the Turkish Lake District. Comparisons at the cross-over points yield RMSE values below 0.8 mGal, which is a remarkable and crucial internal precision especially for geophysical applications where the precision of the measurements is the main concern. The external comparison with the latest high-resolution global geopotential model shows mean bias of around 1 mGal, which can be considered as promising long-wavelength stability for geodetic applications such as regional geoid modelling. Relatively large gravity data gaps have been covered over the Turkish Lake District for the first time that will enable us to reduce the errors stem from the data voids and to enhance the resolution of the gravity field maps (e.g. geoid model, free-air, Bouguer, isostatic gravity anomalies) for better interpretations.

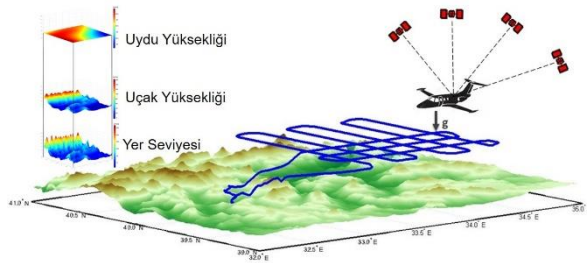
Keywords: Strapdown Airborne Gravimetry, Strapdown Inertial Measurement Unit, Global Navigation Satellite Systems, Extended Kalman Filter, Gravity Disturbance.

1. GİRİŞ

Yer gravite alanının ölçülmesi ve modellenmesi jeodezi biliminin en temel ilgi alanlarından biridir. Yer'in çekim ve merkezkaç kuvvetlerinin toplamından oluşan gravite alanı, konum ve zaman uzayında değişkenlik gösteren vektörel bir alandır. Yer gravite alanı bilgisi; düşey koordinat sistemlerinin gerçekleştiriminden (jeoit belirleme ve nivelman ağları) hassas konumlama ve navigasyon uygulamalarına, maden/petrol/doğalgaz/jeotermal aramalarından fizik ve metrolojiye, deniz seviyesi değişimleri/buzul erimeleri/iklim değişimlerinin izlenmesinden volkanolojiye, tektonik yapıların belirlenmesinden kabuk/manto modellemesine kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bir noktadaki gravite vektörünün düşey bileşeni yatay bileşenlerine oranla çok daha fazla sinyal içerdiğinden 3 boyutlu gravite vektörü genellikle 1 boyutlu düşey bileşeni ile temsil edilmektedir (Torge, 1989).

Yeryüzü üzerinde veya yüzeye yakın yükseklik ve derinlikte gravite büyüklüğü ölçme işlemi gravimetri olarak adlandırılmaktadır. Ölçü için kullanılan cihazlara gravimetre adı verilmektedir. Gravimetri; ölçünün yüzeye yakınlığına göre yüzey (yersel), kuyu, deniz, deniz altı, hava ve uydu gravimetrisi, kullanılan gravimetreye göre ise bağıl ve mutlak gravimetri olarak sınıflandırılmaktadır. Herbir gravimetri sınıfının doğruluk, çözünürlük, maliyet vb. kategorilerde avantaj ve dezavantajları vardır (Torge, 1989).

Hava gravimetrisi, hava araçları kullanılarak yerden birkaç kilometre yükseklikte gravite vektörü bileşenlerinin ölçümü olarak tanımlanabilir. Yaklaşık yarım asırdır jeodezi ve jeofizikte kullanılmakta ve yerden ulaşımın güç ve/veya imkânsız olduğu geniş alanların hızlı ve nispeten uygun maliyetlerle ölçülmesine hizmet etmektedir (Şekil 1). Hava gravimetrisi; gözlenebilir sinyal büyüklüğü, çözünürlük ve kapsama alanı açısından yersel ve uydu gravimetrisi arasında kalan bir tekniktir ve her iki tekniğin zayıf yönlerini kapatmayı amaçlamaktadır. Örneğin; yersel tekniklerle haftalar/aylar sürebilecek bir etüt çalışması, hava gravimetrisi ile birkaç günde tamamlanabilmektedir. Ancak, hava gravimetrisi verilerinin sinyal gücü, çözünürlük/detay ayırma ve doğruluğu yersel verilere oranla daha düşük, uydu verilerine oranla daha yüksektir.



Şekil 1. Hava gravimetrisi.

Bir gravimetre esasen bir ivmeölçerdir ve Yer çekimi ivmesi ile kinematik ivmeyi birlikte ölçmektedir. Gravimetreler, hareketli platformlara monte edildiklerinde tek başına gravite belirlemek için yeterli değildir. Bunun için taşıyıcı platformun hareketini izleyebilecek ilave bilgiye veya veriye ihtiyaç vardır. Bunun yanında ivmeölçer tek bir duyarlı eksen boyunca ölçüm yapabildiğinden, platformun manevrası sırasında sensör yönlendirmesinin takip edilmesi gerekmektedir. Hava gravimetrisindeki bu iki temel problem Şekil 2'de gösterilmiştir.

Birinci problem iki farklı şekilde ele alınabilmektedir. İlkinde, ivmeölçer veya gravimetre mekanik geri bildirimli yalpa çemberi (gimbal) platformlar üzerine monte edilerek (stabil-platform sistemler), hava aracının hareketlerinden izole edilmekte ve uçuş boyunca düşeyde sabit tutulmaktadır (Forsberg ve Olesen, 2010). Stabil-platform sistemler bölgesel gravite alanı etütlerinde birçok grup tarafından uzun süredir kullanılmaktadır (Brozena, 1992; Forsberg ve diğerleri, 2001; Zhong ve diğerleri, 2015; Li ve diğerleri, 2016; McCubbine ve diğerleri, 2018). Bu sistemler ile uçuş hızına bağlı olarak 4-5 km yarı-dalga boyunda birkaç mGal doğrulukla gravite ölçülebilmektedir.



Şekil 2. Hava gravimetrisindeki iki temel problem ve yaygın çözümleri.

İkinci çözümde ise, ivmeölçer ve jiroskop uçlularından oluşan Analitik Ataletsel Navigasyon Birimi (Strapdown Inertial Measurement Unit-SIMU) hava aracına fiziksel olarak sabitlenmekte ve sensör yönlendirmesi sayısal (nümerik) olarak sağlanmaktadır. Çekim ve kinematik ivmelenme ayrıştırma problemi ise genellikle Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System-GNSS) kullanılarak çözülmektedir (Schwarz, 1983). GNSS, kinematik ivmelenmenin belirlenmesi yanında hava aracının hareketinden dolayı ortaya çıkan farklı ivmelenmelerin (Coriolis ve Eötvös) belirlenmesine de katkı sağlamaktadır.

Hava gravimetrisinin tarihi 1960'lı yılların başlangıcına uzanmaktadır (Thompson, 1959; Thompson ve LaCoste, 1960; Gumert, 1998). O tarihlerde sabit ve döner kanatlı hava araçları ile yapılan ilk denemelerde, düşük konumlama doğruluğu ve yeteri duyarlılığa sahip olmayan gravimetrelerin kullanımı nedeniyle ancak 10 mGal seviyelerinde doğruluklara erişilebilmiştir.

İlave konumlama sistemi destekli SIMU ile hava gravimetrisi çalışmaları, 1980'lerden sonra GPS sinyallerinin topluma açık hale gelmesiyle birlikte daha da önem kazanmıştır (Schwarz, 1983; Schwarz ve diğerleri, 1992; Wei ve Schwarz, 1998; Glennie ve Schwarz, 1999; Ayres-Sampaio ve diğerleri, 2015). Özellikle navigasyon amaçlı çalışmalar için dizayn edilen ve kullanılan SIMU'lar, gravimetrik uygulamalarda geleneksel stabil-platform sistemlere oranla daha çok avantaj sağlamaktadır. Düşük enerji tüketimi ve az yer kaplamaları, otonom işletimi, fiyatlarının daha düşük olması ve stabil-platform sistemlere oranla türbülansa daha az duyarlı olmalarının yanında, SAG sistemleri gravite alanının kısa dalga boylarında stabil-platform sistemlere göre daha iyi performans sergilemektedir. Bunun yanında üç eksenli bir SAG sisteminin gravite vektörü yatay bileşenlerini de belirleme potansiyeli bulunmaktadır. Becker ve diğerleri (2015), Jensen ve Forsberg (2018), Jensen ve diğerleri (2019), Simav ve diğerleri (2020), Simav (2020a) ve Simav (2020b) tarafından hava gravimetrisi için uygun SIMU'lar ile gerçekleştirilen güncel çalışmalarda, mGal altı duyarlılığa ve 2-3 km yarı dalga boyunda 1-2 mGal doğruluğa erişilebildiği gösterilmiştir.

SIMU'lar performanslarına göre deniz, hava, orta, taktik ve tüketici olmak üzere beş farklı kategoride sınıflandırılırlar (Groves, 2013). Deniz-dereceli SIMU'lar askeri gemi, denizaltı, kıtalararası balistik füze ve uzay araçlarında kullanılmaktadır. Bu SIMU'ların ataletsel navigasyon çözüm sapmaları 1.8 km/gün'den daha azdır. Hava ya da navigasyon-dereceli SIMU'lar askeri ve ticari hava araçlarında kullanılmakta olup, konum sapmaları 1-4 km/saat arasında değişmektedir. Taktik-dereceli SIMU'lar genellikle güdümlü silah ve insansız hava araçlarında kullanılırlar ve konum sapmaları 10-40 km/saat civarındadır. Tüketici-dereceli SIMU'lar ise akıllı telefonlarda ve otomobil endüstrisinde kullanılmakta olup, konum sapmaları 1-3 km/dk mertebesindedir. SIMU'ların belirli aralıklarla laboratuvarında kalibrasyona tabi tutulmaları gerekmektedir. Fiyatları ise derecesine göre birkaç on dolardan milyon dolarlara kadar değişkenlik göstermektedir. SAG çalışmalarında en az navigasyon-dereceli SIMU'lar kullanılmaktadır.

Yersel gravimetri ile doldurulamayan veri boşlukları, gravite alanı modelleme ve yorumlama çalışmalarında temel problemlerden biridir. Türkiye'de yersel gravimetri uygulamanın zor hatta imkânsız olduğu geniş su alanları, sahil şeritleri ve engebeli araziler gibi birçok coğrafi

detay bulunmaktadır. Hava gravimetrisi, bu alanlardaki veri boşluklarının doldurulması için kaçınılmaz bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı destekli "Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi" projesi (Simav ve diğerleri, 2015) kapsamında Harita Genel Müdürlüğüne navigasyon-dereceli bir SIMU tedarik edilmiştir. SIMU; gravite çözümü yapamayan, sadece navigasyon amaçlı kullanılabilen ve üretici tarafından tescilli bir yazılım ile temin edilebildiğinden, tedarik süresince yazar tarafından SAG veri işleme yazılımı geliştirilmiştir. 20-24 Mart 2017 tarihleri arasında Kırıkkale-Çorum bölgesindeki test alanında gerçekleştirilen fonksiyon ve yazılım denemelerinin ardından yaklaşık 1.5 yıl boyunca sistem ve yazılım iyileştirmesi üzerinde çalışılmıştır. Bu süreç içerisinde SIMU'ya sıcaklık stabilizasyonu sistemi entegre edilmiş, analiz yazılımındaki hatalar giderilerek yeni fonksiyonlar eklenmiştir. 24-28 Eylül 2018 tarihleri arasında ikinci test çalışması gerçekleştirilmiştir. Üretim odaklı ilk hava gravimetrisi çalışmaları ise 17 Ekim-21 Kasım 2019 tarihleri arasında Göller Bölgesi üzerinde yapılmıştır (Simav, 2020b).

Bu çalışmada; SAG temelleri ile SIMU ve GNSS verilerinden uçuş yüksekliğinde gravite bozukluğu hesaplama yöntemleri anlatılmakta, Harita Genel Müdürlüğü hava gravimetrisi sistemi ve veri işleme/analiz yazılımı tanıtılmakta, bugüne kadar gerçekleştirilen uygulamalara ilişkin sonuçlar sunulmakta ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

2. SAG TEMELLERİ

a. Direkt Çözüm

SAG teorisi, ataletsel veya inersiyel sistemde Newton'un ikinci hareket yasasına dayanmaktadır. İnersiyel sistemde (i) hareketli cismin kinematik ivmesi $\ddot{x}^i$, cisim üzerindeki spesifik kuvvet f^i ve gravite vektörünün g^i toplamına eşittir. Dolayısıyla cisme etki eden gravite ivmesi, (1) eşitliğinde gösterildiği şekilde kinematik ivme ile spesifik kuvvetin farkı olarak ifade edilebilmektedir.

$$g^i = \ddot{x}^i - f^i \quad (1)$$

Pratik uygulamalar için gravite vektörünün Yer ile birlikte dönen, merkezi SIMU olan ve eksenleri Kuzey-Doğu-Düşey doğrultusunu gösteren lokal (toposentrik) koordinat sisteminde (n) belirlenmesi gerekmektedir. Bu koordinat

sisteminde Yer'in dönmesinden ve cismin hızından kaynaklan etkilerden dolayı (1) eşitliği (2) eşitliğine dönüşmektedir. (2) numaralı eşitlikteki (b) üst indisi, merkezi toposentrik koordinat sistemi ile çakışık eksenleri burun, sağ kanat ve taban doğrultusunda olan SIMU ivmeölçer ve jiroskop eksenlerinin oluşturduğu gövde koordinat sistemini ifade etmektedir.

$$\mathbf{g}^n = \ddot{\mathbf{x}}^n - \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b + (2\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\Omega}_{en}^n) \dot{\mathbf{x}}^n \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_b^n = \mathbf{R}_Z(-\psi) \mathbf{R}_Y(-\theta) \mathbf{R}_X(-\phi) \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin \varphi & 0 \\ -\omega_{ie} \sin \varphi & 0 & -\omega_{ie} \cos \varphi \\ 0 & \omega_{ie} \cos \varphi & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\Omega}_{en}^n = \begin{bmatrix} 0 & \frac{v_N^n \tan \varphi}{(N+h)} & \frac{-v_N^n}{(M+h)} \\ \frac{-v_E^n \tan \varphi}{(N+h)} & 0 & \frac{-v_E^n}{(N+h)} \\ \frac{v_N^n}{(M+h)} & \frac{v_E^n}{(N+h)} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(2) eşitliğindeki $\mathbf{g}^n$ toposentrik koordinat sisteminde gravite vektörünü, $\dot{\mathbf{x}}^n$ GNSS konum çözümünün ikinci türevinden elde edilen kinematik ivmeyi, $\mathbf{C}_b^n$ gövde koordinat sisteminden lokal koordinat sistemine dönüşüm matrisini, $\mathbf{f}^b$ ivmeölçer spesifik kuvvet verisini, $\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n$ ve $\boldsymbol{\Omega}_{en}^n$ terimleri Yer dönme ve taşıma hızları çarpık-simetrik matrislerini, $\dot{\mathbf{x}}^n$ ise yine GNSS konum çözümünün birinci türevinden elde edilen hız $\mathbf{v}^n$ vektörünü ifade etmektedir. Eşitliğin son terimi literatürde Eötvös düzeltmesi olarak anılmaktadır. $\mathbf{C}_b^n$ dönüşüm matrisi; ψ dönme açısı (yaw), θ yunuslama açısı (pitch) ve ϕ yatış açısının (roll) ilgili rotasyon matrisine yerleştirilmesi sonrasında, üç rotasyon matrisinin çarpımı ile elde edilmektedir. (4) eşitliğindeki $\omega_{ie} = 7.292115 \times 10^{-5}$ rad/s Yer dönme hızını, φ jeodezik enlemi temsil etmektedir. (5) eşitliğindeki v_N^n ve v_E^n terimleri kuzey ve doğu yönlerindeki hız bileşenlerini N ve M normal ve meridyen yönündeki elipsoid ana eğrilik yarıçaplarını, h ise elipsoid yüksekliğini ifade etmektedir.

Lokal koordinat sisteminde gerçek gravite vektörü, referans elipsoidinin oluşturduğu normal gravite vektörü $\boldsymbol{\gamma}^n$ ve gravite bozukluğu $\delta \mathbf{g}^n$ vektörlerinin toplamı cinsinden ifade edilebilmektedir. Sonuç olarak uçuş yüksekliğinde gravite bozukluğu vektörü aşağıdaki şekilde yazılmakta, normal gravite vektörü Somigliana kapalı formülü ile hesaplanabilmektedir (Moritz, 2000).

$$\delta \mathbf{g}^n = \ddot{\mathbf{x}}^n - \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b + (2\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\Omega}_{en}^n) \dot{\mathbf{x}}^n - \boldsymbol{\gamma}^n \quad (6)$$

(6) eşitliği SAG temel eşitliği olarak kabul edilir. Ataletsel dönüş hızı (açısal hız) ve ivme ölçüleri ile birlikte GNSS verilerinin entegrasyonu ile gravite bozukluğunun belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntem literatürde direkt yöntem olarak bilinmektedir. GNSS kinematik ivme çözümleri gürültü içerdiğinden (6) eşitliği ile elde edilen gravite bozukluğu, konumsal düşük geçirgenli filtre ile filtrelenerek nihai çözüm oluşturulmaktadır (Glennie ve Schwarz, 1999; Glennie ve diğerleri, 2000; Forsberg ve diğerleri, 2001; Hwang ve diğerleri, 2006; Forsberg ve Olesen, 2010; Sampietro ve diğerleri, 2017).

b. Dolaylı Çözüm

SAG dolaylı gravite bozukluğu çözümü ataletsel navigasyon eşitlikleri ve ilave ölçü entegrasyonları ile elde edilir. Lokal koordinat sistemine navigasyon eşitlikleri aşağıdaki şekilde yazılmaktadır (Groves, 2013):

$$\dot{\mathbf{p}}^n = \mathbf{T}_r^p \mathbf{v}^n \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b - (2\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\Omega}_{en}^n) \mathbf{v}^n + \boldsymbol{\gamma}^n + \delta \mathbf{g}^n \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{C}}_b^n = \mathbf{C}_b^n \boldsymbol{\Omega}_{ib}^b - (\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\Omega}_{en}^n) \mathbf{C}_b^n \quad (9)$$

(7) eşitliğindeki $\mathbf{p}^n$ enlem, boylam ve elipsoid yüksekliğinden oluşan konum vektörünü, $\mathbf{T}_r^p$ kartezyen-eğri koordinat dönüşüm matrisini, $\mathbf{v}^n$ ise Yer referanslı hız vektörünü ifade etmektedir. (9) eşitliğindeki $\boldsymbol{\Omega}_{ib}^b$ matrisi ise jiroskoplar tarafından ölçülen açısal hız vektörünün çarpık-simetrik matrisi halidir.

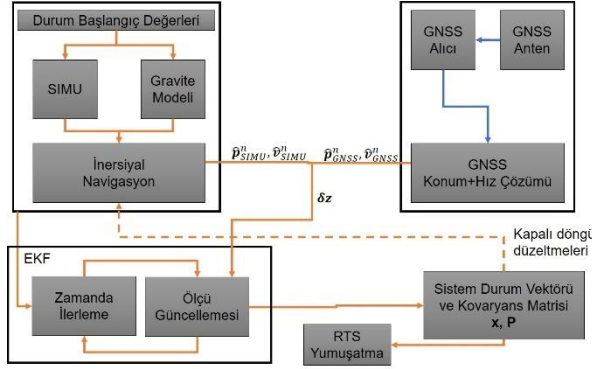
SIMU ivmeölçer ve jiroskoplar çıktıları; atım ($\mathbf{b}_a, \mathbf{b}_g$), ölçek ($\mathbf{s}_a, \mathbf{s}_g$), yanlış hizalama/çapraz çiftleme ($\mathbf{M}_a, \mathbf{M}_g$) gibi hatalar ile rastlantısal gürültü ($\mathbf{w}_a, \mathbf{w}_g$) içermektedir (Groves, 2013).

$$\tilde{\mathbf{f}}^b = \mathbf{b}_a + \mathbf{M}_a \mathbf{f}^b + \mathbf{w}_a \quad (10)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}^b = \mathbf{b}_g + \mathbf{M}_g \boldsymbol{\omega}^b + \mathbf{w}_g \quad (11)$$

(10) ve (11) eşitliklerindeki $\tilde{\mathbf{f}}^b$ hatalı SIMU ivmeölçer spesifik kuvvet çıktısını, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}^b$ ise jiroskop açısal hız çıktısını ifade etmektedir. Bu hatalar kendi içinde statik ve dinamik bileşenlere ayrılmaktadır. Statik hata bileşenleri laboratuvar kalibrasyonları ile giderilmektedir. Ancak dinamik hata bileşenleri rastlantısal süreçler olduğundan yalnızca ilave sensör entegrasyonları yardımıyla kestirilebilmektedir. Birinci bölümde bahsedilen SIMU performansının belirlenmesi, derecelendirme ve kategorilendirme işlemi bu hataların büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir.

İlave sensör entegrasyonu ile SIMU dinamik hatalarının kestirimi işlemi genellikle Kalman filtresi (Kalman, 1960) ile yapılmaktadır. Şekil 3'de gevşek birleştirmeli-kapalı döngü klasik bir genişletilmiş Kalman filtre (Extended Kalman Filter-EKF) akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 3. EKF ile gevşek birleştirmeli-kapalı döngü SIMU/GNSS entegrasyon akışı (Groves, 2013).

EKF dinamik sistem modeli ve lokal koordinat sisteminde 3 boyutlu konum ($\delta \mathbf{p}^n$), hız ($\delta \mathbf{v}^n$) ve yönelim ($\delta \boldsymbol{\psi}^n$) hata vektörü, gövde koordinat sisteminde 3 boyutlu ivmeölçer ($\delta \mathbf{b}_a^b$) ve jiroskop dinamik atım vektörleri ($\delta \mathbf{b}_g^b$) ile lokal koordinat sisteminde düşey yöndeki gravite bozukluğunu (δg^{n-D}) içeren 16+ hata durum vektörü aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\delta \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t)\delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{w}_s(t) \quad (12)$$

$$\delta \mathbf{x} = [\delta \mathbf{p}^n, \delta \mathbf{v}^n, \delta \boldsymbol{\psi}^n, \delta \mathbf{b}_a^b, \delta \mathbf{b}_g^b, \delta g^{n-D}, \dots, \dots]^T \quad (13)$$

Durum vektörü başlangıç değerlerinin belirlenmesini müteakip SIMU ve gravite modeli yardımıyla (7-9) eşitliklerinde verilen navigasyon eşitlikleri çalıştırılmakta ve bir sonraki SIMU ölçü epoğu için konum, hız ve yönelim vektörleri hesaplanmaktadır (zamanda ilerleme adımı). Yeni bir GNSS konum ve hız çözümü ile karşılaşıldığında EKF eşitlikleri çalıştırılmakta ve ölçü güncelleme yapılmaktadır (ölçü güncelleme adımı). Bu adımın sonunda (13) eşitliğinde verilen durum hata vektörleri kestirimleri kapalı döngü düzeltme ile SIMU kestirimlerine eklenmekte, toplam durum vektöründe biriken hatalar minimize edilmektedir. Son olarak sonuç durum vektörü Rauch–Tung–Striebel (RTS) yöntemi (Rauch ve diğerleri, 1965) ile yumuşatılmaktadır. Uygulamada bu işlem ileri yönlü çözüm geri yönlü yumuşatma, geri yönlü çözüm ileri yönlü yumuşatma veya ileri+geri+ileri yönlü çözüm geri yönlü yumuşatma şeklinde yapılabilir (Jensen ve Forsberg, 2018).

SIMU ivmeölçer ve jiroskop dinamik atım hataları ile gravite bozukluğu rastgele sabit, rastgele yürüyüş, N'inci derece Gauss-Markov veya bu stokastik süreçlerin kombinasyonları ile modellenebilmektedir (Becker ve diğerleri, 2015). SIMU ivmeölçer/jiroskop dinamik atım hatalarının rastgele yürüyüş, gravite bozukluğunun ise 3'üncü derece Gauss-Markov ile modellendiği bir durumda (12) eşitliğindeki sistem matrisi ($\mathbf{F}$), sistem gürültü dağılım matrisi ($\mathbf{G}$) ve sistem gürültü vektörü ($\mathbf{w}_s$) aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{pp} & \mathbf{F}_{pv} & \mathbf{F}_{p\psi} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{F}_{vp} & \mathbf{F}_{vv} & \mathbf{F}_{v\psi} & \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{F}_{\psi p} & \mathbf{F}_{\psi v} & \mathbf{F}_{\psi\psi} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 & 1 & 0 \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 & 0 & 1 \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & -\beta_{\delta g}^3 & -3\beta_{\delta g}^2 & -3\beta_{\delta g} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{G} = \text{blokdiag}(\mathbf{0}_{3 \times 3}, \mathbf{C}_b^n, \mathbf{C}_b^n, \mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{I}_{3 \times 3}) \quad (15)$$

$$\mathbf{w}_s = [\mathbf{w}_{p^n}, \mathbf{w}_{v^n}, \mathbf{w}_{\psi^n}, \mathbf{w}_a, \mathbf{w}_g, \mathbf{w}_{\delta g}^{GM3}]^T \quad (16)$$

(14) eşitliğindeki $\mathbf{F}_{xx}$ alt matrislerinin açık şekillerini Groves (2013)'de bulmak mümkündür. $\mathbf{w}_s$ vektörü içerisindeki stokastik terimler güç yoğunluğu spektrumu ile tanımlanan beyaz gürültü süreçleridir. Gravite bozukluğu 3'üncü derece Gauss-Markov ile modellendiği durumunda hata durum vektörüne gravite bozukluğunun birinci ve ikinci türevleri de eklenmektedir (bakınız Bölüm 2.ç).

Ölçü güncelleme adımı EKF'ye farklı türde ölçüler tanımlanabilmektedir. EKF ölçü modeli, durum vektörü ile ölçüler arasındaki fonksiyonel ilişkiyi ve ölçülerin stokastik modelini içermektedir. $\delta \mathbf{z}_k$ bir k epoğunda ölçü yenileme vektörü, $\mathbf{H}_k$ ölçü matrisi ve $\mathbf{w}_k^z \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_k)$ ölçü gürültü vektörü olmak üzere, doğrusal ölçü modeli aşağıdaki şekilde yazılabilir (Groves, 2013):

$$\delta \mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \delta \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k^z \quad (17)$$

18 parametrelili bir durum vektörü içeren EKF için uygulamada sıklıkla kullanılan konum ($\mathbf{H}_p$), hız ($\mathbf{H}_v$) ve havaalanı gravite bağlantı ölçü matrisleri ($\mathbf{H}_g$) aşağıda verilmiştir. Eşitliklerdeki $\boldsymbol{\ell}^b$ terimi GNSS anteni ile SIMU arasındaki baz vektörünü (lever arm), $\times$ işareti ise çarpık-simetrik matrise geçişi ifade etmektedir.

$$\mathbf{H}_p = [\mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{0}_{3 \times 3}, -[\mathbf{C}_b^n \boldsymbol{\ell}^b \times], \mathbf{0}_{3 \times 3}, \mathbf{0}_{3 \times 3}, \mathbf{0}_{3 \times 3}]^T \quad (18)$$

$$\mathbf{H}_v = [\mathbf{0}_{3 \times 3}, \mathbf{I}_{3 \times 3}, -[\mathbf{C}_b^n \boldsymbol{\Omega}_{ib}^b \boldsymbol{\ell}^b \times], \mathbf{0}_{3 \times 3}, [\mathbf{C}_b^n \boldsymbol{\ell}^b \times], \mathbf{0}_{3 \times 3}]^T \quad (19)$$

$$H_g = [0_{3 \times 3}, 0_{3 \times 3}, 0_{3 \times 3}, 0_{3 \times 3}, 0_{3 \times 3}, I_{3 \times 3}]^T \quad (20)$$

Özetle; dolaylı SAG çözüm yönteminde gravite bozukluğu, SIMU sensör hataları gibi ilave sistem durumu şeklinde stokastik olarak modellenmektedir. Bu yöntemde ilgili tüm büyüklük ve ölçüler tek bir sistem modeli içerisinde entegre edilmekte, tüm süreç basitleştirilmektedir (Simav, 2020a).

c. Dolaylı Çözümde Gravite İndirgemeleri

SAG dolaylı çözümlerindeki uzun dalga boylu hataların azaltılması amacıyla Simav (2020a) tarafından “kaldır-hesapla-geri yükle” prensibine dayalı uzun ve kısa dalga boylu gravite indirgemesi yöntemi önerilmiştir. Gravite bozukluğu; uzun dalga boylu bileşen δg_{GGM}^{n-D} , kısa dalga boylu bileşen δg_{RTM}^{n-D} ve artık bileşen δg_R^{n-D} olmak üzere üç bölüme ayrıştırılabilmektedir.

$$\delta g^{n-D} = \delta g_{GGM}^{n-D} + \delta g_{RTM}^{n-D} + \delta g_R^{n-D} \quad (21)$$

Uzun dalga boylu bileşen, küresel harmoniklerle temsil edilen global jeopotansiyel modellerden (GGM) harmonik sentez yöntemiyle hesaplanabilmektedir (Bucha ve Janák, 2014). Referans yüzeyin üzerinde kalan topoğrafik kütlelerin düşey yönlü çekim ivmesi diğer bir deyişle kısa dalga boylu arazi etkisi, artık arazi modeli (Residual Terrain Model-RTM) kullanılarak belirlenmektedir (Forsberg, 1984; Nagy, 1966; Nagy ve diğerleri, 2000). Uçuş yüksekliğindeki GGM ve RTM etkileri, GNSS konum çözümleri kullanılarak SIMU/GNSS entegrasyonundan önce ön analiz aşamasında hesaplanmakta ve SAG çözümü sırasında toplam gravite bozukluğundan çıkarılmaktadır. SAG çözümlerinde daha düşük genlikli ve yumuşatılmış artık gravite bozuklukları modellenmektedir. GGM ve RTM gravite indirgemeleri SAG çözümü sonunda artık gravite bozukluklarına geri eklenmektedir.

SAG dolaylı çözümünde gravite indirgemelerinin uygulanması durumunda (8)'de verilen navigasyon eşitliğinde ve (13)'de verilen hata durum vektöründe gerekli değişiklikler ve düzenlemeler yapılmaktadır.

ç. Gravite Bozukluğunun Birinci, İkinci ve Üçüncü Derece Gauss-Markov Stokastik Süreçleri ile Modellenmesi

Konum uzayında, hava aracı rotası boyunca gravite bozukluğunu en iyi modelleyen stokastik sürecin ne olması gerektiği konusunda çeşitli araştırmalar mevcuttur. Jekeli (1994), gerçek gravite sinyalinin temsil edebilecek en uygun modelin 3 veya 4'üncü derece Gauss-Markov model olduğunu ileri sürmektedir. Ayres-Sampaio ve diğerleri (2015) ve Deurloo ve diğerleri (2015), ise 1'nci derece Gauss-Markov modelinin hatta çok daha basit rastgele yürüyüş sürecinin benzer sonuçlar üretebileceğini göstermiştir.

2'nci ve daha üst derece Gauss-Markov süreçleri, modellenen büyüklüğün zamana bağlı türevlerini içermektedir. Bu nedenle 2'nci derece Gauss-Markov süreçleri için gravite bozukluğunun birinci türevi $\delta \dot{g}^n$, 3'üncü derece Gauss-Markov süreçleri için ise birinci ve ikinci türevleri $\delta \ddot{g}^n$ sistem matrisi ve sistem durum vektörüne eklenmektedir. Gauss-Markov stokastik süreçleri için sistem matrisi, sistem gürültüsü ve oto-korelasyon (öz-korelasyon) fonksiyonu eşitlikleri Tablo 1'de verilmiştir. Eşitliklerdeki σ ve β terimleri sırasıyla süreç standart sapmasını ve korelasyon parametresini temsil etmektedir.

Gauss-Markov korelasyon parametresi zaman biriminde (genellikle saniye) ifade edilmektedir. Ancak gravite bozukluğu sinyalinin karakteristik tanımı konum uzayında yapılmaktadır. Dolayısıyla mesafe birimindeki gravite bozukluğu korelasyon parametresinin, zaman birimine dönüştürülmesi gerekmektedir. Uzunluk ve zaman birimleri arasındaki dönüşüm veri işleme aşamasında o andaki yatay uçuş hızı bilgisi kullanılarak yapılmaktadır (Simav ve diğerleri, 2020; Simav, 2020a):

$$\beta[t] = v_h \beta[d] = \sqrt{v_N^2 + v_E^2} \beta[d] \quad (22)$$

80 m/s v_h yatay uçuş hızına ve $1/20 \text{ km}^{-1} \beta[d]$ değerine sahip tipik bir uçuşta, korelasyon parametresinin zaman birimindeki değeri $\beta[t]$ 0.004 s^{-1} 'dir.

Tablo 1. Gauss-Markov derecesine göre gravite bozukluğu için sistem matrisi, sistem gürültüsü ve oto-korelasyon fonksiyonları (Gelb, 1974; Kwon ve Jekeli, 2001). (τ : ardışık sinyallerin zaman aralığı).

GM Derece	Sistem Matrisi (F)	Sistem Gürültüsü (G)	Oto-Korelasyon Fonksiyonu ($R(\tau)$)
1	$[-\beta_{\delta g}^{1st}]$	$2\beta_{\delta g}^{1st}\sigma_{\delta g}^2$	$\sigma^2 e^{-\beta \tau }$
2	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\beta_{\delta g}^{2nd})^2 & -2\beta_{\delta g}^{2nd} \end{bmatrix}$	$4(\beta_{\delta g}^{2nd})^3\sigma_{\delta g}^2$	$\sigma^2 e^{-\beta \tau }(1 + \beta \tau)$
3	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -(\beta_{\delta g}^{3rd})^3 & -3(\beta_{\delta g}^{3rd})^2 & -3\beta_{\delta g}^{3rd} \end{bmatrix}$	$\frac{16}{3}(\beta_{\delta g}^{3rd})^5\sigma_{\delta g}^2$	$\sigma^2 e^{-\beta \tau }\left(1 + \beta \tau + \frac{1}{3}\beta^2 \tau ^2\right)$

3. HARİTA GENEL MÜDÜRLÜĞÜ HAVA GRAVİMETRESİ VE VERİ-İŞLEME YAZILIMI

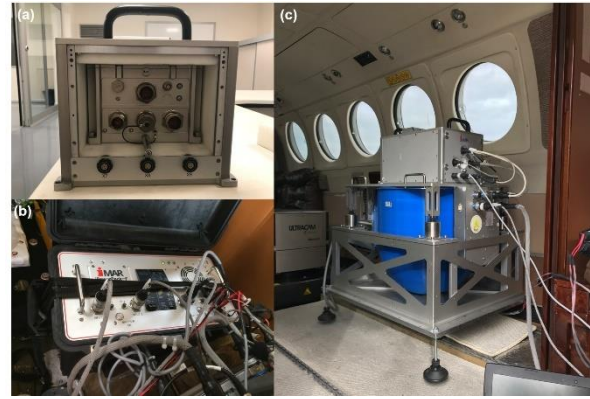
a. Hava Gravimetresi

SAG çalışmaları için Almanya iMAR Navigation GmbH (<https://www.imar-navigation.de>) firmasından eski adıyla iNAT-RQH-1001, yeni adıyla iCORUS hava gravimetresi sistemi tedarik edilmiştir. iCORUS hava gravimetresi sistemi navigasyon-dereceli bir SIMU'dur. 3 adet QA2000-030 tipinde ortogonal ivmeölçer, 3 adet yüksek kaliteli GG1320AN halka lazer jiroskop, bir adet sıcaklık sensörü, entegre NovAtel GNSS alıcısı ve bir PC karttan oluşmaktadır. PC kart, inersiyal sensörlerden ve GNSS alıcısından verileri toplayarak zaman bilgili inersiyal açısal hız ve spesifik kuvvet verilerini çıktı olarak sunmaktadır. 2017-2018 yılları arasındaki sistem iyileştirme çalışmaları sırasında SIMU'ya iTempStab isimli sıcaklık stabilizasyon sistemi eklenmiştir. Sistem, birkaç saatlik ısıtma süresinin sonunda SIMU iç sıcaklık değişimini 0.1 K aralığında tutmaktadır. Böylece sıcaklık değişimi kaynaklı ivmeölçer sürüklenmesi (dinamik atım değişimi) azaltılmakta ve gravite alanı uzun dalga boyu iyileştirilmektedir (Jensen ve diğerleri, 2019; Simav ve diğerleri, 2020). Sistem 24 V doğru akım enerji kaynağı ile çalışmakta, uçak çalıştırılmadan önce iPowerPack olarak bilenen havacılık sertifikalı batarya sisteminden güç almakta, uçak çalıştıktan sonra ise doğrudan kabin içi güç kaynağını kullanmaktadır. Kabin içi güç kaynağı kullanıldığı durumlarda iPowerPack otomatik şarj olmaktadır. iCORUS ve iPowerPack sistemi Şekil 4'de gösterilmektedir.

b. SAG Veri İşleme Yazılımı

iCORUS hava gravimetresi, iXCOM-CMD adında üretici tarafından tescilli bir yazılım ile birlikte gelmektedir. Yazılım; iCORUS sisteminin çalıştırılması, veri toplamaya yönelik ayarlamaların yapılması ve gerçek zamanlı navigasyon çözümü yapılabilmesi için

kullanılmaktadır. Gravimetri için herhangi bir modülü veya fonksiyonu bulunmamaktadır. Bu nedenle, iCORUS sistemi tedariki ve testi sürecince yazar tarafından MATLAB ortamında SAG isimli veri işleme yazılımı geliştirilmiştir.



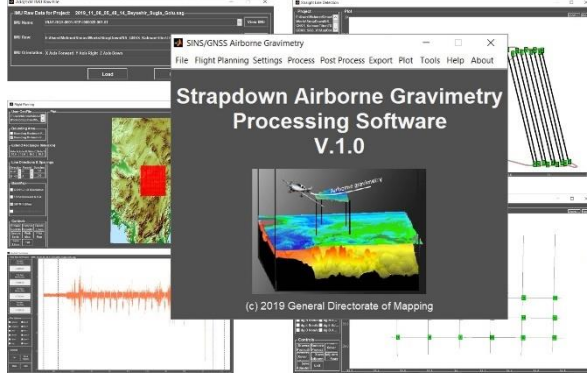
Şekil 4. (a) iCORUS (iNAT-RQH-1001+iTempStab) hava gravimetresi, (b) iPowerPack güç ünitesi, (c) iCORUS hava gravimetresinin uçak içerisindeki görüntüsü.

Yazılım, kullanıcı ayarlarının yapılabildiği, veri işleme seçeneklerinin girilebildiği kullanıcı dostu bir arayüze sahiptir (Şekil 5). Basit bir veri işlem için öncelikle bir proje açılmakta ve projeye SIMU, GNSS (zorunlu) ve varsa gravite indirgeme dosyaları yüklenmektedir. Ardından SIMU parametreleri, zaman, sistem değişkenleri, stokastik modeller, ölçü ve kovaryans güncellemesi, gravite bağlantı noktası ve SIMU-GNSS baz vektörü ile ilgili ayarlamalar yapılmakta ve veri işlem başlatılmaktadır.

Yazılım, birden çok uçuş verisini hızlı bir şekilde işleyebilmek için paralel hesaplama kabiliyetine sahiptir. Tek çekirdekli ortalama bir bilgisayarda 6 saatlik uçuş verisi bir dakikadan daha kısa sürede işlenebilmektedir.

SAG yazılımı birçok veri işlem sonrası fonksiyona sahiptir. 2-3 boyutlu çizgi, münhane

(kontur), yüzey, ham veri, çözüm vb. görüntüleme, çeşitli formatlarda çıktılama, otomatik düz uçuş hatları belirleme, otomatik çapraz geçiş noktası belirleme ve dengeleme, tekrarlı hatları bulma, oto-korelasyon analizi, farklı çözümlerin karşılaştırması gibi özellikleri mevcuttur. Yakın zaman önce yazılıma uçuş planlama fonksiyonu da eklenmiştir.



Şekil 5. SAG veri işlem yazılımı.

4. HAVA GRAVİMETRİSİ UYGULAMALARI

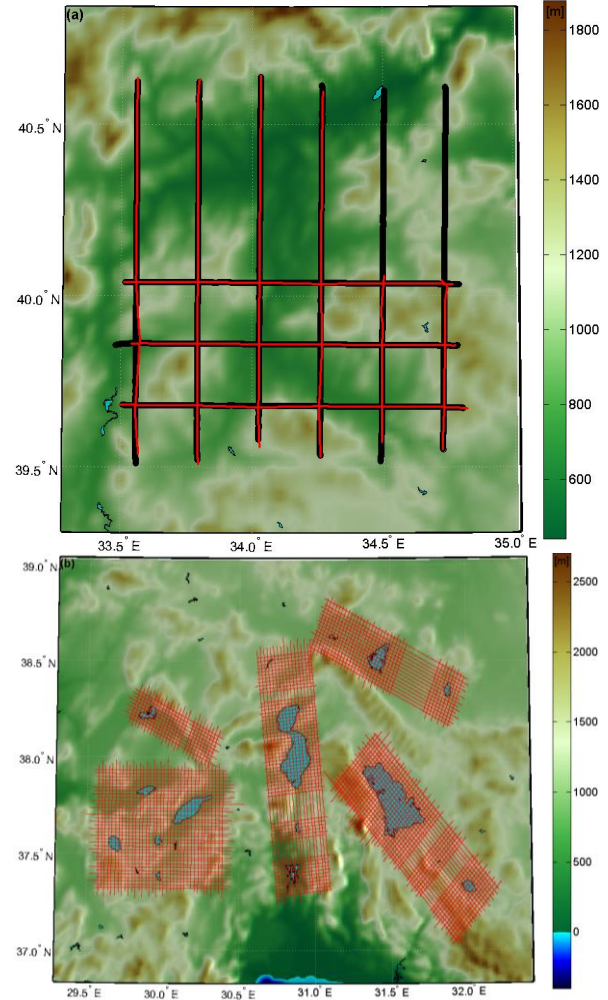
a. Genel

Harita Genel Müdürlüğü hava gravimetrisi sistemi ile 2017 ve 2018 yıllarında Kırıkkale-Çorum test bölgesi üzerinde, 2019 yılında ise Göller Bölgesi üzerinde uçuşlar gerçekleştirilmiş. Toplam uçuş süresi yaklaşık 114 saat, toplam hat uzunluğu ise yaklaşık 21000 km'dir. Uçuşlar, hava aracı oto pilotu kullanılarak sabit irtifada ve olabildiğince sabit hızda yapılmıştır. Test alanı üzerindeki uçuşlar Harita Genel Müdürlüğüne ait Beechcraft King Air 200 uçağı ile Ankara Güvercinlik havaalanından, Göller Bölgesi üzerindeki uçuşlar ise Beechcraft King Air B-350 ER uçağı ile Isparta Süleyman Demirel havaalanından yapılmıştır. Göller Bölgesi; Burdur-Acıgöl-Salda, Beyşehir-Suğla, Eğirdir-Karacaören, Eber-Akşehir-Ilgın ve Işıklı Gölleri şeklinde 5 gruba ayrılarak ölçülmüştür. Uçuşlara ilişkin genel bilgiler Tablo 2'de sunulmuş, uçuş hatları Şekil 6'da gösterilmiştir.

b. Veri Toplama

SAG çalışmaları süresince, iCORUS hava gravimetresi X-ekseni burun, Y-ekseni sağ kanat ve Z-ekseni taban doğrultusunu gösterecek şekilde uçağa sabitlenmiştir. SIMU-GNSS anteni arasındaki baz vektörü total station ile hassas bir şekilde ölçülmüştür. Kalkış/iniş yapılacak havaalanında uçak hangarı girişine gravite

bağlantı noktası tesis edilmiştir. Tesis edilen nokta hassas bir şekilde konumlandırılmış ve en yakın mutlak gravite noktası referans alınarak 30 μGal 'den daha iyi bir duyarlılıkta bağıl gravimetre ile ölçülmüştür. Diferansiyel konumlama için park pozisyonuna yakın açık bir alana GNSS referans istasyonu kurulmuş ve SIMU ile birlikte çalıştırılmıştır. Yerde yapılan çalışmalara ilişkin fotoğraflar Şekil 7'de sunulmaktadır.



Şekil 6. (a) Test-1 (siyah) ve Test-2 (kırmızı) düz uçuş hatları, (b) Göller Bölgesi düz uçuş hatları.

Her uçuştan en az 3-4 saat önce hangar içerisinde sistem çalıştırılarak SIMU iç sıcaklığının optimal sıcaklık seviyesine ($\sim 50-55^\circ\text{C}$) ulaşması sağlanmıştır. Test-1 uçuşu sırasında sıcaklık stabilizasyon sistemi olmadığından SIMU içerisinde yaklaşık 7°C sıcaklık değişimi meydana gelmiş, bu durum sonuçları olumsuz yönde etkilemiştir (Simav ve diğerleri, 2020). Diğer tüm uçuşlarda SIMU iç sıcaklık değişimi 0.5°C 'den daha azdır.

Tablo 2. Bugüne kadar Türkiye’de gerçekleştirilen SAG çalışmaları hakkında genel bilgi (Simav ve diğerleri, 2020; Simav, 2020a; Simav, 2020b).

Bölge	Başlama Tarihi	Bitiş Tarihi	Uçuş Süresi [saat]	Hat Uzunluğu [km]	Ortalama İrtifa [m]	Ortalama Hız [m/s]
Test-1 Kırıkkale-Çorum	22 Mar 17	22 Mar 17	5.4	1545.2	3055.4	80.1
Test-2 Kırıkkale-Çorum	27 Eyl 18	27 Eyl 18	5.1	1421.3	3180.2	79.9
Burdur-Acıgöl-Salda Gölleri	17 Eki 19	24 Eki 19	28.7	5530.1	3108.6	75.9
Beyşehir-Suçla Gölleri	30 Eki 19	08 Kas 19	28.6	4534.8	3133.8	74.0
Eğirdir-Karacaören Gölleri	07 Kas 19	13 Kas 19	23.7	4259.0	3146.8	81.4
Eber-Akşehir-İlgın Gölleri	18 Kas 19	21 Kas 19	15.9	2588.6	3072.4	75.6
Işıklı Gölü	20 Kas 19	20 Kas 19	6.3	1135.6	3060.5	79.1

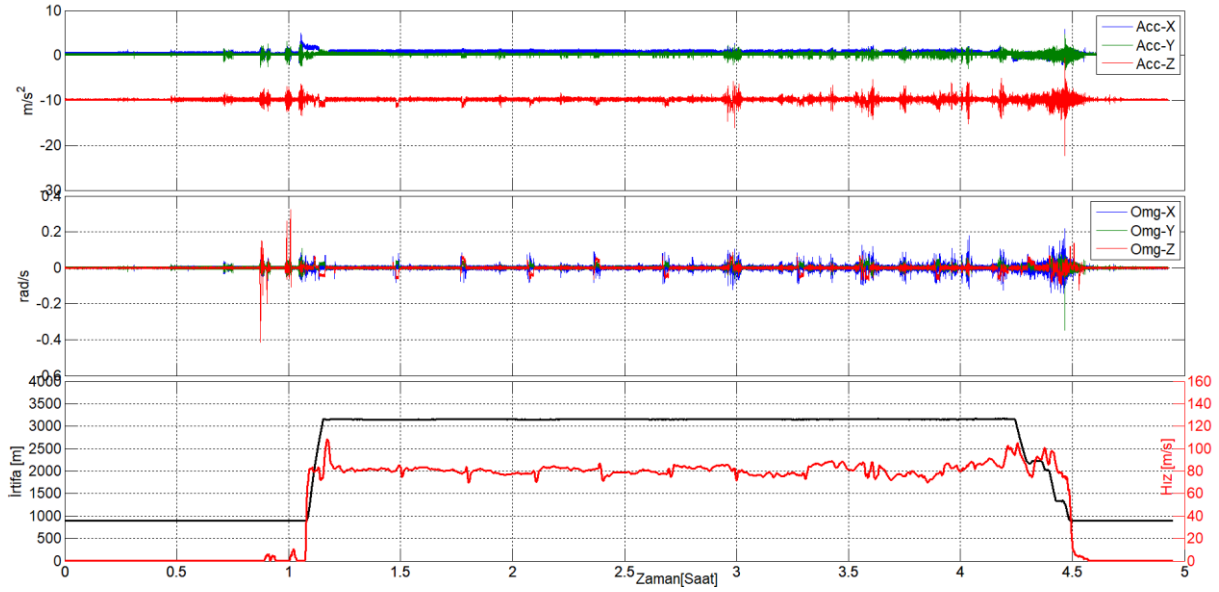
SIMU inersiyal açısal hız ve spesifik kuvvet verileri 300 Hz, GNSS (GPS+GLONASS) gözlemleri ise 1 Hz örneklem aralığında toplanmıştır. Uçak aprondaki gravite bağlantı noktasına çekilir çekilmez veri kaydı başlatılmış ve her uçuş öncesi motor çalıştırılmadan önce ve uçuş sonrası motor susturulduğunda başlangıç durum vektörü değerlerinin belirlenmesi ve statik hizalama (başlangıç yönelim değerlerinin belirlenmesi) işlemi için en az 10 dakika hareketsiz veri toplanmıştır. Hava şartlarına bağlı olarak günlük ortalama 5.2 saat uçuş yapılmış ve yaklaşık 900 km hat üzerinde veri toplanmıştır. Yaklaşık 5 saatlik klasik bir uçuşa ait ivmeölçer (Acc-X, Acc-Y, Acc-Z), jiroskop (Omg-X, Omg-Y, Omg-Z), irtifa ve sürat verisi Şekil 8’de gösterilmektedir. Grafik üzerinde hareketsiz veri toplama, kalkış, iniş, düz uçuş ve dönüşler rahatlıkla ayırt edilebilmektedir.

c. Veri İşleme

Lokal koordinat sisteminde ve uçuş yüksekliğinde düşey gravite bozukluğu hesaplamalarında dolaylı SAG çözüm yöntemi kullanılmaktadır (Bölüm 2.b). SIMU/GNSS entegrasyonu, 18 parametrelili bir durum vektörü içeren gevşek birleştirmeli-kapalı döngü EKF ile yapılmaktadır. Sistem hata durum vektörü, 3 boyutlu konum, hız, yönelim, ivmeölçer ve jiroskop atımları ile 1 boyutlu indirgenmiş düşey gravite bozukluğu, birinci ve ikinci derece gravite bozukluğu türevlerini içermektedir. Ataletsel sensör atımları rastgele yürüyüş, indirgenmiş gravite bozukluğu ise 3’ncü derece Gauss-Markov ile modellenmektedir. Gevşek birleştirmeli entegrasyon GNSS konum ve hız çözümünü gerektirdiğinden öncelikle ham GNSS verileri işlenmektedir. GNSS çözümleri, NovAtel’in Waypoint GrafNav 8.90 yazılımı ile diferansiyel veya Hassas Nokta Konumlama (PPP) yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, iki farklı GNSS veri işleme yöntemi ile belirlenen konum ve hız çözümlerinin, gravite bozukluğu sonuçları üzerinde anlamlı bir değişime neden olmadığı görülmüştür. İkinci aşamada, GNSS konum çözümleri kullanılarak uzun ve kısa dalga boylu gravite indirgemeleri hesaplanmaktadır (Bölüm 2.c). Uzun dalga boylu indirgemeler EGM2008 global jeopotansiyel modeli (Pavlis ve diğerleri, 2008), kısa dalga boylu indirgemeler ise DTM2006.0 Yer topoğrafyası küresel harmonik katsayıları (Pavlis ve diğerleri, 2007) ve MERIT DEM yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli (Yamazaki ve diğerleri, 2017) kullanılarak, Simav (2020a)’da tarif edildiği şekilde belirlenmektedir. Son aşamada, SIMU/GNSS entegrasyonu yapılmakta ve ileri yönlü gravite bozukluğu çözümleri RTS ile yuvarlatılmaktadır.



Şekil 7. (a) Hava gravimetrisinin uçak içerisine yerleştirilmesi, (b) SIMU-GNSS anteni arası baz vektörü ölçümü, (c) Gravite bağlantı noktası ölçümü, (ç) GNSS referans istasyonu.



Şekil 8. Yaklaşık 5 saatlik bir uçuşa ait (a) ivmeölçer spesifik kuvvet (ms^{-2}), (b) Jiroskop açısal hız (rads^{-1}), (c) Deniz seviyesinden uçuş yüksekliği (m) ve hava aracı yer sürati (ms^{-1}).

GNSS konum ve hız çözümleri EKF'de ölçü olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında uçak park pozisyonunda gravite bağlantı noktası üzerindeyken yersel gravite ölçüsü ve sıfır-hız ölçüsü EKF'ye dâhil edilerek ölçü güncellemesinde kullanılmaktadır.

Sonuç gravite bozukluğu çözümleri tekrarlamalı olarak hesaplanmaktadır. İlk tekrarlamada sonunda mesafenin fonksiyonu olarak gravite bozukluğu oto-korelasyonu hesaplanmaktadır. Ardından Tablo 3'de verilen 3'üncü derece Gauss-Markov oto-korelasyon fonksiyonuna, hesaplanan oto-korelasyon fonksiyonu uydurularak Gauss-Markov parametreleri (σ ve β) kestirilmektedir. Yeni parametrelerle çözüm tekrarlanmakta ve sonuç gravite bozukluğu değerleri elde edilmektedir. Veri işlem sırasında kullanılan durum değişkenleri başlangıç belirsizlikleri ve sistem gürültü değerleri Tablo 3'de sunulmuştur.

ç. Uygulama Sonuçları

SAG düşey gravite bozukluğu çözümlerinin iç duyarlılığı (prezisyonu), iki düz uçuş hattının yatayda kesiştiği "çapraz-geçiş" olarak bilinen noktalarda veya aynı hat üzerinde tekrarlı ölçülerle değerlendirilmektedir. Bugüne kadar gerçekleştirilen hava gravimetrisi çalışmalarında tekrarlı hat ölçüsü yapılmamış, duyarlık değerlendirmesi için çapraz-geçiş noktaları kullanılmıştır.

Her ne kadar uçuşlar oto pilot kullanılarak yapılsa da türbülans, rüzgâr gibi faktörler nominal 3 boyutlu uçuş rotasında metreler seviyesinde değişim yaratmaktadır. Bu nedenle iki uçuş hattının aynı noktada kesişmesi neredeyse imkânsızdır. Yatay kesişim noktasında bir miktar yükseklik farkı ortaya çıktığından, çapraz-geçiş noktalarının seçimi önem arz etmektedir. Gerçek düşey gravite gradyenti ile normal gravite gradyenti arasındaki farktan kaynaklanabilecek hatayı en aza indirmek için kesişim noktalarındaki yükseklik farkının belirli bir limiti aşmaması gerekir. Pratikte yükseklik farkı limiti 50-100 m arasında bir değer seçilmektedir.

Tablo 3. SAG veri işlem aşamasında kullanılan EKF parametreleri.

Durum Değişkeni	Başlangıç Belirsizliği	Sistem Gürültüsü
Konum	2 cm	$0 \text{ m}/\sqrt{s}$
Hız	10 cm/s	$5E-5 \text{ m/s}/\sqrt{s}$
Yönelim $[\phi, \theta, \psi]$	$[1, 1, 5]^\circ$	$0.2 \text{ yay-saniye}/\sqrt{s}$
İvmeölçer Atımı	100 mGal	$0.01 \text{ mGal}/\sqrt{s}$
Jiroskop Atımı	$0.001^\circ/\text{h}$	$0^\circ/\text{h}/\sqrt{s}$
Düşey Gravite Bozukluğu	0.03 mGal	$\sigma_{dg} = 100 \text{ mGal}$ $\beta_{dg}^{3rd} = 1/20 \text{ km}^{-1}$

Gelgitler, yer altı suyu ve atmosferik basınç değişimleri, okyanus yüklemesi gibi nedenlerden kaynaklan gravite alanındaki zamana bağlı değişimler ihmal edildiğinde, bir çapraz-geçiş noktasındaki düşey gravite bozukluğu farkı aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\chi_{A,B} = \delta \hat{g}_A - \delta \hat{g}_B \quad (23)$$

Eğer yeterli sayıda çapraz-geçiş noktası olması durumunda, en küçük kareler dengelemesiyle her bir uçuş hattı için öteleme parametresi κ hesaplanabilmektedir. $\delta \hat{g}_{A_i}$ ve $\delta \hat{g}_{B_j}$ sırasıyla A ve B uçuş hatlarında i ve j numaralı çapraz-geçiş noktalarındaki düşey gravite bozukluğu kestirimleri olmak üzere, dengelenmiş çapraz-geçiş artıkları $\bar{\chi}_{A,B}$ aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

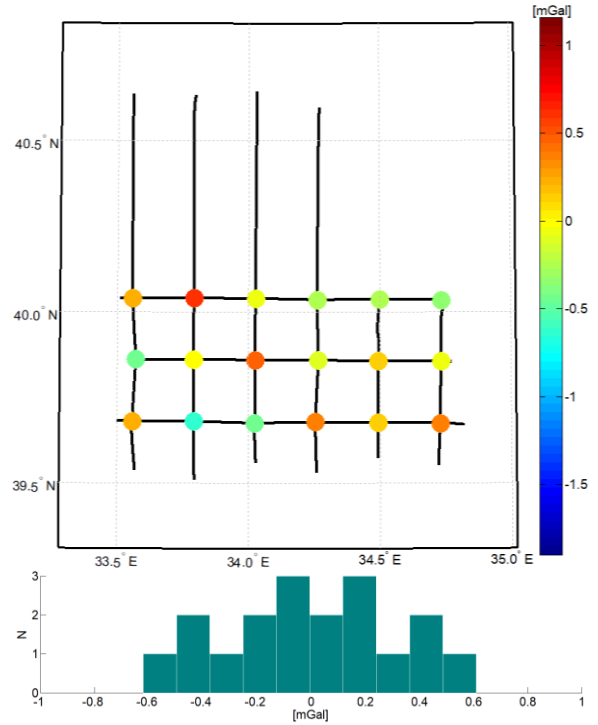
$$\bar{\chi}_{A,B} = (\delta \hat{g}_{A_i} + \kappa_A) - (\delta \hat{g}_{B_j} + \kappa_B) \quad (24)$$

Şekil 9'da Kırıkkale-Çorum Bölgesi Test-2 uçuşuna, Şekil 10'da ise Göller Bölgesi üzerindeki uçuşlara ait çapraz-geçiş nokta yerleri ve $\bar{\chi}_{A,B}$ değerleri gösterilmektedir. Çapraz-geçişlerin dengeleme öncesi ve sonrası istatistikleri Tablo 4'de sunulmuştur. Sıcaklık stabilizasyon sistemi olmadan gerçekleştirilen Test-1 uçuşu dışındaki diğer tüm uçuşlarda dengelenmemiş RMSE ($\text{RMS}/\sqrt{2}$) değerleri 1 mGal seviyesindedir. Uçağın keskin manevraları ölçü presizyonunu düşürdüğünden, beklendiği gibi yüksek $\bar{\chi}_{A,B}$ değerleri genellikle hat sonlarında dönüşlere yakın yerlerde gözlenmektedir. Çapraz-geçişlerin dengelemesi sonrası kesişim noktalarında daha küçük gravite bozukluğu farkları elde edildiğinden istatistikler oldukça iyileşmektedir. Çapraz-geçiş farklarının RMSE değerleri 0.8 mGal altına inmektedir.

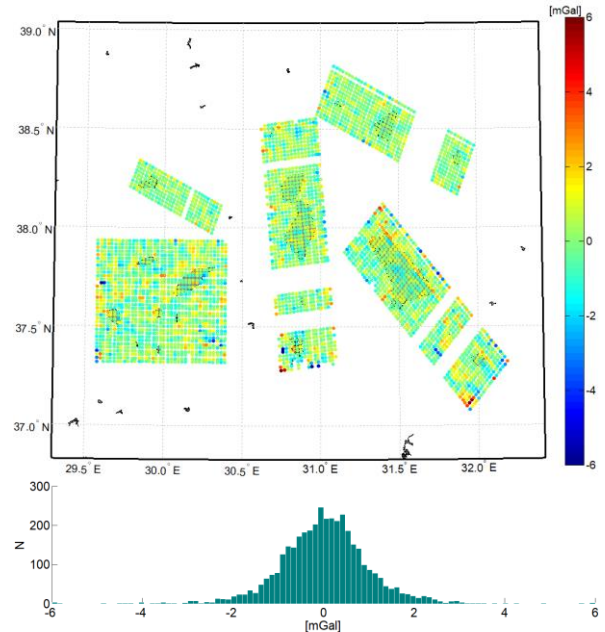
Çapraz-geçişlerin dengelemesi uygulamaya bağlı bir tekniktir ve her uygulama için anlamlı değildir. Maden arama gibi jeofizik uygulamaları için dengeleme mantıklı gözükmemektedir. Jeofizik uygulamaların birçoğunda gravite alanındaki lokal yapılar ana ilgi konusudur ve ölçü duyarlılığı doğruluğa oranla daha önemli bir gereksinimdir. Gravite verisinin uzun dalga boyundaki güvenilirliği bu uygulamalarda genellikle göz ardı edilir.

Hava gravimetrisi sonuçlarının dış doğruluğu veya kalite doğrulaması, çalışma bölgesinde yeteri sıklıkta yersel veri olması durumunda yersel verilerin yukarı yönlü uzanımıyla karşılaştırılarak yapılmaktadır. Ancak hava gravimetrisi genellikle yersel veri boşluklarının doldurulması için kullanıldığından bu karşılaştırmayı her bölgede

yapmak olanaksızdır. Alternatif olarak yüksek çözünürlüklü GGM'lerden uçuş yüksekliğinde düşey gravite bozuklukları kestirilmekte ve SAG çözümleri ile karşılaştırma yapılabilmektedir. Bu tür bir karşılaştırma hava gravimetrisi sonuçlarının dış doğruluğu hakkında bilgi verebileceği gibi aynı zamanda SAG çözümlerinin uzun dalga boyundaki tutarlılığını ve performansını göstermesi açısından da önemlidir.



Şekil 9. Kırıkkale-Çorum Test-2 uçuşuna ait dengelenmiş çapraz-geçiş farkları.



Şekil 10. Göller Bölgesi uçuşlarına ait dengelenmiş çapraz-geçiş farkları.

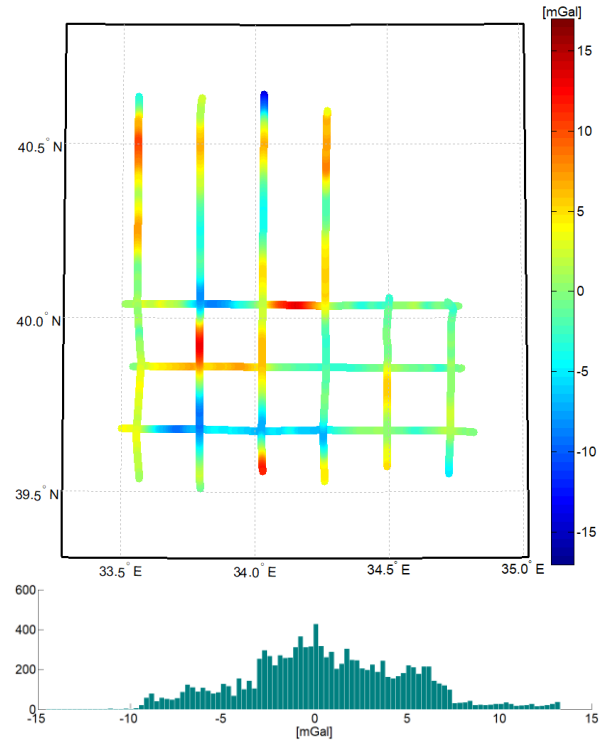
Tablo 4. Çapraz-geçiş noktalarında dengeleme öncesi ve sonrası düşey gravite bozukluğu farkları (mGal). (N: çapraz-geçiş nokta sayısı, μ : Ortalama, σ : Standart Sapma, RMSE: $RMS/\sqrt{2}$).

Bölge	N	Dengelenmemiş			Dengelenmiş		
		μ	σ	RMSE	μ	σ	RMSE
Test-1 Kırıkkale-Çorum	18	-1.85	3.20	2.56	0.00	1.67	1.14
Test-2 Kırıkkale-Çorum	18	-0.03	1.15	0.79	0.00	0.34	0.24
Burdur-Acıgöl-Salda Gölleri	1289	0.13	1.79	1.27	0.00	1.00	0.71
Beyşehir-Suğla Gölleri	896	0.61	1.67	1.26	0.00	1.16	0.82
Eğirdir-Karacaören Gölleri	898	0.67	1.85	1.39	0.00	1.01	0.71
Eber-Akşehir-Ilgın Gölleri	540	-0.04	1.42	1.01	0.00	0.72	0.51
Işıklı Gölü	234	-1.35	1.55	1.45	0.00	0.64	0.45

Kırıkkale-Çorum test bölgesinde yeteri genişlikte ve sıklıkta yersel veri olduğundan Test-1 ve Test-2 uçuş sonuçları yersel verilerin yukarı yönlü uzanımıyla karşılaştırılmış ve sonuçları Simav ve diğerleri (2020) tarafından yayımlanmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda sıcaklık stabilizasyon sistemi ile gerçekleştirilen Test-2 uçuşu gravite bozukluğu sonuçları ile yukarı yönlü uzatılmış yersel veriler arasında yaklaşık 1 mGal civarında bir fark bulunmuştur.

Uçuş yüksekliğindeki SAG düşey gravite bozukluğu çözümleri, 3.5-4 km yarı dalga boyu konumsal çözünürlüğe sahip XGM2019e birleşik GGM (Zingerle ve diğerleri, 2019) ile karşılaştırılmıştır. Model, 5540'ıncı derece ve mertebeye kadar küresel harmonik katsayılarla temsil edilmektedir ve Global Yer Modelleri Uluslararası Merkezinin (International Centre for Global Earth Models-ICGEM) <http://icgem.gfz-potsdam.de> adresindeki web sitesinden indirilebilmektedir. Şekil 11'de Test-2 uçuşuna, Şekil 12'de ise Göller Bölgesi üzerindeki uçuşlara ait fark karşılaştırmaları gösterilmekte, Tablo 5'de farkların istatistikleri sunulmaktadır. Fark haritaları incelendiğinde genel olarak düşey gravite bozukluğu setleri arasındaki uyumun veya korelasyonun yüksek olduğu görülebilmektedir. Farkların ortalaması 1 mGal seviyesindedir. Literatürde SAG çözümlerinde görülen uzun dalga boylu hatalar, Simav (2020a) tarafından önerilen ve bu çalışmada da uygulanan gravite indirgeme yöntemiyle büyük oranda giderilmiştir. SAG ve XGM2019e gravite bozukluğu arasındaki farkların temel sebepleri; SAG çözümlerinin XGM2019e'ye oranla özellikle Göller Bölgesinde daha yüksek çözünürlüğe sahip olması, XGM2019e çözümleme gücü ve model hataları ve SIMU ivmeölçerlerindeki telafi edilemeyen artık hatalardır.

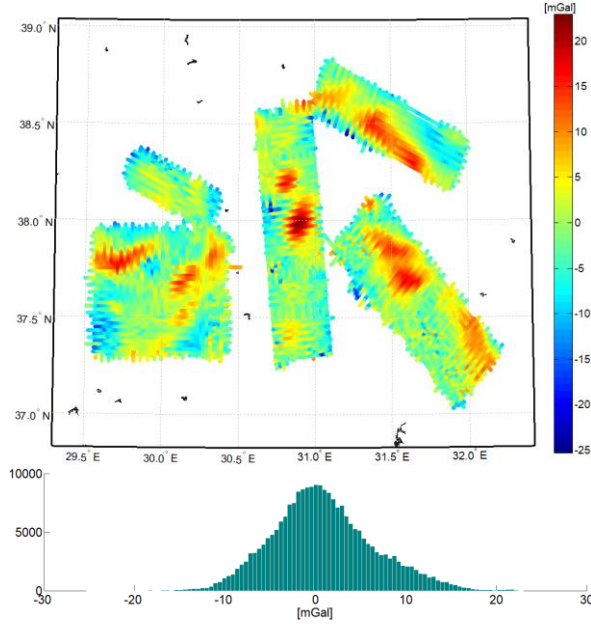
Göller Bölgesindeki farkların nispeten daha yüksek çıktığı alanlar yersel gravite verisinin hiç olmadığı veya çok seyrek olduğu göl üzeri ve dağlık alanlardır. XGM2019e modeli hesaplanırken bu alanlar üzerinde veri boşluğu olduğu için, göller ve dağlık bölgelerdeki gravite alanı değişimleri model tarafından çözümlenememektedir (Simav, 2020b). Bu sonuç hava gravimetrisinin veri boşluğu doldurmadaki önemini açıkça göstermektedir.



Şekil 11. Kırıkkale-Çorum Test-2 uçuşu için SAG ve XGM2019e düşey gravite bozukluğu farkları.

Tablo 5. SAG düşey gravite bozukluğu çözümleri ile 5540'ıncı derece ve mertebeye kadar XGM2019e gravite bozukluğu kestirimleri arasındaki farkların istatistiği (mgal).

Bölge	Minimum	Maksimum	Ortalama	S.Sapma
Test-2 Kırıkkale-Çorum	-14.55	13.29	0.59	4.50
Burdur-Acıgöl-Salda Gölleri	-18.37	16.91	0.23	5.47
Beyşehir-Suğla Gölleri	-20.04	17.85	2.15	5.53
Eğirdir-Karacaören Gölleri	-25.29	22.96	0.55	5.77
Eber-Akşehir-Ilgın Gölleri	-21.62	16.62	1.45	6.19
Işıklı Gölü	-20.01	6.66	-1.22	4.17



Şekil 12. Göller Bölgesinde SAG ve XGM2019e düşey gravite bozukluğu farkları.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yaklaşık 4 yıllık yoğun bir çalışmanın sonunda SIMU/GNSS entegrasyonuna dayalı hava gravimetrisi sistemi ile test çalışmaları tamamlanmış, veri işleme için yazılım geliştirilmiş ve Türkiye’de ilk defa üretim odaklı olarak 1 mGal’den daha iyi duyarlık ve yaklaşık 1 mGal doğrulukla Kırıkkale-Çorum test bölgesi ve Göller Bölgesi üzerinde gravite alanı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yeni veri işleme stratejisi ile literatürde SAG çözümlerinde görülen uzun dalga boylu gravite alanı hataları iyileştirilmiştir. Sonuçlar, Harita Genel Müdürlüğü hava gravimetrisi sisteminin jeodezik ve jeofizik amaçlı gravite alanı ölçmelerinde başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

Hava gravimetrisi ve yersel verilerin kombinasyonu ile Göller Bölgesi ve çevresi için jeoit modeli, serbets hava, Bouguer ve isostatik gravite anomali haritalarının iyileştirme

çalışmalarına başlanmıştır. Önümüzdeki dönemde Marmara Denizi ve çevresindeki göller başta olmak üzere, kıyı alanları, büyük su alanları (Van Gölü, Tuz Gölü, geniş barajlar vb.) ve yerden ölçülemeyen engebeli araziler üzerinde veri toplama çalışmalarına devam edilecektir.

Harita Genel Müdürlüğü hava gravimetrisi sistemi ile gravite vektörünün yatay bileşenlerinin dolayısıyla çekül sapması bileşenlerinin belirlenmesi, sisteme yeni sensörlerin entegrasyonu ile kara ve deniz araçlarında kullanılabilirliğinin araştırılması ve son olarak düşük hızlı insanlı ve insansız hava araçlarında denenmesi önümüzdeki dönemin temel araştırma konularıdır.

TEŞEKKÜR

SIMU/GNSS temelli analitik hava gravimetrisi çalışmaları, Harita Genel Müdürlüğü koordinesinde yürütülmekte olan T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı destekli ve 2015K090710 numaralı “Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi” projesinin bir parçasıdır. Cihaz tedarikinde desteklerinden dolayı TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Müdürlüğüne, sistem geliştirme ve iyileştirme çalışmalarındaki katkılarından dolayı iMAR Navigation GmbH’a, sistemin operasyonel hale getirilmesi ve uçuşların başarıyla tamamlanmasından dolayı başta Jeodezi Dairesi Başkanlığı ve Harita Hava Grup Komutanlığı olmak üzere emeği geçen tüm Harita Genel Müdürlüğü personeline sonsuz şükranlarımı sunarım.

ORCID

Mehmet SİMAV  <https://orcid.org/0000-0002-3963-3871>

KAYNAKLAR

- Ayres-Sampaio, D., Deurloo, R., Bos, M., Magalhães, A. ve Bastos, L. (2015). A comparison between three IMUs for strapdown airborne gravimetry. *Surveys in Geophysics*, 36 (4), 571–586. doi: 10.1007/s10712-015-9323-5
- Becker, D., Nielsen, J.E., Ayres-Sampaio, D., Forsberg, R., Becker, M. ve Bastos, L. (2015). Drift reduction in strapdown airborne gravimetry using a simple thermal correction. *Journal of Geodesy*, 89, 1133-1144. doi: 10.1007/s00190-015-0839-8
- Brozena, J.M. (1992). *The Greenland aerogeophysics project: airborne gravity, topographic and magnetic mapping of an entire continent*. O.L. Colombo (Ed.), From Mars to Greenland: Charting gravity with space and airborne instruments (s. 203-214). International Association of Geodesy Symposia, vol 110, New York: Springer. doi: 10.1007/978-1-4613-9255-2_19
- Bucha, B. ve Janák, J. (2014). A MATLAB-based graphical user interface program for computing functionals of the geopotential up to ultra-high degrees and orders: Efficient computation at irregular surfaces. *Computer & Geosciences*, 66, 219-227. doi: 10.1016/j.cageo.2014.02.005
- Deurloo, R., Yan, W., Bos, M., Ayres-Sampaio, D., Magalhães, A., Becker, M., ... Bastos, L. (2015). *A comparison of the performance of medium-and high-quality inertial systems grades for strapdown airborne gravimetry*. C. Rizos, P. Willis (Ed.), IAG 150 Years (s. 323-329). International Association of Geodesy Symposia, vol 143. Springer, Cham. doi: 10.1007/1345_2015_18
- Forsberg, R. (1984). *A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modeling*. (Report No. 355). Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, USA.
- Forsberg, R., Olesen, A.V., Keller, K., Møller, M., Gidskehaug, A. ve Solheim, D. (2001). *Airborne gravity and geoid surveys in the Arctic and Baltic Seas*. Proceedings of international symposium on kinematic systems in geodesy, Geomatics and Navigation (KIS-2001). Banff, 586–593.
- Forsberg, R. ve Olesen, A.V. (2010). *Airborne gravity field determination*. G. Xu (Ed.), Sciences of geodesy-I (s. 83-104) içinde. Heidelberg, Germany: Springer. doi:10.1007/978-3-642-11741-1_3
- Gelb, A. (1974). *Applied optimal estimation*. Cambridge: The MIT Press.
- Glennie, C.L. ve Schwarz, K.P. (1999). A comparison and analysis of airborne gravimetry results from two strapdown inertial/DGPS systems. *Journal of Geodesy*, 73 (6), 311-321. doi: 10.1007/s001900050248
- Glennie, C.L., Schwarz, K.P., Bruton, A.M., Forsberg, R., Olesen, A.V. ve Keller, K. (2000). A comparison of stable platform and strapdown airborne gravity. *Journal of Geodesy*, 74 (5), 383-389. doi: 10.1007/s001900000082
- Groves, P.D. (2013). *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems*. 2nd ed. Boston, MA, USA, London, UK: Artech House.
- Gumert, W.R (1998). An historical review of airborne gravity. *The Leading Edge*, 17 (1), 113-116. doi: 340 10.1190/1.1437808.
- Hwang, C., Hsiao, Y-S. ve Shih, H-C. (2006). Data reduction in scalar airborne gravimetry: theory, software and case study in Taiwan. *Computers & Geosciences*, 32 (10), 1573-1584. doi: 10.1016/j.cageo.2006.02.015
- Jekeli, C. (1994). Airborne vector gravimetry using precise, position-aided inertial measurement units. *Bulletin Géodésique*, 69 (1), 1–11. doi: 10.1007/BF00807986
- Jensen, T.E. ve Forsberg, R. (2018). Helicopter test of a strapdown airborne gravimetry system. *Sensors*, 18 (9), 3121. doi: 10.3390/s18093121
- Jensen, T.E., Olesen, A.V., Forsberg, R., Olsson, P.A. ve Josefsson, Ö. (2019). New results from strapdown airborne gravimetry using temperature stabilisation. *Remote Sensing*, 11 (22): 2682. doi: 10.3390/rs11222682
- Kalman, R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *ASME Transactions, Series D: Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45.

- Kwon, J.H. ve Jekeli, C. (2001). A new approach for airborne vector gravimetry using GPS/INS. *Journal of Geodesy*, 74 (10), 690–700. doi: 10.1007/s001900000130
- Li, X., Crowley, J.W., Holmes, S.A. ve Wang, Y.M. (2016). The contribution of the GRAV-D airborne gravity to geoid determination in the Great Lakes region. *Geophysical Research Letters*, 43 (9), 4358-4365. doi: 10.1002/2016GL068374.
- McCubbine, J.C., Amos, M.J., Tontini, F.C., Smith, E., Winefield, R., Stagpoole, V. ve Featherstone, W.E. (2018). The New Zealand gravimetric quasigeoid model 2017 that incorporates nationwide airborne gravimetry. *Journal of Geodesy*, 92, 923-937. doi: 10.1007/s00190-017-1103-1
- Moritz, H. (2000). Geodetic reference system 1980. *Journal of Geodesy*, 74 (1): 128–133. doi: 10.1007/s0019000050278
- Nagy, D. (1966). The prism method for terrain corrections using digital computers. *Pure and Applied Geophysics*, 63, 31-39. doi:10.1007/BF00875156
- Nagy, D., Papp, G. ve Benedek, J. (2000). The gravitational potential and its derivatives for the prism. *Journal of Geodesy*, 74, 552-560. doi: 10.1007/s001900000116
- Pavlis, N.K., Factor, J.K. ve Holmes, S.A. (2007). Terrain-related gravimetric quantities computed for the next EGM. *Harita Dergisi*, 18(Özel Sayı), 318-323.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. ve Factor, J.K. (2008). *An Earth gravitational model to degree 2160: EGM2008*. European Geosciences Union General Assembly, Vienna.
- Rauch, H.E., Striebel, C.T. ve Tung, F. (1965). Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems. *AIAA Journal*, 3 (8): 1445-1450. doi: 10.2514/3.3166
- Sampietro, D., Capponi, M., Mans, A.H., Gatti, A., Marchetti, P. ve Sansò, F. (2017). Space-Wise approach for airborne gravity data modelling. *Journal of Geodesy*, 91, 535–545. doi: 10.1007/s00190-016-0981-y
- Schwarz, K.P. (1983). Inertial surveying and geodesy. *Reviews of Geophysics*, 21 (4), 878-890. doi: 10.1029/RG021i004p00878
- Schwarz, K.P., Colombo, O., Hein, G. ve Knickmeyer, E.T. (1992). *Requirements for airborne vector gravimetry*. O.L. Colombo (Ed.), From Mars to Greenland: Charting gravity with space and airborne instruments. International Association of Geodesy Symposia, vol 110. New York: Springer, 273-283. doi: 10.1007/978-1-4613-9255-2_25
- Simav, M., Yıldız, H., Cingöz, A., Sezen, E., Demirsoy, N.S., Akpınar, İ., ... Doğan U. (2015). *Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi Projesi*. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 15. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
- Simav, M., Becker, D., Yıldız, H. ve Hoss, M. (2020). Impact of temperature stabilization on the strapdown airborne gravimetry: a case study in Central Turkey. *Journal of Geodesy*, 94, 41. doi: 10.1007/s00190-020-01369-5
- Simav, M. (2020a). The use of gravity reductions in the indirect strapdown airborne gravimetry processing. *Surveys in Geophysics*, 41, 1029-1048. doi: 10.1007/s10712-020-09596-3
- Simav, M. (2020b). Results from the first strapdown airborne gravimetry campaign over the Lake District of Turkey. *Survey Review*, doi: 10.1080/00396265.2020.1826140
- Thompson, L.G.D. (1959). Airborne gravity meter test. *Journal of Geophysical Research*, 64 (4), 488-488. doi: 10.1029/JZ064i004p00488
- Thompson, L.G.D. ve LaCoste L.J.B. (1960). Aerial gravity measurements. *Journal of Geophysical Research*, 65 (1), 305-322. doi: 10.1029/JZ065i001p00305
- Torge, W. (1989). *Gravimetry*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Wei, M. ve Schwarz, K.P. (1998). Flight test results from a strapdown airborne gravity system. *Journal of Geodesy*, 72 (6), 323-332. doi: 10.1007/s0019000050171

- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J.C., ... Bates, P.D. (2017). A high accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 44, 5844-5853. doi: 10.1002/2017GL072874
- Zhong, D., Damiani, T.M., Preaux, S.A.M. ve Kingdon, R.W. (2015). Comparison of airborne gravity processing results by GravPRO and Newton software packages. *Geophysics*, 80 (4): G107-G118. doi: 10.1190/geo2014-0519.1
- Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T. ve Oikonomidou, X. (2019). The experimental gravity field model XGM2019e. GFZ Data Services. doi: 10.5880/ICGEM.2019.007

Gravimetrik Topoğrafik Düzeltmelerin Hesaplanmasında Yakın Bölge Katkısı (Near Zone Contribution in the Gravimetric Terrain Correction Computations)

Sevda OLGUN , Aydın ÜSTÜN 

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli
sevda.olgun@kocaeli.edu.tr, aydin.ustun@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 04.09.2020

Kabul Tarihi (Accepted): 31.12.2020

ÖZ

Gravite alanının modellenmesi ile ilgili yapılan son çalışmalar, topoğrafik kitlelerin etkisi hakkında güvenilir bilginin önemini ortaya koymaktadır. Yerel yoğunluk ve topoğrafyanın geometrisi, Newton integrali tarafından tanımlanan bu etkinin temel bileşenleridir. Yüksek çözünürlüklü topoğrafya, on yıldan fazla bir süredir uydu radarından veya hava lidar tekniklerinden elde edilmektedir. Yeni veri kaynakları, yüksek doğrulukta topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasını sağlamakta, ancak maalesef katlanarak büyüyen topoğrafik verileri işleyebilmesi için bilgisayar algoritma gerekliliklerini de ortaya çıkarmaktadır. Hesaplama noktası çevresinde, topoğrafik düzeltmeye en büyük katkı yakın bölgedeki kitlelerden kaynaklanır. SYM'nin çözünürlüğü azaldıkça, çekim etkisinin hesaplanan sayısal değerleri de azalır. Bu nedenle, özellikle topoğrafyanın oldukça düzensiz ve engebeli olduğu bölgelerde düzeltme değerleri beklenenden daha düşük olmaktadır. Bu çalışmada, DEM çözünürlüğünün etkisini analiz etmek için topoğrafik düzeltmelerin 1" çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ile hesaplanmasında küçük kitle elemanlarına sahip silindirik bölme yöntemi kullanılmıştır. Konya Kapalı Havzasında 21901 grid noktasında sayısal bir test gerçekleştirilmiştir. Kompartmanlarda herhangi bir boşluk olmaması için yakın bölgedeki grid çözünürlüğü, enterpolasyon ile 0.5" çözünürlüğe yükseltilmiştir. Uyarlanmış yöntem topoğrafik düzeltmenin hesap yükünü artırsa da, hesaplanan değerler gerçek değerlere daha yakın olur. Hesap noktasını kuşatan topoğrafya farklı çözünürlükler altında bölümlendiğinde, bunun çalışma bölgesindeki sonuçları 1.4 ile 26.1 mGal arasında değiştirebildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: topoğrafik düzeltme, gravite indirgemesi, Sayısal Yükseklik Modeli, gravite alanı modelleme, silindirik şablon.

ABSTRACT

The recent studies on the gravity field modeling suggest the importance of reliable knowledge about the effects of topographic masses. Local density and geometry of the topography are the fundamental components of this effect defined by the Newton integral. High resolution topography has been recovered from satellite radar or airborne lidar techniques for more than a decade. The new data resources have led to the computation of high accuracy terrain corrections, but they unfortunately unveil substantial necessities for the computer algorithms that

process exponentially growing topographic data. The major contribution on terrain correction around a computation point comes from the masses in the near zone. As the DEM resolution decreases, the computed numerical values of the gravitational effect diminish. Therefore, the correction values become lower than expected especially in regions where the topography is considerably irregular and rough. In this study, cylindrical template method having smaller mass elements has been used for the terrain correction calculation with 1 arc-second resolution Digital Elevation Model (DEM) to analyze the effect of DEM resolution. A numerical test is performed at 21901 grid points in the Konya Closed Basin. The grid resolution in the near zone is upscaled to 0.5" by interpolation to avoid any gaps in the cylindrical compartments. Although the adapted method increases the computational burden of terrain correction, the computed values converge better to the actual ones. In case the topography surrounding computation point is segmented under different scenarios it is seen that this is able to change the results from 1.4 to 26.1 mGal over the study region.

Keywords: terrain correction, gravity reduction, Digital Elevation Models, gravity field modeling, cylindrical template.

1. GİRİŞ

Newton mekaniğinde kitlesel cisimlerin birbirine uyguladığı karşılıklı çekim kuvveti enerji alanı ile açıklanır. Yerin çekim alanı örneğinde potansiyel, Yeryuvarını oluşturan kitlelerin birim ağırlıklı cismi hareket ettirmesi için gereken iş (enerji) miktarı olarak tanımlanır. Yeryüzünün veya yere yakın uzay kesiminin her noktasında bu potansiyelin değeri aranıyorsa Yerin kitle-yoğunluk dağılımı üç boyutlu modeller yardımıyla bilinmelidir. İşte jeodezi, jeofizik ve oşinografide deniz yüzeyinin üstündeki topoğrafik ve altındaki batimetrik bilginin önemi burada yatar. Bu disiplinlerde türlü hesap yöntemlerinin geliştirilmesinin amaçlarından biri topoğrafik (buradan itibaren batimetriyi de kapsadığı kabul edilecektir) kitlelerin çekim etkisinin hesabıdır.

Yerin gravite alanının eşpotansiyel yüzeylerinden biri olan jeoidin santimetre altı doğrulukla belirlenmesi jeodezinin günümüzde başlıca ödevidir. Yüksek çözünürlüklü ve

doğruluklu jeoit modellerinin bilinmesi durumunda, elde edilmesi pahalı ve iş yükü gerektiren ortometrik yüksekliklere GNSS gözlemleri sayesinde kolayca ulaşılabilir. Ayrıca, jeoidin uzaydaki yerinin belirsizliğinin azaltılması, Yer'in iç ve dış dinamiklerinin daha doğru anlaşılmasını sağlar. Bu yönüyle, jeoit tahminleri topoğrafik kitlelerin düzensizliğinden bağımsız düşünülemez (örneğin bkz. Martinec, 1998; Sjöberg ve Bagherbandi, 2017). Sonuç olarak, gravite alanının eksiksiz modellenebilmesi topoğrafik kitlelerin yerel sinyallerinin göz önüne alınmasına bağlıdır. Örneğin, topoğrafya ile doğrudan korelasyonlu gravite büyüklüklerinin enterpolasyon yardımıyla sıklaştırılması zordur. Gereken özen gösterilmezse jeoide indirgenmiş gravite anomali değerleri çoğu kez topoğrafyaya bağımlı hale gelir. Bu durum jeodezi ve jeofizikte gravite (potansiyel) alanın hatalı yorumlanmasına neden olur.

Bouguer gibi Yer'in iç yapısını gösteren daha yumuşak değişimli gravite anomalileri diğer anomali türlerine geçiş için kullanılır. Gridlenmiş yüksek çözünürlüklü gravite bilgisi veya enterpole edilmiş konumsal gravite alanı bilgisi Bouguer anomalilerinden elde edilir. Diğer anomali türleri için topoğrafya yeniden yorumlanmalıdır. Böyle bir indirgeme işlemi, jeoit üzerinde kalan topoğrafik kitlelerin tümünün indirgenmesiyle başka bir deyişle tamamlanmış Bouguer yöntemiyle sağlanabilir.

Topoğrafyanın çekim etkisinin içinde olduğu bir başka jeodezik büyüklük, jeoit ve quasi-jeoit dönüşüm değeridir. Modern yükseklik sistemleri, ortometrik ve normal yükseklik türlerinin kullanılmasına öncelik verir. Ortometrik yükseklikler jeoidi başlangıç alırken; normal yükseklikler ise quasi-jeoit ile ilişkilidir. Bazı ülkeler her iki yükseklik sistemini bir arada kullanır. Bu durum quasi-jeoit ve jeoit yüksekliği farkını belirlemeyi zorunlu hale getirir. Bir yükseklik sisteminden diğerine sağlıklı geçiş topoğrafik kitlelerin etkisinin güvenilir bir şekilde hesaplanması ile sağlanabilir. Aksi durumda bazı belirsizliklerin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Örneğin topoğrafyanın Bouguer levhası olarak kabulünden dolayı Zugspitze'de birkaç desimetre dönüşüm hatası gözlenmiştir (Flury ve Rummel, 2009).

Jeoit ve quasi-jeoit dönüşüm değeri, normal ve ortometrik yükseklikler arasındaki fark ile temsil edilir. Helmert ortometrik yüksekliği kullanılıyor ise topoğrafya, kalınlığı nokta yüksekliğine eşit Bouguer levhası olarak dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım düz alanlar için uygunken, yüksek ve

engebeli topoğrafyada ve yoğunluk değişimlerinin sık görüldüğü -jeolojik olarak karmaşık- bölgelerde göz ardı edilemeyecek hatalara neden olabilir (Tenzer ve diğ., 2005; Santos ve diğ., 2006; Flury ve Rummel, 2009; Sjöberg ve Bagherbandi, 2012).

Topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasında analitik, sayısal veya hibrit modeller kullanılmaktadır. Analitik algoritmalara dayalı silindirik ve prizmatik yöntem literatürde en iyi bilinenlerdir. Nagy ve diğ. (1966, 2000, 2002) prizmatik bölümlmeyi silindirik bölümlmeden daha etkili bir yöntem olarak önermiştir. Çekim etkisi ayrıca nokta kitle (point mass), polihedral, tesseroid gibi diğer basit kitle elemanları yardımıyla da hesaplanabilmektedir (Pohanka, 1998; Tsoulis, 2001; Heck ve Seitz, 2007; Grombein ve diğ., 2013; D'Urso, 2014; Wild-Pfeiffer, 2008; Yang ve diğ., 2020). Sayısal hesaplama tekniği olarak Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ise daha hızlı sonuç verir (Parker, 1973; Sideris, 1985; Forsberg, 1985; Kirby ve Featherstone, 1999; Tsoulis, 2001; McCubbine ve diğ., 2017; Gayol ve diğ., 2020). Tsoulis (2001) ise FFT tekniği ile prizma ve polihedron yöntemlerini karşılaştırmış, engebeli alanlarda FFT tekniğinin doğruluk bakımından yetersiz kaldığını bildirmiştir. Bir başka çalışmada, uzun hesap süresi gerektiren Gaussian yönteminin FFT'den daha gerçekçi sonuç verdiği raporlanmıştır (Hwang ve diğ., 2003).

Bilgisayarla hesaplamada etkin bir yöntem arayışından önce, silindir bölme yöntemi yaygın olarak kullanılmıştır. Literatürde bilinen Hayford ve Bowie (1912) ve Hammer (1939) 166.7 km (Rapp, 1961; Nowell, 1999; Ayhan ve Kahveci, 1991), Niethammer (1932) şablonu ise 40 km (Demirel, 1984) uzaklığa kadar farklı bölümlendirme seçenekleri sunmaktadır. Bu şablonlar zamanın jeodezik ve jeofizik amaçları için yeterli görülmüştür. Bilgisayarların kullanılmaya başlamasıyla birlikte daha hızlı hesap avantajı sunan tekniklere karşı yöntem uygulamada etkinliğini kaybetmiştir. Öte yandan, günümüzde topoğrafik düzeltmeler için 0.1 mGal gibi yüksek doğruluk aranması (örneğin Long ve Kaufmann, 2013) başta spektral yöntemlerin başarısının sorgulanmasına neden olmuştur (Gayol ve diğ. 2020). Yazılım ve donanım teknolojisindeki gelişmeler kadar yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modellerinin ortaya çıkması bu arayışın bir diğer nedenidir. Silindir bölme yöntemi mevcut şablonlardan çok daha fazla kompartman ve kuşak sayısı ile kullanılabilir. Bu yaklaşımla topoğrafyanın daha küçük silindir parçalarına bölünmesi doğruluğu arttıracak başlıca

etmemidir. Örneğin, Capponi ve diğ. (2018) noktanın yakın çevresinin gravite üzerindeki etkisini göz önüne alarak, hesap noktası yakınında silindirik bölme yöntemini uygulamıştır.

Güncel çalışmalar Hirt ve diğ. (2019), McCubbin ve diğ. (2017) ve Gayol ve diğ. (2020) yüksek çözünürlüklü SYM'leri topoğrafik düzeltme hesabında dikkate almıştır. Bu çalışmada özellikle hesap noktası civarındaki SYM çözünürlüğünün etkisi incelenmektedir. Bu amaçla, noktanın yakın çevresinde; 1", 3" ve 15" çözünürlüklü farklı SYM'ler kullanılmıştır. Bu hesaplamada ayrıntılı SYM kadar uygulanan algoritma da önemlidir. Topoğrafyanın bölümlendirilmesinde mevcut standartlar yerine daha küçük silindirik kitleler öngörülmektedir. Hesap noktasının yakın çevresindeki bölümlendirmede boşluk riskini önlemek için yaklaşık 15 m çözünürlüğe kadar enterpolasyon uygulanacaktır.

2. GRAVİTE İNDİRGEMELERİ VE TOPOĞRAFİK DÜZELTMELER

a. Bouguer İndirgemesi

Bouguer indirgemesi Yeryüzündeki gravite ölçmesinin deniz seviyesindeki karşılığını bulmayı amaçlar. Sırasıyla topoğrafik kitle ve yükseklik indirgemesi olarak iki aşamalı uygulanır. Kavranabilirlik açısından ters sırada açıklanması daha uygun olur. Yükseklik indirgemesi, nokta ile deniz yüzeyi arasında kitle olmadığı varsayılarak ölçülen gravitenin jeoide taşınması ve boşlukta gravite indirgenmesi (δg_{SH}) olarak adlandırılır. Taşıma işlemi, Yeryüzü noktasından Taylor seri açılımıyla gravite değerinin aşağıya analitik uzanımı biçiminde gerçekleştirilir. Jeoit ve havada asılı kabul edilen ölçme noktası arasında çekül doğrultusu boyunca gravite düşey gradyen bilgisinin gerçek değerini belirlemek mümkün olmadığından, kuramsal olanı yani boşlukta normal gravite düşey gradyeni ($\frac{\partial \gamma}{\partial h}$) hesap için yeterli görülmektedir (Heiskanen ve Moritz, 1967; Torge ve Müller, 2012; Sanso ve Sideris, 2013). Boşlukta gravite indirgeme değeri (δg_{SH}), GRS80 elipsoidine göre ϕ enleminde bulunan bir nokta için;

$$\begin{aligned} \delta g_{SH} &= -\frac{\partial \gamma}{\partial h} H - \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \gamma}{\partial^2 h} H^2 - \dots \\ &= -(0.3087691 - 0.0004398 \sin^2 \phi) H \\ &\quad + 7.2125 \times 10^{-8} H^2 - \dots \end{aligned} \quad (1)$$

eşitliği ile gösterilir. Hesap işleminde deniz seviyesinden olan yükseklik (H) metre alınırsa sonuç mGal çıkar.

Topoğrafya düzeltmesi ise, Bouguer plakası indirgemesi ile başlar ve basit Bouguer yaklaşımı olarak adlandırılır. Devamında topoğrafyanın düzensizliklerinin de dahil edilmesiyle tamamlanmış Bouguer indirgemesi gerçekleştirilir. Bouguer plakası, gravite ölçme istasyonu ile aynı yüksekliğe sahip, sonsuz yarıçaplı bir tam silindiridir. Yeryüzündeki bir P noktasında bu plakanın gravite etkisi (δg_B), Newton integralinin bu sonsuz yarıçaplı silindir için yazılmasıyla elde edilir;

$$\delta g_B = 2\pi G \rho H \quad (2)$$

G evrensel çekim sabiti ve ρ ise ortalama kitle yoğunluğudur. ρ değerinin 2.67 gr/cm³ alınmasıyla;

$$\delta g_B = 0.1119 H \quad (3)$$

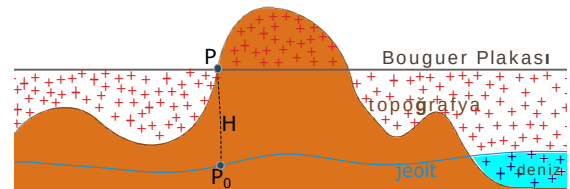
çıkar. Yüzeyde ölçülen gravite değerinin ($g_{P_{ölç}}$) jeoit üzerine indirgenmiş değeri;

$$g_{P_0} = g_{P_{ölç}} + \delta g_{SH} - \delta g_B \quad (4)$$

eşitliğiyle elde edilir (Heiskanen ve Moritz, 1967; Torge ve Müller, 2012; Sanso ve Sideris, 2013). Ancak, topoğrafyanın gerçek şekli bir plaka değildir ve engebeli yapısından dolayı Bouguer plakasından farklılıklar gösterir. Plaka üzerinde kalan kitleler ve altında kalan boşluklar, P noktasında ölçülen gravite değerini Bouguer plakası ile olması gerekenden az gösterir. Gravite değerinin jeoit üzerindeki değeri, bu boşlukların doldurulması ve fazlalıkların taşlanmasıyla elde edilen ve daima pozitif olan gravite etkilerinin indirgenmesiyle sağlanır. Bu değerlerin toplamı (Şekil 1) topoğrafik düzeltme δg_{tc} olarak adlandırılır (Heiskanen ve Moritz, 1967). Bouguer indirgemesine topoğrafik düzeltmelerin ilave edilmesiyle tamamlanmış Bouguer indirgeme değerlerine ulaşılır. Böylece P noktası için jeoit üzerindeki gravite değeri atmosferik indirgemenin ihmal edilmesiyle;

$$g_{P_0} = g_{P_{ölç}} + \delta g_{SH} - \delta g_B + \delta g_{tc} \quad (5)$$

Bouguer'e göre elde edilir.



Şekil 1. Bouguer plakası ve topoğrafik düzeltmeler (Tüm topoğrafik düzeltmelerde + işareti kullanılırken batimetrik etki için mavi renkten yararlanılmıştır.).

b. Topoğrafik Düzeltmelerin Hesaplanması

Topoğrafik düzeltme değerlerinin hesabında, işlem süresini, kullanılan SYM'nin çözünürlüğünü, doğruluğunu ve bilgisayar algoritmalarının güvenilirliğini bir arada optimal olarak sağlamak günümüze kadar oldukça güç olmuştur. Ancak hesaplama tekniklerindeki yeni yaklaşımlar, uydu radar ve havadan lidar teknikleri ile sayısal yükseklik modellerine yüksek çözünürlükte ulaşılabilmesi ve bilgisayar bellek kapasitelerinin gelişmesi zor yükü oldukça hafifletmiştir.

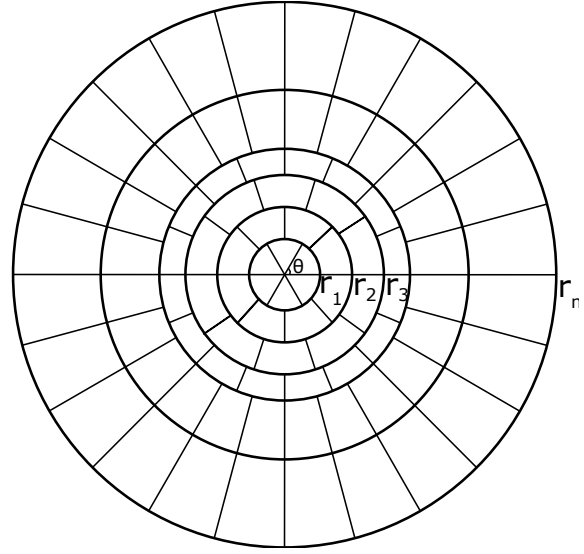
Newton integraline göre çekim etkisinin düşey bileşeninin hesaplanması için topoğrafya çeşitli şekillerde küçük parçalara ayrılabilir. Bu bölümlendirme yönteminin ilk örneği silindir biçimli parçalama yöntemidir. Silindir bölme tekniği Hayford Bowie, Hammer vb. şablonlarla uygulanmıştır. Ancak bu şablonların bağımsız bileşenlerinin büyük hacimli olması topoğrafyanın ifadesinde yetersizliği beraberinde getirir. Günümüzde daha küçük silindir parçalarıyla (Capponi ve diğ., 2018) uygulanabilmektedir. Noktanın yakın çevresi için kullanılan bu yaklaşım ile silindir bölme yönteminin üstünlüğü kanıtlanmıştır. Ayrıca, prizmatik yaklaşımların aksine silindirik yöntemin matematiksel eşitlikleri logaritmik ifadeler içermez (Heiskanen ve Moritz, 1967). Bu sayede diğer analitik hesap yöntemlerine göre daha hızlı sonuç sağlar. FFT temelli sayısal yöntemler ise analitik yöntemlere göre daha hızlı olmalarına karşın engebeli yerlerde yüksek doğruluk beklentisini karşılamaz (Tsoulis, 2001). Ayrıca, noktanın yakın çevresinde yarıçapsal uzaklığın sıfıra yaklaşması durumunda silindir bölme yöntemi eşitliği hesaplamayı olanaklı kılarken, logaritmik ifadeler içeren diğer yöntemler söz konusu bölge için sonuç üretmez (Capponi ve diğ., 2018).

Topoğrafik düzeltme değerleri silindir bölme yöntemiyle hesaplanırken, topoğrafya halkalara ve her bir halka da θ açısal uzaklığına göre kompartmanlara bölünür. Silindirik halka aynı zamanda kuşak olarak isimlendirilebilir. Herhangi bir kuşak r_i iç yarıçap, r_{i+1} dış yarıçap ile tanımlıdır (Şekil 2). H kompartmanın ortalama yüksekliği, ρ topoğrafik yoğunluk değeri, G evrensel çekim sabiti olmak üzere topoğrafik düzeltme değeri;

$$g_{tc} = 2G\rho \frac{\pi}{\theta} [r_{i+1} - r_i - \sqrt{r_{i+1}^2 + H^2} + \sqrt{r_i^2 + H^2}] \quad (6)$$

eşitliğiyle her bir kompartman için hesaplanır (Heiskanen ve Mortiz, 1967; Olgun, 2017). Bir hesap noktası için oluşturulan tüm

kompartmanların g_{tc} değerlerinin toplamı ise o noktadaki topoğrafik düzeltme değeridir.



Şekil 2. Hesap noktası merkezli r kuşak yarıçaplı ve θ açıklık açılı silindirik kitleler.

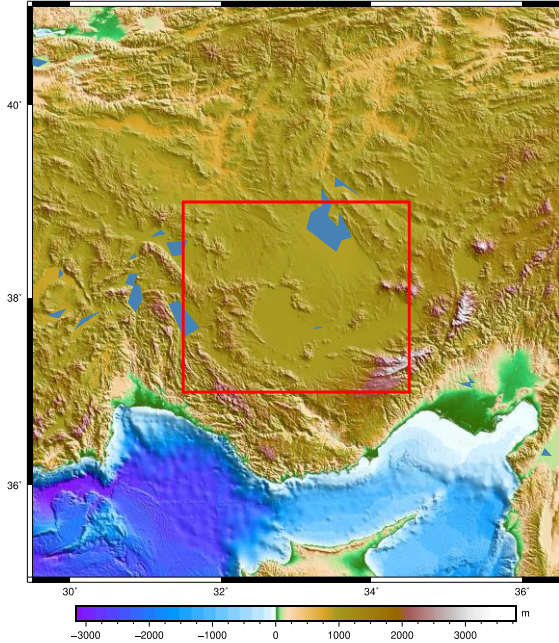
SYM'nin çözünürlüğü ve doğruluğu topoğrafik düzeltme değerinin doğruluğunu etkilemektedir. Düzeltme değerine en büyük katkı noktanın yakın çevresindeki yükseklik verisi ve bu verilerin detay özelliklerinden gelir (Long ve Kaufmann, 2013). Öte yandan, çözünürlük arttıkça hesap işlem hızında verimsizlik oluşur. Bu nedenle, noktanın yakın çevresi (iç bölge) için yüksek, geriye kalan dış bölge için daha düşük çözünürlük tercih edilir. Uzak bölge katkısının Hayford Bowie'nin O kuşağına karşılık gelen 166.7 km'ye kadar alınması yeterli görülmektedir (Bullard, 1936; LaFehr 1991; Hinze ve diğ., 2005).

3. UYGULAMA

a. Çalışma Bölgesi ve Veriler

Konya Kapalı Havzası, hem engebeli hem de düzlük alanlar içermesi yönünden topoğrafik düzeltme büyüklüklerinin incelenmesinde kolaylık sağlar. Topoğrafik düzeltmelerin hesaplanacağı test bölgesi 31.5° - 34.5° doğu boylamları, 37° - 39° kuzey enlemleri arasındadır. Jeoit belirleme çalışmalarına örnek oluşturması ve yüksek çözünürlüklü topoğrafik düzeltme haritası elde edebilmek amacıyla $1'$ aralıklı grid noktalarında (toplam 21901) hesap işlemi yapılmıştır (Şekil 3). Bu noktalar en az 316 m, en çok 3206 m ve ortalama 1089 m topoğrafik yükseklikliğe sahiptir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, hesap noktası 166.7 km'lik (yaklaşık 1.5° 'lik yarıçapsal uzaklık) silindir

şablon uzaklığı gerektirdiğinden kullanılacak SYM'nin batimetri bilgisini de içermesi gerekir.



Şekil 3. Topoğrafik ve batimetrik veriler için çalışma bölgesi ve hesap noktalarının sınırı (kırmızı renkte).

Topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasında 1", 3" ve 15" çözünürlüklü, batimetrik verileri de içeren SYM'ler kullanılmıştır. Her üç model de aynı bölgeyi (Şekil 3) kapsamaktadır. Yükseklik verileri elde edilirken karasal alanlarda 1" (~ 30 m) çözünürlüklü SRTM1 (USGS EROS, 2018), batimetri bilgisi için ise 15" (~ 450 m) çözünürlüklü SRTM15+ (Olson ve diğ., 2016) kullanılmıştır. Batimetri verisinin kara verisiyle aynı çözünürlüğe getirilmesi biküçük enterpolasyon tekniğiyle sağlanmış ve ardından her iki model birleştirilmiştir. Enterpolasyon ve birleştirme işlemleri GMT yazılımı (Wessel ve diğ., 2019) yardımıyla yapılmıştır. Analiz için gerekli diğer iki model 1" çözünürlüklü referans modelin 3" ve 15" çözünürlüğe indirgenmesi yoluyla üretilmiştir. Bunun nedeni, hesaplamalarda model farklılığı etkisini en aza indirmek, sonuçları yalnızca çözünürlüğe göre yorumlamaktır.

b. Topoğrafik Düzeltmelerin Hesaplanması

Topoğrafik düzeltmeler, silindir bölme yöntemi ile iç ve dış bölge ayrı çözünürlüklerde olmak üzere iki farklı SYM yardımıyla hesaplanmıştır. Dış bölge için 15" çözünürlüklü model kullanırken, iç bölgenin çözünürlüğü üç farklı SYM (1", 3" ve 15") ile ayrı uygulanmıştır. Referans olarak kullanılan gravimetrik topoğrafik düzeltmeler iç

bölge SYM çözünürlüğünün 1" olduğu modele aittir. 3" ve 15" iç model sonuçları referans değerlerle karşılaştırılmıştır.

Topoğrafya silindirik parçalara ayrılırken, geleneksel Hayford Bowie ve Hammer şablonlarından farklı olarak, doğruluğu artırmak için daha küçük bölümlendirme boyutları tercih edilmiştir. Kuşak sınırlarının belirlenmesinde en yüksek 1" çözünürlüklü model göz önüne alınmıştır. Buna göre silindir şablon, ana halkalar ve onların içini sabit yarıçap artırımlarıyla dolduran ara halkalardan oluşturulmuştur. Ana halkaların hesap noktasına uzaklığı arttıkça iç halkalar arasındaki yarıçapsal uzaklık değerleri de büyümektedir. Bölümlendirme biçimi, ana halkaların iç ve dış yarıçapları ve ara halka artış miktarları Tablo 1'de gösterilmektedir. Kompartman bölümlendirmeleri ise her bir iç halkanın çevresinin o halkalar arasındaki artım miktarına bölünmesiyle elde edilmiştir. Böylece büyük kiriş uzunluğunun, artım miktarındaki yarıçapsal uzaklık ile yakın değerde olduğu kompartmanlar elde edilmiş olur.

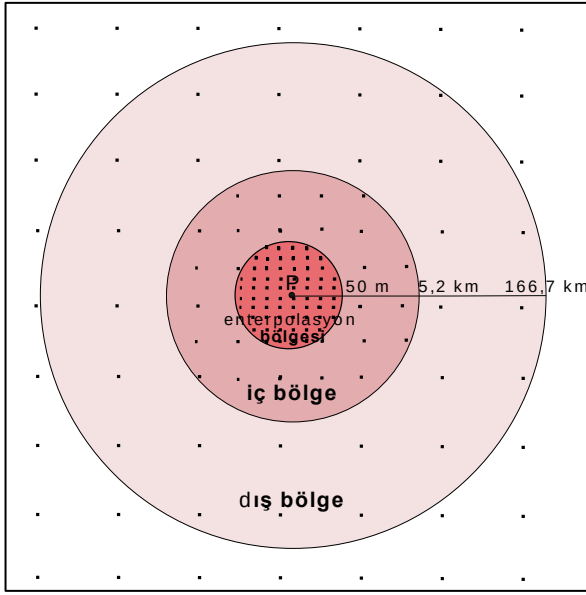
Tablo 1. Silindir bölümlendirmede ana ve ara kuşak yarıçap değerleri.

i	Ana kuşak		Ara kuşak yarıçap artımı (m)
	İç yarıçap (m)	Dış yarıçap (m)	
1	0.5	20	-
2	20	50	-
3	50	1500	50
4	1500	2600	100
5	2600	5200	200
6	5200	10700	550
7	10700	21700	1000
8	21700	51700	1500
9	51700	121700	2500
10	121700	166700	5000

Noktanın yakın çevresinin düzeltme değeri üzerindeki etkisinin en büyük olduğu bilgisinden hareketle 1" iç çözünürlüklü modelde ilk üç halka için (50 metre yarıçapsal uzaklığa kadar) ~30 metre grid aralığının yetersiz kalması ve boş kompartman gerçekleşmesi söz konusudur. Bundan sakınmak için en az 0.5" çözünürlüklü SYM gerekmektedir. Bu amaçla nokta çevresinde enterpolasyon bölgesi oluşturulmuş ve biküçük enterpolasyon ile grid sıklaştırılmıştır (Şekil 4).

Tüm iç SYM modellerinde enterpolasyonun etkisini anlamak için enterpolasyonlu ve enterpolasyonsuz topoğrafik düzeltme hesabı

yapılmıştır. İç bölgede daha düşük çözünürlüklü 3" ve 15" modellerde kayıp silindirik kitle olasılığı doğal olarak yüksektir. Üstelik boşluk riski interpolasyon sınırı dışına taşar. Bu nedenle 3" (~90 m) için 2.5 km'ye kadar, 15" için 5 km'ye kadar 0.5" çözünürlüğünde interpolasyon sağlanmıştır. Bu interpolasyon sınırlarıyla, SYM çözünürlüğünün ara kuşak yarıçap artım değerinden küçük olması sağlanarak boş kompartman oluşumunun önüne geçilebilir. Tekrar hatırlatmak gerekirse, interpolasyon SYM'ye topoğrafik detay kazandırmamakta, sadece boş silindirik kitle oluşmasını engellemektedir.



Şekil 4. Referans model için interpolasyon bölgesi, iç ve dış silindirik bölge.

Topoğrafik düzeltmenin hesap yoğunluk değeri, deniz ve göl alanlarında 1.64 gr/cm^3 , karasal bölgelerde ise 2.67 gr/cm^3 olarak sabit alınmıştır. Klasik düzlem yaklaşımlarından farklı olarak topoğrafik kitlelerin konumu elipsoidal coğrafi koordinatlarla (grid) temsil edilmiştir. Böylece koordinat dönüşümünden kaynaklı yüzey modeli hatalarının ve veri hazırlık aşamasının getireceği ek iş yükünün önüne geçilmiş olur. Bu hazırlık aşaması iç ve dış bölgeler için farklı yüzey modellerinin kullanımıyla daha da artmaktadır. Çoğu zaman dönüşüm işleminde gereken hazırlık süresi doğrudan coğrafi grid sisteminin kullanıldığı topoğrafik düzeltme hesabı kadar sürmektedir.

c. Bulgular ve Tartışma

1'x1' aralıklı 21901 hesap noktasının her biri için 166.7 km'lik yarıçapsal uzaklığın içinde kalan yükseklik verisi hesaplamaya dahil edilmiştir. Her bir noktanın 5200 m yarıçapsal uzaklığına kadar

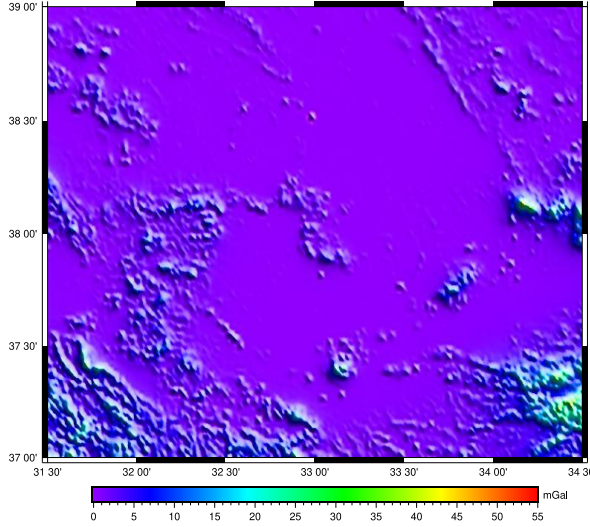
(5. kuşağın sonu) yüksek çözünürlüklü, daha uzak kompartmanlarda ise daha düşük çözünürlüklü model kullanılmaktadır. Bu noktaların jeodezik koordinatları WGS84 sistemindedir. Hesap noktalarının deniz seviyesinden olan yükseklikleri SRTM 1 yay saniyesi sayısal yükseklik modelinden elde edilmiştir. Referans topoğrafik düzeltme modeli, 1" iç 15" dış çözünürlüklü ve ilk üç halka için 0.5" interpolasyonu ile elde edilen sonuçlardır. 21901 nokta ile referans model için yapılan hesaplamada işlem süresi; Intel Xeon işlemcisi, 2.20 GHz CPU ve 32 GB RAM ile yaklaşık 1.5 saattir. Tablo 2'de sunulan düzeltmelerin dağılımı, Şekil 5'te haritalanmış ve Şekil 6'da histogram ile gösterilmiştir. Beklendiği gibi, düzeltmeler düzlük alanlarda sıfıra yaklaşıırken, engebeli arazide artmaktadır. En büyük topoğrafik düzeltme değerinin 50.68 mGal olduğu bu dağılımın ortalaması 1.74 mGal, standart sapması 3.02 mGal'dir. Dağılımın %90'ı için topoğrafik düzeltme 5 mGal'in altındadır. Daha düşük grid çözünürlüğünde hesap yükü azalacak, buna karşın gerçek yüzeyin detay kaybından kaynaklanan yaklaşım hataları artacaktır.

Tablo 2. 21901 noktanın farklı senaryolar altında hesaplanan topoğrafik düzeltme ve referans modelden olan fark (italik) istatistikleri (birim mGal).

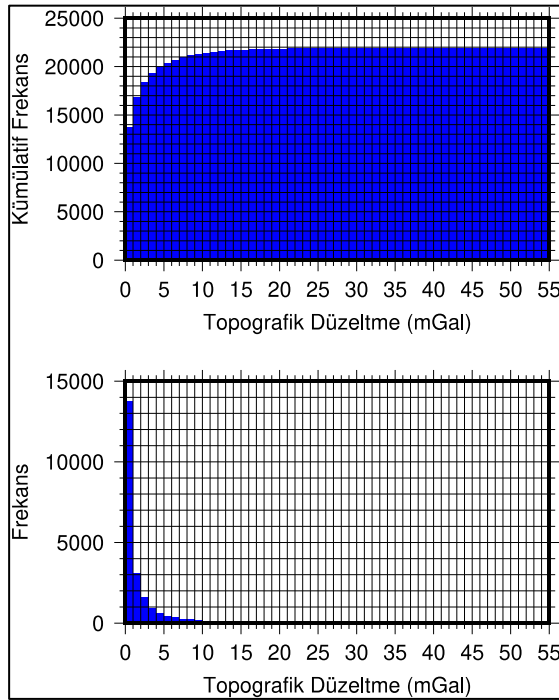
Model	Sonuç				
	Fark				
	Min.	Maks.	Ort.	RMS	Std. Sp.
Referans Model	0.06	50.68	1.74	3.49	3.02
iç grid 3" ve 0.5" interpolasyon	0.05	50.42	1.72	3.47	3.01
	-1.43	0.65	-0.01	0.05	0.05
iç grid 3" ve interpolasyonsuz	0.06	43.38	1.39	2.73	2.35
	-10.79	0.00	-0.35	0.84	0.77
iç grid 15" ve 0.5" interpolasyon	0.06	48.83	1.64	3.31	2.88
	-6.21	1.67	-0.10	0.30	0.28
iç grid 15" ve interpolasyonsuz	0.05	27.97	0.91	1.69	1.43
	-26.11	0.04	-0.83	1.99	1.81

iç çözünürlüğün 3" ve interpolasyon bölgesinin 2500 metreye kadar oluşturulduğu çözümde referans çözüme yakın istatistik değerlerle karşılaştırılmıştır. Ancak düzeltmelerin

referans değerlere göre küçük olduğu görülmektedir. Şekil 7 ile görselleştirilen farklar topoğrafya ile korelasyon ortaya koymaktadır. Farklar -1.45 ile 0.65 mGal arasında değişmektedir. Tek nokta içi nişlem süresi referans modelde 0.25 s iken bu modelde grid düğümlerinin azalmasıyla 0.01 saniyeye düşmektedir. 3" iç çözünürlüklü SYM'de enterpolasyon bölgesi oluşturulmaz ise fark en düşük -10.79 mGal'e gerilemektedir (ortalama sapma -0.35 mGal) (Şekil 8).

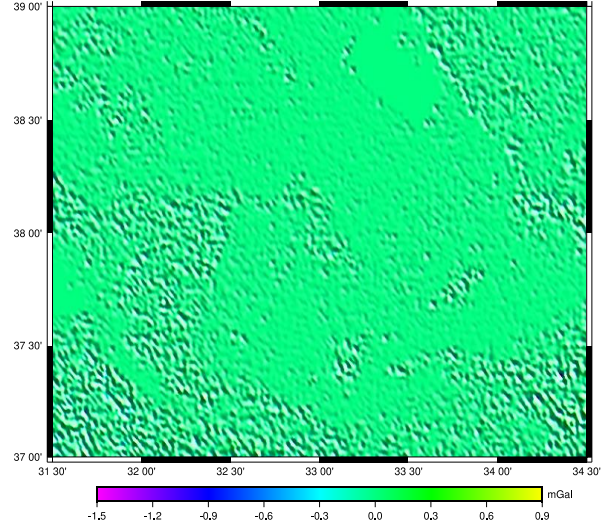


Şekil 5. Referans çözüm için topoğrafik düzeltme değerleri haritası.

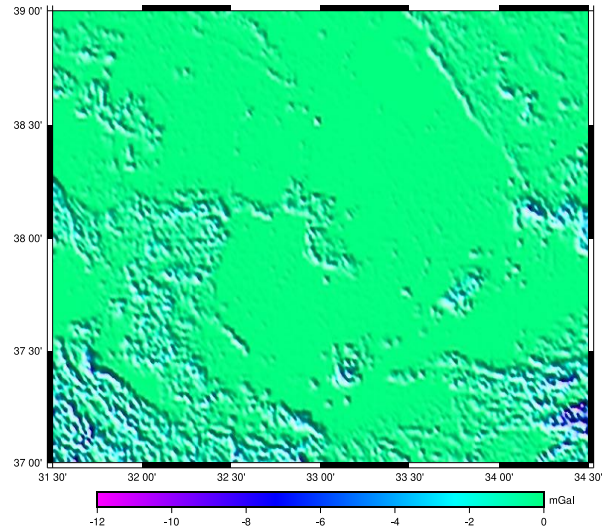


Şekil 6. Referans çözüm için topoğrafik düzeltme değerlerinin frekans dağılımları.

İç ve dış 15" çözünürlükle 5000 metreye kadar üretilen 0.5" aralıklı enterpolasyon bölgesiyle hesap işlemi boş kompartman olmadan sonuçlandırılmıştır. Topoğrafik düzensizliğe bağlı fark değerleri -6.21 ve 1.67 mGal aralığındadır (ortalama -0.10 mGal, Şekil 9).



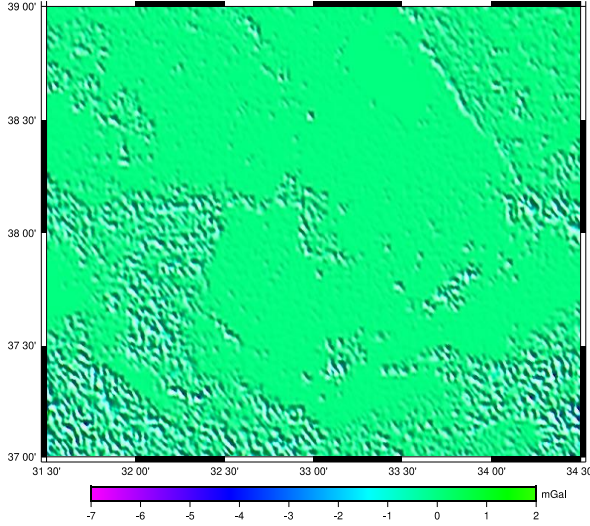
Şekil 7. Enterpolasyon bölgesi oluşturulması durumunda 3" iç ve 15" dış çözünürlüklü SYM'lerden hesaplanan topoğrafik düzeltmelerin referans çözümden farkları.



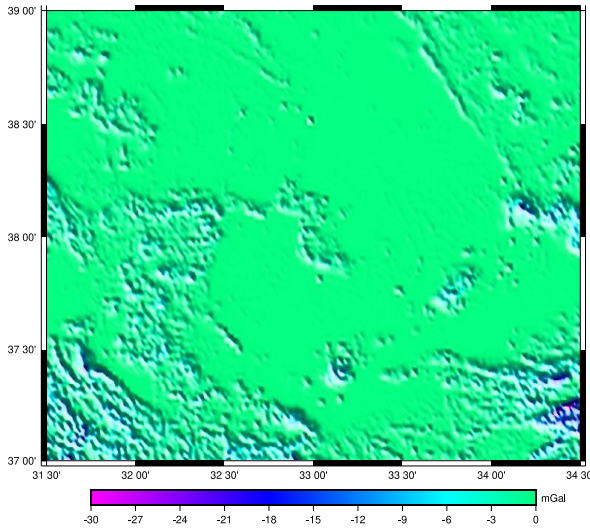
Şekil 8. Enterpolasyonsuz, 3" iç ve 15" dış çözünürlüklü SYM'lerden hesaplanan topoğrafik düzeltmelerin referans çözümden farkları.

SYM çözünürlüğünün azalması yakın çevredeki topoğrafik çekim etkisini daha belirginleştirmiştir. Her ne kadar enterpolasyon ile iç bölgede boşluk kalmayacak şekilde topoğrafya kesintisiz bir biçimde SYM'de temsil edilse bile topoğrafik detay 15" çözünürlüğünden daha iyi

değildir. Öte yandan enterpolasyonun yapılmadığı bir durumda bazı kompartmanlarda yükseklik verisinin bulunmaması nedeniyle farklar -26.11 mGal'e kadar çıkmıştır (ortalama -0.83 mGal). Şekil 10, farkların topoğrafya ile ilişkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Enterpolasyon bölgesi oluşturulması durumunda 15'' iç ve dış çözünürlüklü SYM'lerden hesaplanan topoğrafik düzeltmelerin referans çözümünden farkları.



Şekil 10. Enterpolasyonsuz, 15'' iç ve dış çözünürlüklü SYM'lerden hesaplanan topoğrafik düzeltmelerin referans çözümünden farkları.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, SYM'lerden hesaplanan topoğrafik düzeltmeler için iç grid çözünürlüğünün etkisi doğruluk yönünden araştırılmıştır. Sayısal uygulama ile iç bölgede 1'', 3'' ve 15'' çözünürlüklü

üç farklı SYM test edilmiştir. Topoğrafya silindirik kompartmanlara bölünerek kullanılmıştır. Topoğrafik düzeltme hesabı içinde hem geniş düzlüklerin hem de yüksek dağlık alanların bulunduğu Konya Kapalı Havzasında 1' grid aralığında 21901 noktada gerçekleştirilmiştir.

Nokta çevresinde enterpolasyon bölgesi (0.5'' çözünürlüklü) oluşturulması durumunda 3'' iç 15'' dış çözünürlüklü SYM ile referans modelden en fazla -1.43 mGal kadar sapan düzeltme değerleri elde edilmiştir. Enterpolasyon oluşturulmaması durumunda, eksik silindirik kitlelerin etkisi -10.79 mGal'e yükselmektedir. 15'' iç çözünürlüklü model için bu sapma değerleri sırasıyla -6.21 ve -26.11 mGal'e çıkmaktadır. 3'' ve 15'' iç çözünürlüklü model beklendiği gibi referans modele göre daha düşük topoğrafik detay içermektedir. Bu da hesaplanan potansiyel alanın konumsal çözünürlüğüne yansımaktadır. Sonuç olarak, hesap noktası yakın çevresinde enterpolasyon yapılmamasının ve iç bölge için 15'' çözünürlüklü SYM yardımıyla topoğrafik düzeltme hesaplanmasının beklenenden oldukça küçük düzeltme değerleri vereceği ortaya çıkmaktadır. Farkların büyüklüğü doğrudan topoğrafyaya bağlıdır. Jeodezik ve jeofizik uygulamalarda 3'' SYM ve noktadan 2500 metrelik yarıçapsal uzaklığa kadar enterpolasyon bölgesi oluşturulması durumunda 1-1.5 mGal civarında bir kayıpla topoğrafik düzeltmelerin hesaplanabileceği sonucuna varılmıştır. Bu istatistikler 1'' iç ve 15'' dış çözünürlüğe sahip SYM'lere göredir. Referans çözümde boş kitle elemanı oluşmasını önlemek için 50 metrelik yarıçapa kadar 0.5'' enterpolasyon yapılması yeterli görülmüştür. Doğruluğun yanı sıra, tek bir nokta için işlem süresi 1'' iç çözünürlüklü modelde 3'' iç çözünürlüklüye göre 250 kat daha fazladır. Yapılacak çalışmanın niteliğine göre doğruluk ve hız ölçütleri değerlendirilerek kullanılacak iç çözünürlük belirlenebilir.

Uygulama sonuçlarından anlaşılabileceği üzere topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasında noktanın yakın çevresi sonuçların doğruluğunda belirleyicidir. Düz yerlerde ortalama farklar 0.1 mGal değerinin altındadır. Bu yüzden iç model için çözünürlüğün engebeli topoğrafyada anlamlı olduğu açıktır. Günümüzde, SRTM1 ve ASTER1 gibi ulaşılabilir en yüksek çözünürlüklü küresel modellerin kullanımı gravite verilerinin indirgemesi çalışmalarında önemli bir veri seti oluşturmaktadır. Ayrıca, lidar verileriyle daha yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modellerin kullanımı gelecek çalışmaların konusu olacaktır.

Konya Kapalı Havzasında 50 mGal'e varan topoğrafik düzeltme değerleri elde edilmiştir. Ülkemizin engebeli ve yüksek coğrafyası nedeniyle, farklı bölgelerde yapılacak çalışmalarda daha büyük düzeltme değerlerine ulaşılacağı tahmin edilmektedir.

Yüksek lisans tezi araştırma konusu ile başlatılan ve bu çalışmada iyileştirilen algoritma; SYM çözünürlüğünün ve enterpolasyon yarıçapının seçiminde kullanıcıya esneklik sağlamaktadır. Ayrıca, 21901 noktada kısa sürede (en yüksek iç çözünürlükte yaklaşık 1.5 saat) uygulanabilmesi, silindirik bölme yönteminin ve algoritmanın işlevselliğini ortaya koymaktadır. Hesaplamanın gerektiğinde tek bir nokta için doğrudan coğrafi grid yapılı sayısal yükseklik modelleri üzerinden yapılması, düzlem için ayrıca SYM'nin yeniden gridleme gerektirmemesi önerilen yöntemin en önemli avantajıdır.

ORCID

Sevda OLGUN  <https://orcid.org/0000-0001-7082-2593>

Aydın ÜSTÜN  <https://orcid.org/0000-0001-6449-2145>

KAYNAKLAR

- Ayhan, M. E. ve Kahveci, M. (1991). Gravimetrik yerey düzeltmesinin Sayısal Arazi Modelinden yararlanarak hesabı. *Harita Dergisi*, 107, 1-24. Erişim adresi: <https://www.harita.gov.tr/images/dergi/makaleler/a7bf3f5462cc820.pdf>
- Capponi, M., Mansi, A. H. ve Sampietro, D. (2018). Improving the computation of the gravitational terrain effect close to ground stations in the GTE software. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 62(2), 206-222. doi: 10.1007/s11200-017-0814-3
- Bullard, E. C. (1936). *Gravity measurements in East Africa: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 235, 445-534. doi: 10.1098/rsta.1936.0008
- Demirel, H. (1984). *Yükseklik sistemleri ve nivelman sonuçlarının indirgenmesi*. Y.T.Ü. İnşaat Fak. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Douglas, J. K. ve Pahl, S. R. (1972). Extended terrain correction tables for gravity reductions. *Geophysics*, 37(2), 377-379. doi: 10.1190/1.1440266
- D'Urso, M. G. (2014). Analytical computation of gravity effects for polyhedral bodies. *Journal of Geodesy*, 88(1), 13-29. doi: 10.1007/s00190-013-0664-x
- Flury, J. ve Rummel, R. (2009). On the geoid-quasigeoid separation in mountain areas. *Journal of Geodesy*, 83(9), 829-847. doi: 10.1007/s00190-009-0302-9
- Forsberg, R. (1984). *A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modelling* (Rapor No. OSU/DGSS-355). Ohio: Ohio State Univ Columbus Dept Of Geodetic Science and Surveying.
- Forsberg, R. (1985). Gravity field terrain effect computations by FFT. *Bulletin géodésique*, 59(4), 342-360. doi: 10.1007/BF02521068
- Goyal, R., Featherstone, W. E., Tsoulis, D., ve Dikshit, O. (2020). Efficient spatial-spectral computation of local planar gravimetric terrain corrections from high-resolution digital elevation models. *Geophysical Journal International*, 221(3), 1820-1831. doi: 10.1093/gji/ggaa107
- Grombein, T., Seitz, K. ve Heck, B. (2013). Optimized formulas for the gravitational field of a tesseroid. *J. Geod.*, 87, 645-660. doi: 10.1007/s00190-013-0636-1
- Hammer, S. (1939). Terrain corrections for gravimeter stations. *Geophysics*, 4(3), 184-194. doi: 10.1190/1.1440495
- Hammer, S. (1982). Critique of terrain corrections for gravity stations. *Geophysics*, 47(5), 839-840. doi: 10.1190/1.1441352
- Hayford, J. F. ve Bowie, W. (1912). *Geodesy: the effect of topography and isostatic compensation upon the intensity of gravity*. Washington: US Government Printing Office.
- Heck, B. ve Seitz, K. (2007). A comparison of the tesseroid, prism and point-mass approaches for mass reductions in gravity field modelling. *J Geod.*, 81(2), 121-136. doi: 10.1007/s00190-006-0094-0
- Heiskanen, W. A. ve Moritz, H. (1967) *Physical geodesy* (1. baskı). San Francisco: Freeman.

- Hinze, W. J., Aiken, C., Brozena, J., Coakley, B., Dater, D., Flanagan, G. ve Kucks, R. (2005). New standards for reducing gravity data: The North American gravity database. *Geophysics*, 70(4), J25-J32. doi: 10.1190/1.1988183
- Hirt, C., Yang, M., Kuhn, M., Bucha, B., Kurzmann, A. ve Pail, R. (2019). SRTM2gravity: an ultrahigh resolution global model of gravimetric terrain corrections. *Geophysical Research Letters*, 46(9), 4618-4627. doi: 10.1029/2019GL082521
- Hwang, C., Wang, C. G. ve Hsiao, Y. S. (2003). Terrain correction computation using Gaussian quadrature. *Computers and geosciences*, 29(10), 1259-1268. doi: 10.1016/j.cageo.2003.08.003
- Kirby, J. F. ve Featherstone, W. E. (1999). Terrain correcting Australian gravity observations using the national digital elevation model and the fast Fourier transform. *Australian Journal of Earth Sciences*, 46(4), 555-562. doi: 10.1046/j.1440-0952.1999.00731.x
- Krynski, J. ve Lyszkowicz, A. (2006). Centimetre quasigeoid modelling in Poland using heterogeneous data. In IAG Proc. 1st International Symposium of the International Gravity Field Service (IGFS): Gravity Field of the Earth, İstanbul.
- Kuhn, M. (2003). Geoid determination with density hypotheses from isostatic models and geological information. *Journal of Geodesy*, 77(1-2), 50-65. doi: 10.1007/s00190-002-0297-y
- LaFehr, T. R. (1991). Standardization in gravity reduction, *Geophysics*, 56, 1170-1178. doi: 10.1190/1.1443137
- Long, L. T. ve Kaufmann, R. D. (2013). *Acquisition and analysis of terrestrial gravity data*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Martinec, Z. (1998). *Boundary-Value Problems for Gravimetric Determination of a Precise Geoid, Lecture Notes in Earth Sciences*, 73, Springer.
- McCubbine, J. C., Featherstone, W. E. ve Kirby, J. F. (2017). Fast-Fourier-based error propagation for the gravimetric terrain correction. *Geophysics*, 82(4), G71-G76. doi:10.1190/geo2016-0627.1
- Nagy, D. (1966). The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*, 31(2), 362-371. doi: 10.1190/1.1439779
- Nagy, D., Papp, G. ve Benedek, J. (2000). The gravitational potential and its derivatives for the prism. *Journal of Geodesy*, 74(7-8), 552-560. doi: 10.1007/s001900000116
- Nagy, D., Papp, G. ve Benedek, J. (2002). Corrections to "The gravitational potential and its derivatives for the prism". *Journal of Geodesy*, 76(8), 475-475. doi: 10.1007/s00190-002-0264-7
- Nowell, D.A.G. (1999). Gravity terrain corrections – an overview, *Journal of Applied Geophysics*, 42, 117-137. doi: 10.1016/S0926-9851(99)00028-2
- Niethammer, T. (1932). *Nivellement und Schwere als Mittel zur Berechnung wahrer Meereshöhen*. Bern: Schweizerische Geodätische Kommission.
- Olgun, S. (2017). *Topoğrafik düzensizliklerin ortometrik yüksekliklere etkisinin farklı çözünürlüklü SYM ve silindirik şablonlar yardımıyla araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Olson, C. J., Becker, J. J. ve Sandwell, D. T. (2016). SRTM15_PLUS: Data fusion of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) land topography with measured and estimated seafloor topography (NCEI Accession 0150537). Erişim Adresi: <https://catalog.data.gov/dataset/srtm15-plus-data-fusion-of-shuttle-radar-topography-mission-srtm-landtopography-with-measured->
- Parker, R. L. (1973). The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal International*, 31(4), 447-455. doi: 10.1111/j.1365-246X.1973.tb06513.x
- Pohánka, V. (1998). Optimum expression for computation of the gravity field of a polyhedral body with linearly increasing density. *Geophysical Prospecting*, 46(4), 391-404. doi: 10.1046/j.1365-2478.1998.960335.x
- Rapp, R. H. (1961). The orthometric height: Master of Science Thesis, Dept. Of Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio.

- Sanso, F. ve Sideris, M.G. (2013). *Geoid determination: theory and methods*. Springer Science and Business Media.
- Santos, M. C., Vaníček, P., Featherstone, W. E., Kingdon, R., Ellmann, A., Martin, B. A. ve Tenzer, R. (2006). The relation between rigorous and Helmert's definitions of orthometric heights. *Journal of Geodesy*, 80(12), 691-704. doi: 10.1007/s00190-006-0086-0
- Sideris, M. G. (1985). A fast Fourier transform method for computing terrain corrections. *Manuscripta geodaetica*, 10(1), 66-73. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Michael-Sideris/publication/234038995_A_Fast_Fourier_Transform_method_for_computing_terrain_correction/links/58cc4328a6fdcc5cccb98acb/A-Fast-Fourier-Transform-method-for-computing-terrain-correction.pdf
- Sjöberg, L. E. ve Bagherbandi, M. (2012). Quasigeoid-to-geoid determination by EGM08. *Earth Science Informatics*, 5(2), 87-91. doi: 10.1007/s12145-012-0098-7
- Sjöberg, L. E. ve Bagherbandi, M. (2017). *Gravity inversion and integration*. İsviçre: Springer International Publishing AG.
- Tenzer, R. (2004). Discussion of mean gravity along the plumbline. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 48(2), 309-330. doi: 10.1023/B:SGEG.0000020835.10209.7f
- Tenzer, R., Vaníček, P., Santos, M., Featherstone, W. E. ve Kuhn, M. (2005). The rigorous determination of orthometric heights. *Journal of Geodesy*, 79(1-3), 82-92. doi: 10.1007/s00190-005-0445-2
- Tenzer, R., Hirt, C., Novak, P., Pitonak, M. ve Sprlak, M. (2016). Contribution of mass density heterogeneities to the quasigeoid-to-geoid separation. *Journal of Geodesy*, 90(1), 65-80. doi: 10.1007/s00190-015-0858-5
- Torge, W. ve Müller, J. (2012). *Geodesy*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Tsouliş, D. (2001). Terrain correction computations for a densely sampled DTM in the Bavarian Alps. *Journal of Geodesy*, 75(5-6), 291-307. doi: 10.1007/s001900100176
- Tziavos, I. N., Vergos, G. S. ve Grigoriadis, V. N. (2010). Investigation of topographic reductions and aliasing effects on gravity and the geoid over Greece based on various digital terrain models. *Surveys in geophysics*, 31(1), 23. doi: 10.1007/s10712-009-9085-z
- USGS EROS. (2018) Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Erişim Adresi: <https://earthexplorer.usgs.gov>
- Wessel, P., Luis, J., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. ve Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools Version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. doi:10.1029/2019GC008515.
- Wild-Pfeiffer, F. A. (2008). Comparison of different mass elements for use in gravity gradiometry. *J. Geod.*, 82, 637-653, doi:10.1007/s00190-008-0219-8
- Yang, M., Hirt, C. ve Pail, R. (2020). TGF: A New MATLAB-based Software for Terrain-related Gravity Field Calculations. *Remote Sens.*, 12(7), 1063. doi: 10.3390/rs12071063

Açık Kaynaklı Bulut CBS Yardımıyla Kitlesel Taşınmaz Değerleme Uygulaması

(An Application of Mass Real Estate Valuation with Open Source Cloud GIS)

Muhammed Oğuzhan METE*^{ID}, Tahsin YOMRALIOĞLU^{ID}
 İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, Sarıyer, İstanbul
 *Sorumlu yazar: metemu@itu.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 01.11.2020

Kabul Tarihi (Accepted): 31.12.2020

ÖZ

Coğrafi Bilgi Bilimi, bu alanda önemli gelişmelerin ortaya çıkması ve uygulama örneklerinin pratikte yaygınlaşmasıyla birlikte daha belirgin hale gelmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemlerinde (CBS) internetin yaygın kullanımı ile dinamik sistemlere olan gereksinimler “Web CBS” ve “Bulut CBS” çözümlerini ortaya çıkarmıştır. Masaüstü CBS ürünlerinin günümüzde yaygın bir şekilde kullanılıyor olmasına rağmen Web CBS ve Bulut CBS uygulamalarının kullanımı dikkat çekici bir artış göstermekte ve kullanıcılara daha verimli çözümler sunmaktadır. Bulut Bilişim, yerel masaüstü sistemler yerine web tabanlı bilgisayar merkezlerinde birçok hesaplama ve analiz görevinin gerçekleştirildiği ve hizmetlerin paylaşıldığı bir sistemdir. Bulut Bilişim modelleri ölçeklenebilir, güvenli ve yüksek kapasiteli sistemleri daha az personel, bütçe ve donanım ihtiyacı ile sunmaktadır. Bulut CBS uygulamaları veri depolama, gerçek zamanlı veri görselleştirme, coğrafi analiz işlemleri ve coğrafi veri sunucusu gibi yetenekleri önemli maliyet tasarrufu ile tek platform üzerinden sunma imkânı sağlamaktadır. Kitlesel taşınmaz değerlendirme uygulamaları Bulut CBS’nin kullanımı ile verilerin dinamik bir şekilde depolanması, analizi ve paylaşılması sonucunda hızlı ve işlevsel hale gelmektedir. Bu çalışmada, Amazon Web Servisleri (AWS) bulut bilişim altyapısı ile PostgreSQL veritabanı, GeoServer veri sunucusu ve Leaflet web harita kütüphanesi açık kaynaklı yazılımları kullanılarak Bulut CBS destekli kitlesel taşınmaz değerlendirme platformu oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında parsel sorgulaması veya adres araması yapılarak taşınmazların arsa değerine ve çevresine ait bilgilere tek bir platform üzerinden erişilmesi sağlanarak değer esaslı çalışmalara önemli bir referans sunulması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bulut CBS, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Taşınmaz Değerleme, Kitlesel Değerleme, Nominal Değerleme

ABSTRACT

Geospatial technologies have become more prominent over the last decades with the emergence of improvements in this field. Widespread usage of internet and requirements in dynamic systems in Geographic Information Systems (GIS) have revealed Web GIS and cloud GIS solutions. Desktop GIS products are still used in the community frequently, however Web GIS and cloud GIS applications have drawn attention and have become more efficient for users. Cloud computing is the system where many

computations and analysis tasks are performed and shared services in web-based computer centers instead of local desktop systems. Cloud computing models offer scalable, secure and robust systems with less people, money and hardware needs. Cloud GIS applications provide real time data visualization, enable multi-users access, deliver significant cost savings. Mass real estate valuation applications become fast and functional as a result of the dynamic storage, analysis and sharing of data with the use of Cloud GIS. In this study, Amazon Web Services (AWS) cloud computing infrastructure, PostgreSQL, GeoServer, and Leaflet are used to create cloud GIS solution for real estate valuation. In the paper, it is aimed to provide an important reference to value-based studies by sharing land values and surrounding information on a single platform by searching for parcels or addresses.

Keywords: Cloud GIS, Geographic Information Systems, Real Estate Valuation, Mass Valuation, Nominal Valuation

1. GİRİŞ

Konumsal verilerin hızla büyüyen varlığı, büyük verileri depolamak ve paylaşmak için farklı yaklaşımlar gerektirmektedir. Bulut Bilişim sistemlerinin geliştirilmesiyle, bu büyük veri yığınlarını web üzerinden sanal makinelerde depolamak, işlemek ve paylaşmak mümkündür. Bulut teknolojisi, hesaplama servisleri, sunucular, depolama, veri tabanları, ağ uygulamaları, yazılımlar gibi birçok hizmetin internet üzerinden hızlı, güvenli ve ekonomik bir şekilde kullanıcılara sunulması amacıyla ortaya çıkan, gelişmekte olan bir kavramdır. Bulut Bilişim, birçok hesaplama ve analiz görevlerinin lokal masaüstü sistemler yerine internet tabanlı büyük bilgisayar merkezlerinde gerçekleştirilip web servisleriyle sunulduğu bir sistem olarak göze çarpmaktadır. Geleneksel sistem mimarisine kıyasla birçok avantaja sahip olan Bulut Bilişim, Bilgi Teknolojileri (BT) altyapısına bakış açısını değiştirmiştir.

Taşınmaz değerlendirme; taşınmazların konuma bağlı sahip oldukları fiziksel, ekonomik, yasal ve çevresel niteliklerin dikkate alınarak, bütüncül olarak irdelenerek güncel piyasa koşullarındaki birim değerinin tahmin edilmesi işlemidir (Yomralıoğlu, 1997). Dünya genelinde

taşınmazların değerlemesinde yaygın olarak klasik yöntemler olarak bilinen Emsal (Karşılaştırma) Yöntemi, Gelir Yöntemi ve Maliyet Yöntemi kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemler ile sadece değerlendirme konusu olan tekil taşınmazın kıymetlendirilmesi yapılabilmektedir. Öte yandan günümüzde vergilendirme, imar uygulamaları vb. birçok faaliyette belli bir alandaki taşınmazların kitlesel değerlemesine gereksinim duyulmaktadır.

Dünyada ve ülkemizde kitlesel taşınmaz değerlendirme ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalarda son on yıllık dönemde artış görülmektedir. Jahanshiri, Buyong ve Shariff (2011), kitlesel değerlendirme yöntemlerinden Çoklu Regresyon Analizi, Mekansal Otoregresif Modeller, Coğrafi Ağırlıklandırılmış Regresyon ve Kriging yöntemlerini özetleyerek avantaj ve dezavantajlarını incelemişlerdir. Güneş ve Yıldız (2015), Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM)'nin Tapu ve Kadastro Modernizasyon Projesi kapsamında İstanbul'un Fatih ilçesi ile Ankara'nın Mamak ilçesinde Çoklu Regresyon Analizi, Yapay Sinir Ağları ve Karar Ağaçları yöntemlerini kullanarak kitlesel değerlendirme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yalpir (2016), farklı aktivasyon fonksiyonlarına sahip Yapay Sinir Ağları ve Çoklu Regresyon Analizi ile Konya ilinde kitlesel değerlendirme çalışması gerçekleştirmiştir. Erdem (2017) ülkemizdeki ve dünyadaki kitlesel taşınmaz değerlendirme mevzuatını ve uygulama yöntemlerini inceleyerek bir kitlesel değerlendirme modeli önermiştir. Bilgiliöğlu (2018), Makine Öğrenmesi yöntemleri ile Aksaray iline ait kitlesel taşınmaz değer haritası üretmiş, yöntemlerin performanslarını istatistiksel doğruluk analizleri gerçekleştirerek kıyaslamıştır. Ayrıca tüm yöntemlerin bir arada kullanılabileceği bir yazılım geliştirmiştir. Demetriou (2018), doğrusal ve doğrusal olmayan iki farklı hedonik değerlendirme modeli geliştirerek Güney Kıbrıs'ta CBS destekli kitlesel değerlendirme çalışması gerçekleştirmiştir. Unel ve Yalpir (2019), Konya'nın Selçuklu ilçesinde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Süreci ve Çoklu Regresyon Analizi ile kitlesel değerlendirme çalışması yaparak yöntemlerin performanslarını kıyaslamışlardır. Bovkir ve Aydınoglu (2020), konut cinsindeki taşınmazların kitlesel değerlemesi için Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri (TUCBS) altyapısını kullanan, birlikte çalışabilir kitlesel değerlendirme modeli geliştirmiş, Makine Öğrenmesi yöntemlerinden Rastgele Orman algoritmasını kullanarak İstanbul'un Pendik ilçesinde taşınmaz değer haritası üretmişlerdir.

Şehir veya ilçe bazlı geniş alanlarda çok sayıda taşınmazın topluca değerlendirilmesi, birçok analiz, veri işleme ve uzun bir zaman

gerektirmektedir. Bu süreci bilimsel yöntemlerle objektif olarak yönetmek için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Bulut Bilişim teknolojilerinden faydalanmak, taşınmaz verilerinin ve haritalarının depolanmasını, analizi, görüntülenmesi ve paylaşılmasını kolaylaştırmaktadır (Mete ve Yomralıoğlu, 2019a). Son yıllarda farklı uygulama alanlarında Bulut Bilişim ve CBS'nin bütünleştirilmesi ile birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yang ve Wu (2010), literatürdeki Bulut Bilişim tanımlarını özetlemiş ve Bulut Bilişim teknolojisini özellikleri ve uygulama süreçleriyle birlikte ele almıştır. Ayrıca bulut üzerinde karar destek sistemleri uygulamaları ve coğrafi veri depolama süreçlerini de incelemişlerdir. Açık Mekansal Bilişim Birliği (Open Geospatial Consortium [OGC]), standartlar için bir referans model oluşturmak amacıyla Bulut Bilişimin gelişimini mekansal bakış açısı ile incelemiştir. Ekin (2011) Bulut Bilişim ve CBS'nin kullanım örneklerini incelemiş ve altyapı yönetimi için Web tabanlı CBS uygulaması geliştirmiştir. OGC oluşturduğu taslakta Bulut Bilişimin CBS ekosisteminde benimsenmesi ile birlikte kullanıcılar ve şirketler için avantaj ve dezavantajlarını özetlemişlerdir (McKee, Reed ve Ramage, 2011). Yang vd. (2011) zamansal CBS uygulamalarında Bulut Bilişimin kullanımını araştırmışlardır. Genellikle veri yönetimi, hesaplama, analiz ve zaman-mekan modelinin uygulama argümanlarına odaklanmışlardır. Kavzoğlu ve Şahin (2012) Bulut Bilişim ve Bulut CBS uygulamalarını ele almış, "Google Maps API" ve "GIS Cloud" ile iki farklı Bulut CBS uygulaması geliştirmişlerdir. Çetin, Yaman, Sabah, Ayday, ve Ayday (2013) CBS ve Uzaktan Algılama özelinde Bulut Bilişimin uygulanabilirliğini inceleyerek bir sistem mimarisi önermişlerdir. Alfaqih ve Hassan (2016), Bulut Bilişim ve Bulut CBS hakkında genel tanımları araştırarak literatürdeki Bulut CBS ile ilgili çalışmaları özetlemişlerdir. Ayrıca Bulut Bilişimin coğrafi bilgi, acil durum yönetimi ve sosyal medya alanlarındaki uygulama zorluklarını ve fırsatlarını tartışmışlardır. Tripathi, Agrawal ve Gupta (2020), coğrafi veri yönetimi, birlikte çalışabilirlik, güvenlik ve güvenilirlik kavramlarını bulut tabanlı Konumsal Veri Altyapısı (KVA) özelinde incelemişlerdir. Bulut CBS klasik CBS'ye göre depolama, analiz, dinamik veri paylaşımı gibi konularda yüksek performans ve işlevsellik sunmaktadır. Ayrıca yoğun Web trafiği karşısında ölçeklenebilir yapısı sayesinde kesintisiz ve hızlı erişim sağlama avantajı bulunmaktadır. Bulut Bilişim altyapısı, yüksek performanslı hesaplama ve etkin veri depolama imkanı sağlamanın yanı sıra, donanım ve bilgi teknolojileri personeli gereksinimlerini azaltarak kişi ve kurumlara önemli kazanımlar sunmaktadır (Grossman, 2009). Bulut

sistemlerindeki platform ve hizmet dağıtım modelleri de kullanıcı tarafındaki kurulum ve bakım gereksinimlerini ortadan kaldırmaktadır.

Literatürdeki çalışmalarda görüldüğü üzere kitlesele değerleme çalışmalarının çoğunluğu Çoklu Regresyon Analizi, Yapay Sinir Ağları gibi Makine Öğrenmesi yöntemlerinden oluşmaktadır. Yapılan çalışmalarda CBS destekli kitlesele değerleme çalışmaları bulunmasına karşın, Bulut CBS ile kitlesele taşınmaz değerleme çalışmasına rastlanmamıştır. Kitlesele değerleme çalışmalarında verinin depolanması, analizi, görselleştirilmesi ve paylaşılması Bulut CBS ile işlevsel hale gelmektedir. Bu çalışmada Amazon Web Servisleri (AWS) kullanılarak Bulut CBS ile kitlesele taşınmaz değerleme platformu oluşturulmuştur. Nominal Değerleme Yöntemi ile elde edilen arsa değerleri, Çoklu Regresyon Analizi ile rayiç değerlere dönüştürülmüş, istatistiksel testler ile doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca coğrafi verileri bulut ortamında dinamik olarak depolamak için "PostgreSQL" açık kaynak veritabanı sistemi "Amazon Relational Database Service (RDS)" kurulmuş, "AWS Elastic Compute Cloud (EC2)" üzerinde taşınmaz veri ve haritalarının paylaşılması amacıyla açık kaynaklı coğrafi veri sunucusu yazılımı "GeoServer" yüklenmiştir. Ayrıca "Leaflet" açık kaynaklı JavaScript web haritası kütüphanesi ile raster ve vektör verilerin web tarayıcısı üzerinden görselleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Böylelikle güncel emlak değerlerinin kullanıcılarla paylaşılması ve taşınmazları konu alan ekonomik işlemlerde yararlanılabilecek bir referans oluşturulması amaçlanmıştır.

2. BULUT BİLİŞİM

Bulut Bilişim, ağ, sunucu, depolama, uygulama ve servis gibi ayarlanabilir bilgi işlem araçları paylaşılan bir kaynağa her yerden uygun ağ erişimi sağlayan bir modeldir. Sistemin yapılandırılması ve devreye alınması sırasında kullanıcı tarafında fazla bir çaba veya müdahale gerektirmez (Mell ve Grance, 2011).

Bulut Bilişimin ortaya çıkışı 1960'lı yıllara kadar uzanmasına rağmen, "Bulut (Cloud)" terimi ilk olarak 2006 yılında Google, Amazon, Microsoft ve IBM gibi büyük teknoloji şirketleri tarafından tanınmıştır (Regaldo, 2011). Ancak dünya genelinde tanınırlık kazanması Amazon'un EC2 ürünü ile meydana gelmiştir.

Bulut Bilişim sistemlerinde özel, topluluk, genel ve hibrit olmak üzere dört dağıtım modeli bulunmaktadır (Bhat, Shah ve Ahmad, 2011).

Özel dağıtım modeli, çok sayıda çalışanı olan kuruluşlardaki kullanıcılara şirket içinde veya dışında özel bulut altyapısı sunmaktadır. İş sektörü, çalışma konusu, ilgi alanı gibi ortak hedefleri olan belirli bir grup için topluluk modeli bulut altyapısı sunulmaktadır. Genel bulut modeli servis sağlayıcısının merkezlerinde bulut altyapısının açık kullanımını mümkün kıldığı hizmet türüdür. Hibrit bulut modeli ise diğer dağıtım türlerinin birleşimi olarak görülebilir, ancak gelişmiş bulut çözümleri için özgün özellikleri barındırmaktadır (Mell ve Grance, 2011).

Helmi, Farhan, ve Nasr (2018)' a göre; Bulut Bilişim teknolojisi beş ana özellik içermektedir. Bunlar; i) İsteğe bağlı hizmet yapılandırması, ii) geniş ağ erişimi, iii) kaynak havuzu oluşturma, iv) hızlı esneklik ve v) kullandıkça öde. İsteğe bağlı hizmet yapılandırma özelliği, kullanıcıların sunucu özellikleri ve depolama gibi tercihleri istedikleri gibi yönetebilmeleri için bilgi işlem araçları sağlamaktadır. Geniş ağ erişim özelliği, ince veya kalın istemci platformlarının standart protokollerle hizmetlere erişmesini sağlamaktadır. Bulut sistemlerinin kaynak havuzu oluşturma özelliği, çok kiracılı modeli olan birden fazla kullanıcıya dinamik olarak etkinleştirilen, konumdan bağımsız sanal ve fiziksel bilgi işlem kaynakları sağlamaktadır. Hızlı esneklik özelliği, her zaman esnek, ölçeklenebilir, isteğe bağlı, otomatik hizmet sunumu sağlamaktadır. Son olarak, kullandıkça öde özelliği, kullanım ölçümü işlevini kullanarak kaynakların izlenmesini, yönetilmesini, optimize edilmesini ve raporlanmasını sağlamaktadır.

Bulut Bilişim sistemlerinde üç ana servis türü vardır: Servis Olarak Yazılım (Software as a Service [SaaS]), Servis Olarak Platform (Platform as a Service [PaaS]) ve Servis Olarak Altyapı (Infrastructure [IaaS]). SaaS, bilgi işlem araçları ağı olan bulut altyapısı üzerindeki uygulamaları kullanma yeteneği sağlamaktadır. Bu sayede kullanıcıların sunucu, ağ, işletim sistemi, depolama, uygulama veya bakım gibi işlemleri yönetmeleri gerekmez. Ayrıca, şirketlerin ve kuruluşların yazılım ve donanım satın almak, BT çalışanlarını istihdam etmek yerine bulut üzerindeki bilgi sistemlerini veya uygulamalarını kullanabilmeleri sağlanmaktadır (Alfaqih ve Hassan, 2016). PaaS, tüketiciler tarafından talep edilen yazılım geliştirme uygulamaları için platformların veya uygulamaların dağıtımını sağlamaktadır. PaaS modelindeki bulut altyapısı kullanıcılar tarafından yönetilmez veya kontrol edilmez, ancak kullanıcıların platformlar ve uygulamalar üzerinde yetkileri bulunmaktadır. IaaS servis modeli bilgi işlem, depolama, ağ ve işleme gibi temel özellikler sunmaktadır. Kullanıcılar ayrıca bulut altyapısı üzerinde

yönetebilecekleri ve kontrol edebilecekleri bir işletim sistemi ve uygulaması da kullanabilirler (Lněnička ve Komárková, 2013). IaaS servis modeline “AWS EC2”, “Google Cloud Platform Compute Engine” ve “Microsoft Azure” sanal makineleri; PaaS’a “ArcGIS Server” ve “GeoServer”; SaaS’a ise “ArcGIS Online”, “Mapbox” ve “CartoDB” örnek verilebilir (Mete, 2019).

Bulut Bilişim hizmeti veren teknoloji şirketleri arasında “AWS”, “Google Cloud Platform”, “Microsoft Azure”, “IBM Cloud”, “Oracle Cloud”, “Digital Ocean”, “Rackspace” gibi önde gelen Bulut Bilişim hizmeti sağlayıcıları bulunmaktadır. Bu çalışmada birçok hizmet imkanı bulunması, makul hizmet maliyetleri sunması, birçok konumda veri merkezinin bulunması ve yüksek oranda kullanılabilir hizmetler sunması dolayısıyla Bulut Bilişim platformu olarak AWS tercih edilmiştir.

a. Amazon Web Servisleri

AWS, işlevsellik, ulaşılabilirlik, hizmet çeşitliliği, boyutlandırma ve maliyet açısından en büyük genel bulut servis sağlayıcılarından biridir (Dillman, 2016). Airbnb, Autodesk, BP, Canon, Deloitte, Duolingo, Foursquare, Here, Hitachi, HTC, McDonalds, Netflix, Philips, Siemens ve Xiaomi gibi AWS ile işbirliği yapan birçok şirket ve kurum bulunmaktadır (Amazon Web Services, 2020). Üçüncü parti bir bulut sağlayıcısı olarak AWS, iş ortakları için bilgi işlem, depolama, ağ oluşturma, veritabanı, analitik, uygulama hizmetleri, dağıtım ve yönetim çözümleri sunmaktadır. Bu çalışmada AWS hizmetleri arasında en çok bilinen ve kullanılan EC2, S3 ve RDS sistemleri ele alınmıştır.

(1) Esnek Bulut Bilişim (EC2)

EC2, bulut sisteminde uygulamaların güvenli, yeniden boyutlandırılabilir ve ölçeklendirilebilir dağıtımını sağlayan bir web hizmetidir. EC2 hizmeti IaaS olarak kabul edilebilir, çünkü AWS sunucu, depolama, ağ iletişimi ve sanallaştırma işlemlerinin sorumluluğunu üstlenmektedir. Öte yandan, kullanıcılar işletim sistemi, veri uygulamaları, ara katman yazılımı ve çalışma zamanından sorumludur (Shao, Di, Guo ve Gong, 2012). Kullanıcılar, kullanıma hazır bir sanal makine oluşturmak için bir Amazon Makine İmajı (AMI) başlatabilir. AMI, Windows veya Linux işletim sistemleri, yazılımlar ve uygulamalardan oluşmaktadır. Sanal makinenin yönetimi ve yapılandırılması yönetim paneli üzerinden kontrol edilmektedir.

(2) Basit Depolama Servisi (S3)

AWS S3, bulut ortamında güvenlik, performans, ölçeklenebilirlik ve yüksek veri erişilebilirliği sağlayan çevrimiçi bir nesne depolama hizmetidir. S3 servisi ile çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere internet üzerinden tekdüzen kaynak konumlandırıcısıyla (URL) erişilebilen verileri nesne olarak depolamak mümkündür. Bu nesneler Amazon'un çeşitli ülkelerde konumlandırılmış veri merkezlerinden birindeki makinelerde yedeklenerek depolanmaktadır (Amazon Web Services, 2020). S3 veri kovanında bulunan verileri yönetmek ve kopyalama, yayınlama gibi temel işlemleri gerçekleştirmek için konsol ve komut satırı kullanılabilir.

(3) İlişkisel Veri Tabanı Servisi (RDS)

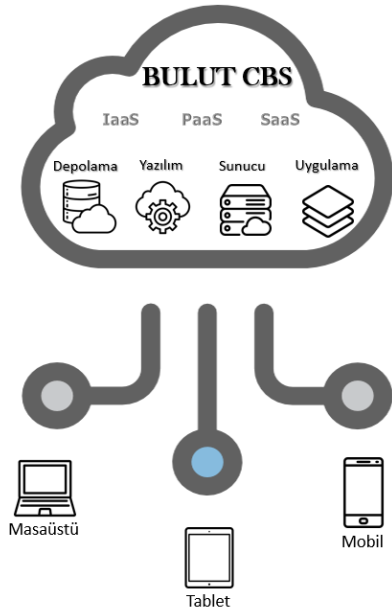
RDS Amazon'un bulut üzerinden ilişkisel veritabanları hizmetini web ortamında sağladığı servistir. Amazon RDS, veritabanının kurulumu, yönetimi, kontrolü ve ölçeklendirilmesi işlemlerinin kolaylıkla yürütülmesi amacıyla tasarlanmıştır. Ayrıca bu servis ile veritabanı üzerinde otomatik eklenti, yedekleme ve aşamalı kurtarma olanakları sunulmaktadır (Hubbard, 2019). Kullanıcıların ihtiyaçlarına göre, ölçeklenebilir, yeniden boyutlandırılabilir veritabanı yönetimi için sistemi yavaşlatan giriş-çıkış darboğazı ve performans düşüklüğü problemlerinin çözümü için optimizasyon imkanı sağlamaktadır. SaaS olarak RDS, “Amazon Aurora”, “MariaDB”, “MySQL”, “Oracle Database”, “PostgreSQL” ve “SQL Server” gibi yaygın kullanılan veritabanı sistemlerini desteklemektedir. Ayrıca, kullanıcıların AWS Veritabanı Geçiş Hizmeti'ni kullanarak mevcut veritabanılarını RDS'e hızlı ve güvenli bir şekilde taşıma imkanı bulunmaktadır.

3. BULUT CBS

Bulut CBS kavramı CBS'nin Bulut Bilişim altyapısı üzerinde işlevsel olarak kullanımıyla ortaya çıkmıştır. CBS'nin sağladığı temel özelliklerin yanı sıra, veri depolama, yazılım ve içerik anlamında yüksek erişilebilirlik, ölçeklenebilirlik, güvenlik ve düşük maliyet gibi avantajlar sağlamaktadır. Bulut CBS kullanıcıların verilere, haritalara ve coğrafi analiz hizmetlerine ulaşımını kolaylaştırmaktadır (Peng ve Wang, 2014). Ayrıca donanım ve yazılım kaynakları sağlama, Bilgi Teknolojileri uzmanı ve destek ihtiyaçlarını en aza indirme, maliyetleri düşürme ve gelişmiş veri yönetimini sağlama gibi birçok avantaj sunmaktadır. Öte yandan kullanıcılar kullandıkça öde özelliği sayesinde yalnızca

tükettikleri hizmetlerden sorumlu tutulmaktadırlar. Bulut CBS'nin ölçeklenebilirlik özelliği, hesaplama, depolama ve ağ kapasitelerini istenen şekilde artırmayı veya azaltmayı mümkün kılarken, coğrafi veri manipülasyonunu kolaylaştırmaktadır (Diasse ve Kone, 2011).

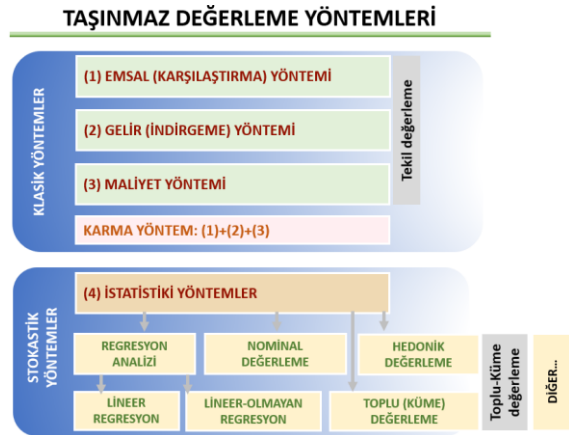
Bulut Bilişim sistemleri, bilgi işlem kaynakları, yazılım ve uygulamaların bulut üzerinde tam bir coğrafi bilişim ortamı oluşturmasını sağlamak için donanım ve yazılım ihtiyacını bilgi işlem gücü, performans ve bütçe gereksinimlerine göre istenilen özelliklere sahip sanal makineler yardımıyla karşılayabilmektedir. Çok kiracılı model kullanarak işleme, ağ oluşturma ve depolama istekleri için kaynak havuzu sağlamaktadır. Konumdan bağımsız havuz oluşturma sayesinde kaynaklar kullanıcı talebi doğrultusunda merkezi bulut altyapısı üzerinden birden fazla istemciye sunulmakta ve ölçeklendirilebilmektedir. IaaS servis modeli yardımıyla bulut sistemlerinde bütüncül bir CBS altyapısının oluşturulması mümkündür. Şekil 1'de Bulut CBS servis modelleri ve modellere ait uygulama örnekleri yer almaktadır. Bulut CBS uygulamaları, kullanıcılara coğrafi veri yönetimi, analizi ve depolamasını kolaylaştırma olanağı sunmaktadır (Bhat ve diğerleri, 2011). Ayrıca, işletim sistemi, CBS yazılımı, uygulamalar ve araçlar hazır bulut makinesi görüntüleri kullanılarak kolayca kurulabilmektedir.



Şekil 1. Bulut CBS bileşenleri ve servis modelleri.

4. TAŞINMAZ DEĞERLEME

Taşınmaz değerlendirme, ekonomik gelişmeleri dikkate alarak taşınmaz özelliklerini bir bütün olarak inceleme ve mevcut piyasa koşullarında birim değeri tahmin etme sürecidir (Yomralıoğlu, 1997; Açlar ve Çağdaş, 2002). Arazi, arsa ve binaların değerlendirilmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır, ancak bunlar iki genel gruba ayrılabilir: a) Klasik Yöntemler ve b) Stokastik Yöntemler (Yomralıoğlu, 2019). Emsal, Gelir ve Maliyet Yöntemleri klasik yöntemler olarak bilinmekte; diğer taraftan Nominal Değerleme, Regresyon, Hedonik Değerleme ve diğer kitlel değerlendirme yöntemleri stokastik yöntemlerdir (Şekil 2). Stokastik yöntemler, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında bilgisayarla analiz gerektiren istatistiksel modellere dayanmaktadır. Çünkü bu yöntemler geniş alanları kapsayan çok sayıda taşınmaza uygulanmaktadır. Bu şekilde gerçekleştirilen toplu değerlendirme yöntemleri ile değer haritası üretimi, vergilendirme, imar uygulamaları gibi çeşitli amaçlara yönelik faaliyetler yürütülebilmektedir (Erdem, 2017).



Şekil 2. Taşınmaz değerlendirme yöntemleri (Yomralıoğlu, 2019).

Ülkemizde henüz taşınmaz değerlendirme faaliyetlerinin bütünü kapsayan özel bir kanun bulunmamaktadır. Bunun yanında taşınmaz değerlendirme faaliyetlerine yer veren, değer tespit çalışmaları, vergi ve harç düzenlemeleri vb. konulara değinen Kamulaştırma Kanunu, Vergi Usul Kanunu, Gelir Vergisi Kanunu, Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun gibi çeşitli kanunlar taşınmaz değerlendirme mevzuatını dağınık bir şekilde oluşturmaktadır.

Son olarak 4 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi'ne (Bakanlıklara Bağlı, İlgili, İlişkili Kurum Ve Kuruluşlar İle Diğer Kurum Ve Kuruluşların Teşkilatı Hakkında) 05.02.2019 tarihinde 30 sayılı kararname ile eklenen

maddelerde taşınmaz değerlendirme çalışmaları ile alakalı önemli düzenlemeler getirilmiştir. Kararnamenin 478'nci maddesinin birinci fıkrasına TKGM'nin kuruluş, görev, yetki ve sorumlulukları ile teşkilatlanmasına ilişkin usul ve esasları arasına, "toplu değerlendirme faaliyetlerini düzenlemek ve yürütmek" ifadesi eklenmiştir. TKGM'nin görev ve yetkileri arasına, 480'nci maddenin birinci fıkrasının (h) bendinde, "taşınmazların toplu değerlendirme yöntemleriyle değerini belirlemek, değer bilgi merkezini kurmak, yönetmek ve değer haritalarının üretilmesi ile güncel tutulmasını sağlamak" ifadeleri eklenmiştir. Ayrıca 483'ncü maddenin birinci fıkrasının (e) bendinde (Değişik: RG-5/2/2019-30677-CK-30/19), TKGM bünyesindeki teşkilatlara Taşınmaz Değerleme Dairesi Başkanlığı eklenmiştir (Resmi Gazete, 2019). Başkanlık bünyesinde kurulan Toplu Değerleme ve Veri Yönetimi Birimi'nin toplu değerlendirme çalışmaları kapsamında veri toplama, konumsal ve istatistiksel analizler, değer haritası üretimi ve paylaşımı gibi çeşitli görevleri bulunmaktadır (TKGM, 2020).

Toplu değerlendirme yöntemlerinden biri olan Nominal değerlendirme, taşınmaz değerlerini etkileyen kriterlerin ağırlıklı toplamıyla parametrik değerler şeklinde hesaplanmasına dayanmaktadır (Yomralıoğlu, Nişancı ve Uzun, 2007; Mete ve Yomralıoğlu, 2019b). Yöntemde kriterlerin formüle edilmesi ve değerlerin piyasa fiyatlarından bağımsız olarak nesnel bir şekilde oluşturulabilmesinden ötürü bilimsel bir temeli bulunmaktadır. Nominal Değerleme Yöntemi, taşınmazların değer dağılımlarının birbirine göre yorumlanmasını sağlamakla birlikte, elde edilen parametrik değerlerin kolaylıkla gerçek piyasa değerlerine dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır (Mete ve Yomralıoğlu, 2019a).

a. Taşınmaz Değerlemede CBS Çözümleri

Taşınmaz değerlerini etkileyen faktörleri sınırlandırmak oldukça zordur. Çok sayıda kriterin değerlendirilmesi ve taşınmazın birim değerinin elde edilmesi onlarca analiz ve işlem gerektirmektedir. Bu karmaşık süreçle başa çıkmak için kolay veri manipülasyonu, gelişmiş otomasyon ve güçlü konumsal analiz yeteneklerine sahip CBS kullanılabilir. Klasik değerlendirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, CBS destekli Stokastik Yöntemler, geniş alanların kısa sürede kitlesel değerlemesini kolaylaştırmakta ve taşınmaz veri ve haritalarının görüntülenmesini, oluşturulmasını, depolanmasını, analiz edilmesini

ve paylaşılmasını sağlar. Ayrıca Web CBS uygulamalarını kullanarak gerçek zamanlı haritalar oluşturmak ve taşınmaz değerlerini web tarayıcısında dinamik olarak görüntülemek mümkün hale gelmiştir. Bu çalışmada, Mete (2019) tarafından oluşturulan İstanbul şehrinin CBS tabanlı nominal arazi değerleri, Bulut CBS teknolojisi yardımıyla taşınmaz veri ve haritalarını depolamak, görüntülemek ve yayınlamak amacıyla kullanılmıştır.

5. YÖNTEM

Taşınmaz değerlendirme, değeri etkileyen çok sayıda ölçüt bulunması sebebiyle karmaşık bir işlem olarak bilinmektedir. Taşınmazları nesnel bir yaklaşımla değerlendirmek, içsel ve dışsal faktörlerinin etkilerini analiz etmek CBS ile mümkün hale gelmektedir. Bunun sonucunda taşınmaz verilerini, harita ve raporlarını Web CBS ve Bulut CBS teknolojileri aracılığıyla kullanıcılarla paylaşmak kolaylaşmıştır. Bu çalışmada, CBS destekli "Nominal Taşınmaz Değerleme Yöntemi (Yomralıoğlu, 1993)" ile arsa değerleri elde edilmiş, istatistik yöntemlerle doğruluk analizi yapılarak parsel bazında rayiç değere dönüştürülmüştür. Üretilen taşınmaz değer haritası ve parsel verisi Bulut Bilişim teknolojilerinden faydalanarak geliştirilen kitlesel taşınmaz değerlendirme platformu üzerinden web servisleriyle paylaşılmıştır.

a. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak 5.461 km² yüzölçümüne sahip, 16 milyon nüfusuyla Türkiye'nin en büyük şehri olan İstanbul seçilmiştir (İstanbul Valiliği, 2020). Marmara Bölgesi'nde bulunan İstanbul şehri, Avrupa ve Asya kıtalarını birbirine bağlayan, kara, hava ve deniz ulaşımında önemli bir bağlantı noktasıdır. Önemli imkan ve fırsatlarından ötürü bir çekim merkezi olan İstanbul, gün geçtikçe büyüyüp gelişmekte, nüfusu da bu ölçüde artmaktadır. Bu sebeple taşınmaz mallara dair yaşanan talep ve el değiştirme de oldukça fazladır. Dolayısıyla taşınmaz malların alım-satım ve kira değerleri oldukça hareketli ve değişkendir. İstanbul genelindeki kentsel gelişme yanında, ayrıca birçok bölgede kentsel dönüşüm projeleri de sıkça uygulanmaktadır. Bu sebeplerden ötürü taşınmazların değerleri sıklıkla değişmektedir. Taşınmaz piyasasındaki birim değerlerin objektif ve dinamik olarak belirlenmesi amacıyla İstanbul ili kapsamında nominal taşınmaz değerlendirme çalışması yapılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Çalışma alanı: İstanbul ili.

b. Değeri Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi ve Ağırlıklandırılması

Nominal değer varlığı temsil eden gösterge değerdir. Ancak nominal değer birçok farklı parametrenin birlikte ele alınarak bir “veri kümesi” biçiminde değerlendirilmesi gereken bir fonksiyon olduğu da göz ardı edilmemelidir. Bu bağlamda, taşınmaz değerine etki edebilecek temel parametrelerin belirlenmesine ihtiyaç vardır.

Söz konusu parametreler içerisinde birim değere etki edebilecek en önemli faktör “konum” olarak bilinir. Taşınmazların bir veri kümesi şeklinde, toplu biçimde değerlemesinde konumsallık önemli bir özelliktir. Bunun yanı sıra arsa değerini etkileyen diğer faktörler ise genel olarak manzara ve topografyadır. Taşınmazın sahip olduğu orman, göl, deniz gibi manzaralar, taşınmaza çekicilik katmakta ve değerini artırmaktadır. Taşınmazın bulunduğu bölgenin eğimi de değeri etkileyen önemli bir faktördür. Düz bir zeminde bulunan taşınmazlar, yüksek eğimli, yokuşlu bir zeminde bulunan taşınmazlara göre daha çok tercih edilmekte ve daha değerli olmaktadır.

Bu kapsamda İstanbul ilinde taşınmaz değerini etkileyen 25 kriter seçilmiştir. Bu kriterler genel olarak yakınlık, manzara ve topografyaya ait faktörlerden meydana gelmektedir. Yakınlık kriteri kapsamında yola, toplu taşıma duraklarına,

alışveriş merkezlerine, yeşil alanlara, şehir merkezlerine, eğitim kurumlarına, sağlık merkezlerine, kamu binalarına, tarihi ve turistik yerlere, zararlı alanlara yakınlık faktörleri seçilmiştir. Manzara kriterleri kapsamında deniz, adalar ve boğaz manzaraları irdelenmek üzere seçilmiştir. Topografya kriterleri kapsamında ise eğim ve baki faktörleri seçilmiştir.

Taşınmaz değerlemenin en büyük problemi, kriterlere ait ağırlıkların kişiden kişiye değişiyor olmasıdır. Taşınmaz değerlendirme bir tahmin ve tecrübe işi olduğu için, değeri etkileyen kriterlerin önemi de kişilere göre farklı olabilmektedir. Örneğin; kimine göre taşınmazın metro istasyonlarına yakın olması en önemli kriter iken, bir başkası ise şahsi aracını park edebileceği bir otoparkı daha önemli görebilmektedir. Ayrıca kriter ağırlıklarının değerlendirme bölgesine bağlı olarak bazı özel durumları da olabilmektedir. Örneğin; raylı sistemler, metropol şehirler hariç diğer illerde tren ile şehirler arası ulaşım için çok seyrek kullanılmakta, bu sebeple değerlemede etkisi daha az olmaktadır. Fakat İstanbul için metro, tramvay ve Marmaray gibi şehir ulaşımının önemli parçası haline gelmiş raylı sistemlerin değere etkisi oldukça fazladır. Bunun dışında günlük toplu taşıma hacminin önemli bir kısmını üstlenen metrobüs de İstanbul şehrinde taşınmaz değerlerini etkileyen en önemli kriterlerden biri olarak görülmektedir.

Taşınmaz değerlendirme esnasında bir çalışma alanı için belirlenen kriterlerin değere etkisi genellikle birbirinden farklıdır. Her bir kriterin önem derecesine göre alacağı ağırlık katsayısı, ilgili kriterin değere kesin etkisini doğru bir şekilde ifade etmeyi sağlar. Bu çalışmada Mete (2019) tarafından En İyi En Kötü Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi ile belirlenmiş kriter ağırlıkları kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Taşınmaz değerlerine etki eden kriterler ve ağırlık katsayıları (Mete, 2019).

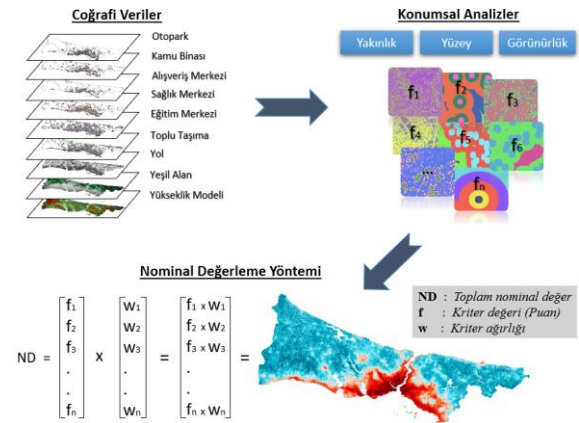
Kriter	Ağırlık
1. Ana Yola Yakınlık	0,04189
2. Otoyol Kavşaklarına Yakınlık	0,03142
3. Caddeye Çıkış	0,06284
4. Raylı Sistemlere Yakınlık	0,10323
5. Metrobüs Duraklarına Yakınlık	0,10323
6. Otobüs Duraklarına Yakınlık	0,02513
7. İskelelere Yakınlık	0,02513
8. Alışveriş Merkezlerine Yakınlık	0,03142
9. Yeşil Alanlara Yakınlık	0,02513
10. Şehir Merkezlerine Yakınlık	0,04189
11. Eğitim Kurumlarına Yakınlık	0,02513
12. Üniversitelere Yakınlık	0,03142
13. Sağlık Kurumlarına Yakınlık	0,02513
14. Hastanelere Yakınlık	0,03142
15. İtfaiye İstasyonuna Yakınlık	0,00898
16. Karakollara Yakınlık	0,00898
17. Otoparklara Yakınlık	0,03142
18. Tarihi Yerlere Yakınlık	0,03142
19. Zararlı Alanlara Yakınlık	0,02513
20. Havalimanlarına Yakınlık	0,04189
21. Deniz Manzarası	0,06284
22. Boğaz Manzarası	0,10323
23. Adalar Manzarası	0,03142
24. Eğitim	0,02513
25. Bakı	0,02513

c. Nominal Yöntem ile Kitlesele Taşınmaz Değerleme

Kitlesele değerlendirme uygulamalarından nominal yöntem ile belli sayıdaki faktörlerle taşınmazların nominal değerleri hesaplanabilmektedir. Bu şekilde yapılacak bir çalışmada faktör sayısı ve önem derecelerini belirten ağırlıklar kullanılarak taşınmaz değer haritaları coğrafi analizler yardımıyla piksel tabanlı üretilmektedir.

Nominal değer haritasının üretilmesi için QGIS açık kaynaklı CBS yazılımında kurulan modelde yakınlık, yüzey ve görünürlük olmak üzere üç farklı konumsal analiz türü yer almaktadır (QGIS.org, 2021). Yakınlık analizleri kapsamında kriterlere ait Öklid mesafelerinin hesaplanması için GDAL yakınlık aracı kullanılmıştır. Yüzey analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla Eğim ve Bakı araçları kullanılmıştır. Boğaz, deniz ve adalar manzaralarının belirlenmesi için ise Görünürlük Analizi eklentisi yüklenerek manzara analizi gerçekleştirilmiştir.

Çalışma alanı için gerçekleştirilen tüm analizlerin ağırlıklı toplamı ile değer haritasının elde edilmesi için Raster Hesaplama aracı kullanılarak Ağırlıklı Doğrusal Birleştirme yöntemi uygulanmıştır (Şekil 4). Böylece çalışma bölgesi İstanbul'da 10 metre çözünürlüklü değer haritası üretilmiş, değerler yüzde olarak ifade edilmiştir. Nominal taşınmaz değer haritasına göre Avrupa yakasında Beşiktaş, Beyoğlu, Fatih ve Şişli ilçeleri, Anadolu yakasında ise Kadıköy, Üsküdar ve Maltepe ilçeleri yüksek değere sahip bölgeler olarak göze çarpmaktadır.



Şekil 4. Nominal Değerleme Yöntemi.

ç. Nominal Değerlerin Parsel Bazında Hesaplanması ve Rayiç Değere Dönüştürülmesi

Piksel tabanlı taşınmaz değer haritası üretildikten sonra parsellere ait nominal değerlerin hesaplanması amacıyla Alansal Kesiştirme Yöntemi (Mete, 2019) kullanılmıştır. Bu yöntemde öncelikle piksel tabanlı nominal taşınmaz değer haritası raster formatından vektör formatına çevrilerek nominal değerleri içeren bir vektörel piksel gridi oluşturuldu. Oluşturulan vektörel değer haritası katmanı ile parsel katmanı bindirme analizi ile kesiştirildi. Piksellerin örtüştüğü parsellerin alanlarıyla, ilgili piksellerin değerlerinin çarpımları hesaplanarak her bir parselin toplam nominal değeri net olarak elde edilmiş, son olarak

kesişim vektörü ile parsel katmanı arasında konumsal birleştirme analizi yapılarak parsellerin içerisinde kalan tüm nominal değerler toplanıp parsel katmanına öznitelik olarak eklenmiştir. Sonuç olarak bir parsel için isabet eden tüm piksellerin kapladığı alan kadar nominal değere etki etmesi sağlanmaktadır.

Üretilen nominal taşınmaz değer haritasının doğruluğunun parsel bazında test edilmesi amacıyla İstanbul'un Anadolu ve Avrupa bölgelerinde bulunan 128 taşınmazın rayiç değerleri kullanılarak çeşitli istatistik testler yapılmıştır.

Rayiç değerler ve nominal değerler, istatistiksel anlamda bağımlı verilerdir. Bu iki veri arasında bir uyum olup olmadığını irdelenmek için öncelikle regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla rayiç değerlerden 32 parsel (%25) test verisi olarak ayrılmış, 96 parsel (%75) ile lineer, parabolik, kübik ve logaritmik regresyon eğrileri uydurulmuştur. Analizde bağımlı değişken olarak rayiç değerler, bağımsız değişken olarak da nominal değerler kullanılmıştır.

Regresyon analizinde belirtme katsayısı olarak bilinen R^2 değeri, kurulan denklemin uyum düzeyini belirtmektedir. Belirtme katsayısı sıfıra yakın ise kurulan modelin uyumsuz, bire yakın ise uyumlu olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra literatürde R^2 değerinin yorumlanması konusunda çeşitli görüşler yer almaktadır. Falk ve Miller (1992) R^2 değerinin uyumlu bir modelden bahsedebilmek için $\geq 0,1$ olması gerektiğini belirtmiştir. Cohen (1988) R^2 değerini 0,26 (güçlü); 0,13 (orta); 0,02 (zayıf); Hair, Sarstedt, Ringle ve Mena (2012) ise 0,75 (güçlü); 0,50 (orta); 0,25 (zayıf) olarak derecelendirmiştir.

Regresyon analizi sonucu elde edilen R^2 değeri lineer denklemde 0,745; logaritmik denklemde 0,625; parabolik denklemde 0,762; kübik denklemde ise 0,781 olarak hesaplanmıştır. En yüksek değerin kübik denklemde elde edilmesi dolayısıyla rayiç değerlerin testinde bu denklem kullanılmıştır (1).

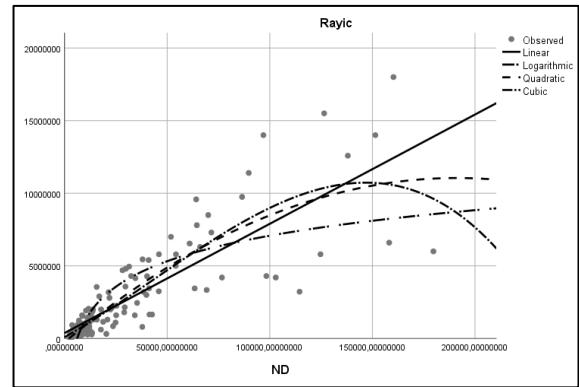
$$\text{Rayiç} = 341432,0618 + 40,60847 \times ND + 0,00117 \times ND^2 - (6 \times 10^{-9}) \times ND^3 \quad (1)$$

Elde edilen denkleme göre hesaplanan rayiç değerleri test etmeden önce uygun istatistik yönteminin belirlenmesi oldukça önemlidir. İki verinin tutarlılığının istatistiksel olarak test edilmesi amacıyla ortalama değerlerin karşılaştırıldığı yöntemler bulunmaktadır. Verilerin normal dağılım göstermesi durumunda parametrik testler, normal dağılım göstermemesi durumunda ise parametrik olmayan (non-parametrik) testlerin

uygulanması gerekmektedir. Bu kapsamda öncelikle verilere ayrı ayrı "Shapiro-Wilk" normal dağılım testi uygulanmıştır (Shapiro ve Wilk, 1965). Test sonucunda rayiç değerler için önem düzeyi $p < 0,05$ ($p = 4 \times 10^{-14}$), çarpıklık değeri 2,253 (SH = 0,214), basıklık değeri 5,570 (SH = 0,425) olarak hesaplanmıştır. Nominal değerler için önem düzeyi $p < 0,05$ ($p = 3 \times 10^{-14}$), çarpıklık değeri 2,057 (SH = 0,214), basıklık değeri 4,003 (SH = 0,425) olarak hesaplanmıştır. Verinin normal dağılım göstermesi için önem düzeyi p değerinin 0,05'ten büyük, çarpıklık ve basıklık değerlerinin de sıfıra yakın (-1 ve +1 aralığında) olması gerekmektedir. Hem nominal hem de rayiç değerlerin bu değerlere göre normal dağılım göstermediği anlaşılmaktadır.

Normal dağılım göstermeyen verilerin logaritmik dönüşüm, karekök, ters dönüşüm gibi bir takım transformasyonlar ile normal dağılım göstermeleri mümkündür. Yapılan transformasyonlar sonucunda da normal dağılım elde edilemediği için non-parametrik testlerden "Wilcoxon Matched Pairs" testi uygulanmıştır. Test için ayrılan 32 parselin piyasa değeri ile regresyon eğrisi sonucu hesaplanan değerlerin ortalamaları kıyaslanmıştır. Test sonucunda önem düzeyi $p > 0,05$ ($p = 0,454$) hesaplandığı için sıfır hipotezi H_0 kabul edilir. H_0 iki grubun, yani piyasa değerleri ile regresyon analizi sonucu elde edilen değerlerin ortalamaları arasında fark olmadığını belirtir.

Regresyon analizinin istatistik testinin yapılmasından sonra test parselleri de veri setine dahil edilerek 128 parsel ile tekrar regresyon analizi yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Çoklu Regresyon Analizi.

Regresyon analizi sonucu elde edilen R^2 değeri lineer denklemde 0,690; logaritmik denklemde 0,615; parabolik denklemde 0,717; kübik denklemde ise 0,722 olarak hesaplanmıştır. En yüksek değer yine kübik denklemde elde edilmiştir (2).

$$Rayiç = 91758,43137 + 80,3316 \times ND + 0,000385 \times ND^2 - (3 \times 10^{-9}) \times ND^3 \quad (2)$$

Son olarak elde edilen regresyon denklemi ile hesaplanan değerlerle rayiç değerlerin testi gerçekleştirilmiştir. “Wilcoxon Matched Pairs” testi sonucuna göre önem düzeyi $p > 0,05$ ($p=0,877$) hesaplandığı için sıfır hipotezi H_0 kabul edilir. İstatistik analizlere ait sonuçlar Tablo 2’de görülmektedir.

d. Değer Haritasının Bulut CBS ile Web Servisi

Coğrafi verilerden analizler sonucu elde edilen ürünün kullanıcılara sunulması, CBS’nin önemli adımlarından biridir. Sonuçların kullanıcılara ulaştırılabilmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Günümüzde veri ve bilgiye zaman ve mekandan bağımsız ulaşabilmek amacıyla masaüstü sistemler yerine web çözümleri ve bulut bilişim sistemleri yaygınlaşmıştır.

Coğrafi verilerin internet üzerinden paylaşılması kapsamında çeşitli standartlarda geliştirilmiş web servisleri kullanılmaktadır. Taşınmaz değerlendirme veri ve haritalarının kullanıcılarla dinamik olarak paylaşılması için bulut üzerinde açık kaynaklı CBS araçları kullanılmıştır. İlk olarak EC2 bulut sunucusu üzerinde CBS altyapısı oluşturmak için AWS üzerinde sanal makine kurulmuştur. İşlem adımları sırasıyla: i) işletim sistemini atamak için bir AMI seçme, ii) sanal sunucu türünü seçme, iii) sunucu yapılandırma, iv) depolama alanı ekleme, v) sunucu etiketleme ve vi) güvenlik grubu yapılandırma. Gerekli işlemler tamamlandıktan sonra “Ubuntu Linux” işletim sistemi ile “t2.micro” bulut sunucusu oluşturulmuştur. Bu sunucuya Güvenli Kabuk Bağlantısı ile komut satırı arabirimi üzerinden erişilebilmektedir.

Verileri bulut ortamında depolamak için “PostgreSQL” nesne-ilişkisel açık kaynak veritabanı yönetim sistemi tercih edilmiştir. Bu

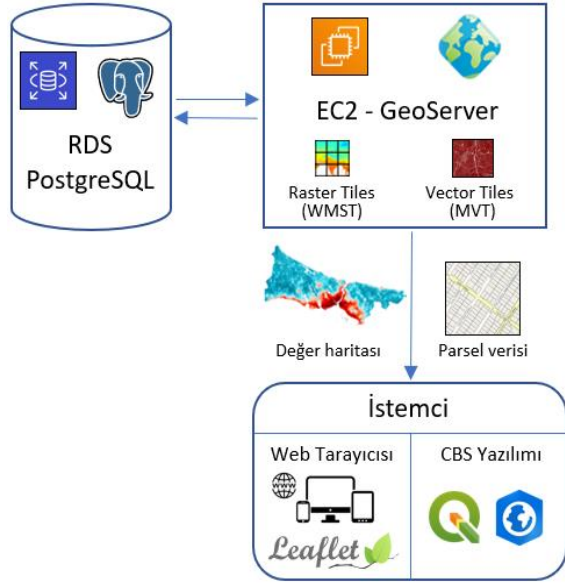
nedenle, AWS’de “Amazon RDS” veritabanı sunucusu oluşturulmuş ve coğrafi veri depolamayı etkinleştirmek için “PostGIS” uzantısıyla birlikte “PostgreSQL” yüklenmiştir. Daha sonra İlçe ve mahalle sınırları, parsel sınırları, taşınmaz değerlendirme verileri gibi gerekli tüm vektör ve raster veri kümeleri veritabanına yüklenmiştir. “Amazon RDS PostgreSQL” veritabanını “pgAdmin” ve etkileşimli “psql” terminali kullanarak yönetmek mümkündür.

EC2 ve RDS uygulamaları kurulduktan sonra, veri paylaşımını sağlamak için Java tabanlı, açık kaynaklı coğrafi veri sunucusu olan GeoServer, EC2 bulut sürücüsüne yüklenmiştir. Geoserver ile veri paylaşımı ve veri işleme amaçlı Web Detay Servisi (Web Feature Service [WFS]), Web Harita Servisi (Web Map Service [WMS]), Web Harita Kareleme Servisi (Web Map Tile Service [WMTS]), Web Kapsama Servisi (Web Coverage Service [WCS]) ve Web İşleme Servisi (Web Processing Service [WPS]) gibi OGC standartlarının kullanımı mümkündür. “GeoServer” birlikte çalışabilirlik kapsamında “Shapefile”, “GeoPackage” ve “GeoTIFF” gibi birçok veri formatını desteklemektedir. Ayrıca “PostGIS” verilerinin dinamik olarak depolanmasına ve yayınlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu amaçla “PostgreSQL / PostGIS” veritabanında depolanan taşınmaz verilerinin OGC servisi olarak yayınlanması için “GeoServer”da “Amazon RDS” bulut veritabanı sunucusuna bağlanılarak taşınmaz değerlendirme veri ve haritalarına erişim sağlanmıştır. Nominal değerlendirme verileri “GeoServer”ın “GeoWebCache” eklentisi kullanılarak WMTS formatında (256X256) piksel boyutunda raster görüntü kareleri (tile) şeklinde sunulmuştur. Öte yandan parsel verileri gibi büyük boyutlu vektör verilerin web üzerinde görüntülenmesi sırasında verimliliği artırmak için “GeoServer”ın “Vector Tiles” eklentisi kullanılarak Mapbox Vector Tiles (MVT) formatında yayınlanmıştır.

Tablo 2. Nominal ve rayiç değerlere ait istatistik testler.

Örneklem Sayısı	Regresyon Analizi (R ²)				Shapiro Wilk Normallik Testi			Wilcoxon Matched Pairs Testi
	Li	Pa	Kü	Lo	p	Basıklık	Çarpıklık	p
96 (%75)	0,745	0,762	0,781	0,625	4x10 ⁻¹⁴	5,570	2,253	0,454
128 (%100)	0,690	0,717	0,722	0,615	3x10 ⁻¹⁴	2,057	4,003	0,877

Li: Lineer, Pa: Parabolik, Kü: Kübik, Lo: Logaritmik



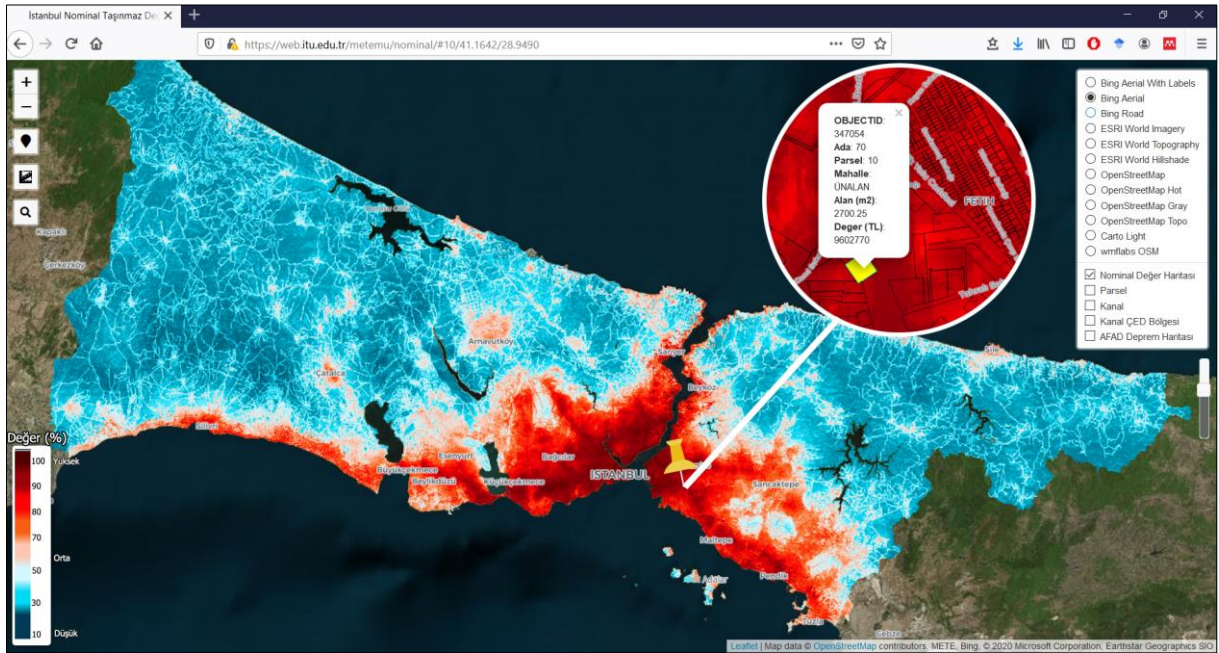
Şekil 6. Açık kaynaklı Bulut CBS platformunun sistem mimarisi.

Web servisleriyle yayınlanan tüm bulut tabanlı coğrafi verilere, masaüstü CBS yazılımları ("QGIS", "ArcGIS" vb.) veya web tarayıcıları aracılığıyla erişilebilmesi mümkündür.

Web harita kütüphaneleri, coğrafi verileri sunmak ve bu verilerle çalışmak için Uygulama Programlama Arayüzü (API) kullanır. Web tarayıcısı üzerinden veri ve haritaların görüntülenmesi için "ArcGIS API for JavaScript",

"Leaflet", "OpenLayers", "Mapbox GL JS" gibi birçok JavaScript harita kütüphanesi vardır. Bu çalışmada hızlı, sade, kullanışlı tasarıma sahip ve açıklayıcı kullanım dökümanı bulunan "Leaflet" açık kaynaklı web harita kütüphanesi kullanılmıştır. "Leaflet", masaüstü ve mobil platformlarla uyumlu bir şekilde çalışmakta ve bünyesinde işlevselliği attıran birçok eklenti barındırmaktadır. Şekil 6'da kullanılan açık kaynaklı yazılımlardan oluşan Bulut CBS platformu mimarisi görülmektedir.

"Leaflet" harita kütüphanesi kullanılarak, Bulut CBS üzerinden yayınlanan gayrimenkul değerleme verilerine internet üzerinden dinamik bir şekilde erişilebilmektedir (Şekil 7). Kullanıcılar nominal değer haritasını tarayıcı ile görüntüleyebilmekte, parsel üzerine tıklayarak veya taşınmaza ait bilgileri sorgulayarak İstanbul'daki herhangi bir parselin mevcut değerini öğrenebilmektedir. Öte yandan, uydu görüntüleri, topografik haritalar ve çeşitli vektör haritalar "REST API" ve OGC web servisleri kullanılarak altlık harita olarak görüntülenebilmektedir. Ayrıca harita üzerinde mesafe ölçme, adres arama ve kullanıcının konum tespiti ile bulunduğu mahallenin emlak değerlerini görüntülemek de mümkündür. İstanbul taşınmaz değerleme platformuna <https://web.itu.edu.tr/metemu/nominal> web adresinden erişilebilmektedir.



Şekil 7. Web üzerinden erişilebilen Bulut CBS tabanlı İstanbul taşınmaz değerleme platformu.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gelişen bilişim teknolojileri ile kurumlar, işletmeler veya bireysel kullanıcılar artan ihtiyaç ve sorunlara yönelik gelişmiş çözümler bulabilmektedirler. Bulut Bilişim sistemleri, depolama, bilgi işlem ve ağ çözümleri alanlarındaki sınırları kaldırarak önemli fırsatlar sunmaktadır. Bulut CBS altyapısı, veri depolama, veri görselleştirme, konumsal analiz ve veri paylaşımı açısından coğrafi bilgi teknolojilerine yaklaşımı değiştirmiştir. CBS tabanlı karar destek sistemlerinde bu teknolojilerin yaygın kullanımı web üzerinde dinamik coğrafi bilgi platformunun oluşturulmasını kolaylaştırmaktadır.

Kitlesel değerlendirme yöntemlerinden biri olan nominal değerlendirme yöntemi, geniş alanlarda topyekün değerlendirme imkanı sunmaktadır. Bulut CBS ile kitlesel taşınmaz değerlemeye dair tüm analiz ve işlemler hızlı bir şekilde, kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Coğrafi ve coğrafi olmayan verilerin depolanması, analizi, sonuç ürününün ortaya konması ve kullanıcılarla paylaşılmasına kadar olan tüm süreçlerin etkin bir şekilde yürütülmesinde Bulut CBS altyapısında IaaS, PaaS ve SaaS hizmet modelleri ile önemli kolaylıklar sağladığı görülmüştür.

İstanbul iline ait nominal taşınmaz değer haritası 25 kriter ile 10 metre çözünürlükte QGIS açık kaynaklı CBS yazılımı kullanılarak üretilmiştir. Parsel bazında nominal değerler elde edildikten sonra yapılan nominal değerlendirme çalışmasının doğruluğu rayiç değerlerle test edilmiştir. Bu kapsamda İstanbul'un Avrupa ve Anadolu yakasında bulunan, piyasa değerleri bilinen 128 parsel yardımıyla istatistiksel analizler yapılmıştır. Regresyon analizi ile nominal değerler kullanılarak İstanbul ilinde bulunan tüm parsellerin güncel piyasa değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler test parselleriyle kıyaslanarak doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel testler sonucunda taşınmaz değerlendirme modelinin tutarlı olduğu görülmüştür.

Taşınmazlara ait verileri depolamak, görüntülemek, analiz etmek ve değer haritalarını paylaşmak için bulut tabanlı açık kaynaklı coğrafi bilgi platformu oluşturulmuş, kullanıcıların parsel sorgulama ile tahminlenmiş güncel değere ve değeri etkileyen kriterleri barındıran coğrafi verilere web üzerinden erişimleri sağlanmıştır. Böylelikle taşınmaza ve çevresine ait bilgilerin tek bir platform üzerinden sorgulanıp dinamik olarak incelenmesi mümkün kılınmıştır.

Bu alanda gelecekte yapılacak çalışmalarda CBS destekli kitlesel taşınmaz değerlendirme ile

taşınmazların arsa değerlerinin yanı sıra, üzerindeki yapıların da değerlendirilmesinin yapılabilmesi için bütüncül bir değerlendirme platformunun hayata geçirilmesi ile vergilendirme, kentsel dönüşüm gibi değeri konu alan uygulamalarda referans olarak kullanılması kolaylaşacaktır. Böyle bir yaklaşımda taşınmazların üç boyutlu görselleştirilmesi için 3B web harita kütüphanelerinden (Mete, Güler ve Yomralıoğlu, 2018) faydalanılarak değer ve bağımsız bölümlere ait diğer öznelik bilgilerini görüntülemek mümkün olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: MYL-2018-41706.

ORCID

Muhammed Oğuzhan METE 
<https://orcid.org/0000-0002-9312-1965>

Tahsin YOMRALIOĞLU 
<https://orcid.org/0000-0002-8532-747X>

KAYNAKLAR

- Açlar, A. ve Çağdaş, V. (2002). *Taşınmaz (Gayrimenkul) Değerlemesi*. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası. Ankara
- Amazon Web Services. Case Studies & Customer Success Stories. (2020). Erişim adresi: <https://aws.amazon.com/solutions/case-studies/all> (15 Ekim 2020)
- Amazon Web Services. Simple Storage Service. (2020). Erişim adresi: <https://aws.amazon.com/s3> (15 Ekim 2020)
- Alfaqih, T. M. ve Hassan, M. M. (2016). GIS Cloud: Integration between cloud things and geographic information systems (GIS) opportunities and challenges. *International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSE)*.
- Aydinoglu, A. C., Bovkir, R. ve Colkesen, I. (2020). Implementing a mass valuation application on interoperable land valuation data model designed as an extension of the national GDI. *Survey Review*, 1–17.

- Bhat, M. A., Shah, R. M. ve Ahmad, B. (2011). Cloud Computing: A solution to Geographical Information Systems(GIS). *International Journal on Computer Science and Engineering*, 3(2), 594–600.
- Bilgilioglu, S. S. (2018). *Makine öğrenmesi teknikleri ile mekansal karar destek sistemlerinin geliştirilmesi: Aksaray ili örneği*. (Doktora tezi). Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, Lawrence Erlbaum Associates, NJ.
- Çetin, Ç., Yaman, N., Sabah, L., Ayday, E. ve Ayday, C. (2013). Bulut Bilişim (Cloud Computing) Teknolojisinin Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinde Uygulama Olanakları. *Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği VII. Teknik Sempozyumu (TUFUAB'2013)*. Trabzon.
- Demetriou, D. (2018). Automating the land valuation process carried out in land consolidation schemes. *Land Use Policy*, 75, 21–32.
- Diasse, A. ve Kone, F. (2011). Proposed of a GIS Cloud (GIS-C) System Architecture in Private Used. *Future Intelligent Information Systems* (pp. 55–63). Springer.
- Dillmann, J. (2016). Comparing Cloud Providers: Amazon vs. Google vs. Microsoft. Erişim adresi: <https://www.inovex.de/blog/comparing-cloud-providers> (15 Ekim 2020)
- Ekin, E. (2011). *Hizmet Yönetiminde Bulut CBS Uygulamaları: Eskişehir Alt Yapı Hizmetleri Örneği*. Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Erdem, N. (2017). Toplu (Küme) Değerleme Uygulama Örnekleri ve Ülkemiz İçin Öneriler. *TMMOB HKMO, 16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*. Ankara.
- Falk, R. F. ve Miller, N. B. (1992). *A primer for soft modeling*. University of Akron Press.
- Gunes, T. ve Yildiz, U. (2015). Mass valuation techniques used in land registry and cadastre modernization project of Republic of Turkey. *FIG Working Week: From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World*.
- Grossman, R. L. (2009). The case for cloud computing. *IT Professional*, 11(2), 23–27.
- Hair, J. F., Sarstedt, M., Ringle, C. M. ve Mena, J. A. (2012). An assessment of the use of partial least squares structural equation modeling in marketing research. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 40(3), 414–433.
- Helmi, A. M., Farhan, M. S. ve Nasr, M. M. (2018). A framework for integrating geospatial information systems and hybrid cloud computing. *Computers & Electrical Engineering*, 67, 145–158.
- Hubbard, A. (2019). Amazon EC2 to S3: A guide to AWS products. Erişim adresi: <https://searchaws.techtarget.com/feature/Amazon-Web-Services-product-directory> (15 Ekim 2020)
- İstanbul Valiliği. Nüfus Bakımından Türkiye'nin En Büyük Kenti: İstanbul. (2020). Erişim adresi: <http://www.istanbul.gov.tr/nufus-bakimindan-turkiyenin-en-buyuk-kenti-istanbul> (15 Ekim 2020)
- Kavzoğlu, T. ve Şahin, E. K. (2012). Bulut Bilişim Teknolojisi ve Bulut CBS Uygulamaları. *IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu*. Zonguldak.
- Lněnička, M. ve Komárková, J. (2013). Cloud solutions for GIS and cloud-based testing of web-based GIS applications. *Scientific Papers of the University of Pardubice. Series D, Faculty of Economics and Administration*. 28 (3/2013).
- McKee, L., Reed, C. ve Ramage, S. (2011). OGC Standards and Cloud Computing. *OGC White Paper*.
- Mell, P. ve Grance, T. (2011). *The NIST definition of cloud computing*. NIST Spec. Publ., 800 (2011), p. 7

- Mete, M. O., Guler, D. ve Yomralioglu, T. (2018). Development of 3D Web GIS Application With Open Source Library. *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology*, 6(Özel (Special)), 818–824. doi:10.15317/scitech.2018.171
- Mete, M. O. ve Yomralioglu, T. (2019a). Creation of Nominal Asset Value-Based Maps using GIS: A Case Study of Istanbul Beyoglu and Gaziosmanpasa Districts. *GI_Forum 2019*, 7(2), 98–112. doi:10.1553/giscience2019_02_s98
- Mete, M. O. (2019). *Coğrafi Bilgi Sistemleri İle İstanbul İli Nominal Taşınmaz Değer Haritasının Oluşturulması* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mete, M. O. ve Yomralıoğlu, T. (2019b). CBS ile Nominal Taşınmaz Değer Haritası Üretiminde Çözünürlük Araştırması. *Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi*, 1(1), 16–23.
- Peng, Y. ve Wang, Y. (2014). Geographic information system in the cloud computing environment. In *Computer Engineering and Networking* (pp. 893–902). Springer.
- QGIS.org, 2021. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Regalado, A. (2011). Who coined 'cloud computing.' *MIT Technology Review*, 31.
- Resmi Gazete (2019). Bakanlıklara Bağlı, İlgili, İlişkili Kurum ve Kuruluşlar ile Diğer Kurum ve Kuruluşların Teşkilatı Hakkında Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi ile Genel Kadro ve Usulü Hakkında Cumhurbaşkanlığı Kararnamesinde Değişiklik Yapılmasına Dair Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi (Sayı:30677). (2019, 5 Şubat). Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/02/20190205-7.pdf>
- Shapiro, S. S., ve Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611.
- Shao, Y., Di, L., Bai, Y., Guo, B. ve Gong, J. (2012). Geoprocessing on the Amazon cloud computing platform — AWS. *2012 First International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, Shanghai, pp. 1-6, doi: 10.1109/Agro-Geoinformatics.2012.6311655.
- TKGM. Toplu Değerleme ve Veri Yönetimi Birimi (2020). Erişim Adresi: <https://www.tkgm.gov.tr/tr/icerik/toplu-degerleme-ve-veri-yonetimi-birimi> (15 Ekim 2020)
- Tripathi, A. K., Agrawal, S. ve Gupta, R. D. (2020). Cloud enabled SDI architecture: a review. *Earth Science Informatics*, Vol. 13, pp. 211–231. doi: 10.1007/s12145-020-00446-9
- Unel, F. B. ve Yalpir, S. (2019). Valuations of building plots using the AHP method. *International Journal of Strategic Property Management*, 23(3), 197–212.
- Yalpir, Ş. (2018). Enhancement of parcel valuation with adaptive artificial neural network modeling. *Artificial Intelligence Review*, 49(3), 393–405. doi:10.1007/s10462-016-9531-5
- Yang, C., Goodchild, M., Huang, Q., Nebert, D., Raskin, R., Xu, Y., ... Fay, D. (2011). Spatial cloud computing: how can the geospatial sciences use and help shape cloud computing? *International Journal of Digital Earth*, 4(4), 305–329.
- Yang, J. ve Wu, S. (2010). Studies on application of cloud computing techniques in GIS. *2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing*, 1, 492–495. IEEE.
- Yomralioglu, T. (1993). *A Nominal Asset Value-Based Approach For Land Readjustment And Its Implementation Using Geographical Information Systems* (Doktora tezi). University of Newcastle upon Tyne.
- Yomralıoğlu, T. (1997). Eşdeğer İlkesine Dayalı Arsa ve Arazi Düzenlemesi Modeli. *JEFOD Kentsel Alan Düzenlemelerinde İmar Planı Uygulama Teknikleri*, 1(1), 139–152.

Yomralıoğlu, T., Nişancı, R. ve Uzun, B. (2007).
Raster Tabanlı Nominal Değerleme Yöntemine
Dayalı Arsa-Arazi Düzenlemesi Uygulaması.
11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı.

Yomralıoğlu, T. (2019). Taşınmaz Değerleme
Ders Notları. Erişim adresi:
<https://nirnova.itu.edu.tr/tr/dersler/insaat-fakultesi/11490/geo-308e/ekkaynaklar?g1419116> (15.10.2020)

Türkiye için Gece Işıkları ve İnsani Gelişme Endeksinin Mekansal İstatistiksel Analizi

(A Spatial Statistical Evaluation of Night Lights and Human Development Index for Turkey)

Vural YILDIRIM¹ , Kaan KALKAN² 

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Yer ve Uzak Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir

²TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara

vurall_yildirim@hotmail.com, kaankalkan@gmail.com

Geliş Tarihi (Received): 10.08.2020

Kabul Tarihi (Accepted): 04.01.2021

ÖZ

Günümüz dünyasında kentlerin ekonomik kalkınmasına bağlı olarak ışıklandırma sistemlerinde de gelişmeler görülmektedir. Bu sistemlerin bir kısmı yeni yerleşim yerlerinin açılmasına bağlı olsa da bir kısmı sanatsal veya sokak peyzajına dayalı olarak da artmaktadır. Gece ışıkları verisi Amerika Birleşik Devletleri Savunma Meteorolojik Uydu Programı kapsamında düzenli olarak tutulmaktadır. Kentlerin gelişmişlik düzeylerinin bir göstergesi olan İnsani Gelişme Endeksi (İGE) Türkiye Ekonomi Politikaları Araştırma Vakfı (TEPAV) tarafından Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı'na (BMKP) bağlı kalarak hesaplanmaktadır. Bu çalışma kapsamında gece ışıklarının İnsani Gelişme Endeksiyle mekansal keşfedici analizleri yapılmış ve mekansal modeller yardımıyla açıklanmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki gece ışıkları ve İGE mekansal ilişkilere sahiptir ve mekansal model başarılı olarak kurulabilmektedir. Ayrıca gece ışıklarının yalnız mekansal olarak değil, yıl bazında değişimleri de dikkate alınarak konum zaman küpleri ile analiz edildiğinde bazı bölgelerde zamana bağlı trendlerin istatistiksel olarak anlamlı çıktığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Gece Işıkları, Alan İstatistikleri, Mekansal Ekonometrik Modeller, Coğrafi Ağırlıklandırılmış Regresyon, Konum Zaman Küpü.

ABSTRACT

The developments in cities can be observed in lighting systems depending on economic development. Although some of these systems depend on the opening of new settlements, some of them increase based on artistic or street landscape. Night lights data are collected regularly within the United States Defense Meteorological Satellite Program (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP). Human Development Index (HDI) which is an indicator of the level of development of the city, is calculated according to the United Nations Development Program (UNDP). Within the scope of this study, spatial analysis of night lights with HDI was performed and spatial models were developed. The results showed that both the night lights and HDI have spatial relationships, and this model can be established successfully. In addition, when the night lights were analyzed with space-time cube, considering not only spatial changes but also yearly changes, time-

related trends were statistically significant in some regions.

Keywords: Night Lights, Zonal Statistics, Spatial Econometric Models, Geographically Weighted Regression, Space-Time Cube.

1. GİRİŞ

Türkiye'de ilk elektrik üretim santrali İstanbul Haliç'te 1888 yılında elektrik üretmeye başlamıştır. Özellikle cumhuriyet döneminde sanayileşmenin artmasıyla paralel elektrikli aydınlatma kentlere ve köylere yayılmalar göstermiştir. Son yıllardaki teknolojik gelişmelere bağlı olarak tasarruflu aydınlatmanın gelişmesi ve binalarda veya kentlerde estetik bir görsel olarak rağbet görmesinden dolayı ışıklandırmalara bağlı olarak kentlerin uzaydan görüntüsünde de gelişmeler olmaktadır.

Gece ışıkları ve kent araştırmaları ile ilgili dünyada çeşitli yayınlar olduğu gibi ülkemizde de bu alanda yayınlar mevcuttur. Başışoş (2016) gece ışıkları ile Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYH) değerlerini karşılaştırmış ve yıllara göre değişimi yapay sinir ağı algoritması ile hem ülke geneli değeri için hem de il bazında değerler için başarılı şekilde tahmin etmiştir. Özer ve Elmalı (2018) gece ışıkları verisiyle hesaplanan GSYH'yı komşuluk ilişkilerini dikkate alınarak iller arasındaki gelir farklılıklarını tespit etmek için mekansal ekonometrik modeller kullanmıştır. Analiz sonuçlarına göre illerdeki GSYH illerin kendi içindeki kamu yatırımları ile doğru orantılı, komşu illerdeki nüfusla ters orantılı ve komşu illerdeki ithalatla doğru orantılı olduğu tahmin edilmiştir. Elvidge vd. (2007) gece ışıkları ile inşa edilmiş su geçirimsiz alanları (yollar, park alanları, binalar, kaldırımlar vb.) ülkeler bazında incelemişlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre Çin diğer ülkelere göre daha fazla geçirimsiz alana sahipken kişi başına düşen alan incelendiğinde ABD'nin gerisinde kalmıştır. Krikigianni vd. (2019) gece ışıkları ile turizmi Coğrafi Ağırlıklandırılmış Regresyon (CAR) yardımıyla Avrupa Birliği (AB)

ülkeleri için mevsimsel olarak incelemişler ve mevsimsel olarak farklılıkları ortaya koymuşlardır. Mellander vd. (2015) İsveç için gece ışıkları ve ekonomik göstergeleri CAR yöntemi kullanarak modellemişlerdir. Tahmin sonuçlarına göre gece ışıkları ve ekonomik aktiviteler arasında anlamlı mekansal bağımlılıklar bulmuşlardır. Bruederle ve Hodler (2018) 29 Afrika ülkesi için demografik ve sağlık anketlerini baz alarak hane halkı zenginliği, eğitim ve sağlık göstergelerini gece ışıklarıyla incelemişlerdir. Elde ettikleri analiz sonuçlarına göre yerel insani gelişme ve gece ışıkları arasında pozitif ilişki olduğunu göstermişlerdir. Charris vd. (2019) Brezilya belediyelerinde İGE ve gece ışıklarını inceleyerek gece ışıklarının iyi bir sosyo-ekonomik gösterge olduğunu göstermişlerdir. Elvidge vd (2012) çalışmasında İGE'nin uydu görüntülerinden elde edilmesi üzerine Gece Işıkları Gelişim Endeksi (GIGE) yönetimini geliştirmişlerdir. Ülkeler bazında yaptıkları çalışmada elde ettikleri sonuçlara göre geliştirdikleri yöntem, İGE ile yüksek korelasyona sahip iken geleneksel gelir ölçme katsayısı olan Gini ile herhangi bir korelasyonu olmamıştır. Salvati vd (2017) çalışmasında GIGE yöntemini iyileştirilerek daha iyi sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Hesaplamalarda aynı GIGE değerlerinin çıkmasına karşın aslında farklı İGE değerlerinin var olduğunu göstermişler ve bir düzeltme önermişlerdir. Geliştirdikleri yöntemi İtalya'da uygulayarak daha gerçekçi sonuçlar elde etmişlerdir.

Waldo Tobler 1969 yılında Uluslararası Coğrafi Birliğin Nitel Yöntemler Komisyonu toplantısında coğrafyanın ilk kuralını "Her şey her şeyle ilişkilidir. Fakat yakın olanlar, uzak olanlara göre daha ilişkilidir" şeklinde tanımlamıştır (Tobler, 1970). Mekansal istatistiksel çalışmaların başlangıcı Tobler'in ifadesinden daha eski tarihlere kadar gitse de ilk istatistik Moran tarafından 1950'lerde geliştirilmiştir. Mekansal ekonometri kavramı ise Jean Paelinck tarafından 1974 yılında Hollanda İstatistik birliğinin toplantısında kullanılmıştır (Arbia, 2016). Bundan sonraki yıllarda da mekansal ekonometrik modeller gelişme göstermiştir. Ord (1975) bağımlı değişken ve hata teriminde mekansal bağımlılık olması durumunda mekansal ekonometrik modelleri kullanmayı önermiştir. Manski (1993) mekansal bağıllığın bağımlı değişkende, bağımsız değişkende ve hata teriminde olduğu modeller üzerine çalışmalar yapmıştır. Klasik doğrusal regresyon modelinin En Küçük Kareler (EKK) tahminçileri hata teriminin sabit varyanslı ve ilişkisiz olması durumunda en küçük varyanslı ve yansız EDYT (en iyi doğrusal yansız tahminci) olma özelliğine sahiptir (Gujarati, 2001). Mekansal bağıllığın olduğu veri setlerinde

ise bu varsayım ihlal edileceğinden dolayı EKK EDYT olma özelliğini yitirecektir, bu nedenle mekansal ekonometrik modellerin kullanılması önerilmiştir (Anselin, 1988).

Bu çalışma kapsamında ise İGE gece ışıkları ile açıklanmış ve modellenmiştir. Gece ışıkları veri seti 1992 ve 2013 yıllarını kapsadığından keşfedici istatistiksel teknik olarak konum zaman küpleri kullanılarak, "Getis Ord" (Getis ve Ord, 1992), sıcak nokta ve "Moran I" (Anselin, 1995), aykırı değer analizleri yıl bazındaki değişimlerle açıklanmıştır. Böylece daha önceki çalışmalardan farklı olarak gece ışıkları tüm yıllardaki değerleriyle aynı anda analiz edilebilmiştir. Ayrıca İGE ve gece ışıklarının 2013 yılı verilerinin analizi için de doğal kırılım haritaları oluşturulmuş, en uygun sıcak nokta ve aykırı değer analizleri yapılmıştır. Tahminleme yöntemi olarak klasik doğrusal en küçük kareler yöntemi ile mekansal ilişkileri hesaba katan mekansal ekonometrik modeller ve coğrafi ağırlıklandırılmış regresyon modeli kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gece ışıkları ile İGE'ni açıklayan dünyada benzer çalışmalar olsa da bu çalışmada Türkiye için daha farklı ve daha fazla yöntemlerle mekansal modeller kullanılarak il bazında analizler yapılmıştır. Makalede ilk olarak veri seti tanıtılmış, daha sonra kullanılan istatistiksel yöntemler açıklanmış ve daha sonra analizler yapılarak yorumlanmıştır.

2. VERİ SETİ

İGE verileri Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı'na (BMKP) uygun olarak Türkiye Ekonomi Politikaları Araştırma Vakfı (TEPAV) tarafından 2013 yılı için hesaplanmıştır. Endeks kalkınmayı ölçen sağlık, eğitim, gelir olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır (Özpınar ve Koyuncu, 2016).

Gece ışıkları verisi Amerika Birleşik Devletleri'ne ait bir program olan Savunma Meteorolojik Uydu Programı'ndan (SMUP) alınmıştır. Uydu görüntüleri yerel saat 20:30 ile 22:00 arasında kaydedilerek, Linescan sistemi ile kızılötesi ışınlar düşük seviyelerde tespit edilmektedir. Böylelikle görünür bant verileri ile kentlerin atmosfere yansıyan ışıkları kolaylıkla tespit edilebilmektedir (Başıhoş, 2016, Uysal, 2015, 2018). Ayrıca piksellerin yıllık ortalama parlaklığı 0-63 arasında 6 bit ile ölçeklendirilmiştir. Bu veriler her bir takvim yılı içinde çekilen tüm bulutsuz görüntülerin harmanlama işlemi ile birleştirilmesi sonucu üretilmektedir (Doll, 2008). Veriler 1992-2013 yıllarını kapsamaktadır ve en son 2013 yılı için açıklanmıştır. Türkiye için iki

farklı yıla ait gece ışıkları haritası Şekil 1'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde ışıkların daha geniş alanlara yayıldığı görülmektedir.

3. İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER

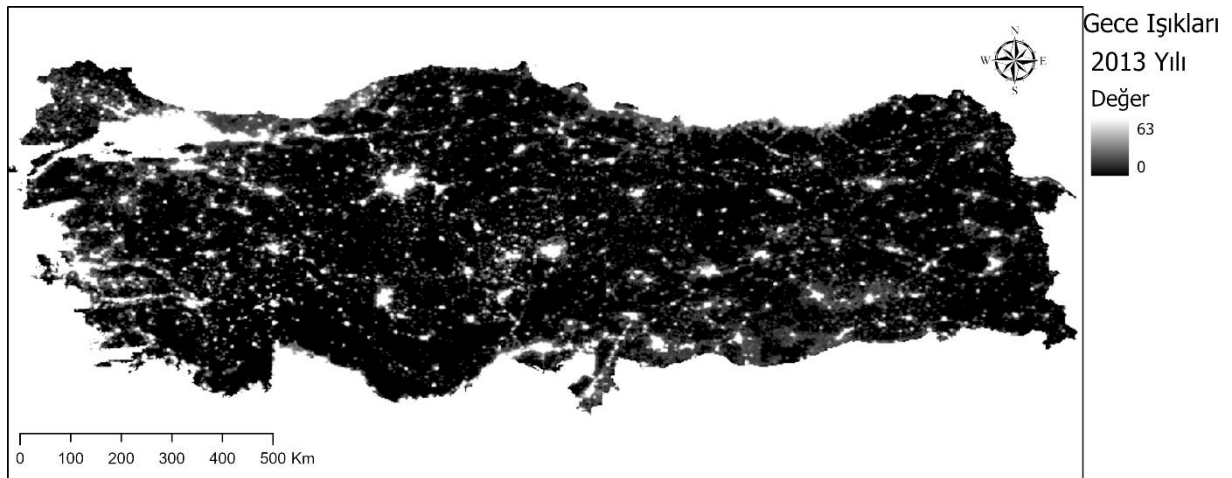
İstatistiğin temel varsayımlarından biri olan gözlem değerlerinin birbirinden bağımsızlığının ihlal edildiği durumlarda mekansal ilişkilerin gözlem değerlerini etkileyip etkilemediği araştırılmalıdır. Eğer bu ihlalin sebebi mekansal ilişki ise coğrafi ve mekansal modellerin kullanılması gerekir (Zeren, 2011). Bu nedenle ilk olarak keşfedici istatistiksel yöntemlerden olan "Getis Ord" sıcak nokta ve "Moran I" aykırı değer analizleri ile 2013 yılı verilerinde mekansal bağıllığın olup olmadığı araştırılmıştır. Ayrıca gece ışıkları verisi 1992-2013 yıllarını kapsadığından, yıllara göre değişimin trendini baz alan konum zaman küpü yöntemi ile analizler yapılmıştır. Daha

sonra veri seti ilk olarak klasik bir yöntem olan En Küçük Kareler (EKK) ile modellenmiş daha sonra mekansal ilişkilerin hesaba katıldığı MGYM Mekânsal Genel Yuva Modeli, MABBM Mekânsal Ardışık Bağımlı Birleşik Model, MDM Mekânsal Durbin Modeli, MDHM Mekânsal Durbin Hata Modeli, MABM Mekânsal Ardışık Bağımlı Model, MXGM Mekânsal X Gecikmeli Model, MHM Mekânsal Hata Modeli ve CAR Coğrafi Ağırlıklandırılmış Regresyon ile de modellenmiş sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

"Getis Ord" istatistiği bir bölgenin diğer bölgelere göre ortalamadan anlamlı çok yüksek (sıcak nokta) veya anlamlı çok düşük (soğuk nokta) olmasını "z testi" ile belirler. Formülü denklem 1'de verilmiştir (Getis ve Ord, 1992),



(a)



(b)

Şekil 1. Gece ışıkları haritası (a) 1992 yılı (b) 2013 yılı.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (1)$$

Burada w ağırlık matrisi, x bağımsız değişken, n coğrafi birim sayısı, $\bar{X} = \sum_j X_j / n$ ve $S = \sqrt{\sum_j X_j^2 / n - \bar{X}^2}$ şeklindedir.

“Moran I” istatistiği bir bölgenin komşularına göre anlamlı şekilde çok yüksek veya çok düşük değerler almasını gösterdiği gibi komşularından farklı yönde (aykırı değer) değerler almasını da göstermektedir. Formülü denklem 2’de verilmiştir (Anselin, 1995),

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (X_j - \bar{X}) \quad (2)$$

burada w ağırlık matrisi, x bağımsız değişken ve n coğrafi birim sayısı olmak üzere $\bar{X} = \sum_j X_j / n$ ve $S_i^2 = \sum_{j=1, j \neq i}^n (X_j - \bar{X})^2 / (n - 1)$ şeklindedir.

Konum zaman küpü analizinde ise veri seti belirli zaman aralıklarına bölünerek her bir zaman dilimi için “Getis Ord” veya “Moran I” istatistikleri hesaplanır daha sonra tüm zaman dilimindeki eğilimini ölçmek için Mann Kendall trend analizi kullanılır. Bu çalışmada zaman dilimleri 1 yıl olarak alınmıştır. Formülü denklem 3’de verilmiştir (Spataru, 2018),

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (3)$$

burada sign işaret fonksiyonu, x bağımsız değişken, n coğrafi birim sayısıdır.

Sıcak nokta: istatistiksel olarak anlamlı olan yüksek değerlerin mekânsal kümelenmesini gösterir.

Soğuk nokta: istatistiksel olarak anlamlı olan düşük değerlerin mekânsal kümelenmesini gösterir.

Aykırı değer: bir değer komşularına göre daha düşük veya daha yüksek istatistiksel olarak anlamlı değerlere sahip olmasıdır. Mekansal olarak iki aykırı değer bulunmaktadır, Yüksek Düşük: düşük değerlerle çevrelenmiş yüksek değeri ifade ederken, Düşük Yüksek: yüksek değerlerle çevrelenmiş düşük değeri ifade eder.

Konum zaman küpü analizlerinde sıcak noktaların zaman dilimlerinde göstermiş oldukları değişime göre “ArcGIS yazılımı” aşağıdaki şekilde

sınıflamalar yapmaktadır (“ArcGIS how emerging hot spot analysis works”, 2020):

- Yeni Sıcak Nokta: Daha önceleri anlamsızken son zaman diliminde anlamlı sıcak noktayı ifade eder.
- Ardışık Sıcak Nokta: Daha önceleri anlamsızken tüm zaman dilimlerinin %90’ından daha az olmak kaydıyla son zaman dilimlerinde kesintisiz anlamlı sıcak noktayı ifade eder.
- Yoğun Sıcak Nokta: Son zaman dilimi de dahil olmak üzere tüm zaman dilimlerinin %90’ı için artan trende sahip anlamlı sıcak noktayı ifade eder.
- Seyrek Sıcak Nokta: Dönem dönem aralıklarla sıcak nokta olup diğer dönemlerde anlamsız olan ve tüm zaman dilimlerinin %90’ından daha az olmak kaydıyla anlamlı sıcak noktayı ifade eder.

En Küçük Kareler (EKK) yönteminin formülü doğrusal model için denklem 4’de verilmiştir (Yıldırım ve Kantar, 2019),

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (4)$$

burada, y bağımlı değişken, X bağımsız değişken, β bilinmeyen model parametresi, ε hata terimidir.

Mekânsal Genel Yuva modeli (MGYM) mekânsal bağımlılığın tüm değişkenlerde ve hata teriminde olduğu modeldir, formülü denklem 5’de verilmiştir (Elhorst, 2014, Yıldırım ve Kantar, 2019),

$$y = \rho W y + X\beta + W X \theta + u$$

$$u = \lambda W u + \varepsilon \quad (5)$$

burada, W ağırlık matrisi, ρ bağımlı değişken için mekansal ardışık bağımlılık katsayısı, θ mekansal ilişki katsayısı, λ hata terimi için mekansal ardışık bağımlılık katsayısı, β bilinmeyen model parametresi, y bağımlı değişken, X bağımsız değişkendir. Hata terimleri $u \sim N(0, \Sigma)$ ve $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ dağılıma sahiptirler ve Σ formülü denklem 6’da verilmiştir.

$$\Sigma = (I - \lambda W)^{-1} (I - \lambda W')^{-1} \sigma^2 \quad (6)$$

burada W' ağırlık matrisinin transpozunu ifade etmektedir. Eğer MGYM modelinde $\rho=0$, $\lambda=0$ ve $\theta=0$ alınırsa klasik EKK modeli oluşmaktadır.

Mekânsal ardışık bağımlı model (MABM) mekânsal bağımlılığın bağımlı değişkende olduğu modeldir. MGYM modelinde $\lambda=0$ ve $\theta=0$ alınırsa MABM modeli oluşur ve formülü denklem 7'de verilmiştir,

$$y = \rho W y + X \beta + \varepsilon \quad (7)$$

burada, W ağırlık matrisi, ρ bağımlı değişken için mekânsal ardışık bağımlılık katsayısı, β bilinmeyen model parametresi, y bağımlı değişken, X bağımsız değişken, ε hata terimidir.

Mekânsal Hata modeli (MHM) mekânsal bağımlılığın hata teriminde olduğu modeldir. MGYM modelinde $\rho=0$ ve $\theta=0$ alınırsa MHM modeli oluşur formülü denklem 8'de verilmiştir,

$$\begin{aligned} y &= X \beta + u \\ u &= \lambda W u + \varepsilon \end{aligned} \quad (8)$$

burada, W ağırlık matrisi, λ hata terimi için mekânsal ardışık bağımlılık katsayısı, β bilinmeyen model parametresi, y bağımlı değişken, X bağımsız değişken, $u \sim N(0, \Sigma)$ ve $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ dağılıma sahip hata terimidir. Σ formülü denklem 6'da verilmiştir.

Mekânsal X Gecikmeli model (MXGM) mekânsal bağımlılığın bağımsız değişkenlerde olduğu modeldir. MGYM modelinde $\lambda=0$ alınırsa MXGM modeli oluşur ve formülü denklem 9'da verilmiştir,

$$y = X \beta + W X \theta + \varepsilon \quad (9)$$

burada, W ağırlık matrisi, θ mekânsal ilişki katsayısı, β bilinmeyen model parametresi, y bağımlı değişken, X bağımsız değişken, ε hata terimidir.

Mekânsal Ardışık Bağımlı Birleşik model (MABBM) mekânsal bağımlılığın hem bağımlı değişkende hem de hata teriminde olduğu modeldir. MGYM modelinde $\theta=0$ alınırsa MABBM modeli oluşur ve formülü denklem 10'da verilmiştir,

$$\begin{aligned} y &= \rho W y + X \beta + u \\ u &= \lambda W u + \varepsilon \end{aligned} \quad (10)$$

burada, W ağırlık matrisi, ρ bağımlı değişken için mekânsal ardışık bağımlılık katsayısı, λ hata terimi için mekânsal ardışık bağımlılık katsayısı, β bilinmeyen model parametresi, y bağımlı değişken, X bağımsız değişken, $u \sim N(0, \Sigma)$ ve $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ dağılıma sahip hata terimidir. Σ formülü denklem 6'da verilmiştir.

Mekânsal Durbin Hata modeli (MDHM) mekânsal bağımlılığın hem bağımsız değişkende hem de hata teriminde olduğu modeldir. MGYM modelinde $\rho=0$ alınırsa MHM modeli oluşur ve formülü denklem 11'de verilmiştir,

$$\begin{aligned} y &= X \beta + W X \theta + u \\ u &= \lambda W u + \varepsilon \end{aligned} \quad (11)$$

burada, W ağırlık matrisi, θ mekânsal ilişki katsayısı, λ hata terimi için mekânsal ardışık bağımlılık katsayısı, β bilinmeyen model parametresi, y bağımlı değişken, X bağımsız değişken, $u \sim N(0, \Sigma)$ ve $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ dağılıma sahip hata terimidir. Σ formülü denklem 6'da verilmiştir.

Mekânsal Durbin modeli (MDM) mekânsal bağımlılığın hem bağımlı değişkende hem de bağımsız değişkende olduğu modeldir MGYM modelinde $\lambda=0$ alınırsa MDM modeli oluşur ve formülü denklem 12'de verilmiştir,

$$y = \rho W y + X \beta + W X \theta + \varepsilon \quad (12)$$

burada, W ağırlık matrisi, ρ bağımlı değişken için mekânsal ardışık bağımlılık katsayısı, θ mekânsal ilişki katsayısı, β bilinmeyen model parametresi, y bağımlı değişken, X bağımsız değişken, ε hata terimidir.

Coğrafi Ağırlıklandırılmış Regresyon (CAR) her bir bölgeye göre regresyon denklemi kurarak modelleme yapar, formülü denklem 13'de verilmiştir (Zeren ve Yurtkur, 2012),

$$y_i = \sum_{j=0}^m \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (13)$$

burada, $i=1,2,\dots,n$ coğrafi birim sayısı, m parametre sayısı, W ağırlık matrisi, y bağımlı değişken, X bağımsız değişken, β bilinmeyen model parametresi, ε hata terimidir. i . birime ait lokal parametre ise denklem 14 ile tahmin edilir,

$$\hat{\beta}_i = (x' W_i x)^{-1} x' W_i y \quad (14)$$

Modellerin performansları LogOlabilirlik (LO), Akaike Bilgi Ölçütü (ABÖ), düzeltilmiş Akaike Bilgi Ölçütü (ABÖd), Olabilirlik Oran (OO), Wald ve R^2 ölçütlerine göre değerlendirilecektir. Mekânsal ekonometrik modellerde "vezir" komşuluk yani bir ilin tüm sınır komşularını hesaplamaya dahil eden komşuluk türü kullanılırken, CAR'da ise "Altın Arama" yöntemi ile 6 komşuluk kullanılmıştır.

Model hesaplamalarında gece ışıklarının logaritması alınarak log-doğrusal model kullanılmıştır. Gece ışıkları verisi ArcGIS Pro yazılımında ("ArcGIS Pro tool reference", 2020)

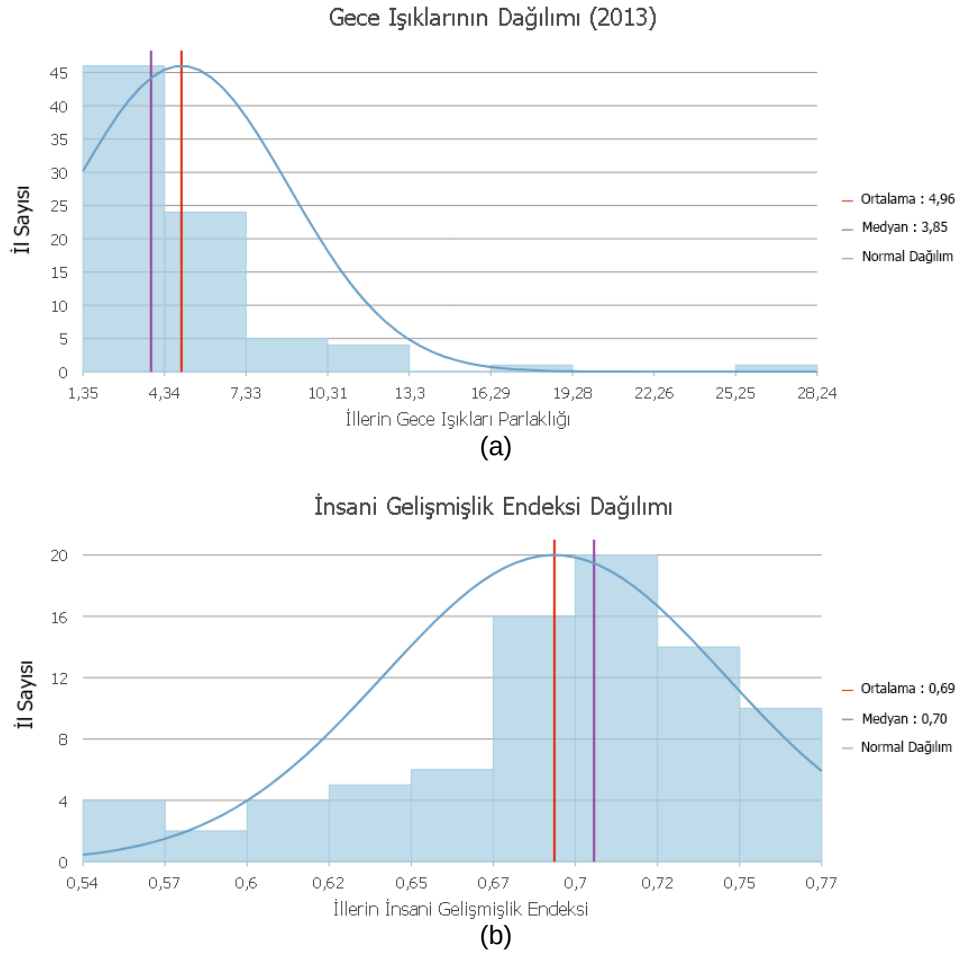
Alan İstatistikleri analizleri “Alan İstatistikleri” aracı ile, konum zaman küpleri analizleri “Konum Zaman Küpü” aracı ile, “Getis-Ord” sıcak nokta ve “Moran I” aykırı değer analizleri “en uygun sıcak nokta” ve “en uygun aykırı değer” aracı ile, CAR analizleri ise “Mekansal İstatistikler” araç kutusu ile analiz edilerek il bazında değerleri hesaplanmıştır. EKK ve mekânsal ekonometrik modeller de “R” yazılımında “spdep” kütüphanesi (“The Comprehensive R Archive Network”, 2020) kullanılarak hesaplanmıştır.

4. ANALİZLER VE DEĞERLENDİRME

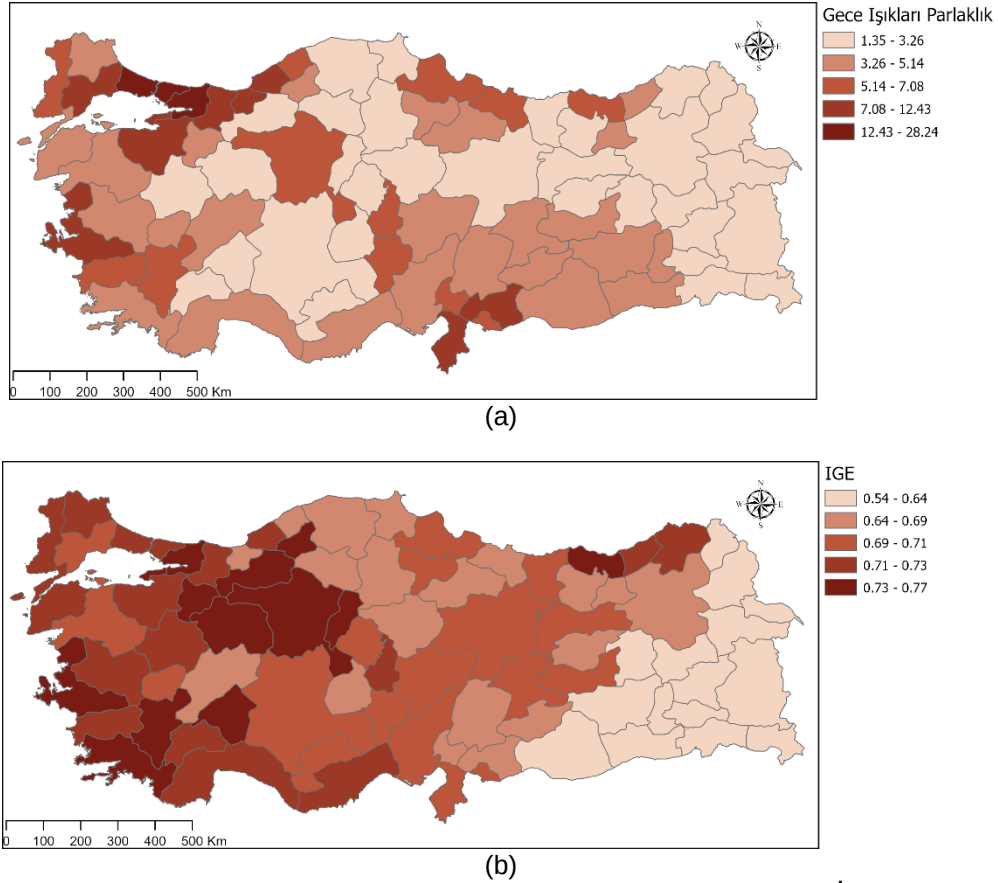
Analizlerde gece ışıkları verisinin logaritması kullanılmıştır. İlk olarak konum zaman küpü analizleri yapılarak yıllara göre değişim incelenmiş, daha sonra 2013 yılı için “Getis Ord” ve “Moran I” istatistikleri hesaplanarak keşfedici mekansal analizler yapılmıştır. Modelleme kısmında ise mekânsal ekonometrik modeller ve coğrafi ağırlıklandırılmış modeller kullanılmıştır.

İl bazında gece ışıklarının histogramı ve dağılımı Şekil 2 (a)’da ve İGE’nin dağılımı da Şekil 2 (b)’de verilmiştir. Grafiklerde yatay ekseninde gece ışıklarının ve İGE’nin illere göre değerleri yer almaktadır. Grafikler incelendiğinde gece ışıkları için 0-7 değerleri arasında yığılma olduğu ve sağa çarpık bir dağılıma sahip olduğu görülürken İGE ise hafif sola çarpık bir dağılıma sahiptir. Her iki veri setinde de ortalama ve medyan değerleri birbirine yakın çıkmıştır.

Doğal kırılım haritaları 2013 yılı için Şekil 3’te verilmiştir. Gece ışıkları baz alındığında Ege ve Marmara’da yoğunluklar görülürken orta Anadolu da Ankara, Nevşehir ve Niğde de, Karadeniz’de Trabzon, Ordu, Samsun ve Zonguldak’ta, Akdeniz’de ise Hatay ve Gaziantep’de yoğunluklar görülmektedir. İGE ise doğudan batıya doğru artmaktadır. Endeksin en yüksek değerleri aldığı iller ise Kocaeli, Bilecik, Eskişehir, Bolu, Ankara, Kırıkkale, Isparta, Denizli, Muğla ve İzmir’dir.



Şekil 2. Dağılım ve histogram grafikleri (a) Gece ışıklarının illere göre dağılımı (b) İGE’nin illere göre dağılımı.



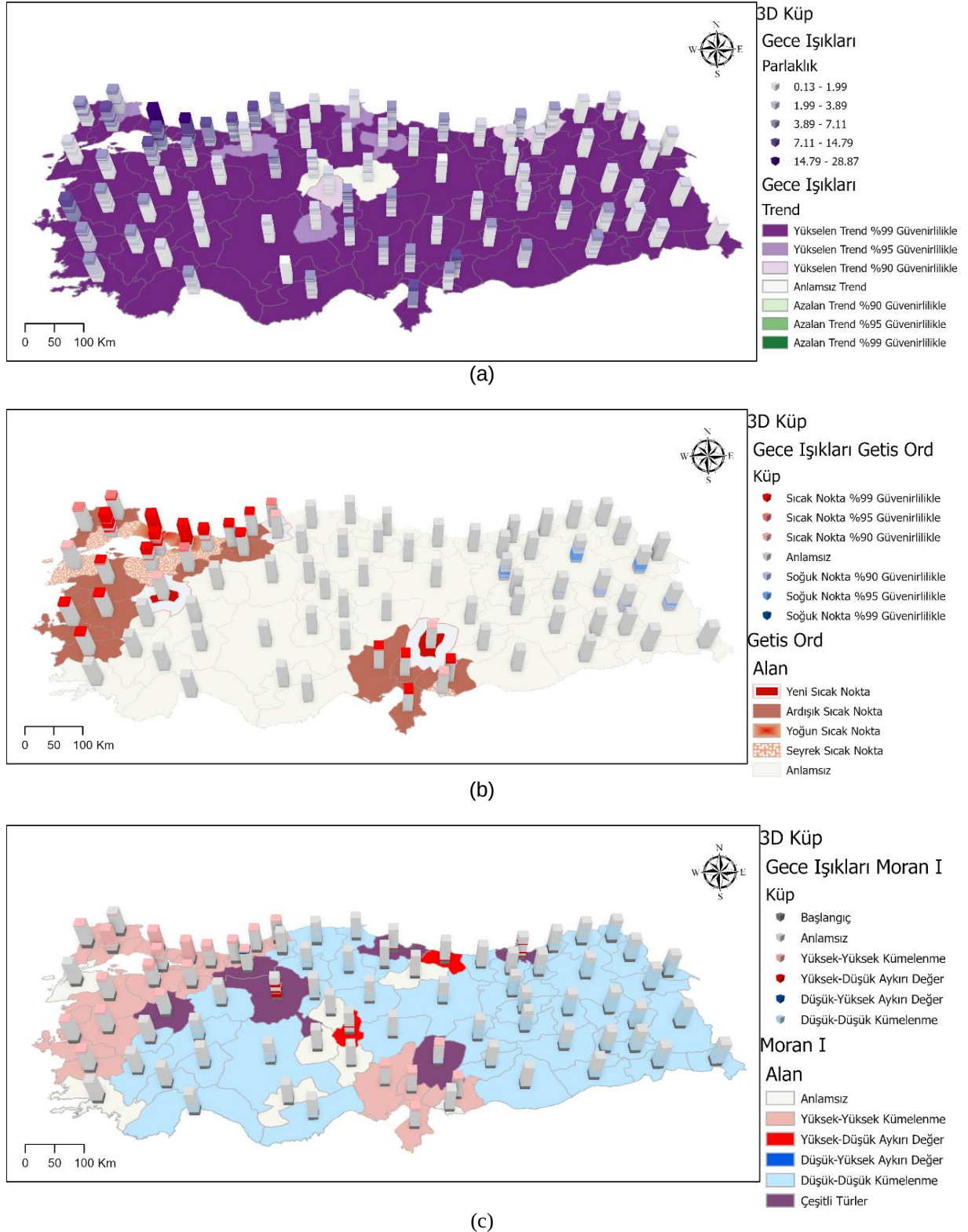
Şekil 3. Doğal kırılım haritaları (2013 yılı) (a) Gece ışıkları (b) İGE.

Gece ışıkları için 1992-2013 yıllarını kapsayan 14 yıllık konum zaman küpü analizleri Şekil 4'de verilmiştir. Şekil 4(a) değer-trend analizi incelendiğinde İstanbul'un her zaman en yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Anadolu'da trendlerin anlamlı olduğu görülürken sadece Yozgat ve Kırıkkale'de değişimler anlamlı değildir. Trendlerin pozitif eğilime sahip olmasının başlıca nedenleri arasında kentlerde yerleşim alanların genişlemesi ve konut sayısının artması verilebilir. Ayrıca Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre 1994 yılında ülke genelinde kayıtlı 2.861.640 otomobil varken 2013 yılında 9.283.923 otomobile çıkması düşünüldüğünde artan araçların gece ışıkları üzerinde pozitif bir etkisi vardır. Türkiye'de otomobil sahipliği doyma seviyesine ulaşmadığı için otomobilleşme yaygınlaşmış ve yerleşmelerin büyüme dinamiklerini de etkilemişlerdir (Şenbil ve Yetişkul, 2020).

"Getis-Ord" sıcak nokta analizi Şekil 4(b) dikkate alındığında Marmara ve Ege bölgeleri ile Akdeniz'in doğusunda anlamlı farklılıklar görülmektedir. İstanbul ve Kocaeli'nde yoğun sıcak noktalar görülmüştür. Bunun başlıca sebepleri arasında bu bölgelerdeki yoğun

sanayileşme ve ekonomik faaliyetlerden kaynaklı alansal genişlemeler gelebilir. Kütahya, Kahramanmaraş, Bartın ve Karabük'te ise yeni sıcak nokta yani son yıllarda sıcak noktalar görülmüştür. Edirne, Kırklareli, Zonguldak, Düzce, Bolu, Bilecik, Balıkesir, Manisa, İzmir, Aydın, Adana, Osmaniye, Gaziantep ve Hatay'da ardışık sıcak noktalar görülmektedir. Çanakkale, Tekirdağ, Sakarya, Bursa ve Kilis'de seyrek sıcak noktalar görülmüştür. Küpler incelendiğinde genel olarak son yıllarda anlamlılık vardır ve bu nedenle trend de pozitiftir.

Moran aykırı değer analizi Şekil 4(c) incelendiğinde Nevşehir ve Ordu'da aykırı değer gözlemlenmektedir. Bu iki il için komşu illerdeki gece ışığı ortalamaları düşük iken kendilerinde çok yüksektir, yani Yüksek-Düşük kümelenme söz konusudur. Bu iki ilde yıllar içerisindeki gelişim komşularından daha fazla olmuştur. Ankara, Bolu, Kütahya, Kahramanmaraş, Trabzon ve Samsun'da bazı yıllarda Yüksek-Düşük kümelenme da Düşük-Yüksek kümelenme görülmüştür. Muğla, Karaman, Niğde, Aksaray, Kırşehir ve Tokat'ta herhangi anlamlı bir kümelenme veya aykırı değer görülmemektedir.



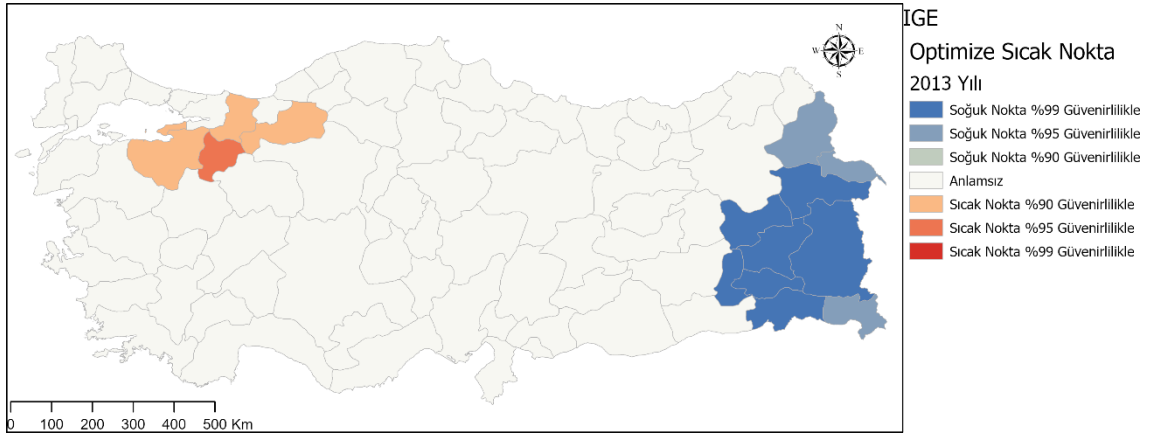
Şekil 4. Konum zaman küpleri (a) Değer-Trend analizi (b) Sıcak nokta analizi (c) Aykırı değer analizi.

2013 yılı için gece ışıkları ve İGE'nin "Getis-Ord" sıcak nokta haritaları Şekil 5'de verilmiştir. Gece ışıkları haritası Şekil 5(a) incelendiğinde Marmara bölgesinde sıcak noktalar görülmektedir ki bu bölgede sanayi tesisleri oldukça gelişmiş

olup buna bağlı olarak da ticaret ve nüfus oldukça fazladır. Ayrıca Marmara Türkiye'nin en çok göç alan bölgesidir. Marmara'da sadece Çanakkale anlamsız çıkmıştır.



(a)



(b)

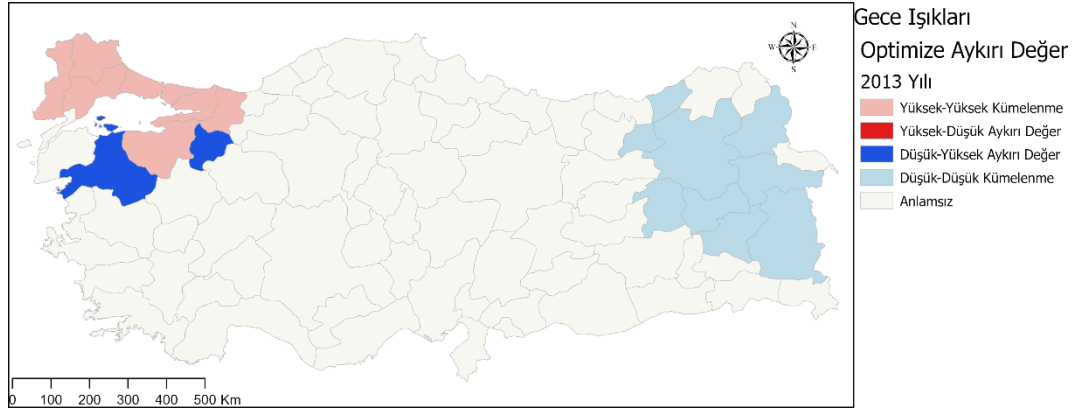
Şekil 5. Sıcak nokta haritaları (a) Gece ışıkları (b) İGE.

İGE'de ise Doğu Marmara'da Bursa, Yalova, Bilecik, Bolu ve Sakarya'da sıcak noktalar görülürken Doğu Anadolu'da ise soğuk noktalar görülmektedir. İGE eğitim, sağlık ve gelir endeksleri baz alınarak hesaplandığından Şekil 5(b) Doğu Anadolu'da bu değerlerin Türkiye geneline göre daha düşük olduğunu ifade etmektedir.

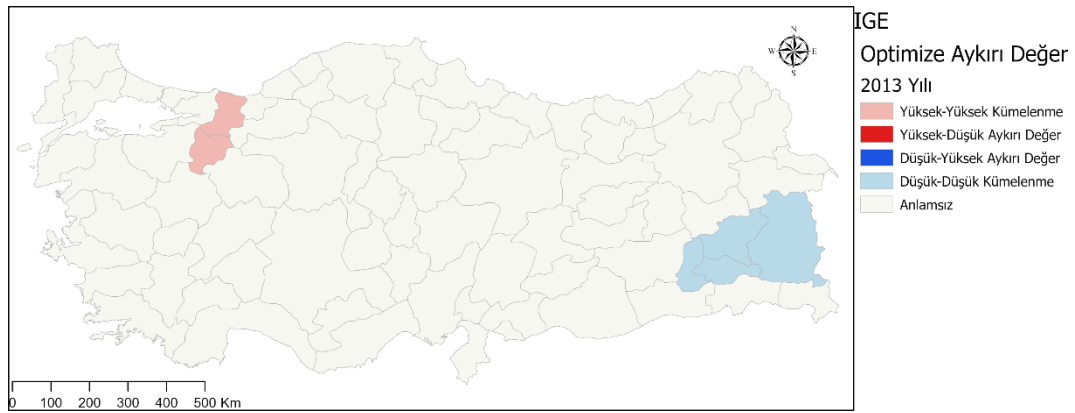
2013 yılı için gece ışıkları ve İGE'nin Moran aykırı değer haritaları Şekil 6'da verilmiştir. Gece ışıkları haritası Şekil 6(a) incelendiğinde Bilecik ve Balıkesir'de düşük-yüksek kümelenme görülmektedir. Bunun anlamı bu iki il çevresi yüksek ortalama ışık değerine sahipken kendileri düşük değere sahiptir. Bursa, Yalova, Sakarya,

Kocaeli, Edirne, Kırklareli, Tekirdağ ve İstanbul'da yüksek-yüksek kümelenme görülmektedir. Yani bu iller çevre illere göre daha yüksek gece ışıkları parlaklığına sahiptirler. Anadolu'nun doğusundaki illerde ise düşük-düşük kümelenmeler görülmektedir. Bu illerdeki gece ışığı parlaklık değerleri çevre illere göre daha küçüktür.

İGE'de ise aykırı değer bulunmamaktadır. Bilecik ve Sakarya'da yüksek-yüksek kümelenme görülmektedir. Bu illerde İGE değerleri komşu illere göre daha yüksektir. Van, Bitlis, Siirt ve Batman'da düşük-düşük kümelenme görülmektedir. Bu illerdeki İGE çevre illere göre daha düşüktür.



(a)

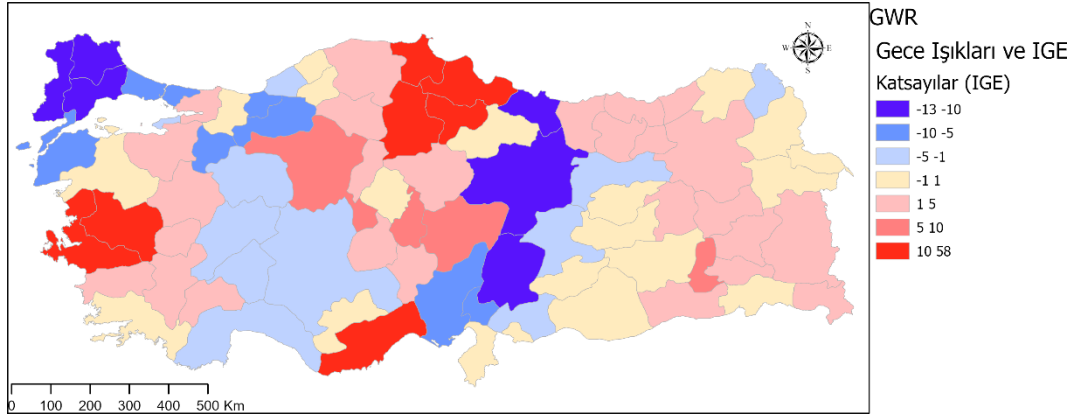


(b)

Şekil 6. Aykırı değer haritaları (a) Gece ışıkları (b) İGE.

Coğrafi Ağırlıklandırılmış Regresyon sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. CAR sonuçlarına göre gece ışıkları ile İGE İstanbul'da negatif katsayıya sahipken Ankara'da pozitif katsayıya sahiptir. Trakya'da ise negatif olmuştur. Katsayının en yüksek çıktığı iller Mersin başta olmak üzere sırasıyla Sinop, Samsun, Çorum, Amasya, İzmir ve Manisa olmuştur. Bu illerde gece ışıkları parlaklığının bir birim artışı İGE'ni en az %10 oranında artırmaktadır. En düşük çıktığı iller ise sırasıyla Edirne, Kahramanmaraş, Kırklareli, Sivas, Tekirdağ ve Ordu olmuştur. Ayrıca Konya, Afyonkarahisar ve Antalya çevresinde de negatif katsayıların kümelendiği görülmektedir. Muğla, Balıkesir, Sakarya, Bartın, Karabük, Kırşehir, Karaman, Tokat, Hatay, Kilis, Artvin, Iğdır ve çevre illeri ile Şanlıurfa ve çevre illerinde katsayılar sıfıra yakın çıkmıştır. Bu illerde gece ışıkları parlaklığının artışı veya azalışı İGE'ni maksimum %1 oranında değiştirecek bir etkiye bulunmaktadır. İzmir ve Mersin'de hem sanayi gelişmiştir hem de birer turizm kentleri olduğu için

hareketlilik oldukça fazladır ve turizm tesislerinden dolayı yapılaşma da yayılmıştır. Özellikle bu illerdeki turizm faaliyetleri dikkate alındığında artan gece ışığı bölgede daha fazla turiste dikkat çekebileceğinden İGE de pozitif yönde etkilenebilecektir. Diğer illere göre dar bir alana sıkışmış olan İstanbul'da nüfusun ve iş merkezlerinin fazlalığı gece ışıklarının yoğunluğunu etkilemiş olmasına rağmen Türkiye'deki ekonomik değerlerin bu ilde yoğunlaşmasından dolayı parlaklık burada İGE'nin açıklanmasında yetersiz kalabilmektedir. Sivas İGE bakımından orta sıralarda yer alırken gece ışıkları parlaklığı bakımından alt sıralarda yer almış ve bu nedenle de gece ışıkları ile bağımlı değişken arasında ters ilişki ortaya çıkmıştır. Antalya'nın turizme doymuş bir kent olması yani turizmdeki artışın ekonomik ve sosyal göstergelere eskisi kadar çok daha fazla anlamlı etkisi olmaması (Aktaş vd., 2017) bu ilin katsayısının negatif çıkmasını etkilemiş olabilir.



Şekil 7. Coğrafi ağırlıklandırılmış regresyon katsayıları.

Mekânsal bağıllığı Türkiye genelinde görmek için “Global Moran I” testleri yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’e göre bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında maksimum teorik değerin 1 olduğu dikkate alındığında orta derecede mekânsal bir ilişki söz konusudur. Ayrıca “Breusch-Pagan (BP)” testine göre EKK artıklarında değişen varyans vardır (BP test değeri = 4.872, p-değeri = 0.0273) ve “Jarque-Bera (JB)” testine göre EKK artıkları normal dağılıma sahip değildir (JB test değeri = 5.527, p-değeri = 0.0631). Mekânsal etkileşimden dolayı BP ve JB test sonuçları böyle çıkmış olabilir. Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında mekânsal ekonometrik modeller bu veri seti için uygulanabilir (Anselin, 1988).

Tablo 1. Moran I istatistikleri

Değişkenler	Moran I İstatistiği
Gece Işıkları	0,513***
İGE	0,691***

Anlamlılık düzeyleri *****, 0,01 *** 0,05 ** 0,1

Tablo 2’de mekânsal ekonometrik modellerin tahmin sonuçları gösterilmektedir. Burda lag.İGE bir ilin komşuluğundaki ağırlıklandırılmış İGE değerlerini ifade etmektedir. İGE EKK, MHM, MABM, MABBM ve MDHM’de anlamlı çıkarken MXGM, MDM ve MGYM’de anlamsız çıkmıştır. Ayrıca lag.İGE tahminleri anlamsız çıktığından bir

Tablo 2. Katsayı tahminleri

Parametreler	EKK	MHM	MABM	MXGM	MABBM	MDM	MDHM	MGYM
ρ	-	-	0.728***	-	0.527	0.733***	-	0.431
(sabit)	-0,039	0,426	-0,229	-0,280	-0,179	-0,186	-0,467	-0,321
İGE	1,819***	1,177**	0,820**	1,036	1,103*	0,956	1,158**	1,010
lag.İGE	-	-	-	1,132	-	-0,208	1,352	0,468
λ	-	0,745***	-	-	0,367	-	0,737***	0,465

Anlamlılık düzeyleri *****, 0,01 *** 0,05 ** 0,1

bölgedeki İGE komşuluklarındaki İGE değerlerinden etkilenmemektedir. Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında mekânsal ekonometrik modellerden sadece MHM ve MABM anlamlı çıkmışlardır. MHM’de hatalardaki mekansallık katsayısı 0.745 olurken MABM’de bağımlı değişkendeki mekansallık katsayısı 0.728 olmaktadır. Yani bir bölgedeki gece ışıkları komşu bölgelerdeki gece ışıklarından yüksek derecede etkilenmektedir. Her iki modelin de mekansallık katsayısı yüksek ilişkili çıkmıştır. MGYM’de ise hiçbir katsayı anlamlı çıkmamıştır. MABM ve MHM sonuçlarına göre illerdeki İGE değeri arttığında gece ışıklarının parlaklık değeri de artacaktır.

Çalışmada kullanılan EKK, CAR ve mekansal ekonometrik modellerden hangisinin daha iyi olduğuna karar vermek için performans istatistiklerini gösteren değerler Tablo 3’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde CAR ve mekansal ekonometrik modeller kullanmak EKK yöntemine göre R2 değerlerini yükseltmiştir. En düşük ABÖ değeri MABM’de çıkarken en yüksek LO değeri ise MGYM’de çıkmıştır. Fakat OO testine göre katsayılar tüm modellere göre anlamlı olmakla beraber Wald istatistiklerine bakıldığında MHM ve MABM için katsayılar anlamlıdır. Bu nedenle bu veri seti için sadece MHM veya MABM kullanılabilir. ABÖ MABM’de en düşük olduğundan MABM mekansal modeller içerisinde en iyisidir. R2 ve ABÖd baz alındığında bu veri setini en iyi açıklayan yöntem CAR olmuştur.

Tablo 3. Model karşılaştırma istatistikleri

Modeller	R ²	LO	ABÖ	ABÖd	OO	Wald
EKK	0,152	5,038	-6,076	-6,026		
MHM	0,542	23,41	-38,819	-38,769	-36,743***	89,143***
MABM	0,544	23,978	-39,956	-39,905	-37,879***	84,483***
MXGM	0,165	5,682	-5,364	-5,313	-1,287***	
MABBM	0,528	24,677	-39,354	-39,304	-39,278***	0,599
MDM	0,546	24,016	-38,032	-37,981	-37,956***	0
MDHM	0,548	24,091	-38,182	-38,131	-38,105***	0
MGYM	0,527	24,771	-37,542	-37,491	-39,465***	0,994
CAR	0,944			-50,361		

Anlamlılık düzeyleri '***' 0,01 '**' 0,05 '*' 0,1

5. SONUÇ

Elde edilen tüm sonuçlar ve daha önceki çalışmalar (Özer ve Elmalı, 2018, Özpinar ve Koyuncu, 2016, Bruederle ve Hodler, 2018, Elvidge vd., 2012) göstermiştir ki hem gece ışıkları verisinde hem de İnsani Gelişme Endeksi'nde mekânsal etkileşim söz konusudur. Her iki veri setini de mekansal olmayan EKK gibi klasik istatistiksel teknikleri uygulamak yanıltıcı sonuçların elde edilmesine neden olacağından mekânsal yöntemlerin kullanılması daha doğru olacaktır. Ayrıca bu iki değişken arasında da mekânsal bir bağıllığın olduğu analiz sonuçlarından görülmüş olup kurulan modellerden anlamlı olanları belirlenmiştir. Performans kriterlerine göre CAR en iyi sonuçları vermiştir.

CAR sonuçlarına göre Büyükşehirlerden İzmir, Manisa, Mersin ve Samsun'da gece ışıkları ile İGE arasında en yüksek pozitif bir ilişki görülürken, Tekirdağ, Kahramanmaraş ve Ordu'da en düşük negatif bir ilişki görülmektedir. Yani pozitif ilişkilerde İGE değerlerinin artışı gece ışıklarının parlaklığını da artırırken, negatif ilişkili yerlerde ise azaltmaktadır. Negatif etkinin görüldüğü illerde İGE gece ışıklarını açıklamada yetersizdir. Ankara'da CAR katsayısı pozitif çıkarken İstanbul'da negatif çıkmıştır. Bunun nedeni olarak İGE'nin hesaplanmasında kullanılan gelir endeksinin İstanbul'da Türkiye geneline göre orta sıralarda yer alması verilebilir. Gece ışıkları bakımından ise İstanbul üst grupta yer almıştır.

Ayrıca gece ışıkları için yıl bazında değişimler incelendiğinde Anadolu'nun kuzey batısı ve Hatay ili çevresinde sıcak noktalar görülmektedir. Yani buradaki illerde çevre illere göre daha yüksek artışlar gerçekleşmiştir. 2013 yılı baz alındığında en yüksek İGE Eskişehir'de görülürken, en yüksek gece ışıkları parlaklığı İstanbul'da görülmüştür. En

düşük değerlere ise İGE için Ağrı, gece ışıkları parlaklığı için Karaman sahiptir.

Mekansal ekonometrik modellerden MABM dikkate alındığında illerdeki gece ışıkları komşu illerden yüksek derecede etkilenmektedir.

Daha önceki farklı ülkelerdeki benzer ve ülkemizdeki farklı konular için yapılmış çalışmalarda sadece CAR veya mekansal ekonometrik modellerden sadece birkaçı kullanılmış iken bu çalışmada hem CAR hem de tüm mekansal ekonometrik modeller kullanılarak analizler yapılmıştır. Sonuçlar da Türkiye il bazında elde edilmiştir. Gelecek çalışmalarda farklı bağımsız değişkenler ile de gece ışıkları incelenebilir ve iller hakkında farklı açılardan bir bilgi çıkarımı sağlanabilir.

Bu çalışmada gece ışıklarının yıllar içerisindeki değişimleri coğrafi istatistikler yardımıyla incelenmiş olup 2013 yılı için İGE ile modellemesi yapılmıştır. Günümüzde illerin birbirleriyle olan bağlantıları ve etkileşimleri dikkate alındığında coğrafi istatistiksel tekniklerin kullanılmasının performansı artırdığından dolayı gelecek sosyal ve ekonomik çalışmalarda da bu yöntemler kullanılabilir.

ORCID

Vural YILDIRIM  <https://orcid.org/0000-0002-6517-7849>

Kaan KALKAN  <https://orcid.org/0000-0002-2732-5425>

KAYNAKLAR

- Aktaş, S. G., Yüncü, D., ve Kantar, Y. M. (2017). *Spatial distribution of occupancy rate in the hospitality sector in Turkey according to international and domestic tourist arrivals*. A. Saufi, I. Andilolo, N. Othman, ve A. Lew (Eds.), *Balancing Development and Sustainability in Tourism Destinations* (s. 367-376) içinde. Singapur: Springer. doi: 10.1007/978-981-10-1718-6_33.
- Anselin, L. (1988). *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Anselin, L. (1995). Local indicator of spatial association – LISA. *Geographical Analysis*, 27, 93–115. Doi: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x.
- Arbia, G. (2016). Spatial econometrics: a rapidly evolving discipline. *Econometrics*, 4(1), 1-4. doi: 10.3390/econometrics4010018.
- ArcGIS how emerging hot spot analysis works. (2020, 1 Aralık). Erişim adresi: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/space-time-pattern-mining/learnmoreemerging.htm>
- ArcGIS Pro tool reference, (2020, 1 Aralık). Erişim adresi: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.6/tool-reference/main/arcgis-pro-tool-reference.htm>
- Başıhoş, S. (2016). *Gelişmişlik göstergesi olarak gece ışıkları: ulusal ölçekte ve il bazında GSYH tahmini*. Ankara: Türkiye Ekonomi Politikaları Araştırma Vakfı. Erişim adresi: <https://www.tepav.org.tr/tr/yayin/s/964>.
- Bruederle, A. ve Hodler, R. (2018). Night time lights as a proxy for human development at the local level. *PLoS ONE*, 13(9): e0202231. doi: 10.1371/journal.pone.0202231.
- Charris, C., Velilla, R. ve Chaves, L. (2019). Mapping the human development index using nighttime lights inside Brazil. *Associação Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos* 2019, 16-18 Ekim 2019, Rio de Janeiro, Brezilya.
- Doll, C.N. H. (2008). *CIESIN thematic guide to night-time light remote sensing and its applications*. Palisades, NY:Center for International Earth Science Information Network of Columbia. Erişim adresi: https://sedac.ciesin.columbia.edu/binaries/web/sedac/thematic-guides/ciesin_nl_tg.pdf.
- Elhorst, J. P. (2014). *Spatial econometrics: from cross-sectional data to spatial panels*. Heidelberg: Springer.
- Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Anderson, S. J., Sutton, P. C. ve Ghosh, T. (2012). The night light development index (NLDI): a spatially explicit measure of human development from satellite data. *Social Geography*, 7(1), 23-35. doi:10.5194/sg-7-23-2012.
- Elvidge, C.D., Tuttle B.T., Sutton, P.C., Baugh, K.E., Howard, A.T, Milesi, C., ... Nemani, R. (2007). Global distribution and density of constructed impervious surfaces. *Sensors (Basel)*. 7(9), 1962-1979. doi:10.3390/s7091962.
- Getis, A. ve Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189-206. doi: 10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x.
- Gujarati, D. N. (1999). *Temel Ekonometri* (Çev. Ümit Şenesen ve Gülay Günlük Şenesen). İstanbul: Literatür Yayınları.
- Krikigianni, E., Tsiakos, C. ve Chalkias, C. (2019). Estimating the relationship between touristic activities and night light emissions. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 233-246. doi:10.1080/22797254.2019.1582305.
- Manski, C. F. (1993). Identification of endogenous social effects: the reflection problem. *The Review of Economic Studies*, 60, 531-542. doi: 10.2307/2298123.
- Mellander, C., Lobo, J., Stolarick, K. ve Matheson, Z. (2015). Night-time light data: a good proxy measure for economic activity?. *PLoS ONE*, 10(10), 1-18. doi: 10.1371/journal.pone.0139779.
- Ord, J. K. (1975). Estimation methods for models of spatial interaction. *Journal of the American Statistical Association*, 70(349), 120-126. doi: 10.1080/01621459.1975.10480272.

- Özer, H. ve Elmalı, K. (2018). Türkiye'de gece ışıkları ile hesaplanan iktisadi büyümenin mekânsal analizi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 18, 511-524. doi:10.18092/ulikidince.349749
- Özpınar, E. ve Koyuncu E. (2016). *Türkiye'de insani gelişmişlik iller arasında nasıl farklılaşıyor? 81 il için insani gelişmişlik endeksi*. Ankara: Türkiye Ekonomi Politikaları Araştırma Vakfı. Erişim adresi: https://www.tepav.org.tr/upload/files/1467929122-9.81_Il_icin_Insani_Gelismislik_Endeksi.pdf.
- Salvati, L., Guandalini, A., Carlucci, M., ve Chelli, F.M. (2017). An empirical assessment of human development through remote sensing: evidences from Italy. *Ecological Indicators*, 78, 167-172. doi: 10.1016/j.ecolind.2017.03.014.
- Spataru, R. (2018). *Spatial-temporal GIS analysis in public health – a case study of polio disease* (Yüksek lisans tezi, Lund Üniversitesi, Lund, İsveç). Erişim adresi: <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/8963858>
- Şenbil, M. ve Yetişkul Şenbil, E. (2020). Türkiye'de son dönem otomobilleşme: 2007-2018 arası iller bazında analizler. *İdealkent*, 11 (29), 373-405. doi: 10.31198/idealkent.712272
- Tobler, W. (1970). A computer movie simulating urban growth in the detroit region. *Economic Geography*, 46(Supplement): 234–240. doi: 10.2307/143141.
- Uysal, C. (2015), *Detection of urban expansion in turkey by using spectrally unmixed landsat images and nighttime DMSP-OLS images*, (Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul).
- Uysal, C., Maktav, D. ve Small, C. (2018). Mapping urban growth and its relation to seismic hazards in İstanbul. *J Indian Soc Remote Sens*, 46, 1307–1322. doi:10.1007/s12524-018-0799-6
- The Comprehensive R Archive Network, (2020, 1 Aralık). Erişim adresi: <https://cran.r-project.org/web/packages/spdep/index.html>
- Yıldırım, V. ve Kantar, Y.M. (2019). Spatial statistical analysis of participants in the individual pension system of Turkey. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B- Teorik Bilimler*, 7(2), 184-194. doi:10.20290/estubtdb.518706
- Zeren, F. (2011). Mekânsal etkileşim analizi. *İstanbul University Econometrics and Statistics e-Journal*, 0(12), 18-39. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/iuekois/issue/8979/112025>
- Zeren, F. ve Koç- Yurtkur, A. (2012). Türkiye'de telekomünikasyon altyapısının ekonomik gelişmişliğe etkisi: coğrafi ağırlıklı regresyon yöntemi. *Sosyoekonomi*, 17(17), 63-84. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sosyoekonomi/issue/21077/226921>

Arkeolojik Alanların Dokümantasyonunda Fotogrametrik Tekniklerinin Doğruluklarının Karşılaştırmalı Analizi: Konya Yunuslar Örneği (Comparative Analysis of the Accuracy of Photogrammetric Techniques in the Documentation of Archaeological Sites: A Case Study of Konya Yunuslar)

Yunus KAYA¹ , Abdurahman Yasin YİĞİT² , Ali ULVİ³ , Murat YAKAR² 

¹Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü

²Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi / Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

³Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü / Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı
yunuskaya@harran.edu.tr; (ayasinyigit, aliulvi, myakar)@mersin.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 21.05.2020

Kabul Tarihi (Accepted): 04.01.2021

ÖZ

Türkiye'nin bulunduğu coğrafi konum, tarih boyunca birçok medeniyeti bünyesinde barındırmıştır. Bundan dolayı bu topraklar üzerinde yaşamış çeşitli medeniyetlere ait azımsanmayacak sayıda somut kültürel miras hâlâ varlığını sürdürmektedir. Bu kültürel miraslar zamanla doğal ya da doğal olmayan sebeplerden dolayı tahribatlara maruz kalmaktadır. Bu eserlerin istenilen şekilde korunabilmesi için yapılması gereken ilk ve en önemli adım eserlerin dokümantasyonunun yapılmasıdır. Dokümantasyon çalışmalarının hızlı ve güvenilir şekilde tamamlanabilmesi için teknolojiye dayalı olarak büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma; Müzeler Genel Müdürlüğü tarafından Konya ili Yunuslar mahallesinde yürütülen kazı çalışmasında bulunan yaklaşık 1400 yıllık tarihe sahip taban mozaiklerinin ve arkeolojik alanın dokümantasyonu için yersel lazer tarayıcı, sayısal el kamerası ve insansız hava aracından (İHA) elde edilen verilerden yararlanılmıştır. Çalışma sonunda yoğun nokta bulutu verilerinden yararlanılarak kazı alanının dokümantasyonu yapılmıştır. Dokümantasyon sonucunda kullanılan farklı veri toplama tekniklerinin doğrulukları karşılaştırılmıştır. Ayrıca kazı alanı üzerinde belirlenen 18 noktaya ait koordinat değerleri her üç yazılımda da hesaplanmıştır. Lazer tarama verilerinin işlendiği "Scene" yazılımında 3.65 cm, "Photomodeler UAS" ve "Agisoft PhotoScan" yazılımlarında ise sırasıyla 4.64 ve 4.02 cm konum hatası belirlenmiştir. Lazer tarama teknolojisi yeni bir teknoloji olmasına rağmen konum doğruluğu bakımından diğer tekniklere göre üstünlük sağlamaktadır. Maliyet açısından düşünüldüğünde ise yersel fotogrametri ve İHA fotogrametrisi lazer tarama tekniğine oranla daha düşük maliyetli ve veri işleme aşaması daha kısa sürede tamamlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Arkeoloji, Kültürel Miras, Dokümantasyon, Hibrit Teknikler, Nokta Bulutu, Yersel Lazer Tarama, Yersel Fotogrametri, İHA

ABSTRACT

Turkey has hosted many civilizations throughout history. Therefore, many concrete cultural heritage of various civilizations that lived on these lands still exist. These cultural heritages are exposed to destruction

over time due to natural or unnatural reasons. The most important step to be taken in order to protect these works as desired is the documentation of the works. Technology must be used to complete documentation works quickly and reliably. This study includes the documentation of the excavation work carried out in the Yunuslar neighborhood of Konya. In the excavation area, there are floor mosaic and other archaeological details with a history of about 1400 years. For the documentation of the archaeological site, the data obtained from the terrestrial laser scanner, digital hand camera and unmanned aerial vehicle (UAV) were used. At the end of the study, a documentation study was carried out using the dense point data of the excavation site. Accuracy comparison of different data collection techniques used from the documentation result was made. As a result of the study, the coordinate values of 18 points determined on the excavation area were calculated separately from all three software. A 3.65 cm position error was determined in the "Scene" software where the laser scanning data was processed. In the "Photomodeler UAS" and "Agisoft PhotoScan" software, 4.64 and 4.02 cm position error was detected, respectively. Although laser scanning technology is a new technology, it provides superiority over other methods in terms of location accuracy. When it is considered in terms of cost, terrestrial photogrammetry and UAV photogrammetry are completed at a lower cost compared to laser scanning method and the data processing phase is completed in a shorter time.

Keywords: Archeology, Cultural Heritage, Documentation, Hybrid Techniques, Point Cloud, Terrestrial Laser Scanning, Terrestrial Photogrammetry, UAV

1. GİRİŞ

Kültürel ve doğal miras niteliğindeki yapı ve alanlar bize tarihin farklı zamanlarında farklı medeniyetlerden ipuçları vermekte ve hatta destansı olayların izlerini yaşatmaktadır. Türkiye'nin bulunduğu coğrafya, tarihin tüm dönemlerinde çeşitli medeniyetlere ev sahipliği yapmıştır (Eskikurt, 2003; Ulvi, Yakar, Yiğit ve Kaya, 2020). İnsanlığın varoluşundan bu yana yaşadığı alanda izlerini bırakma alışkanlığı, eski dönemlerde inşa edilen ve günümüzde hâlâ

varlığını sürdüren yapıları meydana getirmiştir (Ulvi, Yakar, Yiğit ve Kaya, 2019).

Ayrıca bu miraslar, insanların tarih boyunca biriktirdiği deneyim ve geleneklerin sürekliliğini sağlamasının yanında geleceğin doğru planlanmasına da katkı yapmaktadır (Sekban, Aktarer ve Purçek, 2019; Doğan ve Arıkan, 2013). Ek olarak toplumlar, kültürel miraslarını ulusal kimliklerinin belirleyici unsurları olarak görmektedirler (Phinney, Horenczyk, Liebkind ve Vedder, 2001). Bu tür önemli anıtların korunması ulusal kimliklerin korunmasına eşdeğer kabul edilmektedir. Aslında toplumlar, bu değerleri kültürel mirasları olarak benimsemek için bu unsurların kökeni üzerine bilimsel araştırma faaliyetlerine girişmişlerdir (Ulvi ve diğerleri, 2019).

Kültürel miraslar doğal ya da beşeri sebeplerden dolayı yok olma tehlikesi altındadır (Cömert, Avdan ve Şenkal, 2012; Tercan, 2017). Teknoloji ilerledikçe ve insanoğlu bilim üzerinde daha detaylı çalışmalar yaptıkça bu eşsiz alan ve yapılara olan ilgi artmakta ve onları korumak için yapılan çalışmalar günden güne gelişmektedir. Bu gelişmeler sonucunda ortaya çıkan en önemli çalışmalardan biri de kültürel eserlerin dokümantasyonudur. Tarihi eserlerin dokümantasyonunun yapılması ve sayısal ortama aktarılabilmesi için uzun yıllardır farklı ve çok sayıda teknik kullanılmıştır ancak şu ana kadar kullanılan hiçbir teknik fotoğraf çekmekten daha pratik çözümler sunamamıştır (Ulvi ve diğerleri, 2019).

Yapılan birçok kazı çalışmasında bulunan mozaik vb. hassas tarihi kalıntıların ortaya çıkarılması, temizlenmesi ve dokümantasyonun yapılması uzun süreçler almaktadır. Tarihi alanların kazı işlemleri yapılırken meydana gelebilecek olası doğal ve beşeri faktörler alanda tahribatlara yol açabilmektedir. Bu bağlamda, hem kültürel mirasların ortaya çıkarılması hem de çıkarılan mirasın korunması ve belgelenmesi farklı disiplinler tarafından araştırma konusu olmaktadır.

Bir tarihi eserin korunması yapının görsel ve sayısal verilerinin elde edilmesiyle başlar. Yapıya veya alana ait görsel ve metrik değerler mümkün olduğunca hızlı ve yapıya zarar vermeyecek şekilde toplanmalıdır. Bu sebepten dolayı gelişen teknoloji koşullarının da yardımıyla tarihi eserlerin dokümantasyonunda çeşitli teknikler kullanılmaya başlanmıştır (Pakben, 2013; Mohammed, 2016; Gürleyen, 2020). Bu tekniklerden biri de çağımızın önemli teknolojilerinden olan lazer ışını ve fotoğrafın bütünleşik halde kullanılmasıdır. Bu

şekilde tarihi yapıya ilişkin çok sayıda veri yeterli hassasiyetle ve yapıya fiziki temas olmaksızın elde edilebilmekte ve gerekli yazılımlar yardımıyla objenin sayısal verileri ve 3 boyutlu (3B) modeli elde edilebilmektedir.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte dokümantasyon çalışmalarında geleneksel teknikler yerini modern tekniklere bırakmaktadır (Ulvi, Yakar, Yiğit ve Kaya, 2019; Şenol, Memduhoğlu ve Ulukavak, 2020). Modern ve teknolojik dokümantasyon teknikleri; deformasyonların tespitinde, tarihi yapıların ölçülüp çizilmesinde ve restorasyon projelerinin hazırlanmasında geleneksel tekniklere göre zaman ve maliyet yönünden avantaj sağlamaktadır. Teknolojinin bu alanda etkin kullanımı ile dokümantasyon tekniklerine yeni bakış açıları getirilmiştir. Özellikle sayısal platformlarda 3B model ile farklı dokümantasyon tekniklerinin kullanımı artmıştır.

Fotogrametri tekniği, eserin özelliklerini nesneye temas etmeden 3B olarak yeniden belirlemeye yarayan bir yöntem (Kraus, 2007; Ulvi ve Yiğit, 2020) olmasından dolayı dokümantasyon çalışmalarında da sıklıkla tercih edilmektedir. Bu noktada fotogrametri tekniği yıllardır arkeolojik ölçmeler, kültürel mirasın dokümantasyonu ve 3B modellenmesi uygulamalarında hızlı, verimli, ekonomik ve güvenilir bir biçimde veri sağladığı için etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Uslu, Polat, Toprak ve Uysal, 2016; Uslu ve Uysal, 2017; Şenol ve diğerleri, 2017; Zeybek ve Kaya, 2020).

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında kültürel mirasın dokümantasyonunda farklı yaklaşımlar kullanılmıştır. Sztwiertnia, Ochalek, Tama ve Lewinska (2019), yersel lazer tarayıcı ve fotogrametri yöntemini Yapı Bilgi Modelleme (YBM) yaklaşımıyla birleştirerek Kültürel Miras Yapı Bilgi Modellemesi (KMYBM) yaklaşımını öne sürmüştür. Poux, Billen, Kasprzyk, Lefebvre ve Hallot (2020) ise arkeolojik sit alanının sayısal yönetimi için 3B nokta bulutu veri setine dayanan KMYBM yaklaşımını önermişlerdir.

Shao ve diğerleri (2019), Çin'deki önemli kültürel miras türlerinden biri olan Huizhou tarzı antik mimari yapıların yaşlarını belirlemek için hiperspektral LIDAR kullanmışlardır. Gautier ve diğerleri (2020), LIDAR sistemlerine alternatif olarak düşük maliyetli derinlik algılama kameralarının doğruluklarını araştırmıştır. Brandolini ve Patrucco (2019), düşük maliyetli mobil cihaz kamerası ile farklı açılara sahip tarihi harita görüntülerinden SfM (Structure from motion/Hareketten yapı) tabanlı yazılımlar ile tarihi

alana ait ortofoto üretmiştir. Peña-Villasenin, Gil-Docampo ve Ortiz-Sanz (2019), SfM ve yersel lazer tarama teknolojilerini petroglifleri belgelemek için kullanmışlardır. Moyano, Nieto-Julían, Bienvenido-Huertas ve Marín-García (2020) ise kültürel mirasın yapı bilgi modellemesi ile belgelenmesi için yersel lazer tarama ve SfM yöntemlerinin geometrik doğruluklarını araştırmıştır. Frodella ve diğerleri (2020), Vardzia, Gürcistan'da bulunan Rupestrian kültürel mirasını modellemek için kızılötesi termografi ve İHA tabanlı sayısal fotogrametri tekniklerini kullanmışlardır. Randazzo ve diğerleri (2020), Güney Calabira'daki San Domenico kilisesinin hasar tespiti için fotogrametrik yöntemin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Peña-Villasenin, Gil-Docampo ve Ortiz-Sanz (2020), tarihi bir bina cephesinin modellenmesi için "Agisoft Photoscan", "Pix4D" ve "Autodesk Remake" yazılımlarının performansını karşılaştırmıştır.

Fotogrametri tekniği ile elde edilen sonuç ürünler sayesinde kazı sezonları arasında veya kazı sezonu tamamlandıktan sonra yararlanabilecek bilgi kaynağı elde edilebilmektedir. Arkeolojik alanlarda ortaya çıkan mozaikler bir sezondan diğerine çok kolay değişime uğrayabilmektedir. Bu nedenle dokümantasyon, koruma çalışmalarının gerçekleştirilmesinde de önemli bir araç niteliği taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı ileri belgeleme araçlarından biri olan fotogrametrik tekniklerin

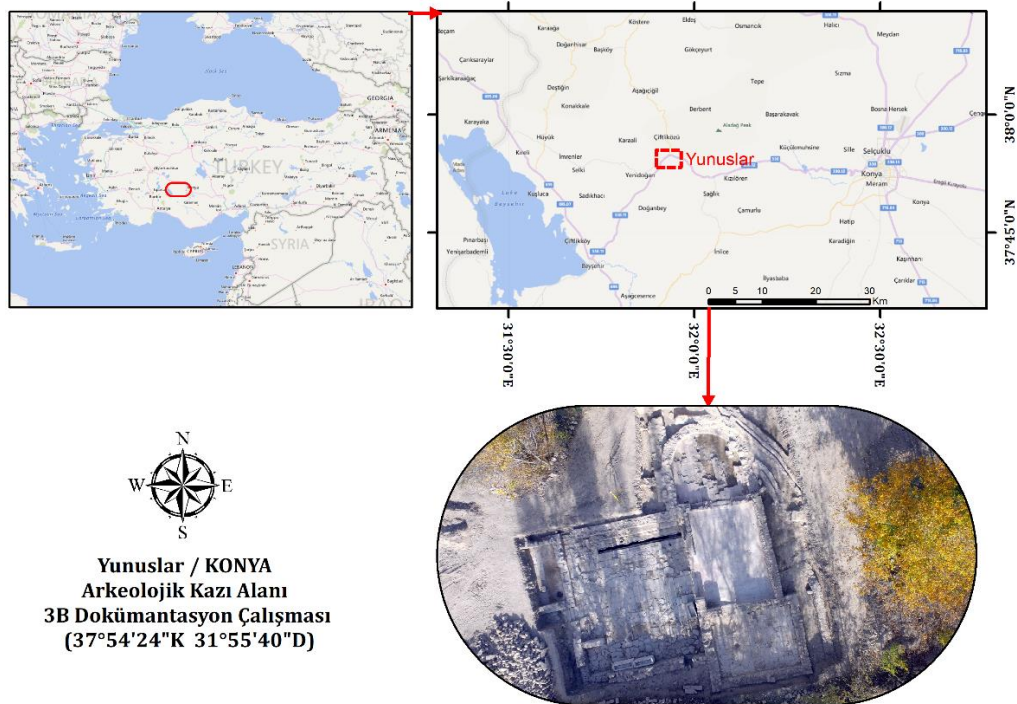
arkeolojik kazı alanlarında kullanımını araştırmaktır. Çalışmada bu amaç doğrultusunda hem yersel lazer tarayıcı ile hem de İHA ve yersel fotoğraflar kullanılarak 3B nokta bulutu ve 3B model üretilmiştir. Çalışma sonunda üç farklı veri toplama tekniği ile elde edilen sonuç ürünlerin doğruluk araştırılması yapılmıştır.

Bu makale 25-27 Nisan 2019 tarihinde Aksaray'da yapılan 10. TUFUAB Teknik Sempozyumu'nun Tam Metin Bildiri Kitabında yayımlanan (s. 70-76) "Arkeolojik Alanların Dokümantasyonunun Yersel Lazer Tarama ve İHA Teknikleri ile Elde Edilmesi: Konya Yunuslar Örneği" başlıklı bildiriden hazırlanmıştır (Ulvi, Yakar, Yiğit ve Kaya, 2019).

2. MATERYAL METOT

a. Çalışma Alanı

Çalışmada nokta bulutu ve 3B modeli üretilen kazı alanı, Konya-Beyşehir arasında, Konya il merkezine 60 kilometre, Beyşehir ilçe merkezine 30 kilometre uzaklıkta Yunuslar Mahallesi'nin merkezinde bulunan bir alandır (Şekil 1). Yapılan kazı alanına ilişkin mevcut kaynaklarda 'Konan' ismi geçmektedir. Daha önce yonca tarlası olarak kullanılan arazide, insan, hayvan figürleri ve kitabenin yer aldığı 1400 yıllık olduğu belirtilen taban mozaikler mevcuttur ("Konya'da 1400 Yıllık Aslan", 2016).



Şekil 1. Kazı Alanının Konumu.

b. Materyal

Çalışmada arkeolojik kazı alanına ilişkin geometrik veriler yersel lazer tarayıcı ve elektronik uzaklık ölçer ile, görsel veriler ise hem İHA hem el kamerası ile temin edilmiştir. Arkeolojik alanın dokümantasyon çalışmasında kullanılan cihazlara ilişkin detaylı bilgi aşağıda verilmiştir.

(1) Lazer Tarayıcı

Yeni nesil veri toplama tekniği olan lazer tarama teknolojisi, arazi detay noktalarının 3B olarak koordinatlandırılmasında oldukça kullanılan ve hassas bir tekniktir (Ulvi ve diğerleri, 2019).

Çeyrek asırdan bu yana, Yersel Lazer Tarama (YLT) tekniği; mühendislik yapıları, mimarlık, yer bilimi, trafik, maden ve peyzaj gibi pek çok alanda sayısal verinin temininde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. 3B üretilen veriler yüksek hassasiyet ve doğruluktadır (Uray, Varlık ve Metin, 2018; Zeybek ve Kaya, 2020).

Bu çalışmada lazer tarama işlemi "FARO Focus3D X 330" tarayıcısı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Lazer tarayıcıya ait temel özellikler Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 2. "FARO Focus3D X 330" ("Faro", t.y.).

Tablo 1. "FARO Focus3D X 330" Teknik Özellikleri ("Faro", t.y.)

Öznitelik	Değer
Lazer sınıfı	1
Ölçüm hızı	Saniyede
Mesafe	976,000 noktaya kadar
Mesafe hatası	0.6-330m
Mesafe hatası	± 2mm
Multi-Sensör	GPS, Pusula
Çift Eksenli Kompensatör	Yükseklik Sensörü
Entegre renkli kamera	Var
Boyut	70 mio. piksele kadar
Ağırlık	240 x 200 x 100mm
Tarayıcı kumanda	5,2 kg
	Dokunmatik ekran

(2) Elektronik Uzunluk Ölçer

Kazı alanında elde edilen verilerin anlamlı ve sağlıklı bir şekilde birleştirilebilmesi için arazinin karakteristik noktalarının ölçülmesi gereklidir. Aynı zamanda farklı tekniklerle toplanan verilerin karşılaştırılması için ortak bir koordinat sisteminde çalışılması gerekmektedir. Bu işlem için elektronik uzunluk ölçer (TOPCON KS-102 Elektronik Takeometre) kullanılmıştır (Şekil 3). TOPCON KS-102 teknik özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.



Şekil 3. TOPCON KS-102.

Tablo 2. TOPCON KS-102 Teknik Özellikleri

Özellik
Tek prizma ile 2300 m mesafe
Mesafe hassasiyeti 2mm + 2ppm
Çift taraflı klavye
IP54 Su geçirmezlik standardı
Yol programı
230 m reflektörsüz mesafe
Dahili 24.000 nokta hafıza
Tamamen Türkçe menü
Tek batarya kullanım süresi 14 saat
Detay alım (Koordinatlı, açısı mesafe)
En kesit & Alan hesabı

(3) Sayısal El Kamerası

Kazı alanının yersel fotogrametri tekniği ile dokümantasyonu ve 3B modelinin oluşturulabilmesi için çalışma alanının tamamını kapsayan bindirmeli fotoğraflara ihtiyaç vardır. Bu amaçla yer merkezli olmak üzere arazinin fotoğraf verilerinin toplanması için sayısal el kamerası kullanılmıştır (Şekil 4). Çalışmada kullanılan sayısal el kamerasına ait teknik bilgiler Tablo 3'te gösterilmiştir.



Şekil 4. “Pentax Optio RZ18” fotoğraf makinesi (“Digicamb”, t.y.).

Tablo 3. “Pentax Optio RZ18” teknik özellikleri Digicamb. (“Digicamb”, t.y.)

Özellik	Değer
Toplam megapiksel	16.6
Maks. görüntü çözünürlüğü	4608 x 3456
Optik & sayısal yakınlaştırma	18x & Evet
Odak uzaklığı	25 - 450 mm
Maksimum açıklık	f3.5 - f5.9
Ağırlık	190g
Boyut	109x61x36 mm

(4) İHA

Özellikle yersel fotogrametri tekniği ile dokümantasyon ve 3B modelleme çalışmasında yer merkezli fotoğraf çekimlerinde çeşitli eksiklikler oluşmaktadır. Bu sebeple teknolojinin gelişmesi ile hemen hemen her alanda kullanılan İHA’lar yardımıyla havadan fotoğraf toplama işlemi bu eksiklikleri büyük ölçüde kapatmaktadır. Bu amaçla çalışma alanına ait havadan fotoğraflama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Çalışmada kullanılan İHA’ya ait teknik bilgiler Tablo 4’te gösterilmiştir.



Şekil 5. İHA ile hava fotoğrafların çekim anı.

Tablo 4. “Phantom 3 Professional” teknik özellikleri (“Dron market”, t.y.)

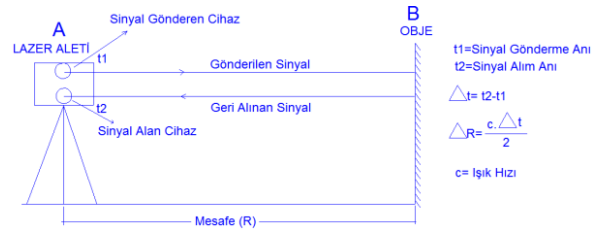
Özellik	Değer
Ağırlık	1.280 Gram
Maks. Hız (Tırmanış/İniş)	16 m/s & 5 m/s – 3 m/s
Kamera & Video	12.76 MP & 4K
Maks. İrtifa	6.000m
Uçuş Süresi	Yaklaşık 23 Dk
Çalışma Isısı	40 C
Navigasyon	GPS/GLONASS

c. Metot

Çalışmada üç farklı veri toplama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemlerden lazer tarama yöntemi ayrı başlık altında anlatılırken İHA ve yersel fotogrametri yöntemleri ise SfM mantığı ile çalıştığı için bir başlık altında anlatılmıştır.

(1) Yersel lazer tarama tekniği

Yersel lazer tarama tekniği objelerin doğrudan, hassas ve otomatik olarak 3B koordinatlarının elde edilmesini sağlayan bir teknolojidir (Reshetyuk, 2009). Yersel lazer tarama teknolojileri, özellikle mühendislik projeleri ve kültürel mirasın kayıt işlemleri gibi alanlarda uygulama alanı bulmaktadır (Lichti ve Gordon, 2004). Bu teknoloji, kültürel miras nesneleri için yüksek hassasiyetli 3B modellerin oluşturulması, nesne ile ilgili yüksek oranda detay içermesi, yüksek çözünürlüklü eşleşme, değişim izleme ve sunum imkânına sahip olduğu için kültürel mirasa ve arkeolojik alanlara yönelik yapılan çalışmalarda farklı amaçlar için kullanılabilir (Fabris ve diğerleri, 2009; Çelik, Hamal ve Yakar, 2020). Genel olarak bir lazer tarayıcıda; Lazer uzaklık ölçer, açı ölçüm birimi, lazer ışını saptırma birimi bulunmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Tipik atımlı lazer telemetrenin çalışma prensibi (Ulvi ve Yakar, 2014).

Lazer verici kısa sinyaller yaymakta ve bu sinyaller iki bölümden oluşmaktadır. Sinyallerden biri alıcıya diğer objeye gönderilir. Otomatik Algılama kontrolü aracılığıyla zaman ölçme birimi çalışır. Genel olarak sinyalin şekli Gaussian

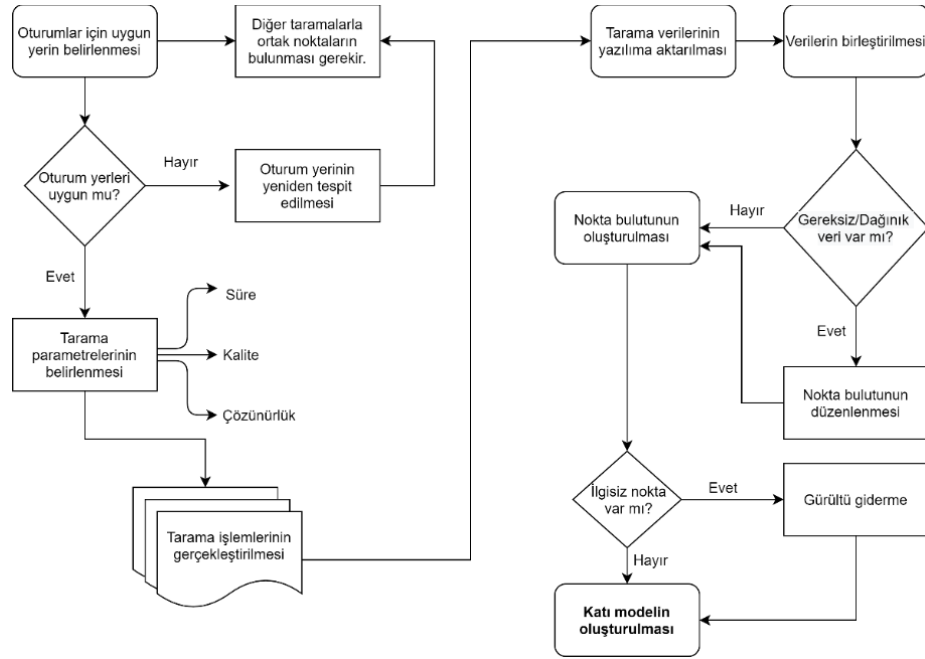
eğrisidir. Sinyal obje yüzeyine ulaştığında yüzey taranır ve lazer sinyali geri saçılır. Saçılan sinyallerin bir bölümü lazer tarayıcıya geri döner ve sinyalin ışımaya gücü elektrik akımına çevrilir. t zamanı 100 MHz gibi yüksek frekanslı asilatör saat ile sayısal sayım teknikleri kullanılarak belirlenir. Yersel lazer tarama iş akış şeması Şekil 7'de verilmiştir.

(2) Fotogrametri Yöntemi (Yersel ve İHA fotogrametrisi)

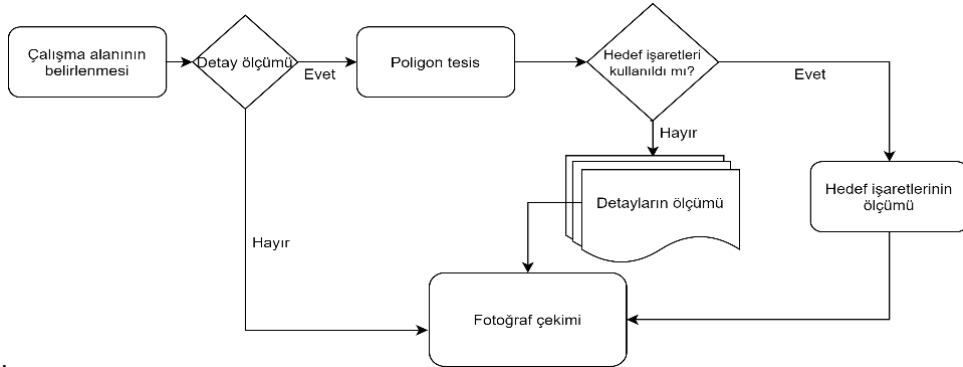
Fotogrametri; cismin bir veya birkaç fotoğrafından yararlanarak uzaydaki şeklini, boyutlarını ve konumunu incelikli olarak belirlemeyi amaç edinmiş bir bilim dalıdır. Fotoğraflar üzerinde yapılan ölçmelerde kullanılan

bu tekniğin en önemli özelliği cismin ayrıntılı olarak tam bir görünümünü vermesidir. Fotogrametri tekniğini kısaca iki boyutlu (2B) fotoğraflardan 3B model elde etmek olarak tanımlanabilmektedir.

Alım merkezinin yer üzerinde bir nokta olması durumunda uygulanan fotogrametrik tekniğe 'yersel fotogrametri' denir (Yakar ve Mohammed, 2016). Yersel fotogrametri ile veri toplama işlemi genellikle sayısal bir el kamerası ile gerçekleştirilmektedir. Yer merkezli, sayısal el kamerası ile çekilen fotoğraflarda genellikle eserin üst taraflarının fotoğraflık verilerinin eksik olduğu gözlemlenmiştir. Bu sorun; alçak irtifadan, insan hayatını riske atmadan uçabilen insansız hava araçları ile ortadan kalkmıştır. Yersel fotogrametri iş akış şeması Şekil 8'de gösterilmiştir



Şekil 7. Yersel lazer tarama iş akış şeması



Şekil 8. Yersel fotogrametri iş akış şeması

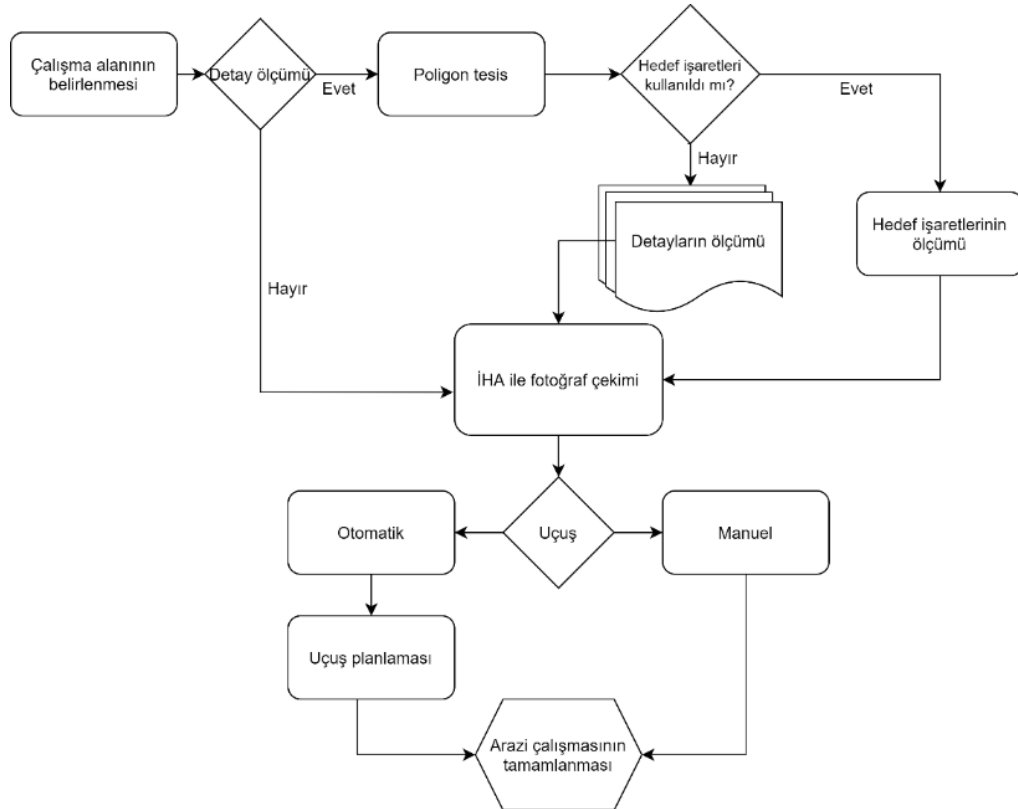
Fotogrametri yöntemi ile üretilen sonuç ürünleri yer merkezi ile aynı konuma getirmek için araziden detay ölçümü yapılmalıdır. Ayrıca bu işlemin yapılmasının bir diğer sebebi farklı yöntemler ile üretilen ürünlerin aynı koordinat sisteminde kullanılmak istenmesidir. Bu sebeple çalışma alanının uygun noktalarına homojen dağılım olacak şekilde hedef işaretleri (yer kontrol noktası/YKN veya özel hazırlanmış levhalar) konulmalıdır. Eğer hedef işaretleri konulacak uygun alan bulunamıyorsa obje üzerindeki keskin veya belirgin (ayrıt etmesi kolay) detay noktalarından ölçümler yapılmalıdır. Bu işlem adımları İHA fotogrametrisi için de geçerlidir.

İHA'lar teknoloji ile birlikte gelişmeye devam etmiş ve birçok alanda kullanılmaktadır. İHA'nın tercih edildiği her alanda kullanıcıya birçok fayda sağlamaktadır. Bu faydaların en başında zaman ve maliyet gelmektedir. Fotogrametrik çalışmalarda kullanılacak İHA fotoğraflarından uygun modelin çıkarılabilmesi için uçuş esnasında dikkat edilmesi gereken durumlar mevcuttur. İHA ile yapılan arazi çalışması ve uçuşlarda izlenen aşamalar Şekil 9'da verilmiştir.

İHA ve yersel fotogrametri yöntemleri Hareketten yapı (structure from motion-“SfM”) prensibi ile çalışmaktadır. “SfM” tekniği birbirine

bindirmeli olarak farklı açılardan çekilmiş 2 boyutlu resimlerden 3B model elde eden fotogrametri tekniğidir. “SfM” fotoğrafların kamera parametrelerinin, pozisyonlarının ve görüntülerdeki obje üç boyutlu geometrilerinin otomatik olarak düzenlenmesini sağlayan görüntü temelli modelleme tekniğidir (Dellaert, Seitz, Thorpe ve Thrun, 2000; Chiuso, Favaro, Jin ve Soatto, 2002; Pavlidis, Koutsoudis, Arnaoutoglou, Tsioukas ve Chamzas, 2007; Bevan ve diğerleri, 2014; Koutsoudis ve diğerleri, 2014; Ulvi vd., 2020)

Literatürde, pek çok araştırma bu teknolojiyi yapısal jeoloji (Bemis ve diğerleri, 2014); enkaz akış dinamikleri (Cucchiari ve diğerleri, 2019); batık yüzeylerin incelenmesi (Woodget, Carbonneau, Visser ve Maddock, 2015; Dietrich, 2017); heyelan yer değiştirmesinin izlenmesi (Stumpf, Malet, Allemand, Pierrot-Deseilligny ve Skupinski, 2015; Turner, Lucieer ve de-Jong, 2015); açık ocak madencilik alanları (Chen, Li, Chang, Sofia ve Tarolli, 2015; Xiang, Chen, Sofia, Tian ve Tarolli, 2018); ve biyofiziksel orman veya bitki parametrelerinin çıkarılması ve izlenmesi (Zarco-Tejada, Diaz-Varela, Angileri ve Loudiani, 2014; Malambo ve diğerleri, 2018; Iglhaut ve diğerleri, 2019) gibi farklı amaçlar için kullanmıştır.



Şekil 9. İHA Fotogrametrisi iş akış şeması

3. UYGULAMA

Uygulama, arazi çalışması ve ofis çalışması olmak üzere 2 aşamada gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışması detay ölçümü, yerden ve havadan fotoğraf çekimi ve tarama işlemini kapsamaktadır. Ofis çalışması ise ölçülen detayların değerlendirilmesi, çekilen fotoğrafların dengelenmesi, modellenmesi; taramaların birleştirilmesi ve yorumlanması kısmından oluşmuştur. Son olarak farklı tekniklerle yapılan dokümantasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

a. Arazi Çalışması

İlk olarak kazı alanının çevresinde detay noktaların ölçümü için gerekli olan istikşaf çalışmaları yapılmıştır. İstikşaf çalışmaları sonucunda belirlenen 3 noktaya poligonların tesisi gerçekleştirilmiştir. Tesis edilen poligonlar jeodezik ölçme aleti olan Elektronik Takeometre TOPCON KS-102 ile iki yarım silsile tekniği kullanılarak koordinatlandırılmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Arazi ölçüm işlemi ve krokisi.

Çalışma alanına ait 18 adet detay noktası ölçülmüştür. Bu noktalardan 8 adedi dengeleme işleminde referans noktası olarak, 10 adedi ise kontrol noktası olarak kullanılmıştır.

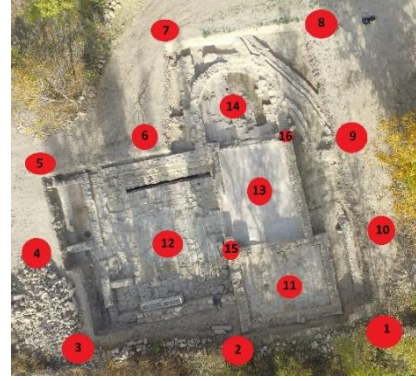
Yersel fotogrametri ve İHA fotogrametrisi teknikleri kullanarak yapılacak olan dokümantasyon ve 3B model çalışması için araziye ait yerden ve havadan bindirmeli olarak fotoğraflar çekilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Yerden ve havadan çekilen örnek fotoğraflar.

Çalışma alanına ait; sayısal el kamerası ile 78 adet, İHA ile 24 adet fotoğraf çekilmiştir. Yersel fotogrametri ve İHA fotogrametrisi için fotoğraf

toplama işlemi tamamlandıktan sonra lazer tarama ile veri toplama işlemine geçilmiştir. Lazer tarama işlemi için lazer tarayıcı Şekil 12'de gösterilen 16 farklı yere konumlandırılmış olup tarama işlemi yapılmıştır. Lazer tarama cihazının örnek konumları Şekil 13'te gösterilmiştir.



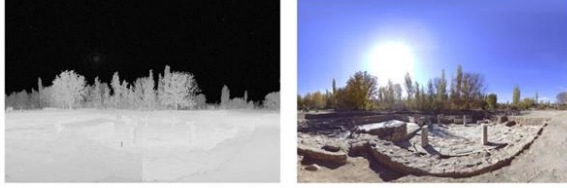
Şekil 12. Lazer tarama cihazı ile tarama yapılan konumlar.



Şekil 13. Kazı alanına ait lazer tarama oturumları.

Lazer tarama cihazı ile taranan yüzey arasındaki mesafe, nokta bulutu verisinin çözünürlüğünü doğrudan etkilemekte ve lazer tarama cihazından taranacak yüzeye gelen ışınlar da nokta bulutu verisinin kalitesini etkilemektedir. Çalışma yapılan kazı alanındaki her detay, tarihi açıdan öneme sahip olduğundan her bir detayın eksiksiz olarak elde edilmesi gerekmektedir. Çalışma alanındaki seramik ve duvarların eksiksiz bir şekilde modellenmesi için lazer tarama cihazının odaların tabanına ve duvarların üzerinde kurulması uygun görülmüştür. Kazı alanındaki tüm detayları kapsayacak şekilde ve lazer tarayıcının bir oturumda tarayamadığı kör noktaları diğer bir oturumda elde edebilmek ve nokta veri kümelerini birleştirirken bir düzen içerisinde olabilmek amaçlı 10 tanesi arazinin çevresinde ve 6 tanesi de iç kısımda olmak üzere toplam 16 oturum yapılarak tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Taramaların süreleri ise taranacak objelerin detay yoğunluğuna bağlı olarak değişmekte olup ortalama her tarama 20 dakika sürmüştür. Lazer tarama cihazı her

taramanın sonunda taradığı nokta kümelerine RGB (kırmızı-yeşil-mavi) renk değerlerini atamak için 360° panoramik fotoğraflar elde etmektedir. Bu RGB değerleri verileri işleme, birleştirme ve ayırma gibi ofis çalışmalarında önemli kolaylıklar sağlamakta ve daha sonra elde edilecek 3B modelin görsel kalitesini artırmaktadır (Şekil 14). Tarihi arkeolojik kazı alanına ait dokümantasyon çalışmasının arazi çalışması yaklaşık olarak sekiz saat sürmüştür.

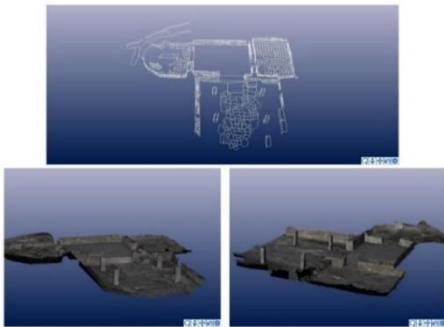


Şekil 14. Tarama sonrası çekilen panoramik fotoğrafın siyah-beyaz ve RGB görünümü (5. oturuma ait).

b. Ofis Çalışması

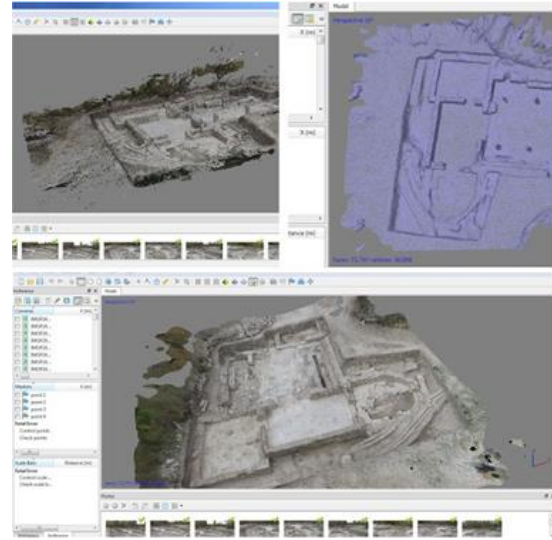
Ofis çalışmasında lazer tarama verileri, İHA ve sayısal el kamerası ile çekilen fotoğraf verileri ayrı ayrı yazılımlarda değerlendirilmiştir. Sayısal el kamerası ile çekilen fotoğraflar “Photomodeller UAS” (Photomodeller, 2020) yazılımında, İHA ile çekilen fotoğraflar “Agisoft PhotoScan” (Agisoft, 2018) yazılımında fotogrametri tekniği ile işlenmiştir. Lazer tarama verileri ise lazer tarama cihazının kendi yazılımı olan “Scene” (Scene, 2020) yazılımında işlenmiştir.

Sayısal el kamerası ile çekilen 78 adet fotoğraftan 25 adedi “Photomodeller” yazılımında kullanılmıştır. Araziden toplanan detay noktalar referans kabul edilerek manuel dengeleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra her bir detayın çizimi gerçekleştirilerek yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir ve arazinin 3B modeli elde edilmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. “Photomodeller” yazılımında elde edilen 3B model.

İHA aracılığıyla elde edilen toplam 24 fotoğraf ile “Agisoft Photoscan” yazılımında İHA fotogrametrisi uygulanmıştır. İlk olarak araziden toplanan detay noktalar ile fotoğrafların dengelenmesi işlemi yapılmıştır. Ardından otomatik olarak fotoğraflar üzerinden yoğun nokta bulutu oluşturulmuş, yüzey geçirme işlemi tamamlanmış ve modele homojen bir doku giydirilmiştir. 3B modelin pikselini keskinleştirmek için görüntü zenginleştirme işlemi uygulanarak kazı alanının 3B modeli elde edilmiştir. “Agisoft PhotoScan” yazılımında elde edilen 3B model Şekil 16’da gösterilmiştir.



Şekil 16. “Agisoft” yazılımında elde edilen 3B model.

Lazer tarama teknolojisi ile veri toplama tekniği diğer veri elde etme tekniklerine göre daha kolay ve pratiktir. Fakat her teknolojinin olumlu tarafı olduğu kadar olumsuz tarafları da bulunmaktadır. Bu tekniğin en önemli olumsuz tarafı çok fazla detay veriye sahip olmasıdır. Nokta kümelerini birleştirmeden önce gereksiz nokta verilerini ayıklamak gerekmektedir.

Tüm oturumlardan elde edilen birbirinden bağımsız nokta bulutları farklı referans sistemleri aracılığıyla birleştirilebilmektedir. Arazide alımı yapılan detay noktalar ile yazılım içerisinde bulunan yerel noktalar kullanılmak suretiyle manuel olarak yazılımda birleştirme işlemi yapılabilmektedir. Referans noktalar haricinde yazılım içinde nokta bulutları ile otomatik olarak birleştirme işlemi yapılabilmektedir. Birleştirme ve dengeleme işlemleri sırasında arazide ölçülen detay noktalar referans kabul edilerek birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kazı alanına ait elde edilmiş olan tarama verileri yersel lazer tarayıcı cihazını üreten firmanın sunmuş olduğu 3B nokta bulutu değerlendirme yazılımı olan “Scene” yazılımında birleştirilerek arkeolojik kazı alanının 3B görüntüsü elde edilmiştir (Şekil 18). Kazı alanının 3B modelinin elde edilmesinde 277 milyondan fazla taranmış nokta kullanılmıştır. Bu taramalar sonucunda elde edilen model ortalama 4.8 mm hassasiyete ve minimum %40 oranında taramalar arasında bindirmeye sahiptir.

4. DOĞRULUK ARAŞTIRMASI

Çalışma alanındaki belirli noktalardan elektronik uzaklık ölçerle elde edilen koordinatlar (Tablo 5) referans alınarak her bir yazılım üzerinden elde edilen koordinatlar (Tablo 6) ile karşılaştırılmış ve 3B karesel ortalama hata değerleri hesaplanmıştır. “Scene”, “Photomodeler UAS” ve “Agisoft PhotoScan” yazılımlarından elde edilen hata değerleri sırasıyla Tablo 7, 8 ve 9’da verilmiştir. Her üç yazılıma ait konum hata değerleri ise Tablo 10 ve Şekil 17’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Elektronik Uzaklık Ölçer ile elde edilen kesin koordinatlar.

Elektronik Uzaklık Ölçer (Kesin Koordinatlar)			
N.N	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	2039.169	3026.775	210.354
2	2035.799	3025.095	210.229
3	2039.848	3030.153	210.412
4	2039.451	3031.339	209.698
5	2035.533	3031.907	209.355
6	2035.796	3031.936	209.511
7	2035.797	3030.734	209.345
8	2036.179	3029.154	209.358
9	2036.193	3029.143	208.642
10	2035.793	3030.691	208.618
11	2036.234	3027.280	209.281
12	2036.042	3025.935	209.777
13	2035.838	3024.595	209.302
14	2035.914	3024.576	208.648
15	2036.117	3025.924	208.639
16	2036.324	3027.262	208.652
17	2037.335	3023.558	208.924
18	2035.385	3023.124	209.035

Tablo 6. Yazılımlardan elde edilen koordinatlar.

“Scene”				“Photomodeler UAS”				“Agisoft PhotoScan”			
No	X (m)	Y (m)	Z (m)	No	X (m)	Y (m)	Z (m)	No	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	2039.18	3026.78	210.35	1	2039.19	3026.79	210.34	1	2039.19	3026.78	210.34
2	2035.80	3025.10	210.22	2	2035.79	3025.09	210.22	2	2035.79	3025.09	210.22
3	2039.79	3030.07	210.41	3	2039.76	3030.03	210.41	3	2039.77	3030.05	210.41
4	2039.45	3031.33	209.68	4	2039.45	3031.32	209.67	4	2039.45	3031.32	209.68
5	2035.54	3031.93	209.34	5	2035.54	3031.93	209.33	5	2035.54	3031.92	209.34
6	2035.81	3031.96	209.51	6	2035.80	3031.95	209.51	6	2035.80	3031.95	209.51
7	2035.81	3030.75	209.34	7	2035.81	3030.74	209.34	7	2035.80	3030.74	209.34
8	2036.19	3029.16	209.36	8	2036.19	3029.16	209.37	8	2036.18	3029.16	209.37
9	2036.2	3029.14	208.65	9	2036.20	3029.15	208.65	9	2036.20	3029.14	208.65
10	2035.80	3030.69	208.62	10	2035.80	3030.70	208.63	10	2035.80	3030.69	208.63
11	2036.25	3027.28	209.27	11	2036.24	3027.28	209.28	11	2036.24	3027.28	209.28
12	2036.05	3025.95	209.76	12	2036.04	3025.94	209.76	12	2036.04	3025.94	209.76
13	2035.83	3024.59	209.29	13	2035.83	3024.60	209.30	13	2035.83	3024.60	209.30
14	2035.93	3024.58	208.67	14	2035.94	3024.58	208.65	14	2035.93	3024.58	208.65
15	2036.06	3025.91	208.63	15	2036.05	3025.91	208.63	15	2036.06	3025.91	208.63
16	2036.31	3027.24	208.63	16	2036.31	3027.21	208.64	16	2036.31	3027.21	208.64
17	2037.34	3023.58	208.94	17	2037.34	3023.58	208.94	17	2037.33	3023.58	208.94
18	2035.39	3023.15	209.05	18	2035.39	3023.15	209.05	18	2035.38	3023.15	209.05

Tablo 7. “Scene” yazılımı hata değerleri.

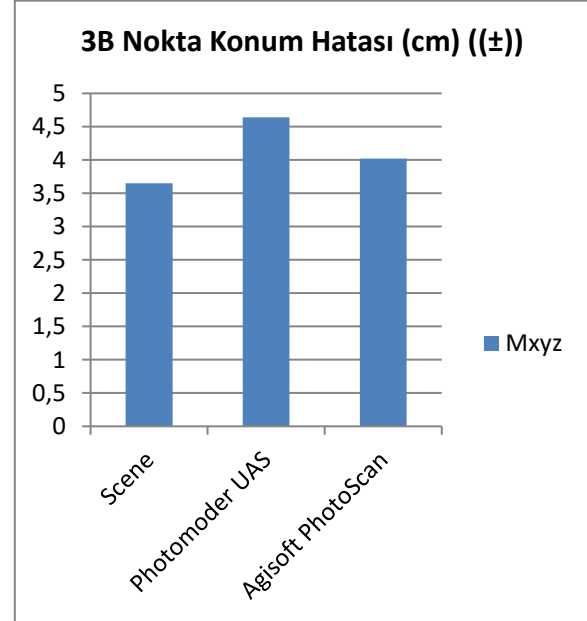
N.N	Vi Farklar (cm)			Vi Vi Farklar cm ²		
	Vx(±)	Vy(±)	Vz(±)	VxVx	VyVy	VzVz
1	1.6	1.2	-0.3	2.5	1.5	0.1
2	0.6	1.0	-0.3	0.3	1.1	0.1
3	-5.5	-7.9	0.0	29.8	62.5	0.0
4	0.6	-0.1	-1.6	0.3	0.0	2.5
5	1.5	2.5	-1.0	2.4	6.1	1.0
6	1.6	2.6	-0.1	2.5	6.6	0.0
7	2.0	2.4	0.1	3.9	6.0	0.0
8	1.3	1.0	1.0	1.8	1.0	0.9
9	0.9	0.6	1.0	0.9	0.3	1.0
10	0.7	0.3	0.7	0.5	0.1	0.5
11	1.6	0.8	-0.4	2.6	0.6	0.1
12	1.5	1.5	-0.9	2.2	2.4	0.8
13	-0.1	-0.2	-0.7	0.0	0.0	0.5
14	2.1	1.3	2.2	4.4	1.7	4.7
15	-5.7	-1.2	-0.3	32.3	1.4	0.1
16	-1.3	-1.3	-1.5	1.6	1.7	2.3
17	0.8	3.1	2.3	0.6	9.9	5.2
18	0.8	3.1	2.3	0.6	9.9	5.2

Tablo 8. “Photomodeler” yazılımı hata değerleri.

N.N	Vi Farklar (cm)			Vi Vi Farklar cm ²		
	Vx(±)	Vy(±)	Vz(±)	VxVx	VyVy	VzVz
1	2.4	1.7	-0.7	5.7	2.7	0.5
2	-0.2	-0.1	-0.3	0.0	0.0	0.1
3	-8.0	-11.7	-0.2	64.2	137.6	0.0
4	0.0	-1.7	-2.0	0.0	2.9	4.2
5	1.2	2.3	-1.6	1.4	5.3	2.6
6	0.8	2.3	0.0	0.6	5.5	0.0
7	1.4	1.5	0.3	2.0	2.4	0.1
8	1.2	1.4	1.6	1.3	1.9	2.5
9	1.0	0.7	1.4	1.1	0.5	1.9
10	1.0	1.0	1.5	1.0	0.9	2.1
11	1.2	0.8	-0.1	1.4	0.7	0.0
12	0.6	1.4	-1.1	0.4	2.0	1.2
13	-0.1	0.8	-0.1	0.0	0.7	0.0
14	2.6	0.7	0.6	6.9	0.5	0.4
15	-6.4	-0.6	-0.8	41.5	0.4	0.7
16	-0.5	-5.2	-1.1	0.3	26.7	1.1
17	0.5	3.0	2.4	0.2	8.9	5.7
18	0.5	3.0	2.4	0.2	8.9	5.7

Tablo 9. “Agisoft PhotoScan” yazılımı hata değerleri.

N.N	Vi Farklar (cm)			Vi Vi Farklar cm ²		
	Vx(±)	Vy(±)	Vz(±)	VxVx	VyVy	VzVz
1	2.1	1.4	-0.6	4.3	2.0	0.4
2	-0.1	-0.1	-0.3	0.0	0.0	0.1
3	-6.9	-10.2	-0.2	48.2	103.3	0.0
4	0.0	-1.5	-1.8	0.0	2.2	3.1
5	1.0	2.0	-1.4	1.1	4.0	2.0
6	0.7	2.0	0.0	0.5	4.1	0.0
7	1.2	1.3	0.3	1.5	1.8	0.1
8	1.0	1.2	1.4	1.0	1.4	1.9
9	0.9	0.6	1.2	0.8	0.4	1.5
10	0.9	0.8	1.3	0.8	0.7	1.6
11	1.0	0.7	-0.1	1.1	0.5	0.0
12	0.5	1.2	-0.9	0.3	1.5	0.9
13	-0.1	0.7	-0.1	0.0	0.5	0.0
14	2.3	0.6	0.6	5.2	0.4	0.3
15	-5.6	-0.5	-0.7	31.2	0.3	0.5
16	-0.5	-4.5	-0.9	0.2	20.1	0.8
17	0.4	2.6	2.1	0.2	6.7	4.3
18	0.4	2.6	2.1	0.2	6.7	4.3



Şekil 17. Değerlendirme sonucunda oluşan nokta konum hataları.

Tablo 10. Konum hata değerleri.

“Scene”				“Photomodeler UAS”				“Agisoft PhotoScan”			
	Vi farklar (cm)				Vi farklar (cm)				Vi farklar (cm)		
	Vx(±)	Vy(±)	Vz(±)		Vx(±)	Vy(±)	Vz(±)		Vx(±)	Vy(±)	Vz(±)
Vmin	0.1	0.1	0	Vmin	0	0.1	0	Vmin	0	0.1	2.1
Vmaks	5.7	7.9	2.3	Vmaks	8	11.7	2.4	Vmaks	6.9	10.2	2.4
Vort	1.7	1.8	0.9	Vort	1.6	2.2	1	Vort	1.4	1.9	0.9
m	2.3	2.6	1.2	m	2.7	3.5	1.3	m	2.4	3	1.1
mxyz(±)	3.65			mxyz(±)	4.64			mxyz(±)	4.02		



Şekil 18. Yersel lazer tarama sonucun oluşan 3B model.

5. SONUÇLAR

Tarihi yapılar, yüzyıllar öncesinde yaşamış olan toplumların yaşantılarını günümüze yansıtan en önemli somut kaynakların başında gelmektedir. Bunların birçoğu toprak altında keşfedilmeyi beklemektedir. Günümüze kadar gelmeyi başaranların ise bir kısmı kullanılabiliyorken diğerleri ne yazık ki doğal ya da doğal olmayan sebeplerden dolayı yok olmanın eşiğindedir. Bundan dolayı geçmişimizi canlı bir şekilde gözler önüne seren tarihi eser ve alanlarımızın dokümantasyonunu yapmak oldukça önemlidir. Bu dokümantasyon çalışmaları uzun yıllardır farklı tekniklerle yapılmakta ve değişik doğrulukta veriler elde edilmektedir.

Günümüzde minimum maliyetle hızlı ve güvenilir 3B veri elde etmek oldukça önemlidir. 3B modelleme ve dokümantasyon çalışmalarında uzun yıllardır yersel fotogrametri tekniği farklı disiplinlerce tercih edilmiştir. Yersel fotogrametri tekniği temel olarak yer bazlı fotoğrafçılığa içerdiği için özellikle büyük boyuttaki objelerin modellenmesinde bazı eksiklikler yaşanmaktadır. İHA teknolojisinin bu alanda kullanılmasına başlandıktan sonra havadan fotoğraf çekilerek yer bazlı fotoğraflara ek olarak kullanılması karşılaşılan bazı sorunlara çözüm olabilmektedir. Ek olarak yoğun nokta bulutu üretmek ve bu verileri işleyip değerlendirmek güçlü donanımlara sahip bilgisayarlar gerektirmektedir. Bu iki veri toplama ve işleme metodu bir rakip olmaktan ziyade birbirini tamamlayan tekniklerdir.

Teknolojinin bu önlenemez ilerleyişi ile yeni teknikler bizlere çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Çağımızda çok farklı disiplinlerde hayatımızı kolaylaştıran lazer ışını bu anlamda önemli yapıların dokümantasyonlarının oluşturulmasında zaman, maliyet ve ölçü doğruluğu açısından optimum veriler vermekte ve dokümantasyon çalışmalarına yeni bir boyut kazandırmaktadır.

Lazer tarama teknolojisi yeni bir teknoloji olmasına rağmen kullanım alanları oldukça geniştir. Özellikle son yıllarda; 3B şehir modelleme, mühendislik yapıları için deformasyon izleme çalışmaları, mimari çalışmalar, haritacılık işlemleri, tarihi yapıların detaylı durumu ve arkeolojik çalışmalarda lazer tarama teknolojisi ön plana çıkmaktadır. Kazı çalışmasında bulunan objelerin detaylarının fazlalığına göre, tarama cihazının tarama kalitesini artırılması detayların gerçeğe daha yakın elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Lazer tarama teknolojisi her ne kadar hızlı ve ekonomik bir teknik olsa da elde edilen nokta kümelerinin bir kısmı anlamsız bilgiler içermektedir. Bu anlamsız bilgileri maskeleyerek, ölçücü için ilave dikkat ve zaman isteyen bir süreç olmaktadır. Ayrıca yoğun nokta bulutlarının birleştirilmesi işlemi bilgisayarın bellek ve ekran kartı ile doğrudan ilişkilidir. Birleştirme çalışmasında yüksek kapasiteli bellek ve ekran kartına sahip bilgisayarların kullanılması ofis çalışmasının süresini kısaltacaktır.

Doğruluk araştırması için kullanılan 18 noktanın konum doğrulukları üç farklı yazılımda değerlendirilmiştir. Tablo 10'da görüleceği üzere değerlendirme sonucunda noktaların konum hataları; "Scene", "Photomodeler UAS" ve "Agisoft PhotoScan" yazılımlarında sırasıyla 3.65, 4.64, 4.02 cm olduğu görülmüştür.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde lazer tarama tekniğinin fotogrametrik tekniğe göre daha hassas çalıştığını görmek mümkündür. Ancak hem veri dosyalarının çok büyük olması hem de çok fazla ilgisiz nokta bulutunun bulunmasından dolayı operatöre bağlı olan işler artmaktadır. Ayrıca çok daha güçlü bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır. Fotogrametrik teknikte ise hem yersel teknikler hem de İHA ile elde edilen verilerin kullanılması sonucunda oluşan konum hatası miktarları lazer tarama tekniğine yakındır. Bu durumda mevcut

teknik donanıma göre hareket etmek daha uygun olacaktır. İHA veya yersel fotogrametri lazer tarama tekniğine göre daha ekonomiktir ve arazi işi daha kısa sürmektedir. Ofis çalışmasında ise tekniklerin uygun olup olmadığı bilgisayarların gücüne bağlıdır.

Bu çalışmada lazer tarama tekniği, yersel fotogrametri ve İHA fotogrametrisi tekniği ile elde edilen görüntülerin kullanılarak oluşturulan 3B modelin doğruluğu ayrı ayrı hesaplanmıştır. Gelecek çalışmalarda bu teknikler ile birleştirme işlemleri uygulanarak konum doğruluğunun hangi durumda daha yüksek olduğu araştırılacaktır.

ORCID

Yunus KAYA  <https://orcid.org/0000-0003-2319-4998>

Abdurrahman Yasin YİĞİT  <https://orcid.org/0000-0002-9407-8022>

Ali ULVİ  <https://orcid.org/0000-0003-3005-8011>

Murat YAKAR  <https://orcid.org/0000-0002-2664-6251>

KAYNAKLAR

- Agisoft, L. L. C. (2018). Agisoft PhotoScan user manual. *St Petersburg, Russia: Agisoft LLC*. Erişim Adresi: https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf.
- Bemis, S. P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M.R., Akciz, S., Thiele, S.T. ve Bangash, H.A., (2014). Ground-based and UAV-based photogrammetry: a multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *J. Struct. Geol.* 69, 163–178. doi: 10.1016/j.jsg.2014.10.007
- Bevan, A., Li, X., Martinón-Torres, M., Green, S., Xia, Y., Zhao, K. ve Rehren, T. (2014). Computer vision, archaeological classification and China's terracotta warriors. *Journal of Archaeological Science*, 49, 249-254. doi:10.1016/j.jas.2014.05.014
- Brandolini, F. ve Patrucco, G. (2019). Structure-from-Motion (SfM) Photogrammetry as a Non-Invasive Methodology to Digitalize Historical Documents: A Highly Flexible and Low-Cost Approach?. *Heritage*, 2(3), 2124-2136. doi: 10.3390/heritage2030128
- Chen, J., Li, K., Chang, K.J., Sofia, G. ve Tarolli, P. (2015). Open-pit mining geomorphic feature characterisation. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 42, 76–86. doi: 10.1016/j.jag.2015.05.001
- Chiuso, A., Favaro, P., Jin, H. ve Soatto, S. (2002). Structure from motion causally integrated over time. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 24(4), 523-535. doi: 10.1109/34.993559.
- Cömert R., Avdan U., ve Şenkal E. (2012, Ekim). *İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Gelecekteki Beklentiler*. IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2012), 16-19, Zonguldak. Erişim Adresi: https://www.researchgate.net/profile/E mre_Senkal/publication/292669083_İnsansız_Hava_Araclarinin_Kullanım_Alanlari_ve_Gelecekteki_Beklentiler/links/5795ce7f08ae33e89f abd68c.pdf
- Cucchiario, S., Cavalli, M., Vericat, D., Crema, S., Llena, M., Beinart, A., ... Cazorzi, F. (2019). Geomorphic effectiveness of check dams in a debris-flow catchment using multi-temporal topographic surveys. *Catena* 174, 73–83. doi: 10.1016/j.catena.2018.11.004
- Çelik, M. Ö., Hamal, S.N.G. ve Yakar, İ. (2020). Yersel lazer tarama (YLT) yönteminin kültürel mirasın dokümantasyonunda kullanımı: Alman Çeşmesi örneği. *Türkiye LİDAR Dergisi*, 2(1),15-22. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/melid/issue/55648/755790>
- Dellaert, F., Seitz, S. M., Thorpe, C. E. ve Thrun, S. (2000, Haziran). Structure from motion without correspondence. *In Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2, 557-564. doi: 10.1109/CVPR.2000.854916
- Dietrich, J.T. (2017). Bathymetric structure-from-motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-viewstereo photogrammetry. *Earth Surf. Process. Landf.* 42, 355–364. doi: 10.1002/esp.4060
- Digicamb. (t.y.). Pentax Optio RZ18. Erişim Adresi: https://www.digicamdb.com/specs/pentax_optio-rz18/
- Doğan, Y. ve Arıkan, İ. (2013). İlköğretim 7. Sınıf Öğrencilerinin Kültürel Mirasla İlgili Başarı Düzeyleri ve Tutumlarının Bazı Değişkenlerce İncelenmesi (Adıyaman Örneği). *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 15, 29-68. doi: 10.14520/adyusbd.730

- Dron market. (t.y.). DJI Phantom 3 Professional Erişim Adresi: <https://www.dronmarket.com/urun/dji-phantom-3-professional-drone>
- Eskikurt, A. (2003). Anadolu medeniyetleri ve coğrafya. Doktora tezi. Erişim Adresi: <http://dspace.marmara.edu.tr/handle/11424/27726>.
- Fabris, M., Achilli, V. Artese, G., Boatto, G., Bragagnolo, D., Concheri, G., ...Trecroci A. (2009). High Resolution Data From Laser Scanning and Digital Photogrammetry Terrestrial Methodologies Test Site: An Architectural Surface. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, 38, Part 3/W8pages.43-48. Erişim Adresi: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.409.5594&rep=rep1&type=pdf>
- Faro. (t.y.). Laser Scanner for Fast and Exact Indoor and Outdoor Measurements in Three Dimensions: Simply at Your Fingertips. Erişim Adresi: <https://www.faro.com/tr-tr/urunler/construction-bim-cim/faro-focus/#main>
- Frodella, W., Elashvili, M., Spizzichino, D., Gigli, G., Adikashvili, L., Vacheishvili, N., ... Casagli, N. (2020). Combining InfraRed Thermography and UAV Digital Photogrammetry for the Protection and Conservation of Rupestrian Cultural Heritage Sites in Georgia: A Methodological Application. *Remote Sensing*, 12(5), 892. doi: 10.3390/rs12050892
- Gautier, Q. K., Garrison, T. G., Rushton, F., Bouck, N., Lo, E., Tueller, P. ve Kastner, R. (2020). *Low-cost 3D scanning systems for cultural heritage documentation. Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 10(4), 437-455. doi: 10.1108/JCHMSD-03-2020-0032
- Gürleyen, S. B. (2020). Kültürel Varlıkların Yönetiminde Semantik Ağ ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri Çerçevesinde Bir Sürdürülebilirlik Yaklaşımı: Konumsal Semantik Kültür Ağı (KoSeKA) Modeli. Doktora tezi. Erişim Adresi: <http://www.openaccess.hacettepe.edu.tr:8080/xmlui/handle/11655/22579>.
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J. ve Rosette, J. (2019). Structure from motion photogrammetry in forestry: a review. *Curr. For. Rep.* 5, 155–168. doi: 10.1007/s40725-019-00094-3
- Konya'da 1400 Yıllık Aslan ve Savaşçı Mozaïği Bulundu. (2016, 1 Eylül). Erişim Adresi: <http://arkeofili.com/konyada-1400-yillik-aslan-ve-savasci-mozaigi-bulundu/#.WFa7dFWLTU>
- Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G. ve Chamzas, C. (2014). Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage*, 15(1), 73-79. doi:10.1016/j.culher.2012.12.003
- Kraus, K. (2007). Photogrammetry: geometry from images and laser scans. *Walter de Gruyter, Berlin*. ISBN: 978-3-11-019007-6.
- Lichti, D. D. ve Gordon, S.J. (2004, Mayıs). Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording. *FIG Working Week*, Athens, Greece. Erişim Adresi: https://www.researchgate.net/publication/253002405_Error_Propagation_in_Directly_Georeferenced_Terrestrial_Laser_Scanner_Point_Clouds_for_Cultural_Heritage_Recording
- Malambo, L., Popescu, S.C., Murray, S.C., Putman, E., Pugh, N.A., Horne, D.W., ... Bishop, M. (2018). Multitemporal fieldbased plant height estimation using 3D point clouds generated from small unmanned aerial systems highresolution imagery. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 64, 31–42. doi: 10.1016/j.jag.2017.08.014
- Mohammed, O. H. (2016). Kültürel mirasın belgelenmesinde dökümantasyon tekniklerin karşılaştırılması. Doktora tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erişim Adresi: <http://acikerisimarsiv.selcuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/4344>
- Moyano, J., Nieto-Julián, J. E., Bienvenido-Huertas, D. ve Marín-García, D. (2020). Validation of Close-Range Photogrammetry for Architectural and Archaeological Heritage: Analysis of Point Density and 3D Mesh Geometry. *Remote Sensing*, 12(21), 3571. doi: 10.3390/rs12213571
- Pakben, U. (2013). Tarihi yapıların rölöve ve analizlerinde kullanılan ileri belgeleme teknikleri. Doktora tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. Erişim Adresi: <https://acikerisim.deu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12397/7598>

- Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V. ve Chamzas, C. (2007). Methods for 3D digitization of cultural heritage. *Journal of cultural heritage*, 8(1), 93-98. doi: 10.1016/j.culher.2006.10.007
- Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M. ve Ortiz-Sanz, J. (2019). Professional SfM and TLS vs a simple SfM photogrammetry for 3D modelling of rock art and radiance scaling shading in engraving detection. *Journal of Cultural Heritage*, 37, 238-246. doi: 10.1016/j.culher.2018.10.009
- Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M. ve Ortiz-Sanz, J. (2020). Desktop vs cloud computing software for 3D measurement of building façades: The monastery of San Martín Pinario. *Measurement*, 149, 106984. doi: 10.1016/j.measurement.2019.106984
- Phinney, J. S., Horenczyk, G., Liebkind, K. ve Vedder, P. (2001). Ethnic identity, immigration, and well-being: An interactional perspective. *Journal of social issues*, 57(3), 493-510. doi: 10.1111/0022-4537.00225.
- Photomodeler. (2020). PhotoModeler software online help manual. Erişim Adresi: <https://www.photomodeler.com/resources/>
- Poux, F., Billen, R., Kasprzyk, J. P., Lefebvre, P. H. ve Hallot, P. (2020). A Built Heritage Information System Based on Point Cloud Data: HIS-PC. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10), 588. doi: doi.org/10.3390/ijgi9100588
- Randazzo, L., Collina, M., Ricca, M., Barbieri, L., Bruno, F., Arcudi, A. ve La Russa, M. F. (2020). Damage Indices and Photogrammetry for Decay Assessment of Stone-Built Cultural Heritage: The Case Study of the San Domenico Church Main Entrance Portal (South Calabria, Italy). *Sustainability*, 12(12), 5198. doi: 10.3390/su12125198
- Reshetuk, Y. (2009). Self-Calibration and Direct Georeferencing in Terrestrial Laser Scanning. Doktora tezi. Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), *Department of Transport and Economics Division of Geodesy*, Erişim Adresi: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:139761/FULLTEXT01>
- Scene. (2020). FARO SCENE user manual. Erişim Adresi: <https://faro.app.box.com/s/uivkgf3jyrxcxn5ofazlohjnaddknhr/file/730718082810>
- Sekban, D. M., Aktarer, S. M. ve Purcek, G. (2019). Friction stir welding of low-carbon shipbuilding steel plates: microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior. *Metallurgical and materials transactions A*, 50(9), 4127-4140. doi: 10.1007/s11661-019-05324-8
- Shao, H., Chen, Y., Yang, Z., Jiang, C., Li, W., Wu, H., ... Hyyppä, J. (2020). Feasibility Study on Hyperspectral LiDAR for Ancient Huizhou-Style Architecture Preservation. *Remote Sensing*, 12(1), 88. doi: 10.3390/rs12010088
- Stumpf, A., Malet, J. P., Allemand, P., Pierrot-Deseilligny, M. ve Skupinski, G. (2015). Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology*, 231, 130-145. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.10.039
- Sztwiertnia, D., Ochalek, A., Tama, A. ve Lewińska, P. (2019). HBIM (heritage Building Information Model) of the Wang Stave Church in Karpacz—Case Study. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-15. doi: 10.1080/15583058.2019.1645238
- Şenol, H. I., Erdogan, S., Onal, M., Ulukavak, M., Memduhoglu, A., Mutlu, S., ... Yilmaz, M. (2017, Ekim). 3D Modeling Of A Bazaar in Ancient Harran City Using Laser Scanning Technique. *International Archives of the Photogrammetry*. Remote Sensing & Spatial Information Sciences, Karabük, Türkiye. Erişim Adresi: <https://pdfs.semanticscholar.org/6f37/b517a2f3e88e916005850d0a39d6e33f15dd.pdf>
- Şenol, H., Memduhoglu, A. ve Ulukavak, M. (2020). Multi instrumental documentation and 3D modelling of an archaeological site: a case study in Kizilkoyun Necropolis Area. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11 (3), 1241-1250. doi: 10.24012/dumf.801662
- Tercan, E. (2017). İnsansız Hava Aracı Kullanılarak Antik Kent ve Tarihi Kervan Yolunun Fotogrametrik Belgelenmesi: Sarıhacılar Örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 633-642. doi: 10.21923/jesd.315232

- Turner, D., Lucieer, A. ve de Jong, S.M. (2015). Time series analysis of landslide dynamics using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sens.* 7, 1736–1757. doi: 10.3390/rs70201736
- Uslu, A., Polat, N., Toprak A.S. ve Uysal, M. (2016). Kültürel Mirasın Fotogrametrik Yöntemle 3B Modellenmesi Örneği. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8, 2, 165-176. doi: 10.15659/hartek.16.08.302
- Ulvi, A. ve Yakar, M. (2014) Yersel Lazer Tarama Tekniği Kullanarak Kızkalesi'nin Nokta Bulutunun Elde Edilmesi ve Lazer Tarama Noktalarının Hassasiyet Araştırması. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 25-36. Erişim adresi: http://www.makalesistemi.com/panel/files/manuscript_files_publish/9cd7b8eb03077e60693ba14fb8ed2f1d/707fb0767d3f75e1919502e82529ac08/143cda31ad15940.pdf
- Ulvi, A. ve Yiğit, A. (2020). 3D Modelling of Kayseri Tekgöz Bridge. *Mersin Photogrammetry Journal*, 2 (1), 29-32. Erişim Adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/mephoj/issue/52791/676334>
- Ulvi, A., Yakar, M., Yiğit, A. ve Kaya, Y. (2019). The Use of Photogrammetric Techniques in Documenting Cultural Heritage: The Example of Aksaray Selime Sultan Tomb. *Universal Journal Of Engineering Science*, 7(3), 64-73. doi: 10.13189/ujes.2019.070303
- Ulvi, A., Yakar, M., Yiğit, A. Y. ve Kaya, Y. (2020). İHA ve Yersel Fotogrametrik Teknikler Kullanarak Aksaray Kızıl Kilise'nin 3 Boyutlu Nokta Bulutu ve Modelinin Üretilmesi. *Geomatik Dergisi*, 5(1), 22-30. doi: 10.29128/geomatik.560179
- Ulvi, A., Yakar, M., Yiğit, A.U. ve Kaya, Y. (2019, Nisan). Arkeolojik Alanların Dokümantasyonunun Yersel Lazer Tarama ve İHA Teknikleri ile Elde Edilmesi: Konya Yunuslar Örneği. TUFUAB X. Teknik Sempozyumu, Aksaray, Türkiye. Erişim Adresi: http://tufuab2019.aksaray.edu.tr/wp-content/uploads/2019/12/tam_metin_kitap.pdf
- Uray, F., Varlık, A. ve Metin, A. (2018). Üç Boyutlu Kent Modellerinde Ayrıntı Düzeyi Kavramı İnce Minareli Medrese (Konya) Örneği. *Geomatik*, 3(1), 74-83. doi:10.29128/geomatik.369065.
- Uslu A. ve Uysal, M. (2017). Arkeolojik eserlerin fotogrametri yöntemi ile 3 boyutlu modellenmesi: Demeter Heykeli örneği. *Geomatik*, 2(2), 60-65. doi: 10.15659/hartek.16.08.302
- Woodget, A.S., Carbonneau, P.E., Visser, F. ve Maddock, I.P., (2015). Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. *Earth Surf. Process. Landf.* 40(1), 47-64. doi: 10.1002/esp.3613.
- Xiang, J., Chen, J., Sofia, G., Tian, Y. ve Tarolli, P. (2018). Open-pit mine geomorphic changes analysis using multitemporal UAV survey. *Environ. Earth Sci.* 77, 220. doi: 10.1007/s12665-018-7383-9
- Yakar, M. ve Mohammed, O. (2016). Yersel Fotogrametrik Yöntem ile İbadethanelerin Modellenmesi. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 15(2), 85-95. Erişim Adresi: <http://sutod.selcuk.edu.tr/sutod/article/view/297>
- Zarco-Tejada, P.J., Diaz-Varela, R., Angileri, V. ve Loudjani, P. (2014). Tree height quantification using very highresolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *Eur. J. Agron.* 55, 89–99. doi: 10.1016/j.eja.2014.01.004
- Zeybek, M. ve Kaya, A. (2020). Tarihi Yığma Kiliselerde Hasarların Fotogrametrik Ölçme Tekniğiyle İncelenmesi: Artvin Tibeti Kilisesi Örneği. *Geomatik*, 5 (1), 47-57. doi: 10.29128/geomatik.568584

Astrojeodezide QDaedalus Sistemi Uygulamaları: Bir İnceleme (Applications of the QDaedalus System in Astrogeodesy: A Review)

Müge ALBAYRAK*^{ID}, Sébastien GUILLAUME^{ID}

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

*Sorumlu yazar: muge.albayrak@heig-vd.ch

Geliş Tarihi (Received): 13.04.2020

Kabul Tarihi (Accepted): 31.12.2020

ÖZ

Astrojeodezik çekül sapma verisi, Yer'in gravite alanı ile ilgili önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu veriyi bir noktada elde edebilmek için, o noktaya ait astronomik ve jeodezik koordinatların (enlem ve boylam) bilinmesi gereklidir. Günümüzde jeodezik enlem ve boylam çift-frekanslı GNSS alıcıları ile elde edilebilirken; astronomik enlem ve boylam Sayısal Zenit Kamera Sistemleri (SZKS) veya elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemi ile gözlemlenebilmektedir. SZKS'ler yüksek doğrulukta çekül sapma verisi (0.05"-0.1") sağlamalarına rağmen, genellikle geliştirilmeleri pahalı ve nakliyesi zordur. Bu güçlükler, astrojeodezik sistem geliştirme alanında öncü araştırma kuruluşlarından biri olan ETH Zürih'teki araştırmacıları, SZKS'lere alternatif bir sistem geliştirmeye yöneltmiştir ve QDaedalus sistemi (doğruluğu ~0.2") bu şekilde ortaya çıkmıştır. QDaedalus sistemi, SZKS'lerden farklı olarak gün ışığında jeodezik amaçlı çalışmalarda da kullanılabilir. QDaedalus sistemi; elektronik takeometre, CCD kamera, takılabilir menisküs lens, u-blox tek-frekanslı GNSS alıcısı ve anteni, bir arayüz kutusu ve bir dizüstü bilgisayardan oluşmaktadır. Bu makalede, QDaedalus sistemi hakkında detaylı bilgi sunularak, astrojeodezik gözlemlerin nasıl yapıldığı ve gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma bileşenlerinin nasıl hesaplandığı açıklanmıştır. Ayrıca, QDaedalus sistemi ile 2014-2019 yılları arasında gerçekleştirilen tüm astrojeodezik çalışmalar gözden geçirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Astrojeodezik Çekül Sapması, Astrojeodezik Gözlemler, Astrojeodezik Ölçme Aletleri, QDaedalus Sistemi, Sayısal Zenit Kamera Sistemi

ABSTRACT

Astrogeodetic vertical deflections (VDs) data provide valuable information about the structure of Earth's gravity field. To obtain astrogeodetic VDs at a point, the astronomic and geodetic coordinates (latitude and longitude) of this point need to be known. Currently, geodetic coordinates are obtained by dual-frequency GNSS receivers, while astronomical coordinates are obtained by the Digital Zenith Camera System (DZCS) or the total station-based QDaedalus system. Although DZCSs provide highly accurate (0.05"-0.1") VDs data, the DZCSs are usually very expensive to construct and

difficult to transport. For these reasons, researchers at ETH Zurich, a leading developer of astrogeodetic instruments, attempted to develop an alternative instrument to the DZCS: the QDaedalus system (accuracy ~0.2"). Unlike the DZCS, the QDaedalus system can be used for geodetic work during daytime. The QDaedalus system consists of a total station, a CCD camera, a mountable meniscus lens, a single-frequency GNSS receiver and antenna, an interface box, and a laptop. In this paper, the QDaedalus system is presented in detail, and the methods for completing astrogeodetic observations and obtaining astrogeodetic VDs are explained. This paper also reviews all astrogeodetic studies conducted with the QDaedalus system from 2014-2019.

Keywords: Astrogeodetic Vertical Deflection, Astrogeodetic Observations, Astrogeodetic Measurement Systems, QDaedalus System, Digital Zenith Camera System

1. GİRİŞ

Astrojeodezik çekül sapması (ϵ), bir yer noktasındaki gravite vektör doğrultusu ile seçilen referans elipsoidinin normali arasındaki açısal farktır (Jekeli, 1999; Featherstone ve Rüeger, 2000). Yer'in gravite alanı ile ilgili önemli bilgiler içeren astrojeodezik çekül sapma verisi, diğer jeodezik teknikler ile ölçülen/gözlemlenen veriler (jeodezik koordinatlar, yükseklik farkı vb.) kadar kolay elde edilememektedir. Bu veriyi temin edebilmek için, jeodezik ve astronomik enlem ve boylam bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde jeodezik enlem ve boylam (ϕ , λ) GNSS alıcıları ile elde edilebilirken; astronomik enlem ve boylam (Φ , Λ) Sayısal Zenit Kamera Sistemleri (SZKS) veya elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemi ile gözlemlenebilmektedir. Jeodezik ve astronomik sistemler ile gerçekleştirilen gözlemlerde, sistemlerin nokta üzerine kurulması gerekliliğinden dolayı, gözlemler aynı noktada farklı zamanlarda yapılmaktadır. Bu gözlemler sonucu Kuzey-Güney (ξ) ve Doğu-Batı (η) astrojeodezik çekül sapma bileşenleri aşağıdaki eşitlikler ile elde edilmektedir (Pick, Picha ve Vyskočil, 1973; Jekeli, 1999):

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

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

Eşitlik 1 ve 2’de, ikinci ve daha yüksek dereceden terimler ihmal edilmiştir. Eşitliğin ihmal edilen terimleri için, Pick ve diğerleri (1973) ve Jekeli (1999) makalelerinden yararlanılabilir. Toplam astrojeodezik çekül sapması ise aşağıdaki eşitlik ile elde edilmektedir:

$$\varepsilon = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \quad (3)$$

Astrojeodezik çekül sapması, Helmert çekül sapması olarak da anılmaktadır. Ancak, astrojeodezik çekül sapması daha yaygın bir kullanım olarak bilinmektedir (Jekeli, 1999; Hirt, 2010). Astrojeodezik çekül sapması dışında Molodensky ve Pizetti çekül sapmaları da bulunmaktadır. Bu üç çekül sapması birbirinden, seçilen referans doğrultusuna göre ayrılmışlardır (Jekeli, 1999; Featherstone ve Rüeger, 2000). Bu makale kapsamında sadece astrojeodezik çekül sapma verileri kullanıldığından, makalenin devamında çekül sapma terimi tek başına kullanılmış ve astrojeodezik çekül sapmasını nitelemiştir.

Geçmişten günümüze jeodezik ve astronomik koordinatların gözlemlendiği aletler daha hızlı ve yüksek doğrulukta veri elde edilebilmesi için teknolojinin gelişimine paralel olarak sürekli güncellenmiştir. Ancak, bu iki koordinat bilgisi ile üretilen astrojeodezik çekül sapma verisinin belirlenmesinde kullanılan temel prensip günümüze kadar değişmeden ulaşmıştır (Eşitlik 1 ve 2). Çekül sapma bileşenlerinin elde edilmesindeki zorluğun asıl sebebi astronomik koordinatların gözlenmesindeki güçlülüdür. 1970’li yıllara kadar astrojeodezik çekül sapma bileşenlerinin elde edilmesi için usturlab, T4 ve DM3A teodolitleri kullanılmıştır. Bu aletlerden DKM3A teodolitinin doğruluğunun Omega OTR kronografi ile birlikte kullanıldığında ~0.5" olduğu, Türen ve Üstün (2013) tarafından belirtilmiştir. 1970’li yıllardan sonra ise fotografik zenit kamera sistemleri aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır.

2000’lerde yük bağlaşımlı aygıt (Charge Coupled Device-CCD) algılayıcıların icadı sonrasında, bu algılayıcıların teleskoplar ile birlikte kullanılması kısa poz aralıklarında yüksek oranda yıldız ışığı yakalanmasını mümkün kılmıştır (Halicioğlu, 2015). Astronomide bir milat olarak kabul edilen CCD kameraların bu başarısı, jeodezik astronomi çalışmalarına da yeni bir soluk kazandırmıştır. En yaygın kullanılan iki fotografik

zenit kamera sistemi; Almanya Hannover ve İsviçre ETH Zürih Üniversiteleri tarafından geliştirilen Taşınabilir Zenit Kameralar (TZK)—TZK2 (Gessler, 1975; Wissel, 1982) ve TZK3 (Bürki, 1989)—CCD kameralar ile entegre edilerek, modernize edilmişlerdir. CCD bütünleştirilen Hannover’deki TZK2, TZK2-Dijital sistem (TZK2-D; Hirt, 2004); ETH Zürih’teki TZK-3 ise Dijital Astronomik Sapma Ölçme Sistemi (Digital Astronomical Deflection Measuring system-DIADEM; Somieski, 2008) olarak yeniden isimlendirilmişlerdir. DIADEM, Avrupa ve Kuzey Amerika’daki birçok astrojeodezik çalışmada kullanıldıktan sonra (Hirt, Bürki, Somieski ve Seeber, 2010a), hem boyutunun küçültülmesi hem de daha ekonomik bir fiyata mal edilerek endüstrileşmesi için tekrar güncellenmiş ve Kompakt Dijital Astronomik Kamera (Compact Digital Astronomical Camera-CODIAC; Guillaume, 2015) olarak yeniden isimlendirilmiştir. CODIAC, ilk olarak 2011 yılında DIADEM ile gerçekleştirilen “Amerika Düşey Datumunun Yeniden Tanımlanması İçin Gravite (Gravity for the Redefinition of the American Vertical Datum)” projesi kapsamındaki “Geoit eğimi validasyon ölçmeleri (Geoid Slope Validation Surveys 2011-GSVS11; Smith ve diğerleri, 2013)” çalışmasının devamı niteliğindeki iki projede de kullanılmıştır. Bu projeler: Wang ve diğerleri (2017) tarafından tamamlanan GSVS14 ve Van Westrum ve diğerleri (2021) tarafından gerçekleştirilen GSVS17 projeleridir.

CCD kameranın, elektronik takeometreye entegre edilerek astrojeodezik gözlemlerde kullanılması fikri, TZK2-D ve DIADEM’in geliştirildiği dönemde ortaya çıkmıştır. 2005 yılında, CCD bütünleştirilen elektronik takeometre, ICARUS sistemi olarak adlandırılarak, astrojeodezik çalışmalarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu makalede bahsi geçen Qdaedalus sistemi, 30 yılı aşkın süredir astrojeodezik gözlem aletleri geliştirme deneyimine sahip ETH Zürih Üniversitesi Jeodezi ve Jeodinamik Laboratuvarı (Geodesy and Geodynamics Lab.-GGL) tarafından ICARUS sisteminin modernize edilmesiyle geliştirilmiştir. Qdaedalus, ICARUS ile aynı astronomik gözlem prensibine sahiptir. Bu nedenle, ICARUS sisteminden kısaca bahsetmek yerinde olacaktır.

ICARUS’un temel bileşenleri; elektronik takeometre, CCD kamera, tek frekanslı bir GPS alıcısı ve anteni ve ICARUS yazılımının yüklendiği bir dizüstü bilgisayardır. GGL tarafından geliştirilen ICARUS yazılım paketinde (Bürki, 2005), gözlemlenen yıldızların yıldız katalogları ile eşleştirilmesi için Fricke ve diğerleri (1988)

tarafından geliştirilen Beşinci temel katalog (Fifth fundamental catalogue-FK5) kullanılmıştır.

ICARUS'un QDaedalus olarak modernize edilmesindeki temel amaç, sistemin doğruluğunu arttırmak ve astronomik gözlemlerin süresini kısaltmaktır. Bu konuda hedeflenen amaca ulaşıldığı söylenebilir: (i) ICARUS ile gerçekleştirilen astronomik gözlemler sonucu elde edilen çekül sapma verileri yaklaşık 0.5" doğruluğa sahip (Hirt ve Bürki, 2006) iken, QDaedalus'un doğruluğu ~0.2" dir (Hauk, Hirt ve Ackermann, 2017; Albayrak ve diğerleri, 2020a). (ii) ICARUS ile 60-90 dakikalık bir zaman diliminde, her bir yıldız 6 adet gözlem yapılarak 25 adet yıldız gözlemlenebilmekteyken (Wiesenhofer ve Kühtreiber, 2007), QDaedalus sistemi ile 15 dakikalık bir sürede, her bir yıldız en az 4 adet gözlem yapılarak yaklaşık 70 adet yıldız gözlemlenebilmektedir (Hauk ve diğerleri, 2017).

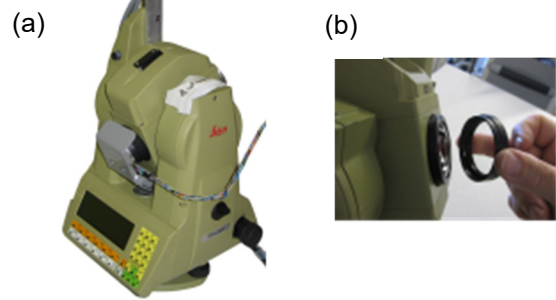
ICARUS, QDaedalus olarak modernize edilmeden önce Daedalus olarak güncellenmiştir. ICARUS ve Daedalus, sadece geceleri yıldızlara gözlem yaparak astrojeodezik çalışmalarda kullanılmak maksadıyla geliştirilmişken; Daedalus'un QDaedalus olarak modernize edilmesinin ana nedeni, sistemin hem astrojeodezik çalışmalarda hem de gündüzleri jeodezik çalışmalarda kullanılmasını sağlamaktır. Örneğin, QDaedalus sistemi mühendislik ölçmeleri ve deformasyon, titreşim ve frekans analizi (Bürki, Guillaume, Sorber ve Oesch, 2010; Charalampous ve diğerleri, 2015; Guillaume, Clerc, Leyder, Ray ve Kistler, 2016), yakın yersel kırılmanın özelliğinin ortaya konması (Hirt, Guillaume, Wisbar, Bürki ve Sternberg, 2010b), fotografik dokümantasyon (Bürki ve diğerleri, 2010), GNSS anten faz merkezi değişiminin kalibrasyonu (Wili ve Guillaume, 2019) gibi birçok jeodezik çalışmada başarı ile kullanılmıştır. Bu makalede, yalnızca QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen astrojeodezik uygulamalar ele alınmıştır.

Astrojeodezik çekül sapma verisi, GNSS ve nivelman verilerinin kombinasyonu vasıtasıyla da hesaplanmaktadır (Soler, Carlson ve Evans, 1989; Ceylan, 2009; Vittuari ve diğerleri, 2016); fakat astrojeodezik sistemler ile gözlemlenen çekül sapma verisi kadar yüksek duyarlılığa sahip değildir (bkz. Bölüm 4b; Vittuari ve diğerleri, 2016).

2. QDAEDALUS SİSTEMİ

a. QDaedalus Sistemi Bileşenleri

QDaedalus sisteminin temel prensibi, robotik bir elektronik takeometre cihazının oküler aracılığıyla sağladığı görüş olanağının, prizma hedefi olmaksızın CCD kamera ve otomatik nesne tanıma (Automatic Target Recognition-ATR; Knoblach, 2009) teknolojisi ile sağlanmasıdır. ATR teknolojisi, görünen objelerin mekansal doğrultusunun tamamen otomatik ve yüksek doğrulukla ölçülmesini olanaklı hale getirmektedir (Guillaume, Bürki, Griffet ve Durand, 2012; Guillaume, Clerc ve Bürki, 2015). Bu amaçla, Şekil 1 (a)'da görüldüğü üzere, elektronik takeometreye ait oküler çıkartılarak, hiç bir modifikasyon yapmadan yerine CCD kamera takılmıştır. Uzak nesnelere, özellikle astronomik gözlemler sırasında yıldızlara gözlem yaparken, dürbünün büyütme gücünü arttırmak için ise dürbüne menisküs lens takılmıştır (Şekil 1b). Menisküs lens, CCD'nin görüntü düzlemindeki nesneyi yaklaşık 4mm odak noktasına kaydırarak, görüntünün net olmasını sağlamaktadır (Guillaume ve diğerleri, 2015).

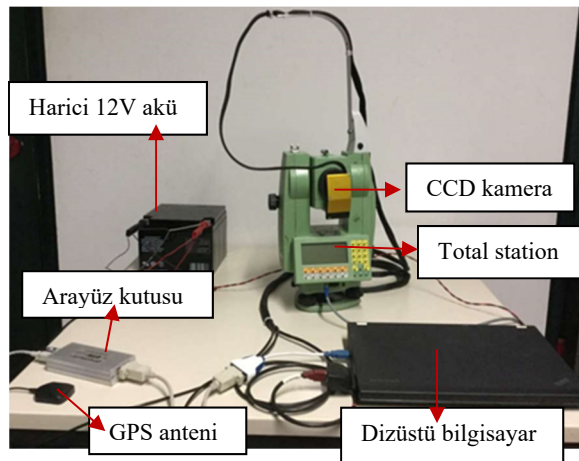


Şekil 1. (a) Elektronik takeometreye ait oküler çıkartılarak yerine CCD kameranın takılması, (b) elektronik takeometre dürbününe menisküs lens yerleştirilmesi (Guillaume ve diğerleri, 2012).

QDaedalus sistemi (Şekil 2), elektronik takeometre, AVT Guppy F-080 CCD kamera, takılabilir menisküs lens, düşük ücretli u-blox LEA tek-frekanslı GNSS alıcısı ve anteni (u-blox, 2015), yıldız görüntüsünü GNSS zamanı ile eşleştirilmesi için tüm donanımların (GNSS alıcısı, elektronik takeometre ve dizüstü bilgisayar) birbirleriyle entegrasyonunu sağlayan bir arayüz kutusu ve firewire kablo ile iletişim kurulması için gerekli Express kart girişine sahip, tüm yazılım ve donanımların kontrolünü sağlayan, resim görüntüleme ve değerlendirilebilme yeteneği olan bir dizüstü bilgisayardan oluşmaktadır (Bürki ve diğerleri, 2010). Elektronik takeometre, CCD kamera ve arayüz kutusuna enerji, harici 12V akü ile sağlanmaktadır. Robotik elektronik takeometre,

QDaedalus yazılımına entegre edilmiş Leica GeoCom yazılımı ile yönetilmektedir (Geosystems, 2004). Son olarak, FK6 yıldız kataloğu kullanılmaktadır (Wielen ve diğerleri, 1999).

GGL tarafından, QDaedalus sistemleri farklı özellikteki elektronik takeometrelere entegre edilebilecek biçimde tasarlanmışlardır. Elektronik takeometre dışında QDaedalus'a ait tüm donanımlar aynıdır. QDaedalus sistemleri ile şu ana kadar kullanılan tüm elektronik takeometreler, Leica firmasına aittir ve robotiklerdir: TCA1800, TPS1202+, TCA2003, TDA5005 ve TCRM1101. Bu elektronik takeometreler, sabit bir zenit açısında tek frekanslı bir GNSS alıcısı tarafından sağlanan zaman bilgisi ve QDaedalus yazılımı sayesinde, gözlem anında FK6 yıldız kataloğundaki yıldızların yaklaşık konumuna yönlenmekte ve her bir yıldızla en az 4 adet gözlem gerçekleştirmektedir.



Şekil 2. QDaedalus sistemi.

b. QDaedalus Sistemi ile Astronomik Gözlem Gerçekleştirilmesi

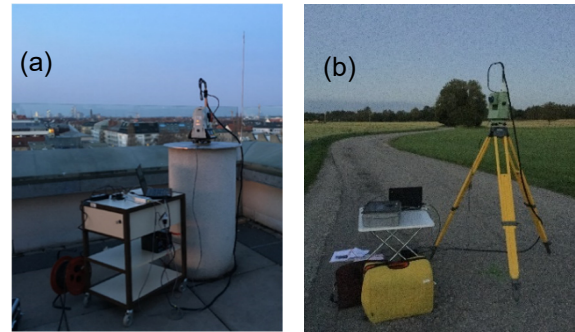
QDaedalus sistemi ile astronomik gözleme başlayabilmek için öncelikli olarak başarılı bir şekilde tamamlanması gereken 3 aşama bulunmaktadır (Guillaume ve diğerleri, 2015):

(1) QDaedalus sisteminin kurulumu: Bu aşamada, QDaedalus sisteminin hem arazide tesis edilmiş bir nokta üzerine kurulumu hem de tüm sistem bileşenlerinin QDaedalus yazılımı ile bağlantılarının kurulumundan bahsedilmektedir.

QDaedalus'un pilye tesisli noktalara kurulum süresi, çivi ile tesis edilmiş yer noktalarına kurulum süresine göre daha hızlıdır (Şekil 3). Her iki kurulumda da dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, gözlem süresince gözlemci tarafından

tutulmak zorunda olan CCD kamera kablosunun en üstte olması için en son takılmasıdır. Bunun nedeni, farklı yıldızlara gözlem yapmak amacıyla dönmek zorunda olan dürbüne bağlı CCD kamera kablosunun, diğer kablolarla ve/veya elektronik takeometreye dolaşmasını engellemektir.

QDaedalus sisteminin nokta üzerine kurulumu tamamlandıktan sonra dizüstü bilgisayar çalıştırılmalı ve QDaedalus yazılımı açılmalıdır. Tüm cihazların (elektronik takeometre, CCD kamera ve GNSS) QDaedalus yazılımında bulunan "Bağlan" düğmesi ile bağlantıları sırasıyla tek tek yapılmalıdır. GNSS alıcısı ile bağlantı kurulduktan sonra, dizüstü bilgisayar saatinde değişiklik yapılarak; GNSS ile dizüstü bilgisayar zamanı arasındaki farkın 2 saniyeden az olması sağlanmalıdır. Bunun nedeni, elektronik takeometre dürbününün yıldızlara yönlenmesinin GNSS zamanına göre senkronize edilmesidir.



Şekil 3. QDaedalus sisteminin (a) Münih Teknik Üniversitesinin (TUM) terasında bulunan pilye tesisli astrojeodezik test/kontrol istasyonuna kurulumu, (b) Münih astrojeodezik gözlem profilindeki çivi tesisli bir yer noktasına kurulumu (Nokta numarası: 36900).

(2) CCD kamera kalibrasyonu: CCD kamera kalibrasyonunun temel amacı, CCD (düzlem; 2B-Boyutlu) ve elektronik takeometre (küresel; 3B) koordinatları arasında dönüşüm yapılabilmesi için gerekli kalibrasyon parametrelerini elde etmektir. Kalibrasyon yöntemi olarak, Guillaume ve diğerleri (2015) tarafından grid yöntemi tercih edilmiştir. Kalibrasyon aşamasına, elektronik takeometre dürbününün el feneri gibi yapay bir ışığa, yönlendirilmesi ile başlanmaktadır. Bu yapay ışık ile yıldızların ışık karakteri, elektronik takeometreye göre benzerdir. Dürbün, üzerindeki yöneltme elemanı yardımıyla seçilen yapay ışık kaynağına yönlendirilmelidir. Gözlemlerin gece yapılmasından dolayı dürbün üzerindeki yöneltme elemanının ayrı bir yapay ışık kaynağı ile aydınlatılması gereklidir. Dürbün yapay ışığa yönlendirildikten sonra, ince yöneltmenin başarılı olabilmesi için

dürbünün göze uydurulması ve görüntünün netleştirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada dizüstü bilgisayar ekranından yararlanılacağı için, dizüstü bilgisayar yer seçimi oldukça önemlidir. Yapay ışığa yönlendirme yapıldıktan sonra, dizüstü bilgisayar ekranında ilk olarak simit biçiminde görünen yapay ışık kaynağının, elektronik takeometrenin görüntü netleştirme vidasının çok yavaş hareketlerle çevrilmesiyle daire görüntüsünü almasından sonra “kalibrasyon” düğmesine basılmalıdır. Bu durumda iken, “çekim süresi” ve “kazanç” ortamın ışığına göre ayarlanmalıdır. Eğer ortam yeteri kadar karanlık ise, “çekim süresi” ve “kazanç”, sırasıyla 40 ve 400 olarak ayarlanmalıdır. Grid kalibrasyon yönteminde nesne, CCD kamera tarafından birçok farklı noktasından ölçülmektedir. Bununla birlikte, ölçümler, elektronik takeometrenin 1. ve 2. durumunda yapılmaktadır. Böylece standart sistematik hataların ölçümlere etkisi azaltılmaktadır (Guillaume ve diğerleri, 2012; Hauk ve diğerleri, 2017).

(3) Teleskobun referans yıldız oryantasyonu: Astrojeodezik gözlem yapan gözlemcinin, elektronik takeometre dürbününü sabit bir yıldızla yönlendirmesi ve bu yıldızla oryantasyon gerçekleştirmesi gerekmektedir. QDaedalus ile gerçekleştirilen tüm astronomik gözlemlerde sabit/referans yıldız olarak kuzey yarım kürede Alpha Ursae Minoris/Kutup yıldızı (Polaris); Güney Yarım Kürede ise Sigma Octantis seçilmiştir. Bunun nedeni, bu yıldızların, Dünya'nın dönüş eksenini ile aynı doğrultuda bulunması dolayısıyla, gözlemcilere göre sabit olarak algılanmasıdır. Kuzey yarım kürede kutup yıldızına elektronik takeometrenin dürbününü yönlendirmek amacıyla gerekli azimutu hesaplamak için 90° den bulunan noktanın enlemi çıkartılmalıdır. Böylelikle, bulunan değer ile dürbünün yaklaşık ne kadar bir azimut açısına sahip olması gerektiği hesaplanmış olur. Örneğin, TUM istasyonunun enlemi 48° olduğu için yaklaşık 42° lik bir azimut açısına elektronik takeometre dürbünü sahip olmalıdır. QDaedalus yazılımının yeni astronomik gözlemler sekmesinde “zenit açısı” bölümüne bu değer (42°) girilmelidir. Daha sonra dürbünün bu açısında, operatör dürbünü kutup yıldızına kendi becerisi ile yöneltmelidir. Bu aşamada amatör kullanıcılar için Stellarium gibi mobil ve masaüstü uygulamaları faydalı olabilir (Gates, Zotti, Wolf ve Gerdes, 2016). Dürbün, referans yıldızla yönlendirildikten sonra, CCD'deki görüntü, kalibrasyon aşamasındaki gibi netleştirme vidası ile netleştirilmeli ve “Oryantasyon” düğmesine basıldıktan sonra, “oryantasyon başarılıdır” yazısı ekranda

görünmelidir. Böylece, bu aşama tamamlanmış olur.

Yukarıda bahsedilen 3 aşama başarılı bir biçimde tamamlandıktan sonra, son aşama olan astronomik gözlem aşamasına geçilebilmektedir. Astronomik gözlemler için azimut açısı 30° seçilmeli ve “çekim süresi”, “kazanç” gibi gözleme dair tüm bilgiler gözlemci tarafından eksiksiz girilerek, görünen tüm yıldızların otomatik olarak seçilmesi için; “sonraki yıldızları otomatik seç” butonu seçili olmalıdır. Parlaklık derecesi (kadir) yüksek olan yıldızlar daha sönüktür. CCD ile yapılan astronomik gözlemlerde, 1 ile 6 kadirdeki yıldızlar seçilebilmektedir. QDaedalus ile astronomik gözlem gerçekleştirirken, görünen yıldızların sıralaması yıldızların kadirine göre değil de ilişkilerine göre yapılmaktadır. Bu nedenle, gözlem sırasında “yıldızları ilişkilerine göre sırala” seçilmelidir. İlk yıldızı seçtikten sonra, “başlat” düğmesine basılarak gözleme başlanmalı ve bir sonraki yıldız, yazılım tarafından otomatik seçilmelidir. Gözlem yapılan yıldızdan sonra hangi yıldızla gözlem yapılacağı ekranda seçilen yıldızın altında görülmektedir. Başlat düğmesine basıldığında aynı zamanda bir oturuma ait ilk seriye de başlanılmaktadır.

“Oturum” kavramı, gözlem noktasında aletin kurulması ve gözlem bitene kadarki tüm süreci ifade ederken; “seri” kavramı gözlemci tarafından belirlenen süre içinde gerçekleştirilen astronomik gözlemi ifade etmektedir. Hauk ve diğerleri (2017) tarafından QDaedalus ile gerçekleştirilen astronomik test çalışmalarında (bkz. Bölüm 3), her bir serinin yaklaşık 15 dk olması ve yıldızların görülebileceği açık gökyüzü mümkün olduğu sürece bir oturumun 3–4 seri yapılması önerilmiştir. Gerçekleştirilen tüm serilerin ortalaması alınarak, oturuma ait astrojeodezik çekül sapma bileşenleri hesaplanmaktadır. Gözlem sırasında, gökyüzünün bulutlarla kaplanması, sis vb. meteorolojik olaylardan dolayı her zaman 3–4 seri gözlem yapılamamaktadır. Bu gibi durumlarda, eğer o istasyonda tekrar gözlemi yapma imkanı da olmazsa, yapılan 1–2 seri gözlem değerlendirilerek o istasyona ait çekül sapma bileşenleri tanımlanmaktadır.

c. QDaedalus Sistemi ile Astronomik Koordinatların Elde Edilmesi

Bir astrojeodezik ölçme aleti ile gerçekleştirilen astronomik gözlem sonrası astronomik koordinatların hesabı için, Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (International Earth Rotation and Reference Systems Service-IERS) tarafından sağlanan yer

dönüklük parametreleri (Earth Orientation Parameters-EOP) kullanılmaktadır. Bu parametreler, yersel koordinat sisteminden (International Terrestrial Reference System-ITRS), göksel koordinat sistemine (International Celestial Reference System-ICRS) dönüşümün gerçekleştirilmesini sağlamaktadırlar (Sigl, 1991; Seeber, 2003; Torge ve Müller, 2012). QDaedalus yazılımında gözlem sonrası astronomik koordinatların elde edilmesi için kullanılan eşitlik aşağıdaki gibidir (Guillaume ve diğerleri, 2012; Vittuari ve diğerleri, 2016):

$$x_{topo}(t) = T(\Lambda, \Phi) x_{ITRS}(t) \quad (4)$$

$$= T(\Lambda, \Phi) R_2(-x_p) R_1(-y_p) R_3(GAST) N(t) P(t) x_{ICRS^*}(t)$$

Eşitlik (4)'te;

$x_{topo}(t)$: yerel toposentrik kartezyen sistemdeki yıldız doğrultu vektörü,

$x_{ITRS}(t)$: ITRS'deki yıldız doğrultu vektörü,

$x_{ICRS^*}(t)$: paralaks, görelilik ve anomalik düzeltmesi getirilmiş ICRS'deki yıldız doğrultu vektörü,

$T(\Lambda, \Phi)$: ITRS'den yerel toposentrik sisteme olan transformasyon matrisi,

$R_2(-x_p) R_1(-y_p)$: kutup hareketleri dönüşüm matrisleri,

$R_3(GAST)$: yer dönme hareketi dönüşüm matrisi,

$GAST$: Greenwich görünen yıldız zamanı (Greenwich Apparent Sidereal Time),

$N(t)$: nutasyon matrisi,

$P(t)$: presesyon matrisi,

t : yersel ölçme zamanıdır.

R_1 , R_2 , R_3 ve N matrislerini tanımlayan parametreler, gözlem günü için IERS web sayfasından (<http://www.iers.org/>) temin edilirken, ICRS yıldız doğrultu vektörü, ABD Ulusal Gözlemevi (United States Naval Observatory-USNO) tarafından geliştirilen NOVAS kütüphaneleri ile hesaplanmaktadır.

Yukarıda anlatılan astronomik koordinatların hesabı, QDaedalus yazılımında bulunan "Dengeleme" sekmesi ile gözlemlerden 24 saat sonra yapılmaktadır. Bu 1 günlük beklemenin sebebi, IERS web sayfasından temin edilen Uluslararası Astronomi Birliği 1980 (The International Astronomical Union-IAU1980) final (son) yer dönüklük parametrelerinin, her 24 saatte bir yayımlanmasıdır. QDaedalus yazılımına, gözlem gününe ait IAU1980 yer dönme parametreleri ile birlikte gözlem yapılan istasyona ait jeosentrik jeodezik koordinatlar girilmektedir. Bu veri girişi tamamlandıktan sonra, dengeleme sekmesinde tek bir tuş ile bir oturumdaki her bir seriye ait astrojeodezik çekül sapma bileşenleri

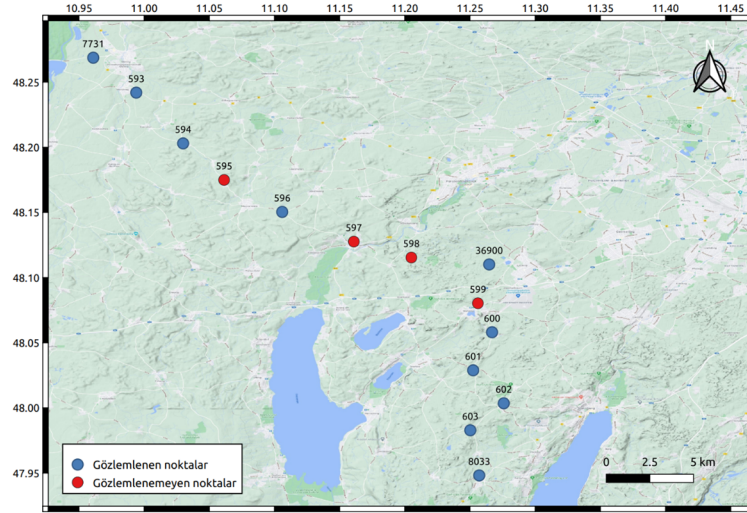
hesaplanmaktadır. Bir oturumdaki gözlemlenen tüm serilerin ortalaması alınarak, o oturuma ait astrojeodezik çekül sapma bileşenleri elde edilmektedir. Aynı istasyonda, yeni/tekrarlı gözlemler yapılması durumunda, her oturumdan elde edilen sonuçların ortalaması alınarak, o istasyona ait gözlemlenen çekül sapma bileşenleri kesin değer olarak raporlanmaktadır.

3. QDAEDALUS SİSTEMİNİN DUYARLILIĞI VE DOĞRULUĞUNUN BELİRLENMESİ

Astrojeodezik sistemlerin duyarlılığı (iç doğruluğu) aynı istasyonda yapılan tekrarlı gözlemler ile belirlenirken; doğruluğu (dış doğruluğu) geleneksel olarak başka bir astrojeodezik alet ile aynı istasyonda yapılan ölçmelerin karşılaştırılması ile belirlenmektedir (Albayrak ve diğerleri, 2019, 2020a). TUM Astronomik ve Fiziksel Jeodezi Enstitüsü'nün (Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie-IAPG) 4. katındaki terasta bulunan pilye, Leica TCA2003, TDA5005 ve TCRM1101 elektronik takeometre bütünleştirilen QDaedalus sistemlerinin duyarlılıklarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu amaçla, TCA2003, 2014 yılında Hauk ve diğerleri (2017); TDA5005, 2015–2018 yılları arasında ve TCRM1101 ise 2018 yılında Albayrak, Hirt, Guillaume, Hauk ve Halicioğlu (2018) ve Albayrak ve diğerleri (2020a) tarafından kullanılmıştır. Üç farklı elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemleriyle gözlemlenen çekül sapma verilerinin standart sapma değerleri, toplam seri ve oturum sayısı için hesaplanmıştır (Tablo 1). Bu tabloda, üç sistemin çekül sapma bileşenlerinin Kuzey-Güney (K-G) doğrultusunda 0.14" ile 0.20"; Doğu-Batı (D-B) doğrultusunda ise 0.15" ile 0.24" arasında değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlar, Albayrak ve diğerleri (2020a) tarafından, QDaedalus sistemlerinin duyarlılıklarının hem K-G hem de D-B bileşenlerinde ~0.20" olduğu ve tüm ölçümlerin birbirleri ile uyumlu olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

Tablo 1. TUM test/kontrol istasyonunda üç farklı elektronik takeometre ile gözlemlenen çekül sapma bileşenlerine ait toplam seri ve oturum sayıları ile hesaplanan standart sapma (σ) değerleri.

Elektronik takeometre	Toplam Seri	Toplam Oturum	σ_{ξ} ["]	σ_{η} ["]
TCA2003	30	4	0.20	0.15
TDA5005	56	18	0.15	0.24
TCRM1101	32	12	0.14	0.15



Şekil 4. Münih bölgesinde Hannover TZK2-D SZKS için tesis edilen ve TCRM1101 elektronik takeometre temelli QDaedalus sisteminin doğruluğunu belirlemek için kullanılan nirengi noktaları.

QDaedalus sistemi bütünleştirilerek duyarlılıkları belirlenen 3 elektronik takeometreden 2'si—TCA2003 ve TCRM1101—doğruluklarının belirlenmesi için Hannover TZK2-D SZKS (doğruluğu $\sim 0.1''$) ile daha önce astrojeodezik gözlem gerçekleştirilmiş nirengi noktalarında kullanılmışlardır. TCA2003 temelli QDaedalus sistemi Hauk ve diğerleri (2017) tarafından Bavyera Alpleri'nde 6 nirengi noktasında; TCRM1101 temelli QDaedalus sistemi ise Albayrak ve diğerleri (2020a) tarafından Münih bölgesinde 10 nirengi noktasında test edilmiştir (Şekil 4).

Bavyera Alpleri'nde, TCA2003 ile gözlemlenen çekül sapma verisi, TZK2-D SZKS ile gözlemlenen değerlerle (Hirt ve Flury, 2008) karşılaştırıldığında, K-G ve D-B çekül sapma bileşenlerindeki farkların $\sim 0.2''$ olduğu görülmüştür (Hauk ve diğerleri, 2017). Münih bölgesinde, TCRM1101 ile TZK2-D SZKS arasında yapılan karşılaştırmalarda, Bavyera Alpleri'ndekine benzer sonuçlar elde edilmiştir (Albayrak ve diğerleri, 2020a). Elektronik takeometrelerin doğruluklarının aynı SZKS ile belirlendiği bu iki çalışmada, nihai olarak TCA2003 ve TCRM1101 ile elde edilen çekül sapma verilerinin uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Albayrak ve diğerleri, 2020a). Nitekim, TUM kontrol istasyonundaki sonuçlarda da elektronik takeometrelerin uyumlu olduğu vurgulanmıştır.

Astronomik gözlemlerin, jeodezik gözlemler gibi aynı koşullar altında yapılamaması, gözlem yapılan noktanın zamana bağlı meteorolojik etmenlerle doğrudan ilintili olması, QDaedalus sistemi ile gözlemlenen çekül sapma

bileşenlerinin duyarlılık ve doğruluğunun belirlenmesinde kötümser değerlendirme yapılmasına neden olmaktadır. Gözlem istasyonu, gözlem tarihi ve zamanına göre değişmekte olan meteorolojik olaylardan (gözlem sırasında gökyüzünün bulut ile kaplanması, nem oranının yüksek olması, sis çökmesi vb.) ve ışık kirliliğinden yüksek derecede etkilenmektedir. Örneğin, sık karşılaşılan gözlem sırasında gökyüzünün bulut ile kaplanması sorunda, gözlemci başlatılan seri gözlemi sonlandırmaktansa bulutların geçmesini, yani yıldızların tekrar görülebileceği açık gökyüzünü beklemeyi tercih etmektedir. Açık gökyüzünün beklenmesi bazen 1 saat gibi bir süreyi bulmakta ve bu durum da dizüstü bilgisayar bataryasının bitmesi gibi bir soruna neden olabilmektedir. Karşılaşılan bu tür durumlar, bir oturumda 3–4 seri gözlem yapılamamasının temel nedenidir. Ayrıca, her seride gözlemlenen yıldız sayısı da, yukarıda belirtilen benzer meteorolojik faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, QDaedalus'un duyarlılığı ile ilgili yapılan testlerde ölçülerin (referans değerden olan çekül sapması) aralığının bazen $0.5''$ değerine kadar yayılmasının nedeninin farklı gözlem koşulları ve gözlemlenen yıldız sayısındaki değişiklikten kaynaklandığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Astrojeodezik sistemlerin duyarlılığı ve doğruluğu belirlendikten sonra sistemler çeşitli arazi uygulamalarında kullanılabilmektedirler. Ancak, başka bir coğrafi bölgeye nakliyesinin yapılması durumunda, sistemin nakliye sırasında zarar görüp görmediğini tespit edebilmek için, nakliyesi yapılan yerde yeni bir test noktası tesis edilmeli ve mutlaka birkaç gece bu test noktasında tekrarlı astrojeodezik gözlemler

gerçekleştirilmelidir. Bununla birlikte, arazi çalışmaları sırasında gözlemlenen, örn. 5–7 nirengi noktasından sonra tekrar gözlemlerinin yapıldığı test noktasında yeni gözlemlerin yapılması verilerin güvenilirliğini sağlamak adına oldukça önemlidir. Çünkü tüm ölçme sistemlerinde olduğu gibi, astrojeodezik sistemlerde de olası bir problemin oluşması durumunda erken teşhis edilmesi ve gözlemlenen verilerin güvenilirliğin sağlanması için en üst düzeyde önlemler alınması gerekmektedir. Tekrarlı gözlemlerde, gözlemlenen yeni veri setindeki farklılığın tespiti durumunda, sistemin kalibrasyonu, hata tespiti vb. yapılmalıdır.

4. QDAEDALUS SİSTEMİ İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ASTROJEODEZİK ÇALIŞMALAR

Sayısal Zenit Kamera Sistemleri (SZKS) birçok farklı astrojeodezik uygulamada başarılı bir biçimde kullanılmıştır. En yaygın kullanıldıkları uygulamalar şu şekilde sıralanabilir: Geometrik-astronomik nivelman (Hirt ve Bürki, 2006; Hirt ve diğerleri, 2011), astrojeodezik geoit belirleme (Hirt ve Flury 2008), yükseklik sistemlerinin validasyonu ve gravite alanı modelleme (Smith ve diğerleri, 2013; Wang ve diğerleri, 2017), yerel jeodezik ağ uygulamaları (Volafik, Machotka, Kuruc, Puchrik ve Jurcik, 2013; Halicioğlu, Deniz ve Özener, 2016) ve anormal kırılmaların izlenmesi (Hirt, 2006; Hirt, 2012). SZKS'ler gibi QDaedalus sistemleri de çok çeşitli astrojeodezik uygulamalarda kullanılmıştır. QDaedalus sistemlerinin, SZKS'lere göre nakliyesinin çok daha kolay yapılabilmesi ve çetin arazi koşullarında rahatlıkla kullanılabilmesi, QDaedalus'un geliştirildiği ülke olan İsviçre dışında beş farklı ülkede daha kullanılmasını sağlamıştır. QDaedalus sistemi ile İsviçre'de yapılan ve sonuçları paylaşılan çalışmalar, gün ışığında ya da iç mekanlarda yapılan jeodezik çalışmalardır (bkz. Bölüm 1). QDaedalus ile Almanya, İtalya, Macaristan, Avustralya ve

Türkiye olmak üzere beş farklı ülkede gerçekleştirilen uygulamalar astrojeodezik amaçlı çalışmalardır (Tablo 2) ve gerçekleştirildiği coğrafi bölgeye göre bu bölümün devamında açıklanmıştır.

a. Almanya'da QDaedalus Sistemi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Almanya, astrojeodezik sistem geliştirme deneyimi bakımından, İsviçre ile birlikte dünyada öncü bir rol üstlenmiştir. Hannover TZK2-D SZKS, Almanya dışında Avrupa'da birçok farklı ülkede

kullanılmıştır (Hirt ve Bürki, 2006). Bölüm 3'te, QDaedalus sisteminin doğruluğunu belirlemek için TZK2-D ile astrojeodezik gözlem yapılan Bavyera Alpleri ve Münih bölgesindeki mevcut nirengi noktaları kullanıldığından, 3 farklı elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemlerinin duyarlılığının ise TUM'deki kontrol istasyonunda belirlendiğinden bahsedilmişti. Almanya'da TUM IAPG 1 adet QDaedalus sistemine sahip olduğu için Almanya QDaedalus sistemi ile astrojeodezik gözlemlerin en yoğun yapıldığı adreslerden biri olmuştur. Avustralya ve Türkiye'de QDaedalus ile gerçekleştirilen astrojeodezik çalışmalara ise TUM IAPG ve ETH Zürih GGL destek vererek katkı sağlamışlardır. Almanya'da bahsedilen çalışmaların dışında, Albayrak ve Hirt (2018) tarafından Wettzell Jeodezik Gözlemevinde (Geodetic Observatory Wettzell-GOW) Leica TCRM1101 ve TDA5005'lerle bütünleştirilen QDaedalus sistemleri vasıtasıyla astrojeodezik çalışmalar yürütülmüştür.

616 m yükseklikteki Wagnerberg dağında bulunan GOW, Wettzell köyünün batısında, Almanya'nın Bavyera ormanlarında yer almaktadır. GOW, dünyanın en önemli jeodezik gözlemlerinden biri olmakla birlikte, jeodezik uydru teknikleri çalışmaları için (VLBI, SLR, GNSS ve DORIS), Almanya Kartografya ve Jeodezi federal dairesi (Federal Agency for Cartography and Geodesy-BKG) ve TUM tarafından yönetilmektedir (Klügel, Mähler ve Schade, 2011). GOW'da QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen astrojeodezik gözlemler, gravite veri setleri arasındaki farklılıkların giderilmesi ve farklı elektronik takeometrelerle aynı pilyelerde elde edilen verilerin uyumlu olup olmadığının tespit edilmesi amaçlarıyla gerçekleştirilmiştir. GOW'daki 36 pilye arasından, tüm alanı kapsayacak biçimde 6 pilye astrojeodezik gözlemler için seçilmiştir.

GOW'da 6 pilyede gerçekleştirilen gözlemler, TCRM1101 ve TDA5005 temelli QDaedalus sistemleri ile birbirini takip eden iki gecede tamamlanabilmiştir. Birinci gece her bir elektronik takeometre ile 3 istasyonda (WT: Wettzell istasyonu) gözlem gerçekleştirilmiştir. İkinci gece, ilk gece kullanılan istasyonda kullanılan farklı bir elektronik takeometre istasyonlarda kullanılmıştır. Ancak, ikinci gece TDA5005'te sorun yaşanmış ve sadece bir istasyonda (WT3) kullanılabilmektedir. Bu nedenle, 4 pilyede tekrarlı gözlem yapılabilmiştir. İki farklı elektronik takeometrenin kullanıldığı pilyelerde, iki farklı oturumun ortalaması ile o pilyeye ait çekül sapma değerleri, aletsel sistematik hataların etkisi azaltılmış olarak hesaplanmıştır. Astrojeodezik

gözlemler sonucu çekül sapma verilerine ait elde edilen standart sapma değerleri (her bir oturum için); TCRM1101 için K-G ve D-B bileşenlerinde ~0.2"; TDA5005 için K-G ve D-B bileşenlerinde ise ~0.1" olarak tespit edilmiştir (Albayrak ve Hirt, 2018; Albayrak, 2020). Her bir oturumda elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise iki QDaedalus sistemine ait standart sapma değerlerinin, bu iki sisteme ait belirtilen presizyon değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Gravite veri setleri ile ilgili daha önce bahsedilen çalışma henüz tamamlanamamıştır.

b. İtalya'da QDaedalus Sistemi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Vittuari ve diğerleri (2016) tarafından, İtalya'nın Medicina (Kuzey İtalya) ve Noto (Sicilya, İtalya) şehirlerinde yer alan ve şehrin isimleriyle anılan gözlemevleri, farklı jeomorfolojik koşullar altında, üç farklı teknikle çekül sapma bileşenlerinin belirlenmesi için seçilmiştir. Medicina gözlemevi düz bir jeomorfolojiye sahip iken, Noto gözlemevi oldukça dağlık olmakla birlikte Kuzey ve Güney kısımlarında tepe yükseklikleri birkaç yüz metreyi bulmaktadır. Bu gözlemevlerindeki çekül sapma bileşenleri: (i) Leica TCA2003 temelli QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen astrojeodezik gözlemler, (ii) Yüksek presizyonlu geometrik nivelman ve GNSS ölçmeleri, (iii) Yüksek doğruluğa sahip İtalyan gravimetrik geoit modelinden (ITALGEO2005; Barzaghi, Borghi, Carrion ve Sona, 2007) elde edilmiştir.

Medicina ve Noto gözlemevlerinde, üç farklı teknik kullanılarak elde edilen çekül sapma verileri

birbirleriyle karşılaştırıldığında Vittuari ve diğerleri (2016) tarafından şu sonuçlara ulaşılmıştır:

(i) Her iki gözleminde üç teknik ile elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumludur.

(ii) İki gözleminde de K-G ve D-B çekül sapma bileşenlerine ait standart sapma değerleri, GNSS/Nivelman tekniği için 0.5" ile 0.7" arasında iken, QDaedalus gözlemleri için 0.1" ile 0.4" arasındadır. Bu sonuçlar, QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapma verilerinin presizyonunun, GNSS/Nivelman tekniğine göre biraz daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, QDaedalus ile GNSS/Nivelman tekniğine göre daha hızlı çekül sapma verisi elde edilebilmektedir.

(iii) ITALGEO2005 ile kestirilen çekül sapma verileri diğer iki teknik ile elde edilen çekül sapma verileri ile uyumludur ve gözlemlenen çekül sapma verisinin bulunmaması durumunda güvenle kullanılabilir. (iv) İki gözlemevi arasındaki jeomorfolojik farklılıklardan dolayı, Noto gözlemeviden elde edilen çekül sapma değerleri Medicina gözlemevine göre iki kat daha fazladır.

Bu sonuçlarla birlikte, Vittuari ve diğerleri (2016), QDaedalus sisteminin temininin kısıtlı olmasından, özellikle GNSS ve Nivelman ölçü aletleri gibi bir endüstrileşme veya ticarileşme olmamasından dolayı QDaedalus'un yaygın kullanılmadığını belirtmişlerdir.

Tablo 2. QDaedalus sistemi ile beş farklı ülkede gerçekleştirilen uygulamalar.

Ülke	Yer	Elektronik takeometre	Tarih	Gözlemlenen nokta sayısı	Verilerin duyarlılığı	İlgili Yayın
Almanya	TUM	TCA2003	2014	Test noktası	0.2"	Hauk ve diğerleri (2017)
		TCRM1101	2018		0.2"	Albayrak ve diğerleri (2018, 2020a)
		TDA5005	2015-18		0.2"	Albayrak ve diğerleri (2018, 2020a)
	Bavyera Böl.	TCA2003	2014	6	0.2"	Hauk ve diğerleri (2017)
	Münih Böl.	TCRM1101	2018	10	0.2"	Albayrak ve diğerleri (2020a)
	GOW	TCRM1101	2018	6	0.2"	Albayrak ve Hirt (2018)
		TDA5005		4	0.1"	
İtalya	Medicina	TCA2003	2015	1	0.1"	Vittuari ve diğerleri (2016)
	Noto			4	0.1" -0.4"	
Macaristan	Budapest	TCA2003	2016	Test noktası	0.1"	Toth ve Völgyesi (2017)
			2016-18		0.1"	Toth ve Völgyesi (2018)
Avustralya	Pert	TCA2003	2016	39	0.2"	Schack ve diğerleri (2018)
Türkiye	İTÜ	TCRM1101	2018	Test noktası	0.2"	Albayrak ve diğerleri (2019)
	İstanbul			29	0.2"	Albayrak ve diğerleri (2020a)

c. Macaristan'da QDaedalus Sistemi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Macaristan'daki astrojeodezik gözlemlerin adresi, Budapeşte şehrinin güneyinde yer alan Pistahegy istasyonu olmuştur. Bu istasyonda yapılan ilk çalışmalar, Tóth ve Völgyesi (2017) tarafından ve ilk çalışmaları da kapsayan bir diğer çalışma ise Tóth ve Völgyesi (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir. Her iki çalışmanın da odak noktası, Leica TCA1800 temelli QDaedalus ile gerçekleştirilen gözlemlerle, astronomik koordinatların elde edilebilmesinde en kritik nokta olan zenit doğrultusunun daha yüksek doğrulukla belirlenmesidir.

Tóth ve Völgyesi (2017) tarafından yapılan çalışmada her bir seri, ortalama 50 dk. olmak üzere, 33 farklı gecede bağımsız 70 oturum gerçekleştirilmiştir. Gözlemlenen bu veri seti, iki farklı ters çözüm tekniği; En Küçük Kareler Danimarka metodu ve Cauchy-Steiner ağırlıklandırma metodu ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde, M-inversiyonunu kullanan Cauchy-Steiner metodunun 70 bağımsız seride daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Bu çalışmanın neticesinde, 15–30 dakikalık bir astrojeodezik gözlem süresinde 0.1" duyarlılığa ulaşabilmenin mümkün olduğu belirtilmiştir.

Tóth ve Völgyesi (2018) tarafından ise Pistahegy istasyonunda daha önce gözlemlenen 70 seriyi de kapsayan ve 3 yıl süre zarfında gözlemlenen toplam 180 bağımsız veri seti, daha önce de kullanılan En Küçük Kareler Danimarka metodu ve Cauchy-Steiner ağırlıklandırma metodu ile analiz edilmiştir. Daha fazla verinin değerlendirildiği bu çalışmada da Cauchy-Steiner ağırlıklandırma metodunun daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca bu çalışmada, artık verilere (residual) zamansal veri analizi uygulanarak, QDaedalus sistemi ile yapılan gözlemlerde CCD kamera kalibrasyonu veya bilgisayar saat ayarında yapılabilecek bir hatanın veri setine nasıl yansıtacağı üzerinde durulmuştur.

ç. Avustralya'da QDaedalus Sistemi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Schack ve diğerleri (2018) tarafından, Avustralya'nın Batısındaki Perth şehrinde 39 nirengi noktası ile oluşturulan bir astrojeodezik geçkide QDaedalus sistemi kullanılmıştır. Bu geçkinin ilk noktası okyanus kıyısına yakın olmak üzere nokta sıklığı ~1 km ve toplam geçki uzunluğu ~38 km'dir. 39 nirengi noktasından 6 tanesinde farklı gecelerde tekrarlı gözlemler yapılarak, gözlemlerin güvenilirliği artırılmıştır. Bu

çalışmada elde edilen çekül sapma bileşenlerine ait standart sapma (K-G bileşeni için 0.17" ve D-B bileşeni için 0.23") değerlerinin, Almanya'daki çalışmalarda (bkz. Bölüm 3 ve 4.1) elde edilen değerlerle (~0.20") uyumlu olduğu görülmüştür.

Schack ve diğerleri (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın önemi ve elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

(i) Güney yarım kürede, astrojeodezik sistemlerle gözlemlenen çekül sapma verisi oldukça azdır (Hirt ve Wildermann, 2018). Bu çalışma, dijital bir sistemden yararlanılarak çekül sapma verisi elde edilen güney yarım küredeki ilk çalışmadır ve gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma verileri ~0.2" gibi yüksek bir duyarlılık ile elde edilmiştir. Ayrıca, astrojeodezik gözlemlerin güney yarım kürede yapılması nedeniyle, referans yıldız olarak Sigma Octantis kullanılarak, ilk kez QDaedalus sisteminde, Kutup yıldızı/Polaris dışında bir yıldız oryantasyon yapılmıştır.

(ii) Gözlemlenen çekül sapma bileşenleri, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) tarafından üretilen topografya bilgisi ile birlikte kullanılarak, astronomik-topografik nivelman tekniği ile quasi-jeoit yükseklik farklarına dönüştürülmüştür.

(iii) Gözlemlenen çekül sapma verisi bağımsız bir veri setidir ve bu nedenle geliştirilen ve geliştirilecek global gravite modellerinin (GGM) kalitesinin ölçülmesinde kullanılabilirler. QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapma verisi, 3 farklı GGM ve SRTM ile birleştirilen çekül sapma verileri ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan GGM'ler; Hirt ve diğerleri (2013) tarafından geliştirilen Global Gravite Modeli plus (GGMplus) ve Featherstone ve diğerleri (2011) ve (2017) tarafından geliştirilen, Avustralya gravimetrik quasi-jeoit 2009 ve 2017 (AGQG2009 ve AGQG2017) modelleridir. GGM'ler tarafından kestirilen çekül sapma bileşenlerinin, QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapma bileşenleri ile ortalama karekök (RMS) değerleri uyumludur: K-G bileşeninde ~0.5" ile ~0.9" arasında değişmekteyken, D-B bileşeninde daha iyi olmakla beraber ~0.3" dir. Bu sonuçlar, QDaedalus ile gerçekleştirilen diğer uygulama sonuçlarında bir birlik olduğunu göstermiştir.

Schack ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen bu çalışma, okyanus aşırı bir ülkede 10.000 AUD gibi oldukça az bir bütçe ile, 39 nirengi noktasından oluşan bir geçkide QDaedalus sisteminin kullanılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca bu çalışmada, gözlemlenen çekül sapma verisi bulunmayan ya da yetersiz veri bulunduran diğer kıtalarda (Asya, Afrika, Güney Amerika ve Antartika) QDaedalus sisteminin

kullanılabilirliğini ve geliştirilecek GGM'lerin kalitesinin yeni veri setleri ile değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur.

d. Türkiye'de QDaedalus Sistemi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Türkiye'de son 10 yıldır astrojeodezi çalışmalarında büyük bir atılım yaşanmıştır. Halicioğlu ve diğerleri (2016) tarafından TÜBİTAK ÇAYDAG (111Y125; Deniz, 2015) desteğiyle geliştirilen ve Türkiye'nin ilk SZKS olan Astrojeodezik Kamera Sistemi (AKS); Albayrak ve diğerleri (2019) tarafından yine TÜBİTAK ÇAYDAG (115Y237; Özlüdemir, 2018) desteğiyle modernize edilerek güncellenmiştir. Her iki çalışmada adresi İstanbul olmakla beraber, QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen çalışmalar da İstanbul'da yürütülmüştür.

Albayrak ve diğerleri (2020a) tarafından, İstanbul'daki astrojeodezik gözlemler, TCRM1101 temelli QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu sistemin TUM kontrol istasyonunda presizyonu ve Münih bölgesinde TZK2-D SZKS'ye ait astrojeodezik profilde doğruluğu belirlenmiştir (bkz. Bölüm 3). İstanbul'daki çalışmalar QDaedalus ile 7 aylık (Şubat-Ağustos, 2018) bir zaman diliminde tamamlanmıştır. Yapılan çalışmalar çok yönlü olmakla birlikte, şu şekilde özetlenebilir:

(i) AKS2 olarak yeniden isimlendirilen SZKS'nin presizyonu, İTÜ İnşaat Fakültesi'nin otoparkına tesis edilen bir nirengi noktasında 5 farklı gece yapılan tekrarlı gözlemler ile belirlenirken (0.3"), AKS2'nin doğruluğu QDaedalus sistemi ile 6 farklı gece yapılan gözlemler ile belirlenmiştir (Albayrak ve diğerleri, 2019, 2020a). QDaedalus'un, yeni geliştirilen bir astrojeodezik aletin doğruluğunu belirlemede kullanıldığı ilk çalışmadır. Bu çalışma, ilerde geliştirilecek astrojeodezik sistemlerin doğruluğunun belirlenmesinde, QDaedalus sisteminden yararlanılabileceğini göstermiştir.

(ii) İTÜ test istasyonundaki QDaedalus ile yapılan gözlemler, QDaedalus sisteminin nakliyesi sırasında bir hasar olup olmadığını tespit etmek için de kullanılmıştır. Test gözlemleri sonucu, daha önce QDaedalus ile gerçekleştirilen diğer çalışmalarda gibi sistemin presizyonu her iki çekül sapma bileşeninde $\sim 0.2''$ olarak tanımlanmıştır (Albayrak ve diğerleri, 2019, 2020a).

(iii) QDaedalus sistemi, astrojeodezik gözlemler için oluşturulan İstanbul Astrojeodezik Ağında (İAA) kullanılmıştır. Bu ağ, İstanbul GPS Nirengi Ağı (İGNA) ve İstanbul Nivelman Ağına (İNA) ortak olan ~ 1183 mevcut nirengi noktası

arasından seçilen 30 nokta ile oluşturulmuştur. İGNA'dan jeodezik koordinatlar (jeosentrik jeodezik enlem ve boylam, elipsoid yükseklik) elde edilirken, İNA'dan ortometrik yükseklik bilgisi elde edilmiştir (Ayan ve diğerleri, 2006; Albayrak, Özlüdemir, Aref ve Halicioğlu, 2020b). İGNA'ya ait noktaların kullanılmasının iki temel avantajı vardır: (a) yeni bir GPS gözlemi yapılmasına gerek olmamasından dolayı iş ve zamandan kazanç sağlanmıştır. (b) İGNA için tesis edilen pilyelerin, çivi ile tesis edilen noktalara göre daha uzun ömürlü olması sebebiyle, ilerde yapılması olası tekrar gözlemlerinde, İGNA noktalarının kullanılabilirliği ihtimali artırılmıştır. Yeni tesis edilen çivi tesisli noktaların ömürlerinin kısa olmasının sebebi, dünyanın en büyük metropollerinden biri olan İstanbul'da, sıklıkla gerçekleştirilen yol, inşaat vb. çalışmalar nedeniyle bu tip yer noktalarının tahrip ya da yok edilmesidir. Bu nedenle, İAA'yı oluşturan 30 nirengi noktasından 15'inin pilye tesisli olması öncelikli olarak tercih edilmiştir. Ayrıca, İAA'yı oluşturan 21 nirengi noktası İstanbul'un kıyı kesiminde ve 9'u kısmen dağlık alanlarda olmakla birlikte İstanbul'un iç kesiminde seçilmiştir. Son olarak, 17'si İstanbul'un Avrupa kıtasında (İTÜ test noktası dahil) ve 13'ü ise Asya kıtasında yer almaktadır.

İAA'daki astrojeodezik gözlemler, toplamda 3 farklı kampanya ile tamamlanmıştır. Birinci kampanyada (Şubat-Mayıs 2018) 24 adet nirengi noktasında gözlem yapılmıştır. İkinci ve üçüncü kampanya Haziran ve Ağustos 2018 tarihlerinde tamamlanarak, İkinci kampanyada, 4 noktada tekrarlı gözlem ve 3 yeni noktada da ilk kez gözlem yapılmıştır. Üçüncü kampanyada ise, 6 noktada tekrarlı gözlem ve 3 noktada ilk kez gözlem gerçekleştirilmiştir. İkinci kampanyanın temel amacı, ilk kampanyada QDaedalus ile gözlemlenen ve GGMplus (Hirt ve diğerleri, 2013) ile karşılaştırıldığında aralarındaki farkın çok fazla ve az olduğu noktalarda kontrol gözlemi yapmaktır. Üçüncü kampanyanın amacı ise, birinci ve ikinci kampanyalardaki gözlemleri tekrarlı gözlemler ile kontrol etmek ve İAA'ya yeni noktalar eklemektir. Üç kampanyadan elde edilen verilerin standart sapma değerleri çekül sapma bileşeninin her iki doğrultusunda da $\sim 0.2''$ olarak tanımlanmıştır.

(iv) QDaedalus ile gerçekleştirilen toplam 3 kampanya sonucu gözlemlenen çekül sapma verileri, GGMplus ve Yer Gravite Modeli 2008 (Earth Gravitational Model 2008-EGM2008; Pavlis, Holmes, Kenyon ve Factor, 2012, 2013) global gravite alan modelleri ile karşılaştırılmıştır. Bu modeller ile çekül sapma bileşenlerinin nasıl hesaplandığı Albayrak ve diğerleri (2020c)

tarafından da açıklanmıştır. QDaedalus ile gözlemlenen ve GGMplus ile kestirilen çekül sapma verileri karşılaştırıldığında İstanbul'un kıyı kesiminde seçilen 21 noktadan 15'inin K-G bileşeninde farkın 2" den fazla olduğu ve ~6" kadar ulaştığı görülmüştür. D-B bileşeninde ise sadece 3 noktada, gözlemlenen ve GGMplus ile kestirilen çekül sapma bileşenleri arasındaki fark 2" den fazladır ve bu noktalar K-G bileşeninde 2" den büyük olan noktalarla aynı noktalar. EGM2008 ile kestirilen değerler, GGMplus ile kestirilen değerlere benzer sonuçlar vermiştir ve gözlemlenen değerlerle aralarındaki fark daha önce de vurgulandığı üzere oldukça fazladır. Gözlemlenen ve GGMplus ile kestirilen çekül sapma bileşenleri arasındaki yüksek farkın daha iyi analizinin yapılabilmesi için bu iki veri seti arasındaki çekül sapma bileşenleri farkı, uydu radar altimetre ölçmeleriyle üretilen Danimarka Ulusal Uzay Merkezi (Danish National Space Center-DNSC) verilerinin de kullanıldığı bir haritada gösterilmiştir. Gözlemlenen ve kestirilen çekül sapma verileri arasındaki farkın fazla olduğu kıyı bölgelerinde DNSC verilerinin düzensiz olduğu görülmüştür.

İstanbul'da gerçekleştirilen bu çalışmanın sonuçları, Albayrak ve diğerleri (2020c) tarafından Münih bölgesinde gözlemlenen çekül sapma verilerinin GGMplus ve EGM2008 modelleri ile karşılaştırıldığı çalışma sonuçları ile de kıyaslanmıştır. Münih'te, QDaedalus ile gözlemlenen ve modellerden kestirilen veri seti arasındaki farkların, İstanbul'un iç kesimlerinde elde edilen farklarla benzer olduğu raporlanmıştır. İstanbul'un kıyı kesimlerindeki sonuçların ise EGM2008'in hesaplanmasında kullanılan uydu radar altimetre verilerinin yetersizliğinden dolayı düşük doğruluğa sahip olduğu Albayrak ve diğerleri (2020c) tarafından tekrar vurgulanmıştır.

5. GENEL BAKIŞ VE ÖNERİLER

Astrojeodezik çekül sapma verisinin elde edilmesindeki güçlük teknolojinin gelişimi ile beraber kısmen aşılmıştır. Yaklaşık son 20 yıldır astrojeodezik çalışmalarda kullanılan Sayısal Zenit Kamera Sistemlerinin (SZKS) geliştirilmesindeki zorluklar, QDaedalus sisteminin SZKS'lere alternatif olarak geliştirilmesini sağlamıştır. En çok bilinen ve kullanılan SZKS'lerin— Hannover TZK2-D ve ETH Zürih DIADEM ve CODIAC'ın—doğruluğu ~0.1" iken, QDaedalus sisteminin doğruluğu ~0.2" olarak tanımlanmaktadır. Fakat, QDaedalus'un nakliyesinin kolay yapılabilmesi, özellikle uçak kabininde taşınabilmesi nedeniyle okyanus aşırı ülkelerde gözlem yapılabilmesi (örneğin,

Avustralya'da yapılan gözlemler) ve nirengi noktasına erişimin çok zor olduğu yerlerde elde taşınabilmesi (örneğin İstanbul'da kıyı ve dağlık bölgelerde yapılan gözlemler) QDaedalus sisteminin gelecekte SZKS'lerden daha fazla kullanılabilir olmasını sağlayabilir. İTÜ test noktasında presizyonu belirlenen AKS2'nin doğruluğunun QDaedalus ile belirlenebilmesi (bkz. Bölüm 4.d), ileride geliştirilecek astrojeodezik sistemlerin doğruluğunun da QDaedalus ile belirlenebileceğini ve QDaedalus'un alternatiften daha fazlası olduğunu göstermiştir. Ayrıca, QDaedalus, SZKS'lerden farklı olarak, sadece yıldızlara gözlem yaparak astronomik enlem ve boylam belirlemek ile sınırlı kalmayarak, mühendislik ölçmeleri ve deformasyon gibi birçok jeodezik amaçlı çalışmada başarıyla kullanılmaktadır (diğer jeodezik çalışmalar için bkz. Bölüm 1).

QDaedalus ile 2014–2019 yılları arasında yürütülen astrojeodezik çalışmaların incelendiği bu makalede, Türkiye'yi de kapsayan beş farklı ülkede gerçekleştirilen çalışmalarda her bir uygulamanın amacının farklı olması sebebiyle; QDaedalus ile yapılan çalışmaların çeşitliliği ortaya konulmuştur. QDaedalus ile yapılan bu orijinal çalışmalar:

(i) Almanya'daki çalışmalar, farklı elektronik takeometreler ile bütünleştirilen QDaedalus sistemlerinin presizyonunu ve doğruluğunu belirlemeye odaklanmıştır. Ayrıca, Türkiye ve Avustralya'da gerçekleştirilen astrojeodezik gözlemlerin güvenilir olmasını mümkün kılmıştır (bkz. Bölüm 3 ve 4a; Hauk ve diğerleri, 2017; Albayrak ve Hirt, 2018; Albayrak ve diğerleri, 2020a).

(ii) İtalya'daki çalışmalar iki farklı jeomorfolojiye sahip VLBI ve GNSS ölçmelerinin sürekli yapıldığı gözlemlerinde, QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapma verisini de içeren üç farklı teknik ile elde edilen çekül sapma bileşenlerinin karşılaştırılmasını konu edinmiştir (bkz. Bölüm 4b; Vittuari ve diğerleri, 2016).

(iii) Macaristan'da yapılan çalışmalar, temel olarak QDaedalus'un doğruluğunun iyileştirilmesi üzerinedir (bkz. Bölüm 4c; Tóth ve Völgyesi, 2017, 2018).

(iv) Avustralya'daki çalışmalarda, QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapma verisine astronomik-topografik nivelman tekniği uygulanması ve quasi-jeoit yüksekliklerine dönüştürülmesi; QDaedalus gözlemlerinden elde edilen sonuçların, farklı GGM'lerden kestirilen sonuçlarla karşılaştırılarak GGM'lerin kalitesinin ölçülmesi; jeodezik

astronomi alanındaki teorik alt yapının da sunulmasını konu edindiği için literatüre oldukça önemli katkılar sağlamıştır. Ayrıca, Avustralya'daki gözlemler, Güney yarım kürede gerçekleştirilmesi bakımından da özeldir (bkz. Bölüm 4ç; Shack ve diğerleri, 2018).

(v) Türkiye'de QDaedalus ile gerçekleştirilen çalışmalarda, İstanbul'un kıyı şeridinde gözlemlenen çekül sapma verisi ile GGMplus ve EGM2008 ile kestirilen çekül sapma verisi arasındaki farkın oldukça fazla olduğu ve bunun uydu-altimetre verilerinden kaynaklandığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, Türkiye'de İTÜ tarafından geliştirilerek modernize edilen SZKS'nin doğruluğu QDaedalus ile belirlenmiştir (bkz. Bölüm 4d; Albayrak ve diğerleri, 2019, 2020a).

Yukarıda özetlenen astrojeodezik çalışmalar, QDaedalus sisteminin geliştirildiği 2014 yılından bu yana sistemin çok geniş bir ölçekte ve çok yönlü kullanıldığını göstermiştir. QDaedalus sisteminin temininin daha yaygın olması durumunda, SZKS'ler ile gerçekleştirilen astrojeodezik geoit belirleme vb. birçok farklı uygulamanın QDaedalus ile de yapılabileceği ve gerçekleştirilebilecek jeodezik amaçlı uygulamaların çeşitliliğinin ve sayısının da artacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu makalede ayrıntılı olarak anlatılan QDaedalus Sistemi, ETH Zürih Üniversitesi Jeodezi ve Jeofizik Laboratuvarı (GGL) tarafından geliştirilmiştir. 2014-2019 yılları arasında QDaedalus ile gerçekleştirilen astrojeodezik çalışmaların incelenmesinde referans kaynak olarak kullandığımız eserlerin yazarlarına teşekkür ederiz. Bu makalenin yazım sürecindeki desteklerinden dolayı, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) BİDEB 2219 Doktora Sonrası Araştırma Bus Programı'na (proje no: 1059B192000149) ve İsviçre Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) Yersel Mühendislik Enstitüsü Geomatik Mühendisliği bölümüne teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca, değerli yorum ve önerileri ile bu makalenin geliştirilmesine çok önemli katkı sağlayan Hakemlere, ayırmış oldukları zaman ve emekleri için çok teşekkür ederiz. Şekil 4'teki harita QGIS kullanılarak çizdirilmiştir (QGIS, 2020; OpenStreetMap, 2015).

ORCID

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

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

KAYNAKLAR

- Albayrak, M. ve Hirt, C. (2018). Astrogeodetic observations at Geodetic Observatory Wettzell, Report, p.43, Munich, Germany.
- Albayrak, M., Hirt, C., Guillaume, S., Hauk, M. ve Halicioglu, K. (2018, December). Testing the QDaedalus measurement system for astrogeodetic observation of the gravity field. In AGU Fall Meeting 2018, Washington DC, USA. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2018AGUFM.G51F0534A>
- Albayrak, M., Halicioglu, K., Özlüdemir, M.T., Basoglu, B., Deniz, R., Tyler, A.R.B. ve Aref, M.M. (2019). The use of the automated digital zenith camera system in Istanbul for the determination of astrogeodetic vertical deflection. *Bulletin of Geodetic Sciences*, 25(4). doi:10.1590/s1982-21702019000400025
- Albayrak, M. (2020). Assessment of global gravity models in coastal zones: A case study using astrogeodetic vertical deflections in Istanbul (PhD Thesis). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.
- Albayrak, M., Hirt, C., Guillaume, S., Halicioglu, K., Özlüdemir, M.T. ve Shum, C.K. (2020a). Quality assessment of global gravity models in coastal zones: A case study using astrogeodetic vertical deflections in Istanbul, Turkey. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 64(3), 306–329. doi:10.1007/s11200-019-0591-2
- Albayrak, M., Özlüdemir, M.T., Aref, M.M. ve Halicioglu, K. (2020b). Determination of Istanbul geoid using GNSS/levelling and valley cross levelling data. *Geodesy and Geodynamics*, 11(3), 163–173. doi:10.1016/j.geog.2020.01.003
- Albayrak, M., Zeray Öztürk, E., Bildirici, İ., Hirt, C., Guillaume, S. ve Shum, CK. (2020c). Almanya Münih Bölgesinde QDaedalus sistemi ile gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma verilerinin GGMplus ve EGM2008 ile kestirilen değerlerle karşılaştırılması. *Yerbilimleri*, 41(3), 220–246. doi: 10.17824/yerbilimleri.740141
- 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*. Istanbul Teknik Üniversitesi Rapor 2005/3123, Vol. 1, Istanbul, Turkey, s.186.

- Barzaghi, R., Borghi, A., Carrion, D. ve Sona, G. (2007). Refining the estimate of the italian quasi-geoid. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, 66, 145–160. <http://hdl.handle.net/11311/250536>
- Bürki, B. (1989). Integrale Schwerefeldbestimmung in der Ivrea-Zone und deren geophysikalische Interpretation Geodätischgeophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Nr. 40, Schweizerische Geodätische Kommission.
- Bürki, B. (2005). ICARUS, Astro-geodetic on-line observation system–User manual V.05. Geodesy and Geodynamics Lab (GGL) at ETH Zurich.
- Bürki, B., Guillaume, S., Sorber, P. ve Oesch, H.P. (2010, September). DAEDALUS: A versatile usable digital clip-on measuring system for total stations. In 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Zurich, Switzerland. doi:10.1109/IPIN.2010.5646270
- Ceylan, A. (2009). Determination of the deflection of vertical components via GPS and leveling measurement: A case study of a GPS test network in Konya, Turkey. *Scientific Research and Essays*, 4(12), 1438–1444. Erişim adresi: <https://academicjournals.org/journal/SRE/article-full-text-pdf/E6CB7F919837>
- Charalampous, E., Psimoulis, P., Guillaume, S., Spiridonakos, M., Klis, R., Bürki, B., ... Feltrin, G. (2015). Measuring sub-mm structural displacements using QDaedalus: A digital clip-on measuring system developed for total stations. *Applied Geomatics*, 7(2), 91–101. doi:10.1007/s12518-014-0150-z
- 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 in the reduction of terrestrial survey data to a geocentric datum. *Australian Surveyor*, 45(2), 46–61. (Erratum in The Australian Surveyor 47(1), 7). doi: 10.1080/00050354.2000.10558815
- Featherstone, W.E., Kirby, J.F., Hirt, C., Filmer, M.S., Claessens, S.J., Brown, N.J., ... Johnston, G.M. (2011). The AUSGeoid09 model of the Australian height datum. *Journal of Geodesy*, 85(3), 133–150. doi:10.1007/s00190-010-0422-2
- Featherstone, W.E., McCubbin, J.C., Brown, N.J., Claessens, S.J., Filmer, M.S. ve Kirby, J.F. (2017). The first Australian gravimetric quasigeoid model with location-specific uncertainty estimates. *Journal of Geodesy*, 92(2), 149–168. doi:10.1007/s00190-017-1053-7
- Fricke, W., Schwan, H., Lederle, T., Bastian, U., Bien, R., Burkhardt, G., ... Röser, S. (1988). Fifth fundamental catalogue (FK5). part 1. the basic fundamental stars. *VeARI*. 32, 1–106.
- Gates, M., Zotti, G., Wolf, A. ve Gerdes, B. (2016). *Stellarium: User Guide*. Samurai Media Limited.
- Geosystems, L. (2004). *GeoCOM Reference Manual*. Heerbrugg, Switzerland.
- Gessler, J. (1975). Entwicklung und Erprobung einer transportablen Zenitkamera für astronomisch-geodätische Ortsbestimmungen. *Wiss. Arb. Lehrst. für Geod., Phot. und Kart. Techn. Univ. Hannover* Nr. 60.
- Guillaume, S., Bürki, B., Griffet, S. ve Durand, H.M. (2012, May). QDaedalus: Augmentation of total stations by CCD sensor for automated contactless high-precision metrology. In FIG Working Week, Rome, Italy. Erişim adresi: http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2012/papers/ts09i/TS09i_guillaume_buerki_et_al_6002.pdf
- Guillaume, S. (2015). *Determination of a precise gravity field for the CLIC feasibility studies* (PhD Thesis). Dissertation Nr. 22590, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zurich, Switzerland. doi:10.3929/ethz-a-010549038
- Guillaume, S., Clerc, J. ve Bürki, B. (2015). *QDaedalus digital clip-on measuring system for total station user manual*. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Geodesy and Geodynamics Laboratory, ETH Zurich, Switzerland.

- Guillaume, S., Clerc, J., Leyder, C., Ray, J. ve Kistler, M. (2016, March). Contribution of the image-assisted theodolite system QDaedalus to geodetic static and dynamic deformation monitoring. In 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Vienna, Austria. Erişim adresi: http://www.fig.net/resources/proceedings/2016/2016_03_jisdms_pdf/nonreviewed/JISDM_2016_submission_66.pdf
- Halıcıoğlu, K. (2015). *Sayısal zenit kamera sistemi ile astro-jeodezik çekül sapmalarının belirlenmesi* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Halıcıoğlu, 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), 914–23. doi:10.1080/17538947.2016.1189612
- 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
- Hirt, C. (2004). *Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamarasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung* (PhD Thesis). Wissen. Arb. Fach. Vermessungswesen Univ. Hannover Nr. 253. Erişim adresi: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh04/393223965.pdf>
- Hirt, C. (2006). Monitoring and analysis of anomalous refraction using a digital zenith camera system. *Astronomy ve Astrophysics*, 459(1), 283–90. doi: 10.1051/0004-6361:20065485
- Hirt, C. ve Bürki, B. (2006). Status of Geodetic Astronomy at the Beginning of the 21st Century. In: Festschrift Univ.- Prof. Dr.- Ing. Prof. h.c. Günter Seeber anlässlich seines 65. Geburtstages und der Verabschiedung in den Ruhestand, (Hirt C., Ed.), Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Hannover 258, 81–99. Erişim adresi: http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/ERTM2160/pdf/Hirt_Buerki2006_status_geodetic_astronomy.pdf
- 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. (2010). Prediction of vertical deflections from high-degree spherical harmonic synthesis and residual terrain model data. *Journal of Geodesy*, 84(3), 179–90. doi:10.1007/s00190-009-0354-x
- Hirt, C., Bürki, B., Somieski, A. ve Seeber, G. (2010a). 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., Guillaume, S., Wisbar, A., Bürki, B. ve Sternberg, H. (2010b). Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D21). doi:10.1029/2010JD014067
- Hirt, C., Schmitz, M., Feldmann-Westendorff, U., Wübbena, G., Jahn, C.H. ve Seeber, G. (2011). Mutual validation of GNSS height measurements and high-precision geometric-astronomical leveling. *GPS Solutions*, 15(2), 149–59. doi:10.1007/s10291-010-0179-3
- Hirt, C. (2012). Anomalous atmospheric refraction and comments on 'fast and accurate determination of astronomical coordinates...' (Balodimos et al., 2003. *Survey Review*, 37(290): 269–75). *Survey Review*, 44(327), 285–9. doi:10.1179/175227012X13455477714906
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R. ve Rexer, M. (2013). New ultrahigh-resolution 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
- 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

- Klūgel, T., Māhler, S. ve Schade, C. (2011). Ground survey and local ties at the Geodetic Observatory Wettzell. In 17th Workshop on Laser Ranging, Bad Kōtzting, Germany.
- Knoblach, S. (2009). Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines kameraunterstūtzten Hāngetchymeters (PhD Thesis). Techn. Univ. Dresden, Dresden, Gemany.
- OpenStreetMap contributors. (2015). Planet dump [Data file from December, 2020 of database dump]. Retrieved from <https://planet.openstreetmap.org>
- Özlūdemir, M.T. (2015). *Astro-jeodezik ve GNSS/Nivelman verilerinin entegrasyonu ile yerel geoid modellemesi*. TUBITAK 1001 Projesi Sonuē Raporu (No: 115Y237), Ankara, Tūrkiye.
- 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
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. ve Factor, J.K. (2013). Correction to "The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)" *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(5), 26-33. doi:10.1002/jgrb.50167
- Pick, M., Picha, J. ve Vyskoēil, V. (1973). Theory of earth's gravity field. Amsterdam, London, New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- QGIS Development Team, (2020). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Schack, P., Hirt, C., Hauk, M., Featherstone, W.E., Lyon, T.J. ve Guillaume, S. (2018). A high-precision digital astrogeodetic traverse in an area of steep geoid gradients close to the coast of Perth, Western Australia. *Journal of Geodesy*, 92(10), 1143–53. doi:10.1007/s00190-017-1107-x
- Seeber, G. (2003). Satellite Geodesy. 2nd edition. Berlin: Walter de Gruyter.
- Sigl, R. (1991). Geodātische Astronomie. Wichmann, 4. Auflage.
- Smith, D.A., Holmes, S.A., Li, X., Guillaume, S., Wang, Y.M., Būrki, B., ... Damiani, T.M. (2013). Confirming regional 1 cm differential geoid accuracy from airborne gravimetry: the geoid slope validation survey of 2011. *Journal of Geodesy*, 87(10–12), 885–907. doi:10.1007/s00190-013-0653-0
- Soler, T., Carlson, Jr A.E. ve Evans, A.G. (1989). Determination of vertical deflections using the Global Positioning System and geodetic levelling. *Geophysical Research Letters*, 16(7), 695–698.
- Somieski, A.E. (2008). Astrogeodetic geoid and isostatic considerations in the North Aegean Sea, Greece (PhD Thesis). ETH Zurich, Switzerland. doi:10.3929/ethz-a-005710420
- Torge, W. ve Mūller, J. (2012). Geodesy. 4th edition. Berlin: De Gruyter.
- Tōth, G. ve Vōlgyesi, L. (2017). Data processing of QDaedalus measurements. *Geosciences and Engineering*, 5(8), 147–64. Eriēim adresi: http://volgyesi.hotserver.hu/gravity/miskolc_2016.pdf
- Tōth, G. ve Vōlgyesi, L. (2018). Experiences of QDaedalus measurements. *Geosciences and Engineering*, 6(9), 75–86.
- Tūren, Y. ve Ūstūn, A. (2013, Mayıs) Astrojeodezik ēekūl Sapması Bileēenlerinin ve Jeoit Yūkseklk Farklarının Kern DKM3A ile Belirlenmesi: Konya Őrneēi. TMMOB Harita ve Kadastro Mūhendisleri Odası, 14. Tūrkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
- u-blox AG (2015). NEO-6T/LEA-6T product summary
- van Westrum, D., Ahlgren, K., Hirt, C. ve Guillaume, S. (2021). A Geoid Slope Validation Survey (2017) in the rugged terrain of Colorado, USA. *Journal of Geodesy*, 95(1), 1-19. doi:10.1007/s00190-020-01463-8
- Vittuari, L., Tini, M.A., Sarti, P., Serantoni, E., Borghi, A., Negusini, M. ve Guillaume, S. (2016). A comparative study of the applied methods for estimating deflection of the vertical in terrestrial geodetic measurements. *Sensors*, 16(4), 565. doi:10.3390/s16040565

- Volařík, T., Machotka, R., Kuruc, M., Puchrik, L. ve Jurčík, J. (2013). Determination of quasigeoid in local network using modern astrogeodetic technologies. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 10(172), 437–442.
- Wang, Y.M., Becker, C., Mader, G., Martin, D., Li, X., Jiang, T., ... Bürki, B. (2017). The Geoid slope validation survey 2014 and GRAV-D airborne gravity enhanced geoid comparison results in Iowa. *Journal of Geodesy*, 91(10), 1261–1276. doi:10.1007/s00190-017-1022-1
- Wielen, R., Schwan, H., Dettbarn, C., Lenhardt, H., Jahreiss, H. ve Jährling, R. (1999). Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6). Part I. Basic fundamental stars with direct solutions. Veröffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg, Germany.
- Wiesenhofer, B. ve Kühtreiber, N. (2007). Combination of Deflections of the Vertical and Gravity Anomalies in Difficult Geological Regions, A Case Study. In Proceedings 1st International Symposium of the IGFS "Gravity Field of the Earth", *Harita Dergisi*, Özel sayı 18:108–12.
- Willi, D. ve Guillaume, S. (2019). Calibration of a Six-Axis Robot for GNSS Antenna Phase Center Estimation. *Journal of Surveying Engineering*, 145(4), 04019016. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000291
- Wissel, H. (1982). *Zur Leistungsfähigkeit von transportablen zenitkameras bei der lotabweichungsbestimmung*. Wissen. Arb. Fach. Vermessungswesen Univ. Hannover Nr. 107.

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 (ingilizce 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 cümleinin 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 cümleinin 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

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.

Vanícek, 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.

(MAKALE ÖRNEĞİ)

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX (Makale Başlığı-Türkçe)

(XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX Xxx) (Makale Başlığı- İngilizce)

(1 satır boşluk)

Xxxx XXXX (Yazar ismi)

XXXXX XXXX XXXX, XXXXX XXXXX (Adres)

xxxxxxxx@xxxxxx (e-posta)

(1 satır boşluk)

0.5 cm
0.5 cm
0.5 cm

ÖZ
(1 satır boşluk)

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX; XXXXX XXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

(1 satır boşluk)

Anahtar Kelimeler: XXXXXXXX XXXXX XXXXXXX XXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXX XXXXXXX

(1 satır boşluk)

ABSTRACT

(1 satır boşluk)

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX. XXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXX XXXX.

(1 satır boşluk)

Keywords: XXXXXXXX XXXXXXX XXXXXXX XXXXXXX XXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXX.

(1 satır boşluk)

1. GİRİŞ

(1 satır boşluk)

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXX XX
XXXX XXXXX /1/.

(1 satır boşluk)

a. XXXXX XXXXXXX XXXXXXXXXXX XXXXXXX XXXXX
XXXX XXXX XXXXXXX XXXX XXXXXXX XXXX XXXX XXXX

(1 nci düzey alt bölüm)

(1 satır boşluk)

XXXXXXXXXX
(1) XXXXXXX XXX XXXX XXXXXXXXXXX XXXXXXX
XXXX XXXXX XXXXX XXXX.

(2 nci düzey alt bölüm)

(1 satır boşluk)

2. XXXXX XXXXX XXXX (Ana bölüm başlığı)

(1 satır boşluk)

a. XXXXXXXXXXX XXXXXXX XXXXX XXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXX

(1 inci düzey alt bölüm başlığı)

(1 satır boşluk)

XXXXXXXX XXX XXXXXXXXXXXXXXX XXX XXXXXXX
XXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX.

(1 nci düzey alt bölüm 1 inci paragraf)

(1 satır boşluk)

(1) XXXXX XXXXXXX XXXXXXX XXXX XXXXXXX
XXXXXXXX XXXXXXX

(2 nci düzey alt bölüm başlığı)

(1 satır boşluk)

XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXX
XXXXXXXXXXXX XXXX XXXXXXX XXXXXXXXXXX XXXXXXX.

(2 nci düzey alt bölüm 1 nci paragraf)

(1 satır boşluk)

(a) XXXXX XXXXXXX XXXXXXX XXXX

(3 üncü düzey alt bölüm başlığı)

(1 satır boşluk)

XXXX XXXXX XXXXXXX XXXXX XXXXXXX

XXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXX

XXXXXXXX XXXXXXX XXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXX XXXXXXX

XXXXXXXX XXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXX XXXXX XXXX XXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX.

(1 satır boşluk)

(b) XXXXX XXXXXXX XXXXXXX XXXX

(3 üncü düzey alt bölüm başlığı)

(1 satır boşluk)

XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXX

XXXXXXXX XXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXX XXXXXXX XXXXXXX

XXXXXXXX XXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXX XXXXX XXXX XXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXX XXXXX XXXX XXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

(1 satır boşluk)

(I) XXXXX XXXXXXX XXXXXXX XXXX

XXXX XXXXX XXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXX

(4 üncü düzey alt bölüm başlığı)

(1 satır boşluk)

XXXXXXXXXXXX XXXXXXX XXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXX

XXXXXXXX XXXXXXX XXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXX XXXXXXX

XXXXXXXX XXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXX XXXXX XXXX XXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

(1 satır boşluk)

(aa) XXXXX XXXXXXX XXXXXXX

(5 inci düzey alt bölüm başlığı)

(1 satır boşluk)

XXXXXXXXXXXX XXXXXXX XXXXXXX XXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXX XXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXX XXXXXXX XXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXX

XXXXX XXXX XXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXX.

(1 satır boşluk)

b. XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXX

(1 inci düzey alt bölüm başlığı)

(1 satır boşluk)

XXXXXXXX XXX XXXXXXXXXXXXXXX XXX XXXXXXX

XXXXX XXXXXXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX.

(1 nci düzey alt bölüm 1 inci paragraf)

0.5 cm

3 cm

2 cm

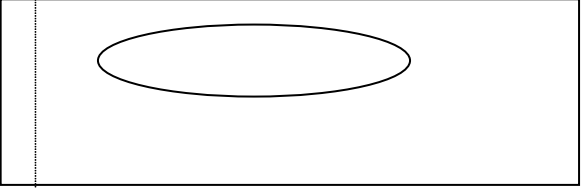
xx

3 cm

1.25 cm

(MAKALE ÖRNEĞİ)

(1)	Xxxxx XXXXX XXXXX XXXXXXXXXXXX.
(2 nci düzey alt bölüm başlığı)	
(1 satır boşluk)	
Xxxxxxxxx xxxxx xxxxxx xXXXXXXXXX	
xxxx xxxxxx xxxxxxxx xxxxx xxxxxx.	
(2 nci düzey alt bölüm 1 nci paragraf)	
(1 satır boşluk)	
(a) Xxxxx XXXXX XXXXX XXXX	
(3 üncü düzey alt bölüm başlığı)	
(1 satır boşluk)	
Xxxxxxxxx xxxxxxxx xxxxxxxx	
xxxx xxxxxx xxxxxxxx xxxxxxxx xxxxxxxx	
xxxxxxxxxxx xxxxxxxx xxxxx xxxxxxx xxxxxxxx	
xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxx	
xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx	
xxxxxxxxxxx xxxxx xxxxxxx xxxxxxx xxxxxxxx	
xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxx	
xxxxxx xxxxx xxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx	
xxxxxxxxxxx x xxxxxxxxxx.	
(1 satır boşluk)	
(b) Xxxxx XXXXX XXXXX XXXX	
(3 üncü düzey alt bölüm başlığı)	
(1 satır boşluk)	
Xxxxxxxxx xxxxx xxxxxx xxxxxxx	
xxxxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxxx	
xxxxxxxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxx xxxxxxx	
xxxxxxxxxxx xxxxxx xxxxxxx xxxxxx xxxxxxx	
xxxx xxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx	
xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxx xxxxxx	
xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxx xxxxxxxxxx x	
xxxxxx xxxxxxx xxxxxx xxxxxx.	
(1 satır boşluk)	
(l) Xxxxx XXXXX XXXXX XXXX	
(4 üncü düzey alt bölüm başlığı)	
(1 satır boşluk)	
Xxxx xxxxx xxx xxxxxxx xxxxxx	
xxxxxxxx xxxxx xxxxxxxxxx xxxxxx xxxxxxx	
xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxx xxxxxxx	
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxx xxxxxx	
xxxxxxxx xxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxx	
xxxxxxxx xxxxxx xxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxx	
xxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx	
xxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx xxxxxxxxxx	
xxxxxxxxxxx xxxxx xxxxxxx xxxxxxxxxx xxx xxxx.	
(1 satır boşluk)	
Tablo 1. Xxxx xxxxxxx xxxxxxx xxxxxx	
(1 satır boşluk)	
Xxxxxxxx xxxxxx xxxxx xxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxx	
xxxxxxx xxxxxx xxxxxxx xxxxxxx xxxxxxx xxxxxxxxxxx	
xxxxxx xxx xxxxxx xxxxxx xxxxxxx.	
(1 satır boşluk)	
$KOH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i - X_{i(RASAT)}}{n}}$	(1)
(1 satır boşluk)	

Xxxxxxxx xxxxx xxxxx xxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxx	
xxxxxxx xxxxxxx xxxxxxx xxxxxxx xxxxxxx xxxxxxxxxxx	
xxxxxx xxx xxxxxx xxxxxx .	
(1 satır boşluk)	
	
(1 satır boşluk)	
Şekil 1. Xxxxxxxx xxxxx xxxxxxxxxxx xxxxxxx	
(1 satır boşluk)	
Xxxxxxxx xxxxxxx xxxxxx xxxxxxx xxxxxx xxxxxxxx	
xxxxxxx xxxxxxx xxxxx xx xxxxxx	
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxx	
xxxxx.	
(1 satır boşluk)	
3. SONUÇ	
(1 satır boşluk)	
Xxxxx xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	
xxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxx xxxxxxx xxxxxx xxxxxx.	
(1 satır boşluk)	
KAYNAKLAR	
(1 satır boşluk)	
Sürelî Yayınlar:	
Yazar, A. A., Yazar, B. B. ve Yazar, C. C. (Yıl).	
Yazının başlığı. <i>Sürelî Yayının Başlığı</i> , Cilt, s-.	
s. doi:xx.xxxxxxxx (veya Erişim Adresi:)	
Kitap:	
Yazar, A. A. (Yıl). <i>Eserin başlığı</i> . Yer: Yayıncı.	
Yazar, A. A. (Yıl). <i>Eserin başlığı</i> . Erişim adresi:	
http://www.xxxxxxxx	
Yazar, A. A. (Yıl). <i>Eserin başlığı</i> .	
doi:xxxxxxxxxxx	
Editor, A. A. (Ed.). (Yıl). <i>Eserin başlığı</i> . Yer:	
Yayıncı.	
Yazar, A. A. ve Yazar, B. B. (Yıl). <i>Bölüm ya da</i>	
<i>giriş başlığı</i> . 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). <i>Doktora ya da yüksek lisans</i>	
<i>tezinin başlığı</i> (Yüksek lisans tezi/Doktora	
tezi). ... veri tabanından erişildi (Erişim ya da	
Sipariş No.).	
Yazar, A. A. (Yıl). <i>Doktora ya da yüksek lisans</i>	
<i>tezinin başlığı</i> (Yayımlanmamış doktora	
tezi/yüksek lisans tezi). Kurum adı, Yer bilgisi.	
Teknik raporlar ve araştırma raporları:	
Yazar, A. A. (Yıl). <i>Çalışmanın başlığı</i> (Rapor No.	
xxx). Yer bilgisi: Yayıncı.	
Toplantı ve sempozyumlar:	
Sunan, A. A. (Yıl, Ay). <i>Bildiri ya da poster başlığı</i> .	
Kuruluş Adının toplantısında sunulan bildiri ya	
da poster, Yer bilgisi.	

